دانشکده فیزیک

دستورکار آزمایشگاه

فیزیک پایه ۱

ویژهٔ دانشجویان کارشناسی

رشته های مهندسی

ویرایش اسفند ۱۳۹۵

پیشگفتار ویرایش بهمن ۱۳۹۵

محتوی جزوه دستور کار آزمایشگاه فیزیک پایه ۱ نتیجه زحمات گروهی از مدرسین این درس عملی پایه ای در گذشته و حال است که در تطابق با اصول اساسی درس فیزیک پایه ۱ و با توجه به امکانات آزمایشگاهی تهیه، تدوین و به رشته تحریر در آمده‌است. این جزوه در مقاطعی از زمان بنا بر نیاز ، ضرورت و باز خورد از مدرسین و بعضاً دانشجویان ویرایش گردیده است. آخرین ویرایش با افزودن آزمایش آونگ بالستیک برای ترم پائیز، مهر ۱۳۹۵ صورت گرفت. قبل از آن نیز در سال ۱۳۹۳ به علت خراب شدن دستگاه آزمایش رسانش گرمائی، و جایگزین کردن آزمایش انبساط حرارتی جامدات، دستور کار آن آزمایش نیز تهیه و افزوده شد. در بهمن ۱۳۹۵ آزمایش قرقرهای مرکب جایگزین آزمایش اندازه‌گیری ضریب اصطکاک گردید. در عین حال ویرایش های مقطعی در برخی موضوعات دیگر جزوه از نظر مبانی فیزیکی و روش های اجرای آزمایش ها تلاش خوبی در این زمینه صورت گرفته است. بجاست که از همکارهای آقای ابوالفضل اسکندری، آقای احمدی، خانم دکتر پیری، خانم تقی‌زاده و خانم دکتر دباغ کاشانی در کاملتر شدن دستور کار آزمایش ها قدردانی شود.

همچنین در این ویرایش در حد امکان تلاش گردیده به روان سازی نوشتاری جزوه از نظر نثر ادبی با رعایت نکات دستور زبان فارسی و تکمیل برخی از کاستی‌های آن توجه شود. بی تردید نکاتی وجود دارند که ممکن است در این ویرایش مغفول واقع شده اند و ویرایش های بعدی نیاز خواهد بود. از هر گونه نقد سازنده و پیشنهاد اصلاحی که به غنای جزوه بیافزاید و موجب سهولت در انجام آزمایش توسط دانشجو گردد قطعاً تقدیر می‌شود.

غلامحسین کتابی

بهمن ماه ۱۳۹۵

پیش گفتار۱:

گرچه آزمایشگاه فیزیک پایه ۱ بر پایه آزمایش هایی است که تئوری آنها در درس فیزیک پایه ۱ ارائه و روشن شده است، با وجود این ضروری است که در هر آزمایش علاوه بر دستور کار مربوط به آن، باری دیگر فهم تئوری و مبنای نظری که آزمایش بر آن استوار است، بیان گردد. تجربه چندین بار ارائه این درس و بررسی انواع اشکالاتی که در فهم و درک دانشجویان در هر آزمایش به چشم می خورد، بررسی و بازبینی دوبارهٔ دستور کار موجود را امری ضروری و فوری می نمود. از سوی دیگر تغییر بعضی از آزمایشها و یا اضافه شدن آزمایشهایی تازه به سری آزمایشهای موجود این ضرورت را بیشتر می نمود. در نسخه حاضر تلاش شده تا هر آزمایش دوباره بازبینی شده و اشکالات آن تا حد ممکن برطرف گردد. به دلیل کمبود وقت بخشهای ابتدایی دستور کار یا بازبینی نشده اند و اگر هم شده اند بسیار اندک بوده است، بطوریکه بازبینی و باز نویسی آنها در آینده نیز لازم و ضروری بوده و بایستی انجام پذیرد. بی شک هنوز اشکالات دیگری وجود دارند که از دید نویسنده پنهان مانده اند، از طرفی باز بینی و باز نویسی انجام شده می تواند خود دارای اشتباهات و اشکالاتی باشد که بایستی برطرف گردند.

در پایان با سپاس از تمامی افرادی که در تهیه دستور کار اولیه تلاش نموده اند و در واقع گام اصلی را آنها برداشته اند، همچنین از تمام افراد و دانشجویانی که در این بازبینی مرا یاری نمودند از جمله آقای مهندس مهدیان و آقای محمد رضا نیکنام (در بخش خطاها) این پیشگفتار را به پایان برده و از همه خواهشمندم که با ارائه اشکالات و ایراداتی که در این نسخه می بینند در بهینه کیفی این دستور کار سهیم گردند.

محمدرضا زمانی

پیش گفتار۲:

دستور کار حاضر پس از بازنگری همه جانبه در جزوات قبلی، مطابق سر فصل های آزمایشگاه فیزیک پایه ۱ برای دانشجویان مهندسی تدوین شده است. در این جزوه تلاش شده است اطلاعات لازم برای انجام آزمایش به طور خلاصه توضیح داده شود. نکاتی که در اثر تجربیات چندین ساله آزمایشگاه فیزیک پایه ۱ این دانشگاه درک و مشاهده شده است و موجب فهم و سهولت در اجرای آزمایش توسط دانشجو می گردد، در دستور کار گنجانده شده است.

آزمایش ها در تطابق با درس تئوری فیزیک پایه ۱ به دو موضوع فیزیک مکانیک و فیزیک حرارت اختصاص یافته است.

بین تعداد آزمایش های مربوط به مکانیک و آزمایش های مربوط به حرارت توازن بیشتری ایجاد شده است، به گونه ای که با ادغام چند آزمایش، حداقل ۶ عنوان آزمایش جامع در مکانیک و ۴ عنوان آزمایش جامع در حرارت، در نظر گرفته شده است.

ضرورت ارتقاء کیفیت آزمایش ها به لحاظ مبانی تئوری مورد نیاز و نحوه ی اجرای وسیع تر آزمایش، درج نتیجه گیری و خواسته ها، مد نظر قرار گرفته است.

با این اعتقاد که اولین تعلیم آزمایشگاهی بر مبنای اندازه گیری و دقت در اندازه گیری و شناخت منابع خطا در حین اجرای آزمایش استوار است، فصل تعاریف و روش های محاسبه ی خطا برای اولین بار به دستور کار آزمایشگاه فیزیک پایه ۱ به عنوان مقدمه ای مفصل افزوده شده است.

سخن آخر این که نگرش ما در دستور کار جدید آشنا نمودن دانشجو با کاربرد دانسته های تئوری و تحقیق در مورد مفاهیم و اصول و قوانین پایه در درس فیزیک پایه ۱ بوده است. با این امید که دانشجو ذهنیت مقدماتی و ساده ای از پژوهش تجربه به دست آورد و هم چنان بر این باوریم که این دستور کار نیاز به تکمیل و معرفی آزمایش های دیگر در زمینه فیزیک پایه ۱ دارد.

بنابراین از هر گونه پیشنهاد اصلاحی توسط همکاران و دانشجویان محترم این درس به منظور رفع اشکالاتی که مشاهده می نمایند، استقبال و پیشاپیش تشکر می کنیم.

شایان ذکر است که تعدادی از آزمایش های مربوط به حرارت این جزوه، از دستور کار قبلی توسط آقایان باجور، مهرزاد استفاده شده است که بدین وسیله از همکاران فوق الذکر قدردانی می شود.

ضمناً از همکاری صمیمانه دانشجویان ***دانشگاه علم و صنعت ایران***، خانم ها غزال فاتح راد دانشجوی کارشناسی فیزیک، که نگارش، تنظیم جداول و اشکال را به صورت دست نویس و مریم هومن دانشجوی مهندسی فناوری اطلاعات (IT) که تایپ، تنظیم جداول، ترسیم نمودارها و عکس برداری دیجیتال، و آقای نادر طواف دانشجوی کارشناسی مکانیک و آقای سید سعید حسینی که ویرایش را بر عهده داشتند، قدردانی می گردد.

با تشکر

غلامحسین کتابی- مریم نوروزی

مقدمه

دستور کار آزمایشگاه فیزیک پایه ۱ شامل مجموعه‌ای از آزمایش های فیزیک مکانیک و فیزیک حرارت می‌باشد که با در نظر گرفتن برنامه ی آموزشی و امکانات موجود آزمایشگاه برای دانشجویان رشته‌های مهندسی و ریاضی تنظیم شده است.
در این دستور کار سعی شده که مطالب مربوط به هر آزمایش به طور خلاصه یادآوری شود. در این دستور کار تئوری آزمایش ها به اختصار شرح داده شده‌اند و فرض شده که دانشجویان، درس تئوری فیزیک پایه ۱ را گذرانده‌اند و لذا برای مرور بیشتر می توانید به کتاب های مبانی فیزیک پایه مراجعه کنید.

نکاتی که دانشجویان باید توجه نمایند :

برای این که بتوانید از کارهای آزمایشگاه نتیجه مطلوب به دست آورید، باید نکاتی چند را مورد توجه قرار دهید. از جمله :

احاطه به موضوع :

پیش از این که در آزمایشگاه حضور یابید باید دستور کار را به دقت بخوانید و مقدم بر آن فصولی از کتاب فیزیک پایه ۱ را که به عنوان مرجع معرفی شده، به دقت مطالعه نمائید. تا به موضوع مورد نظر کاملاً اشراف داشته باشید و بتوانید در آزمایشگاه تمام وقت خود را صرف آزمایش کنید.

نظم و ترتیب :

انجام صحیح آزمایش و امکان اخذ نتیجه مستلزم حفظ نظم و ترتیب است. پس از ورود به آزمایشگاه مستقیماً در پشت میز مربوط به آزمایش خود قرار بگیرید. رعایت نکات انضباطی از شرایط اولیه کار دسته جمعی است. همواره مواظب باشید تا مزاحمتی برای دیگران ایجاد نگردد. وسایل روی میز را با لیست وسایل مورد نیاز برای آزمایش مقایسه کنید. در صورت ناقص بودن وسایل از مسئول آزمایشگاه در مورد وسیله مورد نظر سؤال کنید. اسباب هائی که در اختیار شما قرار داده می‌شود اغلب گرانبهاست. خراب شدن و یا فقدان آنها صرف نظر از خسارت و اشکال تهیه آن، به پیشرفت کار شما لطمه می‌زند. دستگاه و وسایلی را که با کارکردن آن آشنا نیستید بدون اجازه مسئول آزمایشگاه به کار نبرید. هنگام به کار بردن اسباب ها اگر ناروائی و یا گیری در کار آن مشاهده می‌کنید هیچگاه زور و فشار روی قطعات آن وارد نکنید و از مسئول آزمایشگاه برای رفع اشکال آن کمک بگیرید.
اسباب های دقیق را باید با نهایت ظرافت و دقت به کار برد. حرکت دادن سریع، با آتش مواجه کردن و آلوده کردن ممکن است دستگاه را خراب کند و یا از دقت آن بکاهد.

روی میز کار باید کاملاً پاک باشد. اسباب هایی را که به کار می‌برید پس از پایان کار تمیز کرده و به همان طریق که در آغاز آزمایش در اختیار شما گذارده شده مرتب نموده و به مسئول آزمایشگاه تحویل دهید.

تنظیم و تقسیم کار :

وقت شما اغلب محدود است. باید اجرای آزمایش را طوری ترتیب دهید که بتوانید از وقتی که در اختیار شماست، حداکثر استفاده را بنمائید. اگر این تذکر مراعات نشود ممکن است نتوانید آزمایش را به موقع تمام کنید.

هنگامی که دو نفر با هم کار می‌کنید باید ضمن تقسیم کار وظیفه هر کس معلوم باشد. هر یک از شما در انجام آزمایش ها باید شرکت فعال داشته باشید.

علاقمندی به کار :

علاقه‌مندی به کار از تمام نکات مهم تر است چنانچه کار آزمایشگاه را تنها برای ادای تکلیف انجام دهید و علاقه و شوق به انجام آزمایش نداشته باشید نه تنها وقت خود را تلف می‌کنید بلکه مخل کار دیگران هم هستید. دانشجویی که برای انجام آزمایش به آزمایشگاه وارد می‌شود، باید نیت و آرزوی او آشنائی با روش تحقیق عملی باشد. اگر از آغاز با این نیت شروع به کار کنید و خود را به رعایت اصول و قواعد کار و نظم آزمایشگاه پایبند سازید بدون شک توفیق خواهید یافت.

گزارش کار :

گزارش کارهایی که آماده می‌کنید شامل دو گزارش کار «ساده» و «کامل» است. گزارش کار ساده را پس از پایان هر آزمایش تنظیم و طبق دستورالعمل به مسئول آزمایشگاه ارائه خواهید نمود.

هر دو نفر و یا هر گروه بایستی گزارش کار تهیه کنند و یک هفته پس از آزمایش، گزارش کار کامل خود را تحویل مسئول آزمایشگاه بدهند. چنانچه یک نفر به نمایندگی گروه گزارش کار را تهیه می‌کند، نمرهٔ این گزارش کار برای بقیه افراد گروه منظور می‌گردد. لذا لازم است گزارش کار با مشارکت و همکاری افراد گروه تهیه گردد.

مطالبی که لازم است در گزارش کارهای آزمایشگاهی گنجانده شود :

- هدف آزمایش.

- شرح کوتاهی از تئوری آزمایش.

- یادآوری فرمول های مربوط با معرفی هر یک از کمیت های استفاده شده و ذکر یکای آنها.

- شرح کوتاهی از روش و چگونگی آزمایش با درج نکاتی که در ضمن آزمایش متوجه شده‌اید.

- درج دقت هر یک از وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده.

- نوشتن یک نمونه از محاسبات و جایگذاری مستقیم ارقام در یک فرمول کلی و نگهداری ارقام با معنی در نتایج حاصل.

- مشخص کردن خطاهای آزمایش (خطاهای سیستماتیک و آماری).

- برآورد محاسبه خطاهای آزمایش با توجه به دقت وسایل اندازه گیری.

- رسم نمودارها.

- پاسخ به سئوالات دستور کار.

- بحث و نتیجه‌گیری. هر گزارشی با نتیجه‌گیری های کلی تمام می‌شود که معمولاً شامل مطالب زیر است : رسیدن به هدف آزمایش، برآورد خطاها، نظریات کلی، میزان سودمندی، و مقایسه روش ها، پیشنهادهای اصلاحی.

در روی گزارش کار نام و نام خانوادگی و شماره دانشجویی و تاریخ انجام آزمایش و تاریخ گـزارش را بنویسـید. چنانچه آزمایش توسط چند نفر انجام می‌شود، نام و نام خانوادگی افراد گروه که در انجام آزمایش حاضر بوده‌اند و عناوین آزمایش های انجام شده باید درج شود. در صورتیکه با دلیل قابل قبول از نظر مسـئول آزمایشـگاه در جلسه‌ای از آزمایش نتوانستید در آزمایشگاه حاضر شوید، بعد از غیبت به مسئول آزمایشگاه مراجعه کنید و در وقت تعیین شده آزمایش را انجام دهید.

توزیع نمره درس آزمایشگاه :

رعایت نظم و ترتیب و نکات انضباطی در آزمایشگاه و داشتن آمادگی قبلی و اجرای آزمایش حـدود ۱۰ درصـد، گـزارش کـار حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد و امتحان تئوری و عملی در پایان ترم حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد از کل نمره آزمایشگاه فیزیـک پایـه ۱ را به خود اختصاص می‌دهد.

خطاها و محاسبات آنها

سرچشمه خطاها در اندازه‌گیری های فیزیکی.

در هر آزمایش فیزیکی عوامل و منابع متعددی از خطا وجود دارند که موجب دورشدن نتایج آزمایش از اندازه حقیقی آن می‌شوند. بنابراین بایستی سعی نمود عامل خطا را صفر کرد و یا به حداقل رساند. در این صورت بسیار ضروری است که بدانیم خطا در اندازه‌گیری یک کمیت چقدر بوده است. اصولاً خطاها را به دو دسته : ***خطاهای معین یا سیستماتیک و خطاهای نامعین و یا اتفاقی*** تقسیم می‌کنند. در بیشتر موارد خطای آزمایش ترکیبی از این دو است.

الف : خطای سیستماتیک.

این خطا به طور منظم در یک سو صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر دارای علامت واحد است (مثبت یا منفی). خطای سیستماتیک معمولاً قابل تصحیح است و به سه گروه زیر تقسیم می‌شود :

۱- **خطای ناشی از دستگاه** که می تواند در اثر مدرج کردن غلط و یا ناموزونی دستگاه اندازه‌گیری باشد. یک وسیله اندازه‌گیری، ممکن است ذاتاً دارای خطا باشد و یا غلط ساخته شده باشد. مثلاً علائم میلیمتر روی یک خط‌کش چوبی ممکن است فواصلشان از ابتدا تا انتهای خط‌کش یکسان نباشد. بیشتر دستگاه های آزمایشگاه به اندازهٔ کافی دقیق ساخته نشده‌اند. لذا یا باید از خطای وسیله در آنها صرف نظر کرد یا تصحیح مختصری در این مورد در نظر بگیریم. بعضی وسایل مانند آمپرمتر یا ولت‌متری که در آزمایشگاه به کار می‌رود، تا ۳٪ ± پس از قرائت صحیح دقت دارد. بعضی جعبه‌های مقاومت تا ۱٪ ± دقت دارد و الی آخر. بعضی وسایل اندازه‌گیری که بر حسب درجه است در بعضی مواقع ممکن است با دقت بیشتری تنظیم شده باشد.

۲- **خطای آزمایشگر یا خطای انسانی** ناشی از شخص آزمایش کننده است. گاهی بیننده ممکن است در اندازه‌گیری مرتکب خطا شود. مثلاً در به کار بردن یک میکرومتر برای اندازه‌گیری های دقیق لازم است که فواصل بین علامت های روی لوله را حدس بزنیم. دقت به خصوصی لازم است تا این حدس تا سر حد امکان صحیح باشد. در خواندن وضع ستون جیوه یا وضع عقربه یک وسیلهٔ اندازه‌گیری الکتریکی ممکن است بیننده خطایی مربوط به زاویه پارولاکس مرتکب شود. مثلاً اگر کسی هنگام خواندن درجه‌بندی، از روی عادت سرش را به چپ برد. چنین خطایی ایجاد می‌شود. استفاده از آئینه در وسایل دقیق اندازه‌گیری خطای پارولاکس را به حداقل می‌رساند.

تعصبات و تصورات شخصی از قبیل این که کمیتی قبلاً اندازه‌گیری شده و دیگر احتیاج به اندازه‌گیری مجدد آن نیست یا اکتفا کردن به اولین آزمایش برای اندازه‌گیری، از انواع دیگر و مهم خطاهای انسانی است. همچنین خطای دیگری در مورد اشتباه خواندن اندازه و یا اشتباه ثبت کردن آن روی ورقه یادداشت از انسان سر می‌زند. خطاهای انسانی را با به کاربردن روشهای خوب در آزمایشگاه می توان به حداقل رساند.

۳- **خطای مبنی بر اسلوب شرایط آزمایشگاه یا مربوط به.** اگر دستگاهی تحت شرایط معینی (به طور مثال فشار و درجه حرارت) کالیبره شده و در شرایط دیگری (از فشار و درجه حرارت) به کار رود، بایستی تصحیحات لازم مربوط به این تغییر شرایط را در نظر گرفت. در غیر این صورت مرتکب خطا خواهیم شد.

در اندازه‌گیری انسان مایل است که تمام عوامل دخالت کننده را کنترل کند. اگر این عوامل کنترل نشوند یا تصحیح مناسبی برای آنها در نظر گرفته نشود، خطاهای اصولی تولید می‌شود. مثلاً در اندازه‌گیری با نوار فلزی یا پرگار که درجه حرارتش بالاتر یا پائین‌تر از حد معمول باشد، انسان ممکن است اندازه‌های خیلی کوچک یا خیلی بزرگ به دست آورد. یک خط‌کش چوبی که درجات اندازه روی آن اندکی خراشیده شده باشد همیشه مقدار زیادتری را نشان می‌دهد. یک پیچ اندازه‌گیری که به طور غیر متحدالشکلی کهنه شده باشد بدین ترتیب که بار بیشتری در یک نقطه آن و بار کمتری در یک نقطه دیگر اعمال شده یا یک سر آن بیشتر از سر دیگر سائیده شده باشد تولید خطای مبنی بر اسلوب می‌نماید. در آمپرسنج یا ولت‌سنج اگر عقربه ابتدا روی صفر نباشد، خطاهای اصولی تولید می‌کند. در اندازه‌گیری فشار با فشارسنج جیوه‌ای اگر انبساط جیوه را در اثر درجه حرارت در نظر نگیرند یا گودشدگی سطح جیوه در اثر فشار سطحی مورد توجه قرار نگیرد، خطاهای اصولی تولید می‌شود. وجود اندکی بخار آب در بالای سطح جیوه لوله بسته هواسنج خطای اصولی در خواندن فشار اتمسفر تولید می‌کند. در اندازه‌گیری برد اشعه α اگر فشار و درجه حرارت هوا در نظر گرفته نشود خطای اصولی تولید می‌کند. خطاهای اصولی را در عمل ممکن است به وسیله کنترل عوامل مهم تر به حداقل رساند یا به کلی آنها را از بین برد.

ب : خطاهای اتفاقی.

خطاهای اتفاقی خود به خود به صورت تغییر نتایج اندازه‌گیری های متوالی یک کمیت مشاهده می‌شود و ناشی از پدیده‌های آماری و تغییر مداوم شرایط آزمایش است. مانند تغییر ناگهانی و پیش‌بینی نشدهٔ دمای محیط، فشار جو، وقوع زمین‌لرزه، لرزش ساختمان آزمایشگاه در اثر عبور تریلی های بزرگ و یا پرواز هواپیما با ارتفاع کم از بالای آزمایشگاه و مانند اینها. این خطا برعکس خطاهای مذکور در بند الف که همیشه در سوی معینی صورت می‌گیرد، این خطاها گاه مثبت و گاه منفی هستند.

پس از آنکه کلیه خطاها از بین رفت باز نتیجه آزمایش صددرصد قابل اعتماد نیست و اگر آزمایش تکرار شود، نتایج اندازه گرفته شده در اطراف میانگین، اندکی بالا و پائین می‌رود و این اساس و هدف فرضیه خطاهای اتفاقی است که با تعداد زیادی آزمایش بهترین نتیجه را تخمین بزنند.

فرضیه خطاهای احتمالی.

هنگامی که تعداد زیادی اندازه‌گیری از یک کمیت به عمل می‌آید نتیجه‌های اندازه‌گیری همگی یکسان نیست و اختلافات اتفاقی در بین آنها وجود دارد. انسان معمولاً فکر می‌کند که میانگین این اندازه‌گیری ها به حقیقت نزدیک تر است تا هر یک از آنها به تنهائی. عموماً این طور است ولی باید گفت که میانگین یا حد وسط این اندازه‌گیری ها محتمل‌ترین اندازه آن کمیت است. تعداد ارقام مهم در نتیجه اندازه گرفته شده فقط یک اشاره تقریبی به صحت آن کمیت است. بیان دقیق‌تری از کلمه صحت در قواعد خطای احتمالی وجود دارد لذا روش تخمینی احتمالی را باید آموخت.

فرض کنیم $x_1, x_2, x_3, ..., x_i, ..., x_n$، مقادیر اندازه گرفته شده باشند و N تعداد آزمایش ها باشد. اگر میانگین مقادیر x_i ها را به $\bar{x}$ نمایش دهیم، در این صورت خواهیم داشت :

$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_i + ... + x_n}{N}$. که ممکن است آن را به صورت $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$ نوشت. در این جا i تمام مقادیر از ۱ تا n را به خود می‌گیرد.

در جدول ۱:

مجذور انحراف $(cm^2) \rightarrow (x_i - \bar{x})^2$

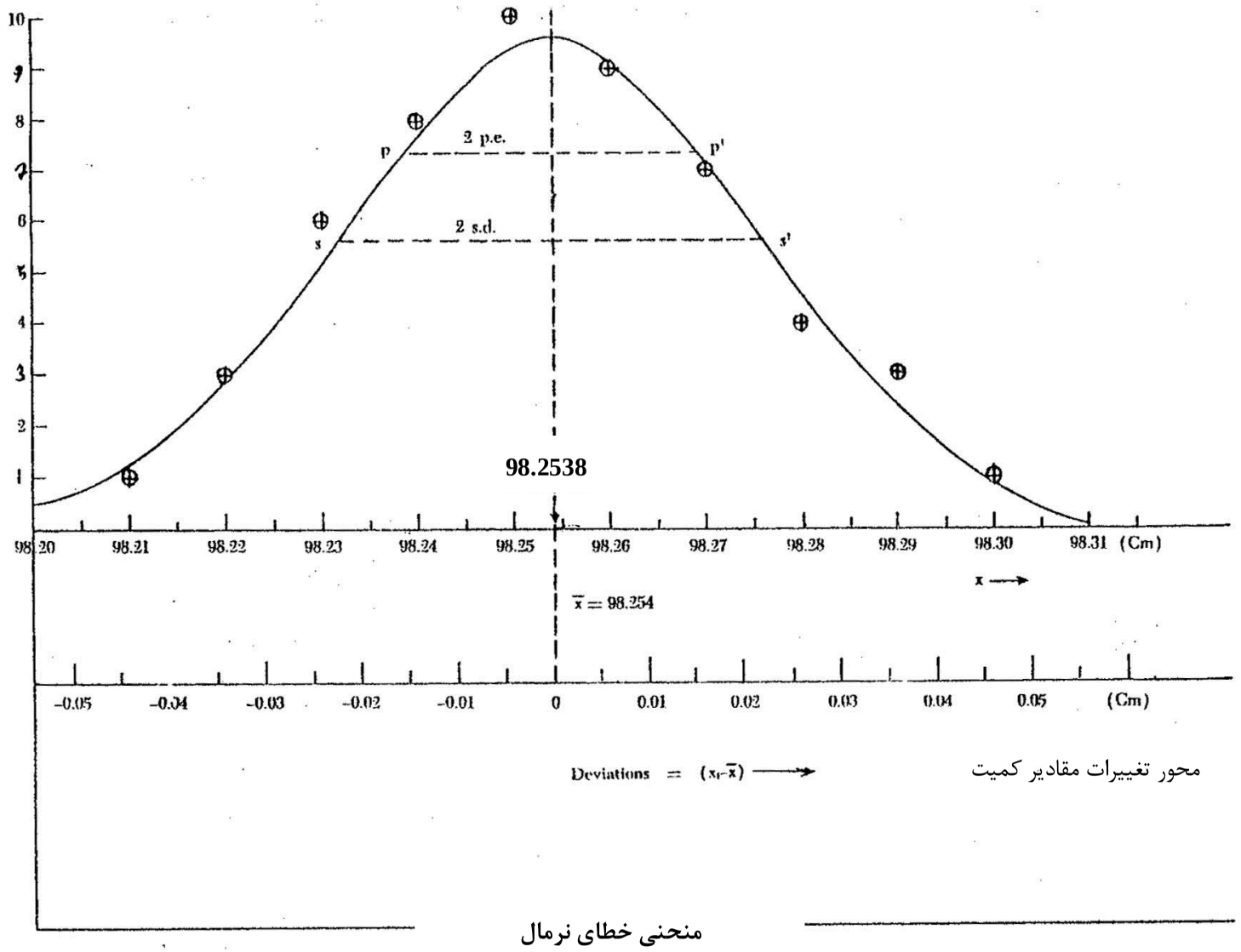
قدر مطلق انحراف $(cm) \rightarrow |x_i - \bar{x}|$

انحراف از میانگین $(cm) \rightarrow (x_i - \bar{x})$

مقادیر اندازه‌گیری شده $(cm) \rightarrow (x_i)$

$x_i(cm)$	$(x_i - \bar{x})(cm)$	$\lvert x_i - \bar{x}\rvert(cm)$	$(x_i - \bar{x})^2(cm^2)$
98.26	0.01	0.01	1×10^{-4}
98.28	0.03	0.03	9
98.24	-0.01	0.01	1
98.23	-0.02	0.02	4
98.22	-0.03	0.03	9
98.25	0.00	0.00	0
98.29	0.04	0.04	16
98.27	0.02	0.02	4
98.24	-0.01	0.01	1
98.26	0.01	0.01	1
98.21	-0.04	0.04	16
98.25	0.00	0.00	0
98.26	0.01	0.01	1
98.30	0.05	0.05	25
98.25	0.00	0.00	0
98.23	-0.02	0.02	4
98.27	0.02	0.02	4
98.24	-0.01	0.01	1
98.28	0.03	0.03	9
98.25	0.00	0.00	0
98.27	0.02	0.02	4
98.22	-0.03	0.03	9
98.23	-0.02	0.02	4
98.26	0.01	0.01	1
98.27	0.02	0.02	4
98.24	-0.01	0.01	1
98.22	-0.03	0.03	9
98.25	0.00	0.00	0
98.29	0.04	0.04	16
98.27	0.02	0.02	4
98.24	-0.01	0.01	1
98.23	-0.02	0.02	4
98.26	0.01	0.01	1
98.28	0.03	0.03	9
98.25	0.00	0.00	0
98.24	-0.01	0.01	1
98.26	0.01	0.01	1
98.27	0.02	0.02	4
98.26	0.01	0.01	1
98.24	-0.01	0.01	1
98.29	0.04	0.04	16
98.23	-0.02	0.02	4
98.24	-0.01	0.01	1
98.25	0.00	0.00	0
98.26	0.01	0.01	1
98.25	0.00	0.00	0
98.28	0.03	0.03	9
98.23	-0.02	0.02	4
98.26	0.01	0.01	1
98.27	0.02	0.02	4

جدول ۱



منحنی خطای نرمال

در جدول شماره «۱» در ستون اول مقادیر اندازه گرفته شده یک طول که پنجاه مرتبه اندازه‌گیری شده است، نوشته شده و در ستون دوم میزان انحرافات از مقدار متوسط و در ستون سوم قدر مطلق انحرافات (یعنی بدون در نظر گرفتن علامت) و در ستون چهارم مربع انحرافات ثبت شده است. منحنی تغییرات مقادیر طول را در مقابل تغییرات انحرافات از میانگین نشـــان می‌دهد. دیده می‌شود که اندازه‌هایی که نزدیک حد متوسط می باشند خیلی زیادتر از اندازه‌هایی است که از مقـدار متوسـط دورند.اگر نوسانات اندازه‌ها کاملاً اتفاقی باشد، آنگاه منحنی تجربی کاملاً بر منحنی خطاهای طبیعی یا منحنی گوس منطبـق می‌شود. که بر پایه خطاهای طبیعی احتمالی بنا شده است. اگر منحنی باریک باشد نشان می‌دهد کـه مقـادیر انحرافـات کـم بوده است و آزمایش ها با دقت بیشتری به عمل آمده‌اند و برعکس. ما نمی توانیم چیزی درباره صـحت آزمـایش هـا بگـوئیم چون مقدار حقیقی معلوم نیست و ممکن است خطاهای وسیله و اصولی در ضمن اندازه‌گیری رخ داده باشد.

حد متوسط یا میانگین مقادیر اندازه گرفته شده در جدول «۱» چنین است :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} = \frac{4912.69}{50} = 98.254 \ \ cm$$

انحراف از میانگین : تفاوت مقادیر اندازه‌گرفته شده از مقدار $\bar{x}$ را انحراف از میانگین نامند. آنها را باقی مانده نیز مـی‌نامنـد. برای تعداد بسیار زیادی آزمایش مجموع جبری انحرافات صفر است. میانگین انحرافات از تقسـیم مجمـوع قـدر مطلـق هـای انحرافات بر تعداد کل اندازه‌گیری های N به دست می‌آید. پس :

$$\text{میانگین انحرافات} = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{N} = \frac{|x_1 - \bar{x}| + \ldots + |x_n - \bar{x}|}{N}$$

میانگین انحرافات از حد متوسط برای جدول ۱ عبارت است از :

$$a.d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{N} = \frac{0.85}{50} = 0.017 cm$$

میانگین انحرافات نسبی عبارت است از :

$$\frac{a.d}{m} = \frac{0.017}{98.25} = 0.0173 \times 10^{-2}$$

میانگین انحرافات که بدین طریق به دست می‌آید گاهی میانگین خطا نامیده می‌شود. ولی این اصطلاح گـاهی گمـراه‌کننـده است. برای مقدار زیادی آزمایش اندازه‌گیری میانگین انحرافات متوسط $A.D$ برابر است با میـانگین انحرافـات از حـد وسـط تقسیم بر جذر تعداد آزمایش ها یعنی $A.D = \frac{a.d}{\sqrt{N}}$. این کمیت‌ها انحرافات یا پخش اندازه‌گیری های حـدود محتمـل‌تـرین مقدار را تعیین می‌کنند ولی خطای احتمالی را به ما نمی‌گویند.

مفهوم مفیدتری در فرضیه خطا، جذر متوسط مربع انحرافات می‌باشد که به آن انحراف معیار (s.d) گفته می‌شود و به طریق زیر محاسبه می‌شود :

هر یک از انحرافات را به توان دو می‌رسانیم که همگی اعداد مثبتی تولید می‌کنند. مجموع این توانها را بر تعداد آزمایش هـا تقسیم می‌کنیم تا میانگین مربع انحرافات به دست آید. آنگاه از این میانگین جذر می‌گیریم تا جذر متوسط مربع انحرافات به دست آید و اگر برای آزمایش های زیادی این عدد را به دست آوریم، این عدد همان انحراف از حد متوسط خواهد بود.

$$s.d = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + ... + (x_n - \bar{x})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

می توان نشان داد که برای تعداد زیادی آزمایش تقریباً $\frac{2}{3}$ آزمایش ها بین $\pm s.d$ از حد متوسط واقع خواهد بود. $\frac{1}{3}$ باقی مانده آزمایش ها از حد متوسط با $\pm s.d$ اختلاف خواهند داشت.

نکته مهم

باید توجه داشت که تعداد دفعات آزمایش N اگر زیاد نباشد، بجای N، N-۱ منظور می‌شود. ولی در آزمایش هایی که شمارش زیاد است. مثلاً شمارش اشعه یا ذرات رادیواکتیو، N منظور می‌شود. شمارش اشعه معمولاً از یک توزیع پوآسن پیروی می‌کنند که با تقریب خوبی می توان آن را یک توزیع گوس در نظر گرفت.

انحرافات مفروضات جدول «۱» چنین به دست می‌آید :

$$s.d = \sqrt{\frac{221\times10^{-4}}{50}} = 2.1\times10^{-2} cm$$

و انحرافات نسبی برابر است با :

$$\frac{s.d}{\bar{x}} = \frac{2.1\times10^{-2}}{98.25} = 0.021\times10^{-2}$$

برای تعداد زیادی آزمایش حد متوسط انحراف $S.D$ از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$S.D = \frac{s.d}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}}{N}$$

خطای احتمالی $(p.e)$ مقداری از انحراف است که برای آن احتمال انحراف هر آزمایش از آن برای بیشتر یا کمترش مساوی باشد. نیمی از اندازه‌ها انحرافشان بین $p.e+$ و $p.e-$ است. می توان نشان داد که خطای احتمالی تقریباً $\frac{2}{3}$ انحراف مأخذ خواهد بود.

$$p.e = 0.6745 s.d$$

خطای احتمالی نیز مانند میانگین انحراف مفهومی درباره پخش مشاهدات آزمایش به ما نشان می‌دهد. خطای احتمال اندازه‌های جدول «۱» چنین به دست می‌آید.

خطای احتمالی مطلق = $0.6745\ s.d = 0.67(2.1\times10^{-2}) = 1.4\times10^{-2}\ cm$

خطای احتمالی نسبی = $0.6745\ \frac{s.d}{\bar{x}} = \frac{0.67(0.021)}{98.25} = 0.014\%$

در دیاگرام ss' نماینده دو برابر انحراف مأخذ از حد متوسط و pp' نماینده دو برابر خطای احتمالی است. یک منحنی مرتفع و باریک نشان می‌دهد که خطای احتمالی کم و بنابراین دقت آزمایش بیشتر بوده است. یک منحنی پست و پهن نشان می‌دهد که خطای احتمال زیاد بوده و دقت آزمایش کم بوده است. چون حد وسط یا میانگین تعدادی آزمایش همیشه به

کار برده می‌شود خطای احتمال متوسط $P.E.M$ همیشه مورد توجه است. می توان نشان داد که $P.E.M$ از تقسیم $p.e$ بـر جذر کل دفعات آزمایش به دست می‌آید.

$$P.E.M = \frac{p.e}{\sqrt{N}}$$

برای اندازه‌های جدول «۱» :

$$P.E.M = \frac{0.014\%}{\sqrt{5}} = 0.002\%$$

عدم قطعیت یا خطای مطلق و نسبی :

عدم قطعیت مطلق در یک اندازه‌گیری معمولاً کوچک ترین درجه تقسیماتی است که مستقیماً در روی وسـیله انـدازه‌گیـری خوانده می‌شود. بنابراین خطای مطلق در اندازه‌گیری با یک خط‌کش میلیمتری عبارتست از ۰٫۱سانتی متر و یا یک میلیمتر. از تقسیم خطای مطلق بر مقدار واقعی کمیت مورد سنجش خطای نسبی به دست می‌آید. البته در این تقسـیم بایـد واحـدها یکسان باشند. صد برابر خطای نسبی را درصد خطای نسبی گویند. در بعضی موارد اصطلاح ***خطا*** با کلمـه ***اشـتباه***، متـرادف می‌شود. در بسیاری موارد خطای نسبی بسیار مهم تر از خطای مطلق است. اگر طول میله‌ای را با خط‌کش اندازه‌گیری کـرده و عدد ۲۵۱ به دست آوریم، خطای یک میلیمتر در این جا خیلی کم اهمیت‌تر از خطای یک میلیمتری است که قطـر همـان میله را که مثلاً پنج میلیمتر است اندازه گرفته‌ایم. در حالت اول خطای نسبی۰٫۴٪ و در حالت دوم ۲۰٪ است. خطای نسـبی از این لحاظ نیز مهم است. که از روی آن می توانیم خطای کمیتی را که نتیجه حاصل ضرب یا خـارج قسـمت چنـد کمیـت اندازه‌گیری شده است به دست آوریم. عموماً در مواقعی که با یک جمع یا یک تفاضل سروکار داریم خطای مطلـق را در نظـر می‌گیریم و هنگامی که با حاصل ضرب یا خارج قسمت سروکار داریم خطای نسبی را در نظر می‌گیریم.

اشتباه را در اندازه‌گیری ها این چنین تعریف می‌کنند : تفاوت بین مقدار حقیقی کمیت و مقدار اندازه‌گیری شده. در بسیاری اندازه‌گیری ها عملاً مقدار حقیقی کمیت را نمی‌دانیم و بدین جهت نمی توانیم مقدار خطا و درصد آن را بیابیم. با وجود ایـن ما نیاز داریم که صحت نتیجه را تخمین بزنیم. دو اصل در این تخمین خیلی مفید اسـت. یکـی کوچـک تـرین درجـه‌بنـدی وسیله اندازه‌گیری و دیگری تکرار اندازه‌گیری ها. اگر کوچک ترین درجات یـک خـط‌کـش یـک میلیمتـر باشـد خطـای هـر اندازه‌گیری با این خط‌کش در حدود یک میلیمتر مـی‌شـود. اگرچـه ممکـن اسـت مقـدار کوچـک تـر از میلیمتـر را هـم در اندازه‌گیری تخمین بزنیم، با وجود این همان اندازه خطا در اندازه‌گیری وجود دارد. که ما کوچک ترین درجه تقسیم خط‌کش را به عنوان خطا انتخاب کرده و درصد آن را تعیین کنیم. اگر طولی را چند بار اندازه بگیریم و نتیجه اندازه‌گیری ها اختلافـی در حدود یک میلیمتر داشته باشند ما اطمینان پیدا می‌کنیم که نتیجه تا حد یک میلیمتر تقریب درست است. با وجـود ایـن چندین بار اندازه‌گیری ممکن است همیشه با حد کوچک ترین درجه وسیله اندازه‌گیری توافـق نداشـته باشـد. ممکـن اسـت طولی را یک دفعه ۴۶۴۳ میلیمتر و دفعه دیگر ۴۶۵۰ میلیمتر اندازه بگیریم. ولی فعلاً ما همان کوچک ترین درجـه و وسـیله اندازه‌گیری را به عنوان خطای تخمینی قبول می‌کنیم و بدین ترتیب باید بدانیم که خطای حقیقی احتمالاً بزرگتر از کوچـک ترین تقسیمات وسیله اندازه‌گیری است.

ارقام مهم :در ثبت مشاهدات همیشه لازم است که همه ارقام مورد اطمینان را یادداشت کنیم. مثلاً فرض کنید با وسیله‌ای که تا صدم سانتی متر را می‌سنجند طولی را اندازه گرفته‌ایم و ۵۰,۰۰سانتی متر به دست آمده است. این نتیجه را به طور حتم و یقین نباید ۵۰ یادداشت کنیم. زیرا در این صورت به نظر خواهد رسید که این عدد یک عدد تقریبی است و ممکن است ۴۹ یا ۵۱ بوده. در حالی که وقتی آن را ۵۰,۰۰ ثبت کنیم معنایش این است که با در نظر گرفتن خطا مقدار کمیت بین ۴۹,۹۹ و ۵۰,۰۱ سانتی متر می‌باشد. به عبارت دیگر وقتی می‌نویسیم ۵۰,۰۰ معلوم می‌کند که آخرین رقم مورد اطمینان از طرف چپ چهارمین رقم آن است. در حالی که وقتی می نویسیم ۵۰ فقط دو رقم مهم را در نظر گرفته‌ایم.
شماره ارقام مهم به وضع قرار گرفتن نقاط اعشاری ربطی ندارد. دو عدد۵۱,۵ و۰,۰۰۵۱۵ سانتی متر هر دو، سه رقم مهم دارند و هر دو تا ۰٫۲٪ تقریب اندازه‌گیری شده‌اند. بهترین طریقه معرفی شماره ارقام مهم یک کمیت این است که ارقام مهم را نوشته و ممیز را بعد از اولین رقم می‌نویسیم و سپس آن را در قوای مثبت یا منفی از عدد ده ضرب می‌کنیم. مثلاً اگر جرم جسمی ۲۵۰۰۰ گرم اندازه‌گیری شده باشد و سه رقم آن مهم باشد باید آن را این طور بنویسیم: $2.50\times10^{4}\,gr$
شماره ارقام مهمی که یک کمیت به وسیله آنها نشان داده می‌شود اشاره‌ای تقریبی از صحت آن کمیت تا آنجا که دانسته شده است می‌باشد.

ترکیب اندازه‌گیری ها :

بسیاری از کمیت‌ها از ترکیب چند اندازه‌گیری به دست می‌آیند. مثلاً سرعت از تقسیم فاصله اندازه‌گیری شده بر زمان اندازه گرفته شده به دست می‌آید. برای فهمیدن این که چند رقم از ارقام جواب صحیح است و تا چه وقتی باید کمیت های مختلف را اندازه‌گیری کرد نکات زیر باید مورد توجه دانشجو واقع شود.

مجموع و تفاضل :

مقادیری که به یکدیگر افزوده می‌شوند و یا از یکدیگر تفریق می‌شوند بایستی رقم اعشارشان یکی باشد. صرف نظر از این که ارقام مهم آنها با هم مساوی باشد یا نه. رقم اعشار قابل اعتماد حاصل جمع و یا تفاضل کمیت‌ها نباید از رقم قابل اعتماد کمترین کمیت بیشتر باشد.

حاصل ضرب و خارج قسمت :

مقادیری که بر هم تقسیم یا در هم ضرب می‌شوند باید با یک دقت اندازه‌گیری شوند و رقم اعشارشان یکی باشند. رسم بر این است که معمولاً یک رقم غیرمهم را در تمام محاسبات تا به دست آوردن آخرین نتیجه باقی می‌گذارند و باید توجه داشت که در تقسیم‌ها با اعشار رفتن زیاد چیزی بر دقت آنها نمی‌افزاید. ارقام قابل اعتمادی که در حاصل ضرب یا خارج قسم به دست می‌آیند نباید بیشتر از ارقام مهم کمترین رقم قابل اعتماد (مهم) ضرب و تقسیم باشد. در حذف کردن ارقام غیرمهم اگر اولین رقم حذف شده کمتر از ۵ باشد ارقام باقی مانده تغییر نمی‌کند ولی اگر اولین رقم حذف شده بیشتر از ۵ باشد رسم بر اینست که یک واحد بر آخرین رقم باقی مانده اضافه می‌کنند و نیز اگر آخرین رقم باقی مانده زوج باشد، یک واحد به آن اضافه می‌کنند ولی اگر آخرین رقم فرد باشد به آن دست نمی‌زنند.

به عنوان مثال فرض کنید که سرعت یک جت را در فاصله‌ای حدود یک میل بخواهیم اندازه بگیریم. عدد ۵۲۸۰,۰ پا، عدد خیلی دقیقی است که شامل پنج رقم مهم است. یعنی تا یکدهم فوت دقت دارد. وسایل اندازه‌گیری مناسبی وجود دارد که می تواند با این دقت هنگامی که هواپیما از ابتدای اندازه‌گیری تا انتهای آن عبور می‌کند را اندازه بگیرد. با کرونومتر دقیق هم‌زمان دقیق این مسافت را اندازه می‌گیریم و زمان ۴,۳ ثانیه به دست می‌آید. سپس سرعت متوسط هواپیما باید $V=\frac{d}{t}=\frac{5280.0}{4.3}$ به دست آید. می‌بینیم که اکنون در سومین رقم مهم سرعت اختلاف به دست آمد. بنابراین در حالت اول چون سومین رقم مهم زمان را نمی‌دانستیم. پس حق نداشتیم سومین رقم را تعیین کنیم. می‌بینیم که وقتی سومین رقم مهم زمان تعیین می‌شود سومین رقم سرعت کاملاً متفاوت می‌شود. طبق قاعده‌ای که در بالا گفته شد در حالت اول سرعت به دست آمده را باید به صورت 1.2×10^3 بنویسیم. در صورتی که در حالت دوم باید تا سه رقم مهم آن را نوشت:

$v=1.23\times10^3$

هنگامی که یک کمیت به توان عددی برسد خطای نسبی آن در عدد توان ضرب می‌شود. مثلاً حجم کره برابر است با $\frac{4}{3}\pi r^3$. اگر r با تقریب ۰,۵٪ اندازه گرفته شده باشد خطای v برابر است با:

$3\times0.5\%=1.5\%$

به عنوان مثال : اگر ستون استوانه‌ای شکلی از مایع به قطر ۰,۱ سانتی متر را با خطای مطلق ۰,۰۱ سانتی متر یا خطای نسبی ٪ ۱ و نیروی ۲۵۵,۳ گرم با خطای نسبی ٪ ۰,۰۴ اندازه گرفته باشیم، خطای نسبی فشار چقدر است؟

فشار عبارت است از :

$$\text{فشار}=\frac{255.3gr}{\pi(0.55cm)^2}=268.6\,gr/cm^2 \qquad (\text{فشار= نیرو/مساحت})$$

$$\text{خطای نسبی}=\sqrt{(2\times1\%)^2+(0.04)^2}=2\%=5\quad gr/cm^2$$

چون سومین رقم نتیجه تا ۵ درصد خطا دارد. کافی است که فقط دو رقم مهم را بنویسید. $P=2.7\times10^2\ gr/cm^2$.

توجه کنید که مقدار خطای نتیجه را که بدین وسیله به دست آوردیم بزرگ ترین خطا است. مخصوصاً برای حالتی که یکی از عوامل اندازه گرفته شده با دقت کمتر از سایرین اندازه گرفته شده باشد. بنابراین هنگامی که چند کمیت اندازه گرفته می‌شوند کوشش بی‌فایده‌ای است که یکی از آنها را با دقت خیلی بیشتری هم اندازه می‌گرفتیم، با مقایسه با خطای نسبتاً زیاد مساحت تأثیری در اندازه صحیح فشار نداشت.

محاسبه خطای کمیت های مرکب.

اگر کمیتی به صورت تابعی از چند کمیت دیگر باشد، برای محاسبه خطای آن بسته به نوع خطا، خطای سیستماتیک یا اتفاقی به روش های زیر عمل می‌شود:

خطای سیستماتیک و قضیه خطاهای نسبی.

اگر کمیتی مانند g به صورت حاصل جمع یا تفریق چند کمیت دیگر باشد مانند :

$g=ka+k'b+k''c$

k و k' و k'' اعداد بدون دیمانسیون مثبت یا منفی هستند. خطای سیستماتیک برابر خواهد بود با (در تفاضل بین دو خطا بیشترین خطا برای حالتی است که علامت را مثبت در نظر بگیریم. لذا خطای تفاضل برابر خطا حاصل جمع است).

$$\Delta g = k\,\Delta a + k'\,\Delta b + k''\,\Delta c$$

اگر g به صورت حاصل ضرب یا تقسیم چند کمیت باشد برای محاسبه خطای سیستماتیک از روش دیفرانسیل‌گیری استفاده می‌کنیم. مثال :

$$g = ka^{\alpha}b^{\beta}c^{\gamma}$$

که k عدد بدون دیمانسیون و α و β و γ اعداد صحیح کسری مثبت و یا منفی هستند.

روش ۱

$$dg = f'(a)da + f'(b)db + f'(c)dc$$

$$f'(a) = \alpha k a^{\alpha-1}b^{\beta}c^{\gamma} = \frac{\alpha}{a}.g$$

$$f'(b) = \beta k b^{\beta-1}c^{\gamma}a^{\alpha} = \frac{\beta}{b}.g$$

$$f'(c) = \gamma k a^{\alpha}b^{\beta}c^{\gamma-1} = \frac{\gamma}{c}.g$$

در نتیجه به دست می‌آید :

$$\frac{dg}{g} = \alpha\frac{da}{a} + \beta\frac{db}{b} + \gamma\frac{dc}{c}$$

از این رابطه می توان نوشت :

$$\frac{\Delta g}{g} = \alpha\frac{\Delta a}{a} + \beta\frac{\Delta b}{b} + \gamma\frac{\Delta c}{c}$$

رابطه فوق به قضیه بیراهی های خطاهای نسبی معروف است. چون در همهٔ موارد دیفرانسیل‌گیری به این سادگی نیست، بهتر است ابتدا از طرفین رابطه لگاریتم گرفته و سپس آن را به صورت دیفرانسیل نوشت :

روش ۲

$$Lng = Lnk + \alpha Lna + \beta Lnb + \gamma Lnc$$

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta k}{k} + \alpha\frac{\Delta a}{a} + \beta\frac{\Delta b}{b} + \gamma\frac{\Delta c}{c}$$

چون k عدد ثابتی است و $\Delta k = 0$ بنابراین :

$$\frac{\Delta g}{g} = \alpha\frac{\Delta a}{a} + \beta\frac{\Delta b}{b} + \gamma\frac{\Delta c}{c}$$

بسته به نوع رابطه ای که بایستی خطای نسبی آن را به دست آورد از روش ۱ یا ۲ استفاده می کنیم. البته غالبا روش ۲ سریعتر مارا به محاسبه خطا رهنمون می سازد. مثالی از نحوه محاسبه خطای دیفرانسیلی در خواسته های آزمایش گرمای ویژه اجسام جامد آمده است.

خطای تابع لگاریتمی :

اگر $x = \log a$ باشد خطای مطلق برابر است با $\Delta x = \frac{\Delta a}{a}$ و خطای نسبی عبارت است از : $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta a}{a\log a}$

خطای اتفاقی :

اگر کمیت d برابر مجموع کمیت های b و c باشد (یا تفاضل آنها)، انحراف معیار کمیت d برابر خواهد بود با :

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma^2{}_b - \sigma^2{}_c}$$

σ_c و σ_b به ترتیب انحراف معیار کمیت های b و c هستند. اگر d برابر حاصل ضرب b و c باشد : $d = b^{\alpha}.c^{\beta}$

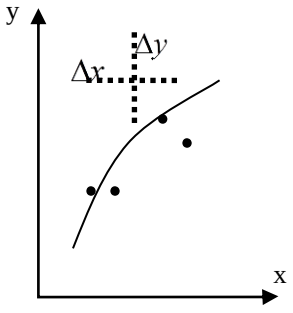
انحراف معیار کمیت d برابر است با :

$$\sigma_d = \pm\sqrt{\alpha^2\left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2 + \beta^2\left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2}$$

منحنی نمایش تغییرات نتایج آزمایش (رسم نمودار).

در مطالعه تجربی غالباً لازم می‌شود که نسبت بین کمیت های مشاهده شده را از راه منحنی نمایش تغییرات به دست آورند. رسم بر این است که در رسم یک منحنی، تغییرات متغیر مستقل را روی محور xها و تغییرات تابع را روی محور yها نشان دهند. مثلاً $y = f(x)$ معنایش این است که برای هر مقدار معینی از x مقداری برای y وجود دارد. یعنی y تابعی از x است. با رسم منحنی از روی نقطه‌یابی فوراً می توان نسبت بین دو کمیت تابع و متغیر را نشان داد. همیشه لازم نیست که محل تلاقی دو محور را صفر قرار دهیم. اندازه‌های روی محورها را ممکن است طوری انتخاب کنیم که تا آنجا که ممکن است منحنی در روی صفحه کاغذ بگنجد. معمولاً لازم است که آخرین رقم مهم اندازه گرفته شده نماینده یک دهم کوچک ترین تقسیمات محورهای مختصات باشد. هر یک از محورها را باید درجه‌بندی کرد و درجه‌ها نماینده کمیت های فیزیکی اندازه‌گیری شده هستند. هر یک از آزمایش ها که روی صفحه مختصات نشان داده می‌شود با علامت یک دایره که یک نقطه در مرکز آن است. نمایش داده می‌شود. اگر چند دسته آزمایش داشتیم، برای مفروضات هر یک از علامت جداگانه‌ای انتخاب می‌کنیم. مانند $\oplus$ یا $\otimes$ یا $*$.

رسم یک منحنی باریک بهترین حل نمایشی یک تابع است و یک وسیله ترسیمی از مشاهدات تجربی می‌باشد. ممکن است یک منحنی باریک از هیچ یک از نقاط علامت‌گذاری شده به وسیله آزمایش نگذرد. چون در هر یک از آزمایش ها خطایی وجود دارد. به طور کلی هر چقدر از این نقاط در یک طرف منحنی قرار گیرند، در طرف دیگر هم همان اندازه از این نقاط باید قرار گرفته باشند. در فضایی دورتر از منحنی باید نام منحنی، تعداد آزمایش ها، نام خودتان و همکارتان، تاریخ آزمایش را بنویسید و هر کمیت مربوطه که از روی منحنی حساب شده است باید نوشته شده باشد.



در عمل اندازه علامت ها که برای نشان دادن نقاط انتخاب می‌شوند می تواند خطای اندازه‌گیری را نشان دهد. ولی در بیشتر موارد خطای یک نقطه نمودار را توسط خطاهایی به موازات محورهای مختصات نشان می‌دهند. واحدها و بزرگی اعداد مختصات بایستی به طور واضح نشان داده شده و نمودارها به طور صحیح نامگذاری شوند. اگر نمودار به صورت یک خط یا شبه خط است، بهترین معادله خط را می توان با روش ترسیمی، مقدار متوسط و یا حداقل مربعات به دست آورد.

روش ترسیمی :

در این روش با در نظر گرفتن خطای هر نقطه، خط طوری رسم می‌شود که به طور نظری مجموع فواصل نقاطی که یک طرف خط قرار می‌گیرند از خط برابر مجموع فواصل نقاطی که طرف دیگر خط هستند باشد. پس از رسم خط در صورت لزوم می توان معادله آن را با استفاده از مختصات دو نقطه روی خط به دست آورد. (به عبارتی اگر منحنی را با فرض معلوم بودن مقادیر حقیقی x و y رسم کنیم، از تمام نقاط آزمایش عبور نمی‌کند. بلکه این نقاط اغلب در حوالی منحنی قرار دارند. باید منحنی را طوری رسم کرد که نقاط تجربی کم و بیش در طرفین منحنی قرار گیرند). به طور مثال اگر طی هفت

آزمایش مقادیر زیر برای N و θ با خطای ΔN و $\Delta\theta$ به دست آمده باشد، پس از مشخص کردن خطای هر نقطه، خطا را به روش ترسیمی رسم می‌کنیم.

(N عبارت از شماره اشعه است. پس خطاهای شمارش برابر است با $\sigma N=\sqrt{N}$. در این مثال فرضی زاویه‌ها را تا ۰٫۱ درجه می توان خواند.سپس خطای زاویه برابر است با ۰٫۰۵ درجه و چون قطر علامت دایره به کار برده شده برای مشخص‌کردن هرنقطه،این مقدار خطای زاویه رانشان می‌دهد،لازم نیست که ازخطوط دیگری برای مشخص کردن‌خطای‌زاویه‌استفاده شود.)

دو نقطه A و B روی خط نمودار در نظر می‌گیریم. با استفاده از مختصات آنها، ضریب زاویه خط و ثابت منحنی به دست می‌آید.

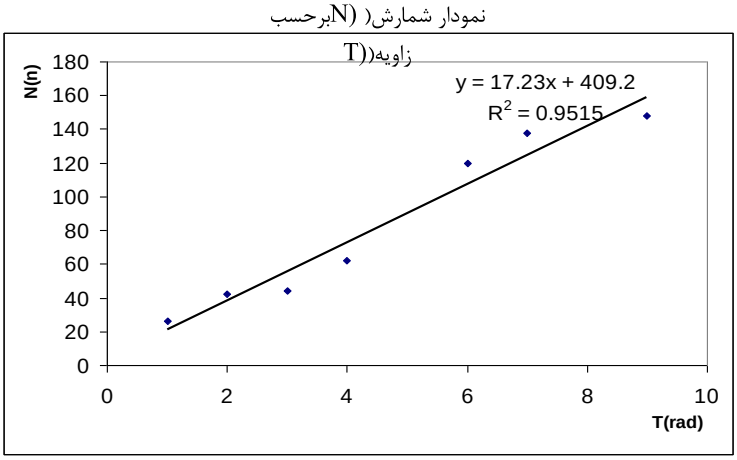
$$m=\frac{N_2-N_1}{\theta_2-\theta_1}=\frac{90-20}{5-1}=\frac{70}{4}=17.5$$

$$b=N_1-m\theta_1=20-17.5\times1=2.5$$

از این جا معادله خط به دست می‌آید:

$$N=17.5\theta+2.5$$

زاویه		شمارش	
θ	$\Delta\theta$	N	ΔN
۱	۰٫۰۵	۲۶	۵٫۱
۲	۰٫۰۵	۴۲	۶٫۵
۳	۰٫۰۵	۴۴	۶٫۶
۴	۰٫۰۵	۶۲	۷٫۹
۶	۰٫۰۵	۱۲۰	۱۰٫۹
۷	۰٫۰۵	۱۳۸	۱۱٫۷
۹	۰٫۰۵	۱۴۸	۱۲٫۱



روش مقدار متوسط :

این روش مبتنی بر آن است که مجموع اختلاف مقدار آزمایش (به طور مثال شمارش N در مثال قبل) که r عبارت است از $r = N - (m\theta + b)$. برای استفاده از این روش نتایج را به دو گروه تقسیم می‌کنیم از جمع این دو گروه دو معادله به دست می‌آید که از حل هم زمان آنها می توان m و b را به دست آورد. در مثال قبلی :

گروه اول

$$26 = m + b$$
$$42 = 2m + b$$
$$44 = 3m + b$$
$$112 = 6m + 3b$$

گروه دوم

$$62 = 4m + b$$
$$120 = 6m + b$$
$$138 = 7m + b$$
$$148 = 9m + b$$
$$468 = 26m + 4b$$

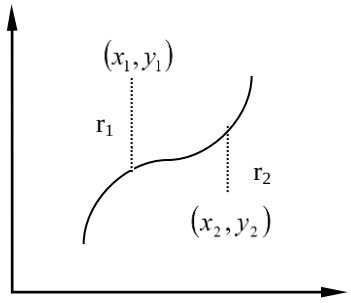
از این جا معادله خط به دست می‌آید :

$$\begin{cases} 112 = 6m + 3b \\ 468 = 26m + 4b \end{cases} \rightarrow m = 17.7 \quad , \quad b = 1.9$$

$$N = 17.7\theta + 1.9$$

روش حداقل مربعات :

برای اجتناب از رسم خطوط، سهمی‌ها و یا هر منحنی تقریبی دیگر برای یک حالت خاص، لازم است قراردادی برای تعریف بهترین خط مناسب، بهترین سهمی و غیره داشته باشیم. برای به دست آوردن یک تعریف ممکن، شکل زیر را که در آن نقاط با (x_1, y_1) و (x_2, y_2) و ... (x_n, y_n) داده شده‌اند در نظر می‌گیریم. برای هر مقدار x، مثلاً x_1، اختلافی بین y_1 و مقدار مربوطه روی منحنی وجود دارد. همان طور که روی شکل نشان داده شده است،این اختلاف را با r_1 نمایش داده‌ایم که می توان آن را با انحراف، خطا یا باقی مانده نامید. این مقدار می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. به همین ترتیب به ازاء مقادیر $x_n ... x_2$ انحراف $r_n ... r_2$ برای y به دست می‌آید. یک معیار مناسب بودن منحنی برای نتایج داده شده به وسیله مقدار $r_1^2 + r_2^2 + ... + r_n^2$ تعیین می‌شود.



اگر این مقدار کوچک باشد منحنی مناسب است و اگر بزرگ باشد منحنی مناسب نیست. پس بهترین منحنی، منحنی‌ای است که برای آن مقدار $r_1^2 + r_2^2 + ... + r_n^2$ مینیمم باشد. منحنی که دارای چنین خاصیتی باشد ***منحنی حداقل مربعات*** و خطی که این خصوصیت را دارا باشد، ***خط حداقل مربعات*** نامیده می‌شود.

خط حداقل مربعات : معادله خط حداقل مربعات تقریبی برای یک سری نقاط $(x_1, y_1) ... (x_n, y_n)$ به صورت $y = mx + b$ است. روی این خط مقدار y مربوط به نقاط $x_1, x_2, ..., x_n$ برابر $mx_1 + b, mx_2 + b, ..., mx_n + b$ می‌باشد. در صورتی که مقادیر حقیقی $y_1, y_2, ..., y_n$ است. بنابراین خط حداقل مربعات طوری خواهد بود که :

$$S = \left[(mx_1 + b - y_1)^2 + (mx_2 + b - y_2)^2 + ... + (mx_n + b - y_n)^2\right] = 0$$

S وقتی مینیمم است که مشتقات جزئی آن نسبت به m و b صفر باشد. یعنی:

$$\frac{\partial s}{\partial b} = 2\left[(mx_1 + b - y_1) + (mx_2 + b - y_2) + \ldots + (mx_n + b - y_n)\right] = ۰$$

$$\frac{\partial s}{\partial m} = 2\left[x_1(mx_1 + b - y_1) + x_2(mx_2 + b - y_2) + \ldots + x_n(mx_n + b - y_n)\right] = ۰$$

از این جا معادلات نرمال نتیجه می‌شوند :

$$Nb + m\sum x - \sum y = ۰$$

$$b\sum x + m\sum x^2 - \sum xy = ۰$$

که از آنها m و b مطابق زیر به دست می‌آیند :

$$m = \frac{\sum x \sum y - N\sum xy}{(\sum x)^2 - N\sum x^2}$$

$$b = \frac{\sum xy \sum x - \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - N\sum x^2} = \frac{\sum y - m\sum x}{N}$$

برای مثال قبل m و b از معادلات فوق به دست می‌آیند :

$$m = \frac{32 \times 580 - 7 \times 3508}{1024 - 7 \times 196} = \frac{-5996}{-348} = 17.2$$

$$b = \frac{3508 \times 32 - 580 \times 196}{1024 - 7 \times 196} = \frac{-1424}{-248} = 14.1$$

معادله خط به دست می‌آید :

$$N = 17.2\theta + 4.1$$

به منظور مقایسه مقادیر به دست آمده m و b با سه روش مختلف در زیر آمده است :

	m	b
روش ترسیمی	۱۷,۵	۲,۵
روش مقدار متوسط	۱۷,۷	۱,۹
روش حداقل مربعات	۱۷,۲	۴,۱

خطی که از روش حداقل مربعات به دست می‌آید، از خطوط دیگر به بهترین خط حقیقی نزدیکتر است. در ضمن برای دستیابی به سرعت عمل خوب ابتدا مقادیر x و y را به حافظه ماشین حساب خود سپرده و سپس با یک دستورالعمل خاص و فشردن یک دگمه مقادیر m و b را به دست آورید.(به دفترچه راهنمای ماشین حساب خود قسمت *Regression analysis* قسمت *Linear regression* مراجعه کنید.)

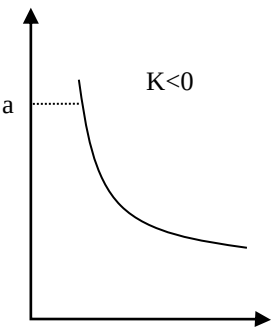
نکته : برای رسم منحنی‌ها بهتر است از کاغذهای میلیمتری با اشل معمولی در مواقع لزوم اشل لگاریتمی یا نیمه لگاریتمی استفاده شود. در کاغذهای میلیمتری هر یک از خانه‌های کوچک آن به ضلع یک میلیمتر است و دارای تقسیمات مشابه

روی دو محور عمود بر هم است. در روی این کاغذ هر نوع تابعی را می توان نمایش داد. توابعی که به صورت $y = mx + b$ می‌باشند، در روی این کاغذ به صورت خط خواهد بود. از کاغذ نیمه لگاریتمی معمولاً برای رسم توابعی که معادله آنها خطی نیست و دارای شکل نمایی هستند استفاده می‌شود. اگر لگاریتم کمیت های فیزیکی اندازه گرفته شده را محاسبه کنیم و روی محورهای مختصات اندازه‌های لگاریتمی کمیت ها را ثبت کنیم منحنی دقیق‌تر و بهتر به دست می‌آید. در یک کاغذ نیمه لگاریتمی محور xها درجه‌بندی معمولی شده و محور yها درجه‌بندی لگاریتمی شده است. مثلاً فاصله پنجمین فاصله روی محور yها متناسب با لگاریتم عدد پنج خواهد بود. روی صفحات لگاریتمی اعداد روی محور از یک تا ده (یا از ده تا صد و یا از صد تا هزار) درجه‌بندی شده‌اند. منحنی که در روی صفحه لگاریتمی رسم شده باشد، از روی آن می توان لگاریتم هر یک از نقاط اندازه گرفته شده را به دست آورد (بدون مراجعه به جدول لگاریتم). کاغذ لگاریتمی هم روی محور طول‌ها و هم روی محور عرض‌ها با لگاریتم اعداد درجه‌بندی شده است.

داریم : $y = a e^{kx}$ (۱)

اگر از رابطه (۱) لگاریتم گرفته شود : $\ln y = \ln a + kx$ (۲)

اگر مقادیر تابع (۱) را روی کاغذ میلیمتری رسم کنیم، نمودار نمایی به دست می‌آید. ولی چنانچه معادله (۲) را رسم کنیم، نمودار را به صورت خط راستی خواهد بود که با اندازه‌گیری شیب خط و همچنین نقطه‌ای که x آن صفر است می توان مقادیر k و a را به دست آورد. برای این که احتیاجی به لگاریتم گرفتن از مقادیر y نباشند می توان از کاغذهای چاپ شده‌ای که یک محورشان دارای تقسیمات لگاریتمی است استفاده کرد. (کاغذهای نیمه لگاریتمی). بنابراین توابعی که به صورت معادله (۱) هستند، وقتی روی کاغذ نیمه لگاریتمی خوانده می‌شوند، به صورت خط می‌شوند که نتیجه‌گیری از آن آسانتر می‌گردد. در این کاغذها با اندازه‌گیری شیب خط (با استفاده از رابطه مربوط به کاغذهای نیمه لگاریتمی که متعاقباً توضیح داده می‌شود) و همچنین نقطه‌ای که x آن صفر است، (امتداد خط محور عرض ها را در $x = 0$ در نقطه‌ای به عرض a قطع می‌کند) می توان k و a را به دست آورد.



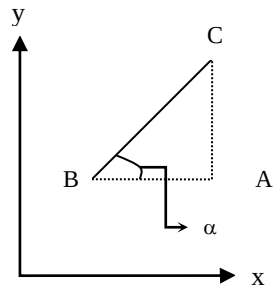
از کاغذهای تمام لگاریتمی برای رسم توابعی که معادله آنها خطی نیست و دارای شکل سهمی می‌باشند استفاده می‌شود. توابعی که به‌صورت $y = ax^n$ می‌باشند، چنان که در روی کاغذ میلیمتری نمایش داده شوند، معمولاً به صورت یک منحنی در می‌آیند. ولی اگر مقادیر مربوط به این معادله را روی کاغذی که دارای دو محور با تقسیمات لگاریتمی است نمایش داده شوند، نمودار حاصل به صورت خط راستی در می‌آید که به آسانی می توان درجه بستگی دو متغیر یعنی n و ضریب ثابت a را به دست آورد. برای اثبات این که نمایش معادله در روی کاغذی که دارای دو محور لگاریتمی است، به صورت یک خط راست در می‌آید، کافی است از طرف رابطه (۱) لگاریتم گرفته شود. با توجه به این که لگاریتم تابع y و متغیر x روی دو محور برده می‌شود، می توان نتیجه گرفت که نمودار حاصل باید خطی باشد. شیب خط که ضریب متغیر $\log x$ می‌باشد، برابر n است که خود توان معادله $y = ax^n$ می‌باشد. برای پیداکردن a، نقطه‌ای که x آن برابر یک است در نظر گرفته می‌شود. در این صورت می توان نوشت :

$$x = 1 \;\rightarrow\; \log y = \log a \;\rightarrow\; |y| = |a|$$

یعنی عرض نقطه‌ای که $x=1$ می‌باشد برابر a است.

در کاغذهای لگاریتمی، در روی محورهای لگاریتمی چند بار اعداد ۱۰-۱ تکرار شده است. اگر یک بار از ۱۰-۱ نوشته شده باشد کاغذ را یک رده‌ای یا یک سیکلی می‌نامند. اگر به صورت ۱۰-۱۰-۱ باشد کاغذ را دو سیکلی گویند. در هر سیکل کاغذ، یک طبقه از اعداد را می توان جا داد. مثلاً در یک کاغذ سه سیکلی می توان اعداد طبقه یکان، دهگان و صدگان را جای داد.

اندازه‌گیری شیب روی کاغذهای مختلف.



چنانچه نمودار تابعی را به صورت خطی درآوریم، با اندازه‌گیری شیب آن خط می توان اطلاعات زیادی در مورد نوع بستگی عوامل موجود به دست آورد. منظور از شیب خط. اندازه تانژانت زاویه ای است که خط با سوی مثبت محور xها می‌سازد.

$$\text{شیب خط} = \frac{AC}{AB}$$

مثلاً برای اندازه شیب خط D مطابق شکل می توان نوشت :

برای اندازه‌گیری شیب هر خط روی کاغذهای مختلف همین شیوه را می توان به کار برد. بدین ترتیب لازم است مثلث قائم‌الزاویه‌ای که وتر آن روی خط قرار دارد و اضلاع آن موازی محورها است به دلخواه کشیده و از روی آن شیب خط را با اندازه‌گیری پاره خط های AC و AB تعیین کرد. ولی باید در نظر داشت که طول این پاره‌خط ها بر حسب واحدهایی که دو محور x و y با آن مدرج شده‌اند، سنجیده می‌شود.

در روی کاغذهای میلیمتری انتخاب واحد کاملاً اختیاری است. در صورتیکه کاغذهایی که دارای محور لگاریتمی هستند، این انتخاب توسط چاپ کننده کاغذ صورت گرفته است و طول این واحد نیز برابر طول یک سیکل یا رده‌بندی کاغذ است. از اینرو چنانچه بخواهیم مثلاً شیب یک خط را روی کاغذ لگاریتمی بیابیم، لازم است مانند شکل بالا مثلثی بسازیم و با خط‌کش طولهای AC و AB را اندازه گرفته و بهم تقسیم کنیم تا شیب خط به دست آید. در مورد شیب روی کاغذ نیمه لگاریتمی برای رسم توابعی از نوع $y=ae^{bx}$، باید توجه داشت که کاغذهای لگاریتمی چاپ شده بر حسب لگاریتم‌های ده دهی است. در صورتیکه توابع نمایی در پایهٔ پنری می‌باشند. از اینرو لازم است پس از محاسبه تانژانت، مقدار آن را در ۲/۳ که برابر لگاریتم عدد ده پایه نپری است ضرب کرد

.

$$\text{شیب در کاغذ تمام لگاریتمی} = \frac{\text{طول ضلع مقابل}}{\text{طول ضلع مجاور}}$$

$$\text{شیب در کاغذ میلیمتری} : \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$$

$$\text{شیب در کاغذ نیمه لگاریتمی} = \frac{\frac{\text{طول ضلع مقابل}}{\text{طول سیکل}} \times ۲,۳}{x_2-x_1}$$

حساب تقریبی (طرز نوشتن نتایج اندازه‌گیری)

در فیزیک نتیجه اندازه‌گیری هر کمیت را با عدد نمایش می‌دهند. این عدد باید طوری نوشته شود که دقت اندازه‌گیری در آن منعکس باشد. مثلاً اگر طول میله‌ای را با یک خط‌کش که حداکثر درجه‌بندی آن میلیمتر است اندازه‌گیری کنیم و نتیجه سنجش دقیقاً هفده سانتی متر شود، باید این نتیجه را به صورت ۱۷,۰ بنویسیم. این عدد نشان می‌دهد که تا میلیمتر را می توانستیم بخوانیم.

نمونه ای از چگونگی رسم در کاغذهای تمام لگاریتمی :

طول / زمان	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶
t (sec)	۱۳	۱۸	۲۲	۲۵	۲۸	۳۱
T (sec)	۰/۶۴	۰/۹	۱/۱	۱/۲۴	۱/۴	۱/۵۵

«جدول نتایج فرضی از انجام آزمایش آونگ ساده»

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (۱)$$

از طرفین لگاریتم می‌گیریم، خواهیم داشت:

$$\log T = \log\frac{2\pi}{\sqrt{g}} + \frac{1}{2}\log L$$

در سمت راست تساوی فوق جمله اول عرض از مبدأ و جمله دوم ضریب $\frac{1}{2}$ معادل شیب خط می‌باشد چرا که اگر :

$$\log T = y \ , \ \log L = x \ , \ \log\frac{2\pi}{\sqrt{g}} = b \rightarrow \quad y = b + \frac{1}{2}x \qquad (۲)$$

می‌بینیم که تساوی فوق تبدیل به معادله خط (۲) در کاغذ لگاریتمی شده است.

چون ضریب زاویه خط $\frac{1}{2}$ می‌باشد پس :

$$\tan\alpha = \frac{1}{2}$$

طرفین را به توان دو رسانده و g را محاسبه می‌کنیم.

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

با استفاده از جدول :

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{3.95}{0.64} = 9.7 \quad \rightarrow \quad g = 9.7$$

در نمودار داده شده از روی شکل هم می توان شیب خط را به دست آورد:

$$\tan\alpha = \frac{AB}{BC} = \frac{1.1}{2.7} = 0.407$$

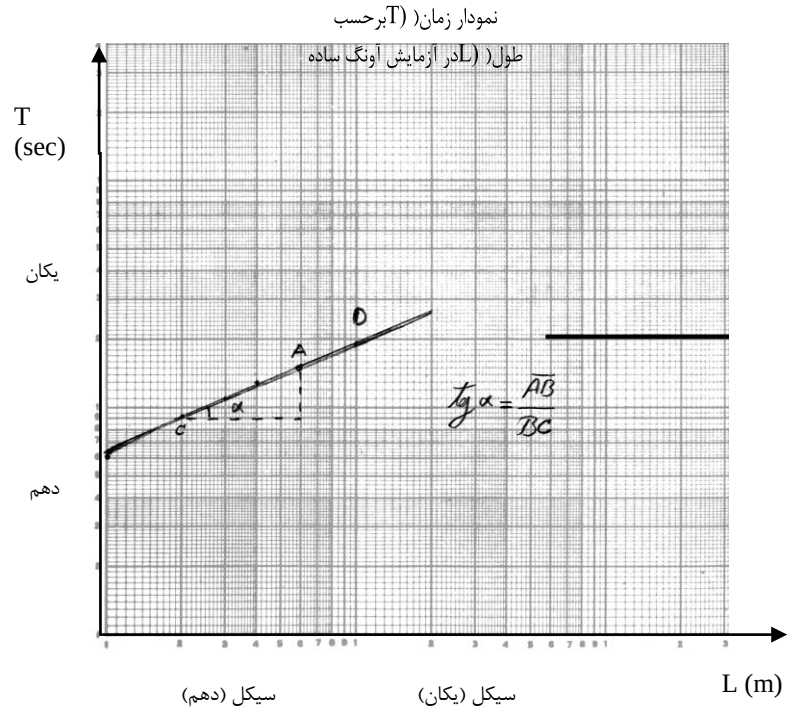
همان طور که مشاهده می‌کنیم مقدار شیب به دست آمده تقریباً برابر $\frac{1}{2}$ می‌باشد.

در ضمن فراموش نمی‌کنیم که مقادیر AB و BC به وسیله خط‌کش اندازه‌گیری می‌شود.

برای محاسبه عرض از مبدأ در کاغذ لگاریتمی خط را در جهتی امتداد می‌دهیم که خط $L = 1$ را قطع کند. عرض این نقطهٔ تلاقی همان عرض از مبدأ می‌باشد.

$$\left.\text{D}\right|_{\text{عرض از مبدأ}}^{1}$$

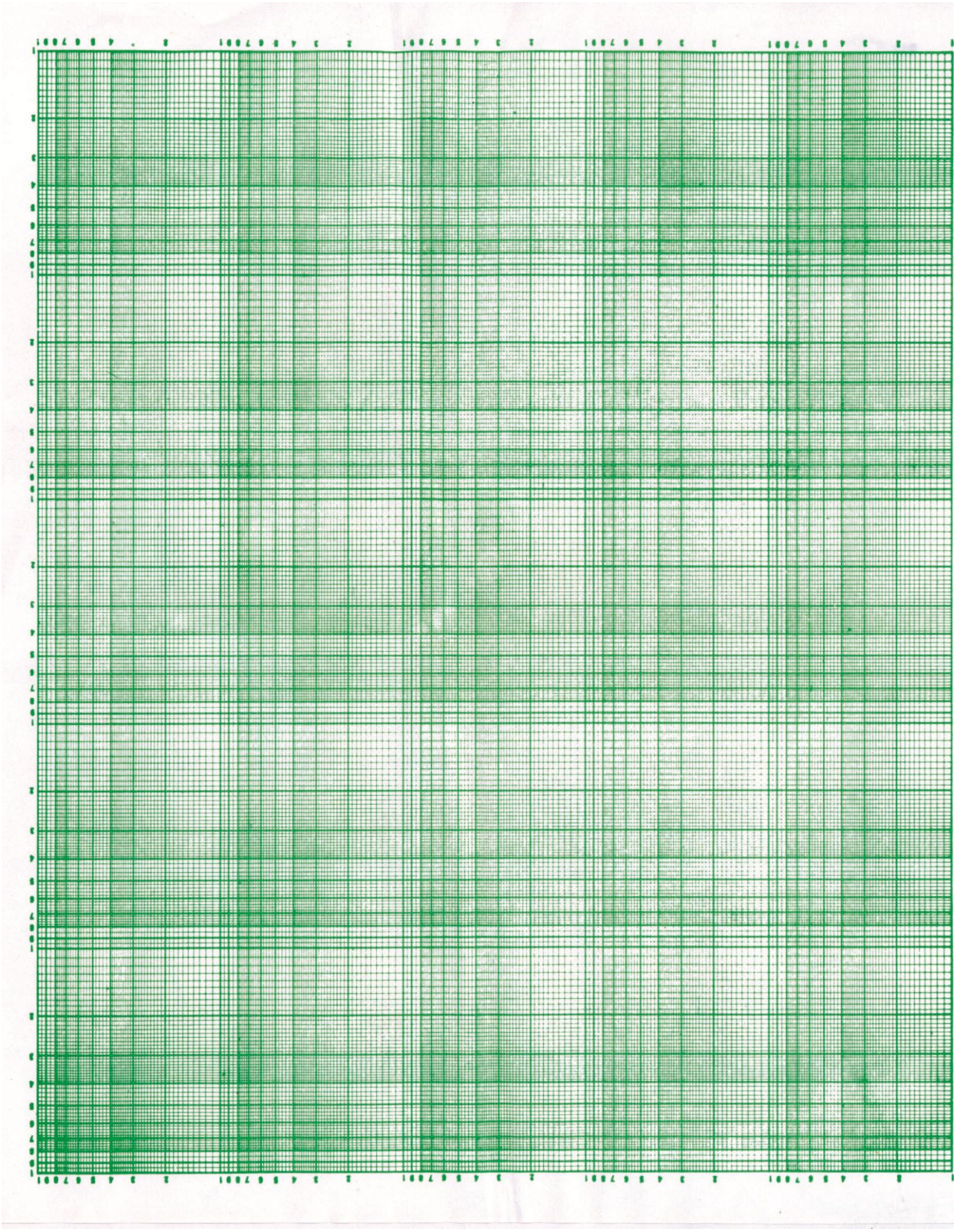
از روی نمودار به دست می‌آید : $OD = 2.1$



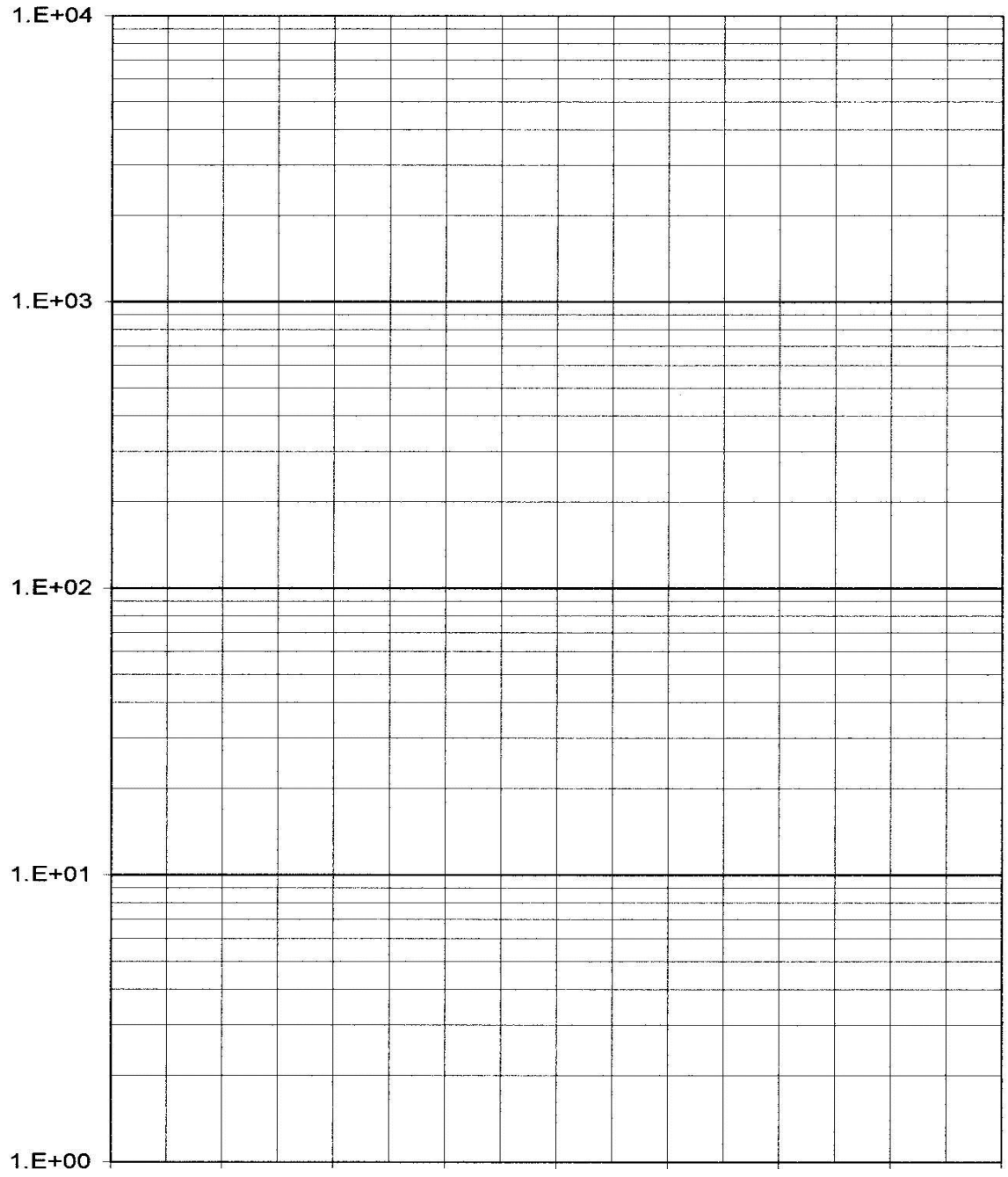
با توجه به روابط فوق نیز داریم :

$$\log\frac{2\pi}{\sqrt{g}} = \log\frac{2\pi}{\sqrt{9.7}} = \log 2.026$$

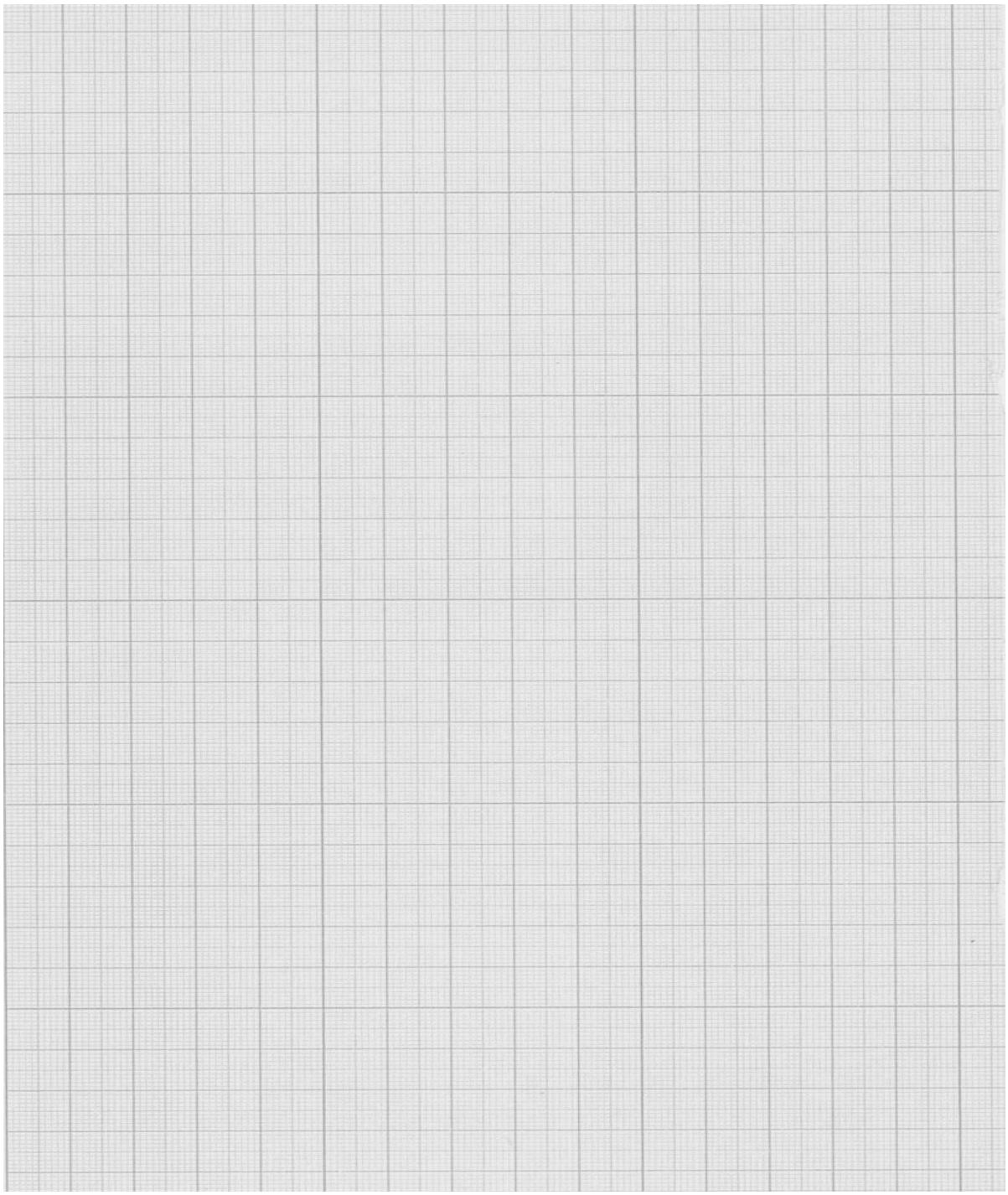
مشاهده می‌کنیم که دو عدد به دست آمده از دو طریق بسیار نزدیک به هم هستند. آن چه که در گام اول در کاغذ لگاریتمی اهمیت دارد تعیین طبقات از اعداد بر روی سیکل های کاغذ با توجه به مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایش است.



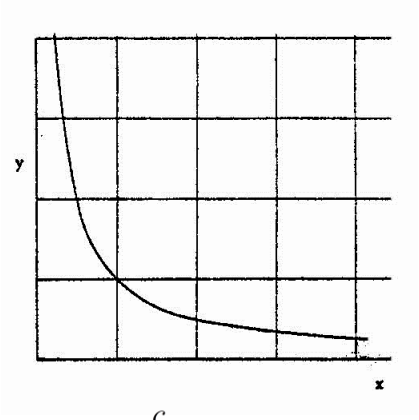
«نمونه‌ای از یک کاغذ تمام لگاریتمی»



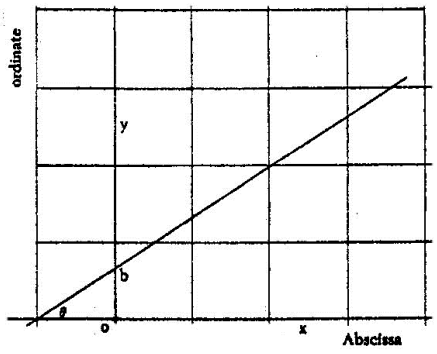
«نمونه‌ای از یک کاغذ نیمه لگاریتمی»



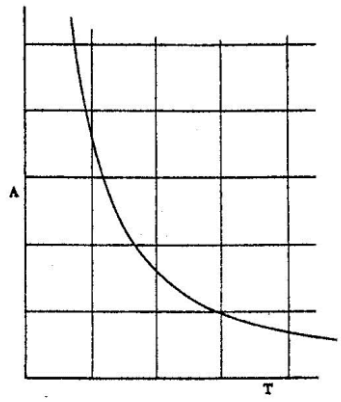
«نمونه ای از کاغذ میلیمتری»



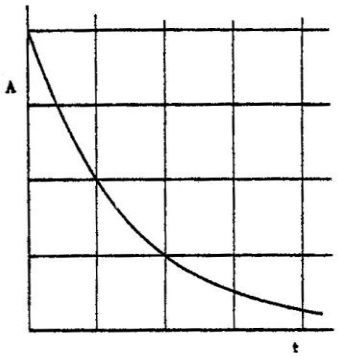
«نمودار منحنی $y = \frac{c}{x}$»



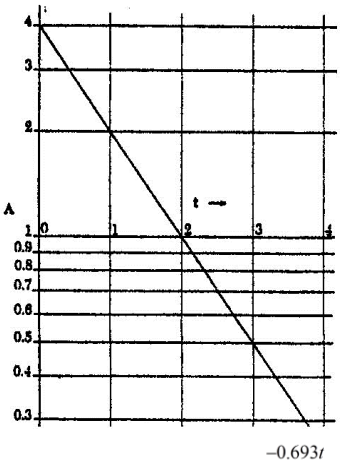
«نمودار خط $y = mx + b$»



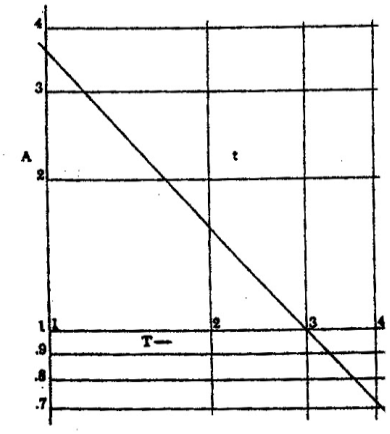
«نمودار $A = A_{\circ} e^{\frac{-0.693t}{T}}$ در کاغذ میلیمتری»



«نمودار $AT^{1/2} = C$ در کاغذ میلیمتری»



«نمودار $A = A_{\circ} e^{\frac{-0.693t}{T}}$ در کاغذ نیمه لگاریتمی»



«نمودار $AT^{1/2} = C$ در کاغذ تمام لگاریتمی»

آزمایش اول : آشنایی با تعدادی از وسایل اندازه‌گیری دقیق

هدف : اندازه‌گیری با کولیس، ریزسنج و گوی سنج و ترازو

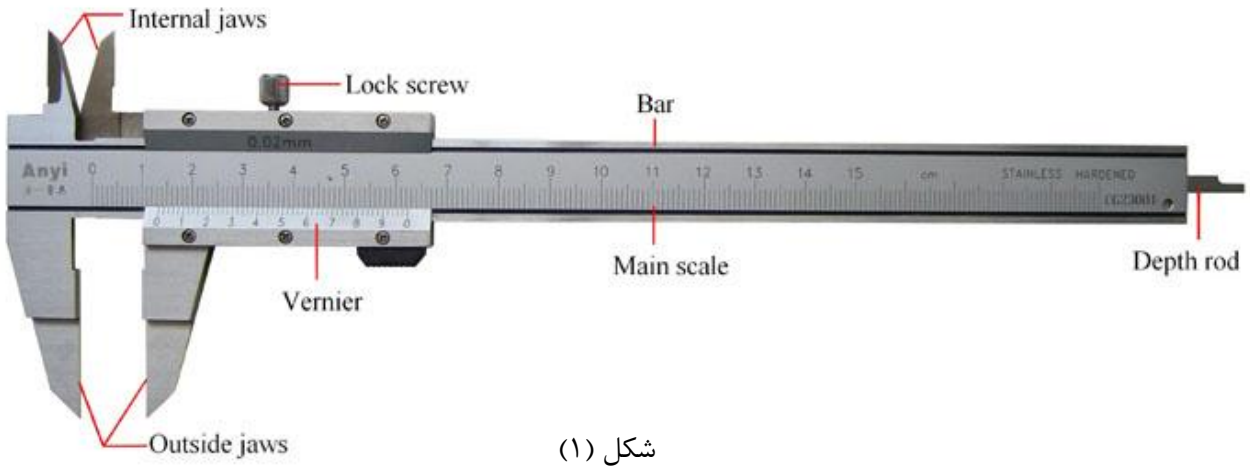
الف- کولیس.

تئوری آزمایش :

قطر داخلی و خارجی یک لوله را نمی‌توان با خط‌کش مدرج با دقت و به آسانی اندازه گرفت. برای اندازه‌گیری دقیق‌تر آنها از کولیس استفاده می‌شود. کولیس از ترکیب یک خط‌کش مدرج و یک ورنیه متحرک درست شده است (شکل ۱). خط‌کش بر حسب میلیمتر مدرج شده و ورنیه دارای درجه‌بندی کوچکتری است، بطوریکه تعداد کل تقسیمات روی آن برابر کوچکترین تقسیم بندی روی خط‌کش است. بعنوان نمونه برای کولیسی که خط کش آن بر حسب میلیمتر و ورنیهٔ آن به ۲۰ بخش تقسیم شده است تمام این ۲۰ بخش ورنیه هم ارز ۱ میلیمتر است، به بیان دیگر ۱ میلیمتر به ۲۰ بخش یکسان بر روی ورنیه تقسیم شده است. بنابراین می‌توان گفت که هر بخش ورنیه (هر خط روی آن) به اندازه $\frac{1}{20}$ از هر درجهٔ روی خط‌کش است. با این نوع کولیس به آسانی می توانیم تا $\frac{1}{20}$ میلیمتر را اندازه بگیریم. دقت اندازه‌گیری کولیس از تقسیم کردن مقیاس کوچک‌ترین تقسیم خط‌کش بر تعداد تقسیمات ورنیه به دست می‌آید. (کولیس و...)

روش محاسبه دقت دستگاه:

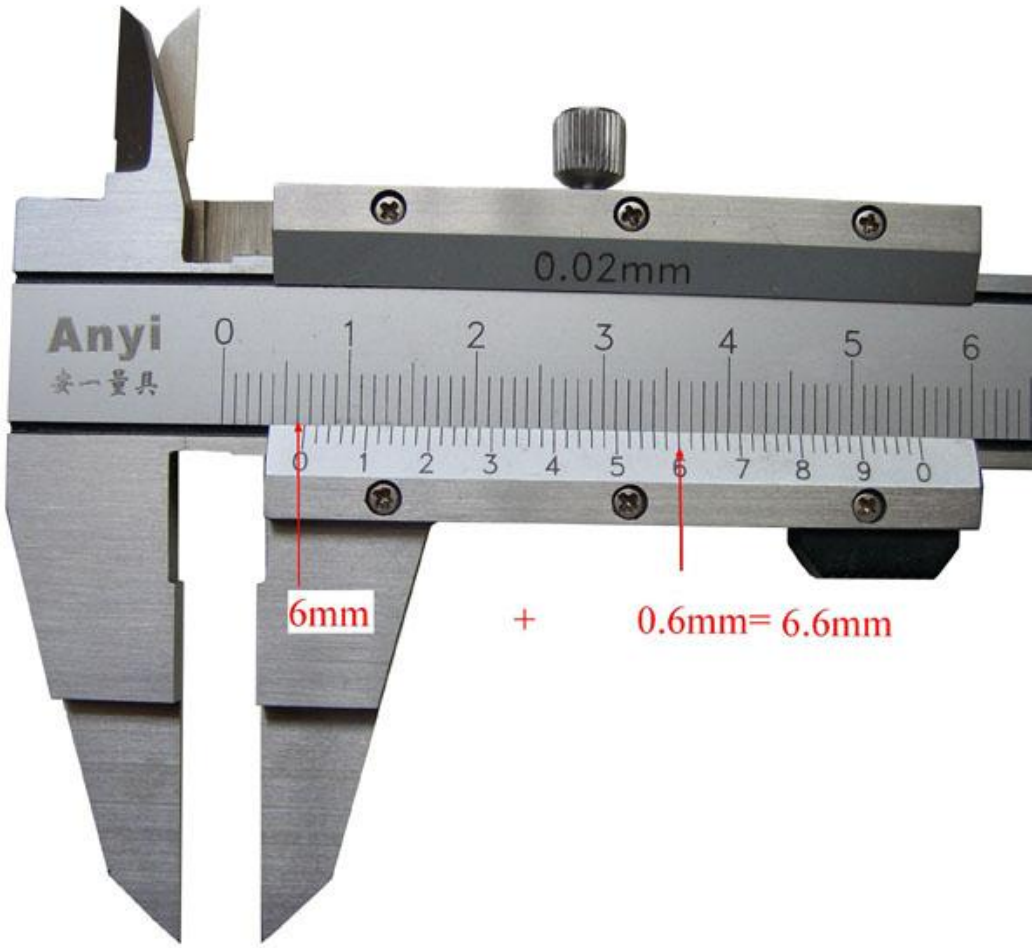
$$\text{دقت دستگاه} = \frac{\text{کوچکترین درجه خط‌کش}}{\text{تعداد تقسیمات ورنیه}}$$



شکل (۱)

برای تعیین طول یا قطر خارجی جسم، آن را در میان شاخک‌های بزرگ کولیس قرار می‌دهند به طوریکه هر دو شاخک با بدنه جسم تماس داشته باشند. سپس به کمک ورنیه و خط‌کش اندازه طول یا قطر گلوله را تعیین می‌کنند. عدد درجات را از روی خط‌کش (عددی که صفر ورنیه در مقابل آن قرار دارد و یا از آن گذشته است) و کسر درجات را از روی ورنیه

می‌خوانند. برای خواندن کسر درجات، درجه‌ای از درجات ورنیه را پیدا می‌کنند که درست در برابر یکی از درجات خط‌کش قرار گرفته است. شکل ۲ خط‌کش مدرج یک ورنیه را نشان می‌دهد که عدد ۶/۶ میلیمتر روی آن خوانده می‌شود.
در این جا صفر ورنیه از خط ۶ خط کش گذشته و عدد ۶ ورنیه بر یکی از خطهای خط‌کش منطبق است.



شکل (۲)

برای اندازه‌گیری قطر داخلی یک لوله دو شاخک بالایی را در داخل لوله فرو می‌برند و ورنیه را بر روی خط‌کش آن قدر 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. برای اندازه‌گیری عمق اجسام مثلاً عمق یک سوراخ استوانه‌ای، انتهای خط‌کش را بر لبه سوراخ می‌چسبانند و ورنیه را حرکت می‌دهند تا تیغه آن با کف سوراخ تماس پیدا کند. عمق استوانه را مانند اندازه قطر از روی خط‌کش و ورنیه می‌خوانند.

روش انجام آزمایش :

انواع کولیس[1] را مورد مطالعه قرار دهید. قطر داخلی و خارجی و همچنین عمق نمونه‌ی داده شده را با آنها اندازه‌گیری کنید. اندازه‌گیری هایی فوق را با کولیس کولیس $\frac{1}{20}$ یا $\frac{1}{50}$ میلیمتر انجام دهید. از مقایسهٔ اعداد حاصل چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟ ابعاد نمونه‌هائی را که در اختیار دارید با انواع کولیس اندازه‌گیری نموده، اعداد حاصل را با هم مقایسه و نتیجه را بنویسید.

نتایج :

خطای دستگاه	عمق سوراخ	قطر خارجی بلبرینگ	قطر داخلی بلبرینگ	قطر ساچمه کروی	نوع وسیله اندازه‌گیری
					کولیس $\frac{1}{10}$
					کولیس $\frac{1}{20}$ یا $\frac{1}{50}$

خواسته‌های آزمایش :

- خطای نسبی در اندازه‌گیری حجم ساچمه فولادی را به دست آورید.

ب- ریزسنج :

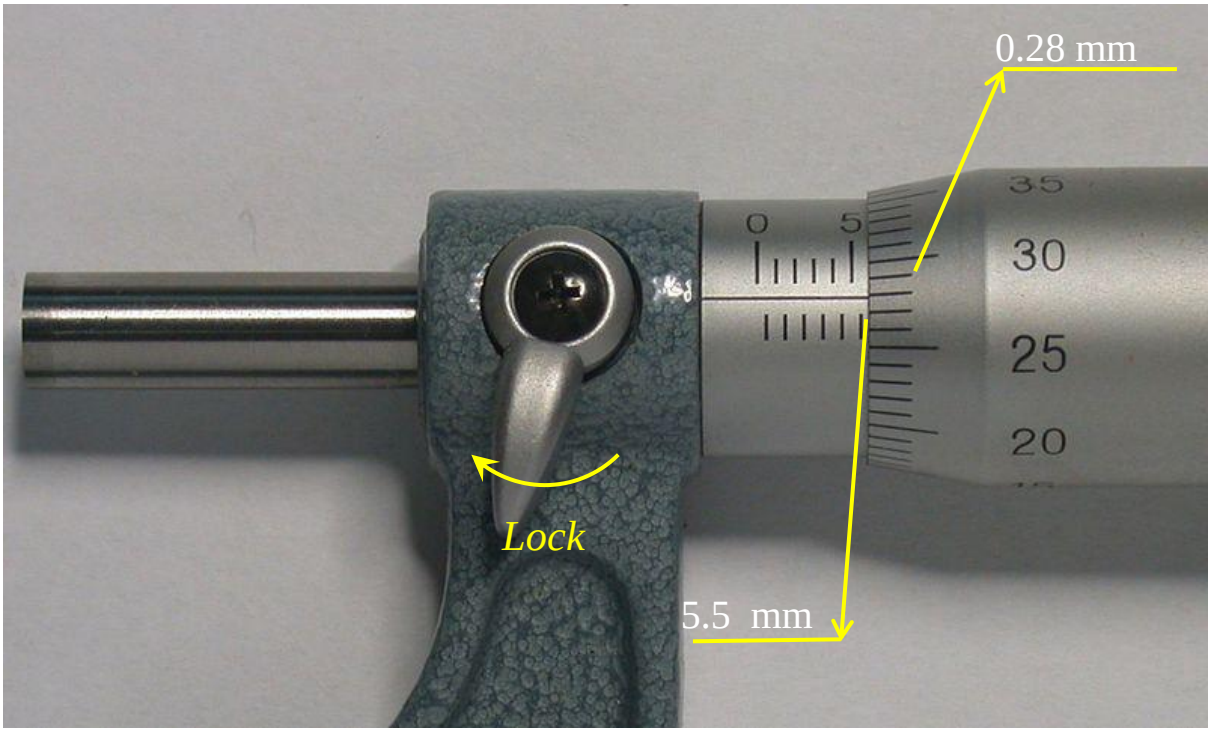
تئوری آزمایش :

ضخامت ورقه‌های نازک و قطر سیم های نازک را با اسبابی به نام ریزسنج اندازه می‌گیرند. این اسباب از ترکیب یک پیچ و یک مهره مدرج مانند شکل ۳ ساخته شده است. در این وسیله، مهره استوانه‌ای است توخالی که سطح خارجی آن مدرج شده است. این استوانه به کمانی متصل است. در انتهای دیگر کمان زائده‌ای 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 مهره‌ها جا به جا می‌شود. در صورتی که پای پیچ ۰٫۵میلیمتر باشد، دور کلاهک به پنجاه قسمت و اگر پای پیچ ۱ میلیمتر باشد، دور کلاهک پیچ به صد قسمت تقسیم می‌شود. به آن قسمت از پیچ که از داخل مهره خارج شده در حد فاصل سندان و لبه مقابل جا به جا می‌گردد، زبانه می‌گویند.

اگر پیچ یک دور بپیچد در نوع اول، زبانه ریزسنج نیم میلیمتر و در نوع دوم یک میلیمتر جا به جا می‌شود. بنابراین وقتی پیچ به اندازه یک درجه پیچانده شود، دهانه ریزسنج به اندازه یک صدم میلیمتر باز یا بسته می‌شود. بنابراین با استفاده از ریزسنج دقت اندازه‌گیری تا یک صدم میلیمتر بالا می‌رود. در نوع اول وقتی پیچ به اندازه یک درجه بپیچد دهانه ریزسنج به اندازه یک پنجاهم از نیم میلیمتر یعنی به اندازه یک صدم میلیمتر باز می‌شود.

توجه : فقط با پیچ هرزگرد بپیچانید و با شنیدن اولین صدای تماس زبانه با سندان عمل پیچاندن را متوقف کنید.

در شکل (۳) ریزسنج فاصله موجود بین سندان و زبانه را برابر 5.78 میلی متر نشان می‌دهد. زیرا درجه‌ای که مهره می‌خواند 5.5 میلی متر و (درجات روی بدنه اصلی 0.5 میلیمتر است) درجه‌ای که پیچ اندازه‌گیری می‌خواند 0.28 میلی متر است. پس در مجموع 5.78میلی متر است. برای اندازه‌گیری، جسم موردنظر را بین زبانه و سندان قرار می‌دهند. پیچ کلاهک را آن قدر می‌چرخانند تا جسم با زبانه و سندان تماس پیدا کند.برای چرخاندن کلاهک، پیچ هرز گرد را می‌پیچانند. پس از تماس زبانه با جسم، پیچ هرزگرد صدا می‌کند. با شنیدن اولین صدای تق، عمل پیچاندن را متوقف می‌کنند. در غیر این صورت از حساسیت اسباب کاسته می‌شود. درجات میلیمتر (و نیم میلیمتر) را روی مهره و درجات صدم میلیمتر را از روی کلاهک پیچ می‌خوانند. درجه‌ای که از کلاهک پیچ خوانده می‌شود آن درجه‌ای است که در امتداد خط افقی مهره قرار دارد.



[۱] سنجش با کولیسی با گام $\frac{1}{20}$ با تقریب $\frac{1}{20}$ میلیمتر انجام می شود، خطای نسبی حجم برابر است با:

$$\frac{\delta V}{V}=\frac{3\delta d}{d}+\frac{\delta \pi}{\pi}$$

چنان چه تعداد ارقام با معنی π را در این جا ۳،۱۴۱ اختیار کنیم، می توان از خطای نسبی روی π چشم پوشی کرد.

روش انجام آزمایش :

با استفاده از ریزسنجی که در اختیار دارید قطر یک گلوله آهنی و ضخامت یک برگ کاغذ و قطر یک مو را اندازه‌گیری نمائید. قطر گلوله آهنی مذکور را با کولیس نیز اندازه‌گیری کنید. اعداد حاصل از اندازه‌گیری با هر دو وسیله فوق را با همدیگر مقایسه کرده و نتیجه را با توجه به ارقام معنی‌دار بنویسید.

نتایج :

نتایج خود را در جدول یادداشت نمائید.

خطای اندازه‌گیری	اندازه	جسم	وسیله اندازه‌گیری
		کاغذ	ریزسنج
		قطر گلوله	ریزسنج
		ضخامت بلبرینگ	ریزسنج

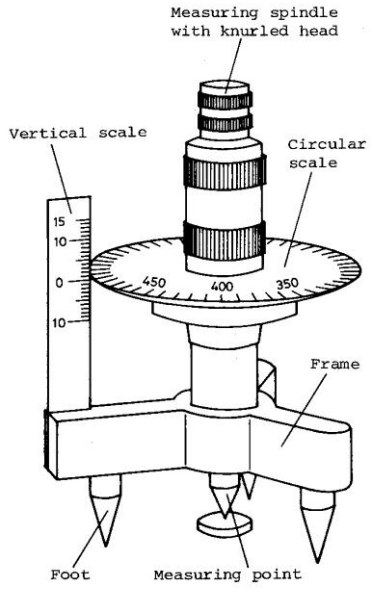
خطای اندازه‌گیری	اندازه	جسم	وسیله اندازه‌گیری
		کاغذ	کولیس $\frac{۱}{20}$ یا $\frac{1}{50}$
		گلوله	کولیس $\frac{۱}{20}$ یا $\frac{1}{50}$
		ضخامت بلبیرینگ	کولیس $\frac{۱}{20}$ یا $\frac{1}{50}$

ج - گوی‌سنج یا انحناسنج (اسفرومتر).

تئوری آزمایش :

گوی‌سنج شکل (۴) از بدنه‌ای دارای سه پایه نوک تیز فلزی ثابت مرکزی عمود متصل به آن تشکیل شده است. و این سه پا یک مثلث متساوی‌الاضلاع را می‌سازد. در مرکز سه پایه یک پیچ میکرومتری با پای نوک دار فلزی قابل تنظیم (در جهت قائم) وجود دارد. پیچ میکرومتری از یک صفحه دایره‌ای مدرج تشکیل شده است. این پای نوک دار قابل تنظیم به طور دقیق تا حدود یک میکرومتر در جهت قائم جا به جا می‌گردد. هنگامی که پیچ میکرومتری ۰,۵ میلیمتر در جهت عمودی جا به جا گردد، صفحه دایره‌ای که به ۵۰۰ بخش یکسان تقسیم شده است یک دور کامل خواهد چرخید. میلیمترها و نیم‌میلیمترها از روی خط کش عمودی و میکرومترها ز روی صفحهٔ دایره‌ای خوانده می‌شوند. هر خط روی مقیاس دایره‌ای برابر با تغییر ارتفاع ۰,۰۰۲ میلیمتر است، بنابراین از آنجا که هر خط هم ارز دو درجه می باشد می توان نتیجه گرفت که هر درجهٔ صفحه برابر ۰,۰۰۱ میلیمتر خواهد بود. مقداری که خوانده می‌شود منطبق با ارتفاع h یعنی حد فاصل نوک پای متحرک تا سطحی مستوی که توسط سه پای نوک دار به وجود می‌آید، می‌باشد. برای محاسبه شعاع انحناء «R» یک سطح خمیده، گوی‌سنج روی سطح قرار می‌گیرد. به طوری که هم زمان پاهای نوک دار و نوک متحرک بر روی سطح تماس پیدا کنند. اگر فاصله بین هر دو پای ثابت را «d» بنامیم شعاع انحناء «R» با استفاده از معادله زیر و مقدار اندازه‌گیری شدهٔ «h» به دست می‌آید :

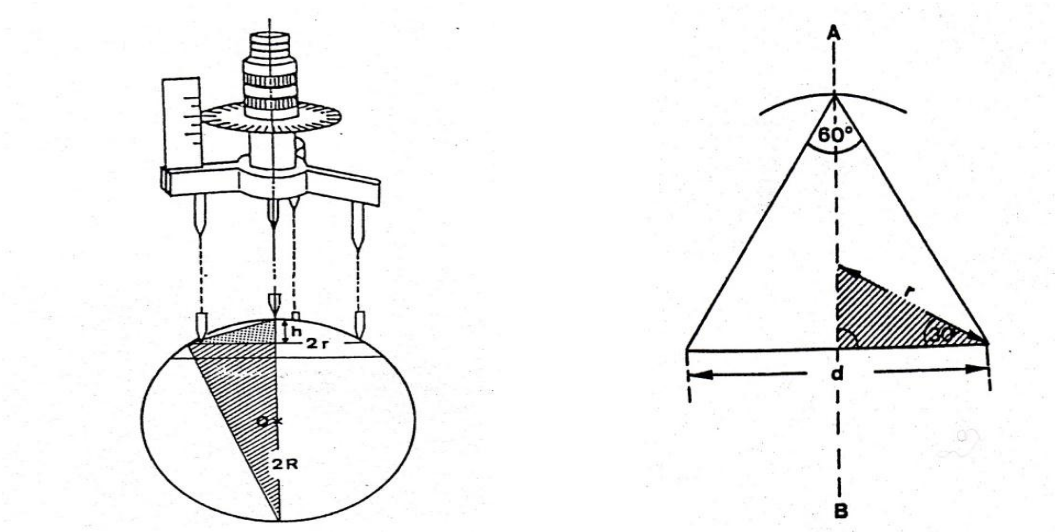
$$R = \frac{d^2}{6h} + \frac{h}{2}$$



شکل (۴)

در شکل۴: ۱- مقیاس عمودی ۲- پیچ قابل تنظیم ۳- دیسک دایره‌ای با مقیاس ۴- سه پایه ۵- پای نوک دار ۶- پای نوک دار قابل تنظیم

این معادله با استفاده از تشابه دو مثلث قائم‌الزاویه که در شکل (۵) هاشورزده شده از دو رابطه بین شعاع «r» (شعاع دایره‌ای که به وسیله پاهای ثابت گوی‌سنج به وجود می‌آیند) و «d» (فاصله بین دو پای ثابت) به دست می‌آید. هم چنان که در شکل (۶) داریم می توان نوشت :



$$r\,Cos30=\frac{d}{2} \quad , \quad Cos30^{\circ}=\frac{\sqrt{3}}{2}$$

بنابراین :

$$r=\frac{d}{\sqrt{3}} \quad , \quad d=50mm$$

از تشابه دو مثلث :

$$\frac{2R-h}{r}=\frac{r}{h}\rightarrow R=\frac{d^{2}}{6h}+\frac{h}{2}$$

روش انجام آزمایش :

محاسبه شعاع انحنای یک سطح کروی.

جسم مورد نظر(شیشه ساعت) را روی سطح صاف میز به طوری که سطح گوژ آن به سمت بالا باشد قرار دهید. پیچ میکرومتری گوی‌سنج را بچرخانید. به طوریکه پای متحرک آن گوی‌سنج روی سطح شیشه قرار می‌گیرد با سطح آن تماس نداشته باشد. حال پیچ میکرومتری را به سمت پائین بپیچانید. به طوری که پای متحرک آن هم‌اکنون روی سطح شیشه ساعت تماس حاصل نماید. مقدار h را بخوانید. این اندازه‌گیری را ده مرتبه تکرار کنید. آنگاه R شعاع انحناء سطح را محاسبه کنید.

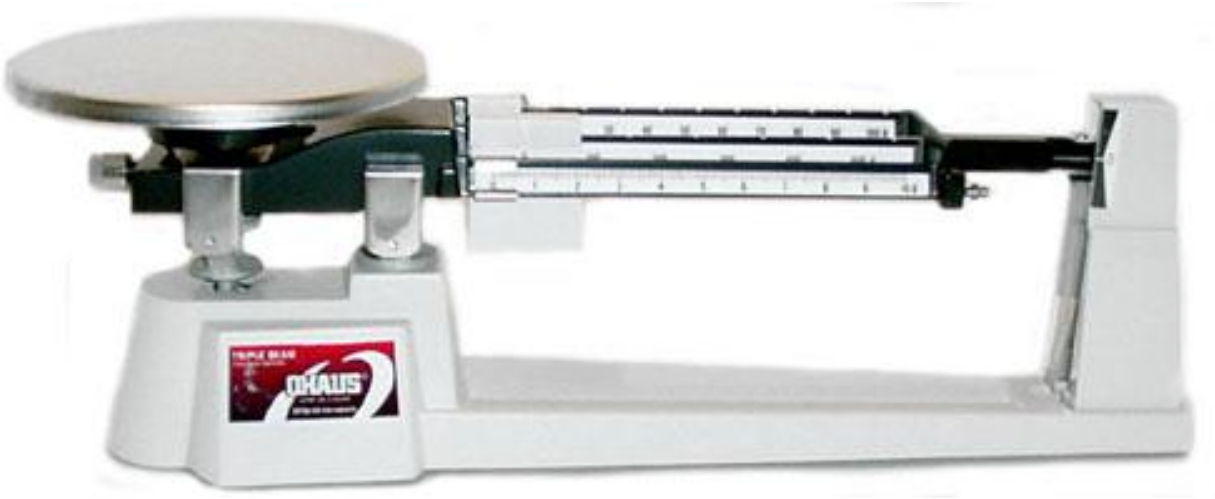
نتایج :

خطای نسبی R	مقدار شعاع R	اندازه h
	R میانگین $\Longrightarrow$	

خواسته های آزمایش:

- ✓ خطای اندازه‌گیری R را با استفاده از روش آماری محاسبه نمائید. σ_n
- ✓ خطاهای احتمالی نسبی و مطلق را نیز محاسبه نمایید.

تصاویر آزمایشگاهی وسائل آزمایش بالا



د – ترازوی یک کفه‌ای سه اهرمی

تنظیم نقطه صفر ترازو:

برای کار با ترازو ابتداء نقطه صفر دستگاه را بررسی میکنیم. برای اینکار بدون اینکه جسمی را روی کفه ترازو بگذاریم وزنه‌های روی اهرم‌های ترازو را در منتها الیه سمت چپ اهرم‌ها قرار می‌دهیم. چنانچه شاخص انتهایی اهرم درست روبروی خط صفر قرار گرفت نقطه صفر درست تنظیم شده است در غیر اینصورت باید پیچ تنظیم زیر کفه ترازو را در جهت مناسب بچرخانیم تا شاخص انتهایی اهرم درست مقابل خط سفید قرار گیرد. اکنون ترازو برای انجام کار آماده است.

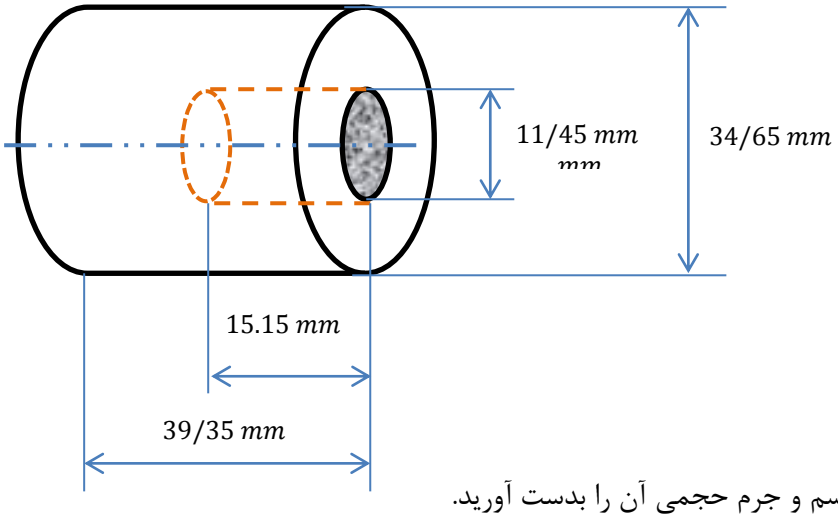
روش کار با ترازو:

ابتداء جسم مورد نظر را بر روی کفه ترازو قرار می‌دهیم. سپس وزنه‌های روی اهرم‌های ترازو را طوری جابجا می‌کنیم که شاخص ترازو روبروی خط صفر قرار گیرد. وزنه قرار گرفته روی اهرم وسط که از بقیه بزرگتر است گام‌های صدگرمی دارد. گام‌های اهرم پشتی هرکدام ۱۰ گرم هستند و توسط وزنه روی اهرم جلویی می‌توانیم تا دقت یک دهم گرم را اندازه بگیریم. برای مثال اگر جسمی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ گرم باشد ابتداء وزنه بزرگتر را بر روی شیار مربوط به ۳۰۰ گرم قرار می‌دهیم. اگر جرم جسم بین ۳۴۰ تا ۳۵۰ گرم باشد وزنه روی اهرم عقبی را روی شیار ۴۰ گرم قرار می‌دهیم. بعد با جابجایی وزنه کوچک روی اهرم جلویی ترازو، میزان گرم و دهم گرم را نیز تعیین می‌کنیم تا شاخص اهرم ترازو روبروی خط صفر قرار گیرد. *حتما دقت کنید تا وزنها دقیقا بر روی شیارها قرار گرفته باشند.* در صورتیکه جرم جسم بیشتر از ظرفیت ترازو باشد با آویزان کردن وزنه‌های مخصوص در زائده انتهایی اهرم‌ها می‌توانید ظرفیت ترازو را افزایش دهید. یک وزنه ۱۴۷/۵ گرمی زمانی که در انتهای اهرم آویزان می‌شود معادل ۵۰۰ گرم به اعداد خوانده شده از روی ترازو اضافه می‌کند یعنی اگر عددی که ترازو نشان می‌دهد ۴۷۱/۸ باشد و تنها یک وزنه ۱۴۷/۵ گرمی به انتهای اهرم آویزان شده باشد، جرم جسم برابر خواهد بود با ۹۷۱/۸ گرم و اگر دو وزنه آویخته شده باشد جرم جسم برابر خواهد بود با ۱۴۷۱/۸ گرم.

خواسته‌های آزمایش:

۱- فرض کنید استوانه‌ای مطابق شکل زیر در اختیار داریم و می‌خواهیم ابعاد آن را اندازه‌گیری کرده و سپس جرم حجمی آن را بدست آوریم. بوسیله کولیسی با دقت ۰/۰۵ میلی متر اندازه‌گیری ها را انجام داده‌ایم. جرم جسم نیز با ترازویی به دقت ۰/۱ گرم اندازه گرفته شده است. اعداد زیر بدست آمده‌اند:

$$h = 39/35\ mm$$
$$R = 34/65\ mm$$
$$r = 11/45\ mm$$
$$d = 15/15mm$$
$$m = 175/8\ gr$$



- حجم جسم و جرم حجمی آن را بدست آورید.
- خطای دیفرانسیلی در اندازه‌گیری حجم و جرم حجمی چقدر است؟ (از روش دیفرانسیل‌گیری مستقیم)
- خطای نسبی مربوط به هرکدام از دو کمیت را حساب نمایید. (روش لگاریتمی)

آزمایش دوم : بررسی خطاها در حرکت نوسانی ساده در آونگ فنری (حرکت هماهنگ ساده SHM)

هدف : تعیین ثابت فنر در آونگ فنری (فنرهای مارپیچ) و بررسی خطاهای آزمایش

تئوری آزمایش :

فنری را در نظر بگیرید که از قانون هوک پیروی کرده و بوسیلهٔ نیروی F کشیده و یا فشرده شود. در اینصورت نیروی بازگرداننده‌ای به سوی وضعیت تعادل فنر بوجود می‌آید که با تغییر طول آن نسبت به وضع تعادل خود متناسب است. ضریب این تناسب را با k نشان داده و ثابت فنر نامند. رابطه بین نیروی وارده و جابجایی فنر از وضعیت تعادل x به شکل زیر است.

$$F = -kx$$

علامت منفی نشان دهندهٔ جهت نیرو می‌باشد که همواره به سوی وضعیت تعادل فنر است.

می‌توان قانون دوم نیوتن برای جرم m که به آن چنین نیروئی وارد می‌شود را با چشم پوشی از جرم فنر چنین نوشت:

$$(F = Ma\,, \qquad F = -kx)\,, \qquad a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \rightarrow \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{M}x = 0$$

اگر در لحظهٔ $t = 0$ فنر در موقعیت بیشینهٔ جابجایی x_m و $v_0 = 0$ باشد در اینصورت پاسخ معادلهٔ بالا را می‌توان بصورت زیر نوشت که در آن ω سرعت زاویه ای نوسانهای فنر می باشد:

$$x(t) = -x_m Cos\omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

(۲)

همانطور که دیده می‌شود معادلهٔ حرکت نوسانهای فنر بصورت تابعی سینوسی و یا کسینوسی می‌باشد که از ویژگیهای حرکت هماهنگ ساده است. بنابراین و بطورکلی حرکتی را که از قانون هوک پیروی می‌کند، حرکت هماهنگ ساده نامند.

با توجه به روابط بالا و رابطهٔ میان زمان تناوب و سرعت زاویه‌ای می‌توان نوشت:

$$\left(T = \frac{2\pi}{\omega} \quad , \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{M}} \right) \quad \rightarrow \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}} \quad \rightarrow \quad k = \frac{4\pi^2 M}{T^2}$$

(۳)

هدف ما در این آزمایش ابتداء بدست آوردن ثابت فنر k به کمک روابط بالا (که برآمده از نوسانهای هماهنگ سادهٔ فنر می‌باشند) و سپس بررسی و محاسبهٔ برخی از خطاهای موجود در اندازه گیری‌های انجام شده خواهد بود.

وسایل آزمایش :

چندین فنر، خط‌کش پایه دار، وزنه های مختلف.

روش انجام آزمایش :

از میان فنرهای داده شده یکی را انتخاب نموده و بوسیلهٔ قلاب از میلهٔ افقی متصل به پایه های عمودی بیاویزید. از سر دیگر فنر وزنه‌ای ۱۵۰ گرمی را آویزان نموده و وزنه را از وضع تعادل خود بگونه‌ای کشیده و رها سازید که فنر بصورت هماهنگ در یک بعد نوسان کند. با شمردن زمان ۱۰ نوسان کامل t، دورهٔ تناوب T را به دست آورید. آزمایش را ۵۰ بار تکرار نموده و جدول را کامل نمائید. سپس جرم آویخته شده را تغییر داده و به ازای جرمهای ۲۰۰ و ۲۵۰ گرمی، ۲۵ بار زمان ۱۰ نوسان کامل را اندازه گرفته و نتایج حاصل را در جدول وارد نمائید.

رابطهٔ (۳) در صورتی صادق است که جرم فنر صفر درنظر گرفته شده باشد. اکنون می‌خواهیم نمودار T^2 را برحسب M بر روی کاغذ میلی‌متری رسم نماییم و تحقیق کنیم که آیا خط مربوطه از مرکز می‌گذرد یا خیر.

می‌توان اثبات کرد در صورتیکه جرم فنر قابل اغماض نباشد باید رابطه را به شکل زیر اصلاح نمود.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M+\alpha m}{k}}$$

که در رابطه بالا m جرم فنر و α یک ضریب ثابت است. پس رابطه T^2 برحسب M به شکل زیر در خواهد آمد.

$$T^2(M) = \left(\frac{4\pi^2}{k}\right)M + \left(\frac{4\pi^2\alpha m}{k}\right)$$

بعد از رسم منحنی از روی نمودار ضریب زاویه خط یعنی $4\pi^2/k$ را بدست آورده از روی آن مقدار ضریب سختی فنر را بدست آورید.

جرم فنر را اندازه بگیرید. از روی منحنی عرض از مبداء خط را بدست آورید. عرض از مبداء برابر است با $4\pi^2\alpha m/k$. با در دست داشتن جرم فنر، ثابت فنر و عرض از مبداء خط رسم شده مقدار α را بدست آورید.

M[kg]	*t[s]*	*T[s]*	*k*	*M[kg]*	*t[s]*	*T[s]*	*k*

خواسته‌های آزمایش:

- با انتخاب بازه‌های مناسب نمودار فراوانی مربوط به K های بدست آمده در جدول بالا، هیستوگرام K را رسم نمائید. (هم بصورت دستی بر روی کاغذ میلی‌متری و هم در $Excel$)
- مقدار K_{ave} را روی نمودار مشخص نمائید.
- برای مقادیر K بدست آمده در جدول بالا انحراف معیار یعنی σ_k را محاسبه نمائید و محدوده $\bar{x} \pm \sigma_k$ را روی نمودار مشخص کنید. تعیین کنید که چند درصد داده ها در این محدوده قرار دارند.
- خطای دیفرانسیلی را برای یکی از K های جدول بالا محاسبه نمایید.
- خطای مربوط به K میانگین را به دو صورت زیر محاسبه نموده با هم مقایسه نمائید.

الف:

۱- ابتداء خطای مربوط به مقادیر T را از طریق محاسبه انحراف استاندارد میانگین بدست آورید.

$$dT = \sigma_{\bar{T}}$$

۲- مقدار T_{ave} را برای جرم ۱۵۰ گرمی حساب کنید.

۳- مقدار K را از رابطه مربوطه بدست آورید.

$$K = \frac{4\pi^2 M}{T_{ave}^2}$$

۴- خطای دیفرانسیلی را از رابطه اخیر محاسبه نمائید.

$$dK = \frac{4\pi^2}{T_{ave}^2} dM + \frac{8\pi^2 M}{T_{ave}^3} dT$$

ب:

۱- ابتداء K_{ave} را از روی داده‌های بدست آمده برای جرم اولیه محاسبه کنید.

$$\overline{K} = K_{ave} = \sum_{i=1}^{N} \frac{K_i}{N}$$

۲- مقدار انحراف معیار را از رابطه زیر بدست آورید.

$$s.d. = \sigma_{\overline{K}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (K_i - K_{ave})^2}$$

۳- انحرافات نسبی یعنی $\frac{s.d.}{\overline{K}}$ را حساب کنید.

۴- خطای استاندارد (حد متوسط انحراف) $S.D. = \frac{s.d.}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (K_i - K_{ave})^2}}{N}$ را حساب کنید.

۵- خطای احتمالی مطلق $p.e. = 0/6745 s.d$ راحساب کنید.

۶- خطای احتمالی نسبی یعنی($0/6745 \frac{s.d.}{\overline{K}}$) را حساب نمائید.

آزمایش سوم : سقوط آزاد، حرکت پرتابی

الف- سقوط آزاد.

هدف : بدست آوردن شتاب جاذبهٔ زمین به کمک قوانین مربوط به حرکت شتابدار ثابت

تئوری آزمایش :

چنانچه در مجاورت زمین مقاومت هوا وجود نداشته باشد، نیروی گرانشی زمین باعث می شود که تمام اجسام - سوای اندازه، جرم و یا جنس آنها - با شتاب تقریبا ثابتی سقوط می‌کنند که به آن شتاب گرانشی گویند.

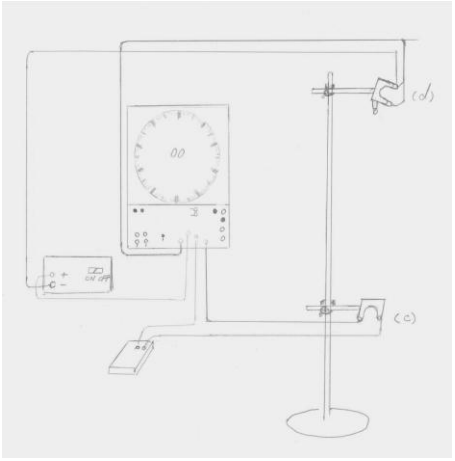
هدف از این قسمت بدست آوردن این شتاب گرانشی (g) به کمک روابط مربوط به سقوط ازاد اجسام می باشد.

اگر یک گلوله ساکن در لحظهٔ $t=\circ$ رها شده و سقوط آزاد نماید، با توجه به روابط حاکم بر سقوط آزاد می توان ارتفاع پیموده شده بوسیلهٔ گلوله را (h) پس از مدت زمان t بدست آورد:

$$h=\frac{1}{2}gt^2$$

در این رابطه با داشتن h و t می توان g را بدست آورد.

برای بدست آوردن مدت زمانی که گلوله ارتفاع h را سقوط می کند می توان گلوله ای فلزی را به یک آهنربای الکتریکی آویخت که به میله ای عمودی متصل است و با اتصال الکتریکی توانائی ربایش پیدا کرده است.



گلوله هنگامی سقوط می‌کند که جریان الکتریکی قطع شده و در نتیجه خاصیت مغناطیسی آهنربا محو شود. در همین زمان ساعت الکترونیکی شمارش را آغاز می‌کند. لحظه‌ای که گلوله از جلوی چشمهٔ نوری واقع در پایین میلهٔ عمودی می گذرد، مدار الکتریکی ساعت الکترونیکی قطع شده و شمارش متوقف می‌شود. بدین صورت مدت زمان سقوط گلوله ثبت شده و با اندازه گیری میزان جابجائی گلوله در این مدت می توان g را بدست آورد.

وسایل آزمایش :

ساعت الکترونیکی، خط‌کش عمودی، کلید قطع و وصل نوری، منبع تغذیه DC تقریباً ۱,۵ ولت، گلوله فلزی.

روش انجام آزمایش :

دستگاه را مانند شکل (۴) آماده کرده و اتصالهای الکتریکی لازم را برقرار کنید. منبع تغذیه را روشن کرده و گلوله را به آهنربای الکتریکی وصل کنید! پیش از رها شدن گلوله دکمهٔ reset ساعت الکترونیکی را بفشارید! سپس با زدن دکمهٔ start و قطع شدن خاصیت ربایش در آهنربا، گلوله رها شده و مدت زمان سقوط گلوله به اندازهٔ ارتفاع h بوسیلهٔ ساعت الکترونیکی ثبت می شود.

هر اندازه‌گیری را دوبار تکرار کنید و برای دقت بیشتر مقدار متوسط t را در نظر بگیرید! آزمایش را برای دست کم ۶ فاصلهٔ متفاوت، ترجیحاً در فاصله های ۳۰ تا ۸۰ سانتی متر انجام دهید ونتایج حاصل را در جدول زیر وارد نمائید!

خواسته های آزمایش:

- نمودار ارتفاع سقوط h را به صورت تابعی از زمان t بکشید! این نمودار به چه شکلی است؟

- نمودار h را بر حسب t^2 کشیده و شتاب ناشی از ثقل g را از شیب نمودار بدست آورید!

- مقدار g به دست آمده را با مقادیر جدول g برای عرض جغرافیایی در شهر تهران مقایسه کنید.

در سطح دریا بسته به عرض جغرافیایی مکان مورد نظر، g از رابطهٔ زیر پیروی می کند: ($\varphi^\circ = 35^\circ,44'$ تهران)

به ازای $h = \circ$:

$$g(\phi) = 9.78049(1 + 0.005288 \times \sin^2\phi - 0.000006\sin^2 2\phi)$$

در ارتفاع h از سطح دریا و در اتمسفر زمین رابطه زیر برقرار است:

$$g(\phi) = g_{(h=\circ)}(\phi) - 0.00000309 \times h \qquad m/s^2$$

(h = ۱۲۰۰m تهران)

- مقدار خطای استاندارد برای تعیین g را به دست آورید!

ارتفاع $[cm]$	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$t_3[s]$	$\bar{t}\,[s]$	$g[m/s^2]$
۳۰					
۴۰					
۵۰					
۶۰					
۷۰					
۸۰					
۹۰					
۱۰۰					
۱۱۰					
۱۲۰					
				⟵ میانگینg	

ب- حرکت پرتابی

هدف : بررسی حرکت پرتابی

تئوری آزمایش :

حرکت پرتابی به حرکتی گویند که در آن گلوله ای به جرم m با سرعت اولیهٔ v_0 که با سطح افق زاویهٔ θ_0 می سازد، پرتاب شود. از آنجا که تنها نیروی وارد بر گلوله پس از پرتاب نیروی جاذبهٔ زمین می باشد، لذا جسم در دو راستای x و y حرکتهای متفاوتی داشته و می توان نوشت:

الف) در راستای افقی هیچ نیروئی بر جسم وارد نمی شود، بنابراین گلوله در راستای xها با سرعت ثابت $v_x = v_0 \cos\theta_0$ حرکت یکنواخت خواهد داشت و داریم $x = (v_0 cos\theta_0)t$

ب) در راستای عمودی با فرض ثابت بودن شتاب جاذبهٔ زمین، گلوله حرکت شتابدار ثابت داشته و حرکت آن از معادلهٔ زیر پیروی می کند:

$$y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t \sin\alpha + y_0$$

(نباید فراموش کرد که حرکت سقوط ازاد اجسام نوع ویژه ای از حرکت پرتابی است که در آن $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ می باشد.)

به کمک این دو رابطه می توان بیشترین برد چنین حرکتی را (برد ماکزیمم) بصورت زیر بدست آورد:

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_0}{g}$$

در این بخش از آزمایش می خواهیم بطور تجربی برد R را برای زوایای مختلف پرتاب θ_0 بدست آوریم و به کمک رابطهٔ بالا سرعت اولیهٔ پرتاب v_0 را بدست آوریم.

وسایل آزمایش :

دستگاه پرتاب کننده، خط‌کش، کاربن، کاغذ.

یادآوری: مواظب باشید هنگامی که ماشه دستگاه پرتابی کشیده و باز می‌شود انگشتان خود را در منطقه خطرناک نگذارید. زیرا ممکن است صدمه دیده و له شوند.

روش انجام آزمایش :

مانند شکل ماشه شلیک گلوله‌ها را با قراردادن در هر شیارتنظیم کنید .هر شیار سرعت ابتدایی مختلفی را به گلوله دستگاه پرتابی می‌دهد. پیچ های i برای تنظیم زاویه پرتاب دستگاه به کار می‌رود. با یک ضربه ماشه دستگاه پرتاب کننده را رها کنید و مسیر حرکت گلوله را مشاهده کنید و برد گلوله را به دست آورید.

خواسته‌های آزمایش :

- برد گلوله را به ازای سرعت های مختلف پرتاب دستگاه برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به دست آورده و جدول زیر را کامل نمائید! برای آسانتر شدن اندازه گیری یک نوار کاغذ پهن را که بر روی آن کاغذ کاربن قرار داده‌اند در راستای پرتاب روی سکوی ویژه که به منظور ایجاد تراز افقی و پرتاب، تهیه شده است قرار دهید آنگاه یک خط‌کش باریک در مسیر مقوا ولی در حاشیه قرار دهید تا آنها روی هم ثابت بمانند. هنگامی که گلوله شلیک می‌شود بر روی این نوار کاغذی فرود آمده و ورق کاربن نقطه اثر فرود را بر روی کاغذ به خوبی نشان می‌دهد. فاصله این نقطه اثر از امتداد راستای عمودی گلوله، برد گلوله خواهد بود.

- نمودار تغییرات برد گلوله را به صورت تابعی از زاویهٔ پرتاب برای سه سرعت اولیه مختلف دستگاه پرتاب کننده بکشید!
- سرعت اولیهٔ پرتاب را برای هر کدام از پرتابهای انجام شده بدست آورید!
- چرا بیشترین برد گلوله به ازای زوایهٔ 45° است؟

$\theta_{\circ}$ [deg]	R[m]	$v(m/s)_{0}$

آزمایش چهارم : بررسی قانون هوک در فنرها

هدف : تعیین ثابت فنرهای مارپیچی و پیچشی

الف- فنرهای مارپیچ

تئوری آزمایش :

نیروی وارد بر یک فنر مارپیچی می تواند باعث کشیده و یا فشرده شدن آن گردد. فنر در اثر این تغییر طول نیروی مخالفی را اعمال می کند که همواره بسوی وضع تعادل اولیهٔ فنر بوده و در حالت تعادل با نیروی وارد شده به فنر برابر است. چنانچه رابطهٔ این نیرو با تغییر طول فنر رابطه ای خطی باشدآنرا قانون هوک نامیده و می توان نوشت:

$$F = -kx$$

در این رابطه k ثابت فنر نام داشته و بستگی به میزان سختی و جنس فنر دارد. علامت منفی نیز بیان کنندهٔ تمایل این نیرو در رسیدن به وضع تعادل اولیهٔ فنر است. در فنرهای پیچشی نیز وضعیتی مشابه وجود دارد، با این تفاوت که گشتاور نیروی وارد شده به فنر (یعنی عاملی که باعث چرخش یک جسم بدور یک محور می گردد) باعث پیچش فنر شده و گشتاور نیروی بازگرداننده ای (τ) در فنر ایجاد می کند که با زاویهٔ پیچش فنر θ متناسب بوده و در حالت تعادل با گشتاور نیروی وارد شده به فنر برابر است، بنابراین شکل قانون هوک در فنرهای پیچشی بصورت زیر در می آید:

$$\tau = -k'\theta$$

که در آن k' ثابت فنر پیچشی بوده و مانند فنر مارپیچی بستگی به میزان سختی و جنس فنر دارد.

وسایل آزمایش :

دو فنر مارپیچی متفاوت، پایه، خط‌کش، چند وزنه.

روش انجام آزمایش :

الف- یکی از فنرها را به پایه مربوطه آویزان نمایید. شاخص بالایی را جابجا کنید تا لبه پایین آن با انتهای فنر بدون بار هم سطح گردد. وزنه ای ۱۰۰ گرمی را به فنر آویزان نموده، قسمت بالایی شاخص دیکر را با انتهای فنر کشیده شده هم سطح کنید. بدین صورت میزان تغییر طول فنر را در اثر وزنهٔ آویخته شده بدست می‌آورید. آزمایش را با وزنه های ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ گرمی تکرار کنید و دقت نمائید که انتخاب وزنه ها بگونه ای نباشد که فنر از حالت کشسانی خارج شود. نتایج بدست آمده برای این فنر و فنر دوم را در دو جدول زیر وارد نمائید.

M *Kg*	*X* *meter*	*F* *Newton*	*K1* *N/m*
۰/۱۰۰			
۰/۲۰۰			
۰/۳۰۰			
۰/۴۰۰			
۰/۵۰۰			
$K_{ave} =$			

M *Kg*	*X* *meter*	*F* *Newton*	*K2* *N/m*
۰/۱۰۰			
۰/۲۰۰			
۰/۳۰۰			
۰/۴۰۰			
۰/۵۰۰			
$K_{ave} =$			

حال دو فنر را به صورت سری بهم ببندید و آزمایش را با جرمهای داده شده تکرار کنید، سپس جدول زیر را کامل نموده و K معـادل را بدست آورید.

M Kg	X $meter$	F $Newton$	K N/m
۰/۱۰۰			
۰/۲۰۰			
۰/۳۰۰			
۰/۴۰۰			
۰/۵۰۰			
$K_{ave} =$			

خواسته‌های آزمایش :

- برای هر مرحله و در یک مقیاس نمودار تغییرات F را به صورت تابعی از X بکشید. از روی شیب خطوط بدست آمـده مقـدار K هر یک را به دست آورید.
- خطای دیفرانسیلی و خطای استاندارد یا انحراف استاندارد میانگین مربوط به ثابت فنر K را به دست آورید.
- اکنون از رابطه مربوط به فنرهای سری با داشتن مقادیر متوسط ثابت های دو فنر ضریب سختی فنر معادل را حساب کـرده بـا مقدار متوسط تجربی مقایسه نمایید.

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

ب- فنر پیچشی یا حلزونی.

روش انجام آزمایش :

فنر پیچشی روی پایهٔ ایستاده‌ای مانند شکل (۱) سوار می‌شود. حال قلاب نیرو سنج را در شیار دوم که ۱۰ سانتی متر از محور دوران فاصله دارد قرار دهید و **در جهتی که فنر حلزونی فشرده می‌شود** میله را بچرخانید. دقت کنید تا نیروسنج بر راستای میله عمود باشد. زاویه چرخش را در هر حالت طوری انتخاب نمایید تا نیرویی که نیروسنج نشان می‌دهد بیشتر از ۰/۵ نیوتون نباشد. (این نیرو سنج در مقادیر بزرگتر از ۰/۵ نیوتون دقت خوبی ندارد) اکنون مقادیر مربوط به بازوی گشتاور، نیروی وارده توسط نیروسنج و زاویه دوران را در جدول زیر یادداشت نموده (زاویه برحسب رادیان نوشته شود) و ثابت فنر را بدست آورید. این کار را برای فواصل ۱۵، ۲۰، ۲۵ سانتی متری نیز تکرار نمایید.

نکته مهم: بعد از آنکه زاویه مورد نظر را انتخاب نمودید باید نیروسنج را طوری در دست بگیرید که زبانه نیروسنج با بدنه آن کمترین اصطکاک را داشته باشد.

نتایج :

نتایج خود را در جدول یادداشت نمائید.

R(meter)	*0.10*	*0.15*	*0.20*	*0.25*
F(Newton)				
Θ(radian)				
$K = \frac{R \times F}{\Theta}$				
K_{ave}				

خواسته‌های آزمایش :

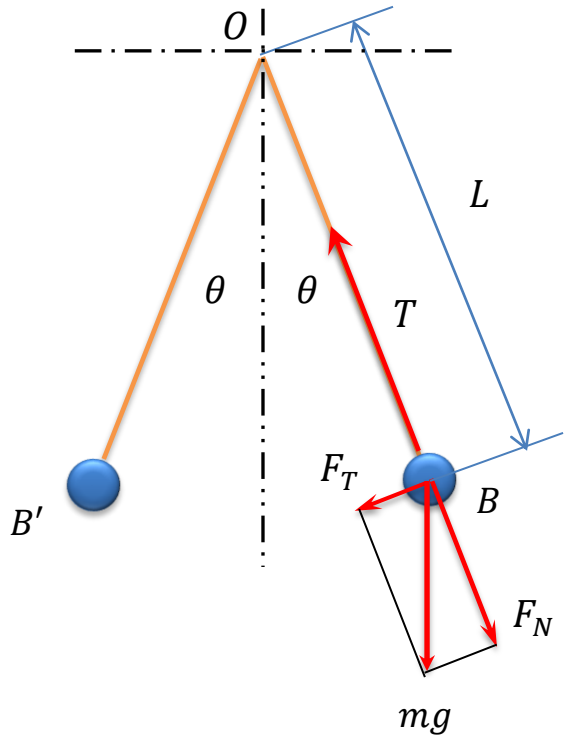
- خطای دیفرانسیلی و خطای استاندارد ضریب سختی فنر K را محاسبه نمایید.

آزمایش پنجم : بررسی حرکت نوسانی در آونگ ساده

هدف : بررسی عاملهای موثر در زمان تناوب آونگ ساده و بدست آوردن شتاب گرانش

تئوری آزمایش :

حرکت یک آونگ ساده نمونه‌ای از حرکت هماهنگ ساده است. بنا به تعریف یک آونگ ساده یا آونگ ریاضی، گلولهٔ کوچکی است (در مقایسه با طول نخ) به جرم m که بوسیلهٔ نخی به جرم ناچیز و طول L از نقطه‌ای مانند O در شکل ۱ آویزان است و بدور از نیروهای نا پایستار، نوسانهائی منظم و نامیرا حول وضعیت تعادل انجام می‌دهد.در شرایط ویژه این نوسانها می‌توانند بشکل نوسانهای یک حرکت هماهنگ ساده باشند. همانطور که در آزمایش ۱ گفته شد، حرکت هماهنگ ساده هنگامی رخ می‌دهد که قانون هوک برقرار باشد. این بدان معناست که نیروی بازگرداننده متناسب با میزان جابجایی باشد. همانطور که در شکل دیده می‌شود اگر گلوله از نقطهٔ B که با راستای عمودی زاویه θ میسازد رها شود، در نبود اصطکاک و مقاومت هوا آونگ میان دو نقطهٔ متقارن B و B' بر روی کمانی از دایره ای به شعاع $L = OB$ نوسان خواهد کرد. تنها نیروهای وارد بر آن، وزن mg و کشش نخ T می‌باشند بطوریکه مؤلفه مماسی نیرو بر مسیر حرکت به صورت زیر نوشته می‌شود:



$$F_T = -mgsin\theta \qquad (۱)$$

علامت منفی در این رابطه نشان می‌دهد که جهت نیرو به سمت نقطهٔ تعادل گلوله است.

بنا به قانون دوم نیوتن و روابط موجود در حرکت دورانی می توان نوشت:

$$F_T = ma_T = -mgsin\theta$$

$$a_T = R\alpha = L\alpha \qquad , \qquad \alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

بنابراین داریم:

$$mL\frac{d^2\theta}{dt^2} = -mgsin\theta$$

حال چنانچه θ کوچک باشد، آنگاه $Sin\theta \cong \theta$ خواهد بود و رابطهٔ بالا به رابطهٔ مربوط به حرکت هماهنگ ساده تبدیل خواهد شد:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L}\,\theta = 0$$

این معادله شبیه معادلهٔ دیفرانسیل در حرکت هماهنگ ساده است که θ به جای x قرار گرفته است، و این یعنی تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی.

همانطور که در گذشته دیدیم پاسخ چنین معادله‌ای یک تابع سینوسی با مشخصات زیر خواهد بود:

$$\theta(t) = \theta_m cos\omega t$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

در نتیجه :

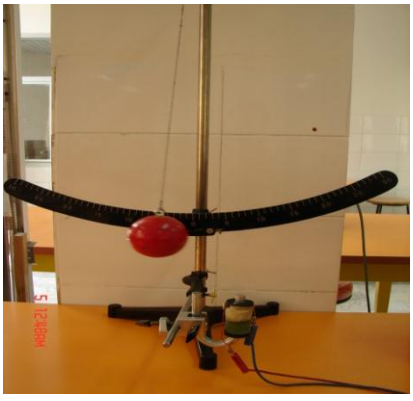
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

که در این رابطه L طول آونگ یعنی فاصله از نقطه آویز تا مرکز جرم گلوله، g شتاب ثقل زمین و T مدت زمان یک نوسان کامل می‌باشد. از رابطهٔ اخیر می‌توان دریافت که دورهٔ تناوب آونگ مستقل از جرم گلوله است.

در این آزمایش رابطه دورهٔ تناوب آونگ ساده با دامنه، طول آونگ، شتاب ثقل و جرم آن بررسی خواهد شد.

وسایل آزمایش :

انواع گلوله با جرمهای متفاوت، پایهٔ بلند، کرونومتر.



روش انجام آزمایش :

الف) بررسی رابطهٔ میان دورهٔ تناوب با دامنهٔ نوسان آونگ:

ابتدا طول آونگ را $60\ cm$ انتخاب نمائید. حال گلوله را به اندازهٔ $6\ cm$ به یک سو کشیده و سپس رها کنید. در همین زمان کرونومتر را نیز به کار انداخته و از روی مدت زمان ده نوسان کامل t، زمان تناوب یک نوسان را بدست آورید T .

دقت کنید که آونگ هنگام نوسان باید کاملا در یک صفحه عمودی حرکت رفت و برگشت انجام دهد و درصورتیکه مشاهده کردید بعد از چند نوسان حرکت آونگ به حرکت دورانی تبدیل شد، آونگ را متوقف کنید و مجددا آن را به نوسان وادارید.

یادآوری: برای اینکه بتوان $Sin\theta$ را برابر θ گرفت باید $\theta < 6^\circ$ باشد. برای رسیدن به این شرط کافی است که دامنهٔ نوسان از یک دهم طول آونگ کمتر باشد.

آزمایش را برای دامنه‌های ۲ و ۴ سانتیمتر تکرار کنید و اعداد بدست آمده را در جدول زیر وارد نمائید!

دامنهٔ نوسان / زمان — cm / s	X_1	X_2	X_3
t			
T			

جدول(۱)

پرسش: آیا دورهٔ تناوب و فرکانس آونگ ساده به دامنهٔ آن بستگی دارد؟

ب) رابطهٔ میان دورهٔ تناوب آونگ با جرم گلوله

هر یک از گلوله‌های موجود را که در جرم متفاوتند بترتیب به نخ آونگ متصل نموده، طول نخ را طوری تغییر دهید که طول آونگ برابر با ۶۰ سانتی‌متر گردد. با انحراف آن برای زوایای کوچکتر از 6° زمان ده نوسان کامل رااندازه بگیرید. نتایج آزمایش رادرجدول زیر یادداشت کنید. آیا دورهٔ تناوب آونگ مستقل از جرم آونگ است؟

جرم گلوله — $[gr]$ / زمان — s	m_1	m_2	m_3
t			
T			

جدول(۲)

ج) رابطهٔ میان دورهٔ تناوب آونگ با طول آونگ

یک گلوله آهنی را به نخ آونگ بیاویزید. طول آونگ را در مراحل مختلف برابر ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی متر انتخاب کرده و در هر مورد با اندازه‌گیری زمان ۱۰ نوسان، زمان یک نوسان کامل را بدست آورید. نتایج به دست آمده را در جدول زیر یادداشت نموده و با هم مقایسه نمائید.

این بار طول آونگ را برابر با ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته، تعداد نوسانات را به ۵۰ نوسان افزایش دهید. این کار را سه بار تکرار نمایید. بعد دوره تناوب آونگ را حساب نموده و شتاب گرانش را محاسبه کنید.

طول آونگ cm / زمان Sec	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
t						
T						
g						

میانگین شتاب گرانش: $\bar{g} = \quad m/s^2$

جدول(۳)

خواسته‌های آزمایش :

- در کاغذ تمام لگاریتمی نمودار تغییرات زمان نوسان را به صورت تابعی از طول آونگ بکشید. آیا این نمودار بصورت خطی راست است؟ به فرض مثبت بودن پاسخ این پرسش T و L چگونه به هم مربوط می شوند؟ آیا می‌توان نتیجه گرفت که برای این آونگ $T \propto \sqrt{L}$ است؟
- شیب خط و عرض از مبدا این نمودار بیان کنندهٔ چیست؟
- رابطهٔ $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ را بکار برده و به کمک داده های جدول مقادیر g را در هر مورد بدست آورده و $\bar{g}$ را تعیین کنید!
- خطای دیفرانسیلی مربوط به شتاب گرانش را در موردی که تعداد نوسانات ۱۰ و ۵۰ انتخاب شدند را محاسبه کرده با هم مقایسه نمایید. آیا اعداد بدست آمده با توجه به خطای آزمایش و اطلاع از مقدار g که در تهران برابر با ۹/۷۹۴ است قابل قبول است؟ توضیح دهید.
- اگر بجای طول آونگ، طول نخ را اندازه گرفته در فرمول قرار دهیم و سپس به محاسبه شتاب گرانش بپردازیم و شعاع گلوله نیز ۱ سانتی‌متر باشد، در حالتی که مقدار L برابر ۵۰ سانتی‌متر است درصد خطای ایجاد شده در محاسبه g چقدر خواهد بود؟ این مقدار را با درصد خطای بدست آمده برای این طول در حالت معمول مقایسه نمایید. چه نتیجه‌ای می‌توان از این مقایسه گرفت؟ اگر همین کار را با حالتی که طول آونگ ۷۰ سانتی‌متر و تعداد نوسانات برابر ۵۰ است مقایسه نماییم چه نتیجه‌ای بدست می‌آید؟ (برای پاسخ دادن به این سئوال از خطای لگاریتمی استفاده نمایید.)

د) رابطهٔ میان دورهٔ تناوب آونگ با شتاب ثقل زمین

در این بخش از آزمایش بایستی شتاب ثقل زمین را تغییر داد. برای شبیه سازی این مطلب می‌توان یک آهنربای الکتریکی را در زیر گلولهٔ آهنی آونگ قرار داد. نیروی مغناطیسی آهنربا وزنه را به پایین کشیده و باعث افزایش g می‌گردد، بنابراین در این بخش از آزمایش یک آهنربای الکتریکی را در زیر گلوله آهنی آونگ و به فاصلهٔ 0.5 سانتی متر از گلوله نصب کنید و آونگ را با همان طول ۶۰ سانتی متری و با یک دامنه حدود ۱ سانتی متر، بطوری که تاثیر حوزه آهنربا بر آن محسوس باشد، به نوسان درآورید. سپس با اندازگیری ۵ نوسان کامل، زمان یک نوسان را محاسبه کنید. آزمایش را هنگامی که آهنربای الکتریکی در فواصل ۰/۵، ۱/۵ و 2 سانتی متر در زیر گلوله آهنی نصب شده است نیز تکرار نموده و به کمک رابطهٔ $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ مقادیر g مربوط به هر اندازه‌گیری را بدست آورید. با داشتن این مقادیر جدول زیر را کامل نموده و درستی رابطهٔ $\frac{T}{T_i} = \sqrt{\frac{g_i}{g}}$ را بررسی نمائید.

یادآوری: پیش از انجام آزمایش و اتصال آهنربا به منبع تغذیه دقت کنید محور گلوله و آهنربا کاملا در راستای عمودی و منطبق برهم قرار گیرند.

فاصله آهنربا از گلوله cm / زمان sec	۰/۵	1	۱/۵	2	بدون آهنربا
t					
T					
g					

جدول(۴)

خواسته‌های آزمایش :

- نمودار زمان تناوب را به صورت تابعی از $\sqrt{\frac{L}{g}}$ برای جدول شماره ۴ بکشید. (برای رسم این نمودار کاغذ مناسب کدام است؟)
- آیا زمان نوسان یک آونگ در ارتفاعات مختلف از سطح زمین تغییر می‌کند؟ چرا؟
- دلیل انتخاب ۱۰ یا ۵۰ نوسان کامل بجای یک نوسان چیست؟
- دلیل بکارگیری کاغذ تمام لگاریتمی در نمایش برخی از نمودارها چیست؟ در این موارد چرا کاغذ معمولی مناسب نیست؟
- خطای استاندارد g را با استفاده از نتایج جدول (۳) بدست آورید.

آزمایش ششم : تعیین گشتاورماند اجسام صلب با استفاده از حرکت نوسانی ساده زاویه‌ای فنر پیچشی

هدف : بدست آوردن اینرسی دورانی چند جسم هندسی

تئوری آزمایش :

در حرکت انتقالی دیدیم که چنانچه قانون هوک برقرار باشد، می توان زمان تناوب نوسانهای هماهنگ ایجاد شده را از حل معادلهٔ زیر بدست آورد (به صفحهٔ ۲۹ مراجعه شود):

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

در این رابطه x میزان انحراف فنر از وضعیت تعادل و k ثابت فنر است که از قانون هوک $F = -kx$ به دست می‌آید. F نیز نیروی بازگردانندهٔ فنر است. با حل این معادله دیفرانسیل زمان تناوب نوسان (T) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

بدلیل تشابه حرکت دورانی با حرکت انتقالی می توان برای حرکت دورانی نیز روابطی شبیه آنچه در حرکت انتقالی برقرار است، نوشت. به عنوان نمونه قانون هوک در مورد فنر پیچشی به‌صورت زیر در می آید(به صفحهٔ ۳۷ مراجعه شود):

$$\tau = -k\theta$$

که در این رابطه θ زاویه انحراف از وضعیت تعادل فنر است و $\tau = r \times F$ گشتاور نیرو نامیده می شود. این معادله در مقایسه با معادلهٔ (۱)، معادلهٔ حرکت نوسانی سادهٔ زاویه ای بوده و آنرا بصورت زیر نیز می توان نشان داد:

$$I\ddot{\theta} + k'\theta = 0 \qquad (۲)$$

که در آن $I = \int r^2\, dm$ گشتاور ماند یک جسم صلب است. حل معادله (۲) منجر به معادله حرکت نوسانی ساده زاویه ای می شود ودر تشابه با معادله خطی، زمان تناوب آن از رابطه زیر به دست می آید.

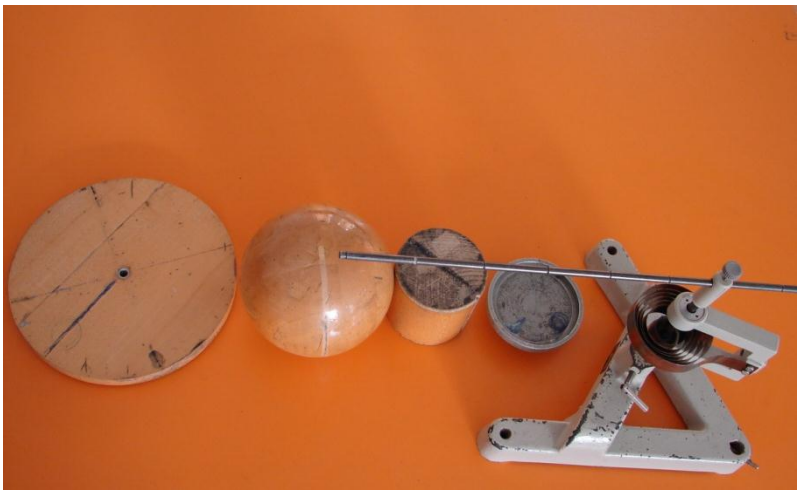
$$T = 2\pi\sqrt{I/K'}$$

در این آزمایش ابتدا زمان تناوب نوسان اندازه گیری شده و از روی آن گشتاور ماند محاسبه میگردد.

$$I = \frac{K'T^2}{4\pi^2} \qquad (3)$$

وسایل آزمایش :

کرنومتر، اجسامی همگن به شکل: کره، میله، استوانه، ترازوی دقیق، فنر پیچشی با پایه.



روش انجام آزمایش :

گشتاورماند اجسام را می توان با استفاده از رابطه (۳) به دست آورد. برای این کار ابتدا جسم موردنظر را بر روی محور عمودی فنر پیچشی سوار نموده (برای سوار کردن دقت کنید بر روی محور فشار نیاورید) و از وضعیت ترازمندی آن به اندازهٔ زاویهٔ θ° در جهت پیچش و فشرده شدن فنر بچرخانید. دست کم پنج نوسان کامل را بوسیلهٔ کرنومتر یا ساعت الکترونیکی اندازه گرفته و از روی آن زمان تناوب نوسانهای جسم را بدست آورید. با دانستن مقدار K' که بر روی صفحه دستگاه درج شده است و جایگذاری در رابطهٔ ۳، I را بدست آورید برای هر جسم آزمایش را حداقل سه بار تکرار کنید. با داشتن پارامترهای لازم از هر جسم که در جدول زیر داده شده است گشتاور ماند اجسام را از راه نظری نیز به دست آورده و جدول زیر را کامل کنید.

$$K' = 0.0393 \pm 0.0001 \ {}^{Nm}/_{rad}$$

یادآوری: هنگام جداکردن اجسام از روی میله با احتیاط عمل نمائید که اجسام مزبور در اثر شتاب جدا شدن به روی زمین نیافتند و یا به‌صورت شما برخورد نکنند.

قطر کره =۱۴۵ mm جرم کره = ۹۶۰ gr	طول میله : ۶۰ سانتی متر جرم میله : ۱۲۹ گرم
جرم صفحهٔ گرد = ۳۵۰ gr قطر صفحه گرد = ۲۲۵ mm	جرم استوانه = ۳۵۰ gr قطر استوانه = ۹۰ mm

T (sec)	t_1	t_2	t_3	t_{ave}	$T = \frac{t_{ave}}{n}$	$I_{Exp} = \frac{K'T^2}{4\pi^2}$	I_{Theory}	
میله								$\frac{1}{12}mL^2$
صفحه گرد								$\frac{1}{2}mR^2$
استوانه								$\frac{1}{2}mR^2$
کره								$\frac{2}{5}mR^2$

خواسته‌های آزمایش :

- لختی دورانی را تعریف کنید و رابطه کلی آن را بنویسید.

- چنانچه هنگام اندازه‌گیری جرم میله جرم گیره متصل به میله را نیز به آن اضافه نماییم در مقدار نظری اینرسی دورانی میله تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد خواهد شد یا خیر؟ چرا هنگام تعیین لختی دورانی بصورت تجربی این امر مورد بررسی قرار نگرفت؟

- با استفاده از این روش (آونگ پیچشی) آیا می توان گشتاورماند هر جسم صلب (با هر شکل) را به طور تجربی به دست آورد؟ پاسخ خود را مستدل توضیح دهید.

- حرکت نوسانی ساده زاویه‌ای چه نوع حرکتی است؟

- برای هر یک از بخشهای جدول بالا درصد خطا را نسبت به مقدار نظری محاسبه کنید.

$$\text{درصد خطا} = \frac{\delta I}{I_{Theory}} \times 100$$

$$\delta I = I_{Theory} - I_{Exp}$$

- خطاهای دیفرانسیلی مربوط به مقدار نظری و تجربی لختی دورانی را برای کره حساب نمایید. (کلیه طولها با دقت ۰/۱ میلی‌متر و جرم‌ها با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری شده‌اند.)

آزمایش هفتم: بررسی حرکت دورانی ژیروسکوپ و تعیین گشتاور ماند آن

هدف ۱ : محاسبه گشتاورماند (لختی دورانی) یک ژیروسکوپ به کمک اصل پایستگی انرژی مکانیکی

تئوری آزمایش :

برا ی اینکه ژیروسکوپی پیرامون محور خود بچرخش درآید، می توان نخی را بدور بدنهٔ آن پیچیده و سپس وزنه ای را به انتهای آزاد نخ متصل نمود. در این صورت گشتاور نیروی حاصل از وزن وزنه بوسیلهٔ نخ به ژیروسکوپ منتقل شده و سبب چرخش آن بدور محور خود می گردد. با باز شدن نخ و سقوط وزنه به سمت پائین، از انرژی پتانسیل وزنه کم شده و به انرژی جنبشی انتقالی وزنه و دورانی ژیروسکوپ اضافه می گردد، بطوریکه در سطح پتانسیل صفر تمام انرژی مکانیکی مجموعه بصورت انرژی جنبشی انتقالی و دورانی خواهد بود. در نبود نیروهای ناپایستار، اصل پایستگی انرژی مکانیکی برقرار است: $E_i = E_f$ و برای دو نقطهٔ ابتدائی و انتهائی مسیر حرکت وزنه می توان نوشت:

$$E_i = E_f \qquad \rightarrow \qquad mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

که در آن m جرم وزنه، h طول مسیر سقوط وزنه، v سرعت وزنه در موقعیت نهایی، I لختی دورانی ژیروسکوپ پیرامون محور دوران و ω سرعت زاویه ای دوران ژیروسکوپ می باشند.

(**یادآوری:** از دید فیزیکی گشتاور ماند یک جسم نشان دهندهٔ میزان مقاومتی است که جسم در برابر تغییر حرکت دورانی از خود نشان می دهد و از دید ریاضی برابر است با $I = \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2$ که در آن r_{i} فاصلهٔ جرم m_{i} از محور دوران می‌باشد.)

در نبود نیروهای دیگر و با ثابت بودن گشتاور نیروی وارد بر ژیروسکوپ، شتاب زاویه‌ای و در نتیجه شتاب مماسی دستگاه ثابت خواهد ماند، بنابراین با جایگزینی $v = r\omega, \quad h = \frac{1}{2}a_t t^2, \quad v = a_t t$ در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$mgh = \frac{1}{2}m\left(\frac{4h^2}{t^2}\right) + \frac{1}{2}I\left(\frac{4h^2}{r^2t^2}\right)$$

و در نهایت رابطه مربوط به لختی دورانی به شکل زیر بدست می‌آید:

$$I = mr^2\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right)$$

که در این رابطه r فاصلهٔ نقطه اثر نیرو تا محور دوران بوده (چرا؟) و a_t شتاب مماسی حاصل از دوران ژیروسکوپ می باشد.

هدف این آزمایش بدست آوردن گشتاور ماند ژیروسکوپ به کمک رابطهٔ بالا است. همانطور که دیده می شود با اندازه گیری کمیتهای h، r، t و m می توان I را بدست آورد.

وسایل آزمایش :

وزنه‌های متفاوت، کولیس، ساعت الکترونیکی (یا کرونومتر)، ژیروسکوپ بزرگ، خط کش و شاخص، پایهٔ نگه دارنده.

روش انجام آزمایش :

ژیروسکوپ مانند شکل سوار شده و نخ مناسبی (نخ ماهی‌گیری) به دور محور دوران آن پیچانده می‌شود. با آویختن وزنهٔ مورد نظر دستگاه از حالت سکون رها شده و با کرونومتر مدت زمان لازم برای پیمودن مسیر تا ارتفاع مورد نظر h اندازه گیری می‌گردد. با داشتن زمان پیمودن مسیر و تعیین شعاع چرخش می‌توان مقدار میانگین I را بدست آورد.

آزمایش را برای ارتفاع سقوط ۹۰ سانتی‌متر با وزنه‌هایی به جرم های ۱۰۰، ۱۵۰ ، ۲۰۰ ، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ گرم انجام داده و جدول زیر را کامل نمائید، سپس مقدار متوسط I را بدست آورید. برای دقت بیشتر در بدست آوردن مقادیر t و h در صورت امکان میتوان آزمایش را بگونه‌ای ترتیب داد که به جای شاخص، یک مانع نوری مرتبط به کرونومتر الکترونیکی بکار گرفته شود، بطوریکه با عبور وزنه از مانع نوری بالا کرونومتر بکار افتاده و با رسیدن آن به روزنهٔ دوم قطع شود.

$\boldsymbol{h}[m]$	$\boldsymbol{m}[kg]$	t_1	t_2	t_3	$\boldsymbol{t}_{ave}[sec]$	$\boldsymbol{I}[kg.m^2]$
۰/۹۰	۰/۱۰۰					
۰/۹۰	۰/۱۵۰					
۰/۹۰	۰/۲۰۰					
۰/۹۰	۰/۲۵۰					
۰/۹۰	۰/۳۰۰					
۰/۹۰	۰/۳۵۰					
۰/۹۰	۰/۴۰۰					

سپس آزمایش را با وزنهٔ ۲۰۰ گرمی برای ارتفاعهای ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ سانتی متری تکرار نموده و نتایج بدست آمده را در جدول زیر وارد نمائید.

$h[m]$	$m[kg]$	t_1	t_2	t_3	$t_{ave}[sec]$	$I[kg.m^2]$
۰/۵۰	۰/۲۰۰					
۰/۶۰	۰/۲۰۰					
۰/۷۰	۰/۲۰۰					
۰/۸۰	۰/۲۰۰					
۰/۹۰	۰/۲۰۰					

خواسته‌های آزمایش :

- در رسیدن به رابطه مربوط به لختی دورانی ژیروسکوپ

$$I = mr^2\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right)$$

چه فرض‌ها و تقریب‌هایی لحاظ شده است؟

- چرا در محاسبات، r را شعاع محور کوچک ژیروسکوپ در نظر می‌گیرند؟

- اگر ژیروسکوپ دارای تقارن محوری نباشد بعبارتی مرکز جرم آن بر روی محور قرار نداشته باشد چه فرض‌هایی نقض خواهند شد؟ آیا می‌توان از این روش برای محاسبه لختی دورانی آن استفاده نمود؟

- چنانچه به پره‌های ژیروسکوپ به‌طور متقارن وزنه‌های یکسان اضافه شود، گشتاورماند ژیروسکوپ چگونه تغییر می‌کند؟ در رابطه با نقش جرم های افزوده شده بحث کنید.

- خطای استاندارد یا انحراف معیار میانگین در محاسبه I را به دست آورید.

- چرا وزنه باید حرکتش را با $v = 0$ آغاز کند؟

- خطای دیفرانسیلی مربوط به لختی دورانی I را برای یکی از حالت‌ها بدست آورید.

- از استفاده از روش ارقام با معنی، توضیح دهید که چگونه ارقام بامعنی برای I را می‌توان تعیین نمود.

- خطای دیفرانسیلی را برای قسمت اول و در حالت کلی برای لختی دورانی I بدست آورید.

آزمایش هشتم: ظرفیت گرمایی ویژه و گرمای نهان ذوب اجسام

هدف : اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی یک جسم فلزی و گرمای نهان ذوب یخ به روش اختلاط

تئوری آزمایش :

بطور کلی در روش اختلاط اجسامی با دماهای متفاوت در تماس گرمائی با یکدیگر قرار گرفته و سرانجام به تعادل گرمائی می رسند. در این حالت اختلاف دمائی میان آنها صفر شده و میزان گرمائی که از اجسام گرماده (اجسامی با دمای بالاتر) گرفته شده است برابر با گرمائی خواهد بود که اجسام گرماگیر (اجسامی با دمای پائین تر) دریافت کرده اند. از این موضوع می توان برای تعیین ظرفیت گرمائی ویژهٔ یک جسم جامد (که عبارتست از مقدار گرمای لازم تا دمای یکای جرم جسم به اندازهٔ یک درجهٔ کلوین تغییر کند) کمک گرفت، بدین شکل که جسم را در اختلاط گرمائی با اجسامی دیگر قرار داده و با محاسبهٔ گرمای گرفته شده و داده شده بوسیلهٔ اجسام و مشخص نمودن دیگر پارامترهای لازم به ظرفیت گرمائی جسم مورد نظر رسید. این آزمایش بگونه ای ترتیب داده شده که یک گرماسنج و آب داخل آن به عنوان اجسام گرماگیر و یک قطعه فلزی به عنوان جسم گرماده در نظر گرفته شده اند. تعادل گرمایی میان اجسام گرماده و گرماگیر باعث می‌شود تا اختلاف دمایی صفر شده و دمای تعادل θ_n حاصل گردد. از آنجا که گرمای داده شده بوسیلهٔ اجسام گرماده برابر گرمای گرفته شده بوسیلهٔ اجسام گرماگیر است، می توان نوشت:

$$(m_w C_w + A)(\theta_e - \theta_i) = m_x C_x (\theta_M - \theta_e) \qquad (1)$$

که در این رابطه داریم:

C_w : ظرفیت گرمایی ویژه آب. $J/kg.C^\circ$ ۴۱۹۰ یا $Cal/gr.C^\circ$ ۱ — m_w : جرم آب داخل گرماسنج.

m_x : جرم فلز یا غیر فلز — θ_i: دمای اولیه آب و گرماسنج.

θ_M : دمای اولیه قطعه فلز — θ_e دمای تعادل

A: ظرفیت گرمایی گرماسنج (طبق تعریف، مقدار گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازهٔ یک درجه کلوین یا سانتی گراد). — C_x : ظرفیت گرمایی ویژه جسم موردنظر.

با مشخص بودن C_w و اندازه گیری دیگر پارامترهای موجود در رابطهٔ بالا می توان به ظرفیت گرمائی ویژهٔ جسم (C_x) رسید.

وسایل آزمایش :

کالریمتر، دماسنج، چراغ گاز برقی، فلاکس یخ، قطعه فلزی، ترازو.

الف- اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی ویژه قطعه فلزی.

روش انجام آزمایش :

برای بدست آوردن ظرفیت گرمایی گرماسنج A می‌توان به این ترتیب عمل کرد. ابتداء مقداری آب سرد درون گرماسنج ریخته آن را بر روی ترازو قرار داده جرم آن را اندازه می‌گیریم. (جرم گرماسنج بدون آب باید قبلا اندازه گرفته شده باشد). بعد درپوش گرماسنج را گذاشته بوسیله همزن آب درون آن را بهم می‌زنیم تا تمام نقاط آن همدما شود. بوسیله دماسنج دمای آن را می‌خوانیم. بعد مقداری آب گرم که دمای آن اندازه گرفته شده است را درون گرماسنج می‌ریزیم و در آن را سریع می‌بندیم. بوسیله همزن آنقدر آب درون

گرماسنج را بهم می‌زنیم تا به دمای تعادل برسند. مجددا کالریمتر ار بهمراه آب درون آن با ترازو وزن می‌کنیم تا جرم آب گرم نیز بدست آید. با استفاده از رابطه زیر می‌توانیم با داشتن دماهای اولیه آب گرم و سرد و همینطور دمای تعادل نهایی و داشتن جرم آب گرم و سرد، ظرفیت کالریمتر را بدست آوریم.

$$(m_c C_w + A)(\theta_e - \theta_c) = m_h C_w(\theta_h - \theta_e)$$

در رابطه بالا اندیس c برای آب سرد و اندیس h برای آب گرم است. و اندیس e نیز مربوط به حالت تعادل گرمایی است.

توجه: شما لازم نیست که ظرفیت گرماسنج را بدست آورید. مقدار آن بر روی کالریمتر نوشته شده است.

برای بدست آوردن ظرفیت گرمایی ویژه فلز مطابق زیر عمل نمایید.

ابتداء جرم قطعه فلزی که ظرفیت گرمایی ویژهٔ آن مجهول است را با ترازو بدست آورید m_x. سپس قطعه فلز را به نخی بسته و از میلهٔ افقی متصل به پایه به گونه ای آویزان کنید تا بطور کامل درون ظرف آبی که روی هیتر است غوطه‌ور گردد. حال جرم گرماسنج خالی را بدون درپوش با ترازو اندازه بگیرید. سپس مقداری آب درون گرماسنج بریزید تا سطح آب حدود ۳ سانتی‌متر تا لبه ظرف فاصله داشته باشد. (بهتر است دمای آب حدود ۲ درجه کمتر از دمای محیط باشد) جرم کالریمتر و آب درون آن را بدون درپوش اندازه‌گیری نمایید تا از تفاضل جرم های بدست آمده جرم آب بدست آید. m_w

اکنون درپوش گرماسنج را گذاشته با فنرهای مربوطه آن را محکم نمایید. تا تبادل حرارتی بین گرماسنج و محیط به حداقل مقدار ممکن برسد. صبر کنید تا آب درون گرمکن بجوش آید. بعد از چند دقیقه که از جوشیدن اب گذشت تمام نقاط فلز با آب جوش همدما خواهند شد. دماسنج را طوری درون آب جوش در کنار قطعه فلز نگهدارید که با ته ظرف تماس نداشته باشد. بعد از چند دقیقه دماسنج دمای ثابتی را که همان دمای آب جوش و قطعه فلز است نشان خواهد داد T_2 . حال باید دمای اولیه آب و گرماسنج را بخوانیم. ابتداء توسط همزن آب درون کالریمتر را بهم می‌زنیم تا تمام نقاط آن همدما شود. اکنون دمای درون گرماسنج را ار روی دماسنجی که بر روی آن قرار دارد خوانده و یادداشت می‌کنیم T_1. بلاقاصله بعد از خواندن دمای گرماسنج، درپوش آن را باز نموده قطعه فلز را که درون آب جوش قرار دارد درون کالریمتر می‌اندازیم. هرچه این عمل سریعتر انجام گردد میزان انرژی گرمایی مبادله شده با محیط کمتر شده دقت آزمایش بالا خواهد رفت.

دقت کنید در اثر انداختن قطعه فلز به درون گرماسنج آب درون گرماسنج به بیرون نپاشد.

آب گرماسنج را با هم زن به هم بزنید تا به دمای تعادل T_n برسد. دمای تعادل را از روی دماسنج خوانده و به کمک رابطه (۱) ظرفیت گرمایی ویژه فلز را بدست آورید.

نکته مهم: بعد از اینکه فلز را بداخل گرماسنج انداختید دمای مجموعه بالا خواهد رفت. اگر دما از دمای محیط بالاتر رود بعد از رسیدن به یک مقدار ماکزیمم آرام آرام کاهش پیدا می‌کند. بیشینه دمای نشان داده شده توسط دماسنج همان دمای تعادل خواهد بود. (چرا؟)

ب- اندازه‌گیری گرمای نهان ذوب یخ.

روش انجام آزمایش :

چند قطعه یخ با دمای صفر درجه را از ظرف مخلوط آب و یخ (فلاکس) بیرون آورده و پس از خشک کردن سریع به درون گرماسنج که در آن قداری آب قرار دارد، می‌اندازیم. تبادل گرمایی میان یخ و گرماسنج باعث می‌شود تمامی یخ در نقطهٔ ذوب خود (دمای صفر درجه) به آب تبدیل شده و سرانجام تمام مجموعه به دمای تعادل T_n برسد. در این فرایند، گرمائی که آب گرماسنج از دست داده است صرف آبتدا تبدیل یخ صفر درجه به اب صفر درجه و سپس تبدیل اب صفر درجه به آب با دمای T_n شده است و می توان نوشت:

$$m L_f + m C_w T_n = (m_w C_w + A)(T_1 - T_n) \qquad (۲)$$

که در آن داریم:

C_w : ظرفیت گرمایی ویژه آب — m : جرم یخ

A : ظرفیت گرمایی گرماسنج یا ارزش آبی. — L_f: گرمای نهان ذوب یخ.

T_1 : دمای آب داخل گرماسنج. — T_n : دمای تعادل نهایی.

m_w : جرم آب داخل گرماسنج.

برای تعیین L_f یخ از این معادله، ابتدا مقداری آب با دمایی حدود ۳۰ تا 35 درجه سانتی‌گراد درون گرماسنج ریخته جرم گرماسنج را بهمراه آب درون آن بدون درپوش اندازه بگیرید و جرم خالص آب m_w را محاسبه نمایید. درپوش کالریمتر را بسته و آب درون آن را بهم بزنید. دمای تعادل گرماسنج و آب درون آن T_1 را اندازه بگیرید. حالا جرم کل گرماسنج و آب داخل آن را بهمراه درپوش اندازه بگیرید. سپس چند قطعه یخ را (که در آن حباب هوا نباشد) از فلاکس درآورده و بعد از خشک کردن سریع به درون گرماسنج بیندازید. اکنون کل گرماسنج حاوی یخ را ً وزن نموده و جرم قبلی کل گرماسنج را از آن کسر و جرم یخ را محاسبه کنید. لازم است آب داخل گرماسنج به طور مداوم و آرام با هم زن، به هم زده شود و هنگامی که تمام یخ ذوب و دمای آب روی دماسنج ثابت شود، دمای تعادل T_n را بخوانید. چناچه دمای مجموعه از دمای محیط پایین تر بیاید بعد از رسیدن به یک مقدار کمینه مجددا افزایش خواهد یافت. کمینه دمای خوانده شده توسط دماسنج همان دمای تعادل خواهد بود. چرا؟ با قرار دادن مقادیر به دست آمده در رابطهٔ (۲) گرمای نهان ذوب یخ را بدست آورید! برای اطمینان از اعداد بدست آمده آزمایش را دوبار تکرار نمائید!

خواسته‌های آزمایش :

- چرا در اندازه‌گیری C فلز باید آن را مدتی در آب جوش نگه داشت؟
- چرا باید دمای آب اولیه داخل گرماسنج به ترتیب برای گرمای نهان ذوب یخ و گرمای ویژه فلز بیشتر و یا کمتر از دمای محیط آزمایشگاه باشد؟
- خطای دیفرانسیلی را در محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه فلز و گرمای نهان ذوب یخ به دست آورید.

پاورقی

۱-تصحیح گرماسنجی : با وجود تمام دقت هایی که در ساختمان گرماسنج‌ها به عمل می‌آید با این حال چون میان محیط خارج و ظرف گرماسنج، اختلاف دما وجود دارد، مقداری گرما در نتیجهٔ عواملی از قبیل تشعشع، همرفتی، رسانایی و ... تلف می‌شود. عوامل دیگری نیز وجود دارد که باعث عدم دقت در نتایج سنجش است. مثلاً مقداری مایع ممکن است تبخیر گردد و در نتیجه مقداری گرما

جذب شود. در اثر اصطکاک آب و میله در هنگام هم زدن آب درون گرماسنج مقداری گرما ایجاد می‌گردد. چون از تأثیر این عوامل نمی توان عملاً جلوگیری کرد، در سنجش‌های دقیق باید با محاسبه، نتایج به دست آمده از سنجش را تصحیح کرد.

چنانچه گرمای مذکور تلف نمی‌شد دمای نهایی به جای این که به T_n برسد کمی بالاتر می‌رفت. یعنی مساوی $T_f = T_n + \Delta T_n$ در این صورت معادله به شکل زیر در می‌آید :

$$(C_w m_w + A)\left[(T_n + \Delta T_n) - T_1\right] = m_x C_x \left[T_2 - (T_n + \Delta T_n)\right]$$

برای تعیین ΔT_n می توان از روش ترسیمی استفاده کرد. که از ذکر آن خودداری می‌شود.

۲- نمونه محاسبه خطا به روش دیفرانسیلی در محاسبه C_x :

رابطهٔ $(M + A)(T_2 - T_1) = mc(T_n - T_2)$ را به صورت زیر در می‌آوریم :

$$C = \frac{(M + A)(T_2 - T_1)}{m(T_n - T_2)}$$

از این رابطه ابتدا لگاریتم گرفته و سپس دیفرانسیل می‌گیریم :

$$LnC = Ln(M + A) + Ln(T_2 - T_1) - Lnm - Ln(T_n - T_2)$$

$$\frac{dC}{C} = \frac{d(M + A)}{M + A} + \frac{d(T_2 - T_1)}{T_2 - T_1} - \frac{dm}{m} - \frac{d(T_n - T_2)}{T_n - T_2}$$

چون خطا هم مثبت است و هم منفی و برای این که ماکزیمم خطا به دست آید کلیه علامات منفی را مثبت می‌کنیم.

$$\frac{dC}{C} = \frac{dM + dA}{M + A} + \frac{dT_2 + dT_1}{T_2 - T_1} + \frac{dm}{m} + \frac{dT_n + dT_2}{T_n - T_2}$$

اگر در اندازه‌گیری دما درجه بندی وسیله اندازه گیری ۱ درجه باشد و بتوان تا ۰,۵ درجه را از روی دماسنج تشخیص داد در نتیجه خطای دماسنج ۰,۵ درجه است و همچنین در اندازه‌گیری جرم، اگر خطا ۰,۱ گرم باشد می توان نوشت :

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{0.1 + \Delta A}{M + A} + \frac{1}{T_2 - T_1} + \frac{0.1}{m} + \frac{1}{T_n - T_2}$$

تذکر: اگر مقدار ΔA بر روی گرماسنج نوشته شده باشد از آن در رابطه فوق استفاده گردد. در غیر اینصورت ΔA را صفر منظوز نمائید.

آزمایش نهم :

۱ – اثر ژول (اثر گرمایی جریان الکتریسیته)

هدف : تعیین فاکتور تبدیل میان دو نوع یکای انرژی : ژول و کالری

تئوری آزمایش :

روشن است که برای پیدا کردن تجربی رابطه میان متر و سانتی متر می توان طول یک میله را یک بار به متر و یک بار دیگر به سانتی متر اندازه گرفت و سپس با پیدا کردن ضریب تناسب میان مقادیر بدست آمده ، ضریب تبدیل متر به سانتی متر را بدست آورد .

در اینجا نیز از روش تجربی برای بدست آوردن رابطه میان یکای ژول و یکای کالری (واحد سنتی انرژی گرمائی) که هر دو یکاهای انرژی می باشند، کافی است به یک وسیله مقدار مشخصی انرژی را تولید نموده و در محاسبه آن ، یکاهای کمیت های موثر در اندازه گیری را بگونه ای انتخاب کنیم که مقدار انرژی یکبار بر حسب ژول و بار دیگر بر حسب کالری بدست آید. سپس به منظور پیدا کردن ضریبی که تناسب میان این دو مقدار را به تساوی تبدیل کند ، می توان آزمایش را بگونه زیر ترتیب داد :

سیمی به مقاومت الکتریکی R را که در اثر عبور جریان الکتریکی I از آن، گرما تولید می شود در نظر می گیریم. چنانچه تمام گرمائی که در مدت t ثانیه در سیم ایجاد می شود (W) ، برای گرم کردن یک گرماسنج (کالریمتر) و آب درون آن مصرف گردد (Q) ، در این صورت به شرط یکی بودن یکاهای Q و W می توان نوشت :

$$Q = W \quad (1)$$

در این رابطه W یعنی انرژی گرمائی تولید شده در سیم بنا بر قانون ژول متناسب است با مقاومت R ، مجذور شدت جریان I^2 و مدت زمان عبور جریان t :

$$W = RI^2t = VIt \quad (V=\text{اختلاف پتانسیل الکتریکی}) \qquad (۲)$$

انرژی داده شده به آب و کالریمتر نیز از رابطه زیر بدست می آید.

$$Q = (mC_w + A)(T_2 - T_1) \qquad (۳)$$

که در این رابطه داریم :

m: جرم آب درون گرماسنج — C_W : ظرفیت گرمایی ویژه آب $1\frac{Cal}{gr.°C} = 4190\ \frac{J}{Kg.°C}$

A: ظرفیت گرمایی گرما سنج — T_1: دمای اولیه آب درون گرماسنج و متعلقات آن

T_2: دمای ثانویه آب — V : اختلاف پتانسیل

I : جریان عبوری — t : مدت زمان عبور جریان

W : انرژی الکتریکی مصرف شده. — Q : افزایش انرژی گرمایی گرماسنج و آب درون آن

برای رسیدن به عامل تناسب میان کالری و ژول، کافی است که یکی از دو کمیت W و Q را به ژول و دیگری را به کالری بدست آورد .

در این صورت است که رابطه (۱) بصورت زیر تغییر می یابد که در آن J همان ضریب تبدیل ژول به کالری خواهد بود :

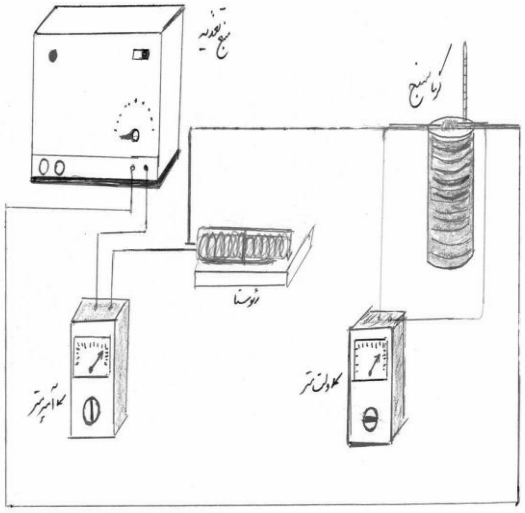
$$W \propto Q \Rightarrow W = JQ \ \&\ J = \frac{W}{Q} \qquad (4)$$

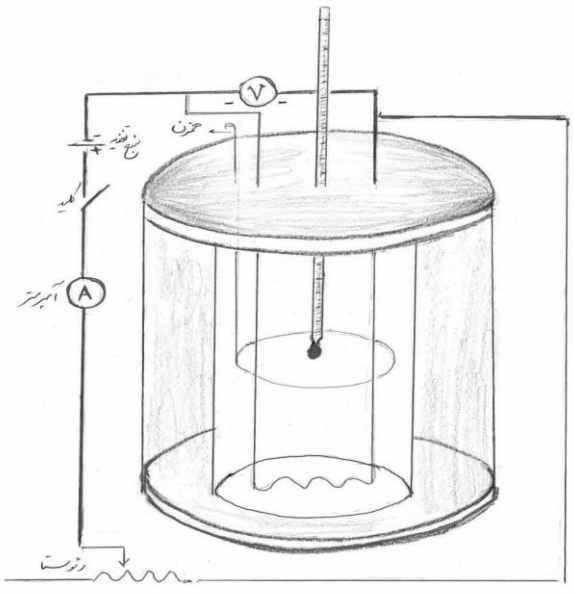
برای رسیدن به این هدف می توان در رابطه ۲ با انتخاب V بر حسب ولت ، I برحسب آمپر و t بر حسب ثانیه مقدار W را بر حسب ژول بدست آورد و در رابطه (۳) با انتخاب جرم به گرم ، C_w بر حسب Cal/gr.°C، A بر حسب Cal/°C و T بر حسب °C ، به مقدار Q بر حسب کالری رسید و این دو را در رابطه (۴) قرار داد.

در این آزمایش یک کالریمتر دارای یک رشته مقاومت برای گرم کردن مقداری آب به کار می رود. مقدار الکتریکی V و I در طول گرم کردن با ولت متر و آمپرمتر اندازه گیری شده و از روی میزان تغییرات درجه حرارت آب ، انرژی گرمایی محاسبه می شود.

وسایل آزمایش :

گرماسنج دارای گرمکن الکتریکی ، ترازو ، کرنومتر ، رئوستا ، منبع تغذیه جریان مستقیم .





روش انجام آزمایش :

برای انجام آزمایش مداری مانند شکل که شامل مقاومت درون گرماسنج ، آمپرمتر، منبع تغزیه جریان مستقیم ، ولت متر و رئوستا است را ترتیب می دهیم .

ابتدا $\boldsymbol{M_1}$ جرم ظرف خالی گرماسنج را بدست آورید ، سپس درون ظرف را تا دو سوم آب ریخته (بطوری که دماسنج و سیم گرماده (المنت)درون آب قرار گیرد) و دوباره آن را وزن کنید $\boldsymbol{M_2}$

جرم آب از رابطه $\mathrm{M} = \boldsymbol{M_2} - \boldsymbol{M_1}$ به دست می آید . حال مدار را وصل کرده و پس از تنظیم جریان (بوسیله رئوستا) بر روی ۵ آمپر مدار را قطع نمایید . با هم زن آب درون گرماسنج را هم زده و دما را از روی دماسنجی که روی گرماسنج است خوانده و یادداشت نمائید . این دما T_1 نام دارد .

حال هم زمان با وصل کردن مدار ، کرنومتر را روشن نموده و دما را در هر دقیقه یادداشت کرده و این کار را تا ۱۵ دقیقه ادامه دهید .(یادآوری : در مدتی که مدار وصل است باید آب درون گرما سنج به طور یکنواخت و به آرامی هم زده شود). در هنگام آزمایش درجات ولت متر و آمپرمتر را پیوسته خوانده و تلاش نمائید که در صورت لزوم بوسیله رئوستا از تغییرات آنها جلوگیری نمائید (چرا؟) پس از پانزده دقیقه مدار را قطع کنید .

نتایج :

جدول گرم شدن :

t(min)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
$\mathrm{T}(^{\circ}\boldsymbol{C})$															

هم چنین در جدول زیر نتایج را برای بازه های زمانی خواسته شده در آزمایش درج کنید و عدد ژول را محاسبه کنید .

$\boldsymbol{M_{[gr]}}$	$\boldsymbol{C_w}$	A	$\boldsymbol{\Delta T}$	$\boldsymbol{V_{[V]}}$	$\boldsymbol{I_{[A]}}$	$\boldsymbol{\Delta t_{[s]}}$	$\boldsymbol{Q_{[Cal]}}$	$\boldsymbol{W_{[J]}}$	J

خواسته های آزمایش :

- نمودار تغیرات دما (گرم شدن) را بر حسب زمان در یک کاغذ میلیمتری رسم کنید . شیب خط را $(\tan\boldsymbol{\alpha} = \frac{\boldsymbol{\Delta\theta}}{\boldsymbol{\Delta t}})$ را به دست آورده و مقدار J را محاسبه کنید .
- نمودار تغییرات دما (گرم شدن و سرد شدن) را برحسب زمان در یک کاغذ میلیمتری رسم کنید . چرا در این نمودار ، تغییرات در قسمت گرم شدن خطی و در قسمت سرد شدن خطی نیست و انحنا دارد ؟
- اگر شدت جریان در ضمن آزمایش تغییر کند در جواب آزمایش چه اثری خواهد داشت ؟ چرا شدت جریان I باید در طول آزمایش ثابت باشد ؟
- چرا باید در طول آزمایش مایع داخل گرما سنج را به هم بزنیم ؟
- انرژی یک کالری بیشتر است یا یک ژول ؟ چرا ؟
- در این آزمایش آیا باید از انرژی هدر رفته چشم پوشی نمود یا خیر ؟ چرا ؟

توجه : برای این که اتلاف گرما کم باشد بهتر است دمای آب گرماسنج را طوری انتخاب کنید که مثلا دمای گرماسنج پیش از شروع آزمایش ده درجه پائین تر از دمای محیط باشد و آزمایش را ادامه دهید تا هنگامی که دمای گرماسنج به ده درجه بالاتر از دمای محیط برسد .

- قانون نیوتن برای سرد شدن اجسام

هدف: بررسی و مشاهده درستی قانون

تئوری: نیو تن نشان داد یک جسم گزم زمانیکه دز محیط سرد قرار گیرد، آهنگ زمانی سرد شدن جسم با منفی اختلاف دمای جسم و محیط متناسب است. با انتخاب ضریب تناسب k، می توان نوشت

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a) \qquad (۱)$$

که در آن T_h دمای جسم گرم و T_a دمای محیط سرد بر حسب سانتی گراد است. k را ثابت زمانی واهلش (Relaxation Time Constant) می نامند و یکای آن عکس یکای زمان t می باشد. با انتگرال گیری از رابطهٔ (۱) در بازهٔ زمانی لحظه شروع اندازه گیری زمان $t_0 = 0$ تا زمان دلخواه t خواهیم داشت:

$$\frac{dT}{(T - T_a)} = -kdt \qquad (2)$$

$$\int_{T_h}^{T} \frac{dT}{(T - T_a)} = \int_{t_0}^{t} -kdt$$

$$Ln\frac{(T - T_a)}{(T_h - T_a)} = -kt$$

$$(T - T_a) = (T_h - T_a)e^{-kt}$$

یا

$$T = T_a + (T_h - T_a)e^{-kt} \qquad (3)$$

روش اجرای آزمایش:

ابتدا دمای محیط را اندازه گرفته و یادداشت نمائید. سپس در یک ظرف استوانه ای فلزی تا ۲ سانتی متر پائین تر از لبهٔ ظرف، آب جوش بریزید و بلافاصله دمای آنرا اندازه گرفته و همزمان کرنومتر را شروع کرده و هر یک دقیقه دمای آب را از روی دماسنج خوانده و در جدول زیر ثبت کنید.

توجه: آب را پیوسته بهم زنید تا توزیع یکنواخت دمای آب درون ظرف در تمام لحظات بر قرار باشد.

جدول سرد شدن :

t(min)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
T($°C$)															
t(min)	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
T($°C$)															

خواسته های آزمایش:

۱ – نمودار دمای T را نسبت به زمان t در کاغذ میلی متری رسم نمائید.

۲ –در نمودار زمان معین $(t = 15\ min)$ را روی محور زمان مضخص کنید. سپس از آن نقطه خطی بموازی محور دما رسم نموده تا نمودار را قطع کند. سپس از محل تقاطع با نمودار خطی بموازی محور زمان رسم نمائید تا محور دما را در دمای T (متناظر با زمان t) قطع کند. این دما و زمان $(t = 15\ min)$ را در رابطهٔ (۳) قرار داده و از آنجا k ثابت زمانی واهلش را حساب کنید.

آزمایش دهم: تعیین ضریب انبساط خطی جامدات

هدف آزمایش: اندازه گیری ضریب انبساط خطی جامدات برای فلزهای مختلف

وسایل آزمایش: سیرکولاتور- ترمورگولاتور- دستگاه انبساط طولی جامدات همراه با گیج اندازه گیری- لوله ضریب انبساط طولی

تئوری آزمایش

هنگامیکه دما (T) بالا می رود، دامنه ارتعاشات اتم ها درشبکه بلوری جسم جامد افزایش می یابد، به علت طبیعت نامتقارن منحنی انرژی پتانسیل، این ارتعاشات سبب افزایش فاصله متوسط بین اتم ها می گردد. این امر از دیدگاه ماکروسکوپیک به افزایش طول جسم جامد می انجامد. تغییرخطی هر بعد جسمی جامد (مانند طول،عرض و یا ضخامت) را یک انبساط خطی می نامند. اگر طول بعد مورد نظر l_0 باشد تغییر طول ناشی از تغییردمای ΔT برابر Δl خواهند بود. به طورتجربی معلوم شده است که هرگاه ΔT به مقدار کافی کوچک باشد، تغییر طول با تغییر دما و طول اولیه l_0 متناسب است. پس می توانیم بنویسیم:

$$\Delta \boldsymbol{l} = \boldsymbol{\alpha}\, \boldsymbol{l_0}\, \Delta T \Rightarrow \boldsymbol{l} = \boldsymbol{l_0} + \boldsymbol{\alpha}\, \boldsymbol{l_0}(\boldsymbol{T} - \boldsymbol{T_0})$$

که درآن α ضریب انبساط خطی نامیده می شود و برای مواد مختلف دارای مقادیر متفاوتی است.

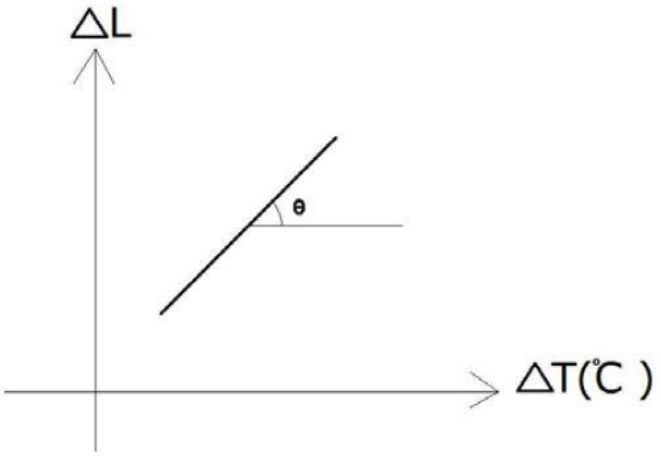
روش اجرای آزمایش

دستگاه را مطابق شکل ۱ سوارکنید سپس مخزن آب را تا چهار پنجم ازآب پر کرده و سیرکولاتور را روشن کنید مطابق دستورالعمل دستگاه عمل کنید و سیرکولاتور را روی عدد $25\ ^\circ C$ قرار دهید. اگر دمای آب از $25\ ^\circ C$ بیشتر است به آن آب سرد اضافه کنید تا دمای آب به $25\ ^\circ C$ برسد.

بر روی دستگاه، دو تثبیت کننده وجود دارد که یکی از آنها ثابت ودیگری متحرک است. به کمک تثبیت کننده متحرک می توانیم طول های مختلفی از لوله ها را مورد آزمایش قرار دهیم. دراین حالت ریزسنج را با انتهای میله تماس داده و با پیچ در جای خود محکم کنید سپس خط نشانه آن را درمقابل صفر ثابت کنید دقت ریزسنج 0/01mm می باشد. دمای آب را که در واقع همان دمای میله نیز می باشد توسط سیرکولاتور سه درجه سه درجه بالا برده و به ازای هر دمای T ،افزایش طول $\Delta \boldsymbol{l}$ را اندازه گیری نمایید. این کار را حداکثرتا دمای $62\ ^\circ C$ ادامه دهید، در هربار تغییر دما کمی صبر کنید تا دما روی سیرکولاتور ثابت شود. نتایج اندازه گیری شده را در جدولی مانند جدول زیر یادداشت کنید.

خواسته های آزمایش

۱ - برای هر میله به ازای طول های اولیه متفاوت منحنی تغییرات Δl را برحسب ΔT رسم نمایید .

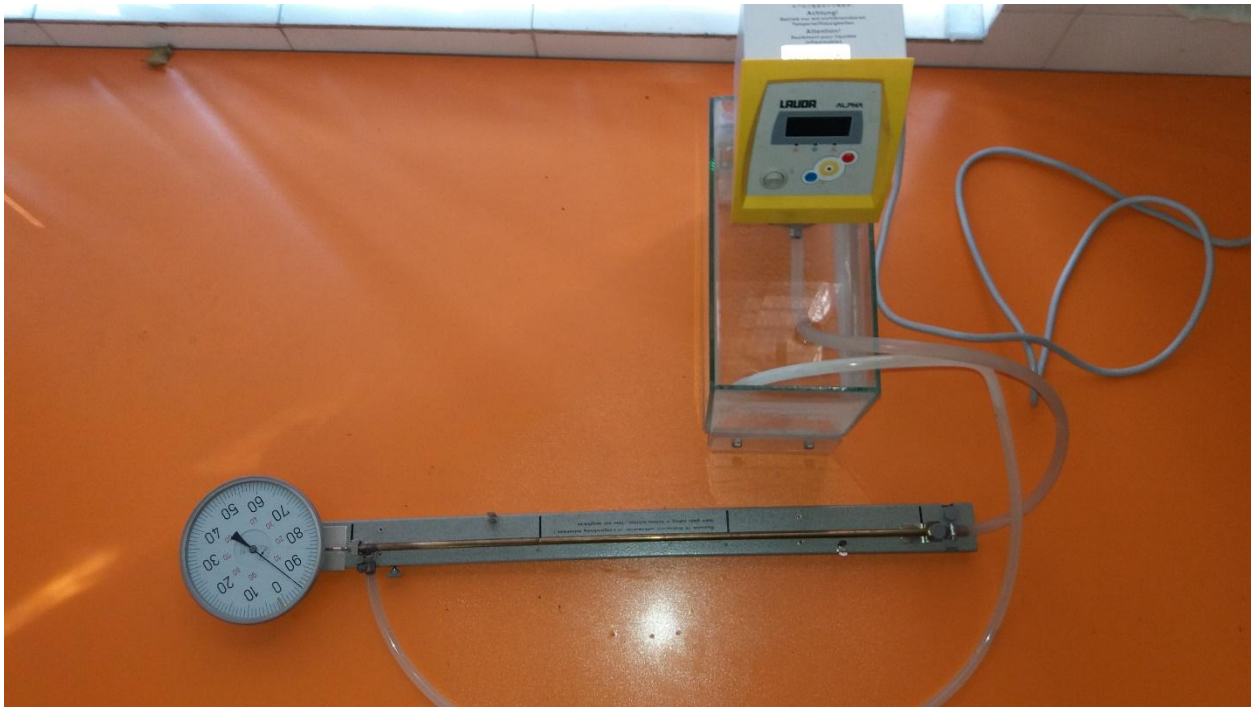


۲ - با توجه به اینکه $\tan\theta = \boldsymbol{\alpha l_0}$ است، به کمک این نمودار α را بدست آوردید.

۳ - $\bar{\alpha}$ ، ضریب انبساط طولی میانگین، را از رابطه $\bar{\alpha} = \frac{\Delta l}{\boldsymbol{l_0}\Delta T}$ محاسبه و با α بدست آمده از نمودار مقایسه و خطای نسبی بین آنها را محاسبه کنید.

جدول تغییر طول Δl میله فلزی نسبت به تغییر دما ΔT

شماره آزمایش	$T(°C)$	$\Delta l(mm)$	$\Delta T = T - \boldsymbol{T_0}$
0	25	0	0
1	28		
2	31		
3	34		
4	37		
5	40		
6	43		
7	47		
8	50		
9	53		
10	56		
11	59		
12	62		



شکل (۱): عکس دستگاه اندازه گیری انبساط طولی میله فلزی و پمپ گرم کننده آب

آزمایش یازدهم: بررسی قوانین گاز کامل

هدف : بررسی قانون بویل ماریوت، قانون آمونتون و محاسبه تعداد مول گاز.

تئوری آزمایش :

بطور کلی یک سیستم ترمودینامیکی بر حسب مختصات ترمودینامیکی آن توصیف می‌شود. منظور از مختصات ترمودینامیکی یک سیستم آن دسته از کمیتهای ماکروسکوپی هستند (مانند P، V و T) که با حالت درونی سیستم (مانند انرژی درونی و ...) در ارتباطند. از مهمترین اهداف ترمودینامیک پیدا کردن روابطی کلی میان این مختصات است که با قوانین بنیادی ترمودینامیک سازگار باشد. یکی از این روابط، رابطهٔ میان P، V و T در گازها می باشد (که از سیستمهای مهم ترمودینامیکی به حساب می آیند) و به معادلهٔ حالت شهرت دارد. معادلهٔ حالت یک گاز در واقع بیان کنندهٔ این واقعیت است که سه مختصهٔ ترمودینامیکی P، V و T بطور کامل، از هم مستقل نبوده و نمی‌توانند همزمان هر سه بطور دلخواه انتخاب شوند، این مطلب به این معنی است که با انتخاب دلخواه دو پارامتر از آنها پارامتر سوم خود بخود بوسیلهٔ طبیعت انتخاب می‌گردد. بسته به جنس و ویژگیهای گاز انتخاب شده، هر سیستم ترمودینامیکی دارای معادلهٔ حالت ویژهٔ خود می‌باشد. چنانچه گاز انتخاب شده گاز کامل باشد (گازی را کامل گویند که ذرات آن را بتوان مانند نقاط مادی بدون اثر بر یکدیگر در نظر گرفت) معادلهٔ حالت سیستم شکلی ساده پیدا کرده و بصورت زیر در می‌آید:

$$PV = nRT \qquad (1)$$

که در این معادله n تعداد مول گاز موجود در سیستم و R ثابت عمومی گازها است ($R = 8.314472\ J/K.mol$). این رابطه نشان می‌دهد که با ثابت نگه داشتن دما P و V با یکدیگر رابطهٔ معکوس دارند، یعنی با افزایش فشار، حجم گاز کاهش می‌یابد و بر عکس. این موضوع پایهٔ قانون بویل ماریوت می‌باشد که در آن داریم:

$$\text{اگر } T = cte \quad \rightarrow \quad P \propto \frac{1}{V} \quad \rightarrow \quad PV = cte$$

از طرف دیگر می‌توان در رابطهٔ (۱) با ثابت نگه داشتن حجم گاز به این نتیجه رسید که P با T متناسب است. (قانون آمونتون):

$$\text{اگر } V = cte \quad \rightarrow \quad P \propto T \quad \rightarrow \quad P/T = cte$$

هدف ما در این آزمایش بررسی این دو قانون است:

شرح دستگاه :

همانطور که در شکل دیده می‌شود، دستگاه تشکیل شده از یک لولهٔ شیشه‌ای U شکل که شاخهٔ سمت چپ آن مسدود است و شاخهٔ سمت راست آن باز بوده و با هوای محیط در ارتباط می‌باشد. در قسمت بالای لولهٔ سمت چپ مقداری هوا بوسیلهٔ ستونی از جیوه (که بقیهٔ لوله U شکل را فرا گرفته است) محبوس شده و نقش همان سیستم ترمودینامیکی مورد بررسی را بازی می‌کند. برای کنترل دمای سیستم، محفظهٔ گاز توسط محفظهٔ دیگری احاطه شده است. که دارای دو مجرای ورودی و خروجی بوده و بوسیلهٔ یک پمپ، آب در درون آن جریان می‌یابد. وجود آب در اطراف محفظهٔ گاز باعث می‌شود که با تغییر حجم گاز و سرد و گرم شدنهای جزئی آن، محفظهٔ گاز مقدار گرمای لازم برای رسیدن به دمای اولیه را با آب مبادله کرده و دمای ابتدائی خود را باز یابد. همچنین آب بدلیل ظرفیت گرمائی ویژهٔ بالائی که دارد با گرفتن و دادن مقدار گرمائی ناچیز به این شکل، تغییر محسوس دمائی نداشته و در صورت ثابت بودن دیگر پارامترهای محیطی همچنان در دمای ثابت ابتدائی خود باقی خواهد ماند. با قراردادن یک گرم کنندهٔ قابل تنظیم از جنس

مقاومت الکتریکی در مخزن آب، می‌توان دمای آب را بر روی هر دمای دلخواهی تنظیم نمود. (کاربرد این وسیله هنگامی است که بخواهیم دمای گاز درون محفظه را تغییر دهیم.) به کمک دماسنجی که انتهای آن در درون لولهٔ آب قرار دارد می توان دمای سیستم را در هر زمانی مشخص نمود. در فضای میانی دو بازوی لولهٔ U شکل نیز خط کشی قرار دارد که بوسیلهٔ آن بتوان اختلاف ارتفاع دو ستون جیوهٔ واقع در دو طرف لوله را تعیین کرد. این اختلاف نشان دهندهٔ اختلاف فشاری است که میان سطح جیوه در دو شاخهٔ لوله وجود دارد، بطوریکه می توان نوشت:

$$P_1 = P_\circ \pm \rho g h$$

که در آن داریم:

$P_\circ$ فشار هوای محیط آزمایشگاه

P_1 فشار سطح جیوهٔ سمت چپ که همان فشار گاز درون لولهٔ سمت چپ می باشد.

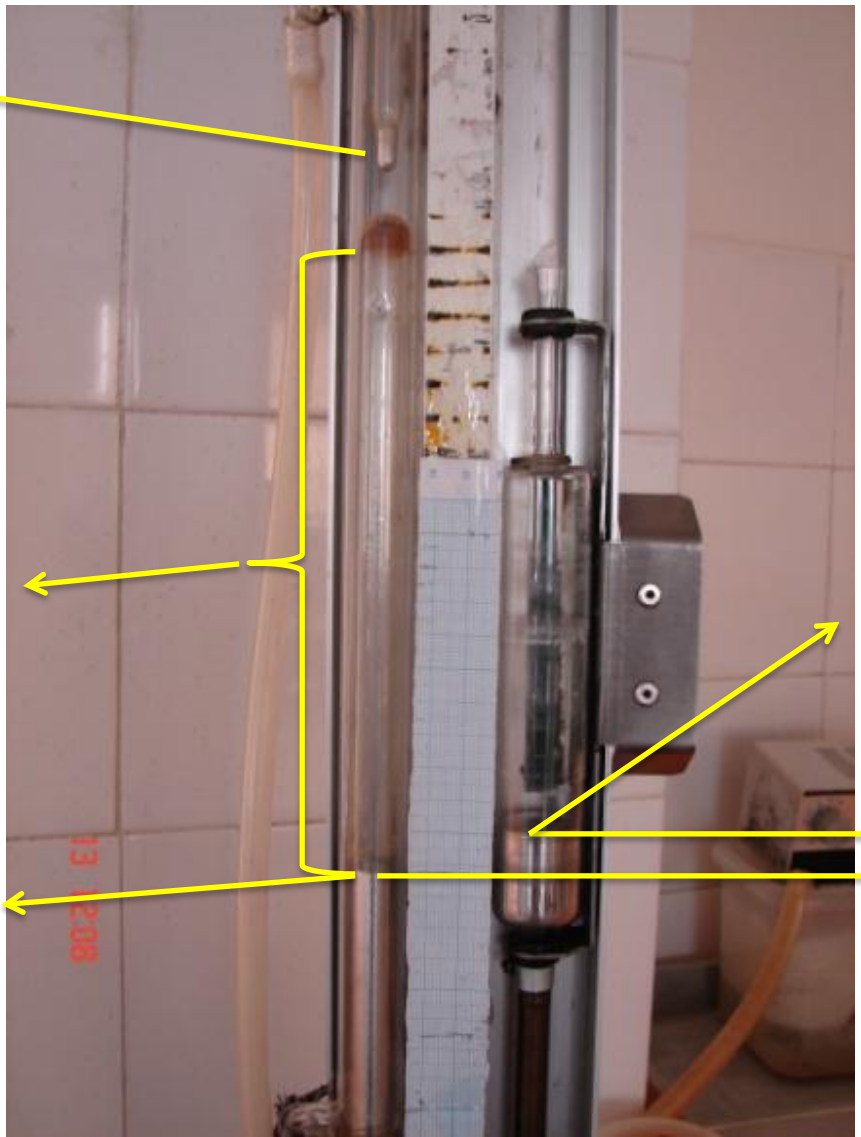
ρ چگالی حجمی جیوه

h اختلاف ارتفاع سطح دو ستون جیوه.

یادآوری۱: در رابطهٔ بالا علامت منفی (مثبت) برای حالتی است که ستون سمت چپ بالاتر (پائین تر) از ستون سمت راست باشد.

یادآوری ۲: چنانچه فشار را بر حسب ارتفاع ستون جیوه نمایش دهیم در اینصورت رابطهٔ بالا بصورت زیر در می‌آید که در آن P_0 فشار هوای درون آزمایشگاه به سانتی متر جیوه، P فشار هوای گاز درون لولهٔ سمت چپ به سانتی متر جیوه و h اختلاف ارتفاع دو سطح جیوه به سانتی متر می باشد.

$$P = P_\circ \pm h$$



الف- بررسی قانون بویل ماریوت (رابطهٔ میان فشار و حجم یک گاز در دمای ثابت).

روش انجام آزمایش :

ابتداء دستگاه تنظیم دما را روشن می‌کنیم. با روشن شدن دستگاه پمپ آب بکار افتاده و آب درون مخزن در اطراف سیستم ترمودینامیکی به گردش در می‌آید. به محض روشن کردن دستگاه صفحه نمایش آن دمای آب درون مخزن را نشان خواهد داد. دقت کنید که این دما در ابتداء در حدود دمای محیط آزمایشگاه باشد. (در غیر اینصورت به مسئول آزمایشگاه اطلاع دهید.) چند دقیقه صبر کنید تا دمای نشان داده شده توسط دستگاه با دمایی که از روی دماسنج بالای سیستم خوانده می‌شود برابر گردد.

حال لوله سمت راست را آنقدر جابجا کنید تا جیوه در دو لوله کاملا هم سطح گردد. در این حالت $h = 0$ و فشار سیستم برابر فشار جو یعنی P_0 خواهد بود. (فشار جو را از روی بارومتر نصب شده در آزمایشگاه بخوانید.)

اکنون حجم سیستم را اندازه بگیرید. از آنجائیکه سطح مقطع لوله حاوی گاز برابر یک سانتی‌متر مربع است، ارتفاع ستون گاز بر حسب سانتی‌متر دقیقا برابر با حجم گاز بر حسب سانتی‌متر مربع خواهد بود. (که در این حالت آنرا با V_0 نشان می‌دهیم.) مقدار $K = P_0V_0$ را بدست آورید.

در مرحله بعدی لوله سمت راست را طوری جابجا نمائید تا سطح جیود در این لوله در حدود ۳ تا ۴ سانتی‌متر بالاتر از سطح جیوه در لوله سمت چپ قرار گیرد. در این حالت نیز مقادیر فشار و حجم گاز را طبق آنچه پیشتر گفته شد بدست آورده در جدول وارد نمائید. مراحل بالا را چندین بار تکرار نمائید. همین کار را با h های منفی نیز انجام دهید.

مقادیر $K = PV$ را در هر حالت بدست آورده بصورت خام در جدول وارد نمائید. با پیدا کردن میزان خطای این کمیت بعنی dK اعداد بدست آمده را با تعداد ارقام بامعنی درست در جدول ثبت کنید.

نتایج : ضمن درج دمای دماسنج دستگاه، مقادیر به دست آمده را در جدول (۱) یادداشت کنید.

دفعات	V (cm^3)	h (cmHg)	$\frac{1}{V}$	$P = P_0 \pm h$	$PV = K$
۱					
۲					
۳					
۴					
۵					
۶					
۷					
8					

جدول (۱)

خواسته‌های آزمایش :

- خطای مربوط به K یعنی حاصلضرب فشار در حجم را از روش دیفرانسیلی برای یک حالت محاسبه نمایید و بر اساس آن مقادیر ثبت شده در جدول را اصلاح نموده با تعداد ارقام بامعنی درست درج کنید.

- نمودار تغییرات h را بر حسب $\frac{1}{V}$ در کاغذ میلیمتری رسم کرده معادله خط را به دست آورید و از روی آن تعداد مول گاز را حساب کنید.. همین کار را در نرم افزاری مثل $Excel$ انجام دهید و نتایج را مقایسه نمایید. برای آنکه K را در SI بدست آوریم باید مقدار آن را بر ۷۶۰ تقسیم نماییم.

- نمودار را امتداد دهید تا محور h را قطع کند. فاصله محل تقاطع محورها تا محل تقاطع نمودار و محور h معرف چه کمیتی است؟ مقدار کمیت به دست آمده را با فشار بارومتر در آزمایشگاه مقایسه کنید.

- با استفاده از محاسبه شیب خط و دانستن مقدار ثابت عمومی گازها، تعداد مول های گاز محبوس را محاسبه کنید.

ب- قانون آمونتون (تغییرات فشار و دمای گاز در حجم ثابت).

روش انجام آزمایش :

مجددا مخزن سمت راست را آن قدر جا به جا کنید تا سطح جیوه در دو طرف لوله کاملاً در یک تراز قرار گیرد. سطح جیوه در لوله سمت چپ را با علامتی مشخص نمایید. حجم هوای محبوس بالای لوله سمت چپ را با اندازه‌گیری ارتفاع ستون گاز به کمک خط‌کش اندازه بگیرید.V_0. فشار هوای آزمایشگاه را از روی بارومتر بخوانید P_0. دمای θ_0 را که همان دمای محیط است از روی دماسنجی که روی دستگاه نصب شده یادداشت کنید. از رابطه $T = 273/15 + \theta$ دمای T را برحسب کلوین بدست آورید. مقادیر بدست آمده را در جدول ثبت نموده، نسبت $\frac{P}{T}$ را بدست آورید.

اکنون با استفاده از کلیدهای پائین صفحه نمایش دستگاه، دمای سیستم را طوری تنظیم کنید تا حدود ۳ تا ۴ درجه نسبت به دمای اولیه آن بالاتر باشد. چند دقیقه صبر کنید تا هر دو دمای نشان داده شده روی صفحه نمایش یکسان گردند. و همچنین دماسنج جیوه‌ای سیستم نیز دمای ثابتی را نشان دهد. در این حالت بدلیل افزایش حجم گاز مورد بررسی، سطح جیوه در شاخهٔ سمت چپ پائین آمده، سطح جیوه درون لوله سمت راست بالا می‌رود. اکنون لوله سمت راست را آن قدر بالا ببرید که سطح جیوه در لوله سمت چپ به حالت قبلی برگردد. (حجم ثابت). اختلاف سطح جیوه (فشار مانومتری) را که همان اختلاف فشار است به کمک خط‌کش اندازه بگیرید h و فشار گاز را به دست آورید، $P = P_0 + h$. سپس دمای θ را از روی دماسنج روی دستگاه بخوانید و دمای مطلق T را بدست آورده در جدول ثبت نمایید. مجددا مراحل بالا را تکرار نمائید و بعد از آنکه دماسنج روی دستگاه، دمایی ثابتی را نشان داد، اندازه گیری را مطابق روش فوق تکرار کنید.

نتایج :

ضمن درج اندازه حجم گاز ودمای اولیه دستگاه، نتایج خود را در جدول شمارهٔ (۲) یادداشت کنید:

دفعات آزمایش	$\theta\ (C^\circ)$	*فشار مانومتری* h	*فشار مطلق* P	*دمای مطلق* T	$K = P/T$
۱					
۲					
۳					
۴					

جدول (۲)

خواسته‌های آزمایش :

– مقدار خطای دیفرانسیلی مربوط به حاصل تقسیم فشار بر دما را $K = P/T$ برای یک حالت محاسبه نمایید تا دقت اندازه‌گیری این کمیت معلوم گردد. سپس اعداد ثبت شده در ستون آخر جدول بالا را با احتساب این خطا با تعداد ارقام با معنی درست در جدول ثبت نمایید.

- نمودار تغییرات P را بر حسب θ روی کاغذ میلیمتری رسم کنید و آن را ادامه دهید تا محور دما را قطع کند. عدد به دست آمده را مشخص کنید. این عدد معرف چه دمایی است؟

- شیب نمودار P بر حسب θ را به دست آورید و از آنجا تعداد مول گاز را محاسبه کنید.

- اگر دما در ضمن آزمایش تغییر کند نمودار p بر حسب V به چه شکل در می‌آید؟

- گاز کامل را تعریف کنید و تفاوت آن را با گاز حقیقی بنویسید.

- آیا می توان به وسیلهٔ این دستگاه قانون گیلوساک، تغییرات حجم نسبت به دما در فشار ثابت (فرآیند ایزوبار)، را بررسی کرد؟ چگونه؟

- نحوهٔ کار دماسنج گازی چگونه است؟ از این دستگاه چگونه می توان به عنوان دماسنج گازی استفاده نمود؟ توضیح دهید.

آزمایش یازدهم: قرقره‌های متحرک

هدف آزمایش: بررسی روابط حاکم بر ماشین‌های ساده

تئوری آزمایش:

ماشین های ساده وسایلی هستند که به وسیله‌ی آنها می‌توان کاری را انجام داد که انجام آن در حالت عادی ناممکن یا مشکل است.این ماشین‌ها برای غلبه بر مقاومت‌ها به کار می‌روند و نیروی وارد بر یک نقطه در یک جهت معین را به نقاط و جهت‌های دیگر منتقل می‌کنند. ماشین‌های ساده به خودی خود کار تولید نمی‌کنند بلکه با دریافت کار بدون اینکه در مقدار آن تغییری حاصل کنند انجام آن را آسانتر می‌کنند. معمولا ماشین‌های ساده در یکی از موارد زیر بکار می‌روند:

۱- جابجا کردن وزنه‌های بزرگ با نیروی کم مانند بلند کردن اتومبیل توسط یک جک

۲- انتقال نیرو به یک نقطه‌ی دیگر جهت استفاده مناسب مانند استفاده از انبر

۳- جابه جا کردن اجسام در جهتی غیر از جهت نیروی وارده مانند بلند کردن مصالح ساختمانی توسط قرقره

۴- تبدیل یک حرکت کند در یک نقطه به حرکت تند در نقطه‌ی دیگر مثل دوچرخه

۵- تبدیل حرکت دورانی به انتقالی یا برعکس مانند چرخ و محور

اصل بقای کار در ماشین‌های ساده

معمولا کاری را که ماشین دریافت میکند کار محرک و کاری را که ماشین انجام میدهد کار مقاوم می‌گویند.

قرقره ثابت، قرقره متحرک و قرقره مرکب نمونه‌های قدیمی ماشین‌های ساده هستند. آن‌ها قادرند تا نقطه مورد نظر، جهت یا مقدار نیروی F را که برای بالا بردن با به وزن G نیاز است تغییر دهند. وقتی یک طناب به دور یک قرقره ثابت می‌چرخد، می‌تواند با یک نیروی F معادل وزن بار، آن را به سمت پایین بکشد. بنابراین:

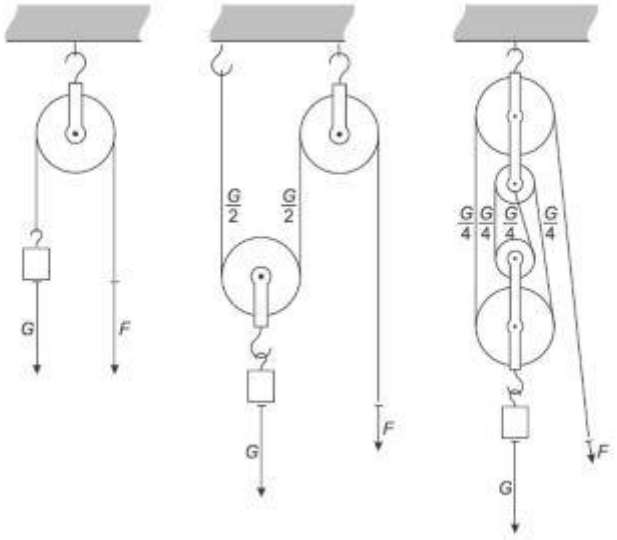
$$F = G$$

اگر یک قرقره متحرک مورد استفاده قرار گیرد، نیروی گرانش G متناسب با دو انتهای طنابی که به دور آن پیچیده است توزیع می‌شود. با ترکیب کردن قرقره متحرک با یک قرقره ثابت، نیروی لازم برای بالا بردن بار برابر است با:

$$F = G/2$$

این اصول در ساخت و ساز قرقره مرکب کاربرد دارد. اگر یک قرقره مرکب با n جفت از قرقره‌های ثابت و متحرک استفاده شده باشد به دلیل فشار کششی مشابه موجود میان کل طناب، نیروی کششی که در انتهای طناب مصرف می‌شود برابر است با :

$$F = \frac{G}{2n}$$



قرقره ثابت (چپ)،قرقره متحرک(وسط)و قرقره مرکب (راست)

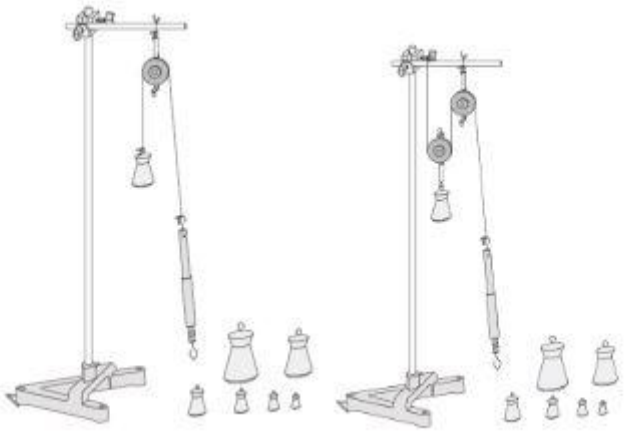
بازده قرقره‌ها:

در قرقره ها اگر نیروی مقاوم با F_R و تغییر مکان آن با S_R و نیروی محرک با F_E و تغییر مکان با S_E نمایش داده شود، کار مفیدی که از دستگاه گرفته می‌شود یعنی $F_R \times S_R$ برابر است با کاری که به دستگاه داده می‌شود. بازده قرقره با استفاده از رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$R = \frac{F_R \times S_R}{F_E \times S_E} \times 100$$

طریقه انجام آزمایش:

- مطابق شکل قرقره ها را از یک نقطه آویزان کنید.
- نخ را از روی قرقره ها عبور دهید و به یک سر آن وزنه و به سر دیگ نخ نیرو سنج را متصل کنید و نیروی F را بخوانید.
- آزمایش را برای یک قرقره ثابت و متحرک مطابق شکل انجام دهید و نیروی F را برای وزنه‌های متفاوت تغییر داده و نیرو را حساب کنید.



این جدول‌ها را برای قرقره های مرکب چهارتایی و شش تایی تکرار کنید. بعد از هر اندازه‌گیری مقادیر حاصل را در جدول یادداشت کرده و باهم مقایسه کنید.

M(kg)	G(N)	F(N)	
$m_1 =$			قرقره ثابت
$m_2 =$			
$m_3 =$			
$m_1 =$			قرقره متحرک
$m_2 =$			
$m_3 =$			
$m_1 =$			قرقره مرکب ۱
$m_2 =$			
$m_3 =$			
$m_1 =$			قرقره مرکب ۲
$m_2 =$			
$m_3 =$			

در قرقره‌ها به جای نیروسنج، با گذاشتن وزنه در آن ها تعادل را برقرار کنید. اکنون محل وزنه ها را با استفاده از خط کش بخوانید و ملاحظه کنید که به ازای پایین آوردن وزنه ها به اندازه معین (مثلا $10\ cm$) نیروی مقاوم چقدر بالا می‌آید. این مسافت‌ها را به ترتیب S_E و S_R بنامید و بازده دستگاه‌ها را محاسبه کنید(جرم قرقره تکی ۱۷/۳ گرم، جرم قرقره دوتایی۱۳۸/۴ گرم و جرم قرقره سه‌تایی ۶۴/۲ گرم است).

$S_R(m)$	$S_E(m)$	$F_R(N)$	$F_E(N)$	بازده قرقره	
					قرقره ثابت
					قرقره متحرک
					قرقره مرکب ۱
					قرقره مرکب ۲

خواسته‌های آزمایش:

۱- از آزمایش قرقره‌ها چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۲- با ذکر عوامل خطای آزمایش، ذکر کنید چگونه می‌توان تا حد امکان این خطاها را کاهش داد؟

۳- درصد خطای نسبی آزمایش را محاسبه کنید.

۴- مزیت استفاده از قرقره‌ها را بیان کنید.