



محاسبه خطا در اندازه گیری

مفاهیم و تعاریف آزمایشگاهی:

۱- خطای مطلق و نسبی

چنانچه بخواهیم آزمایش را انجام دهیم دو حالت وجود دارد:

(الف) مقدار دقیق و واقعی کمیتی را که می‌خواهیم اندازه‌گیری کنیم داریم.

(ب) مقدار دقیق و واقعی کمیتی را که می‌خواهیم اندازه‌گیری کنیم نداریم.

در حالت (الف) اگر مقدار واقعی را به X نمایش دهیم و مقدار بدست آمده از آزمایش را به X' نمایش دهیم در این صورت خطای مطلق آزمایش بنا به تعریف خواهد بود:

$$X - X' = \pm \Delta X$$

مثلاً اندازه‌گیری شتاب ثقل در آزمایش سقوط آزاد اگر g منطقه برابر $9/79$ متر بر مجذور ثانیه باشد و g آزمایش برابر $9/87$ متر بر مجذور ثانیه بدست آید در این صورت خطای مطلق در اندازه‌گیری g خواهد بود:

$$\Delta g = 9.79 - 7.79 = 0.08$$

در حالت (ب) بدلیل آن که مقدار واقعی را نداریم چاره‌ای جز تکرار آزمایش نیست. مثلاً با توجه به اینکه ضریب اصطکاک به ضخامت فیلم یا لایه سطحی که بین دو سطح تشکیل می‌شود بستگی دارد و رطوبت هوا همچون یک فیلم با لایه سطحی روی جسم عمل می‌کند و در ساعات مختلف اجرای آزمایش نیز با توجه به تغییر درصد رطوبت هوا تفاوت می‌کند لذا چاره‌ای جز تکرار آزمایش و بدست آوردن چند ضریب اصطکاک مثلاً μ_{s2} نخواهیم داشت. پس از بدست آوردن چند جواب از روش میانگین‌گیری مقدار متوسط آن کمیت را بدست می‌آوریم در اینجا میانگین می‌شود.

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{s1} + \mu_{s2} + \mu_{s3} + \dots + \mu_{sN}}{N}$$

در این صورت این مقدار میانگین را به صورت مقدار واقعی کمیت مورد نظر در نظر می‌گیریم با این شرط مقادیر «انحراف از معیار» یعنی مقادیری که با سایر مقادیر بسیار فاصله دارند را از میانگین‌گیری حذف کنیم «البته با یک دید مثبت» زیرا که این مقادیر ما را از مقدار واقعی دور خواهند نمود. در این حالت مقدار میانگین را به عنوان مقدار واقعی تلقی کرده و به منظور بدست آوردن خطای مطلق مثلاً در اندازه‌گیری μ_{s2} به روش قسمت (الف) و به شکل زیر عمل می‌کنیم:

$$\bar{\mu} - \mu_{s2} = \pm \Delta \mu_{s2}$$

بنا به تعریف قدر مطلق خطای مطلق تقسیم بر مقدار واقعی را خطای نسبی می‌نامند.

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

۲- درصد خطا: بنا به تعریف خطای نسبی ضربدر ۱۰۰ را که آن را به صورت درصد نشان می‌دهند درصد خطا و یا درصد خطای

نسبی می‌نامند



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

در بدست 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) خطای قابل قبول است و چنانچه درصد خطا بیش از این مقدار باشد بایستی آزمایش را مجدداً تکرار کرد.

۳- حساب اشتباهات یا خطاها:

فرض کنیم کمیت قابل اندازه گیری X غیرمستقیمی از روی مقادیر دیگر c, b, a که آنها را مستقیماً اندازه گیری می کنیم بدست می آید. منظور از حساب اشتباه این است که از روی اشتباهات Δa و Δb و Δc که در اندازه گیری c, b, a رخ می دهد، اشتباه Δx که در نتیجه نهایی یعنی X حاصل می شود بدست می آوریم اینک چند حالت ساده اشتباه و نحوه محاسبه آنها را بیان می کنیم و سپس نتیجه گیری می نماییم:

(۳-۱) اشتباهات حاصل جمع و تفاضل:

اگر $X = a + b$ بوده و Δa و Δb حداکثر اشتباه در مقادیر a و b باشند و Δx حداکثر اشتباه باشد که در X رخ خواهد داد، حداکثر Δx را از رابطه ذیل می توان حساب نمود.

$$x + \Delta x = (a + \Delta a) + (b + \Delta b)$$

$$x - (x + \Delta x) = a + b - (a + \Delta a) - (b + \Delta b)$$

$$\Delta x = \Delta a + \Delta b$$

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a + b} \quad \text{و اشتباه نسبی به طوریکه قبلاً گفته شده چنین است:}$$

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a + \Delta b}{a - b} \quad \text{اشتباه تفاضل دو مقدار از رابطه مقابل حساب می شود:}$$

(۳-۲) اشتباه حاصل ضرب:

اگر $x = a \cdot b$ و Δa و Δb و اشتباهات مطلق در a و b باشند خواهیم داشت:

$$x + \Delta x = (a + \Delta a) \cdot (b + \Delta b)$$

$$\Delta x = (a + \Delta a) \cdot (b + \Delta b) - a \cdot b$$

$$\Delta x = a\Delta b + b\Delta a + \Delta a\Delta b$$

چون جمله $\Delta a\Delta b$ از دو جمله اولی و دومی کوچکتر است بنابراین آن:

$$\Delta x = a\Delta b + b\Delta a$$

پس اشتباه نسبی را در این حالت چنین حساب می کنیم:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{a\Delta b + b\Delta a}{a \cdot b} \Rightarrow \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

و یا به صورت کل اگر n مقدار a و b و c و... داشته باشیم:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta b}{b} + \dots$$

به همین ترتیب اگر $x = a^n$ باشد. در این صورت اشتباه نسبی از رابطه زیر حساب می شود:

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



(۳-۳) اشتباه خارج قسمت:

اگر $x = \frac{a}{b}$ باشد و در مقادیر a و b اشتباه Δa و Δb موجود باشد خواهیم داشت:

$$x + \Delta x = \frac{(a + \Delta a)}{(b + \Delta b)} \Rightarrow \Delta x = \frac{(a + \Delta a)}{(b + \Delta b)} - \frac{a}{b} \Rightarrow \Delta x = \frac{b\Delta a - a\Delta b}{b^2 + b\Delta b}$$

چون جمله $b\Delta b$ در برابر b^2 کوچک است پس از آن صرفنظر می‌کنیم لذا:

$$\Delta x = \frac{b\Delta a - a\Delta b}{b^2}$$

اشتباه نسبی در اشتباه خارج قسمت عبارت است از:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{b\Delta a - a\Delta b}{b} / \frac{a}{b}$$

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

چون علامت Δa و Δb معلوم نیست، پس باید Δa و Δb با هم جمع شوند یعنی:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

دستور کلی: اگر بین مقدار مورد اندازه‌گیری x و مقادیر a و b و c ... که مستقیماً از آزمایش بدست می‌آید رابطه $X=f(a,b,c\dots)$ دیفرانسیل گرفته و به جای دیفرانسیل‌ها da, db, dc اشتباهات ماکزیمم Δa و Δb و Δc ... را قرار داد و در نتیجه اشتباه مطلق Δx برابر است با

$$\Delta x = f_a \times \Delta a + f_b \times \Delta b + f_c \times \Delta c + \dots$$

که مقادیر f_a, f_b, f_c و ... در رابطه مشتق‌های جزییی تابع $f(a, b, c, \dots)$ نسبت به متغیرهای a, b, c ... می‌باشد.

۴- حساسیت:

حساسیت به آزمایشگر بر می‌گردد و بنا به تعریف عبارتست از عکس خطای نسبی کل 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.

۵- دقت:

دقت به اندازه‌گیری بر می‌گردد و بنا به تعریف عبارتست از حداقل مقداری که می‌توان به کمک یک دستگاه اندازه‌گیری کرد مثلاً کولیس با دقت 0.001 متر با زمان سنج یا دقت 0.1 ثانیه یا ترازوی با دقت 0.01 کیلوگرم. ابزار اندازه‌گیری با ارزش‌تر است که دقت آن ابزار بر رویش ثبت شده باشد. در ابزار اندازه‌گیری که دقت آن مشخص نباشد کافی است که از رابطه زیر به منظور تعیین دقت آن ابزار استفاده کنیم:

تعداد فواصل مساوی بین آن دو عدد / تفاضل اندازه‌گیری دستگاه روی دو عدد متوالی = دقت اندازه‌گیری

نکته: در محاسبه درصد خطا بدلیل آن که از نظر فیزیکی خطای صفر درصد معنی ندارد در صورتیکه در جواب نهایی بدست آمده توسط آزمایشگر خطا صفر درصد باشد در این صورت ابزار اندازه‌گیری به عنوان درصد خطا در نظر گرفته می‌شود.



۶- دستگاه‌های اندازه‌گیری:

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

۱- سیستم اندازه‌گیری بین‌المللی SI یا $M.K.S$ (متر، کیلوگرم، ثانیه) که بسیار تلاش می‌شود کلیه کشورهای جهان از آن پیروی کنند.

۲- سیستم اندازه‌گیری $c.g.s$ (سانتی‌متر، گرم، ثانیه) که زیر مجموعه‌ای است از سیستم SI

۳- سیستم اندازه‌گیری $f.Lbs$ (فوت (۰/۳۳ متر)، پوند (۰/۴۵۸ کیلوگرم)، ثانیه) که در حال کنار گذاشتن در جهان است.

۷- انواع کمیت‌ها:

در فیزیک کمیت‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

اصلی: کمیت‌هایی که مبنای تعریف سایر کمیت‌ها هستند و خود به طور مستقل بیان می‌شوند. نظیر طول، جرم، زمان.
فرعی: کمیت‌های که وابسته، به کمیت‌های اصلی هستند و از ترکیب کمیت‌های اصلی بدست می‌آیند نظیر نیرو، جرم حجمی، شتاب و...

کمیت‌های اصلی و فرعی و یکای آنها در فهرست انتهاب کتاب آمده است.

۸- ارقام با معنی:

به ارقامی گفته می‌شود که در حد دقت ابزار اندازه‌گیری هستند.

مثال: در اندازه‌گیری زمان وقوع یک رویداد به وسیله زمان سنجی با دقت 0.02 ثانیه مقادیر زیر بدست آمده‌اند:

الف: $(S) 35/284$ ب: $(S) 35/27$ ج: $(S) 35$ د: $(S) 35/2$

کدام گزینه صحیح است؟

پاسخ: با توجه به تعریف ارقام با معنی چون دقت ابزار اندازه‌گیری تا صدم ثانیه است پس گزینه (د) (ج) که به ترتیب اولی تا یک رقم اعشار دارد و دومی عدد اعشاری ندارد صحیح نمی‌باشند گزینه (ب) نیز صحیح نمی‌باشد زیرا رقم ۷ عدد فردی است در حالیکه زمان سنج قادر به قرائت ضرب‌های زوج می‌باشد. گزینه (الف) نیز صحیح نمی‌باشد زیرا رقم ۴ یک رقم بی‌معنی با توجه به دقت ابزار اندازه‌گیری (تا صدم ثانیه) است. بنابراین هیچ یک از ۴ گزینه صحیح نیست توجه داشته باشید که اگر گزینه (د) بخواهد صحیح باشد باید بنویسیم $(S) 35/20$ رقم صفر آخر که جزء ارقام با معنی در اینجا به حساب می‌آید بدین معنی است که آزمایشگر قادر بوده تا صدم اعشار را قرائت کند مقدار قرائت شده برابر (صفر) بوده است.

چگونگی کار با ارقام با معنی بر حسب دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری:

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 در حین آزمایش با چند دستگاه اندازه‌گیری سروکار داشته باشیم مقدار رقم با معنی که باید در نظر گرفته شود معمولاً در حد بالاترین دقت اندازه‌گیری در میان دستگاه‌ها باید باشد.

مثال: در اندازه‌گیری از خط‌کشی با دقت 0.001 مترو و ترازوی با دقت 0.01 کیلوگرم و زمان‌سنجی با دقت 0.1 ثانیه استفاده شده است در محاسبات عددی تا چند رقم بعد از اعشار یا به عبارتی تا چند رقم با معنی را مجاز به در نظر گرفتن هستیم.

پاسخ: با در نظر گرفتن بالاترین دقت مربوط به خط‌کشی 0.001 متر بنابراین تا چهار رقم بعد از اعشار یعنی تا ۴ رقم با معنی را مجاز به در نظر گرفتن هستیم. توجه داشته باشید که در کلیه محاسبات ریاضی مثال فوق مثال مجاز به انجام اعمال ریاضی نظیر



جمع ضرب و... برای اعداد تا چهاررقم با معنی می‌باشیم بنابراین چنانچه در محاسبه‌ای ریاضی در مثال فوق جواب به صورت $0/78692915$ درآمد چاره چیست؟
در پاسخ به سوال فوق باید از روش گرد کردن ارقام استفاده کنیم.

۹- گرد کردن ارقام (رسانیدن به حد ارقام با معنی):

مانند مثال قبل اگر جواب ناشی از آزمایش $0/78692915$ بود و دقت ابزار اندازه‌گیری مستلزم داشتن ۴ رقم با معنی بعد از اعشار بود باید از روش گرد کردن استفاده کنیم بدین ترتیب که:

۱- رقم‌های $0/78692915$ بی‌اثر حذف می‌شوند.

۲- رقم‌های $0/78692915$ ضمن حذف شدن یکی به رقم سمت چپ خود می‌افزایند

لازم به تذکر است که عمل ریاضی گرد کردن از راست به چپ انجام می‌شود، برای مثال فوق خواهیم داشت:

$0/78692915$

جواب نهایی: $0/78693$

فرض کنید دقیق‌ترین ابزار اندازه‌گیری، تا رقم ۴ با معنی بعد از اعشار را نمایش می‌داد و ضمناً مضرب زوج را نمایش می‌داد مثلاً دقتی در حد $0/003$ داشت در این صورت اگر جواب نهایی به صورت $0/7869$ درآمد می‌توان آن را به یکی از نزدیکترین همسایگان زوج خود گرد کرد و هر دو جواب $0/7864$ و $0/7862$ قابل قبول خواهد بود برای مضارب فرد نیز به همین ترتیب عمل خواهد شد.

در اینجا لازم است که به این پرسش پاسخ داده شود که ضرورت ابزارهای اندازه‌گیری با دقت بیشتر و آزمایش‌های دقیق‌تر و در نتیجه جواب‌های 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 می‌گردد. به گونه‌ای که صد سال پیش گذشت زمان بر حسب شبانه‌روز و ساعت برای بشر اهمیت داشت امروزه اندازه‌گیری زمان صدم ثانیه به منظور وقوع یک رویداد امری طبیعی و بلکه پیش‌پا افتاده است. توجه داشته باشید که امروزه ارزش جواب‌های آزمایشگاهی بدست آمده مستقیماً به دقت بیشتر ابزار اندازه‌گیری مربوط می‌گردد. لذا در اجرای آزمایش‌ها به هیچ وجه حق اضافه نمودن یا کاستن مقادیر عددی به نتیجه بدست آمده نداریم.

۱۰- نمادگذاری

توجه داشته باشید که از دیگر تفاوت‌های ریاضی آزمایشگاهی با ریاضی معمولی آن است که در نوشتن مقادیر عددی در آزمایشگاه حتماً باید نماد (دیمناسیون - 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 جدول زیر نمادهای متعارف مربوط به برخی از کمیت‌های فیزیکی آمده است.



بعضی از کمیت‌های فیزیکی و واحدهای آنها

رابطه تبدیل دو دستگاه	واحد cgs	واحد SI	ابعاد	نماد	کمیت
$1 m = 10^2 cm$	Cm (سانتی‌متر)	M (متر)	L	L, l	طول
$1 kg = 10^3 g$	g	Kg	M	M, m	جرم
---	S	S	T	T, t	زمان
$1 m^2 = 10^4 cm^2$	Cm^2	M^2	L^2	S	مسافت
$1 m^3 = 10^6 cm^3$	Cm^3	M^3	L^3	V	حجم
$1 m/s = 10^2 cm/s$	$cm-s$	m/s	LT^{-1}	V, v	سرعت
$1 m/s^2 = 10^2 cm/s^2$	$cm-s^2$	m/s^2	LT^{-2}	a	شتاب
----	Rad	Rad (رادیان)	--	θ	زاویه چرخش
----	$Rad-s$	Rad/s	T^{-1}	ω	سرعت زاویه‌ای
---	$Rad-s^2$	Rad/s^2	T^{-2}	α	شتاب زاویه‌ای
----	Hz	Hz	T^{-1}	f	بسامد زاویه‌ای
$1 N = 10^5 dyne$	$Dyne$	N	MLT^{-2}	F	نیرو
$1 kgm/s = 10^3 gcm/s$	$Gcm-s$	Kgm/s	MLT^{-1}	P	اندازه حرکت خطی
$1 N.s = 10^5 dyn.s$	$Dyn.s$	$N.S$	MLT^{-1}	I	ضربه نیرو
$1 kg/m^3 = 10^{-3} g/cm^3$	g/cm^3	Kg/m^3	ML^{-3}	ρ	جرم حجمی
$1 N/kg^2 = 10^{-2} g/cm^2$	Dyn/g^2	N/kg^2	LT^{-2}	g	شدت میدان گرانش
$1 n/m = 10^7 dyn/cm$	Dyn/cm	N/m	MT^{-2}	K	ثابت نیروی فنر
$1 n/m = 10^7 dyn/cm$	Dyn/cm	N/m	$ML^2 T^{-2}$	τ	گشتارو نیرو
$1 kgm^2 = 10^7 gcm^2$	Gcm^2	Kgm^2	ML^2	I	گشتاور ماند
$1 kgm^2 = 10^7 gcm^2/s$	$Gcm^{2/s}$	Kgm^2/s	$ML^2 T^{-1}$	L	اندازه حرکت زاویه‌ای
$1 J = 10^7 erg$	Erg	J	$ML^2 T^{-2}$	W, E, Q	کار یا انرژی یا گرما
$1 W = 10^7 erg/s$	Erg/s	وات W	$ML^2 T^{-3}$	P	توان
$1 Pa = 10 dyn/cm^2$	Dyn/cm^2	Pa	$ML^{-1} T^{-2}$	P	فشار

۱۱- محاسبه کلی خطا (محاسبه خطا به روش لگاریتمی):

فرض کنید که شما نخستین فردی باشید که یک آزمایش عملی به منظور تحقیق صحت یک رابطه فیزیکی با شیمی یا زیست یا... را انجام دهید یا فرض کنید که بدلیل کمبود وقت و امکانات مالی فقط فرصت اجرای این آزمایش را داشته باشید. اینکه این سوال مطرح می‌شود که چگونه دریا بایم جوابی که بدست آورده‌ایم صحیح است (با یک آزمایش) و یا نسبت به جواب واقعی چقدر خطا داشته‌ایم. در چنین شرایطی از محاسبه خطا به روش لگاریتمی استفاده می‌کنیم. به عنوان مثال فرض کنید که این امکان برای شما بوجود آمده تا شتاب ثقل در سیاره‌ای را مشخص نمائید. بدین منظور فرض کنید که از یک ابزار اندازه‌گیری طول (متر فلزی با دقت ۰/۰۰۱ متر) و از یک زمان‌سنج (کرونومتر با دقت ۰/۰۱ ثانیه) استفاده می‌کنید و تنها فرصت دارید یک بار کمیت‌های مورد نظر را اندازه گرفته و ثبت کنید فرض کنید که در این راه از فرمول فیزیکی سقوط آزاد $y = \frac{1}{2} gt^2$ استفاده می‌کنید چنانچه پس



از آزمایش نتایج زیر بدست آورده باشید ($y=10\text{ m}$, $t=2/24\text{ s}$) اینک می‌خواهیم از روش لگاریتمی دریابیم که مقدار خطای شما در بدست آوردن g در آن سیاره چقدر بوده است. به این منظور ابتدا رابطه تئوری مورد نظر را نوشته: $y = \frac{1}{2}gt^2$ رابطه را بر حسب کمیتی که می‌خواهیم مقدار خطای آن را محاسبه می‌کنیم مرتب می‌کنیم:

$$g = \frac{2y}{t^2}$$

از طرفین رابطه در مبنای طبیعی لگاریتم می‌گیریم:

$$\text{Ln}g = \text{Ln}2 + \text{Ln}y - 2\text{Ln}t$$

در بدست آوردن رابطه فوق از خواص عملگر لگاریتم که ضرب را به جمع و تقسیم را به تفریق و توان را به پشت لگاریتم منتقل می‌کند استفاده کرده‌ایم اینک از رابطه بالا دیفرانسیل جزئی یا مشتق جزئی می‌گیریم یعنی تغییرات هر یک از پارامترهای موجود در رابطه را نسبت به خودش در نظر می‌گیریم.

$$(\text{Ln}g = \text{Ln}2 + \text{Ln}y - 2\text{Ln}t) \Rightarrow \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta 2}{2} + \frac{\Delta y}{y} - 2 \frac{\Delta t}{t}$$

مقادیر ثابت را که نسبت به خودشان تغییراتشان برابر با صفر است حذف کرده و چون حداکثر خطا را می‌خواهیم محاسبه کنیم کلیه علامت‌های منفی را به مثبت تبدیل می‌کنیم.

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta y}{y} + 2 \frac{\Delta t}{t}$$

اینک توجه کنید که رابطه $\frac{\Delta g}{g}$ با توجه به تبدیل تمام علائم منفی به مثبت چیزی مشابه $\left| \frac{\Delta x}{x} \right|$ یعنی خطای نسبی شد.

اینک در سمت راست معادله بدست آمده اخیر به جای Δ ها با دقت اندازه‌گیری و بجای مخرج کسرها مقادیر بدست آمده از آزمایش را قرار می‌دهیم. بنابراین:

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{0/001}{10} + 2 \frac{0/01}{2/24} = 0/0001 + 0/008 = 0/0081$$

$$\left| \frac{\Delta g}{g} \right| \times 100 = \%0/81 \quad \text{و از آنجا:}$$

یعنی با توجه به دقت اندازه‌گیری در آزمایش فوق درصد خطای نسبی در محاسبه برابر با $0/81\%$ بوده است لذا با یک نسبت گیری ساده:

$$100 \cdot 0/81 \Rightarrow x = \frac{8/1}{100} = \%0/081$$

$$10 \cdot x$$

درمی‌یابیم که مقدار g واقعی در آزمایش مورد نظر با توجه به یک بار اجرای آزمایش برابر بوده است با:

$$g = 10 - 0/081 = 9/919 \frac{m}{s^2}$$

به این ترتیب با مثالی که در بالا آورده شد می‌توان به منظور تحقیق نتایج ناشی از یک رابطه فیزیکی یا شیمی یا زیست از روش محاسبه خطا به روش لگاریتمی استفاده نمود.

آزمایش شماره ۱

اندازه گیری طول، جرم و تقعر

چرا اندازه گیری می کنیم؟

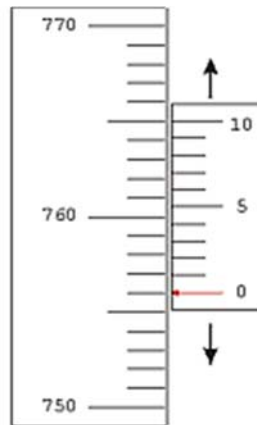
قوانین و نظریات فیزیک بصورت معادلات ریاضی بیان می شوند. حال ما از کجا بدانیم که هر معادله خاص، رفتار چیزی را بیان می کند؟ باید این قاعده امتحان شود و به مرحله آزمون گذاشته شود. بنابراین، اندازه گیری مهارتی است که میان نظریه علمی و دنیای واقعی رابطه ایجاد می کند. این رابطه دو طرفه می باشد. هر رویداد اندازه گیری شده ای که قبلاً پیشگویی نشده باشد، باید نظریه جدید آنرا توجیه کند.

اشخاصی که کار تجربی انجام می دهند باید اطلاعات فنی جامعی از اصول اندازه گیری داشته باشند. نحوه اندازه گیری و محدودیت های ناشی از وسایل اندازه گیری را بشناسند. هر دانشمندی فقط با دانستن اینکه چه اندازه گیری هایی انجام شده است و نحوه اندازه گیریها چگونه بوده است، می تواند اثر و کشفیات دانشمندان دیگر را خوب بفهمد. بنابراین، اندازه گیری هنری است که در حال حاضر تکنولوژی پیشرفته حامی آن است.

هدف آزمایش

آشنایی با اصول درجه بندی ورنیه و چگونگی بکارگیری کولیس و ریزسنج، اندازه گیری کمیت طول با این ابزارها، اندازه گیری تقعر و اندازه گیری جرم با ترازو.

ورنیه



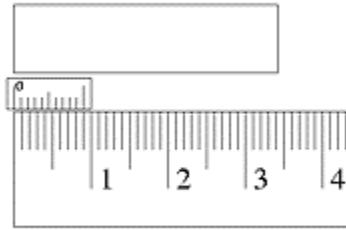
ورنیه به ما در خواندن دقیق تر تا کسری از درجه بندی ریز ابزار اندازه گیری کمک می کند. اصول این درجه بندی در سال 1631 توسط شخصی به نام ورنیه ابداع شد. درجه بندی ورنیه یک درجه بندی کمکی است که می تواند در مقابل مقیاس اصلی و ثابت وسیله اندازه گیری جابجا شود. درجه بندی ورنیه از نقطه نظر طول با درجه بندی خط کش اصلی و ثابت متفاوت است بدین ترتیب که طول n عددی صحیح است که دقت دستگاه را تعیین می کند. کوچکترین مقداری که توسط درجه بندی ورنیه خوانده می شود برابر است با تفاضل بین یک درجه خط کش ثابت و یک درجه ورنیه یعنی اگر طول یک درجه ورنیه را با X و طول یک درجه خط کش ثابت را با Y نمایش دهیم:



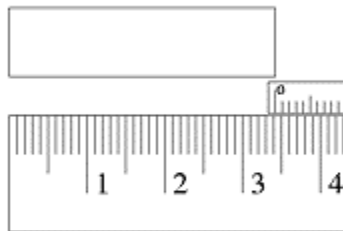
$$nX = (n-1)Y \rightarrow X = \frac{n-1}{n}Y$$

و کمترین مقدار قابل خواندن توسط ورنیه برابر است با:

$$Y - X = Y - \frac{n-1}{n}Y = \frac{1}{n}Y$$



برای مثال ورنیه شکل فوق دارای ۱۰ درجه است و طول آن با طول ۹ درجه خط کش ثابت برابر است لذا هر درجه ورنیه به اندازه $\frac{1}{10}$ درجه از درجه خط کش ثابت کوچک تر است. در این شکل وقتی صفر ورنیه بر روی صفر خط کش ثابت قرار داشته باشد، اولین شماره ورنیه از اولین شماره خط کش ثابت به اندازه $\frac{1}{10}$ عقب تر است و به همین ترتیب دومین شماره $\frac{2}{10}$ و آخرین شماره ورنیه نیز به اندازه $\frac{10}{10}$ یا یک درجه از شماره خط کش ثابت فاصله دارد. یعنی آخرین شماره ورنیه بر روی نهمین شماره خط کش ثابت واقع شده است. حال اگر ورنیه حرکت داده شود به نحوی که مثلاً ششمین درجه آن با ششمین درجه خط کش ثابت رو برو شود، میزان جابجایی آن برابر $6 \times \frac{1}{10}$ یا $\frac{6}{10}$ خواهد بود. اساس کار ورنیه به همین صورت می باشد.



برای مثال در شکل فوق صفر ورنیه به اندازه ۳۴ درجه خط کش ثابت و کسری از آن حرکت کرده است که با توجه به اینکه سومین درجه ورنیه بر سومین درجه خط کش ثابت منطبق شده، میزان جابجایی برابر خواهد بود با:

$$3.34 = 3.0 + 34$$

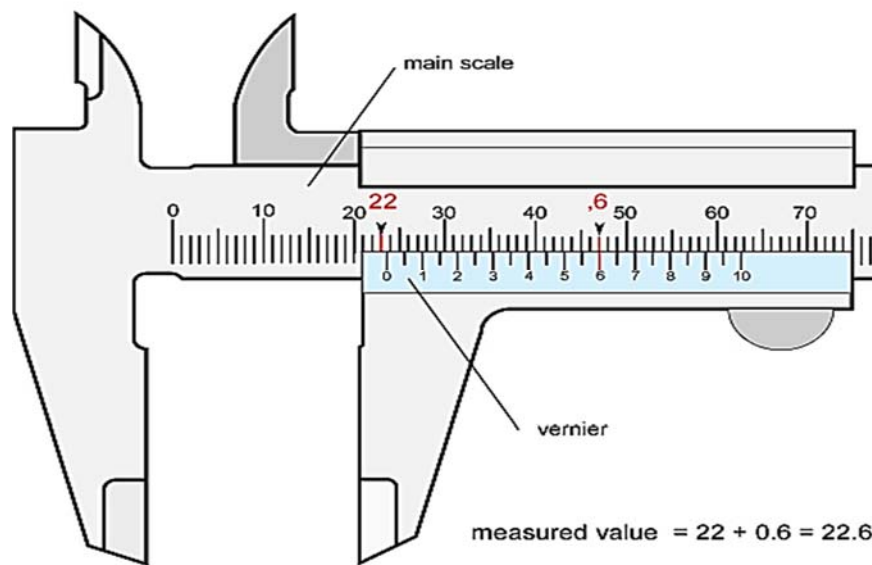
مقدار عدد n در اسبابهای اندازه گیری مختلف متفاوت است ولی اصول کلی ورنیه ها یکی است. برای استفاده از ورنیه باید ابتدا تعداد درجات خط کش ثابت را که قبل از صفر ورنیه قرار دارند قرائت نمود، سپس درجه ای از ورنیه که رو بروی یکی از درجات خط کش ثابت قرار گرفته را معین نموده و این عدد را در $\frac{1}{n}$ ضرب نموده و با عدد اول جمع نمود.

کولیس

قطر داخلی و خارجی یک لوله را نمی توان با دقت و به آسانی با یک خط کش مدرج اندازه گرفت. برای اندازه گیری دقیق تر آنها از کولیس استفاده می شود. کولیس از ترکیب یک خط کش مدرج و یک ورنیه متحرک درست شده است. خط کش ورنیه دارای دو

شاخک است شاخک‌های کوچک برای اندازه‌گیری قطر داخل و شاخک‌های بزرگ برای اندازه‌گیری قطر خارجی اجسام بکار می‌رود. خط کش برحسب میلی‌متر مدرج شده ورنیه دارای درجه بندی کوچکی است که اغلب شامل ۱۰ قسمت بوده و معادل ۹ میلی‌متر است یعنی ۹ میلی‌متر در روی خط کش کوچک‌تر است. با این نوع کولیس به آسانی می‌توانیم تا ۰,۱ میلی‌متر را اندازه بگیریم. دقت اندازه‌گیری کولیس از تقسیم کردن یک درجه خط کش به تعداد تقسیمات ورنیه به دست می‌آید. برخی از انواع کولیسها برای اندازه‌گیری عمق یک تیغه باریک دارند که به ورنیه متصل است و با آن حرکت می‌کند. اگر صفر ورنیه بر صفر خط کش منطبق باشد انتهای تیغه بر انتهای خط کش منطبق می‌گردد. در صنعت برای اندازه‌گیری قطر گلوله و سیلندر و پیستون و طول وسایل مختلف از انواع کولیس‌ها با بزرگی‌های مختلف استفاده می‌شود.

روش کار با کولیس



۱- اندازه‌گیری قطر یا طول

جسمی را که منظور تعیین طول یا قطر خارجی آن است در بین شاخک‌های ثابت و متحرک بزرگ قرار می‌دهند بطوری که هر دو شاخک با بدنه جسم تماس داشته باشند سپس به کمک ورنیه و خط کش اندازه طول یا قطر گلوله را تعیین می‌کنند. درجات را از روی خط کش (عددی که صفر ورنیه در مقابل آن قرار دارد و یا از آن گذشته است) و کسر درجات را از روی ورنیه می‌خوانند برای کسر درجات، درجه ای از درجات ورنیه را پیدا می‌کنند که درست در برابر یکی از درجات خط کش قرار گرفته است.

۲- اندازه‌گیری قطر داخلی

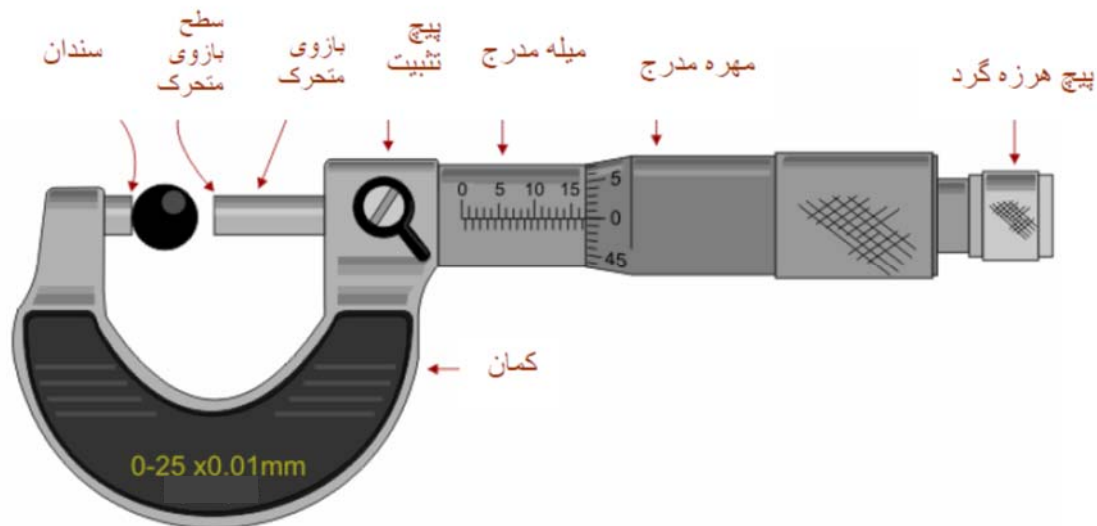
برای اندازه‌گیری قطر داخلی مثلاً قطر یک لوله دو شاخک بالایی را در داخل لوله فرو می‌برند و ورنیه را آنقدر جابجا می‌کنند تا دو شاخک با جدار داخلی لوله تماس پیدا کنند. کولیس را تا حدی در داخل لوله می‌چرخانند تا دو شاخک بر قطر لوله منطبق گردد. در این حالت قطر داخلی را با روش قبلی از روی خط کش و ورنیه می‌خوانند.



ضخامت ورقه‌های نازک و سیم‌های نازک را با اسبابی به نام ریز سنج اندازه می‌گیرند، این اسباب از ترکیب یک پیچ و یک مهره مدرج ساخته شده است. در این وسیله، مهره استوانه‌ای است تو خالی که سطح خارجی آن مدرج شده است. این استوانه به کمانی متصل است در انتهای دیگر کمان زائیده‌ای وجود دارد که به آن سندان می‌گویند.

پیچ در داخل کلاهکی قرار دارد و در داخل مهره حرکت می‌کند، کلاهک پیچ بر روی سطح خارجی مهره جابجا می‌شود. در صورتی که پای پیچ میلیمتر باشد دور کلاهک پیچ به پنجاه قسمت و اگر پای پیچ یک میلیمتر باشد دور کلاهک پیچ به صد قسمت تقسیم می‌شود به آن قسمت از پیچ که از داخل مهره خارج شده و در داخل کمان جابه جا می‌گردد زبانه می‌گویند.

اگر پیچ یک دور بپیچد در نوع اول زبانه ریزسنج نیم میلیمتر جابجا می‌شود بنابراین وقتی پیچ به اندازه یک درجه بپیچد دهانه ریزسنج به اندازه یک صدم میلیمتر باز یا بسته می‌شود. بنابراین با استفاده از ریزسنج دقت اندازه گیری تا میلیمتر بالا می‌رود.



روش کار با ریز سنج

برای اندازه گیری جسم مورد نظر را از بین زبانه و سندان قرار می‌دهند و پیچ کلاهک آنقدر می‌چرخانند تا جسم با زبانه و سندان تماس پیدا کند. برای چرخاندن کلاهک پیچ، پیچ هرزه گرد را می‌پیچانند پس از تماس با زبانه با جسم، پیچ هرزه گرد صدا می‌کند. با شنیدن صدا عمل پیچاندن را متوقف می‌کنند. در غیر این صورت از حساسیت اسباب کاسته می‌شود. درجات میلیمتر را از روی مهره و درجات صدم میلیمتر را از روی کلاهک پیچ می‌خوانند. درجه‌ای از کلاهک پیچ خوانده می‌شود که در امتداد خط افقی مهره قرار دارد. ریز سنج‌ها (میکرومترها) نیز مانند کولیس دو نوع می‌باشند که آنها را میکرومترهای اینچی و میکرومترهای میلیمتری می‌نامند. دقت میکرومترهای میلیمتری تا میلیمتر می‌باشند. دقت میکرومترهای اینچی تا اینچ می‌باشند. در حالت کلی دقت ریز سنج (میکرومتر) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{تعداد تقسیمات روی استوانه} / M \text{ گام پیچ} = \text{دقت ریز سنج}$$

اسفرومتر

اسفرومتر یا گوی سنج وسیله‌ای است که به کمک آن می‌توان شعاع انحناء سطوح کروی را محاسبه کرد. اسفرومتر، یکی از وسایل بسیار ضروری برای یک مؤسسه ی عینک سازی می باشد. این وسیله از دو قسمت ثابت و متحرک تشکیل شده است. قسمت ثابت شامل یک صفحه ی گرد افقی ثابت که روی این صفحه سه پایه ی ثابت قرار دارند. انتهای این سه پایه ، نوک تیز است. این پایه‌ها در روی رئوس یک مثلث متساوی الاضلاع قرار دارند. قسمت متحرک دستگاه نیز شامل یک پایه ی متحرک که پایه ی متحرک در محل برخورد میانه های مثلث قرار دارد و یک صفحه ی مدور مدرج متحرک که به صورت افقی نصب شده است. این وسیله نیز بر اساس خاصیت پیچ و مهره کار میکند. انتهای پیچ تنظیم اسفرومتر نیز تیز است.



روش اندازه گیری با اسفرومتر

با باز و بسته کردن پیچ تنظیم ، سه پایه نوک تیز و انتهای نوک تیز پیچ تنظیم را با سطح کروی مماس می‌کنیم. لازم به ذکر است که در این حالت سه پایه نوک تیز هم سطح با یکدیگرند. اما در سطوح کروی بر جسته نوک تیز پیچ بالاتر از پایه‌ها و در سطوح کروی فرو رفته ، نوک تیز پیچ پایین تر از پایه‌ها قرار می‌گیرد. a فاصله پایه‌های نوک تیز از انتهای نوک تیز پیچ تنظیم است و بزرگی آن برای یک گوی سنج همواره ثابت است. h عددی است که اسفرومتر نشان می‌دهد. h در اصل اختلاف ارتفاع بین نوک تیز پیچ تنظیم از نوک تیز هر یک از پایه‌های سه گانه گوی سنج است. h در حالت کلی از یک قسمت صحیح و اعشاری نظیر ۱۰,۴۲ تشکیل شده است. در این مثال ۱۰ صحیح است. این عدد برای سطوح برجسته (+) و برای سطوح فرورفته (-) است. عدد صحیح را خط کش نشان می‌دهد. ۰,۴۲ قسمت اعشاری است. قسمت اعشاری را از روی صفحه چرخان می‌خوانند. صفحه چرخان به صد قسمت تقسیم شده است. در نتیجه دقت اندازه گیری h در اسفرومتر ، یکصدم میلیمتر است. سپس به کمک رابطه زیر ، شعاع انحناء سطح کروی را محاسبه می‌کنند.

$$R = \frac{a^2 + h^2}{2h}$$

توجه داشته باشید که با اندازه گیری دوبر شعاع انحنای داخلی و خارجی یک عدسی نازک می توان با بدست آوردن R_1 و R_2 فاصله کانونی عدسی نازک را بدست آورد.

$$C = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

که در رابطه بالا n ضریب شکست جسم مورد نظر 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.



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 وزنه های لغزنده و کم کردن خطای ترازو جرم مورد نظر را تعیین کنید.

روش انجام آزمایش:

احتیاط: چون ریزسنگ وسیله های بسیار دقیق و حساس است باید مراقب بود که فشار دست در هنگام تماس میله ریزسنگ با سطح جسمی (قطعه های) که بعدی از آن در حال اندازه گیری است بیش از حد اعمال نشود. بدین خاطر قسمتی عاج دار در انتهای ریزسنگ تعبیه شده است تا فشار دست 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 ریزسنگ حتماً انتهای عاج دار آن را برای چرخاندن 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. در اکثر ابزارهای اندازه گیری، خطای صفر قابل رفع و تنظیم می باشد. در صورت رفع نشدن خطای صفر در ریزسنگ یا کولیس، اگر خط نشان صفر قسمت متحرک ریزسنگ 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.

نوع کمیت	اندازه گیری اول	اندازه گیری دوم	اندازه گیری سوم	میانگین	خطا
قطر داخلی (cm)					
قطر خارجی (cm)					
عمق یا ارتفاع (cm)					



۲. اندازه گیری به وسیله ریزسنج

ضخامت ورقه هایی از کاغذ و فلز را با ریزسنج سه بار اندازه گرفته و مقدار خوانده شده را در جدول یادداشت کنید. سعی کنید اندازه گیری از نقاط مختلف نمونه باشد.

خطا	میانگین	اندازه گیری سوم	اندازه گیری دوم	اندازه گیری اول	نوع کمیت
					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 در هنگام 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 یادداشت کنید. مقدار R - شعاع انحناعدسی و خطای آن را به دست آورید. فاصله کانونی عدسی مزبور چقدر است؟

خطا	میانگین	اندازه گیری سوم	اندازه گیری دوم	اندازه گیری اول	نوع کمیت
					قطر داخلی (cm)
					قطر خارجی (cm)
					عمق یا ارتفاع (cm)
					a
					h
					r

۴. اندازه گیری جرم

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

خطا	میانگین	اندازه گیری سوم	اندازه گیری دوم	اندازه گیری اول	نوع کمیت
					جرم جسم ۱
					جرم جسم ۲



آزمایش شماره ۲

اصطکاک

هدف آزمایش: تعیین ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی روی سطح افقی و شیبدار
وسایل مورد نیاز: سطح شیب دار، زاویه شیب قابل تنظیم، جا وزنه ای، وزنه های کوچک و بزرگ، پره فلزی و پلاستیکی

تئوری آزمایش:

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:

$$|\vec{F}_s| = \mu |\vec{N}|$$

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 اصطکاک به دست داده اند:

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

نیروی اصطکاک متناسب با نیروی عمودی تبادلی میان سطوح است.

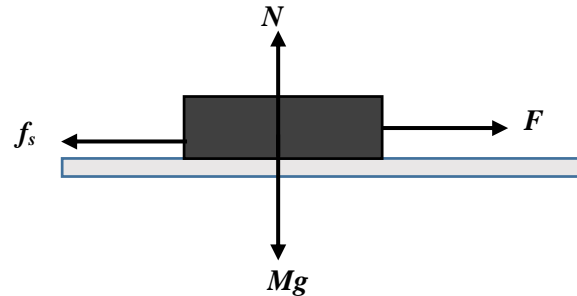
در سرعت های پایین نیروی اصطکاک جنبشی به سرعت نسبی سطوح بستگی ندارد.

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

با توجه به رابطه $|\vec{F}_s| = \mu |\vec{N}|$ 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 حرکتند. 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.

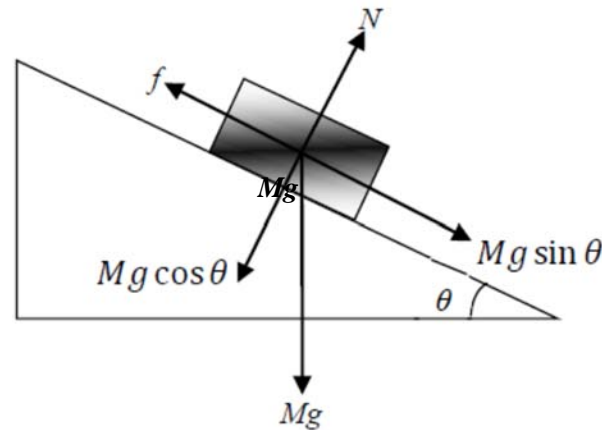
اگر مطابق شکل جسم در حال تعادل روی سطحی قرار گیرد و نیروی اصطکاک بین جسم و سطح f_s باشد چنانچه جسم تحت تأثیر نیروی کشش F قرار گیرد حالات زیر ممکن است رخ دهد:



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.

در صورتیکه مانند شکل جسم روی سطح شیب دار قرار داشته باشد داریم:



$$Mg \sin \theta_s - f_s = 0 \rightarrow f_s = Mg \sin \theta_s$$

$$N - Mg \cos \theta_s = 0 \rightarrow N = Mg \cos \theta_s$$

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 می باشد که در آزمایشگاه اندازه گیری میکنیم). با جایگزین کردن N از رابطه بالا خواهیم داشت:

$$f_s = \mu_s Mg \cos \theta_s$$

بنابراین داریم:

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

$$\mu_s = \tan \theta_s$$



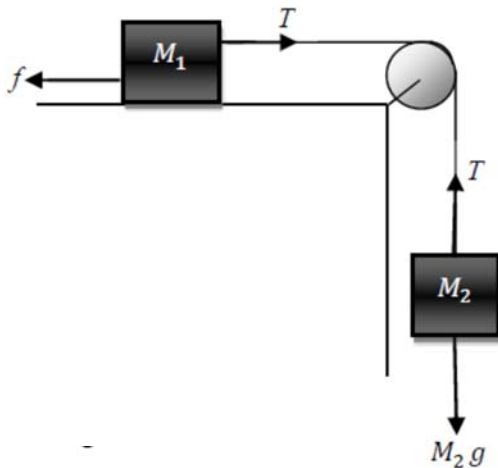
حال اگر جسم در اثر نیروی وزنش با سرعت ثابت روی سطح به پایین بلغزد، به طور مشابه برای ضریب اصطکاک لغزشی خواهیم داشت:

$$\mu_k = \tan \theta_k$$

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.

روش اول:

مطابق شکل 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:



$$T = M_2 g$$

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

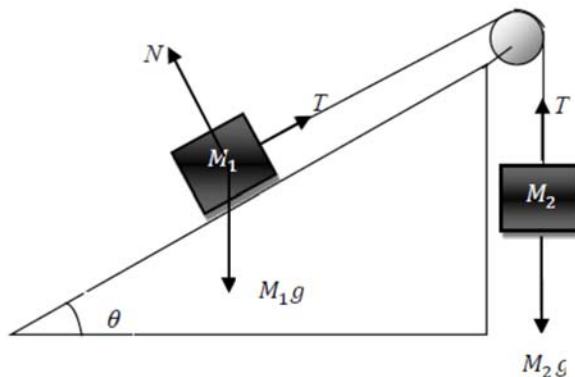
$$\rightarrow \mu_s = \frac{M_2}{M_1}$$

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:

$$\mu_k = \frac{M_2}{M_1}$$

روش دوم:

در شکل زیر 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_1 در شرایط آستانه حرکت به طرف بالا باشد می توان معادلات زیر را برایش نوشت:

$$N = M_1 g \cos \theta$$

$$T = f_s + M_1 g \sin \theta$$

$$T = M_2 g$$

با جایگذاری در روابط بالا خواهیم داشت:

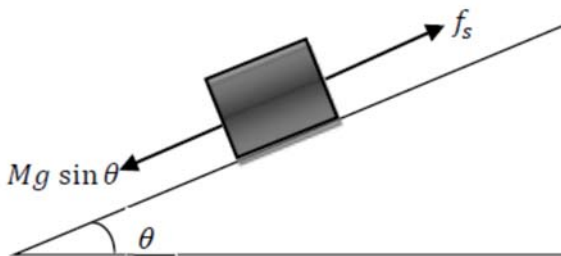
$$\mu_s = \frac{M_2 - M_1 \sin \theta}{M_1 \cos \theta}$$

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:

$$\mu_k = \frac{M_2 - M_1 \sin \theta}{M_1 \cos \theta}$$

روش سوم:

مطابق شکل 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 خواهیم داشت:



$$M_1 g \sin \theta = f_s$$

$$\rightarrow \mu_s = \tan \theta_s$$

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:

$$\mu_k = \tan \theta_k$$

روش انجام آزمایش:

قسمت اول:

سطح دستگاه شیبدار را مانند آنچه در روش اول اندازه گیری ضریب اصطکاک گفته شد، تراز کنید و وزنه M_1 را روی سطح قرار داده و آن را توسط نخ به کفه نگه دارنده 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 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_1 برحسب M_2 را در یک کاغذ میلیمتری یا با نرم افزار Excel رسم کرده و با محاسبه شیب نمودار μ_s را محاسبه کنید. مراحل فوق را برای سطح دیگر (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 به حرکت وا داشت.

را μ_k از تغییر دادن جرم وزنه M_1 برای دو سطح پلاستیکی و آلومینیومی به دست آورید. همچنین منحنی M_1 برحسب M_2 را رسم کرده و از روی آن μ_k را بیابید.



سطح فلزی							
M ₁	M ₂	μ _s		M ₁	M ₂	μ _k	
		μ _s =					μ _k =

سطح پلاستیکی							
M ₁	M ₂	μ _s		M ₁	M ₂	μ _k	
		μ _s =					μ _k =

قسمت دوم:

با توجه به آنچه در روش دوم اندازه گیری ضریب اصطکاک گفته شد سطح شیب دار را در زاویه ثابتی قرار دهید و وزنه های M₁ و M₂ را روی آن سوار کنید. شبیه قسمت اول با قرار دادن وزنه داخل کفه، جسم M₁ را یک بار در آستانه حرکت و بار دیگر در حالت حرکت یکنواخت قرار دهید. مقادیر M₁ و M₂ را در جدول های مربوطه یادداشت کنید و با استفاده از روابط بدست آمده در قسمت تئوری آزمایش ضرایب اصطکاک μ_s و μ_k را برای سطوح پلاستیکی و آلومینیومی به دست آورید.

سطح فلزی							
M ₁	M ₂	μ _s		M ₁	M ₂	μ _k	
		μ _s =					μ _k =



سطح پلاستیکی						
M ₁	M ₂	μ _s		M ₁	M ₂	μ _k
		μ _s =				μ _k =

قسمت سوم:

جرم M₁ را روی سطح شیب دار قرار داده و زاویه سطح را آرام آرام افزایش دهید. وقتی جسم از حال سکون خارج شد مقدار زاویه θ_s را یادداشت کنید و از روی آن $\mu_s = \tan \theta_s$ را محاسبه کنید. آزمایش را برای جرم های مختلف وزنه M₁ 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 با سرعت تقریباً ثابت حرکت کرد زاویه سطح شیب دار را یادداشت کنید و با استفاده از رابطه $\mu_k = \tan \theta_k$ مقدار را بیابید.

سطح فلزی				
M ₁	θ _s	θ _k	μ _s	μ _k
			μ _s =	μ _k =

سطح پلاستیکی				
M ₁	θ _s	θ _k	μ _s	μ _k
			μ _s =	μ _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. آیا 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؟

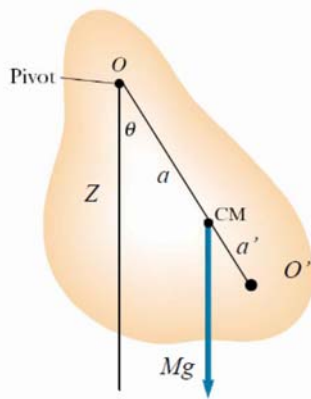
آزمایش شماره ۳

آونگ کاتر

هدف آزمایش: اندازه‌گیری شتاب ثقل زمین به کمک آونگ کاتر.
وسایل مورد نیاز: آونگ کارتر ۲- زمان سنج ۳- متر یا خط کش.

تئوری آزمایش:

جسم صلب M که می‌تواند حول محور OZ نوسان نماید، آونگ فیزیکی یا آونگ مرکب نامیده می‌شود و زمان تناوب آن از رابطه $T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mga}}$ بدست می‌آید. که در این رابطه T زمان نوسان کامل کم دامنه آونگ حول محور و I ممان اینرسی آونگ حول همین محور، M جرم آونگ، g شتاب گرانش و a فاصله مرکز جرم آونگ تا محور OZ نوسان می‌باشد، که اگر این رابطه را با رابطه $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ مقایسه کنیم $l = \frac{I}{Ma}$ بدست می‌آید، یعنی طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب مساوی $\frac{I}{Ma}$ است یعنی می‌توان تمام جرم آونگ را در فاصله $\frac{I}{Ma}$ از محور نوسان آونگ فرض نمود و به این نقطه مرکز نوسان گویند.



قضیه هویگنس: اگر O و O' دو نقطه در دو طرف مرکز جرم جسم به طور غیر متقارن قرار بگیرند که زمان نوسان کامل، حول این دو محور مساوی باشد، $O O'$ مساوی طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب است. مطابق تعریفی که در بالا نمودیم نقاط O و O' مرکز نوسان اند. برای اثبات این قضیه نخست باید بدانیم $I_{OZ} = I_G + Ma^2$ یعنی ممان اینرسی نسبت به محور OZ مساوی با ممان اینرسی جسم نسبت به محوری که موازی OZ بوده و از مرکز جرم می‌گذرد بعلاوه حاصلضرب جرم جسم در مجذور فاصله مرکز جرم جسم تا این محور و اگر فرض نماییم $I_G = Mk^2$ که در آن به k شعاع ژیراسیون می‌گویند، رابطه زمان نوسان کامل با ممان اینرسی و جرم و غیره به صورت زیر در می‌آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M(a^2+k^2)}{Mga}} = 2\pi \sqrt{\frac{(a^2+k^2)}{ga}}$$

حال طبق فرض قضیه چون زمان نوسان حول O و O' برابر است داریم:

$$2\pi \sqrt{\frac{(a_1^2+k^2)}{ga_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{(a_2^2+k^2)}{ga_2}} \Rightarrow \frac{a_1^2+k^2}{a_1} = \frac{a_2^2+k^2}{a_2}$$

رابطه بالا در صورتی درست است که $k^2 = a_1 a_2$. قبلاً داشتیم $l = \frac{I}{Ma}$ بنابراین:

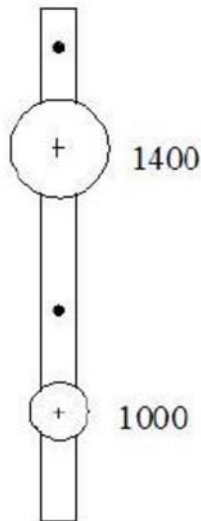


$$l = \frac{M(a_1 a_2 + a_1^2)}{M a_1} = a_1 + a_2$$

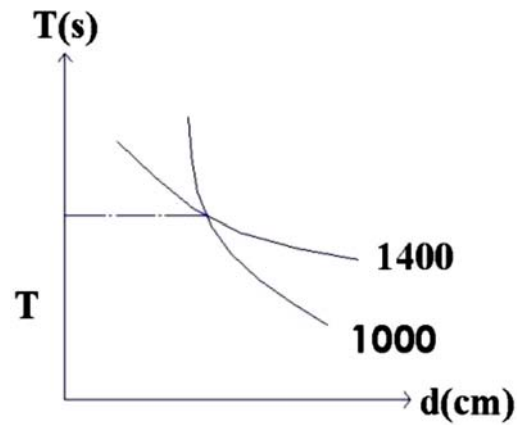
در نتیجه اگر دو محور نوسان در دو طرف مرکز جرم پیدا کنیم که زمان نوسان کامل برای آنها مساوی باشد فاصله این دو محور مساوی طول آونگ ساده مشابه با آونگ مرکب است در این رابطه باید $a_1 \neq a_2$ باشد و دونقطه نسبت به مرکز جرم قرینه نباشند.

روش انجام آزمایش:

دستگاه تشکیل شده از میله ای که در دو طرف آن دو تیغه برای نوسان تعبیه شده و روی این میله دو وزنه به شکل دیسک نصب گردیده که محل قرار گرفتن آن در روی میله بوسیله پیچی قابل تغییر است. بوسیله تغییر محل دووزنه مرکز جرم دستگاه را آنقدر تغییر می دهند که زمان نوسان نسبت به دو محور مساوی شود. وزنه ای که خارج از دو محور قرار دارد ۱۰۰۰ گرم و وزنه ای که داخل دو تیغه است ۱۴۰۰ گرم جرم دارد.



وزنه ای را که خارج از دو محور است در محلی روی میله ثابت نموده (از وسط کمی بالاتر) و محل وزنه داخل را ۵ سانتی متر ۵ سانتی متر تغییر دهید و زمان نوسان کامل حول دو محور را پیدا کرده و منحنی تغییرات زمان را نسبت به این فواصل روی کاغذ میلی متری رسم نمایید این دو منحنی یکدیگر را در نقطه ای قطع می کنند و این همان زمان مشترک است و طول آونگ ساده همزمان با آونگ مرکب فاصله دو تیغه است که یک متر یا ۱۰۰ سانتی متر می باشد. برای توضیح بیشتر وزنه هزار گرمی را در فاصله کمی بالاتر از وسط قطعه بالایی و نزدیک به انتهای میله نصب نمایید و وزنه هزار و چهارصد گرمی را در فاصله یک دو سانتی متر از تیغه دومی ثابت نموده و فاصله آنها پنج سانتی متر، پنج سانتی متر تغییر دهید و نتایج را در جدول نوشته واز روی جدول منحنی را رسم نمایید و برای اینکه نتایج دقیق باشد هر بار ۲۰ نوسان کامل را بشمارید و از روی آن زمان یک نوسان کامل را بدست آورید. روی محور زمان هرسانتی متر را معادل یکصدم ثانیه و روی محور d هر دو سانتی متر را معادل ۵ سانتی متر میله انتخاب نمایید.



$d (cm)$	$t_{1000} (s)$	$T_{1000} (s)$	$T_{1400} (s)$	$T_{1400} (s)$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				

پس از بدست آوردن از روی نمودار و همچنین معلوم بودن $l = 1 m$ اکنون با استفاده از رابطه زیر می توان شتاب گرانش زمین را محاسبه نمود :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \rightarrow g = \frac{4\pi^2}{T^2}$$

با توجه به مقدار g حاصل از آزمایش خطای ماکزیمم نسبی (Δg و $\frac{\Delta g}{g}$) را محاسبه نمایید.



آزمایش شماره ۴

فنها

هدف آزمایش: تحقیق قوانین مربوط به فنرها

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

تئوری آزمایش:

نیروی کشسانی (بازگرداننده) فنر مهمترین نوع از نیروهای کشسانی محسوب می شود، چون نیروی جاذبه بین اتمهای یک مولکول یا نیروی جاذبه بین اتمهای یک جامد بلوری را اغلب به صورت نیروهای کشسانی فنرهایی که بین آنهاست تقریب می زنند. در اواسط قرن هفدهم، هوک کشف کرد که میزان کشیدگی فنر در هر دو حالت جابجایی که منجر به انبساط یا انقباض فنر شود با میزان این جابجایی متناسب است. نیروی اعمال شده F_s از طرف یک فنر کشیده شده به وسیله قانون هوک با رابطه زیر داده می شود:

$$F_s = -kx$$

در این رابطه k مقداری ثابت است که ثابت فنر نامیده می شود و x جابجایی انتهای فنر از وضعیت تعادل آن است. بزرگی F_s بطور

خطی با جابجایی افزایش می یابد. علامت منفی نشانگر آن است که

نیروی F_s بازگرداننده است. یعنی نیروی فنر همواره در جهتی است که

مایل است فنر را به طول اولیه بازگرداند. نیرویی که از قانون هوک

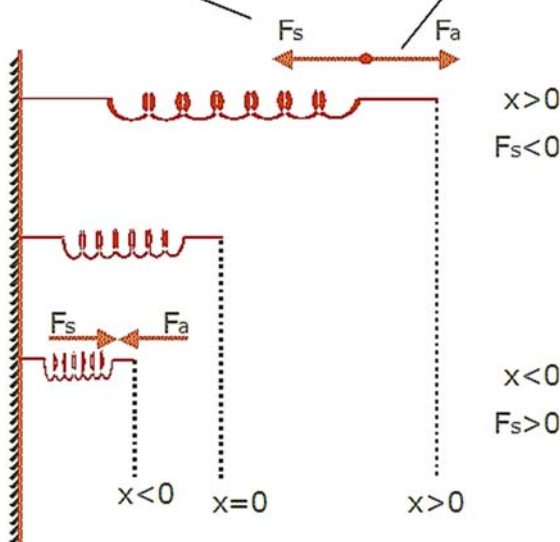
پیروی می کند، نیروی بازگرداننده خطی است.

اگر فنر توسط نیروی F_a به صورت کشیده در آمده باشد، آنگاه $x > 0$

و F_s منفی و جهت آن به طرف مبدأ است. اگر فنر توسط F_a فشرده

شده باشد، آنگاه $x < 0$ و F_s مثبت است. قانون هوک تجربی است و

برای جابجائیهای بزرگ صادق نیست.



روش انجام آزمایش:

الف) فنری را از پایه نگهدارنده آویزان کنید. در کنار آن یک خط کش مدرج قرار دارد مکان انتهای فنر را از روی خط کش بخوانید. سپس وزنه های با جرم معلوم را به فنر متصل کنید. بعد از تعادل دوباره محل انتهای فنر را بخوانید و مقدار افزایش طول را اندازه گیری کنید. وقتی وزنه در تعادل است نیروی وزن و نیروی بازگرداننده فنر با هم برابرند، داریم:

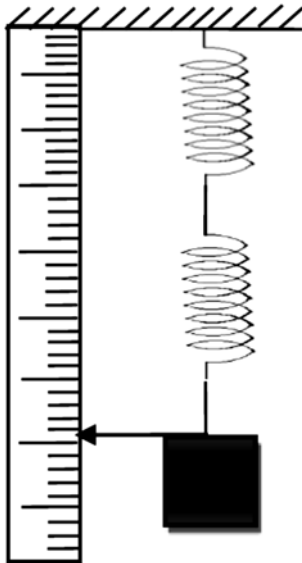
$$k = \frac{mg}{\Delta x}$$



از رابطه فوق ضریب سختی فنر به دست می آید. این کار را برای وزنه های مختلف 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 زیر ضریب سختی آن ها را حساب کنید.

	فنر ۱		فنر ۲	
$M(gr)$	Δx	k	Δx	k
		$K_1 =$		$K_2 =$

(ب) به هم بستن فنرها بصورت سری:



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 بدست می آید:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

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

بهم بستن سری دو فنر			
M	Δx	K_{tot}	
			مقدار نظری
		$\bar{K}_{tot} =$	$K_{tot} =$

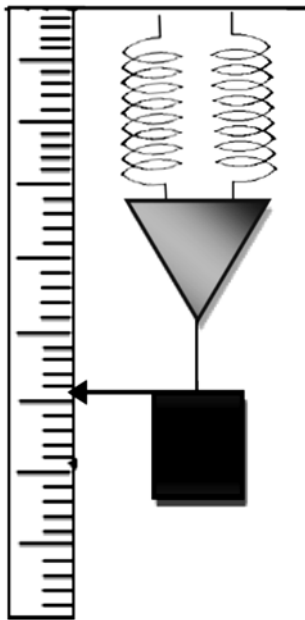


ب) به هم بستن فنرها بصورت موازی:

هرگاه وزنه ای را مطابق شکل 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، 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 بدست می آید:

$$K = K_1 + K_2$$

برای انجام آزمایش 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.



بهم بستن موازی دو فنر		
M	Δx	K_{tot}
		$\bar{K}_{tot} =$
		مقدار نظری
		$K_{tot} =$



آزمایش شماره ۵

میز نیرو

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

وسایل آزمایش: میز نیرو، وزنه با جرمهای متفاوت

تئوری آزمایش:

تعدادی از کمیت های فیزیکی فقط با یک عدد (مقدار) کاملاً مشخص می گردند در حالی که تعداد دیگری از کمیت ها برای معرفی شدن علاوه بر مقدار باید جهتشان نیز مشخص گردد.

کمیت های دسته اول را کمیت های اسکالر (یا عددی) و دسته دوم را کمیت های برداری گوئیم. از جمله کمیت های اسکالر می توان جرم، زمان، کار و انرژی را نام برد و کمیت های برداری از قبیل سرعت، شتاب و نیرو می باشند. مقدار کمیت های اسکالر با اعداد جبری مشخص می گردند و جمع و تفریق و ضرب و تقسیم آنها تابع قوانین اعمال جبری می باشند یعنی مانند اعداد جبری با یکدیگر جمع و تفریق و ضرب و تقسیم می شوند و اما این اعمال برای کمیت های برداری به صورت دیگری تعریف شده است و به نحو دیگری انجام می گردد. کمیت های برداری را با بردار که یک پاره خط جهت دار می باشد و دارای مقدار، جهت و امتداد است نشان می دهند و به گونه ای که در ادامه می آید، جمع و تفریق و ضرب این کمیت ها تعریف شده است.

تعریف بردار:

برداریک پاره خط جهت دار است که طول آن متناسب با مقدار آن می باشد و به شکل یک پیکان نمایش داده می شود.

ضرب یک عدد (اسکالر) در یک بردار:

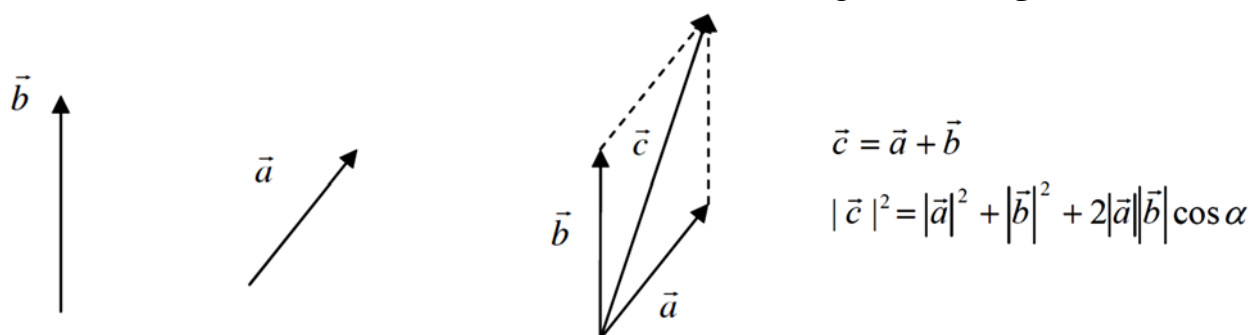
اگر $a > 0$ این حاصل ضرب برابر است با برداری در امتداد بردار \vec{v} و به طول $a|\vec{v}|$ و اگر $a < 0$ این حاصل ضرب برابر است با برداری در خلاف جهت بردار \vec{v} و به طول $|a||\vec{v}|$

جمع بردارها:

برای جمع کردن کمیت های برداری روش های خاصی وجود دارد که در ذیل به آنها اشاره می شود.

الف) روش متوازی الاضلاع:

در این روش از یک نقطه دلخواه، همسنگ بردارهایی که می خواهیم با هم جمع کنیم، رسم می کنیم قطر متوازی الاضلاع که از این دو بردار تشکیل می گردد حاصل جمع این دو بردار است.

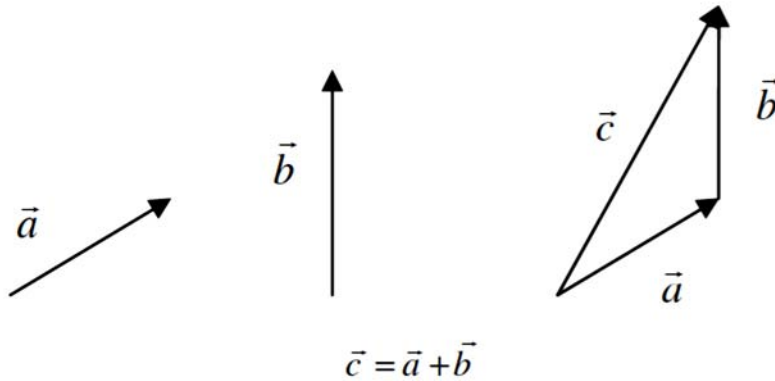


ب) روش مثلث یا چند ضلعی:

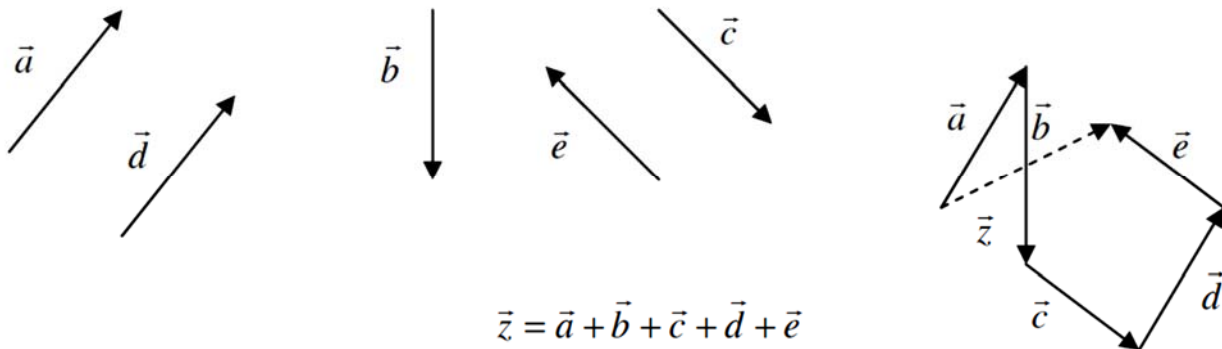
در این روش از یک نقطه دلخواه برداری همسنگ یکی از بردارها رسم می کنیم و سپس از انتهای آن برداری همسنگ بردار



دوم رسم می کنیم. اگر ابتدای بردار اول را به انتهای بردار دوم وصل کنیم حاصل جمع دو بردار بدست می آید.

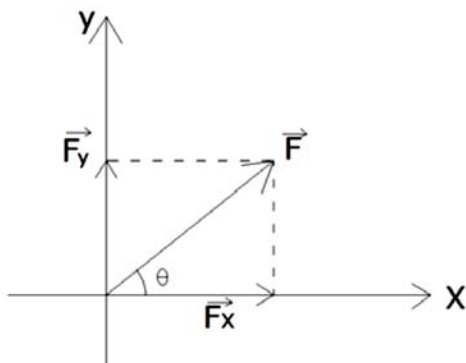


اگر جمع تعداد زیادی بردار را بخواهیم به این روش انجام دهیم کافی است از انتهای هر بردار، برداری همسنگ یکی از بردارها رسم کنیم و سپس از ابتدای بردار اول به انتهای بردار آخر وصل کنیم این بردار جمع کل بردارهای قبلی خواهد بود.



ج) روش تجزیه:

در این روش ابتدا کلیه بردارها را در یک دستگاه مختصات رسم می کنیم و سپس تک تک آنها را به روی محورها تجزیه می کنیم. بعد از آن همنه های افقی را جمع جبری می کنیم و همنه های قائم را نیز با هم جمع جبری می کنیم و حاصل این دو همنه را به عنوان برآیند مؤلفه های افقی و قائم در نظر گرفته، قطرمستطیل حاصل از آنها جمع کل بردارها می باشد.

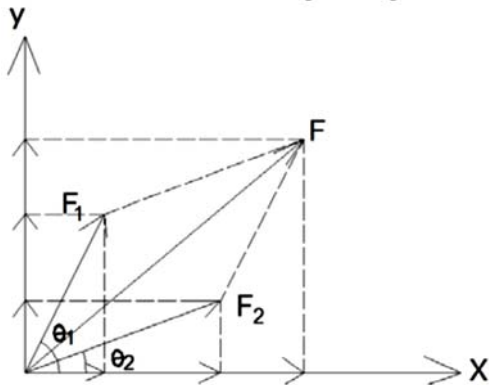


$$F_x = F \cos \theta$$

$$F_y = F \sin \theta$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x}$$



اندازه و زاویه ای که برآیند دو بردار با محور می سازد، برحسب مولفه های افقی و قائم آن دو بردار، از رابطه زیر بدست می آید:

$$\tan \theta = \frac{F_1 \sin \theta_1 + F_2 \sin \theta_2}{F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2}$$

$$|\vec{F}|^2 = |\vec{F}_1|^2 + |\vec{F}_2|^2 + 2|\vec{F}_1||\vec{F}_2|\cos(\theta_1 - \theta_2)$$

روش انجام آزمایش:

چنانچه دو یا چند نیرو در یک نقطه بر یک جسم اثر کنند می توان به جای آنها یک نیرو قرار داد که آن را برآیند آن نیروها می نامیم چنانچه نقطه مادی تحت اثر این چند نیرو در حال تعادل باشد، برآیند این نیروها صفر است.

لازم به یاد آوری است که اولاً زاویه بین بردارها از روی صفحه مدرج میز نیرو قابل تنظیم است و ثانیاً نیروهایی که توسط وزنه ها و قلاب ها برنخ وارد می شوند برحسب گرم نیرو محاسبه می گردند.

به کمک گیره های موجود و مطابق جدول به سه نخ نیروهایی را تحت زوایای داده شده وارد سازید و با روش های جمع برداری برآیند این نیروها را محاسبه نمایید و سپس نیروی لازم برای برقراری تعادل را بطور عملی بدست آورید. طول و زاویه بردار چهارم را که از دو طریق محاسبه و عملی بدست آمده اند در جدول درج نمایید.

برداری A		برداری B		برداری C		برداری برآیند (تئوری)		برداری برآیند (عملی)	
اندازه (grf)	زاویه (درجه)	اندازه (grf)	زاویه (درجه)	اندازه (grf)	زاویه (درجه)	اندازه (grf)	زاویه (درجه)	اندازه (grf)	زاویه (درجه)
۱۵۰	۰	۷۵	۸۰	۱۰۰	۲۰۰				
۱۲۰	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۷۰	۲۵۰				
۱۸۰	۵۰	۱۰۰	۱۷۰	۲۵۰	۲۴۰				
۱۰۰	۷۰	۷۵	۱۷۰	۸۰	۳۰۰				
۵۰	۰	۷۰	۷۰	۱۰۰	۳۰۰				
۲۰۰	۴۵	۸۰	۱۸۰	۱۵۰	۳۳۰				



آزمایش شماره ۶

اندازه گیری چگالی به روش ارشمیدس

هدف آزمایش : بررسی قانون ارشمیدس و موارد استفاده از آن

وسایل آزمایش: نیروسنج، گیره و پایه، پی ست، بشر، وزنه

تئوری آزمایش:

وقتی جسمی در سیالی قرار گیرد از طرف سیال نیرویی به آن وارد می شود که جهت آن عکس جهت نیروی وزن جسم می باشد که آن را نیروی ارشمیدس می گویند، در نتیجه وزن جسم در داخل سیال همیشه کمتر از وزن حقیقی آن می باشد. وزن یک جسم را در خلا وزن حقیقی آن می گویند ولی در اغلب آزمایش ها وزن جسم در هوا را وزن حقیقی جسم به حساب می آورند و آنرا با P یا W نشان می دهند.

وزن ظاهری یک جسم، وزن آن جسم در داخل یک سیال می باشد و در واقع وزن ظاهری برآیند نیروی وزن حقیقی و نیروی ارشمیدس است. اندازه نیروی ارشمیدس که از طرف مایع در خلاف جهت نیروی وزن بر جسم اثر می کند برابر با وزن سیال (مایع) جابجا شده می باشد و با R نشان داده می شود.

$$\dot{P} = P - R \quad , \quad \dot{P} \text{ وزن ظاهری} \quad , \quad P \text{ وزن حقیقی} \quad , \quad R \text{ وزن سیال}$$

روش انجام آزمایش:

نیروسنج را حالت آویخته قرار داده و بدون اینکه وزنه ای از قلاب آن آویزان کنید خطای صفر آن را بدست آورده و از اندازه گیری های بعدی کم کنید.

ابتدا وزن وزنه را با استفاده از نیروسنج اندازه گیری و ثبت نمایید. حال وزنه را به آرامی توسط شل کردن پیچ گیره وارد آب بشکرده به طوری که کاملاً در آب غوطه ور شود، عددی را که نیروسنج نشان می دهد یادداشت نمایید و تحقیق کنید که نیروی ارشمیدس برابر وزن آب هم حجم جسم می باشد.

وزن حقیقی و نیروی ارشمیدس را همچنین وزن ظاهری پیستون رامشخص کنید. درستی رابطه بالا را تحقیق کنید. به جای آب، مایع دیگری مانند آب نمک انتخاب کرده و آزمایش را انجام دهید. جدول زیر را کامل نمایید.

P وزن حقیقی	\dot{P} وزن ظاهری	R نیروی ارشمیدس



آزمایش شماره ۷

اندازه گیری ارزش آبی کالریمتر

هدف آزمایش: اندازه گیری ارزش آبی کالریمتر
وسایل آزمایش: ترازو، هیتر، کالریمتر، بشر، دماسنج

تئوری آزمایش:

ارزش آبی کالریمتر بنا به تعریف مقدار آبی است که ظرفیت گرمایی آن با ظرفیت گرمایی کالریمتر برابر باشد. ظرفیت گرمایی کالریمتر (ارزش آبی کالریمتر) از رابطه ی زیر مشخص میشود:

$$A = \sum m_i c_i$$

در رابطه ی فوق m_i جرم اجزای کالریمتر و c_i ظرفیت گرمایی ویژه ی مربوط به آنها می باشد. از رابطه ی فوق همیشه نمی توان ارزش آبی کالریمتر را تعیین نمود، زیرا تعیین جرم و ظرفیت گرمایی ویژه ی ظرف و همزن و دماسنج و ... خالی از اشکال نیست. در نتیجه با استفاده از روش اختلاط ظرفیت گرمایی کالریمتر را تعیین میکنند. بدین معنی که در روش ذکر شده جسمی را با کالریمتر در تعادل گرمایی قرار داده و سپس ظرفیت گرمایی کالریمتر را محاسبه می کنند. معمولاً جسم را آب در نظر میگیرند و با توجه به این مطلب که گرمای ویژه ی آب مقدار مشخصی است، ارزش آبی کالریمتر (A) به راحتی محاسبه میگردد.

روش انجام آزمایش:

لازم است پیش از تعیین گرمای ویژه یک ماده، ارزش آبی کالریمتر اندازه گیری شود. ارزش آبی کالریمتر عبارت است از مقدار آبی که هم ارز کالریمتر در یک واکنش تعادل گرمایی، گرما می گیرد. برای اندازه گیری ارزش آبی کالریمتر مراحل زیر را به ترتیب انجام دهید:

- ۱- جرم کالریمتر M_{ca} را به دقت اندازه بگیرید و آن را در جدول زیر یادداشت نمایید.
- ۲- مقداری آب معمولی در کالریمتر ریخته به وسیله ترازو جرم را اندازه گرفته، جرم خالص آب M_w را محاسبه کنید.
- ۳- مدتی صبر کنید تا تعادل گرمایی برقرار شود آنگاه دما را به کمک دماسنج اندازه بگیرید T_c
- ۴- مقداری آب گرم M_h که قبلاً به اندازه کافی (در حدود $60^\circ C$) حرارت داده اید T_h به آب داخل کالریمتر بیفزایید بطوری که سطح مایع مخلوط تا سه چهارم ظرف برسد.
- ۵- مدتی صبر کنید تا تعادل گرمایی در کالریمتر برقرار شود، پس از آن دمای مایع مخلوط T_f را یادداشت کنید.

$$M_h C_w (T_h - T_f) = M_w C_w (T_f - T_c) + M_{ca} C_{ca} (T_f - T_c)$$

از این رابطه C_{ca} بدست می آید سپس از رابطه زیر A نیز بدست می آید

$$A = M_{ca} C_{ca}$$

M_{ca}	M_w	M_h	T_c	T_h	T_f	A



آزمایش شماره ۸

ضریب انبساط حجمی مایع

هدف آزمایش: اندازه‌گیری ضریب انبساط حجمی الکل.

وسایل آزمایش: تنگ چگالی (پیکنومتر)، دماسنج، ترازو، بشر، آب، منبع گرمایی، سرنگ، الکل، قیف کوچک، پارچه نظیف.

تئوری آزمایش:

به استثنای چند جسم، حجم اکثر اجسام با افزایش دما افزایش می‌یابد. (چنانچه فشار خارجی وارد بر آن ثابت باشد) علت اصلی افزایش حجم یک جسم آن است که اتم‌ها و مولکول‌های جسم با گرفتن انرژی گرمایی در فضای سه بعدی شروع به ارتعاش به صورت نوسانگرهای غیرهماهنگ ساده می‌نمایند که به تدریج دامنه ارتعاش آنها افزایش می‌یابد. اگر تغییر حجم جسم Δv باشد و این تغییر حجم به ازاء تغییر دمای Δt باشد بنا به تعریف β ضریب انبساط حجمی عبارتست از تغییر واحد حجم که به ازاء یک درجه حرارت صورت می‌گیرد و یا:

$$\beta = \frac{1}{v} \times \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{در فشار ثابت}) \quad (1)$$

در مایعات افزایش حجم Δv به مقداری که دما افزایش یافته است یعنی Δt حجم اولیه مایع v و جنس مایع بستگی دارد.

$$\Delta v = v\beta\Delta t \quad (2)$$

β ضریب انبساط حجمی مایع است و برابر است با افزایش واحد حجم مایع به ازاء ازدیاد یک درجه سانتی‌گراد حرارت و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{1 + \gamma_1}{1 + \gamma_2} \cdot \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t_2} \quad (3)$$

مایعات تابع ظرف خود می‌باشند و انبساط و انقباض آنها با انبساط و انقباض ظرف توأم است. حجم ظرف در دمای t از رابطه:

$$v = v_0(1 + \gamma) \quad (4)$$

بدست می‌آید و V_0 عبارتست از حجم ظرف در دمای صفر درجه:

اگر جرم واحد حجم (جرم مخصوص) مایع در دمای صفر درجه d_0 و در دمای t برابر با d باشد می‌توان نوشت:

$$d = \frac{d_0}{1 + \beta t} \quad (5)$$

و از آنجا جرم مایع M که ظرف را در دمای t پر کرده است از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$M = vd = \frac{v_0 d_0 (1 + \gamma)}{1 + \beta t} \rightarrow M = \frac{M_0 (1 + \gamma)}{1 + \beta t} \quad (6)$$

و M_0 عبارتست از جرم مایعی که در دمای صفر ظرف را پر کرده است با دست آوردن M_1 و M_2 و تقسیم طرفین بر یکدیگر:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{M_0 (1 + \gamma_1)}{(1 + \beta t_1)} \\ \Rightarrow \frac{M_1}{M_2} &= \frac{1 + \gamma_1}{1 + \gamma_2} \cdot \frac{1 + \beta t_1}{1 + \beta t_2} \\ M_2 &= \frac{M_0 (1 + \gamma_2)}{(1 + \beta t_2)} \end{aligned}$$



که همان رابطه (۳) خواهد بود.

بر طبق بسط دو جمله‌ای نیوتن خواهیم داشت:

$$\frac{1}{1+\beta t} = (1 - \beta t + \beta^2 t^2 - \beta^3 t^3 + \dots) \quad (7)$$

بدلیل کوچک بودن β از جمله دوم به بعد رابطه (۷-۲۲) صرفنظر می‌کنیم بنابراین برطبق رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$M = \frac{M_0(1+\gamma)}{(1+\beta t)} = M_0(1+\gamma) \cdot \frac{1}{1+\beta t} + M_0(1+\gamma)(1-\beta t)$$

و یا به عبارتی:

$$M = M_0(1 - \beta t + \gamma - \beta\gamma t^2) \quad (8)$$

با حذف جمله آخر به دلیل کوچک بودن γ خواهیم داشت:

$$M = M - M_0(\beta - \gamma)t \Rightarrow M - M_0 = -M(\beta - \gamma)t \quad (9)$$

اگر در دمای t_1 جرم مایع در ظرف M_1 و در دمای t_2 جرم مایع در ظرف M_2 باشد در اینصورت β ضریب انبساط حجمی مایع برابر است با:

$$(\beta - \gamma) = -\frac{M - M_0}{M_0 \Delta t} \Rightarrow (\beta - \gamma) = -\frac{M_2 - M_1}{M_1 \Delta t}$$

و یا:

$$\beta = \frac{M_1 - M_2}{M_1 \Delta t} + \gamma \quad (10)$$

روش انجام آزمایش:

ابتدا جرم تنگ چگالی کاملاً خشک به همراه درپوش را به وسیله ترازو بدست آورید (m). سپس به وسیله قیف تنگ چگالی را کاملاً پر از الکل نموده درپوش آن را گذاشته آن‌گاه آن را داخل بشر قرار داده و به آرامی تا گلوی شیشه پیکنومتر داخل بشر آب در دمای محیط بریزید. چند دقیقه صبر کنید تا سیستم به حالت تعادل حرارتی برسد و چنانچه سطح الکل در شیشه پیکنومتر پایین آمده به وسیله سرنگ پر از الکل تا بالای لوله موئینه درپوش را پر از الکل نمایید. اینک تنگ چگالی را از بشر بیرون آورده پس از خشک نمودن به وسیله پارچهٔ تنظیف آن را مجدداً توزین نمایید (m_1) (توجه داشته باشید که در این حالت تنگ چگالی را بیش از چند لحظه در دستان خود نگاه ندارید تا دمای آن تغییر نکند) به این ترتیب جرم اولیه الکل را بدست آورید.

$$M = m_1 - m$$

در این حالت دمای اولیه آب داخل بشر t_1 را نیز به وسیله دماسنج اندازه‌گیری نمایید. تنگ چگالی را مجدداً داخل بشر حاوی آب قرار داده و مجموعه را روی منبع گرمایی قرار دهید و در دماهای t_2 ثبت شده در جدول هر بار پس از خشک نمودن بدنه شیشه پیکنومتر با پارچه تنظیف جرم پیکنومتر و درپوش حاوی الکل را اندازه‌گیری و نتایج را در جدول وارد کنید. (m_2)

$$M_2 = m_2 - m$$

سپس آن را از جرم پیکنومتر خالی m کم کرده و جرم ثانویه الکل M_2 را بدست آورید.

در هر دمای t_2 با در دست داشتن مقادیر M_1 و M_2 و t_1 و t_2 و با توجه به اینکه ضریب انبساط حجمی تنگ چگالی برابر است با:

$$\gamma = 0.276 \times 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$$



مقدار ضریب انبساط حجمی الکل β° را بدست آورید و در جدول ثبت کنید.
 مقدار ضریب انبساط حجمی β الکل را از رابطه (۳) نیز بدست آورده در جدول وارد کنید و نتایج بدست آمده برای β را با هم مقایسه کنید.

نمودار تغییرات جرم الکل بر حسب تغییر دما را بر روی کاغذ میلیمتری رسم کنید. نمودار را ادامه دهید. تا محور جرم‌ها را قطع کند و بدین ترتیب حجم اولیه مایع M_0 در دمای صفر درجه سانتی‌گراد را بدست آورید با استفاده از شیب نمودار و دانستن γ مقدار β را بدست آورده و در جدول بنویسد.

شماره	گرم m	t_1 درجه سانتیگراد	گرم m_1	گرم m_2	t_2 درجه سانتیگراد	M_1 گرم	M_2 گرم	Δt درجه سانتیگراد	$\beta(^\circ c)^{-1}$	β از رابطه	β نمودار
۱					۴۰						
۲					۵۰						
۳					۶۰						