

دانشگاه سیام نور

دستور کار آزمایشگاه فیزیک پایه ۳

(رشته فیزیک)

دکتر نرگس فتحعلیان

«امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.»^۱

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چند هزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

مقدمه	هفت
فصل اول: حرارت	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
آزمایش ۱: گرماسنجی: اندازه‌گیری ارزش آبی گرماسنج (کالریمتر)	۳
آزمایش ۲: اندازه‌گیری گرمای نهان تغییر حالت آب (ذوب و تبخیر)	۹
آزمایش ۳: اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی ویژه جامدات	۱۶
آزمایش ۴: محاسبه عدد ژول به‌روش الکتریکی	۲۰
آزمایش ۵: اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی فلزات	۲۴
آزمایش ۶: به‌دست‌آوردن ضریب انبساط حجمی برای مایعات	۲۸
آزمایش ۷: اندازه‌گیری ضریب اتمیسیته گاما برای یک گاز (هوا)	۳۱
آزمایش ۸: عدم بستگی فشار مایع به‌شکل ظرف	۳۶
آزمایش ۹: فشار بخار اشباع	۴۰
آزمایش ۱۰: بررسی قانون ارشمیدس برای مایعات و اندازه‌گیری چگالی مایعات به کمک آن	۴۳
آزمایش ۱۱: اندازه‌گیری ضریب کشش سطحی مایعات	۵۱
آزمایش ۱۲: معادل مکانیکی حرارت	۵۶
آزمایش ۱۳: حرکت مولکولی گازها	۶۱
فصل دوم: امواج مکانیکی	۶۷
هدف کلی	۶۷
هدف‌های یادگیری	۶۷
مقدمه	۶۷
آزمایش ۱۴: بررسی امواج ساکن در تارهای مرتعش	۶۸
آزمایش ۱۵: بررسی امواج ساکن در لوله‌های صوتی	۷۳
منابع	۷۹

مقدمه

پیشرفت روزافزون علم، تکنولوژی و صنعت با شناخت دقیق قوانین علوم پایه، به‌ویژه علم فیزیک ممکن خواهد بود. این شناخت و درک صحیح از موضوعات پیچیده تنها با مطالعه متون دروس و شنیدن دروس نظری محض به‌دست نمی‌آید، بلکه دانشجو باید خودش در محیط آزمایشگاه به‌طور تجربی پدیده‌های موردنظر در نظریه‌ها را پس از انجام آزمایش، مشاهده و اندازه‌گیری مکرر تجزیه و تحلیل کند. از این‌رو هدف اصلی از این درس و به‌طور کلی کار در آزمایشگاه آشناسدن دانشجویان با روش‌های مختلف تحقیق تجربی، چگونگی اندازه‌گیری‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی و آزمایشی، پی‌بردن به روند شکل‌گیری و آزمون نظریه‌های فیزیکی، تحلیل علل خطا و کاهش آن و همچنین آموختن روش درست اندیشیدن است.

این کتاب جهت استفاده دانشجویان در آزمایشگاه فیزیک پایه ۳ کارشناسی فیزیک (کلیهٔ گرایش‌ها) تدوین یافته است. برنامهٔ درسی این کتاب برای یک نیمسال تحصیلی در نظر گرفته شده و انتظار می‌رود دانشجو با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه دست‌کم ۱۲ آزمایش از آزمایش‌های این کتاب را در طول ترم انجام دهد. فرض ما این است که دانشجویان قبل از شروع این درس و یا هم‌زمان با آن، درس فیزیک پایه ۳ را گذرانده‌اند و یا می‌گذرانند. از این‌رو از تشریح نظریه‌های فیزیکی مربوط به هر آزمایش اجتناب شده و تنها به اختصار به آن‌ها پرداخته شده است. هدف آن است که دستور کار آزمایش‌ها تا حد ممکن خودآموز با زبانی ساده و درخور فهم دانشجویان و همچنین منطبق با دستگاه‌ها و امکانات موجود در آزمایشگاه‌ها باشد تا

دانشجویان پیش از ورود به آزمایشگاه با مطالعه دستور کار مربوطه با آزمایشی که قرار است انجام دهند، آشنایی پیدا کنند.

ابتدا در این قسمت شرحی از مقررات حضور در آزمایشگاه و نحوه نگارش گزارش کار می‌آوریم. سپس به دلیل اهمیت تخمین خطاها به طور مختصر به ذکر عوامل ایجاد خطا در آزمایش می‌پردازیم و توضیح می‌دهیم که دانشجو باید به چه شکل خطاهای آزمایشی را که انجام می‌دهد در گزارش کارش محاسبه و ثبت کند. پس از آن اشاره‌ای به نحوه رسم نمودار می‌کنیم تا دانشجو بتواند برای ترسیم منحنی‌ها و نمودارهای گزارش کارش از این قسمت استفاده کند. مطالعه دقیق این بخش‌ها اکیداً توصیه می‌شود. پس از ذکر این مقدمات دستور کار آزمایش‌های مربوط به درس فیزیک پایه ۳ خواهد آمد که به دو قسمت حرارت و امواج مکانیکی تقسیم شده است. در نگارش دستورکار آزمایش‌ها هدف، وسایل مورد نیاز، اصول، نظریه، مراحل انجام آزمایش، جدول‌ها و خواسته‌های مربوط به هر آزمایش به طور مشخص تشریح شده است. همچنین سعی بر آن بوده که آزمایش‌ها تاحد ممکن مستقل باشند به نوعی که اگر بنابر امکانات موجود در آزمایشگاه آزمایش‌ها به ترتیب موجود در این کتاب انجام نشدند، هر آزمایشی به طور مستقل قابل خواندن و انجام دادن باشد.

مقررات حضور در آزمایشگاه

خواهشمند است دانشجویان عزیز به موارد زیر توجه کنند:

- درس آزمایشگاه یک درس عملی است و با شرکت در جلسات آزمایشگاه و انجام آزمایش‌ها همراه است. بنابراین لازم است دانشجویان در وقت تعیین شده در آزمایشگاه حضور داشته و به طور فعال در انجام آزمایش شرکت کنند.
- قبل از ورود به آزمایشگاه، آزمایش مورد نظر را دقیقاً مطالعه کنید. اگر قسمت‌های نظری و فیزیکی مرتبط با آن آزمایش را فراموش کرده‌اید، حتماً پیش از شروع جلسه آن قسمت را از کتاب فیزیک پایه ۳ مرور کنید.
- در دستور کار هر آزمایش، جدول یا جدول‌هایی که باید با داده‌های آزمایش پر شود آورده شده است. پس از اتمام هر آزمایش، داده‌هایی را که از اندازه‌گیری به دست آوردید در جدول مربوطه وارد کنید و تأیید استاد را دریافت کنید و کپی آنرا به

مسئول آزمایشگاه تحویل دهید. گزارش آزمایشگاه شما باید منطبق بر آن داده‌ها باشد. بنابراین در انجام آزمایش و گزارش داده‌ها نهایت دقت را داشته باشید.

- از شما انتظار می‌رود از آزمایشی که انجام دادید به همراه محاسبات مربوطه گزارشی را به‌طور فردی یا گروهی تهیه کنید.
- به توضیحات استاد درس و دستیاران آزمایشگاه که در ابتدای هر جلسه داده می‌شود توجه فرمایید. در هر جلسه پس از شنیدن توضیح استاد درس دربارهٔ آزمایشی که قرار است انجام شود، آزمایش خود را شروع کنید.
- در کار با دستگاه‌ها به نکات ایمنی توجه کنید و هرگونه مشکل را به مسئول و دستیاران مربوطه، یا در صورت عدم حضور آنان به استاد درس، اطلاع دهید.
- هنگام کار با وسایل آزمایشگاه کاملاً احتیاط کنید و از شوخی با یکدیگر یا بلند حرف زدن در محیط آزمایشگاه و در حین انجام آزمایش پرهیزید. آزمایش‌های فیزیک پایه ۳ با ابزارهای حساس انجام می‌شود که دقت و هشپاری شما را در حین انجام آزمایش نیازمند است.
- چنانچه با ابزارهای گازی یا برقی کار می‌کنید با کمک مسئول آزمایشگاه از سالم بودن آن‌ها اطمینان حاصل کنید و پس از پایان آزمایش و پیش از خروج از آزمایشگاه حتماً وسایل برقی را از پریز بکشید و از خاموش بودن دستگاه‌ها مطمئن شوید. اگر میز شما سویچ جداگانه برق دارد، کلید آن را در حالت خاموش (*off*) قرار دهید.
- در هنگام کار با وسایل آزمایشگاه نهایت دقت را در مراقبت از این وسایل داشته باشید. چنانچه آسیبی به هر وسیله‌ای وارد شود، شخص یا گروه آزمایش‌کننده موظف به جبران آسیب و خسارت خواهد بود.
- پس از اتمام هر آزمایش تمام وسایل مورد استفاده در آزمایش خود را به‌طور منظم، تمیز و سالم در جای خود قرار دهید.
- آزمون نهایی درس معمولاً دارای دو قسمت نظری و عملی است که با صلاح‌دید استاد درس برگزار خواهد شد.

ارقام معنی‌دار

در گزارش کردن داده‌های حاصل در آزمایشگاه لازم است که اعداد و ارقام را به شکل «معنی‌دار» گزارش کنیم. به ارقام لازم برای نشان دادن عددی که دقت یک اندازه‌گیری را برسانند ارقام معنی‌دار می‌گوییم. مثلاً اگر طول فنری را با خط‌کش معمولی اندازه گرفته باشیم و مقدار $۱۶/۳$ سانتی‌متر باشد، می‌گوییم این کمیت (در اینجا طول) تا سه رقم معنی‌دار اندازه‌گیری شده است. حتی اگر عدد فوق را به صورت $۰/۰۰۰۱۶۳$ کیلومتر بنویسیم نیز هنوز سه رقم معنی‌دار بیشتر نداریم. باید توجه داشت که صفرهای پشت عدد برای نشان دادن محل ممیز به کار رفته‌اند و ارقام معنی‌دار نیستند. (البته اگر صفر بین ارقام معنی‌دار بود مثلاً بین ۱ و ۶ معنی‌دار به حساب می‌آمد).

توجه کنید که معمولاً تعداد ارقام معنی‌دار یک سنجش را ابزار آن سنجش تعیین می‌کند. برای مثال اگر شخص در کاربرد ریزسنجی که دقت اش $۰/۰۱$ میلی‌متر است، اندازه‌گیری اش را با عددی با دقت $۰/۰۰۱$ میلی‌متر گزارش کند اشتباه کرده است. به عنوان مثالی دیگر دقت خط‌کش معمولی تا میلی‌متر (دهم سانتی‌متر) است، از این رو اگر کسی با خط‌کش معمولی اندازه‌گیری کرده باشد و حاصل اندازه‌گیری را مثلاً $۱۶/۳۵$ سانتی‌متر گزارش دهد مرتکب خطا شده است. چراکه ابزار اندازه‌گیری این شخص (در این مورد خط‌کش معمولی) دقت در این مرتبه (در اینجا صدم سانتی‌متر) را نداشته است فلذا در اینجا این رقم (عدد ۵) برای این اندازه‌گیری معنی‌دار نیست. یا فرض کنید شخص در اندازه‌گیری طول فنر $۱۶/۳$ سانتی‌متر را گزارش کرده باشد و در ادامه محاسبات اش نصف طول فنر را لازم داشته باشد و آن را برابر $\frac{۱۶/۳}{۲} = ۸/۱۵$ گزارش کند. در اینجا مجدد عدد ۵ در $۸/۱۵$ عددی بی‌معنی است چراکه دقت ابزار اندازه‌گیری (خط‌کش) از مرتبه میلی‌متر بوده است و نه بیشتر. فلذا دانشجویان عزیز باید توجه کنند که ارقام نهایی را تا مرتبه دقت ابزارها گزارش کنند و نه آخرین رقم حاصل از ماشین حساب! همچنین اگر در اندازه‌گیری طول فنری با خط‌کش آن را ۱۰ سانتی‌متر به دست آوردید باید آن را به صورت $۱۰/۰$ سانتی‌متر گزارش کنید. چراکه دقت ابزار شما تا میلی‌متر است و باید آن را تا همین دقت بنویسید. خطای سنجش هر اندازه‌گیری (منظور خطای مرتبط با ابزار است) تا مرتبه دقت ابزار آن اندازه‌گیری است. برای مثال در اندازه‌گیری فوق مقدار عدد به شکل $۱۰/۰ \pm ۰/۱$ سانتی‌متر گزارش

می‌شود. چراکه دقت خط‌کش ۰/۱ سانتی‌متر بوده است و از این‌رو عدد واقعی بین ۱۰/۰+۰/۱ و ۱۰/۰-۰/۱ است.

در محاسبات عددی باید میزان دقت اندازه‌گیری را با ارقام معنی‌دار نمایش داد و از ارقام بی‌معنی صرف‌نظر کرد. اگر در حاصل محاسبات مان رقم بعد از رقم معنی‌دار بزرگ‌تر از ۵ باشد آن‌را حذف می‌کنیم و یک واحد به رقم سمت چپ آن می‌افزاییم و اگر کوچک‌تر از ۵ باشد تنها آن را حذف می‌کنیم. اگر رقمی که باید حذف شود ۵ باشد، به رقم سمت چپ آن نگاه می‌کنیم، اگر فرد باشد پس از حذف ۵ یک واحد به رقم سمت چپ اضافه می‌کنیم و اگر زوج باشد فقط ۵ را حذف می‌کنیم. برای مثال اگر نتیجه محاسبات ما عدد ۳/۶۵۴۳ باشد و بدانیم که نتیجه باید یک عدد دو رقمی معنادار باشد، آن‌را به صورت ۳/۶ گزارش می‌کنیم. همچنین اگر عدد داده‌شده بزرگ‌تر از ۱۰ باشد باید از قبل آن‌را به صورت حاصل ضرب عددی بین یک و ده در توان مناسبی از عدد ۱۰ بنویسیم سپس دستور بالا را به کار ببریم. مثلاً $10^4 \times 1/4200 = 14200$. برای اعداد کوچک‌تر از یک نیز همین‌طور عمل می‌کنیم: $10^{-4} \times 1/42 = 0.000142$. در جمع و تفریق اعداد با تعداد ارقام معنی‌دار متفاوت، حاصل به شکل عددی با کمترین رقم‌های اعشاری منظور می‌شود. برای مثال در جمع ۸۲/۶ و ۹ و ۳۲/۴ و ۰/۰۲ کمترین رقم اعشار مربوط به عدد ۹ است که هیچ رقم اعشاری ندارد پس چنین عمل می‌کنیم: $82 + 9 + 32 = 123$ حاصل تعداد ارقام معنی‌دار در ضرب و تقسیم برابر تعداد ارقام معنی‌دار عددی است که کمترین رقم معنی‌دار را دارد. برای مثال در محاسبه $11/2 \times 141/25$ کمترین تعداد رقم معنی‌دار ۳ است و حاصل نیز باید به شکل عددی با ۳ رقم با معنی گزارش شود، یعنی $10^3 \times 58/1$ (برای توضیحات بیشتر نگاه کنید به جزوه درسی آزمایشگاه فیزیک پایه، دانشگاه صنعتی شریف).

عوامل خطا در آزمایش و چگونگی گزارش کردن خطا

برای بسیاری از دانشجویان یا مردم عادی، «خطا» چیزی است که اشتباه انجام شده‌است. اما در علم واژه «خطا» به معنای عدم قطعیتی است که با هر اندازه‌گیری همراه است. هر کمیتی را که در آزمایشگاه اندازه می‌گیریم دارای خطا است به طوری که مقدار صد درصد دقیق یک کمیت فیزیکی را نمی‌توان یافت [Taylor, 1982]. با این وجود فرض می‌شود که مقدار دقیق وجود دارد و هدف ما کاهش خطا در حد ممکن و نزدیک شدن به مقدار دقیق است. از دانشجویان انتظار می‌رود که علل و انواع خطا را در

آزمایش بشناسند و در گزارش کار خود بیان کنند. بامطالعه و یادگیری اصول تحلیل خطا می‌توانیم:

(الف) یاد بگیریم که چطور خطای آزمایشگاهی را اندازه بگیریم.

(ب) انواع و سرچشمه‌های خطاهای آزمایشگاهی را بشناسیم.

(ج) به‌طور واضح و دقیق مقادیر اندازه‌گیری‌شده و عدم قطعیت‌های آن‌ها را گزارش کنیم.

(د) روش‌های آزمایشگاهی را بهبود ببخشیم تا خطاها در حد امکان کاهش یابند. در این قسمت می‌خواهیم چگونگی یافتن دقیق‌ترین مقدار و چگونگی محاسبه دقت و خطای آزمایش را نشان دهیم. عوامل گوناگونی موجب ایجاد خطا می‌شوند که آزمایشگر باید آن‌ها را بشناسد. خطاها دلایل متعددی دارند و از قانون ثابتی پیروی نمی‌کنند. با این‌وجود با اصلاح وسایل به‌کاررفته در آزمایش و روش‌های انجام آزمایش، افزایش دقت و کنترل تغییرات فیزیکی مؤثر در سنجش، می‌توان خطا را به حداقل رساند. خطاهای اندازه‌گیری اغلب به دو نوع خطای سیستماتیک و خطای اتفاقی تقسیم می‌شوند:

خطای سیستماتیک: این نوع از خطا معمولاً دارای مقدار ثابت و مشخصی است و یا تغییرات منظمی دارد. منشا این خطا می‌تواند موارد زیر باشد:

- خطا در درجه‌بندی دستگاه‌ها
- خطای شخص آزمایشگر: منظور خطایی است که به‌دلیل عادات فردی شخص در آزمایش رخ می‌دهد. مثلاً ضعیف‌بودن شماره چشم شخص آزمایشگر و یا عادت‌داشتن به خواندن ابزار به‌طور غیرعمودی که همواره خطای معینی را در اندازه‌گیری ایجاد می‌کند

- شرایط آزمایش: چنانچه دستگاهی در شرایط خاصی (دما، فشار و ...) مدرج (کالیبره) شده باشد و کارکرد درست آن منوط به بازه‌ای از شرایط خاص باشد و بدون اعمال تصحیحات و تغییرات لازم در شرایط متفاوتی به‌کار رود

- روش‌های ناقص: که بیشتر به‌دلیل بی‌دقتی آزمایشگر اتفاق می‌افتد.

خطاهای سیستماتیک معمولاً شناخته‌شده و قابل تخمین نیستند. باید اثر آن‌ها را شناخت و حذف کرد. اگرچه یافتن منبع این‌گونه از خطا قاعده و روش کلی ندارد ولی باید به‌روش و مراحل انجام آزمایش فکر کرد و با تردید و بازنگری در آن‌ها به کشف و حذف علل این‌گونه خطا پرداخت. در هر اندازه‌گیری اگر خطای سیستماتیک قابل

برطرف کردن باشد، آن را برطرف می کنیم و در غیر این صورت باید در نتیجه اندازه گیری یا آزمایش گزارش شود.

خطای اتفاقی: این نوع خطا از نظر وقوع نظم خاصی ندارد و از نظر مقدار نیز متفاوت است. حتی علامت آن نیز ثابت نیست. اگر اندازه گیری توسط یک دستگاه تکرار شود، ممکن است نتایج به دست آمده با یکدیگر در توافق کامل نباشند. به کمک روش های آماری و با افزایش تعداد دفعات آزمایش می توان این نوع خطا را تخمین زد. بدین منظور اغلب هر آزمایش را برای دفعاتی انجام می دهیم و مقدار اندازه گیری را با میانگین گیری روی مقادیر به دست آمده گزارش می کنیم. منشأ این خطاها را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- خطای تخمین: ناشی از کم دقتی آزمایشگر
- افت و خیزهای کوچک در شرایط آزمایش: مانند تغییرات فشار، دما و غیره
- اختلالات کوچک: مانند ضربه به میز آزمایش و لرزش های مکانیکی مشابه یا جریان هوا و غیره.

محاسبه خطا: برای محاسبه خطا روش های آماری متفاوتی وجود دارد. برای مطالعه دقیق این روش ها می توان به کتاب های مرتبط مراجعه کرد. ما در اینجا به طور مختصر به قدری که برای انجام آزمایش های این کتاب کافی باشد به این بحث می پردازیم.

خطای مطلق: اگر نتیجه اندازه گیری یک کمیت به طور تجربی برابر x' به دست آمده باشد و مقدار حقیقی آن کمیت برابر x باشد، قدر مطلق تفاضل این دو را به عنوان خطای مطلق در نظر می گیریم:

$$|x - x'| = \text{مقدار تجربی} - \text{مقدار حقیقی} = \text{خطای مطلق}$$

برای مثال می دانیم مقدار دقیق عدد ژول $4/186$ است. اگر آزمایشگری آن را برابر $3/5$ به دست آورده باشد، خطای مطلق او در این آزمایش برابر $0/68 = 4/186 - 3/5$ است.

خطای نسبی: نسبت خطای مطلق را به مقدار حقیقی کمیت اندازه گیری شده، خطای نسبی گوئیم:

$$\text{خطای مطلق} = \frac{|x - x'|}{x} = \frac{|\text{مقدار تجربی} - \text{مقدار حقیقی}|}{\text{مقدار حقیقی}} = \text{خطای نسبی}$$

برای مثال آزمایشگر فوق خطای نسبی را برابر $0/16 = \frac{4/186 - 3/5}{4/186}$ به دست می آورد.

درصد خطا: اگر خطای نسبی را درصد ضرب کنیم، مقدار درصد خطا به دست می آید:

$$100 \times \text{خطای نسبی} = \text{درصد خطا}$$

برای مثال درصد خطای آزمایشگر فوق برابر ۱۶ درصد است که درصد خطای معقولی است. درصد خطای بیشتر از ۳۰ درصد معمولاً پذیرفته نیست و نشان از بی دقتی زیاد آزمایشگر یا ابزارها دارد و باید آزمایش را مجدد انجام داد.

خطای نسبی حاصل جمع: اگر کمیتی به صورت $f = x + y$ باشد و Δx و

Δy و Δf حداکثر خطا در مقادیر x و y و f باشند، خواهیم داشت:

$$f + \Delta f = (x + \Delta x) + (y + \Delta y)$$

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

$$\rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y$$

بنابراین خطای نسبی جمع برابر خواهد بود با

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$$

خطای نسبی تفریق: اگر کمیتی به صورت $f = x - y$ باشد و Δx و Δy و

Δf حداکثر خطا در مقادیر x و y و f باشند، خواهیم داشت:

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

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

$$\rightarrow \Delta f = \Delta x - \Delta y$$

بنابراین خطای نسبی جمع برابر خواهد بود با

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x - \Delta y}{x - y}$$

خطای نسبی حاصل ضرب: اگر کمیتی به صورت $f = xy$ باشد و Δx و Δy و Δf حداکثر خطا در مقادیر x و y و f باشند، خواهیم داشت:

$$f + \Delta f = (x + \Delta x)(y + \Delta y) = xy + x \Delta y + y \Delta x + \Delta x \Delta y$$

پس

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

در محاسبه رابطه فوق از $\Delta x \Delta y$ صرف نظر کردیم، چرا که حاصل ضرب دو کمیت کوچک Δx و Δy است.

بنابراین خطای نسبی حاصل ضرب برابر خواهد بود با

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

خطای نسبی در تقسیم: اگر کمیتی به صورت $f = \frac{x}{y}$ باشد و Δx و Δy و Δf حداکثر خطا در مقادیر x و y و f باشند، خواهیم داشت:

$$f + \Delta f = \frac{(x + \Delta x)}{(y + \Delta y)}$$

پس

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

از آنجا که حداکثر خطا برای ما مهم است در مخرج رابطه فوق از $y \Delta y$ صرف نظر می کنیم. بنابراین خطای نسبی تقسیم برابر خواهد بود با^۱

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} - \frac{\Delta y}{y}$$

محاسبه خطا به کمک میانگین یک کمیت: در بیشتر موارد در اندازه گیری ممکن است مقدار دقیق کمیت را در دست نداشته باشیم. در این حالت پس از چندبار اندازه گیری مقدار میانگین کمیت را محاسبه می کنیم و این میانگین گیری می تواند خطای کار را کاهش دهد و ما را به مقدار دقیق نزدیک کند. اگر کمیتی را n مرتبه اندازه

^۱. برای توضیحات بیشتر نگاه کنید به تیلور، ۱۹۸۲.

بگیریم و مقادیر اندازه‌گیری شده $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ باشند، خطای m امین اندازه‌گیری برابر $\Delta m = x_m - \bar{x}$ است که در آن $\bar{x}$ ، میانگین n بار اندازه‌گیری است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

و از این رو خطای نسبی اندازه‌گیری m ام برابر $\frac{\Delta m}{\bar{x}}$ است و درصد آن برابر $\frac{\Delta m}{\bar{x}} \times 100$ است. در آنجا که مقدار دقیق کمیت مورد سنجش در دسترس نیست، میانگین مقادیر اندازه‌گیری، یعنی $\bar{x}$ را به عنوان بهترین مقدار کمیت اندازه‌گیری شده در نظر می‌گیریم. هرچه دفعات اندازه‌گیری بیشتر شود مقدار خطای تصادفی کمتر خواهد شد.

اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین را در اندازه‌گیری i ام با $d_i = |x_i - \bar{x}|$ نشان می‌دهیم. یکی از شاخص‌های مهم یک مجموعه اندازه‌گیری شده میزان پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده حول مقدار میانگین آن‌ها است. برای مشخص کردن آن انحراف از معیار داده‌ها را محاسبه می‌کنیم:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

انحراف از معیار مهم‌ترین عامل اندازه‌گیری پراکندگی دفعات اندازه‌گیری است. انحراف از معیار استاندارد نیز به این شکل تعریف می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2}$$

محاسبه خطا با کمک مشتق توابع لگاریتمی: اگر کمیتی مانند f تابعی از کمیت‌های دیگری مانند x و y و z و ... باشد به طوری که $f = f(x, y, z, \dots)$ و رابطه بین آن‌ها مفروض باشد، خطای محاسبه کمیت f ، Δf ، را می‌توانیم با کمک خطاهای کمیت‌های تابعی آن (Δx و Δy و Δz) به دست آوریم. برای این کار ساده‌تر آن است که از طرفین رابطه لگاریتم یا لگاریتم طبیعی بگیریم ($\ln f(x, y, z, \dots)$) و سپس با

مشتق‌گیری از لگاریتم آن $(\frac{df}{f})$ و جایگزینی Δf به جای df می‌توانیم مقدار خطا را در کمیت f حساب کنیم. در ادامه با ذکر چند مثال این مبحث را بهتر درک می‌کنیم.

محاسبه خطا در چند مثال:

مثال ۱. در یک آزمایش با اندازه‌گیری کمیت‌های متغیر x و y با کمک فرمول زیر اندازه f محاسبه شده است. خطایی که در محاسبه f واقع شده را به دست آورید.

$$f = \frac{(x - y)^2}{2xy}$$

راه‌حل: از رابطه بالا لگاریتم و سپس دیفرانسیل می‌گیریم:

$$\ln f = 2 \ln(x - y) - \ln 2 - \ln x - \ln y$$

$$\frac{df}{f} = 2 \frac{d(x - y)}{x - y} - \frac{dx}{x} - \frac{dy}{y}$$

$$\rightarrow \frac{df}{f} = \frac{2}{x - y} dx - \frac{2}{x - y} dy - \frac{dx}{x} - \frac{dy}{y}$$

دیفرانسیل (تغییرات جزئی) را می‌توان با دلتا (تغییرات بزرگ) جایگزین کرد:

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(\frac{2}{x - y} - \frac{1}{x} \right) \Delta x - \left(\frac{2}{x - y} + \frac{1}{y} \right) \Delta y$$

اکنون با جایگزینی مقادیر اندازه‌گیری شده برای x ، y ، f و Δx و Δy مقدار Δf به دست می‌آید.

مثال ۲: رابطه زیر مفروض است. مقدار Δf را محاسبه کنید.

$$xyz + yf = (x - y)(x + y) + y^2$$

راه‌حل: با دیفرانسیل‌گیری داریم:

$$ydz + xzdy + yzdx + fdy + ydf$$

$$= (x - y)(dx + dy) + (x + y)(dx - dy) + 2ydy$$

$$ydf = -xyz - (xz + f)dy + (x - yz)dx$$

و با جایگزینی دلتا به جای دیفرانسیل خواهیم داشت:

$$y \Delta f = -xy \Delta z - (xz + f) \Delta y + (x - yz) \Delta x$$

اکنون با جایگزینی مقادیر اندازه‌گیری شده برای $\alpha, y, f, \Delta x$ و Δy مقدار Δf به دست می‌آید. همچنین باید توجه داشت که از آنجاکه خطا جهت ندارد مقدار آن نیز منفی نمی‌شود فلذا در رابطه بالا قدر مطلق مقدار تغییرات را در نظر می‌گیریم (برای توضیحات بیشتر نگاه کنید به رالفسون و همکاران، ۲۰۱۳).

مثال ۳: فشار (P)، دما (T) و حجم (V) گازی را اندازه گرفته‌ایم. فرض می‌کنیم گاز کامل است. اگر مطابق خوانش فشارسنج و دماسنج عدم قطعیت در فشار برابر ΔP و در دما برابر ΔT باشد، عدم قطعیت در حجم گاز، ΔV ، چقدر است؟

$$PV = nRT$$

$$PdV + VdP = nRdT$$

$$\rightarrow \Delta V = \frac{nR\Delta T - VdP}{P}$$

نحوه رسم نمودار

کمیت‌هایی که اندازه گرفته‌ایم اغلب وابسته به متغیر یا متغیرهای دیگری هستند. برای مثال طبق قانون هوک نیروی اعمال شده به فنر (f) با تغییرات طول فنر (Δx) متناسب است ($f = k \Delta x$). در بررسی داده‌ها و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها گاهی لازم است چگونگی تغییرات کمیت‌های اندازه‌گیری شده را برحسب متغیر یا متغیرهای وابسته ترسیم کنیم. این کار در محاسبه مقدار کمیت اندازه‌گیری شده، بررسی چگونگی تغییرات کمیت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی یا برون‌یابی برخی نتایج دیگر به ما کمک می‌کند. نمودارها یا به‌طور دستی در کاغذ و یا به کمک نرم‌افزارها و رایانه رسم می‌شوند. در رسم دستی، کاغذهای به کاررفته برای رسم نمودار - که به آن‌ها کاغذ ترسیم می‌گویند - با مقیاس‌های مختلفی مدرج می‌شوند که عبارت‌اند از: مقیاس میلی‌متری، مقیاس نیم‌لگاریتمی و مقیاس لگاریتمی.

انواع کاغذهای ترسیم: کاغذ ترسیم میلی‌متری: در این نوع از کاغذهای ترسیم، محورهای افقی و عمودی هر دو به صورت خطی و برحسب میلی‌متر درجه‌بندی شده‌اند. برای محاسبه شیب خط در یک کاغذ میلی‌متری کافی است تفاوت عرض‌های دو نقطه را بر تفاوت طول‌هایش تقسیم کنیم ($\Delta y / \Delta x$).

کاغذ ترسیم نیم‌لگاریتمی: در این کاغذها محور افقی به صورت خطی و محور عمودی به صورت لگاریتمی درجه‌بندی شده‌است به طوری که در آن فاصله بین اعداد ۱

تا ۱۰، با فاصله اعداد ۱۰ تا ۱۰۰ و با فاصله اعداد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر است. این نوع کاغذ ترسیم برای رسم توابعی مناسب است که بازه تغییرات آن‌ها نسبت به متغیرشان وسیع است، مانند توابع نمایی، $f(x) = ce^{ax}$. تابع f در کاغذ نیم‌لگاریتمی به شکل خط راست ترسیم می‌شود. چراکه اگر از طرفین این تابع لگاریتم طبیعی بگیریم خواهیم داشت: $\ln f(x) = \ln c + ax$. با توجه به اینکه $\ln c$ مقداری ثابت است، پس اگر $y = \ln f(x)$ را بر حسب x رسم کنیم، نمایش آن یک خط راست خواهد بود که عرض از مبدأ آن مقداری ثابت (برابر $k = \ln c$) و شیب خط برابر a است. شیب خط در کاغذ نیم‌لگاریتمی برابر خواهد بود با $\Delta y / \Delta x$ که در آن $\Delta x = x_2 - x_1$ و $\Delta y = \ln f(x_2) - \ln f(x_1)$. مقدار Δy می‌تواند با اندازه‌گیری اختلاف عرض دو نقطه از داده‌ها و تقسیم آن بر اختلاف طول آن دو نقطه به دست آید.

کاغذ ترسیم تمام لگاریتمی: در این نوع از کاغذهای ترسیم محورهای افقی و عمودی هر دو به صورت لگاریتمی درجه‌بندی شده‌اند به طوری که توابعی چون $f(x) = cx^a$ در آن به شکل یک خط مستقیم ترسیم می‌شوند. به این دلیل که با لگاریتم گرفتن از رابطه f داریم:

$$\ln f(x) = \ln c + a \ln x$$

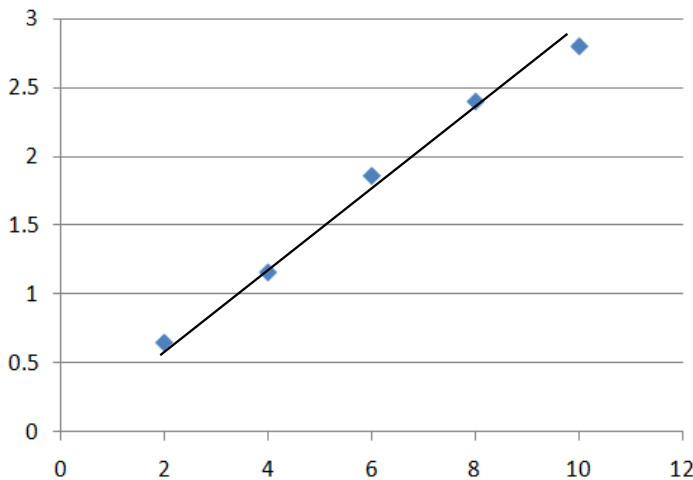
و اگر نمودار $y = \ln f(x)$ را بر حسب $\ln x$ رسم کنیم به صورت یک خط راست نمایش داده می‌شود. برای محاسبه شیب خط در این نوع از کاغذها نیز اختلاف عرض دو نقطه از داده‌ها را بر اختلاف طول آن‌ها تقسیم می‌کنیم. اگر فواصل طولی و عرضی برابر نباشند، قبل از تقسیم اختلاف عرض نقاط بر اختلاف طولشان، اختلاف عرض را بر مقیاس فاصله محور عمودی و اختلاف طول را بر مقیاس فاصله محور افقی تقسیم می‌کنیم.

رسم دستی نمودار: برای رسم یک نمودار به طوردستی، ابتدا کاغذ ترسیم مناسب را با توجه به نکات فوق انتخاب می‌کنیم و محورهای آن‌را درجه‌بندی می‌کنیم. بازه درجه‌بندی‌ها را مطابق با داده‌ها (نتایج حاصل از اندازه‌گیری) انتخاب می‌کنیم. اعداد نمایشگر بازه‌ها را به صورت یکی یکی، دو تا دو تا، پنج تا پنج تا یا ده تا ده تا و... روی محورهای مشخص می‌کنیم. فاصله درجه‌بندی محور افقی می‌تواند با فاصله درجه‌بندی محور عمودی متفاوت باشد. علاوه بر آن صفر درجه‌بندی در هر محور نیز می‌تواند بر مبدأ مختصات منطبق نباشد. درجه‌بندی محورها را طوری انتخاب می‌کنیم که نمودار نهایی قسمت اصلی صفحه را دربرگیرد و در یک گوشه آن واقع نشود.

واحدهای کمیت‌ها باید در پایین محورهای افقی و عمودی درج شوند. باتوجه به مقیاس‌بندی محورهای مختصات، اعدادی که از آزمایش به‌دست آمده‌اند با علامت ضربدر یا دایره روی صفحه مشخص می‌کنیم. پس از مشخص کردن نقاط، باید براساس آن‌ها نمودار موردنظر را رسم کرد. اما برای رسم نمودار نباید نقاط را به‌صورت خط شکسته به‌هم وصل کرد. بلکه باید بهترین منحنی حاصل را با کمک خط‌کش رسم کرد به‌شکلی که خط حاصل از میان نقاط عبور کند و تعدادی از نقاط در بالا و تعدادی در پایین آن قرار گیرند. به‌طورمثال فرض کنیم می‌خواهیم یک رابطه خطی به‌صورت $y = ax$ (مانند بستگی مقدار گرمای داده‌شده به جسم با افزایش دمای آن) را تحقیق کنیم. مقادیر فرضی که در آزمایش ازطریق اندازه‌گیری برای x و y به‌دست آمده‌اند در جدول زیر نشان‌داده شده‌است.

جدول ۱. مقادیر اندازه‌گیری فرضی در یک آزمایش فرضی

y	x	a
۰/۶۵	۲	۰/۳۳
۱/۱۶	۴	۰/۲۹
۱/۸۶	۶	۰/۳۱
۲/۴۰	۸	۰/۳۰
۲/۸	۱۰	۰/۲۸



شکل ۱. رسم داده‌های جدول فوق برای نمونه

با کمک این مقادیر می‌خواهیم ضریب تناسب (شیب خط) a را به‌دست آوریم. مشخص است که برای هر مقدار x مقداری متناظر برای y وجود دارد فلذا مقدار نظیری هم برای a وجود خواهد داشت. این مقادیر را برای a محاسبه می‌کنیم (ستون سوم جدول). اگرچه مقادیر a باید همه یکسان باشند اما به‌علت خطای آزمایش مقادیر به‌دست‌آمده باهم مقداری متفاوت‌اند. پس از مقادیر به‌دست‌آمده برای a میانگین‌گیری می‌کنیم و مقدار میانگین حاصل را که برابر $۰/۳$ می‌شود - درنظر می‌گیریم. عمل میانگین‌گیری را می‌توان با رسم منحنی و محاسبهٔ شیب خط آن از روی منحنی نیز انجام داد. برای این‌کار مقادیر مختلف x و y را روی محورهای مختصات مشخص می‌کنیم. چنانچه گفتیم این نقاط دقیقاً روی یک خط واقع نمی‌شوند. حال اگر به‌شکل نظری بدانیم که منحنی باید یک خط راست باشد سعی می‌کنیم به‌ترتیبی که در بالا گفتیم خطی را از میان نقاط عبور دهیم. این کار به‌طور تقریبی عمل میانگین‌گیری را انجام می‌دهد. برای اینکه این کار دقیق‌تر صورت گیرد و مقدار دقیق شیب خط محاسبه شود باید از روش‌های محاسباتی دقیق‌تری مانند روش کمترین مربعات استفاده کرد و از آنجاکه محاسبات آن زمان‌بر است بهتر آن است که برای این کار از نرم‌افزارهایی که برنامه‌های محاسباتی در این زمینه نوشته‌اند کمک بگیریم که یک نمونه را در قسمت بعد توضیح می‌دهیم. تفسیر ضریب زاویهٔ به‌دست‌آمده باتوجه به موضوع آزمایش توسط آزمایشگر انجام می‌شود. به‌علاوه اگر عرض و طول از مبدأ نیز صفر نباشند، قابل تفسیر هستند که باید باتوجه به موضوع مورد آزمایش توسط آزمایشگر مورد بحث و تفسیر واقع شود.

رسم منحنی با کمک رایانه: برای رسم نمودارها و منحنی‌ها می‌توانیم از نرم‌افزارهای مختلفی مانند *Table Curve*, *MAPLE*, *MATHEMATICA*, *MATLAB* یا نرم‌افزار *Excel* استفاده کنیم. در نرم‌افزار *MATLAB* بستهٔ نرم‌افزاری خاصی طراحی شده که در منوی *TOOLS* تعبیه شده‌است و مخصوص رسم نمودارهای مختلف است. با کمک این بسته نرم‌افزاری می‌توانید داده‌های مختلف را وارد کرده و منحنی موردنظر را به آن منطبق (*fit*) کنید و ضرایب معادله را برحسب متغیرها به‌دست آورید. همچنین نرم‌افزارهای *MATLAB*, *MATHEMATICA* و *MAPLE* دارای دستورها و برنامه‌های از پیش نوشته شده‌ای هستند که به شما کمک می‌کنند تا نمودارهای موردنظر خود را رسم کنید. چگونگی کار با این نرم‌افزارها اغلب موضوع

بحث درس‌هایی مانند کاربرد کامپیوتر در فیزیک هستند و ما در اینجا تنها به توضیحات مختصری درباره رسم نمودار با Excel بسنده می‌کنیم.

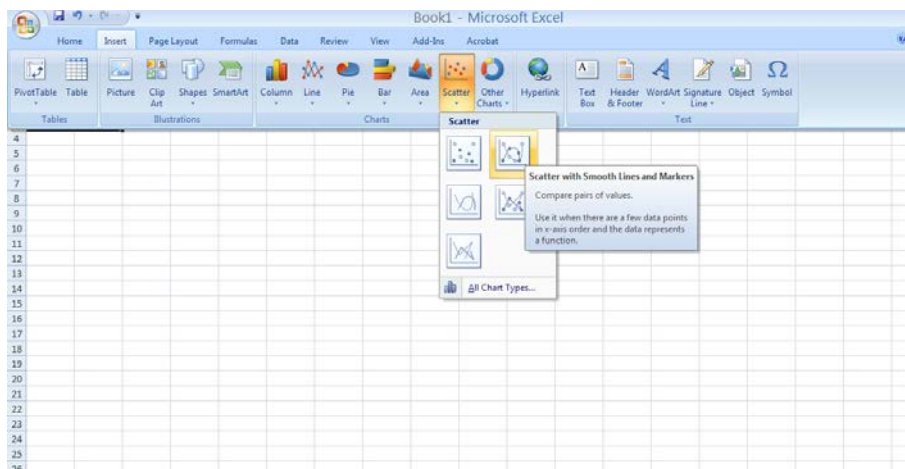
- راهنمای رسم یک نمودار خطی ساده در Excel 2007

۱. نرم‌افزار Excel را باز کنید. داده‌های x را در ستون A و داده‌های y را در ستون B وارد کنید.

۲. $Ctrl+A$ را بگیرید تا کل داده‌های وارد شده انتخاب شود.

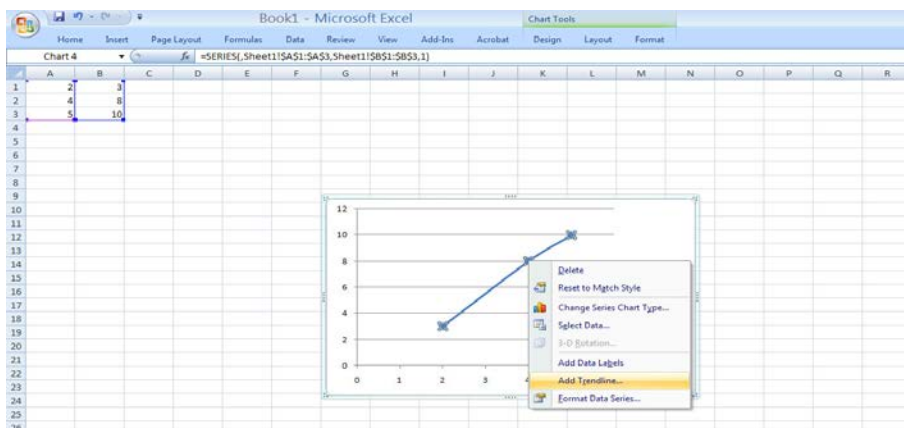
۳. روی آیکون Insert در بالای صفحه کلیک کنید. زیرمجموعه‌ای در menu Bar بالای صفحه باز می‌شود.

۴. روی گزینه scatter کلیک کنید. از آیکون‌های باز شده روی آیکون scatter with Lines and Markers کلیک کنید (شکل ۱).



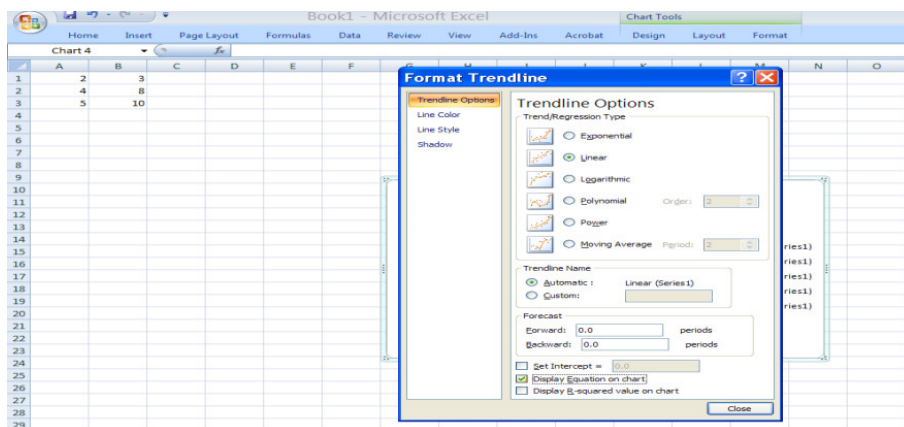
شکل ۲

۱. نمودار y بر حسب x رسم می‌شود. اکنون برای منطبق (fit) کردن منحنی مناسب بر آن، مثلاً نمودار خطی ساده $y = ax + b$ بدین ترتیب ادامه می‌دهیم.
۲. روی خط رسم شده کلیک می‌کنیم تا انتخاب شود و سپس راست کلیک کرده و روی گزینه add trendline کلیک می‌کنیم (شکل ۲).

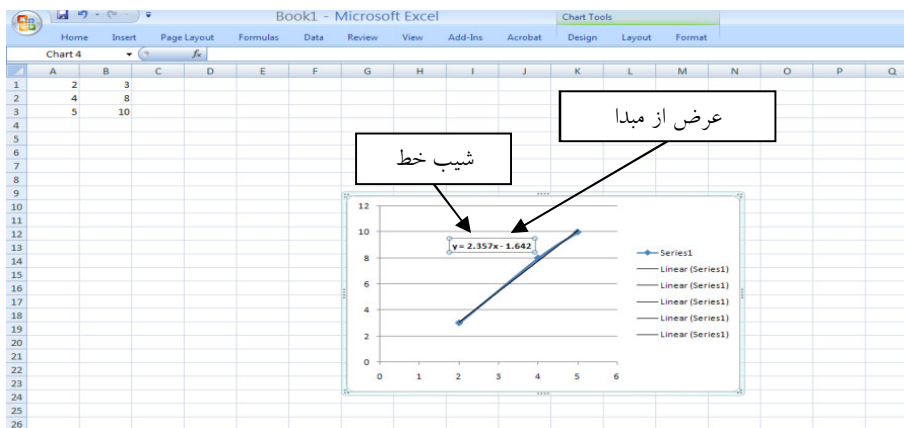


شکل ۳

۱. منوی *format trendline* باز می‌شود. گزینه *linear* و *display equation on chart* را علامت (*tick*) می‌زنیم (شکل ۳). معادله به‌دست‌آمده که روی صفحه نمایش می‌یابد، بهترین شیب خط و عرض از مبدا را برای داده‌های ثبت‌شده به‌دست می‌دهد (شکل ۴). برای مثال اگر داده‌ها مربوط به افزایش طول فنر (x) برحسب میزان نیروی اعمال‌شده (y) در آزمایش فنر باشد، شیب خط مقدار ضریب فنر را به‌دست می‌دهد.



شکل ۴



شکل ۵

تبدیل واحدها به SI

ذکر واحدهای هر داده در گزارش کار آزمایش ضروری است و عددی که واحد آن ذکر نشده باشد فاقد ارزش علمی است. به علاوه واحدها باید به شکل صحیح به کار رفته باشند. برای مثال در استفاده از رابطه $Q = mc\Delta\theta$ ، اگر c را در دستگاه CGS یعنی برحسب کالری بر گرم درجه سلسیوس $cal / gr^{\circ}C$ می نویسیم پس باید مقدار جرم را نیز برحسب گرم وارد کنیم. از طرفی اگر آن را در دستگاه SI، برحسب ژول بر درجه سلسیوس (یا کلوین) نوشته و وارد کرده ایم، پس مقدار جرم را نیز باید برحسب کیلوگرم وارد کنیم ($J / kg^{\circ}C$) و اگر برحسب گرم وارد کنیم نتیجه محاسبات ما نادرست خواهد بود. دانشجویان عزیز باید در تبدیل واحدها به شکل صحیح دقت کنند و هر واحدی را که لازم است پیش از انجام محاسبات تبدیل کنند. در زیر برخی از تبدیل واحدهایی را که در این درس به آنها نیاز داریم می آوریم:

طول

$$1m = 100cm = 1000mm$$

$$1in = 2.54cm$$

$$1A^{\circ} = 10^{-10}m \quad 1A^{\circ} = 10^{-10}m$$

زمان

$$1min = 60s$$

$$1h = 60min = 3600s$$

زاویه

$$1^{\circ} = 0.1745 \text{ rad} = \pi / 180 \text{ rad}$$

$$1 \text{ دور} = 360^{\circ} = 2\pi \text{ rad}$$

$$1 \text{ rev / min (rpm)} = 0.1047 \text{ rad / s}$$

جرم

$$1 \text{ kg} = 10^3 \text{ gr}$$

$$1 \text{ gr} = 10^{-3} \text{ kg}$$

سطح

$$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$$

حجم

$$1 \text{ لیتر} = 1000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

انرژی

$$1 \text{ ژول} = 10^7 \text{ ارگ} = 0.239 \text{ کالری}$$

$$1 \text{ کالری} = 4/186 \text{ ژول}$$

$$1 \text{ eV} = 1/602 \times 10^{-19} \text{ ژول}$$

$$1 \text{ kWh} = 3/600 \times 10^6 \text{ ژول}$$

توان

$$1 \text{ وات} = 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$$

فشار

$$1 \text{ pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ atm} = 1/0.13 \times 10^5 \text{ pa}$$

$$1 \text{ mm Hg} = 133/3 \text{ pa}$$

برخی ثابت‌های فیزیکی:

جدول ۲. برخی ثابت‌های فیزیکی

کمیت	نماد	مقدار	واحد
سرعت نور در خلأ	C	$۲/۹۹۷۹۲۴۵۸ \times ۱۰^۸$	$m.s^{-1}$
تراوایی خلأ	μ_0	$۴\pi \times ۱۰^{-۷}$	$H.m^{-1}$
گذردهی خلأ	ϵ_0	$۸/۸۵۴۱۸۷ \times ۱۰^{-۱۲}$	$F.m^{-1}$
ثابت پلانک	H	$۶/۶۲۶۱۷۶ \times ۱۰^{-۳۴}$	$J.Hz^{-1}$
بار بنیادی	E	$۱/۶۰۲۱۸۹۲ \times ۱۰^{-۱۹}$	C
عدد آووگادرو	N_A	$۶/۰۲۲۰۴۵ \times ۱۰^{۲۳}$	mol^{-1}
ثابت گرانش	G	$۶/۶۷۲۰ \times ۱۰^{-۱۱}$	$N.m^۲.kg^{-۲}$
شعاع بور	a_0	$۵/۲۹۱۷۷۰۶ \times ۱۰^{-۱۱}$	M
طول موج کامپتون الکترون $h/m_e c$	λ_c	$۲/۴۲۶۳۰۸۹ \times ۱۰^{-۱۲}$	M
جرم سکون الکترون	m_e	$۹/۱۰۹۵۳۴ \times ۱۰^{-۳۱}$	Kg
یک الکترون ولت	eV	$۱/۶۰۲۱۸۹۲ \times ۱۰^{-۱۹}$	J
جرم سکون پروتون	m_p	$۱/۶۷۲۶۴۸۵ \times ۱۰^{-۲۷}$	Kg
جرم سکون نوترون	m_n	$۱/۶۷۴۹۵۴۳ \times ۱۰^{-۲۷}$	Kg
ثابت ریدبرگ	R_∞	$۱/۰۹۷۳۷۳۱۷ \times ۱۰^۷$	$m^{-۱}$
ثابت بولتزمن	K	$۱/۳۸۰۶۶۲ \times ۱۰^{-۲۳}$	$J.k^{-1}$
ثابت مولی گاز	R	$۸/۳۱۴۴۱$	$J.mol^{-1}.k^{-1}$
ثابت استفان-بولتزمن	σ	$۵/۶۷۰۳۲ \times ۱۰^{-۸}$	$W.m^{-۲}.k^{-۲}$

فصل اول

حرارت

هدف کلی

آشنایی عملی با آزمایش‌های فیزیک حرارت.

هدف‌های یادگیری

پس از پایان این فصل انتظار می‌رود دانشجو بتواند:

۱. ارزش آبی گرماسنج را محاسبه کند.
۲. گرمای نهان ذوب یخ و تبخیر آب را محاسبه کند.
۳. گرمای ویژهٔ جسم جامد را اندازه بگیرد.
۴. عدد ژول و معادل مکانیکی حرارت را به‌روش الکتریکی به‌دست آورد.
۵. ضریب انبساط طولی اجسام جامد را محاسبه کند.
۶. ضریب انبساط حجمی مایعات را به‌دست آورد.
۷. ضریب اتمیسته هوا را طی آزمایش محاسبه کند.
۸. بتواند با آزمایش نشان دهد که فشار مایع به‌شکل ظرف بستگی ندارد.
۹. فشار بخار اشباع را اندازه بگیرد.
۱۰. درستی قانون ارشمیدس را بررسی کند و چگالی مایعات را به‌صورت تجربی تعیین کند.
۱۱. ضریب کشش سطحی آب، آب صابون و لولهٔ موئین را محاسبه کند.
۱۲. معادل مکانیکی گرما را تعیین کند و ظرفیت ویژهٔ گرمایی آلومینیوم و برنج را محاسبه کند.
۱۳. حرکت مولکول‌های گاز موجود در داخل یک سیستم مفروض را به‌طور آماری بررسی کند.

مقدمه

سردی و گرمی اجسام و انتقال گرما از جسمی به جسم دیگر پدیده‌هایی هستند که همواره در زندگی روزمره تجربه می‌کنیم. اولین کسی که گرما را به شکل مفهومی فیزیکی در نظر گرفت جیمز بلاک بود. او گرما را سیالی بی‌وزن به نام کالرا دانست که می‌تواند وارد جسم شود و دمای آن را بالا ببرد. او در آزمایشات‌اش به این نتیجه رسید که جرم‌های مساوی از مواد مختلف هنگام یک درجه افزایش دما مقدار مساوی کالری دریافت می‌کنند. این دریافت، او را به مفهوم ظرفیت گرمایی نزدیکی کرد. پس از آن اشخاصی چون کارنو، تامسون، رامفورد، ژول، کلازیوس، کلوین، بولتزمن و گیس نیز با طرح آزمایش‌هایی به مطالعه این موضوع پرداختند و نظریات خود را در این زمینه ارائه دادند. در این فصل برآنیم که آزمایش‌هایی را در رابطه با حرارت و گرما یاد بگیریم و بتوانیم به کمک آن‌ها به‌طور عملی به اهداف یادگیری که در ابتدای فصل اشاره شد برسیم.

آزمایش ۱

گرماسنجی: اندازه‌گیری ارزش آبی گرماسنج (کالریمتر)

هدف

محاسبه ارزش آبی گرماسنج (کالریمتر)

وسایل آزمایش

کالریمتر آبی، آب سرد و گرم (ترجیحاً آب مقطر)، ترازو، دماسنج (ترمومتر)، گرم‌کننده (هیتر)، بشر مدرج.

نظریهٔ آزمایش

واژهٔ کالریمتر به معنای سنجشگر کالری (گرما) است. گرماسنج (کالریمتر) ابزاری است که برای سنجش گرما، اندازه‌گیری گرمای واکنش‌های شیمیایی یا تغییرات فیزیکی و یا سنجش ظرفیت گرمایی به کار می‌رود. کالریمتر دارای انواع مختلفی است مانند کالریمتر روبشی تفاضلی، میکروکالریمتر هم‌دما و غیره. کالریمتر ساده‌ای که ما در این آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم شامل یک مخزن استوانه‌ای، یک درپوش عایق، یک دماسنج و یک همزن است (شکل ۵). در حالت ایده‌آل، وقتی درپوش کالریمتر کاملاً بسته باشد، محفظهٔ آن طوری طراحی شده که گرمای داخل کالریمتر به بیرون منتقل نمی‌شود و از این رو در آزمایشگاه برای تبادل انرژی گرمایی بین دو یا چند جسم از محفظهٔ داخل کالریمتر استفاده می‌شود.



شکل ۱-۱. کالریمتر

پیش از به کار بردن کالریمتر در آزمایش‌های گرماسنجی، نیاز داریم ارزش آبی کالریمتر را بدانیم. برای این منظور این آزمایش را انجام می‌دهیم. در آزمایش‌های بعدی، ارزش آبی به دست آمده برای کالریمتر را برای کالریمتر مفروض می‌گیریم. ارزش آبی کالریمتر عبارت است از میزان آب معادلی که کالریمتر هم‌ارز آن در یک واکنش تعادل گرمایی، گرما می‌گیرد.

می‌دانیم اگر دو جسم A و B با دماهای متفاوت را در مجاورت هم قرار دهیم، گرما از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می‌شود. بنابراین جسم گرم‌تر مقداری انرژی گرمایی از دست می‌دهد و جسم سردتر مقداری گرما به دست می‌آورد، تا زمانی که به دمای تعادل برسند. طبق اصل بقای انرژی هرگاه چند جسم با دماهای مختلف را به هم نزدیک کنیم، در صورت وجود عایق‌بندی، مجموع گرمای داده شده با مجموع گرمای گرفته شده برابر است. مقدار گرمای لازم برای افزایش دمای معین در جرم مشخصی از اجسام مختلف ثابت نیست و به ظرفیت گرمایی آن جسم بستگی دارد. ظرفیت گرمایی یک جسم مقدار انرژی گرمایی است که به جسم داده می‌شود تا دمای آن یک درجه سلسیوس (یا کلوین) افزایش یابد. واحد ظرفیت گرمایی در دستگاه CGS کالری بر درجه سلسیوس و در دستگاه SI ژول بر درجه سلسیوس است. رابطه آن به این شکل نوشته می‌شود:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta \theta}$$

که در آن C نماد ظرفیت گرمایی، ΔQ گرمای مبادله شده و $\Delta \theta$ افزایش دمای حاصل است. ظرفیت گرمایی ویژه یک جسم طبق تعریف، ظرفیت گرمایی در واحد جرم جسم است:

$$c = \frac{C}{m}$$

ارزش آبی یا ظرفیت گرمایی گرماسنج، مقدار گرمایی است که به کل گرماسنج داده می شود تا دمای آن به اندازه یک درجه سلسیوس (یا کلوین) افزایش یابد. ظرفیت گرمایی کالریمتر را با A نشان می دهیم. گرماسنج (کالریمتر) از قسمت های مختلفی تشکیل شده است که ظرفیت گرمایی و جرم هرکدام متفاوت است. اما ظرفیت گرمایی گرماسنج، A ، مقداری است که به مجموع این اجزا نسبت داده می شود به طوری که اگر اجزای کالریمتر مانند بدنه، درپوش، همزن و غیره را با جرم های $m_1, m_2, m_3, \dots$ مشخص کنیم و گرمای ویژه هرکدام از این اجزا به ترتیب $c_1, c_2, c_3, \dots$ باشد، ظرفیت گرمایی کالریمتر عبارت است از:

$$A = m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 + \dots$$

شرح و روش آزمایش

از آنجاکه ما جرم و ظرفیت گرمایی تک تک اعضای کالریمتر را نداریم به جای استفاده از رابطه فوق از روش زیر استفاده می کنیم. در کالریمتری با ارزش آبی A مقدار m_c گرم آب سرد با دمای θ_c می ریزیم و سپس مقدار m_h گرم آب گرم با دمای θ_h اضافه می کنیم و صبر می کنیم تا مجموعه به دمای تعادل θ_f برسد. طبق اصل بقای انرژی گرمای داده شده با گرمای گرفته شده برابر است بنابراین خواهیم داشت:

$$(A + m_c c_w)(\theta_f - \theta_c) = m_h c_w (\theta_h - \theta_f)$$

که در آن $c_w = 1 \text{ Cal} / \text{gr}^\circ \text{C}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب است. بنابراین برای ظرفیت گرمایی کالریمتر به دست می آوریم:

$$A = \frac{m_h c_w (\theta_h - \theta_f) - m_c c_w (\theta_f - \theta_c)}{(\theta_f - \theta_c)}$$

اکنون مراحل زیر را انجام دهید:

۱. مقداری آب سرد (با دمای آزمایشگاه) را در بشر بریزید. جرم آن m_c را اندازه بگیرید و سپس داخل کالریمتر بریزید. (راهنمایی: ابتدا جرم بشر را اندازه بگیرید. سپس جرم آب و بشر را اندازه بگیرید و با کسرکردن جرم بشر، جرم آب را به دست آورید. برای سنجش دقیق جرم بهتر است از ترازوی دیجیتال، شکل ۶، استفاده کنید. مقدار جرم را با توجه به اندازه کالریمتر انتخاب کنید و از مرتبه ۱۰۰ گرم باشد. بهتر است از آب مقطر استفاده کنید.)
۲. اکنون دمای آب سرد داخل کالریمتر، θ_c ، را با کمک ترمومتر اندازه گرفته و یادداشت کنید. (برای سنجش دقیق دما از ترمومتر (دماسنج دیجیتال، شکل ۶) استفاده کنید.)
۳. مقداری آب را در بشر بریزید و دوباره به شیوه مرحله ۱ جرم آن m_h را به دست آورده و یادداشت کنید. آب را روی هیتر (شکل ۶) تا دمای حدود ۶۰ درجه سانتی گراد گرم کنید. (بهتر است جرم آب گرم و سرد کمابیش یکسان باشد.)
۴. دمای آب گرم را پیش از ریختن در کالریمتر، θ_h ، اندازه گرفته و در جدول زیر یادداشت کنید. سپس آب گرم را نیز در داخل کالریمتر بریزید.
۵. درپوش کالریمتر را درحالی که ترمومتر داخل آن است - کاملاً ببندید به طوری که هیچ گونه تبادل گرمایی با خارج صورت نگیرد. محتوی آب را به آرامی هم بزنید. همان طور که مشاهده می کنید دمای ترمومتر آرام آرام تغییر می کند. صبر کنید تا دما به نسبت ثابت شود. دمای نهایی (دمای تعادل) θ_f را یادداشت کنید.



شکل ۶-۲. از چپ به راست به ترتیب یک نمونه: ترازوی دیجیتال، ترمومتر دیجیتال و درپوش آن، هیتر.

تحلیل نتایج

داده‌های خود را در جدول زیر به‌طور دقیق یادداشت کنید. آزمایش را مجدد برای کالریمتر دیگری انجام دهید و آن داده‌ها را نیز در جدول زیر یادداشت کنید. در تحلیل نتایج خود موارد زیر را به‌دست آورید:

- تبدیل واحدهای لازم را انجام دهید.

- مقدار A ، ظرفیت گرمایی کالریمتر را به‌دست آورید.

- خطای مطلق، خطای نسبی و درصد خطا را محاسبه کنید. علل خطا را ذکر کنید.

برای محاسبه خطا مقدار حقیقی A را از روی اطلاعات کارخانه‌ای درج‌شده برای کالریمتر آزمایشگاه خود بخوانید.

❖ نکته ۱: پس از این مقدار حقیقی ارزش آبی کالریمتر را در تمامی آزمایش‌ها همین مقدار در نظر می‌گیریم.

❖ نکته ۲: در تمام آزمایش‌ها یک نسخه از جداول پرشده را به مسئول آزمایشگاه یا استاد درس تحویل دهید. چنانچه مورد تأیید قرار گرفت داده‌های شما درست است. نسخه دیگر را برای تحلیل نتایج حاصل، نزد خود نگه داشته و در گزارش کار ثبت کنید.

کاربرگ گزارش آزمایش شماره ۱: اندازه‌گیری ارزش آبی کالریمتر

نام و نام خانوادگی:

تاریخ انجام آزمایش:

جدول ۱-۱. داده‌های آزمایش ۱، ارزش آبی کالریمتر

درصد خطا	خطای نسبی	خطای مطلق	A_{Cal} /gr $^{\circ}C$	θ_f سانتی‌گراد	θ_h سانتی‌گراد	θ_c سانتی‌گراد	m_h (gr)	m_c (gr)	نتایج داده‌ها
									کالریمتر اول
									کالریمتر دوم

محل تایید داده‌ها توسط استاد:-----

خودآزمایی

۱. چرا استفاده از آب مقطر توصیه شده است؟
۲. اگر در اندازه‌گیری دمای نهایی (θ_f) تاخیر داشته باشید، آزمایش شما دارای خطاست. علت را توضیح دهید.
۳. مقداری را که برای ارزش آبی کالریمترها به دست آورده‌اید، در دستگاه SI بنویسید (تبدیل کنید).
۴. مقدار معادل ظرفیت گرمایی آب، $c_w = 1 \text{ Cal} / \text{gr}^\circ\text{C}$ ، را در دستگاه SI به دست آورید و واحدهای آن را نیز تبدیل کنید.
۵. مقدار 100 gr آب سرد را در کالریمتر می‌ریزیم. دمای مجموعه آب و کالریمتر را 30°C درجه اندازه‌گیری می‌کنیم. مقدار 100 gr آب گرم را با دمای 60°C درجه به آن می‌افزاییم. اگر دمای تعادل 43°C درجه باشد، ارزش آبی کالریمتر را حساب کنید. خطای نسبی چقدر است؟
۶. از نظر شما به عنوان آزمایشگر، چه عواملی در این آزمایش ایجاد خطا می‌کنند؟ به دوست خود توصیه می‌کنید در انجام این آزمایش چه نکاتی را رعایت کند تا خطا کاهش یابد؟

آزمایش ۲

اندازه‌گیری گرمای نهان تغییر حالت آب (ذوب و تبخیر)

هدف

به دست آوردن گرمای نهان تغییر حالت مربوط به ذوب یخ (l_f) و تبخیر آب (l_v).

وسایل آزمایش

کالریمتر، آب مقطر، ترمومتر (دماسنج دیجیتال)، هیتر (منبع حرارتی)، همزن، ترازوی دیجیتال.

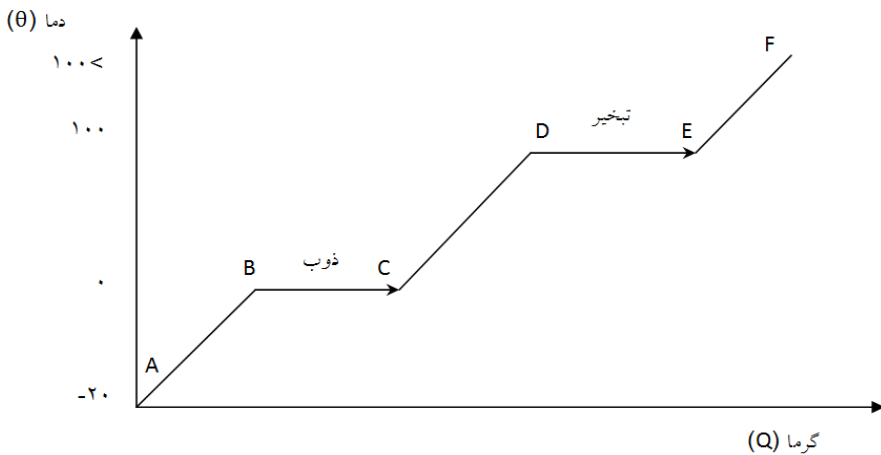
نظریهٔ آزمایش

ذرات مواد برهم اندرکنش دارند و این اندرکنش درحالت‌های مختلف ماده، جامد، مایع یا گاز متفاوت است. هنگامی که ماده را به دماهای پایین می‌رسانیم، جنبش ذرات آن محدود می‌شود و هر ذره از آن، تنها در حوالی یک وضعیت تعادلی ارتعاش می‌کند. در دماهای پایین نیروهای چسبندگی بین ذرات بر نیروهای جنبشی حرارتی غلبه می‌کند و جسم به حالت جامد در می‌آید. با افزایش دما دامنهٔ ارتعاشات ذرات جسم افزایش می‌یابد. برای هر نوع ماده دمایی وجود دارد که در آن دما دیگر نیروهای چسبندگی قادر نیستند بر نیروهای جنبش حرارتی غلبه کنند. در این دما ماده تغییر حالت می‌دهد و درحالت جدید ذرات ماده درحین تماس با یکدیگر دامنهٔ ارتعاشات گسترده‌تری دارند. ماده درحین تغییر حالت همچنان انرژی می‌گیرد اما این انرژی صرف تغییر دمای آن نمی‌شود بلکه به تغییر حالت جسم کمک می‌کند و ازاین‌رو به آن گرمای نهان (*latent heat*) می‌گوییم. اگر این گرمای نهان مربوط به تغییر حالت ماده از جامد به مایع باشد به آن گرمای نهان ذوب می‌گوییم و اگر مربوط به تغییر حالت ماده از مایع به گاز باشد آن را گرمای نهان تبخیر می‌نامیم. واضح است که در هر حالت چنان‌که بخواهیم جسم را به حالت قبلی‌اش برگردانیم لازم است گرمای مذکور را از آن باز پس بگیریم.

به عنوان یک نمونه یخی را در دمای -20 درجه سلسیوس در نظر می گیریم. به این قالب یخ حرارت می دهیم تا دمای آن افزایش یابد. تا دمای صفر درجه، یخ همچنان گرما می گیرد و دمایش افزایش می یابد. وقتی مقدار گرمای Q به ماده ای در حالت جامد، مایع یا گاز به جرم m و ظرفیت گرمایی ویژه c_i داده شود، دمای آن طبق رابطه زیر به اندازه $\Delta\theta$ افزایش می یابد:

$$Q = mc_i \Delta\theta$$

در این مثال c_i ظرفیت گرمایی ویژه یخ است. پس یخ نیز در این بازه به اندازه Q گرما می گیرد و این گرما صرف افزایش دمای آن می شود (شکل ۷ مرحله AB).



شکل ۱-۳. اثر افزایش گرما بر یخ -20 درجه سلسیوس.

سپس همچنان به گرمادادن به یخ صفر درجه ادامه می دهیم اما ملاحظه می کنیم که دمای آن تغییر نمی کند بلکه ثابت می ماند، اما یخ شروع به آب شدن می کند. این مرحله ذوب نامیده می شود (شکل ۷ مرحله BC) و گرمای نهان آن از رابطه زیر به دست می آید

$$Q_f = ml_f$$

که در آن Q_f گرمای نهان ذوب ماده و l_f ضریب گرمای نهان ذوب آن است و مقدار آن برای یخ 80 Cal/gr است.