دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

دستور کار آزمایشگاه فیزیک

پایه ۱

ویرایش بهمن ۱۴۰۱

مخصوص دانشجویان تمامی رشته‌ها (بجز رشته فیزیک)

بسم الله الرحمن الرحیم

دستور کار آزمایشگاه فیزیک (۱)

مخصوص دانشجویان تمامی رشته‌ها (بجز رشته فیزیک)

مولفین :

هایده جعفریان، صادق سلطانی، علی سعیدی، مهدی شهیدی

ویرایش بهمن ۱۴۰۱

فهرست مطالب

دستورکلی برای انجام کارهای آزمایشگاه : ۴

نکات مهمی که لازم است مورد توجه دانشجویان قرار گیرد: ۱۳

آزمایش ۱ : تعیین نیرو ۱۴

آزمایش ۲: تعیین شتاب گرانش(g) به کمک آونگ ساده و مرکب ۲۰

آزمایش ۳: برخورد الاستیک و تعیین ثابت فنر ۲۷

آزمایش ۴: ماشین آتوود و چرخ ماکسول ۳۵

آزمایش ۵: قوانین اصطکاک و تعیین ضریب بی دررو هوا ۴۱

آزمایش ۶: حرکت سقوط آزاد و تعیین ضریب انبساط خطی جامدات ۵۰

آزمایش ۷: تحقیق پدیده تشدید در تار مرتعش و لوله صوتی بسته ۵۵

آزمایش ۸ : کالریمتر ۶۰

آزمایش ۹: تعیین گرمای ویژه مایعات به روش سرد کردن ۶۷

پیوست ۱) فرمت گزارش کار ۷۱

پیوست ۲) برخی ثابت های مهم فیزیکی ۷۳

دستورکلی برای انجام کارهای آزمایشگاه :

دانشجویان بایستی به این مطلب توجه کنند که در این دانشکده ضمن فراگرفتن مطالب نظری، خود را برای کارهای تحقیقاتی و علمی‌عملی در آزمایشگاه مهیا سازند و این تنها با صرف وقت و تمرین و ممارست امکان پذیر است. برای اینکه بتوان از کار در آزمایشگاه نتیجه مطلوب را بدست آورد بایستی نکات زیر که شما را برای کار در آزمایشگاه ماهرتر و تواناتر می‌سازد، مورد توجه قرار دهید.

۱)احاطه به موضوع کار :

هر دانشجو موظف است قبل از اینکه به آزمایشگاه بیاید، آزمایش مورد نظر را به دقت مطالعه نماید تا در هنگام انجام آزمایش از هدف انجام آزمایش و تئوری آن اطلاع کامل داشته باشد. در این خصوص اگر تئوری موجود در دستور کار دارای ابهامی‌باشد می‌توان از کتابهای فیزیک پایه مانند فیزیک پایه‌هالیدی، فیزیک دانشگاهی زیمانسکی و... استفاده نمود.

۲) مراقبت از وسایل :

احتیاط و دقت در بکار بردن لوازم آزمایشگاه لازمه کار در آزمایشگاه است و برای جلوگیری از شکستن و یا خراب شدن آنها قبل از هر آزمایش باید لوازم مربوط به آن را بررسی نموده و با آنها آشنا گردید. وسایلی را که با طرز کار آنها آشنا نیستید بدون اجازه مربی آزمایشگاه دست نزنید و اگر در هنگام انجام آزمایش در اسباب خود گیر و یا اشکالی مشاهده کردید، مطلقاً متوسل به زور نشوید؛ بلکه از مربی آزمایشگاه کمک بگیرید.

وسایل آزمایشگاهی را که در آزمایشگاه بکار می‌برید پس از پایان آزمایش مرتب نمایید و وسایل برقی را حتماً خاموش کنید.

۳) تنظیم و تقسیم کار :

با توجه به محدود بودن وقت باید هرگروه به شکل مناسبی کارهای مربوط به آزمایش را بین افراد گروه تقسیم نماید در این خصوص باید سعی شود که تمام افراد گروه در انجام آزمایش مشارکت نمایند.

۴) نظم و ترتیب :

نظم و ترتیب در آزمایشگاه بالاترین اولویت کار در آزمایشگاه را دارا می‌باشد و باید حتما موارد زیر را هنگام کار کردن با وسایل آزمایشگاهی بکار ببندید:

الف) اسبابها و وسایل اندازه‌گیری را طوری مرتب بچینید که به هم تکیه نکنند و حتی الامکان مانع کارهای یکدیگر نشوند.

ب) دقت کنید که اسبابهای اندازه‌گیری را هیچگاه برای اندازه‌گیری مقادیر، بیش از حداکثر مقداری که بر روی آنها درج شده است، بکار نبرید.

ج) سعی کنید دستگاه‌ها رامطابق شکل سوار کنید.

د) از جابجایی و آوردن وسایل از میزهای کار دیگر جدا خودداری نمایید.

ه) حتما پس از پایان آزمایش میز کار خود را مرتب کرده و صندلی‌ها را در جای خود قرار دهید.

۵) علاقمندی به کار :

انجام یک آزمایش در آزمایشگاه تنها برای ادای تکلیف انجام نمی‌گردد و چنانچه علاقه و شوق نسبت به انجام آزمایش نداشته باشید، نه تنها به نتیجه مطلوب نمی‌رسید، بلکه وقت خود و سایر دانشجویان را بیهوده تلف کرده‌اید. دانشجویان باید بدانند که انجام کارهای آزمایشگاه برای آنها مفید است و در نتیجه با عشق و علاقه کافی به انجام یک تجربه در آزمایشگاه دست بزنید.

۶) اشتباهات اندازه‌گیری :

انجام یک اندازه‌گیری دقیق در آزمایشگاه عملی است مشکل و توفیق در آن بستگی به طبیعت و چگونگی موضوع آزمایش و همچنین به وسایل اندازه‌گیری و دستگاههای آزمایشگاه دارد. حال عوامل مهمی را که تاثیر کلی در آزمایش داشته و ما را از اشتباهات برحذر می‌دارند گوشزد می‌کنیم.

الف) دستگاههای اندازه‌گیری :

اکثر خطاهایی که در آزمایش‌ها رخ می‌دهند مربوط به دستگاه‌ها و وسایل اندازه‌گیری است. بنابراین لازم است که قبلا موارد زیر را بدانیم.

۱- حساسیت :

دستگاهی را حساس می‌گوئیم که با آن بتوان کوچکترین تغییر کمیت مورد نظر آزمایش را تشخیص داد.

۲- درستی :

دستگاهی را درست می‌گوئیم که نتایج سنجش آن با مقدار واقعی کمیت مورد نظر اندازه‌گیری خیلی به هم نزدیک باشند.

۳- قابل اطمینان :

دستگاهی را قابل اطمینان گویند که نتایج اندازه‌گیری مکرر آن همیشه یکسان بوده و با هم اختلاف نداشته باشد.

ب) روش آزمایش :

روشی که برای انجام آزمایش انتخاب می‌شود، در حصول نتیجه صحیح تاثیر بسزایی دارد که در اینجا به دلیل محدود بودن دقت دانشجویان، روش آزمایش در دستور کار آزمایشگاه داده شده است.

ج) مهارت شخص آزمایش کننده :

دانشجو باید قبل از هر آزمایش موضوع مورد آزمایش را به دقت مطالعه نماید و با آمادگی و آگاهی کافی به انجام آزمایش بپردازد. به همین دلیل در اول هر جلسه و قبل از شروع آزمایش یک کوئیز در مورد آزمایش همان جلسه از دانشجو گرفته می‌شود که قسمتی از نمره نهایی دانشجو را شامل می‌گردد.

همچنین دانشجو باید در پایان آزمایش، گزارشی از مشاهدات و نتایج آزمایش ارائه دهد که این گزارش شامل قسمت‌های مختلفی از جمله عنوان و هدف آزمایش، جداول و محاسبات مربوطه، رسم منحنی‌ها و محاسبات خطا، نتیجه آزمایش و نظریات دانشجو می‌باشد.

علاوه برموارد فوق باید سوالات هر آزمایش که در دستور کار مشخص شده، کتبا در برگه گزارش‌کار پاسخ داده شود.

لازم به ذکر است که تمیزی و مرتب بودن برگه گزارش‌کار نشانه دقت عمل و سلیقه دانشجو بوده و نیز بخشی از نمره مربوط به آن را شامل می‌شود.

رسم منحنی‌ها :

در رسم منحنی‌ها نکات زیر را مراعات کنید.

۱- منحنی را همیشه روی کاغذ میلیمتری رسم کنید.
۲- کمیت‌هایی را که برهر محور بکار می‌برید کنار آن یادداشت کنید.
۳- مقیاس‌ها را چنان انتخاب کنید که حتی الامکان تمام طول هر دو محور استفاده شود. بدین منظور اغلب لازم است که از نشان دادن مبدا روی محور مختصات صرف نظر کنید؛ مگر اینکه بدون نشان دادن مبدا بر روی صفحه کاغذ منحنی ناقص بماند که در این صورت مقیاس را کوچک بگیرید.
۴- نقاط به دست آمده از آزمایش را با یک نقطه پررنگ یا با علامت "×" مشخص کنید.
۵- تمامی‌اعداد و حروف و نقاط منحنی و خود آن واضح باشد.
۶- عموما هنگام رسم منحنی نباید تمام نقاط آزمایش را به یکدیگر وصل کرد و یک خط شکسته تشکیل داد؛ بلکه بایستی منحنی را طوری رسم کرد که نقاط آزمایشی کم و بیش در طرفین منحنی قرار گیرند.

۷- برای مدرج کردن محورها فقط اعدادی مانند ۱۰، ۲۰، ۳۰ و.... را درکنار آن بنویسید. لازم نیست که اندازه‌های عددی تمام نقاط منحنی را در کنار محورها یادداشت کنید.

خطای اندازه‌گیری :

هر اندازه‌گیری با خطا با عدم قطعیت همراه است. در هنگام انجام آزمایش با دقت در انجام آزمایش و استفاده صحیح و مناسب از وسایل آزمایش باید تا حد امکان خطا را کاهش داد. ولی به دلیل محدودیت دقت وسایل اندازه‌گیری، خطاهای اتفاقی و خطاهای ناشی از عوامل محیطی، نمی‌توان خطا را در یک آزمایش به صفر رساند. به همین دلیل در یک آزمایش باید میزان خطا را محاسبه نمود تا دقت انجام آزمایش مشخص گردد.

خطای مطلق :

بعلت محدود بودن دقت وسایل اندازه‌گیری و مهارت و آزمودگی شخص آزمایش کننده، هیچوقت نمی‌توان اندازه واقعی یک کمیت را اندازه‌گیری کرد؛ بلکه نتیجه اندازه‌گیری مقداری با اندازه واقعی آن کمیت اختلاف دارد که این اختلاف به خطا یا بیراهی مطلق مرسوم است.

اگر مقدار واقعی کمیت را با x' و مقداری که در نتیجه آزمایش بدست آمده با x نمایش دهیم در این صورت خطای مطلق برابر خواهد بود با :

$$\Delta x' = \left| x' - x \right|$$

از آنجا که مقدار خطای مطلق و علامت آن معلوم نیست (زیرا اگر معلوم باشد دیگر خطا نیست)، بنابراین مقدار واقعی کمیت در محدوده زیر قرار دارد :

$$x - \Delta x \prec x' \prec x + \Delta x$$

خطای نسبی :

خطای مطلق تنها میزان دقت آزمایش را نشان نمی‌دهد. بلکه در حقیقت بایستی دید که این خطا در اندازه‌گیری چه مقدار از کمیت مورد اندازه‌گیری رخ داده است. می‌توان خطای نسبی را به صورت زیر تعریف کرد.

مقدار واقعی / خطای مطلق = خطای نسبی

$$\text{خطای نسبی} = \frac{\Delta x}{x'}$$

دقت :

باتوجه به مطالب فوق می‌توان گفت که هر چه خطای نسبی کل کوچکتر باشد، دقت روش اندازه‌گیری بیشتر است. بنابراین دقت را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد :

$$\text{دقت} = \frac{1}{\left|x' - x\right|}$$

(دقت عبارت است از عکس خطای مطلق)

حساسیت :

وقتی عقربه دستگاهی در مقابل کوچکترین کمیت مورد اندازه‌گیری انحراف پیدا کند، می‌گوئیم آن دستگاه حساس است. حساسیت دستگاه برابر است با "عکس خطای نسبی اندازه‌گیری شده"

اشتباه :

چنانچه خطا از حدود دقت لازم کمتر باشد مجاز است و اگر بیشتر باشد، آن خطا را اشتباه می‌گویند. در این مواقع باید آزمایش از نو انجام گیرد.

محاسبات خطا :

بعضی از کمیت‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری هستند. برای این کمیات خطای مطلق در اندازه‌گیری کمیت برابر با کوچکترین میزان قابل سنجش توسط وسیله اندازه‌گیری است. برای مثال اگر با خط‌کش معمولی یک جسم اندازه‌گیری شود، خطای مطلق برابر $\Delta x = 1\ mm$ است.

از طرفی اکثر کمیات مورد علاقه ما در فیزیک مستقیما قابل سنجش نیستند و با کمک فرمول‌هایی به کمیات قابل سنجش مرتبط می‌شوند. بنابراین در حالت کلی باید بتوان درباره این کمیت‌ها نیز خطا را محاسبه کرد. در ساده‌ترین حالت یک کمیت بصورت حاصل جمع، تفاضل، حاصل ضرب و خارج قسمت کمیت‌های دیگر می‌باشد و درحالت کلی‌تر کمیت مورد نظر به صورت تابع پیچیده‌تری از کمیت‌ها قابل اندازه‌گیری است.

۱) خطای حاصل جمع :

اگر $x = c + d$ و حداکثر خطاهایی که در اندازه‌گیری مقادیر c و d رخ می‌دهد به ترتیب برابر Δc و Δd باشد، دراین صورت خطای مطلق Δx عبارتست از:

$$x + \Delta x = (c + \Delta c) + (d + \Delta d)$$
$$\Rightarrow \Delta x = \Delta c + \Delta d$$

و میزان خطای نسبی برابر است با :

$$\frac{\Delta x}{x}=\frac{\Delta c}{c+d}+\frac{\Delta d}{c+d}$$

۲) خطای تفاضل :

اگر کمیت مورد نظر به صورت $x=c-d$ باشد، به طریق مشابهی نظیر محاسبه خطای حاصل‌ضرب می‌توان نوشت :

$$x+\Delta x=(c+\Delta c)-(d+\Delta d)$$
$$\Rightarrow \Delta x=\Delta c-\Delta d$$

اما چون علامت‌های Δc و Δd معلوم نیستند، خطای مطلق و خطای نسبی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta x=\Delta c+\Delta d$$
$$\frac{\Delta x}{x}=\frac{\Delta c}{c-d}+\frac{\Delta d}{c-d}$$

۳) خطای حاصل ضرب :

اگر کمیت مورد اندازه‌گیری به صورت زیر باشد :

$$x=c.d$$

داریم :

$$x+\Delta x=(c+\Delta c).(d+\Delta d)$$
$$\Rightarrow \Delta x=c\Delta d+d\Delta c+\Delta c.\Delta d$$

چون $\Delta c.\Delta d$ در مقابل بقیه جملات بسیار کوچک است، لذا از آن صر نظر می‌کنیم. در این صورت :

$$\Delta x=c\Delta d+d\Delta c$$

خطای نسبی در مورد حاصل‌ضرب به صورت زیر است.

$$\frac{\Delta x}{x}=\frac{c\Delta d+d\Delta c}{c.d}=\frac{\Delta c}{c}+\frac{\Delta d}{d}$$

در حالت خاصی که همه کمیتها با هم برابر باشند (یعنی $x=c^n$ باشد)، خطای نسبی برابر است با :

$$\frac{\Delta x}{x}=n\frac{\Delta c}{c}$$

۴) خطای تقسیم :

اگر کمیتی به صورت $x=\frac{c}{d}$ باشد، داریم :

$$x+\Delta x=\frac{(c+\Delta c)}{(d+\Delta d)}$$
$$\Rightarrow \Delta x=\frac{c+\Delta c}{d+\Delta d}-\frac{c}{d}=\frac{d\,\Delta c-c\,\Delta d}{d^2-d\,\Delta d}$$

چون Δd در مقابل d خیلی کوچک است، لذا در مخرج کسر از $d\,\Delta d$ در مقابل d^2 صرف نظر می‌کنیم:

$$\Delta x=\frac{d\,\Delta c-c\,\Delta d}{d^2}$$

پس خطای نسبی تقسیم دو کمیت برابر است با :

$$\Rightarrow \frac{\Delta x}{x}=\frac{d\Delta c-c\Delta d}{d^2}\times\frac{d}{c}=\frac{\Delta c}{c}-\frac{\Delta d}{d}$$

چون واقعا علامتهای Δc و Δd معلوم نیستند، لذا بایستی حداکثر خطا منظور گردد. بنابراین :

$$\Rightarrow \frac{\Delta x}{x}=\frac{\Delta c}{c}+\frac{\Delta d}{d}$$

قانون کلی محاسبه بیراهی نسبی (خطای نسبی) :

یک راه کلی برای محاسبه خطای نسبی $\frac{\Delta x}{x}$ از طریق دیفرانسیل‌گیری لگاریتمی است. اگر کمیت اندازه مورد نظر ما x باشد که این کمیت با کمیت‌های $c,d,\mathrm{e},\mathrm{f},\ldots$ که مستقیما آزمایش می‌گردند، با رابطه :

$$x=(c,d,\mathrm{e},\mathrm{f},\ldots)$$

ارتباط داشته باشد، برای محاسبه خطای نسبی ابتدا از رابطه فوق لگاریتم و سپس دیفرانسیل می‌گیریم. پس از آن بجای دیفرانسیل‌های $c,d,\mathrm{e},\mathrm{f},\ldots$ بیراهی‌های ماکزیمم هرکدام از این کمیت‌ها را قرار می‌دهیم.

بعنوان مثال :

$$x=a.b$$
$$Lnx=Ln(a.b)=Lna+Lnb$$
$$\frac{dx}{x}=\frac{da}{a}+\frac{db}{b}\Rightarrow\frac{\Delta x}{x}=\frac{\Delta a}{a}+\frac{\Delta b}{b}$$

مثال : به کمک یک کولیس با دقت 0.1 mm شعاع سکه‌ای را اندازه‌گیری نموده‌ایم. اگر شعاع اندازه‌گیری شده برابر r=11.1 mm باشد، مطلوبست مقدار واقعی سطح سکه؟

حل : فرض می‌کنیم سطح واقعی سکه s' و سطح اندازه‌گیری شده s باشد. بنابراین داریم :

$$s=\pi r^2=\pi(11.1)^2=387mm^2$$

برای بدست آوردن Δs یعنی خطای اندازه‌گیری، باید خطای نسبی را حساب کنیم :

$$s = \pi r^2 \Rightarrow Lns = Ln\pi + 2Lnr$$
$$\frac{ds}{s} = 0 + 2\frac{dr}{r} \Rightarrow \frac{\Delta s}{s} = 2\frac{\Delta r}{r} \Rightarrow \Delta s = 2\frac{\Delta r}{r} \times s$$
$$\Delta s = \frac{2 \times 0.1}{11.1} \times 387 = 7mm^2$$

بنابراین s' سطح واقعی سکه برابر است با :

$$s - \Delta s \le s' \le s + \Delta s$$
$$380mm^2 \le s' \le 394mm^2$$

در نتیجه مقدار واقعی سطحی سکه بین دو حد بالا می‌باشد. این موضوع را از راه حدود اندازه‌گیری شعاع نیز می‌توان استنباط نمود:

کمترین مقدار ممکن برای شعاع سکه با توجه به دقت کولیس برابر است با :

$$r - \Delta r = 11.1 - 0.1 = 11mm$$

بنابراین حداقل سطح سکه برابر است با :

$$s = \pi r^2 = \pi(11) = 380mm^2$$

بیشترین مقدار ممکن برای شعاع سکه با توجه به دقت کولیس برابر است با :

$$r + \Delta r = 11.1 + 0.1 = 11.2mm$$

و در نتیجه حداکثر سطح سکه برابر است با :

$$s = \pi r^2 = \pi(11.2) = 394mm^2$$

این همان نتیجه‌ای است که از طریق محاسبه لگاریتمی‌خطا محاسبه گردید.

مطلب دیگری که باید در حل مسایل فیزیکی و در آزمایشگاه فیزیک بخاطر سپرد، استفاده از سیستم‌های مختلف اندازه‌گیری می‌باشد.

سیستم‌هایی که در آزمایشگاه بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیستم‌های M.K.S و C.G.S می‌باشند. اولی سیستم اندازه‌گیری بین المللی است که در این سیستم کمیاتی از قبیل طول، جرم و زمان کمیات اصلی و بقیه کمیتهای فرعی هستند.

کمیات اصلی کمیاتی هستند که برای تعیین مقدار آنها واحد مستقلی تعریف می‌کنیم؛ مثل طول که در سیستم M.K.S با متر m و در سیستم C.G.S با سانتیمتر cm سنجیده می‌شود.

کمیات فرعی کمیاتی هستند که به وسیله فرمول‌هایی با کمیت‌های اصلی ارتباط پیدا می‌کنند. واحد این کمیات اصلی بوسیله این فرمول‌ها مشخص می‌گردد. مثلا سرعت در سیستم M.K.S با متر بر ثانیه m/s و درسیستم C.G.S با سانتی‌متر بر ثانیه cm/s سنجیده می‌شود.

جدولی که ارائه می‌گردد کمیت‌های اصلی و فرعی را دو سیستم فوق معرفی و واحدهای اندازه‌گیری آنها را بیان می‌کند.

International System of Units (SI)

SI Base Units

Base Quantity	Name	Symbol
Length	meter	m
Mass	kilogram	kg
Time	second	s
Electric current	ampere	A
Temperature	kelvin	K
Amount of substance	mole	mol
Luminous intensity	candela	cd

SI Derived Units

Derived Quantity	Name	Symbol	Equivalent SI units
Frequency	hertz	Hz	s^{-1}
Force	newton	N	$m{\cdot}kg{\cdot}s^{-2}$
Pressure	pascal	Pa	N/m^2
Energy	joule	J	N·m
Power	watt	W	J/s
Electric charge	coulomb	C	s·A
Electric potential	volt	V	W/A
Electric resistance	ohm	Ω	V/A
Celsius temperature	degree Celsius	°C	K*

*Unit degree Celcius is equal in magnitude to unit kelvin.

SI Prefixes

Factor	Name	Symbol	Numerical Value
10^{12}	tera	T	1 000 000 000 000
10^{9}	giga	G	1 000 000 000
10^{6}	mega	M	1 000 000
10^{3}	kilo	k	1 000
10^{2}	hecto	h	100
10^{1}	deka	da	10
10^{-1}	deci	d	0.1
10^{-2}	centi	c	0.01
10^{-3}	milli	m	0.001
10^{-6}	micro	μ	0.000 001
10^{-9}	nano	n	0.000 000 001
10^{-12}	pico	p	0.000 000 000 001

• Adapted from NIST Special Publication 811
• SI rules and style conventions recommend using spaces rather than commas to separate groups of three digits.

نکات مهمی که لازم است مورد توجه دانشجویان قرار گیرد:

۱- از ورود به آزمایشگاه قبل از حضور استاد مربوطه جدا اجتناب شود.

۲- دانشجویان عزیز باید به موقع سر کلاس حاضر شوند، تاخیر بیش از ۵ دقیقه نمرهٔ منفی انضباط را در پی داشته و تاخیر بیش از ۱۵ دقیقه موجب محرومیت از کلاس و ثبت نمرهٔ صفر برای گزارش آزمایش همان جلسه خواهد شد.

۳- برای آشنایی با روش انجام آزمایش‌ها، تعدادی فیلم آموزشی تهیه شده است. دانشجویان می‌توانند با مراجعه به وبسایت دانشگاه صنعتی شاهرود > دانشکده فیزیک > آزمایشگاه ها > محتوای آزمایشگاه فیزیک ۱ یا با اسکن Qr-Code مقابل به فیلم های آموزشی دسترسی داشته باشند. همچنین در توضیحات هر آزمایش Qr-Code مربوطه قرار داده شده که می‌توان با اسکن آن (یا کلیک بر روی آن در نسخه دیجیتال دستور کار) مستقیما به ویدیوی آن آزمایش دسترسی داشت.

۴- دانشجویان موظف هستند با مطالعه دستور کار آزمایش مربوطه (یا مشاهده فیلم های آموزشی) و به صورت آماده در کلاس حاضر شوند.

۵- وسایل شخصی خود را (اعم از کیف ، کوله ، کتاب ، کاپشن و غیره) در کمد ابتدای آزمایشگاه قرار داده و از آوردن آنها به درون آزمایشگاه اجتناب کنید.

۶- هر گروه موظف به تهیه حداقل یک نسخه کاغذی از دستورکار می باشد و در طول انجام آزمایش آنرا همراه خود داشته باشد.

۷- دانشجو در طول کلاس موظف است به انجام آزمایش مربوطه پرداخته و مزاحمتی برای گروه های دیگر ایجاد نکند.

۸- هر گروه در انتهای هر جلسه جداول داده‌های ثبت شده خود را با درج مشخصات کامل (شماره گروه به همراه شماره، عنوان، تاریخ و ساعت انجام آزمایش) تحویل دهند. بدیهی است بدون این داده ها امکان تصحیح گزارش کار وجود ندارد.

۹- دانشجویان پس از اتمام آزمایش باید میز خود را مرتب کنند و تمام وسایل آزمایش را مرتب روی میز خود قرار دهند. همچنین (در صورت استفاده) شیرهای اصلی گاز را بسته، ظروف آب را خالی کرده و پس از قرار دادن صندلی خود زیر میز آن را به مدرس یا دستیار آزمایشگاه تحویل دهند.

۱۰- یادگیری نحوه نوشتن یک گزارش آزمایش کامل و ارائه نتایج و تحلیل به شکل علمی و دقیق یکی از هدف‌های درس آزمایشگاه است. به این منظور لازم است دانشجویان گزارش آزمایش را در ابتدای جلسه بعدی آزمایش تحویل دهند. فرمت نوشتن گزارش کار در پیوست ۱ آمده است.

۱۱- توجه شود که در صورت غیبت، دانشجو حق حضور در دیگر گروهها برای انجام آزمایش را ندارد.

آزمایش ۱: تعیین نیرو

هدف آزمایش : تعیین برآیند نیروها و بررسی تعادل نیروها در حالت های مختلف

وسایل مورد نیاز : میز نیرو، قلاب، وزنه های مختلف، گیره، نخ

تئوری آزمایش : کمیت‌های فیزیکی را به دو دسته کلی می‌توان تقسیم نمود. دسته اول کمیت‌هایی هستند که فقط با یک عدد (مقدار) کاملا مشخص می‌گردند. در حالی که برای تعیین کمیت‌های دسته دوم، علاوه بر مقدار باید امتداد و جهتشان نیز مشخص گردد. کمیت‌های گروه اول را کمیت‌های اسکالر یا عددی و دسته دوم را کمیت‌های برداری می‌گویند. به عنوان مثال برای کمیت‌های اسکالر می‌توان به جرم، زمان، کار و انرژی و برای کمیتهای برداری می‌توان به سرعت، شتاب و نیرو اشاره کرد.

مقدار کمیتهای اسکالر با اعداد جبری مشخص می گردند و جمع و تفریق و ضرب و تقسیم آنها تابع قوانین عملیات جبری می باشند؛ یعنی مانند اعداد جبری با یکدیگر جمع و تفریق ، ضرب و تقسیم می‌گردند. اما این اعمال برای کمیتهای برداری به شکلی دیگر انجام می‌گردد. باید توجه داشت که کمیت‌های برداری را بجای یک عدد خالص، با برداری که دارای مقدار و امتداد و جهت است نشان می دهند. در ادامه به معرفی بردار، و جمع، تفریق و ضرب کمیت‌های برداری پرداخته می‌شود.

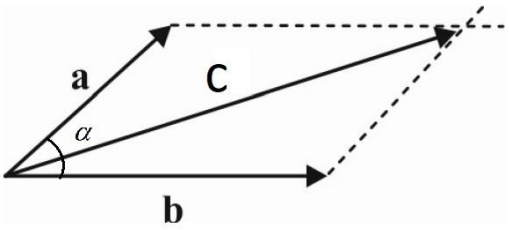
تعریف بردار : بردار یک پاره خط جهت دار است که طول آن متناسب با مقدار آن می باشد و به شکل یک پیکان نمایش داده می‌شود.

ضرب یک عدد اسکالر در یک بردار: این حاصلضرب برابر است با برداری در امتداد بردار اولیه $\vec{v}$ و به طول $|\alpha|\vec{v}|$. اگر α مثبت باشد بردار حاصل هم جهت و اگر منفی باشد در خلاف جهت $\vec{v}$ است.

جمع بردارها: برای جمع کردن کمیتهای برداری روشهای خاصی وجود دارد که در ادامه توضیح داده شده است:

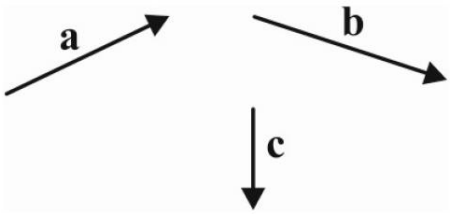
الف) روش متوازی الاضلاع: در این روش از یک نقطه دلخواه دو بردار همانند بردارهایی که می‌خواهیم با هم جمع کنیم، رسم می‌شود. قطر متوازی الاضلاعی که این دو بردار تشکیل می‌دهند، حاصل جمع دو بردار است.

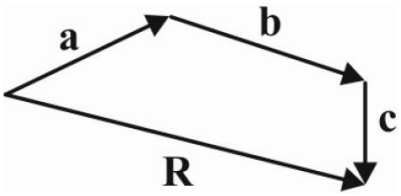
$$\vec{C} = \vec{a} + \vec{b}$$
$$|\vec{C}|^2 = |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos\alpha$$



ب)روش مثلث یا چند ضلعی: در این روش از یک نقطه دلخواه برداری همانند بردار اول رسم می کنیم. سپس از انتهای آن برداری همانند بردار دوم، و از انتهای بردار دوم برداری همانند بردار سوم و ... رسم می‌کنیم. اگر ابتدای بردار اول را به انتهای بردار آخر وصل کنیم، حاصل جمع بردارها به دست می آید.

$$\vec{R} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}$$

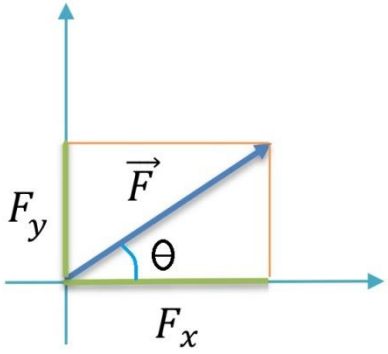


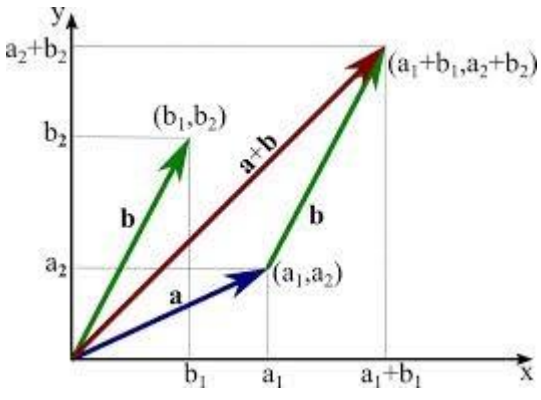


ج) روش تجزیه: در این روش ابتدا کلیه بردارها را در یک دستگاه مختصات رسم کرده و سپس تک تک آنها را بر روی محورها تجزیه می‌کنیم. بردار حاصل جمع عبارت است از قطر مستطیل حاصل از جمع مولفه‌ها بر روی هر کدام از محورها.

(تجزیه بردار F) $F_x = F\cos\theta, \quad F_y = F\sin\theta$

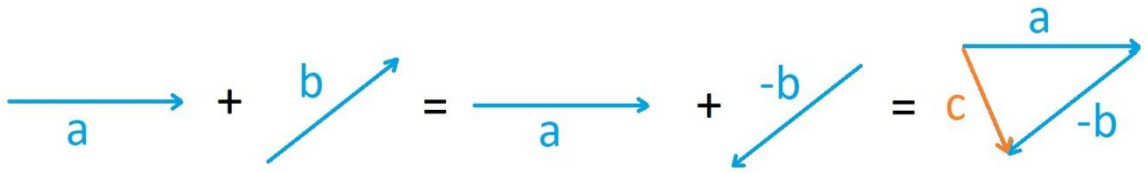
(تعیین اندازه و زاویه بردار برآیند با محور x) $F = \sqrt{F_{(a_1+b_1)}^2 + F_{(a_2+b_2)}^2}, \quad \tan\theta = \frac{F_{(a_2+b_2)}}{F_{(a_1+b_1)}}$





تفریق بردارها: تفریق بردارها مانند جمع بردارهاست با این تفاوت که ابتدا بردار دوم را در (۱-) ضرب می کنیم (یعنی جهت آن را برعکس می‌کنیم) و سپس دو بردار حاصل را با هم جمع می‌کنیم.

$$\vec{C} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$$



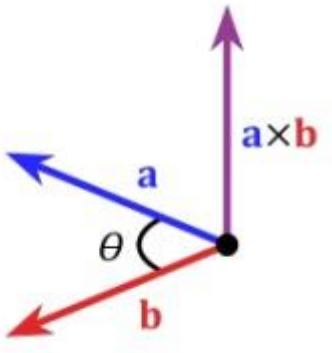
ضرب بردارها : ضرب بردارها بر دو نوع می باشد :

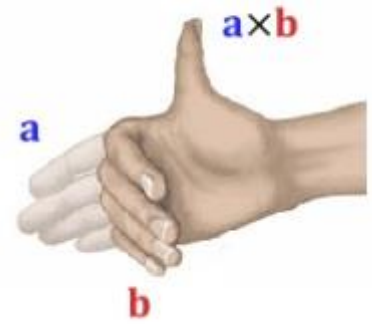
الف) ضرب اسکالر یا نقطه‌ای : حاصلضرب اسکالر یا نقطه‌ای دو بردار که به صورت $\vec{a}.\vec{b}$ نشان داده می شود، یک عدد می باشد که مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید. (θ زاویه بین $\vec{a}$ و $\vec{b}$ است)

$$\vec{a}.\vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta$$

ب) ضرب برداری دو بردار: حاصل این ضرب یک بردار است که اندازه آن برابر است با $|\vec{a}||\vec{b}|\sin\theta$ و امتداد آن بر صفحه دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ عمود می‌باشد. جهت این بردار به کمک قانون دست راست تعیین می‌گردد.

$$\vec{C} = \vec{a} \times \vec{b} \quad , \quad |\vec{C}| = |\vec{a}||\vec{b}|\sin\theta$$





تقسیم بردارها: تقسیم بردارها تعریف نشده است .

روش آزمایش :

چنانچه دو یا چند نیرو در یک نقطه بر یک جسم اثر کند، می‌توان به جای آنها یک نیرو قرار داد که آن را برآیند آن نیروها می‌گوییم. اگر نقطه مادی تحت اثر این نیروها در حال تعادل باشد، برآیند نیروها صفر است.

در آزمایش میز نیرو سه قلاب وزنه بوسیله نخی که از روی یک قرقره گیره‌دار می‌گذرد، به یک حلقه متصل شده‌اند. این مجموعه بر روی یک صفحه دوار مدرج فلزی که بر روی پایه‌ای محکم شده است، قرار دارد. این سه نخ نقش سه بردار نیروی وارده بر حلقه را دارند که راستای آنها در راستای نخ، جهت آنها به سمت خارج و اندازه آنها برابر با وزن قلاب و وزنه سوار شده بر روی آن است. همچنین زاویه بین بردارها از روی صفحه مدرج میز نیرو تعیین می‌گردد.

کاری که در این آزمایش انجام می‌گیرد اینست که ابتدا به کمک وزنه‌ها و گیره‌های موجود، مطابق جدول زیر، به دو نخ نیروهایی تحت زوایا و اندازه‌های داده شده وارد می‌گردد. سپس بار و جهت نخ سوم طوری تنظیم می شود که برآیند نیروهای وارد بر حلقه‌ی مرکزی صفر شود.

الف) ابتدا به کمک گیره‌های موجود مطابق جدول زیر به دو نخ، نیروهایی را تحت زوایا و اندازه‌های داده شده وارد سازید. سپس بار و جهت نخ سوم را طوری تنظیم کنید که برآیند نیروهای وارد بر حلقه در مرکز صفحه را صفر شود و مقادیر آنرا در جدول زیر یادداشت کنید. (برای آنکه مشاهده کنید نیروهای وارد بر حلقه در مرکز صفحه صفر شده است، حلقه را با دست تا وسط صفحه مدرج جابجا کنید؛ به صورتی که وقتی از بالا به حلقه نگاه می‌کنید، میله‌ی وسط صفحه در مرکز حلقه قرار گیرد. برآیند نیروهای وارد بر حلقه در مرکز صفحه هنگامی صفر است که با رها کردن حلقه، موقعیت میله‌ی صفحه دوار در مرکز حلقه تغییر نکند)

- اندازه بردار سوم برای تعادل حلقه در وسط صفحه (تحت زاویه بدست آمده در آزمایش) را به صورت تئوری محاسبه کرده و در جدول یادداشت کنید.
- در هر اندازه‌گیری، مقدار خطای مطلق و خطای نسبی اندازه $\left|\vec{C}\right|$ را نسبت به مقدار تئوری تعیین کرده و در جدول بنویسید.

توجه : در جدول زیر با در نظر گرفتن $g=10\ m/s^2$، اندازه بردار بر حسب صدم نیوتن، همان جرم وزنه بعلاوه قلاب بر حسب گرم می‌باشد.

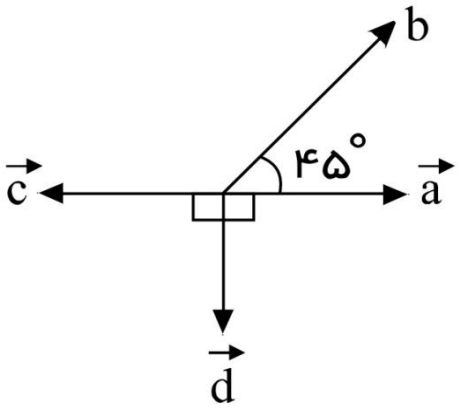
شماره آزمایش	اندازه $\vec{A}$ ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{A}$ (درجه)	اندازه $\vec{B}$ ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{B}$ (درجه)	اندازه $\vec{C}$ عملی ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{C}$ عملی (درجه)	اندازه $\vec{C}$ تئوری ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{C}$ تئوری (درجه)	خطای مطلق اندازه	خطای نسبی اندازه
۱	۱۵۰	۰	۷۰	۸۰						
۲	۱۲۰	۲۰	۱۰۰	۱۰۰						
۳	۱۸۰	۵۰	۱۰۰	۱۷۰						
۴	۱۰۰	۷۰	۷۰	۱۷۰						
۵	۵۰	۰	۷۰	۷۰						
۶	۲۰۰	۴۵	۸۰	۱۸۰						

- عوامل خطا در آزمایش را نام ببرید.

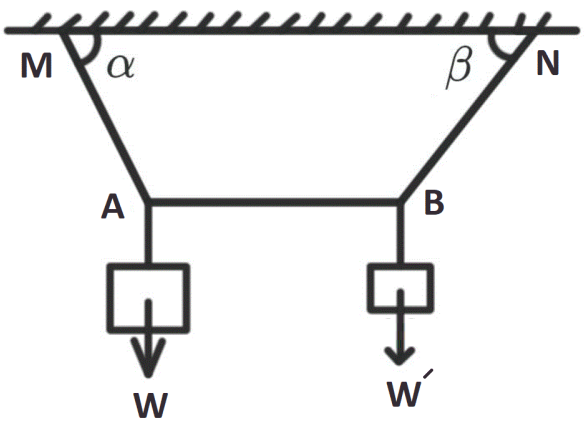
پرسش ها :

۱) چگونه می توان روش جمع متوازی الاضلاع را در مورد بیش از دو بردار انجام داد ؟

۲) در شکل مقابل برآیند چهار بردار $\vec{a},\vec{b},\vec{c},\vec{d}$ برابر با صفر است. اگر $|\vec{a}|=|\vec{d}|$, $|\vec{b}|=2\sqrt{2}$ باشد، بزرگی بردار $|\vec{a}-\vec{c}|$ را بدست بیاورید.



۳) مطابق شکل نقاط انتهایی نخ سبکی در دو نقطه M و N به سقف افقی متصل هستند و دو جسم به وزن W و W' در نقاط A و B آویزان شده اند. اگر نخ در قسمت AB افقی، زوایای نخ با سقف α و β، و سیستم در حال تعادل باشد، ثابت کنید:



$$\frac{W}{W'}=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$$

آزمایش ۲ :

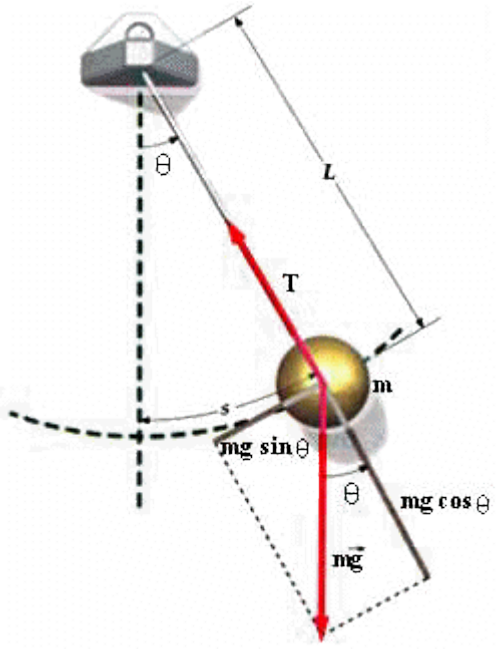
تعیین شتاب گرانش(g) به کمک آونگ ساده و مرکب

الف) آونگ ساده

هدف آزمایش : محاسبه شتاب گرانش g

وسایل مورد نیاز : گلوله فلزی، نخ، پایه، کرنومتر دستی

تئوری آزمایش :



آونگ ساده عبارت است از یک جرم نقطه ای که به نخی سبک آویزان است. اگر آونگ را از موضع تعادلش به یک طرف ببریم و رها کنیم، آونگ تحت تاثیر نیروی گرانشی شروع به نوسان خواهد کرد.

مطابق شکل گلوله‌ای به جرم m متصل به نخ بدون جرمی را در نظر بگیرید که به اندازه زاویه θ از حال تعادل خود منحرف شده است. نیروهای وارد بر آونگ ساده شامل نیروی گرانش و کشش طناب می‌شوند. نیروی گرانش را به دو مولفه عمود بر امتداد نخ و دیگری در راستای نخ تجزیه می‌کنیم. در این صورت همانطور که از شکل مقابل مشخص است، نیروی در امتداد نخ با نیروی کشش طناب T خنثی می‌شود و نیروی عمود بر راستای نخ به عنوان نیروی بازگرداننده F عمل می‌کند.

$$F = mg\sin\theta \qquad (1)$$

برای زوایای کوچک $\sin\theta \cong \theta$ است. بنابراین :

$$F = mg\theta \qquad (2)$$

اگر جهت مثبت x را از نقطه تعادل به سمت خارج از آن در نظر بگیریم، داریم :

$$F = -mg\theta \qquad (3)$$

از طرف دیگر داریم $x = L\,\theta$، بنابراین :

$$F = m\frac{d^2x}{dt^2} = -mg\frac{x}{L} \qquad (4)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{g}{L}x = 0 \qquad (5)$$

اگر معادله فوق را با معادله حرکت نوسانی یعنی $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ مقایسه کنیم، مقدار $\omega^2 = \frac{g}{L}$ بدست می‌آید. از طرف دیگر $\omega = \frac{2\pi}{T}$ است. بنابراین :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (6)$$

که درآن T دوره تناوب و L طول آونگ ساده (نقطه آویز تا مرکز جرم گلوله) و g شتاب جاذبه زمین است.

روش آزمایش :

- برای زاویه‌های کوچک (کمتر از 6°) و با طول‌های مشخص شده در جدول زیر آونگ را از حالت تعادل (قائم) خارج کرده و زمان ۲۰ نوسان کامل را اندازه بگیرید. نتایج را در جدول زیر یادداشت نمایید و مقدار g را از رابطه (6) بدست آوردید.

- با رسم نمودار خطی L بر حسب T^2 و تعیین شیب خط، مقدار g را بدست آورید. سپس با مقایسه نتیجه حاصل با مقدار $g = 9.78\ m/s^2$، خطای نسبی و مطلق آزمایش را محاسبه کنید.

L(cm)	زمان 20 نوسان	زمان یک نوسان T	T^2	$g(cm/s^2)$
20				
30				
40				
50				
60				

ب) آونگ مرکب

هدف آزمایش: اندازه‌گیری شتاب ثقل زمین به کمک آونگ کاتر

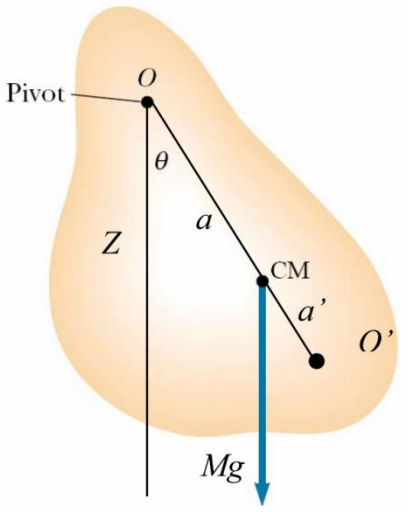
وسایل مورد نیاز : آونگ کاتر، خط‌کش، کرونومتر

تئوری آزمایش :

اگر چه شتاب ثقل زمین را می‌توان با استفاده از یک آونگ ساده و اندازه‌گیری دورهٔ تناوب آن بدست آورد، لکن برای تعیین دقیق آن از نوعی آونگ مرکب به نام آونگ کاتر استفاده می‌کنند.

هر جسمی که بتواند حول یک محور ثابت افقی تحت اثر نیروی جاذبه زمین نوسان کند، آونگ مرکب نامیده می‌شود. دوره تناوب نوسانات یک آونگ مرکب حول محوری مانند محور O به فاصله a از مرکز جرم آن (نقطه CM)، برابر است با:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_0}{Mga}} \qquad (1)$$



در این رابطه T دورهٔ تناوب نوسانات آونگ حول محور O (محور نوسان)، M جرم آونگ و I_0 لختی دورانی آن نسبت به محور O است. می‌توان نشان داد که در صفحهٔ شامل O و CM، محور دیگری مانند O' (محور تعلیق) به موازات O و به فاصله a' از CM وجود دارد، به طوری که دوره تناوب نوسانات آونگ حول آن نیز برابر T می‌شود. در این حالت فاصله دو محور یعنی $L' = a + a'$

برابـر طـول آونـگ ساده‌ایست که زمان تناوب آن نیز همان T می‌باشد. این مطلب را می‌توان به صورت زیر اثبات کرد:

با توجه به برابر بودن دوره تناوب آونگ مرکب حول محور نوسان و تعلیق، داریم:

$$T = T' \quad \Rightarrow \quad 2\pi\sqrt{\frac{I_0}{Mga}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_0'}{Mga'}}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{I_0}{a} = \frac{I_0'}{a'} \quad \Rightarrow \quad I_0' = \frac{a'I_0}{a} \qquad (3)$$

از طرف دیگر چنانچه لختی دورانی جسم حول مرکز ثقل آن I_G باشد، طبق قضیه محورهـای مـوازی، لختی دورانی آن حول محور O و O' (که به ترتیب به فواصل a و a' از مرکز جرم جسم قرار گرفته‌اند) چنین خواهد بود:

$$\begin{cases} I_0 = I_G + Ma^2 \\ I_0' = I_G + Ma'^2 \end{cases} \Rightarrow \quad I_0 - I_0' = M\,(a^2 - a'^2) \qquad (4)$$

با جایگزینی I_0' از رابطه (۳) در (۴) داریم:

$$I_0 - \frac{a'I_0}{a} = M(a^2 - a'^2) \Rightarrow \frac{I_0(a-a')}{a} = M(a+a')(a-a')$$
$$\Rightarrow \qquad I_0 = Ma(a-a') \qquad (5)$$

در نهایت با قرار دادن مقدار I_0' از رابطه (۵) در رابطه (۱)، مقدار دورهٔ تناوب چنین بدست می‌آید:

$$T = T' = 2\pi\sqrt{\frac{a+a'}{g}} \qquad (6)$$

چنانچه $L' = a + a'$ را طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب بنامیم، خواهیم داشت:

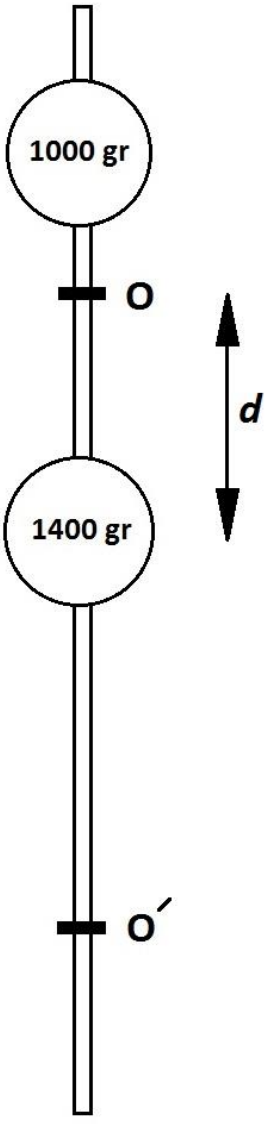
$$T = T' = 2\pi\sqrt{\frac{L'}{g}} \qquad (7)$$

بدین ترتیب می‌توان در یک آزمایش ابتدا نقطه O' متناظر با O را تعیین کرده و سپس با استفاده از رابطه (۶) مقدار g را بدست آورد.

در آونگ کاتر با تغییر توزیع جرم حول دو محور ثابت O و ´O، آنقدر مرکز جرم CM را جابجا می‌کنیم تا زمان نوسان حول دو محور با هم برابر شوند. در این صورت می‌توان با استفاده از رابطه (۶) و برابر قرار دادن فاصله بین دو محور با $a+a'$، شتاب جاذبه زمین را بدست آورد. این روش که نخستین بار در سال ۱۸۱۸ بوسیله کاتر بکار رفت، یکی از دقیقترین روشهایی است که برای اندازه‌گیری g به کار می‌رود.

روش آزمایش :

آونگ کاتر مورد استفاده در آزمایش از یک میله، دو تیغه ثابت (به فاصله یک متر) برای نوسان، و دو وزنه 1000 و 1400 گرمی متحرک تشکیل شده است. محل قرار گرفتن این وزنه‌ها به وسیله پیچی که روی آنها قرار دارد، بر روی میله قابل تنظیم است.



کاری که شما در این آزمایش انجام می‌دهید این است که با تغییر توزیع جرم آونگ، زمان تناوب مشترک حول دو نقطه O و ´O را بدست می‌آورید. سپس با توجه به اینکه فاصله ´OO را می‌دانید (یعنی همان $a+a'$)، می‌توانید با استفاده از رابطه (۶) مقدار g را بدست آورید.

- تیغه ای را که بین دو وزنه 1000 و 1400 گرمی قرار می‌گیرد، به عنوان محور O و تیغه دیگر را ´O در نظر بگیرید.

- وزنه 1000 گرمی را در نقطه‌ای دلخواه قرار داده و آنرا ثابت کنید و تا انتهای آزمایش محل آنرا تغییر ندهید. (چنانچه این وزنه از قبل ثابت شده بود به آن دست نزنید)

- مرکز وزنه 1400 گرمی را مطابق شکل و جدول زیر در فواصل مختلف d از محور O قرار دهید. برای هر فاصله، زمان 20 نوسان حول هر دو محور O و ´O را به صورت جداگانه بدست آورده و در جدول یادداشت نمائید. (بهتر است پس از تنظیم هر فاصله زمان نوسان حول هر دو محور را بدست آورید و سپس مکان وزنه را عوض کنید. همچنین دامنه نوسان برای نوبت‌های مختلف آزمایش را کوچک و یکسان اختیار کنید.)

- منحنی‌های تغییرات زمان تناوب حول هر دو محور را بر حسب فاصله d روی کاغذ میلی‌متری رسم نمائید. این دو منحنی در نقطه (t_1,d_1) همدیگر را قطع می‌کنند. در نقطه تلاقی، t_1 نشان دهنده زمانی است که (به ازای توزیع جرم متناظر با d_1) نوسان حول هر دو محور O و O´ یکسان می‌شود. به بیان دیگر به ازای d_1، زمان نوسان حول هر دو محور یکسان و برابر با زمان نوسان آونگ ساده‌ای به طول $L' = a + a' = 1m$ می‌باشد. حال با جایگزینی زمان نوسان مشترک در رابطه (۶) یا (۷) می‌توان مقدار g را بدست آورد.

- مقدار g بدست آمده را با $g=9.78\ m/s^2$ مقایسه کرده و خطای نسبی و خطای مطلق را محاسبه کنید.

زمان تناوب $T_{O'}$	زمان 20 نوسان حول محور O´	زمان تناوب T_O	زمان 20 نوسان حول محور O	d(cm)
				10
				15
				20
				25
				30
				35
				40
				45

پرسش‌ها :

۱) دررابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mga}}$ پارامترهای بکار رفته را معرفی نموده و واحد آنها را دردستگاه C.G.S و SI بنویسید.

۲) تفاوت آونگ ساده و مرکب چیست ؟

۳) چگونه می‌توان لختی دورانی (I) یک آونگ فیزیک را تغییر داد به گونه‌ای که مرکز جرم آن تغییر نکند؟

آزمایش ۳ :

برخورد الاستیک و تعیین ثابت فنر

الف) برخورد الاستیک

هدف آزمایش :مطالعه برخورد الاستیک در یک بعد

تئوری آزمایش : دو جسم به جرم های m_1 و m_2 را در نظر می گیریم که با سرعت های V_1 و V_2 به طرف یکدیگر حرکت می‌کنند. در صورتی که دو جسم به شکل رودررو با هم برخورد کنند به قسمی که مسیر حرکت آنها بر روی یک خط راست باقی بماند، برخورد را مستقیم می‌گویند. اگر پس از برخورد هیچ گونه تغییر انرژی‌ای در سیستم رخ ندهد، به گونه ای که انرژی جنبشی دو جسم قبل و پس از برخورد یکسان باشد، برخورد الاستیک است. در غیر این صورت برخورد غیر الاستیک صورت گرفته است.

دو جسم را در نظر می‌گیریم که با هم برخورد مستقیم و الاستیک داشته باشند. بنا به قانون دوم نیوتن تغییر اندازه حرکت هر جسم عبارتست از:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \qquad (1)$$

چون در زمان نسبتا کوتاهی تغییرات زیادی در اندازه حرکت دو جسم ایجاد می‌شود، می‌توان از نیروهای دیگر در مقابل نیروی ضربه در لحظه برخورد صرف نظر نمود. بنابراین داریم:

$$\vec{F}dt = d\vec{p}$$
$$\vec{F}dt = d(m\vec{V}) \qquad (2)$$

به $\vec{F}dt$ ضربه می‌گویند. با انتگرال‌گیری از رابطه فوق داریم :

$$\int \vec{F}dt = \int m d\vec{V} \qquad (3)$$

چون به هر دو جسم بنا به قانون سوم نیوتن نیروهای مساوی و مختلف الجهتی وارد می شود، برای هر جسم می‌توان نوشت :

$$\int \vec{F}dt = \int_{V_{01}}^{V_1} m_1 d\vec{V} \quad , \quad -\int \vec{F}dt = \int_{V_{02}}^{V_2} m_2 d\vec{V} \qquad (4)$$

چون برخورد در یک بعد صورت می‌گیرد، می‌توان روابط فوق را به صورت اسکالر نوشت. یعنی:

$$m_1V_1 - m_1V_{01} + m_2V_2 - m_2V_{02} = 0$$
$$\Rightarrow m_1V_{01} + m_2V_{02} = m_1V_1 + m_2V_2 \qquad (5)$$

به عبارت دیگر اندازه حرکت قبل از برخورد مساوی اندازه حرکت بعد از برخورد می باشد. به این رابطه اصل بقای اندازه حرکت خطی می‌گویند.

محاسبه ضریب بازگشت : در صورتی که برخورد صد در صد الاستیک باشد، علاوه بر اندازه حرکت انرژی جنبشی سیستم نیز پایسته است. بنابراین داریم:

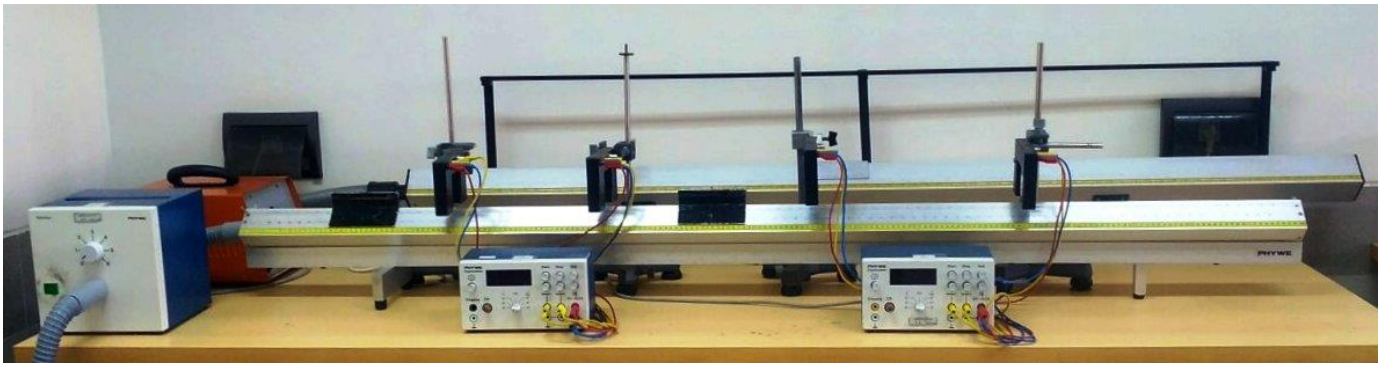
$$\frac{1}{2}m_1V^2{}_{01} + \frac{1}{2}m_2V^2{}_{02} = \frac{1}{2}m_1V^2{}_1 + \frac{1}{2}m_2V^2{}_2 \qquad (6)$$
$$\Rightarrow m_1(V^2{}_{01} - V^2{}_1) = m_2(V^2{}_2 - V^2{}_{02}) \qquad (7)$$

$$(5) \qquad \Rightarrow m_1(V_{01} - V_1) = m_2(V_2 - V_{02}) \qquad (8)$$

$$(7),(8) \rightarrow V_{01} + V_1 = V_2 + V_{02} \rightarrow V_2 + V_1 = -(V_{02} + V_{01}) \Rightarrow -(\frac{V_2 - V_1}{V_{02} - V_{01}}) = 1 \qquad (9)$$

یعنی سرعت نسبی دو جسم بعد از برخورد، مساوی سرعت نسبی دو جسم قبل از برخورد با علامت مخالف می‌باشد. عبارت فوق برای برخوردهای صد در صد الاستیک یک می باشد و در مورد برخوردهای معمولی این مقدار مساوی عددی است که آن را ضریب بازگشت می‌گویند. یعنی :

$$-\frac{V_2 - V_1}{V_{02} - V_{01}} = e \qquad (10)$$



روش آزمایش:

دو جسم m_1 و m_2 را پس از توزین روی ریل هوا قرار دهید؛ به طوری که m_2 بین سد نوری دوم و سوم ساکن باشد، با یک ضربه جسم m_1 را به حرکت در آورید. چون جرم ها روی بالشتکی از هوا حرکت می‌کنند، اصطکاک ناچیز می‌باشد و حرکت با سرعت ثابت انجام می‌گیرد. مسافتی که جرم m_1 قبل از برخورد با m_2 و جرم m_2 پس از برخورد با m_1 طی می‌کند، و زمان های متناظر با آنها را (توسط کرنومتر الکتریکی) بدست آورید. آزمایش را برای مقادیر خواسته شده در جدول دو بار تکرار نموده و نتایج را ثبت نمایید.

به دلخواه برای سه سری از داده‌ها، اصل بقای اندازه حرکت خطی را تحقیق کرده و مقدار انرژی جنبشی دو جسم قبل و پس از برخورد را بدست آورده و با هم مقایسه کنید.

m_1= m_2= V_{02}=0 m/s V_1=0 m/s

X_1	t_1	V_{01}	X_2	t_2	V_2	ضریب بازگشت e	$\Delta e=\lvert e-\bar{e}\rvert$
۳۰			۷۰				
۴۰			۶۰				
۵۰			۵۰				
۶۰			۴۰				
۷۰			۳۰				
						$\bar{e}=$	

ب) تعیین ثابت فنر

هدف : تعیین ضریب ثابت فنر با استفاده از تغییر طول فنر و با استفاده از ارتعاشات فنر، تعیین ضریب ثابت فنرهای سری و موازی

وسایل مورد نیاز : فنر، خط‌کش، پایه، وزنه‌های مختلف، کرنومتر.

تئوری آزمایش :

۱) تعیین ضریب ثابت فنرها

هرگاه به جسم الاستیکی مانند یک فنر نیرویی وارد کنیم، در اثر این نیرو جسم تغییر طول می‌دهد. در ابتدا نسبت این تغییر طول با نیرو خطی است؛ یعنی اگر نیروی وارد بر فنر F باشد و تغییر طول فنر X باشد داریم :

$$F = -kx \qquad (1)$$

این رابطه به قانون هوک معروف است که در آن به k ضریب ثابت فنر می‌گویند. جسم را در این حالت الاستیک می‌گویند؛ چرا که اگر نیرو را حذف کنیم فنر به حالت اولیه برمی‌گردد. مادامی‌که نیرو از مقدار معینی تجاوز نکند، قانون هوک صادق است. این حد را حد ارتجاع یا الاستیک می‌گویند. اگر نیرو از این حد تجاوز کند، دیگر نسبت تغییر نیرو به افزایش طول خطی نیست؛ بلکه به صورت یک منحنی می‌باشد. در این حالت اگر نیرو حذف شود دیگر جسم به حالت اولیه بر نمی‌گردد.

برای محاسبه ضریب ثابت فنر می‌توان از دو روش استفاده کرد:

- استفاده از تغییر طول فنر به ازای نیروهای متفاوت :

به یک فنر وزنه‌ای متصل می‌کنیم و آن را به آرامی پایین می‌آوریم تا معلق بماند. در این حالت نیروی وارد بر فنر برابر وزن جسم است. چنانچه افزایش طول فنر برابر x باشد، داریم :

$$Mg = kx \Rightarrow k = \frac{Mg}{x} = \frac{W}{x} \qquad (2)$$

بنابراین با معلوم بودن Mg و x مقدار k بدست می‌آید.

- استفاده از ارتعاشات فنر :

اگر به یک فنر وزنه‌ای متصل کنیم و آن را از حالتی که فنر دارای طول آزادش می‌باشد رها کنیم، جسم شروع به نوسان می‌کند. برای نیروی وارد بر وزنه برحسب افزایش یا فشردگی طول فنر داریم :

$$F = -kx$$

از طرفی با استفاده از قانون نیوتن می‌توان نوشت :

$$F = ma = m\frac{d^2x}{dt^2} \qquad (3)$$

بنابراین :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx \quad \Rightarrow \qquad (4) \qquad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

این معادله مشابه معادله دیفرانسیل مرتبه دوم حرکت نوسانی ساده یعنی $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ می‌باشد. بنابراین داریم :

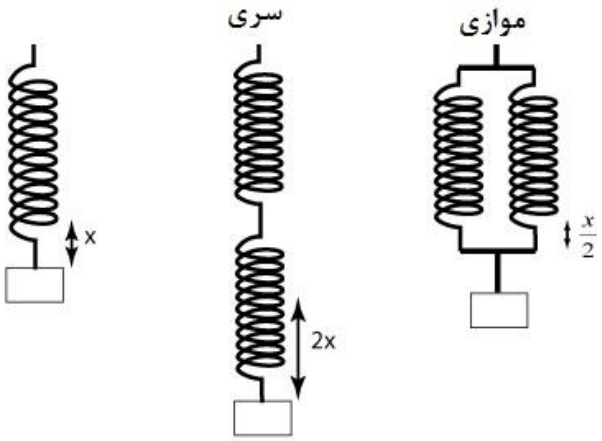
$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{یا} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (5)$$

که ω فرکانس زاویه ای نوسان می‌باشد. از طرفی $\omega = \frac{2\pi}{T}$؛ پس داریم :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (6)$$

که در آن T زمان تناوب حرکت نوسانی جسم متصل به فنر است. بنابراین اگر زمان تناوب حرکت نوسانی جسم متصل به فنر و جرم جسم متصل به فنر را داشته باشیم، ضریب ثابت فنر بدست می‌آید.

۲) به هم بستن فنرها بصورت سری و موازی



اگر دو فنر با ضرایب سختی k_1 و k_2 را بصورت سری به هم متصل کنیم، ضریب سختی مجموعه از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$\frac{1}{k}=\frac{1}{k_1}+\frac{1}{k_2} \qquad (7)$$

اگر همان دو فنر را بصورت موازی ببندیم، ضریب سختی مجموعه برابر می‌شود با :

$$k=k_1+k_2 \qquad (8)$$

روش آزمایش :

۱) **تعیین ثابت فنر با استفاده از قانون هوک:** برای فنری که در اختیار شما قرار داده شده، با استفاده از رابطه (۲) و با متصل کردن وزنه‌های ۳۰۰ و۴۰۰ و ۵۰۰ گرمی و تعیین دقیق افزایش طول فنر k را بدست آورید و نتایج را در جدول زیر بنویسید.

W(N)				
X(M)				میانگین K
K(N/M)				

با استفاده از مقادیر K بدست آمده برای هرحالت و K میانگین، خطای مطلق و خطای نسبی ماکزیمم را بدست آورید.

۲) تعیین ثابت فنر با استفاده از نوسانات آن: مطابق جدول زیر وزنه‌های مختلف را به انتهای فنر آویزان کرده و با کشیدن وزنه از حالت تعادل، آن را به نوسان در آورده و زمان ۳۰ نوسان کامل را اندازه بگیرید. سپس با تقسیم زمان بدست آمده بر ۳۰، زمان یک نوسان کامل را بدست آورید و جدول زیر را کامل کنید.

m(gr)	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
T(sec)			
$T^2(s^2)$			

با رسم نمودار T^2 بر حسب m و استفاده از رابطه (۶) ضریب ثابت فنر را بدست آورید.

۳) به هم بستن سری فنرها

دو فنری را که در بالا ضریب سختی شان را بدست آورده‌اید با استفاده از پیچی به طور سری به هم متصل کنید. سپس با متصل کردن وزنه‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ و ۵۰۰ گرمی و با اندازه‌گیری دقیق افزایش طول مجموعه فنر برای هر حالت، k مجموعه را بدست آورید.

W(N)			
X(M)			
K(N/M)			
		میانگین K	

با استفاده از نتایج بخش قبل و استفاده از رابطه (۷)، K را بدست آورده و با مقدار K میانگین بدست آمده از آزمایش مقایسه کنید.

۴) به هم بستن موازی فنرها

دو فنر مشابه و هم طول را که قبلا ضریب ثابت آنها را بدست آورده‌اید انتخاب کرده و آنها را به صورت موازی به هم متصل کنید. سپس با متصل کردن وزنه‌های ۴۰۰ و ۵۰۰ و ۶۰۰ و ۷۰۰ گرمی و با اندازه‌گیری دقیق افزایش طول مجموعه فنر برای هر حالت، k مجموعه را بدست آورید.

W(N)					
X(M)					
K(N/M)					
				میانگین K	

با استفاده از نتایج بخش قبل و استفاده از رابطه (۸)، K را بدست آورده و با مقدار K میانگین بدست آمده از آزمایش مقایسه کنید.

پرسش‌ها :

۱) برخورد الاستیک چیست و تغییرات انرژی در آن چگونه است ؟

۲) ثابت فنر به چه عواملی بستگی دارد ؟

۳) رابطه (۷) و (۸) مربوط به بهم بستن سری و موازی فنرها را اثبات نمائید.

۴) چگونه می‌توان یک نیروسنج مدرج ساخت ؟

آزمایش ۴:

ماشین آتوود و چرخ ماکسول

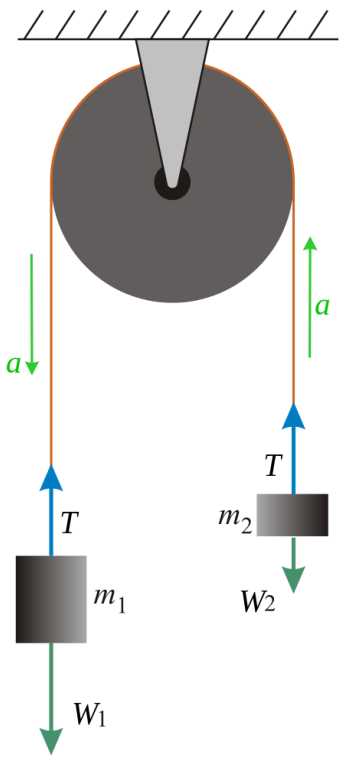
الف) ماشین آتوود

هدف آزمایش : بررسی قانون دوم نیوتن به وسیله ماشین آتوود

وسایل مورد نیاز : دستگاه ماشین آتوود، کرنومتر، وزنه‌های مختلف

تئوری آزمایش :

ماشین آتوود از یک قرقره ثابت که می‌تواند حول محورش آزادانه دوران کند و از جرم قرقره و اصطکاک محور آن صرف نظر شده است، تشکیل گردیده است. دو جرم نامساوی بوسیله نخ بدون جرمی از قرقره گذشته و مطابق شکل زیر بهم وصل شده‌اند.



اگر فرض شود $m_2 = M$ و $m_1 = M + m$ و شتاب دستگاه a باشد،

با استفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان مقدار a را به دست آورد :

(جهت بالا مثبت و جهت پایین منفی در نظر گرفته شده است)

$$\begin{cases} W_1 - T = m_1 a \\ T - W_2 = m_2 a \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T = m_1 g - m_1 a \\ T = m_2 g + m_2 a \end{cases}$$

با حذف T از روابط بالا داریم:

$$m_1 g - m_1 a = m_2 g + m_2 a$$

$$\rightarrow \quad a = \frac{m_1 - m_2}{m_2 + m_1} g \qquad (1)$$

اگر بجای m_2 و m_1 مقادیرشان برحسب m و M را قرار می‌دهیم، داریم :

$$a = \frac{mg}{2M + m} \qquad (2)$$

که در آن M جرم قلاب و وزنه (برای هر طرف هنگامی که سیستم در حال تعادل قرار دارد)، و m جرم بار اضافی است.

روش آزمایش :

- ابتدا ماشین آتوود را با سطح افق تراز کنید. برای اینکار می‌توانیم از سه پیچ که در زیر دستگاه قرار دارد استفاده کنیم. هرگاه دستگاه در راستای شاغولی قرار گیرد، وزنه M ماشین آتوود در مرکز حلقه تعبیه شده روی دستگاه قرار خواهد گرفت.

- دو سنسور نوری را در فاصله مورد نظر (x) قرار داده و زمان‌سنج را آماده به کار کنید.

- در طرف راست دستگاه وزنه اضافی (m=5gr) را قرار دهید. با یک دست خود وزنه سمت چپ را گرفته و دست دیگر خود را در زیر سنسور نوری پایینی قرار دهید؛ به طوری که وزنه سمت راست درست در بالای سد نوری بالایی قرار گیرد. با رها کردن وزنه کرنومتر به کار افتاده و دستگاه شتاب می‌گیرد و به محض عبور وزنه از سنسور نوری دوم کرنومتر از کار می‌افتد. (وزن کفه‌ها ۵۰ گرم است)

- دو سنسور نوری را مطابق جدول زیر در فواصل مختلف قرار دهید. برای هر فاصله خواسته شده آزمایش را سه بار تکرار کرده و نتایج را ثبت کنید.

- با استفاده از رابطه $\Delta x = \frac{1}{2}at^2$ شتاب سیستم را محاسبه کرده و سه سطر اول جدول را کامل کنید..

- $\overline{a}$ را با مقدار بدست آمده از رابطه (2) مقایسه کرده و خطای نسبی و مطلق را محاسبه کنید. (سطر آخر جدول)

- $\overline{a}$ را بار دیگر با استفاده از رسم نمودار خطی Δx بر حسب $\overline{t}^2$ و تعیین شیب نمودار، بدست آورده و نتیجه را با مقدار $\overline{a}$ که از مرحله قبل بدست آورده‌اید، مقایسه کنید.

$\Delta x\ (cm)$	t_1	t_2	t_3	$\bar{t}$	$\bar{t}^2$	$a=\frac{2\Delta x}{\bar{t}^2}$	خطای مطلق	خطای نسبی
۲۰								
۳۰								
۴۰								
					$\bar{a}$ میانگین			

- در سمت راست دستگاه وزنه m=50+20gr و در سمت چپ وزنه m=50+10gr را قرار داده و موارد بالا را تکرار کنید.

ب) تعیین اینرسی دورانی به کمک چرخ ماکسول

هدف آزمایش : تعیین ممان اینرسی (گشتاور لختی) چرخ ماکسول

وسایل آزمایش : چرخ ماکسول، کرونومتر، پایه، کولیس، سنسور نوری، میله نگهدارنده، خط‌کش شاخص‌دار

تئوری آزمایش :

چرخ ماکسول عبارت است از یک چرخ فلزی که از محور آن یک میله نسبتا نازک عبور کرده است. به میله این چرخ دو نخ نازک متصل است که می‌توان این نخ‌ها را حول میله محوری پیچید. اگر دو سر آزاد نخ‌ها را به دو نقطه ثابت کنیم و دو نخ متصل به چرخ را حول محور آن بپیچانیم، با رها کردن سیستم، چرخ شروع به حرکت می‌کند و درضمن سقوط، نخها از حول محور باز شده و باعث دوران چرخ حول محورش می‌شود. در حین سقوط، چرخ هم حرکت دورانی و هم حرکت انتقالی پیدا می‌کند. بنابراین با استفاده از قانون پایستگی انرژی (با صرفنظر از انرژی تلف شده در اثر اصطکاک) می‌توان نوشت :

$$\frac{1}{2}\mathrm{mv(t)}^2+\frac{1}{2}\mathrm{I_G}\omega(t)^2=mgh(t) \qquad (1)$$

که جمله اول انرژی جنبشی انتقالی، جمله دوم انرژی جنبشی دورانی و $h(t)$ فاصله محور چرخ ماکسول از نقطه رهاسازی آن در لحظه t می‌باشد. به بیان ساده‌تر رابطه بالا بیان می‌کند که در لحظه t، انرژی پتانسیل $mgh(t)$ به انرژی جنبشی $\frac{1}{2}mv(t)^2 + \frac{1}{2}I_G\omega(t)^2$ تبدیل شده است. در این رابطه V سرعت خطی، ω سرعت زاویه‌ای، I_G ممان اینرسی (گشتاور لختی) و m جرم چرخ ماکسول می‌باشند.

اگر شعاع محوری که چرخ حول آن پیچیده شده است r باشد، رابطه بین V و ω به شکل $V = \omega r$ است. با جایگذاری ω و مشتق‌گیری از رابطه (۱) نسبت به t داریم :

$$\left(m + \frac{I_G}{r^2}\right) v(t) \frac{dv(t)}{dt} = mg \frac{dh(t)}{dt} \qquad (2)$$

با توجه به اینکه $\frac{dh(t)}{dt} = v(t)$ ، داریم: $$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{mg}{m + \frac{I_G}{r^2}} \qquad (3)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق و در نظر گرفتن $t_0 = 0$ نتیجه می‌شود:

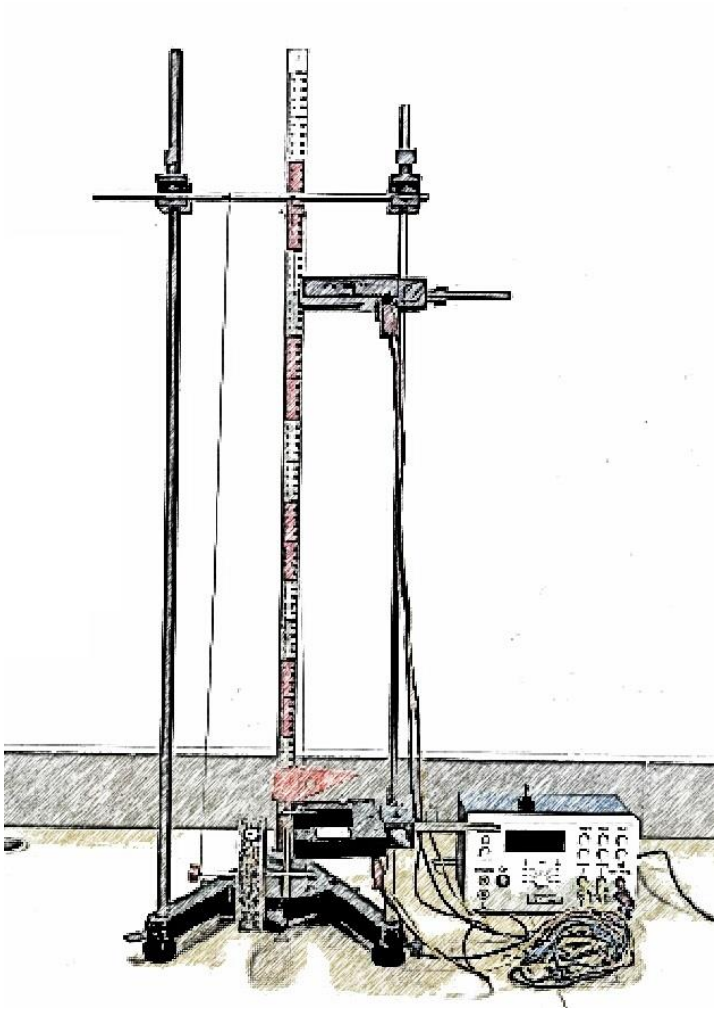
$$v(t) = \frac{mg}{m + \frac{I_G}{r^2}} t \qquad (4)$$

$$h(t) = \int_0^t v(t)\, dt = \int_0^t \frac{mg}{m + \frac{I_G}{r^2}} t\, dt = \frac{mg}{2\left(m + \frac{I_G}{r^2}\right)} t^2 \qquad (5)$$

همانطور که در رابطه (5) می‌بینیم، اگر ارتفاع سقوط $h(t)$ را برحسب t^2 رسم کنیم، یک خط راست خواهیم داشت که شیب این خط برابر $\frac{mg}{2\left(m + \frac{I_G}{r^2}\right)}$ است. بنابراین با استفاده از مقدار شیب خط و با توجه به معلوم بودن مقادیر r،m و g می‌توان I_G را بدست آورد.

روش آزمایش :

دستگاه را مطابق شکل سوار کنید. شعاع محور را اندازه بگیرید. سد نوری پایینی را طوری تنظیم کنید که به هنگام باز بودن نخ‌ها، محور چرخ مقداری پایین‌تر از آن قرار گیرد. سپس سد نوری بالایی را در فاصله h نسبت به سد نوری پایینی قرار دهید. حال چرخ را حول محورش



بچرخانید تا نخ حول محورش بپیچد و چرخ بالا رود. این عمل را آنقدر ادامه دهید تا محور چرخ درست در بالای سد نوری بالایی قرار گیرد. پس از آن زمان‌سنج را آماده به کار نمایید. با رها کردن چرخ کرونومتر شروع به کار می‌کند و هنگامی که محور چرخ از مقابل سد نوری دوم عبور کند، زمان سنج قطع می‌شود.

مطابق جدول زیر دو سد نوری را در فاصله‌های مختلف (h) قرار داده و مقدار t را برای هر فاصله با سه بار تکرار آزمایش و میانگین‌گیری از آن بدست آورید. سپس با استفاده از داده های هر قسمت و رابطه (5) مقدار I_G را تعیین کنید.

پس از آن با رسم نمودار h برحسب t^2 و تعیین شیب نمودار، I_G را تعیین کرده و با مبنا قرار دادن آن خطای مطلق و نسبی هر اندازه‌گیری را بدست آورید.

نتایج را در جدولی مانند جدول زیر نوشته و عوامل خطا را ذکر کنید.

(جرم چرخ ماکسول برابر m =513 gr و شعاع r = 2.5 mm است.)

h(cm)	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
$t_1, t_2, t_3, \overline{t}\,(s)$					
$\overline{t}^{\,2}\,(s^2)$					
I_G					
خطای مطلق					
خطای نسبی					

توجه: در صورتی که قبل از شروع آزمایش محور چرخ ماکسول کج بود، با شل کردن گیره‌های بالایی دستگاه و چرخاندن میله در جهت ساعتگرد یا پادساعتگرد، چرخ را صاف کنید. پس از تراز شدن چرخ گیره ها را دوباره محکم کنید.

پرسش ها:

۱) اگر چرخ ماکسول مورد استفاده در آزمایش را با چرخی قرص مانند و هم جرم و هم شعاع با چرخ اولیه که چگالی آن در مقطع قرص یکنواخت است عوض کنیم، زمان سقوط چه تغییری می‌کند؟ چرا؟

آزمایش ۵ :

قوانین اصطکاک و تعیین ضریب بی دررو هوا

الف) قوانین اصطکاک

هدف آزمایش: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی و لغزشی برای سطوح مختلف.

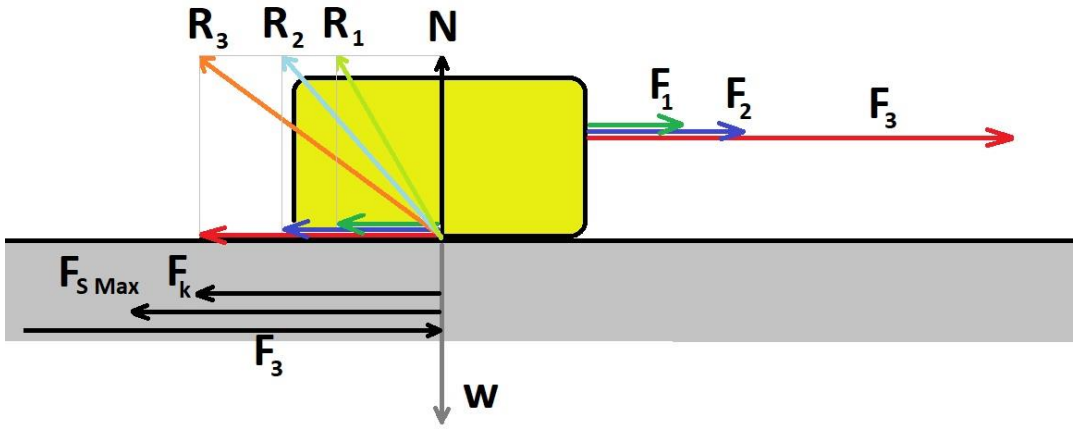
وسایل مورد نیاز : میز اصطکاک، مکعب مستطیل‌هایی با سطوح مختلف، جعبه وزنه، نخ، ترازو.

تئوری آزمایش :

هنگامی که یک جسمی روی یک سطح حرکت می‌کند، سطح تکیه‌گاه در مقابل حرکت مقاومتی نشان می‌دهد که آن را نیروی اصطکاک گویند. اگر سطح اصطکاک نداشته باشد عکس العمل تکیه‌گاه در راستای عمود بر سطح اتکا خواهد بود. در این صورت اگر سطح اتکا افقی باشد جسم را به آسانی می‌توان روی سطح حرکت داد؛ زیرا در مقابل حرکت هیچ نیروی مقاومتی وجود ندارد.

درحالتی که سطح دارای اصطکاک باشد، اگر به جسم واقع روی سطح افقی یک نیروی افقی $\vec{F}$ وارد کنیم مادامی‌که $\vec{F}$ از اندازه معینی تجاوز نکند، جسم ساکن باقی می‌ماند. در این حالت نیروی $\vec{F}$ با نیروی اصطکاک برابر است. به عنوان مثال در شکل زیر جسم S_1 به وزن $\vec{W}$ روی سطح افقی S_2 قرار دارد. اگر نیروی خارجی غیر از وزن $\vec{W}$ بر S_1 اثر نکند، عکس العمل S_2 در راستای قائم و برابر $\vec{W}$ به طرف بالا می‌باشد که آن را با N نمایش می‌دهیم.

در شکل زیر برای مقادیر نیروی افقی $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$، عکس العمل سطح S_2 بر جسم ساکن S_1 به ترتیب با $\vec{R_1}, \vec{R_2}, \vec{R_3}$ نشان داده شده است. هنگامی جسم S_1 می‌تواند حرکت کند که نیروی $\vec{F}$ از نیروی اصطکاک بیشینه ایستایی یعنی $\vec{F}_{S\,Max}$ تجاوز کند (مانند بردار $\vec{F}_3$ در شکل بالا). در این حالت زاویه $\vec{R}$ و $\vec{N}$ برابر با ϕ خواهد بود که آن را زاویه اصطکاک می‌نامند. اگر S_1 و S_2 هر دو در حال حرکت باشند، نیروی اصطکاک در خلاف جهت سرعت نسبی S_1 نسبت به S_2 می‌باشد.



تجربه نشان می‌دهد که اندازه نیروی اصطکاک با مولفه عمودی عکس العمل سطح متناسب است. این ضریب تناسب را با μ نشان می‌دهند و به آن ضریب اصطکاک می‌گویند:

$$F = \mu N \qquad (1)$$

ضریب اصطکاک μ به وسعت سطح اتکا بستگی ندارد و عموما با افزایش سرعت نسبی جسم نسبت به سطح اتکا ضریب μ کم می‌شود. ضریب اصطکاک به عوامل زیادی از جمله ماهیت مواد، درجه صیقلی بودن سطح، لایه‌های نازک سطحی، دما و میزان آلودگی سطح بستگی دارد.

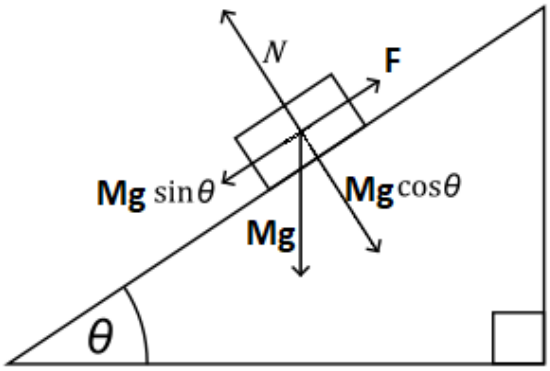
چنانچه بر جسمی‌که روی یک سطح قرار دارد نیرویی در راستای سطح وارد کنیم، مادامیکه جسم ساکن است نیروی مقاومت سطح در راستای نیروی وارد شده، برابر نیروی وارد شده از طرف ما بر جسم است. این نیرو، نیروی اصطکاک ایستایی (F_s) نامیده می‌شود:

$$F_s = \mu_s N \qquad (2)$$

حال چنانچه مقدار نیرو را افزایش دهیم، نیروی اصطکاک نیز افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. در این حالت جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد و نیروی اصطکاک به بیشترین مقدار خود می‌رسد. پس از آن با افزایش بیشتر نیرو جسم شروع به حرکت می‌کند. در حالتی که جسم در حال حرکت باشد نیروی مقاومت سطح در برابر حرکت، نیروی اصطکاک لغزشی (F_k) نامیده می‌شود:

$$F_k = \mu_k N \qquad (3)$$

اگر جسم روی سطح شیبداری که با افق زاویه α می‌سازد قرار داشته باشد، نیروی وزن جسم $(\vec{W})$ را می‌توان به دو مولفه موازی و عمود بر سطح شیب‌دار تجزیه کرد. مولفه قائم با عکس العمل سطح خنثی می‌شود.



در حالتی که جسم ساکن است داریم:

$$\begin{cases} F_s = \mu_s N = Mg\sin\theta \\ N = Mg\cos\theta \end{cases} \Rightarrow \mu_s = \frac{Mg\sin\theta}{N} = \tan\theta \quad (4)$$

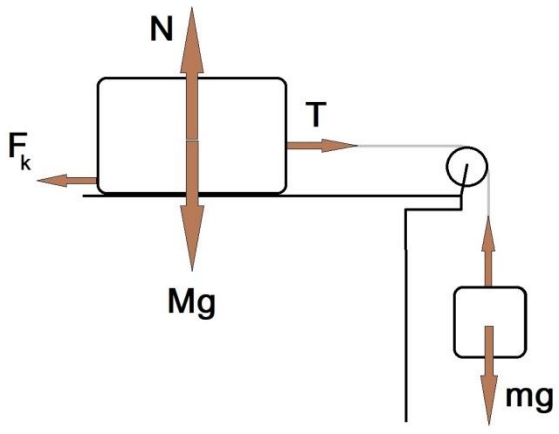
در حالتی که جسم تحت اثر نیروی F با سرعت یکنواخت به سمت بالا حرکت کند (a=0) داریم :

$$\begin{cases} F - Mg\sin\theta - F_k = Ma = 0 \\ F_k = \mu_k N = \mu_k Mg\cos\theta \end{cases} \Rightarrow \quad \mu_k = \frac{F - Mg\sin\theta}{Mg\cos\theta} \qquad (5)$$

اگر جسم را بر روی سطح قرار دهیم و به تدریج شیب سطح را زیاد کنیم تا اینکه به ازای یک زاویه معین α_s جسم شروع به حرکت کند، در این صورت :

$$\begin{cases} (F_s)_{\max} = Mg\sin\alpha_s \\ N = Mg\cos\alpha_s \end{cases} \Rightarrow (\mu_s)_{\max} = \frac{Mg\sin\alpha_s}{N} = \tan\alpha_s \qquad (6)$$

زاویه α_s را زاویه حد سکون می‌نامند. در صورتی جسم S_2 روی سطح S_1 که با سطح افق زاویه α می‌سازد ساکن باقی می‌ماند، که زاویه α از زاویه حد سکون α_s کوچکتر باشد.



مشابه حالت بالا می‌توان نشان داد زاویه لازم برای اینکه جسمی با سرعت ثابت روی سطح شیب‌دار بلغزد از رابطه $\mu_k = \tan\alpha_k$ به دست می‌آید که در آن $\alpha_k \prec \alpha_s$ است.

در نهایت برای یک سطح افقی مانند شکل، اگر جسم با سرعت ثابت حرکت کند (a=0) داریم :

$$T - F_k = 0 \quad , \quad \begin{cases} F_k = \mu_k N = \mu_k Mg \\ T = mg \end{cases} \Rightarrow \mu_k = \frac{m}{M} \qquad (7)$$

روش آزمایش :

الف) سطح افقی :

قطعه چوبی را روی سطح افقی قرار دهید و به آن نخی متصل کنید. نخ را از روی قرقره‌ای که در انتهای سطح قرار دارد عبور داده و آن را به کفه متصل کنید. حال به تدریج در کفه وزنه قرار داده و با زدن ضربه ملایم به سطح حالتی را بوجود آورید که قطعه چوب با سرعت یکنواخت حرکت کند. سپس مقادیر m و M و $\mu_k = \frac{m}{M}$ را یادداشت کنید. با قرار دادن وزنه‌های مختلف روی قطعه چوب (که در اینجا آن را بار می‌نامیم) مجددا آزمایش را تکرار کرده و نتایج را در جدول زیر ثبت کنید:

(جرم بار + جرم قطعه چوبی = M و جرم وزنه + جرم کفه = m)

(توجه : این آزمایش را برای دو جسم با سطوح مختلف انجام دهید)

جرم جسم = جرم کفه = جنس سطح جسم =

شماره	جرم بار روی جسم	جرم وزنه داخل کفه	m(gr)	M(gr)	μ_k	$\lvert \mu_k - \bar{\mu}_k \rvert$	$\frac{\lvert \mu_k - \bar{\mu}_k \rvert}{\mu_k}$
۱	۰						
۲	۱۰۰						
۳	۲۰۰						
۴	۳۰۰						
					$\bar{\mu}_k =$		

منحنی تغییرات m برحسب M را در کاغذ میلیمتری رسم کرده و با استفاده از آن μ_k را بدست آورید.

از آزمایشات فوق کدام یک از قوانین اصطکاک را نتیجه می‌گیرید؟

ب) سطح شیبدار :

این بار زاویه سطح با افق را ۲۰ درجه انتخاب کنید و آزمایش قبلی را برای سطح شیبدار تکرار کنید. واضح است که در این حالت برای محاسبه μ_k باید از رابطه (۵) استفاده نمائید. نتایج را در جدول زیر ثبت نمائید.

جرم جسم = جرم کفه = جنس سطح جسم =

شماره	جرم بار روی جسم	جرم وزنه داخل کفه	m(gr)	M(gr)	μ_k	$\lvert \mu_k - \overline{\mu}_k \rvert$	$\frac{\lvert \mu_k - \overline{\mu}_k \rvert}{\mu_k}$
۱	۰						
۲	۱۰۰						
۳	۲۰۰						
۴	۳۰۰						
					$\overline{\mu}_k =$		

ج) زاویه حد سکون :

یکی از مکعب‌ها (بدون اتصال با کفه) را روی سطح شیبدار گذاشته و آنقدر شیب را زیاد کنید تا مکعب شروع به حرکت کند (توجه شود که برای شروع حرکت ضربه‌ای وارد نکنید). در این حالت ضریب اصطکاک ایستایی بیشینه را با استفاده از رابطه (۶) تعیین کنید. در مرحله بعد زاویه سطح شیبدار را چنان تغییر دهید که جسم با سرعت ثابتی بر روی آن بلغزد (در اینجا برای شروع حرکت ضربه ملایمی به سطح وارد کنید). سپس با استفاده از رابطه $\mu_k = \tan\alpha_k$ ضریب اصطکاک لغزشی را بدست آورید. این عمل را برای سطوح با جنس‌های متفاوت تکرار کنید و نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.

شماره	جنس سطح جسم	زاویه حد سکون α_s	زاویه لغزش α_k	$(\mu_s)_{\max} = \tan\alpha_s$	$\mu_k = \tan\alpha_k$
۱					
۲					
۳					

پرسش‌ها :

۱) اگر سطحی بیشتر از حد معینی صیقل داده شود نیروی اصطکاک، بجای کم شدن افزایش می‌یابد. چرا ؟

۲) آیا این انتظار نامعقول است که ضریب اصطکاک از یک بیشتر باشد؟

۳) یک جسم به وزن 1/1N پیش از توقف روی یخ ۱۵ متر می‌لغزد؛

الف) اگر سرعت اولیه آن $6/1\ m/s$ باشد، نیروی اصطکاک میان توپ و یخ چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک لغزشی چقدر است؟

۴) نیروی افقی 53N مکعبی به وزن 22N را به دیوار قائمی‌می‌فشارد. ضریب اصطکاک ایستایی بین دیوار و مکعب 0/6 و ضریب اصطکاک جنبشی 0/4 فرض شود اگر مکعب در ابتدا ساکن باشد.

الف) آیا شروع به حرکت می‌کند؟

ب) نیروی وارد بر مکعب از طرف دیوار چقدر است؟

ب) تعیین ضریب بی دررو هوا

هدف : تعیین ضریب بی دررو (γ)برای هوا

وسایل مورد نیاز : شمارنده نوری،کرنومتر، بالون با لوله شیشه ای، جسم نوسانگر و پمپ باد

تئوری آزمایش :

ابتدا وسایل را مانند شکل بهم متصل کنید. با روشن کردن پمپ و انداختن وزنه درون لوله، هوای بیرون توسط پمپ به داخل بالون تزریق می‌شود و سبب افزایش فشار درون ظرف و اعمال نیرو به جسم نوسانگر می‌گردد و آن را به سمت بالا می‌راند. پس از عبور جسم از مقابل شکافی که در وسط لوله ایجاد شده، فشار

درون لوله کاهش می‌یابد و جسم نوسانگر به سبب برتری نیروی جاذبه نسبت به فشار هوا مجددا به سمت پایین شتاب میگیرد و در عبور مجدد از سوراخ، راه عبور هوا از شکاف را سد می‌کند. در نهایت تکرار این مراحل باعث حرکت نوسانی جسم درون لوله می‌شود.

در صورتیکه تغییرات فشار درون بالون حاوی هوا (گاز) را Δp در نظر بگیریم و جابجایی نوسانگر را x بنامیم، بنا به قانون دوم نیوتن می‌توان نوشت :

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \pi r^2 \Delta p \qquad (1)$$

که در آن r شعاع نوسانگر و m جرم آن می‌باشد. فشار هوای درون بالون برابر است با :

$$p = p_0 + \frac{mg}{\pi r^2} \qquad (2)$$

که در آن p_0 فشارجو در محیط آزمایشگاه است. از آنجا که این نوسانات بطور نسبتا سریع اتفاق می‌افتد، این فرایند را می‌توان به عنوان یک فرایند بی‌دررو در نظر گرفت و از معادله بی‌دررو استفاده کرد :

$$PV^{\gamma} = c \qquad (3)$$

که در آن V حجم هوا است. با مشتق‌گیری از رابطه بالا نسبت به V و P داریم :

$$\Delta P = -\frac{p\gamma\Delta V}{V} \qquad (4)$$

با استفاده از معادله (1) و (4) و جایگذاری $\Delta V = \pi r^2 x$ خواهیم داشت :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\gamma\pi^2 r^4 p}{mV}x = 0 \qquad (5)$$

این معادله شبیه معادله حرکت نوسانی ساده یعنی $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ می‌باشد و جواب آن به صورت زیر است :

$$x = x_m \sin \omega t \qquad (6)$$

که x_m دامنه حرکت و ω سرعت زاویه ای آن است:

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma\pi^2 r^4 p}{mV}} \qquad (7)$$

با توجه به رابطه $\omega = \frac{2\pi}{T}$ خواهیم داشت :

$$\gamma = \frac{4mV}{\mathrm{Pr}^4 T^2} \qquad (8)$$

روش آزمایش :

۱) دستگاه را مطابق شکل سوار کنید.

۲) جرم و شعاع جسم نوسانگر را اندازه گرفته و در جدول زیر یادداشت کنید.

۳) فشار هوا (گاز) را به کمک رابطه (2) و با اندازه‌گیری فشار جو p_0 توسط فشارسنج، به دست آورید.

۴) پمپ را روشن کرده و وزنه را درون لوله بیاندازید. سپس زمان مربوط به ۵۰ نوسان آن را اندازه گیری کرده و دوره تناوب را بدست آورید. این کار را ۳ بار تکرار کنید و درجدول زیر یادداشت نمائید.

۵) به کمک رابطه (8) مقدار γ را تعیین نمائید.

حجم بالون حاوی هوا (گاز) $V=1.14\times10^{-3}\ m^3$

M(kg)	r(m)	P_0(pa)	P(pa)

شماره آزمایش	تعداد نوسان =n	زمان n نوسان	زمان یک نوسان T	γ
۱				
۲				
۳				
			میانگین	

۶) خطای مطلق و خطای نسبی را بدست آورید.

پرسش :

۱) منظور از فرآیند بی‌دررو چیست ؟

آزمایش ۶ :

حرکت سقوط آزاد و تعیین ضریب انبساط خطی جامدات

الف) حرکت سقوط آزاد

هدف : بررسی حرکت سقوط آزاد و تعیین g در محل آزمایشگاه

وسایل مورد نیاز : گلوله فولادی، میله نگهدارنده، خط‌کش و کرونومتر

تئوری آزمایش :

متداولترین مثال برای حرکت با شتاب (تقریبا) ثابت، سقوط یک جسم به طرف زمین است و شتاب متناظر با آن را با g نشان می‌دهند.

با اختیار کردن جهت مثبت محور y به سمت بالا و نیز قرار دادن مبدا مختصات o در نقطه شروع حرکت، به کمک معادله زیر می‌توان مختصات مکانی جسم را در هر لحظه یافت :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_{0y}t \qquad (1)$$

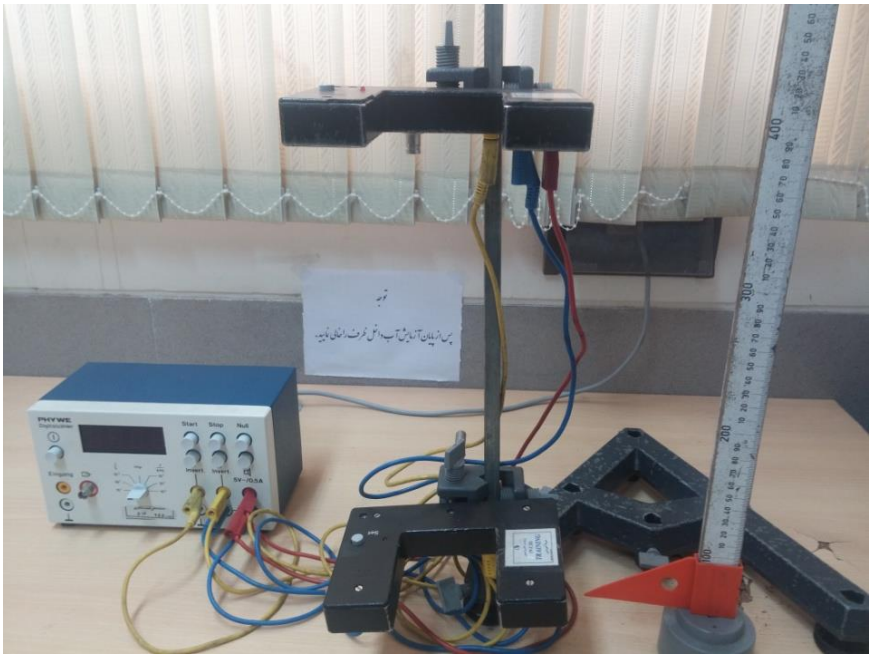
دراین حالت هرگاه جسم مورد نظر از حال سکون رها گردد ($V_{0y} = 0$) معادله فوق به صورت زیر در می آید :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 \qquad (2)$$

روش آزمایش :

۱) دستگاه را مطابق شکل آماده نمائید. همانطور که مشخص است دستگاه شامل دو سنسور نوری است. گلوله را درست در بالای سنسور بالایی قرار داده و پس از صفر کردن زمان سنج آن را رها کنید. با رها کردن گلوله از سنسور بالایی زمان‌سنج شروع به کار می‌کند و هنگامی که گلوله از سنسور پایینی عبور می‌کند زمان‌سنج

متوقف می‌شود. بنابراین زمان سقوط در فاصله بین دو سد نوری بدست می‌آید. با تغییر فاصله بین دو سد نوری، زمان سقوط را برای مسافت‌های خواسته شده در جدول زیر بدست آورده و یادداشت کنید. برای دقت بیشتر برای هر مسافت، آزمایش را سه بار تکرار نمائید.



y(cm)	20	30	40	50	60	70	میانگین
t_1 (sec)							
t_2 (sec)							
t_3 (sec)							
$\bar{t}$ (sec)							
$\bar{t}^2(s^2)$							
g							
خطای مطلق							
خطای نسبی							

۲) با رسم نمودار تغییرات $|y|$ برحسب $\bar{t}^2$ و محاسبه شیب نمودار مقدار g را بدست آورید.

۳) با محاسبه $\overline{g}$ و خطای مطلق ماکزیمم، حدود مقدار g را بدست آورید. یعنی :

$\overline{g} - \Delta g <$ واقعی g $< \overline{g} + \Delta g$

۴) آیا به طور کلی با افزایش فاصله خطای آزمایش کاهش می‌یابد؟ چرا؟

ب) تعیین ضریب انبساط خطی جامدات

هدف : تعیین ضریب انبساط خطی جامدات

وسایل مورد نیاز : پمپ گرداننده آب همراه با ترموستات، دستگاه مخصوص اندازه‌گیری انبساط خطی جامدات به همراه ریزسنج و دماسنج.

تئوری آزمایش :

هنگامی که دما (T) بالا می‌رود، دامنه ارتعاش اتم‌ها در شبکه بلوری جسم جامد نیز افزایش می‌یابد و این ارتعاشات (به دلیل طبیعت نامتقارن منحنی انرژی پتانسیل) سبب افزایش فاصله متوسط بین اتم‌ها میگردد.

این امر از دیدگاه ماکروسکوپی به افزایش طول جامد می‌انجامد. تغییر هر بعد خطی جسم جامد مانند طول، عرض و یا ضخامت را انبساط خطی می‌نامند. بطور تجربی معلوم شده است که اگر طول بعد مورد نظر ℓ_1 و تغییر طول ناشی از تغییر دمای ΔT برابر $\Delta\ell$ باشد، برای ΔT به قدرکافی کوچک، تغییر طول $(\Delta\ell)$ با ΔT و طول اولیه ℓ_1 متناسب است. یعنی:

$$\Delta\ell = \alpha\ell_1\Delta T \qquad (3)$$

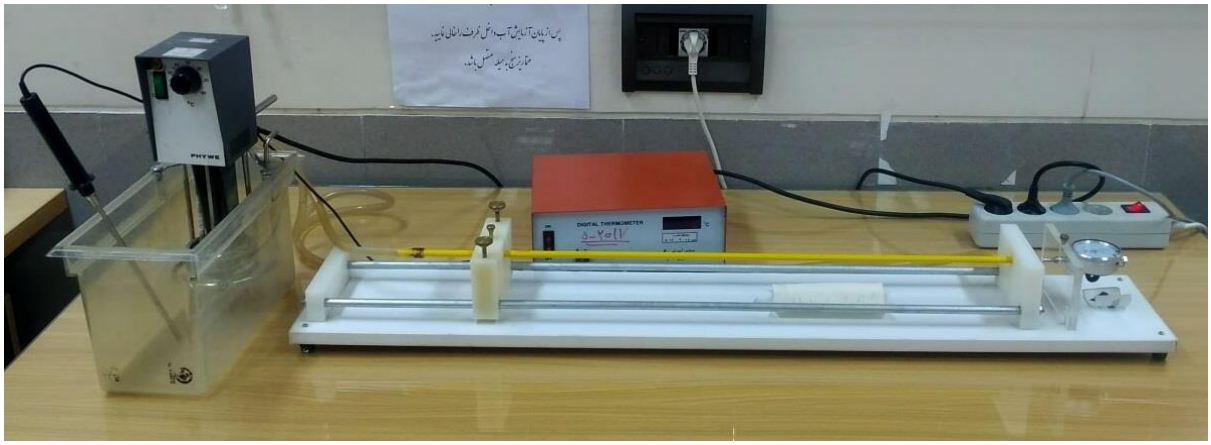
در رابطه بالا α ضریب انبساط خطی نامیده می‌شود که به جنس ماده بستگی دارد و برای مواد مختلف دارای مقادیر متفاوتی است.

روش آزمایش :

۱) دستگاه را مطابق شکل سوار کنید.

۲) مخزن آب را تا تراز مشخص شده روی آن از آب پرکرده و سپس پمپ آب را روشن کنید.

۳) درون مخزن تا خط نشان آب ریخته و دماسنج را روشن کنید. ترموستات سیرکولاتور را روی صفر قرار داده و سیرکولاتور را روشن کنید تا آب درون میله به جریان درآید و بدین طریق میله و آب به تعادل گرمایی برسند. در این حالت چند دقیقه صبر کنید تا دماسنج درون آب عدد ثابتی را نشان دهد.



۴) ریزسنج را به انتهای میله در تماس قرار داده و با استفاده از پیچ مربوطه آنرا محکم کنید. سپس با استفاده از صفحه مدور روی ریزسنج عقربه را مقابل عدد صفر قرار دهید.

۵) مقدار طول اولیه میله L_1 (فاصله محل اتصال با پیچ نگهدارنده تا محل اتصال با ریزسنج) را اندازه گیری کنید.

۶) ترموستات را روی ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار دهید. به ازای هر ۵ درجه افزایش دما، افزایش طول میله را با استفاده از ریزسنج خوانده و در جدولی مانند جدول زیر یادداشت کنید. این کار را تا دمای ۶۰ درجه ادامه دهید.

(جنس میله آلومینیوم و دقت ریز سنج ۰/۰۱ mm است.)

$T_1(^\circ c)$	$T_2(^\circ c)$	$\Delta T(^\circ c)$	$\Delta L\ (10^{-2}\ mm)$	$(1/^\circ c)\,\alpha$	خطای نسبی
				$\overline{\alpha} =$	

۷) منحنی تغییرات $\Delta\ell$ را بر حسب T را رسم نموده و با استفاده از شیب نمودار و رابطه (۳) مقدار $\overline{\alpha}$ را بدست آورید.

۸) $\overline{\alpha}$ بدست آمده از روی نمودار را با مقدار واقعی α (از کتابهای دیگر استخراج کنید) برای میله مورد نظر مقایسه کرده و با استفاده از آن خطای نسبی را محاسبه نمائید.

توجه : پس از اتمام آزمایش حتما آب داخل ظرف را خالی نمایید.

آزمایش ۷ :

تحقیق پدیده تشدید در تار مرتعش و لوله صوتی بسته

الف) تار مرتعش

هدف :اندازه‌گیری فرکانس با استفاده از تار مرتعش

وسایل مورد نیاز : نوسان‌ساز، آهنربای نعلی شکل، جعبه تار، وزنه، سیم هادی الکتریکی

تئوری آزمایش :

اگر دو تار مرتعش را در دو نقطه محکم کنیم و آن را به ارتعاش در آوریم، ارتعاشات عرضی در طول تار منتشر شده و در انتهای ثابت منعکس می‌شوند. تحت این شرایط، در صورتی که طول تار مضرب صحیحی از $\frac{\lambda}{2}$ باشد در تار موج ساکن تشکیل می‌شود. یعنی :

$$\ell = k\frac{\lambda}{2} \qquad (1)$$

که در آن k یک عدد صحیح می‌باشد (k=1,2,3,....)

اگر v سرعت موج و f فرکانس موج باشد، طول موج برابر است با :

$$\lambda = \frac{V}{f} \qquad (2)$$

به کمک رابطه (1) و (2) می‌توان نوشت :

$$f = k\frac{V}{2\ell} \qquad (3)$$

از طرف دیگر آزمایش نشان می‌دهد که سرعت انتشار ارتعاشات V در تار مرتعش با جذر نیروی کشش در طول تار F نسبت مستقیم و با جذر جرم واحد طول تار μ نسبت عکس دارد؛ یعنی :

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (4)$$

بنابراین فرکانس برابر می‌شود با :

$$f = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad (5)$$

روش آزمایش :

۱) ابتدا مطابق شکل دو سیم رابط را از خروجی نوسان‌ساز به دو طرف تار مرتعش روی جعبه تار وصل کنید.

۲) مقداری معین وزنه (۳۰۰ گرم) روی کفه تار قرار دهید و آهنربای نعلی شکل را روی تار در روی جعبه قرار دهید.

۳) فرکانس نوسان‌ساز را روی یکی از فرکانسهای A تا E قرار داده و به آرامی خرک متحرک را از نزدیک خرک ثابت دور کنید تا یک موج ساکن تشکیل شود سپس بسته به تعداد شکم‌های ایجاد شده مقدار طول موج را بدست بیاورید.

۴) فرکانس را با تغییر محل سیم روی نوسان‌ساز عوض نمائید و آزمایش را تکرار کنید. نتایج را در جدول زیر ثبت کرده و در هر مورد با استفاده از رابطه (5) فرکانس را محاسبه کنید.
(جرم کفه gr ۵۰ و جرم واحد طول سیم gr/m ۱/۰۷ می‌باشد.)

حالت	A	B	C	D	E
F(N)					
$\lambda(m)$					
f(HZ)					

۵) برای یک فرکانس معین (A,B,C,D,E) با تغییر کشش سیم (با استفاده از وزنه‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ و ۵۰۰ گرمی) یک یا دو بطن در سیم به وجود آورده و رابطه زیر را تحقیق کنید:

$$\frac{\sqrt{F}_1}{\lambda_1} = \frac{\sqrt{F_2}}{\lambda_2} = \frac{\sqrt{F_3}}{\lambda_3}$$

۶) توضیح دقیقی برای دلیل ارتعاش سیم تار مرتعش بنویسید.

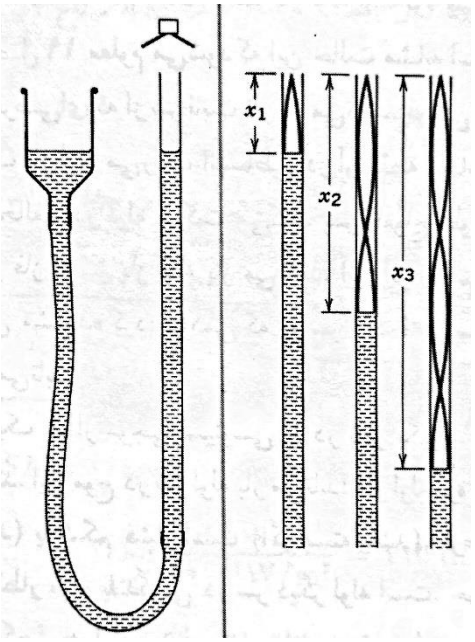
ب) لوله صوتی بسته

هدف : محاسبه سرعت صوت

وسایل مورد نیاز : لوله شیشه‌ای، مخزن آب، لوله پلاستیکی اتصال، منبع نوسان‌ساز با فرکانس‌های مختلف و یک عدد بلندگوی کوچک.

تئوری آزمایش :

همانطوری که در آزمایش تار مرتعش مشاهده کردید در اثر تداخل مخرب دو موج تابشی و انعکاسی که در خلاف جهت یکدیگر منتشر می‌شوند، نقاطی از امواج ساکن شده که به آنها گره می‌گویند. مشابه چنین پدیده‌ای را نیز می‌توان برای امواج صوتی که جزو امواج طولی هستند (راستای ارتعاش موازی با راستای انتشار است)، مشاهده کرد.



اگر در یک طرف لوله صوتی نیم‌بسته‌ای یک منبع صوتی قرار دهیم و بسامد منبع صوتی برابر یکی از بسامدهای طبیعی لوله صوتی باشد، آنگاه در لوله موج ایستاده تشکیل می‌شود و حالت تشدید بوجود می‌آید؛ یعنی صدای لوله صوتی بلندتر شنیده می‌شود. در این حالت موج تابیده و بازتابیده در نقاط مشخصی به طور کامل با هم تداخل سازنده (یا مخرب) پیدا می‌کنند که به آن نقاط شکم (یا گره) گفته می‌شود. از آنجا که امواج طولی فشار بدون تغییر فاز از سر بسته لوله و با ۱۸۰ درجه تغییر فاز از سر باز لوله باز می‌تابند، بنابراین در لوله صوتی در انتهای باز لوله شکم و در انتهای بسته آن گره تشکیل می‌شود. در نتیجه در لوله صوتی یک سر بسته هنگامی موج ایستاده تشکیل می‌شود که رابطه طول لوله L و طول موج صوت λ به صورت زیر باشد:

$$L = (2n-1)\frac{\lambda}{4} \qquad , \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (6)$$

روش آزمایش :

۱) توسط سیم‌های رابط خروجی نوسان‌ساز را به ورودی بلندگوی دستگاه لوله صوتی متصل نمائید.

۲) در مخزن لوله صوتی به مقدار لازم آب بریزید.

۳) دستگاه نوسان‌ساز را روشن نموده و آنرا روی فرکانس مورد نظر تنظیم نمائید.

۴) مخزن لوله صوتی را به بالاترین حد موجود در دستگاه برده و سپس آنرا به آرامی پایین بیاورید تا تشدید رخ دهد (صدا قوی‌تر شود). در این حالت فاصله سطح آب تا ابتدای لوله را اندازه‌گیری کرده تا طول لوله صوتی مربوط به اولین تشدید بدست آید(L_1).

۵) به آرامی مخزن آب را پایین‌تر آورده و طول مربوط به دومین (L_2) و سومین (L_3) حالت تشدیدی را بدست آورید.

۶) با استفاده از روابط زیر مقادیر λ را بدست آورده و میانگین‌گیری کنید. سپس با کمک رابطه $V = \overline{\lambda} f$ سرعت صوت را بدست آورده و در جدول زیر ثبت کنید.

$$L_2 - L_1 = \frac{\lambda}{2} \quad , \quad L_3 - L_1 = \lambda$$

۷) فرکانس منبع صوتی را مطابق جدول زیر تغییر داده و مراحل بالا را تکرار نمائید.

۸) برای هر فرکانس باتوجه به رابطه $V = \lambda f$ سرعت موج صوتی را بدست آورید. نتایج را در جدول زیر یادداشت نمائید.

f(Hz)	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
L_1				
L_2				
L_3				
$\overline{\lambda}$				
V				

۹) با محاسبه سرعت میانگین خطای مطلق و نسبی را محاسبه نمائید.

آزمایش ۸ : کالریمتر

الف) ارزش آبی کالریمتر

هدف : تعیین ارزش آبی کالریمتر

وسایل مورد نیاز : کالریمتر، دماسنج دقیق، ترازو، آب، سه پایه با توری سیمی، چراغ گازی

تئوری آزمایش :

گرما انرژی منتقل شده از یک دستگاه به دستگاه دیگر ناشی از اختلاف دمای بین دو دستگاه می‌باشد. چنانچه بین یک جسم و محیط اطراف گرمای dQ مبادله شود و در اثر آن دمای جسم به اندازه dt تغییر کند، نسبت $\frac{dQ}{dT}$ ظرفیت گرمایی جسم نامیده می‌شود. پس ظرفیت گرمایی جسم (c′)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dQ = c'dT \qquad (1)$$

از طرفی ظرفیت گرمایی با جرم جسم متناسب است. مقدار ظرفیت گرمایی واحد جرم جسم را ظرفیت گرمایی ویژه می‌نامند و آن را با c نشان می‌دهند :

$$dQ = mcdT \qquad (2)$$

بنابراین کل گرمای مبادله شده بین جسم و محیط در فاصله دمایی T_1 تا T_2 برابر است با:

$$Q = m\int_{T_1}^{T_2} cdt \qquad (3)$$

اگر فرض کنیم c در فاصله دمایی مورد نظر ثابت باشد، می‌توان نوشت :

$$Q = mc(T_2 - T_1) \qquad (4)$$

ظرفیت گرمایی ویژه آب $1cal/gr^{\circ}c$ است. گاهی برای سادگی محاسبات این مقدار را به عنوان استاندارد ظرفیت گرمایی ویژه در نظر می‌گیرند. در این صورت فرض می‌شود ظرف حاوی آب نیز دارای همین ظرفیت

گرمایی ویژه است و جرم ظرف را با جرم معادل آبی آن جایگزین می‌کنند؛ به طوری که در ظرفیت گرمایی کل ظرف تغییری ایجاد نشود.

یعنی: $$m_{\text{ظرف}}c_{\text{ظرف}} = Ac_{\text{آب}} \qquad (5)$$

به مقدار A در (5)، بالا ارزش آبی ظرف گفته می‌شود.

روش آزمایش :

۱) ابتدا دماسنج‌ها را همدما کنید. برای اینکار هر دو دماسنج را درون بشر حاوی آب سرد قرار دهید. چند دقیقه صبر کنید تا دماسنج‌ها عدد ثابتی را نشان دهند. اگر دماسنج A دمای T_A، و دماسنج B عدد $T_B=T_A+\Delta T$ را نشان دهد، زین پس دمایی که دماسنج A نشان می‌دهد را به عنوان T_A، و دمایی که دماسنج B نشان می‌دهد را با ΔT جمع کرده و آن را به عنوان دمای T_B در نظر بگیرید. لوله‌های آزمایش را خشک کرده و هر یک را جداگانه توزین کنید.

۲) جرم کالریمتر (m_{cal}) را اندازه‌گیری کرده و آنرا در جدول یادداشت نمائید.

۳) مقداری آب معمولی در کالریمتر بریزید؛ به طوری که تقریبا یک چهارم حجم کالری‌متر را شامل شود. سپس جرم آب و ظرف را اندازه‌گیری کرده و با کم کردن جرم کالریمتر، جرم خالص آب (m_w) را محاسبه کنید.

۴) مدتی صبر کنید تا تعادل گرمایی بین آب و کالریمتر برقرار شود. آنگاه دمای آب را بوسیله دماسنج اندازه بگیرید (T_c)

۵) به طور جداگانه در ظرف فلزی مقداری آب بریزید. سپس ظرف را بر روی شعله قرار داده تا آب به دمای حدود ۶۰ درجه برسد. شعله را خاموش کرده و ظرف حاوی دماسنج را پایین بگذارید. ۳-۲ دقیقه صبر کنید تا گرادیان دمایی تا حد امکان کاهش یابد. سپس دمای آب را با استفاده از دماسنجی که قبلا درون آن قرار داده‌اید بخوانید (T_h). تقریبا به اندازه ۲ برابر آبی که قبلا در کالریمتر ریخته‌اید، آب گرم را به درون کالریمتر اضافه کنید؛ به طوریکه سطح مایع تا $\frac{3}{4}$ ظرف بالا بیاید.

۶) جرم کالریمتر حاوی آب را اندازه‌گیری کرده و جرم مرحله ۲ را از آن کم کنید تا جرم آب گرم اضافه شده بدست بیاید. (m_h)

۷) مدتی صبرکنید تا تعادل گرمایی در ظرف برقرار شود. پس از آن دمای مایع (T_f) را یادداشت کنید.

۸) با استفاده از رابطه زیر مقدار ارزش آبی کالریمتر (A) را محاسبه نمائید :

مقدار گرمای گرفته شده توسط کالریمتر + مقدار گرمای گرفته شده توسط آب سرد = گرمای ازدست داده شده توسط آب گرم

$$m_h c_w(T_h - T_f) = m_w c_w(T_f - T_c) + m_{cal} c_{cal}(T_f - T_c) = (m_w + A)c_w(T_f - T_c)$$

$$\Rightarrow \quad m_h c_w(T_h - T_f) = (m_w + A)c_w(T_f - T_c)$$

m_{cal}(gr)	m_w- m_{cal}	m_w(gr)	m_h(gr)	T_c(°c)	T_h(°c)	T_f(°c)	A(gr)

با توجه به اینکه مقدار A در بخش‌های بعدی آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقدار عددی آن را در آزمایشگاه محاسبه کرده و نتیجه را به استاد خود در میان بگذارید.

ب) تعیین عدد ژول به روش الکتریکی :

هدف : تعیین معادل مکانیکی حرارت

وسایل مورد نیاز : کالریمتر با سیستم حرارتی، آمپرمتر، رئوستا، منبع تغذیه، دماسنج دقیق و کرنومتر.

تئوری آزمایش :

کار مکانیکی و حرارت دو شکل مختلف انرژی‌اند. تبدیل انرژی حرارتی به مکانیکی در ماشین‌های بخار دیده می‌شود و تبدیل کار مکانیکی به انرژی حرارتی زمانی امکان پذیر است که پای یک عامل اتلافی مانند اصطکاک در میان باشد. ژول پس از انجام آزمایش‌های فراوان رابطه بین کار مکانیکی و انرژی حرارتی را بدست آورد و مقدار عددی معادل مکانیکی حرارت را حساب کرد. وی نتیجه آزمایش خود را چنین بیان کرد : نسبت کار مکانیکی و حرارت تولید شده مقداری است ثابت. بعدا این نسبت یا این مقدار ثابت را معادل مکانیکی حرارت و یا ثابت ژول نامیدند. ثابت ژول یکی از ثوابت طبیعت است و واحد آن j/cal می باشد.

در تعیین عدد ژول به روش الکتریکی، جریان الکتریکی از سیم‌پیچی که درون کالری‌متر حاوی آب قرار گرفته، عبور می‌کند. اگر جریانی که از سیم‌پیچ می‌گذرد I و اختلاف پتانسیل V باشد، انرژی الکتریکی که در زمان t در سیم‌پیچ ایجاد می‌شود عبارت است از:

$$W = i^2 Rt \qquad (1)$$

اگر از تبادل گرما بین کالری‌متر و محیط اطراف چشم پوشی کنیم، می‌توان تصور کرد که تمام گرمای الکتریکی تولید شده در داخل کالریمتر صرف افزایش دمای آب و اجزای داخل کالریمتر می‌شود. در صورتی که جرم آب برابر M گرم و ارزش آبی کالریمتر A گرم باشد، مقدار گرمای منقل شده به آب بر حسب کالری عبارتست از (ظرفیت گرمایی ویژه آب برابر است با $1\ \mathrm{cal/g^{\circ}c}$) :

$$Q = (\mathrm{M}+\mathrm{A})(T_2 - T_1) \qquad (2)$$

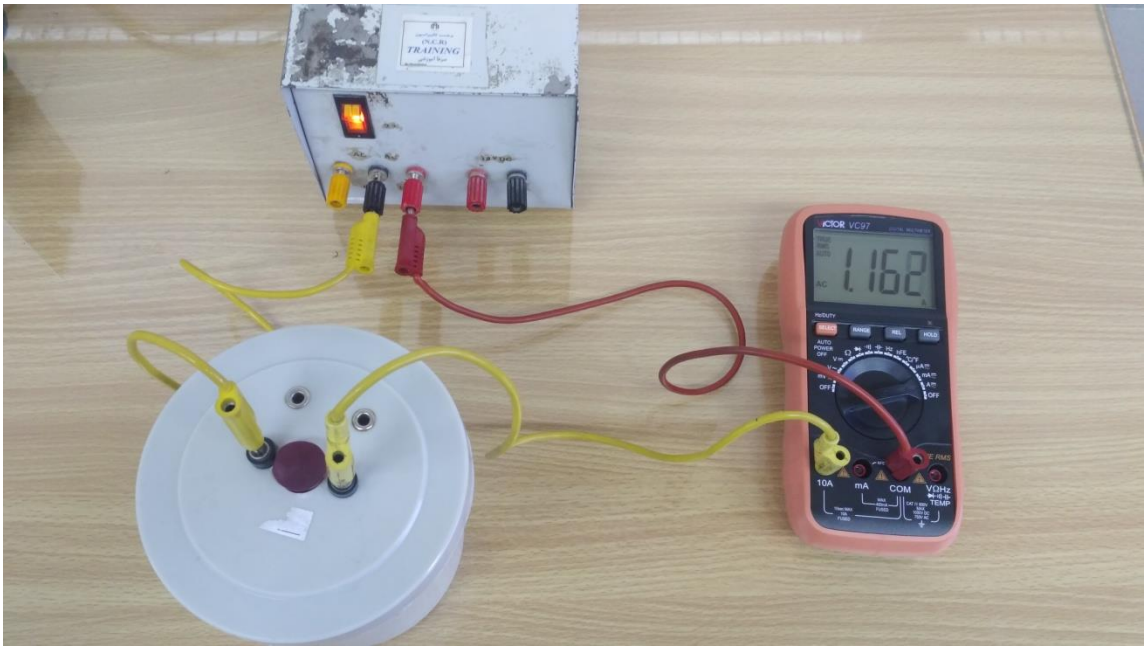
در نتیجه ثابت ژول یا معادل مکانیکی حرارت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{IVt}{(\mathrm{M}+\mathrm{A})(T_2 - T_1)} \qquad (3)$$

روش آزمایش :

ابتدا کالریمتر را کاملا خشک کرده و جرم آن را به کمک ترازو اندازه بگیرید (m_1). سپس مقداری آب داخل کالریمتر بریزید تا سیم‌پیچ کاملا در داخل آب قرار گیرد و مجددا کالریمتر را توزین کنید (m_2). بدین ترتیب جرم آب داخل کالریمتر برابر است با : $\mathrm{M} = m_2 - m_1$

اکنون مداری مطابق شکل زیر ببندید و دماسنج را در محل تعبیه شده روی درب کالریمتر قرار دهید. مایع را با همزن کمی هم بزنید و صبرکنید تا دماسنج دمای ثابتی را نشان دهد و آن را یادداشت کنید. سپس با وصل کردن کلید، جریان را برقرار کرده و همزمان با آن کرنومتر را بکار بیاندازید. پس از گذشت تقریبا یک دقیقه از برقراری جریان، شدت جریان مدار را از روی مولتی‌متر (کلید آنرا روی آمپر و در حالت AC قرار داده و آنرا به یک رقم اعشار گرد کنید) بخوانید و در جدول زیر یادداشت کنید.



در حین عبور جریان الکتریکی آب داخل کالریمتر را بهم بزنید و صبر کنید تا دما به میزان حدود ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. پس از آن، همزمان کلید را قطع و کرنومتر را از کار بیاندازید. کمی آب را هم زده و دمای دماسنج را بخوانید (T_2). سپس با استفاده از اختلاف پتانسیل منبع تغذیه (که بر روی آن نوشته شده است) و فرمول زیر توان الکتریکی مصرفی را محاسبه کنید:

$$W = IVt$$

نتایج را در جدول زیر یادداشت کرده و عدد ژول را بدست بیاورید.

V(v)	I(A)	t(s)	W(J)

m_1(g)	m_2(g)	M(g)	A(g)	T_1(°c)	T_2(°c)	Q(cal)

ج) تعیین گرمای ویژه جامدات :

وسایل مورد نیاز : کرنومتر، دماسنج، ترازو، جسم جامد مورد آزمایش.

تئوری آزمایش :

جسمی‌به جرم m' با گرما ویژه c' و دمای T_h را داخل مقداری آب به جرم m_w و دمای T_i که درون کالریمتری به جرم m_{cal} و گرمای ویژه c_{cal} ریخته شده است، قرار می‌دهیم. چنانچه از تبادل گرمایی سیستم و محیط صرفنظر کنیم، داریم :

مقدار گرمای گرفته شده توسط کالریمتر + مقدار گرمای گرفته شده توسط آب = مقدار گرمای از دست داده جسم گرم

$$m' c' (T_h - T_f) = m_w c_w (T_f - T_i) + m_{cal} c_{cal} (T_f - T_i)$$

$$= (m_w + A) c_w (T_f - T_i)$$

که در رابطه بالا T_f دمای تعادل سیستم و A ارزش آبی کالریمتر است.

روش آزمایش :

۱) جسم مورد آزمایش را توزین کرده جرم آن را یادداشت نمائید (m').

۲) ظرف کالریمتر را کاملا خشک کرده و به کمک ترازو جرم آن را اندازه بگیرید.

۳) در داخل ظرف کالریمتر تا حدود یک سوم آن، آب بریزید. سپس آنرا توزین کرده و از جرم کالریمتر کم کنید تا جرم خالص آب بدست آید (m_w). درب کالریمتر را زده و دماسنج را داخل آن قرار دهید و حدود ۳ تا ۵ دقیقه صبر کنید تا ظرف و آب هم دما شوند. سپس دما را یادداشت نمایید (T_i).

۴) ظرف آلومینیومی را بر روی سه پایه قرار دهید. سپس مقداری آب درون ظرف آلومینیومی ریخته و جسم را درون آن آویزان کنید؛ به صورتیکه جسم کاملا درون آب قرار گیرد. بدون قرار دادن دماسنج داخل ظرف مشعل را زیر سه پایه قرار داده و آن را روشن کنید تا آب به جوش آید.

۵) پس از آنکه آب جوش آمد، شعله را کم کرده و دماسنج را به صورت معلق درون آن قرار دهید (به گونه ای که نوک دماسنج با دیواره ظرف برخورد نداشته باشد). پس از گذشت ۱-۲ دقیقه دمای آب جوش (که در واقع همان دمای جسم می‌باشد)، را یادداشت کنید. (T_h)

۶) پس از خواندن دمای جسم داغ (T_h)، جسم جامد را درون کالریمتر بیاندازید و درب کالریمتر را دوباره بزنید. مدتی صبر کنید تا دما به حالت تعادل رسیده و آن را یادداشت نمائید (T_f).

۷) نتایج را در جدول زیر یادداشت کرده و با استفاده از فرمول صفحه قبل c' را محاسبه نمایید.

m' (gr)	m_w(gr)	T_i (°c)	T_h (°c)	T_f (°c)	A (gr)	$c'(cal/gr.^\circ c)$

$\left(c_w = 1cal/gr.^\circ c\right)$

توجه : در پایان آزمایش از بسته بودن شیر مشعل و شیر اصلی گاز مطمئن شوید.

آزمایش ۹:

تعیین گرمای ویژه مایعات به روش سرد کردن

هدف : تعیین گرمای ویژه به روش سرد کردن با استفاده از قانون نیوتن و یا مقایسه با مایعی که گرمای ویژه‌اش معلوم است.

وسایل مورد نیاز : دو لوله آزمایش مشابه، بشر، دو دماسنج مشابه، گیره و پایه، چراغ گاز، سه پایه و توری، ترازو، مایع مورد آزمایش (الکل)

تئوری آزمایش :

طبق قانون نیوتن، میزان اتلاف حرارت در یک جسم مستقیما با سطح خارجی جسم و اختلاف دمای جسم و محیط متناسب است.

قانون نیوتن را با فرمول زیر می‌توان نشان داد :

$$-\frac{d\theta}{dt} = k\theta \qquad (1)$$

که درآن θ اختلاف دمای جسم و محیط است. اگر در لحظه t=0 اختلاف درجه حرارت را θ_0 فرض کنیم، با انتگرال‌گیری از طرفین رابطه فوق داریم :

$$Ln\theta\,|_{\theta=\theta_0}^{\theta} = -kt\,|_{t=0}^{t} + c \quad \rightarrow \quad Ln\theta - Ln\theta_0 = -kt + c \Rightarrow \theta = \theta_0 e^{-kt} \qquad (2)$$

ملاحظه می‌شود که اختلاف دمای بین دو جسمی‌که با هم تبادل گرمایی دارند، نسبت به زمان به صورت عکس نمایی تغییر می‌کند و در لحظات اولیه تغییراتش بیشتر است. می‌توان به وسیله آزمایش منحنی فوق را برای یک جسم پیدا کرد.

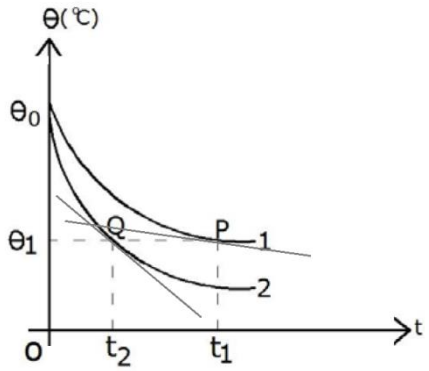
با روش سرد کردن، به دو شیوه می‌توان گرمای ویژه مایع مجهول را با استفاده از مایعی که گرمای ویژه آن را می‌دانیم، بدست بیاوریم.

روش اول) برای این منظور دو مایع با جرم‌های m_1 و m_2 و گرمای ویژه c_1 و c_2 در دمای یکسان T در نظر می‌گیریم. برای اینکه این دو مایع تا درجه حرارت T' سرد شوند، باید به ترتیب $m_1c_1(T-T')$ و $m_2c_2(T-T')$ گرما از دست دهند. اگر t_1 و t_2 مدت زمانی باشد که به ترتیب مایع اولی و دومی از دمای T به T' برسند، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{m_1c_1(T-T')}{t_1}=\frac{m_2c_2(T-T')}{t_2} \quad \rightarrow \quad c_2=\frac{t_2}{t_1}\frac{m_1}{m_2}c_1 \qquad (3)$$

بنابراین کاری که باید انجام دهیم اینست که دو مایع را به دمای یکسان T برسانیم. سپس هر دو مایع را همزمان تحت شرایط برابر در محیط یکسانی قرار دهیم و زمانی را که طول می‌کشد به درجه حرارت T' برسند، بدست می‌آوریم. در نهایت با استفاده از داده‌های بدست آمده و رابطه (۳) می‌توان گرمای ویژه مایع مجهول را تعیین کرد.

روش دوم) هنگامی که سطح تماس و همینطور محیط اطراف دو مایع یکسان باشد، و دو مایع در دمای یکسانی قرار داشته باشند، مقدار تبادل گرمایی در آن لحظه یعنی $mc(\frac{d\theta}{dt})$ برای هر دو مایع برابر است. در نتیجه هرگاه منحنی سرد شدن دو مایع را به وسیله آزمایش رسم کنیم و به ازای دمای θ، خطی به موازات محور زمان رسم نمائیم تا منحنی‌ها را در نقاط P و Q قطع کند، آنگاه داریم:



$$m_1c_1(\frac{d\theta}{dt})_{\text{I}}=m_2c_2(\frac{d\theta}{dt})_{\text{II}} \qquad (4)$$

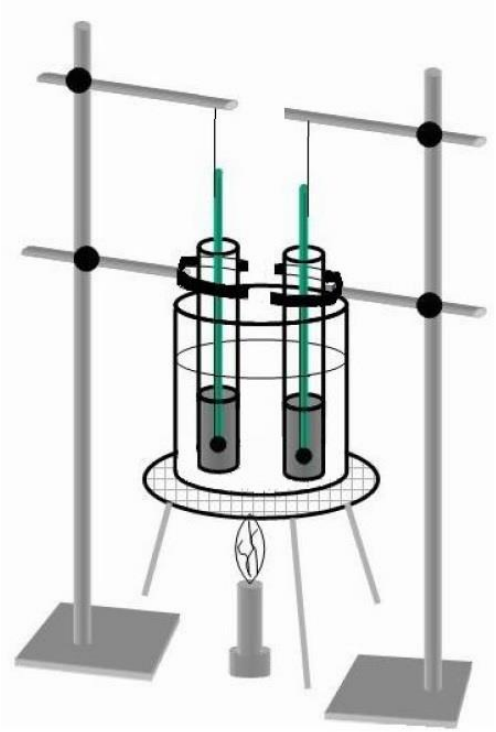
که درآن $(\frac{d\theta}{dt})_{\text{II}}$ و $(\frac{d\theta}{dt})_{\text{I}}$ به ترتیب ضریب زاویه های خطوط مماس بر منحنی در نقاط P و Q هستند.

در نتیجه اگر یکی از دو مایع آب باشد $(c_1 = 1\text{cal/gr°c})$، می توان c_2 را از رابطه (۴) محاسبه کرد.

روش آزمایش :

ابتدا دماسنج‌ها را همدما کنید. برای این منظور هر دو دماسنج را درون بشر حاوی آب سرد قرار دهید. چند دقیقه صبر کنید تا دماسنج‌ها عدد ثابتی را نشان دهند. اگر دماسنج A دمای T_A، و دماسنج B عدد $T_B=T_A+\Delta T$ را نشان دهد، زین پس دمایی که دماسنج A نشان می‌دهد را به عنوان T_A، و دمایی که دماسنج B نشان می‌دهد را با ΔT جمع کرده و آن را به عنوان دمای T_B در نظر بگیرید.

لوله‌های آزمایش را خشک کرده و هر یک را جداگانه توزین کنید. در یکی از لوله‌ها آب و در دیگری مایع مورد آزمایش (الکل) را به ارتفاع‌های مساوی بریزید و دوباره آنها را وزن کنید تا وزن آب و مایع بدست آید. (با توجه اینکه توزین لوله آزمایش محتوی مایع مشکل است، بهتر است هر یک از لوله‌های آزمایش را در یک بشر کوچک گذاشته و با هم وزن کنید). سپس مطابق شکل دو لوله آزمایش محتوی آب و الکل را توسط گیره به پایه محکم کنید و داخل بشر قرار دهید. برای جلوگیری از شکستن لوله‌ها سعی کنید گیره ها مستقیما با لوله‌ها در تماس نباشند (برای اینکار می‌توانید از مقداری کاغذ استفاده کنید). سپس در هر لوله آزمایش یک دماسنج قرار دهید به طوری که با بدنه لوله تماس نداشته باشند و نوک دماسنج‌ها در ارتفاع یکسانی از لوله قرار داشته باشند. حال در داخل بشر آب بریزید بطوری که سطح آب داخل بشر از سطح هر دو مایع بالاتر بیاید. سپس آب داخل بشر را به ملایمت حرارت دهید تا دمای آن به حداکثر ۴۶ درجه سانتیگراد برسد (دقت کنید که دماسنج‌ها باید هر دو یک دما را نشان دهند). در این موقع بشر را از زیر لوله‌های آزمایش برداشته و همزمان کرنومتر را بکار اندازید و دقیقه به دقیقه، همزمان دمای هر دو مایع را خوانده و یادداشت کنید. پس از گذشت ۱۰ دقیقه تغییرات دما کم می‌شود و می‌توانید فاصله زمانی خواندن دماها را زیاد کنید. نتایج اندازه‌گیری را در جدولی مطابق جدول زیر یادداشت نمائید.



t(min)	T_1 ($^{\circ}c$)	T_2 ($^{\circ}c$)

مانند شکل صفحه قبل منحنی سرد شدن دو مایع را با ذکر مقیاس و واحد بر روی کاغذ میلی‌متری رسم کرده و خطی به موازات محور زمان رسم کنید تا منحنی‌ها را در نقاط P و Q قطع کند. در این صورت t_1 و t_2 نشان دهنده زمانی هستند که طول می‌کشد تا مایع ۱ و ۲ به دمای یکسان T برسند.

با استفاده از هر دو روش ذکر شده در تئوری آزمایش (روابط ۳ و ۴) گرمای ویژه الکل را بدست بیاورید.

(ظرفیت گرمایی ویژه آب ۴۱۸۷ ژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد می‌باشد)

توجه : پس از اتمام آزمایش حتما آب داخل ظرف را خالی کرده و الکل را به درون ظرف آن بازگردانید. همچنین از بسته بودن شیر مشعل و شیر اصلی گاز مطمئن شوید.

پیوست ۱) فرمت گزارش کار

به نام خدا

شماره آزمایش

عنوان آزمایش

نام استاد مربوطه

شماره گروه

اعضای گروه

(نام نویسنده گزارش کار به عنوان اسم اول ذکر شود.)

روز و ساعت کلاس (روز هفته)

تاریخ انجام آزمایش

تاریخ تحویل گزارش کار

هدف از انجام آزمایش:

تئوری آزمایش:

در این قسمت موارد و نکات تئوری و فیزیکی مربوط به آزمایش بیان می‌شود.

شرح آزمایش:

در این بخش به نحوه انجام آزمایش، جداول، نمودارها، ریز محاسبات، محاسبه خطای خواسته شده و ... پرداخته می‌شود. توجه شود که نمودارها باید بر روی کاغذ میلی‌متری و در برگه‌ای جداگانه رسم شود؛ به طوریکه بیش از هشتاد درصد صفحه کاغذ میلی‌متری را دربر گیرد.

پاسخ به پرسش‌ها:

در این قسمت به سوالات مطرح شده در دستورکار پاسخ داده می‌شود.

گزارش کار باید به صورت تمیز و خوانا و به شکل دست نویس ارائه شود و از تحویل نسخه‌های تایپی خودداری گردد.

صفحه اول در یک صفحه جداگانه در ابتدای گزارش کار قرار می‌گیرد.

پیوست ۲)

Some Fundamental Constants of Physics

Constant	Symbol	Computational Value	Best (1998) Value	
			Value[a]	Uncertainty[b]
Speed of light in a vacuum	c	3.00×10^{8} m/s	2.997 924 58	exact
Elementary charge	e	1.60×10^{-19} C	1.602 176 487	0.025
Gravitational constant	G	6.67×10^{-11} m^3/s$^2 \cdot$ kg	6.674 28	100
Universal gas constant	R	8.31 J/mol $\cdot$ K	8.314 472	1.7
Avogadro constant	N_A	6.02×10^{23} mol^{-1}	6.022 141 79	0.050
Boltzmann constant	k	1.38×10^{-23} J/K	1.380 650 4	1.7
Stefan–Boltzmann constant	σ	5.67×10^{-8} W/m$^2 \cdot$ K^4	5.670 400	7.0
Molar volume of ideal gas at STP[d]	V_m	2.27×10^{-2} m^3/mol	2.271 098 1	1.7
Permittivity constant	ϵ_0	8.85×10^{-12} F/m	8.854 187 817 62	exact
Permeability constant	μ_0	1.26×10^{-6} H/m	1.256 637 061 43	exact
Planck constant	h	6.63×10^{-34} J $\cdot$ s	6.626 068 96	0.050
Electron mass[c]	m_e	9.11×10^{-31} kg	9.109 382 15	0.050
		5.49×10^{-4} u	5.485 799 094 3	4.2×10^{-4}
Proton mass[c]	m_p	1.67×10^{-27} kg	1.672 621 637	0.050
		1.0073 u	1.007 276 466 77	1.0×10^{-4}
Ratio of proton mass to electron mass	m_p/m_e	1840	1836.152 672 47	4.3×10^{-4}
Electron charge-to-mass ratio	e/m_e	1.76×10^{11} C/kg	1.758 820 150	0.025
Neutron mass[c]	m_n	1.68×10^{-27} kg	1.674 927 211	0.050
		1.0087 u	1.008 664 915 97	4.3×10^{-4}
Hydrogen atom mass[c]	$m_{^1\mathrm{H}}$	1.0078 u	1.007 825 031 6	0.0005
Deuterium atom mass[c]	$m_{^2\mathrm{H}}$	2.0136 u	2.013 553 212 724	3.9×10^{-5}
Helium atom mass[c]	$m_{^4\mathrm{He}}$	4.0026 u	4.002 603 2	0.067
Muon mass	m_μ	1.88×10^{-28} kg	1.883 531 30	0.056
Electron magnetic moment	μ_e	9.28×10^{-24} J/T	9.284 763 77	0.025
Proton magnetic moment	μ_p	1.41×10^{-26} J/T	1.410 606 662	0.026
Bohr magneton	μ_B	9.27×10^{-24} J/T	9.274 009 15	0.025
Nuclear magneton	μ_N	5.05×10^{-27} J/T	5.050 783 24	0.025
Bohr radius	a	5.29×10^{-11} m	5.291 772 085 9	6.8×10^{-4}
Rydberg constant	R	1.10×10^{7} m^{-1}	1.097 373 156 852 7	6.6×10^{-6}
Electron Compton wavelength	λ_C	2.43×10^{-12} m	2.426 310 217 5	0.0014

[a] Values given in this column should be given the same unit and power of 10 as the computational value.

[b] Parts per million.

[c] Masses given in u are in unified atomic mass units, where 1 u = $1.660\,538\,782 \times 10^{-27}$ kg.

[d] STP means standard temperature and pressure: 0°C and 1.0 atm (0.1 MPa).