

دستور کار آزمایشگاه فیزیک پایه ۲

تجربه
سیمی

آشنایی با اصول اولیه یک آزمایش

فهرست

- ۱- اهمیت و مفهوم خطا و خطای تخمینی یک کمیت..... ۲
- ۱-۱ عدم امکان اندازه گیری دقیق کمیت و تعریف خطا..... ۲
- ۲-۱ خطای تخمینی یک کمیت بیانگر چیست؟..... ۲
- ۳-۱ خطای نسبی و درصد خطای نسبی..... ۲
- ۲- خطای وسایل اندازه گیری..... ۳
- ۱-۲ وسایل اندازه گیری مدرج..... ۳
- ۲-۲ وسایل اندازه گیری دیجیتال..... ۳
- ۳-۲ دیگر خطاهای وسایل اندازه گیری..... ۴
- ۳- انواع خطاها و عوامل موثر در ایجاد آنها..... ۴
- ۱-۳ اندازه گیری متعدد یک کمیت و مفهوم خطای کاتوره ای و سیستماتیک..... ۴
- ۲-۳ خطاهای کاتوره ای (تصادفی)..... ۵
- ۳-۳ خطاهای سیستماتیک (ذاتی)..... ۵
- ۴- کمیات اولیه..... ۶
- ۱-۴ مقدار مناسب کمیت..... ۶
- ۲-۴ مفهوم پراکندگی..... ۶
- ۵- کمیات ثانویه..... ۹
- ۱-۵ محاسبه خطا در توابع یک متغیره..... ۱۰
- ۲-۵ محاسبه خطا در توابع چند متغیره..... ۱۰
- ۶- مفهوم ارقام معنادار به عنوان روشی سردستی برای محاسبه خطای کمیات ثانویه..... ۱۲
- ۱-۶ قوانین حاکم بر ارقام معنادار..... ۱۲
- ۲-۶ چند نکته مهم..... ۱۳
- ۷- نمودار..... ۱۴
- ۱-۷ بخشهای مختلف یک نمودار..... ۱۴
- ۲-۷ بهترین خط عبوری و روش کمترین مربعات..... ۱۷
- ۸- قواعد نوشتن گزارش کار..... ۱۷
- ۹- کار با نرم افزار Excel..... ۱۷
- ۱-۹ گرفتن اطلاعات آماری از مجموعه ای از مقادیر..... ۱۷
- ۲-۹ رسم نمودار..... ۱۹
- ۳-۹ بعضی کارهای محاسباتی..... ۲۱
- مراجع..... ۲۱

۱- اهمیت و مفهوم خطا و خطای تخمینی یک کمیت

۱-۱ عدم امکان اندازه گیری دقیق کمیت و تعریف خطا

اندازه گیری دقیق یک کمیت فاقد معناست زیرا عوامل زیادی مانع رسیدن ما به مقدار واقعی کمیت می باشد که حذف همه آنها به طور کامل ممکن نیست. بعضی از این عوامل عبارتند از :

۱- وسایل اندازه گیری کمیات

۲- شخص آزمایشگر

۳- عوامل پیچیده و متغیر محیط

خطای یک کمیت = مقدار/اندازه گیری شده - مقدار واقعی آن کمیت $\varepsilon = x - X$

با اینکه اندازه گیری دقیق یک کمیت امکان ندارد اما داشتن تخمینی از خطای یک کمیت اهمیت خاصی دارد. شاید برسید چرا تخمینی از خطا؟ چون داشتن دقیق خطای یک کمیت معادل داشتن دقیق آن کمیت است .

۱-۲ خطای تخمینی یک کمیت بیانگر چیست؟

خطای تخمینی یک کمیت بیان می کند که تا چه اندازه می توان به مقدار کمیت داده شده اطمینان پیدا کرد. مثال: طول یک میز ۱۲۰ سانتی متر و خطای تخمینی آن ۵ سانتی متر گزارش داده شده است که آن را به این صورت

می نویسیم: $120 \pm 5 \text{ cm}$.

تعبیر اولیه این عبارت این است که طول واقعی میز عددی بین ۱۱۵ و ۱۲۵ سانتی متر (۱۲۰-۵، ۱۲۰+۵) می باشد اما معنی دقیق تر آن می گوید طول واقعی میز به احتمال حدود ۶۸ درصد بین ۱۱۵ و ۱۲۵ سانتی متر و به احتمال حدود ۹۵ درصد بین ۱۱۰ و ۱۳۰ سانتی متر (۱۲۰-۲*۵، ۱۲۰+۲*۵) می باشد که در ۴-۲ به آن خواهیم پرداخت یعنی حداکثر چیزی که خطای تخمینی یک کمیت بیان می کند این است که مقدار واقعی کمیت با احتمال معینی در داخل گستره ای در اطراف مقدار گزارش داده شده می باشد.

مثال: فرض کنید کمیتی از ۱/۲۴ به ۱/۳۵ تغییر کند. اگر خطای این اعداد حدود ۰/۰۱ باشد این تغییر مهم است ولی اگر خطای آنها در حدود ۰/۱ باشد این تغییرات اهمیتی ندارد.

اصولا کم کردن خطاهای موجود در یک آزمایش همیشه کار ساده ای نیست. به این خاطر اگر آزمایشی برای مقاصد خاصی انجام می شود باید ببینیم به چه دقتی احتیاج است تا دچار زحمت مضاعف و بیهوده نشویم.

۱-۳ خطای نسبی و درصد خطای نسبی

حال با دو تعریف جدید آشنا می شویم:

خطای نسبی (انحراف نسبی)

$$\frac{x - X}{X} \cong \frac{x - X}{x} = \frac{\varepsilon}{x}$$

درصد خطای نسبی (درصد انحراف)

$$100 \times \frac{\varepsilon}{x}$$

۲- خطای وسایل اندازه گیری

ما با وسایل اندازه گیری گوناگونی در کارهای آزمایشگاهی روبرو هستیم مثل خط کش، کولیس، ریز سنج، زمان سنج، نیرو سنج، ترازو، دماسنج و ... که بعضی از آنها هم به صورت دیجیتال (رقمی) هستند. هدف از این بخش این است که بدانیم هر وسیله اندازه گیری تا چه دقتی مقدار کمیت مورد نظر را به دست می‌دهد همچنین با بعضی نکات در مورد خواندن درست کمیات آشنا می‌شویم.

۲-۱ وسایل اندازه گیری مدرج

گروهی از وسایل اندازه گیری دارای قسمتی مدرج هستند که باید با چشم خوانده شوند مثل خط کش، کولیس، ریزسنج، ترازو و نکته اول در خواندن کمیت در این وسایل این است که راستای چشم عمود بر صفحه مدرج باشد

و اما خطای این وسایل:

یک قانون سردستی می‌گوید که خطای آنها نصف کوچکترین درجه بندی موجود است.

مثال: خواسته شده با خط کشی عرض یک میز اندازه گرفته شود. یک طرف میز روی صفر خط کش و طرف دیگر خط کش بین $58/2$ و $58/3$ سانتی متر می افتد یعنی عرض میز باید عددی بین این دو عدد باشد پس طول میز برابر $58.25 \pm 0.05 \text{ cm}$ است.

خب احتمالا باید متوجه شده باشید که این قانون سردستی از کجا آمده است البته اگر شاخص وسیله به یک درجه در روی صفحه مدرج خیلی نزدیک باشد می‌توانیم خطا را باز کاهش دهیم مثلا ربع کوچکترین درجه بندی.

خطایی که برای وسایل اندازه گیری مدرج وجود دارد از دو جا ناشی می‌شود:

- ۱- از خود دستگاه : هر دستگاهی دقتی دارد که در محدوده همان دقت می‌توان به آن اعتماد کرد
- ۲- از خود شخص اندازه گیر: وقتی شاخص وسیله بین دو درجه بندی است و بین آنها درجه بندی وجود ندارد تشخیص مقدار این که شاخص در چه کسری از فاصله دو درجه بندی قرار دارد با چشم مشکل است و بالطبع تولید خطا می‌کند حال ممکن است وسیله ای نسبتا دقیق مدرج شده باشد اما خطای چشم مانع از رسیدن به دقت واقعی دستگاه باشد. استفاده از ورنیه (همان چیزی که در کولیس به کار رفته است) ابتکار زیبایی برای رفع این مشکل است.

۲-۲ وسایل اندازه گیری دیجیتال

این وسایل صفحه ای دارند که کمیت مورد نظر را به صورت یک عدد تحویل می‌دهند. در رقم آخر این وسایل ابهامی وجود دارد پس با یک حساب سردستی می‌توان خطای آنها را برابر کوچکترین مقداری که می‌توانند نشان دهند قرار داد.

مثال: اختلاف پتانسیل یک باطری را با یک مولتی متر دیجیتالی ۱/۲۵ ولت می‌خوانیم در نتیجه خطای آن برابر ۰/۰۱ ولت می‌باشد. $1.25 \pm 0.01V$

ممکن است دقت وسیله بیش از عددی باشد که نشان می‌دهد و عدد نشان داده شده عددی گرد شده از عددی دقیقتر باشد در این حالت خطای کمیت نصف کوچکترین مقدار است در ضمن ممکن است خطای وسیله روی آن نوشته شده باشد. حالتی که خطای وسیله بیشتر از کوچکترین مقدار باشد غیر استاندارد ولی ممکن است.

۲-۳ دیگر خطاهای وسایل اندازه‌گیری

تا حالا فرض می‌شد وسایلی که با آنها کار می‌کنیم در حد درجه بندی خود عدد درستی را نشان می‌دهند اما همیشه این گونه نیست و اکثر اوقات هم مجبور به تعویض وسیله هستیم ولی گاهی اوقات می‌توان با کمی اصلاح عدد درست را از وسیله گرفت. یک نمونه آن خطای صفر است. فرض کنید با نیروسنجی می‌خواهید وزن یک جسم را پیدا کنید. وقتی نیرو سنج را قائم نگه می‌دارید بدون آنکه جسم را به آن متصل کرده باشید نیروسنج به شما عددی غیر صفر می‌دهد این همان خطای صفر است. در این حالت خاص شما عدد را یادداشت می‌کنید و از عددی که در موقع وصل کردن جسم مورد نظر خوانده اید کم می‌کنید. در بعضی وسایل اندازه‌گیری امکاناتی وجود دارد که صفر دستگاه را تنظیم کنید مثل ترازوهای یک کفه‌ای.

۳- انواع خطاها و عوامل موثر در ایجاد آنها

۳-۱/ اندازه‌گیری متعدد یک کمیت و مفهوم خطای کاتوره‌ای و سیستماتیک

خطاها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- خطاهای کاتوره‌ای (تصادفی)

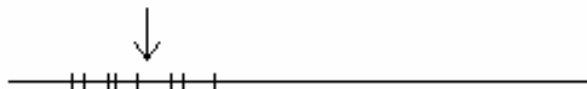
۲- خطاهای سیستماتیک (ذاتی)

کمیتی را چند بار اندازه‌گیری می‌کنیم و اعداد به دست آمده را روی یک محور مشخص می‌کنیم.

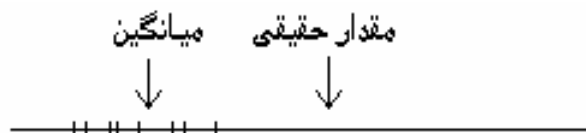


پراکندگی که در روی محور دیده می‌شود ناشی از خطاهای کاتوره‌ای (تصادفی) موجود می‌باشد. اگر خطاهای موجود در اندازه‌گیری فقط از نوع خطاهای کاتوره‌ای باشند نتایج اندازه‌گیریهای متوالی در اطراف مقدار حقیقی کمیت مورد نظر گسترده می‌شوند. طبق تعریف خطاهای کاتوره‌ای خطاهایی هستند که احتمال مثبت یا منفی بودن آنها مساوی است پس معقول به نظر می‌رسد که میانگین این اعداد تقریب خوبی از مقدار واقعی کمیت باشد و هرچه تعداد اندازه‌گیری‌ها افزایش پیدا کند به مقدار واقعی نزدیک تر شود.

مقدار حقیقی



همانطور که گفته شد در حضور خطاهای کاتوره‌ای به تنهایی نقطه میانگین اعداد به دست آمده تقریب خوبی از مقدار حقیقی کمیت مورد نظر می‌باشد. اثر خطاهای سیستماتیک موجود این است که یک جابجایی از مقدار واقعی در میانگین اعداد به وجود می‌آورد.



تشخیص و رفع خطاهای سیستماتیک در حالت کلی کار نسبتاً مشکلی است و معمولاً وقتی یک کمیت از طریق آزمایشهای مختلف به دست می‌آید قابل تشخیص است اما کار با خطاهای کاتوره ای و تشخیص درست کمیت نسبتاً ساده است* چون اگر در آزمایشی خطاهای کاتوره ای بزرگی وجود داشته باشند، به صورت یک مقدار بزرگ در خطای نهایی آشکار خواهند شد ولی حضور ناپیدای یک خطای سیستماتیک ممکن است به ارائه یک نتیجه ظاهراً معتبر همراه با یک خطای تخمینی کوچک منجر شود که در واقع اشتباهی جدی است برای مثال به مقداری که میلیکان برای بار الکترون به دست آورده است توجه کرده و با مقدار کنونی آن مقایسه کنید:

$$\text{مقدار میلیکان: } (1.591 \pm 0.002) \times 10^{-19} C$$

$$\text{مقدار کنونی: } (1.602189 \pm 0.000005) \times 10^{-19} C$$

اکنون به حاد بودن چنین خطاهایی پی می‌برید که حتی بهترین آزمایشگران هم از آن در امان نبودند در واقع خطاهای سیستماتیک را باید یکی یکی کشف و حذف کرد. این کار قاعده کلی ندارد و با تجربه زیاد به دست می‌آید.

۳-۲ خطاهای کاتوره ای (تصادفی)

اصولاً تمام عوامل موجود که تاثیر آنها مستقل از کمیات موجود در آزمایش است می‌توانند تولید خطای کاتوره ای کنند. به همین علت پراکندگی در غیاب خطاهای سیستماتیک حول مقدار واقعی نسبتاً یکنواخت است یا به عبارتی دیگر احتمال مثبت یا منفی بودن این خطا یکی است. تغییرات دما، رطوبت، جریانات جوی، تغییرات جریانات برق، خود شخص اندازه گیر می‌توانند عامل تولید خطای کاتوره ای باشند. فرض کنید زمان تناوب یک آونگ را چندین بار با یک کرنومتر اندازه گرفته ایم. خطاهای حاصل در به کار انداختن کرنومتر و توقف آن و بی نظمیهای کوچک در حرکت آونگ تغییراتی در نتایج اندازه گیری متوالی به وجود می‌آورند که می‌توان آنها را به عنوان خطاهای کاتوره ای در نظر گرفت.

۳-۳ خطاهای سیستماتیک (ذاتی)

خطاهای سیستماتیک معمولاً موقعی پیش می‌آیند که واقعیت آزمایش از مفروضات نظری تعدی می‌کند و از ضریب تصحیحی که این تفاوت را اعمال کند چشم پوشی می‌شود.

چند مثال از خطاهای ذاتی

- ۱- معیوب بودن وسیله اندازه گیری: ساده ترین نوع آن خطای صفر می‌باشد، کرنومتری که کمی کند کار می‌کند، ولت سنجی که محور عقربه آن دقیقاً در مرکز صفحه مدرجش نباشد (در اینجا یک خطای ذاتی تناوبی وجود دارد).
- ۲- اندازه گیری ارتفاع یک مایع در لوله وقتی از یک مقیاس متصل به لوله استفاده می‌کنیم و لوله دقیقاً قائم نباشد: در این حالت خطای ذاتی مثبت است و با افزایش ارتفاع زیاد می‌شود.

* در قسمت ۴ به کمک مفاهیم آماری به این موضوع پرداخته خواهد شد.

۳- اندازه گیری شتاب جاذبه زمین به وسیله یک سطح شیبدار که دارای اصطکاک می باشد ولی وجود آن فرض نشده باشد.

۴- کمیات اولیه : یافتن مقدار مناسب و خطای تخمینی از روی اندازه گیریهای متعدد یک کمیت

۴-۰ تعریف کمیات اولیه و ثانویه

مفهوم کمیت اولیه و ثانویه یک مفهوم من درآوردی ولی مفید می باشد.

کمیت اولیه: کمیتی که مستقیماً از روی وسیله اندازه گیری خوانده می شود مثل طول یک میز، اختلاف پتانسیل دو سر یک باطری و زمان سقوط یک گلوله فلزی از یک ارتفاع مشخص.

کمیت ثانویه: این نوع کمیت مستقیماً از روی وسیله اندازه گیری خوانده نمی شود بلکه توسط تابعی به کمیات اولیه و ثانویه دیگر ربط پیدا می کند مثل چگالی یک جسم که از روی تقسیم جرم بر حجم جسم به دست می آید. در این حالت جرم جسم می تواند کمیت اولیه (توسط ترازو) یا ثانویه (g / وزن) (توسط نیرو سنج) باشد. همین طور حجم می تواند کمیت اولیه (با حجم مایع جابجا شده مثل آب در یک استوانه مدرج) یا ثانویه (حجم = طول * عرض * ارتفاع) (توسط خط کش یا کولیس) اگر مکعبی شکل باشد) باشد.

۴-۱ مقدار مناسب کمیت

در اینجا روی خطاهای کاتوره ای معطوف تمرکز کرده و فرض می کنیم خطاهای سیستماتیک وجود ندارد*. برای به دست آوردن درست یک کمیت چند بار باید اندازه گیری انجام شود. اعداد به دست آمده را x_1, x_2, \dots, x_N می نامیم. هدف نهایی در این قسمت دو چیز است:

- ۱- یافتن مقدار مناسب کمیت از روی اعداد موجود
- ۲- یافتن خطای تخمینی این مقدار از روی اعداد موجود

جواب قسمت اول همانطور که قبلاً اشاره کرده بودیم میانگین این اعداد می باشد.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}$$

حال به دنبال جواب قسمت دوم می گردیم.

۴-۲ مفهوم پراکندگی

* خطاهای سیستماتیک فقط انتقالی در مقدار به دست آمده از کمیت به وجود می آورند.

در آزمایشی زمان سقوط یک توپ کوچک از یک ارتفاع معین ($90.4 \pm 0.05 \text{ cm}$) چندین بار اندازه گیری شده است و اعداد زیر به دست آمده است:

t (s)	0.34	0.41	0.37	0.41	0.42	0.89	0.37	0.49	0.43	0.40	0.41	0.47
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



در بین این اعداد، عددی که مشخص شده است خیلی پرت به نظر می‌رسد و می‌توان با ملاحظاتی آن را حذف کرد. جالب است بدانید در این آزمایش خاص علت اینکه این عدد به دست آمده این است که کرنومتر توسط آزمایشگر صفر نشده و این عدد در واقع مجموع دو نتیجه متوالی می‌باشد.

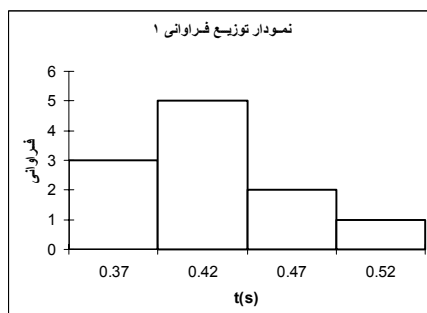
حال ما ۱۱ عدد داریم (0.89 را دور انداختیم). میانگین اینها یعنی مقدار مناسب کمیت برابر است با:

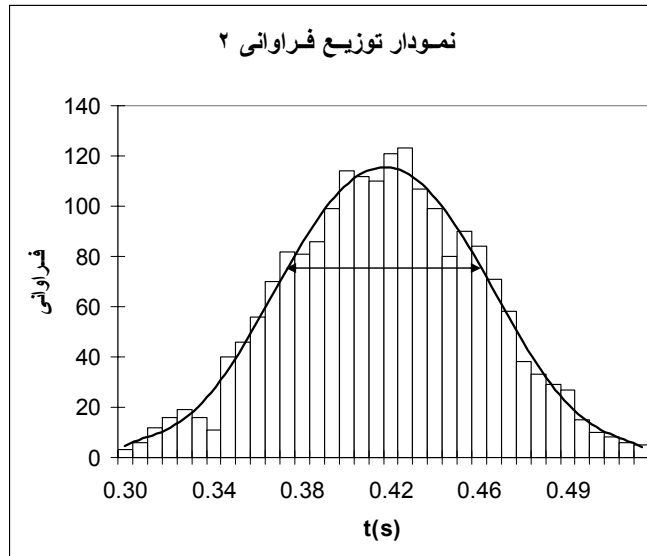
$$\frac{0.34 + 0.41 + \dots + 0.47}{11} = 0.41 \text{ s}$$

اکنون چهار بازه مساوی متوالی تعریف کرده و تعداد اعدادی که در هر بازه هستند را شمرده و در جدولی یادداشت می‌کنیم.

بازه ها (s)	توزیع اعداد (فراوانی)
$0.32 - 0.37$	۳
$0.37 - 0.42$	۵
$0.42 - 0.47$	۲
$\overline{R/\Delta} - 0.52$	۱

همان طور که می‌بینید چون تعداد اندازه گیریها کم بوده است (در اینجا یازده تا) طول بازه ها طوری انتخاب شده اند که دارای تعداد فراوانی معقولی باشند. در نمودار توزیع فراوانی ۱، این فراوانی ها را به تصویر کشیده است. حال فرض کنید تعداد اندازه گیریهای افزایش پیدا کنند مثلاً به دو هزار بار برسند. اکنون نمودار توزیع فراوانی ۲، فراوانی این اندازه گیریها را نشان می‌دهد.





در اینجا طول بازه ها ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است (طول بازه ها نباید کمتر از خطای وسیله اندازه گیری باشد) که می توان این مقدار را با طول ۰/۰۵ برای نمودار ۱ مقایسه کرد.

اگر اندازه گیریهایمان را باز ادامه دهیم به توزیعی هموار می‌رسیم که در نمودار توزیع فراوانی ۲ مشخص شده است. این توزیع هموار با تقریب خوبی یک توزیع گاوسی می‌باشد البته چون تعداد اندازه گیریها به بینهایت میل می‌کند از مفهوم فراوانی نسبی (به جای فراوانی) که عبارت است از فراوانی هر بازه تقسیم بر تعداد کل اندازه گیریها، استفاده می‌شود.

یعنی توزیع یا تابع گاوسی یک توزیع فراوانی نسبی می‌باشد و به همین علت مساحت زیر نمودار آن برابر ۱ می‌باشد.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

$f(x)$ تابع گاوسی می‌باشد و منظور از منفی و مثبت بینهایت جمع روی همه اعداد می‌باشد. این تابع در واقع یک تابع احتمال است و $f(x)dx$ بیان کننده احتمال وجود نتیجه یک اندازه گیری در بازه x تا $x+dx$ می‌باشد. این تابع یک تابع متقارن حول $x = X$ می‌باشد که ماکزیمم مقدار آن هم در همین نقطه می‌باشد (X مقدار واقعی کمیت است). میانگین اعداد اندازه گیری شده وقتی اندازه گیریها به سمت بینهایت میل کند برابر X می‌شود. این

تابع به شکل $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}}$ می‌باشد. این تابع دو نقطه بحرانی در نقاط $x = X - \sigma$ و

$x = X + \sigma$ دارد که پیکان دوسر موجود در نمودار ۲ این نقاط بحرانی و بازه بین آنها را مشخص می‌کند. σ (سیگما) معیار خوبی برای بیان پراکندگی حول میانگین دسته ای از اعداد (در اینجا مقادیر اندازه گیری شده) می‌باشد به روابط زیر توجه کنید:

$$\int_{X-2\sigma}^{X+2\sigma} f(x) dx \approx 0.95 \quad \text{و} \quad \int_{X-\sigma}^{X+\sigma} f(x) dx \approx 0.68$$

این روابط بیان می‌کند که هر اندازه گیری به احتمال حدود ۶۸ درصد در بازه $\bar{x} - \sigma$ تا $\bar{x} + \sigma$ و به احتمال حدود ۹۵ درصد در بازه $\bar{x} - 2\sigma$ تا $\bar{x} + 2\sigma$ می‌باشد. σ را انحراف معیار، انحراف استاندارد* یا خطای معیار

* Standard Deviation

در یک تک مشاهده می‌نامیم. علت نامگذاری خطای معیار در یک تک مشاهده این است که σ خطای تخمینی هر اندازه گیری به تنهایی را از مقدار واقعی کمیت به ما می‌دهد اما چیزی که مطلوب ماست خطای تخمینی میانگین اندازه گیریهای معدود ما از مقدار واقعی کمیت می‌باشد.

کمیتی N بار اندازه گیری شده است. می‌توانیم فرض کنیم که ما مجموعه بزرگی از تعداد بسیار زیادی اندازه گیری داریم و آن را M می‌نامیم و این N اندازه گیری یک زیرمجموعه N عضوی از مجموعه M می‌باشد. σ در واقع خطای معیار اعضای مجموعه M که هر کدام یک اندازه گیری می‌باشد را نشان می‌دهد. حال ما مجموعه جدیدی به نام M' می‌سازیم که اعضای آن میانگین زیرمجموعه های N عضوی از مجموعه M می‌باشد. انحراف استاندارد یا خطای معیار این مجموعه را σ_m^* می‌نامیم که به آن خطای استاندارد یا خطای معیار میانگین می‌گویند. این در واقع آن چیزی است که ما به دنبال آن بودیم. σ_m می‌تواند خطای تخمینی خوبی برای میانگین مقادیر اندازه گیری شده می‌باشد.

تعاریف کلی σ و σ_m به شرح زیر می‌باشد:

$$\sigma^2 = \langle \varepsilon^2 \rangle = \langle (x - X)^2 \rangle$$

که علامت $\langle \rangle$ به معنی متوسط گیری می‌باشد بین تمامی مقادیر موجود داخل آن می‌باشد که در اینجا بین همه مقادیرهای اندازه گیری شده X (اعضای مجموعه M) است.

$$\sigma_m^2 = \langle (\bar{x} - X)^2 \rangle$$

در اینجا متوسط گیری بین همه اعضای مجموعه M' می‌باشد.

ثابت می‌شود که $\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ و $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N-1}}$ و از آنجا نتیجه می‌شود که

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$$

در این روابط x_n ، n امین مقدار اندازه گیری شده از بین N اندازه گیری انجام شده است. در صورتی که N کمتر

از ۱۳ تا باشد می‌توان σ_m را از رابطه ساده تر $\sigma_m = \frac{r}{N}$ که r تفاوت بین کمترین و بیشترین مقدار در بین x_n

ها می‌باشد، به دست آورد*. ما به هدفمان در این فصل رسیدیم σ_m خطای تخمینی یک کمیت اولیه می‌باشد. این

کمیت را در نهایت بدین صورت می‌نویسیم: $\bar{x} \pm \sigma_m$

حال به سراغ مثال اول این بخش برمی‌گردیم:

$$\bar{x} = \frac{0.34 + 0.41 + \dots + 0.47}{11} \approx 0.41s$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{(0.34 - 0.41)^2 + (0.41 - 0.41)^2 + \dots + (0.47 - 0.41)^2}{11(11+1)}} \approx 0.013s$$

* Standard Error

* برای اثبات این روابط به مرجع (۱) فصل ۳ مراجعه کنید.

$$\sigma_m = \frac{0.49 - 0.34}{11} \approx 0.014s \approx 0.013s$$

مقدار نهایی به صورت $0.41 \pm 0.013s$ یا $0.41 \pm 0.01s$ نوشته می شود.

نکته مهم: خطای وسیله اندازه گیری (در اینجا کرنومتر) برابر $0.01s$ می باشد و چون این خطا کمتر از $\sigma_m \approx 0.013s$ است مشکلی پیش نمی آید اما اگر در آزمایشی σ_m کوچکتر از خطای وسیله اندازه گیری کمیت مورد نظر بود به جای σ_m از خطای وسیله اندازه گیری استفاده می کنیم برای مثال اگر $\sigma_m = 0.006s$ باشد آنگاه نتیجه به جای $0.41 \pm 0.006s$ برابر $0.41 \pm 0.01s$ است.

$$\frac{|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|}{N}$$

انحراف میانگین: تعریفی است که ممکن است استفاده شود.

۵- کمیات ثانویه: اندازه گیری مقدار مناسب و خطای تخمینی از روی کمیات اولیه و ثانویه مرتبط

کمیت ثانویه ما توسط تابعی به کمیات اولیه و ثانویه دیگر ربط پیدا می کند یعنی $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$. در اینجا y کمیت ثانویه مورد نظر ما (کمیت وابسته) و x_1, x_2, \dots, x_N کمیات اولیه و ثانویه مرتبط (کمیات مستقل) می باشند که خطاهای تخمینی آنها برابر $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N$ است. هدف نهایی این قسمت دو چیز است:

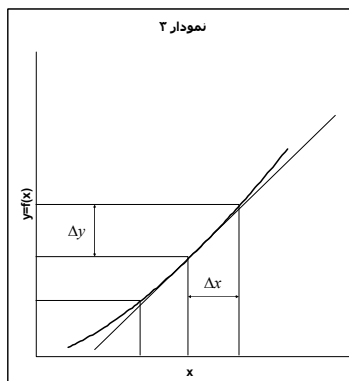
۱- یافتن مقدار مناسب کمیت از روی کمیات مستقل

۲- یافتن خطای تخمینی این مقدار (Δy) از روی کمیات مستقل

جواب قسمت ۱ ساده است کافیت مقادیر مختلف x_1, x_2, \dots, x_N را در تابع f قرار دهیم تا مقدار مناسب کمیت به دست آید. $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$

۵-۱ محاسبه خطا در توابع یک متغیره

ما حالتی در نظر می گیریم که تابع f تابعی از یک کمیت باشد یعنی $y = f(x)$.



همان طور که در نمودار ۳ دیده می شود وقتی x به اندازه Δx تغییر کند y به اندازه Δy تغییر می کند.

* اینها در واقع σ_m کمیات x_1, x_2, \dots, x_N می باشند.

به خط مماس در نقطه x توجه کنید. شیب این خط طبق تعریف برابر مشتق تابع f در نقطه x می باشد که به صورت $\frac{df}{dx}$ می نویسند. اگر Δx کوچک باشد همانطور که از روی شکل دیده می شود Δy از رابطه $\Delta y \approx \frac{df}{dx} \Delta x$ به دست می آید.

چند مثال:

$$y = ax + b \Rightarrow \frac{dy}{dx} = a \Rightarrow \Delta y = a \Delta x$$

$$y = x^n \Rightarrow \frac{dy}{dx} = nx^{n-1} \Rightarrow \Delta y = nx^{n-1} \Delta x \Rightarrow \Delta y = \frac{n}{x} y \Delta x \Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = n \frac{\Delta x}{x}$$

$$y = \ln x \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{1}{x} \Rightarrow \Delta y = \frac{\Delta x}{x}$$

$$y = e^x \Rightarrow \frac{dy}{dx} = e^x \Rightarrow \Delta y = e^x \Delta x \Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = \Delta x$$

۲-۵ محاسبه خطا در توابع چند متغیره

در اینجا f تابعی از چند کمیت می باشد $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$. مقدار Δy در اینجا بدون اثبات آمده است *

$$(\Delta y)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} \Delta x_N\right)^2 = (\Delta y_1)^2 + (\Delta y_2)^2 + \dots + (\Delta y_N)^2$$

$\frac{\partial f}{\partial x_n}$ به مشتق جزئی تابع f نسبت به x_n معروف است یعنی مشتق تابع f نسبت به کمیت مستقل x_n می باشد وقتی فرض کنیم دیگر کمیات تغییری نمی کند. Δy_n هم بیان کننده تغییرات تابع f نسبت به کمیت x_n می باشد وقتی x_n به اندازه Δx_n تغییر کند و دیگر کمیات مستقل تغییری نکنند.

چند مثال مهم:

$$y = x_1 + x_2 \Rightarrow (\Delta y)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2$$

$$y = x_1 - x_2 \Rightarrow (\Delta y)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2$$

$$y = x_1 \times x_2 \Rightarrow \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2$$

$$y = \frac{x_1}{x_2} \Rightarrow \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2$$

محاسبه مستقیم Δy_n :

$$\Delta y_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n + \Delta x_n, \dots, x_N) - f(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N)$$

یا

$$\Delta y_n = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n + \Delta x_n, \dots, x_N) - f(x_1, x_2, \dots, x_n - \Delta x_n, \dots, x_N)}{2}$$

به کمک این روش دیگر احتیاجی به مشتق گیری ندارید (البته معادل آن است).

مثال:

* برای دیدن اثبات به مرجع (۱) فصل ۳ مراجعه کنید.

$$y = f(x_1, x_2) = \frac{\sin(x_1 + x_2)}{\cos(x_2)} \Rightarrow \Delta y_1 = \frac{\sin(x_1 + \Delta x_1 + x_2)}{\cos(x_2)} - y, \Delta y_2 = \frac{\sin(x_1 + x_2 + \Delta x_2)}{\cos(x_2 + \Delta x_2)} - y$$

$$(\Delta y)^2 = (\Delta y_1)^2 + (\Delta y_2)^2$$

حال به آزمایش اشاره شده در ابتدای ۴-۲ بر می گردیم. توپ از ارتفاع $h = 90.4 \pm 0.05 \text{ cm}$ رها می شود و پس از

$t = 0.41 \pm 0.01 \text{ s}$ ثانیه به زمین می رسد هدف، مقدار و خطای g می باشد.

$$h = \frac{1}{2} g t^2 \Rightarrow g = \frac{2h}{t^2} \Rightarrow \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 = \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 \Rightarrow \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 = \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2$$

$$g = \frac{2 \times 90.4 \text{ cm}}{(0.41 \text{ s})^2} = 1.07 \times 10^3 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = 10.7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{0.05 \text{ cm}}{90.4 \text{ cm}}\right)^2 + 4\left(\frac{0.01 \text{ s}}{0.41 \text{ s}}\right)^2} \approx \sqrt{4\left(\frac{0.01 \text{ s}}{0.41 \text{ s}}\right)^2} \approx 0.05 \Rightarrow \Delta g \approx 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

پس نتیجه آزمایش به صورت $10.7 \pm 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ می باشد. همانطور که می بینید آزمایش بسیار بد انجام شده است و نتیجه اصلا خوب نیست چون علاوه بر خطای کاتوره ای زیاد خطای سیستماتیک قابل ملاحظه ای دارد چون مقدار مقدار واقعی g در بازه آن قرار نمی گیرد*.

در اینجا بیشترین خطای موثر در خطای نهایی خطای زمان سقوط یعنی Δt می باشد علت هم کم بودن t و در نتیجه بزرگ بودن خطای نسبی $\frac{\Delta t}{t}$ می باشد. شاید حالا متوجه شده باشید چرا گالیله از سطح شیبدار برای محاسبه g استفاده کرد چون با این کار زمان t افزایش پیدا می کند البته وجود اصطکاک در آزمایش سطح شیبدار معضل بزرگی است. امروزه برای اندازه گیری دقیق g از زمان سنج های بسیار دقیق استفاده می کنند*. آونگ کاتر هم مقدار دقیقی را نتیجه می دهد.

۶- مفهوم ارقام معنادار به عنوان روشی سردستی برای محاسبه خطای کمیات ثانویه

در عمل محاسبه خطای کمیات ثانویه از روی روابط بخش ۵-۲ ممکن است خسته کننده باشد. در اینجا می خواهیم با یک مفهوم رایج یعنی ارقام معنادار و قوانینی که بر آن حاکم است آشنا شویم. برای آنکه دقت کمیتی را بیان کنیم به همراه مقدار کمیت خطای آن را هم می نویسیم $x \pm \Delta x$ اما با به کار بردن مفهوم ارقام معنادار دقت یک کمیت در مقدار بیان شده آن مستتر است برای مثال وقتی می گوئیم که وزن یک توپ 1 gr ۲۳۵ است به خطای آن که برابر 1 gr می باشد هم اشاره کرده ایم به عبارتی وزن توپ $235 \pm 1 \text{ gr}$ می باشد.

چند مثال:

* جمله ای زیبا از لانسلاط هاگین : پژوهشگرانی که با تجربه سر و کار دارند آمار را به عنوان عذری برای انجام آزمایشهای بد تلقی نمی کنند

از مرجع (۲)

* فصل ۷ بخش ۴ مرجع (۱) به تحلیل آزمایشی برای اندازه گیری دقیق g تا ۷ رقم اعشار می پردازد .

$$3.25s \rightarrow \text{سه رقم معنادار} \rightarrow 3.25 \pm 0.01s$$

$$3.0gr \rightarrow \text{دو رقم معنادار} \rightarrow 3.0 \pm 0.1gr$$

$$0.042A \rightarrow \text{دو رقم معنادار (صفرهای قبل از ۴۲ ارقام معنادار محسوب نمی شوند)} \rightarrow 0.042 \pm 0.001A$$

$$4.2 \times 10^{-2} A = 42mA \text{ (عدد نویسی علمی)}$$

$$30cm \rightarrow \text{یک رقم معنادار (قرارداد مرجع (۳) فصل ۱)} \rightarrow 30 \pm 10cm \rightarrow 3 \times 10^1 cm$$

$$30.cm \rightarrow \text{دو رقم معنادار (قرارداد مرجع (۳) فصل ۱)} \rightarrow 30 \pm 1cm \rightarrow 3.0 \times 10^1 cm$$

این دو شیوه نوشتن اصلاً توصیه نشده است و بهتر است به دو شکل سمت راست نوشته شود تا گیج کننده نباشد.

۶-۱ قوانین حاکم بر ارقام معنادار

همان طور که می بینید در مفهوم ارقام معنادار خطای هر کمیت توانی از ۱۰ می باشد یا در واقع به این شکل ساده شده است. این ساده سازی قوانین ساده ای را به دنبال خواهد داشت.

قانون ۱: تعداد رقمهای اعشار مجموع یا تفاوت دو کمیت برابر تعداد رقمهای اعشار کمیتی است که کمترین رقم اعشار را دارد.

مثال:

$$22.0cm + 35cm = 57cm$$

$$42.1s + 2.12s = 44.2s$$

$$12.6gr - 2gr = 11gr \text{ در اینجا } ۱۰/۶ \text{ به } ۱۱ \text{ گرد شده است}$$

اثبات:

از بخش ۵-۲ داشتیم:

$$y = x_1 + x_2 \Rightarrow (\Delta y)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2$$

$$y = x_1 - x_2 \Rightarrow (\Delta y)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2$$

Δx_1 و Δx_2 یا مساوی اند یا حداقل به اندازه ضریب ۱۰ با هم تفاوت دارند (فرض می کنیم $\Delta x_1 > \Delta x_2$ یعنی x_1

کمیتی است که رقم اعشاری کمتری دارد) که در حالت اول $\Delta y = \sqrt{2}\Delta x_1 \approx \Delta x_1$ و در حالت دوم Δx_2 قابل

صرف نظر است $(\Delta x_1)^2 \geq 100(\Delta x_2)^2$ که نتیجه می شود $\Delta y = \Delta x_1$ یعنی قانون ۱.

قانون ۲: تعداد ارقام معنادار حاصلضرب یا نسبت دو کمیت برابر تعداد ارقام معنادار کمیتی است که کمترین ارقام معنادار را داراست.

مثال:

$$5.1cm \times 2.42cm = 12cm$$

$$\frac{5m}{24s} = 0.2 \frac{m}{s}$$

اثبات: از بخش ۵-۲ داشتیم:

$$y = x_1 \times x_2 \Rightarrow \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2$$

$$y = \frac{x_1}{x_2} \Rightarrow \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2$$

فرض کنید $x_1 = 2.35s$ در نتیجه $\frac{\Delta x_1}{x_1} = \frac{0.01s}{2.35s} \approx 10^{-2}$ در واقع می‌خواهیم بیان کنیم که در حالت کلی

$\frac{\Delta x}{x} \approx 10^{N-1}$ که N تعداد ارقام معنادار کمیت x می‌باشد حال اگر فرض کنیم $\Delta x_1 > \Delta x_2$ با همان استدلال

اثبات قبلی ثابت می‌شود که $\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{x_1}$ یعنی قانون ۲.

۶-۲ چند نکته مهم

۱- در محاسبات طولانی شامل چندین جمع و تفریق و ضرب و تقسیم محاسبات را به طور کامل انجام می‌دهیم و قوانین را روی نتیجه نهایی اعمال کرده و در صورت لزوم گرد می‌کنیم.

مثال: محاسبه زیر با ماشین حساب $2197/4145 \dots$ به دست آمده که به مقداری که می‌بینید گرد شده است.

$$\frac{161.032s + 5.6s + 32.45s}{2.12kg} \times 23.4m = 2.20 \times 10^3 \frac{m.s}{kg}$$

۲- بعضی اعداد در محاسبات دقت کامل دارند مثل $\frac{1}{2}$ در معادله $h = \frac{1}{2}gt^2$ که یک مقدار تجربی نمی‌باشد. با آنها

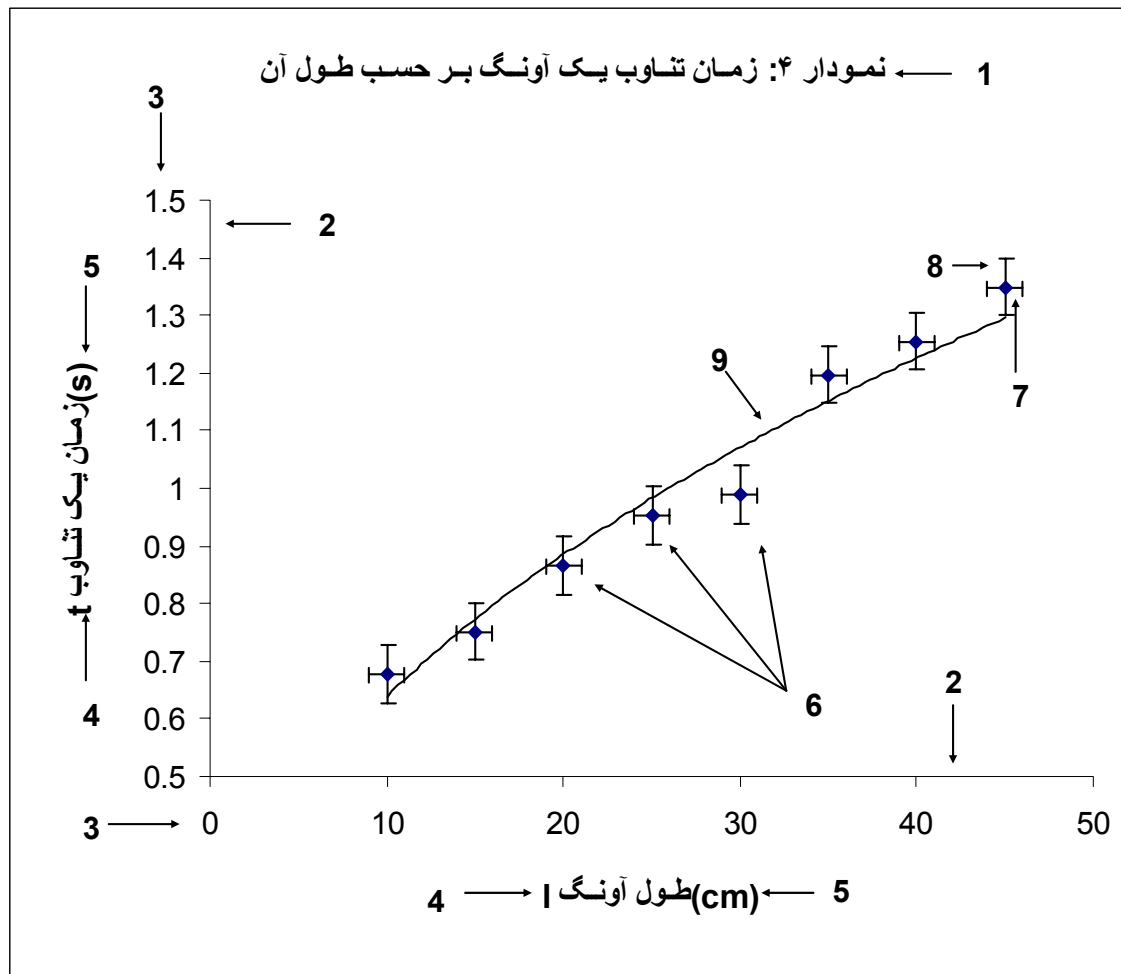
طوری برخورد می‌شود گویا تعداد ارقام معنا دار آن بینهایت است مثلاً در اینجا $\frac{1}{2} = 0.500000 \dots$

۷- نمودار

ضرب المثلی چینی با این مضمون وجود دارد که "کاری که یک تصویر می‌کند هزار صفحه نوشته نمی‌کند". نمودار نمایش دهنده رابطه یک کمیت وابسته با یک یا دو کمیت مستقل است که در حالت اول نمودار دوبعدی و در حالت دوم سه بعدی می‌باشد*. طبق یک بینش فلسفی، یک کل، اطلاعات بیشتری از مجموع اطلاعات اجزاء آن دارد منظور اینکه یک نمودار به عنوان یک کل نمایش دهنده کمیات، اطلاعاتی را به ما می‌دهد که اگر مقادیر کمیات را در جدولی می‌نوشتیم نمی‌توانستیم به دست آوریم. دیدن رفتارهای کلی کمیات در مقادیر مختلف مثل انتقال فازها، رفتارهای آشوبناک، خطی و غیرخطی بودن و ... در نمودارها کار متداولی است. به کمک نمودارها همچنین می‌توان روابط بین کمیات را در محدوده های مختلف حدس زد. حال ببینیم یک نمودار از چه بخشهایی تشکیل شده است.

۷-۱ بخشهای مختلف یک نمودار

* ما در اینجا فقط با نمودارهای دو بعدی کار می‌کنیم. تعمیم مطالب این بخش به نمودارهای سه بعدی کار ساده ای است.



این نمودار رابطه دوره تناوب یک آونگ را بر حسب طول آن به نمایش می‌گذارد. این نمودار حاصل جدول زیر است:

طول آونگ l(cm)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵
$\pm 1cm$								
زمان یک تناوب t(s)	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۸۷	۰/۹۵	۰/۹۹	۱/۲۰	۱/۲۶	۱/۳۴
$\pm 0.05s$								

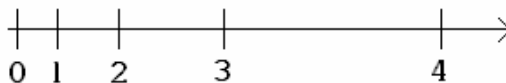
یک نمودار نشان دهنده رابطه یک کمیت وابسته با یک کمیت مستقل است $y = f(x)$. حال به قسمتهای مختلف نمودار ۴ می‌پردازیم:

۱- عنوان: شامل شماره نمودار و توضیحی در مورد آن است.

۲- محورها: محور افقی متعلق به کمیت مستقل x و محور عمودی متعلق به کمیت وابسته $y = f(x)$ می‌باشد.

۳- درجه بندی محورها: هر محور باید دارای مبدا و مدرج باشد البته ممکن است مبدا آن در نمودار قرار نگیرد مثل محور عمودی همین نمودار. مکان مبدا و درجه بندی محورها باید به گونه ای باشد که نقاط نمودار(داده های آزمایش) قسمت اعظم نمودار را اشغال کند تا اطلاعات دقیق تری را از آنها بتوان گرفت. یک نکته قابل توجه این

است که ما عادت کرده ایم که فاصله بصری درجات یک محور از هم یکی باشد اما این کار هیچ لزومی ندارد شکل زیر نمونه ای از این تخطی می باشد:



حال چه لزومی دارد از این خرق عاداتها صورت بگیرد؟ کمی صبر کنید دلیلش را خواهید فهمید.

۴- نام کمیت متعلق به هر محور

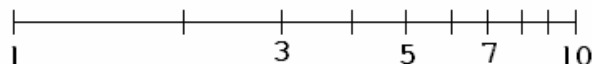
۵- واحد هر کمیت

۶- داده های تجربی ما

۷ و ۸- خطوط خطا: این خطوط خطای هر مقدار را نمایش می دهد. ۷ خطای کمیت مستقل و ۸ خطای کمیت وابسته می باشد و اندازه آنها دو برابر اندازه خطای هر مقدار می باشد. رسم این خطوط همیشه لزومی ندارد اما برای تعیین معادلات حاکم بر نمودار سودمند هستند.

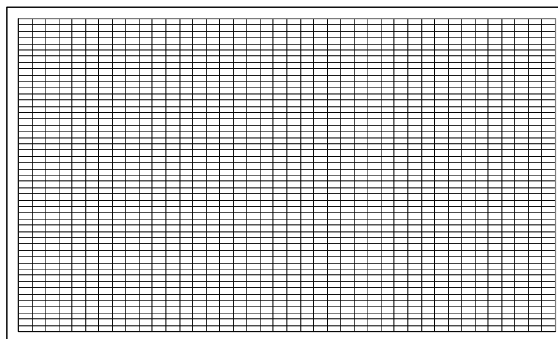
۹- بهترین منحنی یا تابع عبوری: این منحنی یک منحنی هموار است که از میان نقاط نمودار عبور داده شده است و بهترین تابعی است که می توان برای این کمیات در محدوده مشخص حدس زد.

حال برمی گردیم به سوالی که چند خط پیش مطرح شد. جواب این است که آزمایشگران دوست دارند نمودارهایشان خطی باشد یا حداقل از لحاظ بصری به شکل خط باشد اما مشکل اینست که همه نمودارها خطی نیستند. می توان کلکی زد و درجه بندی محورها را طوری دستکاری کرد تا نمودار حاصل ظاهراً به شکل یک خط درآید. راستش را بخواهید این کلک به ندرت سودمند می باشد ولی برای تابع هایی که به شکل $y = ae^{bx}$ و $y = ax^b$ می باشد کارآیی خوبی دارد اما چگونه؟ ما یک محور بدین شکل می سازیم که فاصله بصری هر دو عدد متناسب با تفاضل لگاریتم آنها می باشد به این محور، محور لگاریتمی گفته می شود.

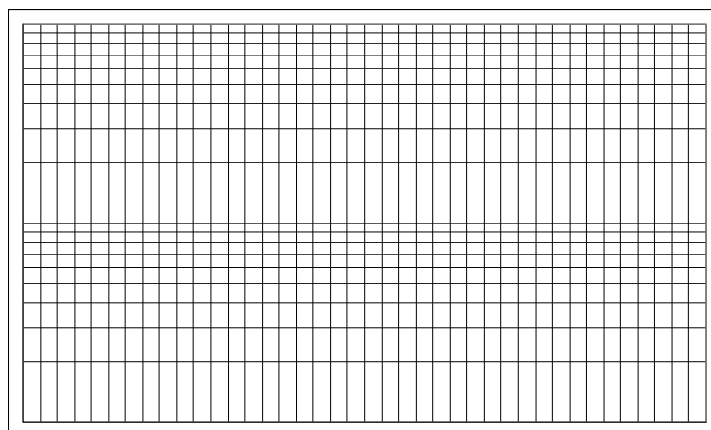


اگر در نمودار هر دو محور لگاریتمی باشد به آن نمودار تمام لگاریتمی گفته می شود و توابع به شکل $y = ax^b$ در آن خطی دیده می شوند و اگر فقط محوری لگاریتمی باشد به آن نمودار نیم لگاریتمی گفته می شود و توابع به شکل $y = ae^{bx}$ خطی دیده می شوند. دو نوع کاغذ رسم برای رسم این نمودارها وجود دارد به نام کاغذ لگاریتمی و کاغذ نیم لگاریتمی. کاغذ میلیمتری هم برای رسم منحنیهای معمولی می باشد.

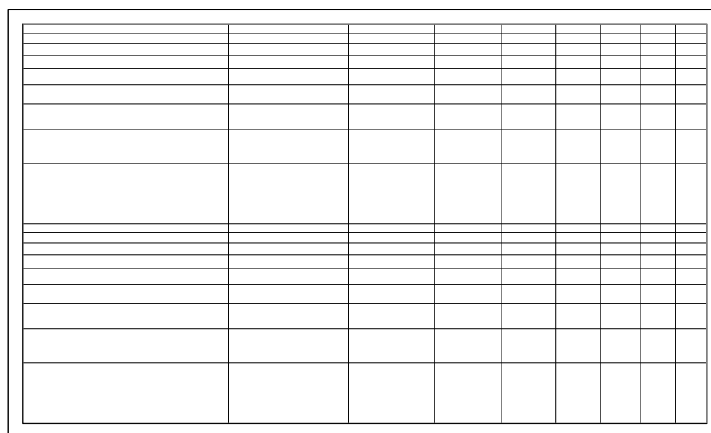
کاغذ میلیمتری



کاغذ نیم لگاریتمی



کاغذ تمام لگاریتمی



۲-۷ بهترین خط عبوری و روش کمترین مربعات

در نمودارهایی که خط نسبتاً راستی می‌توان از میان نقاط آن عبور داد شیب و عرض از مبدا کمیت‌های مهمی هستند.

مثال: در آزمایش آونگ رابطه روبرو برقرار است: $t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow t^2 = \frac{4\pi^2}{g}l$

پس انتظار می‌رود از روی شیب نمودار t^2 بر حسب l یعنی $\frac{4\pi^2}{g}$ بتوان مقدار g را حساب کرد.

به کمک معادلات زیر از روی مجموعه مختصات نقاط موجود آزمایش یعنی (x_i, y_i) (که x_i ، y_i کمیت مستقل و y_i کمیت وابسته مرتبط می‌باشد) می‌توان شیب بهترین خط عبوری (a)، خطای آن (Δa)، عرض از مبدا (b) و خطای آن (Δb) را محاسبه کرد:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})y_i}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, b = \bar{y} - a\bar{x}, \Delta a \approx \sqrt{\frac{1}{D} \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N-2}}, \Delta b \approx \sqrt{\left(\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{D}\right) \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N-2}}$$

* برای اثبات این روابط به فصل ۴ مرجع (۱) مراجعه کنید

$$d_i = y_i - ax_i - b, D = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \text{ که}$$

اگر بهترین خطی که از مبدا می گذرد مورد نظر باشد، شیب خط و خطای آن از معادله زیر به دست می آید:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}, \Delta a \approx \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^N x_i^2} \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N-1}}$$

مثالی از این حالت همین نمودار t^2 بر حسب l می باشد که در بالا بررسی شد.

در ضمن بدست آوردن این مقادیر از روی خود نمودار هم ممکن است کفایت بهترین خطی که با چشم تشخیص

داده می شود از میان نقاط عبور داده و با انتخاب دو نقطه با فاصله نسبتاً زیاد شیب خط عبوری که برابر $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$

می باشد را حساب کرد. در ضمن چون درجه بندیهای دو محور افقی و عمودی از یک جنس و اندازه نیست

استفاده از $tg\theta$ برای محاسبه شیب کار درستی نیست. در قسمت ۹-۲ نحوه محاسبه این مقادیر توسط کامپیوتر

بیان می شود.

۸- قواعد نوشتن گزارش کار

هر آزمایش از جهت نظم و ترتیب و ماندگاری نتایج به دست آمده، نیاز به یک گزارش مکتوب دارد که باید بر

طبق نظم و قواعد خاصی استوار باشد. در زیر به موارد لازم در هر گزارش کار آزمایشگاهی اشاره می کنیم:

۱- مشخص کردن عنوان و هدف از انجام هر بخش آزمایش و ذکر وسایل مورد استفاده

۲- رسم شکل که نحوه انجام آزمایش را نشان می دهد (شکل هایی که طرز چیدن وسایل را نشان می دهد): شکل در حد ممکن ساده باشد پس نقاشی نکنید.

۳- ارائه توضیح مختصر اما کافی درباره نحوه آزمایش و نکات اندازه گیری

۴- ارائه جدولهای اندازه گیری : کمیت و واحد آن یادتان نرود.

۵- به دست آوردن کلیه روابط لازم برای انجام محاسبات (در صورتی که روابط واضح نباشد)

۶- رسم نمودارهای لازم برای تحلیل آزمایش.

۷- محاسبات عددی لازم برای محاسبه مجهولات.

۸- محاسبه خطاهای کمیت های موجود که اندازه گیری یا محاسبه شده اند.

۹- ذکر عوامل خطاهای آزمایش به صورت مجزا و ارائه پیشنهادهای عملی برای رفع آنها و در صورت لزوم انجام آن

۹- کار با نرم افزار Excel

Excel جزء آن دسته از نرم افزارهایی است که به نرم افزارهای صفحه گسترده معروفند. شما می توانید در محیط

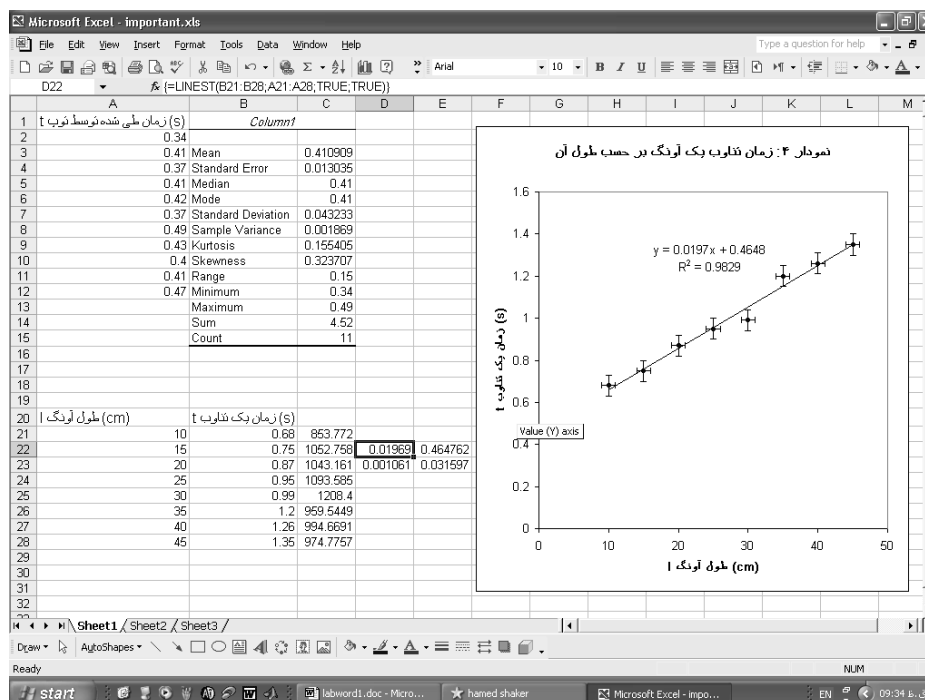
Excel تمامی گزارش کار خود را بنویسید کفایت مقادیر آزمایش را بنویسید، excel به شما امکاناتی می دهد تا

اطلاعات لازم را از آنها بگیرید، محاسبات لازم را روی آنها انجام دهید، نمودارهای مربوط به آنان را رسم کنید و

...

۹-۱ گرفتن اطلاعات آماری از مجموعه ای از مقادیر

می‌خواهیم اطلاعات لازم را از داده های آزمایش ابتدای ۴-۲ بگیریم. اعداد را در ستون A از ردیف ۲ تا ۱۲ وارد کرده (خانه های A2 تا A12) سپس از منوی Tools گزینه Data Analysis را انتخاب کنید (اگر چنین گزینه ای وجود نداشت گزینه Add-Ins... را انتخاب کرده و در پنجره ای که باز می‌شود Analysis Toolpak را علامت بزنید سپس دکمه OK را فشار دهید. احتمالاً از شما خواسته می‌شود سی دی Office را درون درایو قرار دهید). حال در پنجره Data Analysis گزینه Descriptive Statistic را انتخاب کنید.



در قسمت Input Range آیکون را انتخاب کنید. اشاره گر ماوس را روی A2 آورده و دکمه سمت چپ را نگه داشته سپس اشاره گر را به A12 برده و دکمه ماوس را رها کنید. دوباره آیکون را انتخاب کنید تا به پنجره اولیه برگردید. حال در قسمت Output options گزینه Output Range: را علامت زده سپس آیکون مربوطه را انتخاب کنید سپس B1 را انتخاب کرده و دوباره آیکون را انتخاب کنید (B1 محل شروع اطلاعات است). حال Summary statistics را علامت زده سپس OK را فشار دهید. اکنون می‌توانید اطلاعات را ببینید.

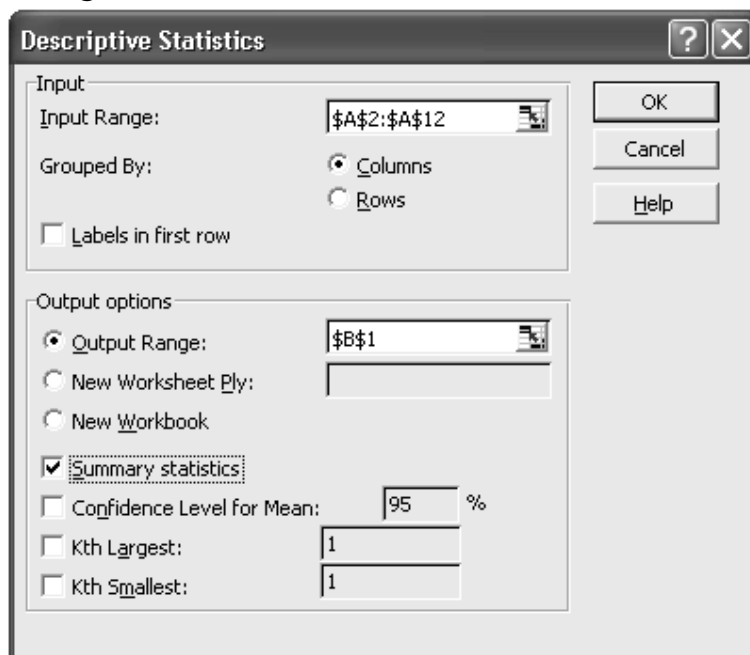
می‌توانید ستون B را برای دیدن اطلاعات بزرگ کنید به خط بین B و C که در شکل مشخص شده است بروید

B	C
---	---

ماوس به این شکل در می‌آید حال دکمه سمت راست را نگه داشته و اندازه این ستون را تغییر دهید.

Mean : میانگین ، Standard Error : خطای استاندارد σ_m ، Standard Deviation : انحراف استاندارد σ

Minimum: کمترین مقدار موجود ، Maximum: بیشترین مقدار موجود، Sum: مجموع ، Count: تعداد ارقام



۲-۹ رسم نمودار

می‌خواهیم نمودار ۴ بخش ۷-۱ را رسم کنیم.

طول آونگ را در ستون A (A21-A28) و زمان یک تناوب را در ستون B (B21-B28) مقابل طول متناظر



نوشته سپس علامت در بالای صفحه یا گزینه Chart از منوی Insert را انتخاب کنید. در قسمت Standard types گزینه XY(Scatter) را انتخاب کرده و دکمه >Next را فشار دهید. سپس در قسمت Data range آیکون مربوطه را انتخاب کنید. حال ماوس را روی A21 آورده، دکمه سمت چپ را نگه داشته و ماوس را تا B28 حرکت دهید و دکمه ماوس را رها کنید. با انتخاب آیکون به حالت اول برگشته و دکمه >Next را فشار دهید.

در قسمت Titles می‌توانید عنوان نمودار و نوشته های هر محور را مشخص کنید.

انتخابهای زیر را انجام می‌دهیم:

Chart title : " نمودار ۴: زمان تناوب آونگ بر حسب طول آن "

Value (X) axis : " l طول آونگ (cm) "

Value (Y) axis : " t زمان یک تناوب (s) "

حال دکمه >Next و سپس دکمه Finish را فشار دهید. نمودار کشیده می‌شود. شما هر تغییری که لازم دیدید می‌توانید روی نمودار انجام دهید مثلاً هر قسمت را که نخواستید آن را انتخاب کرده و دکمه Delete را فشار دهید.

قرار دادن خطوط خطا روی نقاط نمودار

ماوس را روی یکی از نقاط روی نمودار برده و دکمه سمت راست ماوس را فشار دهید. در منویی که باز می‌شود گزینه



Format Data Series... را انتخاب کنید. حال به قسمت X Error Bars رفته و Both را انتخاب کرده و مقدار خطا را در قسمت Fixed Value بنویسید که برابر ۱ cm می‌باشد و خود Fixed Value را علامت بزنید.



همین کار را با Y Error Bars انجام داده که خطای آن برابر $\pm 0.05\%$ می‌باشد و این دفعه Both را انتخاب می‌کنیم.

رسم منحنی های عبوری مختلف از نقاط نمودار

روی یکی از نقاط نمودار رفته و دکمه سمت راست را فشار دهید سپس گزینه Add Trendline... را انتخاب کنید. در قسمت Type، Linear را انتخاب کنید یعنی می‌خواهید یک خط از میان نقاط عبور دهید. حال به قسمت Options رفته و Display equation on chart و Display R-squared value on chart علامت بزنید سپس دکمه OK را فشار دهید. خط عبوری و معادله آن و مقدار R^2 که معیاری برای میزان تطبیق کمیات با نمودار می‌باشد را مشاهده می‌کنید. می‌توانید منحنی های دیگری مثل منحنی توانی (Power) هم عبور دهید فقط کافیست در قسمت Type آن را مشخص کنید.

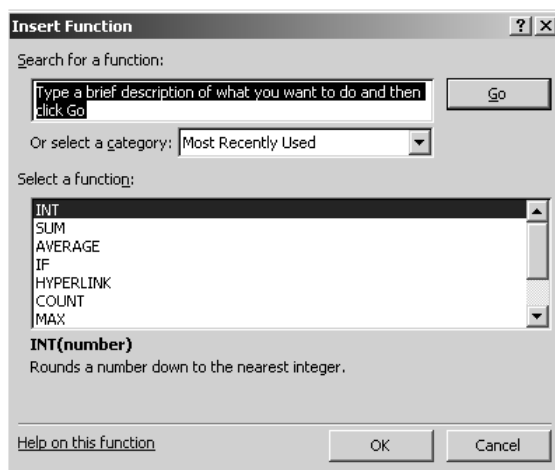
اگر می‌خواهید خطای a و b در خط عبوری پیدا کنید ($y = ax + b$) ماوس را به D22 برده و دکمه سمت چپ را نگه داشته تا E23 می‌کشیم حال در قسمت بالای صفحه که در شکل زیر مشخص شده است f_x را انتخاب می‌کنیم.



در قسمت Select a function تابع LINEST را انتخاب کرده و OK را فشار دهید. در Known_y's خانه B21 تا B28 را انتخاب کرده (به همان طریقی که قبلا آشنا شده اید) و در Known_x's خانه A21 تا A28 را انتخاب می‌کنید. قسمت Const و Stats را برابر true قرار دهید. حال کلیدهای $\text{ctrl} + \text{shift} + \text{enter}$ را با هم فشار دهید. ستون اول مقدار و خطای a و ستون دوم مقدار و خطای b می‌باشد. نکته: اگر Const را برابر false قرار دهید بیان کرده‌اید که خط از مبدا عبور می‌کند.

محورهای لگاریتمی

روی یکی از محورها که می‌خواهید لگاریتمی بشود بروید و دکمه سمت راست ماوس را فشار دهید. حال گزینه Format Axis... را انتخاب کنید. در قسمت Scale گزینه Logarithmic scale را علامت زده و OK را فشار دهید.



۳-۹ بعضی کارهای محاسباتی

در آزمایش آونگ طبق تئوری می‌دانیم $t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow g = 4\pi^2 \frac{l}{t^2}$. می‌خواهیم به ازای هر طول و زمان g

مربوطه را حساب کنیم. ماوس را به خانه C21 برده و بنویسید $=4*PI()^2*A21/B21^2$ و دکمه enter را فشار دهید. مقدار g در سطر ۲۱ محاسبه می‌شود. حالا ماوس را روی C21 برده و دکمه سمت راست ماوس را فشار داده و گزینه Copy را انتخاب کنید. حال ماوس را روی C22 برده و دکمه سمت چپ ماوس را نگه داشته تا C28

کشیده و سپس رها کنید. روی قسمت انتخاب شده دکمه سمت راست را فشار داده و گزینه Paste را انتخاب کنید

. همه g ها محاسبه می شوند طبق واحد $\frac{cm^2}{s}$.

در انتها توصیه می‌شود برای استفاده های بیشتر و کاملتر به کتابهایی که در زمینه Excel نوشته شده اند مراجعه کنید.

مراجع

- ۱- فیزیک عملی، ج.ل. اسکواپرز، ترجمه محمد علی شاهزادگان و محمد حسن فیض، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول ۱۳۷۰
- ۲- خطاهای مشاهده و محاسبه آن، تاپینگ ج.، ترجمه محسن تدین، مرکز نشر دانشگاهی ۱۳۶۴
- ۳- شیمی عمومی جلد اول، چارلز مورتیمر، ترجمه علی پورجوادی، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ پنجم ۱۳۷۸

آزمایش ۱

بررسی قانون اهم

بررسی تجربی قانون اهم و مطالعه پارامترهای مؤثر در مقاومت الکتریکی یک سیم فلزی

تئوری آزمایش

هر جسم فیزیکی، دارای مقاومت الکتریکی است. اجسام فلزی، بدن انسان، یک تکه پلاستیک، یا حتی خلأ دارای مقاومت الکتریکی هستند که قابل اندازه گیری است. اکثر فلزات در برابر جریان الکتریسته مقاومت کمی دارند و اجسام هادی نامیده می‌شوند. اجسامی که دارای مقاومت الکتریکی بسیار زیادی هستند، عایق نامیده می‌شوند. یک مقاومت ایده‌آل عنصری است که اندازه مقاومت الکتریکی آن ثابت است و بستگی به عوامل محیطی (مانند تغییرات دما...) ندارد. در عمل مقاومتها را بگونه‌ای طراحی می‌کنند که در برابر تغییرات دما و عوامل محیطی دیگر، اندازه مقاومت الکتریکی آنها نوسانات کمی داشته باشد.

مقاومت یک سیم طویل یکنواخت که دارای سطح مقطعی یکسان است از رابطه $R = \rho \frac{l}{S}$ به دست می‌آید که در آن: l طول، S سطح مقطع و ρ مقاومت ویژه سیم است. دامنه تغییرات مقاومت ویژه برای مواد مختلف وسیع است. با تقسیم مواد به فلز، نیم‌رسانا و عایق بازه تغییرات مقاومت ویژه آنها حدوداً برابر است با:

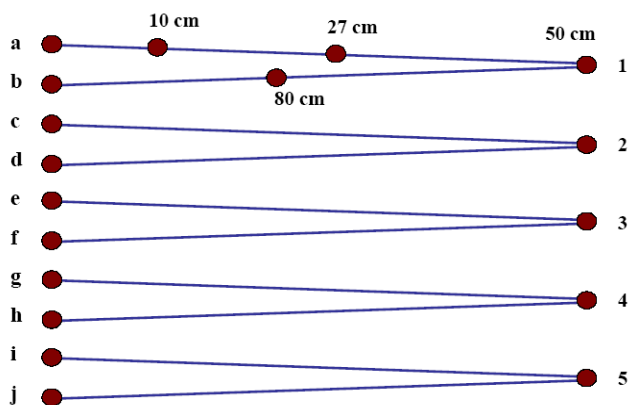
فلز	نیم‌رسانا	عایق
$10^{-6} - 10^{-2} \Omega.cm$	$10^{-2} - 10^9 \Omega.cm$	$10^9 - 10^{18} \Omega.cm$

اگر منحنی نمایش تغییرات اختلاف پتانسیل دو سرسیم بر حسب اندازه جریان الکتریکی که از آن عبور می‌کند، خطی باشد، مقاومت الکتریکی آن ثابت است، بنابراین از قانون اهم پیروی می‌کند و مقاومت «اهمی» نامیده می‌شود، در غیر این صورت «غیر اهمی» خواهد بود. در آزمایشگاه مقاومتها ثابت یا متغیر هستند. مقاومت‌های متغیر، پتانسیومتر یا رئوستا نیز نامیده می‌شوند و مقاومت آنها توسط تنظیم یک پیچ یا لغزش یک ابزار کنترل کننده تغییر می‌کند.

وسایل آزمایش

منبع تغذیه DC، آمپر متر، ولت متر، تخته سیم ها.

تخته سیم ها: تخته سیم ها مطابق شکل ۱ از پنج سیم دارای جنس و قطرهای مختلف تشکیل شده است. سیم های شماره ۱، ۲ و ۳ از جنس نیکل کروم بوده و قطر آنها به ترتیب برابر است با ۰/۲۵، ۰/۴۰ و ۰/۳۰ میلی متر. سیم شماره ۴ از جنس گالوانیزه با قطر ۰/۳۰ میلی متر و سیم شماره ۵ کروم خالص با قطر ۰/۴۰ میلی متر است. طول سیم های شماره ۱ تا ۵ برابر یک متر است.

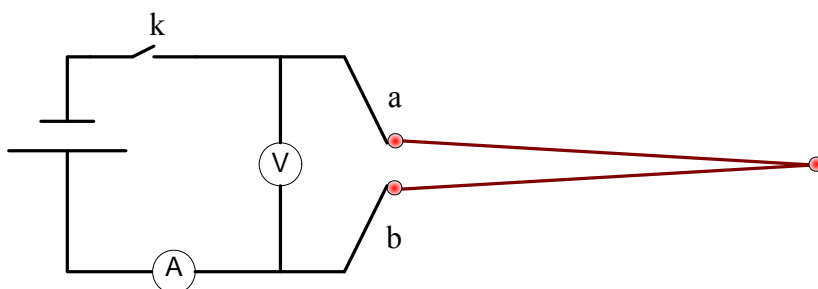


شکل ۱: ترتیب قرار گیری سیم ها بر روی تخته سیم ها

روش آزمایش

بستگی اختلاف پتانسیل دو سر سیم به اندازه جریان الکتریکی که از آن عبور می کند

- از سیم شماره ۱ استفاده کرده و مدار شکل ۲ را ببندید.
- ولتاژ منبع تغذیه را روی صفر تنظیم کرده و کلید K را وصل کنید.



شکل ۲: مدار ساده اندازه گیری

- با تغییر ولتاژ منبع تغذیه، جریان را در بازه ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی آمپر تغییر داده و اختلاف پتانسیل دو سر سیم a و b را اندازه گیری کنید سپس نتایج را در جدول ۱ ثبت کنید.

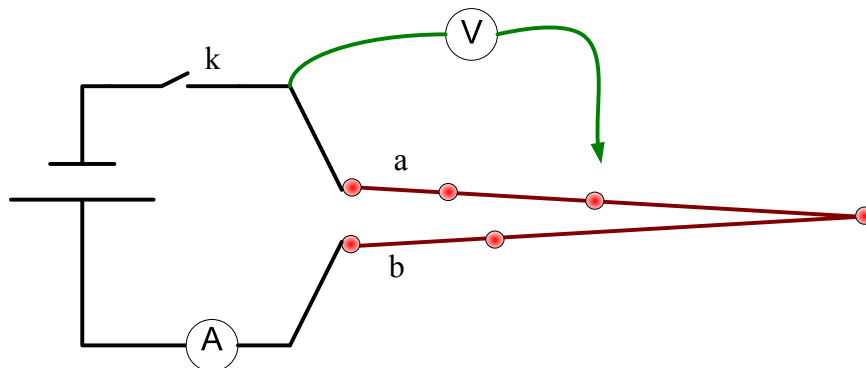
جدول ۱

I (mA)				
V (v)				

- منحنی نمایش تغییرات اختلاف پتانسیل دو سر سیم را بر حسب جریان رسم کنید و با استفاده از شیب خط مقاومت سیم را تعیین کنید.
- درصد خطای R را برای دو جریان اندازه گیری شده، نسبت به R محاسبه شده از روی منحنی حساب کنید.
- آیا منحنی از مبدأ می گذرد، چرا؟
- آیا این سیم دارای مقاومت اهمی است؟

بستگی مقاومت الکتریکی به طول سیم $[R=f(L)]$

- از سیم شماره ۱ استفاده کرده و مدار شکل ۲ را ببندید.
- ولتاژ منبع تغذیه را روی صفر تنظیم کرده و کلید K را وصل کنید.



شکل ۲

- با تغییر ولتاژ منبع تغذیه، جریان مدار را روی مقدار ثابتی (در بازه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی آمپر) تنظیم کنید.
- با استفاده از ولت متر برای طول های داده شده در جدول ۲، اختلاف پتانسیل را نسبت به نقطه a اندازه گیری کرده و در جدول ۲ ثبت کنید.

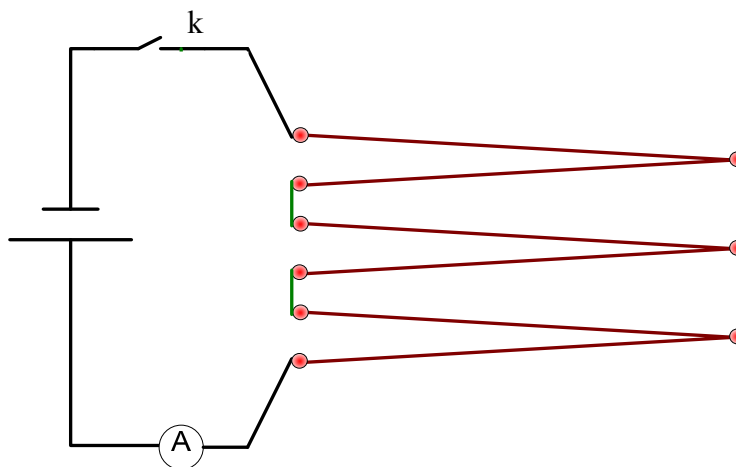
جدول ۲

l (cm)	10	27	50	80	100
V (V)					
$I =$ (mA)					
R (Ω)					

- منحنی نمایش تغییرات R نسبت به طول l را رسم کرده و شیب خط را به دست آورید.

تابعیت مقاومت با قطر سیم $[R=f(s)]$

- سیم‌های شماره ۱ تا ۳ را به صورت سری، مطابق با مدار شکل ۴ به منبع تغذیه وصل کنید.
- ولتاژ منبع تغذیه را روی صفر تنظیم کرده و کلید K را وصل کنید.
- با تغییر ولتاژ منبع تغذیه، جریان مدار را روی مقدار ثابتی (در بازه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌آمپر) تنظیم کنید.



شکل ۴

- اختلاف پتانسیل دو سر هر سیم را اندازه‌گیری کرده و نتایج را در جدول ۳ ثبت کنید.

جدول ۳

شماره سیم	(1) a,b	(2) c,d	(3) e,f
قطر (mm)			
V (v)			
$I =$ (mA)			
R (Ω)			

- با استفاده از جدول ۳ مقاومت هر سیم را حساب کرده و منحنی نمایش تغییرات مقاومت بر حسب عکس سطح مقطع سیم را رسم کرده و شیب منحنی را محاسبه کنید.
- با فرض این که مقاومت فقط بستگی به طول سیم و عکس سطح مقطع آن دارد مقاومت ویژه را در دو بخش قبل، به دست آورید و با مقایسه آنها با یکدیگر مقدار متوسط مقاومت ویژه را به تعیین کنید.

$$R=f(\rho) \text{ تابعیت مقاومت با مقاومت ویژه}$$

- سیم‌های شماره ۳ تا ۵ را به صورت سری، به منبع تغذیه وصل کنید.
 - ولتاژ منبع تغذیه را روی صفر تنظیم کرده و کلید K را وصل کنید.
 - با تغییر ولتاژ منبع تغذیه، جریان مدار را روی مقدار ثابتی (در بازه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌آمپر) تنظیم کنید.
- اختلاف پتانسیل دو سر هر سیم را اندازه‌گیری کرده و نتایج را در جدول ۴ ثبت کنید.

جدول ۴

کروم خالص i,j (۵)	گالوانیزه g,h (۴)	کروم نیکل e,f (۳)	جنس و شماره سیم
			V (v)
I = (mA)			
			R (Ω)

- با استفاده از جدول ۴، مقاومت هر سیم را محاسبه کنید سپس مقاومت‌های ویژه ρ_3, ρ_4, ρ_5 را بدست آورید.

پرسش‌ها

- ۱- صفحه ای مستطیلی شکل به ابعاد l و W که شامل لایه ای بسیار نازک از گرافیت به ضخامت d می باشد (حدوداً ۱۰۰ نانومتر) را در اختیار داریم، آزمایشی طراحی کنید که بتوانیم مقاومت الکتریکی این صفحه را اندازه گیری کنیم.

آزمایش ۲

قوانین کیرشهف و پل وتستون

بررسی قوانین کیرشهف و استفاده از این قوانین برای تعیین مقاومت مجهول

تئوری آزمایش

قوانین کیرشهف

مدارهای الکتریکی از مولدهای الکتریکی و مقاومت‌های الکتریکی تشکیل می‌شوند. برای تعیین شدت جریان در هر شاخه از مدار و پارامترهای مجهول دیگر از قوانین کیرشهف که بر اساس قانون بقای بار و انرژی در مدار بدست می‌آیند، استفاده می‌کنیم.

- قانون اول کیرشهف (قضیه گره): جمع جبری شدت جریان‌هایی که به یک نقطه می‌رسند، برابر با صفر است. به عبارت دیگر بار الکتریکی با همان آهنگی که به یک نقطه از مدار وارد می‌شود، از آن خارج می‌شود.

$$\sum_i I_i = 0$$

- قانون دوم کیرشهف (قضیه حلقه): مجموع تغییرات پتانسیل در هر مسیر بسته برابر با صفر است. این قضیه روشی برای بیان قانون بقای انرژی در مدارهای الکتریکی است.

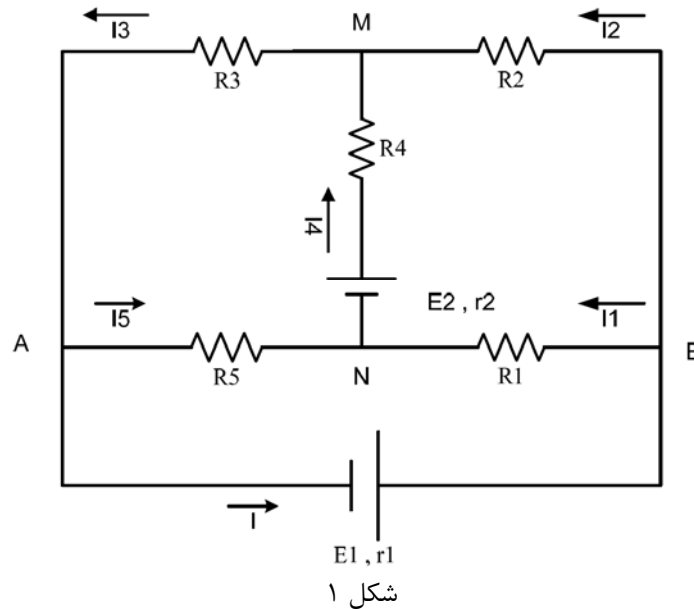
$$\sum_i V_i = 0$$

برای مثال در شکل ۱، در نقطه A، $I_3 - I - I_5 = 0$ و در نقطه M، $I_4 + I_2 - I_3 = 0$ است و در حلقه BNMB (در جهت پاد ساعتگرد) $-R_2 I_2 + (R_4 + r_2) I_4 - E_2 + R_1 I_1 = 0$ است.

تعیین مقاومت مجهول توسط پل وتستون

یکی از روش‌هایی که برای تعیین مقاومت مجهول به کار می‌رود روش پل وتستون است که معادله آن از قوانین کیرشهف به دست می‌آید. در شکل ۱ اگر بجای منبع E_2 و مقاومت R_4 یک گالوانومتر و به جای مقاومت R_5 یک رئوستا با مقاومت مجهول R_x قرار دهید وقتی جریان عبوری از گالوانومتر صفر شود، رابطه زیر بین مقاومت‌ها برقرار خواهد بود که از این رابطه می‌توان مقاومت مجهول را محاسبه کرد.

$$R_1 R_3 = R_x R_2$$



وسایل آزمایش

منبع تغذیه (دو عدد)، بردبورد^۱، ولت‌متر، آمپر‌متر، گالوانومتر، رئوستا، مقاومتهای الکتریکی، سیم‌رابط.

تعیین اندازه مقاومت با استفاده از حلقه‌های رنگی روی آن: به هر حلقه رنگی روی مقاومت مطابق جدول ۱، یک عدد نسبت داده می‌شود. برای تعیین اندازه مقاومت، اگر حلقه طلایی یا نقره‌ای در سمت راست باشد، حلقه رنگی اول از سمت چپ نشان‌دهنده رقم دهگان و حلقه رنگی دوم بیانگر رقم یکان می‌باشد و حلقه سوم رقم توان ۱۰ و یا به عبارتی تعداد صفرها را نشان می‌دهد.

جدول ۱

حلقه رنگ	سیاه	قهوه‌ای	قرمز	نارنجی	زرد	سبز	آبی	بنفش	خاکستری	سفید
حلقه اول	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حلقه دوم	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حلقه سوم	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حلقه چهارم	خطا: اگر حلقه نداشته باشد $\pm 20\%$ نقره‌ای $\pm 10\%$ طلایی $\pm 5\%$									

^۱ Breadboard



طلایی زرد سبز قهوه‌ای

$$5\% \pm 10^4 * (5 + 10 * 1)$$

علاوه بر چهار حلقه ذکر شده، حلقه دیگری نیز ممکن است وجود داشته باشد، حلقه سفید رنگ (در مقاومت‌های اروپایی) و یا طلایی رنگ (در مقاومت‌های آمریکایی) به معنی ممیز بین رقم اول و دوم است و اگر نقره‌ای باشد، نشانه ممیز قبل از دو رقم است.

با توجه به جدول ۱ مقاومت‌های زیر را شناسایی کنید.

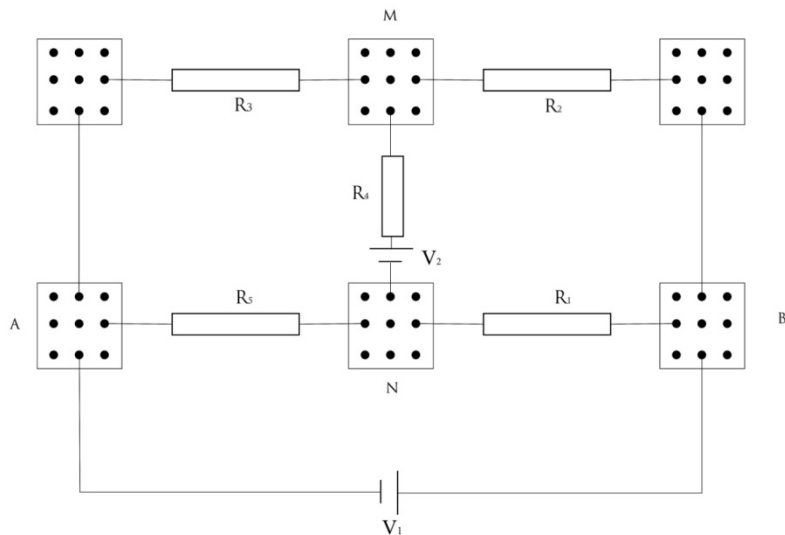
جدول ۲

$R_5 = 100 \Omega$	$R_4 = 47 \Omega$	$R_3 = 47 \Omega$	$R_2 = 220 \Omega$	$R_1 = 390 \Omega$
--------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------

روش آزمایش

بررسی قوانین کیرشهف

- با استفاده از مقاومت‌ها (جدول ۲) مداري مطابق شکل ۲ ببندید.
- به وسیله ولت‌متر، ولتاژ منبع تغذیه‌ها را تنظیم کنید ($V_1 \in [4 - 7] V$ و $V_2 \in [7 - 10] V$).
- به وسیله آمپرتر، اندازه و جهت جریان‌های هر شاخه را تعیین کرده و در جدول ۳ ثبت کنید.
- قانون اول کیرشهف را با توجه به جریان‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش تحقیق کنید.
- در مدار شکل ۲ افت پتانسیل دو سر هر مقاومت را اندازه‌گیری کرده و همراه با علامت مربوطه در جدول ۴ ثبت کنید.
- قانون دوم کیرشهف را با توجه به ولتاژهای اندازه‌گیری شده در هر مسیر بسته تحقیق کنید.
- با استفاده از مقادیر معلوم مقاومت‌ها و ولتاژ منبع تغذیه‌ها، جریان و افت پتانسیل مربوط به هر مقاومت را محاسبه کنید.
- با مقایسه نتایج محاسبه شده و نتایج آزمایش، خطای هر یک را تعیین کنید.



شکل ۲

جدول ۳

جریان هر شاخه (mA)	I_{R_1}	I_{R_2}	I_{R_3}	I_{R_4}	I_{R_5}

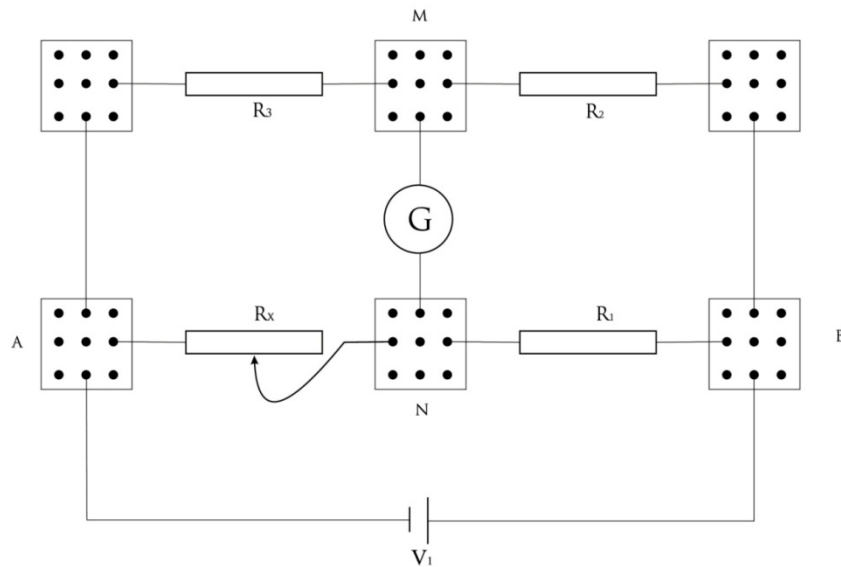
جدول ۴

افت پتانسیل دو سر مقاومت (V)	V_{R_1}	V_{R_2}	V_{R_3}	V_{R_4}	V_{R_5}

تعیین مقاومت مجهول

- منبع V_2 و مقاومت R_4 را با یک گالوانومتر و مقاومت R_5 را با یک رئوستا (مقاومت مجهول R_x) جایگزین کنید (شکل ۳).
- مقاومت رئوستا را تغییر دهید طوری که گالوانومتر جریان صفر را نشان دهد.
- در این حالت، اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R_x و جریان عبوری از آن را اندازه گیری کرده و در جدول ۵ ثبت کنید.

- با استفاده از جدول ۵، R_x را محاسبه کنید. همچنین با استفاده از رابطه مقاومت‌ها برای پل وتستون مقاومت مجهول را محاسبه کنید. آیا اختلافی بین این دو مقدار وجود دارد؟ توضیح دهید. درصد خطای R_x اول را نسبت به دوم محاسبه کنید.



شکل ۳

جدول ۵

$V_{R_x} (V)$	
$I_{R_x} (mA)$	

پرسش‌ها

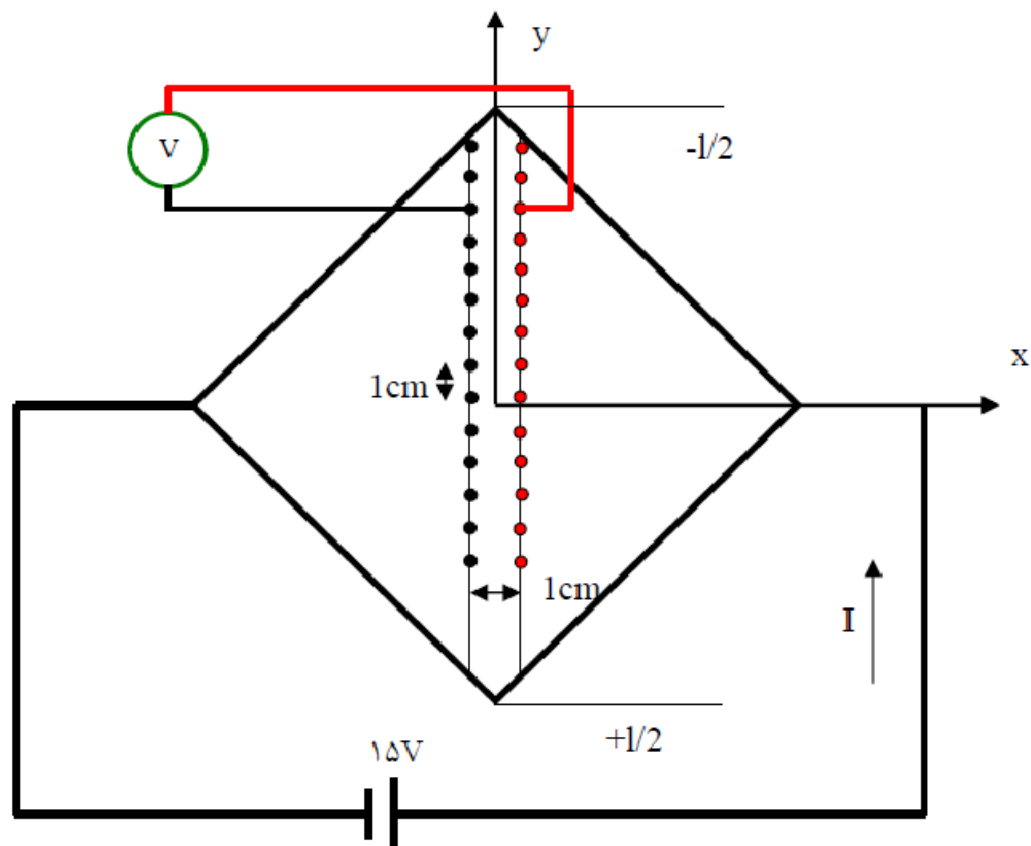
- ۱- رابطه $R_1 R_3 = R_x R_2$ را در مدار شکل ۳ اثبات کنید.

آزمایش ۳

بررسی رسانش الکتریکی و سطوح هم‌پتانسیل در صفحه گرافیت

تئوری آزمایش

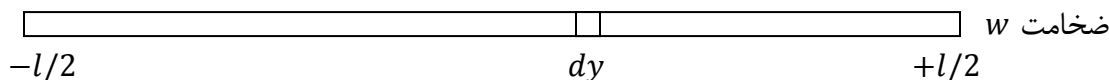
گرافیت یکی از آلوتروپهای کربن است که از قرار گرفتن ۶ اتم کربن به صورت ۶ ضلعی منتظم پدید آمده، این اتم‌ها با پیوند کوالانسی به هم متصل هستند و نمی‌توانند با کربنی خارج از این لایه پیوند کوالانسی دهند. بنابراین یک لایه گرافیت از طریق پیوند واندروالس که پیوند ضعیفی است به لایه‌های زیرین متصل است در نتیجه گرافیت ساختار لایه لایه دارد. این خاصیت سبب می‌شود لایه‌های گرافیت به راحتی روی هم بلغزند، به همین دلیل از این ترکیب به عنوان روان کننده استفاده می‌شود. علاوه بر آن از گرافیت برای الکترودهای کوره، ماده نسوز، قطعات الکتریکی، رنگ‌ها، فولادهای پرکربن، چدن‌ها، مدادگرافیتی و ... استفاده می‌شود.



شکل ۱

اندازه گیری ضخامت صفحه گرافیتی

برای اندازه گیری ضخامت صفحه گرافیتی به دو گوشه آن ولتاژ معینی اعمال می کنیم (شکل ۱) جریانی از الکترون ها در صفحه گرافیتی پخش خواهد شد. الکترون ها روی خطوط میدانی الکتریکی در سطح گرافیت حرکت می کنند که خطوط هم پتانسیل عمود بر خطوط میدان الکتریکی خواهند بود. اگر در امتداد محور y قطر صفحه l باشد، همان قطر آن به شکل زیر خواهد بود.



جریانی که از کل سطح مقطع صفحه می گذرد برابر I است:

$$I = \int J \cdot ds = \int J w dy$$

رابطه بین چگالی جریان و میدان الکتریکی برای مقاومت اهمی برابر است با:

$$J = \sigma E = E/\rho$$

که ρ مقاومت ویژه و عکس آن σ ، رسانندگی ویژه صفحه است، بنابراین:

$$I = w \int \sigma E dy \Rightarrow w = \frac{\rho I}{\int_{-l/2}^{l/2} E dy}$$

وسایل آزمایش

منبع تغذیه DC، صفحه گرافیتی، آمپر متر، ولت متر، خط کش، سیم رابط.

روش آزمایش

رسم منحنی های هم پتانسیل

- مدار آزمایش را مطابق شکل ۱ به یک منبع تغذیه (حدود ۱۵ ولت) وصل کنید.
- با استفاده از ولت متر سطوح هم پتانسیل مربوط به پتانسیل های ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۲ ولت را روی کاغذ میلیمتری مطابق محورهای x و y انتخاب شده در شکل ۱ رسم کنید (دقت در رسم منحنی ها برای پتانسیل های ۵، ۷ و ۹ ولت اهمیت دارد، بقیه منحنی ها را به طور تقریبی رسم کنید).

جدول ۱

پتانسیل (V)	مختصات نقاط	
۳	x	
	y	
۵	x	
	y	
۷	x	
	y	
۹	x	
	y	
۱۲	x	
	y	

تعیین میدان الکتریکی با استفاده از منحنی‌های هم‌پتانسیل

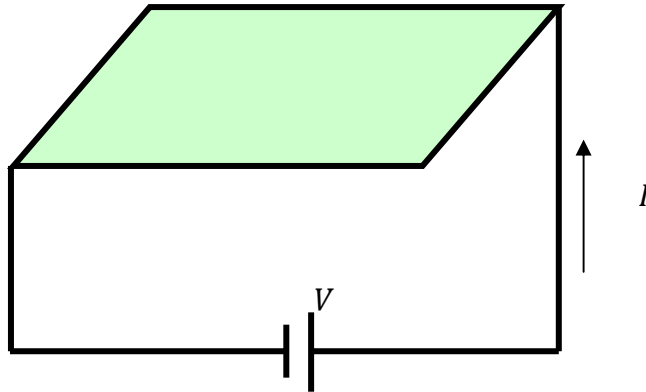
- سطح هم‌پتانسیلی که تقریباً خط راست است را مشخص کنید (لازم به ذکر است در بعضی صفحات به علت وجود کمی غیریکنواختی و یا دلایل دیگر ممکن است این خط پتانسیل کمی از وسط صفحه انحراف داشته باشد)، دو خط موازی با فاصل 0.5 سانتیمتر از سطح هم‌پتانسیل (تقریباً خط راست) در نظر بگیرید (در شکل ۱ خط هم‌پتانسیل منطبق بر قطر صفحه گرافیتی است).
- اختلاف پتانسیل دو نقطه روی دو خط موازی که هر دو به فاصله 0.5 cm از خط هم‌پتانسیل مرکزی (تقریباً خط راست) قرار دارند را با y های مختلف اندازه‌گیری کنید و نتایج را در جدول ۲ ثبت کنید.
- با استفاده از اختلاف پتانسیل، میدان الکتریکی E را محاسبه کنید ($E = \Delta V/d$ که $d = 1$ cm).
- نمودار E بر حسب y را روی کاغذ میلیمتری رسم کنید.
- جریان مدار را اندازه‌گیری کنید.
- در صورتی که بدانیم مقاومت ویژه گرافیت $8 \times 10^{-4} \Omega m$ است و فرض اینکه قانون اهم برقرار است، ضخامت مؤثر لایه گرافیتی را به دست آورید.

جدول ۲

y	
ΔV	
E	

پرسش‌ها

- ۱- تفاوت هدایت الکتریکی گرافیت با هدایت فلزی در چیست؟
- ۲- با توجه به آزمایش فوق خطوط میدان و همچنین خطوط هم‌پتانسیل را در شکل زیر رسم کنید (دقت کنید این صفحه متوازی‌الاضلاع است). در رسم این خطوط از چه فرضیات فیزیکی استفاده می‌کنید؟



آزمایش ۴

باردار شدن و بی بار شدن خازن ها

بررسی تجربی باردار شدن و بی بار شدن خازن ها و ظرفیت معادل خازن های سری و موازی

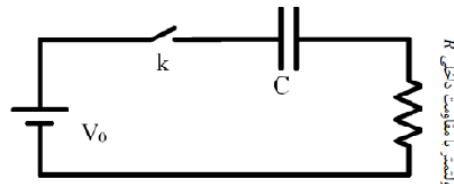
تئوری آزمایش

خازن از دو رسانای عایق بندی شده تشکیل شده است که اصطلاحاً صفحه نامیده می شوند. اگر دو صفحه خازن را به دو سر یک باتری وصل کنیم، بر روی صفحات آن بارهای مساوی و مخالف $\pm q$ جمع می شوند که با ولتاژ دو سر باتری متناسبند ($q = CV$). C ضریب تناسب، ظرفیت خازن نامیده می شود که به شکل و محل نسبی رساناها و همچنین محیطی که رساناها در آن قرار دارند بستگی دارد.

فرض کنید مطابق شکل ۱ خازن و ولت متر با مقاومت الکتریکی R ، به صورت سری در مدار قرار گیرند، پس از بسته شدن کلید k ، خازن بلافاصله باردار نخواهد شد بلکه بارها کم کم بر روی صفحات خازن جمع می شوند و با استفاده از اصل پایستگی انرژی (یا قضیه حلقه) اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن از رابطه زیر به دست می آید.

$$V_c = V_0 \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{RC} \right) \right)$$

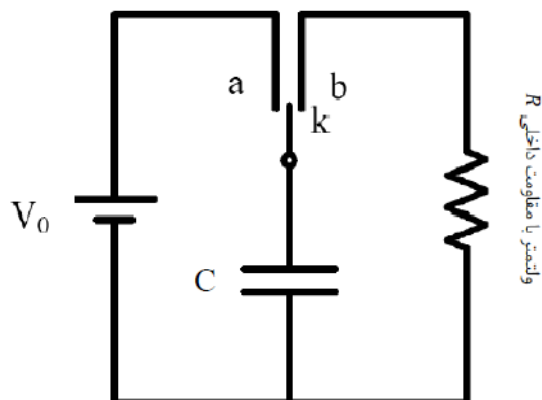
بنابراین در زمان $t = RC$ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه خازن 0.63 اختلاف پتانسیل منبع تغذیه (اختلاف پتانسیل نهایی بین دو صفحه) است. زمان $\tau = RC$ ثابت زمانی مدار نامیده می شود.



شکل ۱

فرض کنید مطابق شکل ۲ با بستن کلید k به نقطه a خازن را باردار کنیم و سپس با بستن کلید k به نقطه b انرژی جمع شده در خازن را در مقاومت R تخلیه می کنیم. با استفاده از اصل پایستگی انرژی (یا قضیه حلقه) اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن از رابطه زیر به دست می آید.

$$V_c = V_0 \left(\exp \left(-\frac{t}{RC} \right) \right)$$



شکل ۲

در مدار باردار شدن و بی‌بار شدن خازن‌ها، می‌توان به جای تک خازن از چند خازن به صورت سری یا موازی استفاده کرد. ظرفیت خازن معادل در حالت موازی و در حالت سری از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند.

$$C = C_1 + C_2 + \dots \quad \text{حالت موازی}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad \text{حالت سری}$$

وسایل آزمایش

منبع تغذیه DC، دو عدد خازن $C_1 = 20 \mu F$ و $C_2 = 4 \mu F$ ، ولت‌متر، زمان‌سنج، سیم رابط.

روش آزمایش

روش اندازه‌گیری/اختلاف پتانسیل یک خازن باردار با ولت‌متر

- خازن C_1 را با اتصال مستقیم به منبع تغذیه با ولتاژ ۱۰ ولت باردار کنید (پس از مدت زمانی کوتاه خازن باردار می‌شود).
- پس از جدا کردن خازن C_1 از منبع تغذیه آن را به صورت موازی به ولت‌متر وصل کنید. تغییر اختلاف پتانسیل دو سر خازن را از روی ولت‌متر مشاهده کنید (توجه داشته باشید که بار خازن از راه مقاومت داخلی ولت‌متر تخلیه می‌شود و ولتاژ آن به آهستگی کاهش می‌یابد).
- خازن C_1 را از ولت‌متر جدا کرده و دو صفحه خازن را با یک سیم به هم وصل کنید تا به تندی تخلیه شود.
- خازن را مجدداً باردار کرده، برای مدت کوتاهی دو دست خود را به دو اتصال خازن وصل کنید سپس به وسیله ولت‌متر اختلاف پتانسیل دو سر خازن را اندازه‌گیری کنید. خواهید دید که ولت‌متر، اختلاف پتانسیل کمتری را نشان می‌دهد که به علت تخلیه خازن توسط بدن شماست (دقت کنید در تمام طول آزمایش، اتصالات خازن‌ها را با دو دست لمس نکنید).

- نتایج این قسمت را شرح دهید.
- رسم منحنی باردار شدن خازن و تعیین مقاومت داخلی ولت‌متر
- مطابق شکل ۱ خازن C_1 را به صورت سری به یک منبع تغذیه (۹ الی ۱۲ ولت) و یک ولت‌متر وصل کنید.
- بازاء زمانهای درج شده در جدول ۱، عددی که ولت‌متر نشان می‌دهد را در جدول ثبت کنید.
- بین اختلاف پتانسیل منبع تغذیه V_0 ، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن V_c و عددی که ولت‌متر نشان می‌دهد رابطه زیر برقرار است:

$$V = V_0 - V_c = V_0 \left(\exp \left(-\frac{t}{RC} \right) \right)$$

- منحنی نمایش تغییرات V/V_0 را برحسب زمان روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم کنید.
- با استفاده از شیب خط، τ ثابت زمانی مدار را بدست آورده و مقاومت داخلی ولت‌متر را محاسبه کنید.

جدول ۱

t (s)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰	۱۳۵
V (V)										
V/V_0										

رسم منحنی بی‌بار شدن خازن و تعیین مقاومت داخلی ولت‌متر

- خازن C_2 را به وسیله یک منبع تغذیه (۹ الی ۱۲ ولت) باردار کنید.
- خازن را از منبع تغذیه جدا کرده و به ولت‌متر وصل کنید تا خازن از راه مقاومت داخلی ولت‌متر، تخلیه شود.
- بازاء زمانهای درج شده در جدول ۲، عددی که ولت‌متر نشان می‌دهد را در جدول ثبت کنید.
- منحنی نمایش تغییرات V/V_0 را برحسب زمان روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم کنید.
- با استفاده از شیب خط، τ ثابت زمانی مدار را بدست آورده و مقاومت داخلی ولت‌متر را محاسبه کنید.
- مقدار متوسط مقاومت داخلی ولت‌متر را با استفاده از نتایج بدست آمده در دو قسمت، تعیین کنید و مقدار خطای R نسبت به \bar{R} را در هر قسمت حساب کنید.

جدول ۲

t (s)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰	۱۳۵
V (V)										
V/V_0										

بررسی تجربی ظرفیت معادل خازن‌های سری

- مطابق شکل ۱ خازن C_1 و C_2 را به صورت سری به یک منبع تغذیه (۹ الی ۱۲ ولت) و یک ولت‌متر وصل کنید.
- بازاء زمانهای درج شده در جدول ۳، عددی که ولت‌متر نشان می‌دهد را در جدول ثبت کنید.
- منحنی نمایش تغییرات V را برحسب زمان روی کاغذ میلیمتری رسم کنید.
- با استفاده از منحنی و تعریف τ ثابت زمانی مدار، τ را بدست آورید.
- با استفاده از τ بدست آمده و مقاومت داخلی ولت‌متر، ظرفیت معادل خازن‌ها را بدست آورید. خطای این ظرفیت را نسبت به ظرفیت معادل $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ محاسبه کنید.

جدول ۳

t (s)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰	۱۳۵
V (V)										

بررسی تجربی ظرفیت معادل خازن‌های موازی

- خازن C_1 و C_2 را به صورت موازی بسته سپس به وسیله یک منبع تغذیه (۹ الی ۱۲ ولت) باردار کنید.
- خازن‌ها را از منبع تغذیه جدا کرده و به ولت‌متر وصل کنید تا خازن‌ها از راه مقاومت داخلی ولت‌متر، تخلیه شوند.
- بازاء زمانهای درج شده در جدول ۴، عددی که ولت‌متر نشان می‌دهد را در جدول ثبت کنید.
- منحنی نمایش تغییرات V را برحسب زمان روی کاغذ میلیمتری رسم کنید.
- با استفاده از منحنی و تعریف τ ثابت زمانی مدار، τ را بدست آورید.
- با استفاده از τ بدست آمده و مقاومت داخلی ولت‌متر، ظرفیت معادل خازن‌ها را بدست آورید. خطای این ظرفیت را نسبت به ظرفیت معادل $C = C_1 + C_2$ محاسبه کنید.

جدول ۴

t (s)	۰	$\frac{\tau}{8}$	$\frac{\tau}{4}$	$\frac{\tau}{2}$	$\frac{3\tau}{4}$	τ	$\frac{5\tau}{4}$	$\frac{3\tau}{2}$	$\frac{7\tau}{4}$	2τ	$\frac{9\tau}{4}$	$\frac{5\tau}{2}$	$\frac{11\tau}{4}$	$\frac{3\tau}{2}$	$\frac{13\tau}{4}$	2τ	$\frac{15\tau}{4}$	$\frac{7\tau}{2}$	$\frac{17\tau}{4}$	3τ
V (V)																				

آزمایش ۵

نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی

بررسی تجربی نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی و پارامترهای موثر در آن

تئوری آزمایش

اگر سیمی به طول L حامل جریان i در میدان مغناطیسی \vec{B} قرار گیرد، نیروی \vec{F} طبق رابطه زیر بر آن وارد می شود.

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B}$$

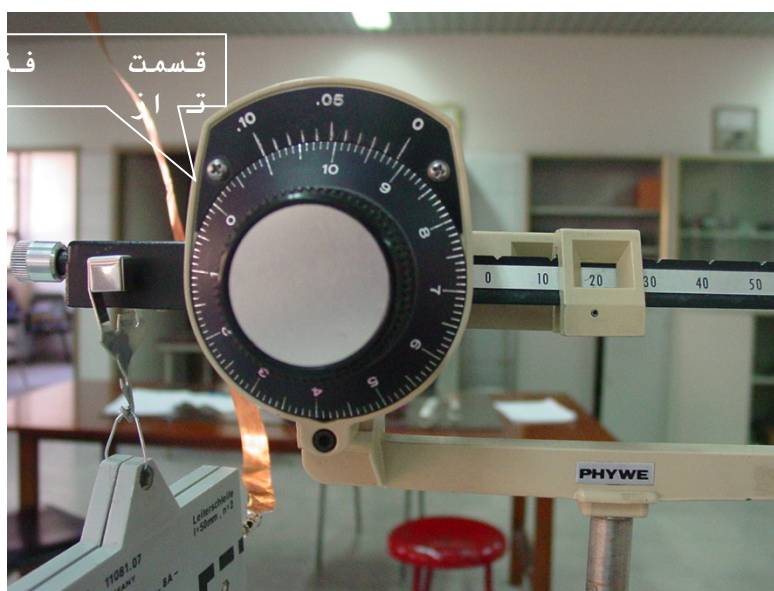
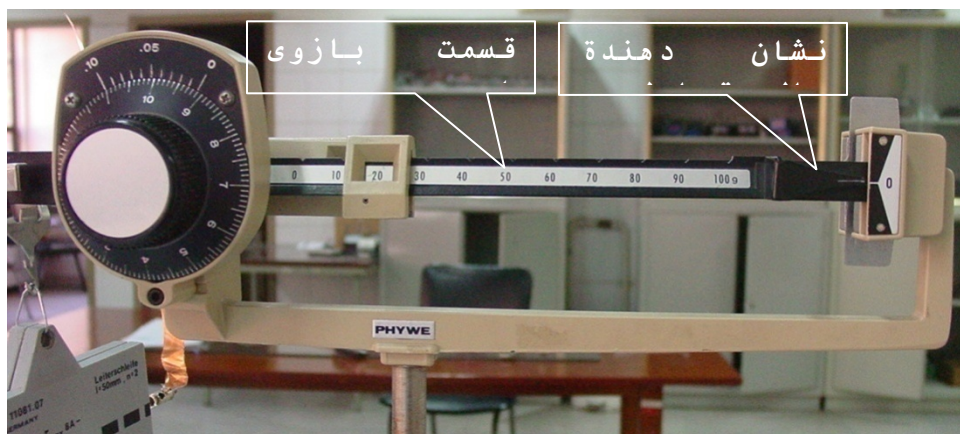
\vec{L} برداری است که بزرگی آن طول سیم، راستای آن راستای سیم و جهت آن همان جهت جریان است. نیرو با ضرب خارجی دو بردار \vec{L} و \vec{B} متناسب است که می توان جهت نیرو را با توجه به جهت آنها نسبت به هم و اندازه نیرو را نیز از رابطه زیر به دست آورد.

$$F = iLB \sin \theta$$

وسایل آزمایش

ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم، حلقه های سیم، هسته آهنی U شکل، سیم پیچ، منبع تغذیه DC (ماکزیمم ۲ آمپر)، منبع جریان، آمپرسنج، سیم نواری، سیم رابط، گیره، میله و پایه.
راهنمای کار با ترازو:

ترازو شامل دو قسمت، بازوی اهرمی با دقت ۱۰ گرم و قسمت فنری با دقت ۰/۰۱ گرم است. هنگام استفاده از ترازو حلقه جریان را مطابق شکل ۱ از قلاب آن آویزان کرده و سپس تغییرات وزن را اندازه گیری نمایید. تغییرات وزن حلقه با اعمال و بدون اعمال میدان مغناطیسی اندازه گیری می شود، بنابراین اندازه گیری خطای صفر ضرورتی ندارد. در شکل ۱ ترازو در وضعیت تعادل، جرم حلقه آویزان شده را $۲۹/۱۲ = ۲۰ + ۹/۱ + ۰/۰۲$ گرم نمایش می دهد.



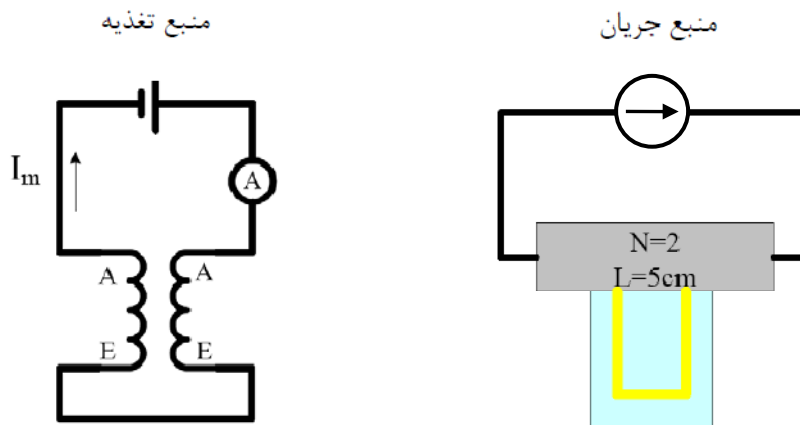
شکل ۱

مدارهای آزمایش

دو مدار مجزا برای انجام آزمایش بسته می شود :

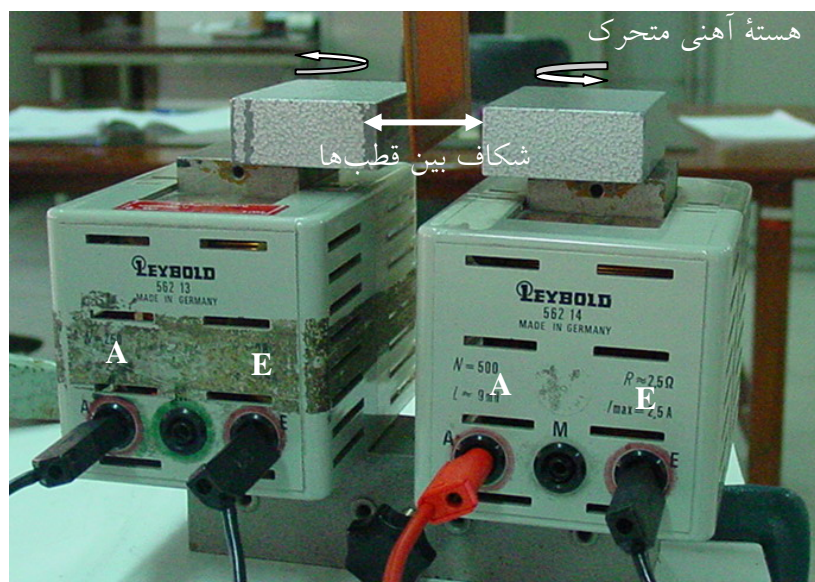
- مدار برای ایجاد جریان در حلقه سیم: منبع جریان را به اتصالات بالای پایه که سیمهای سبک و نواری از آن آویزان هستند وصل کنید (فاصله بین دو سیم نواری باید تا حد ممکن زیاد باشد و فقط کمی شکم دهند) سپس سیمهای نواری را به حلقه سیم وصل کرده و از قلاب ترازو آویزان کنید. لازم به ذکر است که مشخصات هر حلقه مشابه شکل روی آن نوشته شده است (شکل ۲ الف).

- مدار برای ایجاد میدان مغناطیسی: با استفاده از هسته آهنی U شکل، سیم‌پیچ‌ها و منبع تغذیه DC، می‌توان میدان مغناطیسی یکنواخت در شکاف بین قطب‌ها ایجاد کرد. این مدار مطابق شکل ۲ ب بسته می‌شود. چرا؟



شکل ۲: الف

ب: روش بستن اتصالات به سیم‌پیچ‌ها.



- شکل ۳: هسته آهنی متحرک که با چرخاندن آنها می‌توان فاصله بین قطب‌ها را تغییر داد. A و E محل اتصالات نشان داده شده در مدار شکل ۲ است.

روش آزمایش

بستگی نیروی F به زاویه بین سیم حامل جریان i و میدان مغناطیسی B

- شکاف بین قطب‌ها را حدود ۴ سانتی‌متر قرار دهید (شکل ۳) و جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها (I_m) را روی صفر تنظیم کنید.
- حلقه سیم ($L=2/5 \text{ cm}$) را در میدان مغناطیسی طوری قرار دهید که ضلع افقی آن هم‌راستا با میدان مغناطیسی باشد.
- قبل از اعمال میدان، ترازو را در حالت تعادل تنظیم کنید.
- جریان در حلقه سیم را افزایش دهید (ماکزیمم ۴ آمپر)، همیشه جهت جریان را طوری تنظیم کنید که نیروی وارد بر حلقه به سمت زمین باشد، آیا عقربه ترازو جابجا می‌شود؟
- جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها (I_m) را افزایش دهید (ماکزیمم ۲ آمپر)، آیا عقربه ترازو جابجا می‌شود؟
- با چرخاندن هسته U شکل حول محور قائم، مشاهدات خود را یادداشت کنید.

بستگی نیروی F به طول سیم L

- شکاف بین قطب‌ها را حدود یک سانتی‌متر قرار دهید و جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها (I_m) را روی صفر تنظیم کنید.
- حلقه سیم را در میدان مغناطیسی طوری قرار دهید که ضلع افقی آن عمود بر راستای میدان مغناطیسی باشد.
- ماکزیمم جریان ($i=4A$) را در حلقه سیم برقرار کنید.
- قبل از اعمال میدان، ترازو را در حالت تعادل تنظیم کنید.
- جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها را ماکزیمم ($I_m=2A$) کنید.
- بعد از اعمال میدان به علت نیروی وارده به حلقه، دیگر حلقه سیم در وضعیت تعادل نخواهد بود، دوباره حالت تعادل را برقرار کرده و اختلاف نیرو را در دو حالت بدست آورید.
- نتایج آزمایش را در جدول ۱ ثبت کنید.
- آزمایش را با حلقه‌های دیگر با طول‌های مختلف تکرار کنید.
- منحنی نمایش تغییرات F بر حسب L رسم کنید.
- با استفاده از شیب منحنی و جریان i ، میدان مغناطیسی B را محاسبه کنید.

بستگی نیروی F به جریان i

- شکاف قطب‌ها را حدود یک سانتی‌متر قرار دهید و I_m جریان سیم‌پیچ‌ها را روی صفر تنظیم کنید.
- حلقه سیم ($L=10\text{ cm}$) را در میدان مغناطیسی طوری قرار دهید که ضلع افقی آن عمود بر راستای میدان مغناطیسی باشد.
- جریان در حلقه سیم (i) را به تدریج افزایش دهید.
- قبل از اعمال میدان، ترازو را در حالت تعادل تنظیم کنید.
- جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها را ماکزیمم ($I_m=2\text{ A}$) کنید.
- با استفاده از ترازو، نیروی وارد بر حلقه سیم را تعیین کنید.
- نتایج آزمایش را در جدول ۲ ثبت کنید.
- آزمایش را با جریان‌های دیگر i تکرار کنید.
- منحنی نمایش تغییرات F بر حسب i را رسم کنید.
- با استفاده از شیب منحنی و طول L ، میدان مغناطیسی B را محاسبه کنید.

بستگی نیروی F به I_m

- شکاف بین قطب‌ها را حدود یک سانتی‌متر قرار دهید و جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها (I_m) را روی صفر تنظیم کنید.
- حلقه سیم ($L=10\text{ cm}$) را در میدان مغناطیسی طوری قرار دهید که ضلع افقی آن عمود بر راستای میدان مغناطیسی باشد.
- ماکزیمم جریان ($i=4\text{ A}$) را در حلقه سیم برقرار کنید.
- قبل از اعمال میدان، ترازو را در حالت تعادل تنظیم کنید.
- جریان در سیم‌پیچ‌ها (I_m) را به تدریج افزایش دهید.
- با استفاده از ترازو نیروی وارد بر حلقه سیم را تعیین کنید.
- نتایج آزمایش را در جدول ۳ ثبت کنید.
- آزمایش را با جریان‌های دیگر (I_m) تکرار کنید.
- منحنی نمایش تغییرات F بر حسب I_m را برای L و i ثابت رسم کنید.
- آیا با استفاده از منحنی نمایش تغییرات F بر حسب I_m می‌توان نتیجه‌ای در باره تغییرات F بر حسب B گرفت؟

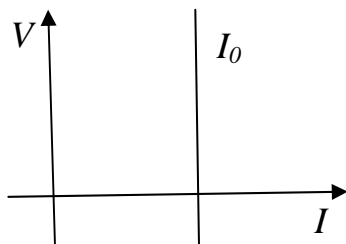
جدول ۱		جدول ۲		جدول ۳	
$I_m = 2A$		$I_m = 2A$		$i = 4A$	
$i = 4A$		$L = 10\text{ cm}$		$L = 10\text{ cm}$	
L (cm)	F (mN)	i (A)	F (mN)	I_m (A)	F (mN)
۱/۲۵					
۲/۵					
۵					
۱۰					

پرسش‌ها

- ۱- چرا در این آزمایش، از سیم‌های مسی نواری مسطح استفاده شده است؟
- ۲- چرا باید جهت نیروی مغناطیسی، به طرف پایین باشد تا نتایج آزمایش قابل قبول‌تر باشد؟
- ۳- چرا سیم‌های نواری مسی باید اندکی شکم داشته باشند و نباید حالت کشیده داشته باشند؟ اگر زیادی شل و یا زیادی کشیده باشند چه اتفاقی می‌افتد.

آشنایی با منبع جریان (برای مطالعه)

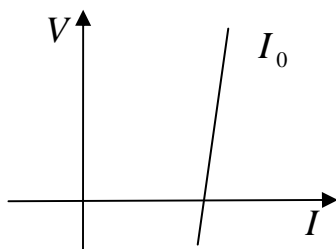
منبع جریان ایده آل، عنصری است که مستقل از اختلاف پتانسیل دو سر آن، همواره جریان عبوری از آن ثابت است. نمودار ولتاژ بر حسب جریان آن در حالت ایده آل به شکل زیر است.



منبع جریان هم مانند منبع ولتاژ بار تولید نمی کند و تنها یک جریان ثابت از بارها در یک شاخه تولید می کند. مثلاً اگر آن را به دو سر یک خازن ببندیم، ولتاژ به صورت خطی زیاد می شود و اگر به یک مقاومت وصل کنیم ولتاژ مقدار ثابت RI_0 می شود. همان طور که اگر دو سر منبع ولتاژ را با سیم به هم وصل کنیم جریان بزرگی از آن می گذرد، اگر دو سر منبع جریان ایده آل را قطع کنیم و در هیچ مداری قرار ندهیم، ولتاژ بزرگی دو سر آن برقرار می شود. همین طور اگر دو سر منبع ولتاژ باز باشد کاری انجام نمی دهد، منبع جریانی که دوسر آن با سیم به هم وصل شده باشد، کاری انجام نمی دهد. شکل این عنصر را در مدارها به صورت زیر نمایش می دهند.



منبع جریان همانند منبع ولتاژ دارای مقاومت داخلی است، یعنی با تغییر ولتاژ، جریان آن ثابت نمی ماند. مدل مناسبی می توان برای منبع جریان غیر ایده آل در نظر گرفت. فرض کنید همانند منبع ولتاژ مقاومت r با منبع جریان ایده آل سری باشد به وضوح این کار اثری در خروجی نخواهد گذاشت، زیرا جریان عبوری از شاخه ای که منبع در آن است همان I_0 است و مقاومت r فقط ولتاژ دو سر منبع ایده آل را عوض می کند. حالتی را در نظر بگیریم که مقاومت r موازی منبع جریان باشد. در این وضعیت با افزایش ولتاژ جریان بیشتری از مقاومت r خواهد گذشت و جریان بیرونی که دیده می شود جمع I_0 و جریان گذرنده از r است. به عبارتی جریان بیرونی تابعی از ولتاژ است. یعنی این مدل مناسب است و خواص مطلوب را داراست. نمودار ولتاژ بر حسب جریان مطابق شکل زیر است. منبع جریان خوب دارای مقاومت r بسیار بزرگ است تا کمترین جریان ممکن از آن بگذرد و همان جریان I_0 از دو سر مجموعه بدست آید.



آزمایش ۶

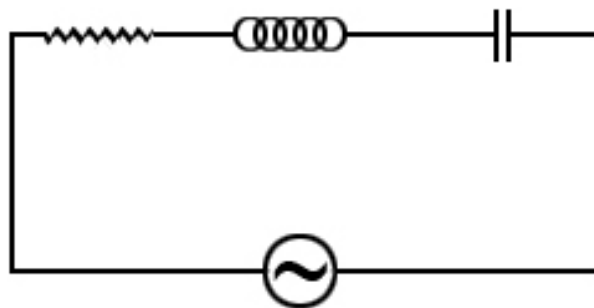
مطالعه مدارها با جریان متناوب

مطالعه و بررسی اثر مقاومت، القاگر و خازن در مدار جریان متناوب

تئوری آزمایش

مقاومت ظاهری و اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان در عناصر مختلف یک مدار RLC

مدار شکل ۱ شامل مقاومت R ، القاگر L و خازن C است که به صورت سری به منبع تغذیه متناوب با نیروی محرکه الکتریکی ε که از رابطه $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ بدست می‌آید، وصل شده‌اند. بین اختلاف پتانسیل دو سر هر عنصر و جریان عبوری از آن اختلاف فاز وجود دارد. فرض کنیم جریان در مدار به صورت $i = i_m \sin(\omega t - \varphi)$ باشد، با استفاده از R ، C ، L ، ω و ε_m می‌توان i_m و φ را به دست آورد.



شکل ۱

ابتدا فرض می‌کنیم هریک از عناصر به طور جداگانه به منبع تغذیه متناوب $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ وصل شده‌اند و اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ را بدست می‌آوریم.

مقاومت R : اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R به صورت زیر است:

$$V_R = \varepsilon_m \sin \omega t$$

$$V_R = Ri = Ri_m \sin(\omega t - \varphi)$$

از مقایسه دورابطه نتیجه می‌شود که $\varepsilon_m = Ri_m$ و اختلاف پتانسیل و جریان نیز هم فاز هستند.

القاگر L : اختلاف پتانسیل دو سر القاگر L به صورت زیر است:

$$V_L = \varepsilon_m \sin \omega t$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} = Li_m \omega \cos(\omega t - \varphi) = X_L i_m \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})$$

که $X_L = L\omega$ را واکنایی القایی یا مقاومت ظاهری القاگر می‌نامند. از مقایسه دورابطه نتیجه می‌شود که $\varepsilon_m = X_L i_m$ و اختلاف پتانسیل V_L به اندازه $\frac{\pi}{2}$ نسبت به جریان تقدم فاز دارد.

خازن C : اختلاف پتانسیل دو سر خازن C به صورت زیر است:

$$V_C = \varepsilon_m \sin \omega t$$

$$V_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{i_m}{C\omega} \cos(\omega t - \varphi) = X_C i_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})$$

که $X_C = \frac{1}{C\omega}$ را واکنایی خازنی یا مقاومت ظاهری خازن می‌نامند. از مقایسه دورابطه نتیجه می‌شود که $\varepsilon_m = X_C i_m$ ، و اختلاف پتانسیل V_C به اندازه $\frac{\pi}{2}$ نسبت به جریان تأخیر فاز دارد.

با توجه به مطالب ذکر شده در باره عناصر مختلف مدار، قانون کیرشهف را برای مدار شکل ۱ به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\varepsilon = V_R + V_L + V_C$$

$$\varepsilon_m \sin \omega t = R i_m \sin(\omega t - \varphi) + X_L i_m \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) + X_C i_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})$$

$$\varepsilon_m \sin \omega t = i_m \{R \sin(\omega t - \varphi) + (X_L - X_C) \cos(\omega t - \varphi)\}$$

تعریف می‌کنیم $\tan \alpha = \frac{X_L - X_C}{R}$ ، بنابراین معادله آخر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon_m \sin \omega t = \frac{i_m R \sin(\omega t - \varphi + \alpha)}{\cos \alpha}$$

برای اینکه دو طرف تساوی در تمام زمانها برقرار باشد باید $\alpha = \varphi$ باشد پس از $\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$ و رابطه‌های مثلثاتی می‌توان $\cos \varphi$ را به دست آورد.

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

با شرط $\alpha = \varphi$ و با استفاده از دو رابطه بالا، می‌توان i_m را بدست آورد

$$i_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

تعریف می‌کنیم $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ که Z امپدانس مدار یا مقاومت ظاهری مدار نامیده می‌شود، بنابراین $i_m = \frac{\varepsilon_m}{Z}$ است. این رابطه بین ولتاژ مؤثر V_Z ^۱ و جریان مؤثر I نیز برقرار است ($I = \frac{V_Z}{Z}$). اگر I ماکزیمم باشد مدار در حالت تشدید است. برای اینکه I ماکزیمم باشد باید امپدانس مدار مینیمم شود، بنابراین شرط اینکه مدار در حالت تشدید باشد عبارت است از:

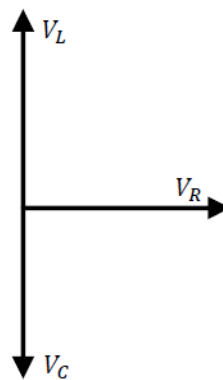
$$X_L - X_C = 0 \Rightarrow \omega_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

بازاء این بسامد مدار در حالت تشدید خواهد بود

^۱ ولتاژ و جریان مؤثر، جذر میانگین مربعی این کمیت‌ها است. برای مطالعه بیشتر به کتاب فیزیک هالیدی، فصل جریان‌های متناوب مراجعه شود.

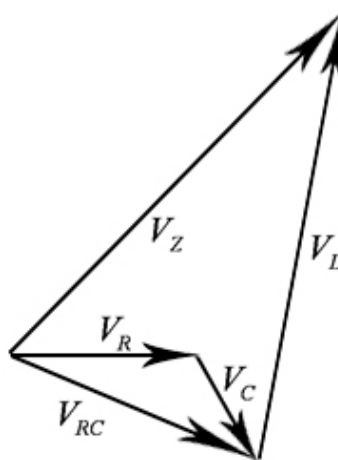
بررسی مدار RLC با روش رسم نمودار فازوری

روش دیگر برای مطالعه مدار RLC روش رسم نمودار فازوری است، در این روش قانون کیرشهف برای مدار RLC یک رابطه برداری است $V_Z = V_R + V_L + V_C$. اندازه هریک از بردارها برابر با اختلاف پتانسیل مؤثر دو سر هر عنصر است. برای مقاومت R اختلاف پتانسیل و جریان هم فاز هستند، در نتیجه این دو بردار هم جهت هستند و اختلاف فاز بین جریان و اختلاف پتانسیل هریک از عناصر مدار برابر با زاویه بین بردار V_R و بردار اختلاف پتانسیل آن عنصر است. بنابراین اگر V_R مانند شکل ۲ در راستای افق رسم شود بردار اختلاف پتانسیل القاگر ایده آل L (V_L) و خازن ایده آل C (V_C) عمود بر بردار V_R خواهند بود. بردار V_L به علت تقدم فاز نسبت به جریان در جهت مثبت و بردار V_C به علت تأخیر فاز نسبت به جریان در جهت منفی رسم می شوند.



شکل ۲

در عمل القاگرها و خازن ها ایده آل نبوده و دارای مقاومت اهمی هستند. بنابراین بردار V_L و بردار V_C بر بردار V_R عمود نیستند. در این حالت با استفاده از خط کش و پرگار شکل زیر را رسم می کنیم. اختلاف پتانسیل مقاومت اهمی القاگر، با تصویر کردن V_L در راستای افق بدست می آید. اختلاف پتانسیل ناشی از القا نیز با تصویر کردن V_L در راستای قائم بدست می آید.



شکل ۳

وسایل آزمایش

منبع تغذیه، جریان متناوب، القاگر، مقاومت، خازن، ولت‌متر، سیم رابط.

روش آزمایش

بررسی مدار RL

- مدار آزمایش را که شامل مقاومت R و القاگر L به صورت سری است، به منبع تغذیه متناوب وصل کنید (دقت کنید قبل از روشن کردن منبع تغذیه، ولتاژ آن روی صفر باشد تا دستگاه آسیب نبیند و ولتاژ نیز به آرامی افزایش یابد).
- ولتاژ منبع تغذیه را روی مقدار ثابتی در بازه ۳۰-۱۵ ولت تنظیم کنید.
- اختلاف پتانسیل V_L ، V_R و اختلاف پتانسیل دو سر مدار V_Z و جریان مدار را اندازه‌گیری کرده سپس در جدول ۱ ثبت کنید.
- نموداربرداری ولتاژها را رسم کنید و با استفاده از آن، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ دو سر مدار V_Z را بدست آورید.
- آیا V_L بر V_R عمود است؟ توضیح دهید. با استفاده از نمودار برداری، مقاومت اهمی القاگر را بدست آورید.
- امپدانس مدار Z را به دست آورید و با استفاده از آن ضریب خودالقایی القاگر را محاسبه کنید (فرکانس برق شهر ۵۰ هرتز است).

جدول ۱

V_R (V)	V_L (V)	V_Z (V)	I (mA)

بررسی مدار RC

- مدار آزمایش را که شامل مقاومت R و خازن C به صورت سری است، به منبع تغذیه متناوب وصل کنید (دقت کنید قبل از روشن کردن منبع تغذیه، ولتاژ آن روی صفر باشد تا دستگاه آسیب نبیند و ولتاژ نیز به آرامی افزایش یابد).
- ولتاژ منبع تغذیه را روی مقدار ثابتی در بازه ۳۰-۱۵ ولت تنظیم کنید.
- اختلاف پتانسیل V_C ، V_R و اختلاف پتانسیل دو سر مدار V_Z و جریان مدار را اندازه‌گیری کرده سپس در جدول ۲ ثبت کنید.

- نموداربرداری ولتاژها را رسم کنید و با استفاده از آن، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ دو سر مدار V_Z را بدست آورید. آیا V_C بر V_R عمود است؟ توضیح دهید.
- امپدانس مدار Z را به دست آورید و با استفاده از آن ظرفیت خازن را محاسبه کنید (فرکانس برق شهر ۵۰ هرتز است).

جدول ۲

V_R (V)	V_C (V)	V_Z (V)	I (mA)

بررسی مدار RLC

- مدار آزمایش را که شامل مقاومت R ، القاگر L و خازن C به صورت سری است، به منبع تغذیه متناوب وصل کنید (دقت کنید قبل از روشن کردن منبع تغذیه، ولتاژ آن روی صفر باشد تا دستگاه آسیب نبیند و ولتاژ نیز به آرامی افزایش یابد).
- ولتاژ منبع تغذیه را روی مقدار ثابتی در بازه ۳۰-۱۵ ولت تنظیم کنید.
- اختلاف پتانسیل V_R ، V_L ، V_C ، V_{RL} و اختلاف پتانسیل دو سر مدار V_Z و جریان مدار را اندازه گیری کرده سپس در جدول ۳ ثبت کنید.
- نموداربرداری ولتاژها را رسم کنید و با استفاده از آن، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ دو سر مدار V_Z را بدست آورید.
- آیا V_L بر V_R عمود است؟ توضیح دهید. مقاومت اهمی سلف را به دست آورده و با مقدار به دست آمده در مدار RL مقایسه کنید. چرا نمی توان با این روش مقاومت اهمی خازن را بدست آورد؟
- با استفاده از V_Z و I اندازه گیری شده، امپدانس مدار Z را به دست آورید. همچنین با استفاده از ضریب خودالقایی القاگر و ظرفیت خازن که در مدار RL و مدار RC محاسبه شد، امپدانس مدار Z را محاسبه کنید و با نتیجه به دست آمده، مقایسه کنید (فرکانس برق شهر ۵۰ هرتز است).

جدول ۳

V_R (V)	V_L (V)	V_C (V)	V_{RL} (V)	V_Z (V)	I (mA)

آزمایش ۷

ترانسفورماتور

بررسی تجربی ترانسفورماتور و مقایسه با یک ترانسفورماتور ایده آل

تئوری آزمایش

توان متوسط در مدار جریان متناوب برابر است با: $P_{av} = \varepsilon_{rms} i_{rms} \cos \varphi$ که ε_{rms} جذر میانگین مربعی ε و i_{rms} جذر میانگین مربعی جریان مدار است. بازاء $\cos \varphi = 1$ ، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ صفر است و برای بدست آوردن یک توان معین می توان ε_{rms} و i_{rms} را به گونه ای انتخاب کرد که حاصلضرب آنها مقدار ثابتی باشد. بنابراین به وسیله ای نیاز داریم که با توجه به محدودیتهای فنی بتواند اختلاف پتانسیل مدار را کاهش یا افزایش دهد و همزمان حاصلضرب $\varepsilon_{rms} i_{rms}$ را ثابت نگه دارد. ترانسفورماتور جریان متناوب چنین وسیله ای است.

در مرکز تولید برق (نیروگاه) و در محل مصرف (منزل یا کارخانه) بنا به دلایل ایمنی بهتر است با ولتاژهای نسبتاً کم کار کنیم از طرف دیگر برای انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاه تا محل مصرف بهتر است که جریان کمترین مقدار ممکن باشد تا تلفات اهمی خطوط انتقال به حداقل برسد. از ترانسفورماتورهای افزایش دهنده برای افزایش ولتاژ مولدهای برق استفاده می شود، سپس انرژی را با این ولتاژ انتقال می دهند. در انتهای خط از ترانسفورماتورهای کاهنده ولتاژ استفاده کرده و اختلاف پتانسیل را تا حد قابل مصرف کاهش می دهند. قابل تغییر بودن ولتاژ به وسیله ترانسفورماتورها مهم ترین علت استفاده از آنها در صنعت است. در صنعت جوشکاری که حرارتی فوق العاده مورد نیاز است، باید مقدار جریان زیاد و ولتاژ نسبتاً کم باشد. در این مورد از ترانسفورماتور کاهنده استفاده می شود.

ساده ترین نوع ترانسفورماتور در شکل ۱ نشان داده شده است این ترانسفورماتور از دو سیم پیچ اولیه و ثانویه که بر روی یک هسته با خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی بالا (مانند آهن) پیچیده شده اند، تشکیل شده است. سیم پیچ اولیه با N_1 دور به منبع تغذیه متناوب با نیروی محرکه الکتریکی ε که از رابطه $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ بدست می آید، وصل شده است. سیم پیچ ثانویه با N_2 دور، تا زمانی که کلید S باز است در حالت مدار باز است و جریانی از آن عبور نمی کند. فرض می کنیم مقاومت سیم پیچهای اولیه و ثانویه و همچنین تلفات مغناطیسی در هسته آهنی قابل صرف نظر کردن است و سیم پیچ ثانویه در حالت مدار باز است. در این وضعیت سیم پیچ اولیه یک

^۱ برای مطالعه بیشتر به کتاب فیزیک هالیدی، فصل جریانهای متناوب مراجعه شود.

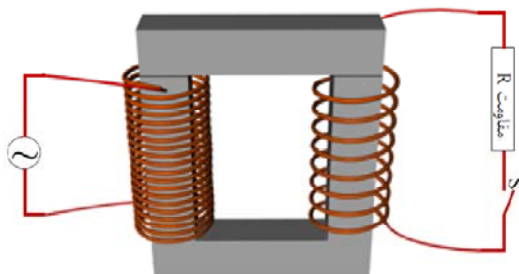
القار است و با عبور جریان متناوب از آن، شار مغناطیسی متناوب در هسته آهنی القا می‌شود. فرض کنید تمام این شار مغناطیسی از سیم‌پیچ ثانویه عبور می‌کند، با توجه به قانون القای فاراده نیروی محرکه الکتریکی هر دور، برای هر دور سیم‌پیچ اولیه و ثانویه یکسان است

$$\left(-\frac{d\Phi_B}{dt}\right)_{rms} = \frac{V_{1,rms}}{N_1} = \frac{V_{2,rms}}{N_2}$$

یا

$$V_{2,rms} = V_{1,rms} \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad (۱)$$

اگر $N_2 > N_1$ باشد، ترانسفورماتور افزایش دهنده و اگر $N_2 < N_1$ باشد ترانسفورماتور کاهش دهنده است.



شکل ۱

وقتی کلید S بسته می‌شود از مدار ثانویه جریان عبور می‌کند. این جریان شار مغناطیسی متناوب خود را در هسته آهنی القا می‌کند و این شار با توجه به قانون فاراده و قانون لنز یک نیروی محرکه الکتریکی مخالف در سیم‌پیچ اولیه ایجاد می‌کند. بنابراین هر دو سیم‌پیچ به صورت القار متقابل کاملاً جفت شده عمل می‌کنند. به علت ثابت بودن نیروی محرکه الکتریکی سیم‌پیچ اولیه، جریان در سیم‌پیچ اولیه به صورتی تغییر می‌کند که نیروی محرکه الکتریکی مخالف تولید شده به وسیله سیم‌پیچ ثانویه در آن را، خنثی کند. بویژه در یک ترانسفورماتور ایده‌آل اختلاف فاز بین جریان و اختلاف پتانسیل به سمت صفر میل کرده و در نتیجه ضریب توان $\cos \phi$ به سمت یک میل می‌کند. بنابراین برای ترانسفورماتور ایده‌آل

$$V_{1,rms} I_{1,rms} = V_{2,rms} I_{2,rms} \quad (۲)$$

یعنی توان داده شده بوسیله مولد به سیم‌پیچ اولیه با توان مصرف شده در بار مقاومتی سیم‌پیچ ثانویه برابر است. از ترکیب معادله‌های (۱) و (۲) نتیجه می‌شود:

$$\frac{I_{1,rms}}{I_{2,rms}} = \frac{N_2}{N_1}$$

یعنی نسبت جریان‌ها به نسبت عکس تعداد حلقه‌هاست.

تلفات در ترانسفورماتور

ترانسفورماتورها در عمل دارای تلفات هستند یعنی توان خروجی برابر توان ورودی نیست. بازده ترانسفورماتور (R) را می‌توان به وسیله اندازه‌گیری توان ورودی و خروجی بدست آورد:

$$R = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}}$$

تلفات در یک ترانسفورماتور از دو قسمت تشکیل شده است، تلفات در هسته آهن و تلفات در سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچ ثانویه (تلفات مس).

تلفات در هسته آهن از سه عامل زیر ناشی می‌شود:

تلفات هیستریزیس^۲: تلفاتی است که در اثر کاهش و افزایش میدان مغناطیسی در هسته به وجود می‌آید. جریانی که از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور عبور می‌کند متناوب است بنابراین با افزایش جریان، میدان مغناطیسی در یک جهت معین در هسته به وجود می‌آید و وقتی جریان کاهش می‌یابد میدان مغناطیسی نیز در جهت ذکر شده کاهش می‌یابد. با کاهش جریان بازاء جریان صفر میدان مغناطیسی هسته صفر نمی‌شود. این مقدار باقی مانده را پسماند مغناطیسی می‌نامند. حذف پسماند مغناطیسی همواره با از دست دادن مقداری انرژی همراه است. تلفات حاصل از پسماند مغناطیسی به بسامد جریان بستگی دارد و با افزایش بسامد جریان تلفات هیستریزیس نیز افزایش می‌یابد. با انتخاب جنس هسته ترانسفورماتور از آلیاژ مناسب آهن (آهن و چهار درصد سیلیس) می‌توان تلفات هیستریزیس را کاهش داد.

تلفات جریان فوکو: با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور، شار مغناطیسی در هسته به طور متناوب تغییر می‌کند. طبق قانون لنز، جریانی به نام جریان فوکو در هسته ایجاد می‌شود که با عامل تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند و باعث کاهش شار مغناطیسی می‌شود، در نتیجه توان خروجی ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. جریان فوکو همچنین باعث گرم شدن هسته می‌شود. اندازه جریان فوکو بستگی به مقاومت الکتریکی هسته دارد، بنابراین برای کاهش تلفات حاصل از جریان فوکو، هسته را از آلیاژ مناسب انتخاب کرده و آن را از ورقه‌هایی که نسبت به همدیگر عایق هستند می‌سازند. تلفات حاصل از جریان فوکو همچنین به بسامد جریانی که از سیم‌پیچ اولیه عبور می‌کند، بستگی دارد و متناسب با مجذور بسامد جریان است.

تلفات پراکندگی شار مغناطیسی: اگر در مسیر شار مغناطیسی یک شکستگی وجود داشته یا سطح مقطع هسته کوچک باشد، مقداری از شار مغناطیسی از هسته ترانسفورماتور خارج می‌شود، این شار پراکنده شده، از سیم‌پیچ ثانویه نخواهد گذشت و باعث کاهش توان می‌گردد.

² Hysteresis

تلفات مس: به علت مقاومت اهمی در سیم پیچ های اولیه و ثانویه، مقداری از انرژی به صورت حرارت در سیم پیچ ها تلف می شود. با کاهش مقاومت الکتریکی سیم پیچ ها تلفات مس را می توان کاهش داد.

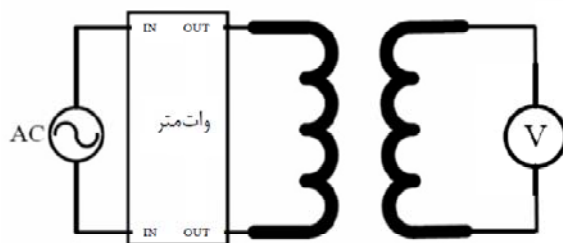
وسایل آزمایش

منبع تغذیه متناوب، هسته آهنی U شکل، سیم پیچ (دو عدد)، رنوستا، وات متر (دو عدد)، ولت متر، سیم رابط.

روش آزمایش

اندازه گیری جریان، توان و ولتاژ در وضعیتی که در مدار سیم پیچ ثانویه مصرف کننده نباشد

- مدار آزمایش را مطابق شکل ۲ ببندید (دقت کنید قبل از روشن کردن منبع تغذیه، ولتاژ آن روی صفر باشد تا دستگاه آسیب نبیند و ولتاژ نیز به آرامی افزایش یابد).
- ولتاژ سیم پیچ اولیه را در بازه ۵۰-۱۵ ولت تغییر دهید و جریان سیم پیچ اولیه، توان ورودی، ولتاژ سیم پیچ ثانویه را اندازه گیری کرده، در جدول ۱ ثبت کنید.



شکل ۲

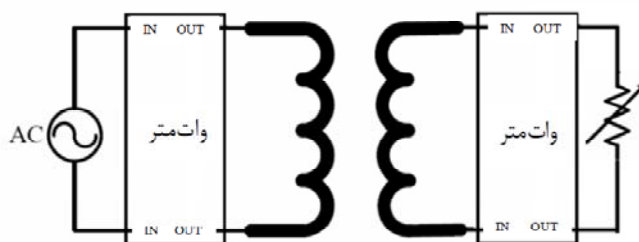
- منحنی نمایش تغییرات I_1 و P_1 را بر حسب V_1 رسم کرده و توضیح دهید.
- منحنی نمایش تغییرات V_2 بر حسب V_1 را با روش کمترین مربعات رسم کنید و با محاسبه شیب خط، درستی رابطه $V_2 = V_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$ را بررسی کنید.

جدول ۱

$N_1 = 250$ و $N_2 = 500$					
V_1 (V)					
I_1 (A)					
P_1 (W)					
V_2 (V)					

اندازه‌گیری جریان، توان و ولتاژ در وضعیتی که در مدار سیم‌پیچ ثانویه مصرف کننده باشد

- با قرار دادن رثوستا در مدار سیم‌پیچ ثانویه، مدار آزمایش را مطابق شکل ۳ ببندید.
- با تغییر مقاومت رثوستا جریان سیم‌پیچ ثانویه را در بازه صفر تا یک آمپر تغییر دهید و بازاء هر جریان P_2 ، I_1 و P_1 را اندازه‌گیری کرده و در جدول ۲ ثبت کنید.
- منحنی نمایش تغییرات I_1 بر حسب I_2 را با روش کمترین مربعات رسم کنید و با محاسبه شیب خط، درستی رابطه $I_1 = I_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)$ را بررسی کنید.
- اختلاف توان‌های اندازه‌گیری شده P_1 و P_2 مربوط به چه نوع تلفاتی در ترانسفورماتور هستند؟ توضیح دهید.



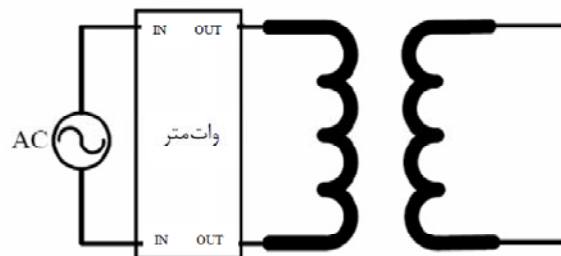
شکل ۳

جدول ۲

$N_1 = 500$ و $N_2 = 250$ و $V_1 = 50$ (V)					
I_2 (A)					
P_2 (W)					
I_1 (A)					
P_1 (W)					

سیم‌پیچ ثانویه در وضعیت اتصال باز

- مدار آزمایش را مطابق شکل ۴ ببندید (سیم‌پیچ ثانویه در وضعیت مدار باز است).
- جریان سیم‌پیچ اولیه و توان ورودی را اندازه‌گیری کرده، در جدول ۳ ثبت کنید.



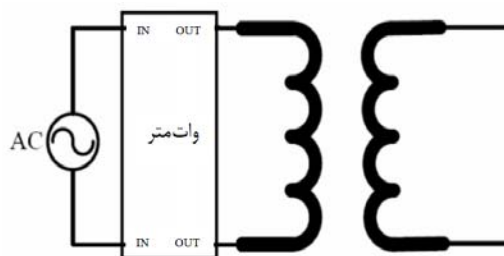
شکل ۴

جدول ۳

$N_1 = 500$ و $N_2 = 250$ و $V_1 = 50$ (V)	
$I_1 =$ (A)	$P_1 =$ (W)

سیم پیچ ثانویه در وضعیت اتصال کوتاه

- ولتاژ منبع تغذیه را روی صفر تنظیم کرده و دو انتهای سیم پیچ ثانویه را به هم وصل کنید (شکل ۵).
- با تغییر ولتاژ منبع تغذیه I_1 را برابر با I_1 آخرین ستون جدول ۲ تنظیم کرده و جدول ۴ را کامل کنید.
- آیا مجموع توانهای اندازه گیری شده در حالت اتصال باز و اتصال کوتاه (جدول ۳ و جدول ۴)، با اختلاف توان ورودی و خروجی در آخرین ستون جدول ۲، برابر است؟ توضیح دهید.



شکل ۵

جدول ۴

$N_1 = 500$ و $N_2 = 250$			
$V_1 =$ (V)	$I_1 =$ (A)	$P_1 =$ (W)	

آزمایش ۸

بررسی ظرفیت خازن و اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک

آموزش کار با اسیلوسکوپ و بررسی رابطه $C = K\epsilon_0 A/d$.

تئوری آزمایش

اگر یک خازن در مداری با اختلاف پتانسیل متناوب $V = V_m \cos \omega t$ قرار داده شود، صفحات خازن به طور متناوب دارای بار مثبت و منفی می‌شوند.

$$q = CV_m \cos \omega t \quad (1)$$

شدت جریان حاصل از این تغییرات بار برابر است با:

$$I = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$I_m = V_m/X_C \quad X_C = 1/C\omega$$

ولتاژ مؤثر V_e و جریان مؤثر I_e مدار از رابطه‌های $V_e = V_m/\sqrt{2}$ و $I_e = I_m/\sqrt{2}$ به دست می‌آیند. بنابراین رابطه بین ولتاژ و جریان مؤثر مدار نیز برابر است با:

$$I_e = V_e/X_C \quad X_C = 1/C\omega \quad (3)$$

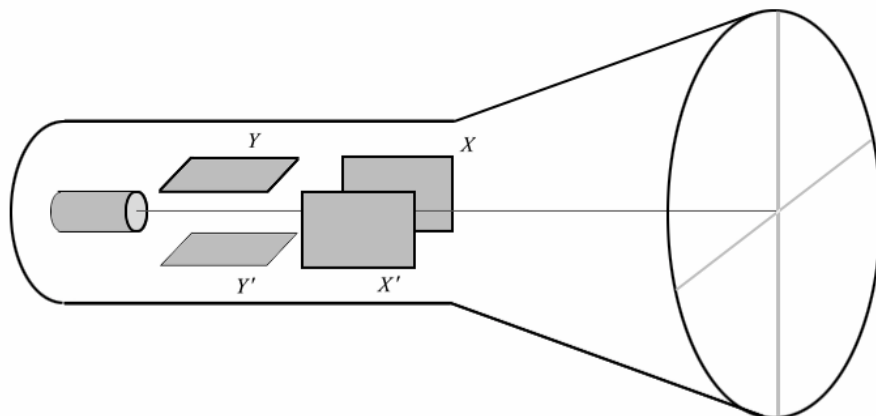
بازاء یک فرکانس مشخص با استفاده از رابطه (۳) و اندازه‌گیری V_e و I_e می‌توان ظرفیت خازن را محاسبه کرده و از رابطه $C = K\epsilon_0 A/d$ وابستگی ظرفیت خازن به فاصله صفحات و جنس عایق بین صفحات (دی‌الکتریک) را بررسی کرد.

وسایل آزمایش

خازن تخت با فاصله قابل تنظیم، دی‌الکتریک، نوسان‌ساز (اسیلاتور)، اسیلوسکوپ، آمپرتر، سیم رابط.

راهنمای استفاده از اسیلوسکوپ

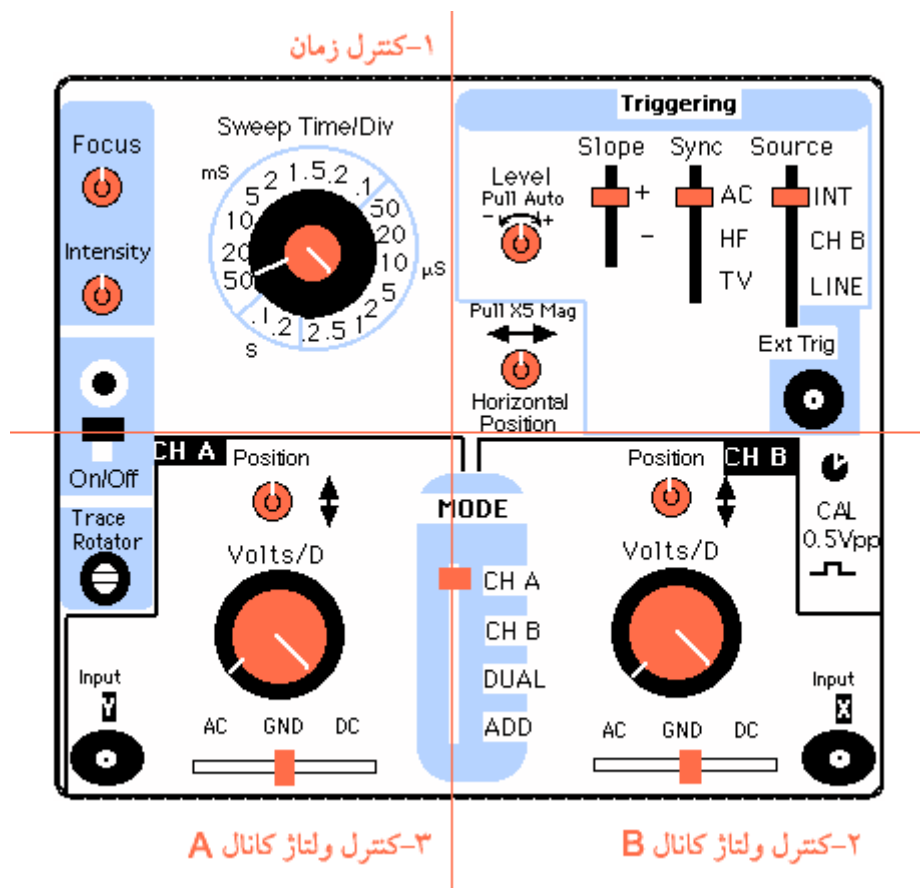
اسیلوسکوپ یا نوسان‌نما وسیله‌ای برای نمایش دو بعدی موج‌های متغیر با زمان است. محور افقی، زمان و محور عمودی، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار را نشان می‌دهد. علاوه بر اندازه‌گیری دامنه از اسیلوسکوپ برای اندازه‌گیری فرکانس موج، اختلاف فاز و مشاهده برهم‌نهی دو موج نیز می‌توان استفاده کرد. قسمت اصلی یک اسیلوسکوپ آنالوگ لامپ آن است که اجزاء اساسی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این لامپ، الکترون‌های ساطع شده که اشعه کاتدی را تشکیل می‌دهند، توسط قسمتی به نام تفنگ الکترونی ایجاد می‌شوند. تفنگ الکترونی شامل یک کاند ملتهب، که الکترون‌ها بر اثر حرارت از آن ساطع می‌شوند و همچنین تعدادی دیافراگم



شکل ۱

برای شتاب دادن و متمرکز کردن اشعه مزبور است. دیافراگم‌های یاد شده، اشعه را بر روی صفحه فلورسانس انتهای لامپ به صورت یک نقطه متمرکز می‌کنند. اختلاف پتانسیل لازم بین کاتد و الکتروود انتهایی، معمولاً حدود چند هزار ولت است و می‌توان پتانسیل الکتروودهای مابین آنها را تنظیم کرد. پتانسیل الکتروودی که بلافاصله بعد از کاتد قرار دارد، روشنی نقطه را تنظیم می‌کند و پتانسیل الکتروود دوم برای متمرکز کردن نقطه روشن به کار می‌رود. بین تفنگ الکترونی و پرده فلورسانس، دو جفت صفحه موازی قرار دارد که شعاع الکترونی از بین آنها عبور می‌کند. یک جفت از صفحات، افقی و دیگری قائم بوده و به این ترتیب می‌توان با اعمال یک اختلاف پتانسیل بر آنها، شعاع الکترونی را در جهت افقی و عمودی تغییر مکان داد.

اگر چه کلیدهای کنترلی اسیلوسکوپ‌های مختلف، کمی با هم فرق می‌کنند ولی در مجموع در اسیلوسکوپ‌های آنالوگ تعدادی کلید یکسان وجود دارند که در ظاهر تفاوت‌هایی بین این کلیدها است ولی در نهایت وظیفه آنها در مدل‌های مختلف یکسان است. در شکل ۲ یکی از ساده‌ترین مدل‌ها را می‌بینید. این شکل به چهار قسمت تقسیم شده است. در ادامه تعدادی از کلیدها توضیح داده می‌شود.



شکل ۲

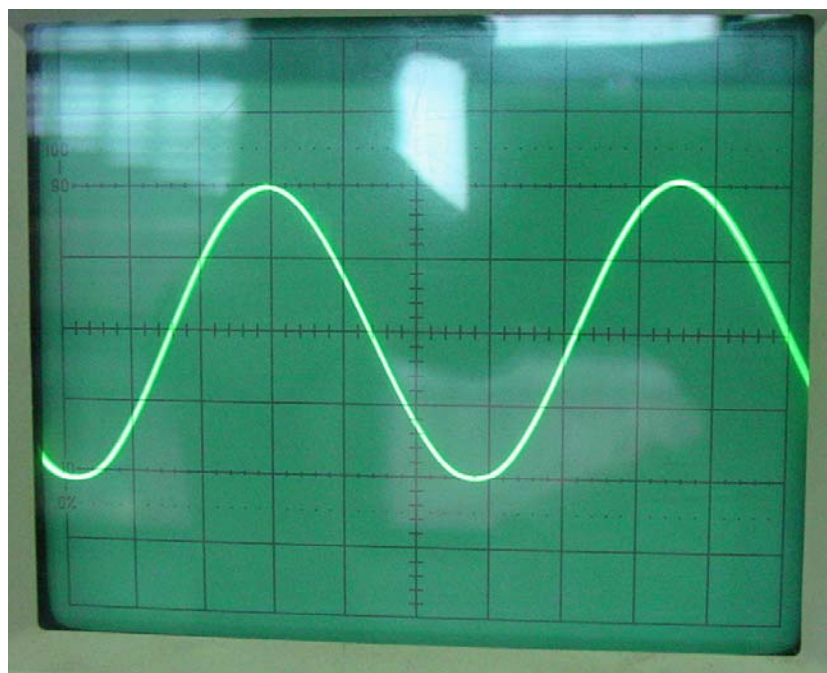
• انتخاب ورودی/اسیلوسکوپ: کلید *MODE*

در مرز مشترک قسمت ۲ و ۳ بسته به این که بخواهیم از کدام یک از ورودی‌های اسیلوسکوپ استفاده کنیم، می‌توانیم کلید *MODE* را تنظیم کنیم، که از بالا به پایین: کانال یک *CH A*، کانال دو *CH B*، نمایش دو موج همزمان *DUAL* و در وضعیت *ADD*، جمع ریاضی دو موج است. در بعضی از اسیلوسکوپ‌ها همراه با وضعیت *DUAL* از کلید *CHOP-ALT* استفاده می‌شود. تفاوت *ALT* و *CHOP* در این است که *ALT* موج یک کانال را به طور کامل و بسیار سریع نشان داده و بعد موج کانال دیگر را نشان می‌دهد. اما این تغییر آنقدر سریع است که ما آن را حس نمی‌کنیم. وضعیت *CHOP* به صورت انتخابی بریده‌هایی از یک موج و بریده‌هایی از موج دیگر را به طور همزمان نشان می‌دهد.

• کنترل زمان

همان‌طور که در شکل ۳ می‌بینید صفحه نمایش اسیلوسکوپ با واحدهایی مدرج شده است، که از محور افقی برای تعیین فرکانس موج استفاده می‌شود. فرض کنید یک موج به ورودی اسیلوسکوپ وارد شده (می‌توان اسیلوسکوپ را به یک نوسان‌ساز وصل کرد) و می‌خواهیم فرکانس آن را تعیین کنیم. اول باید کلید

TIME/DIV را طوری تنظیم کنیم که یک موج ثابت با حداقل یک دوره تناوب بر روی صفحه نمایش داده شود، بعد عددی که کلید TIME/DIV مقابل آن قرار دارد را در تعداد خانه‌هایی که یک دوره تناوب موج در آن قرار می‌گیرد ضرب کنیم، به این ترتیب دوره تناوب به دست می‌آید و با معکوس کردن آن، فرکانس موج تعیین می‌شود. مثلاً فرض کنید در شکل ۳ اگر کلید TIME/DIV روی عدد 0.2 در قسمت ms باشد، یعنی هر واحد افقی 0.2 میلی‌ثانیه است. موج در یک دوره تناوب در $5/6$ خانه قرار گرفته است، پس $5/6$ را در 0.2 میلی‌ثانیه ضرب می‌کنیم بنابراین دوره تناوب این موج $1/12$ میلی‌ثانیه است و در نتیجه فرکانس آن 893 هرتز است. وضعیت X-Y برای حذف زمان بین دو کانال استفاده می‌شود و در واقع آنچه بر روی اسیلوسکوپ نشان داده می‌شود، برهم‌نهی دو موج است که محور عمودی معرف تغییرات کانال Y و محور افقی نمایش تغییرات کانال X است در بعضی از اسیلوسکوپ‌ها تغییر وضعیت به X-Y بوسیله کلید TIME/DIV انجام می‌شود.



شکل ۳

• کنترل ولتاژ یا دامنه

روش خواندن دامنه موج مثل روش خواندن زمان است با این تفاوت که باید تعداد خانه‌های عمودی که موج اشغال می‌کند در عددی که کلید VOLTS/DIV تنظیم شده است ضرب شود. برای موج شکل ۳ اگر بخواهیم ولتاژ بیشینه تا کمینه را اندازه بگیریم، با فرض این که VOLTS/DIV بر روی عدد ۱ باشد از بیشینه تا کمینه موج ۴ خانه را اشغال کرده بنابراین ولتاژ بیشینه تا کمینه ۴ ولت است. این تنظیمات برای هر کانال ورودی به طور جداگانه انجام می‌شود و دامنه موج هر کانال باید بر اساس مقیاس خودش خوانده شود.

در اکثر اسیلوسکوپ‌ها کنار کلید TIME/DIV و روی کلید VOLTS/DIV کلید کوچکتري وجود دارد که برای کالیبره کردن اسیلوسکوپ استفاده می‌شود. همیشه قبل از استفاده از این کلیدها، کلید کوچکتري را تا انتها در جهت عقربه های ساعت می‌چرخانیم در غیر این صورت اندازه‌گیری صحیح نخواهد بود.

• انتخاب وضعیت‌های AC، GND، DC

این کلید سه حالتی که معمولاً زیر کلید VOLTS/DIV قرار دارد این امکان را می‌دهد که نوع خروجی مورد نظر را انتخاب کنیم. اگر کلید در وضعیت AC قرار داشته باشد تنها مؤلفه AC موج نمایش داده خواهد شد و مقدار DC یا جبران موج حذف می‌شود. وضعیت GND ورودی را به زمین اتصال کوتاه می‌کند و امکان تنظیم عمودی سطح صفر را می‌دهد. وضعیت DC که موج را دست نخورده و بدون تغییر نشان می‌دهد، شامل DC و AC موج خواهد بود.

همیشه در ابتدای کار باید از تنظیم بودن وضعیت صفر اسیلوسکوپ مطمئن شوید به این ترتیب که کلید را در حالت GND قرار داده و با کلید Position خط افقی را بر روی صفر قرار دهید. این کار را برای هر کانال باید به طور جداگانه انجام دهید. استفاده از وضعیت AC باعث حذف مقدار DC موج می‌شود ولی در فرکانس‌های پایین باعث اعوجاج و به هم‌ریختگی شکل موج می‌شود و دلیل این مسئله استفاده از خازن‌های ظرفیت بالایی است که برای حذف مقدار DC موج در اسیلوسکوپ وجود دارد. استفاده مفید وضعیت AC برای اندازه‌گیری ریب‌های بسیار کوچک موجود بر روی ولتاژهای به ظاهر DC است، که با حذف مقدار DC اندازه‌گیری دقیق‌تر خواهد بود.

آشنائی مختصر با نوسان‌ساز (اسیلاتور)

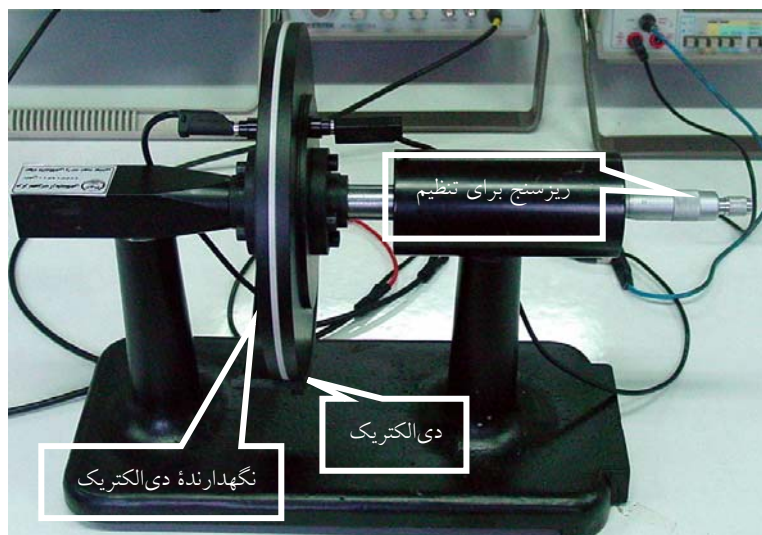
نوسان‌ساز، یک منبع تغذیه AC است که برق متناوب با دامنه ولتاژ و فرکانس‌های مختلف تولید می‌کند. شکل ۴ یک نوسان‌ساز آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، دامنه ولتاژ را می‌توان با چرخاندن پیچ AMPL تغییر داد. برای تغییر فرکانس کافی است صفحه مدرج ۱ را چرخانده و روی عدد دلخواه قرار دهید و آن را در RANGE مورد نظر ضرب کنید.



شکل ۴

خازن با صفحه‌های مسطح

شکل ۵ یک خازن با صفحه‌های مسطح نشان می‌دهد که از دو صفحه آلومینیومی دایره‌ای شکل به شعاع ۱۰ سانتیمتر تشکیل شده و بطور عمودی مقابل هم قرار دارند. صفحه سمت راست در شکل متحرک بوده و به کمک ریزسنجی که به پشت آن متصل است می‌توان فاصله صفحات را با دقت بالایی تنظیم کرد. لازم به ذکر است که ریزسنج‌ها خطای صفر دارند، برای بدست آوردن خطای صفر ریزسنج ابتدا دی‌الکتریک را که ضخامت آن ۳ میلیمتر است بین صفحات خازن قرار دهید سپس ریزسنج را به آرامی ببندید، جایی که ریز سنج اندکی سفت شد، عدد روی آن را بخوانید (ابتدا ریزسنج را سفت نبندید و یا سریع نیچانید) اختلاف این عدد با ضخامت دی‌الکتریک صفر ریزسنج است.



شکل ۵

روش آزمایش

اندازه‌گیری خطای نوسان‌ساز

همانطور که ذکر شد روی نوسان‌ساز صفحه مدرجی برای تنظیم فرکانس قرار دارد ولی تنظیم فرکانس با استفاده از آن دقت کافی را نخواهد داشت. بنابراین استفاده از اسیلوسکوپ برای تعیین فرکانس مناسب‌تر است. در این قسمت از آزمایش با چگونگی تعیین فرکانس با استفاده از اسیلوسکوپ آشنا شده و میزان خطای فرکانس نوسان‌ساز را محاسبه می‌کنید.

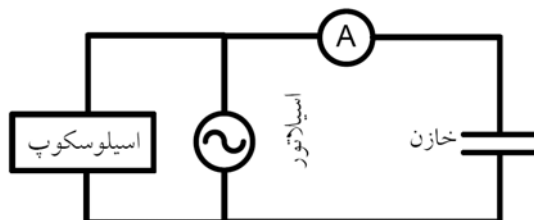
- برای کالیبره کردن اسیلوسکوپ کلیدهای Variable را که به صورت کلیدی کوچکتر بر روی کلید VOLTS/DIV و کنار کلید TIME/DIV وجود دارند تا انتها در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید.
- کلید سه حالت AC GND DC را برای هر دو کانال در حالت GND قرار داده و با تنظیم‌کننده Position محور افقی را روی صفر قرار دهید. به وسیله تنظیم‌کننده‌های Intensity و Focus به ترتیب شدت نور و نازکی موج را تنظیم کنید و بعد از تنظیم زمین، کلید سه حالت را برای هر دو کانال در وضعیت AC قرار دهید.
- نوسان‌ساز را به اسیلوسکوپ وصل کنید (دقت کنید که زمین اسیلوسکوپ به زمین نوسان‌ساز وصل شود). فرکانس نوسان‌ساز را روی 1 kHz تنظیم کنید و کلید TIME/DIV را روی 0.1 ms قرار دهید. اگر موجی که روی صفحه نمایش داده می‌شود سریع حرکت می‌کند، در قسمت Trigger با تنظیم Level آن را ثابت کنید. فرض کنید m دوره تناوب کامل روی صفحه اسیلوسکوپ نمایش داده شود و تعداد خانه‌های افقی روی صفحه اسیلوسکوپ برای m دوره تناوب n باشد و کلید TIME/DIV روی عدد 0.1 ms تنظیم شده باشد، زمان تناوب موج برابر است با $\frac{n \times 0.1}{m}$ و فرکانس برابر $\frac{m}{n \times 0.1}$ خواهد بود. فرکانس تعیین شده را در جدول ۱ ثبت کرده و خطای نوسان‌ساز را تعیین کنید. آزمایش را برای فرکانس‌های دیگر تکرار نموده و نتایج را در جدول ۱ ثبت کنید.

جدول ۱

فرکانس نوسان ساز		10 kHz	15 kHz	20 kHz
فرکانس اندازه گیری شده بوسیله اسیلوسکوپ در وضعیت های مختلف TIME/DIV	0.1 ms	فرکانس : خطا :	فرکانس : خطا :	فرکانس : خطا :
	50 μ s	فرکانس : خطا :	فرکانس : خطا :	فرکانس : خطا :
	20 μ s	فرکانس : خطا :	فرکانس : خطا :	فرکانس : خطا :

تعیین ضریب دی/الکتریک

- مدار را مطابق شکل ۶ ببندید (دقت کنید که زمین اسیلوسکوپ به زمین نوسان ساز و آمپر متر وصل شود).
- تنظیم های اولیه اسیلوسکوپ را انجام داده و قبل از روشن کردن نوسان ساز، مدار را به دستیار آزمایشگاه نشان دهید.
- به کمک دی/الکتریک پلکسی، مطابق با روشی که در بالا ذکر شد صفر ریزسنج را تعیین کنید.
- نوسان ساز را روشن کرده چند ثانیه صبر کنید و سپس دامنه ولتاژ دو سر خازن را روی ۴ ولت تنظیم کنید.
- فرکانس نوسان ساز را مطابق جدول ۲ تغییر دهید و هر بار شدت جریان را اندازه گیری کنید و جدول ۲ را کامل کنید.
- نمودار جریان بر حسب فرکانس را رسم کرده و با استفاده از آن ظرفیت خازن را حساب کرده و ثابت دی-الکتریک را محاسبه کنید.



شکل ۶

جدول ۲

$f(\text{kHz})$	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
$I(\text{A})$												

تعیین ضریب گذردهی هوا

- نوسان ساز را خاموش کنید، ورقه پلکسی را از بین صفحات خازن خارج کرده و فاصله صفحات را به اندازه ۳ میلی متر تنظیم کنید.
- مدار را مطابق شکل ۶ ببندید (دقت کنید که زمین اسیلوسکوپ به زمین نوسان ساز و آمپر متر وصل شود).
- تنظیم های اولیه اسیلوسکوپ را انجام دهید.
- نوسان ساز را روشن کرده چند ثانیه صبر کنید و سپس دامنه ولتاژ دو سر خازن را روی ۴ ولت تنظیم کنید.
- فرکانس نوسان ساز را مطابق جدول ۳ تغییر دهید و هر بار شدت جریان را اندازه گیری کنید و جدول ۳ را کامل کنید.
- نمودار جریان بر حسب فرکانس را رسم کرده و با استفاده از آن ظرفیت خازن را حساب کنید. ضریب گذردهی هوا را محاسبه کرده و با ضریب گذردهی خلاء مقایسه کنید.

جدول ۳

$f(\text{kHz})$	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
$I(\text{A})$												

بستگی ظرفیت خازن مسطح به فاصله صفحات

- مدار را مطابق شکل ۶ ببندید (دقت کنید که زمین اسیلوسکوپ به زمین نوسان ساز و آمپر متر وصل شود).
- تنظیم های اولیه اسیلوسکوپ را انجام دهید.
- فرکانس اسیلاتور را روی $f=15 \text{ kHz}$ تنظیم کنید.

- فاصله بین صفحات خازن را تغییر داده، هر دفعه شدت جریان را اندازه‌گیری کنید و جدول ۴ را تکمیل کنید.
- نمودار جریان بر حسب عکس فاصله ($1/d$) را رسم نموده و به کمک آن رابطه ظرفیت خازن با فاصله صفحات را نتیجه‌گیری کنید.

جدول ۴

$d(\text{mm})$	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
$I(\text{A})$												

پرسش‌ها

- ۱- چگونه می‌توان با استفاده از اسیلوسکوپ جریان را اندازه‌گیری کرد؟
- ۲- در اندازه‌گیری ولتاژ در مدار شکل ۶ اگر سر منفی اسیلوسکوپ بین آمپر متر و خازن بوده و سر مثبت به صفحه دیگر خازن وصل شود، چرا آمپر متر جریانی نشان نمی‌دهد؟
- ۳- خطاهای آزمایش را بررسی کرده و دلایل آن را ذکر کنید.

آزمایش ۹

مشاهده منحنی‌های لیسازو و مطالعه مدارها با جریان متناوب

استفاده از اسیلوسکوپ برای مشاهده منحنی‌های لیسازو و مطالعه مدارهای جریان متناوب.

تئوری آزمایش

منحنی‌های لیسازو و اندازه‌گیری اختلاف فاز

منحنی‌های لیسازو تصاویری هستند که در آنها یک موج بر حسب موج دیگر رسم می‌شود، طوری که متغیر زمان از معادله‌های شکل موج حذف شود. به کمک این تصاویر، می‌توان اختلاف فاز میان دو موج سینوسی هم‌فرکانس و نیز نسبت فرکانسی دو موج سینوسی را به دست آورد.

دو موج سینوسی $x = x_0 \sin \omega t$ و $y = y_0 \sin(\omega t + \varphi)$ را در نظر می‌گیریم و برای آن که حرکت نقطه‌ای تحت تاثیر این دو موج را بررسی کنیم حالت‌های گوناگونی را در نظر می‌گیریم:

- دو موج هم فاز باشند، یعنی $\varphi = 0$

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t \\ y = y_0 \sin \omega t \end{cases} \Rightarrow y = \frac{y_0}{x_0} x$$

که نشان دهنده یک خط راست است، با این تفاوت که x و y هر دو محدود هستند و در حقیقت یک پاره خط خواهیم داشت.

- دو موج دارای اختلاف فاز برابر $\pi/2$ باشند:

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t \\ y = y_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = y_0 \cos \omega t \end{cases}$$

با حذف زمان از معادله‌های بالا رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\left(\frac{x}{x_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 = 1$$

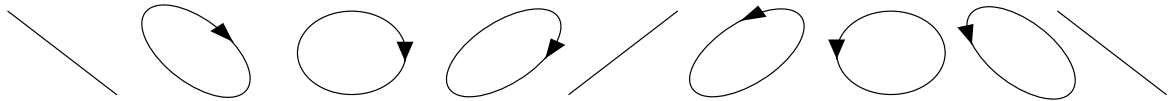
که نشان دهنده معادله یک بیضی است، که قطرهای آن در امتداد محورهای x و y می‌باشد (بیضی استاندارد). در همین حالت اگر دامنه دو موج با هم برابر باشد $x_0 = y_0 = a$ ، در این صورت تصویر پدید آمده، یک دایره به شعاع a خواهد بود.

- دو موج دارای اختلاف فاز $\varphi = \pi$ باشند:

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t \\ y = y_0 \sin(\omega t + \pi) = -y_0 \sin \omega t \end{cases} \Rightarrow y = -\frac{y_0}{x_0} x$$

که نشان دهنده‌ی یک پاره خط در ربع دوم و چهارم است.

در شکل ۱ تصویرهای گوناگون پدید آمده برای مقدارهای مختلف φ نشان داده شده است. نماد پیکان روی این نمودارها مربوط به جهت حرکت الکترون‌ها روی صفحه اسیلوسکوپ می‌باشد.



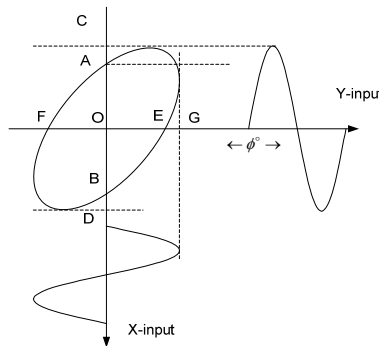
$$\varphi = -\pi, -\pi < \varphi < -\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} = \varphi, -\frac{\pi}{2} < \varphi < 0, \varphi = 0, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} < \varphi < \pi, \varphi = \pi$$

شکل ۱

• اختلاف فاز φ :

اکنون فرض می‌کنیم که دو موج دارای فرکانس برابر و اختلاف فاز آنها $0 < \varphi < \pi/2$ باشد، همان طور که دیدیم، تصویر پدید آمده از ترکیب دو موج، یک بیضی همانند شکل زیر است. این بیضی هنگامی محور y ها را قطع می‌کند که:

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t = 0 & \Rightarrow \omega t = k\pi \\ y = y_0 \sin(\omega t + \varphi) & \Rightarrow y = y_0 \sin(k\pi + \varphi) = \pm y_0 \sin \varphi \end{cases}$$



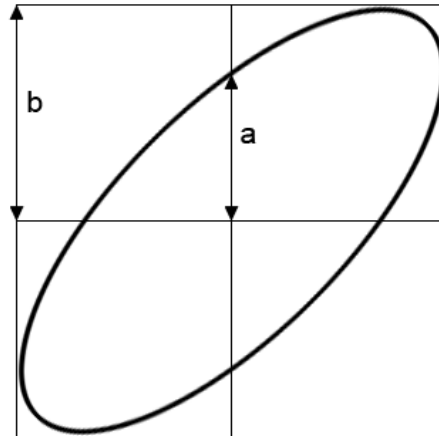
شکل ۲: نمایش بیضی پدید آمده از برهم نهی دو موج با اختلاف فاز $0 < \varphi < \pi/2$

به این ترتیب داریم:

$$y|_{x=0} = y_0 \sin \varphi \Rightarrow \varphi = \text{Arc sin} \left(\frac{y_{x=0}}{y_0} \right)$$

اگر a و b را به گونه‌ای تعریف کنیم که $y_{x=0} = a$ و $y_0 = b$ باشد (شکل ۳)، اختلاف فاز برابر است با:

$$\varphi = \text{Arc sin} \left(\frac{a}{b} \right)$$



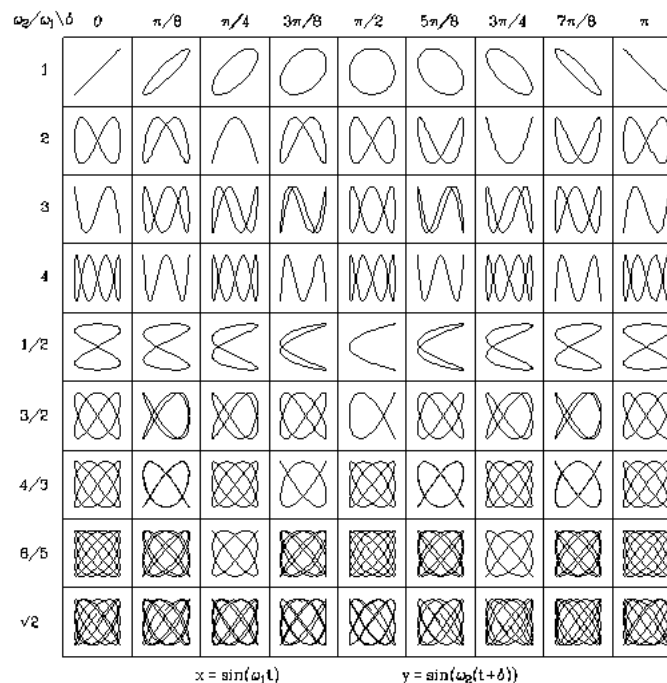
شکل ۳

برای دقت بیشتر می‌توان طول‌های $2a$ و $2b$ را بر روی صفحه اسیلوسکوپ اندازه‌گیری کرد.

اندازه‌گیری فرکانس مجهول

اگر f_x فرکانس یک موج سینوسی $x = x_0 \sin \omega_x t$ و f_y فرکانس موج سینوسی $y = y_0 \sin \omega_y t$ باشد، چنان چه موج x را به ورودی X و موج y را به ورودی Y اسیلوسکوپ بدهیم، تصویرهایی پدید می‌آید که در جهت محورهای مختصات دارای بیشینه‌هایی خواهند بود. همواره نسبت f_y به f_x برابر با نسبت تعداد نقطه‌های

بیشینه در امتداد محور افقی به تعداد نقطه‌های بیشینه در جهت محور قائم است، یعنی: $\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_H}{N_V}$.



شکل ۴: منحنی‌های لیسازو

بررسی مدار جریان متناوب شامل اجزاء مقاومت، خازن و القاگر
برای مطالعه تئوری مدار RLC به قسمت تئوری آزمایش ۶ مراجعه کنید.

وسایل آزمایش

اسیلوسکوپ، نوسان ساز (اسیلاتور)، منبع تغذیه با فرکانس مجهول، جعبه مقاومت، خازن، القاگر، سیم رابط.
برای آشنایی کار با اسیلوسکوپ به آزمایش ۸ مراجعه کنید.

روش آزمایش

اندازه گیری فرکانس مجهول با به کار بردن منحنی‌های لیسازو

برای اندازه‌گیری یک فرکانس مجهول، نوسان ساز را در وضعیت موج سینوسی قرار دهید و خروجی آن را به ورودی قائم اسیلوسکوپ وصل کنید (توجه کنید که زمین نوسان ساز به زمین اسیلوسکوپ وصل شود).
ورودی افقی اسیلوسکوپ را به یک منبع ولتاژ ۱۰ ولت (فرکانس مجهول) وصل کنید. برای دیدن منحنی‌های لیسازو در اسیلوسکوپ کلید (TIME/DIV) را در مد XY قرار دهید، سپس با تغییر دادن فرکانس نوسان ساز، وضعیتی پایدار از برهم‌نهی دو موج، پدید آورید که بر یکی از منحنی‌های لیسازو منطبق باشد. در این حالت با توجه به نسبت فرکانس موج‌های ورودی یکی از منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۴ را خواهیم داشت. با توضیحات ذکر شده در بخش اندازه‌گیری فرکانس مجهول، می‌توان فرکانس مجهول را اندازه گرفت.

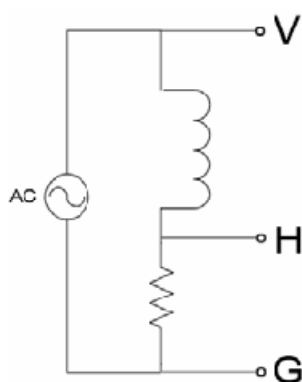
جدول ۱

فرکانس نوسان ساز	
$\frac{N_H}{N_V}$	
فرکانس مجهول	

تعیین ضریب خود/لقایی القاگر

- با استفاده از یک القاگر و مقاومت $R=3900 \Omega$ مدار را مطابق شکل ۵ ببندید. نقطه‌های H و G را به ورودی افقی و نقطه‌های V و G را به ورودی قائم وصل کنید که G معرف زمین اسیلوسکوپ است (توجه کنید که زمین نوسان ساز به زمین اسیلوسکوپ وصل شود).
- کلید (TIME/DIV) را در مد XY قرار دهید و کلید VOLTS/DIV را برای هر دو کانال روی عددی یکسان تنظیم کنید.

- کلید سه حالت AC GND DC را برای هر دو کانال در حالت GND قرار داده و با تنظیم کننده Position محور افقی و قائم، نقطه نورانی را در وسط صفحه قرار دهید و بعد از تنظیم زمین، کلید سه حالت را برای هر دو کانال در وضعیت AC قرار دهید.
- با تنظیم فرکانس مطابق جدول ۲ یک بیضی مشاهده می کنید.
- با تکرار آزمایش برای فرکانسهای مختلف و اندازه گیری a و b ، $\sin \varphi$ را محاسبه کرده و جدول ۲ را کامل کنید.
- منحنی نمایش تغییرات $\tan \varphi$ را بر حسب معکوس فرکانس رسم کنید و با استفاده از شیب خط ضریب خودالقایی القاگر را محاسبه کنید.



شکل ۵

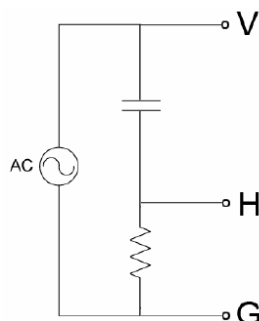
جدول ۲

f (kHz)	1	1.5	2	4	6
$\sin \varphi$					

تعیین ظرفیت خازن

- با استفاده از یک خازن و مقاومت $R=330 \Omega$ مدار را مطابق شکل ۶ ببندید. نقطه های H و G را به ورودی افقی و نقطه های V و G را به ورودی قائم وصل کنید که G معرف زمین اسیلوسکوپ است (توجه کنید که زمین نوسان ساز به زمین اسیلوسکوپ وصل شود).
- کلید (TIME/DIV) را در مد XY قرار دهید و کلید VOLTS/DIV را برای هر دو کانال روی عددی یکسان تنظیم کنید.

- کلید سه حالت DC AC GND را برای هر دو کانال در حالت GND قرار داده و با تنظیم کننده Position محور افقی و قائم، نقطه نورانی را در وسط صفحه قرار دهید و بعد از تنظیم زمین، کلید سه حالت را برای هر دو کانال در وضعیت AC قرار دهید.
- با تنظیم فرکانس مطابق جدول ۳ یک بیضی مشاهده می کنید.
- با تکرار آزمایش برای فرکانسهای مختلف و اندازه گیری a و b ، $\sin \varphi$ را محاسبه کرده و جدول ۳ را کامل کنید.
- منحنی نمایش تغییرات $\tan \varphi$ را بر حسب معکوس فرکانس رسم کنید و با استفاده از شیب خط ظرفیت خازن را محاسبه کنید.



شکل ۶

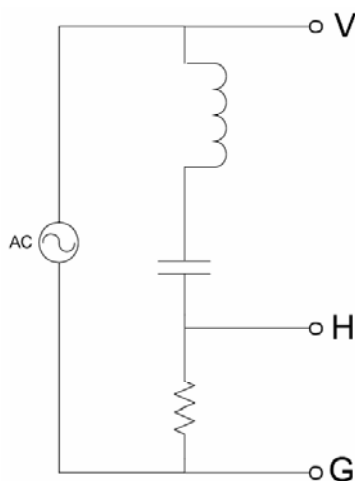
جدول ۳

f (Hz)	60	80	100	120	200
$\sin \varphi$					

مدار تشدید

- با استفاده از یک القاگر، خازن و مقاومت $R=3000 \Omega$ مدار را مطابق شکل ۷ ببندید. نقطه های H و G را به ورودی افقی و نقطه های V و G را به ورودی قائم وصل کنید که G معرف زمین اسیلوسکوپ است (توجه کنید که زمین نوسان ساز به زمین اسیلوسکوپ وصل شود).
- کلید (TIME/DIV) را در مد XY قرار دهید و کلید VOLTS/DIV را برای هر دو کانال روی عددی یکسان تنظیم کنید.
- کلید سه حالت DC AC GND را برای هر دو کانال در حالت GND قرار داده و با تنظیم کننده Position محور افقی و قائم، نقطه نورانی را در وسط صفحه قرار دهید و بعد از تنظیم زمین، کلید سه حالت را برای هر دو کانال در وضعیت AC قرار دهید.

- با تنظیم فرکانس یک بیضی مشاهده می کنید.
- فرکانس را تغییر دهید تا تشدید حاصل شود (تشدید زمانی اتفاق می افتد که بیضی به خط راست تبدیل شود).
- بازاء فرکانسهایی حول فرکانس تشدید، a و b را اندازه گیری کرده و $\sin \varphi$ را محاسبه کنید و جدول ۴ را کامل کنید.



شکل ۷

جدول ۴

f					
$\sin \varphi$			صفر		

- منحنی نمایش تغییرات $\tan \varphi$ را بر حسب فرکانس رسم کنید و روی منحنی قسمتی که مربوط به فرکانس تشدید است را مشخص کنید. درباره اختلاف فاز در قبل و بعد از فرکانس تشدید بحث کنید.
- ورودی قائم اسیلوسکوپ را قطع کنید و تغییرات ولتاژ دو سر مقاومت را بر حسب زمان روی صفحه اسیلوسکوپ مشاهده کنید.
- با تغییر فرکانس حول فرکانس تشدید، تغییرات دامنه ولتاژ دو سر مقاومت را مشاهده کنید و جدول ۵ را کامل کنید.
- منحنی نمایش تغییرات V_R را بر حسب فرکانس رسم کنید و روی منحنی نقطه ای که مربوط به فرکانس تشدید است را مشخص کنید.

جدول ۵

f			فرکانس تشدید		
V_R					

پرسش‌ها

۱- چرا هنگامی که مدار شامل یک القاگر و یک مقاومت به طور سری باشد، ولتاژ نسبت به جریان، تقدم فاز دارد؟

۲- چرا هنگامی که مدار شامل یک خازن و یک مقاومت به طور سری باشد، ولتاژ نسبت به جریان تأخیر فاز دارد؟

۳- فرکانس تشدید چه رابطه‌ای با پارامترهای R، L و C دارد؟ توضیح دهید.

جدول داده های آزمایش شماره ۱

جدول ۱

۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	I(mA)
				V(V)

جدول ۲ $I=200\text{mA}$

۱۰۰	۸۰	۵۰	۲۷	۱۰	l سانتی متر
					V ولت

جدول ۳ $I = 300\text{mA}$

e,f (۳)	c,d (۲)	a,b (۱)	شماره سیم
			d ^(mm) قطر
			V ولتاژ

جدول ۴ میلی آمپر $I=200$

کروم خالص i,j (۵)	گالوانیزه g,h (۴)	کروم نیکل e,f (۳)	جنس و شماره سیم
			V ولت

جدول داده های آزمایش شماره ۲

جدول ۲

I_{R_5}	I_{R_6}	I_{R_3}	I_{R_2}	I_{R_1}	جریان هر شاخه (mA)
					تئوری

$$V_1 = 6V$$

$$V_2 = 9V$$

جدول ۳

V_{R_5}	V_{R_6}	V_{R_3}	V_{R_2}	V_{R_1}	افت پتانسیل دو سر مقاومت (V)
					تئوری

جدول ۴

	$V_{Rx} (V)$
	$I_{Rx} (mA)$

جدول داده های آزمایش شماره ۳

جدول ۱ (نقاط هم پتانسیل)

پتانسیل (V)	مختصات نقاط	
۳	X	
	Y	
۵	X	
	Y	
۷	X	
	Y	
۹	X	
	Y	
۱۲	X	
	Y	

جدول ۲

X	
E	

جدول داده های آزمایش شماره ۴

جدول ۱

[illegible]

جدول داده های آزمایش شماره ۵

جدول ۱

جدول ۲

جدول ۳

$I_m = 2A$			$I_m = 2A$			$i = 4A$	
$i = 4A$			$L = 10\text{ cm}$			$L = 10\text{ cm}$	
$L(cm)$	$F(mN)$		$i(A)$	$F(mN)$		$I_m(A)$	$F(mN)$
1/25			0.5			0.5	
2/5			1			0.7	
5			1/5			0.9	
10			2			1/1	
			2/5			1/3	
			3			1/5	
			3/5			1/7	
		4		1/9			
				2			

جدول داده های آزمایش شماره ۶

جدول ۱

I	V_R	V_L	V_Z

جدول ۲

I	V_R	V_C	V_Z

جدول ۳

I	V_R	V_C	V_{RC}	V_L	V_Z

جدول داده های آزمایش شماره ۷

جدول ۱

$۲۵۰N_1=$	V_1	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
$۵۰۰N_2=$	V_2				

جدول ۲

$۲۵۰N_1=$	V_1	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
$۲۵۰N_2=$	I_1				
	P_1				
	V_2				

جدول ۳

$۵۰۰N_1=$	I_1	P_1	V_2	I_2	P_2
$۲۵۰N_2=$	I_1			۰/۲	
$V۵۰V_1=$	P_1			۰/۴	
	V_2			۰/۶	
				۰/۸	
				۱	

جدول ۵

$۵۰۰N_1=$	V_1	
$۲۵۰N_2=$	I_1	
	P_1	

جدول ۴

$۵۰۰N_1=$	V_1	$V۵۰$
$۲۵۰N_2=$	I_1	
	P_1	

جدول داده های آزمایش شماره ۸

جدول ۱

[illegible]

جدول ۲

[illegible]

جدول ۳

[illegible]

جدول ۴

[illegible]

جدول ۵

[illegible]

جدول ۶

[illegible]

جدول ۷

[illegible]

جدول داده های آزمایش شماره ۹

(۱) اندازه گیری فرکانس مجهول با استفاده از الگوهای لیسازو:

فرکانس های اندازه گیری شده	
فرکانس سیلاتور	

(۲) اندازه گیری فرکانس مجهول با استفاده از منحنی های لیسازو

الف) مدار RL

a: , b:

ب) مدار RC

a: , b:

ج) مدار تشدید

فرکانس تشدید: