

دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
( پلی تکنیک تهران )

دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی

## دستور کار آزمایشگاه فیزیک 2

سال تحصیلی 1402-1403

## فهرست آزمایش های آزمایشگاه فیزیک ۲

۳	..... مقدمه
۵	..... آزمایش ۱: تعیین مقاومت درونی منبع تغذیه
۷	..... آزمایش ۲: تعیین مقاومت درونی ولتمتر
۹	..... آزمایش ۳: تحقیق قوانین کریشف
۱۲	..... آزمایش ۴: پل وتستون
۱۶	..... آزمایش ۵: شارژ و دشارژ خازن
۲۱	..... آزمایش ۶: اسیلوسکوپ
۲۹	..... آزمایش ۷: تحقیق قانون القای فارادی
۳۳	..... آزمایش ۸: اندازه گیری میدان مغناطیسی زمین

آزمایشگاه فیزیک ۲ مشتمل بر تعداد ۱۵ آزمایش است که بر اساس مباحث الکترومغناطیس کتاب فیزیک ۲ تدوین شده است.

در طول ترم به نکات زیر توجه نمایید:

با توجه به عملی بودن این درس، غیبت بیش از یک جلسه منجر به حذف واحد آزمایشگاه می گردد. در صورت بروز غیبت موجه با هماهنگی مربی مربوطه در اسرع وقت به آزمایشگاه مراجعه و آزمایش معوقه را جبران نمایید. عدم مراجعه و جبران آزمایش موجب محرومیت از امتحان عملی می گردد. گزارش کار باید با خود کار تنظیم و منحنی ها با مداد ترسیم گردد (پرینت قابل قبول نیست).

پس از اتمام هر آزمایش وسایل میز کار خود را مرتب نمایید.

### محاسبه خطا:

به طور کلی در اندازه گیری کمیت های مختلف در حین آزمایش ممکن است با خطاهای متعددی مواجه شویم. آگاهی از این خطاها و حذف آنها منجر به نتایج دقیق تری خواهد شد. دو نمونه از انواع خطا عبارت است از:

### خطای وسایل اندازه گیری

ما با وسایل اندازه گیری گوناگونی در کارهای آزمایشگاهی روبرو هستیم. مثل خط کش، زمان سنج، آمپر متر، ولت متر و غیره که بعضی از آنها بصورت آنالوگ (عقربه ای) و بعضی بصورت دیجیتال (رقمی) هستند.

#### ۱- خطای دستگاه آنالوگ

کوچک ترین مقداری که توسط هر دستگاه مدرج شده قابل اندازه گیری می باشد، دقت وسیله اندازه گیری یا خطای درجه بندی دستگاه نام دارد. به این معنا که وسیله ما قابلیت اندازه گیری مقادیر بین هر یک از کوچکترین این قسمت ها را ندارد.

**مثال:** فرض کنید در کار با یک آمپر متر عقربه ای، خطای درجه بندی دستگاه  $\Delta I = 0.005$  آمپر باشد. اگر عقربه آمپر متر بین 0.015 و 0.020 آمپر قرار گیرد، نمی توان نتیجه ای بین این دو مقدار را قرائت نمود. در این حالت مقدار جریان با توجه به نزدیکی عقربه آمپر متر به یکی از دو حد بالا یا پایین، اعلام می شود. مثلاً "بصورت زیر اعلام می شود:

$$(0.015 \pm 0.005)A$$

در حین استفاده از این وسایل اندازه گیری، به کالیبره بودن آنها نیز باید توجه داشت.

#### ۲- وسایل اندازه گیری دیجیتال

این وسایل، صفحه نمایشی دارند که کمیت مورد نظر را به صورت یک عدد ارائه می دهند. در رقم آخر این وسایل ابهامی وجود دارد که می توان خطای آنها را برابر کوچکترین مقداری که می توانند نشان دهند (مرتبه اولین رقم سمت راست) قرار داد.

**مثال:** اختلاف پتانسیل یک باطری را با یک ولت متر دیجیتالی 1.426 ولت می خوانیم در نتیجه خطای آن برابر 0.001 ولت می باشد.

$$(1.426 \pm 0.001)V$$

### خطای آزمایشگر

برای کاهش این خطا، آزمایش را چندین بار تکرار می کنیم. سپس میانگین مقادیر به دست آمده اعلام می گردد. خطای آزمایش عبارت است از تفاوت مقدار اندازه گیری شده  $x_i$  با مقدار میانگین  $\bar{x}$ .

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

اگر آزمایش در دفعات مختلف تکرار شود، می توان میانگین خطای آزمایشگر را به صورت زیر نوشت:

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n}$$

**خطاها را این گونه محاسبه می کنیم:**

### خطای مطلق

با توجه به اینکه هرگز نمی توان به مقدار واقعی کمیت دست یافت، بنابراین نمی توان مقدار دقیق خطا و علامت آن را از لحاظ جبری تعیین کرد. لذا همواره قدر مطلق حداکثر خطا (خطای درجه بندی دستگاه یا خطای میانگین آزمایشگر) را که ممکن است در سنجش یک کمیت رخ دهد، به عنوان خطای مطلق ( $\Delta x_i = |x_i - \bar{x}|$ ) به حساب می آوریم.

اکنون می توان نوشت:

$$\bar{x} - \overline{\Delta x} < x < \bar{x} + \overline{\Delta x}$$

### خطای نسبی

خطای مطلق به تنهایی نمی تواند دقت اندازه گیری را نشان دهد، بلکه باید نسبت به کمیت مورد اندازه گیری بررسی شود. این خطا بدون بعد است و هرچه مقدار آن کمتر باشد، دقت اندازه گیری بیشتر خواهد بود.

گاهی خطای نسبی را با درصد بیان می کنند.

$$\% \text{ خطای نسبی} = \frac{\Delta x}{x} \times 100$$

### محاسبه خطای نسبی با استفاده از دیفرانسیل لگاریتمی

می دانیم که اگر  $x = \ln a$  باشد، مقدار دیفرانسیل آن برابر است با :

$$dx = d(\ln a) = \frac{da}{a}$$

طرف راست رابطه بالا خطای نسبی کمیت  $a$  می باشد. پس می توان برای محاسبه خطای نسبی یک کمیت از طرفین آن لگاریتم گرفته و سپس دیفرانسیل گیری نماییم. مثلا اگر داشته باشیم  $x = a/b$ ، برای تعیین خطای نسبی چنین عمل می کنیم:

$$\ln x = \ln \frac{a}{b} = \ln a - \ln b$$

$$d(\ln x) = d(\ln a - \ln b) \rightarrow \frac{dx}{x} = \frac{da}{a} - \frac{db}{b}$$

علامت دیفرانسیل را به  $\Delta$  تبدیل می کنیم. برای محاسبه ماکزیمم مقدار خطا و به دلیل اطلاع نداشتن از علامت جبری آن، علامت منفی را به مثبت تغییر می دهیم.

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \rightarrow \Delta x = x \left( \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \right)$$

مقدار  $\Delta x$  خطای مطلق است که به روش لگاریتمی محاسبه شده است.

## آزمایش ۱: تعیین مقاومت درونی منبع تغذیه

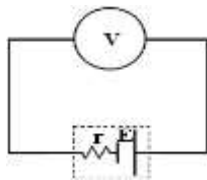
**هدف آزمایش:** اندازه گیری مقاومت درونی منبع تغذیه

**وسایل مورد نیاز:** منبع تغذیه DC، ولت‌متر، مقاومت های زیر ۱۰ اهم، سیم های رابط

**تئوری آزمایش:** برای یک منبع تغذیه داریم:

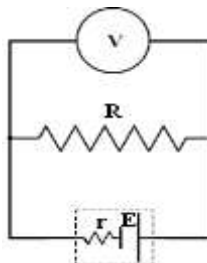
$$E = V + rI \quad (۱)$$

که در آن  $E$  نیروی محرکه<sup>۱</sup> منبع تغذیه،  $r$  مقاومت درونی آن است. اختلاف پتانسیل دو سر مولد وقتی با نیروی محرکه برابر است که یا  $r=0$  باشد و یا  $I=0$  باشد. در حالت دوم اگر  $I=0$  باشد طبقاً "جریانی از مدار نمی گذرد یعنی مدار باز است و  $E=V$  می شود.



شکل ۱: تعیین نیروی محرکه منبع تغذیه

پس برای این که نیروی محرکه منبع تغذیه را اندازه بگیریم کافی است که دو قطب آن را مستقیماً" به ولت‌متر وصل کرده و نیروی محرکه مولد را بخوانیم.



شکل ۲: مدار مقاومت درونی منبع تغذیه

با نوشتن قانون KVL در شکل ۲ داریم:

$$E = (r + R)I \quad (۲)$$

اگر در رابطه (۱) به جای  $I$ ، مقدار  $I = \frac{V}{R}$  را قرار دهیم:

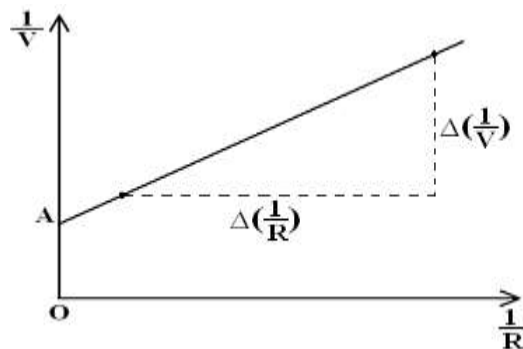
$$E = V + r \left( \frac{V}{R} \right) \quad (۳)$$

طرفین رابطه فوق را بر  $EV$  تقسیم می کنیم.

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{E} + \left( \frac{r}{E} \right) \frac{1}{R} \quad (۴)$$

با توجه به معادله (۴) اگر نمودار  $\frac{1}{V}$  را بر حسب  $\frac{1}{R}$  رسم کنیم، با توجه به این که  $r$  و  $E$  مقادیر ثابتی هستند، منحنی بدست آمده یک خط راست می شود، که از مرکز نمی گذرد.

<sup>۱</sup> electromotive force



شکل ۳: منحنی  $\frac{1}{V}$  بر حسب  $\frac{1}{R}$

با توجه به شکل ۳، عرض از مبدأ آن روی محور  $\frac{1}{V}$  (یعنی OA) همان  $\frac{1}{E}$  است.

### روش آزمایش:

- ابتدا منبع تغذیه را روشن کرده، نیروی محرکه منبع تغذیه (E) را با نظر مربی آزمایشگاه روی عدد مشخص قرار دهید (مطابق شکل ۱).
- سپس مدار شکل ۲ را بسته، مقاومت های مختلف زیر ۱۰ اهم را در مدار قرار داده هر بار V مربوطه را اندازه بگیرید، جدول زیر را پر کرده و R را با استفاده از رابطه  $r = \frac{(E-V)R}{V}$  بدست آورده و میانگین بگیرید. میانگین خطای مطلق را محاسبه و حاصل مقاومت درونی منبع تغذیه  $(\bar{r} \pm \Delta r)$  را گزارش کنید.
- نمودار  $\frac{1}{V}$  را بر حسب  $\frac{1}{R}$  روی کاغذ میلیمتری رسم کرده و با استفاده از شیب خط مقدار مقاومت درونی منبع تغذیه r را تعیین کنید.

جدول ۱

$E \pm \Delta E = \dots \pm \dots$					
$R \pm \Delta R(\Omega)$	V(v)	$\frac{1}{R}(\Omega^{-1})$	$\frac{1}{V}(v^{-1})$	$r(\Omega)$	$\bar{r} \pm \Delta r(\Omega)$

### سؤالات:

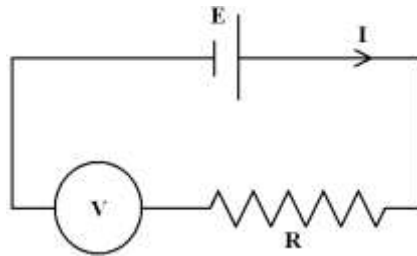
- ۱- چرا در این آزمایش از مقاومت های کوچک (زیر 10 اهم) استفاده می شود؟
- ۲- آیا سلکتور منبع تغذیه را تغییر دهیم مقاومت درونی منبع تغذیه تغییر می کند؟
- ۳- آیا با اهم متر می توانیم مقاومت درونی منبع تغذیه را به طور مستقیم اندازه گیری کنیم؟

## آزمایش ۲: تعیین مقاومت درونی ولت‌متر

**هدف آزمایش:** اندازه گیری مقاومت درونی ولت‌متر

**وسایل مورد نیاز:** ولت‌متر، منبع تغذیه DC، چند مقاومت، سیم های رابط

**تئوری آزمایش:** با توجه به مدار شکل ۱ یک منبع تغذیه با نیروی الکتروموتوری  $E$  و مقاومت درونی  $r \approx 0$  با یک ولت‌متر که دارای مقاومت درونی  $R_V$  است و با یک مقاومت تقریباً "بزرگ"  $R$  به طور سری بسته شده است را در نظر می گیریم.



شکل ۱: مدار مقاومت درونی ولت‌متر

با توجه به قانون دوم کریشف می توانیم بنویسیم:

$$E = V + RI \quad (1)$$

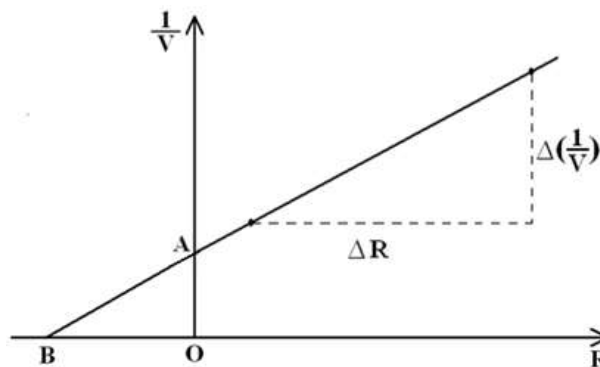
در اینجا  $V$  همان ولتاژی است که ولت‌متر نشان می دهد، به عبارت دیگر  $V$  اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت درونی ولت‌متر است، اگر در رابطه (۱) به جای  $I$ ، مقدار  $I = \frac{V}{R_V}$  را قرار دهیم:

$$E = V + R \frac{V}{R_V} \quad (2)$$

طرفین رابطه فوق را بر  $EV$  تقسیم می کنیم:

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{E} + \left( \frac{1}{R_V E} \right) R \quad (3)$$

اگر منحنی  $\frac{1}{V}$  را بر حسب  $R$  رسم کنیم، با توجه به این که  $E$  و  $R_V$  مقادیر ثابتی هستند، منحنی بدست آمده یک خط راست می شود، که از مرکز نمی گذرد.



شکل ۲: منحنی  $\frac{1}{V}$  بر حسب  $R$

با توجه به شکل ۲،  $OB$  از نظر عددی برابر مقاومت درونی ولت‌متر ( $R_V = |OB|$ ) است و عرض از مبدأ آن روی محور  $\frac{1}{V}$  (یعنی  $OA$ )، همان  $\frac{1}{E}$  است.

## روش آزمایش:

- مداری را مطابق شکل ۱ ببندید.
- نیروی محرکه منبع تغذیه را با نظر مربی آزمایشگاه روی عدد مشخص قرار دهید.
- مقدار مقاومت های داده شده را با استفاده از کد های رنگی بخوانید و در جدول زیر ثبت نمایید.
- به ازای مقاومت های مختلفی که وارد مدار می نمائید، ولتاژ ولتمتر را قرائت کرده و در جدول زیر ثبت کنید.
- مقاومت درونی ولتمتر را با استفاده از روش محاسباتی (میانگین کمیت و میانگین خطای مطلق،  $\overline{R_V} \pm \Delta R_V$ ) گزارش کنید و درون جدول ثبت کنید.
- نمودار  $\frac{1}{V}$  را بر حسب R روی کاغذ میلیمتری رسم کرده و از روی نمودار مقدار مقاومت درونی ولتمتر  $R_V$  (طول از مبدا) را گزارش کنید.
- بار دیگر با معلوم بودن E، مقاومت درونی ولتمتر ( $R_V$ ) را با استفاده از شیب خط گزارش کنید.

جدول ۱

$E \pm \Delta E = \dots \pm \dots$				
$R \pm \Delta R (M\Omega)$ (کد رنگی)	V(v)	$\frac{1}{V} (v^{-1})$	$R_V (M\Omega)$	$\overline{R_V} \pm \Delta \overline{R_V} (M\Omega)$

## سؤالات:

۱- چرا مقاومت R در مدار شکل ۱ باید خیلی زیاد باشد؟



### آزمایش ۳: تحقیق قوانین کریشهف

**هدف آزمایش:** بکار بردن قوانین کریشهف در مدارهای الکتریکی

**وسایل مورد نیاز:** منبع تغذیه DC (دو عدد)، مقاومت (سه عدد)، آوومتر (مولتی متر)، سیم های رابط

**تئوری آزمایش:** برای پیدا کردن شدت جریان و اختلاف پتانسیل در مداراتی که پیچیده هستند، می توان از قوانین کریشهف استفاده کرد. قبل از هر چیز دو اصطلاح را که در شبکه به کار می رود تعریف می کنیم.

**۱-گره:** نقطه ای روی مدار است که سه (یا بیشتر) سیم در آن به هم وصل شده باشند.

**۲-حلقه:** مسیری روی مدار الکتریکی است که از نقطه ای شروع و به همان نقطه ختم شود.

**قانون اول کریشهف (قضیه گره):** در هر گره، جمع جبری جریانها صفر است.

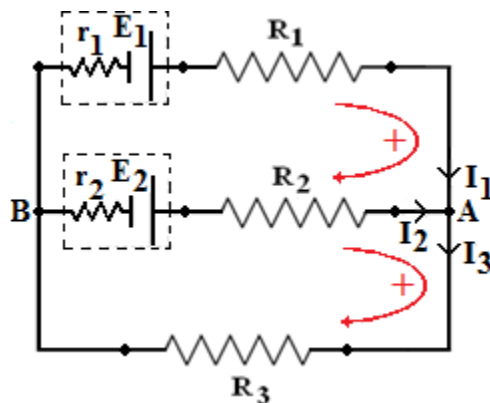
$$\sum I_i = 0$$

**قانون دوم کریشهف (قضیه حلقه):** جمع جبری نیروهای الکتروموتوری در هر مسیر بسته برابر جمع جبری حاصل ضرب های شدت جریان و مقاومت در آن مسیر است.

$$\sum E = \sum RI$$

برای نوشتن قانون اول، اگر جریان وارد گره شود مثبت و اگر از گره خارج شود، منفی در نظر می گیریم (یا برعکس قرارداد می کنیم).

برای نوشتن قانون دوم ابتدا یکی از جهات چرخش را به عنوان جهت مثبت اختیار می کنیم. در محاسبات همه جریانها و نیروهای الکتروموتوری را که هم جهت با جهت مفروض باشند مثبت و آنهایی را که مخالف جهت مذکورند منفی به حساب می آیند.



شکل ۱: مدار کریشهف

قوانین کریشهف را برای مدار شکل ۱ بکار می گیریم.

$$\sum I = 0 \quad : \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum E = \sum RI \quad : \quad E_1 - E_2 = R_1 I_1 + r_1 I_1 - R_2 I_2 - r_2 I_2$$

$$: E_2 = R_2 I_2 + r_2 I_2 + R_3 I_3$$

به این ترتیب سه معادله و سه مجهول داریم که با حل آنها  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  بدست می آیند.

## روش آزمایش:

- مداری مطابق شکل ۱ را تشکیل دهید.

**تذکره:** قبل از اتصال مدار به منبع اصلی الکتریسیته برای جلوگیری از سوختن آمومتر و یا خسارات دیگر، مدار مربوطه را به مربی آزمایشگاه نشان دهید.

- سه مقاومت داده شده را با استفاده از کد های رنگی بخوانید، و با کمک یک ولتمتر اختلاف پتانسیل دو سر منبع تغذیه  $V_1$  و  $V_2$  را در حالتی که مدار بسته است اندازه بگیرید و در جدول ۱ ثبت کنید. توجه داشته باشید برای یک منبع تغذیه (و یا باتری) رابطه  $E = V + rI$  برقرار است.

- جریان هر شاخه را با توجه به قانون اهم  $I = \frac{V}{R}$  محاسبه کنید. برای انجام اینکار با موازی قرار دادن ولتمتر با مقاومت مربوطه، اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت را تعیین کنید. محدوده خطای جریان را با استفاده از روش لگاریتمی  $\Delta I = I \left( \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta R}{R} \right)$  محاسبه کنید، و در جدول ۲ ثبت نمایید، و از آنجا قانون اول را برای گره A تحقیق کنید.

- جریانهای  $I'_1$ ،  $I'_2$  و  $I'_3$  را با سری قراردادن آمپر متر با مقاومت های  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  از روی آمپر متر بخوانید، و در جدول ۳ ثبت کنید. قانون اول را برای گره A و قانون دوم را برای حلقه های ۱ و ۲ تحقیق نمایید.

- با توجه به مقادیر جدول ۱ که اندازه گرفته اید، سه معادله برحسب  $I''$  تشکیل داده و جریانها را محاسبه کنید و در جدول شماره ۴ بنویسید.

- نتایج محاسبه شده از روش سه معادله و سه مجهول را با نتایج اندازه گیری شده از روش های قبلی مقایسه کرده و اختلاف درصد آنها را محاسبه کنید و در جدول ۵ ثبت نمایید.

جدول ۱: مقادیر معلوم

$R_1 \pm \Delta R_1 (\Omega)$ (کد رنگی)	$R_2 \pm \Delta R_2 (\Omega)$ (کد رنگی)	$R_3 \pm \Delta R_3 (\Omega)$ (کد رنگی)	$V_1 \pm \Delta V_1 (v)$	$V_2 \pm \Delta V_2 (v)$

جدول ۲: تحقیق قوانین کریشف با استفاده از نتایج قانون اهم

$V_{R1} \pm \Delta V_{R1} (v)$	$V_{R2} \pm \Delta V_{R2} (v)$	$V_{R3} \pm \Delta V_{R3} (v)$	$I_1 \pm \Delta I_1 (mA)$	$I_2 \pm \Delta I_2 (mA)$	$I_3 \pm \Delta I_3 (mA)$	$I_1 + I_2 - I_3$

جدول ۳: تحقیق قوانین کریشف با استفاده از اندازه گیری مستقیم

$I'_1 \pm \Delta I'_1(\text{mA})$	$I'_2 \pm \Delta I'_2(\text{mA})$	$I'_3 \pm \Delta I'_3(\text{mA})$	$I'_1 + I'_2 - I'_3$	$V_1 - V_2 - R_1 I'_1 + R_2 I'_2$	$V_2 - R_2 I'_2 - R_3 I'_3$

جدول ۴: روش سه معادله و سه مجهول

$I_1''(\text{mA})$	$I_2''(\text{mA})$	$I_3''(\text{mA})$

جدول ۵: مقایسه نتایج

$\frac{ I_1'' - I_1 }{I_1''} \times 100$	$\frac{ I_2'' - I_2 }{I_2''} \times 100$	$\frac{ I_3'' - I_3 }{I_3''} \times 100$
$\frac{ I_1'' - I'_1 }{I_1''} \times 100$	$\frac{ I_2'' - I'_2 }{I_2''} \times 100$	$\frac{ I_3'' - I'_3 }{I_3''} \times 100$

• سؤالات:

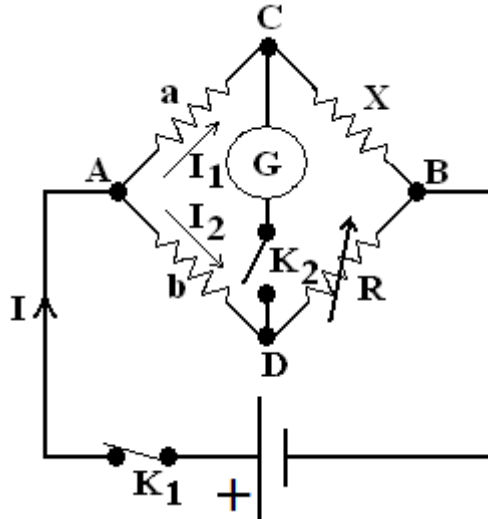
۱- قوانین کریشف در حل معادلات مدار چه کمکی به ما می کنند؟

## آزمایش ۴: پل وتستون

**هدف آزمایش:** اندازه گیری مقاومت مجهول با استفاده از پل وتستون

**وسایل آزمایش:** جعبه پل وتستون، گالوانومتر، مقاومت مجهول، باتری، سیم های رابط

**تئوری آزمایش:** یکی از روش های بسیار دقیق اندازه گیری مقاومت، استفاده از مدار پل وتستون<sup>۲</sup> می باشد. با استفاده از جعبه پل وتستون می توان مقاومت های مجهول را با توجه به محدوده آن با دقت دو رقم اعشار اندازه گیری نمود. این روش در مقایسه با دستگاه مولتی متر و علائم رنگی از دقت اندازه گیری بالاتری برخوردار است. بر این اساس، برای اندازه گیری مقاومت مجهول موجود، مدار پل وتستون در شکل (۱) استفاده می شود.



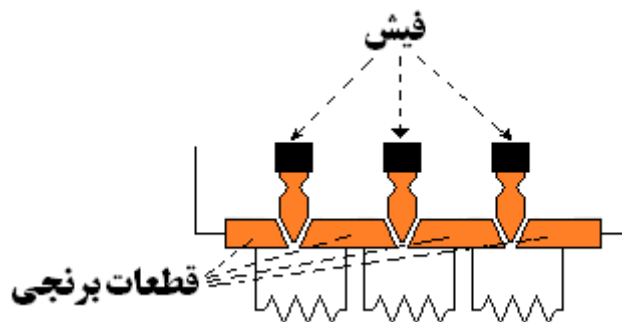
شکل ۱: مدار پل وتستون

a و b مقاومت های معلوم، R مقاومت متغیر و X مقاومت مجهول می باشد. بعد از اتصال کلیدهای  $k_1$  و  $k_2$  مسلماً از گالوانومتر G جریانی عبور خواهد کرد. اگر با تغییر مقاومت متغیر R، گالوانومتر جریان صفر را نشان دهد، پتانسیل نقطه C و D با یکدیگر برابر بوده و می توان مقاومت مجهول را با استفاده از روابط ولتاژ شاخه های موازی محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} V_C &= V_D \\ \begin{cases} V_A - V_C = V_A - V_D \Rightarrow aI_1 = bI_2 \\ V_B - V_C = V_B - V_D \Rightarrow XI_1 = RI_2 \end{cases} \\ \Rightarrow X &= \frac{a}{b}R \end{aligned}$$

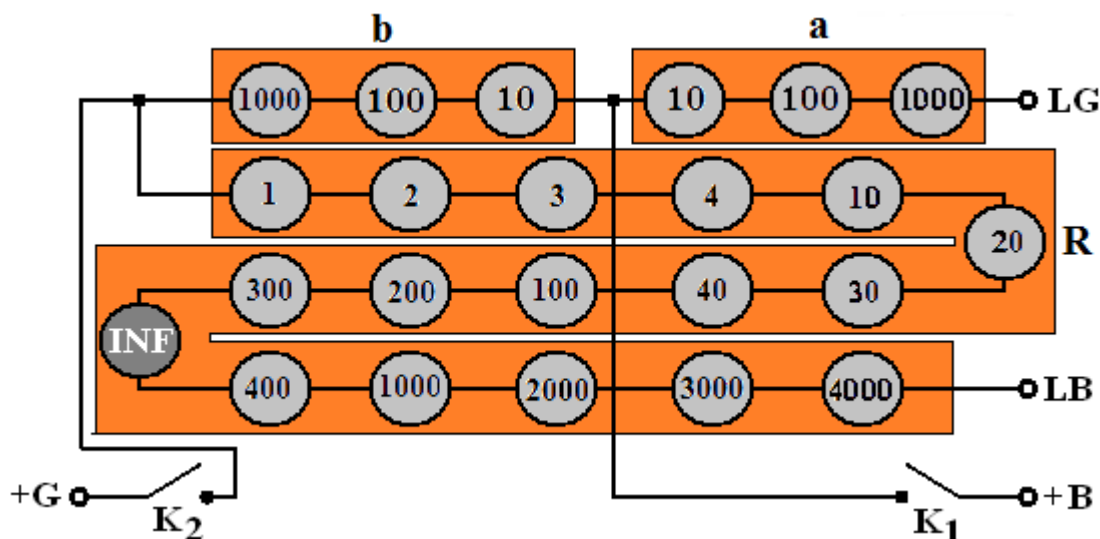
این معادله، رابطه اصلی پل وتستون در شرایط تعادل می باشد.

در جعبه پل وتستونی که در اختیار دارید مقاومت های مختلف به وسیله قطعات برنجی با ضخامت بالا به هم وصل شده اند. به این ترتیب، خطای ناشی از وجود سیم های اتصال به حداقل می رسد. در این جعبه هر فیشی (مهرد برنجی) را که بر می دارید مقاومت مربوط به آن وارد مدار می شود.



شکل ۲: ساختار داخلی دستگاه

در شکل ۳ مقاومت های  $a$ ،  $b$  و  $R$  و نیز کلیدهای  $k_1$  و  $k_2$  در جعبه پل وتستون نشان داده شده اند. مقاومت  $a$  در بالای جعبه سمت راست،  $b$  بالای جعبه سمت چپ و مقاومت متغیر  $R$  در زیر آنها قرار دارند. مقاومت های  $a$  و  $b$  می توانند مقادیر 100، 10 و 1000 اهم و مقاومت متغیر  $R$  می تواند از 1 تا 11110 اهم را اختیار نماید.



شکل ۳: موقعیت مقاومت های  $a$ ،  $b$  و  $R$  و نیز کلیدهای  $k_1$  و  $k_2$  روی دستگاه پل وتستون

## روش آزمایش

### الف) پل وتستون

#### امتحان مدار

- مداری مطابق شکل ۱ را ببندید و از مقاومت های  $a$  و  $b$  دو مقدار دلخواه انتخاب نمایید.
- مقاومت  $R$  را در حالت صفر قرار دهید. با بستن کلیدهای  $k_1$  و  $k_2$  جهت انحراف عقربه گالوانومتر را در نظر بگیرید. سپس با برداشتن فیش (INF)، مقاومت  $R$  را در حالت بینهایت قرار داده و مجدداً "انحراف عقربه گالوانومتر را ملاحظه نمایید. در صورت انحراف عقربه گالوانومتر در جهت مخالف، مدار صحیح بسته شده است. (چرا؟)
- پس از اطمینان از صحت مدار، مقاومت متغیر  $R$  را به گونه ای تغییر دهید که پس از هر بار کلید زدن، گالوانومتر جریانی را از خود عبور ندهد. در این شرایط پل در حال تعادل بوده و نقاط  $C$  و  $D$  هم پتانسیل خواهند بود ( $V_D = V_C$ ). از رابطه (۱) مقدار مقاومت مجهول  $X$  را حساب کنید.
- انتخاب صحیح نسبت  $a/b$  در دقت اندازه گیری مؤثر می باشد. این نسبت می تواند مقادیر مختلفی را به خود اختصاص دهد. جهت سادگی مقادیر ۰.۰۱، ۰.۱، ۱، ۱۰، ۱۰۰ اختیار می شود. با توجه به محدوده مقاومت مجهول بایستی بهترین و دقیق ترین نسبت  $a/b$  را اختیار کرد. طبق رابطه (۱)، اگر نسبت  $a/b = ۰.۰۱$  باشد، مقدار مقاومت های مجهول در محدوده 0.01 تا 111.10 اهم با دقت یکصدم اعشار قابل اندازه گیری می باشد. برای اندازه گیری مقاومت های بیش از این مقدار باید نسبت  $a/b$  را تغییر داد (بیشتر کرد). به طور مثال برای اندازه گیری مقاومت مجهول 1200 اهم باید از نسبت  $a/b = ۱$  استفاده کرد.
- مقدار مقاومت های مجهول  $X_1$  و  $X_2$  که در اختیار دارید را با استفاده از کد رنگی خوانده و در جدول زیر ثبت کنید.
- مقدار مقاومت های  $X_s$  و  $X_p$  را با استفاده از روابط زیر محاسبه کنید.

$$\begin{cases} X_s = X_1 + X_2 \\ \frac{1}{X_p} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} \end{cases}$$

- خطای مطلق آنها را با استفاده از روش لگاریتمی به دست آورید و آنها را بصورت زیر گزارش کنید (در جدول ثبت کنید).

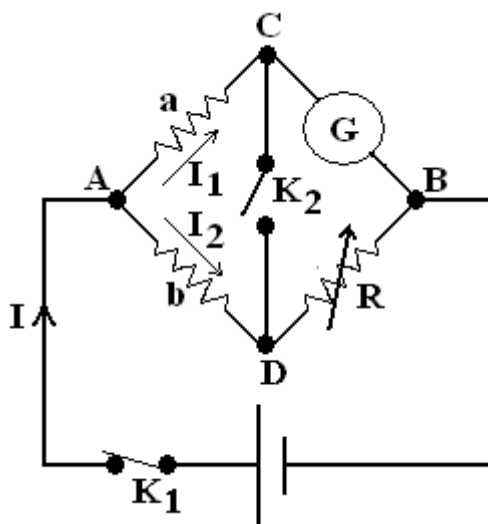
$$\begin{cases} X_s \pm \Delta X_s (\Omega) \\ X_p \pm \Delta X_p (\Omega) \end{cases}$$

- بار دیگر مقدار مقاومت های مجهول  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_s$  و  $X_p$  را با استفاده از دستگاه پل وتستون اندازه گیری نمایید و در جدول زیر ثبت کنید.

	$X \pm \Delta X (\Omega)$ (کد رنگی - تنوری)	$\frac{a}{b}$	$R (\Omega)$	$\frac{a}{b} R \pm \Delta X$ (دستگاه پل و تستون)
$X_1$				
$X_2$				
$X_s$				
$X_p$				

(ب) اندازه گیری مقاومت درونی گالوانومتر-پل کلونین

• مدار شکل (۴) را ببندید. مقادیر  $b=a=1000$  را اختیار نمایید.



شکل ۴: مدار پل کلونین

• کلید  $k_1$  را ببندید تا عقربه گالوانومتر منحرف شود. مقدار جریان گالوانومتر را قرائت نمایید. سپس مقدار مقاومت  $R$  را آن قدر تغییر دهید تا در هر بار پس از برقراری اتصال کلید  $k_1$  و  $k_2$ ، گالوانومتر همان جریان اولیه، ناشی از اتصال کلید  $k_1$  را نشان دهد. در این حالت از قطر مربع جریانی عبور نخواهد کرد و رابطه:

$$X_G = \frac{a}{b} R$$

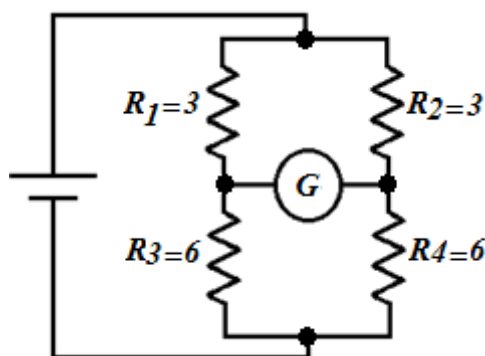
برقرار خواهد بود و از آنجا مقدار مقاومت گالوانومتر به دست می آید.

• خطای مطلق آن را با استفاده از روش لگاریتمی به دست آورید و آن را بصورت زیر گزارش کنید.

$$X_G \pm \Delta X_G (\Omega)$$

## سؤالات:

- ۱- هر یک از نسبت های ممکن  $a/b$  برای اندازه گیری چه محدوده ای از مقاومت های مجهول مناسب می باشند؟
- ۲- چهار مقاومت داریم که به ترتیب در حدود  $0.4$ ،  $8$ ،  $159$  و  $4400$  اهم می باشند. بهترین نسبت  $a/b$  را برای اندازه گیری این مقاومت ها تعیین کنید.
- ۳- در صورتی که حداکثر مقدار مقاومت متغیر قادر به صفر کردن جریان آمپرتر نباشد، چه راهکاری را پیشنهاد می کنید؟
- ۴- نشان دهید هر گاه پل وتستون در حال تعادل باشد و جریانی از گالوانومتر عبور ننماید، اگر جای گالوانومتر و باتری با هم عوض شود، در این حالت نیز جریانی از گالوانومتر عبور نخواهد کرد.
- ۵- در اندازه گیری مقاومت درونی گالوانومتر، مقادیر  $a$  و  $b$  برابر  $1000$  اهم اختیار شدند. علت را توضیح دهید.
- ۶- چگونگی برقراری شرط تعادل را در مدار شکل (۴) به طور کامل شرح دهید.
- ۷- آیا شرط تعادل پل وتستون برای مدار زیر برقرار می باشد؟ چرا؟



## آزمایش ۵: شارژ و دشارژ خازن

**هدف آزمایش:** ۱- بررسی پلاریته خازنها

۲- بررسی اثر خازن در مدار DC و رسم منحنی شارژ و دشارژ آن

۳- اندازه گیری مقاومت درونی ولت متر

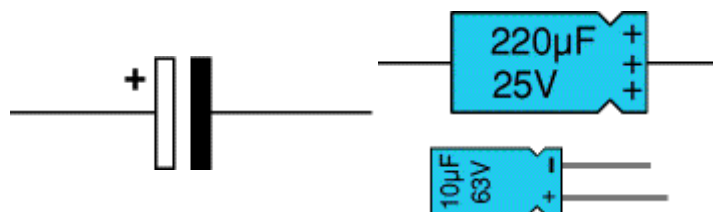
**وسایل آزمایش:** دو عدد خازن (با ظرفیت های مختلف)، منبع تغذیه DC، آوومتر(مولتی متر)، کلید چاقوئی(دو طرفه) و سیم های رابط

**تئوری آزمایش:** همان طور که می دانید انواع مختلفی از خازن ها وجود دارند که می توان از دو نوع اصلی آنها یعنی خازن های دارای پلاریته (قطب دار) و بدون پلاریته (بدون قطب) نام برد.

### خازنهای قطب دار

#### خازن های الکترولیت (شیمیایی)

در خازنهای الکترولیت قطب مثبت و منفی بر روی بدنه آنها مشخص شده و بر اساس قطب ها در مدارات مورد استفاده قرار می گیرند. دی الکتریک در این خازن ها به ماده شیمیایی مخصوصی آغشته می باشد. هنگام اتصال این خازن ها به ولتاژ مستقیم، قطب های همنام باید به هم وصل شوند. (دو نوع طراحی برای شکل این خازن ها وجود دارد، یکی شکل آکسیل که در این نوع پایه های یکی در طرف راست و دیگری در طرف چپ قرار دارد و دیگری رادیال که در این نوع هر دو پایه خازن در یک طرف آن قرار دارد. در شکل نمونه ای از خازن اکسیل و رادیال نشان داده شده است).



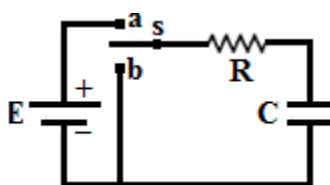
خازن های الکترولیت معمولاً استوانه ای شکل بوده و دو سیم مسی قلع اندود شده از آنها خارج می شود. ظرفیت آنها به صورت یک عدد بر روی بدنه شان نوشته شده است. همچنین ولتاژ قابل تحمل خازن ها نیز بر روی بدنه آنها درج شده و هنگام انتخاب یک خازن باید این ولتاژ مد نظر قرار گیرد.

#### خازن های بدون قطب

خازن های بدون قطب معمولاً خازن های با ظرفیت کم هستند و می توان آنها را از هر طرف در مدارات مورد استفاده قرار داد. این خازن ها در برابر گرما تحمل بیشتری دارند و در ولتاژهای بالاتر مثلاً "۵۰ ولت، ۲۵۰ ولت و ... عرضه می شوند. خازن ها، انرژی الکتریکی را نگهداری می کنند. همچنین از خازن ها برای صاف کردن سطح تغییرات ولتاژ مستقیم استفاده می شود. خازن ها در مدار به عنوان فیلتر هم به کار می روند. زیرا به راحتی سیگنالهای غیر مستقیم (AC) را عبور داده و مانع عبور سیگنالهای مستقیم (DC) می شوند.

### شارژ خازن

مدار شکل ۱ را در نظر بگیرید. هنگامی که کلید S در جهت a بسته شود، الکترون ها از قطب منفی باتری که پتانسیل منفی دارد به طرف صفحه ای که به این قطب وصل شده جاری می شوند. بنابراین در این صفحه تراکم الکترون یا بار منفی ایجاد می شود. در همین هنگام قطب مثبت باتری که پتانسیل مثبت دارد همان تعداد الکترون را از صفحه ای از خازن که به این قطب وصل شده است جذب می کند و در نتیجه این صفحه فاقد الکترون یا دارای بار مثبت می شود. بنابراین به هنگام شارژ خازن الکترون ها در مدار جاری بوده و در مدار جریان برقرار است. به تدریج با گذشت زمان بار ذخیره شده روی صفحات خازن اجازه عبور بیشتر الکترون ها را نمی دهند و جریان در مدار قطع می شود. در این شرایط ولتاژ دو سر خازن ماکزیمم و برابر ولتاژ دو سر منبع تغذیه می باشد. می توان روابط بار، ولتاژ و جریان ذخیره شده بر روی صفحات خازن را با استفاده از روابط ولتاژ کریشهف به صورت زیر نوشت:



شکل ۱:



$$\varepsilon - V_R - V_C = 0$$

$$\varepsilon - \frac{dq}{dt}R - \frac{q}{C} = 0 \Rightarrow \frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{\varepsilon}{R} \quad (۱)$$

با حل معادله دیفرانسیلی بالا، با توجه به شرایط اولیه  $q(t=0)=0$  به روابط زیر می‌رسیم:

$$q_c(t) = C\varepsilon(1 - e^{-t/RC}) = q_0(1 - e^{-t/RC})$$

$$V_C(t) = \varepsilon(1 - e^{-t/RC}) \quad (۲)$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} e^{-t/RC}$$

کمیت RC را که دارای بعد زمان است "ثابت زمانی" خازن می‌نامند و آن را با " $\tau$ " نمایش می‌دهند. در حالت شارژ  $\tau$  مدت زمانی است که ولتاژ دو سر خازن به ۶۳٪ ولتاژ منبع تغذیه برسد.

$$V_C = \varepsilon(1 - e^{-1}) = 0.63\varepsilon \quad (۳)$$

اگر در مدار شارژ، مقاومت قابل توجهی وجود نداشته باشد، خازن تقریباً بلافاصله شارژ می‌شود. بعد از گذشت ۵ ثابت زمانی می‌توان خازن را کاملاً "شارژ" فرض کرد. با توجه به مجموعه معادلات (۲) می‌توان دریافت که ولتاژ و جریان دو سر خازن خلاف یکدیگر عمل می‌کنند. بدین معنا که در ابتدای شارژ، جریان ماکزیمم و ولتاژ دو سر خازن صفر می‌باشد. با گذشت زمان جریان در مدار کاهش یافته و ولتاژ دو سر خازن برابر با ولتاژ منبع تغذیه خواهد شد.

### دشارژ خازن

بعد از آنکه یک خازن در یک مدار شارژ شد، ولتاژ دو سر خازن با ولتاژ منبع تغذیه برابر است. خازن نمی‌تواند در جهت جریان منبع دشارژ شود. به همین جهت برای دشارژ خازن مسیر دیگری در نظر گرفته می‌شود. در مدار بالا با قرار دادن کلید S در حالت b خازن تخلیه می‌شود. حال به بررسی روابط ولتاژ، بار و جریان خازن در حالت دشارژ می‌پردازیم.

$$V_R + V_C = 0 \Rightarrow \frac{dq}{dt}R + \frac{q}{C} = 0$$

$$q_c(t) = C\varepsilon e^{-t/RC} = q_0 e^{-t/RC}$$

$$V_c(t) = \frac{q}{C} = \varepsilon e^{-t/RC}$$

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = -\frac{\varepsilon}{R} e^{-t/RC} \quad (۴)$$

علامت منفی در رابطه جریان نشان می‌دهد که جهت جریان در خلاف جهت تعیین شده در مدار شارژ می‌باشد. هنگامی که دشارژ آغاز می‌شود ولتاژ دو سر خازن ماکزیمم مقدار را دارد. با گذشت زمان جریان و ولتاژ دو سر خازن کاهش می‌یابد تا هر دو به صفر رسیده و خازن کاملاً دشارژ شود.

### روشی آزمایشی:

#### الف) بررسی قطبیت (پلاریته) خازن

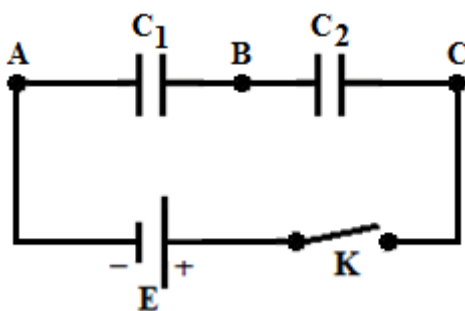
- ولتاژ دو سر منبع تغذیه را با استفاده از ولت‌متر، روی ۴ ولت تنظیم کنید.
- ابتدا خازنی را که در اختیار دارید توسط سیم رابط به طور کامل تخلیه نمایید. سپس دو سر خازن را به منبع تغذیه وصل کرده و آن را شارژ کنید.
- حال خازن را از منبع جدا کرده و ترمینال مثبت ولت متر را به قطب مثبت خازن و ترمینال منفی آن را به قطب منفی وصل کنید. اختلاف پتانسیل آن را اندازه بگیرید ( $V_{AB}$ ).

## سؤالات:

- ۱- ولتاژ دو سر خازن شروع به افت می کند. چرا؟
- ۲- دو سر ولت‌متر را جا به جا کنید. چه تغییری در صفحه نمایش آن مشاهده می کنید؟
- حال خازن را مجدداً با قطبین مخالف شارژ کنید. اندازه گیری های فوق ( $V_{BA}$ ) را تکرار کنید. چه نتیجه ای می گیرید؟
- ۳- آیا پلاریزه منبع تغذیه و خازن شارژ شده یکسان است؟
- این کار را با خازن دیگری که در اختیار دارید نیز انجام دهید و مشاهدات خود را یادداشت نمایید.

## ب) اندازه گیری اختلاف پتانسیل دو سر خازنهای سری شده

- خازنها را به طور سری مطابق شکل ۲ به ولتاژ ۴ ولت وصل کنید (از میزان دقیق این مقدار به وسیله ولت‌متر اطمینان حاصل نمایید).
- با اتصال کلید  $K$  هر دو خازن شارژ می شوند.
- ولتاژ  $AB$ ،  $BC$  و  $AC$  را بلافاصله پس از اتصال ولت‌متر اندازه گیری نمایید.



شکل ۲

۴- چه رابطه ای بین ولتاژها وجود دارد؟

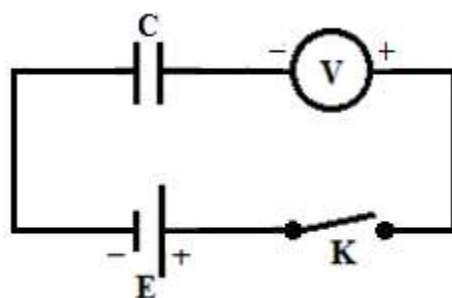
۵- ولتاژها به چه نسبتی تقسیم شده اند؟

## ج) شارژ خازن

- مولتی متر را در حالت اندازه گیری ولتاژهای DC قرار دهید. ابتدا مدار شکل (۳) را ببندید. سپس خازن را تخلیه کنید.
- ولتاژ منبع تغذیه را روی ۵ ولت تنظیم نمایید.
- پس از بستن کلید، کرومومتر را فعال کرده و به ازای هر ۵ ثانیه ولتاژ دو سر ولت‌متر دیجیتالی را اندازه گرفته و در جدول ۱ یادداشت کنید. این عمل را برای خازن دوم که در اختیار دارید، تکرار نمایید.
- حال خازن ها را یک بار به طور موازی و بار دیگر به صورت سری بسته و جدول ۲ را کامل کنید.
- ولتاژ دو سر خازنها در هر مرحله از رابطه زیر به دست می آید.

$$V_C = E - V_V \quad (۴)$$

که در آن  $V_V$  ولتاژ دو سر ولت متر می باشد.



شکل ۳: مدار شارژ خازن

جدول ۱: شارژ خازنهای  $C_1$  و  $C_2$ 

t(s)	خازن $C_1$		خازن $C_2$	
	$V_V(v)$	$V_{C1} = \varepsilon - V_V$	$V_V(v)$	$V_{C2} = \varepsilon - V_V$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
⋮				

جدول ۲: شارژ خازنهای  $C_s$  و  $C_p$ 

t(s)	خازنهای سری		خازنهای موازی	
	$V_V(v)$	$V_s = \varepsilon - V_V$	$V_V(v)$	$V_p = \varepsilon - V_V$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
⋮				

- نمودار ولتاژ خازن بر حسب زمان ( $V_C-t$ ) را برای هر یک از حالت های بالا در یک دستگاه مختصات، جهت مقایسه رسم نمایید.
- ثابت زمانی  $\tau_{C1}$ ،  $\tau_{C2}$ ،  $\tau_{Cs}$  و  $\tau_{Cp}$  را برای هر یک از منحنی ها به دست آورده و نتایج خود را در دفترچه گزارش کار یادداشت نمایید.
- مقدار مقاومت ولتمتر  $R_V$  را یک بار از روی منحنی خازن  $C_1$  و بار دیگر از روی منحنی خازن  $C_2$  با استفاده از رابطه  $\tau=RC$  به دست آورید، و مقدار میانگین آن را محاسبه کنید.

- با فرض مجهول بودن ظرفیت یکی از خازنها، ظرفیت خازن مجهول را حساب کنید:

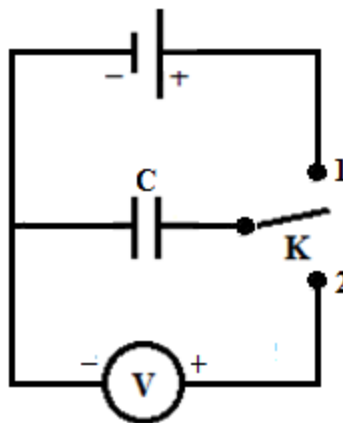
$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (5)$$

- با استفاده از  $\tau_p$  و  $\tau_s$ ، مقدار ظرفیت خازن های معادل را در هر حالت به دست آورید. روابط خازن های سری و موازی را تحقیق کنید (خطای نسبی هر یک را به دست آورید).

$$\begin{cases} C_s = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \\ C_p = C_1 + C_2 \end{cases} \quad (6)$$

#### د) دشارژ خازن:

- مدار شکل زیر را با خازن  $C_1$  ببندید. کلید چاقویی را در حالت ۱ قرار دهید تا خازن با ولتاژ ۴ ولت شارژ شود. سپس با قرار دادن کلید k در حالت ۲، به ازای هر ۵ ثانیه ولتاژ تخلیه خازن را یادداشت نمایید، و در جدول ۳ ثبت کنید.



شکل ۴: مدار دشارژ خازن

● همین کار را با خازن  $C_2$  انجام دهید.

● نمودار تغییرات ولتاژ خازن بر حسب زمان ( $V_c - t$ ) را در حالت دشارژ برای خازنهای  $C_1$  و  $C_2$  در یک دستگاه مختصات، جهت مقایسه رسم نمایید.

● ثابت زمانی های  $\tau_{C1}$  و  $\tau_{C2}$  را در حالت دشارژ از روی نمودار به دست آورید.

جدول ۳

t(s)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$V_{C1}(V)$																			
$V_{C2}(V)$																			

### سؤالات:

6- در حالت شارژ خازن، آیا رابطه  $\frac{\tau_P}{\tau_S} = \frac{C_P}{C_S}$  صادق است؟

7- نقش ولتمتر دیجیتالی در حالت شارژ و دشارژ خازن چیست؟

8- ثابت زمانی  $\tau$  در حالت دشارژ را تعریف کنید.

9- آیا ثابت زمانی در حالت شارژ و دشارژ متفاوت است؟

## آزمایش ۶: اسیلوسکوپ

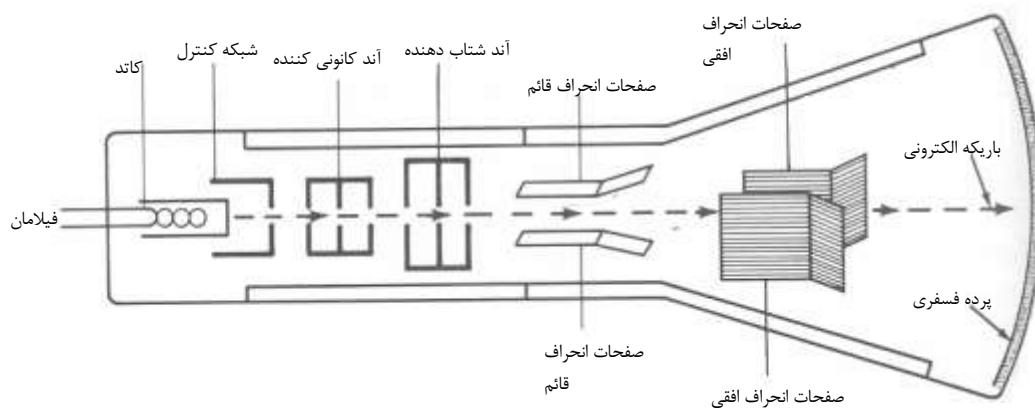
**هدف آزمایش:** آشنائی با اسیلوسکوپ

**وسایل مورد نیاز:** اسیلوسکوپ، سیگنال ژنراتور، جعبه مقاومت، خازن، باتری، سیم کواکسیال

**تئوری آزمایش:** اسیلوسکوپ یک دستگاه مفید و چند کاره آزمایشگاهی است که برای نمایش دادن و اندازه گیری، تحلیل شکل موج ها و دیگر پدیده های مدارهای الکتریکی و الکترونیکی به کار می رود. از آنجایی که الکترون ها دارای جرم ناچیز ( قابل چشم پوشی) هستند، می توان به کمک آنها امواج متغیر الکتریکی بسیار سریع را نمودار کرد. اسیلوسکوپ بر اساس ولتاژ کار می کند. البته به کمک مبدل ها (ترانزیستورها) می توان جریان الکتریکی و کمیت های دیگر فیزیکی و مکانیکی را به ولتاژ تبدیل کرد.

### قسمت های مختلف اسیلوسکوپ

اسیلوسکوپ از یک لامپ پرتو کاتدی که قلب دستگاه بوده و تعدادی مدار برای کار کردن لامپ پرتو کاتدی تشکیل شده است. قسمت های مختلف لامپ پرتو کاتدی عبارت اند از:



شکل ۱: لامپ کاتودیک اسیلوسکوپ

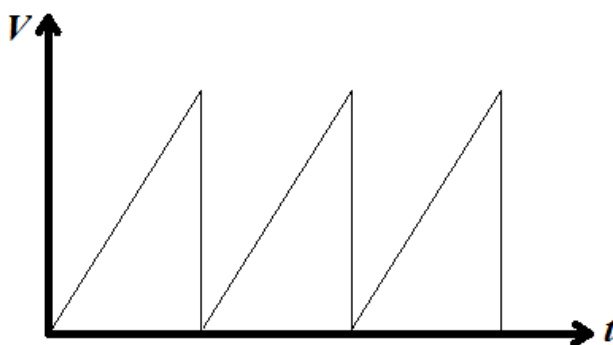
### تفنگ الکترونی

تفنگ الکترونی قادر است باریکه متمرکزی از الکترون ها را که شتاب زیادی کسب کرده اند، به وجود آورد. این باریکه الکترون با انرژی کافی به صفحه فلورسان برخورد و بر روی آن یک لکه نورانی تولید می کند. تفنگ الکترونی از رشته گرمکن (فیلامان)، کاتد، شبکه آند پیش شتاب دهنده، آند کانونی کننده و آند شتاب دهنده تشکیل شده است. الکترون ها از کاتدی که به طور غیر مستقیم گرم می شود، گسیل می شوند. این الکترون ها از روزنه کوچکی در شبکه کنترل عبور می کنند. این شبکه معمولاً یک استوانه هم محور با لامپ است و دارای روزنه ای است که در مرکز آن قرار دارد. الکترون های گسیل شده از کاتد، پس از عبور از روزنه (به دلیل پتانسیل مثبت زیادی که به آندهای پیش شتاب دهنده اعمال می شود)، شتاب می گیرند. الکترون های خارج شده پس از طی مسافت معینی به یک دسته شعاع الکترونی که قطر آن دائماً در حال تزاید است تبدیل خواهند شد. برای جلوگیری از افزایش قطر، الکتروود کانونی کننده را در مسیر آن قرار می دهند. این الکتروود برای شعاع الکترون به مانند یک عدسی جمع کننده عمل می کند، به طوری که الکترون ها در نزدیکی صفحه فلورسنت به یک باریکه تبدیل خواهند شد.

## صفحات انحراف دهنده

صفحات انحراف دهنده شامل دو دسته صفحات انحراف قائم و انحراف افقی می باشد. صفحات انحراف قائم به طور افقی نصب می شوند و با ایجاد یک میدان الکتریکی، باریکه را در راستای قائم منحرف می کنند.

صفحات انحراف افقی به طور قائم نصب می شوند و باعث انحراف افقی باریکه می شوند. اسیلوسکوپ ها بیشتر برای اندازه گیری و نمایش کمیت های وابسته به زمان به کار می روند. برای این کار لازم است لکه نورانی لامپ پرتو کاتدی با سرعت ثابت از چپ به راست حرکت کند. چون صفحه اسیلوسکوپ محدود است بایستی لکه نورانی (باریکه الکترونی) بعد از طی فاصله افقی صفحه به ابتدای آن باز گردد. برگشت لکه نورانی از سمت راست به طرف چپ صفحه اسیلوسکوپ باید خیلی سریع باشد. به این منظور یک ولتاژ شیب به نام "**ولتاژ روبش**" به صفحه انحراف افقی اعمال می شود. این ولتاژ از یک مقدار ابتدایی شروع می شود، به طور خطی در زمان افزایش می یابد و به یک مقدار بیشینه می رسد. پس از آن دو باره به مقدار ابتدایی باز می گردد. سیگنالی که توانائی انجام این کار را دارد "**موج دندان اره ای**" می باشد. در ولتاژ روبش ایده آل، زمان برگشت صفر است.



شکل ۲: موج دندان اره ای

## صفحه فلئورسان

جنس این صفحه که در داخل لامپ پرتو کاتدی قرار دارد، از فسفر است. این ماده دارای این خاصیت است که انرژی جنبشی الکترون های برخورد کننده را جذب کرده و آنها را به صورت یک لکه نورانی ظاهر می سازد.

## کلیدهای اسیلوسکوپ

کلید های این دستگاه را می توان به چهار قسمت طبقه بندی کرد:

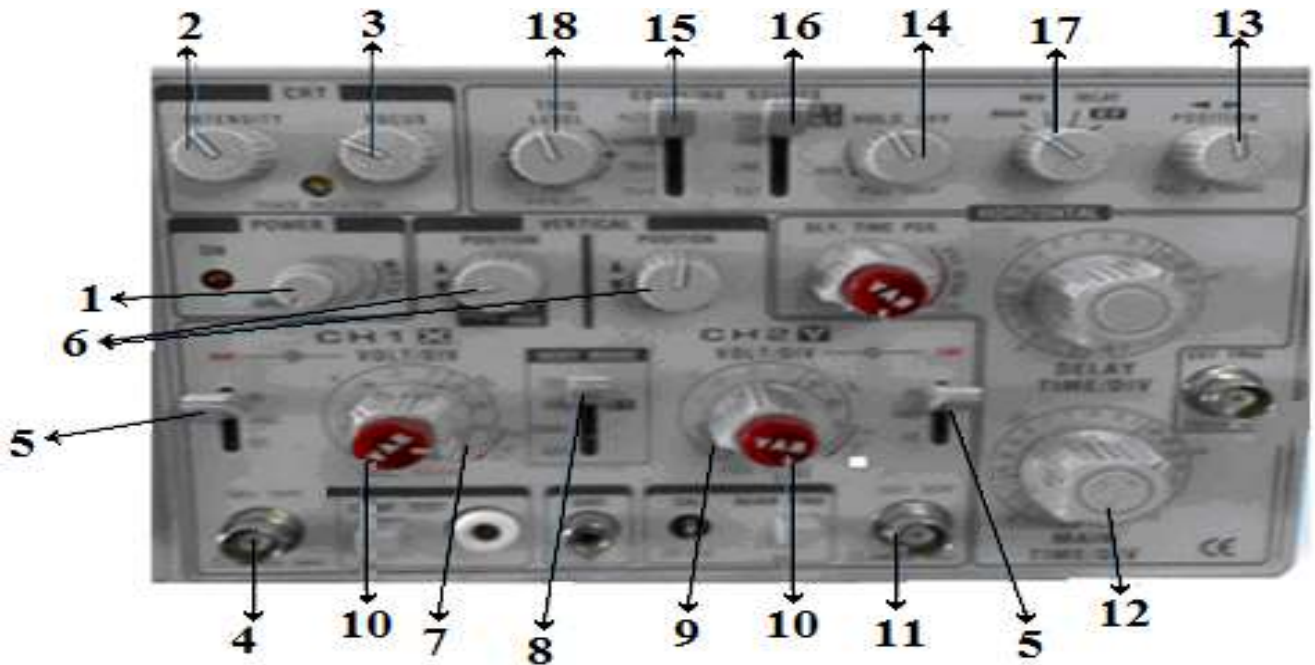
۱- گروه کنترل

۲- گروه کنترل عمودی

۳- گروه کنترل افقی

۴- گروه کنترل تریگر

در شکل زیر موقعیت هر یک از کلیدها بر روی دستگاه اسیلوسکوپ نشان داده شده است:



شکل ۳- پانل جلوی اسیلوسکوپ

### گروه کنترل

- ۱- کلید خاموش و روشن **POWER (ON/OFF)**: پس از روشن کردن دستگاه چند ثانیه طول می کشد تا لکه بر روی صفحه ظاهر شود.
- ۲- کلید شدت **(INTENSITY)**: این کلید برای کنترل میزان روشنایی نقطه نورانی است.
- ۳- کلید تمرکز/اشعه **(Focus)**: این کلید برای تنظیم رزولوشن نقطه نورانی به کار می رود.

### گروه کنترل عمودی

این مجموعه برای نمایش موقعیت عمودی اشعه بوده و شامل کلیدهای زیر می باشد:

- ۴- **INPUT (ورودی کانال ۱)**: این کلید محل ورودی سیگنال به اسیلوسکوپ است و به صورت یک سوکت BNC می باشد. سیگنال توسط یک سیم کواکسیال به ورودی متصل می شود.
- ۵- **کلید انتخاب نوع ورودی AC/GND/DC**: این کلید دارای سه وضعیت AC-GND-DC است و نحوه ارتباط سیگنال ورودی را به داخل اسیلوسکوپ تعیین می کند. اگر کلید در حالت AC قرار گیرد تنها قسمت متناوب سیگنال ورودی به مدارات اسیلوسکوپ می رود. اگر در حالت DC قرار گیرد، مقادیر DC موج را که به همراه دارد به مدارهای داخلی وصل می کند. در حالت GND ورودی تقویت کننده به زمین وصل می شود.
- ۶- **موقعیت عمودی Y-POSITION**: تنظیم موقعیت عمودی باریکه الکترونی با کلید position انجام می شود. به وسیله این کلید می توان باریکه را در راستای قائم جابجا نمود.
- ۷- **کلید سلکتور VOLT/DIV (سلکتور ولتاژ کانال ۱)**: می دانیم که بهره تقویت کننده اسیلوسکوپ بایستی قابل تغییر باشد تا بتواند سیگنال های مختلف با دامنه های متفاوت را روی صفحه نمایش داده و از صفحه خارج نشود. این کلید با VOLT/DIV مشخص شده است. با تنظیم این کلید بر روی حالت های مختلف، مقدار ولتاژ هر قسمت (۱سانتی متر) از محور قائم به دست می آید. مقدار واقعی ولتاژ به تعداد تقسیماتی که روی صفحه اشغال شده و مقدار ضریب VOLT/DIV بستگی دارد. برای مثال مقدار واقعی (V p-p) یک سیگنال به شرح زیر به دست می آید.

مثال:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{مقدار پیک تا پیک روی صفحه} = 6.4(\text{cm}) \\ \text{مقدار ضریب VOLT/DIV} = 0.2(\text{v/cm}) \end{array} \right\} \Rightarrow \text{مقدار واقعی} = 6.4 \times 0.2 = 1.28\text{v}$$

- ۸- کلید **VERT MODE**: شامل کلیدهای CH1 ، CH2 (نمایش دهنده ولتاژ هر یک از کانال ها)، DUAL (نمایش دهنده ولتاژ دو کانال به طور همزمان) و ADD (جمع کننده موج دو کانال)
- ۹- کلید **سلکتور VOLT/DIV (سلکتور ولتاژ کانال ۲):** کلید سلکتور ولتاژ کانال ۲
- ۱۰- **ورنیه VOLT/DIV**: جهت کالیبره کردن محور قائم به کار می رود و بایستی در طول آزمایش ورنیه در حالت کالیبره باشد.
- ۱۱- **INPUT (ورودی کانال ۲):** ورودی ولتاژ کانال ۲

### گروه کنترل افقی

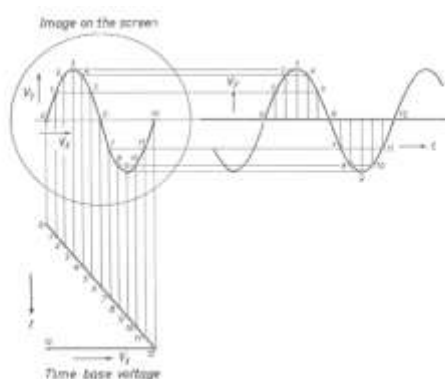
این مجموعه تعیین کننده وضعیت انحراف افقی اشعه و نحوه جاروب صفحه اسیلوسکوپ می باشد و شامل کلید های زیر است:

- ۱۲- کلید **سلکتور Time/DIV**: این کلید اصلی ترین کلید کنترل افقی است و برای کنترل زمان حرکت اشعه در مسیر افقی صفحه به کار می رود. به عبارت دیگر کلید Time/DIV، با تغییر فرکانس موج دندان اره ای، مدت زمان جاروب هر ۱ سانتی متر را در صفحه مشخص می کند. این کلید بر حسب (s/cm) ، (ms/cm) و ( $\mu\text{s/cm}$ ) تنظیم شده است. بدین ترتیب می توان با اندازه گیری تعداد تقسیمات افقی که یک موج کامل اشغال کرده دوره تناوب موج و در نتیجه فرکانس آن را محاسبه کرد.

- ۱۳- **موقعیت افقی POSITION**: برای جابجایی افقی سیگنال در صفحه نمایش از این کلید استفاده می شود.

### گروه کنترل تریگر

تریگر در الکترونیک به معنی آتش کردن و یا تحریک کردن است. در اسیلوسکوپ تریگر به معنی زمان شروع جاروب افقی است. عدم همزمانی ولتاژ جاروب و ولتاژ ورودی باعث حرکت موج بر روی صفحه نمایش می شود.



شکل ۴: نحوه تشکیل موج سینوسی بر روی صفحه نمایش اسیلوسکوپ

- ۱۴- **HOLD OFF**: کلید همزمان کننده موج جاروب و ولتاژ اندازه گیری شونده

- ۱۵- **AUTO**: حتی اگر سیگنال ورودی وصل نباشد، اعمال ولتاژ جاروب به صورت خودکار انجام می شود.

- ۱۶- کلید **SOURCE**: در حالت های CH1 و CH2 نوع جاروب دندان اره ای و در حالت LINE استفاده از موج سینوسی شبکه و در حالت EXT از موج خارجی برای جاروب کردن استفاده می شود.

- ۱۷- **X-Y**: کلید ترکیب موج کانال (۱ و ۲) و MAIN: کلید اعمال ولتاژ دندان اره ای (روبش)
- در حالت X-Y مدار تریگر قطع شده و از کانال های ۱ و ۲ به عنوان محور X (افقی) و محور Y (عمودی) استفاده می شود.

- ۱۸- **TRIG LEVEL**: کلید همزمان کننده موج جاروب و ولتاژ اندازه گیری شونده

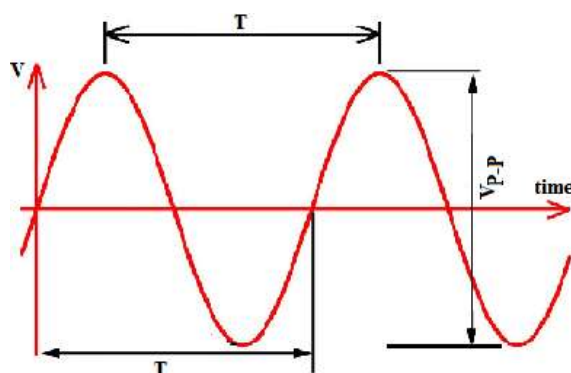


### الف) اندازه گیری پتانسیل منبع-DC

- کلید شماره ۱۷ را در حالت X-Y قرار دهید تا موج جاروب حذف شود.
  - کلید/انتخاب نوع ورودی (کلید ۵) را در حالت GND قرار داده و با استفاده از کلید position، باریکه را بر مبدا مختصات منطبق کنید.
  - دو سر پیلی را که در اختیار دارید به ورودی کانال مربوطه اتصال دهید.
  - با قرار دادن کلید انتخاب نوع ورودی (کلید ۵) در حالت DC و انتخاب ضریب مناسب volt/div (کلید ۷) مقدار ولتاژ پیل را یادداشت کنید.
  - مقدار ولتاژ دو سر باتری را تعیین و بصورت  $V \pm \Delta V$  گزارش کنید.
- که در آن  $\Delta V$  خطای اندازه گیری مربوط به ولتاژ می باشد.
- ضریب سلکتور  $\Delta V = 0.2 \text{ cm} \times \text{Volt/Div}$

### ب) اندازه گیری دامنه و مقدار ولتاژ مؤثر ( $V_{rms}$ ) - منبع AC

ولتاژ مؤثر یک موج سینوسی در حقیقت همان مقدار ثابتی است که به موج سینوسی نسبت داده می شود. ولتاژ مؤثر ( $V_{rms}$ )، معادل ولتاژ در جریان DC که همان مقدار توان را ایجاد کند، گویند. به طور مثال ولتاژ مؤثر برق شهر ۲۲۰ ولت می باشد. ولتاژ مؤثر یک موج سینوسی از رابطه زیر به دست می آید:



شکل ۵: موج سینوسی

$$V_{rms} = \frac{V_{P-P}}{2\sqrt{2}} \quad (۱)$$

$V_{p-p}$  فاصله بین قله و دره موج سینوسی می باشد (دو برابر دامنه موج).

برای مشاهده شکل یک موج متناوب مراحل زیر را انجام دهید:

- سیگنال ژنراتور را روشن کنید و آن را در حالت سینوسی با فرکانس ۵۰۰ Hz قرار دهید.
- پروب ورودی اسیلوسکوپ را به ترمینال خروجی سیگنال ژنراتور وصل کنید. از کالیبره بودن سیستم مطمئن شوید (کلید شماره ۱۰ بسته باشد).
- کلید شماره ۱۷ را در حالت main قرار دهید.
- کلید AC-GND-DC (شماره ۵) را در حالت AC قرار دهید.
- با تغییر کلید Volt/Div و Time/Div شکل موج مناسب را تشکیل دهید.
- مقدار ولتاژ مؤثر موج سینوسی ( $V_{rms} \pm \Delta V_{rms}$ ) را محاسبه و گزارش کنید.

### ج) اندازه گیری زمان تناوب و فرکانس

- به کمک اسیلوسکوپ می توان زمان تناوب (مدت زمان یک سیکل کامل) سیگنال را محاسبه کرد. شکل موج در حالت قبل را در نظر بگیرید. زمان تناوب سیگنال ورودی به کمک رابطه زیر بدست می آید.

ضریب سلکتور Time/Div  $\times$  تعداد خانه های در بر گرفته شده ی یک سیکل کامل =  $T$

خطای اندازه گیری مربوط به زمان تناوب نیز از رابطه زیر بدست می آید.

$$\Delta T = 0.2 \text{cm} \times \text{Time/Div} \text{ ضریب سلکتور}$$

- زمان تناوب را بصورت  $(T \pm \Delta T)$  گزارش نمائید.

- فرکانس منبع  $(f \pm \Delta f)$  را با استفاده از روابط زیر محاسبه و گزارش نمائید.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

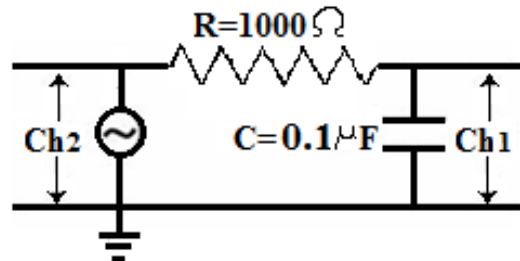
$$\Delta f = f \left| \frac{\Delta T}{T} \right| \quad (3)$$

### رسم منحنیهای $y$ بر حسب $x$ :

- اگر بخواهیم منحنی تغییرات  $y$  را بر حسب متغیری غیر از زمان  $t$  به دست آوریم (مثلا  $x$ )، می توان پارامترهای  $y$  و  $x$  را به ترتیب به ورودی های عمودی و افقی اسیلوسکوپ اعمال نمود. با قرار دادن کلیه کلیدها در حالت  $x$ - $y$ ، تغییرات  $y$  بر حسب  $x$  نمایش داده می شود.

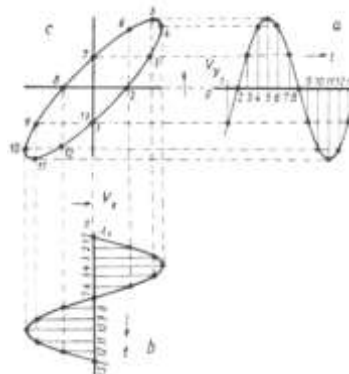
### د) محاسبه اختلاف فاز بر حسب فرکانس در مدار RC

- ابتدا مدار زیر را با مقاومت  $1000\Omega$  و خازن  $0.1\mu\text{F}$  و منبع سینوسی به طور سری ببندید.

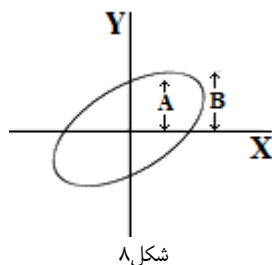


شکل ۶: مدار RC

- دو سر خازن را به ورودی عمودی (Ch1) و دو سر نوسانگر (سیگنال ژنراتور) را به ورودی افقی (Ch2) وصل کنید.
- کلیدهای دستگاه را در وضعیت  $x$ - $y$  قرار دهید. از کالیبره بودن اسیلوسکوپ مطمئن شوید (کلید شماره ۱۰ بسته باشد).
- ترکیب دو موج سینوسی  $x = E \sin(\omega t)$  و  $y = B \sin(\omega t + \theta)$  شکل بیضی را روی صفحه ظاهر می سازد.
- فرکانس نوسانگر را مطابق جدول زیر تغییر دهید. با استفاده از شکل بیضی که روی صفحه نمایش ظاهر شده است، می توانید مقادیر  $A$  و  $B$  را یادداشت کرده و اختلاف فاز دو موج سینوسی را از رابطه (۴) محاسبه نمایید.



شکل ۷: نحوه تشکیل بیضی بر روی صفحه اسیلوسکوپ



شکل ۸

$$\sin\theta = \frac{A}{B} \Rightarrow \theta = \sin^{-1}\left(\frac{A}{B}\right) \quad (۴)$$

جدول ۱

f (HZ)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
2A												
2B												
Sinθ=A/B												

• حال نمودار  $\sin\theta$  بر حسب فرکانس را در یک نمودار میلیمتری رسم نمایید و اختلاف فاز مربوط به فرکانس 1500HZ را از روی نمودار به دست آورید.

• مقدار اختلاف فاز  $\theta$  را از رابطه نظری  $\tan\theta = RC\omega$  به دست آورده و درصد خطای نسبی آن را محاسبه کنید.

### ایجاد منحنی های لیسازور<sup>۳</sup>:

هرگاه ولتاژهای اعمال شده به صفحات عمودی و افقی اسیلوسکوپ هر دو سینوسی بوده و رابطه هارمونیک با هم داشته باشند، اشکال لیسازور بر روی صفحه ظاهر خواهد شد. اگر دو موج سینوسی همفاز یا با اختلاف فاز  $\pi$  با فرکانس و دامنه یکسان به صفحات انحراف افقی و عمودی اعمال شود، روی صفحه اسیلوسکوپ به ترتیب یک خط تحت زاویه  $45^\circ$  به صورت نیمساز ربع اول و سوم و یک خط تحت زاویه  $135^\circ$  به صورت نیمساز ربع دوم و چهارم ظاهر خواهد شد. روابط دو موج با اختلاف فاز  $\pi$  به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} y &= a \sin(\omega t) \\ x &= a \sin(\omega t + \pi) = -a \sin(\omega t) \\ \rightarrow y &= -x \end{aligned} \quad (۱)$$

اگر بار دیگر همان دو موج با اختلاف فاز  $90^\circ$  یا  $270^\circ$  به صفحات اعمال شوند، این بار شکل ظاهر شده دایره خواهد بود. این اختلاف فاز اگر بین  $0^\circ$  تا  $90^\circ$  متغیر باشد، می توان اشکال بیضی را نیز مشاهده نمود. تغییر دامنه دو موج نیز شرایط مشابهی را به وجود می آورد.

### ۵) نحوه محاسبه فرکانس مجهول با استفاده از اشکال لیسازور

• کلید source را در حالت Line قرار دهید.

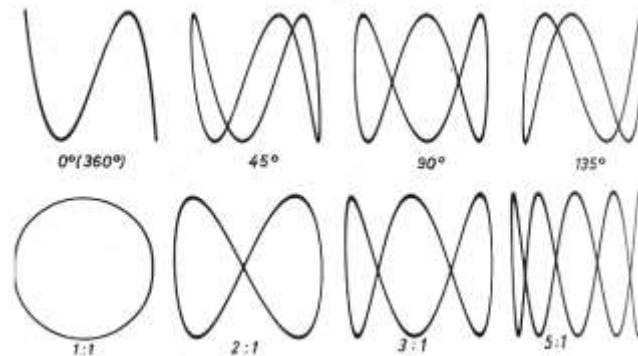
• اسیلوسکوپ را در حالت X-Y قرار دهید.

<sup>3</sup> Lissajous curves

● منبع موج سینوسی 1 (سیگنال ژنراتور 1) را به ورودی کانال 1 وصل کنید.

● منبع موج سینوسی 2 (سیگنال ژنراتور 2) را به ورودی کانال 2 وصل کنید.

اگر فرکانس یکی از دو موج اعمال شده معلوم و دیگری مجهول باشد، در صورتی که منحنی بسته ای داشته باشیم، با استفاده از اشکال لیسازور می توانیم فرکانس مجهول را طبق رابطه زیر به دست آوریم:



شکل ۹: اشکال لیسازور

$$\frac{f_v}{f_h} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\text{تعداد برخورد های خط افقی با منحنی}}{\text{تعداد برخورد های خط قائم با منحنی}}$$

## سؤالات:

۱- آیا می توان از اسیلوسکوپ برای اندازه گیری مستقیم شدت جریان استفاده نمود؟ چرا؟

۲- اشکال لیسازور را چگونه می توان تشکیل داد و برای اندازه گیری چه پارامترهایی به کار می روند؟

۳- علت اختلاف فاز  $\theta$  در مدار چيست و تابع چه پارامترهایی است؟

۴- علت حضور مقاومت  $1000\Omega$  در مدار چيست؟

۵- رابطه (۴) مربوط به اختلاف فاز را ثابت کنید.

۶- آیا در قرائت مقادير A و B در بیضی نیازی به ضرب Volt/Div وجود دارد یا خیر؟ چرا؟

۷- با توجه به اشکال لیسازور چرا در یک مدار RC شکل حاصل در اسیلوسکوپ به صورت بیضی در می آید؟

۸- با توجه به نتایج آزمایش (۶) و این آزمایش، اثر خازن را در مدارهای ولتاژ متناوب و مستقیم با یکدیگر مقایسه کنید.

## آزمایش ۷: تحقیق قانون القای فارادی

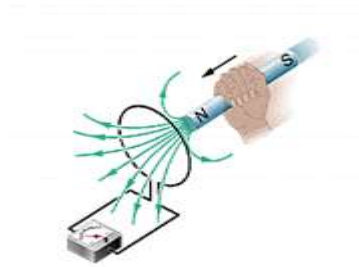
**هدف آزمایش:** ۱- بررسی وابستگی نیروی محرکه القایی با دامنه و فرکانس

۲- اندازه گیری ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی در خلا ( $\mu_0$ )

۳- اندازه گیری اختلاف فاز دو موج متناوب

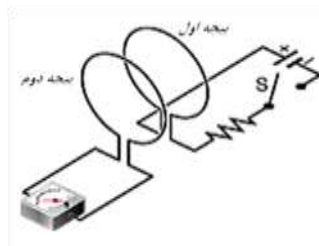
**وسایل آزمایش:** سیملوله و پایه آن، اسیلوسکوپ، مقاومت یک اهم، سیگنال ژنراتور (نوسان ساز)، سیم های رابط

**تئوری آزمایش:** اگر یک آهن ربای تیغه ای را در اختیار داشته باشید و آن را به طرف پیچه (سیم پیچ) یا پیچه را به طرف آهن ربا حرکت دهید، عقربه گالوانومتر (متصل به دو سر پیچه) منحرف خواهد شد. این بدان معناست که علیرغم وجود منبع تغذیه در مدار، در اثر حرکت تیغه آهن ربا جریان لحظه ای در حلقه برقرار شده و نیروی محرکه القایی به وجود می آید. هر چه سرعت نسبی حرکت آهن ربا و پیچه بیشتر باشد، نیروی محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی بزرگتر است.



شکل ۱: با نزدیک و یا دور کردن آهن ربا به یک پیچه، روی دو سر آن نیروی محرکه القا خواهد شد

در آزمایش دیگری دو پیچه ساکن را در نظر بگیرید. با زدن کلید S جریان لحظه ای القایی در پیچه دوم به وجود می آید. در لحظه قطع کلید نیز این جریان مجدداً مشاهده می شود.



شکل ۲

دو آزمایش بالا توسط مایکل فاراده انجام شد. وی نشان داد که علت به وجود آمدن جریان و نیروی محرکه القایی در یک پیچه، تغییر شار عبوری از آن پیچه نسبت به زمان است. این مطلب را "قانون القاء فاراده" می نامند. هرگاه خطوط میدان مغناطیسی B از سطح مقطعی به مساحت A عبور کند، شار مغناطیسی عبوری از آن عبارت خواهد بود از:

$$\phi_B = \int B \cdot dA \quad (۱)$$

با تغییر شار مغناطیسی نسبت به زمان خواهیم داشت:

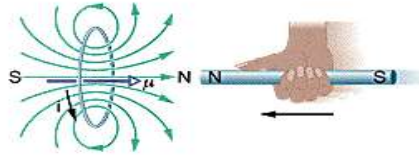
$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (۱)$$

$\varepsilon$  نیروی محرکه القایی می باشد. اگر پیچه شامل N دور باشد، نیروی محرکه القایی برابر خواهد شد با:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (۲)$$

بنابراین تغییر هر یک از پارامترهای شار مغناطیسی، جریان القایی را در پیچه دوم ایجاد می نماید.

**سؤال:** در شکل زیر قطب شمال یک آهن ربا را به یک حلقه رسانا نزدیک می کنیم. جهت جریان القایی در حلقه چگونه است؟



شکل ۳

حلقه حامل جریان القایی مانند یک دو قطبی مغناطیسی اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می کند. بنا به قانون لنز جهت جریان القایی در حلقه به گونه ای است که با افزایش شار مغناطیسی گذرنده از آن همواره مخالفت می کند (شکل-۳).

همان طور که می دانید میدان مغناطیسی داخل سیملوله ای که حامل جریان  $I$  می باشد از رابطه زیر به دست می آید:



شکل ۴: سیملوله حامل جریان  $I$

$$B = \mu_0 \nu I \quad (۳)$$

که در آن  $\mu_0$  ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی در خلا است و در این آزمایش  $\nu = N/L = 400$ ، تعداد دور در واحد طول سیملوله اولیه می باشد. حال اگر جریان سیملوله را نسبت به زمان تغییر دهیم، تغییر میدان مغناطیسی نیروی محرکه القایی ایجاد خواهد کرد. اگر اثر نیروی محرکه القایی را بر روی سیملوله دیگری به نام سیملوله ثانویه بررسی کنیم، مشاهده می شود که ولتاژ القایی در سیملوله ثانویه ایجاد شده است. می توان روابط زیر را برای ولتاژ القایی ایجاد شده در سیملوله ثانویه به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} = -NA\mu_0 \nu \frac{dI}{dt} \quad (۵)$$

که در آن  $A = ۳/۸۵ \times ۱۰^{-۳} \text{ m}^2$  سطح مقطع سیملوله ثانویه و  $N=۶۰$  تعداد دورهای سیملوله ثانویه می باشد. فاراده رابطه دیگری نیز برای نیروی محرکه القایی و تغییرات جریان در واحد زمان به دست آورده بود:

$$\varepsilon = -M \frac{dI}{dt} \quad (۶)$$

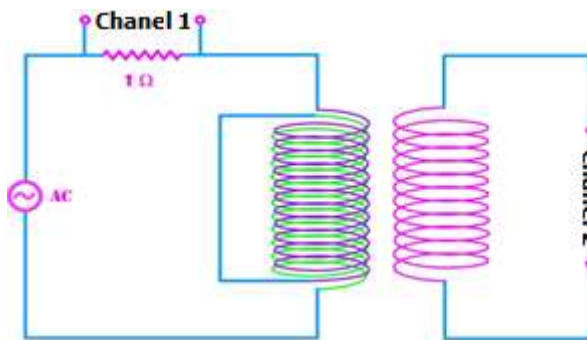
$M$  ضریب القاء متقابل سیملوله بر حسب هانری می باشد. مقایسه روابط (۵) و (۶) نتیجه می دهد که:

$$M = NA\nu\mu_0 \quad (۷)$$

### روش آزمایش:

- ابتدا دو سیملوله مورد نظر را به طور سری به یکدیگر (از انتهای یک سیملوله مثلا سر آبی به ابتدای سیملوله دیگر یعنی سر قرمز آن) متصل نمایید.
- مدار شکل (۵) را ببندید. کانال ۱ اسیلوسکوپ به دو سر مقاومت ۱ اهم و کانال ۲ آن را به دو ترمینال سیملوله ثانویه متصل کنید.

- سیگنال ژنراتور را در حالت موج مثلثی قرار دهید. کلیدهای مربوط (اسیلوسکوپ) به Source را در حالت Main و Auto تنظیم کنید. با تنظیم کلید volt/Div و Time/Div موج مثلثی ایجاد شده را در کانال ۱ مشاهده نمایید. می توانید تغییرات جریان را از محور قائم قرائت نمایید. آنچه در کانال ۲ ظاهر می شود ولتاژ القایی سیملوله ثانویه می باشد. با قرار دادن کلید بر روی dual می توانید این دو موج را به طور همزمان مشاهده نمایید.

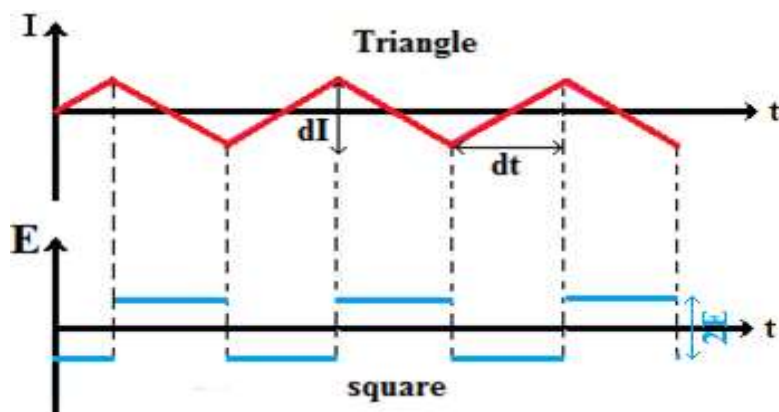


شکل ۵

حال به دو روش ذیل مقدار نیروی محرکه القایی در مدار را اندازه گیری می نماییم:

#### الف) تحقیق بستگی نیروی محرکه القایی با فرکانس موج تحریک

- مقدار دامنه (ولتاژ) موج مثلثی را ثابت نگهداشته و فرکانس موج را مطابق جدول (۱) تغییر دهید.



شکل ۶: موج تحریک و موج القا بر روی صفحه نمایش اسیلوسکوپ

- تغییرات جریان ( $dI$  فاصله ای که در آن تغییرات جریان یکنواخت است) را از روی محور قائم و مقدار  $dt$  را از روی محور افقی قرائت نمایید. ( $dt$  نصف دوره تناوب موج می باشد). سپس از روی کانال ۲ مقدار نیروی محرکه القایی  $\mathcal{E}$  را یادداشت نمایید.

جدول ۱

f(Hz)	200	400	600	800	1000
$dI(A)$					
$dt(S)$					
$dI/dt(A/S)$					
$\mathcal{E}(V)$					

- منحنی  $\mathcal{E}$  بر حسب  $dI/dt$  را بر روی کاغذ میلیمتری رسم کنید، و با استفاده از شیب خط  $\mu_0$  را بدست آورید.

#### ب) تحقیق بستگی نیروی محرکه القایی با دامنه موج تحریک

- این بار فرکانس را ثابت و برابر 400 (Hz) قرار دهید.

● با استفاده از ولوم Amplitude (سیگنال ژنراتور)، دامنه ولتاژ متناوب را در حالت ماکزیمم قرار دهید. سپس به کمک کلید Volt/Div شکل موج CH1 را به طور کامل در تمام صفحه، نمایش دهید. در این حالت ۴/۴ ولتاژ منبع مشاهده می شود.

● مقادیر  $dI$  و  $dt$  را یادداشت کرده و مجدداً  $\epsilon$  را از کانال ۲ بخوانید. با تغییر ولوم دامنه سیگنال ژنراتور، مقادیر ۱/۴، ۲/۴ و ۳/۴ ولتاژ ماکزیمم منبع را تنظیم نموده و جدول ۲ را کامل کنید.

جدول ۲

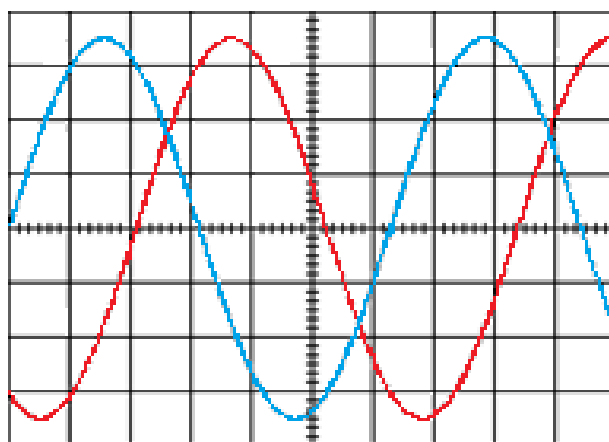
ولتاژ منبع	1/4 منبع	2/4 منبع	3/4 منبع	4/4 منبع
$dI(A)$				
$dt(S)$				
$dI/dt(A/S)$				
$\epsilon(V)$				

نمودار  $\epsilon - dI/dt$  را رسم نمایید. از روی شیب نمودارهای رسم شده مقدار  $M$  را محاسبه نموده و مقدار  $\mu_0$  را از رابطه (۶) به دست آورید. با توجه به مقدار  $(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7})$ ، درصد خطای نسبی آن را حساب کنید.

### ج) اندازه گیری اختلاف فاز دو موج

● حال به همین طریق که مدار بسته است ولتاژ سیگنال ژنراتور را در حالت سینوسی قرار دهید.

● کلید اسیلوسکوپ را در حالت dual قرار داده و دو موج را به طور همزمان مشاهده کنید. با اندازه گیری فاصله زمانی دو قله موج بر حسب  $t$  و براساس رابطه زیر اختلاف فاز دو موج را اندازه گیری نمایید.



شکل ۷

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\text{فاصله زمانی دو قله موج} \times \text{ضریب Time/div}}{\text{دوره تناوب موج} \times \text{ضریب Time/div}}$$

### سوالات:

- ۱- علت اختلاف فاز بین ولتاژ القایی دو سر سیملوله ثانویه و سیگنال ژنراتور را توضیح دهید.
- ۲- علت حضور مقاومت ۱ اهمی در مدار چیست؟
- ۳- چگونه می توان دامنه ولتاژ القائی ایجاد شده در سیملوله ثانویه را تغییر داد؟
- ۴- در اندازه گیری اختلاف فاز دو موج، شکل موج تشکیل شده در کانال ۱ و ۲ اسیلوسکوپ را از نظر دامنه و فرکانس با یکدیگر مقایسه نمایید.
- ۵- اگر در بستن مدار قانون لنز مورد توجه قرار نگیرد چه تغییری در شکلها حاصل می شود؟



## آزمایش ۸: اندازه گیری میدان مغناطیسی زمین

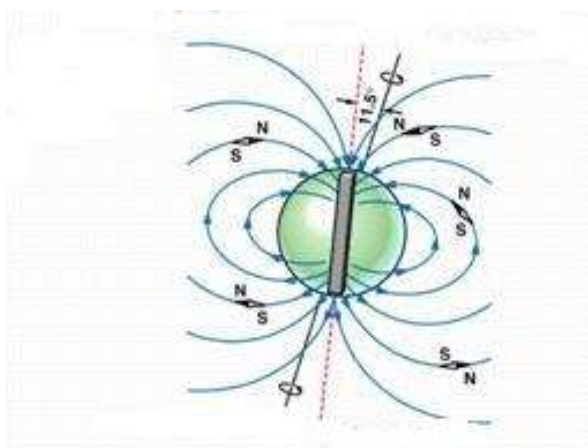
**هدف آزمایش:** ۱- اندازه گیری میدان مغناطیسی زمین با استفاده از قانون القاء فاراده

۲- تعیین جهت میدان مغناطیسی زمین

**وسایل آزمایش:** موتور الکتریکی به همراه پایه اتصال به میز، منبع تغذیه DC، کلید چاقوئی دابل، رکورد (ثبات)، تقویت کننده ولتاژ، حلقه های کوچک و

بزرگ، سیم های رابط، آچار سه نظام

**تئوری آزمایش:** در هر نقطه ای در نزدیکی سطح زمین، عقربه مغناطیسی آویزان از یک نخ یا واقع بر روی یک نقطه، به ترتیب خاصی سمت گیری می کند (تقریباً در جهت شمال به جنوب). این واقعیت مهم به این معنا است که زمین دارای خاصیت مغناطیسی است. علت وجود این میدان مغناطیسی، مواد مذاب موجود در مرکز زمین است.



شکل ۱

### شیب مغناطیسی

می دانیم خاصیت مغناطیسی یک آهن ربا در نقاط مختلف آن متفاوت است و در دو قطب آن، این خاصیت بیشتر است. به همین ترتیب، خاصیت آهن ربایی کره زمین در دو قطب بیشتر است. اگر یک عقربه مغناطیسی آزاد باشد تا بتواند در راستای عمودی حرکت کند، نوک این عقربه نزدیک قطب ها به سمت زمین متمایل می شود. به عنوان مثال در قطب شمال، سر عقربه N آن، عمود بر سطح زمین خواهد شد. عقربه در خط استوای مغناطیسی، افقی (موازی سطح زمین) قرار می گیرد. پس جهت عقربه مغناطیسی در مکانهای مختلف استوا تا قطب، نسبت به سطح افق تغییر کرده و زاویه ای با آن می سازد. این زاویه را "شیب مغناطیسی" یا "میل مغناطیسی" می نامند. می توان شیب مغناطیسی را به وسیله زاویه سنج مغناطیسی اندازه گیری نمود. این دستگاه در واقع یک عقربه مغناطیسی است که تحت تاثیر میدان مغناطیسی زمین در صفحه قائم منحرف شده و از طرف زمین به آن نیرو وارد می شود. هرگاه حلقه ای بسته به مساحت A داخل میدان مغناطیسی B قرار گیرد، شار مغناطیسی عبوری از حلقه برابر خواهد بود با:

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta \quad (1)$$

که در آن  $\theta$  زاویه بین بردار عمود بر سطح و میدان مغناطیسی می باشد. طبق قانون القاء فاراده، هرگاه شار مغناطیسی عبوری از یک حلقه بسته با زمان تغییر کند، در آن حلقه، ولتاژ الکتریکی القاء می شود. به عبارت ریاضی:

$$\varepsilon = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

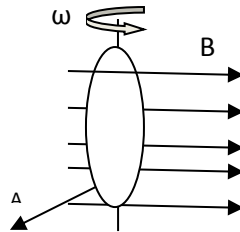
N تعداد دورهای سیم پیچ می باشد. حال اگر سیم پیچ را با سرعت زاویه ای  $\omega$  در حوزه میدان مغناطیسی زمین به چرخش در آوریم، در اثر قطع خطوط میدان مغناطیسی توسط آن، جریان القائی در حلقه به وجود خواهد آمد. اگر میدان مغناطیسی بر امتداد محور دوران حلقه به شعاع R عمود باشد، در آن صورت خواهیم داشت:

$$\varphi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B\pi R^2 \cos(\theta) = B\pi R^2 \cos(\omega t) \quad (3)$$

همچنین طبق رابطه (۲) ولتاژ القایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\varepsilon = -N \frac{d\varphi}{dt} = N\pi R^2 \omega B \sin(\omega t) = \varepsilon_{\max} \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon_{\max} = N\pi R^2 \omega B = aB \quad (4)$$



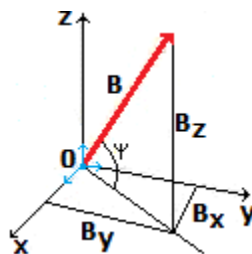
شکل ۲

می توان  $\varepsilon_{\max}$  را به عنوان ماکزیمم دامنه ولتاژ القایی در نظر گرفت که در آن عبارت خواهد بود :

$$a = NA\omega = \frac{2\pi^2 NR^2}{T} \quad (4)$$

همان طور که می دانید میدان مغناطیسی زمین الزاما" بر محور دوران حلقه عمود نیست. فرض کنید محور دوران حلقه، در راستای محور Z باشد و میدان مغناطیسی زمین تحت زاویه ای نسبت به آن قرار داشته باشد. در این صورت می توان میدان مغناطیسی زمین را در راستای محوره های X، Y و Z به ترتیب با سه مولفه  $B_x$ ،  $B_y$  و  $B_z$  نشان داد. شار حاصل از مولفه  $B_z$  هیچ گونه جریان القایی ایجاد نمی کند. چرا؟ برآیند مولفه های  $B_x$  و  $B_y$  تولید ولتاژ القایی در حلقه می نمایند. بنابراین اگر حلقه مورد نظر در راستای محور Z با سرعت زاویه ای  $\omega$  دوران کند، طبق رابطه (۴) ماکزیمم دامنه ولتاژ القایی به شکل زیر خواهد بود:

$$\varepsilon_{\max z} = a\sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (6)$$



شکل ۳

اگر حلقه به ترتیب در راستای محوره های X و Y نیز با سرعت زاویه ای  $\omega$  دوران کند، ماکزیمم دامنه ولتاژ القایی در راستای X و Y عبارت خواهند بود از:

$$\begin{cases} \varepsilon_{mx} = a\sqrt{B_y^2 + B_z^2} \\ \varepsilon_{my} = a\sqrt{B_x^2 + B_z^2} \end{cases} \quad (7)$$

با انجام کمی محاسبه، مولفه های میدان مغناطیسی زمین به صورت زیر به دست می آیند:

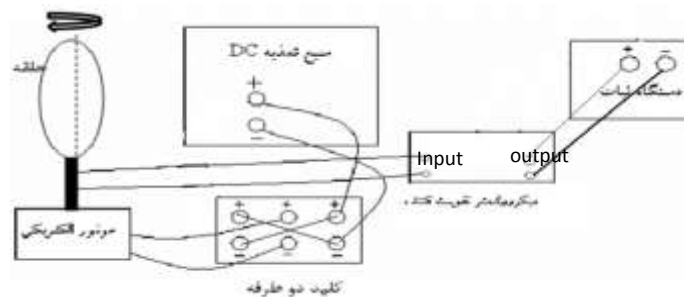
$$\begin{cases} B_x^2 = \frac{\varepsilon_{my}^2 - \varepsilon_{mx}^2 + \varepsilon_{mz}^2}{2a^2} \\ B_y^2 = \frac{\varepsilon_{mx}^2 - \varepsilon_{my}^2 + \varepsilon_{mz}^2}{2a^2} \\ B_z^2 = \frac{\varepsilon_{mx}^2 + \varepsilon_{my}^2 - \varepsilon_{mz}^2}{2a^2} \end{cases} \quad (8)$$

در نهایت اندازه میدان مغناطیسی زمین و نیز زاویه میل میدان مغناطیسی زمین ( $\psi$ ) از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{cases} B_e = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{mx})^2 + (\varepsilon_{my})^2 + (\varepsilon_{mz})^2}{2a^2}} \\ \tan\psi = \frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{mx})^2 + (\varepsilon_{my})^2 - (\varepsilon_{mz})^2}{2(\varepsilon_{mz})^2}} \end{cases} \quad (9)$$

### روش آزمایش:

- برای انجام این آزمایش، ابتدا پایه موتور الکتریکی را روی میز ببندید. سپس حلقه بزرگ را روی آن سوار کنید.
- ورودی برق موتور را به وسیله یک کلید چاقویی دوبل به منبع تغذیه با ولتاژ DC متصل نمایید. جهت جریان مدار را مطابق شکل به حالت معکوس در آورید.
- ولتاژ منبع تغذیه DC را روی ۱۸ ولت قرار دهید. در این آزمایش از دو حلقه با قطرهای ۴۰۰ mm و ۲۰۰ mm استفاده می نمایم.
- هر یک از حلقه ها، شامل سیم پیچ هایی با تعداد ۱۰ دور سیم می باشند. دو سر این سیم پیچ ها را به دستگاه تقویت کننده ولتاژ (Micro Voltmeter) متصل نمایید. ضریب تقویت را روی  $10^4$  ولت تنظیم کنید. ولتاژ تقویت شده را به دستگاه ثبات بدهید تا ولتاژ متناوب را نمایش دهد. ثبات (رکوردر) در واقع نوعی اسیلوسکوپ مکانیکی می باشد که شکل امواج را بر روی کاغذ مخصوص رسم می کند. این دستگاه دارای یک سلکتور جهت تنظیم سرعت حرکت کاغذ می باشد. سرعت عبور کاغذ را روی 5 mm/s و سلکتور مربوط به ولتاژ (دامنه) را روی ۱۰ ولت قرار دهید. این دستگاه همچنین دارای کلید هایی برای کنترل موقعیت کاغذ، موقعیت قلم و ... می باشد.



شکل ۴

دستگاه ثبات ولتاژ متناوب القایی را در عرض کاغذ ترسیم می نماید. بنابراین فاصله افقی دو قله موج، دو برابر ماکزیمم دامنه ولتاژ القایی خواهد بود. این فاصله با توجه به ضریب ولتاژ ثبات و ضریب تقویت میکرو ولت متر محاسبه می شود. فاصله عمودی بین دو قله متوالی با توجه به سرعت حرکت کاغذ بیانگر دوره تناوب ولتاژ القایی می باشد.

- حال محور حلقه بزرگ را در جهت محور Z قرار داده و شکل موج آن را رسم کنید. سپس با توجه به دستگاه راستگرد، حلقه را در راستای محوره‌های X و Y تنظیم نموده و با استفاده از شکل موج رسم شده، ماکزیمم دامنه ولتاژ القائی و دوره تناوب را در هر یک از جهت های محور مختصات به دست آورید.

**توجه: به هنگام جابجایی موتور از اتصال صحیح و محکم آن به میز کار مطمئن شوید.**

- با توجه به روابط (6)، (7)، (8) و (9) میدان مغناطیسی زمین و زاویه میل میدان مغناطیسی را به دست آورید.

- همه این مراحل را برای حلقه کوچک تکرار کنید و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمایید.

جدول ۱: نتایج مربوط به حلقه بزرگ

دوران حول \	$\varepsilon_{\max}$ (v)	T (s)	$a = \frac{2\pi^2 NR^2}{T} (m^2/s)$
x			
y			
z			

(حلقه بزرگ:  $2R = 400\text{mm}$ )

جدول ۲: نتایج مربوط به حلقه کوچک

دوران حول \	$\varepsilon_{\max}$ (v)	T (s)	$a = \frac{2\pi^2 NR^2}{T} (m^2/s)$
x			
y			
z			

(حلقه کوچک:  $2R = 200\text{mm}$ )

## هدف آزمایش:

بررسی چگونگی مغناطیس شدن هسته آهنی، اندازه گیری میدان مغناطیسی و ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی آن. ( $B$  و  $\mu(H)$ )

## وسایل آزمایش:

حلقه رولاند، منبع تغذیه، رنوستا، مقاومت، گالوانومتر بالستیک، سیم پیچ استاندارد، آمپر متر با شنت ۱/۵ آمپر، مترونم، سیم رابط، کلید دو طرفه.

## تئوری آزمایش

مواد در طبیعت به لحاظ خواص مغناطیسی به سه دسته دیامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس تقسیم می شوند. مواد مغناطیسی شامل دو قطبیهای مغناطیسی ( $m_i$ ) می باشند. این دو قطبیهای به طور کاتوره ای در حوزه های مغناطیسی ماده قرار گرفته اند. هرگاه دو قطبیهای تحت تاثیر میدان مغناطیسی مناسب همراستای میدان شوند، ماده مغناطیده می شود. می توان میزان مغناطش مواد را طبق رابطه زیر تعریف کرد:

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \sum_{i=1} m_i \quad (1)$$

در این آزمایش قصد داریم میزان مغناطش هسته آهنی (ماده فرومغناطیس) داخل حلقه رولاند را با استفاده از قانون القاء فاراده اندازه گیری نماییم. حلقه رولاند عبارت است از چنبره ای که داخل آن هسته آهنی قرار گرفته است. هرگاه از داخل چنبره و در غیاب هسته آهنی جریان  $I$  عبور داده شود، شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده در داخل چنبره از رابطه:

$$H = \frac{NI}{2\pi r} \quad (2)$$

به دست می آید.  $N$  تعداد دورهای سیم پیچ اولیه (مغناطیس کننده) و  $r$  شعاع متوسط حلقه می باشد. می توان رابطه بالا را به صورت  $H = \beta I$  نوشت، که در آن مقدار  $\beta$  معادل تعداد دورهای سیم پیچ در واحد طول ( $\beta = \frac{N}{2\pi r}$ ) است. در این آزمایش  $N = 333$  و  $r = 0.101m$  قطر متوسط حلقه می باشد. حال اگر هسته آهنی را داخل سیم پیچ قرار دهیم، با عبور جریان از داخل سیم پیچ و ایجاد میدان مغناطیسی در داخل آن، دو قطبیهای داخل هسته تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی با یکدیگر همراستا شده و هسته آهنی خود تبدیل به یک آهن ربا می شود. می توان چگالی میدان مغناطیسی ایجاد شده را به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H}) \quad (3)$$

$\mu$  ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هوا یا خلا نامیده می شود که مقدار آن  $(Tm/A) \times 10^{-7} \times 4\pi$  است.

$\mu_0 M$  معرف میدان مغناطیسی حاصل از مغناطش هسته آهنی و  $\mu_0 H$  معرف میدان ناشی از جریان انتقالی  $I$  در داخل سیم پیچ اولیه می باشد. همچنین می توان رابطه بالا را با فرض اینکه بردارهای  $\vec{B}$ ،  $\vec{H}$  و  $\vec{M}$  موازی اند به صورت زیر نیز نوشت:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H}) = \mu_0 (1 + \frac{\vec{M}}{\vec{H}}) \vec{H} = \mu(H) \vec{H} \quad (4)$$

عبارت  $\mu(H)$  "ضریب تراوایی" یا "ضریب نفوذپذیری مغناطیسی" ماده نامیده می شود. این ضریب میزان مغناطیده شدن مواد تحت تاثیر میدان  $H$  را بیان می نماید. نسبت بدون بعد  $\frac{M}{H}$  "پذیرفتاری مغناطیسی" ( $\chi_m$ ) نام دارد. این نسبت در مواد پارامغناطیس و دیامغناطیس ثابت و به ترتیب دارای مقادیر مثبت و منفی است. در مواد فرومغناطیس این نسبت ثابت نبوده و میزان مغناطش مواد فرو مغناطیس تحت تاثیر مقدار جریان متغیر خواهد بود.

حال اگر جریان  $I$  را داخل سیم پیچ اولیه حلقه رولاند برقرار نماییم ، میدان مغناطیسی  $H$  در آن تولید می شود. با تغییر جهت جریان از  $I$  به  $-I$  میدان مغناطیسی نیز از  $H$  به  $-H$  تغییر کرده و چگالی میدان مغناطیسی  $B$  نیز تغییر می نماید. در اثر این تغییرات نیرو محرکه القایی در سیم پیچ ثانویه ایجاد می گردد:

$$\begin{aligned} \phi &= N' \vec{B} \cdot \vec{A} = N' BA \cos \theta \\ \Delta \phi &= N' BA (\cos \pi - \cos 0) = -2N' BA \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -N'A \frac{dB}{dt} = N'A \frac{2B}{\Delta t}$$

( $N' = 25$ ) تعداد دورهای سیم پیچ ثانویه (مغناطیس شونده) که بر روی سیم پیچ های اولیه قرار گرفته است،  $A = 75 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  سطح مقطع سیم پیچ و  $\Delta t$  مدت زمان تغییر جریان از  $I$  به  $-I$  می باشد. حال اگر جریان القایی ایجاد شده در سیم پیچ ثانویه را به داخل گالوانومتر بالستیک هدایت نماییم، می توانیم انحراف لکه روشن را مشاهده و بزرگی نیرو محرکه القایی را اندازه گیری نماییم:

$$\varepsilon = K \theta \quad (6)$$

ثابت تناسب  $K$  به مشخصات گالوانومتر و مقدار مقاومت مدار ثانویه بستگی دارد . می توان مقدار  $K$  را به طریق تجربی اندازه گیری نمود. از مقایسه روابط (5) و (6) معادله زیر به دست می آید :

$$N'A \frac{2B}{\Delta t} = K \theta \Rightarrow B = \frac{K \Delta t}{2N'A} \theta \quad (7)$$

اگر در رابطه (7) مقدار  $K$  محاسبه شود ، با معلوم بودن سایر مقادیر، میدان مغناطیسی  $B$  به دست می آید.

برای اندازه گیری ضریب  $K$  (مدرج کردن گالوانومتر بالستیک) از سیم پیچ استاندارد استفاده می نماییم. این سیم پیچ بدون هسته آهنی ( $\vec{M} = 0$ ) و دارای تعداد دورهای اولیه و ثانویه مساوی می باشد. با قرار دادن این سیم پیچ در مدار و اعمال جریان مشخص  $I_0$  در مدت زمان  $\Delta t$  و اندازه گیری  $\theta_0$  مقدار  $K$  به دست می آید. در آزمایش  $\gamma$  با شکل دیگری از رابطه القاء فاراده آشنا شده اید. این رابطه وجود نیرو محرکه القایی را بر اساس تغییرات جریان نشان می دهد. با تغییر جریان از  $+I$  به  $-I$  ، می توان رابطه القاء فاراده را به شکل زیر نوشت:

$$\varepsilon = -M \frac{dI}{dt} = \frac{2MI_0}{\Delta t} \quad (8)$$

$M$  ضریب القاء متقابل دو سیم پیچ نسبت به یکدیگر می باشد. از مقایسه روابط (6) و (8) مقدار  $K$  به دست می آید.

$$K\theta_0 = \frac{2MI_0}{\Delta t} \Rightarrow K = \frac{2MI_0}{\Delta t\theta_0} \quad (9)$$

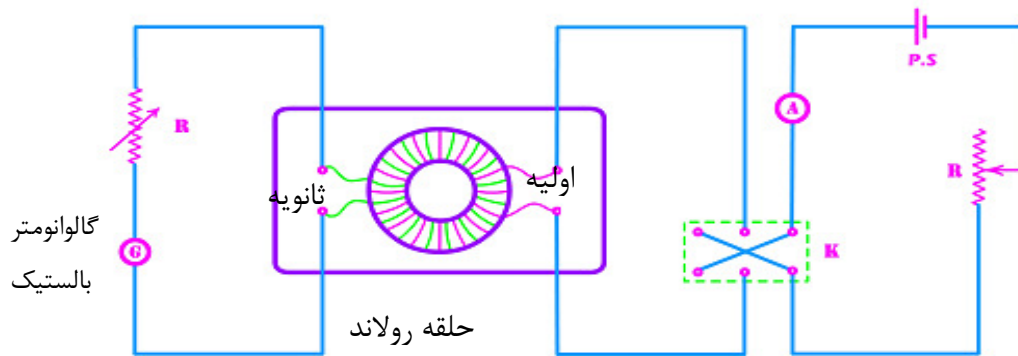
با قرار دادن مقدار  $K$  در معادله (۷) مقدار  $B$  به صورت زیر خواهد شد :

$$B = \frac{MI_0}{N'A\theta_0} \theta = \lambda \theta \quad (10)$$

مقدار  $\lambda$  پس از مدرج کردن گالوانومتر ضریب ثابتی می باشد.

## روش آزمایش

ابتدا مدار زیر را ببندید. دقت کنید که جهت ورود جریان به داخل آمپر متر از سر مثبت آن باشد. مقاومت متغیر رئوستا را در



شکل (۱)

بیشترین مقدار قرار داده و جریان را به وسیله کلید سه طرفه در سیملوله اولیه برقرار نمایید. ولوم منبع تغذیه را تا آخرین حد آن قرار دهید. به تدریج مقاومت رئوستا را کاهش داده تا آمپر متر جریان  $1/5$  آمپر را نشان دهد. سپس با تغییر حالت کلید، جریان القایی ایجاد شده را به داخل گالوانومتر بالستیک هدایت کرده و مقدار انحراف آن را بررسی نمایید. در صورتی که لکه نورانی از صفحه خارج شد با افزایش مقاومت  $R$  در مدار ثانویه، انحراف لکه را کنترل نموده تا در داخل محدوده مدرج قرار گیرد. این تنظیمات اولیه دستگاه می باشد و باید تا آخر آزمایش بدون تغییر باقی بماند. حال با کاهش ولوم منبع تغذیه مقادیر جریان را مطابق جدول قرار دهید. مترومن را فعال کرده و کلید را همزمان با تناوب صدای مترومن دائما تغییر جهت دهید.

به ازای هر یک از مقادیر جریان، مقدار انحراف لکه گالوانومتر  $(\theta_R - \theta_L)$  را بر حسب میلیمتر یادداشت نمایید.  $(\theta_R)$  مقدار انحراف به سمت راست و  $(\theta_L)$  مقدار انحراف به سمت چپ می باشد.

### - مدرج کردن گالوانومتر بالستیک :

برای مدرج کردن گالوانومتر بالستیک (اندازه گیری ضریب  $K$ )، از سیم پیچ استاندارد استفاده می نمایم. جریان را بر روی  $0.2$  آمپر تنظیم نموده و  $\theta$  را به دست آورید.

با استفاده از اطلاعات مربوط به سیم پیچ ثانویه  $(M=10\text{ mH}$ ،  $A=75 \times 10^{-6}\text{ m}^2$ ) و  $\theta$  و  $I_0$  مقدار ضریب ثابت  $\lambda$  را از رابطه (۱۰) محاسبه کرده و ستون مربوط به مقادیر  $B$  را تکمیل کنید.

توجه: در این آزمایش به تبدیل واحدهای اندازه گیری کاملا توجه نمایید.

$I \text{ (A)}$	$\theta \text{ (cm)}$	$H \text{ (A/m)}$	$B = \lambda \theta$ (tesla)	$\mu \text{ (H)} = B/H$
۰/۰۵				
۰/۱				
۰/۱۵				
۰/۲۰				
۰/۲۵				
۰/۳۰				
۰/۳۵				
۰/۴۰				
۰/۴۵				
۰/۵۰				
۰/۶				
۰/۷				
۰/۸۰				
۰/۹				
۱				
۱/۱				
۱/۲				
۱/۳				
۱/۴				
۱/۵				

اندازه گیری از روی سیم پیچ استاندارد:

$$\theta = \dots \text{ (cm)}$$

نمودار  $(B-H)$  و  $(\mu-H)$  را در یک نمودار رسم کنید تا تغییرات و وابستگی آنها را به طور همزمان بررسی نمایید. نمودار  $B-H$  "منحنی مغناطش ماده" نام دارد.

#### سوالات:

- ۱- چرا تنها در لحظات قطع و وصل کلید، گالوانومتر بالستیک جریانی را در مدار ثانویه نشان می دهد؟
- ۲- اگر هسته آهنی در داخل سیم پیچ وجود نداشت منحنی  $B-H$  به چه شکل می بود؟
- ۳- در اواخر آزمایش هنگامی که جریان از ۱ آمپر تجاوز می کند، تغییر  $H$  تغییر زیادی را در  $B$  ایجاد نخواهد کرد. علت این امر چیست؟



- ۴- پس از رسم منحنی  $\mu$  نسبت به  $H$  به این نتیجه می رسید که ضریب نفوذ  $\mu$  هسته آهنی مقدار ثابتی نمی باشد. توجیه فیزیکی این مورد چیست؟
- ۵- با توجه به اینکه  $(\theta)$  زاویه انحراف می باشد، آیا اندازه گیری انحراف لکه گالوانومتر بر حسب میلیمتر صحیح می باشد؟ چرا؟
- ۶- چرا با گذاشتن هسته آهنی جریان القایی در سیم پیچ ثانویه افزایش می یابد؟
- ۷- چرا در ابتدای آزمایش، مقدار جریان با گامهای  $0.05$  آمپر افزایش می یافت؟
- ۸- در ایجاد میدان  $B$  چه عاملی بیشترین اثر را دارد؟
- ۹- نقش متروم در طول آزمایش چیست؟