دانشگاه الزهرا

آزمایشگاه فیزیک پایه ۱

دانشکده فیزیک- شیمی

گروه فیزیک

فهرست:

مقدمات	۲
آزمایش اول: اندازه‌گیری ۱	۱۴
آزمایش دوم: اندازه‌گیری ۲	۱۸
آزمایش سوم: تعادل	۲۰
آزمایش چهارم: قرقره‌ها و چرخ‌ومحور	۲۶
آزمایش پنجم: بررسی سقوط آزاد	۳۲
آزمایش ششم: بررسی سینماتیک حرکت انتقالی در دوبعد (حرکت پرتابی)	۳۵
آزمایش هفتم: بررسی سینماتیک و دینامیک حرکت خطی در یک بعد (قانون اول و دوم نیوتون)	۳۸
آزمایش هشتم: بررسی پایستگی اندازه حرکت خطی در برخورد یک بعدی	۴۲
آزمایش نهم: بررسی سینماتیک و دینامیک حرکت دورانی دریک بعد	۴۶
آزمایش دهم: بررسی حرکت نوسانی ساده (جسم- فنر و آونگ ساده)	۵۱
آزمایش یازدهم: بررسی آونگ مرکب	۵۶
آزمایش دوازدهم: بررسی آونگ کاتر	۶۱
آزمایش سیزدهم: سنجش گشتاور ماند و بررسی قضیه‌ی محورهای موازی(آونگ پیچشی)	۶۴

مقدمات:

نحوه تهیه گزارش‌کار:

گزارش‌کار برقرارکننده ارتباط بین شخص آزمایشگر و مربی آزمایشگاه است تا از چگونگی و نحوه کار دانشجو آگاه شود و بنابراین یک گزارش خوب باید تمامی مراحل کار را دارا باشد و در عین حال از شرح و تفصیل اضافی مبرا باشد.

در تهیه گزارش باید به نکات زیر توجه شود:

۱- موضوع آزمایش، تاریخ انجام آزمایش، تاریخ نوشتن آزمایش، نام و نام‌خانوادگی نویسنده گزارش و همکاران هم گروهایش. این قسمت که به عنوان شناسنامه‌ی گزارشکار است باید در اولین صفحه و به تنهایی تنظیم شود، مانند جلد برای گزارشکار.

۲- هدف از انجام آزمایش.

۳- وسایل مورد نیاز و میزان دقت آنها.

۴- تئوری مربوط به آزمایش با ذکر روابط و شکل‌های مربوطه (در صورت نیاز).

۵- روشی که آزمایش انجام داده شده است (در صورت نیاز).

۶- تکمیل جدول‌های مربوطه و مشخص کردن واحدها.

۷- انجام محاسبات مربوطه به‌طور واضح و در صورتی که محاسبات تکرار می‌شوند انجام یک محاسبه برای نمونه کافی است.

۸- رسم نمودارها در کاغذ مناسب جداگانه با ذکر مختصات، مقیاس و واحدها. (درصورت موافقت استاد می‌توانید نمودارها را با استفاده از نرم‌افزار رسم کنید.)

۹- نتیجه‌گیری از آزمایش ، دراین‌باره آزمایشگر باید استنباط خود را از آزمایش و کاربرد وسایل و اِشکال‌های احتمالی پیش آمده در آزمایش بنویسد و چنانچه آزمایش به نتیجه نرسیده باشد باید دلایل آن و روش برطرف کردن آن را بیان نماید.

دقت و ظرفیت دستگاه اندازه‌گیری:

کوچکترین مقداری را که یک وسیله‌ی اندازه‌گیری در هنگام اندازه‌گیری یک کمیت می‌تواند اندازه بگیرد را دقت یا حساسیت (sensitivity) آن دستگاه می‌گویند. . به‌طور مثال، یک خط‌کش ۲۰ سانتی‌متریِ معمولی کوچکترین فاصله‌ای را که می‌تواند اندازه بگیرد ۱ میلی‌متر است، پس دقت این وسیله ۱ میلی‌متر یا ۰/۱ سانتی‌متر است و اگر طولی را با آن اندازه بگیریم به شکل زیر نشان می‌دهیم:

$x = ۱۰/۰ \ cm$ یا $x = ۱۰۰ \ mm$

بنابراین اگر طولی را با مقدار $۵۱/۴ \ cm$ نشان دهیم به این معناست که دقت اندازه‌گیری ۰/۱ سانتی‌متر یا ۱ میلی‌متر است و چنانچه با مقدار $۵۱/۴۰ \ cm$ بیان کنیم آنگاه دقت وسیله اندازه‌گیری برابر با ۰/۱ میلی‌متر خواهد شد.
اما بیشترین مقداری که دستگاه اندازه‌گیری می‌کند ظرفیت (capacity) آن دستگاه نامیده می‌شود.

خطاهای اندازه‌گیری:

همیشه اندازه‌گیری کمیتها با مقداری خطا همراه است و هیچ‌گاه نمی‌توان مقدار واقعی یک کمیت را بدست آورد. فقط با تکرار اندازه‌گیری و بکاربردن دقت بیشتر می‌توان این خطاها را به حداقل رساند.
خطاهای اندازه‌گیری را معمولاً می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱- خطای کاربرد (Application Error): این نوع خطا ناشی از تغییر حالت دستگاه یا نمونه در هنگام اندازه‌گیری رخ می دهد. برای روشن‌تر شدن موضوع به چند نمونه از این خطاها اشاره می‌کنیم. گرم شدن ترمومتر در اثر تماس با اجسام، فشار کولیس بر روی جسم که باعث تغییر شکل و ابعاد آن می‌شود و در نتیجه ابعاد اندازه‌گیری شده از واقعیت دور می‌شوند. یا برای مثال افت پتانسیل در اثر اتصال ولتمتر که باعث ایجاد خطایی در اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل می‌شود.

۲- خطای شخص آزمایشگر(Operating Error): میزان خطایی که از طرفِ شخص آزمایشگر در اندازه‌گیری ایجاد می‌شود به مهارت، آزمودگی و دقت او بستگی دارد و با تکرار دفعات اندازه‌گیری و میانگین گرفتن از نتایج می‌توان از مقدار این خطا کم کرد. این خطا معمولاً بر اثر کاربرد نادرست وسیله اندازه‌گیری و سهل‌انگاری در خواندن درجه‌ها رخ می‌دهد و همچنین اگر آزمایشگر سعی در رسیدن به نتیجه معینی داشته باشد آنگاه احتمال این خطا نیز بیشتر می‌شود. به عنوان مثال در اندازه‌گیری طول یک میز چنانچه صفر متر نواری را دقیقاً بر لبه‌ی میز منطبق نکنیم و یا به‌طور عمود در هنگام خواندن عدد مورد نظر به متر نواری نگاه نکنیم، دچار خطا خواهیم شد.

۳- خطای دستگاه (System Error): این خطا بستگی به استفاده از ابزار اندازه‌گیری دارد. به‌طور مثال در اندازه‌گیری طول یک کتاب با خط‌کش میلی‌متری دقت اندازه‌گیری تا ۱ میلی‌متر است ولی اگر همان کتاب را با یک خط‌کش مدرج برحسب سانتی‌متر اندازه بگیریم دقت اندازه‌گیری برحسب ۱ سانتی‌متر می‌شود. به عبارت دیگر اندازه‌گیری با خط‌کشِ میلی‌متری خطای کمتری را ایجاد می‌کند. پس برای کم کردن این خطا باید از وسایل دقیق‌تر استفاده کرد.

۴- خطای محیط(Environment Error): عوامل محیطی آزمایشگاه از جمله دما، فشار، رطوبت، روشنایی، ذرات غبار و ... در اندازه‌گیری کمیت‌های مورد بررسی مؤثرند که برای کاهش این دسته از خطا سعی در استانداردسازی محیط آزمایشگاه می‌کنیم.

۵- خطاهای دینامیکی(Dynamic Error): گاهی برای اندازه‌گیری صحیح کمیت نیاز است شرایط پایداری حاکم شود. مثلاً گاهی باید سیستم از حالت متلاطم به حالت آرام و پایدار برسد و یا گاهی دستگاه برای اندازه‌گیری نیاز به زمان عکس‌العمل یا زمان جوابگویی (Response Time) دارد. خطاهای دینامیکی میرا هستند و با ادامه‌ی زمان لازم از بین می‌روند. یک نمونه از این نوع خطا در اندازه‌گیری دما دیده می‌شود. برای خواندن دما باید مدت زمانی را صرف کنیم تا دماسنج و محیط به تعادل برسند.

از نظر کنترل خطا می‌توان خطاها را به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد:

۱- خطاهای روشمند (Systematic Error): این خطا نیز از طرف دستگاه اندازه‌گیری ایجاد می‌شود و همیشه به صورت منظم در یک جهت رخ می‌دهد. مانند ترازویی که همواره جسم را سبک‌تر یا سنگین‌تر نشان می‌دهد و در برخی مواقع می‌توان با مقایسه دیگر ابزار مشابه، میزان خطا را تا حدودی تشخیص داد و در محاسبه‌ها منظور کرد.

۲- خطای تصادفی (Random Error): خطاهایی که در یک اندازه‌گیری به‌صورت تصادفی و پیش‌بینی نشده ظاهر می‌شوند. برای مثال پیش‌آمدهای تصادفی حین آزمایش مثل سروصدا، جریان هوا، لرزش و ... از عوامل ایجاد خطاهای تصادفی هستند. خطاهای تصادفی را می‌توان با میانگین گرفتن و استفاده از فنون آماری به حداقل رساند.

محاسبه خطا:

برای تخمین مقدار خطا، بنا به شرایط و مورد آزمایش از روش خاصی استفاده می‌کنیم. در جایی که مقدار واقعی کمیت را نمی‌دانیم و فقط با اندازه‌گیری‌های متعدد مقادیر مختلفی برای آن کمیت اندازه گرفته‌ایم. در صورتی‌که مقادیر اندازه گرفته شده با هم برابر باشند، می‌توان آن مقدار را اندازه‌ی آن کمیت در نظر گرفت. ولی چنانچه اختلافی بین مقادیر اندازه‌گیری وجود داشته باشد، باید دفعات اندازه‌گیری را افزایش داد تا از حدود تغییرات آنها مطمئن شویم. اگر از مقادیر اندازه‌گیری میانگین بگیریم آنگاه

این میانگین به احتمال زیاد مقدار کمیت خواهد بود (محتمل‌ترین مقدار). هنگامی‌که تعداد اندازه‌گیری‌ها کم باشد، آنگاه حداکثر انحراف از میانگین، خطا خواهد بود. ولی چنانچه تعداد اندازه‌گیری زیاد باشد، میانگین انحراف‌ها را محاسبه می‌کنیم و تفاوت آن را با میانگین مقدار اندازه‌گیری شده به‌عنوان خطا در نظر می‌گیریم. اگر کمیت x به تعداد n بار اندازه‌گیری شود، میانگین n بار اندازه‌گیری می شود:

$$x_m = \bar{x} = \frac{x_1+x_2+\cdots+x_n}{n}$$

و مقادیر انحراف از میانگین برای هر اندازه‌گیری برابر می‌شود با:

$$\Delta x_1 = |\bar{x} - x_1|$$

$$\Delta x_2 = |\bar{x} - x_2|$$

.

.

$$\Delta x_n = |\bar{x} - x_n|$$

و چنانچه n بزرگ باشد، میانگین خطا برابر با مجموع قدرمطلق انحراف از میانگین‌ها تقسیم بر تعداد دفعات اندازه‌گیری می‌شود:

$$(\Delta x)_m = \overline{\Delta x} = \frac{|x_1-\bar{x}|+|x_2-\bar{x}|+\cdots+|x_n-\bar{x}|}{n}$$

و اگر n کوچک باشد بزرگ‌ترین انحراف از میانگین همان خطای مطلق است.

۱- خطای مطلق:

عبارت است از قدرمطلق اختلاف کمیت اندازه‌گیری شده‌ی x' با مقدار واقعی کمیت x و آن‌را با Δx نشان می‌دهیم:

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

باوجود اینکه در آزمایشگاه سعی می‌کنیم خطا را به حداقل برسانیم، ولی در هنگام گزارشِ خطا، باید بیشترین خطایی که ممکن است رخ داده باشد را گزارش کنیم. خطای مطلق ماکزیمم در هر اندازه‌گیری معمولاً مجموع خطای وسیله اندازه‌گیری و خطای شخص آزمایشگر است. خطای وسیله اندازه‌گیری، کوچکترین درجه وسیله اندازه‌گیری است که به عنوان خطای دستگاه به حساب می‌آوریم و یا اینکه کارخانه سازنده بیشینه خطای ممکن را به درصد برای وسیله مورد نظر مشخص می‌کند و در مورد خطای شخص آزمایشگر هم باید گفت که چندین بار اندازه‌گیری و میانگین‌گیری از آنها بهترین کار است. آزمایشگر با بدست آوردن بزرگترین Δx می‌تواند آن را به عنوان ماکزیمم خطای مطلق شخص در نظر گیرد و پس از آن، می‌تواند مقدار واقعی کمیت را در محدوده زیر تعیین نماید:

$$x_m - \Delta x < x < x_m + \Delta x$$

که در این رابطه x مقدار واقعی کمیت و x_m میانگین اندازه‌گیری‌ها و Δx ماکزیمم خطای مطلق است.

مثال: فرض کنید در آزمایشی هدف به دست آوردن شتاب جاذبه زمین g ، از روش سقوط آزاد است و برای آن باید ابتدا ارتفاع و زمان سقوط را اندازه گرفت. سپس از رابطهٔ $h = \frac{1}{2}gt^2$ می‌توان g را محاسبه نمود.
بنابراین خطا در تعیین g به خطای اندازه‌گیری در زمان t و ارتفاع h بستگی دارد. حال فقط به نحوهٔ تعیین خطای t می‌پردازیم. فرض کنید گلوله از ارتفاع $h=1m$ سقوط می‌کند و ۵ مرتبه زمان این سقوط را با زمان‌سنجی به دقت ۱ میلی‌ثانیه اندازه بگیریم و مقادیر زیر را به دست آوریم:

t_1=435 ms, t_2=450 ms, t_3=480 ms, t_4=460 ms, t_5=475 ms

میانگین این اندازه‌ها می‌شود:

$$t_m = \frac{435+450+480+460+475}{5} = 460\ \text{msec}$$

حال مقادیر مطلق انحراف از میانگین را به دست می‌آوریم:

$$\Delta t_1 = |435-460| = 25\ \text{ms}, \qquad \Delta t_2 = |460-450| = 10\ \text{ms},$$

$$\Delta t_3 = |460-480| = 20\ \text{ms}, \qquad \Delta t_4 = |460-460| = 0\ \text{ms},$$

$$\Delta t_5 = |460-475| = 15\ \text{ms}$$

ماکزیمم مقدار مطلق انحراف از میانگین برابر است با $\Delta t_1 = ۲۵\ \text{ms}$ ، که آن‌را به عنوان ماکزیمم خطای آزمایشگر در نظر می‌گیریم. خطای وسیله اندازه‌گیری هم همانطور که گفته شد ۱ msec است و در مقابل ۲۵ msec از آن صرفنظر می‌کنیم. بنابراین خطای مطلق اندازه‌گیری ماکزیمم برابر با ۲۵ msec می‌شود و زمان واقعی سقوط گلوله از ارتفاع یک متری برابر با ۴۶۰-۲۵(ms) < t < ۴۶۰+۲۵(ms) است.

۲- خطای نسبی:

با خطای مطلق نمی‌توان میزان دقت آزمایش را نشان داد. به همین دلیل برای پی بردن به میزان دقت اندازه‌گیری خطای نسبی را به صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$\text{خطای نسبی} = \frac{\text{خطای مطلق}}{\text{مقدار واقعی کمیت}}$$

و از آنجایی که مقدار واقعی کمیت برای ما معلوم نیست، خطای نسبی را از تقسیم خطای مطلق بر مقدار اندازه‌گیری شده به دست می‌آوریم یعنی: $\frac{\Delta x}{x'}$ = خطای نسبی و یا $\frac{\Delta x}{x_m}$ = خطای نسبی ، (x_m مقدار میانگین می‌باشد.) معمولاً خطای نسبی را برحسب درصد بیان می‌کنند:

درصد خطا = خطای نسبی ×۱۰۰

برای مثال فرض کنید در اندازه‌گیری دو طول برابر با ۵۰ cm و ۵ m، یک سانتی‌متر خطا داشته باشیم آنگاه خطای نسبی اندازه‌گیری اول برابر با $\frac{1}{50} = 0.02$ خطای نسبی اندازه‌گیری دوم $\frac{1}{500} = 0.002$ می‌شود. به عبارتی در اندازه‌گیری اول در هر متر به اندازه 20 mm خطا و در اندازه‌گیری دوم در هر متر به اندازه 2 mm خطا داشته‌ایم. همانطور که می‌بینیم با اینکه خطای مطلقِ هر دو اندازه‌گیری برابر با 1 cm است ولی دقت اندازه‌گیری آزمایش دوم بیشتر از آزمایش اول است. پس هرچه خطای نسبی در آزمایشی کوچکتر باشد دقت آزمایش بیشتر می‌شود. خطای نسبی برخلافِ خطای مطلق واحد ندارد، چون خارج قسمت دو مقدار هم‌جنس است.

محاسبه خطاها در چهار عمل اصلی:

گاهی ممکن است کمیت مورد نظر u به طور مستقیم اندازه‌گیری نشود بلکه از رابطه‌ای برحسب کمیت‌های دیگر چون x, y, ... بدست آید که این کمیت‌ها به طور مستقیم اندازه‌گیری شده‌اند. در این صورت خطای مطلق و نسبی u ناشی از خطایی است که در اندازه‌گیری کمیتهای x, y, ... روی می‌دهد. برای محاسبه Δu و $\Delta u/u$ می‌توان از دستورهای زیر استفاده کرد:

۱- خطای مجموع:

اگر u=x+y باشد آنگاه:

$$u + \Delta u = (x + \Delta x) + (y + \Delta y) \rightarrow \qquad \Delta u = \Delta x + \Delta y \quad \text{و} \quad \frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x+y}$$

۲- خطای تفاضل:

اگر $u=x-y$ باشد آنگاه:

$$u + \Delta u = (x + \Delta x) - (y + \Delta y)$$

و چون حداکثر خطا مدنظر است ، بنابراین باید قدرمطلق خطای مطلق را در نظر بگیریم پس:

$$\Delta u = \Delta x + \Delta y \quad \text{و} \quad \frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta x+\Delta y}{x-y}$$

۳- خطای حاصل ضرب:

اگر $u=x\times y$ باشد آنگاه:

$$u + \Delta u = (x + \Delta x).(y + \Delta y) \quad \rightarrow \quad \Delta u = (x\,\Delta y) + (y\,\Delta x) \quad \text{و} \quad \frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

و از جملهٔ $\Delta x.\Delta y$ در مقابل دیگر جمله‌ها به دلیل کوچکی صرف‌نظر کرده‌ایم و به همین ترتیب خطای نسبی حاصل‌ضرب چند کمیت برابر با مجموع خطای نسبی آنها خواهد بود یعنی:

$$u = x.y.z \ldots \rightarrow \frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z} + \cdots$$

۴- خطای خارج قسمت (خطای تقسیم):

اگر $u = \frac{x}{y}$ باشد آنگاه :

$$u + \Delta u = \frac{x+\Delta x}{y+\Delta y} \quad \rightarrow \quad \Delta u = \frac{x+\Delta x}{y+\Delta y} - \frac{x}{y} = \frac{xy+y\Delta x-xy-x\Delta y}{y(y+\Delta y)} \quad \rightarrow \quad \Delta u = \frac{y\Delta x+x\Delta y}{y^2}$$

در رابطه آخر برای محاسبهٔ خطای مطلق منفی صورت را به مثبت تبدیل کرده‌ایم و همچنین ازΔy در مقابل y در مخرج صرف‌نظر کرده‌ایم. بنابراین خطای نسبی $\frac{\Delta u}{u} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$ خواهد شد.

در محاسبهٔ خطای مطلق حاصل‌ضرب چند کمیت از روش دیگری هم می‌توان استفاده کرد و آن دیفرانسیل لگاریتمی است. به این ترتیب که از رابطه لگاریتم می‌گیریم سپس از هر جمله دیفرانسیل می‌گیریم. آنگاه با تبدیل دیفرانسیل، d به Δ و تغییر علامت منفی به مثبت، چنانچه در دیفرانسیل‌گیری ایجاد شده باشد، خطای مطلق و نسبی کمیت مورد نظر را محاسبه می‌کنیم:

$u = x^{\alpha}.y^{\beta}$ ثابت هستند α و β

$$\rightarrow \ln u = \alpha \ln x + \beta \ln y \rightarrow \frac{du}{u} = \alpha\frac{dx}{x} + \beta\frac{dy}{y} \rightarrow \frac{\Delta u}{u} = \alpha\frac{\Delta x}{x} + \beta\frac{\Delta y}{y}$$

به طور کلی برای به دست آوردن خطای مطلق کمیتی که تابع کمیتهای اندازه گرفتنی $x,y,\ldots$ است از طرفین رابطه دیفرانسیل می‌گیریم و به جای d، علامت Δ را قرار می‌دهیم:

$$u = f(x,y,\ldots) \quad \rightarrow \quad \Delta u = f'_x.\Delta x + f'_y.\Delta y + \cdots$$

که در آن f'_x و f'_y به ترتیب مشتق جزئی تابع f نسبت به x , y است.

مثال: آزمایش سقوط آزاد را دوباره در نظر بگیرید. برای تعیین شتاب جاذبهٔ زمین g ، و خطای نسبی آن باید به صورت زیر عمل کنیم:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad \rightarrow \quad g = \frac{2h}{t^2} \quad \rightarrow \quad \ln g = \ln 2h - 2\ln t$$

$$\rightarrow \quad \frac{dg}{g} = \frac{dh}{h} - 2\frac{dt}{t} \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta h}{h} + 2\frac{\Delta t}{t}$$

ارقام با معنا:

دقت اندازه‌گیری هر کمیتی به دستگاهی که اندازه‌گیری به وسیله آن انجام گرفته بستگی دارد، بنابراین بیان نتیجه آزمایش باید نشان دهنده‌ی دقت سنجش و اندازه‌گیری باشد. فرض کنید عمق یک بِشر را با یک خط‌کش و بار دیگر با یک کولیس اندازه بگیریم. و به ترتیب اعداد ۱۲۲ میلی‌متر و ۱۲۲/۴ میلی‌متر را به دست آوریم. با توجه به اعداد بدست آمده می‌توان دریافت که دقت خط‌کش برابر با ۱ mm و دقت کولیس ۰/۱ mm است. و به این ترتیب می‌توان گفت که ۱۲۲ دارای سه رقمِ با معنی و عدد ۱۲۲/۴ دارای چهار رقم با معنی است و خطای مطلق اندازه‌گیری عمقِ بِشر با خط‌کش کمتر از ۱ میلی‌متر و خطای مطلق اندازه‌گیری همین وسیله با کولیس کمتر از ۰/۱ میلی‌متر است. زیرا اگر عددی دارای m رقم بامعنی باشد، آنگاه خطای مطلق کمیتی که این عدد نماینده مقدار آن است، کوچکتر از یک واحد از رقم m اُم آن عدد خواهد شد. حال چنانچه عددی که در اندازه‌گیری خوانده می‌شود، اعشاری و کوچکتر از یک باشد، آنگاه صفرهای بلافاصله پس از ممیز جزء ارقام با معنی به حساب نمی‌آید. مثلاً عددهای ۰/۰۰۲۱۵ و ۲/۱۵ هر دو دارای سه رقم بامعنی هستند. ولی در اعداد بزرگتر از یک، صفرهای پس از ممیز جزء ارقام بامعنی عدد به حساب می‌آیند. به طور مثال عدد ۱۱/۰۶و ۲۶۴/۰ هر دو دارای چهار رقم بامعنی هستند. به دلیل اینکه مقدار واقعی یک کمیت هیچ‌گاه اندازه‌گیری نمی‌شود، بنابراین آخرین رقم بامعنی در سمتِ راست آن عدد به عنوان رقم مشکوک در نظر گرفته می‌شود.

۱- بستگی ارقام با معنی با خطای نسبی:

تعداد ارقام با معنی یک عدد به خطای نسبی آن بستگی دارد مثلاً اعداد ۰/۳۱۴ و ۳/۱۴ و ۳۱۴ را در نظر بگیرید هر سه دارای ۳ رقم با معنی هستند و خطای مطلق آنها به ترتیب از ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ و ۱ کوچکتر است ولی هرسه دارای یک خطای نسبی و برابر $\frac{1}{314}$ هستند. بنابراین می‌توان گفت که خطای نسبی از عدد $\frac{1}{3\times10^2}$ کوچکتر است. به طور کلی : اگر عددی n رقم با معنی داشته باشد و نخستین رقم سمت چپ آن a باشد آنگاه خطای نسبی این عدد از $\frac{1}{a\times10^{n-1}}$ کوچکتر می‌شود.

۲- گردکردن اعداد:

هنگامی‌که از تعداد ارقام با معنی یک عدد بخواهیم کم کنیم، به این صورت عمل می‌کنیم: اگر رقمی که حذف می‌کنیم رقم ۴ و یا کوچکتر از آن باشد، بدون آنکه رقم پیش از آن تغییر کند حذف می‌شود. چنانچه رقم حذفی ۶ و یا بیشتر از آن باشد، آنگاه پس از حذف یک واحد به رقم قبلی افزوده می‌شود و اگر رقم حذف شدنی ۵ و یا ۵ با چند صفر در جلو آن باشد آنگاه اگر رقم قبل از ۵ زوج باشد تغییر نمی‌کند و چنانچه فرد باشد یک واحد به آن اضافه می‌شود. اگر رقم حذف شدنی ۵ و چند رقم دیگر غیر از صفر باشد آنگاه به رقم پیش از ۵ یک واحد اضافه می‌شود.

۳- چهار عمل اصلی اعداد با معنی:

در محاسبه‌های مربوط به اعداد بامعنی مواردی را باید در نظر گرفت. نخست اعدادی که باهم جمع و یا از هم کم می‌شوند حتماً باید از یک نوع کمیت و از یک واحد باشند. دوم آنکه میزان دقت یا تعداد رقمهای پس از ممیز کمیتها، به یک اندازه باشند. چنانچه غیر از این بود، آن عددی را که دقت کمتری دارد و ارقام پس از ممیز آن کمتر از بقیه است را مبنا قرار می‌دهیم. سوم اینکه در ضرب و تقسیم اعداد با معنی، معمولاً تعداد ارقام با معنای حاصل‌ضرب یا خارج قسمت باید برابر ارقام با معنای یکی از عوامل ضرب یا مقسوم یا مقسوم علیه باشد و بیشتر از آن نشود.

برای مطالعه بیشتر در مورد اعداد با معنی به آدرس روبرو مراجعه کنید.

http://www.gammajournal.ir/pdf/gamma_no_25_ar_02v01.pdf

نمودارها و کاربردهای آنها:

در بسیاری از آزمایش‌ها لازم است که نمودار تغییرات کمیتی را برحسب کمیت دیگر رسم نماییم و از رسم نمودارها می‌توان رابطه بین دو کمیت را نتیجه گرفت، در نمودارهای خطی به کمک شیب و مختصات نقاط تقاطع نمودار با محورهای مختصات کمیتهای مجهول آزمایش را می‌توان تعیین کرد.

در رسم نمودارها ، لازم است به نکات زیر توجه شود:

۱- نمودارها را بایستی بر روی کاغذ میلی‌متری، نیمه لگاریتمی و یا تمام لگاریتمی رسم نمود.

۲- متغیر مستقل (یعنی کمیتی که شخص آزمایشگر مقدار آن را انتخاب می‌کند) روی محور افقی و متغیر تابع روی محور قائم برده شود.

۳- روی محورها فقط مقیاس‌ها مشخص و نوشته شود و در انتهای محور نام و یکای کمیت همراه با توان ده ضریب اعداد نوشته شده روی محور درج شود.

۴- پس از انتخاب مقیاس و مشخص کردن نقاط روی صفحه کاغذ مورد نظر، بهترین نمودار را با استفاده از تعداد بیشتری از نقاط تجربی می‌کشیم و باقی نقاط تجربی در اطراف نمودار رسم شده قرار می‌گیرند. بهتر است کار رسم را با مداد انجام داد.

۵- اعدادی را که در آزمایش به دست می‌آیند، هیچ‌گاه نباید روی محورها نوشت و برای تعیین نقاط تجربی روی صفحه نمودار، خط‌های اضافی عمودی و افقی را نباید رسم کرد.

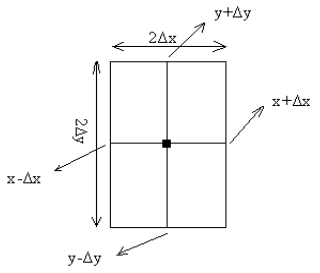
۶- به غیر از برخی از نمودارها که لازم است نکاتی درباره آنها در نظر گرفته شود، معمولا برای رسم نمودار از تمام صفحه کاغذ استفاده می‌کنیم.

۷- برای تعیین شیب، باید دو نقطه‌ای را اختیار کرد که روی نمودار باشند و جزو نقاط تجربی نباشند همچنین نباید نقاطی را که روی نمودار نیستند و نزدیک به آن هستند را انتخاب کرد.

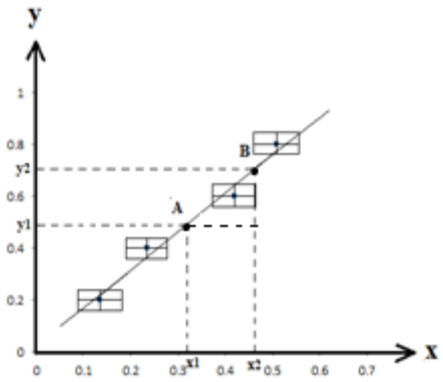
نکاتی دربارهٔ رسم نمودار روی کاغذ میلی‌متری :

از کاغذ میلی‌متری که محورهای آن برحسب میلی‌متر به طور خطی مدرج شده است، برای رسم نمودارهای خطی استفاده می‌شود. در کاغذهای میلی‌متری مقیاس روی محورها باید طوری انتخاب شود که تمام اعداد آزمایش در روی محورها جای‌گیرد و نقاط تجربی به دست آمده خیلی به‌هم فشرده و نزدیک قرار نگیرند. در برخی از نمودارها اگر مجبور نباشیم می‌توان محورها را از نقطه صفر شروع نکرد.

پس از تعیین جای نقاط تجربی روی کاغذ، نمودار را باید از میانِ نقاط تجربی رسم کرد. وصل نقاط تجربی به یکدیگر فقط در موارد بسیار نادر، می‌تواند درست باشد. هر نقطهٔ تجربی را روی نمودار باید با در نظر گرفتن خطای آن کمیت مشخص کرد پس هر نقطه به شکل یک مستطیل نمایش داده می‌شود که طول و عرض آن دو برابر خطای کمیتهایی است که روی محور افقی و عمودی برده می‌شود (شکل ۱). در آزمایش‌هایی که لازم است مقدار کمیتی با استفاده از شیب نمودار به دست آید، به صورت زیر عمل می‌کنیم:



شکل (۱)



شکل (۲)

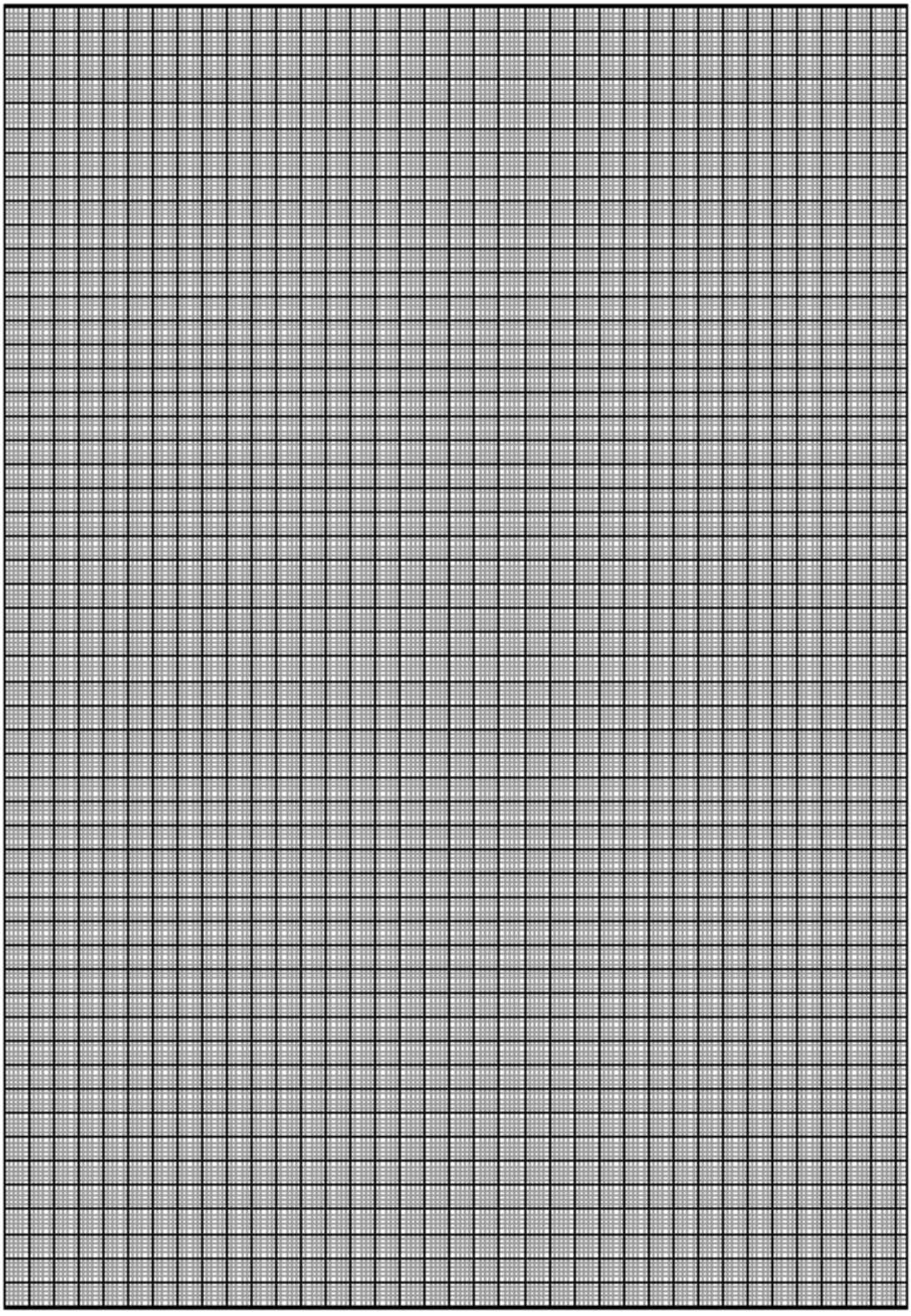
پس از رسم نمودار دو نقطه مانند A, B روی خط انتخاب می‌کنیم و بهتر است که این دو نقطه خیلی به‌هم نزدیک نباشند (شکل ۲). سپس مثلث قائم‌الزاویه‌ای می‌سازیم که پاره خط AB وتر آن باشد. بعد مختصات نقاط A, B را از روی محورها و با توجه به مقیاس انتخاب شده به دست می‌آوریم مثلا $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ در این حالت شیب نمودار برابر است با:

$$\text{شیب خط} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

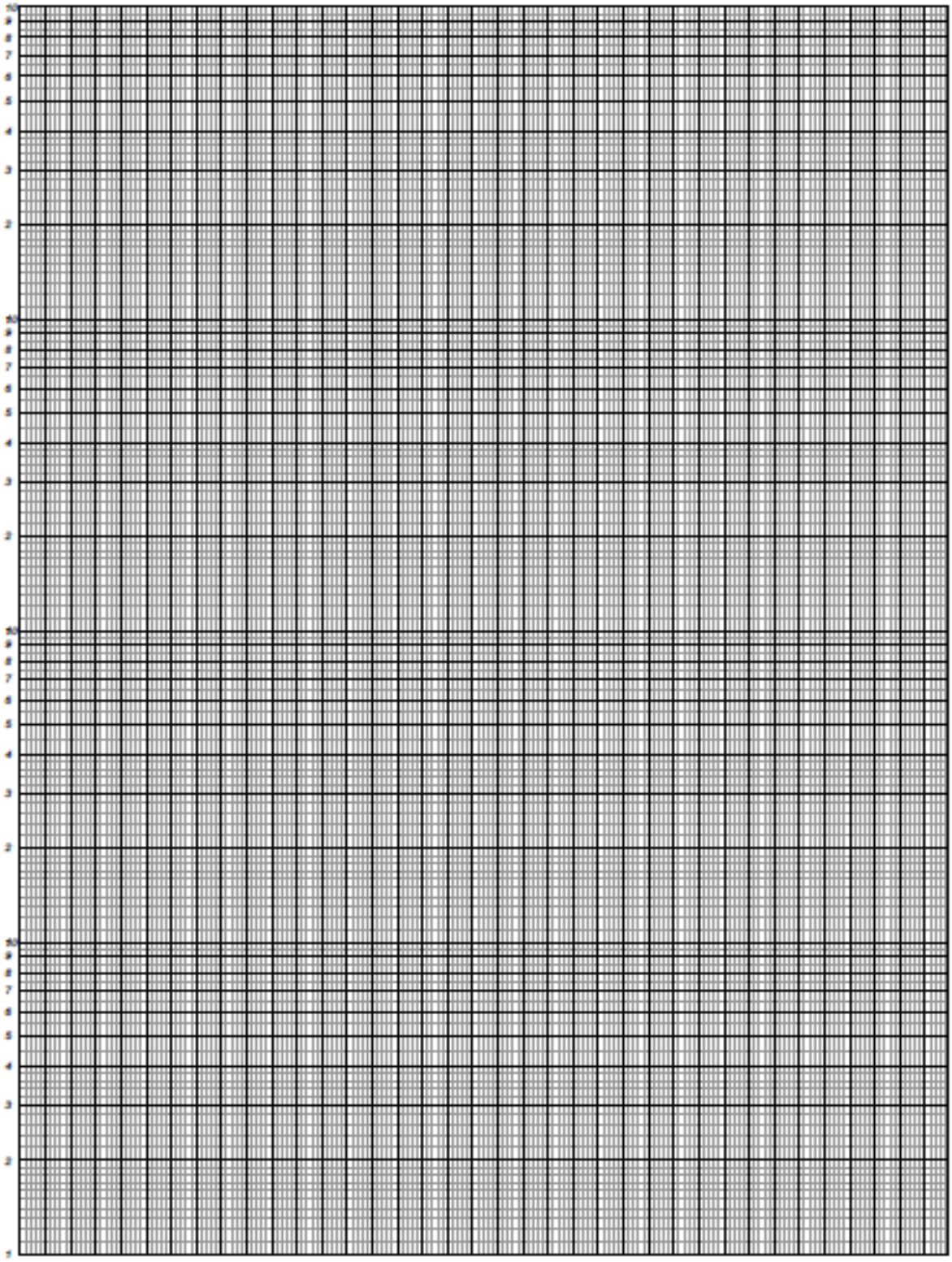
برخلافِ اینکه در ریاضی شیب خط برابر تانژانت زاویه‌ای است که خط با محور افقی می‌سازد و کمیتی بدون یکا است، در فیزیک شیب خط کمیتی فیزیکی و دارای واحد است. چون x, y هر دو دارای یکا و کمیتهای فیزیکی هستند. بطوری‌که با تغییر واحدها در روی هریک از محورها که زاویه خط با محور x تغییر می‌کند، شیب واقعی و فیزیکی نمودار تغییر نخواهد کرد.

در اینجا شکل سه نوع کاغذ که برای رسم نمودار استفاده می‌شود، برای آشنایی شما آورده شده است.

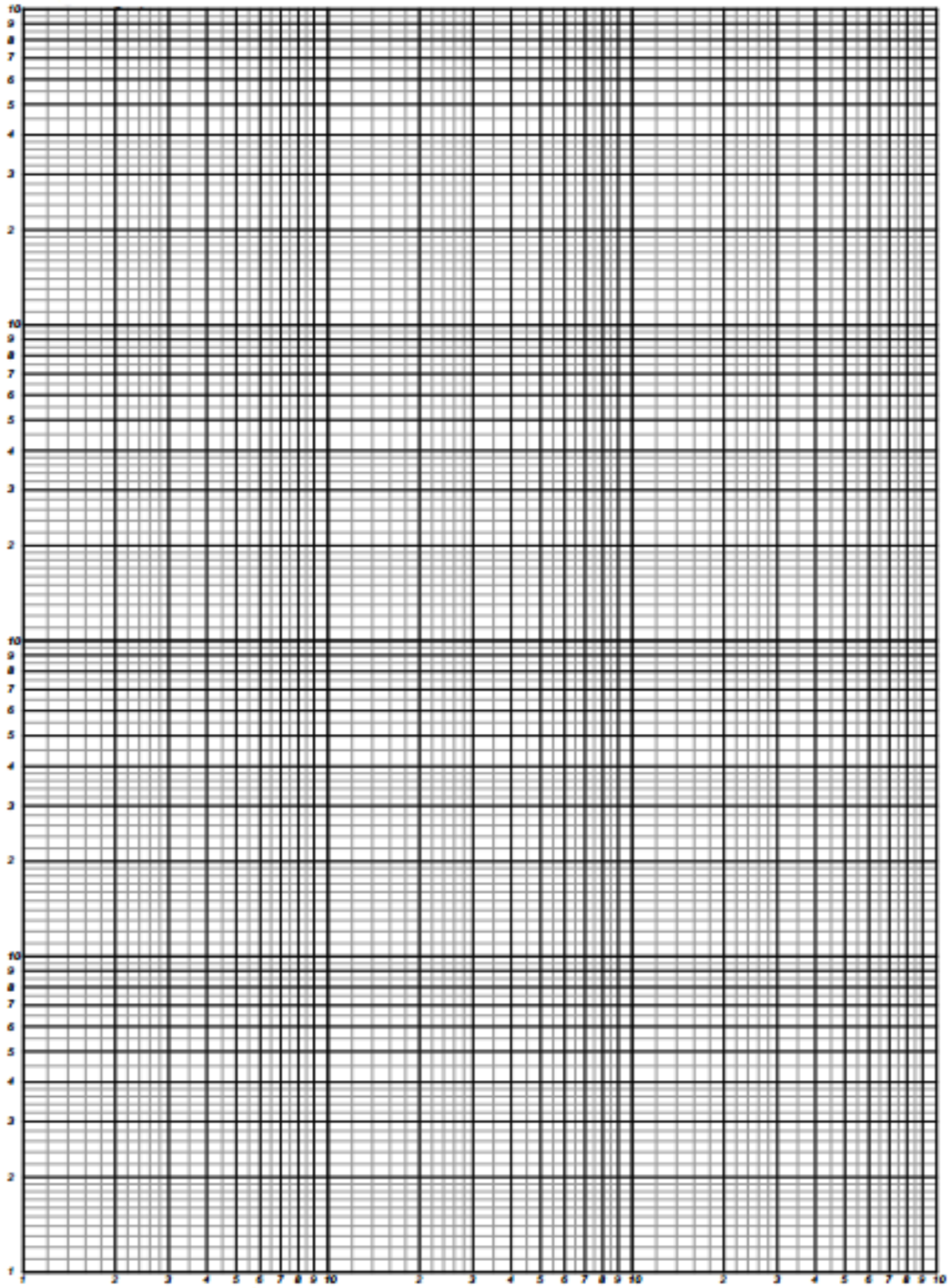
کاغذ میلی‌متری:



کاغذ نیمه لگاریتمی:



کاغذ تمام لگاریتمی:



توابع غیرخطی و نمایی و نمودار در کاغذهای نیمه لگاریتمی و تمام لگاریتمی:

در برخی مواقع توابع به شکل نمایی هستند. این توابع به صورت $y = ce^{kx}$ هستند. اگر از این رابطه لگاریتم طبیعی بگیریم آنگاه:

$$\ln y = \ln c + kx$$

که در آن $\ln c$ عددی ثابت است و با تغییر x, y به صورت لگاریتمی تغییر خواهد کرد. اگر نمودار این معادله را رسم کنیم در کاغذ میلی‌متری به صورت خط راست نمی‌شود و برای اینکه نمودار را به صورت خط راست درآوریم ، مقادیر x و $\ln y$ را روی محورها منتقل می‌کنیم و برای این کار از کاغذهای نیمه لگاریتمی که یک محور معمولی با مقیاس خطی یا میلی‌متری و یک محور با تقسیمات لگاریتمی دارند، استفاده می‌کنیم.

همچنین در مواردی که تابع به صورت $y = ax^n$ است، اگر از طرفین معادله لگاریتم طبیعی بگیریم، آنگاه:

$$\ln y = \ln a + n \ln x$$

خواهد شد. همانطوری‌که می‌بینید x, y به شکل لگاریتمی در می‌آیند و بنابراین $\ln x$ و $\ln y$ را روی محورها منتقل می‌کنیم و به این ترتیب نمودار به شکل خط راست می‌شود و در این حالت از کاغذهای تمام لگاریتمی استفاده می‌کنیم که هر دو محور براساس تقسیم‌بندی لگاریتمی می‌باشند.

واحدهای برخی کمیتها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر:

با چهار کمیت گرما، نیرو، فشار و کار ، همواره در آزمایشگاه سروکار داریم:

الف) نیرو: یکای نیرو در دستگاه بین‌المللی (SI) ، نیوتن است و آن نیرویی است که به جرم یک کیلوگرم وارد می‌شود تا جسم شتابی برابر m/s^2 ۱ بگیرد. یکای نیرو در دستگاه (CGS) دین است و آن نیرویی است که به جرم یک گرم وارد می‌شود تا شتابی برابر cm/s^2 ۱ بگیرد. از مقایسه این دو رابطه دریافت می‌شود که هر نیوتن برابر dyne $۱۰^۵$ است.

برای نیرو واحدهای کیلوگرم نیرو و گرم نیرو نیز به کار می‌رود که هر کیلوگرم نیرو برابر g نیوتن یعنی به طور میانگین N ۹/۸ است و هر گرم نیرو برابر g دین یعنی به طور میانگین ۹۸۰ دین است. از آنجاییکه g ثابت نیست، دو یکای گرم نیرو و کیلوگرم نیرو نیز با آن تغییر می‌کنند. به عنوان مثال ، یک کیلوگرم نیرو در قطب ۹/۸۳ نیوتن و در استوا ۹/۷۸ نیوتن است.

ب) فشار: در دستگاه SI واحد فشار پاسکال است و آن فشار نیروی یک نیوتن بر یک مترمربع است و در دستگاه CGS واحد آن "باری" است و فشار نیروی یک دین بر یک سانتی‌متر است و هر پاسکال ۱۰ باری است. واحدهای دیگر فشار Cm-Hg (سانتی‌متر–جیوه)، mm-Hg (میلی‌متر–جیوه)، کیلوگرم نیرو بر سانتی‌مترمربع و تور است. روابط زیر بین واحدهای فشار برقرار است:

$$1 \text{ atm} = 10^5 \text{pa} = 76 \text{ Cm-Hg} = 760 \text{ mm-Hg}$$

$$1 (\text{Kg f/Cm}^2) = 9.8 * 10^5 \text{ bari} = 9.8 * 10^4 \text{ p}a$$

$$1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyne/Cm}^2$$

$$1 \text{ turr} = 1 \text{ mm-Hg} = \frac{1}{760} \text{ atm}$$

ج) کار: واحد کار در دستگاه SI ، ژول و در CGS اِرگ است. هر ژول برابر erg $۱۰^۷$ است. واحد دیگر کار کیلوگرم- متر است که برابر ۹/۸ ژول است.

د) گرما: در مورد گرما علاوه بر ژول واحدهای کالری و کیلوکالری و تِرمی نیز به کار می‌رود.

$$1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J} \quad , 1 \text{ termi} = 10^6 \text{ cal} \quad , 1 \text{ Kcal} = 10^3 \text{ cal}$$

اندازه‌گیری۱

اهداف آزمایش:

آشنایی با ابزار اندازه‌گیری طول

تئوری آزمایش:

شاید تاکنون شنیده باشید که از فیزیک به عنوان علم اندازه‌گیری یاد می‌کنند و همانطور که می‌دانید برای اینکه پدیده‌های دور وبر خود را بهتر بشناسیم باید اطلاع درستی از آنها داشته باشیم. از این‌رو آشنایی با ابزار اندازه‌گیری و روشهای آن اساس کار آزمایشگاهی است. اندازه‌گیری طول، زمان و جرم از مهمترین کارها و پایه بیشتر سنجش‌هاست. انتخاب واحد اندازه‌گیری یا استاندارد مناسب و مقایسه کمیت اندازه‌گرفتنی با واحد انتخاب شده کارهای مهمی در اندازه‌گیری هستند.

اندازه‌گیری طول:

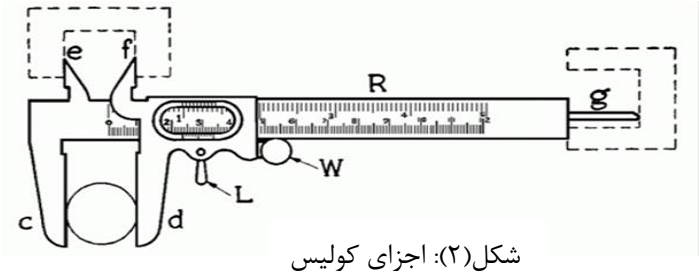
ساده‌ترین وسیله اندازه‌گیری طول، خط‌کش و مترنواری است. خط‌کش باید تقسیم‌بندی یکنواخت و مطابق با واحد استاندارد داشته باشد. پهنای خط اندازه‌گیری به اندازه‌ای باشد که بتوان با درجه‌های آن به خوبی اندازه را خواند. در اندازه گیری با خط‌کش ممکن است دو خطای انسانی رخ بدهد. ممکن است صفر خط‌کش منطبق بر لبهٔ طولِ جسم مورد اندازه‌گیری قرار نگیرد که برای پرهیز از این خطا بهتر است به موازات صفر خط‌کش یک تکیه‌گاه برای آن در نظر بگیریم. دیگر اینکه ممکن است امتداد دید ناظر بر درجه‌ای که باید خوانده شود، عمود نباشد. در این حالت خط‌کش اندازه طول را کمتر یا بیشتر نشان می‌دهد.

کولیس: وسیله‌ای است برای اندازه‌گیری طول، ضخامت، قطرهای داخلی و خارجی، عمق حفره‌ها و شکافها. از دو قسمت، خط‌کش مدرج (بخش ثابت) و وِرنیه (بخش متحرک) تشکیل شده است. خط‌کش برحسب میلی‌متر درجه‌بندی می‌شود و باید دقت کنید که حتماً برحسب میلی‌متر بخوانید نه سانتی‌متر. و وِرنیه دارای درجه‌بندی کوچک‌تر از میلی‌متر است که مقدارش به دقت کولیس بستگی دارد.

شکل (۱): کولیس

در این آزمایشگاه سه نوع کولیس با دقت‌های ۰/۱ و ۰/۰۵ و ۰/۰۲ در اختیار دارید. روی ورنیه‌ی مربوط به کولیس با دقت ۰/۱ فاصله‌ای برابر با ۹ mm به ۱۰ قسمت مساوی تقسیم شده است. پس هر درجه روی وِرنیه ۰/۹ میلی‌متر و از یک میلی‌متر به اندازه‌ی۰/۱= ۰/۹ − ۱ میلی‌متر کوچکتر است. ۰/۱ mm نشان دهندهٔ میزان دقت یا حساسیت دستگاه است. در صورتیکه روی ورنیه فاصله‌ی ۱۹mm را به ۲۰ قسمت مساوی تقسیم کنیم آنگاه هر درجه روی ورنیه از ۱ میلی‌متر به اندازه‌ی ۰/۰۵ mm کوچکتر خواهد شد. یعنی دقت وسیله برابر با ۰/۰۵ mm است. همچنین در برخی کولیس‌ها، فاصله‌ی ۴۹ mm را روی ورنیه به ۵۰ قسمت تقسیم می‌کنند که در این صورت دقت آن کولیس برابر با ۰/۰۲ mm است.

هر قسمت کولیس یعنی خط‌کش و ورنیه دارای یک پاشنه(cوd) و یک شاخک(eوf) هستند بطوریکه هرگاه پاشنه‌ها به‌هم بچسبند، شاخک‌ها روی هم می‌افتند. صفر ورنیه نیز در این حالت درست زیر صفر خط‌کش قرار می‌گیرد. در سمت پشتِ خط‌کش کولیس، یک تیغهٔ نازک(g) قرار دارد که به ورنیه وصل است و با آن می‌توان عمق را سنجید.



شکل(۲): اجزای کولیس

با تکان دادن بخش متحرک (W) روی خط‌کش

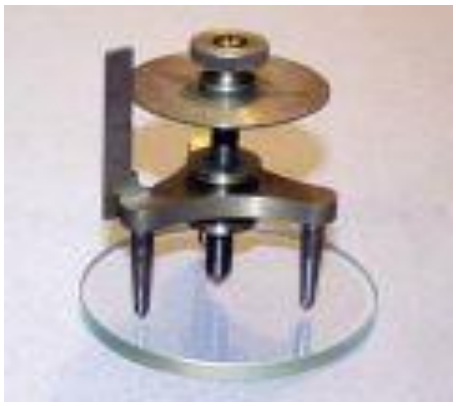
می‌توان اندازه‌گیری را انجام داد و برای خواندن اندازه، اگر صفر ورنیه دقیقاً مقابل یکی از درجه‌های خط‌کش قرار گیرد اندازهٔ دقیق برحسب میلی‌متر به دست می‌آید ولی چنانچه صفر ورنیه از مقابل درجه‌ای گذشته باشد ولی به درجهٔ بعدی نرسیده باشد آنگاه باید دید که چه درجه‌ای از ورنیه دقیقاً در مقابلِ یکی از درجه‌های خط‌کش قرار گرفته است سپس بصورت زیر آن را می‌خوانیم:

اگر صفر ورنیه از عدد p روی خط‌کش گذشته باشد و خط qام از ورنیه مقابل یکی از درجه‌های خط‌کش باشد آنگاه عدد مورد نظر برابر با $p + \frac{1}{n} q$ میلی‌متر خواهد شد. که در این رابطه $\frac{1}{n}$ برابر با دقت دستگاه کولیس است. برای اینکه هنگام خواندن قسمت متحرک تکان نخورد، یک قفل بر روی ورنیه در نظر گرفته شده است تا بتوان پیش از اقدام به خواندن، آن قسمت را با قفل ثابت کرد.

شکل(۳): ریزسنج یا میکرومتر

ریزسنج یا میکرومتر: ابزاری است برای اندازه‌گیری قطر سیمهای نازک یا ضخامت ورقه‌های نازک، که با دقت بسیار زیادی اندازه‌گیری را برحسب ۰/۰۱ میلی‌متر انجام می‌دهد. ساختمان این وسیله برحسب گردش پیچی با گامی برابر ۰/۵ میلی‌متر درون یک استوانه مدرج توخالی طراحی شده است. به این صورت که استوانه مدرج درجه‌بندی شده برحسب ۱mm یا ۰/۵ mm به یک کمان فلزی وصل است و در یک انتهای این کمان یک زایده به نام سندان یا فکِ ثابت ریزسنج قرار دارد و در انتهای دیگر کمان، میله متصل به استوانه قادر به حرکت است (فکِ متحرک ریزسنج) که جسم مورد نظر برای اندازه‌گیری بین این دو فک قرار می‌گیرد. بر روی این استوانه یک پوسته استوانه‌ای قرار دارد که با پیچی که درون استوانه مدرج تعبیه شده، روی استوانه مدرج حرکت می‌کند. لبه‌ی پوسته استوانه‌ای به ۵۰ قسمت تقسیم می‌شود و با هر دوری که می‌زند موجب نشان دادن ۰/۵mm روی استوانه مدرج می‌شود که به اصطلاح می‌گویند گام پیچ ۰/۵mm است. البته در بعضی ریزسنج‌ها گام پیچ ۱ میلی‌متر است. در ریزسنج‌های با گام پیچ ۱ میلی‌متر ، دور پوسته به ۱۰۰ قسمت تقسیم می‌شود که هر قسمت برابر ۰/۰۱ mm است و در ریزسنج‌های با گام پیچ ۰/۵ mm ، دور پوسته به ۵۰ قسمت تقسیم می‌شود که هر قسمت در این ابزار نیز برابر ۰/۰۱mm است (چون $\frac{0.5}{50} = \frac{1}{100}$ است). بنابراین دقت هر دو نوع ریزسنج برابر با ۰/۰۱ mm است.

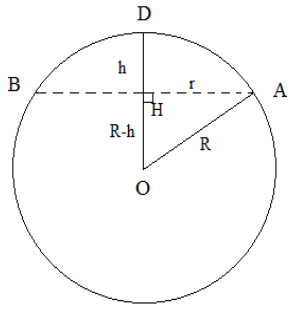
روشِ اندازه‌گیری با ریزسنج بدین‌گونه است که جسم را بین فک‌های ثابت و متحرک ریزسنج قرار می‌دهند و پیچ هرزگرد را که در انتهای استوانه‌ی مدرج قراردارد آنقدر می‌پیچانند تا میله متحرک و سندان کاملاً به طرفین جسم بچسبد و هرزگرد آزاد شود. آنگاه مقدار خارج شده از زیر پوسته استوانه‌ای را بر روی استوانه مدرج برحسب میلی‌متر می‌خوانند سپس برای خواندن صدم اندازه‌گیری به صفر پوسته نگاه می‌کنند چنانچه صفر بر روی خط تقسیم استوانه مدرج باشد اندازه‌گیری دقیقاً برحسب میلی‌متر خواهد بود، اما اگر صفر پوسته در مقابل خط تقسیم نباشد آنگاه درجه‌های روی پوسته را که مقابل خط تقسیم قرارگرفته است، برحسب صدم میلی‌متر با درجه استوانه مدرج برحسب میلی‌متر جمع می‌کنند.



شکل(۴): گوی‌سنج یا اسفرومتر

اِسفرومتر: ابزاری است برای اندازه‌گیری شعاع کره که از آن در آزمایشگاه ها برای اندازه‌گیری شعاع انحنای سطح کروی مانند آینه‌ها و عدسی‌ها استفاه می‌کنند. همچنین می‌توان آن‌را برای اندازه‌گیری ضخامت تیغه‌هایی با سطوح صاف و موازی نیز به کار برد. به اسفرومتر، گوی‌سنج نیز می‌گویند. ساختمان گوی‌سنج عبارت از ریزسنجی است که از یک طرف به سه پایه ثابت و از طرف دیگر به یک صفحهٔ مدرج می‌رسد. همچنین بر روی یکی از پایه‌ها خط‌کش مدرجی قرار دارد و علاوه بر این‌ها، در استوانه ریزسنج یک پایه متحرک قرار دارد که با حرکت کردن صفحه مدرج آن هم به سمت بالا یا پایین حرکت می‌کند. البته قابل ذکر است که از ریزسنج

فقط قسمتهای استوانه مدرج و پوسته مدرج آن در اینجا به کار گرفته شده است.
نحوه‌ی کار گوی‌سنج بدین گونه است که با هر دور چرخیدن صفحه مدرج، به اندازهٔ ۰/۵ mm روی استوانه مدرج به جلو یا عقب می‌رویم، به عبارتی گام استوانه ۰/۵ mm است. بنابراین با دو بار چرخیدن صفحه مدرج، به اندازهٔ ۱ mm روی استوانه مدرج و خط‌کش به بالا یا پایین می‌رویم. بنابراین روی خط‌کش اندازه را برحسب میلی‌متر، روی استوانه مدرج تا ۰/۵ mm دقت و روی پوسته استوانه تا دقت ۰/۰۱ mm را می‌خوانیم و چنانچه درجهٔ پوسته دقیقاً منطبق بر خط تقسیم استوانه نباشد آنگاه باید به سراغ صفحهٔ مدرج رفت. این صفحه به ۵۰۰ قسمت مساوی تقسیم شده است. از روی صفحه عدد مورد نظر را می‌خوانید و بر ۱۰۰۰ تقسیم می‌کنید تا عدد مورد نظر برحسب دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر به دست آید و با اعداد بدست آمده از قسمت خط‌کش و ریزسنج دستگاه جمع می‌کنیم تا عدد نهایی برحسب دقت ۰/۰۰۱ mm بدست آید. برای کارکردن با اسفرومتر به چند نکته باید دقت کرد:
هنگامی‌که صفحه مدرج را طوری می‌چرخانید که پایه متحرک به سمت بالا حرکت می‌کند، درجه‌های خط‌کش هم به سمت بالا افزایش پیدا می‌کنند و در این حالت برآمدگی یک جسم کروی را محاسبه خواهید کرد. به عبارت دیگر سهم عرق چین را برای یک کره یا آینهٔ محدب بدست می‌آورید و در صورتی که برعکس بچرخانیم سهم عرق چین را برای یک آینهٔ مقعر به دست می‌آورید.
هنگامی که اسفرومتر را برای خواندن تقعر یک جسم به کار می‌برید در صفحه مدرج جهت چرخش از صفر به سمت بزرگتر شدن اعداد است ولی چنانچه تحدب جسمی را بخواهید به‌دست آورید جهت چرخش صفحه مدرج به گونه‌ای است که از صفر (یا به عبارت بهتر ۵۰۰) به سمت کوچکتر شدن است پس باید درجهٔ مربوطه را از ۵۰۰ کم کرد تا درجه درست را خواند. این نکته را نیز در نظر بگیرید که سهم عرق‌چین را اندازه گرفته‌اید نه شعاع را و برای محاسبه شعاع باید از رابطهٔ زیر استفاده کنید:



شکل(۵): محاسبه شعاع عدسی

$$(R-h)^2 + r^2 = R^2$$
$$\rightarrow 2Rh = h^2 + r^2 \quad \rightarrow R = \frac{h^2+r^2}{2h}$$

r در این رابطه برابر فاصله دو پایه ثابت گوی سنج تقسیم بر $\sqrt{3}$ است .
که برای بدست آوردن R از قضیه فیثاغورث در OHA (مثلث قائم‌الزاویه) استفاده کرده‌ایم.
همانطوری‌که می‌بینید، کمان BDA عرق‌چین مورد اندازه‌گیری و h اندازه خوانده شده با اسفرومتر است که همان سهم عرق‌چین می‌باشد.
در برخی اسفرومترها تیغهٔ خط‌کش و صفحه مدرج در دو طرف صفر درجه‌بندی شده‌اند. برای اندازه گیری h ابتدا باید گوی‌سنج را در سطحی صاف بگذارید و پایه متحرک را به اندازه‌ای پایین بیاورید که با سطح صاف تماس پیدا کند و درجه مربوطه را یادداشت نمایید. سپس وسیله مورد اندازه‌گیری را با گوی‌سنج اندازه گرفته و درجه آن را هم یادداشت نمایید. با محاسبه تفاوت این دو اندازه می‌توانید مقدار مورد نظر برای ابزارتان را به دست آورید. این کار برای کم کردن خطای اندازه‌گیری انجام می‌شود.

وسایل مورد نیاز: کولیس، ریزسنج، اسفرومتر، کتاب، سیم، بِشر، متر نواری، گلوله فلزی و اجسام دلخواه دیگر برای اندازه‌گیری

روشِ آزمایش و پرسش‌ها:

۱- با متر نواری طول میز را به تعداد افراد گروه بخوانید. سپس خطای مطلق و خطای نسبی و درصد خطای نسبی را محاسبه کنید. با خط‌کش طول و عرض و ارتفاع یک کتاب را اندازه بگیرید. توجه کنید که برای ارائه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده باید داده‌ها در جدول تنظیم شوند.

۲- با استفاده از کولیس ۰/۱ قطر گلوله را به تعداد نفرات گروه بخوانید و خطای مطلق و خطای نسبی و درصد خطا را محاسبه کنید. (داده‌ها در جدول ارائه شوند.)

۳- عمق بِشر را با استفاده از کولیس ۰/۰۲ به تعداد نفرات گروه بخوانید و خطای مطلق و خطای نسبی و درصد خطا را محاسبه کنید. (داده‌ها در جدول ارائه شوند.)

۴- ضخامت کاغذ و سیم را به تعداد نفرات گروه با ریزسنج به دست آورید و خطای مطلق و خطای نسبی و درصد خطا را محاسبه کنید. (داده‌ها در جدول ارائه شوند.)

۵- قطر کتاب را با کولیس ۰/۰۵ بخوانید و با تقسیم بر تعداد صفحات، ضخامت یک برگ را تعیین کنید و با روش شماره ۴ مقایسه کنید.

۶- قطر گلوله‌ای را با ریزسنج اندازه بگیرید و حجم آن را به دست آورید. با توجه به دقت اندازه‌گیری ریزسنج اعداد با معنی حجم را معلوم نمایید.

۷- در اندازه‌گیری طول با استفاده از خط‌کش و متر نواری در آزمایش‌های بالا چگونه می‌توان خطای اندازه‌گیری را به حداقل رساند؟

اندازه‌گیری ۲

اهداف آزمایش:

آشنایی با ابزار اندازه‌گیری زمان، جرم، حجم، تعیین جرم حجمی و روش کار با این ابزار

تئوری آزمایش:

همانطوری‌که می‌دانید رایج‌ترین وسیله اندازه‌گیری جرم، ترازو و برای زمان، ساعت، زمان‌سنج یا کُرنومتر است.

اندازه‌گیری زمان:

برای اندازه‌گیری زمان، با توجه به دقت مورد نظر می‌توان از زمان‌سنجهای متفاوت استفاده کرد. کُرنومترهای آزمایشگاهی با دقت ۰/۱ ثانیه یا ۰/۲ ثانیه و ساعتهای الکترونیکی- دیجیتالی معمولاً با دقت ۰/۱ ، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ ثانیه قادر به اندازه‌گیری هستند.

اندازه‌گیری جرم:

برای تعیین جرم اجسام از ابزاری به نام ترازو استفاده می‌کنند که جرم اجسام را با مقایسه با وزنه‌های معلوم تعیین می‌کنند و اساس ساختمان ترازوها معمولاً برحسب ویژگی اهرم است. ترازوهای شاهین‌دار، دارای میله‌ای به نام شاهین و دو کفه متصل به شاهین و تکیه‌گاهی در وسط شاهین هستند، و عقربه‌ای نیز در مقابل صفحه‌ای مدرج قرار دارد که میزان انحراف شاهین را نشان می‌دهد. وضعیت تعادل در ترازو هنگامی برقرار است که عقربه در مقابل صفر صفحه مدرج باشد. حساسیت ترازو به میزان انحراف نسبت به مقدار عامل بوجود آورنده انحراف گفته می‌شود برای تعیین جرم می‌توان از ۳ روش استفاده کرد:

۱- روش ساده ۲- روش بوردا ۳- روش گوس

روش ساده: در این روش در یکی از کفه‌ها جسم و در کفهٔ دیگر آنقدر وزنه می‌گذاریم تا عقربه به جای ایست اول خود بازگردد.

روش بوردا: این روش در ترازوهایی که نوار جرم ندارند بکار می‌رود. به این ترتیب که جسم را روی یک کفه قرار داده و در کفه مقابل آنقدر براده فلز می‌ریزند تا دو کفه هم تراز گردند. حالا در حالیکه براده‌ها هنوز در کفه دوم هستند، جسم را از روی کفه اول برمی‌داریم و به جای جسم آنقدر وزنه اضافه می‌کنیم تا دوباره تعادل برقرار گردد. جرم جسم برابر جرم وزنه ها می‌باشد.

روش گاوس: در یک کفه جسم و در کفه دیگر وزنه را می‌گذاریم تا تعادل برقرار شود. نقطه ایست را می‌خوانیم، سپس جای آن دو را عوض می‌کنیم و مقدار وزنه را تغییر می‌دهیم تا دوباره تعادل برقرار شود. اگر مقدار وزنه‌ها در دو حالت M_1 و M_2 باشد جرم جسم برابر با $M = \sqrt{M_1 . M_2}$ می‌شود.

علاوه بر ترازوی شاهین‌دار، ترازوهای الکترونیکی نیز وجود دارند که دقت بسیار بالایی دارند.

علاوه بر استفاده از ترازو در اندازه‌گیری جرم جامدها می‌توان جرم مایعات را هم با ترازو اندازه گرفت. به این صورت که ابتدا جرم ظرف خالی و خشک را اندازه گرفت (m_1) سپس جرم ظرف به همراه مایع ریخته شده داخل آن را اندازه گرفت (m_2) . تفاضل این دو مقدار، برابر جرم مایع می‌باشد.

اندازه‌گیری حجم:

برای اندازه‌گیری حجم کافی است مثلاً قطر گلوله فولادی را با استفاده از کولیس یا اِسفرومتر به‌دست آورد. سپس از رابطهٔ $V = \frac{4}{3}\pi(\frac{d}{2})^3$ حجم گلوله را حساب کرد (d قطر گلوله است). همچنین می‌توان از روش غوطه‌ور کردن جسم در آب نیز حجم آن‌را به دست آورد. نخست در داخل استوانه مدرج تا حجم

معین V_1 مقداری مایع مانند آب می‌ریزیم سپس جسم را با نخی در داخل آب غوطه‌ور می‌کنیم و حجم آب و جسم را V_2 می‌خوانیم. حجم جسم از تفاضل این دو به‌دست می‌آید.

اندازه‌گیری وزن:

برای اندازه‌گیری وزن از ابزاری به نام نیروسنج استفاده می‌کنیم. ابتدا باید صفر نیروسنج را تنظیم کنید. سپس برای اندازه‌گیری وزن گلوله‌های فولادی از کفه استفاده کرد. مقدار اندازه گرفته شده برحسب واحد نیوتن، گرم نیرو و یا کیلوگرم نیرو می‌تواند باشد.

تعیین جرم حجمی یا چگالی:

ابتدا از روش‌های گفته شده جرم و حجم مورد نظر را به‌دست می‌آوریم سپس از رابطهٔ $\rho = \frac{m}{V}$ ، جرم حجمی یا چگالی جسم را به دست می‌آوریم. در این رابطه ρ جرم حجمی است و واحد آن gr/cm^3 یا kg/m^3 است.

وسایل مورد نیاز: زمان‌سنج، ترازوی دوکفه‌ای، ترازوی دیجیتالی، بِشر و استوانه‌ی مدرج، متر نواری، گلوله فلزی، نخ خشک و اجسام دلخواه دیگر برای اندازه‌گیری

روشِ آزمایش و پرسش‌ها:

۱- ابتدا نقطه‌ی ایست ترازوی دوکفه‌ای را به‌دست آورید و حساسیت ترازو را تعیین کنید. سپس جرم گلوله را به تعداد افراد گروه اندازه بگیرید. خطای مطلق و خطای نسبی و درصد خطا را محاسبه کنید. (داده‌ها در جدول ارائه شوند.)

۲- جرم سنگ را با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه بگیرید.

۳- حجم سنگ را با روش غوطه‌ور کردن در آب تعیین کنید. سپس با استفاده از رابطه مربوطه جرم حجمی آن را به دست بیاورید.

۴- خطای مطلق و خطای نسبی چگالی را به روش لگاریتمی محاسبه کنید.

۵- وزن گلوله را با استفاده از نیروسنج مناسب به تعداد افراد گروه اندازه‌گیری نمایید. مقدار اندازه‌گیری شده را برحسب N(نیوتون)، Kgf(کیلوگرم نیرو)، grf(گرم نیرو) بنویسید. رابطهٔ آنها را هم بنویسید. خطای اندازه‌گیری خود را بدست آورید.

تعادل

اهداف آزمایش:

تعیین برآیند نیروها، بررسی تعادل جسمی که تحت تأثیر چند نیروی متقاطع قرار دارد.

تئوری آزمایش:

بعضی از کمیت‌های فیزیکی فقط با یک عدد و یک علامت مشخص می‌شوند. به این کمیت‌ها که تابع جبر معمولی هستند، اسکالر می‌گویند. مانند دما، جرم و ... . ولی دسته‌ی دیگری از کمیت‌های فیزیکی هستند که برای مشخص کردنشان علاوه بر مقدار (عدد)، باید جهتشان نیز مشخص شود. به این کمیت‌ها بردار گویند. کمیت‌های برداری از جبر برداری تبعیت می‌کنند.

تعریف بردار:

از نگاه هندسی بردار پاره‌خط جهت‌داری است که طول آن نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی یک کمیت و جهت و راستای آن، جهت و راستای کمیت را نشان می‌دهد. معمولاً برای نشان دادن برداری بودن یک کمیت آن را به شکل $\vec{a}$ می‌نویسند و هرجا منظور مقدار کمیت برداری است آن را به شکل $|\vec{a}|$ نشان می‌دهند.

جمع بردارها:

برای جمع کمیت‌های برداری چند روش وجود دارد که مختصراً به آنها اشاره خواهد شد.

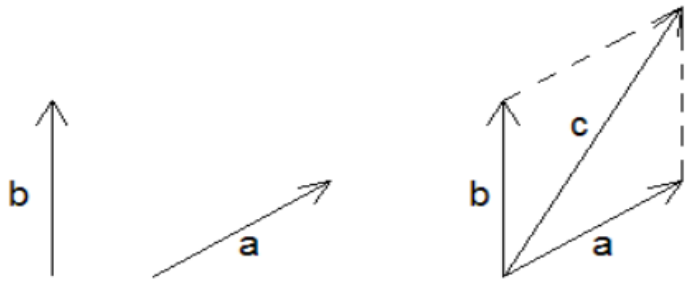
الف- روش متوازی‌الاضلاع:

در این روش از یک نقطه دو بردار هم‌سنگِ بردارهایی که می‌خواهیم با هم جمع کنیم، رسم می‌کنیم. قطر متوازی‌الاضلاعی که از این دو بردار تشکیل می‌گردد حاصل‌جمع این دو بردار است.

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

$$|\vec{c}|^2 = |\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2 + 2|\vec{a}||\vec{b}|\cos\alpha \qquad (1)$$

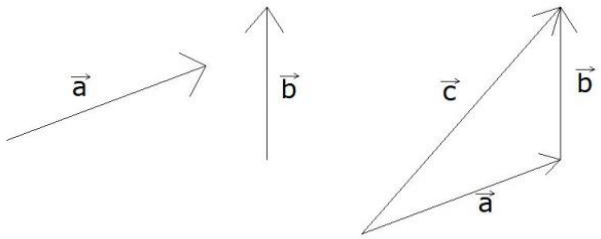
که α زاویه‌ی بین دو بردار است.



شکل(۱): جمع دو بردار به روش متوازی‌الاضلاع

ب- روش مثلثی یا چندضلعی:

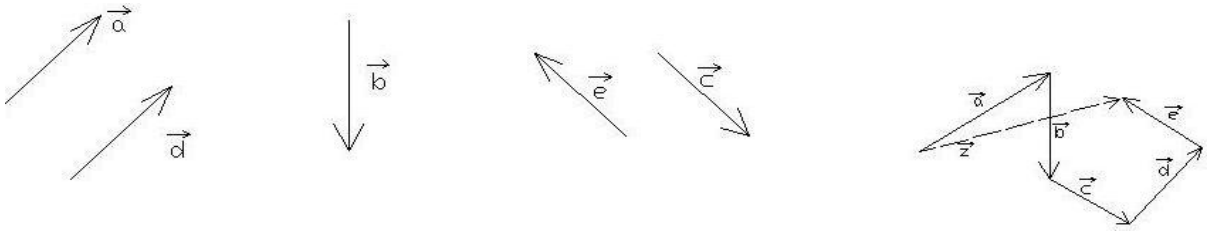
در این روش از یک نقطه‌ی دلخواه برداری هم‌سنگ یکی از بردارها رسم می‌کنیم و سپس از انتهای آن برداری هم‌سنگ بردار دوم با درنظرگرفتن زاویه‌ی بین دو بردار، رسم می‌کنیم. اگر ابتدای بردار اول را به انتهای بردار دوم وصل کنیم حاصل‌جمع دو بردار بدست می‌آید. $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$



شکل(۲): جمع دو بردار به روش مثلثی

اگر بخواهیم جمع تعداد زیادی بردار را به این روش انجام دهیم کافی است از انتهای هر بردار، برداری هم‌سنگ با بردار بعدی رسم کنیم. سپس از انتهای بردار اول به انتهای بردار آخر وصل کنیم. این بردار جمع کل بردارهای قبلی است که طول آن نشان‌دهنده‌ی مقدار برآیند همه‌ی بردارها و جهت آن نیز نشان دهنده‌ی جهت بردار برآیند است.

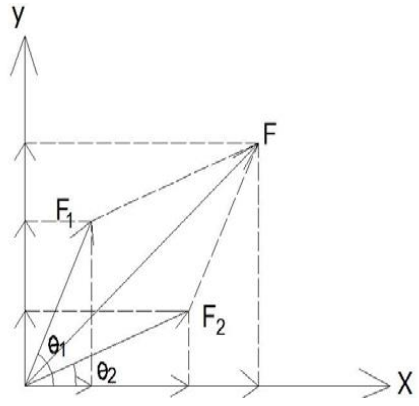
$$\vec{z} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \vec{d} + \vec{e}$$



شکل(۳): جمع چند بردار به روش مثلثی

ج- روش تجزیه:

در این روش ابتدا تمام بردارها را در یک دستگاه مختصات رسم می‌کنیم، طوری‌که شروع تمام بردارها از مبدأ دستگاه مختصات باشد. سپس تک تک بردارها را بر روی محورها تجزیه می‌کنیم. برای این منظور از روابط (۲) استفاده می‌کنیم. بعد از آن جمع جبری مؤلفه‌های افقی و عمودی را محاسبه می‌کنیم. به این ترتیب تمام بردارها به یک مؤلفه‌ی قائم ($\vec{F}_y$) و یک مؤلفه‌ی افقی ($\vec{F}_x$) کاهش می‌یابد. برآیند این دو بردار قائم را به روش فیثاغورس حساب می‌کنیم. به این ترتیب برآیند تمام بردارها بدست می‌آید.(شکل (۴و۵))



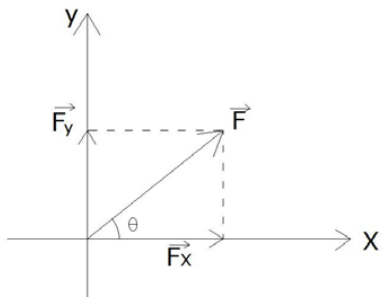
شکل(۴): محاسبه برآیند به روش تجزیه

$$F_x = F\cos\theta$$
$$F_y = F\sin\theta \qquad (۲)$$

اندازه‌ی بردار برآیند از رابطه‌ی (۳) و زاویه‌ی آن با محور xها از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \qquad (۳)$$

$$\tan\theta = \frac{F_y}{F_x} \qquad (۴)$$



شکل(۵)

قسمت اول: نیرو و برآیند نیروهای وارد بر یک جسم صلب

نیرو نیز کمیتی است برداری و از قوانین حاکم بر بردارها تبعیت می‌کند و مانند هر کمیت برداری دیگری اندازه و جهت دارد. هرگاه چند نیرو به جسم صلبی وارد شوند، شرط تعادل جسم این خواهد بود که برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر شود و گشتاور کل نیز برابر با صفر گردد. به عبارت دیگر هر جسم صلب در صورتی در حال تعادل است که هم شتاب خطی مرکز جرم آن و هم شتاب زاویه‌ای آن صفر باشد. طبق این تعریف جسم می‌تواند کاملاً ساکن باشد یا با سرعت ثابت خطی، یا با سرعت ثابت زاویه‌ای در حرکت باشد. بنابراین طبق این تعریف شرط تعادل این نیست که جسم نسبت به ناظر ساکن باشد بلکه کافی است جسم شتاب نداشته باشد. البته اگر جسم صلب در حال تعادل ساکن باشد ($V = 0$ یا $\omega = 0$) می‌گویند جسم در حال تعادل ایستا است.

چنانچه دو یا چند نیرو در یک نقطه بر جسم اثر کنند می‌توان به جای آن‌ها یک نیرو قرار داد که آن را برآیند آن نیروها می‌نامیم. شرط اول برای آن که جسم صلب تحت تأثیر این نیروها شتاب نداشته باشد این است که برآیند نیروهای خارجی وارد بر جسم صفر باشد، ($\sum F_{ext} = 0$) در این‌صورت جسم شتاب خطی نخواهد داشت.

وسایل مورد نیاز:

میز مدرج، قرقره برای نصب روی میز نیرو، پایه، نخ، وزنه‌های مختلف

روش آزمایش و پرسش‌ها:

شکل(۶): میز نیرو

میز نیرو :

میز نیرو (شکل ۶) صفحه‌ای دایره‌ای شکل است که از ۰ تا ۳۶۰ درجه مدرج شده است. این صفحه روی پایه عمودی قرارگرفته است و بوسیله‌ی سه پیچ می‌توان ارتفاع پایه‌ها را تغییر داد و میز نیرو را تراز کرد. در مرکز صفحه دایره‌ای سوزنی به‌طور عمود وجود دارد. حلقه‌ای را که نخ‌ها به آن متصل است طوری قرار می‌دهند که سوزن در وسط آن قرار بگیرد. نخ‌ها از روی قرقره‌ها می‌گذرند و به هر نخ پایه‌ای آویزان می‌شود در نتیجه حلقه توسط سه نیروی متقاطع کشیده می‌شود. ما باید با اعمال نیروی چهارم تحت زاویه‌ای خاص و مقداری مشخص اثر آن سه نیرو را خنثی کنیم طوری که حلقه در حال تعادل و درست وسط صفحه بایستد.

در هر سطر از جدول (۱) سه نیرو با اندازه‌های مختلف مشخص شده که هر کدام از این نیروها تحت زاویه‌ای خاص باید به حلقه اعمال شود، به این منظور قرقره‌ها را توسط پیچ‌هایی که زیر آن قرار دارد کمی شُل کرده و هر قرقره را روی یکی از زاویه‌های مشخص شده قرار داده و پیچ را محکم کنید. از روی هر قرقره یکی از نخ‌ها را آویزان کرده و پایه‌ای به آن بیاویزید. آنقدر وزنه به هر پایه اضافه کنید که نیروی موردنظر که در جدول داده شده تأمین شود. نیروها در جدول بر اساس گرم نیرو (grf) داده شده و دقت کنید که وزن هر پایه برابر ۵۰ گرم نیروست.

برای پیدا کردن برآیند سه نیروی فوق که بطور متقاطع به حلقه اعمال شده است نیرویی برابر با نیروی برآیند و خلاف جهت آن باید به حلقه اعمال کنیم طوری‌که **حلقه در حال تعادل و درست در وسط صفحه و سوزن در وسط حلقه قرارگیرد**. برای این منظور نخ چهارم را با دست آنقدر جابجا کنید تا حلقه در وسط صفحه قرار گیرد. به این ترتیب راستای بردار برآیند (معکوس بردار برآیند) مشخص می‌شود. قرقره‌ای را در آن زاویه ببندید و نخ را از روی آن عبور دهید و پایه‌ای به نخ متصل کنید. آنقدر وزنه به پایه اضافه کنید تا حلقه درست وسط صفحه بماند. به این ترتیب بزرگی بردار برآیند نیز بدست خواهد آمد.

۱- نیروها را طبق جدول (۱) به حلقه اعمال کنید و اندازه و جهت نیروی برآیند را بدست آورید. نتیجه را در جدول (۱) یادداشت کنید.

۲- هر سه نیرو را در یک محور مختصات رسم کرده و به روش تجزیه بردار، اندازه‌ی نیروی برآیند و زاویه‌ی بردار برآیند با محور xها را به شکل تئوری محاسبه کنید.

جدول (۱):

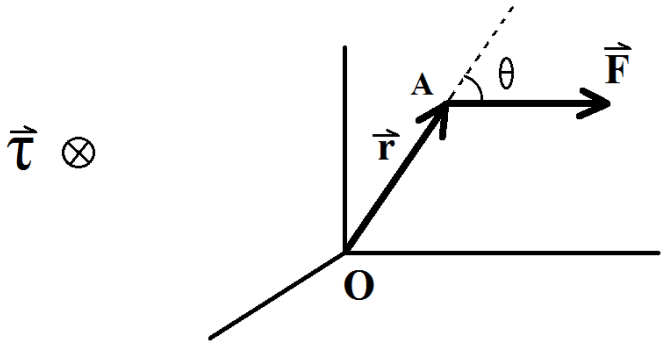
F_1 (grf)	θ_1 درجه	F_2 (grf)	θ_2 درجه	F_3 (grf)	θ_3 درجه	F_R (grf)	θ_R درجه
۲۰۰	۴۵	۸۰	۱۸۰	۱۵۰	۳۳۰		
۱۸۰	۵۰	۱۰۰	۱۷۰	۲۵۰	۲۴۰		
۵۰	۰	۷۰	۷۰	۱۰۰	۳۰۰		

۳- درصد خطای نسبی را هم برای اندازه‌ی نیروی برآیند و هم برای زاویه‌ی آن محاسبه کنید.

قسمت دوم: گشتاور و تعادل گشتاورها

عامل موثر در گشتن هر جسم حول یک محور را گشتاور نیرو می‌نامند. گشتاور نیرو کمیتی است برداری که برابر است با حاصل ضرب خارجی نیرو در فاصله عمودی نقطه اثر نیرو تا محوری که جسم به دور آن می‌گردد و جهت آن طبق قانون دست راست به‌دست می‌آید (شکل ۷). گشتاور نیرو را با τ نشان می‌دهند و واحد آن ($N.m$) می‌باشد. فاصله عمودی نقطه اثر نیرو تا محوری را که جسم حول آن می‌گردد را بازوی گشتاور می‌نامند و با $\vec{r}$ نمایش می‌دهند.

به شکل (۷) توجه کنید؛ جرم m در نقطه A قرار دارد و نیروی $\vec{F}$ طبق شکل به آن وارد می‌شود. طبق تعریف فوق، گشتاور از رابطه (۵) بدست می‌آید. چنانچه θ زاویه بین بردار $\vec{r}$ و $\vec{F}$ باشد، بزرگی گشتاور نیرو از رابطه (۶) بدست خواهد آمد.



شکل(۷):گشتاور نیروی وارد بر جرم m

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \qquad (۵)$$

$$\tau = |r||F| \sin\theta \qquad (۶)$$

شرط دوم برای تعادل جسم صلب، صفر بودن برآیند گشتاورهای خارجی وارد بر جسم می‌باشد. به عبارتی برای اینکه شتاب زاویه ای جسم نسبت به هر محور دلخواهی صفر باشد این است که $\sum \tau = 0$.

الف- گشتاور نیروهای موازی:

دستگاه را مطابق شکل (۸- الف) آماده کنید. دقت کنید که وزنه قلابدار ۱۰ گرمی انتهای عقربه صفحه مدرج آویزان شده باشد. در این حالت عقربه قرمزرنگ در امتداد یکی از قطرهای صفحه مدرج بصورت عمود قرار می‌گیرد.

دوتا از سوراخ‌ها را که روی یکی از قطرها قرار دارند انتخاب کرده و به هر کدام، یک پین متصل کنید. سپس به هر پین یک آویز متصل نمایید. فاصله مرکز سوراخ‌های انتخاب شده تا مرکز صفحه را اندازه‌گیری نموده ($\mathbf{r}_1$ و $\mathbf{r}_2$) و در جدول شماره (۲) یادداشت نمایید.

به حلقه هر یک از آویزها یک نگهدارنده متصل کنید و روی نگهدارنده‌ها آنقدر وزنه اضافه کنید تا قطری از صفحه که دو سوراخ روی آن قرار گرفته کاملاً افقی و در حالت تعادل بایستد (شکل ۸– ب). جرم وزنه‌های آویزان شده از هر پین را محاسبه کرده (m_1 و m_2) و در جدول (۲) وارد نمایید. دقت کنید که M_1 و M_2 جرم کل وزنه‌ها، پایه نگهدارنده، گیره‌ها و نخ متصل به گیره‌ها می‌باشد. بنابراین:

$m = ۰/۸$ gr ⟵ جرم گیره‌ها و نخ متصل به آن

m_1 و m_2 ⟵ جرم پایه‌های نگهدارنده و وزنه‌های روی آنها

M_1 و M_2 ⟵ جرم کل متصل به هر پین بعد از برقراری تعادل

۴- بعد از انجام مراحل فوق گشتاورهای اعمالی به صفحه مدرج (τ_1 و τ_2) را محاسبه کرده و جدول (۲) را کامل نمایید.

راهنمایی:

در این حالت نیروی برآیند بر بازوی گشتاور عمود است ($\vec{F} \perp \vec{r}$).

جدول (۲): گشتاور نیروهای موازی

m	m_1	M_1	r_1	τ_1		m	m_2	M_2	r_2	τ_2

۵- مقدار τ_1 و τ_2 را مقایسه کرده و با محاسبه خطا، شرط تعادل را بررسی کنید.

(۸ - الف)

(۸ - ب)

(۸ - ج)

الف- گشتاور نیروهای غیر موازی:

دو سوراخ را بر روی دو شعاع طوری انتخاب کنید که زاویه بین امتداد دو شعاع انتخاب شده کمتر از۱۸۰درجه باشد. (شکل ۸-ج) پین‌ها را در دو سوراخ انتخاب شده قرار دهید سپس به هر پین یک آویز متصل نمایید. فاصله مرکز سوراخ‌های انتخاب شده تا مرکز صفحه را اندازه‌گیری نموده ($\mathbf{r}_1$ و $\mathbf{r}_2$) و در جدول شماره (۳) یادداشت نمایید.

تذکر: برای دقت بیشتر قطری از صفحه را برای آزمایش انتخاب کنید که r بزرگتری داشته باشد و زاویه بین امتداد شعاع حامل پین‌ها با امتداد شاقول فلزی، کمتر از ۱۸۰ درجه باشد.

به حلقه هر یک از آویزها یک نگهدارنده متصل کنید و روی یکی از نگهدارنده‌ها وزنه‌ی ۵۰ گرمی و بر نگه‌دارنده دیگر وزنه‌ی ۱۰۰گرمی اضافه کنید و اجازه دهید صفحه گشتاور در حالت تعادل باقی بماند و چرخش نداشته باشد. (به شکل ۸-ج توجه کنید.) مقدار زاویه‌های θ_1 و θ_2 را بخوانید و در جدول یادداشت کنید. توجه کنید که θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویه‌ی بین $\mathbf{r}_1$ و$\mathbf{r}_2$ با امتداد شاقول است. مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به شعاع‌ها، جرم‌ها و زوایا را در جدول (۳) وارد نمایید.

جدول (۳): گشتاور نیروهای غیرموازی

m	m_1	M_1	r_1	θ_1	$\sin\theta_1$	τ_1		m	m_2	M_2	r_2	θ_2	$\sin\theta_2$	τ_2

۶- مقدار τ_1 و τ_2 را محاسبه کرده و جدول (۳) را کامل کنید.

راهنمایی:

به رابطه‌های (۵و۶) توجه کنید.

۷- با توجه به اینکه شرط تعادل برابریِ مجموع گشتاورهای ساعتگرد با مجموع گشتاورهای پادساعتگرد می‌باشد، با محاسبه خطا، شرط تعادل را بررسی کنید. $(\sum \boldsymbol{\tau_i}_{\text{ساعتگرد}} = \sum \boldsymbol{\tau_i}_{\text{پادساعتگرد}})$

۸- پایه‌ها را از روی پین‌ها برداشته و صفحه را بچرخانید و دو سوراخ جدیدی که در امتداد یک قطر نبوده و زاویه بین امتداد آن‌ها کمتر از ۱۸۰ درجه می‌باشد را انتخاب کرده و آزمایش را با این نقاط تکرارکنید. دوباره با محاسبه خطا، شرط تعادل را بررسی کنید.

قرقره‌ها و چرخ و محور

اهداف آزمایش:

بررسی انواع قرقره‌ها، محاسبه‌ی مزیت مکانیکی و بازده در انواع قرقره‌ها، بررسی چرخ‌ومحور، محاسبه‌ی مزیت مکانیکی و بازده در انواع چرخ‌و محور

تئوری آزمایش:

قرقره‌ها و چرخ‌ومحور در گروه ماشین‌های ساده قرار دارند که برای غلبه بر یک نیروی مقاوم زیاد در یک نقطه از طریق وارد آوردن نیروی کمتر در نقطه‌ای دیگر بکار گرفته می‌شوند. همچنین برخی از ماشین‌های ساده می‌توانند جهت نیرویی را که بر آن وارد می‌شود را نیز تغییر دهند.
معمولاً با محاسبه‌ی دو کمیت بازده و مزیت مکانیکی عملکرد ماشین‌های ساده را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

مزیت مکانیکی:

در یک ماشین ساده مزیت مکانیکی در حالت کلی نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک است. به عبارتی مزیت مکانیکی نشان می‌دهد که ماشین نیروی وارده را چند برابر می‌کند.

$$M_1 = \frac{R(\text{نیروی مقاوم})}{E(\text{نیروی محرک})} \qquad (۱)$$

بازده یا راندمان:

نسبت انرژی یا کار مفید گرفته شده از ماشین به انرژی داده شده به آن را بازده گویند. معمولاً بازده به شکل درصد بیان می‌شود.

$$Ra\% = \frac{W_R(\text{کار نیروی مقاوم})}{W_E(\text{نیروی کار محرک})} \times 100 \qquad (۲)$$

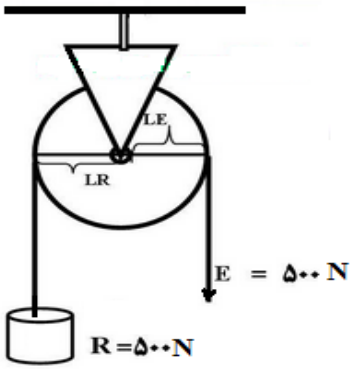
که در رابطه‌ی فوق: W_R = جابجایی نیروی مقاوم × اندازه‌ی نیروی مقاوم
W_E = جابجایی نیروی محرک × اندازه‌ی نیروی محرک

قرقره‌ها:

قرقره چرخی است که به دور یک محور می‌چرخد و عموماً شیاری دارد که ریسمان در آن جامی‌گیرد. قرقره‌ها معمولاً به ۳ دسته تقسیم می‌شوند.

قرقره ثابت:

قرقره ثابت قرقره‌ای است که قلاب آن به جایی محکم بسته شده و با بالا و پایین رفتن طناب و نیروی محرک و مقاوم قرقره بالا و پایین نمی‌رود. مانند قرقره‌ی پرچم. این نوع قرقره با انتقال نیرو و تغییر جهت نیرو به ما کمک می‌کند.
چون در قرقره‌ی ثابت بازوی نیروی محرک (L_E) و بازوی نیروی مقاوم (L_R) شعاع دایره هستند، پس بازوها با هم برابرند یعنی قرقره‌ی ثابت افزایش نیرو ندارد و نیروی محرک و مقاوم با هم برابرند. پس به لحاظ تئوری چنانچه بین نخ و قرقره اصطکاک وجود نداشته باشد، مزیت مکانیکی قرقره برابر ۱ خواهد شد که به آن مزیت مکانیکی کامل گویند. البته اصطکاک وجود دارد پس حتماً مزیت مکانیکی واقعی که از



شکل (۱): قرقره ثابت

رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود کمتر از یک خواهد بود.

از آنجائیکه هرچقدر طناب نیروی محرک را بکشیم طناب نیروی مقاوم هم همانقدر بالا می‌رود پس جابجایی نیروی مقاوم و نیروی محرک برابرند به این ترتیب بازده در

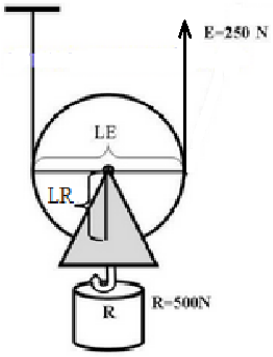
این نوع قرقره از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$Ra\% = \frac{\text{مزیت مکانیکی واقعی}}{\text{مزیت مکانیکی کامل}} \times 100 \qquad (۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۲)، رابطه‌ی (۳) را اثبات کرده در گزارشکارتان بیاورید. دقت کنید این رابطه فقط در قرقره ثابت کاربرد دارد.

قرقره‌ی متحرک:

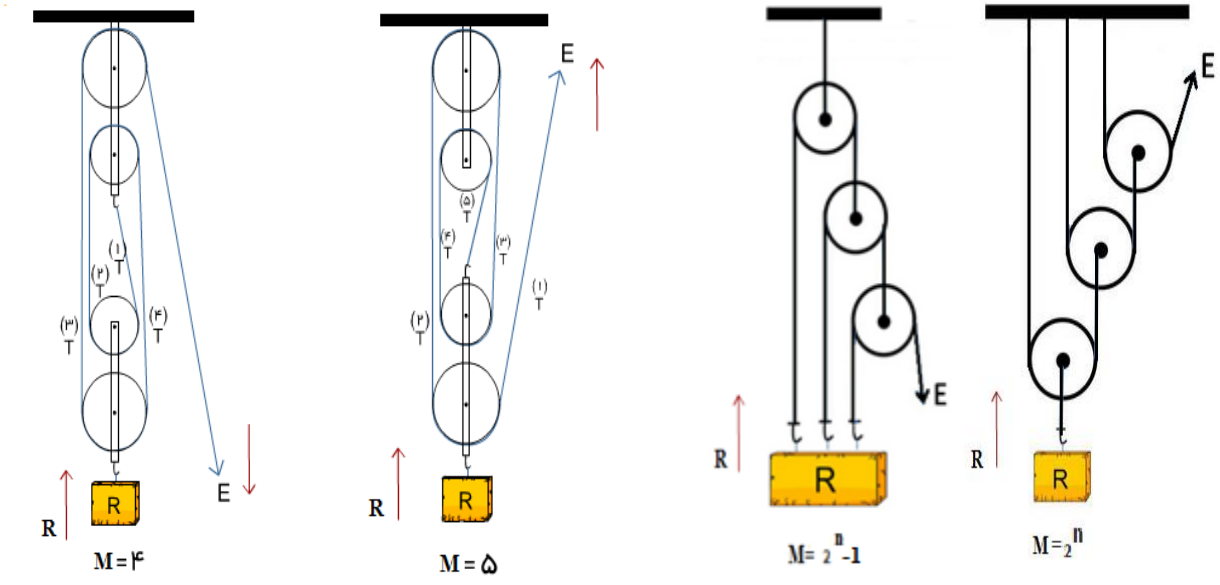
در این نوع قرقره یک سر طناب به جایی ثابت متصل شده و نیروی مقاوم به قلاب قرقره متصل است. وقتی سر طناب را به طرف بالا می‌کشیم قرقره همراه طناب به طرف بالا حرکت می‌کند پس در این نوع قرقره تغییر جهت نیرو نداریم. اما در این نوع قرقره بازوی نیروی محرک قطر قرقره و بازوی نیروی مقاوم شعاع قرقره است. پس بازوی نیروی محرک ۲ برابر بازوی نیروی مقاوم است. به این ترتیب این نوع قرقره با افزایش نیرو به ما کمک می‌کند یعنی نیروی محرک نصف نیروی مقاوم خواهد بود. پس مزیت مکانیکی کامل این قرقره ۲ می‌باشد. در قرقره متحرک طناب نیروی محرک هرچقدر جابجا شود، نیروی مقاوم نصف مقدار جابجا خواهد شد.



شکل(۲): قرقره متحرک

قرقره‌ی مرکب:

قرقره‌ایست که از ترکیب دو یا چند قرقره‌ی ثابت و متحرک ساخته شده است. چون هر قرقره‌ی ثابت آن باعث تغییر جهت نیرو و هر قرقره‌ی متحرک آن باعث افزایش نیرو می‌شود. پس قرقره‌ی مرکب با انتقال نیرو و تغییر جهت نیرو و افزایش نیرو به ما کمک می‌کند. از قرقره‌های مرکب در حرکت آسانسورها، جرثقیل‌های مکانیکی و ... استفاده می‌شود.



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل (۳): چند نمونه قرقره‌ی مرکب

مزیت مکانیکی کامل در قرقره‌های مرکب به تعداد قرقره‌ها و چگونگی بستن طناب‌ها و همچنین تعداد طناب‌ها بستگی دارد. چنانچه مانند شکل (۳- الف) در بستن قرقره‌ها از یک طناب استفاده شود، طوریکه سر طناب به قرقره‌ی ثابت متصل باشد، مزیت مکانیکی کامل از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید. n تعداد قرقره‌های متحرک می‌باشد.

$$M = 2n \qquad (۴)$$

ولی اگر در حالت فوق سر طناب به قرقره‌ی متحرک وصل باشد، (شکل ۳- ب) مزیت مکانیکی کامل از رابطه‌ی (۵) بدست خواهدآمد.

$$M = 2n + 1 \qquad (۵)$$

چنانچه در بستن قرقه‌ی مرکب از چند طناب استفاده شود و طناب‌ها از یک سو به سقف بسته شده باشند و قرقره‌ها روی آن حرکت کنند (شکل ۳- د) مزیت مکانیکی کامل از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود.

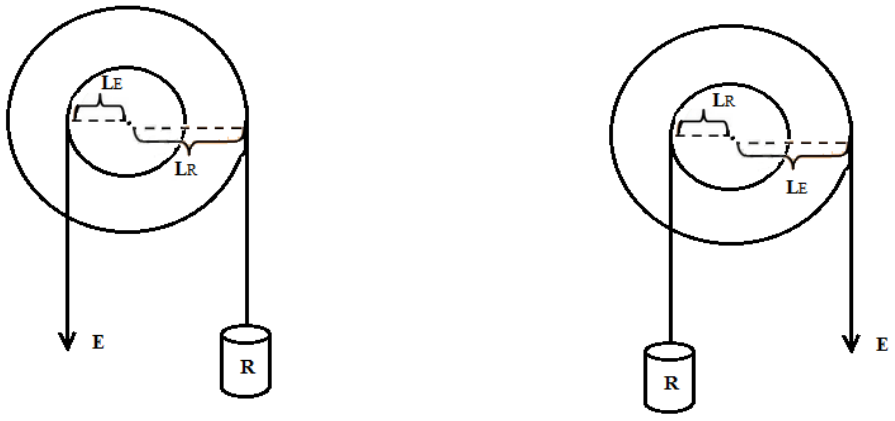
$$M = 2^n \qquad (۶)$$

اما اگر در بستن قرقره‌ی مرکب از چند طناب استفاده شود و یکی از قرقره‌ها به سقف متصل باشد و مابقی قرقره‌ها به هم بسته شده باشند، (شکل ۳- ج) مزیت مکانیکی کامل از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود.

$$M = 2^n - 1 \qquad (۷)$$

چرخ‌ومحور:

چرخ‌ومحور از دو قرقره‌ی متحدالمرکز متصل به‌هم تشکیل شده است. قرقره‌ای که شعاع کمتری دارد، محور و دیگری چرخ نامیده می‌شود. چرخ‌ومحور هر دو باهم حول مرکز می‌چرخند ولی هرکدام دارای نخ یا طناب جداگانه‌ای می‌باشند.



(ب) (الف)

شکل (۴): چرخ و محور

با توجه به تعریف بالا، از چرخ‌ومحور می‌توان به دو صورت استفاده نمود.

۱- نیروی محرک را به چرخ و نیروی مقاوم را به محور وارد نماییم.

۲- نیروی محرک را به محور و نیروی مقاوم را به چرخ وارد نماییم.

حالت اول: اگر نیروی محرک بر چرخ و نیروی مقاوم بر محور وارد شود شعاع چرخ بازوی محرک و شعاع محور بازوی مقاوم است. پس در این حالت بازوی محرک بزرگتر از بازوی مقاوم و چرخ‌ومحور با افزایش نیرو و انتقال نیرو به ما کمک می‌کند (شکل ۴-الف). به این ترتیب مزیت مکانیکی آن بیشتر از یک است. چنانچه بخواهیم مزیت مکانیکی آن را بیشتر کنیم یعنی چرخ‌ومحور با افزایش نیروی بیشتری به ما کمک کند، می‌توانیم قطر چرخ را خیلی بزرگتر از محور نماییم. مزیت مکانیکی کامل در ماشین چرخ‌ومحور از رابطه‌ی (۸) و مزیت مکانیکی واقعی از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$M = \frac{L_{E(\text{بازوی محرک})}}{L_{R(\text{بازوی مقاوم})}} \qquad (۸)$$

توجه داشته باشید که گاهی ماشین چرخ‌ومحور بجای قراردادن چرخ کامل یک دسته به جای چرخ قرار می‌دهند که به آن ماشین دسته‌ومحور می‌گویند که البته تفاوتی با چرخ‌ومحور ندارد در این صورت دسته بجای چرخ عمل می‌کند (مانند آچار).

حالت دوم: اگر در چرخ‌ومحور نیروی محرک بر محور و نیروی مقاوم بر چرخ وارد شود، در این‌صورت شعاع محور بازوی نیروی محرک و شعاع چرخ بازوی نیروی مقاوم خواهد بود. پس چون بازوی محرک کوچکتر از بازوی مقاوم است، مزیت مکانیکی چرخ‌ومحور کوچکتر از یک می‌شود و چرخ‌ومحور در این حالت با انتقال نیرو و افزایش مسافت و سرعت اثر نیرو به ما کمک می‌کند (شکل ۴- ب).

تفاوت عمده بین چرخ‌ومحور و قرقره مزیت مکانیکی این دو ماشین است. مزیت مکانیکی کامل یک قرقره‌ی ثابت همواره یک و قرقره‌ی متحرک همواره ۲ می‌باشد در حالیکه مزیت مکانیکی کامل در یک چرخ‌ومحور با تغییر قطر چرخ یا محور و تغییر محل وارد شدن نیروی محرک و مقاوم می‌تواند به دلخواه کم یا زیاد شود.

وسایل مورد نیاز:

پایه، انواع قرقره، چرخ‌ومحور، نخ مناسب، نیروسنج، وزنه

روش آزمایش و پرسش‌ها:

قرقره‌ها:

الف- قرقره‌ی ثابت را به گیره متصل کنید و نخ را از شیار آن عبور دهید. (شکل ۱) یک طرف نخ وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را بیاویزید و مقدار نیروی مقاوم را توسط نیروسنج اندازه گرفته و در جدول (۱) وارد نمایید. حال نیروسنجی را که از تراز بودن آن اطمینان دارید به طرف دیگر نخ وصل کنید و بوسیله‌ی نیروسنج سیستم را در حال تعادل نگه‌دارید طوری‌که دو نخ طرفین قرقره موازی یکدیگر باشند. نیروی محرک را از روی نیروسنج خوانده و در جدول (۱) وارد نمایید. با کمک نیروهای اندازه‌گیری شده مزیت مکانیکی کامل قرقره را بیابید.

حال با کشیدن نیروسنج وزنه را با سرعت ثابت به سمت بالا بکشید و در حین حرکت یکنواخت مقدار نیروی محرک را از روی نیروسنج اندازه بگیرید و در جدول (۱) وارد نمایید. با کمک نیروهای اندازه‌گیری شده مزیت مکانیکی واقعی و بازده قرقره‌ی ثابت را محاسبه نمایید. دقت کنید که برای اندازه‌گیری بازده می‌توانید به جای رابطه‌ی کلی (۲) از رابطه (۳) استفاده نمایید.

جدول (۱): قرقره‌ی ثابت

سیستم در حال حرکت یکنواخت				سیستم ثابت و در حال تعادل		
بازده٪	M_1 (N)	R (N)	E_1 (N)	M (N)	R (N)	E (N)

۱- از قرقره‌ی ثابت به چه منظوری استفاده می‌شود؟
۲- بین طول بازوی نیروی محرک و طول بازوی نیروی مقاوم در قرقره‌ی ثابت چه رابطه‌ای وجود دارد؟
۳- اگر رشته نخ‌های طرفین موازی هم نباشند، آیا نیروی محرک تغییری می‌کند؟
۴- نقش اصطکاک در آزمایش بالا چه زمانی ظاهر می‌شود؟

ب- قبل از سوار کردن قرقره متحرک نیروی وزن قرقره را توسط نیروسنجی که در اختیار دارید تعیین کرده و با R_1 نمایش دهید. (جدول ۲) وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی (R_2) را به آن متصل کرده و دستگاه را مطابق شکل(۲) سوار کنید. نیروی مقاوم (R) چقدر خواهد بود؟
نیروسنج را طوری نگه‌دارید که امتداد نخ‌های طرفین قرقره موازی و دستگاه بی‌حرکت باشد. نیرویی را که نیروسنج نشان می‌دهد، بخوانید (E) و مزیت مکانیکی کامل دستگاه را محاسبه کنید.
نیروسنج را آرام و به‌گونه‌ای حرکت دهید که قرقره و وزنه‌ی متصل به آن تقریباً بطور یکنواخت حرکت کند. مقدار نیروی محرک واقعی را بخوانید (E_1) و مزیت مکانیکی واقعی و بازده دستگاه را محاسبه کرده و جدول (۲) را کامل کنید. دقت کنید که در این نوع قرقره جابجایی نیروی مقاوم نصف جابجایی نیروی محرک است پس برای محاسبه بازده از رابطه (۲) نیازی به اندازه‌گیری جابجایی‌ها ندارید.

جدول (۲): قرقره‌ی متحرک

سیستم در حال حرکت یکنواخت				سیستم ثابت و در حال تعادل				
بازده٪	M_1	E_1 (N)	R (N)	M	E (N)	R (N)	R_2 (N)	R_1 (N)

۵- از قرقره‌ی متحرک به چه منظور استفاده می‌شود؟ چند نمونه از موارد استفاده از آن را نام ببرید.
۶- بین طول بازوی نیروی محرک و بازوی نیروی مقاوم در قرقره متحرک چه رابطه‌ای وجود دارد؟

ج- دستگاه را مطابق شکل (۳- الف) سوار کنید. وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را به قرقره‌ی متحرک و نیروسنج را به سر آزاد نخ وصل کنید. نیروسنج را به دقت طوری نگه‌دارید تا نخ‌ها موازی قرار گرفته و تعادل برقرار شود. نیروی محرک (E) را از روی نیروسنج بخوانید و در جدول (۳) وارد کنید. مزیت مکانیکی کامل را محاسبه کنید.

۷- آیا مزیت مکانیکی کامل محاسبه شده با مقدار تئوری که در شکل (۳- الف) می‌بینید سازگار است؟

نیروسنج را به آرامی و یکنواخت پایین بکشید تا مجموعه با سرعت ثابت حرکت کند و مجدداً در این حالت نیروی محرک (E_1) را اندازه بگیرید. مزیت مکانیکی و بازده را محاسبه کنید.

جدول (۳): قرقره‌ی مرکب (۳-الف)

سیستم در حال حرکت یکنواخت				سیستم ثابت و در حال تعادل				
بازده٪	M_1	E_1 (N)	R (N)	M	E (N)	R (N)	R_2 (N)	R_1 (N)

د- سیستم را مطابق شکل (۳- ب) ببندید. مجدداً وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را به قرقره‌ی متحرک و نیروسنج را به سر آزاد نخ ببندید و نیروسنج را کاملاً عمودی طوری نگهدارید که نخ‌ها موازی بوده و تعادل برقرار شود. نیروی محرک (E) را از روی نیروسنج بخوانید و در جدول (۴) وارد کرده و مزیت مکانیکی کامل (M) را محاسبه کنید.

۸- آیا مزیت مکانیکی کامل محاسبه شده با مقدار تئوری که در شکل (۳- الف) می‌بینید سازگار است؟

حالا نیروسنج را به آرامی و یکنواخت بالا بکشید تا مجموعه با سرعت ثابت حرکت کند و مجدداً در این حالت نیروی محرک (E_1) را اندازه بگیرید. مزیت مکانیکی واقعی و بازده را محاسبه کرده و جدول (۴) را کامل کنید.

جدول (۴): قرقره‌ی مرکب (۳-ب)

سیستم در حال حرکت یکنواخت				سیستم ثابت و در حال تعادل				
بازده٪	M_1	E_1 (N)	R (N)	M	E (N)	R (N)	R_2 (N)	R_1 (N)

۹- از قرقره‌ی مرکب به چه منظور استفاده می‌کنیم؟

چرخ‌ومحور:

الف- چرخ‌ومحور را از روی پایه بیرون کشیده و توسط کولیس شعاع چرخ و شعاع محور را اندازه بگیرید. وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را به انتهای نخ متصل به محور و نیروسنج را به انتهای نخ متصل به چرخ بیاویزید. انتهای نیروسنج را در دست نگه‌دارید طوری‌که چرخ‌ومحور کاملاً در حال تعادل قرار گیرد. اندازه‌ی نیروی محرک و نیروی مقاوم و همچنین بازوی محرک و بازوی مقاوم را درجدول (۵) یادداشت کنید.

جدول (۵): چرخ‌ومحور

بازده٪	M_1	M	E_1 (N)	E (N)	R (N)	بازوی مقاوم L_R (mm)	بازوی محرک L_E (mm)	شعاع محور (mm)	شعاع چرخ (mm)

۱۰- مزیت مکانیکی کامل چرخ‌ومحور در این حالت چقدر است؟

۱۱- برای به حرکت آوردن دستگاه نیروی محرک E_1 لازم است که $E_1>E$ می‌باشد. اندازه‌ی E_1 را تعیین و مزیت مکانیکی واقعی و بازده دستگاه را حساب کنید.

ب- این بار وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را به انتهای نخ متصل به چرخ و نیروسنج را به انتهای نخ متصل به محور بیاویزید و سعی کنید دستگاه را در حال تعادل نگه‌دارید و نیروی مقاوم (R) و نیروی محرک (E) را اندازه بگیرید. حالا سعی کنید دستگاه را به حرکت درآورید و E_1 را اندازه بگیرید و جدول (۶) را کامل کنید.

جدول (۶): چرخ‌ومحور

بازده٪	M_1	M	E_1 (N)	E (N)	R (N)	بازوی مقاوم L_R (mm)	بازوی محرک L_E (mm)	شعاع محور (mm)	شعاع چرخ (mm)

بررسی سقوط آزاد

اهداف آزمایش:

بررسی سقوط آزاد اجسام از ارتفاع‌های متفاوت، اندازه‌گیری شتاب جاذبه زمین (g)

تئوری آزمایش:

همه اجسام تحت تأثیر نیروی گرانش سقوط خواهند کرد و اگر این نیرو تنها نیرویی باشد که به آنها وارد می‌شود، این سقوط، سقوط آزاد نامیده می‌شود. شتاب سقوط آزاد آنچنان که گالیله ثابت کرد، در هر نقطه از زمین برای همه اجسام، بی اعتنا به شکل، جرم و جنس آنها یکسان است. البته در خلاء یا در شرایطی که مقاومت هوا ناچیز باشد. در طولِ حرکت نیز، به شرط کم‌بودن ارتفاع سقوط، مقدار شتاب ثابت است. بنابراین حرکت اجسام در این سقوط، یک حرکت با شتاب ثابت است. لذا معادله‌ی حرکت آنها (معادله‌ای که مکان ذره را به صورت تابعی از زمان توصیف می‌کند) چنین است:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 + v_0t + h_0 \qquad (۱)$$

که اگر سقوط بدون سرعت اولیه باشد $v_0 = 0$ است. همچنین h_0 را نیز با انتخاب مناسب دستگاه مختصات می‌توان صفر اختیار کرد. یعنی:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \qquad (۲)$$

اگر سقوطی با شرایط مذکور ترتیب دهیم روشن است که با اندازه گیری t به ازای مقادیر مشخص h می‌توانیم g را در محل به دست آوریم.

وسایل مورد نیاز:

زمان‌سنج دیجیتالی، صفحه حساس به برخورد، پایه نگهدارنده، سیم‌های رابط، گلوله فولادی، متر نواری.

روش آزمایش و پرسش‌ها:

قسمت اول: در این آزمایش لازم است زمان سقوط گلوله‌ی فلزی از ارتفاع‌های مختلف را اندازه‌گیری کرده و جدول (۱) را کامل نماییم. برای این منظور از یک اهرم نگهدارنده‌ی گلوله که توسط سیم‌های رابط به یک زمان‌سنج دیجیتالی و یک صفحه‌ی حساس به ضربه متصل است استفاده می‌کنیم. ابتدا به کمک نوارمتر اهرم نگدارنده‌ی گلوله که روی یک پایه‌ی فلزی نصب شده را در فاصله‌ی ۶۰ سانتی‌متری از صفحه‌ی حساس به ضربه، ثابت می‌کنیم. صفحه‌ی حساس را در ارتفاع $h_0 = 0$ یعنی به عنوان مبدأ دستگاه اندازه‌گیری در نظر می‌گیریم، به این ترتیب ارتفاع گلوله $h = 60\ cm$ خواهد بود. زمان‌سنج را روشن کنید و گلوله‌ی کوچکتر را در میان دو اهرم قرار داده و با دست خود اهرم‌ها را فشرده و گلوله را نگه‌دارید و قبل از رها کردن گلوله زمان‌سنج را یکبار reset کنید. وقتی زمان‌سنج عدد صفر را نشان داد گلوله را از حالتِ سکون ($v_0 = 0$) رها کنید. به محض رها کردن گلوله به زمان‌سنج پیامی فرستاده می‌شود که شمارش را آغاز کند، بعد از رسیدن به پایان مسیر و برخورد گلوله با صفحه حساس، پیامی فرستاده می‌شود و زمان‌سنج از شمارش باز می‌ایستد و زمانِ حرکت توسط زمان‌سنج با دقت ۰/۰۰۱ ثانیه اندازه گرفته می‌شود. البته برای کم کردن خطا در اندازه‌گیری زمان، در هر ارتفاع ۵ بار زمان را با روش فوق اندازه‌گیری کرده و میانگین آن را به عنوان زمان سقوط درنظر بگیرید. با همین روش، زمان سقوط را برای تمام ارتفاع‌های خواسته شده در جدول اندازه‌گیری کرده و جدول (۱) را کامل کنید.

۱- نمودار ارتفاع گلوله برحسب مربع میانگین زمان سقوط ($h - t_m^2$) را در یک کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (راهنمایی: از رابطه‌ی (۲) استفاده کنید.)

۲- شتاب گرانش (g) را از روی این نمودار بدست آورده و با مقدار واقعی آن در آزمایشگاه ($g=9.8\ m/s^2$) مقایسه کنید. (محاسبه‌ی درصد خطای نسبی)

جدول (۱) :

زمان t(s) / ارتفاع h(m)	t_1 (S)	t_2 (S)	t_3 (S)	t_4 (S)	t_5 (S)	میانگین زمان t_m(S)	مربع میانگین زمان t_m^2 (s^2)
۰/۶							
۰/۷							
۰/۸							
۰/۹							
۱							
۱/۱							
۱/۲							

۳- نمودار ارتفاع گلوله را برحسب میانگین زمان سقوط ($h - t_m$)، در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (راهنمایی: از رابطه‌ی (۲) کمک بگیرید.)

۴- آیا از روی نمودار فوق می‌توان شتاب گرانش زمین را بدست آورد؟ این نمودار چه اطلاع کمّی دیگری را به شما می‌دهد؟

۵- نمودار ارتفاع سقوط را برحسب میانگین زمان سقوط ($h - t_m$) در کاغذ تمام‌لگاریتمی رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (راهنمایی: از طرفین رابطه‌ی (۲) لگاریتم بگیرید.)

۶- شیب نمودار فوق را محاسبه کنید. شیب این نمودار نشان دهنده‌ی چه چیزی است؟

۷- شتاب گرانش (g) را از روی نمودار فوق بدست آورده و با مقدار واقعی آن در آزمایشگاه مقایسه کنید. (محاسبه‌ی درصد خطای نسبی)

۸- g بدست آمده از دو منحنی سؤال ۱ و سؤال ۵ را با هم مقایسه کنید. کدام دقیق‌تر است؟

۹- نقش استفاده از کاغذ تمام لگاریتمی را در این آزمایش بیان کنید.

۱۰- انتخاب ارتفاع سقوط کم و یا زیاد چه تأثیری در تعیین دقیق تر g دارد؟

قسمت دوم: دو گلوله‌ی کوچک و بزرگ در اختیار شماست. در یک ارتفاع دلخواه به روشی که در قسمت اول شرح داده شد، ۵ بار زمان سقوط را برای گلوله‌ی کوچک اندازه‌گیری کرده و در جدول (۲) یادداشت کنید. در همین ارتفاع زمان سقوط گلوله‌ی بزرگ‌تر را نیز ۵ بار اندازه‌گیری کرده و جدول (۲) را کامل کنید.

جدول (۲): h = ...

زمان t(s) / گلوله	t_1 (S)	t_2 (S)	t_3 (S)	t_4 (S)	t_5 (S)	میانگین زمان t_m(S)
کوچک						
بزرگ						

۱۱- انتخاب گلوله کوچکتر یا بزرگتر چه اثری در نتایج آزمایش دارد؟

بررسی سینماتیک حرکت انتقالی در دوبعد
(حرکت پرتابی)

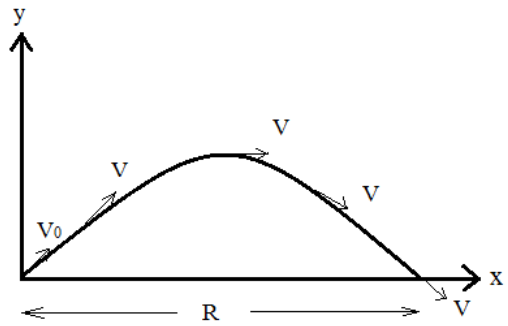
اهداف آزمایش:

بررسی حرکت پرتابی، اندازه‌گیری برد پرتابه و تعیین بستگی برد به سرعت اولیه و زاویهٔ پرتاب

تئوری آزمایش:

حرکت پرتابی، حرکتی است که در دو بعد بر روی مسیر منحنی در صفحه انجام می‌شود و می‌توان آن را به دو حرکت یک بعدی در دو راستای عمود برهم y , x تجزیه نمود. در حرکت پرتابی، تنها نیروی مؤثر بر پرتابه، نیروی جاذبهٔ زمین است. پس شتاب حرکت پرتابه همان شتاب جاذبهٔ زمین است که اندازه تصویر آن بر روی محور x ها صفر و بر روی محور yها $(-g)$ است. در نتیجه در راستای افقی، حرکت پرتابه "حرکت یکنواخت"، و در راستای قائم حرکت پرتابه "حرکت شتابدار با شتاب ثابت رو به پایین" است. معادلات حرکت یک پرتابه به صورت زیر است:

$$\begin{cases} x = V_0 \cos\theta_0 t & (۱) \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0 \sin\theta_0 t & (۲) \end{cases}$$



شکل (۱)

با حذف t بین دو معادله‌ی (۱) و (۲) معادله‌ی مسیر حرکت پرتابه به صورت زیر بدست می‌آید.

$$y = \left(-\frac{g}{2V_0^2 \cos^2\theta_0}\right)x^2 + (\tan\theta_0)x \qquad (۳)$$

همانطور که از معادله‌ی (۳) برمی‌آید، مسیر حرکت پرتابه یک سهمی است. برد حرکت پرتابی فاصلهٔ افقی است که پرتابه از نقطه شروع حرکت تا نقطه بازگشت به ارتفاع اولیه طی می‌کند $(x = R)$ و با رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید.

$$R = \frac{V_0^2 \mathrm{Sin}2\theta_0}{g} \qquad (۴)$$

بخش اول اندازه‌گیری سرعت اولیه دستگاه:

این دستگاه گلوله را با سه سرعت اولیه‌ی متفاوت پرتاب می‌کند. در ابتدای کار باید با روشی که توزیع داده می‌شود، این سه سرعت را محاسبه کنید.

بخش دوم بررسی رابطه‌ی (۴) بصورت تجربی:

طبق آنچه در رابطه‌ی (۴) دیده می‌شود، برد پرتابه با مجذور سرعت اولیه‌ی پرتاب و همچنین با سینوس دو برابر زاویه‌ی پرتاب بستگی مستقیم دارد. در بخش دوم این بستگی‌ها بررسی می‌شود.

وسایل مورد نیاز:

دستگاه حرکت پرتابی، گلوله، متر نواری، جک بالابر و تخته ،کاربن و کاغذ سفید

روش آزمایش و پرسش‌ها:

بخش اول تعیین سرعت اولیهٔ پرتاب:

روی بدنه‌ی دستگاه یک صفحه‌ی مدرج و همچنین یک شاقول تعبیه شده که بوسیله‌ی آن می‌توانید دستگاه را برای پرتاب در زوایای مختلف تنظیم کنید. برای تعیین سرعت اولیهٔ پرتاب، دو پیچی که در پشت دستگاه قرار دارد را کمی شُل کنید و بدنه‌ی دستگاه را آنقدر بچرخانید که نخ شاقول روی زاویه‌ی ۹۰ درجه بایستد. حال هردو پیچ را کاملاً محکم کنید تا بدنه دیگر حرکت نکند. به این ترتیب دستگاه برای پرتاب قائم آماده شده است.

همانطور که روی بدنه‌ی دستگاه مشاهده می‌کنید، این دستگاه می‌تواند با سه سرعت اولیه‌ی کم، متوسط و زیاد گلوله را پرتاب کند. میله‌ی توپر پلاستیکی را که در اختیار دارید داخل دهانه‌ی دستگاه قراردهید و آن‌را به سمت داخل بفشارید. فنر داخل دستگاه را تا جایی فشرده کنید که زبانه به راحتی روی شیار اول قرار گیرد. در این حالت سوراخ مربوط به "سرعت کم" نارنجی رنگ می‌شود و نشان می‌دهد که دستگاه آماده‌ی پرتاب گلوله با سرعت کم (V_{01}) در راستای قائم است.

پیچ پشت فتوسل را کمی شُل و با متر نواری که در اختیار دارید فتوسل را در فاصله‌ی ۱۵ سانتی‌متری از محل پرتاب قرارداده و پیچ را کاملاً محکم کنید تا جابجا نشود. تایمر را روشن کرده و با کمک دکمه‌ی Mode آن را روی مُد ۲ تنظیم کنید. در این مُد تایمر زمان عبور گلوله از جلوی فتوسل را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. قطر گلوله را با کولیس اندازه بگیرید تا بتوانید با زمانی که تایمر ثبت می‌کند و با استفاده از رابطه‌ی $V = \frac{D}{\Delta t}$ سرعت لحظه‌ای گلوله را در محل قرارگفتن فتوسل محاسبه کنید.

حالا گلوله را درون دستگاه بگذارید و نخ متصل به زبانه را آرام بکشید تا زبانه از شیار خارج شده و گلوله با کمترین سرعت اولیه پرتاب شود و از مقابل فتوسل عبور کند. زمانی را که تایمر نشان می‌دهد در جدول (۱) یادداشت کنید. این کار را سه بار تکرار کرده و برای کم شدن خطا میانگین سه زمان را به عنوان زمان عبور (Δt) در نظر گرفته و سرعت لحظه‌ای را محاسبه کرده در جدول(۱) یادداشت کنید.

با در دست داشتن h و V و استفاده از رابطه‌ی $V^2 - V_0^2 = -2gh$ مقدار سرعت اولیه‌ی پرتاب را محاسبه کنید (V_{01}).

فتوسل را کمی بالا برده و در فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متری از محل پرتاب قرار دهید و با روش فوق، دیگر سرعت اولیه‌ی (V_{02}) را محاسبه کنید. حال فوتوسل را در فاصله‌ی ۴۵ سانتی‌متری قرار دهید و (V_{03}) را محاسبه و جدول (۱) را کامل کنید.

جدول (۱): قطر گلوله D =...

	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	Δt_3 (s)	Δt_m (s)	V ($\frac{m}{s}$)	h (m)	V_0 ($\frac{m}{s}$)
شیار اول						۰/۱۵	
شیار دوم						۰/۳۵	
شیار سوم						۰/۴۵	

۱- اگر مقدار واقعی سرعت‌های اولیه‌ی دستگاه به ترتیب برابر ۲/۵ ، ۴/۵ و ۶/۵ متر بر ثانیه باشد، در صد خطای نسبی در تعیین v_{01} و v_{02} و v_{03} را بدست آورید.

بخش دوم بستگی برد حرکت پرتابی به سرعت اولیه و زاویه پرتاب:

در این قسمت از آزمایش بوسیله‌ی دو پیچ پشت دستگاه، آن را روی زاویه‌ی ۲۰ درجه تنظیم کنید. با کمک خط‌کش چوبی بلندی که در اختیار دارید ارتفاع جک وتخته‌ی روی آن را طوری تنظیم کنید که سطح تخته با محل پرتاب گلوله دقیقاً در یک ارتفاع قرار بگیرند. سپس پیچ‌ها را محکم کنید. ضامن دستگاه را در شیار اول قرار دهید تا گلوله با کمترین سرعت اولیه (V_{01}) پرتاب شود. گلوله را در دستگاه بگذارید و نخ متصل به ضامن را بکشید. گلوله پرتاب شده و روی تخته می‌افتد و اثری رو کاربن بجا می‌گذارد. از آنجاییکه تخته و محل پرتاب در یک ارتفاع هستند، فاصله‌ی محل پرتاب تا نقطه اثر گلوله روی تخته برابر برد پرتابه است که آن را به کمک نوارمتر اندازه گرفته و در جدول (۲) یادداشت کنید. این بار ضامن را در شیار دوم قراردهید و برد را در همین زاویه‌ی ۲۰ درجه ولی سرعت اولیه‌ی متوسط (V_{02}) اندازه گرفته و در جدول (۲) وارد نمایید. به همین ترتیب آزمایش را برای زاویهٔ پرتاب ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه و با هر دو سرعت اولیه‌ی کم و متوسط انجام دهید و مقادیر بدست آمده را در جدول (۲) یادداشت نمایید. توجه کنید در صورتیکه آزمایش در خلاء انجام شود، با استفاده از رابطهٔ $R = \frac{v_0^2 Sin2\theta_0}{g}$، بیشینه‌ی برد پرتابه در زاویهٔ $\theta = 45^\circ$ خواهد بود.

جدول (۲):

زاویه پرتاب θ°	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
برد با سرعت اولیه v_{01} R(m)						
برد با سرعت اولیه v_{02} R(m)						

۲- نمودار برد پرتابه بر حسب زاویه‌ی پرتاب را برای دو سرعت مختلف بر روی یک کاغذ میلی‌متری رسم نمایید.

۳- شکل نمودار فوق چگونه است؟ (از رابطه‌ی (۴) کمک بگیرید.)

۴- با استفاده از نمودار رسم شده، برد بیشینه در هر سرعت اولیه، مربوط به چه زاویه‌ای است؟

۵- از روی نمودار، مقدار برد بیشینه را برای سرعت ۲ دستگاه بدست آورید. سپس آن را با مقدار تئوری که با استفاده از رابطه‌ی(۴) محاسبه می‌کنید، مقایسه نمایید.

۶- دلایل خطای آزمایش را بنویسید.

بررسی سینماتیک و دینامیک حرکت خطی در یک بعد
(قانون اول و دوم نیوتون)

اهداف آزمایش:

بررسی حرکت یکنواخت و تحقیق قانون اول نیوتون در حرکت خطی، بررسی حرکت شتابدار و تحقیق قانون دوم نیوتون در حرکت خطی ($\sum F = ma$)

تئوری آزمایش:

قانون اول نیوتون برای یک جسم آزاد، (جسمی که تحت تأثیر نیروی خاصی نباشد): جسم یا ساکن خواهد ماند و یا با سرعت قبلی خود به حرکت یکنواخت ادامه خواهد داد. این خاصیت از اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را درغیاب نیرو حفظ کنند لختی نامیده می‌شود. از این‌رو قانون اول نیوتن، قانون لختی نیز نامیده می‌شود.

معادله‌ی حرکت یکنواخت در یک بعد بصورت $X - X_\circ = Vt$ و معادله‌ی جهان‌خط حرکت شتابدار با شتاب ثابت بصورت $X - X_\circ = \frac{1}{2}at^2 + V_\circ t$ است. (البته در این رابطه کمیتها برداری هستند ولی در حرکت یک بعدی نیازی به تأکید روی این مطلب نیست.)

قانون دوم نیوتون: چنانچه در یک راستا نیرویی به جسم وارد شود شتابی متناسب با نیرو پیدا خواهد کرد که مقدار شتاب را رابطه‌ی $\sum F = ma$ تعیین می‌کند. چنانچه جسمی به جرم m در یک چارچوب مرجع لخت در یک راستا تحت تأثیر نیروی ثابت $\mathbf{F}$ قرارگیرد، شتابی متناسب و هم‌جهت با نیرو را تجربه خواهد کرد که از رابطه‌ی $\sum F = ma$ پیروی می‌کند.

در این آزمایش درستی رابطه‌ی $\sum F = ma$ را به دو طریق بررسی می‌کنیم.

در روش اول، به جرم معین m نیروهای متفاوت F_i را وارد کرده و شتاب حاصل از هر نیرو را محاسبه کرده و درستی تساوی زیر را بررسی می‌کنیم.

$$\left.\begin{array}{l} F_1 = ma_1 \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \\ F_6 = ma_6 \end{array}\right\} \rightarrow \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{a}} = m \qquad (۱)$$

در روش دوم، به جرم‌های متفاوت m_i نیروی ثابت F را وارد کرده و شتاب حاصل را محاسبه کرده و درستی تساوی (۲) را بررسی می‌کنیم.

$$\left.\begin{array}{l} F = m_1 a_1 \\ F = m_2 a_2 \end{array}\right\} \rightarrow \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \qquad (۲)$$

وسایل مورد نیاز: دستگاه پمپ هوا، ریل یا تخت هوا، لغزنده و پرده‌ی متصل به آن، چندین زمان‌سنج و فوتوسل، وزنه‌های یک گرمی، کولیس، متر نواری، آهن‌ربای الکتریکی

پمپ هوا وتخت هوا: مجموعه‌ای برای حذف اصطکاک می‌باشند. تخت هوا مکانی است که لغزنده روی آن حرکت می‌کند. روی سطح آن سوراخ‌های ریزی تعبیه شده است. هوای دمیده شده توسط پمپ هوا از ابتدای ریل (تخت هوا) وارد می‌شود و از سوراخ های سطح فوقانی آن خارج می‌گردد. در نتیجه حرکت لغزنده بر روی ریل هوا صورت می‌گیرد و می‌تواند تقریبا بدون اصطکاک فرض شود. روی پایه‌های ریل دو پیچ نصب شده است که بوسیله آنها می‌توان تخت هوا را تراز کرد.

فوتوسل: وسیله ایU شکل که دیودهای داخل آن به زمان‌سنج، فرمان شروع و خاتمه شمارش را به هنگام عبور پرده از برابر آن می‌دهد.

زمان‌سنج دیجیتالی: این وسیله به ۲ فوتوسل متصل شده و در سه حالت مختلف زمان را اندازه‌گیری می‌نماید. مُد۱ زمانی را که لغزنده فاصله‌ی بین دو فوتوسل را طی کرده اندازه می‌گیرد. مُد۲ زمان عبورعرض پرده متصل به لغزنده از مقابل فتوسل را برای هردو فوتوسل متصل به زمان‌سنج بطور جداگانه اندازه می‌گیرد و مُد۳ برای اندازه‌گیری سرعت لغزنده قبل و بعد از برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آهنربای الکتریکی: از سیم‌پیچ ۴۰۰ دور تشکیل شده که به یک منبع تغذیه متصل است و لغزنده را در ابتدای ریل ثابت نگه‌می‌دارد.

روش آزمایش:

قانون اول نیوتون:

الف – ۶ فوتوسل را در نقاط مختلف مسیر قرارداده و به ترتیب از فوتوسل اول هر دو فوتوسل را به یک زمان‌سنج وصل نمایید به این ترتیب که فوتوسل اول به فیش سمت چپ و فوتوسل دوم به فیش سمت راست زمان‌سنج متصل می‌شود. زمان‌سنج‌ها را روی مُدِ ۲ قراردهید، تا فقط زمان عبور عرض پرده‌ی متصل به متحرک (لغزنده) را اندازه‌گیری کنند. در این مُد، زمان‌سنج دو عدد را ذخیره می‌کند که با دکمهٔ Next می‌توانید هر دو عدد را مشاهده کنید. عدد شماره‌ی ۱ مربوط به فوتوسلی است که به فیش سمت چپ متصل است و عدد شماره‌ی ۲ مربوط به فوتوسلی است که به فیش سمت راست متصل می‌باشد.

نخ را بر روی شیار قرقره قرار دهید و ۴ گرم نیرو به انتهای نخ متصل به لغزنده وصل کنید و صفحه بازدارنده را در فاصله‌ی معینی (حدود ۱۵-۲۰ سانتی‌متری انتهای وزنه) در مسیر حرکت وزنه‌های آویخته شده قرار دهید. پمپ هوا را روی درجه‌ی ۳ قرار دهید. مدار مربوط به آهنربای الکتریکی را ببندید و پیچ تنظیم منبع تغذیه را روی ۵ ولت قرار داده و منبع را روشن کنید. حالا پمپ هوا را روشن کنید. آهنربا لغزنده را ثابت نگه‌می‌دارد. به این ترتیب با بازکردن مدار آهنربا لغزنده رها شده و با سرعت اولیه‌ی صفر (یعنی از حالت سکون) تحت تأثیر وزن وزنه‌ها شروع به حرکت می‌کند. **به محض رسیدن وزنه‌ها به صفحه‌ی بازدارنده نیروی شتاب دهنده قطع شده وپس از آن حرکت لغزنده یکنواخت خواهدشد.**

با اندازه‌گیری عرض پرده‌ی متصل به لغزنده به‌وسیله کولیس و زمان اندازه‌گیری شده توسط زمان‌سنج‌ها سرعت لحظه‌ای لغزنده را در نقاط مختلف مسیر یعنی در مکان‌هایی که فتوسل‌ها قرار دارند از رابطه‌ی $V = \frac{\Delta L}{\Delta t}$ (ΔL عرض پرده و Δt زمانی است که زمان سنج اندازه‌گرفته) بدست آورده، جدول (۱) را کامل کرده و حرکت یکنواخت را تحقیق کنید. دقت نمایید که سطر اول جدول (۱) و (۲) در محاسبات وارد نمی‌شود و تنها به این منظور اندازه‌گیری شده که مطمئن باشیم سرعت‌ها در شش نقطه‌ی کاملاً تصادفی محاسبه می‌شود.

جدول(۱): $\Delta L = \ldots$ عرض پرده

فاصله‌ی هر فتوسل تا مبدأ	X(m)						
مدت زمان عبور پرده	$\Delta t(s)$						
سرعت لحظه‌ای لغزنده	V(m/s)						

۱- سرعت میانگین را بدست آورید و با استفاده از آن خطای مطلق و خطای نسبی در اندازه‌گیری سرعت را تعیین کنید.

ب – محل قرارگرفتن فوتوسل‌ها را کمی (۲ تا ۳ سانتی‌متر) تغییر دهید تا فاصله‌ی فوتوسل‌ها از مبدأ تغییر کند اما مکان صفحه‌ی نگهدارنده را تغییر ندهید. به این ترتیب لغزنده در همان نقطه از مسیرکه در قسمت اول آزمایش حرکت یکنواخت خود را شروع

کرده بود، شروع به حرکت یکنواخت خواهد کرد. آزمایش را مانند قسمت الف تکرار کرده و مقادیر اندازه‌گیری شده را در جدول(۲) بنویسید.

جدول (۲): عرض پرده $\Delta L = \ldots$

فاصله‌ی هر فتوسل تا مبدأ	X(m)						
مدت زمان عبور پرده	Δt(s)						
سرعت لحظه‌ای لغزنده	V(m/s)						

۲- سرعت میانگین را اندازه گیری کنید.

۳- میانگین سرعت در جدول ۱ و ۲ را مقایسه کنید و درصد خطای نسبی را تعیین کنید. دلیل یکی شدن میانگین در قسمت اول و دوم را توضیح دهید.

قانون دوم نیوتن:

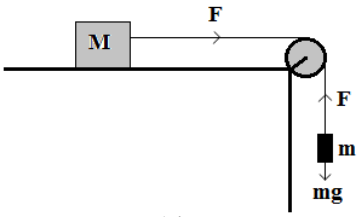
الف – صفحه بازدارنده را بردارید. به این ترتیب لغزنده تا انتهای مسیر تحت تأثیر نیروی وزن وزنه‌ها حرکت شتابدار خواهد داشت. یکی از فتوسل‌ها را در فاصله‌ی ۵۰ سانتی متری مبدأ قرار دهید و آن‌را به اولین زمان‌سنج وصل کرده و بقیه‌ی زمان‌سنج‌ها را خاموش کنید. زمان‌سنجِ روشن را روی مُدِ ۲ قراردهید. همانطور که می‌دانید این مُد مدت زمانی را اندازه می‌گیرد که پرده از مقابل فتوسل رد شده است. به این ترتیب با کمک رابطه‌ی $V = \frac{\Delta L}{\Delta t}$ سرعت لحظه‌ای لغزنده در محل فتوسل بدست می‌آید. با توجه به اینکه فاصله‌ی X و سرعت اولیه (V_0) و سرعت نهایی (V) در این فاصله را در اختیار دارید، می‌توانید شتاب را در این فاصله از رابطه‌ی مستقل از زمان $(V^2 - {V_0}^2 = 2aX)$ بیابید.

فاصله‌ی فتوسل تا مبدا (X) را با متر نواری، عرض پرده (ΔL) را به وسیله کولیس، و جرم لغزنده (M) را بوسیله ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری نمایید و در جدول (۳) یادداشت کنید. لغزنده را در ابتدای تخت هوا (ریل) ساکن کنید. نخ را به لغزنده وصل نمایید و ادامه‌ی آن را بر روی شیار قرقره قرار دهید. به ترتیب وزنه‌هایی را که در جدول مشخص شده به انتهای نخ آویزان کنید. پمپ هوا را روی درجه‌ی ۳ قرار دهید. پمپ را روشن و مدار آهنربا را باز کنید. پمپ هوا اصطکاک را حذف می‌کند و لغزنده از حالت سکون $(V_0 = 0)$ شروع به حرکت می‌کند.

جدول (۳): $X = ۵۰$ cm عرض پرده $\Delta L = \ldots.$

جرم وزنه آویزان m (gr)	نیروی وارد بر لغزنده F (N)	بازه‌ی زمانی عبور پرده از مقابل فتوسل Δt (s)	سرعت لحظه‌ای لغزنده در هنگام عبور از فتوسل V (m/s)	شتاب لغزنده a (m/s^2)	جرم لغزنده M (Kg)	$\frac{F}{a}$ (Kg)
۱						
۲						
۳						
۴						
۵						

۴- با استفاده از جدول (۳) شتاب را در ۵ حالت فوق محاسبه نمایید.



شکل (۱)

در شکل روبرو بصورت شماتیک لغزنده‌ای را می‌بینید که تحت تأثیر وزنه‌ای به جرم m روی سطح بدون اصطکاک با شتاب a به سمت راست در حرکت است. همانطور که در شکل می‌بینید تنها نیروی وارد بر لغزنده به جرم M نیروی کشش نخ است. با توجه به شکل (۱) نیروی کشش نخ (F) برابر خواهد بود با:

$$F = m(g - a) \qquad (۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳) نیروی شتابدهنده به جرم M را در هر حالت محاسبه کرده و جدول (۳) را کامل کنید.

۵- دو ستون آخر جدول (۳) را با هم مقایسه کنید. آیا تساوی (۱) برقرار است؟ علت اختلاف را توضیح دهید.

۶- نمودار نیروی وارد بر لغزنده برحسب شتاب لغزنده $(F - a)$ را در کاغذ میلی‌متری رسم نمایید. شکل نمودار چگونه است؟

۷- با محاسبه‌ی شیب نمودار فوق جرم لغزنده را محاسبه نمایید.

۸- اگر جرم لغزنده که با ترازو سنجیده شده‌است را مقدار واقعی در نظر بگیریم، درصد خطای نسبی برای جرم لغزنده که با روش استخراج از نمودار (سؤال ۷) بدست آمده را محاسبه نمایید .

ب- مکان فتوسل (X) را تغییر ندهید. این‌بار وزنه‌ی ۳ گرمی به لغزنده بیاویزید و مقدار آن را تغییر ندهید. دو وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی مخصوص در اختیار دارید. یکی از وزنه‌ها را روی لغزنده قراردهید. به این ترتیب جرم لغزنده که قبلاً توسط ترازو اندازه گرفته بودید(M)، به اندازه‌ی ۱۰۰ گرم اضافه خواهد شد. حال پمپ را روشن کرده و مدار آهنربا را باز کنید تا لغزنده از حال سکون شروع به حرکت کند $(V_0 = 0)$. به روش قسمت قبل شتاب لغزنده را محاسبه کرده و در جدول (۴) یادداشت کنید. نیروی وارد بر لغزنده را نیز با استفاده از رابطه (۳) حساب کرده و در جدول (۴) یادداشت کنید.
وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی دوم را نیز روی لغزنده قرار دهید تا جرم آن ۱۰۰ گرم دیگر اضافه شود و آزمایش را با جرم جدید تکرار کنید. شتاب و نیروی شتابدهنده را محاسبه کرده و جدول را تکمیل کنید.

جدول (۴):

Ma (N)	F (N)	a (m/s^2)	V (m/s)	Δt (s)	M (Kg)	m (gr)
						۳
						۳

۹- دو ستون آخر جدول (۴) را با هم مقایسه کنید. آیا تساوی (۲) برقرار است؟ علت اختلاف را توضیح دهید.

بررسی پایستگی تکانه خطی در برخورد یک بعدی

اهداف آزمایش:

مطالعه برخورد کشسان (الاستیک) و ناکشسان (غیر الاستیک)، تحقیق پایستگی تکانه‌ی خطی

تئوری آزمایش:

دو جسم با جرمهای m_1 و m_2 و سرعتهای $\overrightarrow{v_1}$و $\overrightarrow{v_2}$ را در نظر می‌گیریم. اندازه حرکت خطی این اجسام برابر است با:

$$\overrightarrow{P_1} = m_1\overrightarrow{v_1} \quad , \quad \overrightarrow{P_2} = m_2\overrightarrow{v_2}$$

اگر این دو جسم به یکدیگر برخورد کنند و سرعت آنها درست در لحظه‌ی بعد از برخورد $\overrightarrow{v_1'}$ و $\overrightarrow{v_2'}$ باشد اندازه حرکت خطی دو جسم بعد از برخورد خواهد شد: $\overrightarrow{P_1'} = m_1\overrightarrow{v_1'} \quad , \quad \overrightarrow{P_2'} = m_2\overrightarrow{v_2'}$

اندازه حرکت خطی سیستم مرکب از دو جسم m_1 و m_2 برابر خواهد بود با:

اندازه حرکت سیستم قبل از برخورد: $\vec{P} = \overrightarrow{P_1} + \overrightarrow{P_2}$

اندازه حرکت سیستم بعد از برخورد: $\vec{P'} = \overrightarrow{P_1'} + \overrightarrow{P_2'}$

اگر برآیند نیروهای خارجی وارد بر سیستم صفر باشد، آنگاه اندازه حرکت کل سیستم در طی برخورد ثابت باقی می‌ماند.

$$\vec{P} = \vec{P'} \qquad (۱)$$

در اینصورت: $m_1\overrightarrow{v_1} + m_2\overrightarrow{v_2} = m_1\overrightarrow{v_1'} + m_2\overrightarrow{v_2'}$

برخورد کشسان: در این نوع برخود علاوه بر پایستگی اندازه حرکت خطی مجموعه حین برخورد، انرژی جنبشی مجموعه نیز حین برخورد ثابت می‌ماند.

$$\begin{cases} m_1\overrightarrow{v_1} + m_2\overrightarrow{v_2} = m_1\overrightarrow{v_1'} + m_2\overrightarrow{v_2'} \\ \frac{1}{2}m_1{v_1}^2 + \frac{1}{2}m_2{v_2}^2 = \frac{1}{2}m_1{v_1'}^2 + \frac{1}{2}m_2{v_2'}^2 \end{cases} \qquad (۲)$$

برخورد ناکشسان: در این نوع برخورد اندازه حرکت کل مجموعه حین برخورد ثابت و پایسته است ولی انرژی جنبشی مجموعه ثابت و پایسته نیست. در یک برخورد ناکشسان ممکن است انرژی جنبشی نهایی کمتر از انرژی جنبشی اولیه باشد، که در این صورت مقداری انرژی صرف تغییر شکل و یا تبدیل به انرژی داخلی گشته و یا ممکن است به دلیل آزاد شدن مقداری انرژی پتانسیل و تبدیل آن به انرژی جنبشی، انرژی جنبشی مجموعه افزوده شود.

$$m_1\overrightarrow{v_1} + m_2\overrightarrow{v_2} = m_1\overrightarrow{v_1'} + m_2\overrightarrow{v_2'} \qquad (۳)$$

برخورد کاملاً ناکشسان: در این نوع برخورد سرعت نسبی دو جسم برخورد کننده پس از برخورد صفر می‌شود. در نتیجه دو جسم به یکدیگر چسبیده و جسم واحدی که جرم آن مجموع جرمهای دو جسم است تشکیل می‌دهند و با هم حرکت می‌کنند. $\overrightarrow{v'}$ سرعت دو جسم چسبیده بعد از برخورد است. در این نوع برخورد نیز تنها اندازه حرکت خطی مجموعه حین برخورد ثابت می‌ماند ولی انرژی جنبشی مجموعه تغییر خواهد کرد.

$$m_1\overrightarrow{v_1} + m_2\overrightarrow{v_2} = (m_1 + m_2)\vec{V} \qquad (۴)$$

این آزمایش شامل دو بخش است. در بخش اول آزمایش با استفاده از ۲ لغزنده و تخت هوا که در اختیار است شرایط یک برخورد کاملاً کشسان را بوجود آورده و درستی روابط (۲) را بررسی خواهیم کرد. در بخش دوم شرایط یک برخورد کاملاً نا کشسان را مهیا کرده و درستی رابطه‌ی (۴) را بررسی می‌کنیم.

وسایل مورد نیاز:

پمپ هوا، تخت هوا، ۲ تا لغزنده با پرده، زمان‌سنج، فتوسل، وزنه ۱۰۰ گرمی، اتصالات لازم برای لغزنده‌ها، ترازو، کولیس ورنیه.

پمپ هوا وتخت هوا: مجموعه‌ای برای حذف اصطکاک می‌باشند. تخت هوا مکانی است که لغزنده روی آن حرکت می‌کند. روی سطح آن سوراخ‌های ریزی تعبیه شده است. هوای دمیده شده توسط پمپ هوا از ابتدای ریل (تخت هوا) وارد می‌شود و از سوراخ های سطح فوقانی آن خارج می‌گردد. در نتیجه حرکت لغزنده بر روی ریل هوا صورت می‌گیرد و می‌تواند تقریباً بدون اصطکاک فرض شود. روی پایه‌های ریل دو پیچ نصب شده است که بوسیله آنها می‌توان تخت هوا را تراز کرد.
فوتوسل: وسیله ایU شکل که دیودهای داخل آن به زمان‌سنج، فرمان شروع و خاتمه شمارش را به هنگام عبور پرده از برابر آن می‌دهد.
زمان‌سنج دیجیتالی: این وسیله به فتوسل متصل شده و در این آزمایش باید روی مُد۳ قرار گیرد تا زمان عبورعرض پرده متصل به لغزنده را برای فتوسل متصل به زمان‌سنج اندازه می‌گیرد. با اندازه‌گیری این زمان و دانستن عرض پرده که قبلاً با کولیس اندازه‌گیری شده می‌توان سرعت لحظه‌ای لغزنده را در محل فتوسل بدست آورد.

روش آزمایش و پرسش‌ها:

۱- با استفاده از قوانین نیوتون رابطه‌ی (۱) را ثابت کنید. مراحل اثبات را در گزارشکارتان بنویسید.

بخش اول بررسی برخورد کاملاً کشسان: ابتدا از تراز بودن تخت هوا مطمئن شوید، به طوریکه در هنگام روشن بودن پمپ هوا لغزنده‌ها را در هرکجا بر روی ریل هوا قرار دهید به هیچ سمت حرکت نداشته باشند. این کار توسط پیچ‌های پایه تخت هوا صورت می‌گیرند. توجه کنید که لغزنده‌ی دوم (m_2) در هر چهار قسمت آزمایش قبل از برخورد بین دو فتوسل قرار گرفته و ساکن است و سرعت اولیه‌ی لغزنده اول (m_1) نیز توسط ضربه کوچکی که به آن وارد می‌نمایید، تأمین می‌شود.
اندازه‌گیری سرعت بوسیله‌ی فتوسل‌ها انجام می‌گیرد بدین ترتیب که روی هر لغزنده یک پردهٔ کوچک، به پهنای ΔL نصب گردیده که هنگام عبور لغزنده از مقابل فتوسل، پرده مذکور مانع رسیدن نور به فتوسل می‌شود و فتوسل به زمان‌سنج فرمان آغاز شمارش زمان را می‌دهد. با عبور پرده از مقابل فتوسل، نور به فتوسل می‌رسد و فتوسل به زمان‌سنج فرمان پایان شمارش زمان را می‌دهد. عدد ثبت شده روی زمان سنج (Δt)، بازه‌ی زمانی که طول کشیده تا پرده از مقابل فتوسل عبور کند را نشان می‌دهد. سرعت پرده در بازه‌ی زمانی که از مقابل فتوسل عبور می‌کند، از رابطه‌ی $v = \frac{\Delta L}{\Delta t}$ بدست می‌آید پس قبل از شروع آزمایش عرض پرده‌ی متصل به هر لغزنده (ΔL_1 و ΔL_2) را با کولیس اندازه بگیرید. از آنجایی که پرده متصل به لغزنده است، "سرعت پرده در هنگام عبور از فتوسل" همان "سرعت لحظه‌ای لغزنده هنگام عبور از فتوسل" است.
این قسمت از آزمایش را با سه شرط اولیه‌ی متفاوت انجام می‌دهیم. ابتدا حالتی را درنظر می‌گیریم که جرم دو لغزنده کاملاً برابر باشد. حالت بعدی جرم لغزنده‌ی اول بیشتر از لغزنده‌ی دوم باشد و حالت سوم جرم لغزنده‌ی دوم بیشتر از لغزنده‌ی اول است.

الف- $m_1 = m_2$

دو گیره فنری را به دو سر روبرو به هم لغزنده‌ها متصل کنید. دو لغزنده را هم جرم کنید. به این ترتیب که جرم هر یک از لغزنده‌ها را توسط ترازوی دیجیتالی اندازه بگیرید. چنانچه جرم آنها یکی نبود با اضافه کردن قطعات کوچک قلع به لغزنده‌ای که جرم کمتری دارد، جرمهای آنها را با هم مساوی کنید. سپس لغزنده‌ی اول را در ابتدای ریل هوا و لغزنده‌ی دوم را بین دو فتوسل قرار دهید.

درجه‌ی پمپ هوا را روی ۳ قرار دهید. بعد از روشن کردن پمپ هوا با وارد کردن یک ضربه کوچک به لغزنده اول، لغزنده با سرعت اولیه‌ی کوچکی شروع به حرکت می‌کند و قبل از برخورد از مقابل فتوسل اول عبور می‌کند. زمان عبورِ پرده متصل به آن قبل از برخورد (Δt_1)، بوسیله‌ی زمان‌سنج اول ثبت می‌شود که با دانستن عرض پرده‌ی اول (ΔL_1) سرعت لحظه‌ای آن قبل از برخورد (V_1) بدست می‌آید. اما لغزنده‌ی دوم قبل از برخورد ساکن است پس سرعت قبل از برخورد آن صفر خواهد بود ($V_2 = 0$). از آنجاییکه برخورد کشسان و جرم لغزنده‌ها نیز برابر است بعد از برخورد لغزنده اول از حرکت می‌ایستد ($V'_1 = 0$) و لغزنده‌ی دوم با سرعتی برابر با سرعت لغزنده‌ی اول شروع به حرکت می‌کند. زمان عبور پرده متصل به لغزنده‌ی دوم بعد از برخورد ($\Delta t'_2$)، نیز بوسیله زمان‌سنج دوم ثبت می‌شود و با داشتن عرض پرده‌ی دوم (ΔL_2) سرعت آن بعد از برخورد (V'_2) بدست می‌آید. پمپ هوا را خاموش کنید و مقادیر اندازه‌گیری شده را در جدول (۱) وارد کنید.

ب- $m_1 > m_2$

جرم لغزنده‌ها را در قسمت الف اندازه گرفتید. در این قسمت یک وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی روی لغزنده‌ی اول قراردهید. به این ترتیب جرم لغزنده‌ی اول ۱۰۰ گرم بیشتر از لغزنده‌ی دوم خواهد شد. دقیقاً مثل قسمت الف لغزنده‌ی اول را ابتدای ریل هوا و لغزنده‌ی دوم را بین دو فتوسل قرار دهید. بعد از روشن کردن پمپ هوا با وارد کردن یک ضربه کوچک به لغزنده اول، لغزنده با سرعت اولیه‌ی کوچکی شروع به حرکت می‌کند و قبل از برخورد از مقابل فتوسل اول عبور می‌کند. زمان عبورِ پرده متصل به آن قبل از برخورد (Δt_1)، بوسیله‌ی زمان‌سنج اول ثبت می‌شود و می‌توانید سرعت قبل از برخورد (V_1) آن را محاسبه کنید. سرعت قبل از برخورد لغزنده‌ی دوم صفر است ($V_2 = 0$). بعد از برخورد لغزنده‌ی دوم شروع به حرکت کرده و از مقابل فتوسل دوم عبور می‌کند. زمان عبور پرده متصل به لغزنده‌ی دوم بعد از برخورد ($\Delta t'_2$)، نیز بوسیله زمان‌سنج دوم ثبت می‌شود و با داشتن عرض پرده‌ی دوم (ΔL_2) سرعت آن بعد از برخورد (V'_2) بدست می‌آید. اما لغزنده‌ی اول به علت سنگین‌تر بودن از حرکت نمی‌ایستد و با سرعتی کمتر از قبل به حرکت خود ادامه می‌دهد و از مقابل فتوسل دوم عبور می‌کند. پس برای ثبت زمان عبور لغزنده‌ی اول از مقابل فتوسل دوم بعد از برخورد، لازم است بعد از اینکه لغزنده‌ی دوم از مقابل فتوسل دوم عبور کرد، $\Delta t'_2$ را خوانده وسریع زمان‌سنج را reset کنید. به این ترتیب زمان‌سنج دوم زمان عبور لغزنده‌ی اول بعد از برخورد ($\Delta t'_1$) را نیز ثبت خواهد کرد. با داشتن ΔL_1 می‌توان سرعت بعد از برخورد لغزنده‌ی اول (V'_1) را محاسبه کرد. پمپ هوا را خاموش کنید و مقادیر اندازه‌گیری شده را در جدول (۱) وارد کنید.

ج- $m_2 > m_1$

این بار وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را روی لغزنده‌ی دوم قراردهید تا لغزنده‌ی دوم سنگین‌تر از لغزنده‌ی اول بشود. لغزنده‌ها را مانند دو قسمت قبل روی ریل هوا قرار دهید. بعد از روشن کردن پمپ هوا با وارد کردن یک ضربه کوچک به لغزنده اول، لغزنده با سرعت اولیه‌ی کوچکی شروع به حرکت می‌کند و قبل از برخورد از مقابل فتوسل اول عبور می‌کند. زمان عبورِ پرده متصل به آن قبل از برخورد (Δt_1)، بوسیله‌ی زمان‌سنج اول ثبت می‌شود و می‌توانید سرعت قبل از برخورد (V_1) آن را محاسبه کنید. سرعت قبل از برخورد لغزنده‌ی دوم صفر است ($V_2 = 0$). بعد از برخورد لغزنده‌ی دوم شروع به حرکت کرده و از مقابل فتوسل دوم عبور می‌کند. زمان عبور پرده متصل به لغزنده‌ی دوم بعد از برخورد ($\Delta t'_2$)، نیز بوسیله زمان‌سنج دوم ثبت می‌شود و با داشتن عرض پرده‌ی دوم (ΔL_2) سرعت آن بعد از برخورد (V'_2) بدست می‌آید. چون جرم‌ها برابر نیست لغزنده‌ی اول از حرکت نمی‌ایستد و چون سبک‌تر است برمی‌گردد و دوباره از مقابل فتوسل اول عبور می‌کند. پس این‌بار برای خواندن ($\Delta t'_1$) باید فتوسل اول را سریعاً reset کنید. پمپ هوا را خاموش کرده و مقادیر را در جدول (۱) وارد کنید.

جدول (۱):

قسمت‌ها	m_1 (Kg)	m_2 (Kg)	Δt_1 (s)	$\Delta t'_1$ (s)	$\Delta t'_2$ (s)	V_1 (m/s)	V'_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V'_2 (m/s)
الف									
ب									
ج									

۲- پایستگی اندازه حرکت خطی و پایستگی انرژی جنبشی را در هر یک از سه قسمت الف، ب، ج تحقیق کنید.

۳- آیا نتیجه‌ای که از قسمت الف آزمایش بدست می‌آید با آنچه که از تئوری بدست می‌آید، مطابقت دارد؟

بخش دوم برخورد کاملاً ناکشسان: وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی را از روی لغزنده‌ها بردارید. گیره‌های فنری را از سر لغزنده‌ها بیرون آورده و به سر لغزنده اول سوزن و به سر روبرو به آن بر روی لغزندهٔ دوم محفظه محتوی پارافین را وصل کنید و جرم لغزنده‌ها را مجدداً اندازه بگیرید و در جدول (۲) یادداشت کنید. لغزنده‌ها را مانند بخش اول روی ریل هوا قرار دهید. پمپ هوا را روشن کرده و با وارد کردن یک ضربه کوچک به لغزنده اول، لغزنده را با سرعت اولیه‌ی کوچکی وادار به حرکت کنید. بعد از برخورد سوزن وارد محفظه‌ی پارافین شده و دو لغزنده به هم وصل می‌شوند و مانند یک جسم حرکت می‌کنند. با اندازه‌گیری زمان‌ها جدول (۲) را کامل کرده به پرسش‌ها پاسخ دهید.

جدول (۲):

m_1 (Kg)	m_2 (Kg)	Δt_1 (s)	$\Delta t'$ (s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V' (m/s)

۴- با استفاده از جدول (۲) پایستگی اندازه حرکت خطی را برای برخورد کاملاً ناکشسان تحقیق کنید.

۵- در آزمایش برخورد کاملاً ناکشسان چه مقدار انرژی جنبشی اولیه تلف شده است؟ درصد انرژی تلف شده را محاسبه کنید.

۶- توضیح دهید که انرژی چگونه تلف شده است.

بررسی سینماتیک و دینامیک حرکت دورانی دریک بعد

اهداف آزمایش:

آشنایی با جسم صلب ومحور دوران و گشتاور ماند، سنجش سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای در حرکت دورانی شتاب‌دار

تئوری آزمایش:

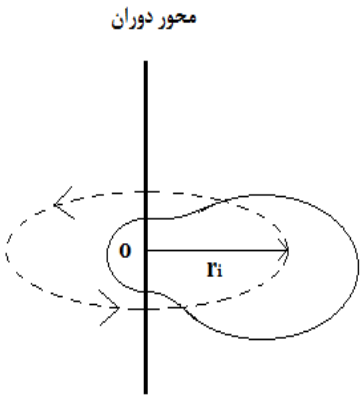
بخش اول آشنایی با جسم صلب، محور دوران و گشتاور ماند: جسم صلب به جسمی گویند که در هنگام حرکت، فاصله‌ی تمام اجزای آن نسبت به یکدیگر تغییر نمی‌کند. اجسام حقیقی کاملاً صلب نیستند. اما اغلب اجسام آن‌قدر صلب هستند که در بسیاری از مسائل می‌توانیم از پیچیده شدن، خم شدن و یا مرتعش شدن آنها صرفنظر کنیم. هنگامی یک جسم صلب حرکت دورانیِ تنها دارد که هر ذره از جسم بر روی یک دایره بچرخد، طوری‌که مرکز تمام دایره‌ها روی خط مستقیمی باشند. به این خط مستقیم محور دوران جسم صلب می‌گویند. به زبان دیگر، وقتی جسم یک دور کامل می‌چرخد هر نقطه i ازجسم، دایره‌ای با شعاع r_i به مرکزیت محور دوران را طی می‌کند.

گشتاور ماند یک جسم نمایانگر مقاومت یک جسم در مقابل تغییر حرکت دورانی حول محور دوران می‌باشد که آن را با I نشان می‌دهیم و برابر با مجموع حاصل‌ضرب‌های جرم ذرات تشکیل‌دهنده‌ی یک جسم در مجذور فاصله‌شان از محور دوران است.

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \qquad (۱)$$

گشتاور ماند دارای بعد ML^2 است و معمولاً برحسب $Kg.m^2$ بیان می‌شود.

بخش دوم سینماتیک دوران: اگر از هر نقطه از جسم صلب درحال دوران خطی بر محور دوران رسم کنیم، هر خط در یک بازه‌ی زمانی معین Δt همان زاویه‌ی $(\Delta\theta)$ را جاروب می‌کند که خطوط نظیر آن جاروب می‌کنند. از این‌رو دوران محض یک جسم صلب را می‌توانیم با در نظر گرفتن حرکت هر یک از ذرات تشکیل دهنده‌ی آن توصیف نماییم.



شکل (۱)

بنابراین سرعت زاویه‌ای متوسط جسم برابر است با :

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad (۲)$$

و سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای ω بصورت حد این نسبت است هنگامی که Δt به سمت صفر میل می‌کند.

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \qquad (۳)$$

اگر سرعت زاویه‌ای ω ثابت نباشد، جسم شتاب زاویه‌ای دارد. شتاب زاویه‌ای متوسط جسم در بازه‌ی زمانی Δt برای تغییر سرعت زاویه‌ای $\Delta\omega$ برابر است با :

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \qquad (۴)$$

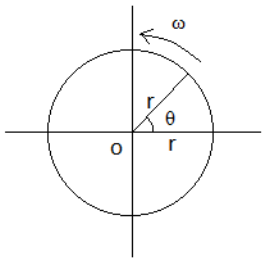
و شتاب لحظه‌ای برابر حد این نسبت است هنگامی‌که Δt به سمت صفر میل می‌کند.

$$\alpha = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$$

اما چنانچه حرکت شتابدار با شتاب ثابت باشد، α و $\overline{\alpha}$ برابرند. یعنی:

$$\omega = \alpha t + \omega_0 \qquad (۵)$$

حرکت دورانی یک جسم صلب حول یک محور ثابت با حرکت انتقالی جسم صلب در یک امتداد ثابت همخوانی صوری دارد. متغیرهای سینماتیکی در حالت اول θ، ω، α و در حالت دوم x، V، a هستند. روابط میان متغییرهای انتقالی جسم و متغیرهای دورانی آن را می‌توان برای هر نقطه از جسم که فاصله‌اش از محور دوران r باشد بصورت زیر نوشت.



شکل (۲)

$$S = r\theta$$

$$\frac{ds}{dt} = r\frac{d\theta}{dt} \rightarrow V = r\omega \qquad (۶)$$

$$\frac{dV}{dt} = r\frac{d\omega}{dt} \rightarrow a = r\alpha \qquad (۷)$$

که در روابط فوق S طول کمان پیموده شده، V سرعت خطی و a_t شتاب مماسی حرکت می‌باشد. در حرکت دورانی یک جسم صلب با شتاب زاویه‌ای ثابت می‌توانیم معادلات حرکت دورانی را بصورت زیر بنویسیم:

$$\theta = \frac{1}{2}\alpha t^2 + \omega_0 t \qquad (۸) \qquad\qquad \omega^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta \qquad (۹)$$

در این آزمایش حرکت دورانی جسمی را مطالعه می‌کنیم که ۱- صلب است. ۲- محور دوران در چارچوب مرجع آزمایشگر ثابت است.

بخش سوم دینامیک دوران: در حرکت انتقالی نیرو را به شتاب خطی جسم وابسته می‌کنیم. در حرکت دورانی کمیت متناظر با نیرو را گشتاو نیرو می‌نامند. گشتاور نیرو عامل دوران یک جسم صلب حول محور دوران است. اگر نیروی $\vec{F}$ به جسم صلب وارد شود، بطوری که نقطه اثر نیرو نسبت به محور دوران با بردار $\vec{r}$ مشخص شود، گشتاور نیرو از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$|\vec{\tau}| = |\vec{r}||\vec{F}| \sin\theta$$

که در آن $\vec{\tau}$ گشتاور نیرو و θ زاویه‌ی بین $\vec{r}$ و $\vec{F}$ است. اگر $\vec{\tau}$ گشتاور نیرو در امتداد محور چرخش و α شتاب زاویه‌ای جسم حول این محور باشد، ثابت می‌شود که گشتاور نیرو با شتاب زاویه‌ای متناسب است.

$$\tau = I\alpha \qquad (۱۰)$$

که ضریب تناسب I گشتاور ماند جسم نامیده می‌شود.

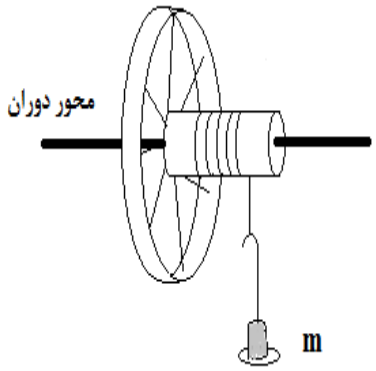
گشتاور لختی یک ذره‌ی مادی به جرم m که به فاصله‌ی r از محور دوران قراردارد نسبت به این محور طبق تعریف برابر است با :

$$I = mr^2$$

گاهی که جسم ساختار پیچیده‌ای دارد و بدست آوردن گشتاور ماند آن از رابطه‌ی (۱) پیچیده می‌شود، یک راه مناسب برای سنجش I، استفاده از رابطه‌ی (۱۰) است. با معلوم بودن α و τ می‌توان I جسم را تعیین کرد.

انرژی جنبشی دورانی جسمی که با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد برابر است با :

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2 \qquad (۱۱)$$



شکل (۳)

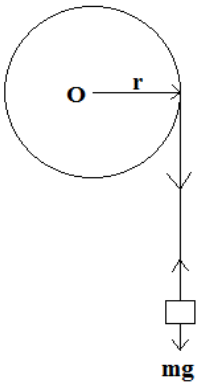
جسم مورد نظر در این آزمایش چرخی است که طبق شکل (۳) چند دور نخ حول محور استوانه‌ای آن پیچیده شده و به انتهای نخ وزنه‌ای متصل است. محاسبه‌ی گشتاور ماند چرخ مشکل است. بنابراین به آن گشتاور نیرو وارد کرده و با بدست آوردن شتاب زاویه‌ای چرخنده و با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) گشتاور ماند چرخ را محاسبه می‌کنیم.

با سقوط وزنه، چرخ شروع به چرخیدن می‌کند. اگر از نیروهای اصطکاک صرفنظر کنیم، گشتاور برآیند نیروهای وارد برچرخ برابر گشتاور نیروی کشش نخ T نسبت به محور دوران است.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{T}$$

$$\tau = rT \sin 90 = rT$$

از طرفی نیروی کشش نخ برحسب شتاب سقوط وزنه‌ی m از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید :



شکل (۴)

$$\sum F = ma$$

$$mg - T = ma \rightarrow T = m(g - a)$$

$$a = r\alpha \rightarrow T = m(g - r\alpha)$$

$$\tau = rT = rm(g - r\alpha) \qquad (۱۲)$$

بنابراین با اندازه‌گیری α و r و معلوم بودن m می‌توان τ و سپس I را بدست آورد.

وسایل مورد نیاز:

چرخنده، سه پایه بزرگ با میله‌ی نگهدارنده، وزنه های مختلف، پایه‌ی نگهدارنده‌ی وزنه‌ها، نخ، زمان‌سنج، فتوسل، کولیس.

روش آزمایش و پرسش‌ها:

بخش اول آشنایی با جسم صلب و محور دوران:

چرخ را چند بار از جهت‌های متفاوت بچرخانید. دقت کنید که کدام بخش از چرخ با هم می‌چرخند. محدوده‌ی جسم صلب را تشخیص دهید. محور دوران را پیدا کنید.

۱- عوامل ایجاد اصطکاک برای حرکت چرخ کدام هستند؟

بخش دوم بررسی سینماتیک دوران:

از آنجایی که در آزمایش دوران چرخ، کاهش عوامل ایجاد اصطکاک به راحتی امکان‌پذیر نیست، باید به روش عملی دیگری نیروی اصطکاک و گشتاور ایجاد شده از آن را حذف کنیم. ابتدا جرم پایه‌ی نگهدارنده را توسط ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری کرده و سپس آن را به انتهای نخ بیاویزید. یک وزنه‌ی ۱۰ گرمی را به آرامی روی پایه قرار دهید. چنانچه چرخ شروع به چرخیدن نکرد ابتدا ضربه‌ی کوچکی به چرخ بزنید، اگر شروع به چرخیدن نکرد وزنه‌ی دیگری به پایه اضافه کنید و این کار را تا جایی ادامه دهید که چرخ به آرامی شروع به حرکت کند. به این ترتیب وزن پایه به اضافه‌ی وزن وزنه‌ها برابر با نیروی اصطکاک ایستایی سیستم است. این وزنه‌ها باید تا انتهای آزمایش روی پایه بمانند و در مراحل بعدی وزنه‌های خواسته شده را به این وزنه‌ها اضافه کنید.

۲- چرا بایستی ابتدا نیروی اصطکاک را حذف کنیم؟

۳- نیروی لازم برای حذف اصطکاک چه اندازه است؟

یک وزنه‌ی ۵۰ گرمی به پایه اضافه کنید. پیش از رها کردن چرخ زمان‌سنج را برای شمارش نیم دور(π رادیان) تنظیم کنید. برای این منظور بعد از روشن کردن زمان‌سنج دکمه‌ی set را فشرده و با دکمه‌ی up شمارشگر را روی عدد ۱ بگذارید و دوباره دکمه‌ی set را بفشارید تا شمارشگر ثابت شود. حال دکمه‌ی start را بزنید تا زمان‌سنج آماده‌ی اندازه‌گیری شود. چرخ را از حالت سکون ($\omega_0 = 0$) رها کنید. بعد از رد شدن اولین نشانه‌ی سیاه‌رنگ از مقابل فتوسل زمان‌سنج شروع به شمارش می‌کند و بعد از نیم دور (π رادیان) شمارش متوقف می‌شود.
چرخ را به حالت قبل برگردانده، زمان‌سنج را reset کرده و این بار روی عدد ۲ تنظیم کنید تا زمان ۱ دور (2π رادیان) را اندازه بگیرد. با همین روش جدول (۱) را کامل کنید.

جدول (۱):

دور	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵
زاویه‌ی پیموده شده θ (rad)										
زمان t(s)										
مجذور زمان $t^2(s^2)$										

۴- نمودار زاویه‌ی پیموده شده بر حسب مجذور زمان (θ - t^2) را در یک کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی (۸) کمک بگیرید.)

۵- شتاب زاویه‌ای چرخ را از نمودار سؤال ۴ بدست بیاورید.

۶- نمودار زاویه‌ی پیموده شده را برحسب زمان (θ- t) را در کاغذ تمام لگاریتم رسم کنید. برای این منظور زاویه‌ی پیموده شده (θ) را بر حسب زمان (t) در کاغذ تمام لگاریتم رسم نمایید. شکل نمودار چگونه است؟

۷- شیب نمودار فوق را محاسبه کنید. شیب این نمودار نشان‌دهنده‌ی چیست؟

۸- شتاب زاویه‌ای چرخ را از روی نمودار سؤال ۶ محاسبه کنید.

۹- شتاب زاویه‌ای چرخ را که از در سؤال ۵ و ۸ بدست آوردید با هم مقایسه کنید.

بخش سوم بررسی دینامیک دوران:

دقت کنید وزنه‌هایی که برای حذف اصطکاک روی پایه گذاشته بودید درجای خود باقی بمانند. یک وزنه‌ی ۵۰ گرمی به آن وزنه‌ها اضافه کنید. با روشی که در بخش دوم شرح داده شد، زمان لازم برای آن که چرخ ۴ دور کامل (8π رادیان) دوران کند را اندازه بگیرید و در جدول (۲) یادداشت کنید. (شمارشگر زمان‌سنج را روی عدد ۸ قراردهید.)
همین آزمایش را برای وزنه‌های ۱۰۰، ۱۵۰، و ۲۰۰ گرمی تکرار کرده و جدول (۲) را کامل کنید.

۱۰- شعاع استوانه‌ای که نخ به دور آن پیچیده شده معرف چه کمیتی است؟ مقدار آن را توسط کولیس اندازه‌گیری کنید.

جدول (۲):

جرم وزنه m (gr)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
زمان ۴ دور کامل t (s)				

۱۱- با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول (۲) شتاب زاویه‌ای چرخ α (رابطه‌ی ۸) ، شتاب خطی وزنه‌ها a (رابطه‌ی ۷) و گشتاورهای وارد بر چرخ τ (رابطه‌ی ۱۲) را در هر ۴ حالت فوق محاسبه کرده و جدول (۳) را کامل کنید.

جدول (۳):

جرم وزنه‌ها m (kg)	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۰
شتاب زاویه‌ای چرخ α (rad/s^2)				
شتاب خطی وزنه‌ها a (m/s^2)				
گشتاو وارد بر چرخ τ (N.m)				

۱۲- چگونگی محاسبه‌ی مقادیر جدول (۳) را فقط برای حالتی که وزنه‌ی ۱۰۰ گرمی داشتید بطور کامل بنویسید.

۱۳- نمودار گشتاور وارد برچرخ برحسب شتاب زاویه‌ای چرخ (τ - α) را در کاغذ میلی‌متری با استفاده از مقادیر جدول (۳) رسم نمایید.

۱۴- گشتاور لختی چرخ (I) را با محاسبه‌ی شیب نمودار فوق بیابید. (از رابطه‌ی (۱۰) کمک بگیرید.)

۱۵- اگر مقدار واقعی گشتاور ماند برابر $I = 0.11\ (kg.m^2)$ باشد، درصد خطای نسبی در تعیین I را محاسبه کنید.

۱۶- مقادیر خواسته شده در جدول (۴) را برای حالتی که جرم وزنه‌ی شتاب دهنده ۱۰۰ گرم است بدست آورید و جدول (۴) را کامل کنید. محاسبات خود را بطور کامل در گزارشکار بنویسید.

۱۷- با توجه به نتایج بدست آمده در ردیف‌های ۴ و ۵ و ۶ جدول(۴)، آیا قانون بقای انرژی در کل مجموعه‌ی (چرخ + وزنه‌ها) برقرار است؟

جدول (۴):

۱	مقدار سقوط وزنه‌ها بعد از ۴ دور دوران	
۲	سرعت لحظه‌ای دورانی چرخ در انتهای ۴ دور	
۳	سرعت لحظه‌ای خطی وزنه‌ها در انتهای ۴ دور	
۴	کاهش انرژی پتانسیل وزنه‌ها در انتهای ۴ دور	
۵	ازدیاد انرژی جنبشی وزنه‌ها در انتهای ۴ دور	
۶	ازدیاد انرژی جنبشی دورانی چرخ در انتهای ۴ دور	

بررسی حرکت نوسانی ساده در یک بعد
(جسم – فنر و آونگ ساده)

اهداف آزمایش:

مطالعه‌ی حرکت نوسانی ساده در مجموعه‌ی جسم و فنر، سنجش ثابت فنر با استفاده از قانون هوک و حرکت نوسانی ساده در فنر، مطالعه‌ی حرکت نوسانی ساده در آونگ ساده، بررسی متغییرهای مؤثر در دوره‌ی تناوب آونگ ساده، تعیین شتاب گرانش در آزمایشگاه توسط آونگ ساده

تئوری آزمایش:

هرگاه حرکت یک ذره یا سیستمی از ذرات در فواصل زمانی منظم تکرار شود، آن حرکت را نوسانی گویند. حالت ویژه‌ی این حرکت، حرکت نوسانی یک بعدی است که شامل ذره‌ای است که در امتداد مسیری مستقیم حرکت رفت و برگشت دارد و معادله‌ی حرکت آن با توابع هماهنگ (سینوس و کسینوس) توضیح داد می‌شود.

همواره در یک حرکت نوسانیِ ساده نیروی بازگردانی به شکل $F = -kx$ عامل ایجاد نوسان است. علامت منفی نشان دهنده‌ی مخالفت نیرو با جابجایی ذره است. معادله‌ی حرکت چنین حرکتی به این شکل محاسبه می‌شود:

$$\sum F = ma \qquad (۱)$$

$$-kx = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (\frac{k}{m})x = 0 \qquad (۲)$$

معادله‌ی (۲) یک معادله‌ی دیفرانسیل خطی است که معمولا $\frac{k}{m}$ را برابر ω^2 می‌گیرند. در این‌صورت جواب‌های معادله‌ی (۲) خواهد شد:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0) \qquad (۳)$$

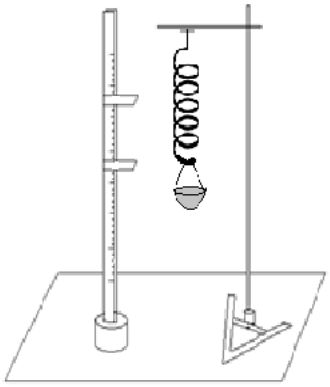
ذراتی که معادله‌ی حرکتشان مطابق معادله‌ی (۳) باشد گفته می‌شود که دارای حرکت هماهنگ ساده هستند یعنی حرکات تکرارشونده و نوسانی خواهند داشت. همانطور که از رابطه‌ی (۳) پیداست، معادله‌ی حرکت در مضارب $T = \frac{2\pi}{\omega}$ تکرار می‌شود. بنابراین T دوره‌ی تناوب حرکت نوسانی جسم خواهد شد:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (۴)$$

بخش اول بررسی حرکت نوسانی فنر:

هرگاه تغییر شکل یک جسم در اثر نیروی کش‌آورنده یا فشرده کننده، موقتی باشد و وقتی نیرو برداشته شود به شکل اولیه خود بازگردد، جسم را کشسان می‌نامند. به‌عنوان مثال فنر یک جسم کشسان است. وقتی فنر بوسیله‌ی نیرویی از شکل اولیه به اندازه‌ی x خارج شود، نیرویی از طرف فنر برای برگرداندن شکل فنر به وضعیت اول ایجاد می‌شود که "نیروی بازگردان" نام‌گذاری می‌شود. در شرایط ایستا، نیروی بازگردان با اندازه‌ی جابجایی از حالت تعادل تناسب دارد ($F \propto x$). این تناسب به قانون هوک مشهور است که یک رابطه‌ی تجربی است. بنابراین رابطه، اندازه‌ی نیروی بازگردان اعمال شده از طرف فنر تغییر شکل یافته با تغییر شکل فنر رابطه مستقیم دارد:

$$F = -kx \qquad (۵)$$



شکل (۱)

علامت منفی برای بیان این نکته است که جهت نیروی بازگردان خلاف جهت تغییر شکل فنر است. k ثابت تناسب است که به جنس فنر بستگی دارد و ضریب کشسانی فنر نامیده می‌شود. این ضریب برای هر فنر، همواره مقداری ثابت است، مشروط بر آن که مقدار نیروی وارده آن‌قدر زیاد نباشد که فنر را از حالت کشسانی خارج سازد.

مجموعه‌ی "جسم و فنر" از نقطه نظر "حرکت" نیز جالب توجه است. وقتی "جسم و فنر" از حالت تعادل خارج شود، نیروی بازگردان فنر "جسم و فنر" را به وضعیت اول برمی‌گرداند و سبب حرکت نوسانی "جسم و فنر" در یک صفحه‌ی قائم می‌شود و معادله‌ی حرکت "جسم و فنر" همان معادله‌ی (۳) خواهد شد. زمان تناوب حرکت "جسم و فنر" نیز با رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود.

توجه کنید که در این بررسی فنر را بدون جرم فرض کرده‌ایم در حالیکه فنر جرمی برابر با (m_s) دارد که باید در محاسبات در نظر گرفته شود. با وارد شدن جرم فنر در محاسبات رابطه‌ی زمان تناوب به معادله‌ی (۶) تبدیل می‌شود که در آن m_s جرم فنر و f ضریبی کوچکتر از یک است.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m + fm_s}{k}} \qquad (۶)$$

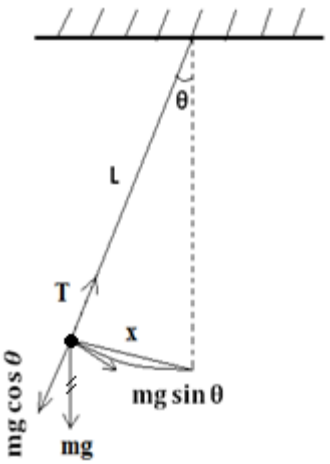
وجود ضریب f نشان می‌دهد که تمام جرم فنر در حرکت نوسانی مجموعه‌ی "جسم و فنر" نقش بازی نمی‌کند، بلکه کسری از جرم فنر است که در نوسان شرکت می‌کند.

در این بخش ابتدا ضریب کشسانی فنر را با استفاده از قانون هوک بدست می‌آوریم. به‌این ترتیب که وزنه‌ای را به فنر آویزان کرده تا نیروی وزن وزنه سبب افزایش طول فنر شود. با تغییر جرم وزنه، نیروی وارد بر فنر را تغییر داده و تغییر طول فنر متناسب با هر نیرو را اندازه‌گیری نموده سپس با استفاده از رابطه‌ی $F = -kx$، ضریب کشسانی فنر را بدست می‌آوریم. در ادامه جرم‌های مختلف به فنر آویخته و مجموعه‌ی جسم و فنر را به نوسان درمی‌آوریم. زمان تناوب مجموعه را با استفاده از زمان‌سنج اندازه‌گیری کرده و با استفاده از رابطه‌ی (۶) ضریب کشسانی فنر k و همچنین ضریب جرمی f را محاسبه می‌کنیم.

بخش دوم بررسی حرکت نوسانی آونگ ساده:

آونگ، جرم نقطه‌ای است که به نخی بدون جرم و غیر قابل کشش آویخته شده است. وقتی آونگ از حالت تعادل خارج شود، بخشی از نیروی وزن گلوله ($mg\sin\theta$) ، نقش "نیروی بازگردان" را بازی می‌کند تا گلوله را به وضعیت اول برگرداند و سبب حرکت نوسانی گلوله در یک صفحه‌ی قائم شود. به عبارتی نیروی بازگردان در آونگ ساده برابر است با:

$$F = -mg\sin\theta$$



شکل (۲): آونگ ساده

چنانچه نوسانات آونگ دقیقاً در یک صفحه‌ی قائم بوده و زاویه‌ی انحراف به قدری کوچک باشد ($\theta < 6°$) که بتوانیم فرض کنیم $\sin\theta \cong \theta$، در اینصورت به این آونگ، آونگ ساده گفته می‌شود. نیروی بازگردان در آونگ ساده با توجه به تقریب ($\sin\theta \cong \theta$) برابر است با:

$$F = -mg\theta \qquad (۷)$$

با قراردادن رابطه‌ی (۷) در معادله‌ی (۱) معادله‌ی دیفرانسیل (۲) برای آونگ ساده به شکل زیر خواهد شد:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + (\frac{g}{l})\theta = 0 \qquad (۸)$$

چنانچه $\frac{g}{l}$ را برابر ω^2 بگیریم، معادله‌ی حرکت به شکل $\theta = A\cos(\omega t + \varphi_0)$ درمی‌آید. با توجه به معادله‌ی حرکت و تعریف $\omega^2 = \frac{g}{l}$ دوره‌ی تناوب آونگ ساده بصورت زیر خواهد بود.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (۹)$$

همانطور که از رابطه‌ی (۹) برمی‌آید، دوره‌ی تناوب آونگ ساده فقط به طول آونگ بستگی داشته و به جرم آونگ بستگی ندارد.
در این بخش از آزمایش ابتدا با تغییردادن طول آونگ و اندازه‌گیری زمان تناوب، شتاب گرانش را در آزمایشگاه محاسبه می‌کنیم و همچنین با استفاده از جدول (۴) نشان می‌دهیم که دوره‌ی تناوب آونگ ساده به جرم آن بستگی ندارد.

وسایل مورد نیاز:

فنر، پایه، خط کش بلند، فتوسل، زمان‌سنج، وزنه های مختلف، کفه، آونگ فلزی و چوبی، مترنواری

روش آزمایش و پرسش‌ها:

بخش اول بررسی حرکت نوسانی فنر: قبل از اتصال فنر به پایه جرم فنر را با ترازو اندازه گرفته و یادداشت کنید(m_s). فنر را در امتداد قائم بر پایه‌ای متصل کنید. خط کش عمودی که دو نشانگر متحرک روی آن نصب شده را در کنار پایه‌ای که فنر روی آن نصب شده قراردهید و نشانگر بالایی را روی خط کش آنقدر جابجا کنید تا با انتهای آزاد فنر منطبق شود و جای آن را تا انتهای آزمایش جابجا نکنید.

الف– اندازه‌گیری ضریب کشسانی فنر با استفاده از قانون هوک: کفه را روی ترازوی دیجیتالی قرار دهید و جرم آن را بخوانید تا مطمئن شوید جرم آن ۱۰ گرم است. سپس آن‌را به انتهای فنر وصل کنید. انتهای فنر در اثر نیروی وزن کفه جابجا می‌شود. نشانگر پایینی را جابجا کنید تا با انتهای فنر منطبق شود. افزایش طول فنر را از روی خط‌کش اندازه بگیرید و در جدول (۱) یادداشت کنید. (افزایش طول فنر برابر فاصله‌ی دو نشانگر روی خط‌کش است.) سپس به ترتیب وزنه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ... ، ۹۰ گرمی به کفه اضافه نموده و هربار تغییر طول فنر را نسبت به طول اولیه فنر بدست آورید و در جدول (۱) یادداشت نمایید.

جدول(۱):

جرم وزنه‌ی متصل به فنر m (gr)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
نیروی وارد بر فنر از طرف وزنه F (N)										
تغییر طول فنر x (m)										

۱- نمودار نیروی وارد بر فنر برحسب تغییر طول فنر $(F - x)$ را در کاغذ میلی‌متری رسم نمایید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی (۵) کمک بگیرید.)
۲- از نمودار مربوط به سؤال قبل ضریب کشسانی فنر را بدست آورید.

ب– اندازه‌گیری ضریب کشسانی جرم فنر (f) در "مجموعه‌ی جسم و فنر" به عنوان مجموعه‌ی نوسان کننده: یک وزنه‌ی ۵۰ گرمی درون کفه بگذارید تا مجموع جرم کفه و وزنه ۶۰ گرم شود. کفه را به آرامی به انتهای فنر آویزان کنید و صبر کنید تا فنر کاملاً به تعادل رسیده و تکان نخورد. در حالی که سیستم در حال تعادل است کفه را کمی (حدود ۲ سانتی‌متر) کشیده (اگر خیلی بیشتر بکشید فنر تغییر شکل خواهد داد.) و به آرامی رهایش کنید. "جسم و فنر" نوسان خواهند کرد. زمان ۲۰ نوسان کامل را توسط زمان‌سنج دستی اندازه بگیرید و در جدول (۲) یادداشت کنید. حال با اضافه کردن وزنه به کفه، جرم کفه را به مقادیری که در جدول (۲) خواسته شده برسانید و آزمایش را تکرار کنید و جدول (۲) را کامل کنید.

۳- نمودار مجذور زمان تناوب را برحسب جرم وزنه‌ها $(T^2 - m)$، در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی (۴) کمک بگیرید.)

۴- با استفاده از نمودار سؤال قبل ضریب کشسانی فنر را یکبار دیگر حساب کنید و با مقداری که از سؤال ۲ بدست آورده‌اید مقایسه کنید.

۵- با استفاده از نمودار ($T^2 - m$)، ضریب f را محاسبه کنید. (راهنمایی: نمودار، محور جرمها را در قسمت منفی محور افقی قطع می‌کند. این مقدار برابر fm_s خواهد شد.)

جدول (۲):

جرم وزنه‌ی متصل به فنر m (gr)*	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰
زمان ۲۰ نوسان t (s)						
زمان یک نوسان T (s)						
مجذور دوره‌ی تناوب T^2 (s^2)						

* در رسم نمودار به کیلوگرم تبدیل شود.

بخش دوم بررسی حرکت تناوبی ساده در آونگ ساده: روی پایه‌ی آونگ دو آونگ فلزی و چوبی وجود دارد. آونگ چوبی دارای طول ثابتی بوده و تغییر نمی‌کند. اما آونگ فلزی طول متغیر دارد و با چرخاندن پیچی که نخ آونگ دور آن پیچیده می‌توانید طول آونگ فلزی را تغییر دهید.

الف- محاسبه‌ی شتاب گرانش: طول آونگ فلزی را توسط متری که در اختیار دارید به ۵۰ سانتی‌متر برسانید. بعد از تنظیم طول، ارتفاع فتوسل را طوری تنظیم کنید که گلوله حین نوسان از مقابل دیودهای موجود روی فتوسل عبور کند تا فتوسل متوجه عبور گلوله شود. فتوسل به یک زمان‌سنج دیجیتالی متصل است که قبل از به نوسان درآوردن آونگ باید آن را برای شمارش ۱۰ نوسان تنظیم کنید. برای تنظیم زمان‌سنج بعد از روشن کردن آن دکمه‌ی set را بفشارید. سپس با دکمه‌ی up شمارشگر را روی عدد ۱۰ قرار داده و دوباره دکمه‌ی set را بفشارید.

کمانی مدرج روی پایه‌ی آونگ قرارداده شده که به کمک آن می‌توانید مطمئن شوید که آونگ را بیش از ۶ درجه منحرف نکرده‌اید. پس از انجام مراحل فوق با توجه به کمان، آونگ را کمتر از ۶ درجه منحرف کرده و رها کنید. اجازه دهید آونگ یک یا دو نوسان انجام دهد. اگر مطمئن بودید که نوسانات آونگ کاملاً در صفحه‌ی قائم است دکمه‌ی start را بزنید تا زمان‌سنج شروع به شمارش کند. زمان‌سنج پس از اندازه‌گیری زمان ۱۰ نوسان از شمارش می‌ایستد و عددی که ثبت می‌شود زمان ۱۰ نوسان کامل است. آن را در جدول (۳) یادداشت کنید. به همین روش برای تمام طول‌های خواسته شده در جدول (۳) زمان ۱۰ نوسان را اندازه بگیرید و جدول (۳) را کامل کنید.

جدول (۳):

طول آونگ L (m)	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱
زمان ۱۰ نوسان t (s)						
زمان ۱ نوسان T (s)						
مجذور دوره‌ی تناوب T^2 (s^2)						

۷- نمودار مجذور دوره‌ی تناوب را برحسب طول آونگ (T^2 - L) در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی (۹) کمک بگیرید.)

۸- با استفاده از نمودار سؤال قبل، شتاب جاذبه‌ی زمین در آزمایشگاه (g) را محاسبه کنید و آن را با مقدار واقعی آن در آزمایشگاه مقایسه کنید.($g=9.8\ m/s^2$)

۹- رابطه‌ای شبیه رابطه‌ی قانون هوک برای حرکت آونگ ساده بنویسید.

ب- بررسی اثر جرم آونگ در دوره‌ی تناوب آونگ ساده: طول آونگ چوبی ثابت است وتغییر نمی کند. پس طول آونگ فلزی را آنقدر تغییر دهید تا دقیقاً با آونگ چوبی هم‌طول شود. حالا ارتفاع فتوسل را برای طول جدید آونگ‌ها تنظیم کنید. زمان‌سنج را نیز برای شمارش ۱۰ نوسان تنظیم کنید. ابتدا آونگ چوبی را به اندازه‌ی کمتر از ۶ درجه منحرف کرده و رها کنید و زمان ۱۰ نوسان آن را اندازه گرفته و در جدول (۴) یادداشت کنید. به همین ترتیب زمان ۱۰ نوسان را برای آونگ فلزی اندازه بگیرید و جدول (۴) را کامل کنید.

جدول (۴):

جنس آونگ	زمان ۱۰ نوسان t (s)	دوره‌ی تناوب T (s)
چوبی		
فلزی		

۱۰- از جدول (۴) چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

ج- طول آونگ فلزی را روی ۷۰ سانتی‌متر تنظیم کنید. ارتفاع فتوسل را برای طول جدید آونگ‌ها تنظیم کنید. زمان‌سنج را نیز برای شمارش ۱۰ نوسان تنظیم کنید. ابتدا آونگ فلزی را به اندازه‌ی کمتر از ۶ درجه منحرف کرده و رها کنید و زمان ۱۰ نوسان آن را اندازه گرفته و در جدول (۵) یادداشت کنید. این‌بار آونگ را به اندازه‌ی ۲۰ درجه منحرف کرده و رها کنید و زمان ۱۰ نوسان را اندازه بگیرید و جدول (۵) را کامل کنید.

جدول (۵):

زاویه	زمان ۱۰ نوسان t (s)	زمان ۱ نوسان T (s)	شتاب جاذبه‌ی زمین g (m/s^2)
کمتر از ۶ درجه			
حدود ۲۰ درجه			

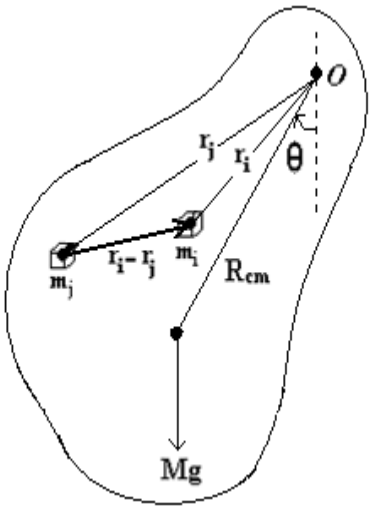
۱۱- با توجه به ستون آخر جدول (۵) چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

بررسی آونگ مرکب

اهداف آزمایش:

آشنایی با آونگ مرکب، بستگی زمان تناوب آونگ مرکب به گشتاور ماند، بستگی زمان تناوب آونگ مرکب بـه فاصـله‌ی مرکـز جـرم آونگ از نقطه آویز

تئوری آزمایش:



شکل (۱)

آونگ مرکب، جسم صلبی به جرم M است که در اثر نیروی گـرانش حـول محـور افقـی بدون اصطکاک که از مرکزجرم آن نمی‌گذرد، نوسان می‌کند (شکل ۱). وقتی آونـگ بـه اندازه‌ی θ از حالت تعادل انحراف زاویه‌ای پیدا کند، گشتاور نیروی بازگردانی آونگ را به وضعیت اول برمی‌گرداند و سبب حرکت نوسانی زاویه‌ایی حـول محـوری افقـی، در یـک صفحه قائم، می‌شود. این صفحه در برگیرنده‌ی مرکزجرم جسم G و نقطه‌ی آویز (O) است. فاصله مرکز جـرم تـا نقطـه‌ی آویـز R_{cm} اسـت. جسـم مـذکور را مجموعـه‌ای از جرم‌های نقطه‌ای m_1وm_2و...وm_i درنظر می‌گیریم که به ترتیب در فواصل r_1وr_2و...وr_i از محور دوران قرار دارند.

در شکل (۱) جـرم نقطـه‌ی m_i کـه در نقطـه‌یP و در فاصـله‌ی r_i از محـور عمـود بـر صفحه‌ی کاغذ و گذرنده از نقطه‌ی آویز (O) قرار دارد را درنظربگیرید. حین نوسـان ایـن نقطه روی کمان دایره‌ای به شعاع r_i و مرکزیت محور دوران حرکـت مـی‌کنـد. چنانچـه سرعت زاویه‌ای جسم در هر لحظه از دوران ω باشد، اندازه‌ی سرعت خطی در نقطه‌ی P برابر $r_i\omega$ و شتاب مماسی آن $r_i\frac{d\omega}{dt}$ خواهد بود. طبق قانون دوم نیوتون برای ذره‌ی i ام می‌تـوانیم بنویسـیم: (سـرعت زاویـه‌ای α برای تمام نقاط جسم یکسان است.)

$$\mathbf{F}_{i(\text{مماسی})} = m_i\mathbf{a}_i = m_i\mathbf{r}_i\alpha \qquad (۱)$$

گشتاور این نیرو حول محور دوران گذرنده از نقطه‌ی (O) برابر است با:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i \qquad (۲)$$

از آنجاییکه برآیند نیروهای وارد بر جرم m_i شامل نیروهای خارجی مانند نیروی وزن و نیروهای داخلی که از جرم‌های نقطه‌ای مجاور m_i به آن وارد می‌شود، است: $\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{i\,(\text{external})} + \sum_j \mathbf{F}_{j\to i}$

($\mathbf{F}_{j\to i}$ نیرویی است که از جرم m_j به جرم m_i وارد می‌شود.)

پس گشتاور $\boldsymbol{\tau}_i$ به دو جمله‌ی گشتاور حاصل از نیروهای خارجی و گشتاور حاصل از نیروهای داخلی تقسیم می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{i\,(\text{external})} + \mathbf{r}_i \times \sum_j \mathbf{F}_{j\to i} \qquad (۳)$$

مجموع گشتاورهای وارد بر نقاط مختلف جسم برابر است با:

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_i \boldsymbol{\tau}_i = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{i\,(\text{external})} + \sum_i \sum_j \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{j\to i} \qquad (۴)$$

در طرف دومِ رابطه‌ی (۴) جمله‌ی اول، گشتاورِ حاصل از نیروهای خارجی و جمله‌ی دوم گشتاور حاصل از نیروهـای داخلـی اسـت. جمله‌ی دوم از رابطه‌ی فوق مجموعه‌ای از جملاتی به شکل $(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \times \mathbf{F}_{j\to i}$ خواهند بود. اما $\mathbf{F}_{j\to i}$ و $(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$ دو بـردار هـم راستا هستند که حاصل‌ضرب خارجی آنها صفر خواهد شد. (یعنی فرض می‌شود که نیروی بین دو جرم هم راستای خط واصل ایـن

دو جرم است.) پس نیروهای داخلی سهمی در گشتاور کل وارد بر جسم ندارند و فقط سهم ناشی از نیروهای خارجی (در اینجا وزن) می‌ماند. و چون α برای تمام نقاط آونگ مرکب یکسان است، پس:

$$\tau = \sum_i \tau_i = (\sum_i m_i r_i^2)\alpha \qquad (۵)$$

جمله‌ی داخل پرانتز در رابطه‌ی (۵) همان گشتاور ماند جسم در حال نوسان (آونگ مرکب) است که با I نمایش داده می‌شود. (به تعریف گشتاور ماند در آزمایش دوران مراجعه کنید.)یعنی:

$$\tau = I\alpha \qquad (۶)$$

این گشتاور با گشتاور نیروی وزن آونگ که بر مرکز جرم وارد می‌شود برابر است.

گشتاور نیروی وزن برای جرم نقطه‌ای m_i بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{r}_i \times m_i\mathbf{g}$$

به این ترتیب گشتاور نیروی وزن برای کل جسم به شکل زیر تعریف می‌شود. ($\mathbf{g}$ برای تمام نقاط ثابت و در یک جهت تعریف می‌شود.)

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_i \mathbf{r}_i \times m_i\mathbf{g} = (\sum_i m_i\,\mathbf{r}_i) \times \mathbf{g} \qquad (۷)$$

با توجه به تعریف مرکز جرم در یک جسم پیوسته ($R_{cm} = \frac{\sum_i m_i r_i}{M}$) رابطه‌ی (۷) بصورت زیر ساده می‌شود:

$$\tau = |M\mathbf{R}_{cm} \times \mathbf{g}| = MgR_{cm}\sin\theta \qquad (۸)$$

گشتاور τ (رابطه‌ی ۸) طوری بر آونگ اثر می‌کند که آونگ را به حالت اولیه‌ی آن (حالت تعادل) برگرداند. علامت منفی که در رابطه‌ی (۹) وارد شده نشان دهنده‌ی بازگردان بودن این گشتاور است.

$$\tau = -MgR_{cm}\sin\theta \qquad (۹)$$

برای بدست آوردن معادله‌ی حرکت آونگ مرکب از روابط (۶) و (۹) و این نکته که $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ است، استفاده می‌کنیم.

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + MgR_{cm}\sin\theta = 0$$

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + MgR_{cm}\theta = 0 \qquad \leftarrow \qquad \text{در تقریب } (\theta < 6^\circ)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + (\frac{MgR_{cm}}{I})\theta = 0 \qquad (۱۰)$$

معادله‌ی (۱۰) یک معادله‌ی دیفرانسیل خطی است پس معادله‌ی حرکت آونگ مرکب بصورت حرکت نوسانی و به شکل زیر خواهد بود.

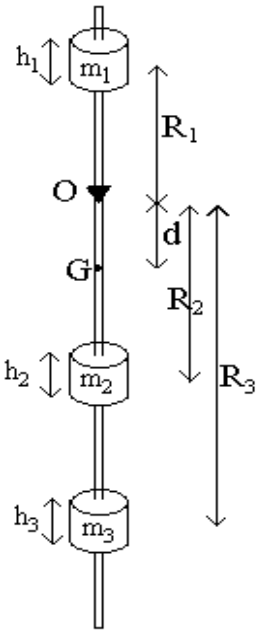
$$\theta = A\cos(\Omega t + \varphi_0) \qquad (۱۱)$$

Ω سرعت زاویه‌ای حرکت نوسانی است و مقدار آن بصورت $\frac{MgR_{cm}}{I} \equiv \Omega^2$ تعریف شده است. به این ترتیب دوره‌ی تناوب حرکت آونگ ($T = \frac{2\pi}{\Omega}$) برابر می‌شود با:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{MgR_{cm}}} \qquad (۱۲)$$

بخش اول: بررسی بستگی زمان تناوب آونگ مرکب به گشتاور ماند آن وقتی فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز R_{cm}، ثابت است.

در این آزمایش، در سه حالت، با جابجا کردن اجسام تشکیل دهنده‌ی آونگ، آونگ مرکبی را با گشتاورهای ماند متفاوت، بصورتی می‌سازیم که همواره فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز R_{cm}، ثابت بماند. اگر آونگ از میله‌ای به جرم m_{rod}، طولL_{rod} و لختی دورانی I_{rod} (که مرکز جرم میله (G) در فاصله‌ی d از نقطه‌ی آویز قرار دارد.) و سه استوانه‌ی توپر به جرم‌هایm_1 , m_2 , m_3و شعاع‌های r_1 , r_2 , r_3 و ارتفاع‌های h_1 , h_2 , h_3 که لختی دورانی میله‌ها به ترتیب I_1 , I_2 , I_3 می‌باشد، تشکیل شده باشد، برحسب مکان قرارگیری استوانه‌ها، آونگ‌های مرکب متفاوتی ساخته می‌شود.(شکل ۲)



شکل(۲): نقطه‌ی G مرکز جرم میله است.

گشتاور ماند آونگ مرکب I نسبت به نقطه‌ی آویز(O)، که ترکیبی از سه استوانه‌ی توپر و یک میله است، مجموع گشتاور ماند اجسام تشکیل دهنده‌ی آن نسبت به نقطه‌ی آویز (O) می‌باشد که برابراست با:

$$I = I_{rod} + I_1 + I_2 + I_3 \qquad (۱۳)$$

گشتاور ماند میله که مرکز جرم آن به فاصله‌ی d از نقطه آویز قرار دارد، از رابطه‌ی زیر بدست می آید:

$$I_{rod} = \frac{1}{12} m_{rod} L_{rod}^2 + m_{rod} d^2 \qquad (۱۴)$$

گشتاور ماند استوانه توپر به شعاع r و ارتفاع h که به فاصله‌ی R از نقطه آویز است، از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$I = \frac{1}{4} m r^2 + \frac{1}{12} m h^2 + m R^2 \qquad (۱۵)$$

بنابراین، با معلوم بودن اندازه‌های اجزای تشکیل دهنده‌ی آونگ مرکب، گشتاور ماند آونگ نسبت به نقطه‌ی آویز مشخص خواهد شد. در این‌صورت بر اساس رابطه‌ی (۱۲)، برای دو آونگ با گشتاور ماند (I) متفاوت ولی مرکز جرم (R_{cm}) ثابت خواهیم داشت:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{I_1}{I_2}$$

و یا به زبان دیگر:

$$\frac{T_1^2}{I_1} = \frac{T_2^2}{I_2} = \frac{4\pi^2}{M g R_{cm}} \qquad (۱۶)$$

(M جرم کل آونگ می باشد.)

با توجه به شکل (۲) مرکز جرم آونگ از رابطه‌ی (۱۷) بدست می‌آید.

$$R_{cm} = \frac{m_1 R_1 - m_2 R_2 - m_3 R_3 - m_{rod} d}{m_1 + m_2 + m_3 + m_{rod}} \qquad (۱۷)$$

بخش دوم: بررسی بستگی زمان تناوب آونگ مرکب به فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز R_{cm} وقتی گشتاور ماند آونگ ثابت است.

در این آزمایش، در دو حالت، با جابجا کردن اجسام تشکیل دهنده‌ی آونگ، آونگ‌های مرکبی را با گشتاورهای ماند مساوی می‌سازیم. بنابراین، با معلوم بودن فاصله‌های اجزای تشکیل دهنده‌ی آونگ مرکب نسبت به نقطه‌ی آویز، R_{cm} مشخص خواهد شد. بنابر رابطه‌ی (۱۲) برای دو آونگ با R_{cm} متفاوت ولی گشتاور ماند ثابت، خواهیم داشت:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_{cm2}}{R_{cm1}}$$

و یا به زبان دیگر:

$$T_1^2 R_{cm1} = T_2^2 R_{cm2} = 4\pi^2 \frac{I}{Mg} \qquad (۱۸)$$

(M جرم کل آونگ می باشد.)

روش آزمایش و پرسش‌ها:

بخش اول: بررسی بستگی زمان تناوب آونگ مرکب به گشتاور ماند آونگ وقتی فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز R_{cm} ثابت است.

در جدول (۱) آرایشی از میله و استوانه‌ها، طوری انتخاب شده است (R_3,R_2,R_1) که با تغییر مکان وزنه‌ها، مرکز جرم آونگ مرکب تغییر نکند و یا به عبارتی فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز (R_{cm}) مقدار ثابتی باشد. در هر یک از آرایش‌ها مقدار R_{cm} (رابطه‌ی ۱۷) و گشتاورماند (رابطه‌ی ۱۳) آونگ مرکب را محاسبه و مطمئن شوید که مرکز جرم ثابت است. نتایج را در جدول (۱) یادداشت کنید. برای هر آرایشی، آونگ را کمی (زاویه‌ی انحراف کوچک‌تر از ۶ درجه) از حالت تعادل منحرف ساخته و رها کنید. پیش از رها کردن آونگ، زمان‌سنج را برای شمارش ۲۰ نوسان تنظیم کرده سپس زمان ۲۰ نوسان کامل را اندازه‌گیری و در جدول (۱) یادداشت کنید. جرم میله (m_{rod}) ۵۱۶ گرم است.

۱- نمودار مربع زمان تناوب را برحسب گشتاور ماند کل آونگ ($T^2 - I$) در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی (۱۲) کمک بگیرید.)

۲- با استفاده از نمودار سؤال ۱ شتاب جاذبه‌ی زمین در آزمایشگاه (g) را بدست آورید. درصد خطای نسبی در محاسبه‌ی g را بدست آورید. (مقدار واقعی $g=9.8\ m/s^2$ می‌باشد.)

۳- آیا نسبت $\frac{T^2}{I}$ مقدار ثابتی است؟

جدول (۱):

آرایش	d^* (cm)	R_1^* (cm)	R_2^* (cm)	R_3^* (cm)	R_{cm}^* (cm)	I_{rod} (Kgm^2)	I_1 (Kgm^2)	I_2 (Kgm^2)	I_3 (Kgm^2)	I (Kgm^2)	۲۰ نوسان t(s)	T (s)	$\frac{T^2}{I}$
۱	۹	۲۰	۱۰	۳۰									
۲	۹	۲۰	۱۵	۲۵									
۳	۹	۱۰	۱۰	۲۰									

* این مقادیر در محاسبه باید به متر تبدیل شود.

بخش دوم: بررسی بستگی زمان تناوب آونگ مرکب به فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز R_{cm} وقتی گشتاور ماند آونگ ثابت است.

آرایشی از میله و استوانه‌ها را بنابر جدول ۲، طوری انتخاب کنید (R_3,R_2,R_1) که گشتاور ماند آونگ مرکب (I) تغییر نکند. در هر آرایشی مقدار R_{cm} ، گشتاورماند آونگ مرکب، را محاسبه کرده و در جدول (۲) یادداشت کنید. برای هر آرایشی آونگ را کمی (زاویه‌ی انحراف کوچکتر از ۶ درجه) از حالت تعادل منحرف ساخته و رها کنید. پیش از رها کردن آونگ زمان‌سنج را برای شمارش ۲۰ نوسان تنظیم و سپس زمان ۲۰ نوسان کامل را اندازه‌گیری و در جدول (۲) یادداشت کنید.

۴- نمودار مربع زمان تناوب را برحسب عکس فاصله‌ی مرکز جرم آونگ از نقطه آویز ($T^2 - \frac{1}{R_{cm}}$)، در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی ۱۲ کمک بگیرید.)

۵- با استفاده از نمودار سؤال ۴ شتاب جاذبه‌ی زمین در آزمایشگاه (g) را بدست آورید. درصد خطای نسبی در محاسبه‌ی g را بدست آورید. (مقدار واقعی $g=9.8\ m/s^2$ می‌باشد.)

۶- آیا $T^2\ R_{cm}$ مقدار ثابتی است؟

جدول (۲):

آرایش	R_1^* (cm)	R_2^* (cm)	R_3^* (cm)	I (Kgm^2)	۲۰ نوسان t(s)	T (s)	R_{cm}^* (cm)	T^2R_{cm} (s^2m)
۱	۱۰	۲۰	۳۰					
۲	۲۰	۱۰	۳۰					

* این مقادیر در محاسبه باید به متر تبدیل شود.

۷- آیا تساوی (۱۸) برقرار است؟

آزمایش دوازدهم

بررسی آونگ کاتر

اهداف آزمایش:

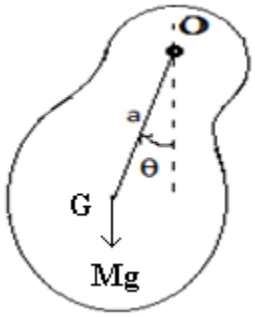
آشنایی با آونگ کاتر و اندازه‌گیری شتاب جاذبه‌ی زمین (g) با کمک آن.

وسایل آزمایش:

آونگ کاتر، متر نواری، زمان‌سنج، فتوسل

تئوری آزمایش:

در آزمایش یازدهم، آونگ مرکب را بررسی کردیم. به هر جسم صلبی که بتواند در اثر نیروی گرانش حول محور افقی بدون اصطکاک (که از گرانیگاه آن نمی‌گذرد) نوسان کند، آونگ مرکب می‌گویند. با توجه به شکل (۱) جسم صلبی به جرم M از نقطه‌ی O آویزان است. این جسم به اندازه‌ی θ از وضع تعادل منحرف و رها می‌شود و حول محوری که از O می‌گذرد نوسان می‌کند. اگر G مرکز جرم جسم و $a = OG$ فاصله‌ی مرکز جرم تا محور نوسان باشد، دوره‌ی تناوب آونگ از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید. I گشتاور ماند جسم مذکور است.



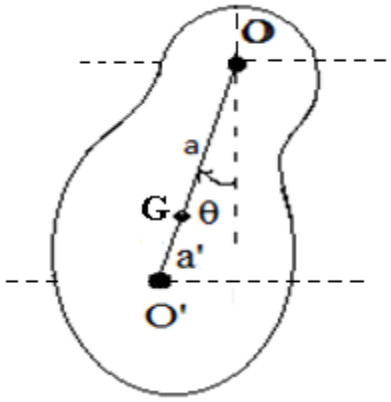
شکل (۱): آونگ مرکب

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mga}} \qquad (۱)$$

هر آونگ مرکب را می‌توان همزمان با آونگ ساده‌ای به طول $l = \frac{I}{Ma}$ درنظر گرفت. زیرا همانطور که می‌دانیم دوره تناوب آونگ ساده از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ بدست می‌آید که با مساوی قراردادن رابطه‌ی دوره تناوب آونگ ساده با آونگ مرکب، طول آونگ ساده‌ی همزمان با آونگ مرکب تعیین می‌شود.

در نتیجه برای محاسبه‌ی دوره‌ی تناوب آونگ مرکب، می‌توان آونگ ساده‌ای درنظر گرفت که طول آن برابر با $l = \frac{I}{Ma}$ است.

هویگنس نشان داد در یک آونگ مرکب، در صفحه‌ای که از نقطه‌ی آویز O و مرکز جرم G می‌گذرد محور دیگری به موازات محور نوسانی که ازنقطه‌ی آویز O می‌گذرد وجود دارد (این محور از نقطه‌ی O' می‌گذرد.) که اگر آونگ را از آن نقطه آویزان کنیم و به نوسان درآوریم، دوره‌ی تناوب آونگ مرکب حول نقطه‌ی آویز O' که با T' نشان داده می‌شود با دوره‌ی تناوب آونگ حول نقطه‌ی آویز O که با T نشان داده می‌شود، برابر است.($T = T'$)



شکل(۲): آونگ کاتر

فاصله‌ی نقطه‌ی آویز O تا مرکز جرم (a) با فاصله‌ی نقطه‌ی آویز O' تا مرکز جرم (a') برابر نیستند. در ضمن مرکزجرم G روی پاره‌خط OO' است.

در این حالت فاصله‌ی دو محور یعنی $OO' = l = a + a'$ برابر طول آونگ ساده‌ایست که زمان تناوب آن نیز همان T می‌باشد. آن را می‌توان از روابط زیر نتیجه گرفت.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mga}} \qquad (۷)$$

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{I'}{Mga'}} \qquad (۸)$$

که a و a' به ترتیب فاصله‌ی نقطه‌های آویز O و O' از مرکزجرم آونگ و I و I' گشتاور ماند آونگ نسبت به نقاط آویز O و O' است.(شکل ۲)

اما طبق قضیه‌ی محورهای موازی، گشتاور ماند یک جسم نسبت به هر محور دلخواه، برابر است با گشتاور ماند جسم نسبت به محوری موازی با آن محور که از مرکز جرم جسم می‌گذرد به اضافه‌ی حاصل‌ضرب جرم جسم در مربع فاصله‌ی دو محور بنابراین:

$$I = I_G + Ma^2$$

$$I' = I_G + Ma'^2$$

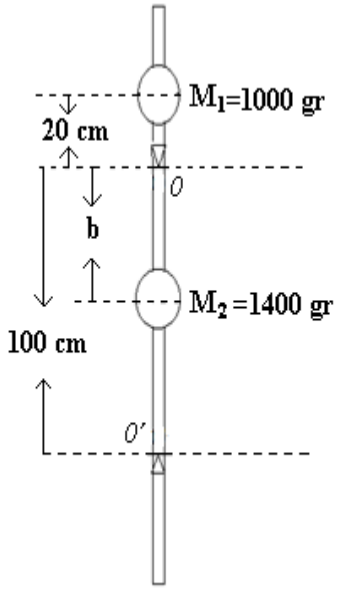
I_G گشتاور ماند جسم نسبت به محوری است که از مرکز جرم جسم می‌گذرد.

از تفاضل دو رابطه‌ی فوق: $$I - I' = M(a^2 - a'^2) \qquad (۹)$$

با جایگذاری I و I' از روابط (۷) و (۸) و دانستن اینکه $T=T'$ است خواهیم داشت:

$$\rightarrow \quad T = T' = 2\pi\sqrt{\frac{a+a'}{g}} \qquad (۱۰)$$

از آنجایی‌که $l = a + a'$ است، بنابراین با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) و با دانستن a و a' طول l را برای استفاده در رابطه‌ی $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ می‌توان به روش دیگری مستقل از سنجش I و M بدست آورد.



شکل(۳): اجزای آونک کاتر

آونگ کاتر: در سال ۱۸۱۸ کاتر بر اساس نظر هویگنس یک آونگ مرکب تولید کرد و از آن برای محاسبه‌ی شتاب جاذبه‌ی زمین (g) استفاده کرد. این روش یکی از دقیق‌ترین روشهایی است که برای اندازه‌گیری g بکارمی‌رود.

آونگ کاتر، آونگ مرکبی است که از یک میله با دو نقطه‌ی آویز ساخته شده است. با قرار دادن هریک از تیغه‌ها روی پایه‌ی آونگ، نوسان حول آن تیغه می‌تواند انجام شود. وزنه‌هایی نیز با جرم‌های نامساوی در طول میله می‌توانند جابجا شوند که با جابجایی این وزنه‌ها محل مرکز جرم آونگ را می‌توان تغییر داد (شکل ۳).

از آنجاییکه در آونگ ساده جرمِ به معنای واقعی نقطه‌ای نمی‌توان داشت، در نتیجه اندازه‌گیری طول واقعی آونگ ساده با دقت کافی ممکن نیست. اما همانگونه که در مورد آونگ کاتر خواهیم دید، می‌توان فاصله‌ی دو تیغه را با دقت بالا اندازه گرفت. به همین دلیل اندازه‌گیری g توسط آونگ کاتر دقیق‌تر است.

برای پیدا کردن g توسط آونگ کاتر (با استفاده از رابطه‌ی (۱۰)) باید مقدار a'، مکان O' نسبت به مرکز جرم میله، را بدانیم. البته در آونگ کاتری که ما در اختیار داریم دو نقطه‌ی آویز ثابت داریم و نمی‌توانیم مکان O و O' را تغییر دهیم پس با جابجا کردن یکی از وزنه‌ها (وزنه‌ی ۱۴۰۰ گرمی) مرکز جرم آونگ را آنقدر جابجا می‌کنیم تا مرکز جرم (G) درجایی قرار گیرد که شرط $T=T'$ برقرار شود.

پس هردو تیغه و یکی از وزنه‌ها روی میله ثابت هستند ولی وزنه‌ی دیگر را در طول میله جابجا می‌کنیم و زمان را حول هردو تیغه اندازه می‌گیریم و این کار را تا زمانی ادامه می‌دهیم که دوره تناوب حول هردو تیغه مساوی شود. در این صورت دوره تناوب مشترک برابر با دوره تناوب آونگ ساده‌ایست که طول آن برابر با فاصله‌ی بین دو تیغه ($l = a + a'$) باشد. با قراردادن دوره تناوب مشترک ($T=T'$) و فاصله‌ی بین دو تیغه به عنوان l در رابطه‌ی $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ می‌توان g را بدست آورد.

روش آزمایش:

الف- محاسبه‌ی g : با توجه به شکل (۳) وزنه‌ی ۱۰۰۰ گرمی را در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از تیغه‌ی O بطور ثابت قرار دهید. سپس وزنه‌ی ۱۴۰۰ گرمی را در فاصله‌ی $b = 10\ cm$ ازتیغه‌ی O قرار داده و آونگ را از طرف تیغه‌ی O روی پایه‌ی آن قراردهید. میله‌ی آونگ را کمتر از ۶درجه از حالت تعادل منحرف کرده، آن را رها کنید تا آونگ حول تیغه‌ی O نوسان کند. قبل از رها کردن آونگ زمان‌سنج را برای شمارش ۲۰ نوسان تنظیم کنید و پس از رها کردن آونگ دکمه‌ی استارت را بفشارید. به این ترتیب زمان‌سنج زمان ۲۰ نوسان را اندازه خواهد گرفت. زمان مذکور را بر ۲۰ تقسیم کنید تا دوره‌ی تناوب حول نقطه‌ی آویز O (یعنیT) بدست آید. سپس بدون جابجا کردن وزنه‌ها آونگ را از تیغه‌ی O' آویزان کنید و به همان ترتیب زمان ۲۰ نوسان را اندازه بگیرید. با تقسیم زمان بدست آمده بر ۲۰، دوره‌ی تناوب حول نقطه‌ی آویز O' (T') را بدست آورید.

آزمایش را برای حالتهایی که وزنه ۱۴۰۰ گرمی را در فاصله‌های ۲۰،۳۰،۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ سانتیمتری از تیغه‌ی O قرار دارد، نیز تکرار نمایید و T و T' را در هر حالت اندازه گیری کرده در جدول (۱) بنویسید.

۱- نمودار تغییرات دوره‌ی تناوب آونگ حول دو تیغه را برحسب فاصله‌ی وزنه‌ی ۱۴۰۰ گرمی از تیغه‌ی O ، دریک دستگاه مختصات در کاغذ میلی‌متری رسم نمایید. (نمودار $T - b$ و نمودار $T' - b$) نقطه‌ی تقاطع دو نمودار را مشخص کنید.

۲- زمان مربوط به محل تقاطع دو نمودار همان دوره‌ی تناوب آونگ ساده‌ی هم‌زمان با آونگ کاتر شماست. با قراردادن این T در رابطه‌ی دوره‌ی تناوب آونگ ساده مقدار g را محاسبه کنید.

جدول (۱) :

فاصله وزنه‌ی متحرک از تیغه O (b (cm))	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
زمان ۲۰ نوسان حول تیغه‌ی O (t_o (s))									
زمان ۲۰ نوسان حول تیغه‌ی O' ($t_{o'}$ (s))									
دوره تناوب حول تیغه‌ی O T(s)									
دوره تناوب حول تیغه‌ی O' T′(s)									

ب- مقایسه‌ی دوره‌ی تناوب آونگ ساده هم‌زمان با آونگ مرکب:

۳- فاصله‌ی دو تیغه در آونگ مرکبی که در اختیار دارید برابر با ۱۰۰ سانتی‌متر است. طول آونگ ساده را به اندازه‌ی ۱۰۰ سانتی‌متر تنظیم کرده و زمان ۲۰ نوسان را اندازه‌گیری کرده و دوره‌ی تناوب آونگ ساده را محاسبه کنید و آن را با مقداری که از نمودار سؤال ۱ برای آونگ کاتر بدست آورده بودید مقایسه کنید. (محاسبه‌ی درصد خطای نسبی)

سنجش گشتاور ماند و بررسی قضیه‌ی محورهای موازی
(آونگ پیچشی)

اهداف آزمایش:

آشنایی با آونگ پیچشی، بررسی گشتاور ماند اجسام با اشکال متفاوت حول محوری که از مرکز جرم جسم می‌گذرد، بررسی بستگی گشتاور ماند یک جسم به توزیع جرم در جسم، بررسی بستگی گشتاور ماند یک جسم به فاصله‌ی محور دوران تا مرکز جرم جسم (قضیه محورهای موازی)

تئوری آزمایش:

گشتاور ماند یک جسم، نمایانگر مقاومت یک جسم در مقابل تغییر حرکت دورانی حول یک محور معین می‌باشد که آن را با I نشان می‌دهیم و برابر است با مجموع حاصل‌ضرب‌های جرم ذرات تشکیل‌دهنده‌ی یک جسم در مجذور فاصله‌شان از محور دوران.

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

گشتاور ماند یک جسم به محور دوران خاصی که حول آن می‌گردد و همچنین به شکل و نحوه‌ی توزیع جرم جسم بستگی دارد. اگر شکل ظاهری اجسام به گونه‌ای باشد که جرم نزدیک به محور دوران باشد، کمیت r برای ذرات تشکیل دهنده‌ی جسم نسبتاً کوچک است. به همین دلیل گشتاور ماند برای یک استوانه‌ی توپر که محور دوران آن همان محور تقارن استوانه است کوچک‌تر از گشتاور ماند یک دیسک هم‌جرم با استوانه‌ی توپر می‌باشد.

گشتاور ماند دارای بعد ML^2 است و معمولاً برحسب $Kg.m^2$ بیان می‌شود.

در جدول (۱) رابطه‌ی گشتاور ماند مربوط به چند جسم داده شده است.

جدول(۱):

میله به طول L حول محوری عمود برمرکز میله	دیسک به شعاع R	استوانه توپر به شعاع R حول محور استوانه	استوانه توخالی به شعاع داخلی R_1 و شعاع خارجی R_2	کره توپر به شعاع R
$I = \frac{1}{12}ML^2$	$I = \frac{1}{2}MR^2$	$I = \frac{1}{2}MR^2$	$I = \frac{1}{2}M({R_1}^2 + {R_2}^2)$	$I = \frac{2}{5}MR^2$

در این آزمایش برای بررسی گشتاور ماند از آونگ پیچشی استفاده می‌کنیم.

آونگ پیچشی، آونگی است که وقتی از حالت تعادل در اثر گشتاور نیروی τ، به اندازه‌ی θ، انحراف زاویه‌ای پیدا کند، گشتاور نیروی بازگردانی که متناسب با انحراف زاویه‌ای است ($\tau = -k\theta$) آونگ را به وضعیت اول برمی‌گرداند و سبب حرکت نوسانی زاویه‌ای می‌شود. معادله‌ی حرکت آونگ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\left.\begin{array}{l} \tau = -k\theta \\ \alpha = \dfrac{d^2\theta}{dt^2} \\ \tau = I\alpha \end{array}\right\} \quad \rightarrow \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{k}{I}\right)\theta = 0 \qquad (۱)$$

معادله دیفرانسیل (۱) معادله حرکت آونگ پیچشی است.

با تغییر متغییر $\omega^2 = \frac{k}{I}$ ، یکی از جواب‌های معادله‌ی دیفرانسیل (۱) به شکلِ $\theta = A\cos(\omega t + \varphi_0)$ در می‌آید. تابع‌های کسینوسی و سینوسی که با تناوب $T = \frac{2\pi}{\omega}$ تکرار می شوند، تابع هماهنگ نامیده می‌شوند. از این‌رو جسمی که معادله‌ی حرکتش

مشابه معادله دیفرانسیل (۱) باشد، حرکت هماهنگ ساده انجام می‌دهد. با این نام گذاری زمان تناوب حرکت آونگ پیچشی از رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}} \qquad (۲)$$

بخش اول سنجش ضریب کشسانی فنر بکار رفته در آونگ پیچشی:

این کمیت با استفاده از رابطه‌ی $\tau = -k\theta$ سنجیده می‌شود. در این آزمایش نیروی مشخصی به فنر وارد و فنر را به اندازه‌ی مشخصی می‌پیچانیم. سپس ضریب کشسانی فنر را بدست می‌آوریم.

بخش دوم سنجش گشتاور ماند اجسام با شکل‌های متفاوت حول محوری که از مرکز جرم جسم می‌گذرد: اجسام با جرم‌ها و هندسه‌های متفاوت را به فنر متصل کرده و آونگ پیچشی‌های متفاوتی را می‌سازیم. آونگ را به نوسان وامی‌داریم. با سنجش زمان تناوب آونگ، گشتاور ماند اجسام با کمک رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شوند.

بخش سوم بستگی گشتاور ماند یک جسم به توزیع جرم در جسم:

اگر گشتاور ماند جسم دلخواهی حول محوری که از مرکز جرم مجموعه می‌گذرد I باشد، با جابجا کردن بخش‌های مختلف جسم (تغییر توزیع جرم در جسم) گشتاور ماند مجموعه حول همان محوری که از مرکز جرم مجموعه می‌گذرد، تغییر می‌کند. برای بررسی این موضوع یک مجموعه‌ی سه جسمی را درنظر می‌گیریم و با اتصال این مجموعه به فنر پیچشی یک آونگ پیچشی می‌سازیم. این مجموعه‌ی سه جسمی شامل یک میله‌ی باریک به جرم M است که ابتدا آنرا به فنر پیچشی متصل کرده و با سنجش زمان تناوب آونگ، گشتاور ماند میله حول محوری که از مرکز میله می‌گذرد(I_{rod}) محاسبه می‌شود. دو جسم کوچک m_1 و m_2 ، به صورت متقارن در فاصله‌های متفاوت d نسبت به محور چرخش آونگ ، به میله متصل می‌شود و با سنجش زمان تناوب آونگ (مجموعه‌ی سه جسمی و فنر)، گشتاور ماند مجموعه حاصل I_{tot} ، در حالت‌های مختلف سنجیده می‌شود و بستگی گشتاور ماند به توزیع جرم یک جسم بررسی می‌شود. (رابطه‌ی $I = I_{rod} + \sum_{i=1}^{n} {d_i}^2 m_i$).

$$I_{tot} = I_{rod} + m_1 d^2 + m_2 d^2 \qquad (۳)$$

بخش چهارم بستگی گشتاور ماند یک جسم به فاصله‌ی محور دوران تا مرکز جرم جسم (قضیه محورهای موازی):

اگر گشتاور ماند جسم دلخواهی حول محوری که از مرکز جرم آن می‌گذرد I_o باشد، گشتاور ماند آن جسم حول محوری که به موازات محور اول و در فاصله‌ی d از مرکز جرم است، از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید. این مطلب قضیه‌ی محورهای موازی نامیده می‌شود. جسم مشخصی به جرم M را حول محوری که از مرکز جرم جسم نمی‌گذرد و به فاصله‌ی d از مرکز جرم جسم قراردارد به فنر پیچشی متصل کرده و با سنجش زمان تناوب آونگ، گشتاور ماند جسم را حول محوری که از مرکز جرم جسم نمی‌گذرد (I_d) محاسبه می‌کنیم. در این حالت بستگی گشتاور ماند به فاصله‌ی محور دوران تا مرکز جرم جسم d بررسی می‌شود.

$$I_d = I_o + Md^2 \qquad (۴)$$

وسایل مورد نیاز:

زمان سنج، نیروسنج، نوارمتر، آونگ پیچشی، دیسک، استوانه‌ی توپر، استوانه‌های توخالی، کره‌ی توپر، میله و وزنه‌های مخصوص

روش آزمایش و پرسش‌ها:

بخش اول سنجش ضریب کشسانی فنر بکار رفته در آونگ پیچشی:

میله را بصورت متقارن روی محور آونگ پیچشی نصب کنید. به این ترتیب یک آونگ پیچشی ساخته‌اید. نیروسنجی را روی میله در نقطه‌ای که فاصله‌ی آن را تا محور دوران می‌دانید (r) ثابت کرده و آن را کاملا عمود بر میله نگهدارید. حالا به کمک نیروسنج میله

به اندازه‌ی زوایای خواسته شده در جدول (۲) از حالت تعادل منحرف کرده و انـدازه‌ی نیـروی لازم بـرای منحـرف کـردن میلـه تـا زاویه‌ی مورد نظر را در جدول (۲) یادداشت کنید.

۱- با توجه به اینکه گشتاور نیرو از رابطه‌ی $\boldsymbol{\tau = r \times F}$ بدست می‌آید، برای هـر زاویـه τ را محاسـبه کـرده و در جـدول(۲) وارد نمایید.

۲- نمودار اندازه‌ی گشتاور نیرو برحسب زاویه‌ی انحراف $(\tau - \theta)$ را در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟

۳- با استفاده از نمودار سؤال ۱ ضریب کشسانی فنر را بدست آورید.

جدول(۲):

زاویه‌ی انحراف θ (درجه)	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰
زاویه‌ی انحراف θ (rad)									
نیروی وارد بر فنر F (N)									
گشتاور نیروی وارد بر فنر τ (N.m)									

بخش دوم سنجش گشتاور ماند اجسام با اشکال متفاوت حول محوری که از مرکز جرم جسم می‌گذرد:

به ترتیب جسم‌های مختلف را به فنر پیچشی متصل کرده و آونگ‌های پیچشی متفاوت بسـازید. آونـگ را از حالـت تعـادل منحـرف ساخته و رها کنید. پیش از رها کردن آونگ زمان‌سنج را برای شمارش ۵ نوسان تنظیم کنید. با اندازه‌گیری زمـان ۵ نوسـان، زمـان تناوب مجموعه را سنجیده و در جدول (۳) یادداشت کنید.

۴- با استفاده از رابطه‌ی (۲) و زمان تناوبی که انـدازه‌گیـری کـرده‌ایـد، گشـتاور مانـد جسـم را محاسـبه کـرده در جـدول(۳) وارد نمایید(I_{exp}).

۵- گشتاور ماند هر یک از اجسام را با استفاده از جدول(۱) بصورت تئوری محاسبه کرده و در جدول(۳) یادداشت کنید(I_{Th}).

۶- نمودار مربع زمان تناوب"جسم و فنر" (آونگ پیچشی) را برحسب گشتاور مانـد جسـم$(T^2 - I_{Th})$ بـرای اجسـام مختلـف در کاغذ میلی‌متری رسم کنید. شکل نمودار چگونه است؟ (از رابطه‌ی ۲ کمک بگیرید.)

۷- با استفاده از نمودار سؤال ۶ ضریب کشسانی فنر پیچشی را یکبار دیگر محاسبه کنید.

۸- آیا ضریب کشسانی فنر پیچشی که از دو روش در سؤال‌های ۳و۷ بدست آوردید تفاوت دارنـد؟ خطـای مطلـق را حسـاب کنیـد. کدام روش برای سنجش ضریب سختی فنر دقیق‌تر است؟

جدول(۳):

شماره	شکل هندسی	جرم جسم M (kg)	اندازه‌های هندسی	زمان ۵ نوسان t(s)	زمان تناوب T(s)	I_{exp} $(kg.m^2)$	I_{Th} $(kg.m^2)$	درصدخطای نسبی بین تئوری و تجربی
۱	میله		L=					
۲	کره تو پر		R=					
۳	دیسک		R=					
۵	استوانه توخالی ۱		R_1= R_2=					
۶	استوانه توخالی۲		R_1= R_2=					
۷	استوانه توپر		R=					

بخش سوم بستگی گشتاور ماند یک جسم به توزیع جرم در جسم:

میله‌ای را که گشتاور ماند آن را بدست آوردید (I_{rod})، به فنر پیچشی وصل کنید. وزنه های m_1 و m_2 را به صورت متقارن به فاصله‌های معینی (d)، از محور دوران "مجموعه‌ی آونگ " بر روی میله قرار داده و آونگ را از حالت تعادل منحرف ساخته و رها کنید. پیش از رها کردن آونگ، زمان‌سنج را برای شمارش ۵ نوسان تنظیم کنید. با اندازه‌گیری زمان ۵ نوسان، زمان تناوب مجموعه را سنجیده در جدول (۴) یادداشت کنید. این کار را برای چند فاصله‌ی دیگر وزنه‌ها از مرکز دوران تکرار کرده جدول را کامل کنید.

۹- جرم وزنه‌های مخصوص (m_1 و m_2) را با ترازو اندازه‌گیری نمایید.

۱۰- با استفاده از رابطه‌ی (۲) گشتاور ماند آونگ پیچشی (I_{tot}) را برای هر یک از حالت‌های فوق محاسبه و در جدول (۴) یادداشت کنید.

۱۱- نمودار گشتاور ماند آونگ پیچشی (I_{tot})، را بر حسب مربع فاصله‌ی جسم‌ها از محور دوران ($I_{tot} - d^2$) را در یک کاغذ میلی‌متری رسم کنید.

۱۲- با استفاده از نمودار سؤال ۱۱ مجموع جرم وزنه‌ها (m_1+m_2) را حساب کنید. آیا جرمی که از نمودار بدست آمده با مقداری که بطور مستقیم اندازه گرفته‌اید یکسان است؟ (راهنمایی: از رابطه‌ی (۴) استفاده کنید.)

۱۳- با استفاده از نمودار سؤال ۱۱ گشتاور ماند میله (I_{rod})، را بدست آورید. (راهنمایی: از رابطه‌ی (۴) استفاده کنید.)

۱۴- گشتاور ماند میله نسبت به محوری که از مرکز جرم آن می‌گذرد (I_{rod}) را که از نمودار بدست آوردید با مقداری که در پرسش ۵ بدست آوردید مقایسه کنید.

جدول (۴):

فاصله‌ی وزنه‌ها از محور دوران $d(cm)$					
$d^2(cm^2)$					
زمان ۵ نوسان $t(s)$					
زمان تناوب $T(s)$					
گشتاور ماند آونگ I_{tot} (kgm^2)					

بخش چهارم بستگی گشتاور ماند یک جسم به فاصله‌ی محور دوران تا مرکز جرم جسم (قضیه محورهای موازی):

جرم صفحه‌ی دایره‌ای تخت به شعاع r (M) را اندازه بگیرید و آن را از مرکزی‌ترین سوراخ (از نقطه‌ای که مرکز جرم صفحه است (O)) به فنر پیچشی متصل کنید. "مجموعه‌ی صفحه‌ی دایره‌ای تخت و فنر" را از حالت تعادل منحرف ساخته و رها کنید. پیش از رها کردن آونگ زمان‌سنج را برای شمارش ۵ نوسان تنظیم کنید. با اندازه‌گیری زمان ۵ نوسان، زمان تناوب مجموعه را سنجیده در جدول (۵) یادداشت کنید.

۱۵- با استفاده از رابطه‌ی (۲) گشتاور ماند صفحه ($I_{o_{exp}}$) را محاسبه کنید. این مقدار را با $I_{o_{Th}} = \frac{1}{2}Mr^2$ مقایسه و درصد خطای نسبی را بدست آورید.

سپس صفحه‌ی دایره‌ای تخت را از نقطه‌ای دیگری روی صفحه که به فاصله معین (d)، از مرکز جرم صفحه است، به فنر پیچشی متصل کنید. "مجموعه‌ی صفحه‌ی دایره‌ای تخت و فنر" را از حالت تعادل منحرف ساخته و رها کنید. پیش از رها کردن آونگ زمان‌سنج را برای شمارش ۵ نوسان تنظیم کنید. با اندازه‌گیری زمان ۵ نوسان، زمان تناوب مجموعه را سنجیده در جدول (۵) یادداشت کنید. حال با استفاده از رابطه‌ی (۲) گشتاو رماند آونگ (I_{tot}) را محاسبه کرده در جدول وارد کنید.
این آزمایش را برای تمام فاصله‌های ممکن (d)، که بر روی صفحه ایجاد شده است، تکرار کنید وجدول (۵) را کامل کنید.

۱۶- نمودار گشتاور ماند " مجموعه‌ی آونگ و صفحه‌ی دایره‌ای تخت " (I_{tot})، را بر حسب مربع فاصله‌ی مرکز جرم صفحه تا محور دوران (d^2)، رسم کنید.($I_{tot} - d^2$)

۱۷- با استفاده از نمودار سؤال ۱۶ جرم صفحه‌ی دایره‌ای تخت M را حساب کنید. (راهنمایی: از رابطه‌ی(۲) استفاده کنید.) جرم صفحه که با این روش بدست می‌آید، چقدر با مقدار اندازه‌گیری شده با ترازو تفاوت دارد؟

۱۸- با استفاده از نمودار سؤال ۱۶ گشتاور ماند صفحه‌ی دایره‌ای تخت نسبت به مرکز جرم صفحه (I_o)، را بدست آورید. (راهنمایی: از رابطه‌ی (۴) استفاده کنید.)

۱۹- گشتاور ماند صفحه دایره‌ای تخت را که از نمودار بدست آوردید با مقداری که از پرسش۱۵ بدست آوردید مقایسه کنید.

جدول (۵):

فاصله‌ی محل اتصال صفحه به فنر تا مرکز صفحه $d(cm)$								
$d^2(cm^2)$								
زمان ۵۰ نوسان $t(s)$								
زمان تناوب $T(s)$								
I_{tot} (kgm^2)								