وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه آیت ا... العظمی بروجردی (ره)

دستور العمل آزمایشگاه

فیزیک پایه ۱

آزاده نظری

فیروز امیری

فهرست مطالب

مقدمه..... ۱

دستورالعمل نحوه کار در آزمایشگاه فیزیک..... ۲

خطاهای اندازه گیری..... ۳

خطای مطلق..... ۴

خطای نسبی..... ۵

درصد خطا..... ۶

حساسیت..... ۶

دقت..... ۶

آزمایش شماره ۱ : اندازه گیری طول، جرم و تقعر..... ۸

آزمایش ۲: اصطکاک..... ۲۰

آزمایش ۳: آونگ ساده..... ۲۸

آزمایش ۴: فنرها..... ۳۲

مقدمه

می‌توان فیزیک را علم مطالعه طبیعت نامید و برای کسب معلومات مفید از طبیعت نیاز به اندازه‌گیری داریم. روش اندازه‌گیری و دقت در آن بسیار مهم است زیرا تفسیر و تجزیه آنها منجر به اصول بنیادی و مفاهیم علمی خواهد شد.

بنابراین کار اندازه‌گیری و تحلیل آنها دارای اهمیت فوق العاده‌ای است. از طرفی ممکن است فراگیران، فیزیک را فقط به صورت مجموعه‌ای از فرمول‌ها تصور کنند و هدفشان تنها به خاطر سپردن آنها برای امتحان باشد. اما فیزیک، علمی مبتنی بر تجزیه و اندازه‌گیری است که نتیجه‌های علمی از آنها به دست می‌آیند و اهمیت آزمایشگاه در آنجاست که درک و فهم فرمول‌ها و مفاهیم بنیادی فیزیک زمانی ممکن است که بتوانیم در عمل آنها را مشاهده کنیم و به کار بندیم. این فرآیند یادگیری که بر مبنای آزمایش و اندازه گیری است موجب سازماندهی مؤثر معلومات و تفسیر مفاهیم و اصول اساسی فیزیک می شود و دانشجو از یادگیری آنها لذت می‌برد. در واقع اگر بخواهیم آموزش فیزیک را به صورت قابل ملاحظه ای بهتر کنیم باید آزمایشگاه را به صورت کامل‌تر و جدی‌تری آموزش دهیم.

با آرزوی موفقیت و سر بلندی شما

دستورالعمل نحوه کار در آزمایشگاه فیزیک

کار در آزمایشگاه های فیزیک نیازمند رعایت یک سلسله مقررات خاصی می باشد تا بهترین نتیجه به منظور انجام تجربه ای عملی حاصل شود:

۱. حضور به موقع در ساعت مقرر در محیط آزمایشگاه مربوطه الزامی است. از غیبت در آزمایشگاه باید خودداری شود زیرا کار آزمایشگاه به گونه‌ای نیست که بتوان به راحتی یک یا چند ساعت غیبت را جبران کرد.

۲. پیش مطالعه آزمایش تعیین شده به منظور تسلط کامل به انجام آزمایش مورد نظر ضروری است.

۳. رعایت نظم و ترتیب در انجام کار گروهی و مسئولیت پذیری در اجرای آزمایش مورد نظر.

۴. در حین کار، رعایت مقررات ایمنی برای سلامتی افراد و مواظبت از دستگاه های ضروری است.

۵. قبل از شروع آزمایش میز کار خود را بررسی کنید و از کامل و سالم بودن آن ها مطمئن شوید. اگر طرز کار با وسیله‌ای را نمی دانید قبل از هر کاری از مربی خود روش کار با آن را فرا گیرید.

۶. یادداشت نتایج به دست آمده از آزمایش به منظور تکمیل گزارش کار آزمایش مربوطه.

۷. دقت در کاهش عوامل خارجی که بر روی نحوه اجرای آزمایش و ایجاد خطا اثر می گذارند.

۸. احتیاط نمودن در هنگام کار با مواد شیمیایی، سمی، قابل اشتعال و خطرناک نظیر برق، گاز، آب جوش، جیوه و ...

۹. تمیز و مرتب نگاه داشتن محیط آزمایشگاه و میز کار مربوطه و دستگاه‌های آزمایشگاهی.

۱۰. در هنگام اندازه‌گیری هر کمیت از همان ابتدا مراقب منابع خطای اندازه‌گیری باشید و سعی کنید حتی الامکان از میزان خطاها کاسته شود.

۱۱. دسترسی داشتن به لوازم نوشتاری مورد نیاز و ضروری نظیر خط کش، پرگار، ماشین حساب، کاغذ میلیمتری و ...

۱۲. پرهیز از تعجیل در اجرای آزمایش و مطرح نمودن سئوالاتی که در حین آزمایش پیش می‌آید از مربیان محترم.

۱۳. در پایان هر جلسه باید وسائل آزمایش روی میز به حالت صحیح در آیند و چنانچه وسیله ای از مسئول آزمایشگاه تحویل گرفته شده است به وی برگشت داده شود.

خطاهای اندازه گیری

فیزیک اگر چه علم دقیقی است، اما به دلیل دقیق نبودن اندازه گیری، آنچه را که گاه مقدار دقیق یا واقعی یک کمیت فیزیکی می نامند، نمی‌توان یافت. به هر حال فرض این مطلب که مقدار دقیق وجود دارد منطقی به نظر می‌رسد و برآورد حدودی که این مقدار را در بر می‌گیرد مورد نظر ما خواهد بود. خلاصه، چون مقدار واقعی از نظر ما قابل حصول نیست تلاش خواهیم کرد تا چگونگی یافتن دقیقترین مقدار، که به کمک مجموعه‌ای از اندازه گیری‌ها مشخص می‌شود و چگونگی برآورد دقت و درستی این مقدار را نشان دهیم. اختلاف بین مقدار مشاهده شده هر کمیت فیزیکی و مقدار دقیق آن را خطای مشاهده می نامند. چنین خطاهایی از قانونی ساده پیروی نمی کنند و به طور کلی از علل متعددی ناشی می شوند. حتی آزمایشگری که از یک نوع وسیله چندین بار استفاده می کند تا کمیت معینی را اندازه گیری کند، همیشه دقیقاً یک مقدار را ثبت نمی کند. این امر ممکن است نتیجه بی دقتی، عدم یکنواختی وسیله یا وسایل به کار رفته، متغیر بودن آزمایشگر و یا نتیجه برخی تغییرات کوچک در عوامل دیگر فیزیکی مؤثر در اندازه گیری باشد.

خطاهای اندازه گیری را معمولاً به دو گروه اتفاقی و سیستماتیک تقسیم می کنند. البته تشخیص آنها از یکدیگر گاه مشکل است و بسیاری از خطاها نتیجه ترکیب این دو نوع خطاست.

الف) خطای اتفاقی

خطای تصادفی می تواند در نتیجه عدم دقت آزمایشگر هنگام اندازه گیری و یا به علت عوامل خارجی بروز نماید که می‌تواند با تکرار آزمایش بر طرف شود. این نوع خطاها از لحاظ وقوع نامرتب و از نظر بزرگی متغیرند. عواملی نظیر دما، فشار هوا، وزش باد و رطوبت هوا، در نتیجه بسیاری از آزمایش‌ها مؤثرند و تغییرات ناگهانی آنها باعث کاهش دقت آزمایش می‌شود. پرواز هواپیما و عبور وسائل نقلیه سنگین نیز در نتیجه بعضی از آزمایش‌ها اثر می‌گذارد.

ب) خطای سیستماتیک

این نوع خطا ناشی از کاربرد وسایل اندازه گیری در شرایطی متفاوت با شرایط مورج سازی (کالیبراسیون) آنها است؛ که باید توسط آنالیز روش ها و شرایط آزمایش تخمین زده شوند. برای مثال اگر دمای آزمایشگاه با دمایی که در آن یک متر فلزی مدرج شده است متفاوت باشد طول اندازه‌گیری شده با طول واقعی آن متفاوت خواهد بود. به علاوه وسایل اندازه گیری ممکن است به صورت های مختلف خطا داشته باشند. حتی بهترین وسایل اندازه گیری

موجود نیز دقت محدودی دارند و درک این نقایص برای آزمایشگر مهم است. از طرفی گاهی در حین آزمایش به نوعی خطا برخورد می کنیم که نه به دقت اندازه گیری و نه به دقت مشخص آزمایش کننده بستگی دارد، بلکه ناشی از عدم حساسیت دستگاه است و به همین دلیل آن را خطای عدم حساسیت می نامند.

خطای مطلق

چنانچه بخواهیم آزمایش را انجام دهیم دو حالت وجود دارد:

الف) مقدار دقیق و واقعی کمیتی را که می خواهیم اندازه گیری کنیم داریم.

ب) مقدار دقیق و واقعی کمیتی را که می خواهیم اندازه گیری کنیم نداریم.

در حالت (الف) چنانچه x مقدار واقعی و x' مقدار اندازه گیری شده یک کمیت باشد. دراین صورت اختلاف بین این دو را خطای مطلق می نامند.

$$x - x' = \pm \Delta x$$

مثلاً اندازه گیری شتاب ثقل در آزمایش سقوط آزاد اگر g منطقه برابر ۹/۷۹ متر بر مجذور ثانیه باشد و g آزمایش برابر ۹/۸۷ متر بر مجذور بر ثانیه به دست آید. در این صورت خطای مطلق در اندازه گیری g خواهد بود:

$$\Delta g = ۹/۷۹ - ۹/۸۷ = ۰/۰۸$$

در حالت (ب) به دلیل آن که مقدار واقعی را نداریم چاره ای جز تکرار آزمایش نیست. برای کاهش خطا در اندازه گیری کمیتی مانند x باید اندازه گیری چند بار تکرار و نتایج ثبت شود. بدیهی است که در هیچ یک ازاین اندازه گیری ها مقدار واقعی به دست نمی آید.

اندازه گیری باید به دفعات تکرار و مشاهده شود که نتایج اندازه گیری به چه میزان نزدیک و یا دور از هم قرار دارند. هر گاه مشاهده شود که تکرار اندازه گیری به نتایج تقریباً یکسانی منجر می شود، لزومی ندارد که اندازه گیری را زیاد تکرار کرد. در هر صورت میانگین نتایج اندازه گیری به عنوان مقدار دقیق یا محتمل ترین مقدار کمیت بیان می شود.

حال اگر به فرض n با اندازه گیری تکرار شد و نتایجی برابر با $x_1, x_2, \dots, x_n$ به دست آمده باشد میانگین آن ها که می تواند با $\bar{x}$ نشان داده شود به عنوان نزدیکترین عدد به مقدار واقعی در نظر گرفته می شود.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

میانگین می‌تواند از هر یک از نتایج اندازه‌گیری بزرگتر یا کوچکتر و یا مساوی آن باشد. اگر تعداد اندازه گیری‌ها کم باشد، مثلاً حدود ۵ بار، حداکثر انحراف از میانگین اندازه‌گیری‌ها را به عنوان میزان خطا در نظر می‌گیریم، یعنی:

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

اگر تعداد تکرار آزمایش زیاد باشد، میانگین $\Delta x_i (= |\bar{x} - x_i|)$ ها را به عنوان خطای اندازه‌گیری در نظر می‌گیریم.

$$\Delta x = \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_i - \bar{x}|}{n}$$

در اندازه‌گیری‌های دقیق، کمیت دیگری به عنوان خطا منظور می‌شود که به آن انحراف معیار گویند و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

بدین ترتیب هر گاه خطای اندازه‌گیری از نوع اتفاقی بوده و توزیع مقادیر اندازه‌گیری شده متقارن باشد، نتیجه اندازه‌گیری چنین نوشته می شود:

$$\text{مقدار کمیت} = \bar{x} \pm \Delta x$$

که در آن $\bar{x}$ میانگین اندازه گیری ها و Δx حداکثر انحراف از میانگین یا میانگین خطا یا انحراف معیار (S) است.

در صورتی که Δx به دست آمده برای خطای اتفاقی از خطای دستگاه کوچکتر باشد برای در نظر گرفتن بیشترین خطای ممکن، خطای دستگاه را به عنوان Δx انتخاب می کنیم.

خطای دستگاه به صورت زیر محاسبه می شود:

خطای دستگاه = خطای عدم حساسیت + دقت وسیله

کوچکترین درجه بندی که با وسیله مورد نظر می توان اندازه گیری کرد را به عنوان دقت وسیله در نظر می گیرند.

خطای نسبی

مقدار خطای مطلق میزان دقت آزمایش را نشان نمی‌دهد. لذا برای تأمین این منظور خطای نسبی را تعریف می‌کنند. به مثال زیر توجه کنید:

چنانچه در اندازه گیری طولی برابر با پنج متر، یک سانتی متر اشتباه کرده باشیم، مانند این است که در هر متر $۲mm$ اشتباه شده باشد، ولی اگر این خطا در اندازه گیری طولی مساوی $۵۰cm$ رخ دهد، مثل این است که در هر

متر، $۲cm$ خطا داشته باشیم. بنابراین دقت اندازه‌گیری در آزمایش اول، ده برابر دقت اندازه گیری در آزمایش دوم است.

بنابراین آنچه را که عملاً باید به کار برد، نسبت خطای مطلق Δx به مقدار اندازه گیری شده می‌باشد که آن را خطای نسبی می نامند.

$$\text{خطای نسبی} = \left|\frac{\pm\Delta x}{x}\right|$$

همان طور که گفته شد خطای نسبی دقت اندازه گیری را تعیین می کند. اندازه گیری یک کمیت در صورتی قابل قبول است که خطای نسبی مقدار کوچکی باشد.

درصد خطا

بنا به تعریف خطای نسبی ضرب در ۱۰۰ که آن را به صورت درصد نشان می دهند درصد خطا و یا درصد خطای نسبی می نامند.

$$\left|\frac{\pm\Delta x}{x}\right| \times 100 = \% \cdots$$

در به دست آوردن نتیجه یک آزمایش درصد خطا از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا دقت شخص آزمایش کننده را نشان می دهد و با توجه به ابزارهای اندازه گیری و خطاهای آزمایشگر در آزمایشگاه (۸ تا ۱۰ درصد) خطا قابل قبول است و چنانچه درصد خطا بیش از این مقدار باشد بایستی آزمایش را مجدداً تکرار کرد.

حساسیت

حساسیت به آزمایشگر بر می‌گردد و بنا به تعریف عبارت است از عکس خطای نسبی کل $\left(\text{حساسیت} = \frac{1}{\text{خطای نسبی کل}}\right)$ و این بدان معنی است که هر قدر خطای نسبی کل بیشتر باشد آزمایشگر، آزمایش را با حساسیت کمتری که از خود نشان داده انجام داده است.

دقت

دقت به ابزار اندازه گیری برمی گردد و بنا به تعریف عبارت است از حداقل مقداری که می توان به کمک یک دستگاه اندازه گیری کرد. مثلاً کولیس با دقت ۰/۰۰۰۱ متر یا زمان سنج با دقت ۰/۰۱ ثانیه و ... . ابزار اندازه گیری ای با ارزش تر است که دقت آن ابزار بر رویش ثبت شده باشد. در ابزار و اندازه گیری که دقت آن مشخص نباشد کافی است که از رابطه زیر به منظور تعیین دقت آن ابزار استفاده کنیم:

$$\text{دقت ابزار اندازه گیری} = \frac{\text{تفاضل دو عدد متوالی روی دستگاه اندازه گیری}}{\text{تعداد فواصل مساوی بین آن دو عدد}}$$

نکته: در محاسبه درصد خطا به دلیل آن که از نظر فیزیکی خطای صفر درصد معنی در صورتی که در جواب نهایی به دست آمده توسط آزمایشگر خطا صفر درصد باشد دراین صورت دقت ابزار اندازه گیری شده به عنوان درصد خطا در نظر گرفته می شود.

آزمایش شماره ۱ : اندازه گیری طول، جرم و تقعر

فیزیک علم اندازه گیری یا به عبارتی علم تجربه های کمی است. ابزارهای اندازه گیری بسیاری با دقت بالا به منظور رفع نیازهای آزمایشگاه های فیزیک ساخته شده اند و همواره در حال توسعه می باشند. کمیت های طول و جرم در کار علمی از اهمیت بنیادی برخوردارند که در اغلب آزمایش ها اندازه گیری می‌شوند.

در مکانیک کلاسیک باید بتوان هویت یک ماده را شناسایی کرد و موقعیت فضایی و زمانی آن را تشخیص داد تا به این وسیله بتوان وضعیت های گذشته و آینده آن را نسبت به فضا و زمان تعیین نمود. بدین منظور جهت مطالعه روی یک ماده باید بتوان ابعاد آن، نوع ماده (جامد، مایع، گاز) وضعیت در حال سکون یا حرکت جسم و وضعیت زمانی آن را تعیین نمود. لذا نیاز به ابزار اندازه گیری بعد جسم به کمک متر، کولیس، ریزسنج (میکرومتر)، اسفرومتر (گوی سنج)؛ ماهیت جسم را به کمک استوانه مدرج و بشر؛ جرم و وزن جسم به وسیله ترازو و نیروسنج؛ زمان برای جسم وسیله زمان سنج داریم.

پیش از شروع به اجرای آزمایش ابتدا باید تصمیم گرفت که مقادیر عددی محاسبه در چه دستگاهی اندازه گیری و اجرا شوند. به دستگاه اندازه گیری «سیستم اندازه گیری» نیز می گویند. سه نوع سیستم اندازه گیری در دنیا مرسوم است:

۱. سیستم اندازه‌گیری بین المللی SI یا $M.K.S$ (متر، کیلوگرم، ثانیه) که بسیار تلاش می‌شود کلیه کشورهای جهان از آن پیروی کنند.
۲. سیستم اندازه گیری $c.g.s$ (سانتی متر، گرم، ثانیه) که زیر مجموعه ای از سیستم SI می‌باشد.
۳. سیستم اندازه گیری $f.lb.s$ (فوت (۰/۳۳ متر)، پوند (۰/۴۵۸ کیلوگرم)، ثانیه) که در حال کنار گذاشتن در جهان است.

انواع کمیت ها

در فیزیک کمیت ها به دو گروه تقسیم می شوند:

۱. **کمیت‌های اصلی**: کمیت‌هایی که مبنای تعریف سایر کمیت‌ها هستند و خود به طور مستقل بیان می‌شوند. نظیر طول، جرم، زمان.

۲. **کمیت های فرعی**: کمیت هایی که وابسته به کمیت های اصلی هستند و از ترکیب کمیت های اصلی به دست می آیند. نظیر نیرو، جرم حجمی، شتاب و ...

ارقام با معنی

به ارقامی گفته می شود که د رحد دقت ابزار اندازه گیری هستند.

چگونگی کار با ارقام با معنی بر حسب دقت دستگاه های اندازه گیری

تفاوت ریاضی آزمایشگاهی با ریاضی معمولی در این است که در آزمایشگاه به هیچ وجه حق نداریم بیش از ارقام با معنی در جواب آزمایش رقم بیاوریم. چنانچه د رحین آزمایش با چند دستگاه اندازه گیری سر و کار داشته باشیم مقدار رقم با معنی که باید در نظر گرفته شود معمولاً در حد بالاترین دقت اندازه گیری در میان دستگاه ها باید باشد.

توجه داشته باشید از دیگر تفاوت های ریاضی آزمایشگاهی با ریاضی معمولی آن است که در نوشتن مقادیر عددی در آزمایشگاه حتماً باید نماد (دیمانسیون ـ بعد) عدد مربوطه در مقابل آن ثبت شود. اگر جواب به دست آمده مربوط به یک ضریب یا عدد ثابت است باید حتماً در مقابل آن کلمه ضریب ثابت قید شود.

در اینجا لازم است که به این پرسش پاسخ داده شود که ضرورت ابزارهای اندازه گیری با دقت بیشتر و آزمایش های دقیق تر و در نتیجه جواب های با ارقام با معنی بیشتر چیست؟ در پاسخ باید گفت که ضرورت این امر مستقیماً به نیاز شدید در جامعه امروز به زندگی با سرعت و دقت بیشتر و بالاتر باز می گردد. به گونه ای که صد سال پیش گذشت زمان بر حسب شبانه روز و ساعت برای بشر اهمیت داشت. امروزه اندازه گیری زمان صدم ثانیه به منظور وقوع یک رویداد امری طبیعی و بلکه پیش پا افتاده است. نوجه داشته باشید که امروزه ارزش جواب های آزمایشگاهی به دست آمده مستقیماً به دقت بیشتر ابزار اندازه گیری مربوط می گردد. لذا در اجرای آزمایش ها به هیچ وجه حق اضافه نمودن یا کاستن مقادیر عددی به نتیجه به دست آمده را نداریم.

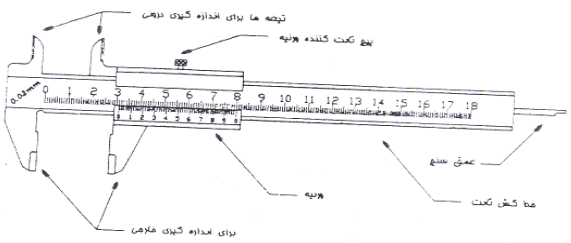
جدول (۱-۱): بعضی از کمیت های فیزیکی و ابعاد آن ها

کمیت	نماد	ابعاد	واحد SI	واحد c.g.s	رابطه تبدیل دو دستگاه
طول	ℓ,L	L	m	cm	$1m=10^{+2}cm$
جرم	M,m	M	Kg	g	$1Kg=10^{3}g$
زمان	T,t	T	S	S	-
مسافت	A	L^2	m^2	cm^2	$1m^2=10^4cm^2$
حجم	V	L^3	m^3	cm^3	$1m^3=10^6cm^3$
سرعت	V,v	LT^{-1}	$^m/_s$	$^{cm}/_s$	$1\,^m/_s=10^2\,^{cm}/_s$
شتاب	a	LT^{-2}	$^m/_{s^2}$	$^{cm}/_{s^2}$	$1^m/_{s^2}=10^2\,^{cm}/_{s^2}$
زاویه چرخش	q	-	rad	rad	-
سرعت زاویه ای	ω	T^{-1}	$^{rad}/_s$	$^{rad}/_s$	-
نیرو	F	MLT^{-2}	N	$dyne$	$1N=10^5dyne$
شدت میدان گرانش	g	LT^{-2}	N/kg^2	$dyne/g^2$	$1\,N/kg^2=10^2\,dyne/g^2$
ثابت نیروی فنر	K	MT^{-2}	$^N/_m$	$dyne/cm$	$1\,^N/_m=10^7\,dyne/cm$
گشتاور نیرو	τ	ML^2T^{-2}	$^N/_m$	$dyne/cm$	$1\,^N/_m=10^7\,dyne/cm$
گشتاور ماند	I	ML^2	Kmg^2	Gcm^2	$1kgm^2=10^7gcm^2$
اندازه حرکت زاویه ای	L	ML^2T^{-1}	kgm^2/s	gcm^2/s	$1kgm^2/s=10^7\,gcm^2/s$
فشار	P	$ML^{-1}T^{-2}$	P_a	$dyne/cm^2$	$1P_a=10\,dyne/cm^2$

هدف: آشنایی و کار با وسایل اندازه گیری طول، ارتفاع انحنا، جرم کولیس

در سال ۱۹۴۹ فردی به نام میتوتویو اولین پروانه ساخت کولیس را کسب کرد و تولید آن را در همان سال در کارخانه میزونوکوچی (*Mizonokuchi*) در شهر کاوازاکی ژاپن شروع کرد. در سال ۱۹۵۳ کارخانه آن به اوتسونومیا (*Utsonomiya*) انتقال یافته و تولید انبوه آن شروع شد. در سال ۱۹۵۶ این فرد اولین کسی بود که موضوع استفاده از فولاد ضد زنگ را برای ساخت کولیس مطرح کرد. ۷ سال بعد در سال ۱۹۶۳ میتوتویو بیش از یک میلیون کولیس تولید کرد.در همان سال تولید کولیس ساعتی آغاز شد و به دنبال آن کولیس های دیجیتالی و سپس کولیس های ضد زنگ که در مقابل آب وروغن مقاوم بودند تولید شد. کولیس های کار سنگین که طول ۴۵۰ میلی متر وبیشتر را اندازه گیری می کنند از سال ۱۳۶۱ ساخته شدند. امروزه کولیس هایی که طول ۲۰۰۰ میلی متر را اندازه می گیرند نیز تولید می شوند. بدنه این نوع از کولیس ها از فیبرهای کربنی است تا سبک باشند و معضل بزرگ این کولیس ها که سنگینی آنهاست را بدین گونه رفع کرده اند.

به وسیله کولیس می توان قطر داخلی ، قطر خارجی و عمق یا ارتفاع اجسام را اندازه گرفت.



شکل (۱-۱): کولیس

اجزای کولیس

۱. خط کش: خط کش بدنه اصلی کولیس است که در یک سمت بر حسب سانتی متر و میلی متر و در سمت دیگر بر حسب میلی متر قرائت می شود.

۲. ورنیه: ورنیه به ما در خواندن دقیق تر تا کسری از درجه بندی ریز اندازه گیری کمک می کند. اصول این درجه بندی در سال ۱۶۳۱ میلادی توسط شخصی به نام ورنیه پایه ریزی شد. درجه بندی ورنیه یک درجه بندی کمکی است که می تواند در مقابل مقیاس اصلی و ثابت وسیله اندازه گیری جابه جا شود. این درجه بندی از نظر اندازه با درجه بندی مقیاس ثابت متفاوت است. بدین ترتیب که n واحد از درجه بندی ورنیه مساوی با $(n\text{-}1)$ درجه مقیاس ثابت است. برای مثال طول یک واحد از درجه بندی ورنیه را با x و طول یک واحد از درجه بندی خط کش ثابت را با y نمایش می دهیم. اگر طولی دلخواه شامل n واحد از درجه بندی خط کش ورنیه و $(n\text{-}1)$ واحد از درجه بندی خط کش باشد، خواهیم داشت:

$$nx = (n-1)y \rightarrow x = \frac{n-1}{n}y \qquad (۱\text{-}۱)$$

که n عددی صحیح است. کوچکترین مقداری که توسط درجه بندی ورنیه خوانده می شود، کمترین شمارش نام دارد که همان دقت دستگاه می باشد و برابر است با تفاضل بین یک درجه خط کش ثابت و یک درجه ورنیه یعنی:

$$\text{کمترین شمارش } y - x = y - \frac{n-1}{n}y = \frac{1}{n}y \qquad (۱\text{-}۲)$$

برای مثال یک ورنیه دارای ۱۰ درجه است به طوری که طول آن مطابق با ۹ درجه خط کش ثابت است . بنابراین هر درجه از ورنیه به اندازه $\frac{1}{10}$ از درجه بندی خط کش ثابت کوچکتر است. اکنون با فرض آنکه صفر ورنیه روبروی صفر خط کش ثابت قرار داشته باشد ، اولین شماره ورنیه از اولین شماره خط کش ثابت به اندازه $\frac{1}{10}$ درجه عقب است. در این حالت دومین شماره ورنیه به اندازه $\frac{2}{10}$ از دومین شماره خط کش ثابت وآخرین شماره ورنیه به اندازه $\frac{10}{10}$ یا یک

درجه از شماره خط کش ثابت فاصله گرفته است. بنابراین آخرین یا دهمین شماره ورنیه روبروی نهمین شماره خط کش ثابت واقع شده است. حال اگر ورنیه به طرف راست حرکت داده شود تا این که ششمین درجه آن با ششمین درجه خط کش ثابت روبرو شود میزان جا به جایی برابر $6 \times \frac{1}{10}$ یا $\frac{6}{10}$ درجه اصلی خواهد بود. هر گاه جابه جایی ورنیه بیش از چند درجه خط کش ثابت باشد، باز نحوه عمل با اندکی دقت به همان صورت خواهد بود. برای مثال صفر ورنیه به اندازه ۲ درجه خط کش ثابت و کسری از آن حرکت کرده است که با توجه به درجه منطبق شده ورنیه (درجه ششم) میزان جابه جایی برابر مقدار زیر خواهد بود:

درجه اصلی ۲/۶ = ۰/۶ + ۲/۰

مقدار عددی n در وسایل اندازه گیری مختلف، متفاوت است. در هر حال اصول کلیه ورنیه ها یکی است و کسی که اصول ورنیه را فرا گرفته باشد به آسانی می تواند از وسایل اندازه گیری مختلف استفاده کند. در هنگام استفاده از وسیله ای که دارای ورنیه است اول بایدکمترین شمارش آن را مشخص کرد. بعد برای اندازه گیری جا به جایی باید ابتدا تعداد درجات خط کش ثابت را قبل از صفر ورنیه قرار دارند ، قرائت کرد. سپس درجه ای از ورنیه که روبروی یکی از درجات خط کش ثابت قرار گرفته است را معین نموده و در نهایت با حاصل ضرب کمترین شمارش عدد خوانده شده ورنیه را به دست آورد وبا عدد خوانده شده خط کش ثابت جمع کرد.

۳. فک ها یا شاخک های خارجی: که به منظور اندازه گیری قطر یا ضخامت خارجی این دو فک بر لبه های خارجی جسم مورد نظر منطبق می شوند.

۴. فک ها یا شاخک های داخلی: که به منظور اندازه گیری قطر یا ضخامت داخلی این دو فک بر لبه های داخلی جسم مورد نظر منطبق می شوند.

۵. تیغه انتهایی یا تیغه عمق سنج: که نوک آن در عمق جسم مورد نظر قرار داده می شود و لبه کولیس نیز بر لبه جسم منطبق می شود تا عمق یا ضخامت جسم اندازه گیری شود.

۶. پیچ تثبیت دستگاه (قفل ورنیه): روی ورنیه قرار دارد و با سفت کردن آن فک متحرک کولیس ثابت خواهد شد تا در هنگام قرائت عدد فک متحرک نسبت به فک ثابت دستگاه حرکت نکند.

۷. زائده زیر ورنیه: برای راحت حرکت دادن فک نسبت به فک ثابت زیر ورنیه تعبیه شده است.

روش اندازه گیری با کولیس

برای اندازه گیری قطر داخلی اجسام دو شاخک کولیس را درون ناحیه ای که می خواهیم قطر داخلی آن را اندازه بگیریم می گذاریم و برای اندازه گیری عمق اجسام تیغه کولیس درون شکاف مورد نظر قرار می دهیم، به طوری که تیغه به انتهای شکاف برسد و انتهای کولیس بر شکاف مماس شود.

خواندن عدد از روی کولیس

عددی را که کولیس نشان می دهد در دو مرحله قرائت می شود:

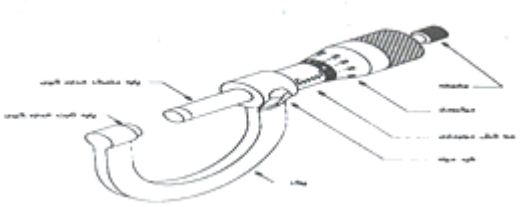
مرحله اول: به خط صفر ورنیه توجه کنید بین دو خط از خطوط درجه بندی خط کش قرار گرفته است از روی خط کش عدد کوچکتر را بر حسب میلی متر یادداشت کنید.

مرحله دوم: یک خط و بهترین خط روی ورنیه را پیدا کنید که کاملاً منطبق بر یکی از خطوط خط کش باشد. از روی ورنیه مشخص کنید این خط چندمین درجه بندی روی ورنیه است (از صفر ورنیه تا خط مورد نظر، روی ورنیه، تعداد فواصل را بشمارید) تعداد درجه بندی را که شمرده اید در دقت ورنیه بر حسب میلی متر ضرب کنید. این عدد را با عدد قرائت شده در مرحله اول جمع کنید.

حالت خاص: حالت خاص زمانی اتفاق می افتد که خط صفر ورنیه بین دو خط خط کش قرار ندارد بلکه منطبق بر یک خط باشد در این حالت به خط انتهای ورنیه نیز توجه کنید در صورتی که این خط نیز کاملاً منطبق بر یکی از خطوط خط کش بود ارقام بعد از ممیز صفر خواهند بود.

ریزسنج (میکرومتر)

ریزسنج وسیله‌ای است که دقیق تر از کولیس بوده و معمولاً برای دقت‌های بالا به کار می‌رود. این وسیله از یک استوانه ثابت مدرج و یک استوانه متحرک مدرج که می تواند روی استوانه ثابت مدرج بچرخد و جابه جا شود و یک کمان فلزی متصل به استوانه متحرک در طول استوانه ثابت به ازای هر دور چرخش و به نحوه طراحی و دقت دستگاه بستگی دارد. گام ریزسنج می تواند ۱ میلی متر یا ½ میلی متر باشد. هرگاه استوانه متحرک به ۵۰ قسمت تقسیم شده باشد با چرخاندن استوانه متحرک به اندازه دو دور کامل دهانه یک میلی متر جابه جا می شود (گام ½ میلی متر) در نتیجه ۱۰۰ قسمت از استوانه متحرک معادل ۱ میلی متر از استوانه ثابت (خط کش ثابت) می باشد؛ بنابراین دقت دستگاه $\frac{1}{100}$ میلی متر می باشد.



شکل (۱-۲): ریزسنج

روش اندازه گیری با ریزسنج

فرض کنید می‌خواهید ضخامت جسمی را اندازه بگیرید؛ با چرخاندن قسمت عاج دار پوسته زبانه متحرک را حرکت دهید تا به اندازه کافی از پایه ثابت فاصله بگیرد. جسم را بین دو زبانه قرار دهید و با استفاده از پیچ هرزگرد زبانه متحرک را حرکت دهید تا پایه و زبانه متحرک کاملاً به طرفین جسم بچسبند. در این هنگام هرزگرد آزاد می شود و صدای آن را خواهید شنید حال ضامن را محکم کنید تا پوسته جابه جا نشود.

خواندن عدد از روی ریزسنج

خواندن عدد از روی ریزسنج دو مرحله دارد و به کمک دو درجه بندی روی محور ثابت و پوسته انجام می شود. وقتی که پوسته نسبت به محور ثابت یک دور کامل حرکت کند، پوسته و زبانه متحرک مسافتی برابر ۰/۵۰ میلی متر را (به صورت افقی) طی می کنند (گام این پیچ ۰/۵۰ میلی متر است یعنی هر دوری که پوسته بزند به اندازه ۰/۵۰ میلی متر جلو یا عقب می رود). خطوط کمکی که نماینده ۰/۵۰ میلی متر هستند روی محور ثابت حک شده اند تا در فاصله دوران پوسته از هر میلی متر تا میلی متر بعدی مشخص شود که آیا پوسته در فاصله صفر تا ۰/۵ میلی متر حرکت خود است یا در فاصله ۰/۵۰ تا ۱/۰۰ میلی متر (چرا که پوسته نسبت به محور ثابت باید دو دور بزند تا یک میلی متر پیشروی یا پسروی داشته باشد). پس برای خواندن عدد از روی ریزسنج طبق مراحل زیر عمل کنید:

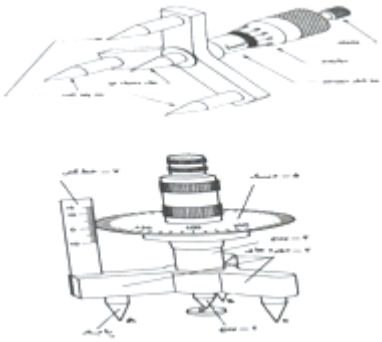
مرحله اول: به درجه بندی روی محور ثابت توجه کنید، یک خط افقی که یک سمت آن درجه بندی های یک میلی متری و سمت دیگر درجه بندی های نیم میلی متری مشخص شده، مشاهده می کنید. همان طور که می بینید بخشی از این درجه بندی زیر پوسته است و قابل رویت نیست. آخرین عدد میلی متری که روی محور ثابت قابل رویت است قرائت و ثبت کنید. حال باید دید که آیا خط نیم میلی متر بعد از این عدد، در سمت دیگر محور افقی

قابل رویت است یا خیر؟ اگر خط ۰/۵۰ میلی‌متر بعد از عدد را مشاهده می‌کنید این ۰/۵۰ میلی‌متر را به عدد قرائت شده اضافه کنید.

مرحله دوم: در امتداد خطی که روی محور ثابت قرار دارد عددی را که از روی پوسته مشاهده می‌کنید قرائت کرده و بر حسب صدم میلی متر به عدد مرحله قبل اضافه کنید.

اسفرومتر (گوی سنج)

اسفرومتر یا تقعرسنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری تقعر یا تحدب سطوح کروی (شعاع کره) و یا ضخامت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ابزار از یک استوانه ثابت، یک محور مرکزی متحرک و یک خط کش عمودی ثابت ساخته شده است. نحوه کار محور متحرک مانند ریزسنج است. محور متحرک روی محور اصلی که روی صفحه ثابت قرار دارد چرخیده و هرگام آن (یک دور کامل) برابر ۰/۵ میلی متر است. در این صورت کمترین مقدار قابل اندازه گیری ۰/۱۰ میلی متر خواهد بود. برای اندازه گیری ضخامت جسم مورد نظر را روی صفحه صاف و افقی قرار داده به طوری که استوانه ثابت گوی سنج نیز بر صفحه افقی مماس باشد. در این حالت انتهای محور متحرک را طوری تنظیم می کنیم که بر سطح جسم مورد نظر مماس شود؛ عددی که روی تقعرسنج خوانده می شود ضخامت جسم موردنظر را به دست می دهد. برای اندازه گیری تقعر یا تحدب استوانه ثابت گوی سنج را روی جسم کروی قرار می دهیم با چرخاندن محور متحرک انتهای آن را بر سطح مورد نظر محدود می کنیم. در این وضعیت گوی سنج فاصله پایین ترین یا بالاترین نقطه سطح کروی مورد نظر از مقطع استوانه را به ما نشان می دهد.



شکل (۱-۳): اسفرومتر

اسفرومتر از ۳ پایه ثابت که با هم یک مثلث متساوی الاضلاع را تشکیل می دهند و یک پایه متغیر ساخته شده است. به کمک فرمول زیر عدد گوی سنج را می خوانیم:

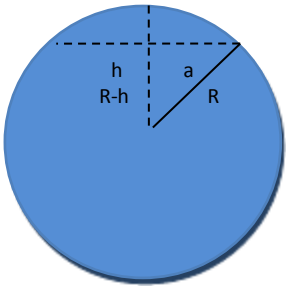
(عدد صفحه مدرج × دقت دستگاه) + (عدد خط کش) = عدد گوی سنج

معمولاً گام ریزسنج ۰/۵ میلی متر و صفحه مدرج به ۵۰۰ قسمت مساوی تقسیم شده و دقت آن ۰/۰۰۲ میلی متر است. برای این گوی سنج عدد خط کش که صفحه مدرج مقابل آن است و یا از آن گذشته، مقدار مورد نظر بر حسب میلی متر و عدد صفحه مدرج که مقابل خط کش قرار گرفته صدم میلی متر عدد مورد نظر است. این عدد را h می نامیم.

اینک شعاع دایره ای که سه پایه تشکیل داده اند را به دست می آوریم.

فاصله دو پایه ثابت را با کولیس به دست آورده و از رابطه زیر شعاع دایره را حساب می کنیم (چرا؟).

$$a = \frac{\text{فاصله دو پایه ثابت}}{\sqrt{3}}$$



شکل (۱-۴)

مطابق روابط زیر شعاع انحنا به دست می آید.

$$(R-h)^2 + a^2 = R^2 \rightarrow \text{شعاع انحنا } R = \frac{h^2+a^2}{2h} \qquad (۱-۳)$$

توجه داشته باشید که با اندازه گیری دو بار شعاع انحنا داخلی و خارجی یک عدسی نازک می توان با به دست آوردن R_1 و R_2 فاصله کانونی عدسی نازک را به دست آورد.

$$\text{همگرایی } C = \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \qquad (۱-۴)$$

که در رابطه بالا n ضریب شکست جسم مورد نظر مثلاً شیشه (n = ۰/۵۳) است.

ترازوی یک کفه ای

انواع مختلف ترازو برای اندازه گیری جرم استفاده می شوند. ترازوهای یک کفه ای مورد استفاده در آزمایشگاه از نوع سه اهرمی (سه نرده ای) یا چهار اهرمی می باشند که دارای دقت ها و ظرفیت های اندازه گیری متفاوت هستند.

این نوع ترازوها همان طور که اسمشان پیداست بر اساس قانون اهرم طراحی شده اند و دارای سه یا چهار نرده (اهرم) مدرج هستند که روی هر نرده یک وزنه متحرک تعبیه شده است.

شکل (۱-۵): ترازوی یک کفه ای

روش اندازه گیری با ترازو

پیش از اندازه گیری جرم با یک ترازو زمانی که کفه ترازو خالی، تمیز و خشک است، شاهین ترازو (شاخص انتهای نرده ها) باید در مقابل خط نشانه صفر ثابت شود، در غیر این صورت، ترازو خطا دارد و می بایست تنظیم شده و یا مقدار خطا تعیین گردد. پس قبل از اینکه جسم را برای توزین روی کفه ترازو قرار دهید، وزنه های لغزنده روی هر نرده را به ابتدای نرده، روی درجه صفر منتقل کنید. در صورتی که شاهین ترازو مقابل خط نشانه صفر ثابت نشد ترازو خطا دارد و باید میزان خطا تعیین گردد. پس با جابجا کردن کوچکترین وزنه لغزنده (کوچکترین لغزنده روی نرده ایست که ریزترین درجه بندی روی آن حک شده است)، شاهین را روی خط نشانه، ثابت کنید، حال عددی که ترازو نشان می دهد، ثبت کنید. این عدد همان خطای ترازو است. برای اندازه گیری جرم جسم، جسم را روی کفه ترازو قرار دهید و بار دیگر وزنه را به ابتدای نرده روی خط صفر منتقل کنید؛ شاهین ترازو بالاتر از خط نشانه صفر قرار دارد. وزنه های لغزنده را آن قدر جابجا کنید که شاهین ترازو مقابل خط نشانه ثابت شود (معمولاً جابجا کردن وزنه ها از وزنه بزرگتر آغاز می‌شود و به کوچکترین وزنه ختم می‌گردد) حال با جمع زدن عدد وزنه‌های لغزنده و کم کردن خطای ترازو جرم جسم مورد نظر را تعیین کنید.

مراحل انجام آزمایش

احتیاط: چون ریزسنج وسیله‌ای بسیار دقیق و حساس است باید مراقب بود که فشار دست در هنگام تماس میله ریزسنج با سطح جسمی (قطعه‌ای) که بعدی از ان در حال اندازه‌گیری است بیش از حد اعمال نشود. بدین خاطر قسمتی عاج دار در انتهای ریزسنج تعبیه شده است تا فشا ردست بیش از حد معین به قطعه ها وارد نشود. در صورت اعمال فشار بیشتر، قسمت عاج دار به صورت هرز چرخیده می شود و نیرویی را به قطعه وارد نمی نماید. در این

هنگام صدایی از وسیله به گوش می رسد که نشان دهنده چرخش بیش از حد می باشد. از این رو باید مواظب بود تا هنگام کار با ریزسنج حتماً انتهای عاج دار آن را برای چرخانیدن در دست گرفت.

خطای صفر: خط نشان صفر قسمت متحرک هر وسیله اندازه گیری در حالت عادی باید در مقابل خط صفر قسمت ثابت آن قرار گیرد. اگر این دو خط در مقابل هم نباشند، گفته می شود خطای صفر وجود دارد. دراکثر ابزارهای اندازه گیری، خطای صفر قابل رفع و تنظیم می باشد. در صورت رفع نشدن خطای صفر در ریزسنج یا کولیس، اگر خط نشان صفر قسمت متحرک ریزسنج یا کولیس از خط نشان صفر قسمت ثابت گذشته و مقابل درجاتی از آن قرار گرفته باشد، مقدار خطای صفر مثبت و در غیر این صورت این خطا منفی است. در آزمایشگاه باید مقدار خطای صفر را از مقدار خوانده شده کم کرد. همچنین باید مقدار خطای صفر هر وسیله اندازه گیری غیر قابل تنظیم را دانست و آن را در مقادیر خوانده شده دخالت داد و یا در بعضی از وسایل که امکان صفر آن وجود دارد، صفر وسیله را قبل از استفاده تنظیم نمود.

۱. اندازه گیری به کمک کولیس

عمق، قطر داخلی و قطر خارجی نمونه استوانه ای شکل را به وسیله کولیس سه بار اندازه گرفته و میانگین و خطای مطلق مقادیر خوانده شده را در جدول یادداشت کنید.

جدول(۱-۱)

نوع کمیت	بار اول	بار دوم	بار سوم	میانگین	خطای مطلق
قطر داخلی $d_1(cm)$					
قطر خارجی d_2 (cm)					
عمق یا ارتفاع h (cm)					

۲. اندازه گیری به وسیله ریزسنج

ضخامت ورقه‌هایی از کاغذ و فلز را با ریزسنج سه بار اندازه گرفته و مقدار خوانده شده را در جدول (۱-۲) یادداشت کنید. سعی کنید اندازه گیری از نقاط مختلف نمونه باشد.

جدول (۲-۱)

نوع کمیت	بار اول	بار دوم	بار سوم	میانگین	خطای وسیله
ضخامت ورقه کاغذی					
ضخامت ورقه فلزی					

۳. اندازه گیری به وسیله اسفرومتر (گوی سنج)

برای اندازه گیری با گوی سنج ابتدا باید صفر وسیله را پیدا کرد. با پیچ روی اسفرومتر پایه متحرک را بالا بیاورید سپس گوی سنج را روی یک سطح صاف شیشه ای قرار داده و پیچ را بچرخانید تا پایه متحرک به سطح شیشه برسد؛ به طوری که نوک پایه ها بر تصویرشان روی شیشه منطبق باشند. در این حالت باید صفر مدرج بر صفر خط کش منطبق باشد. اگر چنین نبود عددی را که در این حالت می خوانید یادداشت کرده، در اندازه گیری ها منظور کنید.

به منظور اندازه گیری شعاع احنا یک سطح خمیده مثل عدسی، گوی سنج را روی سطح قرار داده و پیچ را بچرخانید تا هر چهار پایه روی سطح قرار گیرد. عددی را که گوی سنج نشان می دهد یادداشت کرده با منظور کردن عددی که درهنگام پیدا کردن صفر به دست آورده بودید، مقدار اندازه گیری شده توسط دستگاه را به دست آورید.

فاصله دو پایه ثابت را توسط کولیس اندازه بگیرید و مقادیر را در جدول (۱-۳) یادداشت کنید. مقدار R شعاع انحنا عدسی و خطای آن را به دست آورید. فاصله کانونی عدسی مزبور چقدر است؟

جدول (۱-۳)

نوع کمیت	بار اول	بار دوم	بار سوم	میانگین	خطای وسیله	خطای مطلق
قطر داخلی $d_1(cm)$						
قطر خارجی d_2 (cm)						
عمق یا ارتفاع h (cm)						
a						
h						
R						

۴. اندازه گیری جرم

به کمک ترازو جرم اجسامی را که در اختیار دارید به دست آورید.

جدول (۱-۴)

نوع کمیت	بار اول	بار دوم	بار سوم	میانگین	خطا
جرم استوانه					

آزمایش ۲: اصطکاک

هدف آزمایش: تعیین ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی روی سطح افقی و شیبدار

مقدمه

مقاومت یک جسم در حرکت داخل یک سیال، چنانچه سیال آبگون باشد را ویسکوزیته و در صورتی که سیال گاز باشد مقاومت هوا می نامند. مقاومت یک جسم در آستانه حرکت و یا در حال حرکت روی سطح جسم دیگر را اصطکاک می نامند.

اصطکاک در مکانیک دو روی سکه است و نقشی دوگانه در طبیعت ایفا می‌کند و ضمن آنکه باعث اتلاف انرژی است، لازمه بقا نیز می‌باشد.

نیروی اصطکاک: اگر جسمی روی جسم دیگر بلغزد این دو جسم نیروی متقابلی به هم وارد می‌کنند که در برابر حرکت مقاومت می‌کند و جهت آن همواره مخالف حرکت می‌باشد. این نیرو متناسب با نیروی قائمی است که دو جسم به هم وارد می‌کنند، اگر نیروی قائم را با حرف N نشان دهیم می توانیم بنویسیم:

$$|\vec{F}_s| = \mu|\vec{N}| \qquad (۱-۲)$$

در رابطه بالا μ ضریب اصطکاک نام دارد. اگر جسم ساکن باشد ضریب اصطکاک را در حال سکون μ_s و اگر دارای حرکت باشد ضریب اصطکاک در حال حرکت μ_k می گویند. این ضرایب که بدون بعد هستند به جنس و وضعیت سطوح (نظیر میزان آلودگی بین دو سطح، پرداخت سطحی، فیلم ها یا لایه های نازک سطحی و ...) و تا حدی به شرایط محیط (نظیر دما، رطوبت و ...) بستگی دارد.

آزمایش های مختلف نتایج زیر را برای نیروهای اصطکاکی به دست داده اند.

نیروهای اصطکاکی به جنس سطوح در تماس با هم بستگی دارد.

نیروی اصطکاکی متناسب با نیروی عمودی تبادلی میان سطوح است.

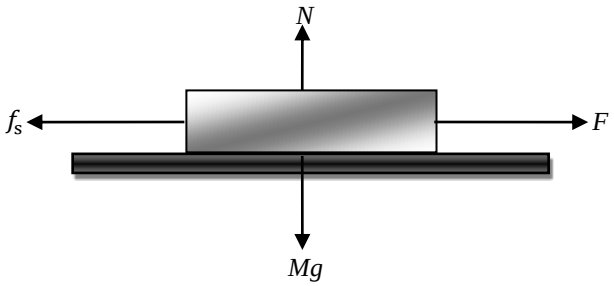
در سرعت های پایین نیروی اصطکاک جنبشی به سرعت نسبی سطوح بستگی ندارد.

در سطوح با مساحت‌های نه چندان کوچک نیروهای اصطکاک به مقدار مساحت سطوح در تماس با هم بستگی ندارد.

با توجه به رابطه (۲-۱) واضح است که نیروی اصطکاک مستقل از سطح ظاهری(ماکروسکوپی) تماس یا تندی نسبی دو سطح است.

هنگامی که دو سطح نسبت به یکدیگر ساکن یا در آستانه حرکت هستند، نیروهای جاذبه بین مولکولی و درگیری‌های بین دو جسم بیشتر از هنگامی است که نسبت به هم در حال حرکت‌اند. در حال سکون تعداد زیادی از نقطه های تماس به هم جوش سرد می خورند علاوه بر اینکه در حال سکون اینرسی سکون نیز وجود دارد. بنابراین نیروی اصطکاک ایستایی آستانه حرکت بیشتر از نیروی اصطکاک جنبشی و ضریب اصطکاک ایستایی نیز بزرگتر از ضریب اصطکاک جنبشی است.

اگر مطابق شکل (۲-۱) جسم در حال تعادل روی سطحی قرار گیرد و نیروی اصطکاک بین جسم و سطح f_s باشد چنانچه جسم تحت تأثیر نیروی کشش F قرار گیرد حالات زیر ممکن است رخ دهد:



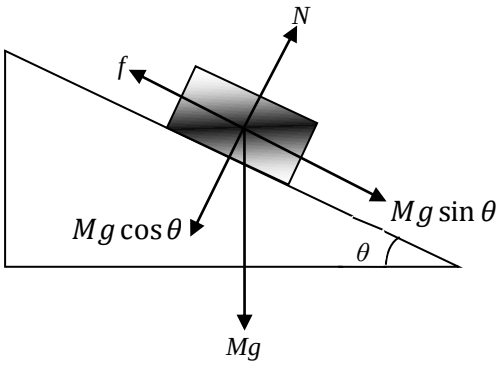
شکل (۲-۱)

اگر $F < f_s$ باشد در این صورت جسم هیچ گونه حرکتی ندارد.

اگر $F = f_s$ باشد در این صورت جسم از نیروی اصطکاک ازد می شود و یا در حال تعادل باقی می‌ماند و یا به حرکت مستقیم الخط یکنواخت ادامه می دهد.

اگر $F > f_s$ باشد جسم تحت شتاب $a = \frac{F-f_s}{m}$ شروع به حرکت می کند.

جسم روی سطح شیب دار



شکل (۲-۲)

در شکل (۲-۲)، وقتی جسم در آستانه حرکت است داریم:

$$Mg\sin\theta_s - f_s = 0 \rightarrow f_s = Mg\sin\theta_s \quad (۲-۲)$$

$$N - Mg\cos\theta_s = 0 \rightarrow N = Mg\cos\theta_s \quad (۳-۲)$$

از طرف دیگر طبق تعریف برای بیشینه f_s (آستانه لغزش) می توان نوشت، $f_s = \mu_s N$ (از این به بعد منظور از f_s همان بیشینه آن می‌باشد که در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌کنیم) با جایگزین کردن N از رابطه (۲-۳) خواهیم داشت:

$$f_s = \mu_s Mg\cos\theta_s \quad (۴-۲)$$

بنابراین با جایگزینی در رابطه (۲-۲) داریم:

$$\mu_s Mg\cos\theta_s = Mg\sin\theta_s$$

$$\mu_s = tan\,\theta_s \quad (۵-۲)$$

حال اگر جسم در اثر نیروی وزنش با سرعت ثابت روی سطح به پایین بلغزد، به طور مشابه برای ضریب اصطکاک لغزشی خواهیم داشت:

$$\mu_k = tan\,\theta_k \quad (۶-۲)$$

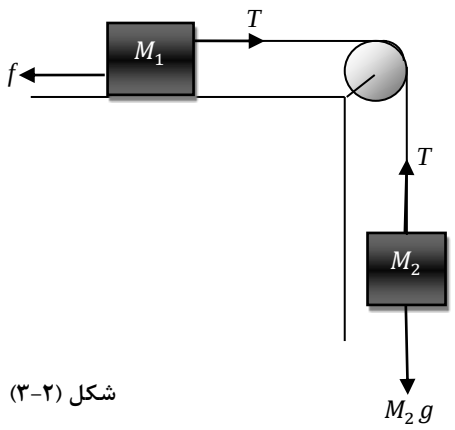
برای تعیین ضرایب اصطکاک میان سطح یک جسم و سطوح زیر آن روش های مختلفی وجود دارد که در ادامه به دو نوع از آن ها اشاره می کنیم.

قسمت (۲-الف): مطابق شکل (۲-۳) هرگاه جسم M_2 دارای مقداری باشد که دستگاه در حالت آستانه حرکت قرار گیرد به گونه ای که با افزایش بسیار کوچک جرم M_2، جسم M_1 شروع به حرکت کند، خواهیم داشت:

$$T = M_2 g$$

$$T = f_s = \mu_s N = \mu_s M_1 g$$

$$\rightarrow \mu_s = \frac{M_2}{M_1} \quad (۷-۳)$$

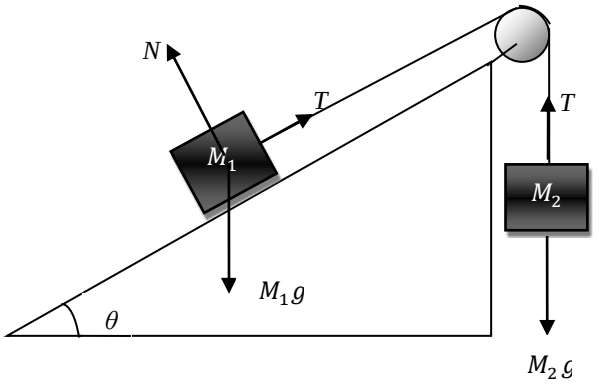


شکل (۲-۳)

هرگاه جسم M_1 روی سطح افق دارای حرکتی یکنواخت باشد معادلات بالا باز هم صادق اند. فقط به جای نیروی اصطکاک ایستایی باید نیروی اصطکاک جنبشی را بنویسیم. در این حالت نیز داریم:

$$\mu_k = \frac{M_2}{M_1} \qquad (۸-۲)$$

قسمت (۲- ب): در شکل (۲-۴) می توان جرم M_1 را به گونه ای انتخاب کرد تا دستگاه در آستانه حرکت قرار گیرد. در این حالت وزنه M_1 می تواند آماده حرکت به طرف بالا یا پایین باشد. اگر M در شرایط آستانه حرکت به طرف بالا باشد می توان معادلات زیر را برایش نوشت:



شکل (۲-۴)

$$N = M_1 g \cos\theta$$
$$T = f_s + M_1 g \sin\theta$$
$$T = M_2 g$$

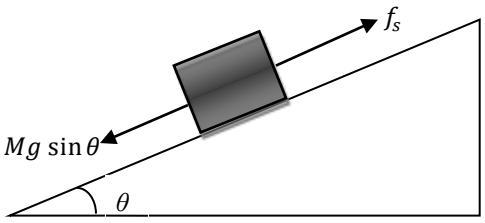
با جایگذاری در روابط بالا خواهیم داشت:

$$\mu_s = \frac{M_2 - M_1 \sin\theta}{M_1 \cos\theta} \qquad (۹-۲)$$

با داشتن جرم وزنه های M_1 و M_2 و زاویه سطح شیب دار μ_s قابل محاسبه خواهد بود. در حالتی که جرم M_1 با سرعت ثابت به طرف بالا حرکت می کند نیز برای μ_k داریم:

$$\mu_k = \frac{M_2 - M_1 \sin\theta}{M_1 \cos\theta} \qquad (۱۰-۲)$$

قسمت (۲-ج): مطابق شکل (۲-۵) هرگاه زاویه سطح شیب دار را آن قدر افزایش دهیم تا جسم M_1 در آستانه حرکت به طرف پایین قرار گیرد در این شرایط برای وزنه M_1 خواهیم داشت:



شکل (۲-۵)

$$M_1 g \sin\theta = f_s$$
$$\rightarrow \mu_s = tan\,\theta_s \qquad (۱۱-۲)$$

که θ_s زاویه سطح شیب دار در حالت آستانه حرکت M_1 است. هم چنین اگر جسم M_1 با سرعت ثابت به طرف پایین حرکت کند نیز به دست می آوریم:

$$\mu_k = tan\,\theta_k \qquad (۱۲-۲)$$

وسایل مورد نیاز: سطح شیب دار، زاویه شیب قابل تنظیم، جا وزنه ای، وزنه های کوچک و بزرگ، پره فلزی و پلاستیکی.

روش انجام آزمایش:

قسمت (۲-الف): سطح دستگاه شیب دار را مانند شکل (۲-۳) کاملاً تراز کنید و وزنه M_1 را روی سطح قرار داده و آن را توسط نخی به کفه نگهدارنده وزنه ها متصل کنید و نخ را از روی قرقره بگذرانید. با قرار دادن وزنه هایی در داخل کفه حالتی را به وجود آورید که M_1 از حالت سکون خارج شود. کافی است وزنه M_1 کمی از جایش تکان بخورد. با اندازه گیری جرم های M_1 و M_2 (که در آن، جرم وزنه های داخل کفه + جرم کفه = M_2)، μ_s را محاسبه کنید و از روی آن ها μ_s نهایی (μ_s میانگین) را بیابید. نمودار M_2 برحسب M_1 را در یک کاغذ میلیمتری رسم کرده و با محاسبه شیب نمودار μ_s را محاسبه کنید. مراحل فوق را برای سطح دیگر M (سطح پلاستیکی و سطح

آلومینیومی) تکرار نمایید. برای تعیین μ_k کافی است حالتی را به وجود آوریم که M_1 با سرعت ثابت روی سطح حرکت کند، بدین منظور با زدن ضربه های خفیفی روی سطح شیب دار می توان جسم M_1 را حرکت وا داشت. μ_k را از تغییر دادن جرم وزنه M_1 برای دو سطح پلاستیکی و آلومینیومی به دست آورید. همچنین منحنی M_2 برحسب M_1 را رسم کرده و از روی آن μ_k را بیابید.

قسمت (۲- ب): با توجه به شکل (۲-۴) سطح شیب دار را در زاویه ثابتی قرار دهید و وزنه های M_1 و M_2 را روی آن سوار کنید. شبیه قسمت (الف) با قرار دادن وزنه داخل کفه، جسم M_1 را یک بار در استانه حرکت و بار دیگر در حالت حرکت یکنواخت قرار دهید. مقادیر M_1 وM_2 را در جدول های مربوطه یادداشت کنید و با استفاده از روابط (۲-۹) و (۲-۱۰) ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k را برای سطوح پلاستیکی و آلومینیومی به دست آورید.

قسمت (۲-ج): مطابق شکل (۲-۵) جرم M_1 را روی سطح شیب دار قرار داده و زاویه سطح را آرام آرام افزایش دهید. وقتی جسم از حال سکون خارج شد مقدار زاویه را یادداشت کنید $\theta = \theta_s$ و از روی آن $\mu_s = tan\,\theta_s$ را محاسبه کنید. آزمایش را برای جرم های مختلف وزنه M_1 با سطوح با جنس های مختلف (پلاستیکی و آلومینیومی) تکرار نمایید. برای محاسبه μ_k با افزایش زاویه سطح شیب دار ضربات آرامی توسط دست به سطح شیب دار اعمال کنید. وقتی جسم M_1 با سرعت تقریباً ثابت حرکت کرد زاویه سطح شیب دار را یادداشت کنید $\theta = \theta_k$ و با استفاده از رابطه $\mu_k = tan\,\theta_k$ مقدار μ_k را بیابید.

جدول (۲-۱): تعیین ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k بین سطوح چوبی و آلومینیومی در سطح افق

سطح آلومینیومی					
M_1	M_2	μ_s	M_1	M_2	μ_k
		$\bar{\mu}_s =$			$\bar{\mu}_k =$

جدول (۲-۲): تعیین ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k بین سطوح چوبی و پلاستیکی در سطح افق

سطح پلاستیکی					
M_1	M_2	μ_s	M_1	M_2	μ_k
		$\bar{\mu}_s =$			$\bar{\mu}_k =$

جدول (۲-۳): تعیین ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k بین سطوح چوبی و آلومینیومی در سطح شیب دار

سطح آلومینیومی					
M_1	M_2	μ_s	M_1	M_2	μ_k
		$\bar{\mu}_s =$			$\bar{\mu}_k =$

جدول (۲-۴): تعیین ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k بین سطوح چوبی و پلاستیکی در سطح شیب دار

سطح پلاستیکی					
M_1	M_2	μ_s	M_1	M_2	μ_k
		$\bar{\mu}_s =$			$\bar{\mu}_k =$

جدول (۲-۵): تعیین ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k بین سطوح چوبی و پلاستیکی به روش تغییر زاویه سطح شیبدار

سطح آلومینیومی				
M_1	θ_s	θ_k	μ_s	μ_k
			$\bar{\mu}_s =$	$\bar{\mu}_k =$

جدول (۲-۵): تعیین ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k بین سطوح چوبی و پلاستیکی به روش تغییر زاویه سطح شیبدار

سطح پلاستیکی				
M_1	θ_s	θ_k	μ_s	μ_k
			$\bar{\mu}_s =$	$\bar{\mu}_k =$

سئوالات:

۱- اگر سطحی بیش از حد معینی صیقل داده شود مقاومت اصطکاک به جای کم شدن افزایش می یابد. آیا می توانید این موضوع را توضیح دهید؟

۲- ایا ضریب اصطکاک بزرگتر از ۱ وجود دارد؟ چطور؟

۳- نیروی اصطکاک به چه عواملی بستگی دارد؟

۴- آیا نیروی لازم برای آغاز حرکت و ادامه آن به طور یکنواخت یکسان است؟ چطور؟

آزمایش ۳: آونگ ساده

هدف: مطالعه حرکت نوسانی ساده و اندازه گیری دوره تناوب آونگ ساده و بررسی g

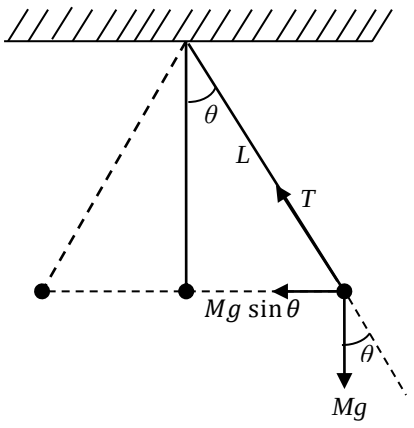
مقدمه

آونگ ساده عبارت است از نقطه ای مادی است که به انتهای نخ بی وزنی آویخته باشند و بتواند حول محور افقی در یک صفحه قائم نوسان کند در حالتی که بتوان از ابعاد گلوله در برابر نخ و همچنین از وزن نخ در برابر گلوله صرف نظر کرد، می توان ثابت کرد که در نوسانات کم دامنه زمان نوسان تابع دامنه نوسان نبوده بلکه تابع طول آونگ و شتاب ثقل می باشد هر گاه جرم نقطه ای را از وضعیت تعادل به اندازه زاویه θ منحرف کنیم و سپس رها کنیم، جرم نقطه ای تحت دو نیرو قرار می گیرد:

۱) نیروی وزن که جهت آن رو به پایین است و در هر لحظه عمود بر سطح افق می باشد.

۲) نیروی کشش نخ

نیرویی که موجب می شود تا نقطه ای مادی را به حال تعادل بر گرداند عبارت است: $F = -Mg\sin\theta$



شکل (۳-۱)

که همواره مماس بر راستای مسیر حرکت است علامت منفی بدان جهت است که نیروی برگشتی در خلاف جهت حرکت است. حال با توجه به رابطه بالا داریم:

$$F = ma \rightarrow m\frac{d^2x}{dt^2} - mg\sin\theta \qquad (۳-۱)$$

که اگر θ کوچکتر از $\frac{1}{10}$ رادیان ($\theta \leq ۶$) باشد می توان $\sin\theta \cong \theta$ در نظر گرفت و با توجه به انتخاب جهت روبه بالا می توان نوشت:

$$\theta \leq 6^\circ \implies sin\,\theta \cong \theta \rightarrow m\frac{d^2x}{dt^2} = -mg\,\theta \qquad (۲-۳)$$

$$\theta = \frac{x}{L} \rightarrow m\frac{d^2x}{dt^2} = -mg\frac{x}{L} \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{g}{L}x = ۰ \qquad (۳-۳)$$

که در آن L طول آونگ است.

در اینجا لازم به ذکر است که شتاب عمودی به علت کوچکی در مقابل شتاب مماسی غیرقابل توجه است و شتاب حرکت منحصر به شتاب مماسی است.

(جرم مانند وزنه ای متصل به فنر، یک حرکت هماهنگ ساده با دامنه کم انجام می دهد). در حرکت هماهنگ ساده بازه زمانی دو وضعیت یکسان و متوالی را دوره می نامیم. (زمان یک رفت و برگشت به وضعیت قبلی) و با T نشان داده می شود. با حل معادله دیفرانسیل فوق داریم:

$$x = x_{\circ}\cos(\omega t) \qquad (۴-۳)$$

$$\omega = \left(\frac{g}{L}\right)^{1/2} \qquad (۵-۳)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \qquad (۶-۳)$$

که در اینجا شتاب متناسب با جابه جایی θ یا x بوده و حرکت حرکت نوسانی ساده می باشد و دوره تناوب آن از رابطه زیر به دست می آید:

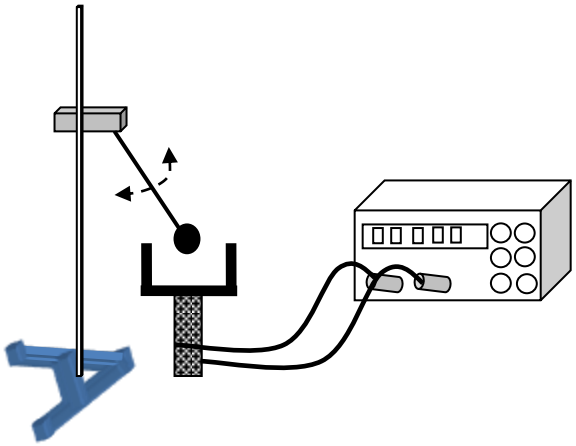
$$\frac{2\pi}{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{L}}} \rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} \qquad (۷-۳)$$

چنانچه ملاحظه می شود دوره تناوب حرکت نوسانی ساده، متناسب با طول آونگ است (در جایی که g ثابت باشد) و مستقل از جرم گلوله و دامنه انحراف است. برای دامنه های بزرگتر از ۶ درجه زمان تناوب از رابطه زیر حاصل می گردد:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left(1 + \frac{\theta^2}{16}\right) \qquad (۸-۳)$$

وسایل مورد نیاز: آونگ ساده، تایمر کنتور، سه پایه که صفحه آویزان دارد و آونگ از آن آویزان است.

شرح آزمایش:



شکل (۶-۲)

آونگ ساده را آماده کنید. برای این منظور تکیه گاه (میله ای فلزی که یک سر آن نیم تخت است) را در بالاترین نقطه پایه ثابت به کمک گیره نصب کنید. نخی به طول حدود ۸۰ سانتی متر را به حلقه آلومینیومی متصل کرده، انتهای دیگر نخ را به گلوله آونگ وصل کنید. طول نخ را طوری تنظیم کنید که فاصله محل آویز تا مرکز جرم گلوله آونگ ۶۰ سانتی متر باشد. دستگاه تایمر کنتور را با دکمه ON روشن کرده و با استفاده از دکمه $RESRT$ صفر می کنیم. دکمه SET را می زنیم تا قسمت $COUNT$ شروع به چشمک زدن کند. با استفاده از دو دکمه UP و $DOWN$ تعداد نوسانات را روی ۳۰ تنظیم می کنیم و دوباره دکمه SET را می زنیم تا تعداد نوسانات ثبت شود. آونگ را کمی (زاویه کمتر از ۶ درجه) از وضعیت تعادل منحرف کرده و رها می کنیم تا شروع به نوسان کند. بعد از چند ثانیه دکمه $START$ را می زنیم. زمان سنج تایمر کنتور که دقت آن ۰/۰۰۱ ثانیه است زمان این تعداد نوسان را برای ما مشخص می کند. حال با استفاده از رابطه $T = \frac{t}{n}$ زمان یک دوره تناوب را محاسبه می کنیم. طول آونگ را تغییر داده و آزمایش را ۵ بار دیگر تکرار کنید. با محاسبه زمان تناوب برای هر حالت مقدار g را بیابید و از روی آنها مقادیر شتاب گرانشی میانگین $\bar{g}$ را محاسبه کنید. مقادیر خطای مطلق و خطای نسبی را برای هر بار آزمایش بیابید.

جدول (۳-۱)

L (cm)	زمان ۳۰ نوسان	T	T^2	g	خطای مطلق	خطای نسبی
۲۰						
۳۰						
۴۰						
۵۰						
۶۰						
				$\bar{g}$ =		

سئوالات

۱- برای یک حرکت نوسانی ساده نشان دهید که زمان تناوب از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{-x}{a}}$ به دست می آید که در آن x بعد حرکت و a شتاب حرکت است. (توجیه علامت زیر رادیکال چیست؟)

۲- زمان نوسان یک آونگ درارتفاعات مختلف از سطح زمین تغییر می کند؟ چرا؟

۳- با قرار دادن یک آهنربا در زیر گلوله فلزی آونگ چه تغییری در دوره تناوب آونگ ایجاد می شود؟ چرا؟

۴- اگر آونگی را از سطح زمین به سیاره ای ببریم که در آن شتاب گرانشی ¼ شتاب گرانش زمین است، دوره تناوب آونگ چه تغییری می کند؟

آزمایش ۴: فنرها

هدف آزمایش: مطالعه حرکت نوسانی ساده و تحقیق قوانین مربوط به فنرها

تئوری آزمایش:

نوسانگرهای هماهنگ

سیستمی در حالت ترازمندی ایستادگی یا دینامیکی پایدار در نظر بگیریم. وقتی جا به جایی چنین سیستمی از وضع ترازمندی اش کوچک باشد حرکت، نوسانی آن حرکت «هماهنگ» نامیده می شود. این نوع حرکت ها در طبیعت زیاد رخ می دهند و هم از دیدگاه عملی و هم از دیدگاه نظری در فیزیک و مهندسی مورد بررسی قرار می گیرند چند نمونه از این نوع حرکت عبارتند از فنرهای کشسان، تیرهای خمیده، آونگ، تارهای مرتعش، تشدید کاواک های هوا و حرکت بارها در بعضی مدارها و کاواک های الکتریکی ما می خواهیم حرکت یک نوسانگر هماهنگ خطی (حرکت حاصل از جابه جایی کوچک یک سیستم از وضع ترازمندیش) در یک بعد را بررسی کنیم. ورود غیر قابل احتراز اصطکاک در چنین حرکتی منجر به مطالعه یک نوسانگر هماهنگ میرا می شود برای حفظ حرکت نوسانی با حضور اصطکاک اعمال یک نیروی خارجی ضروری است. این نوع سیستم نوسانی نوسانگر واداشته یا هدایت شده نامیده می شود. وقتی جابه جایی سیستم از وضع ترازمندی بزرگ باشد، سیستم دیگر خطی نیست. این گونه سیستم های نوسانی غیر خطی نامیده می شوند.

باید خاطر نشان کرد که، به طور کلی نوساناتی که در طبیعت رخ می دهند، غیر خطی اند اما تقریب آن ها به سیستم های خطی به ما اجازه می دهد که از روش های تحلیلی قوی ای که به این منظور فراهم شده اند استفاده کنیم.

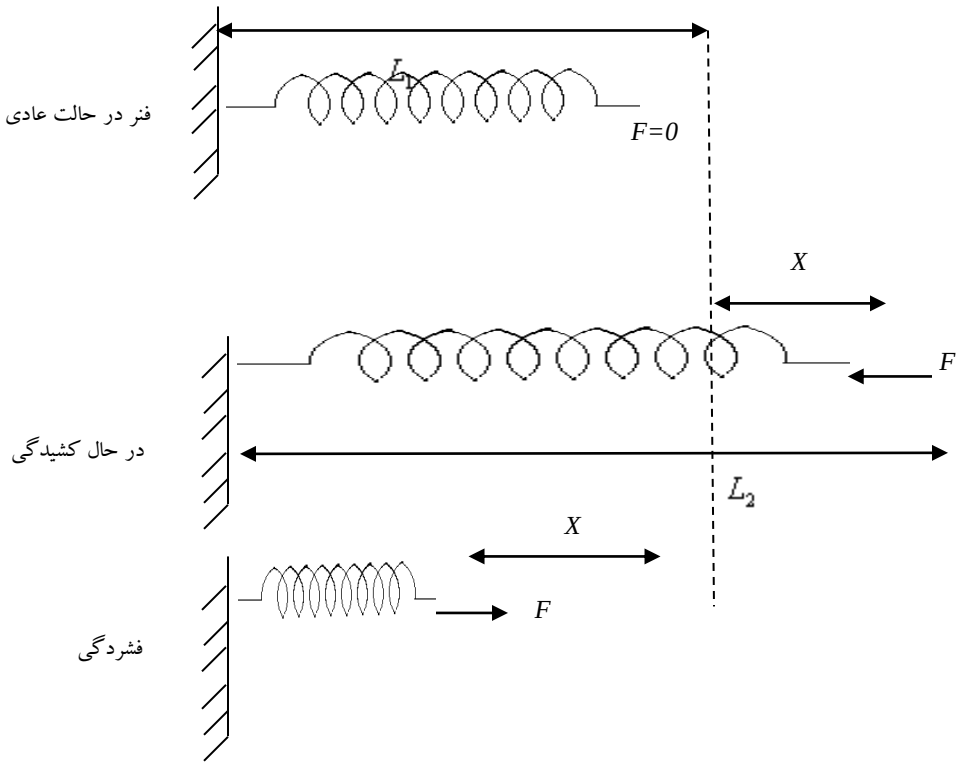
سیستم‌های فیزیکی که فنرها، آونگ‌ها، و تغییر شکل‌های کشسان را درگیر می‌کنند، با معادلات $V(x) = \frac{1}{2}Kx^2$ و $K = \left(\frac{d^2V}{dx^2}\right)_{x=0} = -\left(\frac{dF}{dx}\right)_{x=0}$ توصیف می‌شوند و گفته می‌شود که از قانون هوک پیروی می‌کنند. این تنها در صورتی است که جابه‌جایی‌ها کوچک باشند. به علاوه نتایج به دست آمده هنوز تقریبی‌اند.K ضریب ثابتی است که مقدار آن در دستگاه های مختلف متفاوت است. مثلاً برای فنر (ضریب سختی فنر) در میدان زمین، ضریب جاذبه زمین نامیده می شود.

نمونه یک نوسانگر هماهنگ خطی یا ساده که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است و آن عبارت است از یک جرم m که به انتهای فنری با ثابت نیروی k بسته شده است این سیستم فنر به جرم در امتداد محور x روی یک سیستم افقی بدون اصطکاک حرکت نوسانی یک بعدی انجام می‌دهد. سیستم از قانون هوک پیروی می کند و بنابراین یک سیستم خطی است با اندازه گیری جابه جایی x از وضع ترازمندی انرژی پتانسیل $v(x)$ عبارت است از:

$$V(x) = \frac{1}{2} kx^2$$

$$F(x) = -\frac{dv}{dx} = -kx$$

نیروی کشسانی فنر: اگر در فنر تغییر طولی به صورت کشیدگی یا فشردگی ایجاد کنیم فنر نیرویی ایجاد می کند که با تغییر طول ایجاد شده مخالفت می کند پس نیروی فنر همواره در جهتی است که آن را به حالت عادی اش بازگرداند.



شکل (۴-۱)

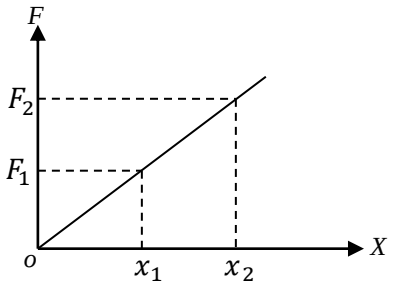
اندازه نیروی کشسانی فنر متناسب با تغییر طول آن است یعنی با افزایش تغییر طول نیروی فنر بیشتر می شود این نیرو از رابطه ی فوق که قانون "هوک" نامیده می شود به دست می آید:

ضریب ثابت فنر (k) به جنس فنر طول فنر و سطح مقطع بستگی دارد و یکای آن نیوتن بر متر می‌باشد.

نمودار نیروی فنر بر حسب تغییر طول فنر

طبق رابطه‌ی $F = kx$ این نمودار یک خط راست با شیب مثبت و بدون عرض از مبدأ است.

شیب این نمودار $\frac{F_1}{x_1} = \frac{F_2}{x_2} = k$ ضریب ثابت فنر است.



شکل (۴-۲)

درآزمایشگاه برای تعیین ثابت فنر می توان وزنه های مختلفی به آن آویخت و تغییر طول آن را به ازای نیروی وارد شده اندازه گرفت. هرگاه جرم M به فنری در حالت افقی متصل شود معادله حرکت جسم چنین خواهد بود:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = ۰ \rightarrow \frac{d^2x}{dx^2} + \omega^2 x = ۰ \qquad (۱-۴)$$

حل معادله فوق به صورت $x(t) = A\sin(\omega t)$ خواهد بود که در آن $\omega = \frac{k}{m}$ سرعت زاویه ای نوسانات است. برای محاسبه دوره تناوب نوسانات از تساوی $\omega = \frac{2\pi}{T}$ استفاده می کنیم:

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \qquad (۲-۴)$$

در روابط فوق فنر بدون جرم فرض شده است. اما در عمل فنر نیز دارای جرم است و از آنجا که این جرم درانتهای آن متمرکز نیست باید در روابط فوق جرم مؤثری را برای آن در نظر گرفت. جرم مؤثر (m_e) از حاصل ضرب جرم فنر (m_s) در ضریب نسبی جرمی فنر (f) به دست می آید.

جرم مؤثر فنر $= m_e =$ (ضریب نسبی جرمی فنر) × (جرم فنر) $= f.m_s$ (۳-۴)

بدین ترتیب برای محاسبه دوره تناوب فنری که خود داری جرم است در رابطه (۴-۲) باید جرم مؤثر آن را به جرم وزنه آویخته شده اضافه نماییم. لذا خواهیم داشت:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m + f\,m_s}{k}} \qquad (۴-۴)$$

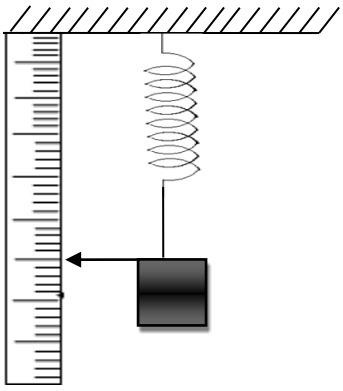
وسایل مورد نیاز: پایه نگهدارنده فنرها، خط کش، وزنه های مختلف، پایه برای سوار کردن وزنه ها

روش انجام آزمایش:

قسمت (۴-الف): فنری را از پایه نگهدارنده آویزان کنید. درکنار آن یک خط کش مدرج قرار دارد مکان انتهای فنر را از روی خط کش بخوانید، آن را x_0 بنامید؛ سپس کفه ۵۰ گرمی را به فنر متصل کنید. بعد از تعادل دوباره محل انتهای فنر را بخوانید و مقدار افزایش طول را اندازه گیری کنید $(\Delta x = x - x_0)$ وقتی وزنه در تعادل است نیروی وزن و نیروی بازگرداننده فنر با هم برابرند، داریم:

$$Mg = k\Delta x \rightarrow k = \frac{Mg}{\Delta x} \qquad (۵-۴)$$

از رابطه فوق ضریب سختی فنر به دست می آید. این کار را برای وزنه های ۱۰۰ و ۲۰۰ گرمی نیز انجام دهید و از نتایج آن ها ضریب سختی میانگین فنر را بیابید. مراحل فوق را برای ۲ فنر با ضرایب سختی مختلف انجام داده و با پر کردن جدول (۴-۱) ضریب سختی آن ها را حساب کنید.

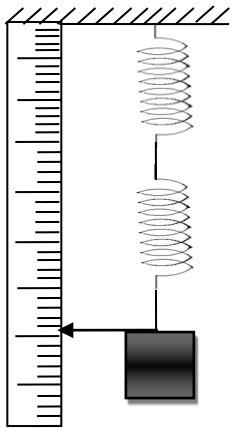


شکل (۴-۳)

قسمت (۴- ب):

به هم بستن فنرها: هرگاه دو فنر با ضرایب سختی k_1 و k_2 را به طور سری از نقطه ای آویزان کنیم مجموعه دو فنر معادل فنر جدیدی است که ضریب سختی کاملاً متفاوتی از هریک از دو فنر (به صورت جداگانه) دارد. به طوری که اگر نیروی F بر آن وارد شود افزایش طولی معادل Δx خواهد داشت. پس ضریب سختی آن از رابطه $k = \frac{F}{\Delta x}$ حاصل می گردد که ارتباط این ضریب سختی با ضریب سختی هریک از فنرها از رابطه زیر حاصل می گردد:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \qquad (۶-۴)$$

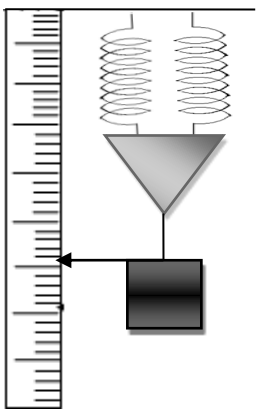


شکل (۴-۴)

برای تحقیق درستی رابطه ذکر شده دو فنر را به صورت متوالی به هم ببندید و شبیه قسمت (ب) ضریب سختی فنر نهایی را بیابید. مقدار به دست آمده را با مقدار محاسبه شده از رابطه نظری مقایسه کنید. (جدول ۴-۲)

قسمت (۴- ج): به هم بستن موازی فنرها: هرگاه میله ای را مطابق شکل (۴-۵) به انتهای دو فنر با ثابت k_1 و k_2 وصل کنید و نیروی F را طوری بر میله وارد کنید که هر دو فنر با اندازه Δx تغییر طول دهند (میله به صورت افقی تغییر مکان یابد) ضریب سختی آن از رابطه $k = \frac{F}{\Delta x}$ حاصل می گردد که رابطه اش با ضریب سختی هر کدام از فنرها طبق رابطه زیر حاصل می گردد:

$$k = k_1 + k_2 \qquad (۴-۷)$$



شکل (۴-۵)

دو فنر را به صورت موازی بسته و همانند قسمت (ب) ضریب سختی نهایی آن را بیابید. مقدار به دست آمده را با مقدار نظری مقایسه کنید (جدول ۴-۳).

جدول (۴-۱): تعیین ضریب سختی فنرها به روش افزایش طول آن ها

	فنر شماره (۱)		فنر شماره (۲)	
$M\ (gr)$	Δx	k	Δx	k
۱۰۰				
۱۵۰				
۲۵۰				
		$\bar{k}_1 =$		$\bar{k}_2 =$

جدول (۴-۲): تعیین ضریب سختی معادل در بستن فنرها به صورت سری

به هم بستن سری دو فنر			
$M\ (gr)$	Δx	k_e	
۱۰۰			
۱۵۰			
۲۵۰			رابطه نظری
		$\bar{k}_e =$	$k_e =$

جدول (۴-۳): تعیین ضریب سختی معادل در بستن فنرها به صورت موازی

به هم بستن موازی دو فنر			
$M\ (gr)$	Δx	k_e	
۱۰۰			
۱۵۰			
۲۵۰			رابطه نظری
		$\bar{k}_e =$	$k_e =$

سئوالات

۱- اگر وزنه آویخته به فنر را در مایعی فرو برده و قانون هوک را تحقیق نماییم آیا ضریب سختی فنر تغییر می کند؟ چرا؟

۲- چند عامل مؤثر بر ضریب سختی فنر K را بنویسید.

۳- روابط $k_e = k_1 + k_2 + \cdots$ و $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \cdots$ مربوط به فنرهای موازی و متوالی را اثبات کنید.