دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

دستور کار آزمایشگاه فیزیک

پایه ۱

ویرایش بهمن ۱۴۰۱

مخصوص دانشجویان رشته فیزیک

بسم الله الرحمن الرحیم

دستور کار آزمایشگاه فیزیک (۱)

مخصوص دانشجویان 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 : اندازه گیری طول و جرم ۱۴

آزمایش ۲ : تعیین نیرو ۲۱

آزمایش ۳ : آونگ ساده ۲۷

آزمایش۴ : بررسی حرکت با شتاب ثابت (حرکت پرتابی و سقوط آزاد) ۳۲

آزمایش ۵ : تحقیق قوانین حرکت به کمک ماشین آتوود و چرخ ماکسول ۳۶

آزمایش ۶ : قوانین اصطکاک ۴۲

آزمایش ۷ : تعیین ثابت فنر ؛ اندازه‌گیری گشتاور لختی ۴۸

آزمایش ۸ : برخورد مستقیم ۵۵

آزمایش ۹ : آونگ مرکب (آونگ فیزیکی) ۶۰

پیوست ۲) برخی از ثابت های مهم فیزیکی ۶۶

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 : اندازه گیری طول و جرم

هدف آزمایش : آشنایی با اندازه‌گیری طول و جرم

تئوری آزمایش : فیزیک علم اندازه‌گیری کمیات فیزیکی از قبیل طول، جرم، جرم حجمی و غیره می باشد. برای اندازه‌گیری هر کمیت وسیله مناسب آن را باید به کار برد و نتایج دقیق‌تر و بهتر زمانی حاصل می‌شود که علاوه بر استفاده از وسایل مناسب، از حداکثر دقت لازم بهره برد. به منظور اطمینان از صحت آزمایش بایستی اندازه‌گیری را چند مرتبه تکرار نمود و متوسط نتایج را به دست آورد.

برای اندازه‌گیری طول بر حسب مورد از وسایلی از قبیل متر، خط‌کش، کولیس یا ریز سنج استفاده می‌شود .

وسایل مورد نیاز : متر فلزی، خط کش، کولیس، ریز سنج، ترازو .

اندازه گیری طول : هنگام اندازه گرفتن طول یک جسم یا فاصله بین دو نقطه بایستی دو مورد را در نظر گرفت :

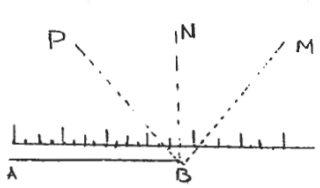
۱) نوع اسبابی که بتوان طول را با آن اندازه گیری کرد .
۲) طرز اندازه‌گیری بوسیله آن

وسایلی که معمولا طول را با آن اندازه گیری می‌کنیم عبارتند از متر، خط کش، کولیس و ریز سنج.

بطور کلی برای طول‌های در حدود متر، خط‌کش میلیمتری یا متر فلزی به کار می بریم. این گونه وسایل طول را با دقت یک میلیمتر اندازه گیری می‌کنند .

میلیمتر ورنیه، با تقریب یک دهم میلیمتر طول را اندازه گیری می کند. برای طولهای کمتر از پنج میلیمتر، میکرومتر یا ریزسنج را به کار می‌برند که تقریب آن ۱/۱۰۰ میلیمتر است .

خطا در اندازه گیری طول : مطابق شکل (۱) هنگام اندازه‌گیری طول به وسیله خط کش، بر حسب اینکه هنگام قرائت چشم در کجا قرار گرفته باشد، ممکن است خطائی رخ دهد. خطائی که در هنگام قرائت درجات تولید می‌شود بیراهی پارادوکس می‌نامند.



شکل (۱)

فرض کنید هدف، اندازه‌گیری طول AB باشد. اگر چشم در وضع NB عمود بر لبه مدرج خط کش قرار نگیرد، بلکه مثلا در امتداد PB قرار گیرد، واضح است که در این زمان خطای پارادوکس داریم. این خطا به خطای نقصانه موسوم است؛ زیرا طول AB را از آنچه که هست کمتر می خوانیم. اگر در امتداد MB به خط‌کش مدرج نگاه شود، در این موقع خطای پارادوکسی وجود دارد که مقدار آن اضافی است؛ زیرا طول AB را از آنچه هست بیشتر می‌خوانیم.

برای از بین بردن بیراهی پارادوکس بایستی دو موضوع زیر را در نظر داشت :

۱) هنگام قرائت درجات خط‌کش بطور قائم یعنی در امتداد NB نگاه کرد تا محل انطباق نقطه B بر روی درجات خط‌کش بطور قائم رویت گردد .
۲) بایستی خط‌کشی انتخاب کرد که لبه درجه دار آن شیب‌دار و نازک باشد .

معمولا برای اندازه‌گیری دقیق باید سعی شود تا آنجا که ممکن است خطای پارادوکس مرتفع شود. مثلا در آمپرمتر و ولتمتر عقربه را باریک می‌سازند و در زیر آن آینه قرار می‌دهند. هنگامی که عقربه و تصویرش را روی هم دیدند آن وقت درجه مقابل عقربه را می‌خوانند. یا در ورنیه و میکرومتر لبه درجه‌دار آنها را شیب‌دار می‌سازند .

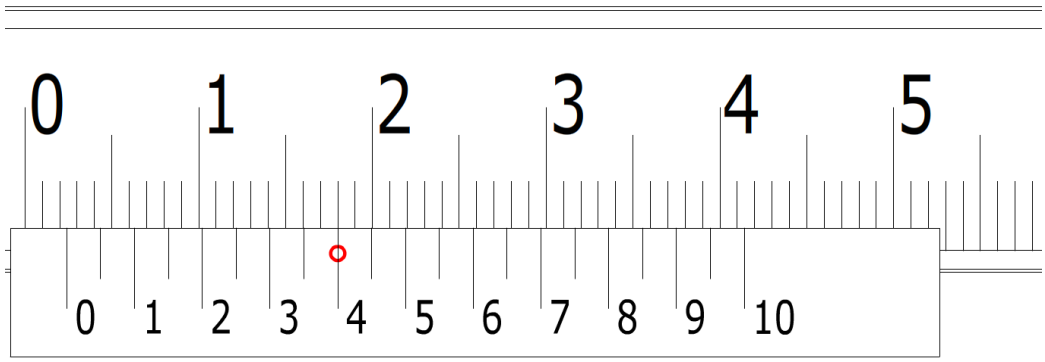
اندازه‌گیری طول با متر فلزی : متر واحد طول در دستگاه SI می باشد و عبارتست از طولی که نور در مدت $\frac{1}{۲۹۹۷۹۲۴۵۸}$ ثانیه در خلا می‌پیماید.

مطابق شکل متر فلزی وسیله‌ای است که به کمک آن طول را اندازه می‌گیرند و معمولا بر حسب متر، سانتیمتر و میلیمتر مدرج گردیده است، بنابراین حداکثر دقت آن حدود میلیمتر است .

اندازه‌گیری طول با متر فلزی : اندازه طولی که در آزمایشگاه به شما داده می‌شود را با متر به دقت معین کنید؛ به این طریق که اندازه‌گیری را با قسمتهای مختلف متر و در دفعات مختلف انجام داده و نتایج را در جدولی نظیر جدول (۱) درج کرده و صحیح‌ترین نتیجه را به دست آورید .

شماره آزمایش	اندازه طول	بیراهی		ملاحظات
		مطلق	نسبی	
۱				
۲				
۳				
جمع				
میانگین				

ورنیه : مطابق شکل زیر، ورنیه عبارتست از یک خط کش خیلی کوچک که می‌تواند در امتداد خط‌کش بزرگ R بلغزد، روی ورنیه ۹ میلی متر، به ده قسمت مساوی تقسیم شده و لذا مقدار هرکدام از درجات آن ۰/۱ میلیمتر از درجات خط‌کش کوچکتر است. دقت این نوع ورنیه ۰/۱ میلی‌متر است.



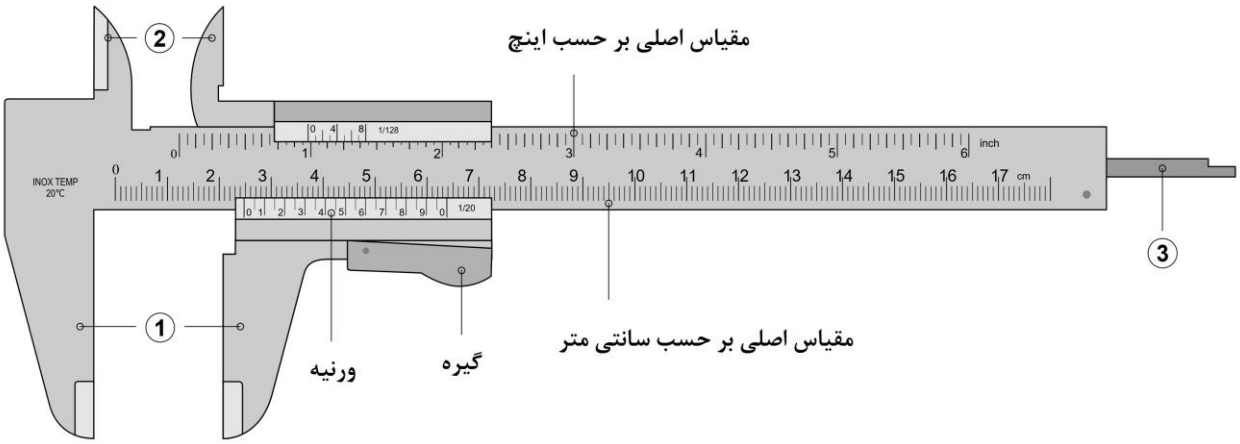
به طوری که در شکل دیده می شود صفر ورنیه بین درجات ۲ و ۳ خط کش قرار گرفته است. ملاحظه می شود که همیشه یکی از درجات ورنیه با یکی از درجات خط کش بزرگ مطابقت دارد. در این شکل درجه ۴ ورنیه با یکی از درجات بالا منطبق است و لذا طول خوانده شده ۲/۴ میلیمتر خواهد بود.

اندازه گیری با کولیس : یکی از موارد استعمال ورنیه در کولیس است. مطابق شکل زیر کولیس تشکیل شده از یک خط کش فولادی که به میلیمتر درجه بندی شده و ورنیه فولادی که می‌تواند در طول خط

کش اصلی بلغزد. دستگاه طوری ساخته شده که وقتی دو سر دستگاه بهم می‌چسبند صفر ورنیه بر صفر خط کش منطبق است.

وقتی می خواهیم طولی را اندازه بگیریم آن را بین دو سر کولیس که در شکل با عدد ۱ نشان داده شده قرار داده و سپس درجات را می خوانیم. لبه های کولیس که با ۲ نشان داده شده است، برای اندازه‌گیری قطر دهانه‌ها به کار برده می شوند. به این ترتیب که ابتدا دو لبه فوق را بهم می چسبانیم (دراین موقع صفر ورنیه بر صفر خط کش منطبق می شود). سپس دو لبه فوق را داخل دهانه مورد نظر کرده و به وسیله گیره ورنیه را حرکت می دهیم تا دولبه فوق به کناره های دهانه مورد نظر بچسبد در این موقع قطر داخلی دهانه را می خوانیم.

برای اندازه گیری گودی و یا عمق جسمی از میله ۳ که به ورنیه متصل است استفاده می‌شود. طول این میله طوری است که وقتی کولیس بسته باشد لبه آن درست هم سطح خط کش است.



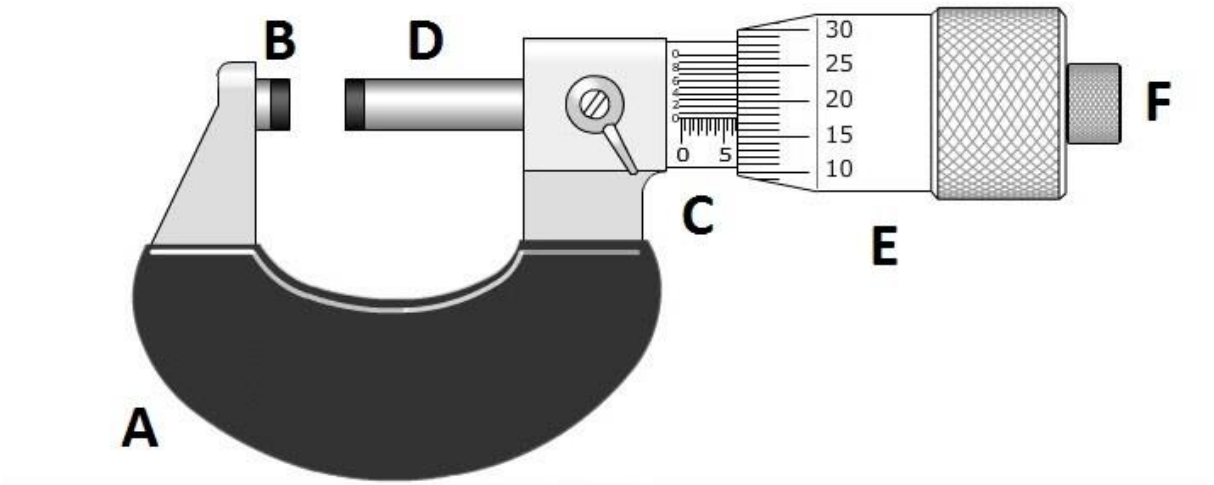
در بعضی کولیس‌ها درجه بندی ورنیه به صورتی می‌باشد که ۱۹میلیمتر به ۲۰ قسمت مساوی تقسیم شده است. دقت این نوع ورنیه‌ها $\frac{1}{20}$ میلیمتر است. همچنین اگر در ورنیه ای ۴۹ میلیمتر به ۵۰ قسمت تقسیم شده باشد، دقت آن $\frac{1}{50}$ میلیمتر خواهد بود.

اندازه‌گیری طول به وسیله کولیس : حال که طرز کار و اندازه گیری طول را با کولیس فرا گرفتید، آزمایش زیر را انجام دهید :

قطر سکه های ۱۰۰۰ ریالی ، ۲۰۰۰ ریالی و ۵۰۰۰ ریالی را با کولیس اندازه گرفته و نتایج را در جدولی مطابق جدول (۲) درج کنید، سپس دقیق‌ترین نتیجه را به دست آورید.

یادداشت	بیراهی مطلق	سکه۵۰۰۰ ریالی		سکه ۲۰۰۰ ریالی		سکه ۱۰۰۰ ریالی		شماره آزمایش
		بیراهی نسبی	قطر سکه mm	بیراهی نسبی	قطر سکه mm	بیراهی نسبی	قطر سکه mm	
								۱
								۲
								۳
								میانگین

ریزسنج یا میکرومتر : ریزسنج اسبابی است که برای اندازه‌گیری قطر اجسام کوچک با تقریب یک صدم میلیمتر به کار می رود و مطابق شکل از قسمت های زیر تشکیل شده است :



۱) قسمت ثابت A که عبارتست از یک رکاب U شکل فلزی که در طرف چپ آن سندان کوچک B نصب شده است.

۲) استوانه مولد C که روی آن درجاتی بر حسب میلیمتر و یا نیم میلیمتر حک گردیده است.

۳) پیچ D که در داخل استوانه C قرار دارد. گام این پیچ نیم میلیمتر یا یک میلیمتر است.

۴) قسمت متحرک E که از یک پوسته استوانه‌ای تشکیل شده و محیط آن به ۵۰ یا ۱۰۰ قسمت تقسیم گردیده است. این استوانه همراه با پیچ D می‌تواند روی استوانه C حرکت کند.

۵) F چرخ ضامن‌داری است که از فشار اضافی وارد به جسم جلوگیری می‌کند.

طرز کار با میکرومتر: ابتدا صفر میکرومتر را پیدا کرده و آنگاه جسم را بین قسمت متحرک میله و سندان قرار دهید. قسمت متحرک E را تا جائی که چرخ ضامن دار به صدا در نیامده است جلو ببرید. سپس درجات میلیمتر را روی استوانه ثابت G و صدم میلیمتر را روی قسمت متحرک بخوانید.

به عنوان مثال چنانچه در اندازه‌گیری با ریزسنج تصویر زیر را مشاهده کردیم برای خواندن آن به صورت زیر عمل می‌کنیم:

همانطور که در سمت چپ تصویر مشاهده می‌شود، قسمت بالایی بخش ثابت بر حسب میلیمتر درجه‌بندی شده است به طوری که درست در میان خطوط بالایی خطوط پایینی قرار دارند. بنابراین فاصله بین خطوط بالایی و پایینی ۰/۵ میلیمتر است. قسمت متحرک نیز به ۵۰ قسمت تقسیم شده است. طول گام پیچ این ریزسنج به گونه‌ای است که وقتی یک دور کامل میچرخد، بخش متحرک به اندازه ۰/۵ میلیمتر بر روی بخش ثابت حرکت می‌کند. بنابراین هر درجه روی بخش متحرک متناظر با ۰/۰۱ میلیمتر است. در نتیجه عدد متناظری که تصویر نشان می‌دهد عبارتست از:

$۳ + ۰/۵ + ۰/۰۶ = ۳/۵۶ \text{ mm}$

اندازه گیری قطر سیم و قطر گلوله : قطر یک سیم و یک گلوله را به کمک میکرومتر اندازه گرفته و نتایج را در جدول ۳ درج نمائید .

یادداشت	بیراهی مطلق	سیم		گلوله		شماره آزمایش
		بیراهی نسبی	قطر سیم mm	بیراهی نسبی	قطرگلوله mm	
						۱
						۲
						۳
						میانگین

ترازو : طرز کار با ترازوهای موجود در آزمایشگاه را مورد مطالعه قرار داده و جرم چند جسم را با توجه به دقت وسیله از طریق توزین ساده و مضاعف به دست آورید.

پرسش ها :

۱) چرا اندازه‌گیری یک جسم را چند بار تکرار می کنیم؟
۲) طول یک قوس را چگونه می‌توان اندازه گیری نمود؟
۳) ارقام با معنی را توضیح دهید؟

آزمایش ۲: 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.

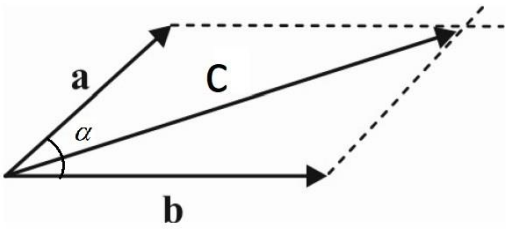
تعریف بردار : بردار یک پاره خط جهت دار است که طول آن متناسب با مقدار آن می باشد و به شکل یک پیکان نمایش داده می‌شود.

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:

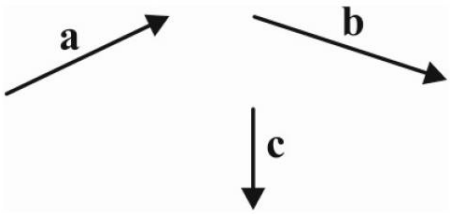
الف) روش متوازی الاضلاع: در این روش از یک نقطه دلخواه دو بردار همانند بردارهایی که می‌خواهیم با هم جمع کنیم، رسم می‌شود. قطر متوازی الاضلاعی که این دو بردار تشکیل می‌دهند، حاصل جمع دو بردار است.

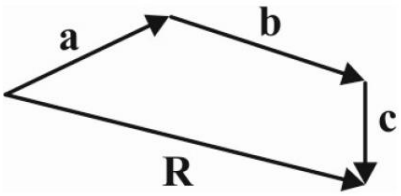
$$\vec{C} = \vec{a} + \vec{b}$$
$$|\vec{C}|^2 = |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos\alpha$$



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.

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

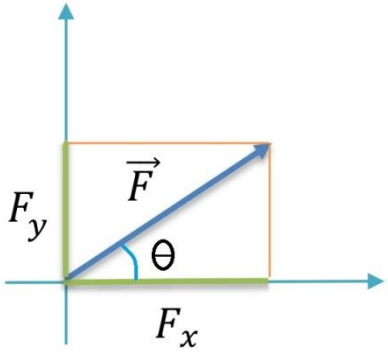


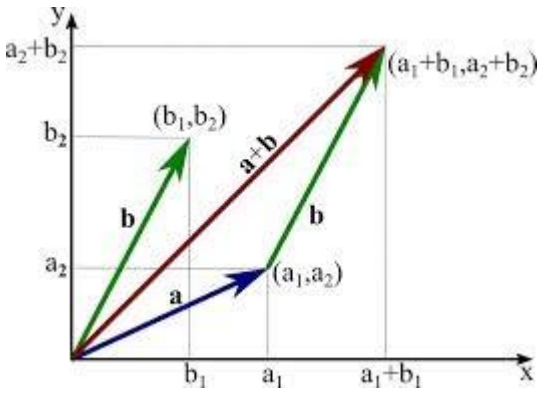


ج) روش تجزیه: در این روش ابتدا کلیه بردارها را در یک دستگاه مختصات رسم کرده و سپس تک تک آنها را بر روی محورها تجزیه می‌کنیم. بردار حاصل جمع عبارت است از قطر مستطیل حاصل از جمع مولفه‌ها بر روی هر کدام از محورها.

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

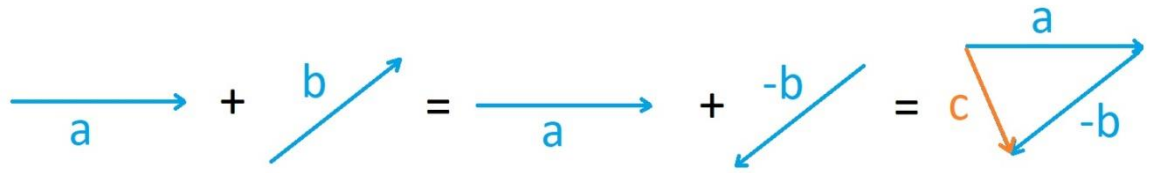
(تعیین اندازه و زاویه بردار برآیند با محور x) $F = \sqrt{F_{(a_1+b_1)}^2 + F_{(a_2+b_2)}^2}, \quad \tan\theta = \frac{F_{(a_2+b_2)}}{F_{(a_1+b_1)}}$





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.

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



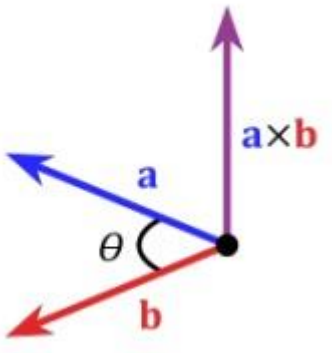
ضرب بردارها : ضرب بردارها بر دو نوع می باشد :

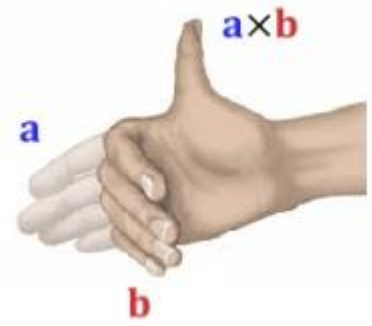
الف) ضرب اسکالر یا نقطه‌ای : حاصلضرب اسکالر یا نقطه‌ای دو بردار که به صورت $\vec{a}.\vec{b}$ نشان داده می شود، یک عدد می باشد که مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید. (θ زاویه بین $\vec{a}$ و $\vec{b}$ است)

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

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.

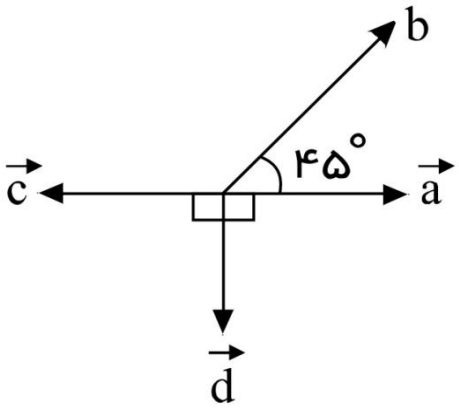
شماره آزمایش	اندازه $\vec{A}$ ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{A}$ (درجه)	اندازه $\vec{B}$ ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{B}$ (درجه)	اندازه $\vec{C}$ عملی ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{C}$ عملی (درجه)	اندازه $\vec{C}$ تئوری ($\times 10^{-2}$ N)	زاویه $\vec{C}$ تئوری (درجه)	خطای مطلق اندازه	خطای 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.

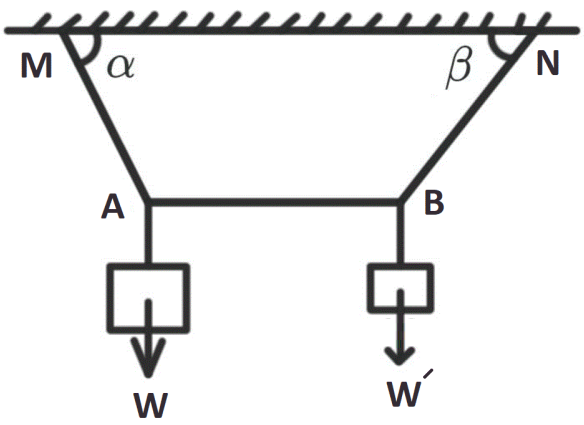
پرسش ها :

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:



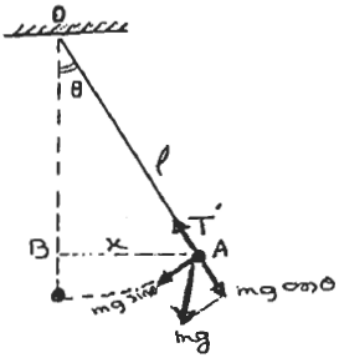
$$\frac{W}{W'}=\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$$

آزمایش ۳ : آونگ ساده

هدف آزمایش : مطالعه فرمول آونگ ساده $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ و محاسبه g به کمک فرمول فوق

تئوری آزمایش : آونگ ساده تشکیل شده است از نقطه‌ای مادی که به وسیله نخی بی‌وزن به نقطه ثابتی آویخته شده است و می‌تواند حول این نقطه در صفحه قائم نوسان کند. آشکار است که آونگ ساده نظری است و عملا نمی تواند وجود داشته باشد. ولی برای آنکه به طور تقریبی یک آونگ ساده بسازند، گلوله چگال کوچکی را به نخ بلند و نازکی می آویزند.

اگر زاویه‌ای که امتداد نخ آونگ با امتداد قائم می‌سازد در حدود ۶ درجه یا کمتر باشد می‌توان زمان تناوب آونگ را از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ به دست آورد.



اثبات رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$

شکل (۱)

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نیروهای وارد برگلوله عبارتند از نیروی وزن (mg) و نیروی کشش نخ (T'). اگر نیروی وزن را در دو راستای عمود بر آن تجزیه کنیم، مولفه $mg\cos\theta$ و نیروی کشش نخ یکدیگر را خنثی می‌کنند.

$$T' = mg\cos\theta \quad \Rightarrow \quad \text{برآیند نیروها در راستای نخ صفر است} \qquad (1)$$

در راستای مماس بر مسیر داریم:

$$(2)\ mg\sin\theta = ma \quad \Rightarrow a = g\sin\theta$$

از طرفی در مثلث ΔOAB داریم :

$$\sin\theta = \frac{x}{\ell} \qquad (3)$$

$$(2),(3) \Rightarrow \quad a = g\frac{x}{\ell} \Rightarrow \frac{x}{a} = \frac{\ell}{g} \qquad (4)$$

چون راستای دو بردار تغییر مکان $\vec{x}$ و بردار شتاب $\vec{a}$ همواره در جهت مخالف با یکدیگر هستند داریم :

$$\frac{-x}{a}=\frac{\ell}{g} \qquad (5)$$

می‌دانیم که حرکت آونگ ساده با دامنه نوسان کوچک، یک حرکت تناوبی ساده است. در حرکت تناوبی زمان تناوب از رابطه $T=2\pi\sqrt{\frac{-x}{a}}$ به دست می آید. بنابراین با توجه به رابطه (5) زمان تناوب آونگ ساده عبارتست از:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

قوانین تجربی آونگ ساده :

۱) قانون همزمانی نوسانات کم دامنه (نوسان‌های کم دامنه یک آونگ همزمانند)
۲) قانون جرم وجنس آونگ (زمان تناوب آونگ ساده بستگی به جرم و جنس آن ندارد)
۳) قانون طولها (زمان تناوب یک آونگ ساده با جذر طول آن نسبت مستقیم دارد)

در آزمایشهای آونگ ساده، نکات زیر می بایستی رعایت شود :

۱) طول آونگ ساده را از رابطه زیر به دست آورید : $L=L'+\frac{2r'^2}{5L'}$

که در آن L' عبارتست از فاصله آویزگاه تا مرکز گوی آونگ (طول نخ به اضافه شعاع گوی که به وسیله کولیس می توان آن را اندازه‌گیری کرد) و r' شعاع گوی آونگ است. عبارت $\frac{2r'^2}{5L'}$ یک جمله تصحیحی برای زمان تناوب آونگ می باشد و بخاطر اینرسی دورانی گوی نسبت به محور دوران است.

۲) در تعیین دامنه آونگ بایستی ابتدا آونگ بدون نوسان باشد و دراین حالت نقاله را زیر آویزگاه قراردهید که مرکز آن بر نقطه منطبق شده و آونگ با درجه ۹۰ نقاله در یک امتداد باشد. سپس به اندازه دامنه دلخواه می‌توان آونگ را از این وضع منحرف کرد.

روش آزمایش :

الف) برای تحقیق قانون همزمانی نوسانات کم دامنه، آونگ را به طول یک متر اختیار نمائید و سپس زمان تناوب آونگ را برای دامنه نوسان ۲ و ۴ و ۶ و ۳۰ درجه به کمک کرنومتر اندازه گیری کنید. این عمل را چند بار تکرار کنید تا نتیجه به دست آمده دقیقتر باشد. مقادیر به دست آمده را در جدول زیر وارد کنید. نتیجه حاصل را بررسی و تحلیل کنید .

شماره آزمایش	$\theta = 2^\circ$	$\theta = 4^\circ$	$\theta = 6^\circ$	$\theta = 30^\circ$	توضیحات
۱					جنس گلوله قطر گلوله طول آونگ
۲					
۳					
میانگین					

تذکر : برای اینکه نتیجه آزمایش دقیقتر باشد زمان تناوب را برای ۱۰ نوسان تعیین کنید وسپس با تقسیم آن بر ۱۰ زمان تناوب یک نوسان را به دست آورید.

ب) از روی فرمول آونگ ساده این نتیجه حاصل می شود که زمان تناوب یک آونگ ساده با جذر طول آن متناسب است . آونگ را در طول های ۲۵ و ۳۶ و ۴۹ و ۶۴ و ۸۱ و ۱۰۰ سانتی‌متر قرار داده (با استفاده از گیره لغزنده می‌توانید طول آونگ را تغییر دهید) و با دامنه ۶ درجه به نوسان در آورده و به وسیله کرنومتر زمان تناوب آونگ را به دست آورید. نتایج را درجدول‌های زیر یادداشت کنید و رابطه $\frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{\ell}{\ell'}}$ را تحقیق کنید.

شماره آزمایش	$\theta =$ زاویه انحراف	T_{25}	T_{36}	T_{49}	T_{64}	T_{81}	T_{100}
۱	6°						
۲	6°						
۳	6°						
میانگین							

$\frac{T_{25}}{T_{36}} =$	$\frac{T_{36}}{T_{25}} =$	$\frac{T_{49}}{T_{25}} =$	$\frac{T_{64}}{T_{25}} =$	$\frac{T_{81}}{T_{25}} =$
$\frac{T_{25}}{T_{49}} =$	$\frac{T_{36}}{T_{49}} =$	$\frac{T_{49}}{T_{36}} =$	$\frac{T_{64}}{T_{36}} =$	$\frac{T_{81}}{T_{36}} =$
$\frac{T_{25}}{T_{64}} =$	$\frac{T_{36}}{T_{64}} =$	$\frac{T_{49}}{T_{64}} =$	$\frac{T_{64}}{T_{49}} =$	$\frac{T_{81}}{T_{49}} =$
$\frac{T_{25}}{T_{81}} =$	$\frac{T_{36}}{T_{81}} =$	$\frac{T_{49}}{T_{81}} =$	$\frac{T_{64}}{T_{81}} =$	$\frac{T_{81}}{T_{64}} =$
$\frac{T_{25}}{T_{100}} =$	$\frac{T_{36}}{T_{100}} =$	$\frac{T_{49}}{T_{100}} =$	$\frac{T_{64}}{T_{100}} =$	$\frac{T_{81}}{T_{100}} =$

ج) تعیین g به کمک آونگ ساده : طول آونگ را ۲۰ سانتیمتر اختیار کنید و زمان ۲۰ نوسان کامل را برای وقتی که انحراف آونگ حدود ۶ درجه است به وسیله کرنومتر به دست آورید. مقادیر را در جدول زیر ثبت نمائید. این عمل را برای طولهای ۳۰ و ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ سانتیمتر تکرار کنید و مقادیر متوسط g را محاسبه نمائید و نتایج را در جدول زیر ثبت نمائید. مقادیر خطای مطلق Δg و خطای نسبی $\frac{\Delta g}{g}$ را محاسبه نمائید.

L(cm)	زمان ۲۰نوسان(tثانیه)	زمان یک نوسان کامل(Tثانیه)	T^2	$g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}$	$\overline{g}(cm/s^2)$
۲۰					
۳۰					
۴۰					
۶۰					
۸۰					

حال بر روی دو محور عمود بر هم، بر روی محور طولها طول، و بر روی محور عرضها یکبار T و بار دیگر T^2 را منتقل کنید و منحنی نمایش تغییرات را در دو حالت رسم نمائید. این دو تغییرات یکدیگر را را در یک نقطه قطع می‌کنند. خصوصیات این نقطه چیست؟

اگر زاویه انحراف از حدود معینی بزرگتر باشد باید از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}(1+\frac{\theta^2}{16})$ استفاده کرد. این بار طول آونگ را ثابت نگه دارید. مقدار انحراف را ۱۵ و ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ درجه انتخاب کنید و مقادیر به دست آمده را در جدول زیر ثبت نمائید و مقدار متوسط g را به کمک این جدول به دست آورید.

ℓ (cm)	زاویه θ انحراف(درجه)	زاویه θ انحراف(رادیان)	زمان۵نوسان (tثانیه)	زمان یک نوسان(T)	$g = \frac{4\pi^2}{T^2}\ell(1+\frac{\theta^2}{16})^2$	$\overline{g}(cm/s^2)$
۳۰	۱۵					
۳۰	۳۰					
۳۰	۴۵					
۳۰	۶۰					

تذکر: در رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}(1+\frac{\theta^2}{16})$ ، θ زاویه انحراف آونگ است و برحسب رادیان می‌باشد. هر رادیان برابر است با $\frac{180}{\pi}$ درجه.

پرسش ها :

۱) حرکت نوسانی ساده را تعریف کنید ؟

۲) پریود و فرکانس حرکت تناوبی را تعریف کرده و رابطه بین آنها را بنویسید.

۳) برای یک حرکت نوسانی ساده نشان دهید که زمان تناوب از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{-x}{a}}$ به دست می‌آید که در آن $\vec{x}$ بعد حرکت و $\vec{a}$ شتاب متحرک می باشد.

۴) توجیه علامت منفی زیر رادیکال از فرمول $T = 2\pi\sqrt{\frac{-x}{a}}$ چیست؟

۵) با توجه به اینکه شدت جاذبه زمین $g = 9.8N/Kg$ و شدت جاذبه ماه $g' = 1.67N/Kg$ می باشد یک آونگ در زمین آرامتر نوسان می کند یا در ماه؟ چرا ؟

آزمایش۴ : بررسی حرکت با شتاب ثابت (حرکت پرتابی و سقوط آزاد)

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 :

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

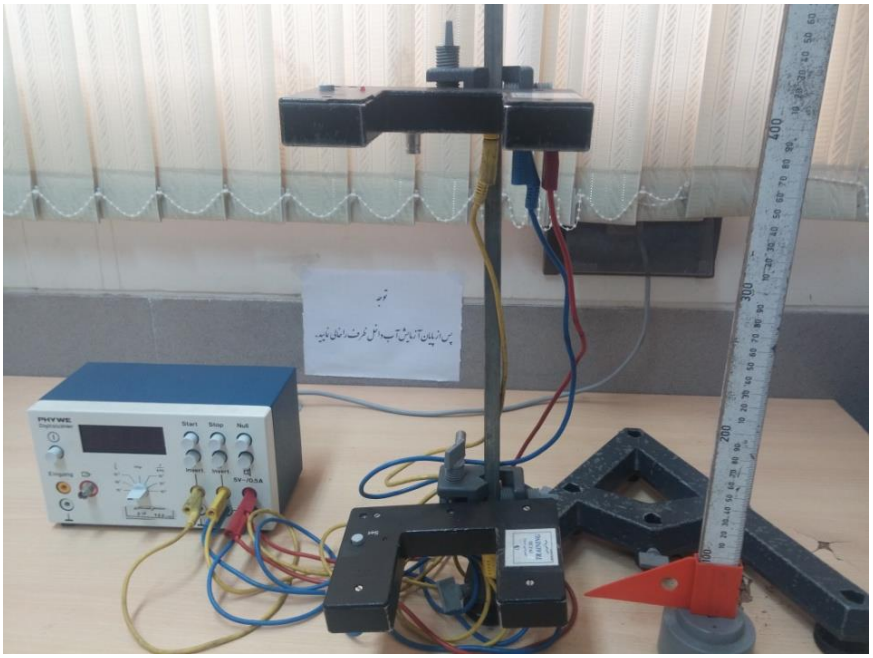
دراین حالت هرگاه جسم مورد نظر از حال سکون رها گردد ($V_{0y} = 0$) معادله فوق به صورت زیر در می آید :

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

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 :

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

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

ب) حرکت پرتابی

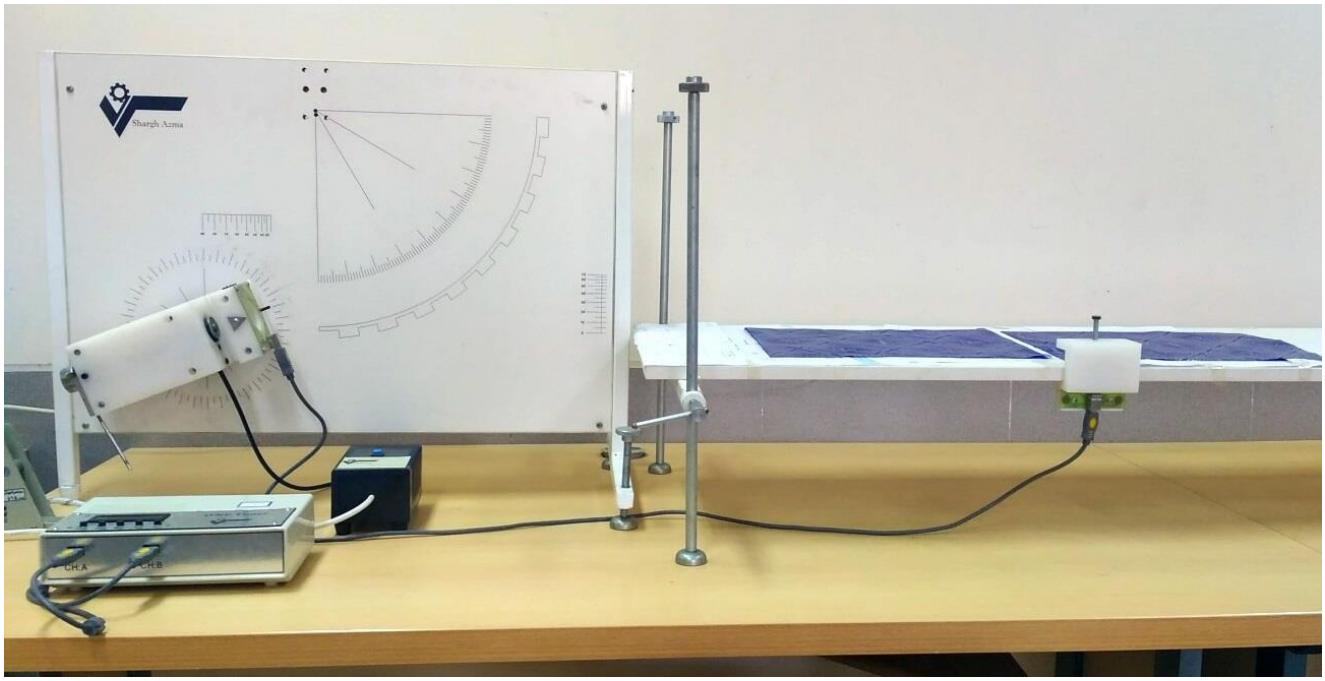
هدف آزمایش : بررسی برد و ماکزیمم ارتفاع در حرکت پرتابی بر حسب زاویه پرتاب

وسایل مورد نیاز : دستگاه پرتابه، گلوله فلزی، میز، خط‌کش، کاربن.

تئوری آزمایش : یک نمونه از حرکت منحنی الخط با شتاب ثابت، حرکت پرتابی است. با فرض اینکه بتوانیم از اصطکاک هوا صرف نظر کنیم، مسیر حرکت پرتابه به شکل سهمی خواهد بود. در این حالت با کمک معادلات حرکت می‌توان ثابت کرد که برد پرتابه از رابطه $R = \frac{v_0^2}{g}\sin 2\theta_0$ و ارتفاع ماکزیمم پرتابه از رابطه $h = \frac{v_0^2}{2g}\sin^2\theta_0$ بدست می آید، که θ_0 زاویه اولیه پرتابه با افق و v_0 تندی اولیه پرتابه است.

روش آزمایش :

۱) میز کار را آماده نمایید و ورقه کاربن را بر روی آن قرار دهید.



۲) دستگاه پرتاب کننده را توسط پیچ های تعبیه شده روی آن، در زاویه مورد نظر تنظیم کنید. با کشیدن دسته انتهایی دستگاه پرتاب کننده و قرار دادن ضامن مربوطه در یکی از شیارهای تعبیه شده روی آن دستگاه را آماده پرتاب نمائید. با کشیدن ضامن، گلوله را پرتاب نمائید. با اندازه‌گیری فاصله نقطه پرتاب تا محل اصابت آن بر روی میز برد گلوله را به دست آورید و از روی آن تندی اولیه پرتابه را تعیین کنید. سپس ارتفاع ماکزیمم پرتابه را با استفاده از رابطه $h = \frac{v_0^2}{2g}\sin^2\theta_0$ محاسبه کنید. به ازای هر θ_0، R را سه بار اندازه بگیرید و جدول زیر را تکمیل کنید.

θ_0	۲۰	۳۰	۴۵	۶۰	۷۰	۷۵	۸۰
$R(cm)$							
$h(cm)$							

۳) منحنی تغییرات R بر حسب θ_0را روی کاغذ میلیمتری رسم نمائید.

۴) منخنی تغییرات hبر حسب θ_0 را روی کاغذ میلیمتری رسم نمائید.

۵) به ازای چه مقدار از θ_0، $R = h$ است ؟

۶) یکی از مقادیر اندازه‌گیری شده را با مقدار انتظاری نظری آن مقایسه و درصد خطا را محاسبه نمائید.

۷) منابع خطا را نام ببرید .

آزمایش ۵ : تحقیق قوانین حرکت به کمک ماشین آتوود و چرخ ماکسول

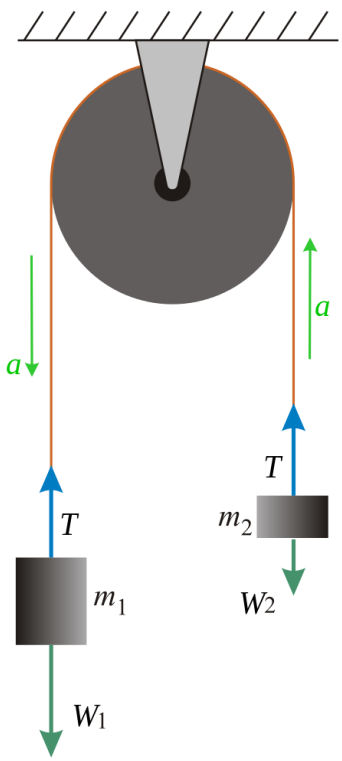
الف) ماشین آتوود

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..

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

- $\bar{a}$ را بار دیگر با استفاده از رسم نمودار خطی Δx بر حسب $\bar{t}^2$ و تعیین شیب نمودار، بدست آورده و نتیجه را با مقدار $\bar{a}$ 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:

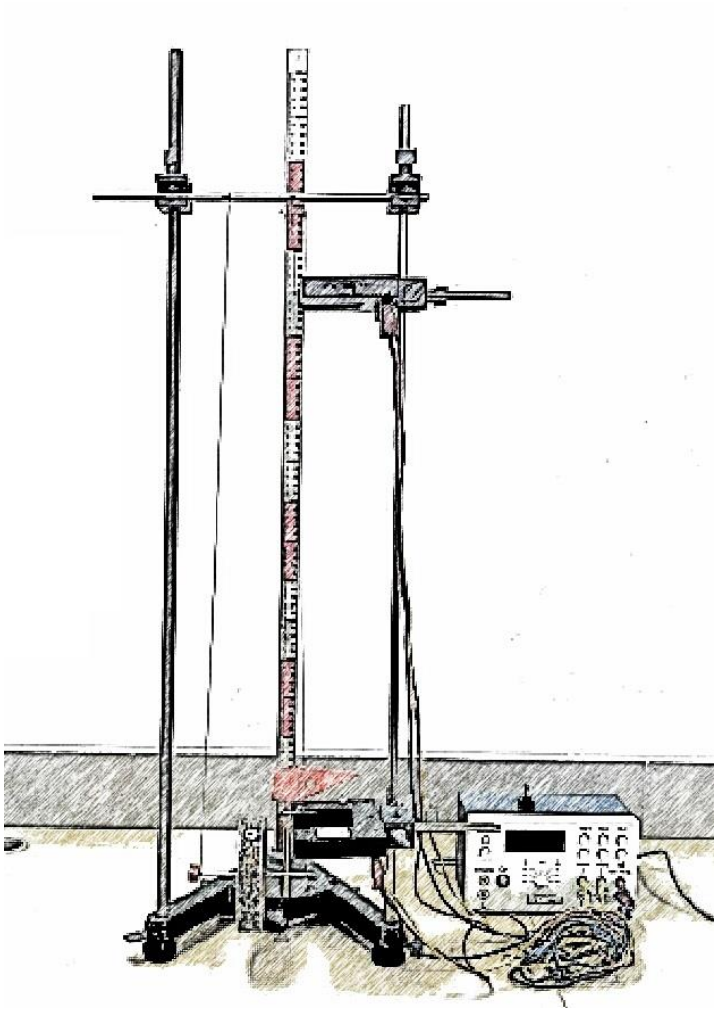
$$v(t) = \frac{mg}{m + \frac{I_G}{r^2}}t \qquad (4)$$

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

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 ۶ : قوانین اصطکاک

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

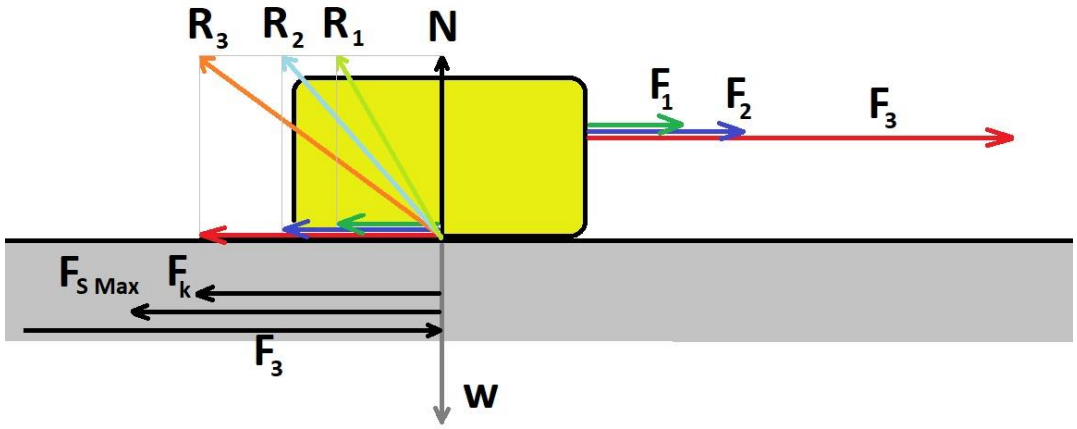
وسایل مورد نیاز : میز اصطکاک، مکعب مستطیل‌هایی با سطوح مختلف، جعبه وزنه، نخ، ترازو.

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.

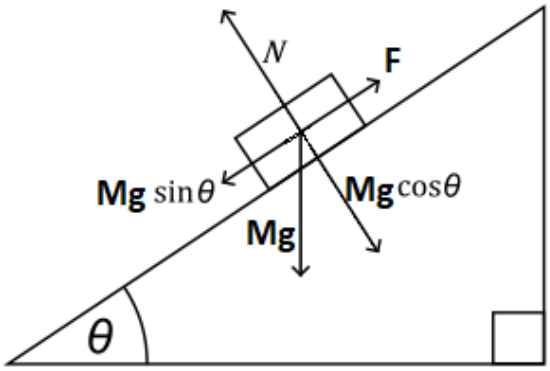
چنانچه بر جسمی‌که روی یک سطح قرار دارد نیرویی در راستای سطح وارد کنیم، مادامیکه جسم ساکن است نیروی مقاومت سطح در راستای نیروی وارد شده، برابر نیروی وارد شده از طرف ما بر جسم است. این نیرو، نیروی اصطکاک ایستایی (F_s) نامیده می‌شود:

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

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:

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

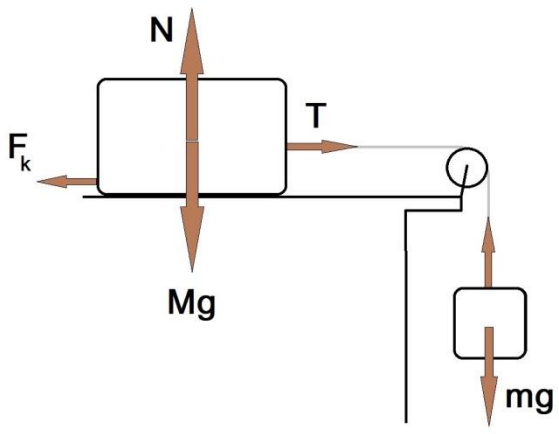
در حالتی که جسم تحت اثر نیروی F با سرعت یکنواخت به سمت بالا حرکت کند (a=0) داریم :

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

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 :

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

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	$\lvert \mu_k - \bar{\mu}_k \rvert$	$\frac{\lvert \mu_k - \bar{\mu}_k \rvert}{\mu_k}$
۱	۰						
۲	۱۰۰						
۳	۲۰۰						
۴	۳۰۰						
					$\bar{\mu}_k =$		

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؟

آزمایش ۷ : تعیین ثابت فنر ؛ اندازه‌گیری گشتاور لختی

الف) 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 :

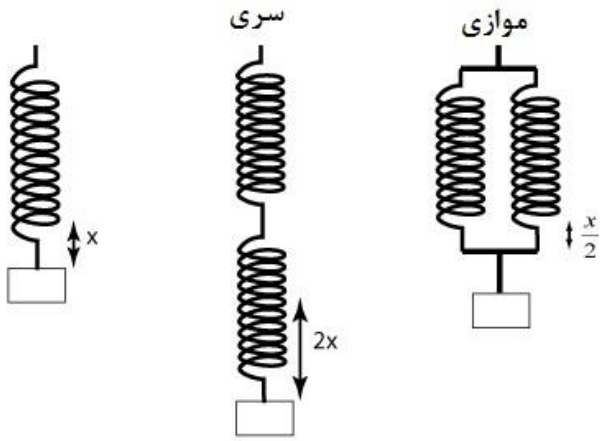
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (6)$$

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 ؟

ب) اندازه‌گیری گشتاور لختی

هدف آزمایش : اندازه گیری گشتاور لختی با حرکت نوسانی

وسایل مورد نیاز : فنر حلزونی ، نیرو سنج ، خط کش ، کرنومتر .

تئوری آزمایش : اگر جسمی تحت یک نیروی پایستار حرکت نوسانی داشته باشد ، حرکت آن یک حرکت نوسانی ساده خواهد بود که معادله حرکت آن با توجه به نوع نیرو متفاوت خواهد شد . در این آزمایش با استفاده از حرکت نوسانی ساده چند جسم که عبارتند از : دیسک ، کره توپر ، استوانه توپر ، استوانه تو خالی و میله . گشتاور لختی آنها را حول محور نوسانشان به دست می آوریم .

برای ایجاد حرکت نوسانی از فنر حلزونی تخت که از قانون هوک پیروی می کند یعنی :

$$\tau = -D\theta \qquad (1)$$

(که در آن τ گشتاور نیرو، D ضریب بازگردان زاویه ای و θ جابجایی زاویه ای است) استفاده می کنیم اگر حرکت نوسانی یکی از اجسامی که با این فنر به نوسان در آمده را در نظر بگیریم برای آن در هر لحظه می توان نوشت :

$$\tau_0 = I_0\alpha = I_0\frac{d\omega}{dt} = I_0\frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (2)$$

که در آن τ_0 گشتاور نیروی فنر حول محور نوسان است که در هر لحظه به جسم وارد می شود α شتاب زاویه ای جسم و ω سرعت زاویه آن و θ جابجایی زاویه ای جسم می باشد با توجه به روابط (۱) و (۲) برای معادله حرکت جسم خواهیم داشت :

$$(3)\quad -D\theta = I_0\frac{d^2\theta}{dt^2} \Rightarrow \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{D}{I_0}\theta = 0$$

که در آن I_0 گشتاور لختی جسم حول محور دوران است . معادله اخیر که معادله حرکت جسم است معادله یک حرکت نوسانی ساده است که زمان تناوب حرکت نوسانی باتوجه به معادله فوق از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{I_0}{D}}$ (4) به دست می آید .

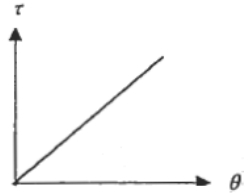
روش آزمایش : با توجه به رابطه (۴) اگر D معلوم باشد با اندازه گیری زمان تناوب حرکت نوسانی به وسیله کرنومتر I_0 به دست می آید . پس ابتدا D فنر را به دست می آوریم برای این کار ابتدا میله فلزی را روی محور فنر قرار داده سپس نیرو سنج را در فاصله دلخواه و معینی از محور d به میله متصل کنید .

حال به وسیله نیروسنج و به طور عمود بر میله ، به میله نیرو وارد کرده و میله را تا زاویه های مختلف بچرخانید . با توجه به عددی که نیرو سنج در هر بار نشان می دهد جدول زیر را کامل کنید .

d = فاصله نیروسنج تا محور دوران

θ	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π
F				
$\tau = Fd$				

با رسم نمودار τ برحسب θ ، D که شیب خط است به دست می آید



ضریب بازگردان فنر = D = شیب خط

اکنون اجسام مختلف را در محور فنر قرار دهید و زمان ۱۰ نوسان آنها را اندازه گرفته ، سپس با به دست آوردن زمان تناوب آنها گشتاور لختی هرکدام را با توجه به رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{I_0}{D}}$ و یا $I_0 = \frac{T^2 D}{4\pi^2}$ بدست آورید .

اجسام مختلف	زمان ۱۰ نوسان	زمان یک نوسان	I_0
استوانه توپر			
استوانه توخالی			
دیسک			
کره توپر			

با اندازه گیری مشخصات فیزیکی اجسام نظیر جرم و شعاع و ....گشتاور لختی را به طریق نظری محاسبه کنید و با مقادیر تجربی به دست آمده از آزمایش مقایسه کنید .

آزمایش ۸ : برخورد مستقیم

هدف آزمایش :مطالعه برخورد الاستیک و غیر 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.

الف) برخورد الاستیک

هدف آزمایش :مطالعه برخورد الاستیک در یک بعد

تئوری آزمایش :

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:

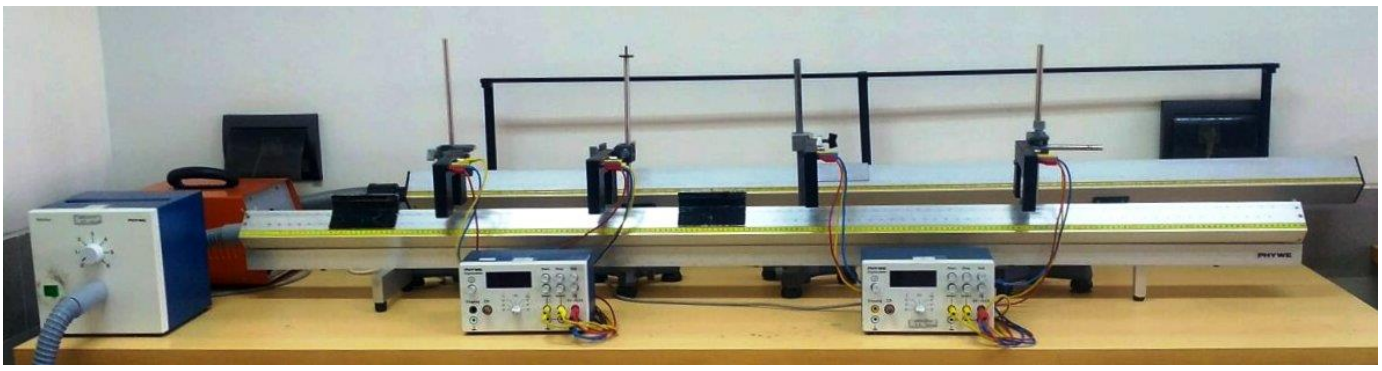
$$\frac{1}{2}m_1V^2{}_{01} + \frac{1}{2}m_2V^2{}_{02} = \frac{1}{2}m_1V^2{}_1 + \frac{1}{2}m_2V^2{}_2 \qquad (6)$$
$$\Rightarrow m_1(V^2{}_{01} - V^2{}_1) = m_2(V^2{}_2 - V^2{}_{02}) \qquad (7)$$

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

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

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	e ضریب بازگشت	$\Delta e=\lvert e-\bar{e}\rvert$
۳۰			۷۰				
۴۰			۶۰				
۵۰			۵۰				
۶۰			۴۰				
۷۰			۳۰				
						$\bar{e}=$	

ب) برخورد غیرالاستیک

تئوری آزمایش : جسم به جرمهای m_1و m_2 که سرعت‌های قبل از برخورد آنها به ترتیب V_1 و V_2 می باشد را در نظر بگیرید. فرض کنید بعد از برخورد این دو جسم به هم چسبیده و تشکیل یک جسم واحد را بدهند و مجموعا با سرعت V حرکت کنند. با استفاده از قانون بقای اندازه حرکت داریم :

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_{1+}m_2)v \qquad (11)$$

دراین نوع برخورد مقداری از انرژی جنبشی دو جسم از بین می‌رود و صرف تغییر شکل یعنی چسبیدن دو جسم به یکدیگر می‌شود. اتلاف نسبی انرژی جنبشی از فرمول زیر بدست می‌آید :

$$\frac{E_1 - E_2}{E_1} = E' \qquad (12)$$

که در این رابطه E_1 انرژی جنبشی دو جسم قبل از برخورد و E_2 انرژی جنبشی دو جسم پس از برخورد هستند. بنابراین داریم :

$$E' = \frac{(\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2) - (\frac{1}{2}(m_{1+}m_2)v^2)}{\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2} \qquad (13)$$

اگر جسم دوم قبل از برخورد ساکن باشد (یعنی $v_2 = 0$ باشد)، داریم :

$$E' = \frac{m_1v_1^2 - (m_{1+}m_2)v^2}{m_1v_1^2} \qquad (14)$$

با حذف v_1 بین دو رابطه (11) و (14) نتیجه می‌شود :

$$E' = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \qquad (15)$$

در نتیجه اتلاف انرژی نسبی از رابطه (15) بدست می‌آید.

روش آزمایش :

جسم m_1 را در ابتدای مسیر قرار دهید و جسم m_2 را در یک نقطه دلخواه بین سد نوری دوم و سوم مستقر کنید. به جسم m_1 ضربه‌ای وارد کنید تا به سمت m_2 حرکت کند. پس از برخورد، جسم ۱ و ۲ بهم چسبیده و با سرعت یکسان مسیر را طی می‌کنند؛ یعنی یک برخورد غیر الاستیک کامل دارید. برای بدست آوردن سرعت جسم ۱ باید مسافت بین سد نوری اول و دوم را بدست آورید و با داشتن زمان مشخص شده توسط کرنومتر اول می‌توان سرعت آن را به دست آورید. همچنین سرعت پس از برخورد (v)، را می‌توانید با اندازه گیری مسافت بین سد نوری سوم و چهارم و زمان مشخص شده توسط کرنومتر دوم محاسبه کنید.

جرم m_1 و m_2 را اندازه گرفته و یادداشت کنید. آزمایش را برای مقادیر خواسته شده در جدول دو بار تکرار نموده و نتایج را ثبت نمایید. برای هر سری از داده ها با استفاده از رابطه (۱۴) اتلاف انرژی را محاسبه کرده و از آنها میانگین‌گیری کنید. میانگین حاصل را با اتلاف انرژی که از رابطه (۱۵) بدست می‌آید مقایسه کرده و خطای نسبی و مطلق را تعیین کنید.

به دلخواه برای دو 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/

X_1	t_1	V_{01}	X_2	t_2	V_2	E´ (14)
۳۰			۷۰			
۴۰			۶۰			
۵۰			۵۰			
۶۰			۴۰			
۷۰			۳۰			
						میانگین:

آزمایش ۹ : آونگ مرکب (آونگ فیزیکی)

هدف آزمایش: اندازه‌گیری شتاب ثقل زمین به کمک آونگ کاتر

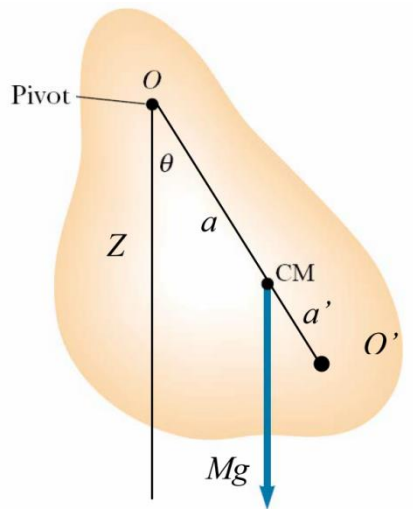
وسایل مورد نیاز : آونگ کاتر، خط‌کش، کرونومتر

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 $L' = a + a'$ برابر طول آونگ ساده‌ایست که زمان تناوب آن نیز همان T می باشد. 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:

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

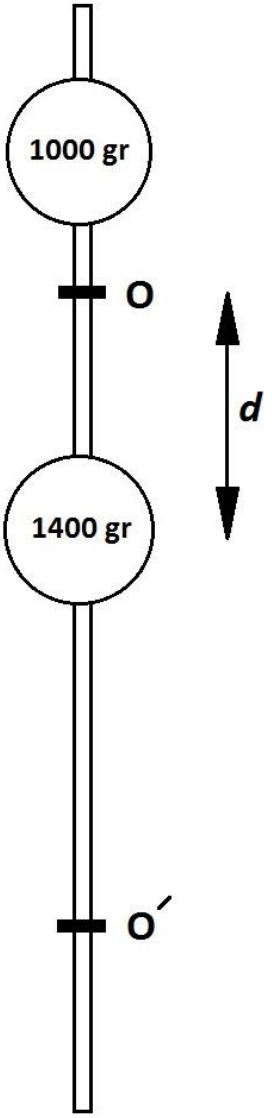
بدین ترتیب می‌توان در یک آزمایش ابتدا نقطه O' متناظر با O را تعیین کرده و سپس با استفاده از رابطه (۶) مقدار g را بدست آورد.

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 نخـستین بـار در سال ۱۸۱۸ بوسیله کاتر بکار رفت، یکی از دقیقترین روشهایی است که بـرای انـدازه‌گیـری 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 محورO 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؟

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_H}	1.0078 u	1.007 825 031 6	0.0005
Deuterium atom mass[c]	m_{2_H}	2.0136 u	2.013 553 212 724	3.9×10^{-5}
Helium atom mass[c]	$m_{4_{He}}$	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

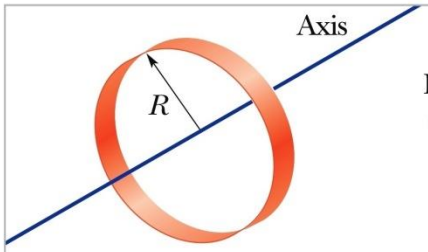
[a] Values given in this column should be given the same unit and power of 10 as the computational value.

[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.

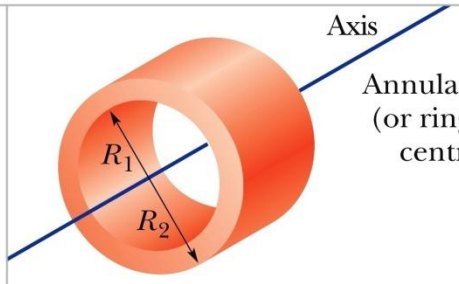
[d] STP means standard temperature and pressure: 0°C and 1.0 atm (0.1 MPa).

Some Rotational Inertias



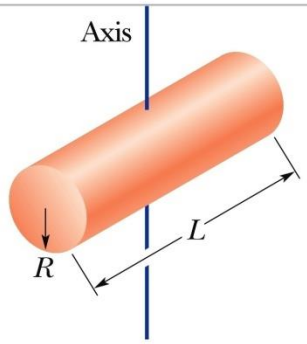
Hoop about central axis

$I = MR^2$



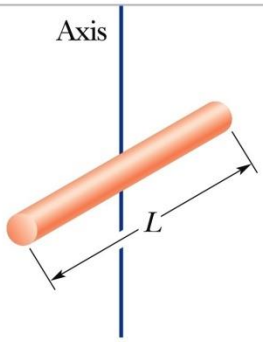
Annular cylinder (or ring) about central axis

$I = \frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$



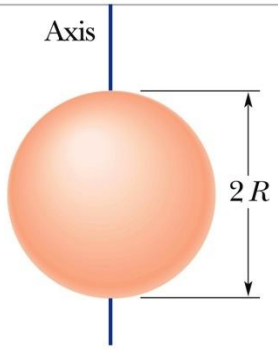
Solid cylinder (or disk) about central diameter

$I = \frac{1}{4}MR^2 + \frac{1}{12}ML^2$



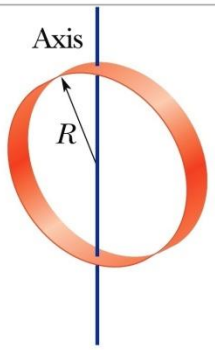
Thin rod about axis through center perpendicular to length

$I = \frac{1}{12}ML^2$



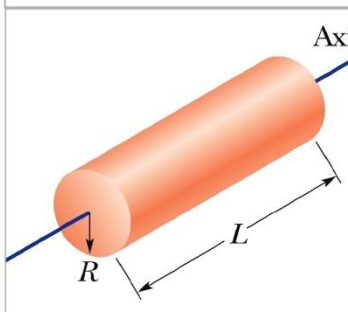
Thin spherical shell about any diameter

$I = \frac{2}{3}MR^2$



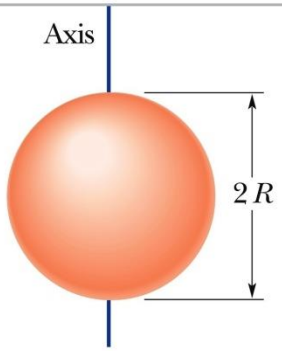
Hoop about any diameter

$I = \frac{1}{2}MR^2$



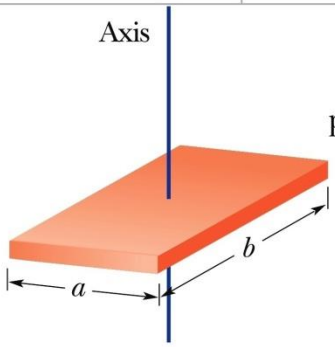
Solid cylinder (or disk) about central axis

$I = \frac{1}{2}MR^2$



Solid sphere about any diameter

$I = \frac{2}{5}MR^2$



Slab about perpendicular axis through center

$I = \frac{1}{12}M(a^2 + b^2)$