اصول انجام آزمایش و تهیه‌ی گزارش کار

مقدمه

آزمایشگاه فیزیک۱ شامل آزمایش‌هایی در زمینه‌ی فیزیک مکانیک است. پیش‌تر از این در کلاس‌ها و کتابهای درسی، با نظریه‌های فیزیکی آشنا شده‌اید. آزمایشگاه فیزیک در واقع جایی است که شرایط برای آزمایش این نظریه‌ها در برخورد با مسائل مربوط به دنیای واقعی مهیاست و شما می‌توانید دستاوردهای این آزمایش را با آن چه که خود انتظار داشتید، مقایسه کنید. هدف از هر آزمایش، اندازه‌گیری کمیت‌ها و بررسی روابط حاکم بین آنهاست. از این رو برای رسیدن به نتایج به اندازه‌ی کافی دقیق لازم است که در آزمایشگاه یک سری اصول رعایت شود. این اصول لازم به بیان نیست. زیرا که هرکسی به خودی خود می‌تواند درک کند که چه مواردی منجر به اختلال در نتایج و یا در تحلیل روابط می‌شود. به همین دلیل کسب مهارت در روش تجربی ضروری است. البته برای آزمایشگر لازم است که احاطه‌ی کافی نسبت به مبانی نظری موضوع نیز داشته باشد. از این رو میزان یادگیری شما در آزمایشگاه بستگی به میزان آمادگی شما پیش از شروع آزمایش دارد. بنابراین قبل از شروع کار در آزمایشگاه، شرح نظری و شیوه‌ی آزمایش را به دقت بخوانید. غیبت در آزمایشگاه همیشه قابل جبران نیست. تا حاضر هستید با دقت و کنجکاو باشید. تا می‌توانید آزمایش کنید و بپرسید. به نظر دیگران احترام بگذارید و با همکلاسی‌های خود بحث علمی داشته باشید. از کار خود مطمئن و در حد خطاهای موجود از آن دفاع کنید. اگر از طرز کار با وسیله‌ای آگاهی ندارید باید از استاد خود بپرسید و از دست زدن و بازی کردن با آن خودداری کنید.

برای اینکه استاد شما به میزان توانایی شما در انجام آزمایش و ایجاد ارتباط بین رخدادهای واقعی و نظریه‌های فیزیکی پی ببرد، باید گزارشی از فعالیت‌های خود را به او تحویل دهید. اگر زیباترین آزمایش با بهترین وسایل و با دقت خوبی انجام شود، اما نتوان گزارش کاملی از آن ارائه نمود چندان توفیقی حاصل نشده است. گزارش کار روش مناسب ارتباط علمی با دیگران است. این گزارش باید به گونه‌ای باشد که خواننده‌ای که

اطلاعی از آزمایشگاه و محیط کار شما ندارد، بتواند از دستاورد آزمایش شما مطلع شود. علاوه بر این در یک گزارش کار درج نام و نام خانوادگی نویسنده و همکاران همراه با رشته‌ی تحصیلی هرکدام، نام استاد، ساعت کلاس، تاریخ انجام آزمایش و تاریخ تحویل گزارش کار الزامی است. توجه داشته باشید که درصدی از نمره‌ی نهایی شما مربوط به گزارش کار، کارهای آزمایشگاهی است. لذا ضمن رعایت تمیزی و درست نوشتن نتایج باید اطلاع داشته باشید که تحویل به موقع گزارش کارها نیز در نمره‌ی نهایی بی‌تأثیر نخواهد بود. هرگونه کپی‌برداری از کار دیگران از ارزش کار و اعتماد به نفس شما خواهد کاست.

موارد دیگری که در تهیه‌ی گزارش کار آزمایشگاهی باید به آن توجه کرد:

۱- مشخص کردن عنوان و هدف از انجام هر بخش آزمایش.

۲- ارائه‌ی توضیح مختصر اما کافی درباره‌ی نحوه‌ی انجام آزمایش.

۳- به دست آوردن کلیه‌ی روابط لازم برای انجام آزمایش، در صورتی که روابط واضح نباشد.

۴- محاسبات عددی لازم برای به دست آوردن مجهولات.

۵- محاسبه‌ی خطاهای کمیت‌های موجود که اندازه‌گیری یا محاسبه شده‌اند.

۶- ذکر عوامل خطاهای آزمایش به صورت مجزا و در صورت لزوم ارائه‌ی پیشنهادهای عملی برای رفع آنها.

۷- ارائه‌ی جدول‌های اندازه‌گیری همراه با واحد کمیات.

۸- رسم نمودارهای لازم برای تحلیل آزمایش.

در هنگام آزمایش نیز رعایت اصول استفاده از وسایل اندازه‌گیری و همچنین رعایت نظم موجب تسریع در انجام آزمایش و دقت کافی نتایج خواهد شد.

از این رو انتظار داریم که:

۱- به موقع در آزمایشگاه حضور داشته باشید.

۲- پیش مطالعه‌ی کافی داشته باشید.

۳- موقع انجام آزمایش نظم و ترتیب را رعایت کنید.

۴- در محیط آزمایشگاه سکوت و آرامش را رعایت کنید.

۵- در حفظ و نگهداری از وسایل و دستگاههایی که در اختیار شما قرار داده می‌شود، کوشا باشید.

۶- خود را با استاد و همکاران هماهنگ کنید.

۷- لوازم نوشتاری لازم و ماشین حساب را به همراه داشته باشد.

۸- بعد از انجام آزمایش میز کار و دستگاههای آزمایشگاهی را مرتب کنید.

۹- گزارش کار را مرتب، تمیز و به موقع تحویل دهید.

اندازه‌گیری

اندازه‌گیری دقیق یک کمیت فاقد معناست. زیرا عوامل زیادی مانع رسیدن ما به مقدار واقعی کمیت می‌شود که حذف همه‌ی آنها به طور کامل ممکن نیست. بعضی از این عوامل عبارتند از: ۱- وسایل اندازه‌گیری، ۲- شخص آزمایشگر و ۳- عوامل پیچیده و متغیر محیط. با اینکه اندازه‌گیری دقیق یک کمیت امکان ندارد، اما داشتن تخمینی از خطای یک کمیت اهمیت خاصی دارد. تعیین خطاهای موجود در یک آزمایش همیشه کار ساده‌ای نیست. به همین دلیل اگر آزمایشی برای مقاصد خاصی انجام می‌شود، باید ببینیم به چه دقتی نیاز است تا دچار زحمت مضاعف و بیهوده نشویم. ما با وسایل گوناگونی در کارهای آزمایشگاهی روبرو هستیم. مثل خط‌کش، کولیس، ریزسنج، گوی‌سنج، ترازو، زمان‌سنج، نیروسنج و ... که بعضی از آنها نیز به صورت دیجیتالی هستند. در خواندن وسایلی که دارای قسمت مدرج هستند باید دقت شود که راستای چشم عمود بر صفحه‌ی مدرج باشد. وقتی شاخص وسیله‌ی اندازه‌گیری بین دو درجه‌بندی قرار دارد و بین آنها درجه‌بندی وجود ندارد، تشخیص اینکه مقدار واقعی در چه کسری از فاصله‌ی بین دو درجه‌بندی قرار دارد، با چشم مشکل است و بنابراین تولید خطا می‌کند. هرچند ممکن است وسیله‌ای نسبتاً دقیق درجه‌بندی شده باشد، اما خطای چشم مانع از رسیدن به دقت واقعی دستگاه می‌شود. خطای وسایل اندازه‌گیری دیجیتال برابر با کوچکترین مقداری است که می‌توانند نشان دهند.

فرض بر این است که وسایلی که با آنها کار می‌کنیم در حد درجه‌بندی موجود خود عدد درستی را نشان می‌دهند. اما باید صفر دستگاه اندازه‌گیری را مرتباً بررسی کرد. به عنوان مثال اگر با نیروسنجی می‌خواهید وزن یک جسم را پیدا کنید، وقتی نیروسنج را قائم نگه می‌دارید بدون آنکه جسمی به آن متصل کرده باشید نیروسنج به شما عددی غیر صفر را نشان می‌دهد و این همان خطای صفر است. در این حالت خاص شما عدد را یادداشت می‌کنید و از عددی که در موقع وصل کردن جسم مورد نظر خوانده‌اید کم می‌کنید. در بعضی از وسایل اندازه‌گیری امکاناتی وجود دارد که صفر دستگاه را تنظیم کنید مثل ترازوهای یک کفه ای.

منظور از اندازه‌گیری یک کمیت تعیین مقدار کمیت مورد نظر است، که به یکی از دو طریق مستقیم یا غیر مستقیم انجام می‌شود. قبلاً با کمیت‌هایی همچون طول، جرم، زمان، سرعت و شتاب آشنا شده‌اید. در واقع کمیت‌هایی مثل طول، جرم و زمان را می‌توان به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد. کمیت‌هایی مثل سرعت و شتاب را می‌توان به صورت غیر مستقیم و با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از کمیت هایی که به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده‌اند و همچنین روابط حاکم بین کمیت‌های مستقیم و غیر مستقیم به دست آورد. یک اندازه‌گیری هر قدر هم دقیق انجام شود، نتیجه‌ی صدرصد دقیقی حاصل نمی‌شود. چون در اندازه‌گیری یک کمیت همواره عواملی باعث ایجاد خطا می‌شوند. بنابراین گزارش اندازه‌گیری برای یک کمیت باید به صورت کامل گویای کمیت مورد نظر بوده و به صورت زیر بیان شود:

(واحد) $(x \pm \Delta x)$

که در آن x بهترین مقدار ممکن برای این کمیت در این اندازه‌گیری و Δx مقدار خطا در اندازه‌گیری این کمیت را نشان می‌دهد. کوچکترین درجه‌ی دستگاه اندازه‌گیری دقت آن نامیده می‌شود و مقدار خطای دستگاه نیز از لحاظ عددی برابر دقت دستگاه است. اگر جرم یک توپ را با ترازویی با دقت ۱گرم برابر با ۲۳۵ گرم اندازه‌گیری کنیم، جرم توپ را به صورت $(235 \pm 1)gr$ گزارش می‌کنیم.

دقت در اندازه‌گیری به دقت شخص اندازه‌گیر و دقت وسیله‌ی اندازه‌گیری وابسته است. هنگام اندازه‌گیری طول به وسیله‌ی خط‌کش میلی‌متری، دقت اندازه‌گیری میلی‌متر و هنگام استفاده از کولیس با دقت دو صدم میلی‌متر دقت اندازه‌گیری، دو صدم میلی‌متر خواهد بود. به عنوان مثال برای اندازه‌گیری طول یک خودکار با استفاده از یک خط‌کش با دقت یک سانتیمتر نمی‌توان از میلی‌متر سخن گفت و گزارش می‌کنیم: $l = (20 \pm 1)cm$ ، در حالی که اندازه‌گیری طول همان خودکار با استفاده از کولیس با دقت یک دهم میلیمتر به صورت $l = (200.3 \pm 0.1)mm$ گزارش می‌شود. اگر انتهای جسم بین دو درجه‌ی میلی‌متر قرار گیرد، باید عددی

را اعلام کرد که انتهای جسم به آن نزدیکتر است. به این ترتیب تمام رقمهای عدد اعلام شده با معنی است و آخرین رقم راست، رقم غیر قطعی خواهد بود.

قوانین حاکم بر ارقام معنادار

۱- دقت وسیله‌ی اندازه‌گیری تعداد ارقام با معنی را مشخص می‌کند. اگر به وسیله‌ی خط‌کشی با دقت $0.1cm$ طولی اندازه‌گیری می‌شود، باید بعد از اعشار یک رقم وجود داشته باشد.

۲- اگر قبل از ممیز هیچ عددی به جز صفر نباشد، صفرهای بلافاصله بعد از ممیز جزء ارقام با معنی نخواهند بود. یعنی دو عدد 0.0001 و 0.01 دارای یک رقم با معنا هستند.

۳- اگر قبل از ممیز عددی به جز صفر وجود داشته باشد، در این صورت صفرهای بعد از ممیز جزء ارقام با معنی به حساب می‌آیند. یعنی $0.3cm$ دارای یک رقم معنادار، $3.0gr$ دارای دو رقم معنادار، $3.05s$ دارای سه رقم معنادار و $10.02s$ دارای چهار رقم معنادار است.

۴- تبدیل واحد تعداد ارقام معنادار را تغییر نمی‌دهد. در این صورت $152m$ را می‌توان به صورت 152×10^2cm، 15.2×10^3cm یا 1.52×10^4cm نوشت و نمی‌توان آن را به صورت $15200cm$ بیان کرد. زیرا تعداد اعداد معنادار را زیادتر کرده‌ایم. این شیوه‌ی نمایش اعداد را اصطلاحاً نماد علمی می‌نامند. برای نمایش به صورت نماد علمی معمولاً مقدار کمیت را به صورت حاصلضرب عددی بین ۰ و ۹ در توانی از ۱۰ نمایش می‌دهند. بنابراین در حالت اخیر بهتر است عدد را به صورت 1.52×10^4cm نمایش دهیم، هرچند دو حالت دیگر نیز صحیح هستند. به طور مثال هر سه عدد $4.5cm$، $0.045m$ و $0.000045km$ نیز دارای دو رقم با معنی هستند و دو عدد اخیر بهتر است به صورت $4.5\times10^{-2}m$ و $4.5\times10^{-5}km$ نمایش داده شوند.

۵- تعداد رقم‌های اعشار مجموع یا تفاوت دو کمیت برابر با تعداد رقم‌های اعشار کمیتی است که کمترین رقم اعشار را دارد. مثلاً $2.12s + 42.1s = 44.2s$

۶- تعداد ارقام معنادار حاصلضرب یا نسبت دو کمیت برابر با تعداد ارقام معنادار کمیتی است که کمترین ارقام معنادار را دارد. مثلاً $5m \div 24s = 0.2m/s$ و $5.1cm \times 2.42cm = 12cm^2$

۷- برای اجرای بند ۵ و ۶ لازم است که یک سری از اعداد حذف شوند و برای این کار از روش گرد کردن استفاده می‌کنیم. در این روش اگر عددی را بخواهیم تا m رقم گرد کنیم، به رقم (m+1)ام آن نگاه می‌کنیم. اگر مساوی یا بیشتر از ۵ بود به رقم mام یک واحد اضافه می‌کنیم و در غیر این صورت همان رقم mام را نگه می‌داریم و رقمهای بعد از آن را دور می‌ریزیم. به طور مثال برای گرد کردن عدد 3.45178 تا دو رقم بعد از اعشار عدد 3.45 را خواهیم داشت و برای گرد کردن تا یک رقم بعد از اعشار 3.5 را گزارش می‌کنیم.

۸- تعداد ارقام با معنای اعداد ریاضی، بی نهایت است. مثلاً عددهای $\frac{4}{3}$، π و توان 3 در فرمول $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ جزء اعداد ریاضی هستند.

باز هم متذکر می‌شویم که در نوشتن مقادیر عددی حتماً باید واحد مربوطه در مقابل آن ثبت شود.

در جدول زیر نمادهای متعارف مربوط به برخی از کمیت‌های فیزیکی آمده است.

کمیت	نماد	ابعاد	واحد SI	واحد cgs	رابطه‌ی تبدیل دو دستگاه
طول	L, l	L	m(متر)	cm(سانتی‌متر)	$1m = 100cm$
جرم	M, m	M	kg	g	$1kg = 1000g$
زمان	T, t	T	s	s	–
مساحت	A	L^2	m^2	cm^2	$1m^2 = 10^4 cm^2$
حجم	V	L^3	m^3	cm^3	$1m^3 = 10^6 cm^3$
سرعت	V, v	LT^{-1}	m/s	cm/s	$1m/s = 10^2 cm/s$
شتاب	a	LT^{-2}	m/s^2	cm/s^2	$1m/s^2 = 10^2 cm/s^2$
زاویه چرخش	q	-	rad(رادیان)	rad	–
سرعت زاویه‌ای	ω	T^{-1}	rad/s	rad/s	–
شتاب زاویه‌ای	a	T^{-2}	rad/s^2	rad/s^2	–
بسامد زاویه‌ای	f	T^{-1}	Hz	Hz	–
نیرو	F	MLT^{-2}	N	dyne	$1N = 10^5 dyne$
اندازه حرکت خطی	P	MLT^{-1}	kg.m/s	g.cm/s	$1kg.m/s = 10^5 g.cm/s$
ضربه‌ی نیرو	I	MLT^{-1}	N.s	dyn.s	$1N.s = 10^5 dyn.s$
جرم حجمی	ρ	ML^{-3}	kg/m^3	g/cm^3	$1kg/m^3 = 10^{-3} g/cm^3$
شدت میدان گرانش	g	LT^{-2}	N/kg^2	dyn/g^2	$1N/kg^2 = 10^2 dyn/g^2$
ثابت نیروی فنر	K	MT^{-2}	N/m	dyn/cm	$1N/m = 10^7 dyn/cm$
گشتاور نیرو	τ	$M L^2T^{-2}$	N/m	dyn/cm	$1N/m = 10^7 dyn/cm$
گشتاور ماند	I	ML^2	$kg.m^2$	$g.cm^2$	$1kg.m^2 = 10^7 g.cm^2$
اندازه حرکت زاویه‌ای	L	ML^2T^{-1}	$kg.m^2/s$	$g.cm^2/s$	$1kg.m^2/s = 10^7 g.cm^2/s$

محاسبه‌ی خطا

پس از اندازه‌گیری کمیت‌ها، باید روابط بین آنها را بررسی کنیم. برای این کار باید توابعی از کمیت‌های اندازه‌گیری شده را تشکیل دهیم. به طور مثال برای محاسبه‌ی چگالی یک مکعب فلزی باید مقدار حجم را از روی مقادیر طول، عرض و ارتفاع مکعب محاسبه کنیم. در این صورت برای تعیین خطای کمیتی که به صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری شده است، می‌توان از یکی از دو روش زیر استفاده کرد:

روش اول

در حالت کلی برای محاسبه‌ی مقدار خطای یک تابع $f(a,b,c,...)$ که در آن کمیت‌های $a,b,c,...$ دارای خطای $\Delta a,\Delta b,\Delta c,...$ هستند، باید از تابع مورد نظر به صورت زیر مشتق جزئی بگیریم:

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial f}{\partial b}\Delta b + \frac{\partial f}{\partial c}\Delta c + ...$$

که در هر جمله از رابطه‌ی فوق، از تابع نسبت به یکی از متغیرهایش مشتق جزئی گرفته شده و در خطای آن کمیت ضرب و در نهایت تمامی جملات با هم جمع شده است. اگر در جملات مشتق منفی ظاهر شد، مثبت می‌کنیم تا بیشینه‌ی مقدار خطا برای تابع به دست آید.

روش دوم

مثلاً برای محاسبه‌ی حجم یک مکعب با اندازه‌گیری ابعاد آن به این صورت عمل می‌کنیم که ابتدا رابطه‌ی مورد نظر را برحسب کمیت غیرمستقیم و کمیت‌های مستقیم مرتب می‌کنیم:

$$V = abc$$

از طرفین رابطه Ln می‌گیریم:

$$LnV = Lna + Lnb + Lnc$$

بعد از طرفین رابطه مشتق می‌گیریم:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c} \quad \text{یا} \quad \Delta V = bc\Delta a + ac\Delta b + ab\Delta c$$

همین نتیجه با استفاده از روش اول نیز حاصل می‌شود. در این صورت با معلوم بودن Δa، Δb و Δc که مربوط به دقت وسیله‌ی اندازه‌گیری هستند و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی a، b و c، ΔV یا خطای اندازه‌گیری V را می‌توان به دست آورد.

هنگامی که یک عملیات جبری بین مقادیر اندازه‌گیری شده انجام می‌دهیم، باید در نظر داشته باشیم که با توجه به میزان دقت مقادیر اندازه‌گیری، اعداد گزارش شده صحیح باشند. به طور مثال اگر طول، عرض و ارتفاع یک مکعب را با یک کولیس با دقت ۰/۱ میلیمتر اندازه‌گیری کنیم و اعداد $a = 22.1mm$، $b = 21.2mm$ و $c = 11.7mm$ را به دست آوریم، مقادیر حجم و خطای آن به قرار زیر خواهند بود:

$$V = 22.1 \times 21.2 \times 11.7 = 548 \times 10^1 mm^3$$
$$\Delta V = 21.2 \times 11.7 \times 0.1 + 22.1 \times 11.7 \times 0.1 + 22.1 \times 21.2 \times 0.1 = 1 \times 10^2 mm^3$$

باید توجه کرد که در این محاسبات از قوانین حاکم بر ارقام معنادار استفاده شده است. در این صورت حجم به دست آمده همراه با خطای آن به صورت زیر گزارش می‌شود:

$$V \pm \Delta V = (55 \pm 1) \times 10^2 mm^3$$

کاربرد نمودار در آزمایشگاه و چگونگی رسم آن

در هر آزمایش ما با بررسی یک رابطه که معمولاً یک قانون فیزیکی می‌باشد، کمیتهایی را اندازه‌گیری می‌کنیم. به طور مثال در آزمایش سقوط آزاد، به دنبال بررسی رابطه‌ی $y = \frac{1}{2} g t^2$ می‌باشیم. پس در این آزمایش شرایط را برای اندازه‌گیری ارتفاع و زمان فراهم می‌کنیم. در هر بررسی دیگری مثل $y = f(x)$ نیز تابعیت f نوع نمودار را در صفحه $x - y$ برای ما مشخص می‌کند. اما بررسی خط راست بسیار ساده‌تر از بررسی یک منحنی غیرخطی است و پارامترهای آزمایش راحت‌تر قابل استخراج می‌باشند. از این رو مقادیر اندازه‌گیری

شده را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که نمودار ما یک خط راست شود. مثلاً در آزمایش سقوط آزاد نمودار y را برحسب $\frac{1}{2}t^2$ رسم می‌کنیم که در این صورت شیب خط، نشان‌دهنده‌ی شتاب گرانش خواهد بود.

برای رسم نمودار بعد از اینکه مقادیر اندازه‌گیری شده را در یک جدول یادداشت کرده و مقادیری که روی محورها نیاز داریم را از آن استخراج کردیم، به یکی از دو روش زیر عمل می‌کنیم:

الف) رسم نمودار به صورت دستی

۱- مقادیر خطای مربوط به هر مقدار را محاسبه می‌کنیم.

۲- روی محورها اعداد را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که نقاط در بیشترین فضای صفحه توزیع گردند (لازم نیست محورهای مختصات را از صفر شروع کنید).

۳- مقادیر خطا را روی مقادیر اصلی اضافه می‌کنیم که منجر به ایجاد مستطیل‌های خطا اطراف هر نقطه می‌گردد.

۴- خطی رسم می‌کنیم که از تمامی مستطیل‌های خطا بگذرد (توجه کنید که به ندرت می‌توان آزمایشی انجام داد که تمامی نقاط بر روی یک خط قرار گیرند) و کمترین فاصله از نقاط اصلی را داشته باشد.

۵- شیب خط را محاسبه می‌کنیم.

۶- خطی با بیشترین شیب ممکن و همچنین خطی با کمترین شیب ممکن که از تمامی مستطیل‌ها می‌گذرد را رسم می‌کنیم.

۷- شیب خطوط را محاسبه می‌کنیم.

۸- در این حالت مقدار خطای شیب برابر با نصف تفاضل بیشترین شیب و کمترین شیب خواهد بود.

ب) رسم نمودار با استفاده از نرم افزار Excel

دم دست‌ترین نرم افزار برای رسم یک نمودار که بر روی اکثر رایانه‌ها می‌توان یافت، نرم افزار Excel است که از سری Office می‌باشد. ضمن اینکه این روش در عین راحت‌تر بودن، از دقت بالاتری نسبت به روش قبلی برخوردار است. در این روش ابتدا مقادیر اندازه‌گیری شده را در ستون‌هایی کنار هم می‌نویسیم. در صورت نیاز می‌توان هر عملیات جبری را روی اعداد انجام داد. برای رسم نمودار با انتخاب داده‌های مورد نظر از قسمت Insert گزینه‌ی Chart را انتخاب کرده و نوع نمودار را که معمولاً Scatter مناسب می‌باشد، انتخاب می‌کنیم. برای رسم خطی با بهترین شیب، با راست کلیک کردن بر روی نقاط نمودار و انتخاب Add Trendline می‌توان بهترین خط راست را از میان نقاط تجربی گذراند. برای نشان دادن شیب خط و همچنین خطای شیب بر روی نمودار باید از منوی Option گزینه‌های زیر را انتخاب کنیم:

Display Equation on Chart & Display R-squared Value on Chart

خطای شیب با کمیتی به صورت R^2 داده می‌شود. در واقع اگر دو سری کمیت اندازه‌گیری شده‌ی (x, y) داشته باشیم و این داده‌ها را با یک منحنی به صورت $Y = f(x)$ برازش کنیم، می‌توانیم از مفهومی به نام رگراسیون (R^2) برای بررسی میزان انطباق بین داده‌های تجربی و تئوری استفاده کنیم. در واقع این کمیت به صورت زیر است:

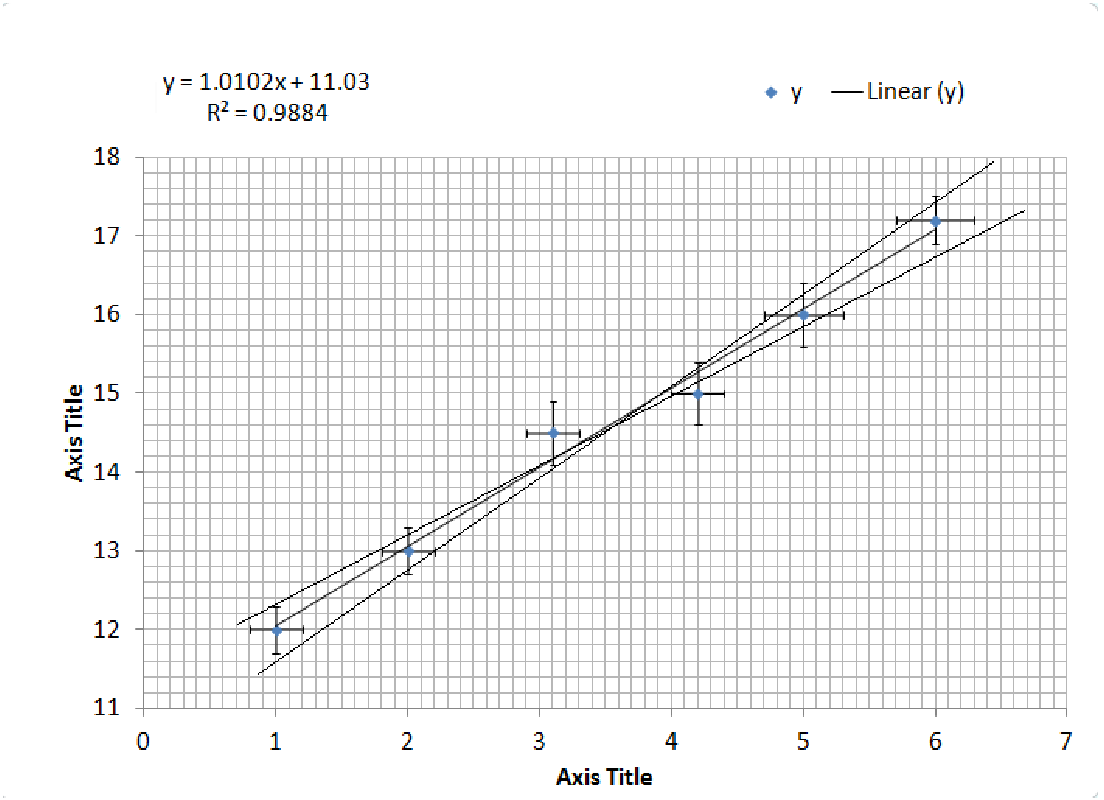
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}$$

که در آن $\bar{y}$ میانگین مقادیر y اندازه‌گیری شده است. اگر y_i و Y_i یکسان باشند، مقدار R^2 برابر با یک خواهد بود و در این حالت بهترین برازش وجود دارد. با داشتن مقدار خطای اندازه‌گیری برای هر یک از داده‌های محورهای افقی و عمودی می‌توان معیار دیگری را نیز برای تعیین خطای شیب نمودار مورد بررسی قرار داد. برای این منظور مقادیر خطا (همانند جدول) در دو ستون جدا برای داده‌های محورهای افقی و عمودی اضافه

می‌گردد. برای قرار گرفتن این خطاها بر روی نمودار، از منوی Chart Tools گزینه‌ی Layout را انتخاب کرده وError Bars را اضافه می‌کنیم. با کلیک راست بر روی Error Bars ایجاد شده (به صورت افقی و عمودی) می‌توانیم از قسمت Customize مقادیر اصلی واقع در جدول را لحاظ کنیم. همچنین با انتخاب Axis Titles از منوی Layout می‌توان عناوین محورهای مختصات را نیز اضافه کرد. با کلیک راست روی محورهای مختصات و انتخاب گزینه‌ی Gridlines می‌توان صفحه‌ی نمودار را به صورت شطرنجی رسم کرد. بعد از تکمیل نمودار آن را

چاپ کرده و با استفاده از خط‌کش خطوط بیشترین و کمترین شیب ممکن که از تمام مستطیل‌های خطا می‌گذرد را به صورت دستی رسم کرده و با محاسبه‌ی مقادیر آنها خطای اندازه‌گیری شیب که برابر با نصف تفاضل بیشترین و کمترین شیب است را به دست آورید. توجه کنید که برای رسم نمودارها به موارد فوق توجه نموده و عناوین محورها را همراه با واحدهایشان به درستی بنویسید.

x	y	Δx	Δy
1	12	0.2	0.3
2	13	0.2	0.3
3.1	14.5	0.2	0.4
4.2	15	0.2	0.4
5	16	0.3	0.4
6	17.2	0.3	0.3



آزمایش ۱ : طرز کار با وسایل اندازه‌گیری

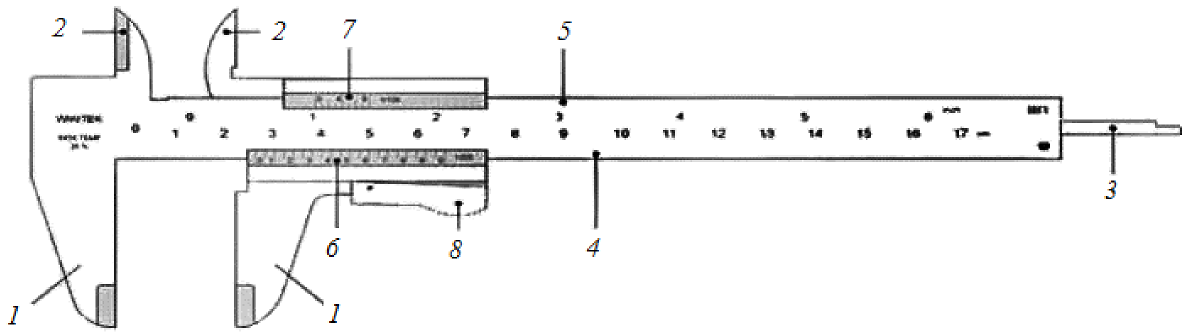
هدف: آشنایی با وسایل اندازه‌گیری مثل کولیس، ریزسنج، گوی‌سنج، ترازو و زمان‌سنج.

دانش فیزیک مبتنی بر آزمایش، تجربه و اندازه‌گیری است. در حالت کلی اندازه‌گیری را می‌توان به دو روش مستقیم و غیرمستقیم انجام داد. در اندازه‌گیری مستقیم می‌توان مستقیماً به اندازه‌ی کمیت (طول، جرم و زمان) دست یافت. ولی در اندازه‌گیری غیرمستقیم ابتدا کمیت‌هایی که مستقیماً با وسایل اندازه‌گیری قابل اندازه‌گیری هستند را اندازه گرفته و سپس با توجه به قوانین یا تعاریف فیزیکی و انجام محاسبات جبری می‌توان به اندازه‌ی کمیت مورد نظر (حجم، چگالی و ...) دست یافت. قبل از اندازه‌گیری باید از دقت وسیله و سالم بودن آن اطمینان حاصل کرد. انتخاب وسیله‌ای برای یک اندازه‌گیری خاص بستگی به اندازه‌ی کمیت مورد نظر و دقت لازم برای اندازه‌گیری آن دارد. مثلاً برای اندازه‌گیری طول‌های بزرگتر از متر، از متر نواری و برای اندازه‌گیری طول‌های کمتر از یک متر، از خط‌کش و برای اندازه‌گیری طول‌های کوچکتر، از کولیس یا ریزسنج استفاده می‌شود.

آزمایش اول: اندازه‌گیری با کولیس

کولیس از ترکیب یک خط‌کش مدرج و یک ورنیه درست شده است. ورنیه که اولین بار توسط پیر ورنیه اختراع شد، درجه‌بندی خاصی است که روی شاخک لغزنده قرار دارد و دقت اندازه‌گیری را تا کمتر از میلی‌متر ممکن می‌سازد. به طور معمول n درجه‌ی ورنیه با $n-1$ درجه‌ی خط‌کش برابر است. کمترین درجه‌بندی روی خط‌کش میلی‌متر است. در این صورت ممکن است ۱۹ میلی‌متر به ۲۰ قسمت روی ورنیه تقسیم شود. یا ۹ میلی‌متر به ۱۰ قسمت روی ورنیه تقسیم شود. که در دو حالت اخیر دقت کولیس به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی‌متر خواهد بود. به طور کلی دقت کولیس از تقسیم کوچکترین درجه‌بندی روی خط‌کش (که یک میلی‌متر است) به تعداد تقسیمات روی ورنیه به دست می‌آید. بنابراین کولیسی که در آن ۴۹ قسمت روی خط‌کش به ۵۰ قسمت روی ورنیه تقسیم شده است، دارای دقت ۰/۰۲ میلی‌متر خواهد بود. از کولیس برای اندازه‌گیری

طول، قطر خارجی، قطر داخلی و عمق استفاده می‌شود. کولیس شامل خط‌کش ، ورنیه، شاخک‌های اندازه‌گیری قطر خارجی، شاخک‌های اندازه‌گیری قطر داخلی و زبانه‌ی عمق‌سنج است. بر روی شاخک لغزنده پیچ سفت کننده تعبیه شده است تا هنگام خواندن از لغزش ورنیه بر روی خط‌کش جلوگیری شود. به منظور حرکت دادن ورنیه روی خط‌کش، زیر ورنیه زایده‌ای به عنوان محل قرار گرفتن انگشت شصت دست راست تعبیه شده است.



۱- برای اندازه‌گیری قطر خارجی

۲- برای اندازه‌گیری قطر داخلی

۳- برای اندازه‌گیری عمق

۴- خط‌کش میلی‌متری

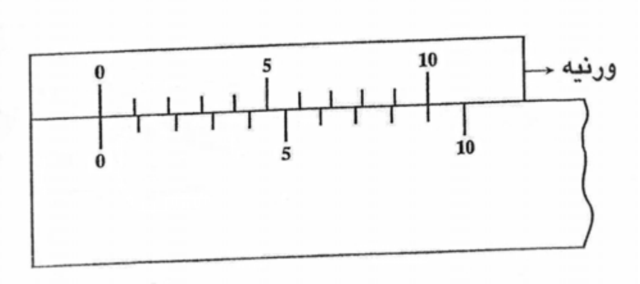
۵- خط‌کش اینچی

۶- فک متحرک برای اندازه‌گیری تا دهم میلی‌متر

۷- فک متحرک برای اندازه‌گیری تا دهم اینچ

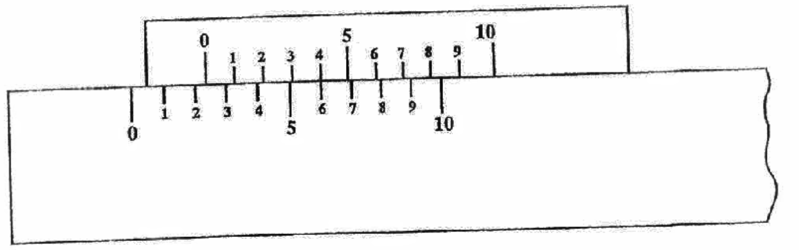
۸- زایده‌ی زیر ورنیه

قبل از اندازه‌گیری با کولیس ابتدا باید آن را تا انتها بست. در این حالت صفر خط‌کش باید بر صفر ورنیه منطبق باشد.



پس از اطمینان از سالم بودن کولیس و تعیین دقت آن، به راحتی می‌توان طول مورد نظر را اندازه‌گیری کرد. باید توجه کرد که اگر شاخک‌ها به اندازه‌ی d از یکدیگر فاصله بگیرند، زبانه‌ی عمق سنج نیز به اندازه‌ی d بیرون

می‌آید. اندازه‌ای که کولیس نشان می‌دهد شامل عدد مشخص شده بر روی خط‌کش تا صفر ورنیه است به اضافه‌ی حاصل ضرب دقت کولیس در شماره‌ی اولین خطی از ورنیه که بر درجه‌ای از خط‌کش منطبق است.



به عنوان مثال اندازه‌ای که کولیس نشان داده شده در شکل فوق نشان می‌دهد، به صورت زیر است:

$$2mm + 4 \times 0.1mm = (2.4 \pm 0.1)mm$$

روش انجام آزمایش اول:

۱- با استفاده از کولیسی که در اختیار دارید طول، عرض و ارتفاع مکعب فلزی را اندازه‌گیری کنید.

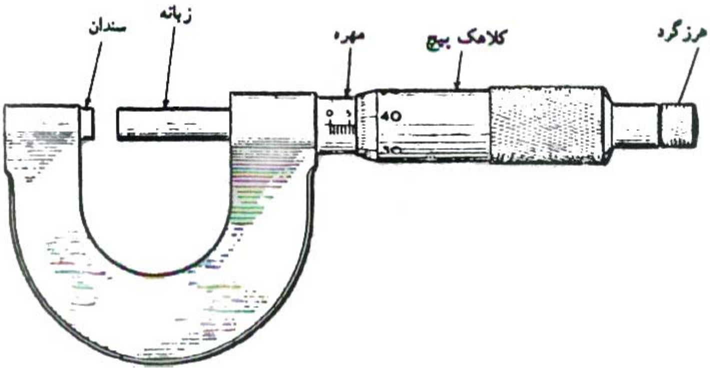
۲- با استفاده از فرمول حجم و مقادیر اندازه‌گیری شده، حجم مکعب فلزی را به دست آورید.

۳- مقدار خطای اندازه‌گیری برای حجم مکعب را به دست آورید.

$(a \pm \Delta a)mm$ طول	$(b \pm \Delta b)mm$ عرض	$(c \pm \Delta c)mm$ ارتفاع	$V(mm^3)$ حجم	$\Delta V = V\left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}\right)$
$(V \pm \Delta V)\ mm^3$				

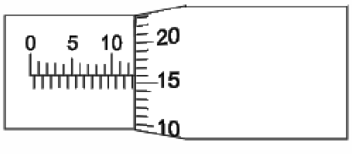
آزمایش دوم: اندازه‌گیری با ریزسنج

ریزسنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری قطر یا ضخامت با دقت بالا به کار می‌رود. ریزسنج از یک مهره و یک پیچ درست شده است. مهره استوانه‌ی ثابتی است که سطح خارجی آن مدرج شده و پیچ استوانه‌ی متحرکی است که لبه‌ی آن معمولاً به ۵۰ قسمت مساوی تقسیم می‌شود. در صورتی که با چرخش یک دور کامل پیچ، دهانه‌ی ریزسنج نیم میلی‌متر جابجا شود، می‌توان گفت که گام ریزسنج نیم میلی‌متر است. در این صورت هر درجه‌ی روی استوانه متحرک معادل $0.5mm / 50 = 0.01mm$ و معرف دقت ریزسنج است. پیچ هرزگرد ما را از تماس واقعی دهانه‌ی ریزسنج با جسم مطمئن می‌سازد.



قسمت‌های اصلی ریزسنج شامل فک ثابت (قسمت کمانی شکل و سندان) و فک متحرک متصل به استوانه‌ی ثابت مدرج و متحرک و همچنین پیچ هرزگرد است. قبل از اندازه‌گیری باید ریزسنج را تا انتها بست و از صفر آن اطمینان حاصل کرد. اگر مثلاً به خاطر فرسودگی دهانه‌ی سندان و میله‌ی فک متحرک، صفر ریزسنج تنظیم نباشد، باید مرجع اندازه‌گیری را مشخص کرد. سپس جسم مورد نظر را بین دهانه‌ی ریزسنج قرار داده و به آرامی استوانه‌ی متحرک را پیچانده تا به جسم مماس شود. هرگونه فشار اضافی باعث خطا در اندازه‌گیری می‌شود. برای اطمینان از مماس شدن میله‌ی فک متحرک با جسم، باید پیچ هرزگرد را چند دور پیچاند. بدین ترتیب، در لحظه‌ی تماس میله با جسم، انرژی مکانیکی که به ریزسنج وارد می‌شود،

به دستگاه فشار نیاورده و دقت عمل آن را کم نمی‌کند. با شنیدن صدای پیچ هرزگرد، می‌توان مطمئن شد که هر دو محور ثابت و متحرک، به سطح جسم رسیده و مماس بر آن هستند. در بسیاری از ریزسنج‌ها ضامن سفت‌کننده‌ای بر روی ریزسنج تعبیه شده است، تا از تغییر اندازه هنگام خواندن جلوگیری شود. اندازه‌ای که ریزسنج نشان می‌دهد، شامل عدد مشخص شده روی استوانه‌ی ثابت تا لبه‌ی استوانه‌ی متحرک است، به اضافه‌ی حاصلضرب درجه‌ای که استوانه‌ی متحرک نشان می‌دهد در دقت ریزسنج.



بدین ترتیب از شکل فوق عدد زیر به دست می‌آید:

$$12.5mm + 16 \times 0.01mm = (12.66 \pm 0.01)mm$$

روش انجام آزمایش دوم:

۱- با استفاده از ریزسنجی که در اختیار دارید، شعاع و طول استوانه‌ی فلزی را اندازه‌گیری کنید.

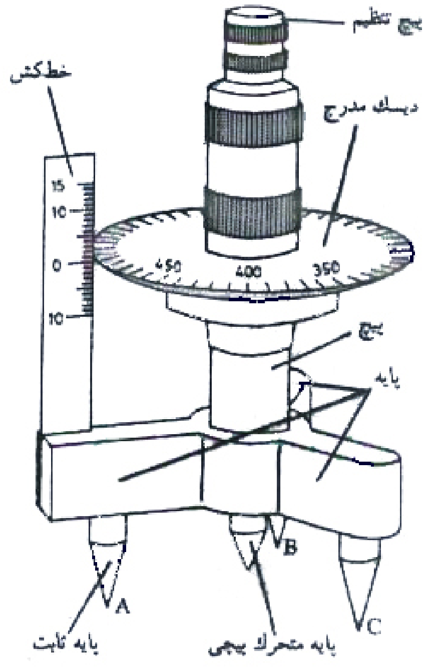
۲- با استفاده از فرمول حجم و مقادیر اندازه‌گیری شده، حجم استوانه‌ی فلزی را به دست آورید.

۳- مقدار خطای اندازه‌گیری برای حجم استوانه را به دست آورید.

$\Delta V = V\left(2\frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta h}{h}\right)$	$V(mm^3)$ حجم	$(h \pm \Delta h)mm$ ارتفاع	$(r \pm \Delta r)mm$ شعاع
$(V \pm \Delta V)\ mm^3$			

آزمایش سوم: اندازه‌گیری با گوی‌سنج (اسفرومتر)

از گوی‌سنج برای اندازه‌گیری شعاع انحنای سطوح کروی محدب یا مقعر استفاده می‌شود. گوی‌سنج از سه پایه‌ی ثابت (که با یکدیگر تشکیل مثلث متساوی الضلاع می‌دهند) و یک پایه‌ی متحرک تشکیل می‌شود. روی پایه‌ی متحرک یک دیسک یا قرص مدور مدرج و در کنار آن یک خط‌کش روی سه پایه نصب شده است.

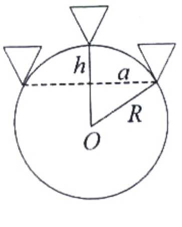


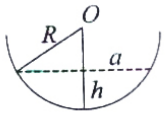
برای اندازه‌گیری شعاع انحنای یک سطح کروی ابتدا پایه‌های ثابت را روی یک صفحه‌ی تخت مرجع قرار می‌دهیم و سپس پایه‌ی متحرک را به صفحه‌ی تخت مرجع مماس کرده تا هر چهار پایه در یک سطح قرار گیرند. سپس درجه‌ی مبنا را تعیین می‌کنیم. آنگاه گوی‌سنج را بر روی سطح کروی گذاشته و مجدداً پایه‌ی ثابت و متحرک را بر آن مماس می‌کنیم. در این حالت بسته به اینکه سطح محدب یا مقعر است، پایه متحرک به اندازه‌ی ارتفاع h بالا یا پایین می‌رود. اگر a فاصله‌ی مرکز پایه متحرک تا پایه‌های ثابت باشد، شعاع سطح کروی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{a^2 + h^2}{2h} \qquad (۱)$$

پارامترهای دخیل در قرائت گوی‌سنج در شکل زیر نشان داده شده است.

برای خواندن h (تفاوت ارتفاع پایه‌ی متحرک در مقایسه با سطح تخت مرجع)، ابتدا باید دقت خواندن را تعیین کنیم. اگر دیسک مدور مدرج به ۵۰ قسمت تقسیم شده باشد و با پیچاندن یک دور کامل آن صفحه‌ی مدرج به اندازه‌ی ۰/۵ میلی‌متر جابجا شود،





دقت هر درجه‌ی روی صفحه‌ی مدرج $0.5mm/50 = 0.01mm$ خواهد بود. بدین ترتیب عددی که گوی‌سنج نشان می‌دهد، شامل عدد مشخص شده روی خط‌کش تا صفحه‌ی مدرج است به اضافه‌ی حاصل ضرب دقت صفحه‌ی مدرج در شماره‌ی عددی که از صفحه‌ی مدرج بر روی خط‌کش منطبق است. دقت شود موقعی که چهار پایه‌ی گوی‌سنج روی یک صفحه مماس باشد، صفر خط‌کش و صفر صفحه‌ی مدرج بر هم منطبق می‌شوند. اما وقتی چهار پایه‌ی گوی‌سنج روی یک سطح محدب یا مقعر مماس می‌شوند، صفحه‌ی مدرج بالاتر یا پایین تر از صفر خط‌کش قرار می‌گیرد. اگر در حالت محدب با پیچاندن صفحه‌ی مدرج در جهت افزایش اعداد حرکت کنیم، در حالت مقعر در جهت کاهش اعداد حرکت می کنیم. پس در حالت مقعر باید عدد نشان داده شده روی صفحه‌ی مدرج را از بیشترین عدد کم کنیم تا میزان چرخش صفحه‌ی مدرج را بیابیم.

فاصله‌ی مرکز پایه‌ی متحرک تا هر یک از پایه‌های ثابت (که باید با هم مساوی باشند) را می‌توان با کولیس اندازه‌گیری کرد.

روش انجام آزمایش سوم:

۱- با استفاده از گوی‌سنجی که در اختیار دارید، پارامتر h را برای عدسی‌های مقعر و محدب به دست آورید.

۲- با استفاده از کولیس پارامتر a را اندازه‌گیری کنید.

۳- با استفاده از فرمول (۱) و اندازه‌گیری‌های فوق، شعاع انحنای عدسی‌های مقعر و محدب را به دست آورید.

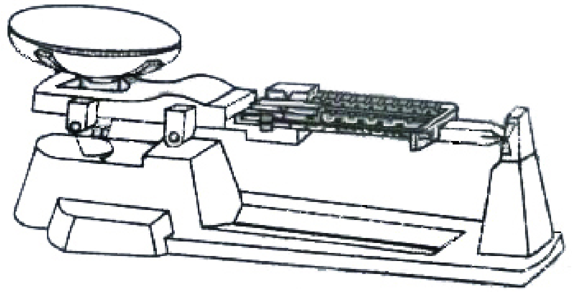
۴- خطای اندازه‌گیری برای شعاع انحنای عدسی‌های مقعر و محدب را به دست آورید.

اندازه‌گیری شعاع انحنای	$(h \pm \Delta h)mm$	$(a \pm \Delta a)mm$	$R(mm)$	$\Delta R = R\left(\frac{2a\Delta a + 2h\Delta h}{a^2 + h^2} + \frac{\Delta h}{h}\right)$
عدسی محدب				
عدسی مقعر				
عدسی محدب	$(R \pm \Delta R)\ mm$			
عدسی مقعر	$(R \pm \Delta R)\ mm$			

آزمایش چهارم: اندازه‌گیری با ترازو

اندازه‌گیری جرم با ترازو یکی از متداول‌ترین اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه است. حداقل مقدار قابل اندازه‌گیری با ترازو (دقت ترازو) به راحتی از روی درجه‌بندی‌ها قابل تشخیص است و حداکثر مقدار قابل اندازه‌گیری معمولاً روی ترازو نوشته شده است. در حالت کلی هنگام کار با ترازو باید توجه کرد که ابتدا ترازو در سطح افقی قرار گیرد. در صورتی که سطح اتکای ترازو کاملاً افقی نباشد، باید صفر ترازو را توسط پیچ تنظیم، تنظیم کرد. گاهی اوقات لازم است با گذاشتن وزنه‌های اضافی یا جابجا کردن وزنه‌های روی بازوها تعادل ترازو را برقرار کرد. در این حالت صفر دستگاه را باید خواند و در اندازه‌گیری‌ها منظور کرد. برای خواندن درجه‌های ترازو، بهتر است که با چشم از فاصله‌ی تقریباً نیم‌متری عقربه و به طور عمودی به آن نگاه کنیم.

ترازوی یک کفه‌ای سه اهرمی یکی از متداول‌ترین ترازوهای آزمایشگاهی است، دقت این ترازو ۰/۱ گرم است و با دو وزنه‌ی کمکی که به انتهای بازوها وصل می‌شود، می‌توان تا حداکثر ۲۶۱۰ گرم را اندازه‌گیری کرد. جرم وزنه‌های اضافی به گونه‌ای انتخاب شده است که به جرم اندازه‌گیری شده مقدار نیم کیلو یا یک کیلو اضافه می‌کند. ولی جرم خود وزنه‌ها این مقدار نیست. بدون وزنه‌های اضافی و با توجه به محدوده‌ی بازوهای مدرج می‌توان تا ۶۱۰ گرم را اندازه‌گیری کرد.



بعد از تنظیم صفر دستگاه قبل از اندازه‌گیری، هنگامی که جسم روی کفه قرار می‌گیرد، بر اساس قانون اهرم‌ها، وزنه‌های لغزنده را آنقدر جابجا می‌کنیم که شاخص انتهای اهرم‌ها مقابل خط نشانه ثابت شود. برای این منظور ابتدا تمامی وزنه‌ها را در حالت صفر قرار می دهیم، سپس وزنه‌ی سنگین‌تر را به انتهای اهرم نزدیک می‌کنیم تا در موقعیتی قرار گیرد که اگر یک پله‌ی دیگر جلو برویم اهرم پایین بیاید. این کار را با وزنه‌ی متوسط تکرار می‌کنیم و سپس با وزنه‌ی سبک این کار را ادامه می‌دهیم تا اهرم در حالت صفر قرار گیرد. با جمع زدن عدد وزنه‌های لغزنده و وزنه‌های روی بازوها، به راحتی می‌توان جرم نامعلومی را اندازه‌گیری کرد. برای خواندن مقدار اندازه‌گیری شده، مقدار نشان داده شده بر روی وزنه‌ی بزرگتر (مضرب ۱۰۰ گرم) را با مقدار نشان داده شده بر روی وزنه‌ی متوسط (مضرب ۱۰ گرم) جمع کرده و با مقدار نشان داده شده بر روی وزنه‌ی سبک (تا دقت ۰/۱ گرم) جمع می‌کنیم.

روش انجام آزمایش چهارم:

۱- ترازو را در مکان مناسبی قرار داده و صفر آن را به کمک پیچ تنظیم، تنظیم کنید. دقت کنید که پس از تنظیم نباید ترازو را جابجا کنید.

۲- جرم مکعب و استوانه‌ی فلزی را اندازه‌گیری کنید.

استوانه	مکعب	اندازه‌گیری جرم
		$(m \pm \Delta m)\ gr$

۳- با استفاده از مقادیر حجم که در قسمت قبل برای مکعب و استوانه‌ی فلزی به دست آورده‌اید و فرمول چگالی، چگالی مکعب و استوانه‌ی فلزی را به دست آورید.

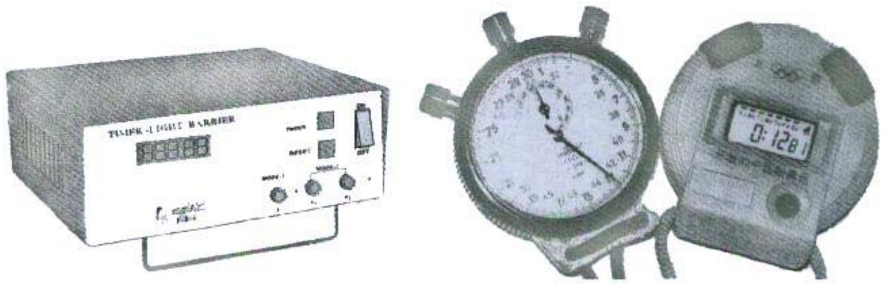
۴- مقدار خطای اندازه‌گیری چگالی را برای مکعب و استوانه‌ی فلزی به دست آورید.

$\Delta\rho = \rho\left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V}\right)$	$\rho\ (kg / m^3)$	**محاسبه‌ی چگالی**
		مکعب
		استوانه
	$(\rho \pm \Delta\rho)\ kg / m^3$	**مکعب**
	$(\rho \pm \Delta\rho)\ kg / m^3$	**استوانه**

آزمایش پنجم: اندازه‌گیری با زمان‌سنج (کرونومتر)

زمان‌سنج وسیله‌ای است که می‌تواند گذشت زمان را به ما نشان دهد. زمان‌سنج‌ها با توجه به کاربرد مورد انتظار در انواع و دقت‌های مختلفی ساخته می‌شوند. زمان‌سنج دیجیتالی دستی، زمان‌سنج عقربه‌ای و زمان‌سنج دیجیتالی رومیزی متداول‌ترین زمان‌سنج‌های مورد استفاده در آزمایشگاه هستند. دقت این

زمان‌سنج‌ها در حد کسری از ثانیه است که به راحتی می‌توان آن را از روی زمان‌سنج تشخیص داد. در این زمان‌سنج‌ها معمولاً دکمه‌ای برای شروع ثبت زمان تعبیه شده است که همان دکمه، کار خاتمه‌ی زمان‌گیری را نیز انجام می‌دهد. دکمه‌ی دیگر، دستگاه را دوباره به حالت صفر بازگردانده و آن را برای یک زمان‌گیری دیگر آماده می‌سازد. از زمان‌سنج دیجیتالی در بسیاری از آزمایش‌ها استفاده خواهیم کرد.



سؤالات

۱- در یک کولیس ۳۹ میلی‌متر روی ورنیه به ۲۰ قسمت تقسیم شده است. دقت اندازه‌گیری این کولیس چقدر است؟

۲- اگر گام پیچ ریزسنج یک میلی‌متر و کلاهک به ۵۰ قسمت تقسیم شده باشد، دقت آن چقدر است؟

۳- رابطه‌ی (۱) را اثبات کنید؟

۴- در صورتی که گام پیچ یک گوی‌سنج یک میلی‌متر و محیط دیسک آن به ۵۰ قسمت تقسیم شده باشد، دقت آن چقدر است؟