

فصل چهارم

سیالات، گرما و خواص مکانیکی مواد

اهداف یادگیری فصل

1. چیدمان و حرکت مولکول‌ها را در حالت‌های جامد، مایع و گاز توضیح دهد.
2. رابطه میان فاصله ذرات، حرکت ذرات و کثافت ماده را بیان کند.
3. ذوب، تبخیر و تصعید را به عنوان تغییرات فیزیکی و برگشت‌پذیر توضیح دهد.
4. فرق میان گرما، دما و انرژی حرارتی را به زبان علمی بیان کند.
5. انتقال گرما از راه هدایت، جابجایی و تشعشع را با مثال توضیح دهد.
6. ظرفیت گرمایی ویژه و گرمای نهان ویژه را تعریف و در محاسبات ساده استفاده کند.
7. رابطه فشار و دمای یک گاز را در حجم ثابت با حرکت ذرات توضیح دهد.
8. رفتار گاز ایده‌آل و کاربرد آن را در صنعت و سیستم‌های زنده بیان کند.
9. مفاهیم فشار، کشش، الاستیسیته، مدول یانگ، مدول برشی و مدول حجمی را درک کند.

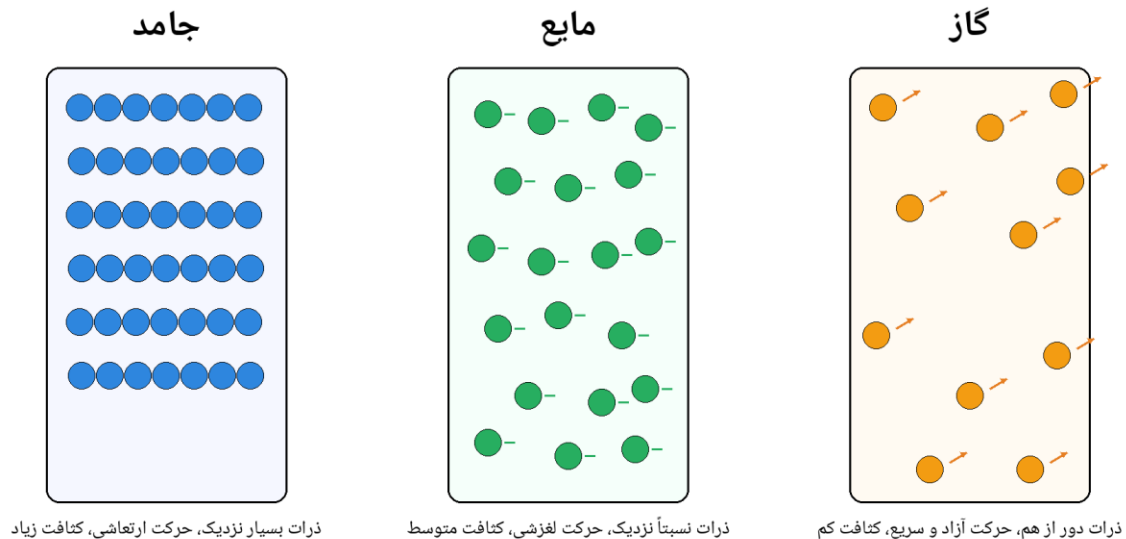
واژه‌های کلیدی

واژه	معنی کوتاه
سیال	ماده‌ای که می‌تواند جریان پیدا کند؛ مانند مایع و گاز.
کثافت	کتله در واحد حجم یک ماده.
ذوب	تبدیل جامد به مایع با گرفتن گرما.
تبخیر	تبدیل مایع به گاز، معمولاً از سطح مایع.
تصعید	تبدیل مستقیم جامد به گاز بدون عبور از حالت مایع.
گرما	انرژی در حال انتقال از جسم گرم‌تر به جسم سردتر.
دما	اندازه متوسط انرژی حرکتی ذرات ماده.
فشار	قوه واردشده بر واحد سطح مقطع.
کشش	نسبت تغییر طول به طول اصلی.
الاستیسیته	توانایی ماده برای برگشتن به شکل اصلی پس از برداشتن قوه.

بخش اول: درک خواص و کاربردهای سیالات

۱,۱ مدل‌های چیدمان و حرکت مولکول‌ها در فازهای جامد، مایع و گاز نسبت به کثافت

تمام مواد از ذرات بسیار کوچک مانند اتم‌ها، مولکول‌ها یا یون‌ها ساخته شده‌اند. حالت فیزیکی ماده به فاصله ذرات، نوع چیدمان، مقدار انرژی حرکتی ذرات و شدت قوه‌های جاذبه میان آن‌ها بستگی دارد. سه حالت معمول ماده عبارت‌اند از جامد، مایع و گاز. تفاوت میان این حالت‌ها را می‌توان با مدل ذره‌ای توضیح داد.



حالت جامد

در حالت جامد، ذرات بسیار نزدیک به هم قرار دارند و معمولاً در یک ترتیب منظم یا نسبتاً منظم چیده شده‌اند. قوه‌های جاذبه میان ذرات قوی است؛ بنابراین ذرات نمی‌توانند آزادانه حرکت کنند، بلکه در جای خود ارتعاش می‌کنند. به همین علت جامدات شکل و حجم ثابت دارند.

- شکل ثابت دارند.
 - حجم ثابت دارند.
 - ذرات آن‌ها بسیار نزدیک به هم قرار دارند.
 - قوه‌های جاذبه میان ذرات قوی است.
 - به آسانی فشرده نمی‌شوند.
 - در بیشتر موارد کثافت آن‌ها زیاد است.
- مثال: سنگ، آهن، یخ، چوب و شیشه نمونه‌هایی از جامدات هستند. در یک قطعه آهن، اتم‌ها در جایگاه‌های تقریباً ثابت قرار دارند و فقط ارتعاش می‌کنند.

حالت مایع

- در حالت مایع، ذرات هنوز نزدیک به هم‌اند، اما مانند جامد در جای ثابت قرار ندارند. ذرات مایع می‌توانند از کنار هم بلغزند و جای خود را تغییر دهند. به همین دلیل مایع شکل ظرف را می‌گیرد، اما حجم آن تقریباً ثابت می‌ماند.
- حجم تقریباً ثابت دارند.

- شکل ثابت ندارند و شکل ظرف را می گیرند.
 - ذرات آنها نزدیک اند اما می توانند حرکت نسبی داشته باشند.
 - جریان پیدا می کنند.
 - به سختی فشرده می شوند.
 - کثافت آنها معمولاً کمتر از جامدات و بیشتر از گازها است.
- مثال: آب، تیل، الکل و شیر از مایعات هستند. وقتی آب را در یک گیلان می ریزیم، شکل گیلان را می گیرد، اما مقدار آب تغییر نمی کند.

حالت گاز

- در حالت گاز، فاصله میان ذرات زیاد است و ذرات با سرعت زیاد و به صورت تصادفی در همه جهتها حرکت می کنند. قوه های جاذبه میان ذرات گاز بسیار ضعیف است. گاز نه شکل ثابت دارد و نه حجم ثابت؛ بلکه تمام فضای ظرف را پر می کند.
- شکل ثابت ندارند.
 - حجم ثابت ندارند.
 - تمام فضای ظرف را پر می کنند.
 - ذرات آنها از هم فاصله زیاد دارند.
 - به آسانی فشرده می شوند.
 - کثافت آنها بسیار کم است.
- مثال: هوا، اکسیجن، کربن دای اکساید، هایدروجن و بخار آب نمونه هایی از گازها هستند.

رابطه حالت ماده با کثافت

کثافت مقدار کتله در واحد حجم است. اگر مقدار زیادی کتله در حجم کم جا بگیرد، کثافت زیاد است. اگر ذرات از هم دور باشند و همان کتله فضای بیشتری را اشغال کند، کثافت کمتر می شود.



$$\rho = m / V$$

در این رابطه، ρ کثافت، m کتله و V حجم است. واحد کثافت در سیستم بین المللی kg/m^3 است، اما در بعضی مثالها از g/cm^3 نیز استفاده می شود.

حالت ماده	فاصله ذرات	حرکت ذرات	شکل	حجم	کثافت عمومی
جامد	بسیار نزدیک	ارتعاش در جای ثابت	ثابت	ثابت	زیاد
مایع	نزدیک	لغزش و حرکت نسبی	شکل ظرف	تقریباً ثابت	متوسط
گاز	بسیار دور	سریع و تصادفی	شکل ظرف	حجم ظرف	بسیار کم

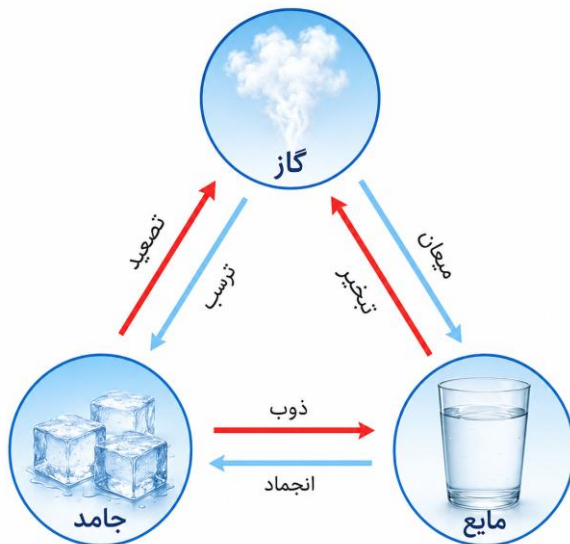
نکته مهم: در بیشتر موارد جامدات از مایعات چگال‌تر اند؛ اما یخ استثنا است. کثافت یخ کمتر از آب مایع است، بنابراین یخ روی آب شناور می‌ماند.

۱،۲ ذوب، تبخیر و تصعید به عنوان تغییرات برگشت‌پذیر

تغییر حالت ماده زمانی رخ می‌دهد که ماده انرژی حرارتی جذب کند یا از دست بدهد. در این تغییرات، نوع ماده تغییر نمی‌کند؛ فقط حالت فیزیکی آن عوض می‌شود. بنابراین بیشتر تغییرات حالت، تغییرات فیزیکی و برگشت‌پذیر هستند.

ذوب

ذوب فرایندی است که در آن یک ماده از حالت جامد به حالت مایع تبدیل می‌شود. وقتی یک جامد گرما جذب می‌کند، ذرات آن انرژی بیشتری به دست می‌آورند و ارتعاش آن‌ها شدیدتر می‌شود. اگر انرژی کافی فراهم شود، ذرات از جایگاه ثابت خود جدا می‌شوند و ماده به مایع تبدیل می‌گردد.



یخ → آب

در آن جامد به مایع تبدیل می‌شود، نقطه ذوب نام دارد. نقطه ذوب یخ در فشار عادی 0°C است. ذوب برگشت‌پذیر است، زیرا اگر آب گرما از دست بدهد دوباره به یخ تبدیل می‌شود. این فرایند انجماد نام دارد.

آب → یخ

تبخیر

تبخیر فرایندی است که در آن مایع به گاز تبدیل می‌شود. تبخیر می‌تواند در حرارت مختلف رخ دهد و بیشتر از سطح مایع انجام می‌شود. ذراتی که در سطح مایع انرژی کافی به دست می‌آورند، می‌توانند از قوه جاذبه سایر ذرات فرار کرده وارد هوا شوند.

آب → بخار آب

تبخیر با جوشیدن فرق دارد. تبخیر فقط از سطح مایع و در حرارت مختلف رخ می‌دهد، اما جوشیدن در سراسر مایع و در دمای معین یعنی نقطه جوش اتفاق می‌افتد. خشک شدن لباس تر در هوای آزاد نمونه‌ای از تبخیر است. تبخیر برگشت‌پذیر است؛ زیرا بخار آب با سرد شدن دوباره به مایع تبدیل می‌شود. این فرایند میعان نام دارد.

بخار آب → آب

تصعید

تصعید فرایندی است که در آن یک ماده مستقیماً از حالت جامد به گاز تبدیل می‌شود، بدون آن‌که از حالت مایع عبور کند. یخ خشک یا کاربن دای‌اکساید جامد نمونه مشهور تصعید است. نفتالین نیز به تدریج از جامد به بخار تبدیل می‌شود.

فزیک سطح دو
تصعید نیز برگشت پذیر است. اگر گاز انرژی از دست بدهد، می تواند مستقیماً به جامد تبدیل شود. این فرایند رسوب گذاری یا چگالش مستقیم نام دارد.

جامد → گاز

۱,۳ گرما، تغییر فاز، ظرفیت گرمایی ویژه و ظرفیت گرمایی نهان

وقتی به یک ماده گرما داده می شود، دو حالت ممکن است رخ دهد: یا دمای ماده افزایش می یابد، یا حالت فیزیکی ماده تغییر می کند. اگر ماده هنوز در یک حالت باقی بماند، انرژی باعث افزایش انرژی حرکتی ذرات و افزایش دما می شود. اما هنگام تغییر فاز، انرژی برای شکستن یا ضعیف کردن قوه های جاذبه میان ذرات مصرف می شود و دما ثابت می ماند.

ظرفیت گرمایی ویژه

ظرفیت گرمایی ویژه مقدار انرژی لازم است تا دمای ۱ kg از یک ماده به اندازه 1°C یا 1 K افزایش یابد. هرچه ظرفیت گرمایی ویژه یک ماده بیشتر باشد، برای گرم شدن به انرژی بیشتری نیاز دارد.

$$Q = mc\Delta T$$

در این رابطه، Q انرژی گرمایی بر حسب ژول، m کتله بر حسب کیلوگرام، c ظرفیت گرمایی ویژه و ΔT تغییر دما است. آب ظرفیت گرمایی ویژه زیادی دارد. به همین دلیل دیر گرم و دیر سرد می شود. این ویژگی در بدن انسان، آب و هوا و سیستم های خنک کننده اهمیت زیاد دارد.

مثال حل شده ۱: ظرفیت گرمایی ویژه

سوال: برای گرم کردن ۲ kg آب از 20°C به 60°C چه مقدار انرژی لازم است؟ ظرفیت گرمایی ویژه آب $4200\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ است.

$$m = 2\text{ kg} \quad c = 4200\text{ J/kg}^{\circ}\text{C} \quad \Delta T = 60 - 20 = 40^{\circ}\text{C}$$

$$Q = mc\Delta T = 2 \times 4200 \times 40 = 336000\text{ J}$$

پاسخ: برای گرم کردن این مقدار آب، ۳۳۶۰۰۰ ژول انرژی لازم است.

گرمای نهان ویژه

گرمای نهان ویژه مقدار انرژی لازم است تا ۱ kg از یک ماده بدون تغییر دما، حالت فیزیکی خود را تغییر دهد. در هنگام ذوب یا جوشیدن، دما تا پایان تغییر فاز ثابت می ماند؛ زیرا انرژی برای تغییر چیدمان ذرات و غلبه بر قوه های بین مولکولی مصرف می شود.

$$Q = mL$$

در این رابطه، Q انرژی لازم، m کتله و L گرمای نهان ویژه است.

نوع گرمای نهان	تغییر حالت	توضیح
گرمای نهان ذوب	جامد به مایع	انرژی لازم برای ذوب شدن ماده در نقطه ذوب بدون تغییر دما.
گرمای نهان تبخیر	مایع به گاز	انرژی لازم برای تبدیل مایع به گاز در نقطه جوش بدون تغییر دما.

گرمای نهان تبخیر معمولاً از گرمای نهان ذوب بیشتر است، زیرا برای تبدیل مایع به گاز باید قوه های جاذبه میان ذرات تقریباً به طور کامل شکسته شوند.

سوال: برای ذوب کردن ۰.۵ kg یخ در دمای °C ۰ چه مقدار انرژی لازم است؟ گرمای نهان ذوب یخ J/kg ۳۳۴۰۰۰ است.

$$m = 0.5 \text{ kg} \quad L = 334000 \text{ J/kg}$$

$$Q = mL = 0.5 \times 334000 = 167000 \text{ J}$$

پاسخ: برای ذوب کردن این یخ، ۱۶۷۰۰۰ ژول انرژی لازم است.

چرا مواد مختلف برای تغییر فاز انرژی متفاوت نیاز دارند؟

مواد مختلف ساختار مولکولی و قوه‌های جاذبه متفاوت دارند. اگر قوه‌های جاذبه میان ذرات قوی باشد، برای تغییر فاز انرژی بیشتری نیاز است. برای مثال، آب برای تبخیر شدن انرژی زیادی می‌خواهد، زیرا میان مولکول‌های آب پیوندهای هایدروژنی نسبتاً قوی وجود دارد. اما الکل زودتر تبخیر می‌شود، چون قوه‌های بین مولکولی آن ضعیف‌تر است.

بخش دوم: درک گرما، دما و انتقال انرژی حرارتی

۱، ۳ تفاوت بین گرما و دما

گرما و دما دو مفهوم مرتبط اما متفاوت هستند. دما نشان می‌دهد که ذرات یک ماده به طور متوسط چقدر انرژی حرکتی دارند، اما گرما انرژی‌ای است که به دلیل اختلاف دما از یک جسم به جسم دیگر منتقل می‌شود.

ویژگی	گرما	دما
تعریف	انرژی در حال انتقال به علت اختلاف دما	اندازه متوسط انرژی حرکتی ذرات
واحد	ژول J	درجه سلسیوس °C یا کلوین K
وابستگی به کتله	بله؛ جسم بزرگ‌تر می‌تواند گرمای بیشتری داشته باشد	به طور مستقیم نه؛ دما متوسط انرژی ذرات است
جهت انتقال	از جسم گرم‌تر به جسم سردتر منتقل می‌شود	انتقال نمی‌یابد؛ فقط اندازه‌گیری می‌شود

مثال: یک دیگ آب گرم و یک پیاله آب گرم ممکن است دمای یکسان داشته باشند، مثلاً هر دو ۸۰°C باشند. اما دیگ آب انرژی گرمایی بیشتری دارد، چون مقدار آب آن بیشتر است.

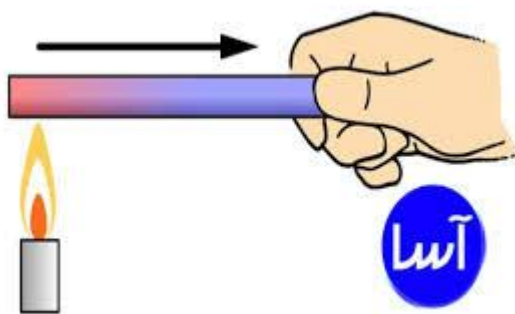
۳,۲ انتقال گرما از طریق هدایت، جابجایی و تشعشع

گرما به سه روش اصلی انتقال می‌یابد: هدایت، جابجایی و تشعشع. شناخت این سه روش در زندگی روزمره، ساختمان‌سازی، آشپزی، صنعت و سیستم‌های زنده اهمیت دارد.



هدایت

هدایت انتقال گرما از طریق تماس مستقیم ذرات است. این روش بیشتر در جامدات رخ می‌دهد، به ویژه در فلزات. وقتی یک سر میله فلزی گرم می‌شود، ذرات آن قسمت سریع‌تر ارتعاش می‌کنند و این ارتعاش به ذرات کناری منتقل می‌شود. در فلزات، الکترون‌های آزاد نیز به انتقال گرما کمک می‌کنند؛ به همین دلیل فلزات رسانای خوب گرما هستند.

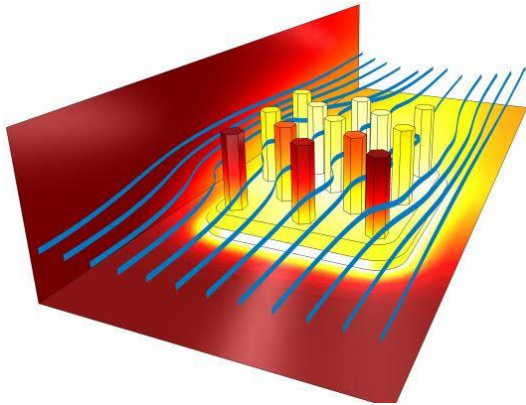


- گرم شدن قاشق فلزی در چای داغ.
- گرم شدن دسته قابلمه فلزی.
- انتقال گرما از اتو به لباس.

مس، آهن و آلومینیوم رسانای خوب گرما هستند. چوب، پلاستیک، هوا و پشم عایق گرما اند و گرما را به کندی انتقال می‌دهند.

جابجایی

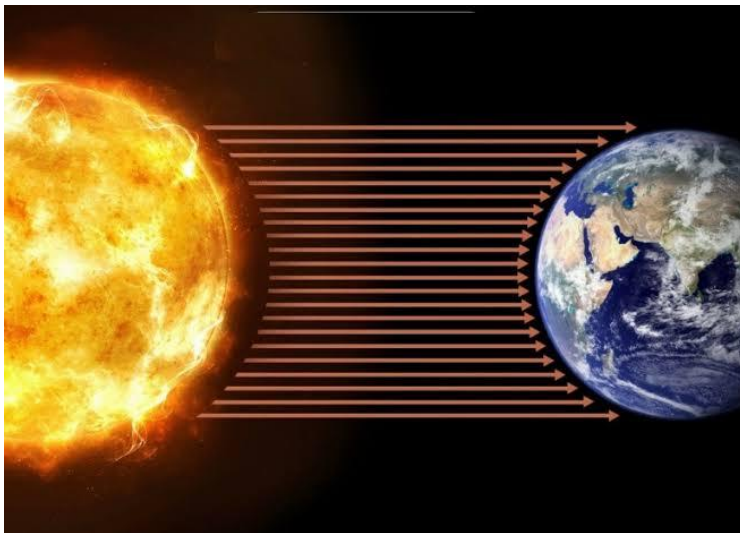
جابجایی انتقال گرما از طریق حرکت مایع یا گاز است. وقتی یک بخش از سیال گرم می‌شود، ذرات آن سریع‌تر حرکت می‌کنند و فاصله میان آن‌ها بیشتر می‌شود. در نتیجه کثافت آن بخش کم شده و به طرف بالا حرکت می‌کند. بخش سردتر که کثافت بیشتر دارد پایین می‌آید. این حرکت دایره‌ای جریان جابجایی نام دارد.



- گرم شدن آب در دیگ.
- گردش هوای گرم و سرد در اتاق.
- بادهای ساحلی.
- حرکت هوای گرم از بخاری به سمت بالا.

تشعشع

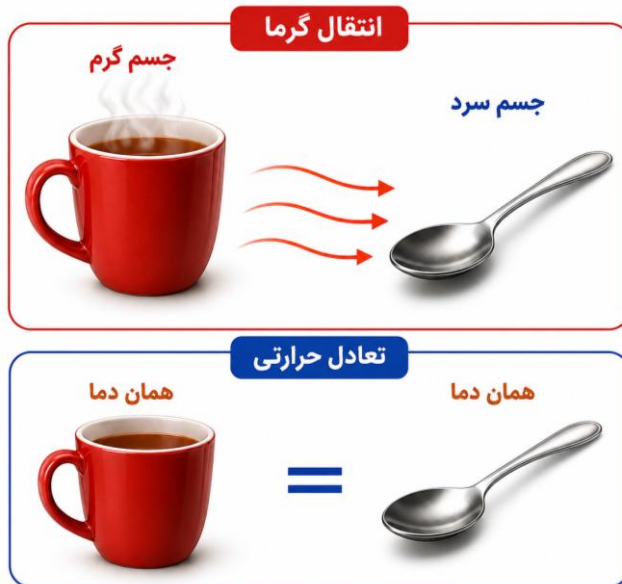
تشعشع انتقال انرژی حرارتی به وسیله امواج الکترومغناطیسی است. تشعشع برای انتقال گرما به ماده یا محیط نیاز ندارد. به همین دلیل گرمای خورشید از فضای خالی به زمین می‌رسد. همه اجسام تشعشع حرارتی دارند، اما اجسام داغ‌تر تشعشع بیشتری منتشر می‌کنند.



- رسیدن گرمای خورشید به زمین.
- احساس گرما از آتش بدون تماس مستقیم.
- گرم شدن بدن در برابر بخاری برقی.

نکته: سطح‌های تیره و مات تشعشع را بهتر جذب و منتشر می‌کنند، اما سطح‌های روشن و براق تشعشع را بیشتر بازتاب می‌دهند.

۳,۳ انتقال گرما و تعادل حرارتی



وقتی دو جسم با حرارت متفاوت با هم تماس پیدا می کنند، گرما از جسم گرم تر به جسم سردتر منتقل می شود. این انتقال ادامه می یابد تا دمای هر دو جسم برابر شود. این حالت تعادل حرارتی نام دارد.

مثال: اگر یک قاشق سرد را داخل چای داغ بگذاریم، گرما از چای به قاشق منتقل می شود. قاشق گرم تر و چای کمی سردتر می شود. پس از مدتی، قاشق و چای به دمای مشترک می رسند. در تعادل حرارتی انتقال خالص گرما متوقف می شود، زیرا اختلاف دما وجود ندارد.

۳,۴ رابطه فشار و دمای گاز در حجم ثابت

در یک گاز، ذرات با سرعت زیاد و به صورت تصادفی حرکت می کنند و با دیواره ظرف برخورد می نمایند. این برخوردها باعث ایجاد فشار می شوند. اگر حجم گاز ثابت باشد و دما افزایش یابد، انرژی حرکتی ذرات بیشتر می شود. ذرات سریع تر حرکت می کنند و با شدت و تعداد بیشتر به دیواره ظرف برخورد می کنند؛ بنابراین فشار گاز افزایش می یابد.

$$P / T = \text{ثابت}$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

نکته محاسباتی: در قوانین گازها دما باید بر حسب کلوین باشد. برای تبدیل درجه سلسیوس به کلوین از رابطه $T(K) = T(^{\circ}C) + 273$ استفاده می کنیم.

مثال حل شده ۳: فشار و دما در حجم ثابت

سوال: فشار گازی در حجم ثابت در دمای $27^{\circ}C$ برابر 100 kPa است. اگر دما به $87^{\circ}C$ برسد، فشار جدید چقدر می شود؟

$$T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ K} \quad T_2 = 87 + 273 = 360 \text{ K}$$

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2$$

$$100 / 300 = P_2 / 360$$

$$P_2 = (100 \times 360) / 300 = 120 \text{ kPa}$$

پاسخ: فشار جدید 120 kPa است.

۳,۵ رفتار گازهای ایده‌آل و نقش آن‌ها در صنعت و سیستم‌های زنده

گاز ایده‌آل یک مدل ساده‌شده از رفتار گازها است. این مدل به دانشمندان کمک می‌کند تا رابطه میان فشار، حجم، دما و مقدار گاز را با فرمول‌های ساده‌تر بررسی کنند. هیچ گازی در واقعیت کاملاً ایده‌آل نیست، اما بسیاری از گازها در فشار کم و دمای بالا تقریباً مانند گاز ایده‌آل رفتار می‌کنند.

فرضیه‌های مدل گاز ایده‌آل

- ذرات گاز حجم بسیار ناچیز دارند.
- میان ذرات گاز قوه جاذبه یا دافعه در نظر گرفته نمی‌شود.
- برخورد ذرات با هم و با دیواره ظرف کاملاً الاستیک است.
- ذرات گاز پیوسته و تصادفی حرکت می‌کنند.
- انرژی حرکتی متوسط ذرات با دمای مطلق رابطه مستقیم دارد.

$$PV = nRT$$

در این رابطه، P فشار، V حجم، n تعداد مول‌های گاز، R ثابت عمومی گازها و T دمای مطلق بر حسب کلوین است.

کاربردهای صنعتی گازها

کاربرد	توضیح علمی
کمپرسورها	با فشرده شدن گاز، حجم کم و فشار زیاد می‌شود. این اصل در یخچال‌ها، ایرکندیشن‌ها و سیستم‌های هوای فشرده استفاده می‌شود.
انجن موتور	در انجن، مخلوط هوا و تیل فشرده و مشتعل می‌شود. افزایش دما و فشار گاز باعث حرکت پیستون می‌گردد.
سیلندرهای گاز	شناخت رابطه فشار، حجم و دما برای نگهداری ایمن اکسیجن، نایتروجن و گازهای دیگر ضروری است.
بالون هوایی	گرم شدن هوای داخل بالون باعث کاهش کثافت هوا می‌شود و بالون بالا می‌رود.

نقش گازها در سیستم‌های زنده

گازها در بدن موجودات زنده نقش حیاتی دارند. انسان و حیوانات اکسیجن را وارد بدن می‌کنند و کاربن دای اکساید را خارج می‌سازند. این تبادل گازها در شش‌ها و به ویژه در کیسه‌های هوایی یا الوئول‌ها انجام می‌شود.

هنگام دم، حجم قفسه سینه افزایش می‌یابد و فشار داخل شش‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین هوا وارد شش‌ها می‌شود. هنگام بازدم، حجم قفسه سینه کاهش یافته و فشار داخل شش‌ها افزایش می‌یابد؛ بنابراین هوا خارج می‌شود. اکسیجن توسط هموگلوبین در خون انتقال می‌یابد و کاربن دای اکساید از بافت‌ها به شش‌ها منتقل می‌شود تا از بدن خارج گردد.

بخش سوم: خواص مکانیکی مواد تحت فشار

۳,۱ الاستیسیته، فشار و تغییر طول و سطح مقطع

وقتی بر یک جسم قوه وارد می‌شود، ممکن است شکل یا اندازه آن تغییر کند. این تغییر می‌تواند موقتی باشد، یعنی جسم پس از برداشتن قوه به شکل اول برگردد؛ یا دایمی باشد، یعنی جسم دیگر به حالت اول برنگردد.

الاستیسیته خاصیتی است که باعث می‌شود یک ماده پس از برداشتن قوه، به شکل و اندازه اصلی خود برگردد. فنر و نوار لاستیکی مثال‌های ساده از مواد الاستیک هستند. البته اگر قوه بسیار بزرگ باشد، ماده ممکن است از حد الاستیک عبور کند و دچار تغییر شکل دائمی شود.

فشار

فشار مقدار قوه وارد شده بر واحد سطح مقطع است. اگر همان قوه بر سطح کوچک‌تر وارد شود، فشار بیشتر خواهد بود. به همین دلیل یک میخ نوک‌تیز با قوه کم هم می‌تواند وارد چوب شود، چون سطح تماس بسیار کوچک است.

$$\sigma = F / A$$

در این رابطه، σ فشار، F قوه وارد شده و A سطح مقطع است. واحد فشار پاسکال Pa یا N/m^2 است.

کشش

کشش نسبت تغییر طول به طول اصلی است. کشش نشان می‌دهد که جسم نسبت به طول اولیه خود چه مقدار تغییر طول داده است. چون کشش نسبت دو طول است، واحد ندارد.

$$\epsilon = \Delta L / L$$

در این رابطه، ϵ کشش، ΔL تغییر طول و L طول اصلی جسم است.

تغییر طول و سطح مقطع تحت فشار

وقتی جسم کشیده می‌شود، طول آن افزایش می‌یابد و سطح مقطع آن معمولاً کمی کاهش پیدا می‌کند. وقتی جسم فشرده می‌شود، طول آن کاهش می‌یابد و سطح مقطع آن ممکن است افزایش یابد. مقدار این تغییرات به نوع ماده، شکل جسم و مقدار قوه بستگی دارد.

قانون هوک، حد تناسب و حد الاستیک

تا یک مقدار مشخص، تغییر طول یک فنر یا سیم با قوه وارد شده نسبت مستقیم دارد. یعنی اگر قوه دو برابر شود، تغییر طول نیز تقریباً دو برابر می‌شود. این رابطه قانون هوک نام دارد.

$$F = kx$$

در این رابطه، F قوه، k ثابت فنر و x تغییر طول است. محدوده‌ای که در آن قوه و تغییر طول نسبت مستقیم دارند، محدوده تناسب نامیده می‌شود. حد الاستیک بیشترین قوه یا فشاری است که ماده هنوز می‌تواند پس از برداشتن قوه به حالت اصلی خود برگردد.

مدول یانگ

مدول یانگ نسبت فشار کششی به کشش کششی است و نشان می‌دهد که ماده در برابر تغییر طول چقدر مقاوم است. ماده‌ای با مدول یانگ زیاد سخت‌تر است و برای تغییر طول آن قوه بیشتری لازم است؛ مانند فولاد. ماده‌ای با مدول یانگ کم آسان‌تر کشیده می‌شود؛ مانند لاستیک.

$$E = \text{Stress} / \text{Strain} = \sigma / \epsilon$$

مثال حل شده ۴: فشار

سوال: قوه ۲۰۰ N بر سیمی با سطح مقطع $1 \times 10^{-4} m^2$ وارد می‌شود. فشار وارد شده چقدر است؟

$$\sigma = F / A = 200 / 0.0001 = 2000000 \text{ Pa}$$

پاسخ: فشار برابر $2.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ است.

مثال حل شده ۵: کشش

سوال: طول اصلی یک سیم ۲ m است. پس از کشیده شدن، طول آن ۲.۰۱ m می‌شود. کشش چقدر است؟

$$\Delta L = 2.01 - 2 = 0.01 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \Delta L / L = 0.01 / 2 = 0.005$$

پاسخ: کشش ۰.۰۰۵ است.

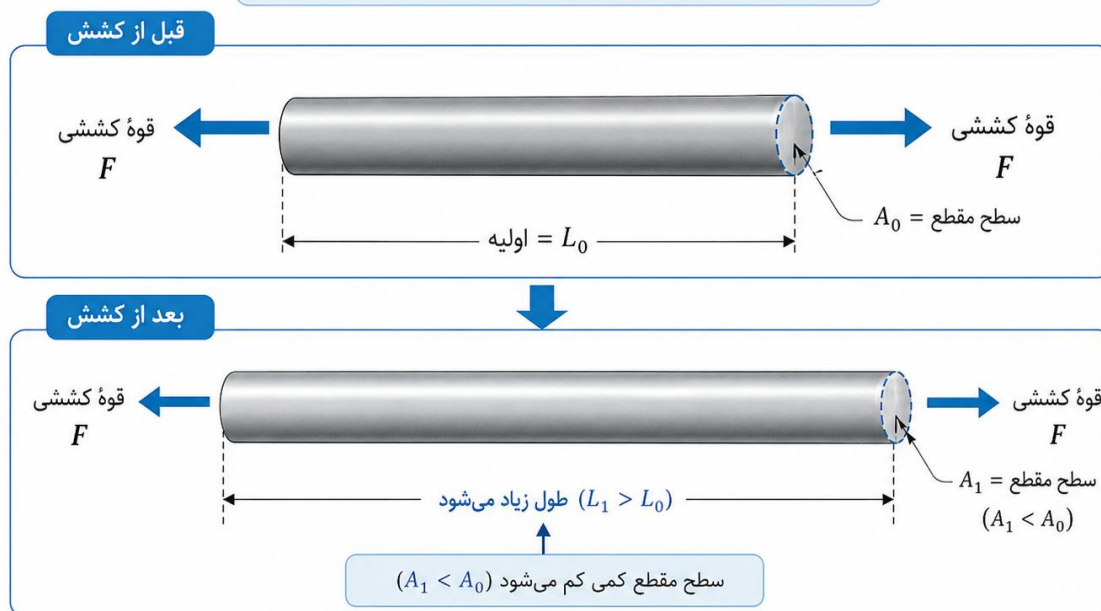
۳،۲ پاسخ مواد به کشش، فشردگی و تغییر شکل؛ مدول برشی و مدول حجمی

مواد در برابر قوه‌های مختلف به شکل‌های متفاوت پاسخ می‌دهند. سه نوع مهم تغییر شکل عبارت‌اند از کشش، فشردگی و برش.

کشش

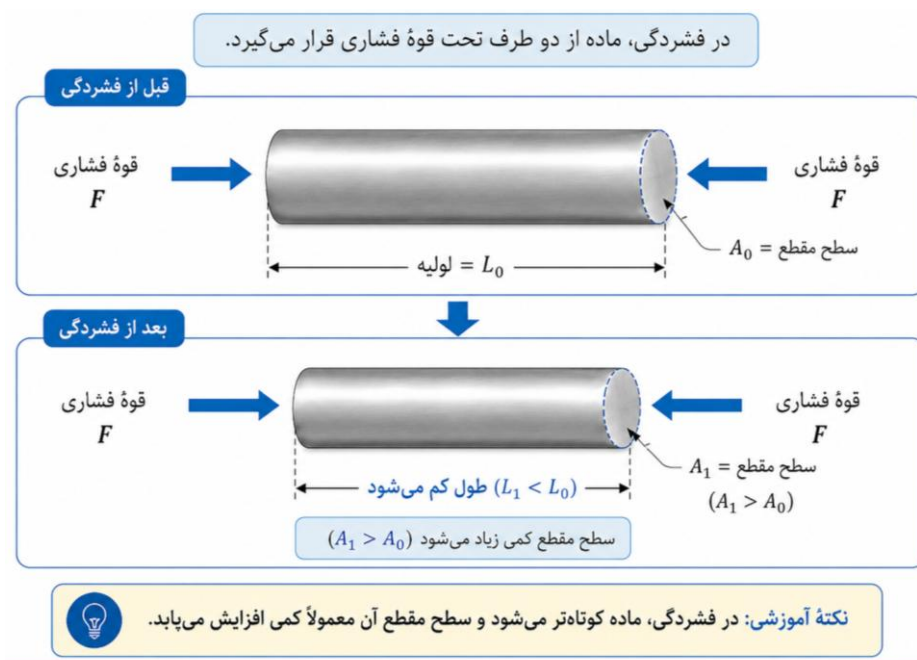
کشش زمانی رخ می‌دهد که دو قوه در جهت‌های مخالف، جسم را از دو طرف بکشند. در این حالت طول جسم افزایش می‌یابد. کشیده شدن فنر، سیم یا نوار لاستیکی نمونه‌های ساده کشش هستند. اگر قوه از حد الاستیک کمتر باشد، جسم پس از برداشتن قوه به حالت اول برمی‌گردد. اگر قوه بیشتر از حد الاستیک باشد، تغییر شکل دائمی یا پاریگی رخ می‌دهد.

در کشش، ماده از دو طرف به بیرون کشیده می‌شود.



نکته آموزشی: اگر قوه در حد کشسان باشد، ماده پس از برداشتن قوه به حالت اول برمی‌گردد.

فشردگی زمانی رخ می‌دهد که قوه‌ها جسم را از دو طرف به سمت داخل فشار دهند. در این حالت طول جسم کاهش می‌یابد. فشرده شدن اسفنج، فنر یا ستون زیر وزن ساختمان نمونه‌های فشردگی هستند. بتن در برابر فشردگی مقاوم است، اما در برابر کشش ضعیف‌تر می‌باشد.

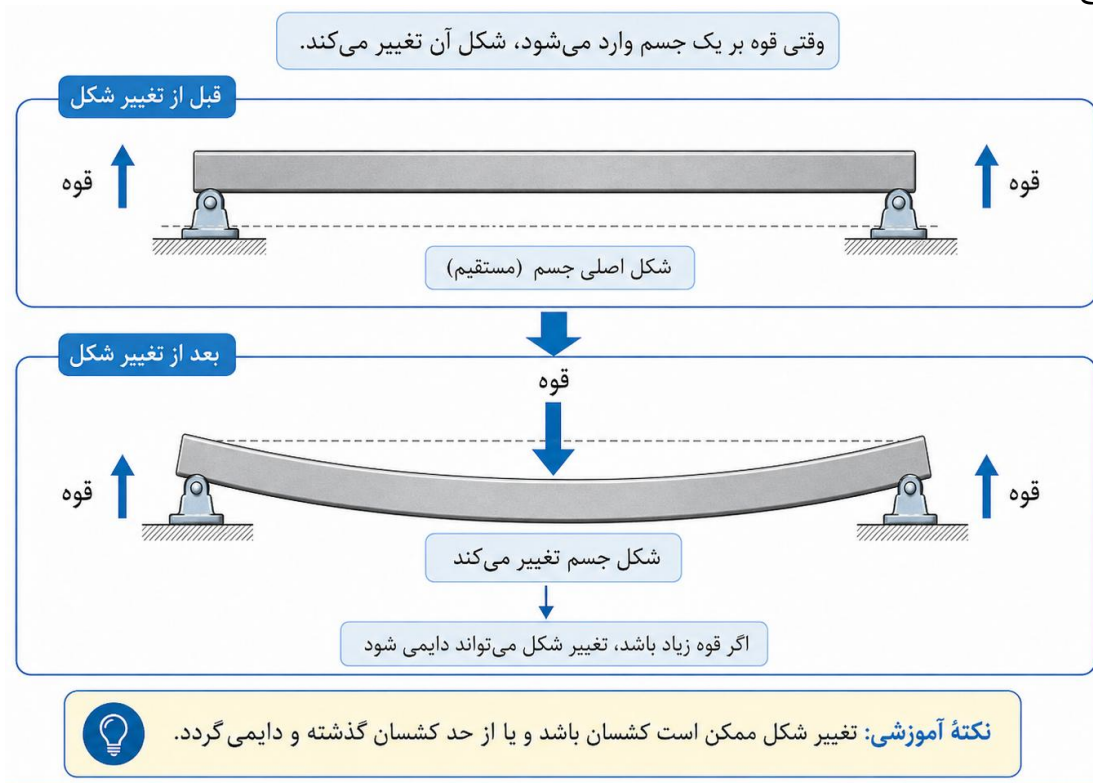


تغییر شکل موقتی و دائمی

نوع تغییر شکل	توضیح	مثال
تغییر شکل الاستیک	جسم پس از برداشتن قوه به حالت اول برمی‌گردد.	فنری که کمی کشیده شده است.
تغییر شکل پلاستیک	جسم پس از برداشتن قوه به حالت اول برنمی‌گردد.	سیم‌ای که بیش از حد کشیده شده است.

برش

برش زمانی رخ می‌دهد که دو قوه موازی اما در جهت‌های مخالف بر دو سطح جسم وارد شوند. این قوه‌ها باعث می‌شوند لایه‌های ماده نسبت به هم بلغزند. بریدن کاغذ با قیچی و تغییر شکل یک کتاب وقتی جلد بالایی آن را به یک طرف فشار دهیم، نمونه‌هایی از برش هستند.



$$\text{Shear Stress} = F / A$$

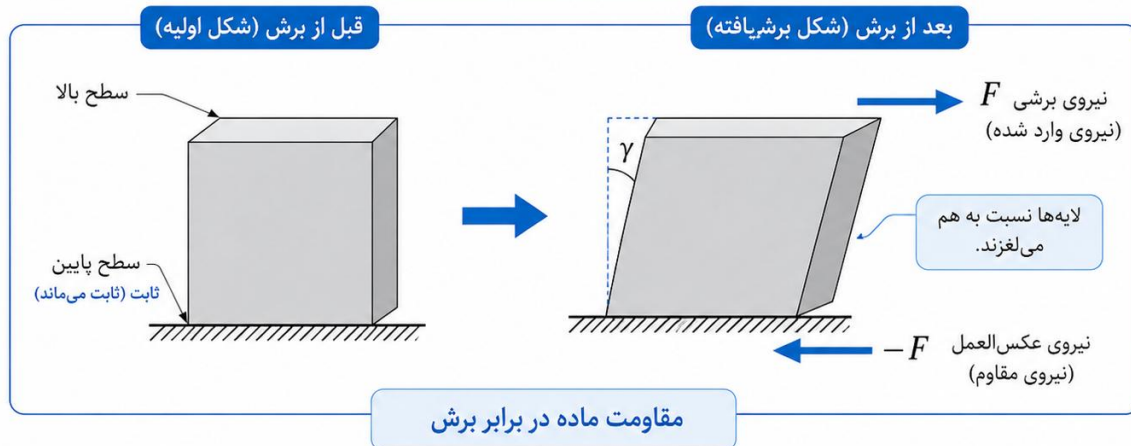
$$\text{Shear Strain} = x / h$$

در کشیش برشی، x جابه‌جایی جانبی و h ارتفاع جسم است.

مدول برشی

مدول برشی نسبت فشار برشی به کشیش برشی است و نشان می‌دهد که ماده در برابر تغییر شکل برشی چقدر مقاومت دارد. فلزات معمولاً مدول برشی بالایی دارند، اما ژل‌ها و مواد نرم مدول برشی پایینی دارند.

وقتی به سطح بالای یک جسم نیرو وارد شود و سطح پایینی ثابت بماند، لایه‌های ماده نسبت به هم می‌لغزند و جسم دچار برش می‌شود.



مدول برشی: $G = \frac{\text{تنش برشی}}{\text{کرنش برشی}}$

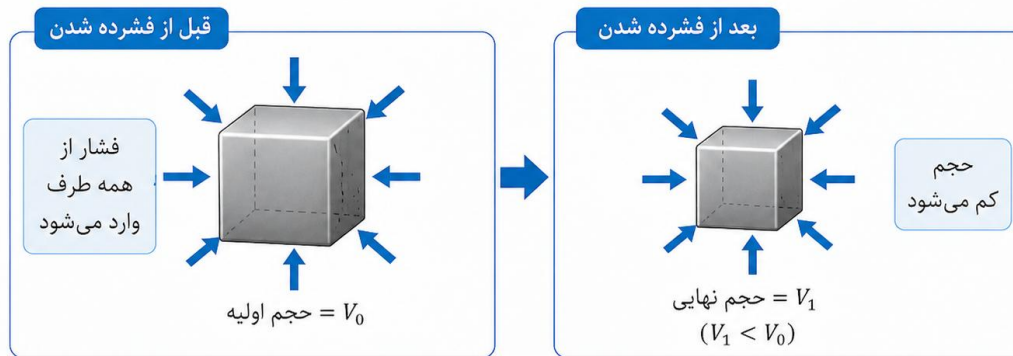
تنش برشی = $\frac{F}{A}$ | کرنش برشی = γ (زاویه برش بر حسب رادیان)



نکته آموزشی: هرچه G بزرگ‌تر باشد، ماده در برابر برش مقاومت بیشتری دارد.

$$G = \text{Shear Stress} / \text{Shear Strain}$$

مدول حجمی، مقاومت ماده در برابر کاهش حجم می‌باشد.



مدول حجمی: مقاومت ماده در برابر کاهش حجم

$K = - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$

ΔP : تغییر در فشار (افزایش فشار)
 ΔV : تغییر در حجم (کاهش حجم)
 V : حجم اولیه

مدول حجمی:



نکته آموزشی: هرچه K بزرگ‌تر باشد، ماده در برابر فشرده شدن حجمی مقاومت بیشتری دارد.

مدول حجمی

مدول حجمی نشان می‌دهد که یک ماده در برابر تغییر حجم تحت فشار چقدر مقاومت می‌کند. وقتی فشار از همه طرف بر جسم یا مایع وارد شود، حجم آن ممکن است کاهش یابد. نسبت فشار وارد شده به تغییر نسبی حجم، مدول حجمی نام دارد.

$$K = \Delta P / (\Delta V / V)$$

اگر مدول حجمی زیاد باشد، ماده به سختی فشرده می‌شود. اگر مدول حجمی کم باشد، ماده آسان‌تر فشرده می‌شود. آب مدول حجمی نسبتاً زیاد دارد و به سختی فشرده می‌شود، اما گازها به آسانی فشرده می‌شوند.

نوع مدول	مربوط به کدام تغییر شکل است؟	فرمول ساده	مفهوم
مدول یانگ	کشش یا فشردگی طولی	$E = \text{Stress} / \text{Strain}$	مقاومت در برابر تغییر طول
مدول برشی	تغییر شکل برشی	$G = \text{Shear Stress} / \text{Shear Strain}$	مقاومت در برابر لغزش لایه‌ها
مدول حجمی	تغییر حجم	$K = \Delta P / (\Delta V / V)$	مقاومت در برابر فشرده شدن حجمی

فعالیت ۱: مشاهده حالت‌های ماده

هدف: مشاهده ذوب، تبخیر و میعان به عنوان تغییرات برگشت‌پذیر.

در این فعالیت، یخ را گرم می‌کنیم تا ذوب شود، سپس آب را بیشتر گرم می‌کنیم تا بخار شود. بخار آب را به سطح سرد نزدیک می‌کنیم تا دوباره به آب تبدیل شود.

مواد لازم



مراحل انجام فعالیت



تغییرات حالت ماده (برگشت‌پذیر)



نتیجه

یخ با گرفتن گرما به آب تبدیل می‌شود، آب با گرفتن گرمای بیشتر به بخار تبدیل می‌شود و بخار با از دست دادن گرما دوباره به آب تبدیل می‌گردد. بنابراین، این تغییرات فیزیکی و برگشت‌پذیر هستند.

مدل ذرات در حالت‌های مختلف ماده



نکته

در تغییر حالت‌های فیزیکی ترکیب شیمیایی ماده تغییر نمی‌کند، فقط حالت فیزیکی آن تغییر می‌یابد.

پرسش‌ها و فعالیت‌ها

سطح متوسط

1. یخ به جرم 100 g در دمای 0°C ذوب می‌شود. اگر گرمای نهان ذوب یخ 334 kJ/kg باشد، مقدار گرمای لازم برای ذوب این یخ چقدر است؟
2. 200 g آب در دمای 20°C وجود دارد. اگر به آن 10.0 kJ گرما داده شود و ظرفیت گرمایی ویژه آب 4.18 kJ/g°C باشد، تغییر دمای آب را حساب کنید.
3. در کدام حالت‌ها (ذوب، تبخیر یا میعان) دمای ماده تغییر نمی‌کند؟ چرا؟

سطح سخت

1. 500 g آب در دمای 100°C به بخار تبدیل می‌شود. اگر گرمای نهان تبخیر آب 2260 kJ/kg باشد، مقدار گرمای لازم برای این تغییر حالت چقدر است؟
2. اگر 2.0 kg یخ در دمای -10°C باشد و بخواهیم آن را به بخار در دمای 100°C تبدیل کنیم، مقدار کل انرژی لازم را حساب کنید. (ظرفیت گرمایی ویژه یخ = 2.1 kJ/kg°C، گرمای نهان ذوب = 334 kJ/kg، ظرفیت گرمایی ویژه آب = 4.18 kJ/kg°C، گرمای نهان تبخیر = 2260 kJ/kg)

تفکر

در زندگی روزمره، سه مثال از حضور تغییرات برگشت‌پذیر حالت ماده را بنویسید و توضیح دهید.



فعالیت ۲: هدایت گرما در فلز

(1) هدف:



مقایسه رسانایی گرمایی فلز و چوب یا پلاستیک.

(2) مواد لازم:



• ظرف

• آب داغ

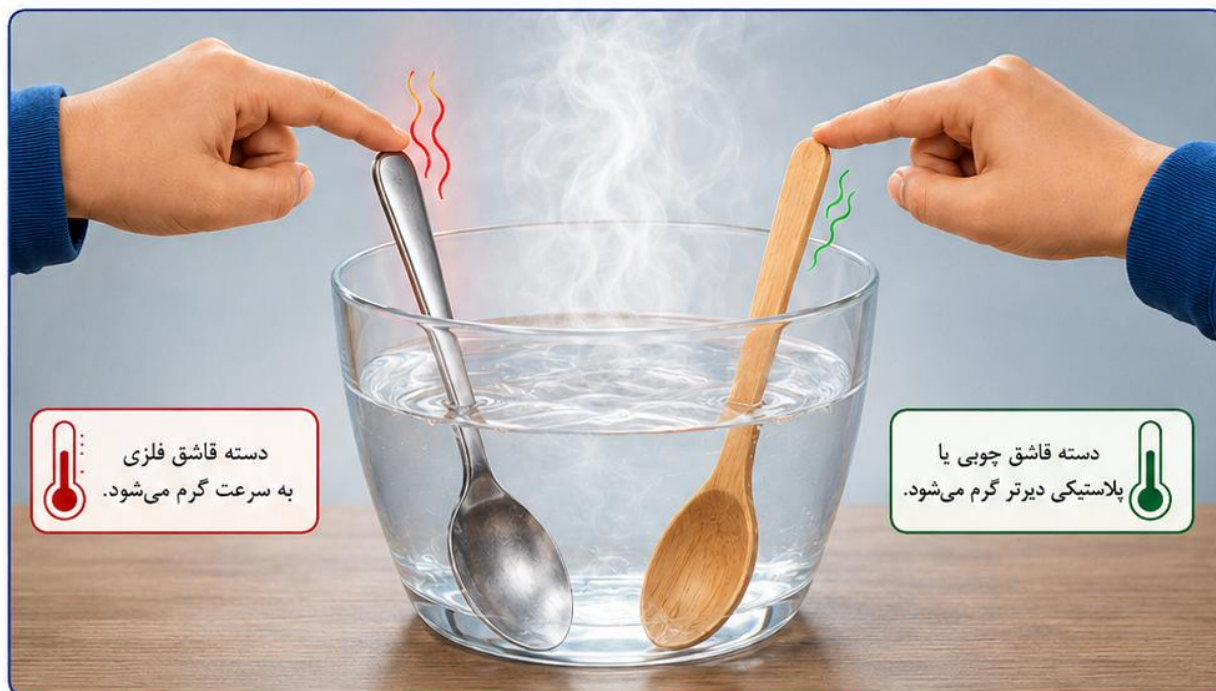
• قاشق چوبی یا پلاستیکی

• قاشق فلزی

(3) مراحل کار:



- قاشق فلزی و قاشق چوبی را در آب داغ قرار دهید.
- پس از چند دقیقه، دسته هر دو قاشق را با احتیاط لمس کنید.
- تفاوت گرمی دسته‌ها را مقایسه کنید.



دسته قاشق فلزی
به سرعت گرم می‌شود.



دسته قاشق چوبی یا
پلاستیکی دیرتر گرم می‌شود.

(4) نتیجه:



قاشق فلزی گرما را بهتر انتقال می‌دهد، زیرا فلز رسانای خوب گرما است.
چوب یا پلاستیک گرما را به کندی انتقال می‌دهد و عایق است.

فعالیت ۳: بررسی کشش فنر

(1) هدف:



مشاهده رابطه میان قوه و تغییر طول در محدوده الاستیک.

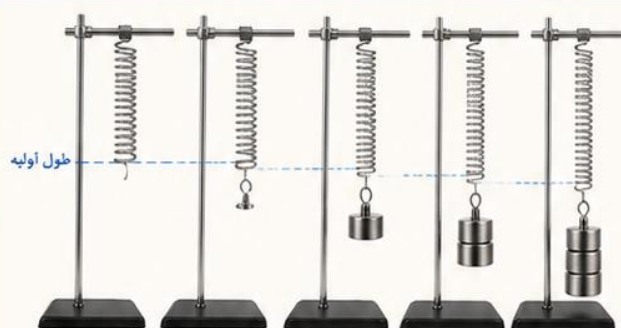
(2) مواد لازم:



- فنر
- وزنه‌های کوچک
- خط‌کش
- پایه



(3) مراحل کار:

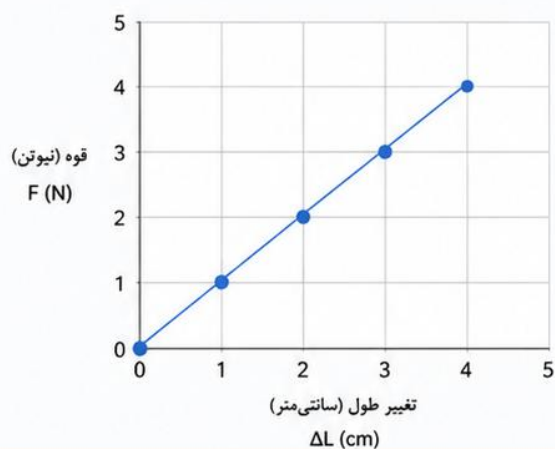


- طول اولیه فنر را اندازه بگیرید.
- یک وزنه به فنر آویزان کنید و طول جدید را اندازه بگیرید.
- وزنه‌های بیشتر اضافه کنید و تغییر طول را ثبت نمایید.
- نمودار قوه در برابر تغییر طول را رسم کنید.

جدول ثبت داده‌ها (نمونه):

تغییر طول (سانتی‌متر) ΔL (cm)	طول فنر (سانتی‌متر) L (cm)	قوه (نیوتن) F (N)
0.0	10.0	0
1.0	11.0	1.0
2.0	12.0	2.0
3.0	13.0	3.0
4.0	14.0	4.0

نمودار قوه در برابر تغییر طول (نمونه):



(4) نتیجه:



در محدوده الاستیک، افزایش قوه باعث افزایش متناسب تغییر طول می‌شود.
این رفتار مطابق قانون هوک است.



سوال 1: چرا گازها به آسانی فشرده می‌شوند؟

پاسخ: چون ذرات گاز از هم فاصله زیاد دارند و فضای خالی زیادی میان آنها وجود دارد. با وارد کردن فشار، این فاصله‌ها کم می‌شود.

سوال 2: چرا جامدات شکل ثابت دارند؟

پاسخ: چون ذرات جامد نزدیک به هم و در موقعیت‌های تقریباً ثابت قرار دارند. قوه‌های جاذبه میان ذرات قوی است و ذرات فقط در جای خود ارتعاش می‌کنند.

سوال 3: تفاوت تبخیر و جوشیدن چیست؟

پاسخ: تبخیر از سطح مایع و در حرارت مختلف رخ می‌دهد، اما جوشیدن در سراسر مایع و در دمای معین یعنی نقطه جوش اتفاق می‌افتد.

سوال 4: چرا دمای ماده هنگام ذوب ثابت می‌ماند؟

پاسخ: چون انرژی داده‌شده برای افزایش دما استفاده نمی‌شود، بلکه برای شکستن یا ضعیف کردن قوه‌های جاذبه میان ذرات مصرف می‌شود.

سوال 5: چرا فشار گاز با افزایش دما در حجم ثابت زیاد می‌شود؟

پاسخ: با افزایش دما، ذرات گاز انرژی حرکتی بیشتری پیدا می‌کنند، سریع‌تر حرکت می‌کنند و با شدت بیشتر به دیواره ظرف برخورد می‌کنند؛ بنابراین فشار افزایش می‌یابد.

سوال 6: تفاوت فشار و کشش چیست؟

پاسخ: فشار مقدار قوه واردشده بر واحد سطح است، اما کشش نسبت تغییر طول به طول اصلی است.

سوال 7: مدول یانگ چه چیزی را نشان می‌دهد؟

پاسخ: مدول یانگ نشان می‌دهد که یک ماده در برابر تغییر طول در اثر کشش یا فشردگی چقدر مقاومت دارد.

سوال 8: چرا آب در سیستم‌های خنک‌کننده استفاده می‌شود؟

پاسخ: چون ظرفیت گرمایی ویژه آب زیاد است و می‌تواند مقدار زیادی انرژی گرمایی جذب کند بدون اینکه دمای آن بسیار سریع بالا برود.

سوالات محاسباتی با حل

سوال ۱: برای گرم کردن ۳ kg آب از ۲۵°C به ۷۵°C، اگر ظرفیت گرمایی ویژه آب $4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ باشد، چه مقدار انرژی لازم است؟

$$\Delta T = 75 - 25 = 50^\circ\text{C}$$

$$Q = mc\Delta T = 3 \times 4200 \times 50 = 630000 \text{ J}$$

پاسخ: ۶۳۰۰۰۰ ژول انرژی لازم است.

سوال ۲: یک سیم با طول اصلی ۴ m پس از کشش به ۴.۰۲ m می‌رسد. کشش را حساب کنید.

$$\Delta L = 4.02 - 4 = 0.02 \text{ m}$$

$$\epsilon = \Delta L / L = 0.02 / 4 = 0.005$$

سوال ۳: فشار یک گاز در حجم ثابت در دمای 300 K برابر 90 kPa است. اگر دما به 450 K برسد، فشار جدید چند kPa می‌شود؟

$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2$$

$$90 / 300 = P_2 / 450$$

$$P_2 = (90 \times 450) / 300 = 135\text{ kPa}$$

پاسخ: فشار جدید 135 kPa است.

خلاصه فصل

مواد از ذرات کوچک ساخته شده‌اند. در جامدات، ذرات نزدیک و نسبتاً منظم‌اند و فقط ارتعاش می‌کنند. در مایعات، ذرات نزدیک‌اند اما می‌توانند روی هم بلغزند. در گازها، ذرات دور از هم‌اند و حرکت سریع و تصادفی دارند. این تفاوت‌ها باعث تفاوت در شکل، حجم و کثافت مواد می‌شود. تغییرات فاز مانند ذوب، تبخیر و تصعید تغییرات فیزیکی و برگشت‌پذیر هستند. برای گرم کردن ماده از رابطه $Q = mc\Delta T$ و برای تغییر فاز از رابطه $Q = mL$ استفاده می‌شود. گرما انرژی در حال انتقال است، اما دما اندازه متوسط انرژی حرکتی ذرات است. گرما از راه هدایت، جابجایی و تشعشع انتقال می‌یابد و انتقال گرما تا رسیدن به تعادل حرارتی ادامه دارد. در گازها، افزایش دما در حجم ثابت باعث افزایش انرژی حرکتی ذرات و افزایش فشار می‌شود. مدل گاز ایده‌آل برای توضیح رفتار گازها در صنعت و سیستم‌های زنده کاربرد دارد. در مواد جامد، قوه می‌تواند باعث کشش، فشردگی یا برش شود. فشار، کشیش، مدول یانگ، مدول برشی و مدول حجمی مفاهیمی هستند که برای بررسی مقاومت مواد در برابر تغییر شکل استفاده می‌شوند.

منابع

- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals & applications* (6th ed.). McGraw Hill.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2021). *Fundamentals of physics* (12th ed.). Wiley.
- Hibbeler, R. C. (2018). *Mechanics of materials* (10th ed.). Pearson.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W., Jr. (2018). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (10th ed.). Cengage Learning.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2019). *University physics with modern physics* (15th ed.). Pearson.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615. doi:10.1016/j.enconman.2003.09.015
- Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583. doi:10.1557/JMR.1992.1564
- Peng, D.-Y., & Robinson, D. B. (1976). A new two-constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15(1), 59–64. doi:10.1021/i160057a011
- Pop, E., Varshney, V., & Roy, A. K. (2012). Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *MRS Bulletin*, 37(12), 1273–1281. doi:10.1557/mrs.2012.203

فصل پنجم

درک ارتعاشات و امواج

اهداف یادگیری

- مفاهیم نوسان، موج، دامنه، طول موج، فرکانس، دوره تناوب و سرعت موج را توضیح دهد.
- رابطه سرعت موج، فرکانس و طول موج را در مثال‌های محاسباتی به کار ببرد.
- امواج عرضی و طولی را مقایسه کند و برای هر کدام مثال بزند.
- طیف امواج الکترومغناطیسی و کاربردهای مهم هر بخش را بشناسد.
- رفتارهای بازتاب، جذب و شکست را با مثال‌های روزمره توضیح دهد.
- روش‌های تولید و آشکارسازی امواج صوتی، نوری، رادیویی و لرزه‌ای را بیان کند.

واژه‌های کلیدی

نوسان، ارتعاش، موج، دامنه، طول موج، فرکانس، دوره تناوب، سرعت موج، موج عرضی، موج طولی، تراکم، انبساط، طیف الکترومغناطیسی، بازتاب، جذب، شکست، آشکارسازی، آنتن، میکروفون، لرزه‌نگار.

مقدمه

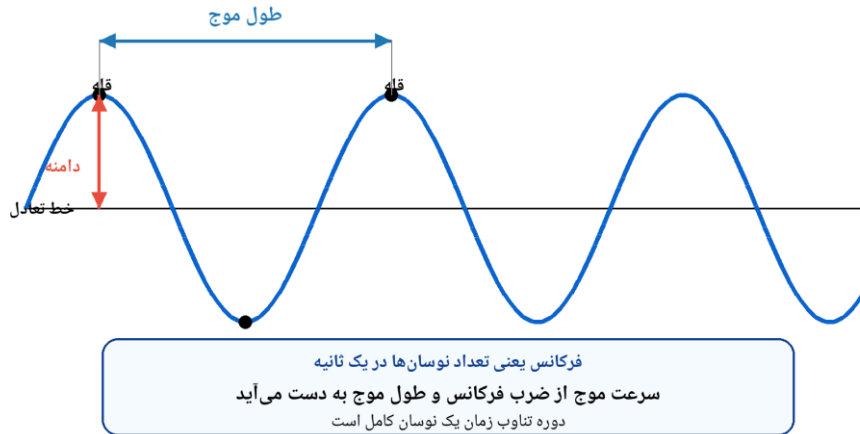
ارتعاشات و امواج از مفاهیم بنیادی فیزیک هستند. بسیاری از پدیده‌های روزمره، مانند شنیدن صدا، دیدن نور، حرکت موج روی آب، کارکرد رادیو و تلفن همراه، تصویربرداری طبی و ثبت زلزله، با موج ارتباط دارند. وقتی یک جسم در اطراف حالت تعادل خود به طور تکراری حرکت کند، به آن نوسان یا ارتعاش گفته می‌شود. اگر این ارتعاش انرژی را از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل کند، موج ایجاد می‌شود. موج انرژی را انتقال می‌دهد، اما معمولاً ماده را به طور دائمی از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل نمی‌کند. برای مثال، در موج سطح آب، ذرات آب بیشتر بالا و پایین می‌روند، اما انرژی موج به اطراف پخش می‌شود.

1. اصول نوسان و امواج

1.1 دامنه، طول موج، فرکانس، دوره تناوب و سرعت موج

برای توضیح علمی یک موج، باید کمیت‌های اصلی آن را بشناسیم. این کمیت‌ها به ما کمک می‌کنند بفهمیم موج چقدر قوی است، با چه فاصله‌ای تکرار می‌شود، در هر ثانیه چند بار نوسان دارد و با چه سرعتی حرکت می‌کند. موج یک نوع انتقال انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر است که به وسیله نوسان یا ارتعاش ایجاد می‌شود. در موج، معمولاً انرژی حرکت می‌کند، اما ماده به طور دائمی جابه‌جا نمی‌شود. یعنی ذرات محیط بیشتر در جای خود می‌لرزند، ولی انرژی موج به جلو پیش می‌رود.

ویژگی‌های اساسی موج



شکل 5.1: ویژگی‌های اساسی موج شامل دامنه، طول موج، قله، دره، فرکانس و رابطه سرعت موج

دامنه (Amplitude)

دامنه بیشترین فاصله‌ای است که یک ذره موج از حالت تعادل خود جابه‌جا می‌شود. در موج عرضی، دامنه معمولاً فاصله خط تعادل تا قله یا خط تعادل تا دره است. هرچه دامنه بیشتر باشد، انرژی موج نیز بیشتر است. برای مثال، صدای بلند دامنه بیشتری از صدای آهسته دارد و موج بلند آب انرژی بیشتری از موج کوچک دارد.

طول موج (Wavelength)

طول موج فاصله بین دو نقطه مشابه و متوالی در یک موج است؛ مانند فاصله بین دو قله، دو دره یا دو تراکم متوالی. طول موج با حرف یونانی λ نشان داده می‌شود و واحد آن معمولاً متر (m) است.

فرکانس (Frequency)

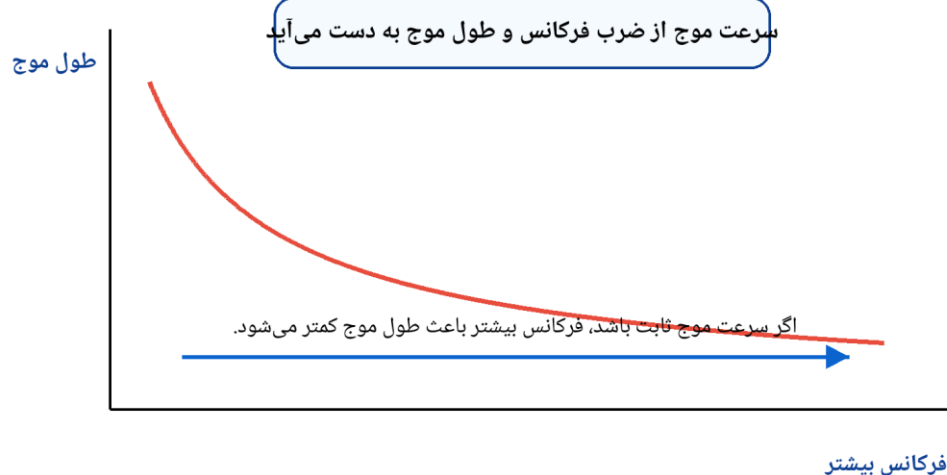
فرکانس تعداد نوسان‌ها یا موج‌هایی است که در یک ثانیه از یک نقطه عبور می‌کنند. فرکانس با حرف f نشان داده می‌شود و واحد آن هرتز (Hz) است. اگر فرکانس موج 10 Hz باشد، یعنی در هر ثانیه 10 نوسان کامل رخ می‌دهد.

دوره تناوب و سرعت موج

دوره تناوب زمانی است که یک نوسان کامل انجام می‌شود و با T نشان داده می‌شود. رابطه آن با فرکانس چنین است: $T = 1 \div f$. سرعت موج نیز با رابطه $v = f \times \lambda$ محاسبه می‌شود.

مثال حل‌شده: اگر طول موج یک موج 2 m و فرکانس آن 4 Hz باشد، سرعت موج برابر است با $v = 4 \times 2 = 8$ m/s پس موج با سرعت 8 متر بر ثانیه حرکت می‌کند.

رابطه فرکانس و طول موج

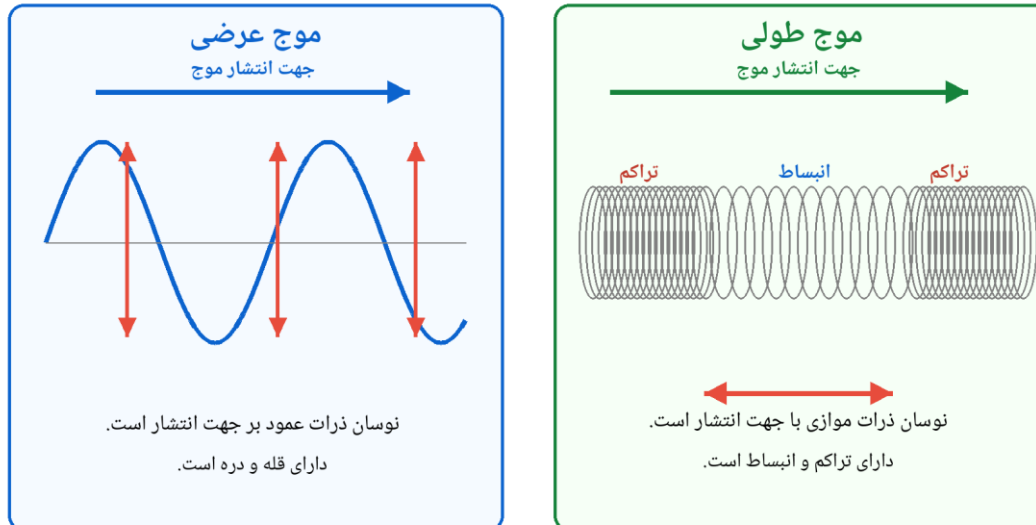


گراف 5.1: اگر سرعت موج ثابت باشد، افزایش فرکانس باعث کاهش طول موج می‌شود.

1.2 تفاوت امواج عرضی و طولی

امواج از نظر جهت نوسان ذرات نسبت به جهت انتشار موج به دو گروه مهم تقسیم می‌شوند: امواج عرضی و امواج طولی. این تفاوت برای تشخیص نوع موج در طناب، فنر، صوت، نور و امواج زلزله بسیار مهم است.

مقایسه موج عرضی و موج طولی



شکل 5.2: مقایسه موج عرضی و موج طولی

موج عرضی

در موج عرضی، نوسان ذرات عمود بر جهت انتشار موج است. اگر موج به طرف راست حرکت کند، ذرات محیط بالا و پایین نوسان می‌کنند. موج عرضی دارای قله و دره است. موج روی طناب و نور از نمونه‌های موج عرضی هستند.

موج طولی

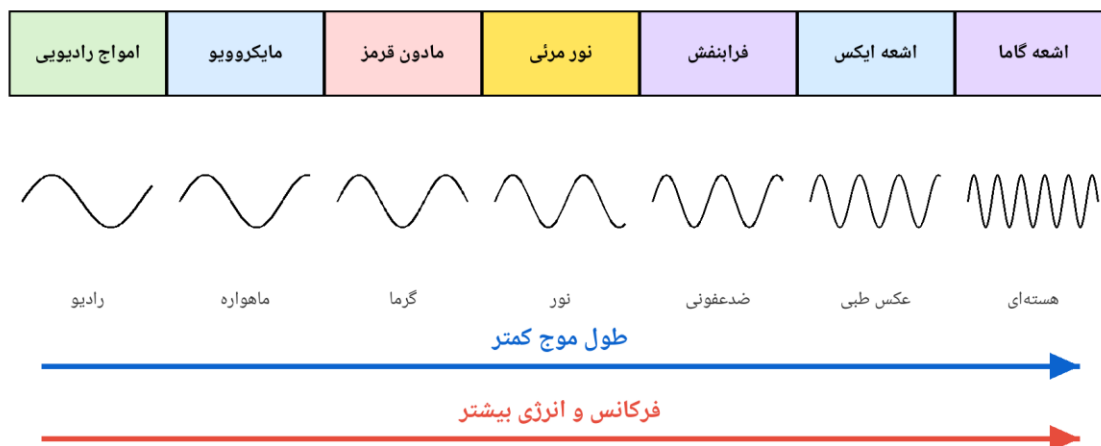
در موج طولی، نوسان ذرات موازی با جهت انتشار موج است. در این نوع موج، نواحی تراکم و انبساط ایجاد می‌شود. صوت در هوا نمونه مهم موج طولی است؛ زیرا مولکول‌های هوا در همان راستای انتشار موج فشرده و رقیق می‌شوند.

ویژگی	موج عرضی	موج طولی
جهت نوسان ذرات	عمود بر جهت انتشار موج	موازی با جهت انتشار موج
بخش‌های اصلی	قله و دره	تراکم و انبساط
نمونه‌ها	موج طناب، نور	صوت، موج در فنر
روش مشاهده	بالا و پایین رفتن ذرات	فشرده و رقیق شدن ذرات

1.3 امواج الکترومغناطیسی

امواج الکترومغناطیسی از نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ساخته می‌شوند. این امواج برای انتشار به محیط مادی نیاز ندارند و می‌توانند در خلأ نیز حرکت کنند. به همین دلیل، نور خورشید می‌تواند از فضای خالی عبور کرده و به زمین برسد. سرعت امواج الکترومغناطیسی در خلأ تقریباً 3×10^8 m/s است.

طیف امواج الکترومغناطیسی



شکل 5.3: طیف امواج الکترومغناطیسی؛ با کوتاه‌تر شدن طول موج، فرکانس و انرژی بیشتر می‌شود.

نوع موج	کاربرد	ویژگی کلی
امواج رادیویی	رادیو، تلویزیون، مخابرات	طول موج بلند و فرکانس کم
مایکروویو	مایکروویو، ماهواره، رادار	طول موج کوتاه‌تر از رادیویی
مادون قرمز	کنترل از راه دور، دوربین حرارتی	بیشتر به صورت گرما احساس می‌شود
نور مرئی	دیدن اجسام، عکاسی، چراغ‌ها	بخش قابل دیدن برای انسان
فرابنفش	ضد عفونی، تشخیص اسکناس، ساخت ویتامین D	انرژی بیشتر از نور مرئی
اشعه ایکس	تصویربرداری طبی، بررسی استخوان‌ها	طول موج بسیار کوتاه و انرژی زیاد
اشعه گاما	درمان بعضی سرطان‌ها، استریل‌سازی وسایل طبی	بیشترین انرژی در طیف

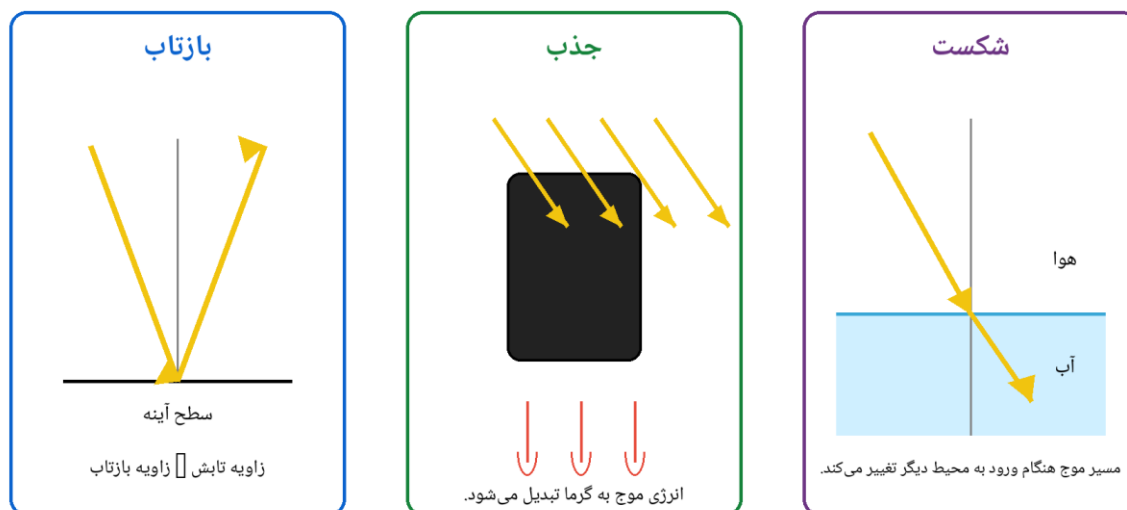
2. کاربرد امواج

امواج در زندگی روزمره و علوم کاربردهای فراوان دارند. از امواج برای ارتباطات، شنیدن صدا، دیدن اجسام، ثبت زلزله، تصویربرداری، تداوی مریض‌ها و انتقال معلومات استفاده می‌شود.

2.1 بازتاب، جذب و شکست

وقتی موج با یک سطح یا محیط تازه برخورد می‌کند، ممکن است بازتاب شود، جذب گردد یا مسیر آن تغییر کند. این رفتارها در نور، صوت، امواج آب و بسیاری از امواج دیگر دیده می‌شوند.

رفتارهای مهم امواج



شکل 5.4: سه رفتار مهم امواج؛ بازتاب، جذب و شکست

بازتاب (Reflection)

بازتاب برگشت موج پس از برخورد به سطح است. انعکاس نور در آینه، برگشت صدا از کوه و برگشت موج آب از دیواره حوض نمونه‌های بازتاب هستند. در بازتاب نور، زاویه تابش با زاویه بازتاب برابر است.

جذب (Absorption)

جذب زمانی رخ می‌دهد که انرژی موج توسط ماده گرفته شود و به شکل دیگری از انرژی، معمولاً گرما، تبدیل گردد. برای مثال، لباس تیره نور خورشید را بیشتر جذب می‌کند و گرم‌تر می‌شود. سطح‌های روشن معمولاً نور بیشتری را بازتاب می‌دهند.

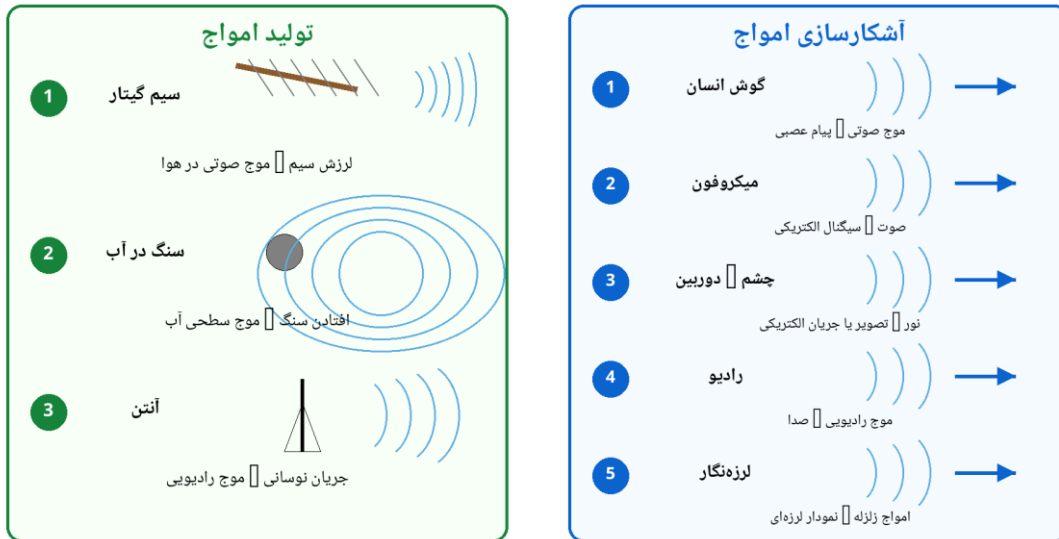
شکست (Refraction)

شکست تغییر مسیر موج هنگام عبور از یک محیط به محیط دیگر است. دلیل شکست این است که سرعت موج در محیط‌های مختلف یکسان نیست. شکسته به نظر رسیدن مداد در آب و کارکرد عدسی‌ها از نمونه‌های شکست نور هستند.

2.2 تولید و آشکارسازی امواج

امواج زمانی تولید می‌شوند که یک منبع دچار نوسان یا ارتعاش شود. آشکارسازی به معنی دریافت موج و تبدیل آن به سیگنال یا اثری قابل فهم، قابل شنیدن، قابل دیدن یا قابل اندازه‌گیری است.

تولید و آشکارسازی امواج



شکل 5.5: نمونه‌هایی از تولید و آشکارسازی امواج

تولید امواج مکانیکی

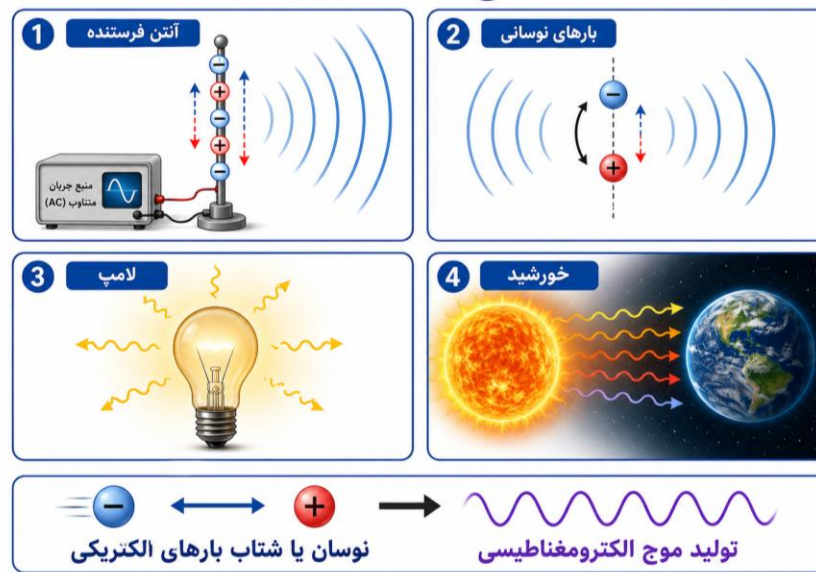
امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند. این محیط می‌تواند جامد، مایع یا گاز باشد. صوت، امواج آب، امواج زلزله و موج در فتر از نمونه‌های امواج مکانیکی هستند.

- در گیتار، لرزش تار باعث فشرده و رقیق شدن مولکول‌های هوا و تولید صوت می‌شود.
- در آب، افتادن سنگ سطح آب را به نوسان درمی‌آورد و حلقه‌های موجی پخش می‌شوند.
- در فتر، حرکت بالا و پایین موج عرضی و حرکت جلو و عقب موج طولی ایجاد می‌کند.



تولید امواج الکترومغناطیسی

امواج الکترومغناطیسی به محیط نیاز ندارند. هرگاه بار الکتریکی با شتاب حرکت کند، میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی متغیر ایجاد می‌شود. این دو میدان یکدیگر را تولید کرده و موج الکترومغناطیسی در فضا منتشر می‌شود. در آنتن رادیو، جریان متناوب باعث حرکت نوسانی الکترون‌ها و تولید موج رادیویی می‌شود.



آشکارسازی امواج

در آشکارسازی، گیرنده باید انرژی موج را دریافت و آن را به اثر قابل اندازه‌گیری تبدیل کند. نمونه‌های مهم آشکارسازی عبارت‌اند از:



- گوش انسان: امواج صوتی را دریافت می‌کند و آن‌ها را به پیام عصبی تبدیل می‌نماید.

- میکروفون: موج صوتی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند.
- چشم و دوربین: نور را دریافت و تصویر یا جریان الکتریکی تولید می‌کنند.
- گیرنده رادیویی: امواج رادیویی را دریافت، انتخاب، تقویت و به صدا تبدیل می‌کند.
- لرزه‌نگار: امواج زلزله را ثبت کرده و نمودار لرزه‌ای ایجاد می‌کند.

۲,۳ کاربردهای طیف الکترومغناطیسی و اثرات زیان‌بار بر بدن انسان

نوع موج	نمونه کاربرد	روش آشکارسازی	روش تولید
صوتی	شنیدن، ثبت صدا	گوش، میکروفون	ارتعاش تار، بلندگو، حنجره
رادیویی	رادیو، مخابرات	آنتن گیرنده، مدار تنظیم	جریان متناوب در آنتن
نور مرئی	دیدن، تصویربرداری	چشم، دوربین، فوتودیود	تغییر انرژی الکترون‌ها، لامپ، خورشید
ایکس	تصویربرداری استخوان	آشکارسازهای طبی	برخورد یا کاهش سرعت الکترون‌های پرانرژی
گاما	درمان سرطان، تحقیقات هسته‌ای	آشکارسازهای تابش	تغییرات هسته‌ای و واپاشی رادیواکتیف

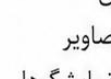
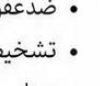
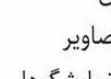
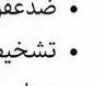
هر بخش از طیف الکترومغناطیسی کاربردهای خاص خود را دارد. امواج کم‌انرژی بیشتر برای ارتباطات و گرمایش استفاده می‌شوند، در حالی که امواج پرانرژی مانند فرابنفش، اشعه ایکس و گاما توانایی آسیب رساندن به سلول‌ها و DNA را دارند. بنابراین استفاده از آن‌ها باید با اصول ایمنی انجام شود.

نوع موج	اثر زیان‌بار احتمالی بر بدن انسان	کاربردهای مهم
امواج رادیویی	در شدت‌های معمول بی‌خطرتر اند؛ در شدت‌های بسیار زیاد می‌توانند باعث گرم شدن انساج شوند.	رادیو، تلویزیون، مخابرات، وایرلس
مایکروویو	شدت زیاد باعث گرم شدن انساج‌ها و آسیب حرارتی، به‌ویژه در چشم، می‌شود.	مایکروویو خانگی، رادار، تلفن همراه، ماهواره
مادون قرمز	شدت زیاد می‌تواند باعث سوختگی پوست یا آسیب حرارتی چشم شود.	کنترل از راه دور، دوربین حرارتی، بخاری تابشی
نور مرئی	نور بسیار شدید یا لیزر می‌تواند به شبکه چشم آسیب برساند.	دیدن، لامپ، لیزر، عکاسی
فرابنفش	قرار گرفتن زیاد باعث آفتاب‌سوختگی، آسیب DNA، سرطان پوست و آسیب چشم می‌شود.	ضد عفونی، تشخیص مواد، ساخت ویتامین D
اشعه ایکس	تابش یون‌ساز است؛ دوز زیاد یا تکراری می‌تواند به DNA آسیب زده و خطر سرطان را افزایش دهد.	تصویربرداری طبی، بررسی وسایل
اشعه گاما	بسیار پرانرژی و یون‌ساز است؛ می‌تواند انساج‌ها، سلول‌ها و DNA را شدیداً تخریب کند.	درمان سرطان، استریل‌سازی، تحقیقات هسته‌ای

نکته ایمنی: اشعه‌های فرابنفش، ایکس و گاما انرژی بیشتری دارند و می‌توانند یون‌سازی کنند یا باعث آسیب مستقیم به مولکول‌های زیستی شوند. به همین دلیل، استفاده از عینک محافظ، لباس محافظ، سرب‌پوشی، فاصله مناسب و کاهش زمان تماس اهمیت دارد.

۲,۳,۱ توضیح تفصیلی کاربردهای بخش‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی

طیف الکترومغناطیسی از امواج رادیویی تا اشعه‌های گاما ادامه دارد. همه این امواج در خلأ با سرعت تقریباً $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ حرکت می‌کنند، اما از نظر طول موج، فرکانس، انرژی، کاربرد و خطر زیستی تفاوت دارند. هرچه از امواج رادیویی به طرف اشعه‌های گاما حرکت کنیم، طول موج کوتاه‌تر، فرکانس بیشتر و انرژی موج زیادتر می‌شود.

نوع موج	کاربردها	نکته یا خطر	امواج رادیویی	امواج مایکروویو	اشعه‌های فروسرخ	نور مرئی	اشعه‌های ایکس	اشعه‌های گاما
1 امواج رادیویی	- پخش رادیو و تلویزیون - مخابرات صوتی - ارتباطات دریایی و هوایی	- ایمن - انرژی کم						
2 امواج مایکروویو	- اجاق مایکروویو - ارتباطات موبایل و وای فای - رادار و GPS	- ایمن در حد معمول - انرژی متوسط						
3 اشعه‌های فروسرخ (مادون قرمز)	- دوربین حرارتی - سیستم‌های گرمایشی - ریموت کنترل	- احساس گرما - نور مرئی نیست						
4 نور مرئی	- بینایی انسان - عکاسی و تصاویر - روشنایی و نمایشگرها	- لازم برای دیدن - قابل تنظیم						
5 اشعه‌های فرابنفش	- ضد عفونی و استریل - تشخیص برخی مواد - ویتامین D در پوست	- برای پوست و چشم - زیانش مضر است						
6 اشعه‌های ایکس	- تصویربرداری پزشکی - دندان پزشکی - بازرسی امنیتی	- نفوذ زیاد - زیانش مضر است						
7 اشعه‌های گاما	- درمان سرطان - استریل تجهیزات پزشکی - تحقیق و پژوهش	- انرژی بسیار زیاد - بسیار خطرناک						



هر بخش طیف الکترومغناطیسی کاربردهای خاص خود را دارد؛ استفاده درست آن به نفع انسان است.

امواج رادیویی (Radio Waves)

امواج رادیویی طول موج بسیار بلند و فرکانس کم دارند. این امواج برای انتقال معلومات در فاصله‌های طولانی مناسب‌اند و به همین دلیل در رادیو، تلویزیون، مخابرات پی‌سیم، سیستم‌های ارتباطی هوایی و دریایی، پی‌سیم‌های امدادی و آنتن‌ها استفاده می‌شوند.

مثال: در یک ایستگاه رادیویی، صدا به سیگنال برقی تبدیل می‌شود؛ سپس آنتن فرستنده آن را به موج رادیویی تبدیل کرده و در فضا پخش می‌کند. آنتن گیرنده این موج را دریافت می‌کند و دوباره به صدا تبدیل می‌نماید.

خطر احتمالی: در شدت‌های معمول، امواج رادیویی خطر زیادی ندارند؛ اما توان بسیار زیاد می‌تواند باعث گرم شدن انساج‌های بدن شود.

امواج مایکروویو (Microwaves)

مایکروویوها طول موج کوتاه‌تر و فرکانس بیشتر از امواج رادیویی دارند. این امواج در اجاق مایکروویو، تلفن همراه، اینترنت بی‌سیم، ارتباطات ماهواره‌ای، رادار و GPS استفاده می‌شوند.

مثال: در اجاق مایکروویو، امواج باعث لرزش مولکول‌های آب در غذا می‌شوند. این لرزش انرژی حرارتی تولید می‌کند و غذا را گرم می‌سازد.

خطر احتمالی: شدت زیاد مایکروویو می‌تواند انساج‌ها را گرم کند؛ به ویژه چشم‌ها در برابر گرمای زیاد حساس‌اند.

اشعه‌های فروسرخ یا مادون قرمز (Infrared)

اشعه‌های فروسرخ طول موج بلندتر از نور مرئی دارند و بیشتر به صورت گرما احساس می‌شوند. هر جسم گرم مقداری تابش فروسرخ تولید می‌کند.

کاربردها شامل ریموت کنترل، دوربین‌های حرارتی، بخاری‌های تابشی، دید در شب، سنجش دمای بدن و بررسی اتلاف گرما در ساختمان‌ها است.

خطر احتمالی: مقدار معمول آن خطر جدی ندارد، اما شدت زیاد فروسرخ می‌تواند باعث سوختگی پوست یا آسیب حرارتی به چشم شود.

نور مرئی (Visible Light)

نور مرئی بخشی از طیف الکترومغناطیسی است که چشم انسان می‌تواند آن را ببیند. رنگ‌های مختلف نور مرئی طول موج و فرکانس متفاوت دارند؛ نور سرخ طول موج بلندتر و نور بنفش طول موج کوتاه‌تر دارد.

کاربردها شامل دیدن اجسام، عکاسی، چراغ‌ها، صفحه‌های موبایل و کامپیوتر، میکروسکوپ نوری، تلسکوپ و فایبر نوری است.

خطر احتمالی: نور معمولی برای دیدن ضروری است؛ اما نور بسیار شدید، لیزر قوی یا نگاه مستقیم به خورشید می‌تواند به شبکیه چشم آسیب برساند.

اشعه‌های فرابنفش (Ultraviolet / UV)

اشعه‌های فرابنفش طول موج کوتاه‌تر و انرژی بیشتر از نور مرئی دارند. بخشی از اشعه‌های فرابنفش خورشید به سطح زمین می‌رسد. کاربردها شامل ضد عفونی آب و وسایل، کشتن میکروب‌ها، تشخیص اسکانس جعلی، تولید ویتامین D در پوست و بعضی آزمایش‌های علمی است.

خطر احتمالی: قرار گرفتن زیاد در برابر UV می‌تواند باعث آفتاب‌سوختگی، پیری زودرس پوست، آسیب چشم و افزایش خطر سرطان پوست شود.

اشعه‌های ایکس (X-rays)

اشعه‌های ایکس طول موج بسیار کوتاه و انرژی زیاد دارند. این اشعه‌ها از انساج‌های نرم بدن عبور می‌کنند، اما توسط استخوان‌ها بیشتر جذب می‌شوند. کاربردها شامل عکس‌برداری طبی، تشخیص شکستگی استخوان، تصویربرداری دندان، CT scan و بازرسی وسایل در میدان‌های هوایی است.

خطر احتمالی: اشعه‌های ایکس می‌توانند به سلول‌ها و DNA آسیب برسانند؛ بنابراین باید فقط با مقدار کنترل‌شده و محافظت مناسب استفاده شوند.

اشعه‌های گاما (Gamma Rays)

اشعه‌های گاما کوتاه‌ترین طول موج و بیشترین انرژی را در طیف الکترومغناطیسی دارند. این اشعه‌ها معمولاً از تغییرات هسته‌ای، مواد رادیواکتیف و واکنش‌های هسته‌ای تولید می‌شوند. کاربردها شامل درمان بعضی سرطان‌ها، استریل‌سازی وسایل طبی، از بین بردن میکروب‌ها، تحقیقات هسته‌ای و بررسی ساختار مواد است.

خطر احتمالی: اشعه‌های گاما بسیار پرانرژی و نفوذکننده‌اند و می‌توانند به سلول‌ها، DNA و انساج‌های بدن آسیب جدی وارد کنند. قرار گرفتن زیاد در برابر آن خطر سرطان و بیماری اشعه‌ای را افزایش می‌دهد.

جدول ۵,۲: خلاصه کاربردها و خطرات طیف الکترومغناطیسی

نوع موج	خطر احتمالی برای بدن	کاربردهای مهم
امواج رادیویی	در توان زیاد باعث گرم شدن انساج‌ها می‌شود	رادیو، تلویزیون، مخابرات، آنتن‌ها
مایکروویو	در شدت زیاد انساج‌ها و چشم را گرم می‌کند	اجاق مایکروویو، موبایل، وای‌فای، رادار، ماهواره
فروسرخ	در شدت زیاد سوختگی یا آسیب حرارتی ایجاد می‌کند	ریموت، دوربین حرارتی، بخاری تابشی، سنسور دما
نور مرئی	نور شدید، لیزر یا خورشید به چشم آسیب می‌زند	دیدن، عکاسی، چراغ، میکروسکوپ، فایبر نوری
فرابنفش	آفتاب‌سوختگی، آسیب چشم، سرطان پوست	ضدعفونی، تشخیص اسکانس، ویتامین D
ایکس	آسیب به سلول‌ها و DNA در دوز زیاد	عکس‌برداری طبی، دندان، CT scan، بازرسی امنیتی
گاما	آسیب شدید به انساج‌ها، DNA و افزایش خطر سرطان	درمان سرطان، استریل‌سازی، تحقیقات هسته‌ای

امواج الکترومغناطیسی در ارتباطات، طب، صنعت، فناوری و زندگی روزمره نقش بسیار مهم دارند. امواج کم‌انرژی مانند رادیویی و مایکروویو بیشتر برای ارتباطات و گرمایش استفاده می‌شوند، اما امواج پرانرژی مانند فرابنفش، ایکس و گاما توانایی آسیب رساندن به سلول‌ها و DNA را دارند؛ بنابراین استفاده علمی و ایمن از آن‌ها بسیار مهم است.

فعالیت ۱: مشاهده موج عرضی در طناب

فعالیت ۱: مشاهده موج عرضی در طناب

هدف:



تشخیص جهت انتشار موج و جهت نوسان ذرات در موج عرضی.

مواد لازم:

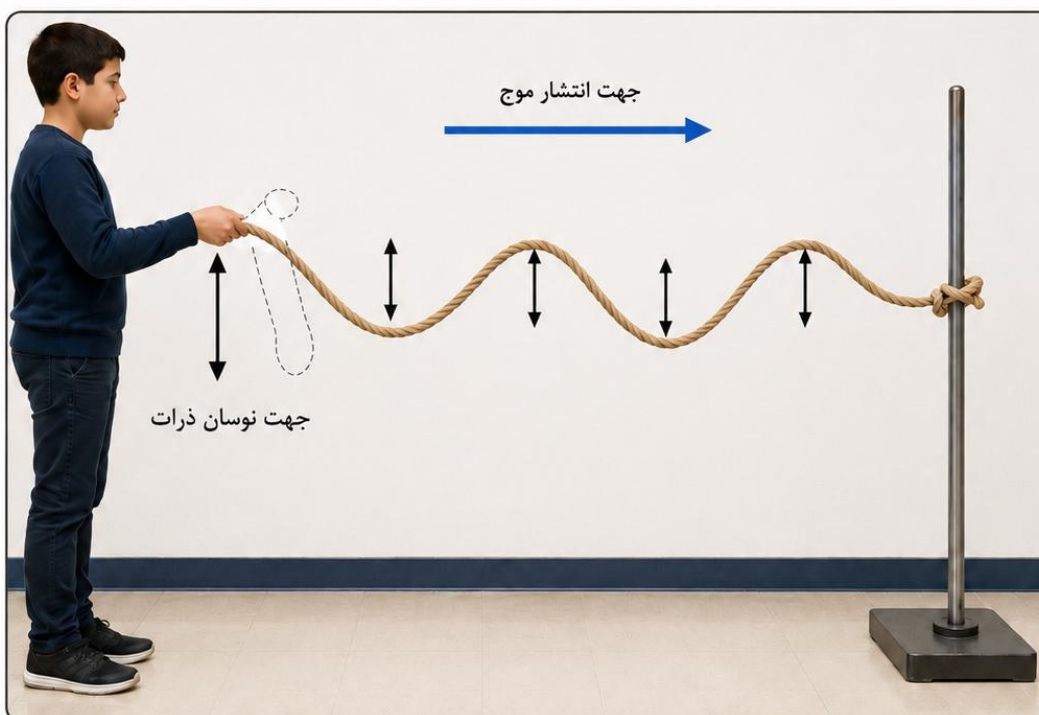


طناب نرم

روش:



یک سر طناب را ثابت نگه دارید و سر دیگر را بالا و پایین تکان دهید.



نتیجه:



موج در طول طناب حرکت می‌کند، اما ذرات طناب بالا و پایین نوسان می‌کنند؛ پس موج عرضی است.

فعالیت ۲: مشاهده شکست نور

فعالیت ۲: مشاهده شکست نور

هدف:



مشاهده تغییر مسیر نور هنگام عبور از آب به هوا.

مواد لازم:

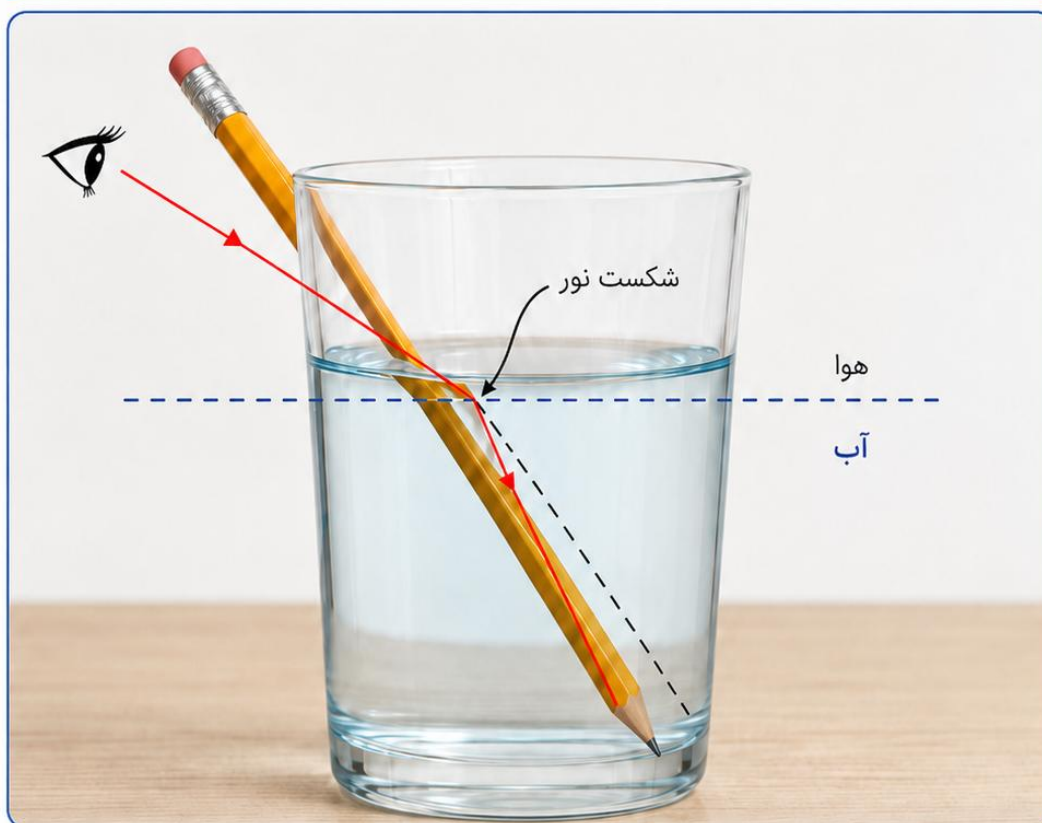


گیلاس شفاف، آب و مداد

روش:



مداد را داخل گیلان آب قرار دهید و از کنار نگاه کنید.



نتیجه:



مداد شکسته به نظر می‌رسد، زیرا نور در مرز آب و هوا
تغییر سرعت و مسیر می‌دهد.

فعالیت ۳: مقایسه جذب نور در رنگ‌های مختلف

هدف: بررسی جذب موج و تبدیل انرژی آن به گرما.

هدف:

مواد لازم: دو پارچه سیاه و سفید، نور خورشید یا چراغ.

مواد لازم:

روش: هر دو پارچه را برای مدت مساوی زیر نور قرار دهید و دمای آن‌ها را مقایسه کنید.

روش:



نتیجه: پارچه سیاه نور بیشتری جذب می‌کند و گرم‌تر می‌شود.

نتیجه:

تمرین‌های سطح متوسط

- دامنه، طول موج و فرکانس را تعریف کنید.
- تفاوت موج عرضی و طولی را با مثال توضیح دهید.
- اگر طول موج یک موج 3 m و فرکانس آن 5 Hz باشد، سرعت موج را محاسبه کنید.
- سه نوع موج الکترومغناطیسی و کاربرد هرکدام را بنویسید.
- بازتاب، جذب و شکست را با مثال توضیح دهید.

تمرین‌های سطح سخت

- چرا امواج الکترومغناطیسی می‌توانند در خلأ منتشر شوند، اما امواج صوتی نمی‌توانند؟
- اگر فرکانس یک موج دو برابر شود و سرعت موج ثابت بماند، طول موج چه تغییری می‌کند؟ با رابطه $v = f\lambda$ توضیح دهید.
- چرا لباس سیاه در زیر آفتاب گرم‌تر از لباس سفید می‌شود؟ این موضوع را با جذب و بازتاب توضیح دهید.
- چگونه یک آنتن رادیویی موج رادیویی را تولید و آنتن گیرنده آن را آشکار می‌کند؟
- چرا هنگام زلزله، لرزه‌نگار می‌تواند حرکت زمین را ثبت کند؟

5. پاسخ‌های کوتاه تمرین‌های محاسباتی

نمونه: اگر $f = 5 \text{ Hz}$ و $\lambda = 3 \text{ m}$ باشد، آنگاه $v = f\lambda = 5 \times 3 = 15 \text{ m/s}$.

اگر سرعت موج ثابت باشد و فرکانس دو برابر شود، طول موج نصف می‌شود؛ زیرا $v = f\lambda$ و حاصل ضرب f و λ باید ثابت بماند.

خلاصه فصل

در این فصل آموختیم که موج نوعی انتقال انرژی از راه نوسان است. دامنه، طول موج، فرکانس، دوره تناوب و سرعت موج ویژگی‌های اصلی موج هستند. امواج عرضی و طولی از نظر جهت نوسان ذرات تفاوت دارند. امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارند و شامل امواج رادیویی، مایکروویو، مادون قرمز، نور مرئی، فرابنفش، اشعه ایکس و اشعه گاما هستند. همچنین رفتارهای مهم امواج مانند بازتاب، جذب و شکست و روش‌های تولید و آشکارسازی امواج در سیستم‌هایی مانند گوش، میکروفون، چشم، رادیو و لرزه‌نگار بررسی شد.

منابع

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of physics* (10th ed.). Wiley.
- Hewitt, P. G. (2015). *Conceptual physics* (12th ed.). Pearson.
- Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2016). *University physics volume 1*. OpenStax.
- National Institute of Standards and Technology. (n.d.). *Electromagnetic spectrum graphic*. NIST.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (10th ed.). Cengage Learning.
- Urone, P. P., & Hinrichs, R. (2022). *College physics 2e*. OpenStax.
- Wittmann, M. C., Steinberg, R. N., & Redish, E. F. (2002a). Understanding and affecting student reasoning about sound waves. *International Journal of Science Education*, 25(8), 991–1013.
- Wittmann, M. C., Steinberg, R. N., & Redish, E. F. (2002b). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *The Physics Teacher*, 37(1), 15–21.
- World Health Organization. (2022). *Ultraviolet radiation*. WHO.
- World Health Organization. (2023). *Ionizing radiation and health effects*. WHO.

- Young, H. D., Freedman, R. A., & Ford, A. L. (2020). *University physics with modern physics* (15th ed.). Pearson.

فصل ششم

بررسی علوم اتمی و کوانتومی در زمینه‌های معاصر

Exploring Atomic and Quantum Science in Modern Contexts

اهداف یادگیری فصل

در پایان این فصل، شاگرد باید بتواند:

- روند پیشرفت مدل‌های اتمی را بر اساس شواهد تجربی توضیح دهد و بداند چرا مدل‌های علمی با شواهد جدید اصلاح می‌شوند.
- اندازه و کتله اتم، هسته و مالیکول‌های کوچک را با واحدهای علمی مقایسه کند و از توان‌های ده استفاده نماید.
- مفهوم فوتون، انرژی کوانتومی و اثر فوتوالکتریک را با رابطه $E = hf$ در مسائل ساده و پیشرفته به کار ببرد.
- دوگانگی موج-ذره را توضیح دهد و با رابطه دوبروی $\lambda = h/p$ طول موج یا مومنتم ذرات را محاسبه کند.
- کاربردهای اشعه ایکس و تابش الکترومقناطیسی را در طبابت و امنیت همراه با خطرات تابش یون‌ساز تحلیل کند.
- عدد اتمی، عدد کتله‌ای، ایزوتوپ‌ها و معادلات هسته‌ای را در واپاشی‌های آلفا، بی‌تا و گاما به کار ببرد.
- نیمه‌عمر، فعالیت رادیواکتیف، تابش‌دهی، آلودگی و اصول حفاظت در برابر تابش را در مثال‌های عددی حل کند.
- مفهوم شکافت، همجوشی، واکنش زنجیره‌ای و کنترل واکنش در راکتور هسته‌ای را توضیح و محاسبات پایه انرژی را انجام دهد.
- حرکت مداری، سرعت نور، فاصله‌های نجومی و ارتباط انرژی خورشید با همجوشی هسته‌ای را در مسائل محاسباتی استفاده کند.

مقدمه فصل

علوم اتمی و کوانتومی به ما کمک می‌کند تا ماده، انرژی، تابش، ساختار اتم، هسته و پدیده‌های بسیار کوچک طبیعت را بهتر بفهمیم. در گذشته تصور می‌شد اتم یک ذره ساده و غیرقابل تقسیم است، اما با پیشرفت آزمایش‌ها و شواهد علمی مشخص شد که اتم از ذرات کوچک‌تر مانند پروتون، نوترون و الکترون ساخته شده است. در این فصل، ابتدا با پیشرفت مدل‌های اتمی آشنا می‌شویم. سپس اندازه و کتله اتم‌ها و هسته‌ها را بررسی می‌کنیم. بعد از آن، وارد مفاهیم کوانتومی مانند فوتون، اثر فوتوالکتریک و دوگانگی موج-ذره می‌شویم. در بخش دوم، ساختار هسته، ایزوتوپ‌ها، رادیواکتیویته، تابش‌ها، نیمه‌عمر و خطرات مواد رادیواکتیف بررسی می‌شود. در بخش سوم، مفاهیم مقدماتی شکافت هسته‌ای، همجوشی هسته‌ای، واکنش زنجیره‌ای، راکتور هسته‌ای و منظومه شمسی توضیح داده می‌شود. این موضوعات در زندگی امروزی کاربردهای بسیار مهم دارند؛ مانند تصویربرداری طبی،

درمان سرطان، امنیت میدان‌های هوایی، تولید برق، مطالعه ستاره‌ها، صفحات خورشیدی، مایکروسکوپ الکترونی و تحقیقات فضایی.

۱. درک پیشرفت نظریه اتمی و کوانتومی

۱.۱ مدل هسته‌ای اتم و پیشرفت آن با شواهد جدید

پیشرفت مدل اتمی نمونه مهمی از روش علمی است. دانشمندان ابتدا بر اساس معلومات موجود یک مدل ساده می‌سازند، سپس آن را با آزمایش بررسی می‌کنند. اگر نتیجه آزمایش با مدل سازگار نباشد، آن مدل باید اصلاح شود یا کاملاً تغییر کند. به همین دلیل، مدل اتمی از یک کره ساده به مدل دارای ذرات زیراتمی، سپس به مدل هسته‌ای و در نهایت به مدل کوانتومی تغییر کرد.

در ابتدا، **جان دالتون** اتم را یک کره بسیار کوچک، سخت و غیرقابل تقسیم می‌دانست. او می‌گفت همه مواد از اتم ساخته شده‌اند و اتم‌های هر عنصر با اتم‌های عنصر دیگر فرق دارند. این مدل برای توضیح بعضی واکنش‌های کیمیای مفید بود، اما نمی‌توانست وجود بار الکتریکی و ذرات داخل اتم را توضیح دهد. بعد از آن، **جی. جی. تامسون** در سال ۱۸۹۷ با آزمایش پرتوهای کاتدی الکترون را کشف کرد. او مشاهده کرد که پرتوهای کاتدی در میدان الکتریکی و مقناطیسی منحرف می‌شوند و جهت انحراف نشان می‌دهد که این پرتوها دارای بار منفی هستند. تامسون نتیجه گرفت که اتم دارای ذرات منفی بسیار کوچک است. این کشف نشان داد که اتم غیرقابل تقسیم نیست. پس از آن، تامسون مدل «کیک کشمش» را پیشنهاد کرد؛ در این مدل، اتم مانند یک کره مثبت تصور می‌شد که الکترون‌های منفی در داخل آن پخش شده‌اند. سپس **ارنست رادرفورد** آزمایش معروف ورق طلا را انجام داد. او ذرات آلفا را به طرف یک ورق بسیار نازک طلا فرستاد. ذرات آلفا نسبتاً سنگین و دارای بار مثبت هستند. اگر بار مثبت در تمام اتم پخش می‌بود، ذرات آلفا نباید به شدت منحرف یا برگشت داده می‌شدند. اما در آزمایش رادرفورد، بیشتر ذرات آلفا از ورق عبور کردند، در حالی که تعداد بسیار کمی از آن‌ها به شدت منحرف شدند یا به عقب برگشتند. این مشاهده نشان داد که بیشتر حجم اتم فضای خالی است و بار مثبت و تقریباً تمام کتله اتم در مرکز بسیار کوچک و متراکم آن قرار دارد. این مرکز را هسته می‌نامیم. کشف هسته راه را برای شناخت پروتون باز کرد. رادرفورد در آزمایش‌های بعدی نشان داد که هسته هایدروجن می‌تواند به عنوان ذره مثبت بنیادی شناخته شود. این ذره بعداً پروتون نامیده شد. پروتون دارای بار مثبت است و در هسته قرار دارد. تعداد پروتون‌ها هویت عنصر را تعیین می‌کند؛ برای مثال، هر اتمی که ۶ پروتون داشته باشد کربن است و هر اتمی که ۸ پروتون داشته باشد اکسیجن است. با وجود کشف پروتون، یک مشکل علمی باقی ماند. کتله بعضی هسته‌ها بیشتر از چیزی بود که فقط با تعداد پروتون‌ها توضیح داده شود. برای حل این مشکل، جیمز چادویک در سال ۱۹۳۲ نوترون را کشف کرد. نوترون ذره‌ای بدون بار است که کتله‌ای تقریباً برابر با پروتون دارد و در هسته قرار می‌گیرد. کشف نوترون توضیح داد که چرا هسته کتله بیشتری دارد و چگونه ایزوتوپ‌ها به وجود می‌آیند. ایزوتوپ‌ها اتم‌های یک عنصر هستند که تعداد پروتون‌های یکسان اما تعداد نوترون‌های متفاوت دارند. بعدها **نیلز بوهر** مدل رادرفورد را کامل‌تر ساخت. مدل رادرفورد همه چیز را توضیح نمی‌داد؛ زیرا اگر الکترون‌ها مانند سیاره‌ها دور هسته می‌چرخیدند، طبق فیزیک کلاسیک باید انرژی از دست می‌دادند و روی هسته سقوط می‌کردند. بوهر پیشنهاد کرد که الکترون‌ها فقط می‌توانند در مدارها یا سطح‌های انرژی مشخص قرار بگیرند. وقتی الکترون از یک سطح انرژی به سطح دیگر می‌رود، انرژی جذب یا نشر می‌کند. این مدل توانست طیف خطی هایدروجن را بهتر توضیح دهد. در مدل کوانتومی جدید، الکترون‌ها مانند سیاره‌هایی با مسیرهای دقیق تصور نمی‌شوند. در عوض، الکترون‌ها در نواحی احتمالی به نام اوربیتال قرار دارند. اوربیتال نشان می‌دهد که احتمال یافتن الکترون در کدام ناحیه اطراف هسته بیشتر است. مدل کوانتومی نسبت به مدل‌های قبلی دقیق‌تر است، زیرا رفتار الکترون‌ها را با احتمال، سطح‌های انرژی و شواهد طیفی توضیح می‌دهد.

نکته مهم برای شاگردان: مدل‌های قدیمی کاملاً بی‌ارزش نبودند. هر مدل در زمان خود بخشی از واقعیت را توضیح می‌داد، اما با شواهد جدید کامل‌تر شد. علم همیشه با مشاهده، آزمایش، اصلاح و بازنگری پیشرفت می‌کند.

پیشرفت مدل اتمی و کشف ذرات زیراتمی

دانشمند	کشف یا مدل اتمی	اهمیت علمی	شکل یا توضیح
جان دالتون	اتم را کره سخت و غیرقابل تقسیم دانست	توضیح ساده ترکیب مواد و واکنش‌های کیمیایی	اتم به شکل کره سخت و یکپارچه
جی. جی. تامسون	کشف الکترون و پیشنهاد مدل کیک کشمش	نشان داد اتم ذرات منفی دارد و قابل تقسیم است	کره مثبت با الکترون‌های منفی پراکنده
ارنست رادرفورد	کشف هسته با آزمایش ورق طلا	نشان داد اتم بیشتر فضای خالی دارد و بار مثبت در هسته متمرکز است	هسته کوچک و متمرکز در مرکز اتم
ارنست رادرفورد	شناسایی پروتون	نشان داد تعداد پروتون‌ها هویت عنصر را تعیین می‌کند	پروتون‌ها (بار مثبت) در هسته قرار دارند
نیلز بوهر	سطح‌های انرژی مشخص برای الکترون‌ها	توضیح بهتر پایداری اتم و طیف خطی هیدروژن	الکترون‌ها در سطح‌های انرژی مشخص قرار می‌گیرند
جیمز چادویک	کشف نوترون	توضیح کتله هسته و پیدایش ایزوتوپ‌ها	نوترون‌ها (بدون بار) در هسته قرار دارند
مدل کوانتومی	اوربیتال‌ها و احتمال حضور الکترون	توضیح دقیق‌تر رفتار الکترون‌ها در اتم	الکترون‌ها در نواحی احتمالی (اوربیتال) قرار دارند

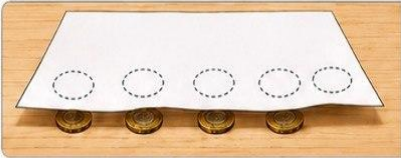
- اگر مدل تامسون درست می‌بود، بار مثبت باید در تمام اتم پخش می‌بود. در این حالت، ذرات آلفا هنگام عبور از ورق طلا فقط کمی منحرف می‌شدند. اما در آزمایش رادرفورد، تعداد کمی از ذرات آلفا با زاویه زیاد منحرف شدند یا حتی برگشتند. این نشان داد که بار مثبت در یک ناحیه کوچک و متراکم در مرکز اتم متمرکز است.
- بیشتر ذرات آلفا از ورق طلا عبور کردند، چون بیشتر حجم اتم فضای خالی است. ذرات آلفا فقط زمانی منحرف می‌شوند که به هسته کوچک و مثبت اتم نزدیک شوند.
- برگشتن تعداد کمی از ذرات آلفا نشان داد که هسته اتم بسیار کوچک، بسیار متراکم و دارای بار مثبت است. چون ذرات آلفا نیز بار مثبت دارند، وقتی به هسته نزدیک می‌شوند، توسط هسته دفع می‌شوند.

فعالیت عملی: مدل‌سازی آزمایش رادرفورد

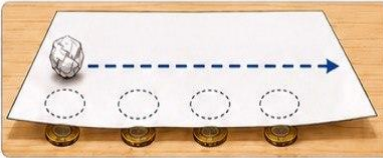
هدف: درک این‌که چگونه دانشمندان از مسیر حرکت ذرات برای شناخت ساختارهای نادیدنی استفاده می‌کنند.

مواد لازم: یک ورق کاغذ، چند سکه، توپ کوچک کاغذی، خط‌کش.

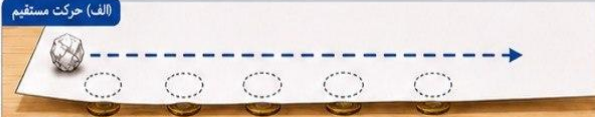
1. چند سکه را زیر یک ورق کاغذ بگذارید.



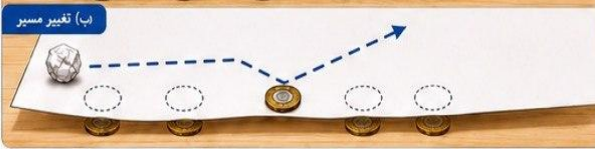
2. توپ کاغذی را روی کاغذ حرکت دهید.



(الف) حرکت مستقیم



(ب) تغییر مسیر



3. اگر توپ تغییر مسیر داد، شماگردان حدس بزنند زیر کاغذ چه چیزی قرار دارد.

توپ مسیرش را مستقیم ادامه داد.

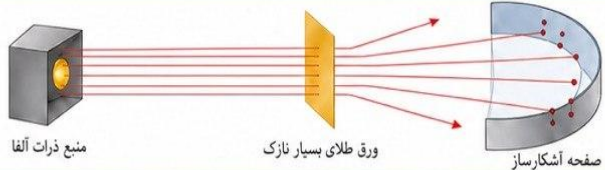
توپ تغییر مسیر داد.





4. این فعالیت را با آزمایش ورق طلای رادرفورد مقایسه کنید.

آزمایش ورق طلای رادرفورد



بیشتر ذرات آلفا مستقیم از ورق عبور کردند.

تعداد کمی تغییر مسیر دادند چون به هسته کوچک و متراکم برخورد کردند.

منبع ذرات آلفا ورق طلای بسیار نازک صفحه آشکارساز

نتیجه: همان‌طور که تغییر مسیر توپ می‌تواند وجود مانع پنهان را نشان دهد، تغییر مسیر ذرات آلفا نیز وجود هسته کوچک و متراکم را نشان داد.

مثال‌های محاسباتی مربوط به آزمایش رادرفورد

- سوال 1: در آزمایش رادرفورد، اگر 20000 ذره آلفا به ورق طلا برخورد کند و 0.5% آن‌ها با زاویه زیاد منحرف شوند، چند ذره به شدت منحرف شده است؟
- حل:

$$0.5\% = 0.005$$

$$20000 \times 0.005 = 100$$

جواب: 100 ذره آلفا به شدت منحرف شده است.

سوال 2: اگر از 20000 ذره آلفا، 19850 ذره تقریباً مستقیم از ورق طلا عبور کند، فیصدی عبور مستقیم را حساب کنید.

حل: فیصدی عبور مستقیم = تعداد ذرات عبور کرده ÷ تعداد کل ذرات $\times 100$

$$19850 \div 20000 \times 100 = 99.25\%$$

جواب: 99.25% ذرات آلفا تقریباً مستقیم عبور کرده‌اند.

سوال 3: قطر اتم را $1 \times 10^{-10} \text{ m}$ و قطر هسته را $1 \times 10^{-15} \text{ m}$ بگیرید. نسبت قطر اتم به قطر هسته را حساب کنید.

حل: نسبت = قطر اتم ÷ قطر هسته

$$(1 \times 10^{-10}) \div (1 \times 10^{-15}) = 10^5$$

$$10^5 = 100000$$

جواب: قطر اتم حدود 100000 بار بزرگ‌تر از قطر هسته است.

سوال 4: اگر انرژی اولیه یک ذره آلفا 5 MeV باشد و بعد از عبور از ورق طلا 4.7 MeV باقی بماند، انرژی از دست‌رفته را حساب کنید.

حل: انرژی از دست‌رفته = انرژی اولیه - انرژی باقی‌مانده

$$5 - 4.7 = 0.3 \text{ MeV}$$

جواب: ذره آلفا 0.3 MeV انرژی از دست داده است.

سوال 5: اگر شعاع تقریبی یک اتم $5 \times 10^{-11} \text{ m}$ باشد، قطر تقریبی اتم را حساب کنید.

حل: قطر = $2 \times$ شعاع

$$2 \times 5 \times 10^{-11} = 10 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$10 \times 10^{-11} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$$

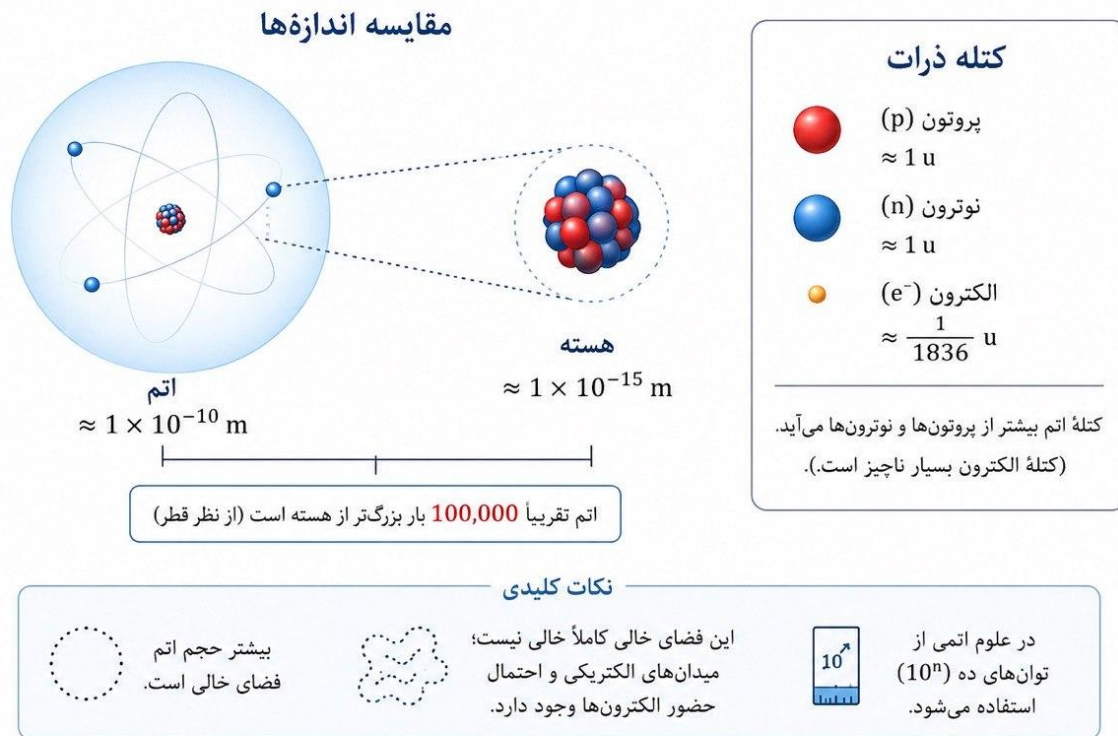
جواب: قطر تقریبی اتم برابر است با $1 \times 10^{-10} \text{ m}$.

۲.۱ کتله و اندازه هسته، اتم و مالیکول‌های کوچک

اندازه‌های اتمی و هسته‌ای بسیار کوچک‌اند و با واحدهای معمول زندگی روزمره به سختی قابل تصور هستند. برای همین، در علوم اتمی از توان‌های ده استفاده می‌شود. عدد 1×10^{-10} متر یعنی یک متر تقسیم بر ده میلیارد، و عدد 1×10^{-15} متر یعنی یک متر تقسیم بر هزار تریلیون.

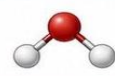
اگر قطر اتم را با قطر هسته مقایسه کنیم، می‌بینیم که اتم تقریباً صد هزار بار بزرگ‌تر از هسته است. اما این مقایسه فقط مربوط به قطر است. اگر حجم را در نظر بگیریم، فضای خالی داخل اتم بسیار بیشتر به نظر می‌رسد. با این وجود، این فضای خالی واقعاً کاملاً خالی از اثر نیست، چون میدان‌های الکتریکی و احتمال حضور الکترون‌ها در آن وجود دارد.

کته اتم بیشتر از پروتون ها و نوترون ها می آید. پروتون و نوترون تقریباً یک واحد کته اتمی دارند، در حالی که کته الکترون حدود 1/1836 کته پروتون است. به همین دلیل، در بسیاری از محاسبات ساده، کته الکترون نادیده گرفته می شود.



کاربرد درک مقیاس ها: فهم اندازه اتم و هسته در توضیح تصویربرداری، تابش، واکنش های هسته ای و حتی ساخت مواد جدید در نانوتکنالوژی اهمیت دارد. اتم ها بسیار کوچک اند و با چشم دیده نمی شوند. اندازه معمول یک اتم در حدود 1×10^{-10} متر است. این اندازه بسیار کوچک است، اما هسته اتم حتی از آن هم کوچک تر است. اندازه معمول هسته در حدود 1×10^{-15} متر است. بنابراین قطر اتم تقریباً صد هزار بار بزرگ تر از قطر هسته است. با وجود این که هسته بسیار کوچک است، تقریباً تمام کته اتم در هسته قرار دارد. دلیل آن این است که پروتون ها و نوترون ها در هسته قرار دارند و کته آن ها بسیار بیشتر از کته الکترون است. الکترون ها کته بسیار کمی دارند و سهم آن ها در کته اتم بسیار ناچیز است. اگر یک اتم را به اندازه یک میدان فوتبال تصور کنیم، هسته آن تقریباً مانند یک دانه بسیار کوچک در مرکز میدان خواهد بود. این مثال نشان می دهد که بیشتر حجم اتم فضای خالی است، اما این فضای خالی شامل ناحیه هایی است که الکترون ها در آن ها یافت می شوند. مالیکول ها از دو یا چند اتم ساخته می شوند. برای مثال، مالیکول آب از دو اتم هیدروجن و یک اتم اکسیجن تشکیل شده است. اندازه مالیکول های کوچک معمولاً کمی بزرگ تر از اندازه یک اتم است و در حدود 1×10^{-10} تا 1×10^{-9} متر قرار دارد.

مقایسه اندازه‌ها

توضیح	اندازه تقریبی	ساختار
بسیار کوچک و متراکم	$1 \times 10^{-15} \text{ m}$	هسته 
بیشتر آن فضای خالی است	$1 \times 10^{-10} \text{ m}$	اتم 
از چند اتم ساخته شده است	$1 \times 10^{-10} \text{ m}$ تا $1 \times 10^{-9} \text{ m}$	مالیکول کوچک 
بسیار بزرگ‌تر از مالیکول‌ها	$1 \times 10^{-8} \text{ m}$ تا $1 \times 10^{-7} \text{ m}$	ویروس کوچک 
بسیار بزرگ‌تر از اتم‌ها	حدود $1 \times 10^{-5} \text{ m}$	حجره انسانی 

فعالیت عملی: مقایسه مقیاس هسته و اتم

هدف: درک تفاوت بسیار زیاد میان اندازه هسته و اندازه اتم.

- یک توپ کوچک را به عنوان هسته در نظر بگیرید.
 - توضیح دهید که اگر هسته به اندازه توپ باشد، اندازه اتم می‌تواند به اندازه یک میدان بزرگ تصور شود.
 - از شاگردان بخواهید توضیح دهند چرا بیشتر حجم اتم فضای خالی است.
- نتیجه: هسته بسیار کوچک‌تر از اتم است، اما تقریباً تمام کتله اتم در هسته قرار دارد.

تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. قطر یک اتم $1 \times 10^{-10} \text{ m}$ و قطر هسته $1 \times 10^{-15} \text{ m}$ است. اتم چند برابر بزرگ‌تر از هسته است؟
۲. اگر شعاع هسته $4 \times 10^{-15} \text{ m}$ باشد، قطر هسته را حساب کنید.
۳. برای اتمی با عدد کتله‌ای $A=27$ و عدد اتمی $Z=13$ ، تعداد نوترون‌ها را محاسبه کنید.
۴. برای ایزوتوپ $^{35}_{17}\text{Cl}$ تعداد پروتون، نوترون و الکترون را در اتم خنثی بنویسید.
۵. اگر کتله تقریبی هر پروتون و نوترون 1 u باشد، کتله تقریبی هسته ^{23}Na را حساب کنید.
۶. اگر اندازه یک مالیکول $2 \times 10^{-9} \text{ m}$ و اندازه یک اتم $1 \times 10^{-10} \text{ m}$ باشد، مالیکول چند برابر بزرگ‌تر از اتم است؟
۷. اگر قطر اتم را به مقیاس 100 m بزرگ کنیم، قطر هسته در همان مقیاس تقریباً چقدر می‌شود؟
۸. یک سوال کوتاه: چرا در محاسبات ابتدایی، کتله الکترون نسبت به پروتون و نوترون نادیده گرفته می‌شود؟

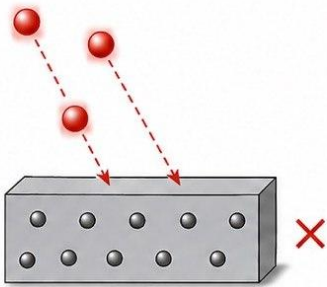
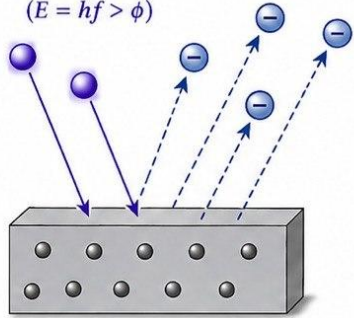
۳.۱ خواص کوانتومی اتم‌ها و اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک یکی از مهم‌ترین شواهد برای ذره‌ای بودن نور است. قبل از نظریه کوانتومی، انتظار می‌رفت اگر شدت نور زیاد شود، الکترون‌ها دیر یا زود از فلز خارج شوند. اما آزمایش نشان داد که اگر فریکونسی نور کمتر از مقدار آستانه باشد، حتی نور بسیار شدید هم نمی‌تواند الکترون آزاد کند.

این نتیجه نشان می‌دهد که انرژی نور به شکل بسته‌های جداگانه، یعنی فوتون‌ها، منتقل می‌شود. هر فوتون باید به تنهایی انرژی کافی داشته باشد تا الکترون را از فلز جدا کند. اگر انرژی هر فوتون کم باشد، زیاد بودن تعداد فوتون‌ها مشکل را حل نمی‌کند.

وقتی فریکونسی نور بالاتر از آستانه باشد، الکترون‌ها فوراً آزاد می‌شوند. اگر شدت نور افزایش یابد، تعداد فوتون‌ها افزایش می‌یابد و معمولاً تعداد الکترون‌های خارج شده بیشتر می‌شود. اما انرژی جنبشی بیشینه الکترون‌ها بیشتر به فریکونسی نور وابسته است، نه شدت نور.

اثر فوتوالکتریک

1 فریکونسی کمتر از آستانه	2 فریکونسی بالاتر از آستانه	نکات کلیدی
فوتون‌های کم انرژی ($E = hf < \phi$)  هیچ الکترونی خارج نمی‌شود. حتی نور شدید هم الکترون آزاد نمی‌کند.	فوتون‌های پر انرژی ($E = hf > \phi$)  هر فوتون پر انرژی می‌تواند یک الکترون را آزاد کند.	انرژی فوتون: $E = hf$ h: ثابت پلانک 1 نور به صورت فوتون‌های جداگانه انرژی را منتقل می‌کند. 2 هر فوتون باید به تنهایی انرژی کافی داشته باشد. 3 شدت بیشتر → فوتون‌های بیشتر → الکترون‌های بیشتر 4 فریکونسی بیشتر → انرژی هر فوتون بیشتر



اثر فوتوالکتریک ماهیت ذره‌ای نور را نشان می‌دهد.

کاربرد پیشرفته: صفحات خورشیدی و سنسورهای نوری بر پایه تعامل نور با الکترون‌ها کار می‌کنند. در این وسایل، انرژی فوتون‌ها باعث حرکت یا آزاد شدن الکترون‌ها و ایجاد جریان الکتریکی می‌شود. در فیزیک کلاسیک تصور می‌شد انرژی به شکل پیوسته انتقال می‌یابد. اما نظریه کوانتومی نشان داد که انرژی در مقیاس اتمی به شکل بسته‌های کوچک و جداگانه منتقل می‌شود. به هر بسته انرژی، کوانتوم گفته می‌شود. در مورد نور، این بسته‌های انرژی را فوتون می‌نامیم.

انرژی فوتون به فریکونسی نور وابسته است. رابطه آن چنین است:

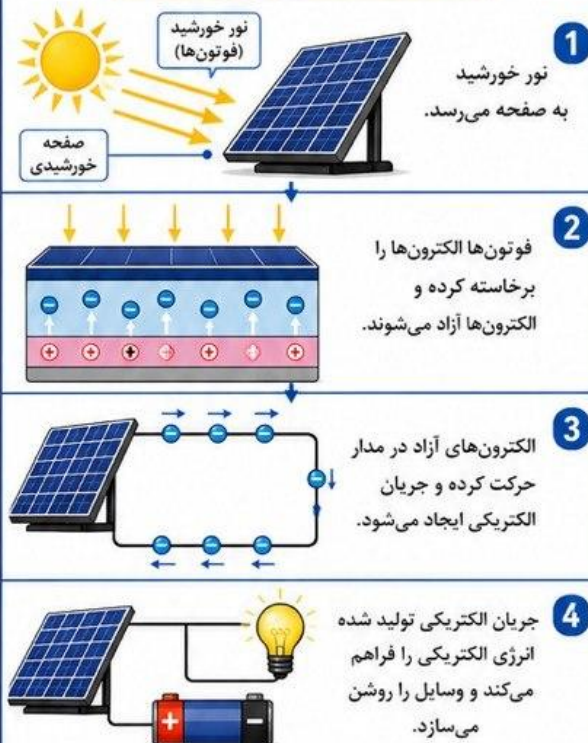
$$E = hf$$

در این رابطه، E انرژی فوتون، h ثابت پلانک و f فریکونسی نور است. هر قدر فریکونسی نور بیشتر باشد، انرژی هر فوتون بیشتر است. برای مثال، نور بنفش نسبت به نور سرخ فوتون‌های پر انرژی‌تری دارد، چون فریکونسی آن بیشتر است. یکی از شواهد مهم

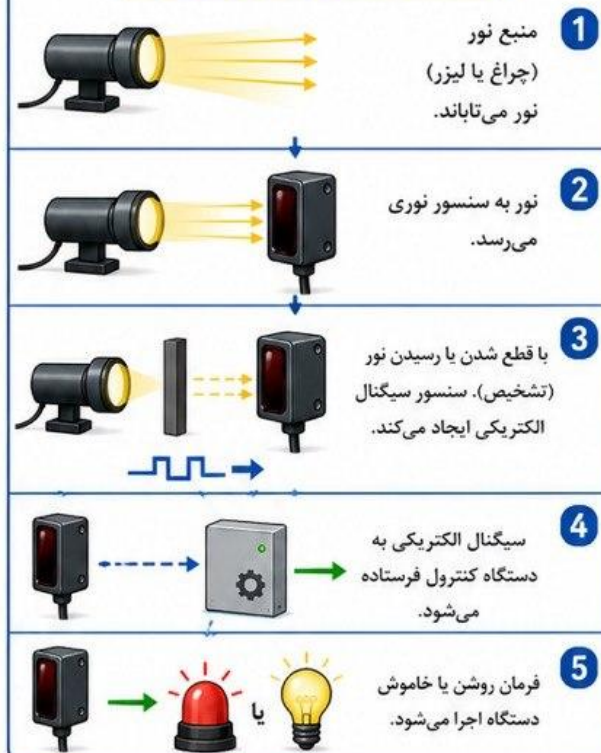
نظریه کوانتومی، اثر فوتوالکتریک است. اثر فوتوالکتریک زمانی رخ می‌دهد که نور با انرژی کافی به سطح یک فلز برخورد کند و الکترون‌ها را از سطح فلز بیرون کند. نکته مهم این است که فقط نوری می‌تواند الکترون آزاد کند که فریکونسی آن از مقدار مشخصی بیشتر باشد. این مقدار را فریکونسی آستانه می‌نامند. اگر فریکونسی نور کمتر از فریکونسی آستانه باشد، حتی افزایش شدت نور هم باعث آزاد شدن الکترون نمی‌شود. اما اگر فریکونسی نور از آستانه بیشتر باشد، افزایش شدت نور باعث آزاد شدن تعداد بیشتری الکترون می‌شود.

کاربردهای اثر فوتوالکتریک

(۱) صفحات خورشیدی



(۲) سنسورهای نوری



(۳) دوربین‌های دیجیتال



(۴) دروازه‌های خودکار



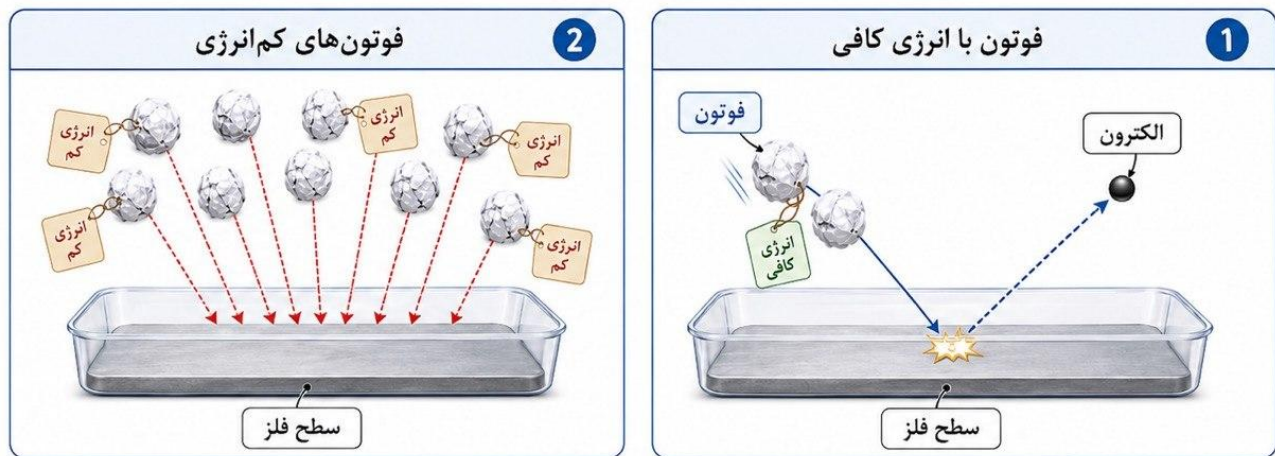
نور می‌تواند به سیگنال یا انرژی الکتریکی تبدیل شود.



- ۱: چون انرژی فوتون از رابطه $E = hf$ به دست می آید، اگر فریکونسی دو برابر شود، انرژی هر فوتون نیز دو برابر می شود.
- ۲: نور سرخ فریکونسی پایین تری دارد، پس انرژی هر فوتون آن کمتر است. اگر انرژی فوتون کمتر از انرژی لازم برای آزاد کردن الکترون باشد، الکترون از فلز جدا نمی شود.
- ۳: اگر فریکونسی نور از فریکونسی آستانه بیشتر باشد، افزایش شدت نور تعداد فوتون ها را بیشتر می کند و در نتیجه تعداد الکترون های آزاد شده افزایش می یابد. اما اگر فریکونسی کمتر از آستانه باشد، افزایش شدت نور هیچ الکترونی آزاد نمی کند.
- ۴: شدت نور مربوط به تعداد فوتون ها است، اما انرژی هر فوتون به فریکونسی بستگی دارد. بنابراین نور شدید اما کم فریکونسی ممکن است نتواند الکترون آزاد کند.

مدل اثر فوتوالکتریک

فعالیت عملی ایمن



هدف: درک این که برای آزاد شدن الکترون، انرژی هر فوتون باید کافی باشد.



- روش کار:**
- توپ های کاغذی را فوتون فرض کنید.
 - ظرف را سطح فلز فرض کنید.
 - فقط فوتون های با انرژی کافی می توانند الکترون را بیرون کنند.
 - تعداد زیاد فوتون های کم انرژی کافی نیست.



نتیجه: برای آزاد شدن الکترون، انرژی هر فوتون باید از حد آستانه بیشتر باشد.



تمرین های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. اگر $f = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ و $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ باشد، انرژی فوتون را با رابطه $E = hf$ حساب کنید.

$$\text{حل: } E = 6.63 \times 10^{-34} \times 6 \times 10^{14} = 3.978 \times 10^{-19} \text{ J} \approx 4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$$

جواب: انرژی فوتون تقریباً $4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ است.

۲. اگر انرژی آستانه فلز $3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ باشد، آیا فوتون با انرژی $2.5 \times 10^{-19} \text{ J}$ می تواند الکترون آزاد کند؟

حل: چون $2.5 \times 10^{-19} \text{ J} < 3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ ، انرژی فوتون کافی نیست.

۳. اگر انرژی فوتون $4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ و انرژی آستانه فلز $3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی بیشینه الکترون آزاد شده را حساب کنید.

$$\text{حل: } K.E. = 4.0 \times 10^{-19} - 3.2 \times 10^{-19} = 8.0 \times 10^{-20} \text{ J}$$

جواب: انرژی جنبشی بیشینه الکترون $8.0 \times 10^{-20} \text{ J}$ است.

۴. فوتونی انرژی $6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$ دارد. فریکونسی آن را با رابطه $f = E / h$ حساب کنید. $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$$\text{حل: } f = 6.63 \times 10^{-19} \div 6.63 \times 10^{-34} = 1 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

جواب: فریکونسی فوتون $1 \times 10^{15} \text{ Hz}$ است.

۵. اثر شدت نور: اگر شدت نور دو برابر شود، اما فریکونسی نور کمتر از فریکونسی آستانه باشد، آیا الکترونی آزاد می‌شود؟

حل: شدت نور تعداد فوتون‌ها را زیاد می‌کند، اما انرژی هر فوتون را زیاد نمی‌کند.

جواب: نخیر، تعداد الکترون‌های آزاد شده 0 است

۴.۱ ماهیت دوگانه ماده و انرژی: موج. ذره

یکی از مفاهیم مهم در فیزیک کوانتومی این است که نور و ذرات بسیار کوچک ماده می‌توانند در شرایط مختلف، رفتارهای متفاوت نشان دهند. گاهی مانند موج رفتار می‌کنند و گاهی مانند ذره. این پدیده را دوگانگی موج. ذره می‌نامیم. دوگانگی موج. ذره به این معنا نیست که یک ذره همزمان دقیقاً مانند یک توپ و یک موج آب رفتار می‌کند. معنای درست‌تر آن این است که رفتار مشاهده شده به نوع آزمایش و روش اندازه‌گیری بستگی دارد. در سطح اتمی و زیراتمی، ذرات همیشه مانند اجسام روزمره رفتار نمی‌کنند؛ به همین دلیل، برای توضیح رفتار آن‌ها به مفاهیم کوانتومی نیاز داریم. نور در پدیده‌هایی مانند تداخل و پراش رفتار موجی نشان می‌دهد. تداخل زمانی رخ می‌دهد که دو موج با هم ترکیب شوند و در بعضی جاها همدیگر را تقویت و در بعضی جاها تضعیف کنند. پراش زمانی رخ می‌دهد که موج از یک شکاف باریک عبور کند و پخش شود. اما نور در اثر فوتوالکتریک مانند ذره رفتار می‌کند. در این پدیده، نور انرژی خود را به شکل بسته‌های جداگانه به نام فوتون به الکترون‌ها منتقل می‌کند. هر فوتون باید انرژی کافی داشته باشد تا بتواند الکترون را از سطح فلز آزاد کند. ذرات ماده مانند الکترون نیز می‌توانند رفتار موجی داشته باشند. برای مثال، الکترون هنگام برخورد با آشکارساز مانند یک ذره ثبت می‌شود، اما وقتی از شکاف‌های بسیار کوچک عبور کند، می‌تواند الگوی تداخلی ایجاد کند. این نشان می‌دهد که دوگانگی موج. ذره فقط مربوط به نور نیست، بلکه برای ذرات کوچک ماده نیز صدق می‌کند. دانشمندی به نام لوئی دوبروی پیشنهاد کرد که هر ذره متحرک می‌تواند طول موج داشته باشد. رابطه دوبروی چنین است:

$$\lambda = h / p$$

در این رابطه:

λ طول موج ذره

h ثابت پلانک

p مومنتم ذره

طبق این رابطه، اگر مومنتم یک جسم زیاد باشد، طول موج آن بسیار کوچک می‌شود. به همین دلیل، خاصیت موجی اجسام بزرگ مانند توپ، بایسکل یا موتر قابل مشاهده نیست. اما برای ذرات بسیار کوچک مانند الکترون، طول موج به اندازه‌ای است که اثر آن در آزمایش‌ها دیده می‌شود.

کاربرد علمی:

یکی از کاربردهای مهم دوگانگی موج، ذره، میکروسکوپ الکترونی است. در این دستگاه از الکترون‌ها به جای نور استفاده می‌شود. چون طول موج الکترون‌ها بسیار کوتاه‌تر از نور مرئی است، میکروسکوپ الکترونی می‌تواند جزئیات بسیار کوچک‌تر را نشان دهد. به همین دلیل، برای دیدن ساختارهای بسیار ریز مانند ویروس‌ها، سطح حجرات و مواد نانویی از میکروسکوپ الکترونی استفاده می‌شود.

نکات مهم سطح دو

- ۱: نور می‌تواند تداخل و پراش نشان دهد. این رفتارها نشان می‌دهند که نور خاصیت موجی دارد.
- ۲: در اثر فوتوالکتریک، نور مانند فوتون‌های جداگانه رفتار می‌کند. هر فوتون مقدار مشخصی انرژی دارد و می‌تواند به یک الکترون انرژی بدهد.
- ۳: طبق رابطه دوبروی $\lambda = h / p$ ، توپ فوتبال کتله و مومنتم بسیار زیادی دارد، بنابراین طول موج آن بسیار بسیار کوچک است و نمی‌توان آن را مشاهده کرد. اما الکترون کتله بسیار کمی دارد، پس طول موج آن می‌تواند قابل مشاهده و اندازه‌گیری باشد.
- ۴: در میکروسکوپ الکترونی از خاصیت موجی الکترون استفاده می‌شود. چون طول موج الکترون بسیار کوتاه‌تر از نور مرئی است، میکروسکوپ الکترونی می‌تواند ساختارهای بسیار کوچک‌تر را نشان دهد.

فعالیت عملی: مدل تداخل موجی

هدف: مشاهده ساده رفتار موجی و تداخل.

1		دو سنگ کوچک را همزمان در دو نقطه نزدیک داخل آب بیندازید.
2		موج‌های ایجادشده را مشاهده کنید.
3		در بعضی نقاط موج‌ها همدیگر را تقویت و در بعضی نقاط تضعیف می‌کنند. تداخل سازنده (تقویت) + تداخل ویرانگر (تضعیف) -
4	نور (موج الکترومغناطیسی) نور می‌تواند تداخل ایجاد کند (مانند آزمایش شکاف دوگانه). الکترون (ذره میکروسکوپی) الکترون نیز در شرایط خاص رفتار موجی نشان می‌دهد (مانند آزمایش شکاف دوگانه).	این پدیده را با رفتار موجی نور و الکترون مقایسه کنید.

نتیجه: موج‌ها می‌توانند تداخل کنند. نور و ذرات کوچک مانند الکترون نیز در شرایط خاص می‌توانند رفتار موجی نشان دهند.

تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. محاسبه طول موج دوبروی: اگر مومنتم الکترون $3.3 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$ باشد، طول موج دوبروی آن را با رابطه $\lambda = h / p$ حساب کنید. $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$

حل: $\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \div 3.3 \times 10^{-24} \approx 2.0 \times 10^{-10} \text{ m}$

جواب: طول موج دوبروی الکترون تقریباً $2.0 \times 10^{-10} \text{ m}$ است.

۲. اثر تغییر مومنتم: اگر مومنتم یک ذره دو برابر شود، طول موج دوبروی آن چه تغییری می‌کند؟

حل: چون $\lambda = h / p$ است، طول موج با مومنتم رابطه معکوس دارد.

جواب: با دو برابر شدن مومنتم، طول موج نصف می‌شود.

۳. محاسبه مومنتم از طول موج: اگر طول موج یک ذره $2 \times 10^{-10} \text{ m}$ باشد، مومنتم آن را با رابطه $p = h / \lambda$ حساب کنید.

حل: $p = 6.63 \times 10^{-34} \div 2 \times 10^{-10} = 3.315 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$

جواب: مومنتم ذره $3.315 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$ است.

۴. مقایسه الکترون و جسم بزرگ: یک موتر با کتله 1000 kg و سرعت 20 m/s حرکت می‌کند. مومنتم و طول موج دوبروی آن را حساب کنید.

حل: $sp = mv = 1000 \times 20 = 20000 \text{ kg m/}$ ، پس $\lambda = 6.63 \times 10^{-34} \div 20000 \approx 3.3 \times 10^{-38} \text{ m}$

جواب: طول موج موثر بسیار کوچک است، پس رفتار موجی آن قابل مشاهده نیست.

۵. کاربرد در مایکروسکوپ الکترونی: اگر طول موج الکترون کمتر شود، قدرت تفکیک مایکروسکوپ الکترونی چگونه تغییر می کند؟

جواب: قدرت تفکیک بهتر می شود، چون طول موج کوتاه تر می تواند جزئیات کوچک تر را نشان دهد.

:چون الکترون کتله و مومنت بسیار کمتری دارد، پس طول موج دوبروی آن بزرگ تر و قابل مشاهده تر است.

۵.۱ کاربرد اشعه ایکس و تابش الکترومقناطیسی در طبابت و امنیت

تابش های الکترومقناطیسی از نظر ماهیت یکسان اند، اما فریکونسی و طول موج متفاوت دارند. هر قدر فریکونسی بیشتر باشد، انرژی فوتون بیشتر می شود. به همین دلیل، اشعه ایکس و گاما نسبت به نور مرئی توانایی بیشتری برای یون سازی و آسیب به حشرات دارند. در تصویربرداری X-ray، تفاوت جذب تابش توسط بافت ها باعث تشکیل تصویر می شود. استخوان ها به دلیل داشتن مواد معدنی مانند کلسیم، اشعه ایکس را بیشتر جذب می کنند. بافت نرم، مانند عضله و چربی، اشعه را بیشتر عبور می دهد. به همین دلیل، استخوان ها در تصویر واضح تر دیده می شوند در CT Scan، دستگاه از زاویه های مختلف اشعه ایکس می فرستد و کمپیوتر از این معلومات تصویر مقطعی می سازد. این روش برای تشخیص خونریزی داخلی، آسیب های مغزی، تومورها و شکستگی های پیچیده مفید است، اما چون دوز تابش بیشتر است باید با ضرورت طبی انجام شود در امنیت، دستگاه های X-ray با تحلیل میزان جذب تابش توسط مواد مختلف، اشیای فلزی، مواد عضوی و وسایل مشکوک را تشخیص می دهند. اصل علمی در هر دو کاربرد طبی و امنیتی یکی است: مواد مختلف تابش را به مقدار متفاوت جذب می کنند.

تابش الکترومقناطیسی شامل انواع مختلف موج ها است که همه با سرعت نور حرکت می کنند، اما فریکونسی، طول موج و انرژی متفاوت دارند. طیف الکترومقناطیسی از موج های رادیویی با انرژی کم شروع می شود و تا اشعه گاما با انرژی بسیار زیاد ادامه می یابد. اشعه ایکس یکی از انواع پراثری تابش الکترومقناطیسی است. این تابش می تواند از بعضی مواد عبور کند، اما توسط مواد متراکم تر بیشتر جذب می شود. به همین دلیل، در تصویربرداری طبی کاربرد زیادی دارد. در عکس استخوان ها معمولاً روشن تر دیده می شوند، چون استخوان ها نسبت به بافت نرم متراکم ترند و کلسیم بیشتری دارند X-ray، این ویژگی باعث می شود استخوان ها اشعه ایکس را بیشتر جذب کنند بنابراین اشعه کمتری به صفحه تصویر یا آشکارساز می رسد و استخوان روشن تر دیده می شود در CT Scan نیز از اشعه ایکس استفاده می شود، اما دستگاه از زاویه های مختلف تصویر می گیرد و کمپیوتر تصاویر مقطعی دقیق تر می سازد CT Scans. جزئیات بیشتری نسبت به X-ray ساده نشان می دهد، اما معمولاً دوز تابش آن بیشتر است.

در امنیت میدان های هوایی، از اشعه ایکس برای بررسی بکس ها و بسته ها استفاده می شود. چون مواد مختلف اشعه ایکس را به مقدار متفاوت جذب می کنند، دستگاه می تواند اجسام فلزی، مواد عضوی و اشیای مشکوک را از هم تشخیص دهد.

1

استخوان روشن تر



2

تصویر مقطعی دقیق‌تر



بررسی بکس‌ها و بسته‌ها

طول موج بلند
← فرکانس کم

طول موج کوتاه
→ فرکانس زیاد

نوع تابش	موج رادیویی	مایکروویو	مادون سرخ	نور مرئی	فرا بنفش	اشعه ایکس	اشعه کاما
انرژی	کم	کم تا متوسط	متوسط	متوسط	زیادتر	زیاد	بسیار زیاد
کاربرد	رادیو و مخابرات	پختن غذا و ارتباطات	ریموت و تصویربرداری حرارتی	دیدن اشیاء	ضد عفونی و اثر بر پوست	تصویربرداری طبی و امنیت	درمان سرطان و رادیواکتیویته

نوت: برای فهم عمیق تر این بخش به فصل پنجم مراجعه بفرمایید.

نکات مهم سطح دو

۱. تصویر X-ray: استخوان متراکم تر از بافت نرم است و اشعه ایکس را بیشتر جذب می کند. بنابراین اشعه کمتری از استخوان عبور می کند و در تصویر، استخوان روشن تر دیده می شود.
۲. CT Scan: در CT Scan جزئیات بیشتری نسبت به X-ray ساده دیده می شود، اما مقدار تابش یا دوز آن معمولاً بیشتر است. بنابراین فقط زمانی استفاده می شود که نیاز به معلومات دقیق تر وجود داشته باشد.
۳. امنیت میدان هوایی: در دستگاه های امنیتی، فلزات و مواد متراکم اشعه ایکس را بیشتر جذب می کنند و در تصویر واضح تر دیده می شوند. این موضوع به تشخیص وسایل خطرناک یا مشکوک کمک می کند.
۴. اصل ایمنی در طبابت: در طبابت، باید از کمترین دوز تابش برای گرفتن معلومات کافی استفاده شود. این کار خطر آسیب به حجرات بدن را کاهش می دهد.

فعالیت عملی: تحلیل تصویر X-ray



1 

بخش های روشن را
مشخص کنید.

.....

2 

بخش های تاریک را
مشخص کنید.

.....

1 

بخش های روشن را
مشخص کنید.

.....

نتیجه: مواد متراکم تر اشعه ایکس را بیشتر جذب می کنند و روشن تر دیده می شوند.



تمرین های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. فوتون X-ray فریکوئسی $3 \times 10^{17} \text{ Hz}$ دارد. انرژی آن را با رابطه $E = hf$ حساب کنید. $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$
- حل: $E = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{17} = 1.989 \times 10^{-16} \text{ J} \approx 2.0 \times 10^{-16} \text{ J}$
- جواب: انرژی فوتون X-ray تقریباً $2.0 \times 10^{-16} \text{ J}$ است.
۲. در یک تصویر X-ray، 80% تابش از بافت نرم عبور می کند، اما فقط 20% از استخوان عبور می کند. تفاوت فیصدی عبور را حساب کنید.

حل: $80\% - 20\% = 60\%$

{ 53 }

جواب: تفاوت عبور تابش 60 واحد فیصدی است.

۳. اگر یک X-ray ساده دوز 0.1 mSv و یک CT Scan دوز 5 mSv داشته باشد، CT Scan چند برابر دوز بیشتر دارد؟

$$\text{حل: } 5 \div 0.1 = 50$$

جواب: دوز CT Scan حدود 50 برابر بیشتر است.

۴. اگر محافظ تابش را از 1000 شمارش در دقیقه به 250 شمارش در دقیقه کاهش دهد، تابش چند فیصد کاهش یافته است؟

$$\text{حل: کاهش } 75\% = 100 \times 1000 \div 750 = 750, 1000 - 250 = 750$$

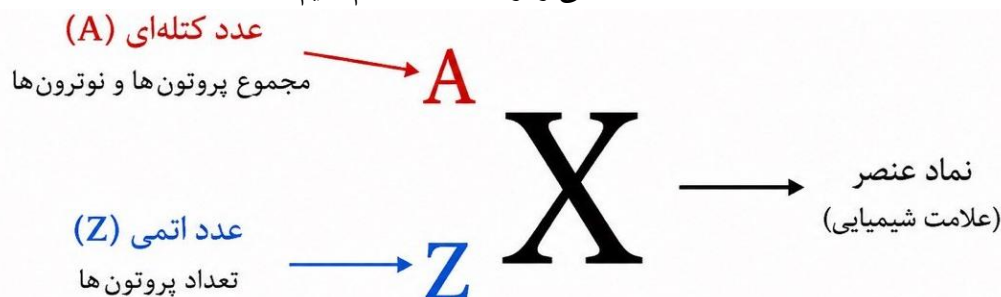
جواب: تابش 75% کاهش یافته است.

۵. چرا در تصویربرداری طبی باید از کمترین دوز مؤثر استفاده شود؟

جواب: برای کاهش خطر آسیب به حجرات و DNA، در حالی که تصویر کافی برای تشخیص به دست آید.

۱.۲ پروتون‌ها، نوترون‌ها، ایزوتوپ‌ها و معادلات هسته‌ای

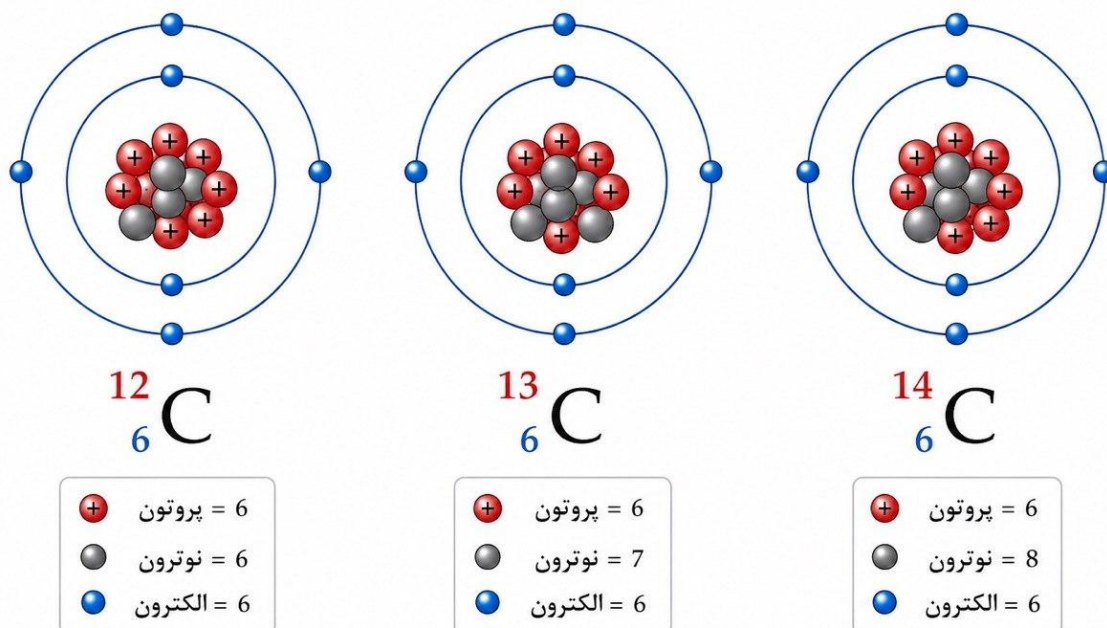
عدد اتمی مهم‌ترین مشخصه یک عنصر است. اگر عدد اتمی تغییر کند، عنصر تغییر می‌کند. برای مثال، کربن همیشه ۶ پروتون دارد. اگر یک پروتون به آن اضافه شود، دیگر کربن نیست و به نایترجن تبدیل می‌شود. عدد کتله‌ای مجموع پروتون‌ها و نوترون‌ها است. چون الکترون‌ها کتله بسیار کمی دارند، در عدد کتله‌ای حساب نمی‌شوند. برای پیدا کردن تعداد نوترون‌ها کافی است عدد اتمی را از عدد کتله‌ای کم کنیم.



ایزوتوپ‌ها در طبیعت بسیار مهم‌اند. بعضی ایزوتوپ‌ها پایدارند، مانند کربن-۱۲؛ بعضی دیگر ناپایدار و رادیواکتیف‌اند، مانند کربن-۱۴. از کربن-۱۴ برای تاریخ‌گذاری بقایای گیاهی و حیوانی قدیمی استفاده می‌شود، چون مقدار آن با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در معادلات هسته‌ای باید قانون بقای عدد کتله‌ای و قانون بقای بار رعایت شود. یعنی مجموع عددهای بالا و مجموع عددهای پایین در دو طرف معادله باید برابر باشند. هسته اتم از پروتون‌ها و نوترون‌ها ساخته شده است. پروتون بار مثبت دارد، نوترون بدون بار است و الکترون بار منفی دارد. تعداد پروتون‌ها در هسته هویت عنصر را تعیین می‌کند. برای مثال، هر اتمی که ۶ پروتون داشته باشد، کربن است. اگر تعداد پروتون‌ها تغییر کند، عنصر نیز تغییر می‌کند. تعداد پروتون‌ها را عدد اتمی می‌نامند و با نماد Z نشان می‌دهند. مجموع تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها را عدد کتله‌ای می‌نامند و با نماد A نشان می‌دهند. رابطه آن چنین است: $A = Z + N$.

ایزوتوپ‌ها اتم‌های یک عنصر هستند که تعداد پروتون‌های یکسان، اما تعداد نوترون‌های متفاوت دارند. چون تعداد پروتون‌ها در ایزوتوپ‌های یک عنصر یکسان است، خواص شیمیایی آن‌ها بسیار مشابه است. اما چون تعداد نوترون‌ها فرق دارد، کتله

ایزوتوپ‌های کربن



نکات مهم سطح دو

تشخیص ایزوتوپ‌ها:

$^{12}_6\text{C}$ و $^{14}_6\text{C}$ هر دو عدد اتمی 6 دارند، پس هر دو اتم کربن هستند. اما کربن-12 دارای 6 نوترون و کربن-14 دارای 8 نوترون است. بنابراین، این دو اتم ایزوتوپ‌های کربن هستند.

محاسبه تعداد نوترون‌ها:

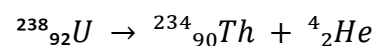
اورانیم-235 دارای عدد اتمی 92 است. تعداد نوترون‌های آن را حساب کنید.

$$\text{حل: } N = A - Z = 235 - 92 = 143$$

جواب: اورانیم-235 دارای 143 نوترون است.

نشر آلفا:

اورانیم-238 ذره آلفا نشر می‌کند:



در نشر آلفا، عدد کتله‌ای 4 واحد کم می‌شود و عدد اتمی 2 واحد کاهش می‌یابد. بنابراین، اورانیم به توریم تبدیل می‌شود.



فعالیت عملی: ساخت ایزوتوپ‌ها



مواد مورد نیاز: دانه‌های سرخ (برای پروتون‌ها)، دانه‌های خاکستری (برای نوترون‌ها).
دستورالعمل: دانه‌ها را در مرکز دایره قرار دهید تا هسته اتم کربن را بسازید.

① کربن-12

پروتون
(سرخ)

نوترون
(خاکستری)

6 پروتون

6 نوترون

② کربن-13

پروتون
(سرخ)

نوترون
(خاکستری)

6 پروتون

7 نوترون

③ کربن-14

پروتون
(سرخ)

نوترون
(خاکستری)

6 پروتون

8 نوترون

نوترون	پروتون	ایزوتوپ
6	6	کربن-12
7	6	کربن-13
8	6	کربن-14

نتیجه: با تغییر تعداد نوترون‌ها، ایزوتوپ تغییر می‌کند؛ اما با ثابت ماندن تعداد پروتون‌ها، عنصر همان کربن باقی می‌ماند.



تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. تعداد ذرات زیراتمی: برای اتم خنثای $^{238}_{92}\text{U}$ تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها را حساب کنید.

حل: پروتون = 92، نوترون = 146، $238 - 92 = 146$ الکترون در اتم خنثی = 92

جواب: 92 پروتون، 146 نوترون و 92 الکترون دارد.

۲. مقایسه ایزوتوپ‌ها: برای $^{14}_6\text{C}$ تعداد نوترون‌ها را حساب کنید و آن را با $^{12}_6\text{C}$ مقایسه کنید.

حل: کربن-14: $14 - 6 = 8$ ، کربن-12: $12 - 6 = 6$ ، $N = 14 - 6 = 8$

جواب: کربن-14 دو نوترون بیشتر از کربن-12 دارد.

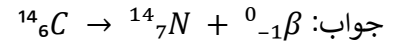
۳. نشر آلفا: معادله نشر آلفا را کامل کنید: $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow \text{---} + ^4_2\text{He}$

حل: در نشر آلفا، عدد کتله‌ای 4 واحد و عدد اتمی 2 واحد کم می‌شود.

جواب: $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$

۴. نشر بتا منفی: معادله نشر بتا منفی را کامل کنید: $^{14}_6\text{C} \rightarrow \text{---} + ^0_{-1}\beta$

حل: در نشر بیتا منفی، عدد کتله‌ای ثابت می‌ماند و عدد اتمی 1 واحد زیاد می‌شود.



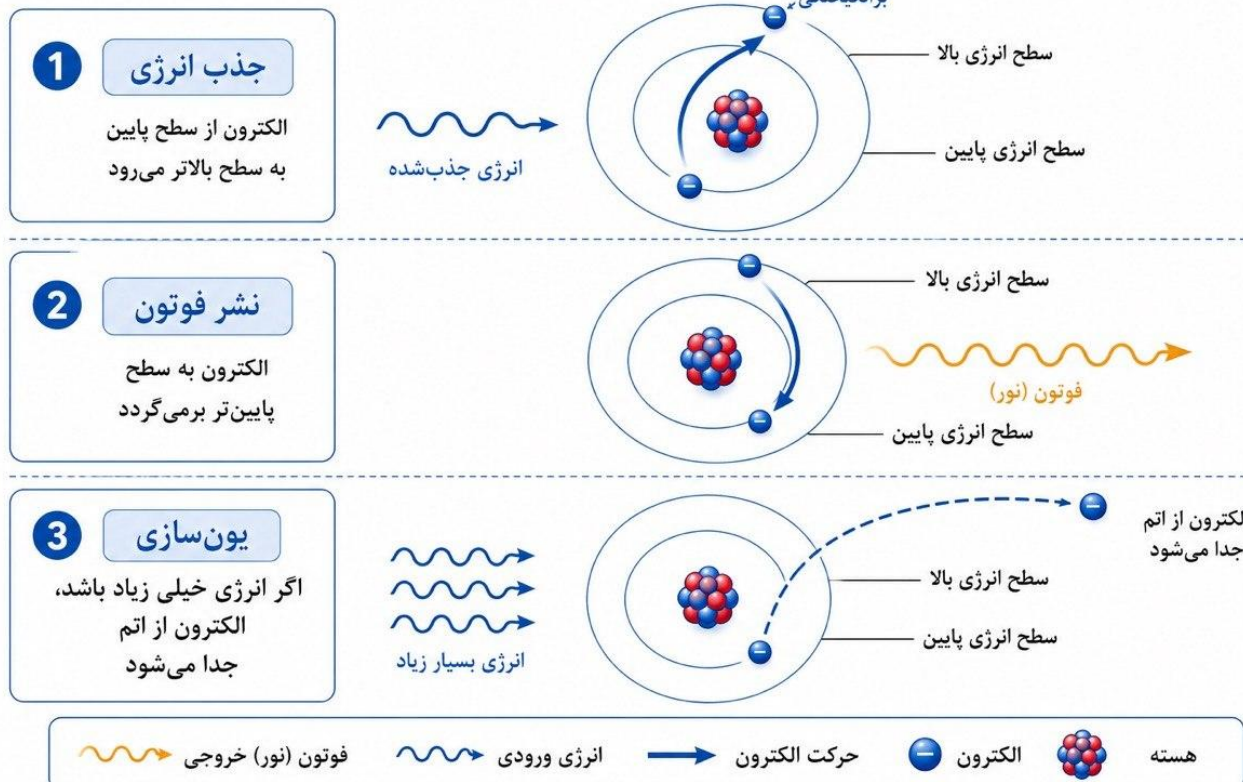
۵. عدد اتمی و هویت عنصر: چرا تغییر عدد اتمی باعث تغییر نام عنصر می‌شود؟

جواب: چون عدد اتمی تعداد پروتون‌ها را نشان می‌دهد و تعداد پروتون‌ها هویت عنصر را تعیین می‌کند

۲.۲ یون‌سازی، جذب و نشر تابش مربوط به تغییرات الکترونی

سطح‌های انرژی الکترون‌ها پیوسته نیستند، بلکه گسسته‌اند. این یعنی الکترون نمی‌تواند هر مقدار انرژی دلخواه داشته باشد، بلکه فقط مقدارهای مشخصی برای آن مجاز است. این ویژگی یکی از تفاوت‌های اساسی فیزیک کوانتومی با فیزیک کلاسیک است. وقتی الکترون انرژی جذب می‌کند، فقط در صورتی به سطح بالاتر می‌رود که انرژی جذب‌شده دقیقاً برابر تفاوت دو سطح انرژی باشد. اگر انرژی کافی نباشد یا با تفاوت انرژی مطابقت نداشته باشد، انتقال رخ نمی‌دهد. وقتی الکترون از سطح بالاتر به سطح پایین‌تر برمی‌گردد، فوتونی با انرژی مشخص نشر می‌کند. چون هر عنصر ساختار انرژی خاص خود را دارد، طیف نشری هر عنصر منحصر به فرد است. به همین دلیل، دانشمندان می‌توانند از طیف نور ستاره‌ها برای تشخیص عناصر موجود در آن‌ها استفاده کنند. یون‌سازی زمانی رخ می‌دهد که الکترون کاملاً از اتم جدا شود. تابش‌های پرانرژی مانند اشعه ایکس و گاما می‌توانند یون‌سازی ایجاد کنند و به مالیکول‌های حیاتی مانند DNA آسیب برسانند. الکترون‌ها در اتم فقط می‌توانند در سطح‌های انرژی مشخص قرار بگیرند. وقتی یک الکترون انرژی جذب می‌کند، می‌تواند از سطح انرژی پایین‌تر به سطح انرژی بالاتر برود. این حالت را برانگیختگی می‌نامند. الکترون در سطح انرژی بالا معمولاً پایدار نیست. پس بعد از مدت کوتاهی دوباره به سطح انرژی پایین‌تر برمی‌گردد و انرژی اضافی را به شکل یک فوتون نشر می‌کند. انرژی فوتون نشرشده برابر با تفاوت انرژی میان دو سطح است. اگر الکترون انرژی بسیار زیادی جذب کند، ممکن است کاملاً از اتم جدا شود. در این حالت، اتم به یون مثبت تبدیل می‌شود. این روند را یون‌سازی می‌نامند.

انتقال الکترون میان سطح‌های انرژی



پدیده	توضیح	نتیجه
جذب	الکترون انرژی می گیرد	رفتن به سطح انرژی بالاتر
نشر	الکترون به سطح پایین تر برمی گردد	آزاد شدن فوتون
یون سازی	الکترون از اتم جدا می شود	تشکیل یون مثبت

نکات مهم سطح دو

- ۱: وقتی الکترون انرژی جذب می کند، به سطح انرژی بالاتر منتقل می شود. اما این انتقال فقط زمانی رخ می دهد که انرژی جذب شده دقیقاً برابر با تفاوت انرژی میان دو سطح باشد.
- ۲: وقتی الکترون از سطح انرژی بالا به پایین برمی گردد، فوتونی با انرژی مشخص نشر می کند. به همین دلیل، اتم ها طیف خطی مشخص دارند.
- ۳: هر عنصر سطح های انرژی مخصوص خود را دارد. بنابراین هر عنصر فوتون هایی با انرژی های مشخص نشر می کند. به همین دلیل، طیف خطی هر عنصر مانند اثر انگشت آن عنصر است.
- ۴: طیف هاییدروجن و هیلیم فرق دارد، چون ساختار هسته و ترتیب سطح های انرژی الکترون ها در آنها متفاوت است. بنابراین انرژی فوتون های نشر شده نیز متفاوت خواهد بود.

فعالیت عملی: مدل سطح انرژی

1 سطح‌های انرژی هر کتاب نماینده یک سطح انرژی است.	2 جذب انرژی توپ از سطح پایین به سطح بالا می‌رود. انرژی جذب می‌شود.	3 نشر انرژی توپ از سطح بالا به پایین برمی‌گردد. انرژی آزاد می‌شود.	4 نمی‌تواند بین سطح‌ها بماند الکترون فقط در سطح‌های مشخص قرار می‌گیرد.
--	---	---	---

نتیجه: الکترون‌ها فقط در سطح‌های انرژی مشخص قرار می‌گیرند و هنگام جابه‌جایی میان سطح‌ها انرژی جذب یا نشر می‌کنند.



تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. اگر الکترون از سطح انرژی 5.0 eV به سطح انرژی 2.0 eV برگردد، انرژی فوتون نشرشده چند eV است؟

$$\text{حل: } E = 5.0 - 2.0 = 3.0 \text{ eV}$$

جواب: انرژی فوتون نشرشده 3.0 eV است.

۲. انرژی فوتون نشرشده $3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ باشد، فریکوانسی آن را با رابطه $f = E / h$ حساب کنید.

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\text{حل: } f = 3.2 \times 10^{-19} \div 6.63 \times 10^{-34} \approx 4.83 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

جواب: فریکوانسی فوتون تقریباً $4.83 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است.

۳. اگر الکترون برای یون‌سازی به 13.6 eV انرژی نیاز داشته باشد، آیا فوتون 10 eV می‌تواند اتم را یون‌سازی کند؟

حل: $10 \text{ eV} < 13.6 \text{ eV}$ ، پس انرژی فوتون کافی نیست.

جواب: خیر، اتم یون‌سازی نمی‌شود.

فیزیک سطح دو
۴. اگر دو سطح انرژی به ترتیب 1.5 eV و 3.4 eV باشند، انرژی فوتون هنگام برگشت الکترون از سطح بالاتر به پایین‌تر را حساب کنید.

حل: $\Delta E = (-1.5) - (-3.4) = 1.9\text{ eV}$

جواب: انرژی فوتون نشرشده 1.9 eV است.

۵. چرا فقط بعضی انرژی‌های مشخص در طیف خطی دیده می‌شود؟

جواب: چون الکترون‌ها فقط در سطح‌های انرژی مشخص قرار می‌گیرند و فقط انرژی‌های برابر با تفاوت آن سطح‌ها جذب یا نشر می‌شود

۳.۲ هسته‌های رادیواکتیف و نشر آلفا، بتا، گاما و نوترون

رادیواکتیویته یک روند تصادفی است. نمی‌توان گفت یک هسته خاص دقیقاً چه زمانی تجزیه می‌شود، اما می‌توان تعداد بسیار زیاد هسته‌ها رفتار کلی را پیش‌بینی کرد. این همان دلیل استفاده از مفهوم نیمه‌عمر است. در نشر آلفا، هسته یک ذره نسبتاً بزرگ و سنگین از دست می‌دهد. به همین دلیل عدد کتله‌ای و عدد اتمی هر دو کاهش می‌یابند. در نشر بتا منفی، در داخل هسته یک نوترون به پروتون تبدیل می‌شود؛ بنابراین عدد اتمی افزایش می‌یابد اما عدد کتله‌ای ثابت می‌ماند. تابش گاما معمولاً بعد از آلفا یا بتا رخ می‌دهد، زیرا هسته جدید ممکن است هنوز انرژی اضافی داشته باشد. نشر گاما فقط انرژی هسته را کم می‌کند و تعداد پروتون‌ها یا نوترون‌ها را تغییر نمی‌دهد.

مقایسه نشر آلفا، بتا و گاما

1. نشر آلفا	2. نشر بتا منفی	3. نشر گاما
ذره آلفا (${}^4_2\text{He}$) هسته ناپایدار (قبل از نشر) هسته جدید (بعد از نشر)	نوترون $n \rightarrow p$ پروتون هسته ناپایدار (قبل از نشر) هسته جدید (بعد از نشر) β^-	هسته برانگیخته (انرژی اضافی دارد) هسته همان (انرژی کمتر)
• هسته یک ذره بزرگ و سنگین از دست می‌دهد • عدد کتله‌ای 4 کم می‌شود • عدد اتمی 2 کم می‌شود	• یک نوترون به پروتون تبدیل می‌شود • عدد اتمی 1 زیاد می‌شود • عدد کتله‌ای ثابت می‌ماند	• معمولاً پس از آلفا یا بتا رخ می‌دهد • فقط انرژی هسته کم می‌شود • تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها تغییر نمی‌کند
${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$	${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \beta^-$	هسته + هسته برانگیخته $\rightarrow$



نکته مهم

آلفا و بتا ترکیب هسته را تغییر می‌دهند، اما گاما فقط انرژی اضافی را کم می‌کند.

نکته ایمنی: تابش آلفا بیرون بدن معمولاً توسط پوست متوقف می‌شود، اما اگر ماده آلفا از راه تنفس، غذا یا زخم وارد بدن شود، به دلیل یون‌سازی شدید می‌تواند بسیار خطرناک باشد.

بعضی هسته‌ها پایدار نیستند. هسته ناپایدار برای رسیدن به حالت پایدارتر، تابش نشر می‌کند. این پدیده را رادیواکتیویته می‌نامند. تابش رادیواکتیف می‌تواند به شکل ذره یا موج الکترومقناطیسی باشد.

ذره آلفا از دو پروتون و دو نوترون ساخته شده است. یعنی ذره آلفا مانند هسته هیلیم است. وقتی یک هسته ذره آلفا نشر می‌کند، عدد کتله‌ای آن ۴ واحد و عدد اتمی آن ۲ واحد کم می‌شود. تابش آلفا نفوذپذیری کمی دارد و با کاغذ یا پوست متوقف می‌شود، اما قدرت یونسازی زیادی دارد. اگر ماده آلفا وارد بدن شود، می‌تواند بسیار خطرناک باشد.

در نشر بیتا منفی، یک نوترون در هسته به پروتون تبدیل می‌شود و یک الکترون پرانرژی از هسته خارج می‌شود. در این حالت، عدد اتمی یک واحد زیاد می‌شود، اما عدد کتله‌ای تغییر نمی‌کند.

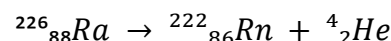
تابش گاما موج الکترومقناطیسی با انرژی بسیار زیاد است. گاما معمولاً بعد از نشر آلفا یا بیتا نشر می‌شود، وقتی هسته هنوز انرژی اضافی دارد. تابش گاما عدد اتمی و عدد کتله‌ای را تغییر نمی‌دهد.

در بعضی واکنش‌های هسته‌ای، نوترون آزاد می‌شود. نوترون‌ها چون بار الکتریکی ندارند، می‌توانند به داخل مواد نفوذ کنند. آن‌ها در راکتورها و واکنش‌های زنجیره‌ای نقش مهم دارند.

نوع تابش	ماهیت	نفوذپذیری	یونسازی	محافظ مناسب
آلفا	۲ پروتون و ۲ نوترون	کم	زیاد	کاغذ یا پوست
بیتا	الکترون پرانرژی	متوسط	متوسط	آلومینیوم
گاما	موج پرانرژی	زیاد	کمتر از آلفا	سرب یا کانکریت
نوترون	ذره بدون بار	زیاد	غیرمستقیم	آب، کانکریت یا مواد هایدروژنی

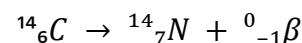
نکات مهم سطح دو

۱. رادیوم-226 ذره آلفا نشر می‌کند و به رادون-222 تبدیل می‌شود:



در این واپاشی، عدد کتله‌ای از 226 به 222 کاهش یافته است و عدد اتمی از 88 به 86 کم شده است. یعنی در نشر آلفا، عدد کتله‌ای 4 واحد و عدد اتمی 2 واحد کاهش می‌یابد.

۲. کربن-14 با نشر بیتا منفی به نایتروجن-14 تبدیل می‌شود:



در این حالت، عدد اتمی از 6 به 7 افزایش می‌یابد، اما عدد کتله‌ای 14 ثابت می‌ماند. دلیل آن این است که در داخل هسته، یک نوترون به پروتون تبدیل می‌شود.

۳. اگر هسته بعد از یک واپاشی هنوز انرژی اضافی داشته باشد، تابش گاما نشر می‌کند. در نشر گاما، عدد اتمی و عدد کتله‌ای تغییر نمی‌کند؛ فقط انرژی اضافی هسته کاهش می‌یابد.

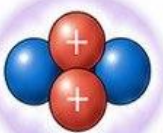
۴. ذره آلفا بزرگ، نسبتاً سنگین و دارای بار مثبت +2 است. به همین دلیل با اتم‌های مسیر خود زیاد برهم‌کنش می‌کند، انرژی خود را سریع از دست می‌دهد و در فاصله کوتاه متوقف می‌شود.

α نشر آلفا α

ویژگی‌ها و تأثیرات

1

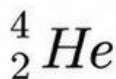
ماهیت



• ذره آلفا = هسته هلیوم

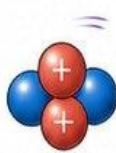
• بار: +2

• کتله نسبی: 4



2

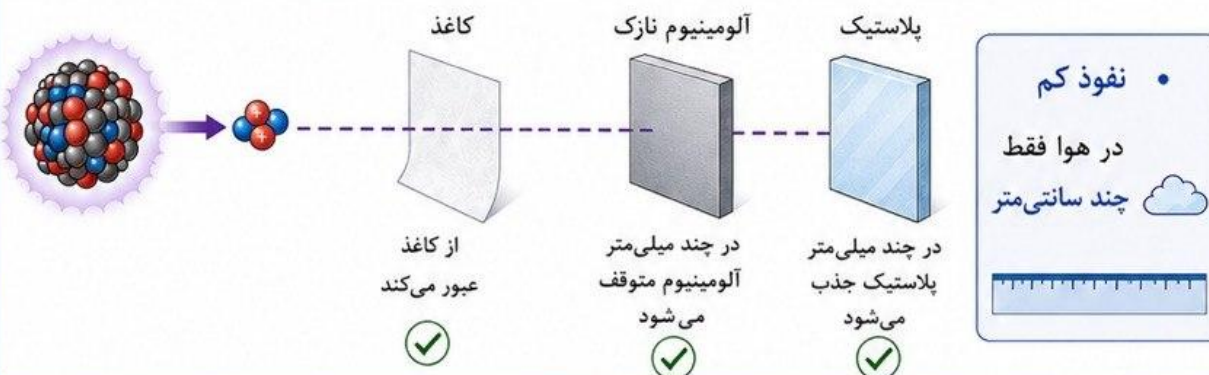
یون‌سازی



بسیار زیاد

مسیر کوتاه، ولی یون‌سازی بسیار متراکم

3 نفوذ و جذب



4

خطر برای بدن



بیرون بدن: خطر کم
پوشش خارجی پوست از نشر آلفا محافظت می‌کند.



داخل بدن: بسیار خطرناک
بلعیدن یا تنفس ذرات آلفا می‌تواند به شدت به سلول‌ها آسیب برساند. آسیب شدید در مسافت بسیار کوتاه.



5

اثر بر محیط

آلودگی محلی گرد و غبار، هوا و سطوح ممکن است ایجاد شود.



در صورت وارد شدن مواد رادیواکتیف به غذا یا ریه‌ها، خطر جدی برای سلامت وجود دارد.



کنترل گرد و غبار و جلوگیری از بلعیدن یا استنشاق ضروری است.



6

کاربرد



دزدکتور دود (اشکارساز دود)

تحقیقات علمی و تجربیات هسته‌ای



7

جمع‌بندی کوتاه



یون‌سازی زیاد



نفوذ کم



خطر داخلی زیاد

با رعایت اصول ایمنی، نشر آلفا قابل کنترل است: خطر اصلی زمانی است که مواد رادیواکتیف وارد بدن شود.

β^- نشر بیتا منفی

ویژگی‌ها و تأثیرات

1

ماهیت (چیست؟)



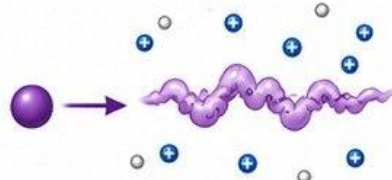
- ذره بیتا منفی = الکترون پرسرعت
- بار: -1
- کتله نسبی: بسیار کم

2

یون‌سازی

متوسط

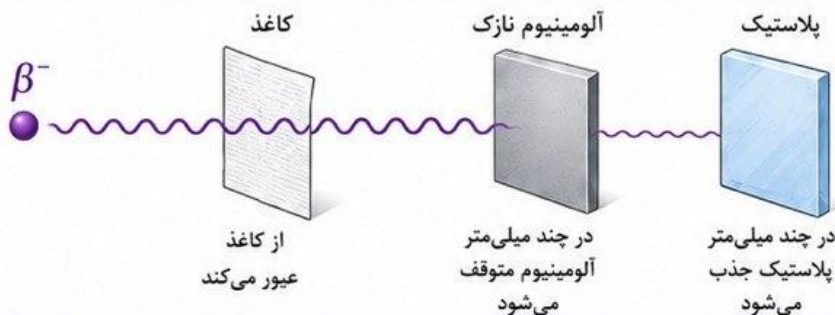
اثر یون‌سازی:
ایجاد مسیر ذرات
با تراکم متوسط



3

نفوذ و جذب

- نفوذ متوسط
- در هوا چند متر
- با آلومینیوم نازک یا پلاستیک جذب می‌شود



4

خطر برای بدن



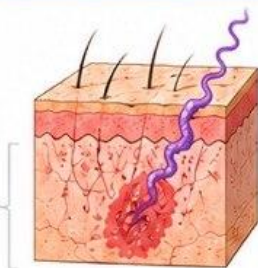
بیتا می‌تواند از پوست بیشتر از آلفا نفوذ کند.



بیرون بدن:
خطر متوسط



داخل بدن:
خطر زیاد



ممکن است باعث سوختگی پوست و آسیب به بافت‌های بدن شود.

5

اثر بر محیط



در صورت آلودگی، مواد رادیواکتیف می‌توانند پخش شوند و در صورتی که از راه آب، غذا یا تنفس وارد بدن موجودات زنده شوند، به آن‌ها آسیب برسانند.

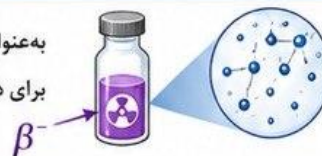
6

کاربرد

کنترل ضخامت کاغذ، فویل آلومینیوم یا ورق‌های نازک در صنعت.



به‌عنوان ردیاب (ترسر) در علم و طب:
برای دنبال کردن جریان مواد و فرایندها.



جمع‌بندی کوتاه



یون‌سازی متوسط، نفوذ متوسط، خطر داخلی و خارجی بیشتر از آلفا.

نکته: همیشه از دستورالعمل ایمنی پیروی کنید و در صورت کار با منابع رادیواکتیف از وسایل حفاظتی استفاده کنید.

γ نشر گاما γ

ویژگی‌ها و تأثیرات

1 ماهیت پرتوی گاما

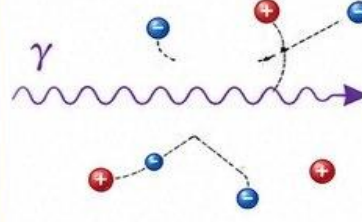


فوتون پرنرژی

- پرتوی گاما = موج الکترومغناطیسی یا فوتون پرنرژی

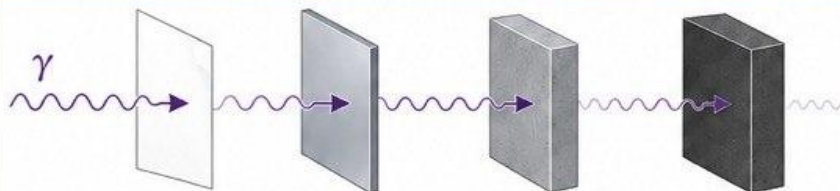
- بار: 0
- کتله نسبی: 0

2 یونسازی



یونسازی: کم
(اگر کم بر الکترون‌ها)

3 نفوذ و جذب



کاغذ
می‌گذرد

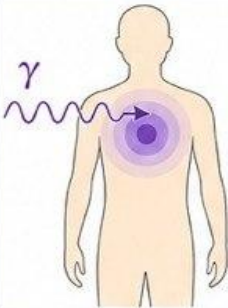
آلومینیوم
می‌گذرد

سرب نازک
تا حدی تضعیف می‌شود

سرب ضخیم
یا بتون ضخیم
به‌طور زیاد تضعیف
می‌شود

- نفوذ بسیار زیاد
- در هوا فاصله زیاد
- با سرب یا بتون ضخیم تضعیف می‌شود

4 خطر برای بدن



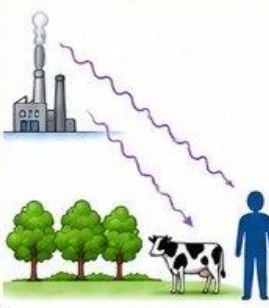
بیرون بدن:
بسیار خطرناک

پرتوی گاما می‌تواند از بدن بگذرد، ولی به بافت‌های درونی آسیب برساند.

داخل بدن: خطرناک

اگر منبع گاما وارد بدن شود، می‌تواند خطر سرطان را افزایش دهد.

5 اثر بر محیط



- می‌تواند موجودات زنده را در فاصله دور تحت تأثیر قرار دهد.

- اطراف منابع رادیواکتیف، به حفظ و کنترل ایمنی نیاز است.

6 کاربرد

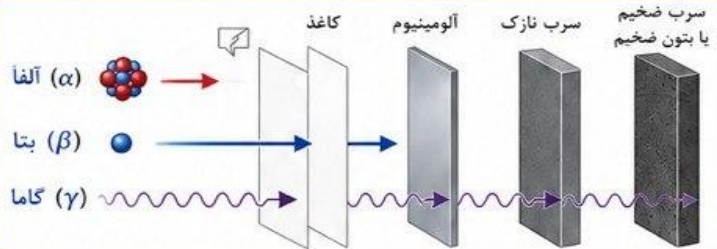


استریل‌سازی:
برای میکروب‌زدایی
تجهیزات طبی و مواد غذایی.



پزشکی:
تصویربرداری و تشخیص
(مثل گاماکمرا) و درمان سرطان
(تابش درمانی).

نفوذ مقایسه‌ای انواع پرتوها



جمع‌بندی کوتاه



یونسازی کم، نفوذ بسیار زیاد، نیاز به حفظ قوی.

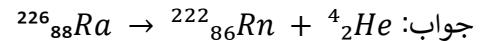


تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. نشر آلفا را کامل کنید:



حل: در نشر آلفا، A چهار واحد و Z دو واحد کم می‌شود.



۲. در نشر آلفا از هسته $^{238}_{92}\text{U}$ ، عدد کتله‌ای و عدد اتمی هسته دختر را حساب کنید.

حل: $Z = 92 - 2 = 90$ و $A = 238 - 4 = 234$

جواب: هسته دختر $^{234}_{90}\text{Th}$ است.

۳. در نشر بیتا منفی از $^{32}_{15}\text{P}$ ، عدد اتمی هسته دختر چند می‌شود؟ عدد کتله‌ای چه تغییری می‌کند؟

حل: در بیتا منفی، Z یک واحد زیاد می‌شود و A ثابت می‌ماند.

جواب: $Z = 16$ و $A = 32$ ؛ هسته دختر $^{32}_{16}\text{S}$ است.

۴. نفوذپذیری تابش‌ها: اگر تابش آلفا با کاغذ متوقف شود اما گاما متوقف نشود، از نظر نفوذپذیری چه نتیجه می‌گیرید؟

جواب: آلفا نفوذپذیری کم دارد، اما گاما نفوذپذیری زیاد دارد.

۵. اگر شمارش تابش بدون محافظ 1200 cpm و با محافظ آلومینیومی 300 cpm شود، کاهش فیصدی را حساب کنید.

حل: کاهش $= 1200 - 300 = 900$ ، پس $900 \div 1200 \times 100 = 75\%$

جواب: تابش 75% کاهش یافته است.

۶. چرا آلفا یون‌سازی بیشتر اما نفوذ کمتر از گاما دارد؟

جواب: چون آلفا بزرگ‌تر و دارای بار $2+$ است؛ با اتم‌ها بیشتر برهم‌کنش می‌کند، انرژی خود را سریع از دست می‌دهد و زود متوقف می‌شود

۴.۲ مواد رادیواکتیف، نیمه‌عمر، تابش‌دهی، آلودگی و دفع زیاله

نیمه‌عمر مدت زمانی است که در آن نصف هسته‌های رادیواکتیف موجود در یک نمونه واپاشی می‌کنند. هر ماده رادیواکتیف نیمه‌عمر مشخص و ثابتی دارد که به نوع آن ماده بستگی دارد و با تغییر مقدار اولیه ماده تغییر نمی‌کند.

پس از هر نیمه‌عمر، مقدار ماده رادیواکتیف به نصف کاهش می‌یابد:

پس از یک نیمه‌عمر، $\frac{1}{2}$ ماده باقی می‌ماند.

پس از دو نیمه‌عمر، $\frac{1}{4}$ ماده باقی می‌ماند.

پس از سه نیمه‌عمر، $\frac{1}{8}$ ماده باقی می‌ماند.

این روند به همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند.

مقدار ماده باقی مانده از رابطه زیر به دست می آید:

$$N = N_0 \times (1/2)^n$$

که در آن:

N = مقدار باقی مانده ماده رادیواکتیف

N_0 = مقدار اولیه ماده

n = تعداد نیمه عمرهای سپری شده

مثال ۱: اگر در آغاز 80 g از یک ماده رادیواکتیف داشته باشیم، پس از سه نیمه عمر چه مقدار از آن باقی می ماند؟

حل:

پس از نیمه عمر اول:

$$80 \div 2 = 40 \text{ g}$$

پس از نیمه عمر دوم:

$$40 \div 2 = 20 \text{ g}$$

پس از نیمه عمر سوم:

$$20 \div 2 = 10 \text{ g}$$

پاسخ: پس از سه نیمه عمر، 10 g از ماده باقی می ماند.

مثال ۲: اگر نیمه عمر یک ماده 5 سال باشد، پس از 15 سال چه کسری از آن باقی می ماند؟

حل:

تعداد نیمه عمرها:

$$15 \div 5 = 3$$

پس از سه نیمه عمر: $(1/2)^3 = 1/8$

پاسخ: پس از 15 سال، $1/8$ ماده باقی می ماند.

نکات مهم

نیمه عمر هر ماده رادیواکتیف ثابت است و به نوع آن ماده بستگی دارد.

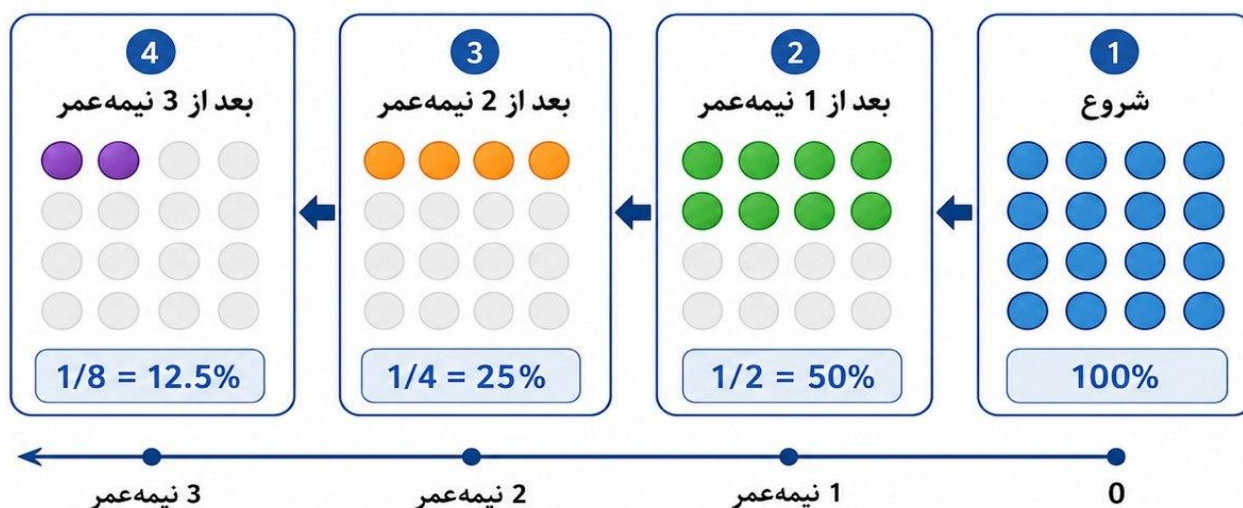
در هر نیمه عمر، نصف هسته های باقی مانده واپاشی می کنند، نه نصف مقدار اولیه.

با گذشت زمان، تعداد هسته های رادیواکتیف و فعالیت (Activity) ماده به تدریج کاهش می یابد.

از مفهوم نیمه عمر در پزشکی هسته ای، تعیین عمر سنگ ها و فسیل ها، پژوهش های زمین شناسی و صنعت هسته ای استفاده می شود.

نکته: نیمه عمر به معنی از بین رفتن کامل ماده نیست؛ بلکه در هر نیمه عمر، تنها نصف مقدار باقی مانده واپاشی می کند. به همین دلیل، مقدار ماده به تدریج کاهش می یابد و هیچ گاه به صورت ناگهانی به صفر نمی رسد.

نیمه عمر

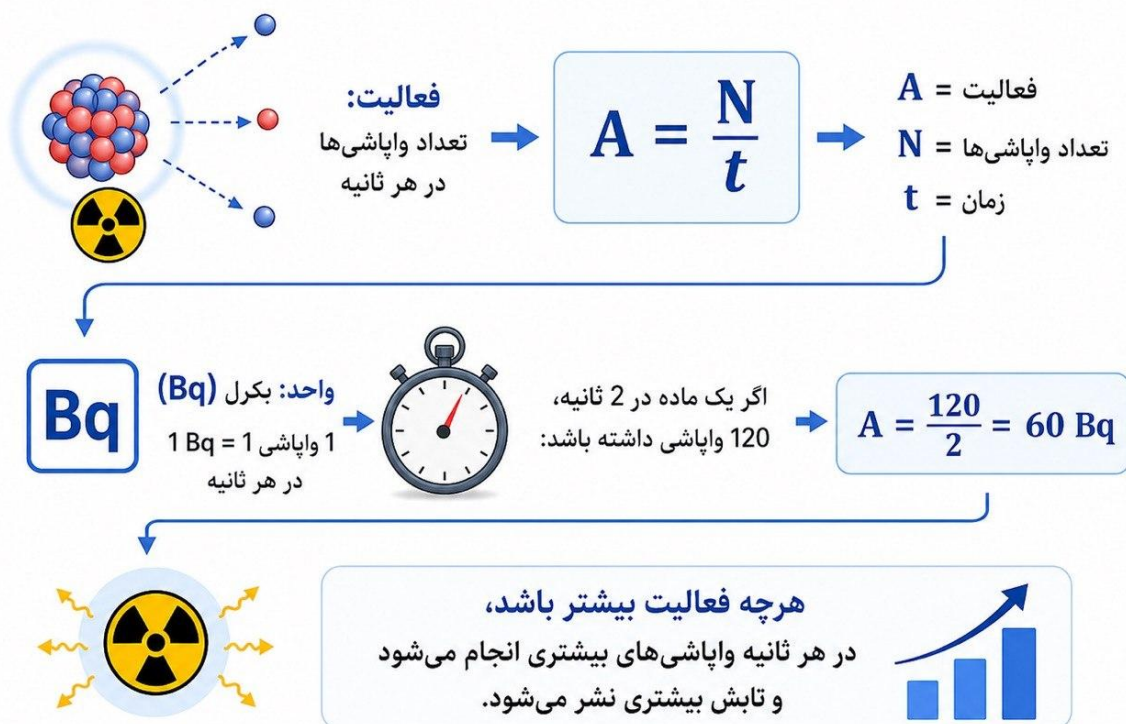


در هر نیمه عمر، تعداد هسته‌های رادیواکتیف به نصف کاهش می‌یابد.

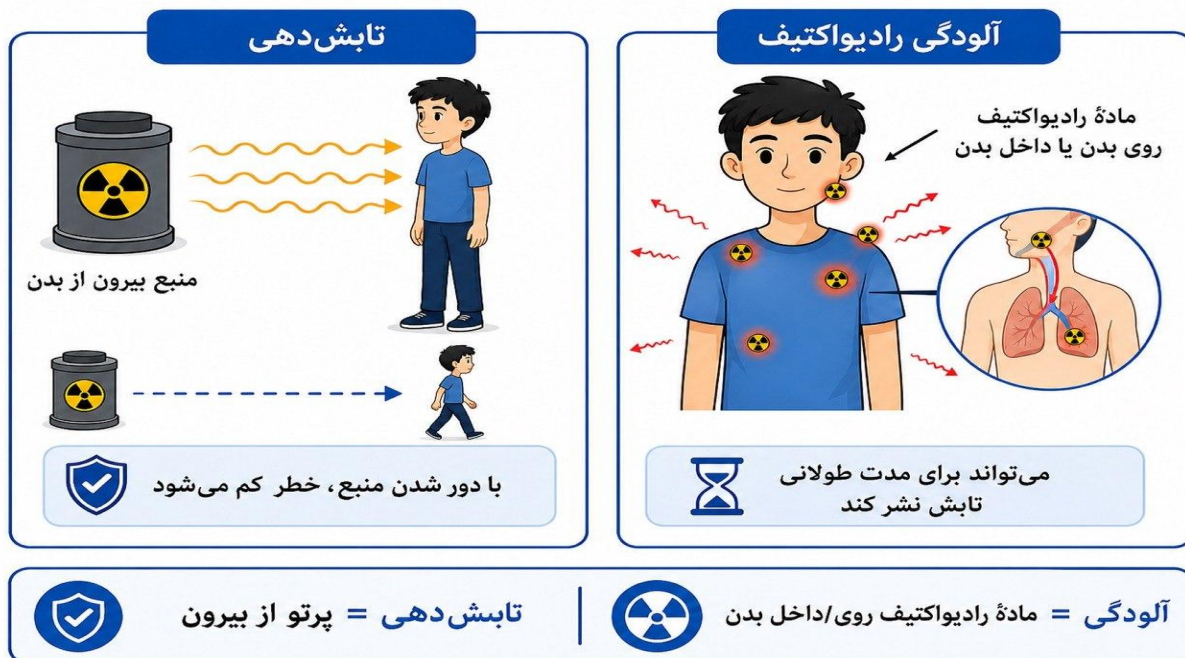


فعالیت یک ماده رادیواکتیف به تعداد واپاشی‌ها در هر ثانیه گفته می‌شود و واحد آن بکرل است. اگر فعالیت زیاد باشد، ماده در

هرثانیه واپاشی‌های بیشتری انجام می‌دهد و تابش بیشتری نشر می‌کند.



تابش‌دهی و آلودگی نباید با هم اشتباه شوند. در تابش‌دهی، منبع تابش ممکن است از بدن دور شود و خطر پایان یابد. اما در آلودگی، مادهٔ رادیواکتیف می‌تواند روی بدن یا داخل بدن باقی بماند و برای مدت طولانی تابش نشر کند.



دفع زباله رادیواکتیف یکی از چالش‌های مهم انرژی هسته‌ای است. زباله‌های با نیمه‌عمر کوتاه پس از مدتی کم‌خطرتر می‌شوند، اما زباله‌های با نیمه‌عمر طولانی باید با نظارت، محافظت و جداسازی طولانی‌مدت نگهداری شوند. مواد رادیواکتیف به طور خودبه‌خود تابش نشر می‌کنند. این تابش می‌تواند مفید یا خطرناک باشد. در طبابت از مواد رادیواکتیف برای تشخیص و درمان بعضی بیماری‌ها استفاده می‌شود، اما تماس غیرکنترل‌شده با آن‌ها می‌تواند به حشرات بدن آسیب برساند. نیمه‌عمر مدت زمانی است که در آن نصف هسته‌های رادیواکتیف یک نمونه تجزیه می‌شوند. نیمه‌عمر برای هر ماده رادیواکتیف مقدار مشخص دارد. بعضی مواد نیمه‌عمر بسیار کوتاه دارند و بعضی دیگر برای هزاران سال رادیواکتیف باقی می‌مانند.

شمارشگر گایگر وسیله‌ای است که برای آشکارسازی و اندازه‌گیری تابش‌های رادیواکتیف استفاده می‌شود. این دستگاه هنگام دریافت تابش، آن را به صورت شمارش (Counts) ثبت می‌کند و معمولاً صدای «کلیک» تولید می‌کند. از شمارشگر گایگر برای شناسایی مواد رادیواکتیف و بررسی آلودگی رادیواکتیف استفاده می‌شود.

فعالیت زمینه (Background Radiation)

حتی زمانی که هیچ منبع رادیواکتیف در نزدیکی دستگاه وجود ندارد، شمارشگر گایگر مقداری تابش ثبت می‌کند. این تابش را فعالیت زمینه می‌گویند. فعالیت زمینه از اشعه‌های کیهانی، سنگ‌ها، خاک، هوا و مواد رادیواکتیف طبیعی موجود در محیط به وجود می‌آید.

برای به‌دست آوردن فعالیت واقعی یک منبع، باید فعالیت زمینه از فعالیت اندازه‌گیری‌شده کم شود.

فعالیت واقعی = فعالیت اندازه‌گیری‌شده - فعالیت زمینه

آلودگی رادیواکتیف (Contamination)

آلودگی رادیواکتیف زمانی رخ می‌دهد که ماده رادیواکتیف روی بدن، لباس یا داخل بدن قرار گیرد. این ماده تا زمانی که پاک یا دفع نشود، به نشر تابش ادامه می‌دهد. برای جلوگیری از آلودگی باید از لباس محافظ، دستکش و وسایل ایمنی استفاده کرد و از تماس مستقیم با مواد رادیواکتیف خودداری نمود.

تابش‌دهی (Irradiation)

تابش‌دهی زمانی است که بدن یا یک جسم در معرض تابش رادیواکتیف قرار گیرد، بدون آن که ماده رادیواکتیف روی آن باقی بماند. برای کاهش تابش‌دهی باید زمان تماس را کم، فاصله را زیاد و از محافظ مناسب مانند سرب یا کانکریت استفاده کرد. تابش یون‌ساز می‌تواند به DNA آسیب برساند، باعث مرگ حشرات شود، سوختگی تابشی ایجاد کند یا خطر سرطان را افزایش دهد. برای کاهش خطر تابش، سه اصل مهم باید رعایت شود: کم کردن زمان تماس، افزایش فاصله از منبع و استفاده از محافظ مناسب.

زباله‌های رادیواکتیف باید به شکل ایمن نگهداری شوند. زباله‌هایی با نیمه‌عمر کوتاه ممکن است تا کاهش فعالیت نگهداری شوند، اما زباله‌هایی با نیمه‌عمر طولانی باید در ظروف محافظ و محل‌های ویژه، معمولاً زیر زمین، ذخیره شوند.

نکات مهم سطح دو

۱. برای پیدا کردن تعداد نیمه‌عمرها، زمان سپری‌شده را بر نیمه‌عمر ماده تقسیم کنید:

تعداد نیمه‌عمرها = زمان سپری‌شده ÷ نیمه‌عمر

۲. پس از هر نیمه‌عمر، مقدار ماده یا فعالیت نمونه به نصف کاهش می‌یابد. برای مثال:

$$80 \rightarrow 40 \rightarrow 20 \rightarrow 10$$

۳. فعالیت ماده رادیواکتیف با واحد بکرل (Bq) اندازه‌گیری می‌شود. هر 1 Bq برابر با یک واپاشی در هر ثانیه است.

۴. کاهش فعالیت به این معنا نیست که ماده کاملاً ناپدید شده است؛ بلکه تعداد هسته‌های رادیواکتیف باقی‌مانده کمتر شده است.

۵. آلودگی رادیواکتیف با تابش دهی تفاوت دارد. در آلودگی، ماده رادیواکتیف روی بدن یا داخل بدن باقی می ماند و می تواند برای مدت طولانی تابش نشر کند.

۶. مواد آلفا در بیرون بدن نفوذ کمی دارند، اما اگر وارد بدن شوند، به دلیل قدرت یونسازی زیاد می توانند به حرات نزدیک آسیب جدی برسانند.

فعالیت عملی: مدل نیمه عمر با سکه

1

سکه ها را در ظرف بگذارید و خوب تکان دهید.

2

سکه ها را روی میز بریزید.

3

سکه هایی را که روی انتخاب شده می افتد، «تجزیه شده» است، جدا کنید و کنار بگذارید.

4

سکه های باقی مانده را جمع کنید، در ظرف بگذارید و دوباره خوب تکان دهید.

6

مثال: با 16 سکه شروع کردیم

دور (شماره)	تعداد سکه های باقی مانده
0 (شروع)	16
1	8
2	4
3	2
4	1

هر دور تقریباً نصف سکه ها باقی می ماند.

جدول نتایج

دور (تعداد نیمه عمر)	تعداد سکه های باقی مانده	کسر باقی مانده از مقدار اولیه
0 (شروع)	16	1
1	8	1/2
2	4	1/4
3	2	1/8
4	1	1/16
5	0 یا 1	1/32

گراف نیمه عمر

فرمول نیمه عمر:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

N = تعداد سکه های باقی مانده
 N_0 = تعداد اولیه سکه ها
 n = تعداد نیمه عمرها

نتیجه:

نمی توان پیش بینی کرد کدام سکه (هسته) دقیقاً در کدام دور «تجزیه» می شود، اما رفتار تعداد زیادی سکه (هسته) را می توان به شکل آماری پیش بینی کرد. تعداد هسته های رادیواکتیف در هر نیمه عمر تقریباً نصف می شود.

تمرین های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. یک نمونه رادیواکتیف 160 g است و نیمه عمر آن 5 سال می باشد. بعد از 20 سال چند گرام باقی می ماند؟

حل: $20 \div 5 = 4$ نیمه عمر، پس $160 \rightarrow 80 \rightarrow 40 \rightarrow 20 \rightarrow 10$ g

جواب: 10 g باقی می ماند.

۲. فعالیت یک نمونه از 800 Bq به 100 Bq کاهش یافته است. چند نیمه عمر گذشته است؟

حل: $100 \rightarrow 200 \rightarrow 400 \rightarrow 800$

جواب: 3 نیمه عمر گذشته است.

۳. اگر بعد از 12 روز فقط 1/8 نمونه باقی بماند، نیمه عمر ماده چند روز است؟

حل: $1/8 = 1/2^3$ پس 3 نیمه عمر گذشته است. $12 \div 3 = 4$ روز

۴. اگر فعالیت زمینه 30 cpm و فعالیت اندازه گیری شده 230 cpm باشد، فعالیت واقعی منبع چند cpm است؟

$$\text{حل: فعالیت واقعی} = 230 - 30 = 200\text{ cpm}$$

جواب: فعالیت واقعی منبع 200 cpm است.

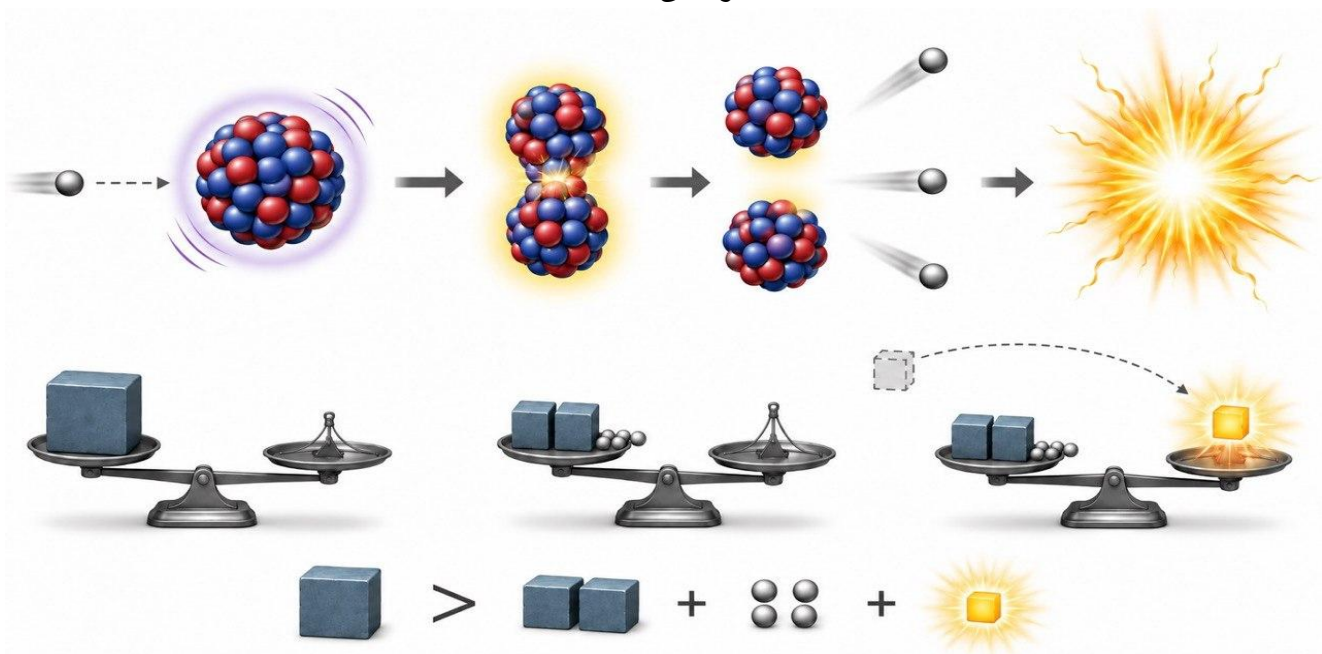
۵. چرا ماده رادیواکتیف با نیمه عمر بسیار طولانی برای دفع زباله مشکل ساز است؟

جواب: چون برای مدت بسیار طولانی تابش نشر می کند و باید برای زمان زیاد به شکل ایمن نگهداری شود.

۱.۳ شکافت هسته ای، همجوشی هسته ای و انرژی خورشید

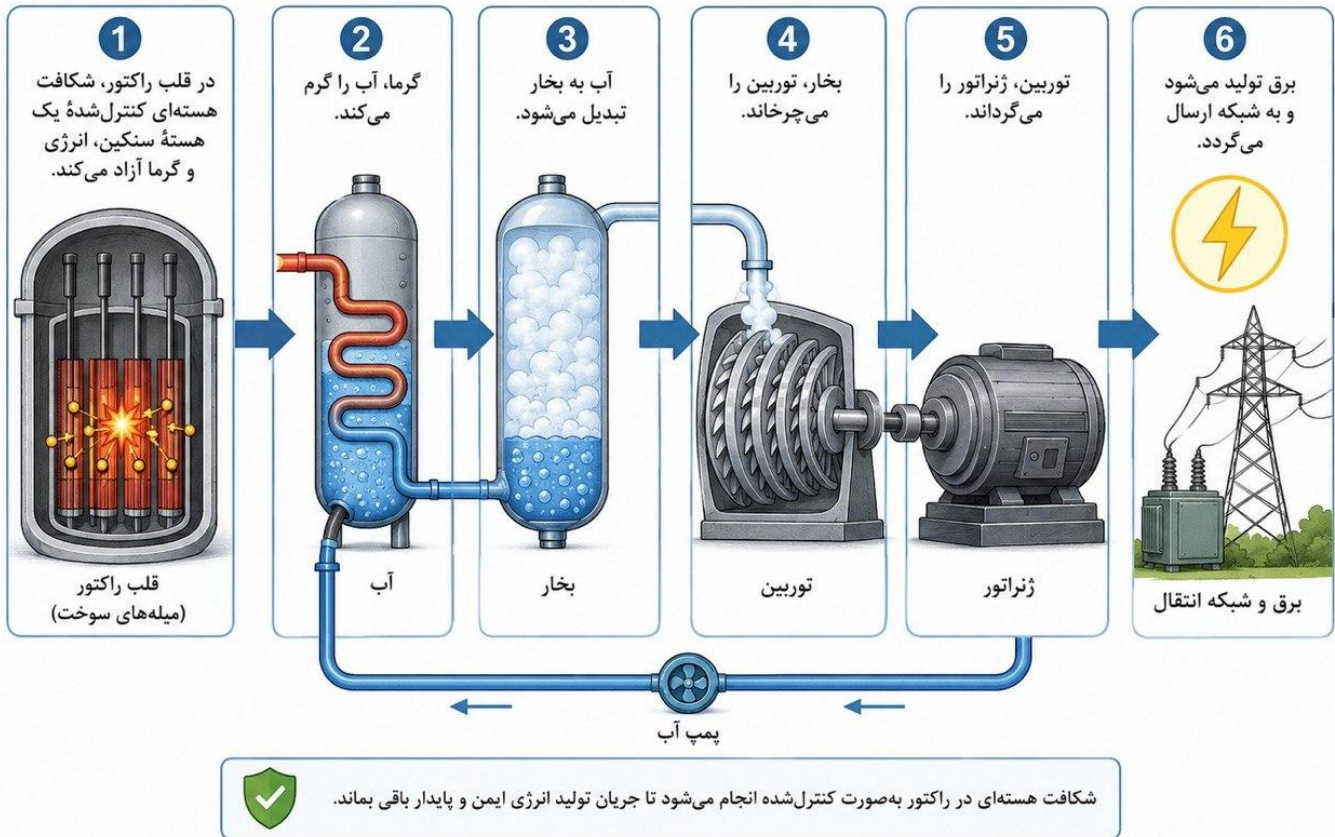
در شکافت هسته ای، هسته سنگین پس از جذب نوترون ناپایدار می شود و به دو هسته کوچک تر می شکند. محصولات شکافت معمولاً خودشان رادیواکتیف اند و به همین دلیل زباله هسته ای باید با احتیاط مدیریت شود.

انرژی آزاد شده در شکافت از تفاوت کتله مواد اولیه و محصولات به دست می آید. کتله محصولات کمی کمتر از کتله اولیه است و این کمبود کتله به انرژی تبدیل می شود. چون سرعت نور بسیار بزرگ است، حتی مقدار بسیار کمی کتله انرژی بسیار زیادی تولید می کند.



در همجوشی، هسته های سبک مانند هایدروجن با هم ترکیب می شوند. اما چون هسته ها بار مثبت دارند، یکدیگر را دفع می کنند. فقط در دما و فشار بسیار زیاد، مانند مرکز خورشید، هسته ها می توانند به اندازه کافی به هم نزدیک شوند تا نیروی هسته ای قوی آن ها را به هم وصل کند. خورشید یک راکتور همجوشی طبیعی است. انرژی تولید شده در مرکز خورشید پس از طی مسیر طولانی به سطح خورشید می رسد و سپس به شکل نور و گرما به زمین می آید. شکافت هسته ای زمانی رخ می دهد که یک هسته سنگین مانند اورانیم-۲۳۵ یا پلوتونیم-۲۳۹ به دو هسته کوچک تر تقسیم شود. در این روند، مقدار زیادی انرژی و چند نوترون آزاد می شود. نوترون های آزاد شده می توانند به هسته های دیگر برخورد کنند و شکافت های بیشتری ایجاد کنند. در راکتور هسته ای، شکافت به شکل کنترل شده انجام می شود. انرژی آزاد شده به شکل گرما ظاهر می شود. این گرما آب را به بخار تبدیل می کند. بخار توربین را می چرخاند و توربین جنراتور را به حرکت می آورد. در نتیجه، برق تولید می شود.

تولید برق در راکتور هسته‌ای



همجوشی هسته‌ای زمانی رخ می‌دهد که دو هسته سبک با هم ترکیب شوند و هسته سنگین‌تری بسازند. در این روند نیز انرژی بسیار زیاد آزاد می‌شود. منبع اصلی انرژی خورشید همجوشی هسته‌ای است. در خورشید، هسته‌های هایدروجن در دما و فشار بسیار زیاد به هم نزدیک می‌شوند و در نهایت هیلیم تشکیل می‌دهند.

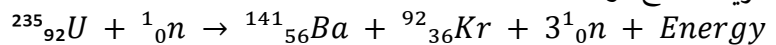
در همجوشی و شکافت، بخشی از کتله به انرژی تبدیل می‌شود. این رابطه با معادله معروف انیشتین بیان می‌شود.

$E = mc^2$ یعنی مقدار بسیار کمی کتله می‌تواند به مقدار بسیار زیادی انرژی تبدیل شود.

ویژگی	شکافت	همجوشی
نوع واکنش	شکستن هسته سنگین	ترکیب هسته‌های سبک
مثال	اورانیم-۲۳۵	هایدروجن در خورشید
انرژی	زیاد	بسیار زیاد
شرایط	قابل انجام در راکتور	نیاز به دما و فشار بسیار بالا
زیاله رادیواکتیف	قابل توجه	کمتر، اما چالش فنی دارد

نکات مهم سطح دو

۱. وقتی اورانیم-۲۳۵ یک نوترون جذب می‌کند، ناپایدار می‌شود و به دو هسته کوچک‌تر، چند نوترون و انرژی تقسیم می‌شود. نوترون‌های آزاد شده می‌توانند شکافت‌های بعدی را آغاز کنند.



۲: در خورشید دما و فشار بسیار زیاد است. این شرایط باعث می‌شود هسته‌های هایدروجن با وجود دافعه الکتریکی به هم نزدیک شوند و همجوشی رخ دهد.

۳: هسته‌ها بار مثبت دارند و همدیگر را دفع می‌کنند. برای نزدیک ساختن آن‌ها به هم، دما و فشار بسیار زیاد لازم است. ایجاد و کنترل این شرایط روی زمین بسیار دشوار است.

۴: انرژی آزاد می‌شود، چو کتله محصولات نهایی کمی کمتر از کتله مواد اولیه است. این کتله از دست‌رفته به انرژی تبدیل می‌شود.

فعالیت عملی: مدل شکافت با مهره

1

مهره بزرگ را هسته سنگین فرض کنید. یک مهره کوچک را نوترون فرض کنید.

2

نشان دهید که برخورد نوترون می‌تواند هسته را به دو بخش تقسیم کند.

3

چند نوترون جدید را از هسته بیرون بیاورید.

4

توضیح دهید که این نوترون‌ها می‌توانند شکافت‌های بعدی را آغاز کنند.

5

نوترون → هسته سنگین → هسته‌های کوچک‌تر + نوترون‌های جدید + انرژی

نتیجه:

در شکافت، هسته سنگین به هسته‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و انرژی و نوترون آزاد می‌کند.

تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

1. اگر در یک واکنش هسته‌ای $2 \times 10^{-6} \text{ kg}$ کتله به انرژی تبدیل شود، انرژی آزاد شده را با رابطه $E = mc^2$ حساب کنید.

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

حل:

$$E = 2 \times 10^{-6} \times (3 \times 10^8)^2$$

$$E = 2 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{16} = 1.8 \times 10^{11} \text{ J}$$

جواب: انرژی آزاد شده $1.8 \times 10^{11} \text{ J}$ است.

۲. اگر کتله اولیه واکنش 4.030 u و کتله نهایی 4.000 u باشد، کمبود کتله چند u است؟

$$4.030 - 4.000 = 0.030 u$$

جواب: کمبود کتله 0.030 u است.

۳. اگر هر شکافت 200 MeV انرژی آزاد کند، 10 شکافت چه مقدار انرژی آزاد می‌کند؟

حل:

$$10 \times 200 = 2000 \text{ MeV}$$

جواب: انرژی آزاد شده 2000 MeV است.

۴. اگر نیروگاه هسته‌ای 1000 MW توان تولید کند، در 10 ثانیه چند ژول انرژی تولید می‌کند؟

حل:

$$1000 \text{ MW} = 1 \times 10^9 \text{ W}$$

$$E = P \times t = 1 \times 10^9 \times 10 = 1 \times 10^{10} \text{ J}$$

جواب: انرژی تولید شده $1 \times 10^{10} \text{ J}$ است.

۵. اگر بازده تبدیل گرما به برق 35% باشد و راکتور 3000 MW گرما تولید کند، توان برقی تقریبی چند MW است؟

$$\text{حل: توان برقی} = 0.35 \times 3000 = 1050 \text{ MW}$$

جواب: توان برقی تقریبی 1050 MW است.

۶. چرا در راکتور هسته‌ای شکافت باید کنترل شده باشد؟

جواب: چون اگر نوترون‌های آزاد شده کنترل نشوند، واکنش زنجیره‌ای بسیار سریع افزایش می‌یابد و مقدار زیادی انرژی در زمان کوتاه آزاد می‌شود. در راکتور، واکنش باید آهسته و پایدار بماند تا گرما به شکل ایمن برای تولید برق استفاده شود.

۲.۳ واکنش زنجیره‌ای، واکنش کنترل شده و غیرکنترل شده

در یک واکنش زنجیره‌ای، هر شکافت می‌تواند چند نوترون آزاد کند و این نوترون‌ها شکافت‌های بعدی را آغاز کنند. اگر به طور متوسط هر شکافت فقط یک شکافت دیگر ایجاد کند، واکنش پایدار می‌ماند. اگر بیشتر از یک شکافت ایجاد شود، واکنش سریع‌تر و شدیدتر می‌شود. راکتور هسته‌ای برای حفظ واکنش در سطح مناسب به سیستم‌های کنترلی نیاز دارد. میله‌های کنترل با جذب نوترون‌ها، تعداد نوترون‌های مؤثر را کم می‌کنند. اگر واکنش بیش از حد سریع شود، میله‌ها بیشتر وارد می‌شوند تا واکنش آهسته شود. کندکننده با میله کنترل فرق دارد. کندکننده معمولاً نوترون‌ها را جذب نمی‌کند، بلکه سرعت آن‌ها را کم می‌کند. نوترون‌های کند در بسیاری از راکتورها احتمال بیشتری برای ایجاد شکافت در اورانیوم-۲۳۵ دارند. خنک‌کننده گرمای تولید شده را از قلب راکتور خارج می‌کند. اگر گرما به شکل ایمن انتقال داده نشود، دمای راکتور بالا می‌رود و خطرات جدی ایجاد می‌شود. بنابراین کنترل نوترون‌ها و مدیریت گرما هر دو برای ایمنی ضروری‌اند. واکنش زنجیره‌ای زمانی رخ می‌دهد که محصولات یک واکنش، واکنش‌های بعدی را آغاز کنند. در شکافت هسته‌ای، نوترون‌های آزاد شده می‌توانند به هسته‌های دیگر برخورد کنند و باعث شکافت آن‌ها شوند. هر شکافت نوترون‌های بیشتری آزاد می‌کند و این روند می‌تواند ادامه یابد. در راکتور هسته‌ای، واکنش زنجیره‌ای باید کنترل شود. اگر تعداد نوترون‌ها بیش از حد زیاد شود، انرژی بسیار سریع آزاد می‌شود و خطر ایجاد می‌کند. برای کنترل واکنش، از میله‌های کنترل استفاده می‌شود. این میله‌ها نوترون‌ها را جذب می‌کنند و تعداد نوترون‌های موجود برای

شکافت را کاهش می‌دهند. در راکتورها از کندکننده نیز استفاده می‌شود. کندکننده سرعت نوترون‌ها را کم می‌کند. در بسیاری از راکتورها، نوترون‌های کند احتمال بیشتری دارند که توسط اورانیوم-۲۳۵ جذب شوند و شکافت ایجاد کنند. واکنش کنترل‌شده برای تولید برق استفاده می‌شود. اما در واکنش غیرکنترل‌شده، انرژی در زمان بسیار کوتاه آزاد می‌شود و می‌تواند بسیار خطرناک و تخریبی باشد. در این بخش، هدف فقط فهم علمی تفاوت میان واکنش کنترل‌شده و غیرکنترل‌شده است، نه بررسی جزئیات فنی سلاح‌ها.

بخش‌های اصلی راکتور هسته‌ای

بخش	وظیفه	بخش	وظیفه
سوخت هسته‌ای	انجام شکافت	میله‌های کنترل	جذب نوترون‌ها و کنترل واکنش
کندکننده	آهسته ساختن نوترون‌ها	خنک‌کننده	انتقال گرما
محافظ	جلوگیری از خروج تابش	توربین و جراثور	تولید برق

نکات مهم سطح دو

مرحله	تعداد شکافت‌ها
1	1
2	3
3	9
4	27
5	81

مثال ۱: اگر در هر شکافت ۳ نوترون آزاد شود و هر نوترون یک شکافت جدید ایجاد کند، تعداد شکافت‌ها بسیار سریع زیاد می‌شود. این نشان می‌دهد که واکنش زنجیره‌ای می‌تواند بسیار سریع رشد کند.

مثال ۲: اگر میله‌های کنترل بیشتر داخل راکتور شوند، نوترون‌های بیشتری جذب می‌شود و سرعت واکنش کاهش می‌یابد. اگر میله‌ها بیرون کشیده شوند، نوترون‌های بیشتری باقی می‌مانند و واکنش سریع‌تر می‌شود.

مثال ۳: میله کنترل نوترون‌ها را جذب می‌کند. کندکننده نوترون‌ها را آهسته می‌کند. بنابراین وظیفه آن‌ها یکی نیست.

مثال ۴: راکتور به خنک کننده نیاز دارد، چون شکافت هسته‌ای گرمای زیادی تولید می‌کند. خنک کننده این گرما را انتقال می‌دهد و از افزایش خطرناک حرارت جلوگیری می‌کند.

فعالیت عملی: مدل واکنش زنجیره‌ای با دومینو

- 1 دومینوها را نزدیک به هم در یک خط قرار دهید.



- 2 دومینوی اول را هل دهید.



- 3 یک دومینو باعث می‌شود دومینوهای بعدی یکی پس از دیگری بیفتند (واکنش زنجیره‌ای).



- 4 مثال دوم: بین بعضی از دومینوها فاصله ایجاد کنید.



- 5 به دلیل وجود فاصله‌ها، واکنش زنجیره‌ای متوقف می‌شود.



نتیجه: اگر شرایط مناسب باشد، یک رویداد می‌تواند رویدادهای بعدی را آغاز کند. در راکتور، واکنش زنجیره‌ای باید با جذب و کنترل نوترون‌ها مدیریت شود.



تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. در واکنش زنجیره‌ای، اگر هر شکافت ۲ نوترون مؤثر تولید کند، تعداد شکافته‌ها در مرحله پنجم از یک شکافت اولیه چند است؟

حل: اگر شکافت اولیه مرحله ۱ باشد:

$$\text{مرحله پنجم} = 2^4 = 16$$

جواب: در مرحله پنجم ۱۶ شکافت ایجاد می‌شود.

۲. اگر هر شکافت ۳ نوترون آزاد کند اما میله کنترل ۲ نوترون را جذب کند، چند نوترون برای ادامه واکنش باقی می‌ماند؟

$$\text{حل: } 3 - 2 = 1$$

جواب: ۱ نوترون باقی می‌ماند.

۳. اگر توان راکتور از ۵۰۰ MW به ۷۵۰ MW برسد، افزایش توان چند فیصد است؟

$$750 - 500 = 250 \text{ MW} = \text{افزایش توان}$$

$$250 \div 500 \times 100 = 50\% = \text{فیصدی افزایش}$$

جواب: توان راکتور 50% افزایش یافته است.

۴. اگر خنک کننده در هر ثانیه $2 \times 10^9 \text{ J}$ گرما انتقال دهد، توان انتقال حرارت چند W است؟

حل:

$$P = E \div t$$

$$P = 2 \times 10^9 \div 1 = 2 \times 10^9 \text{ W}$$

جواب: توان انتقال حرارت $2 \times 10^9 \text{ W}$ است.

۵. اگر یک راکتور 24 ساعت با توان 900 MW کار کند، انرژی تولیدشده را بر حسب MWh حساب کنید.

حل:

$$E = P \times t$$

$$E = 900 \times 24 = 21600 \text{ MWh}$$

جواب: انرژی تولیدشده 21600 MWh است.

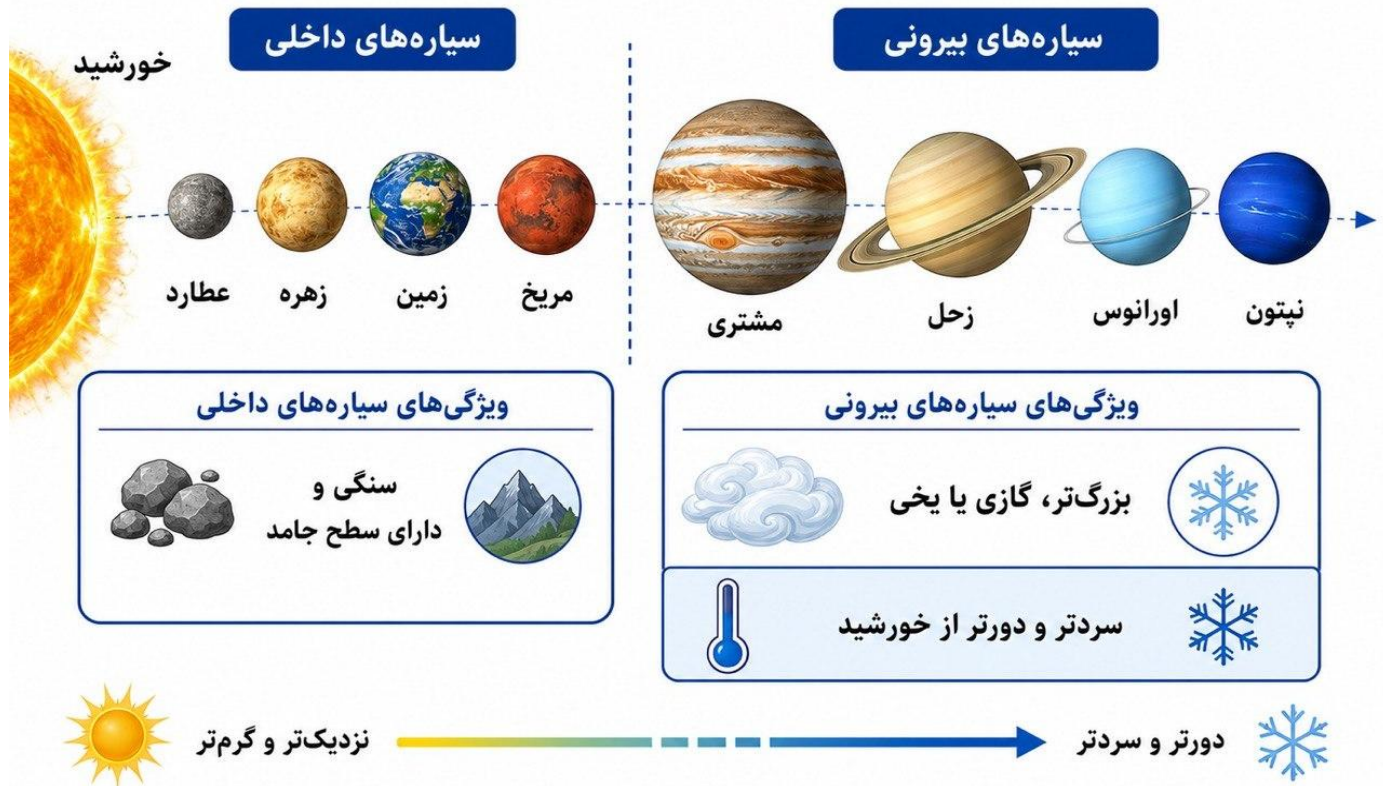
۶. فرق میان واکنش پایدار و واکنش رو به رشد چیست؟

جواب: در واکنش پایدار، هر شکافت به طور متوسط فقط یک شکافت بعدی ایجاد می کند، پس واکنش ثابت می ماند. در واکنش رو به رشد، هر شکافت بیش از یک شکافت بعدی ایجاد می کند، پس واکنش سریع تر زیاد می شود

۳.۳ ویژگی های اصلی منظومه شمسی

حرکت مداری نتیجه ترکیب سرعت افقی و جاذبه است. اگر فقط سرعت وجود می داشت و جاذبه نبود، سیاره یا ماهواره در خط مستقیم حرکت می کرد. اگر فقط جاذبه بود و سرعت افقی وجود نداشت، جسم به طرف مرکز سقوط می کرد. مدار زمانی ایجاد می شود که این دو اثر با هم عمل کنند. ارتباط با فیزیک هسته ای: انرژی خورشید از همجوشی هسته ای می آید، نه از سوختن کیمیاوی. اگر خورشید مانند آتش معمولی می سوخت، نمی توانست میلیاردها سال انرژی تولید کند. منظومه شمسی شامل خورشید، سیاره ها، قمرها، سیارک ها، دنباله دارها و اجرام کوچک دیگر است. خورشید در مرکز منظومه شمسی قرار دارد و بیشترین کتله منظومه را تشکیل می دهد. جاذبه خورشید باعث می شود سیاره ها در مدارهای تقریباً بیضوی به دور آن حرکت کنند. سیاره ها به دلیل سرعت خود تمایل دارند در خط مستقیم حرکت کنند، اما جاذبه خورشید آن ها را به طرف مرکز می کشد. ترکیب این دو اثر باعث حرکت مداری می شود. اگر سرعت مداری یک جسم کم باشد، ممکن است به طرف جسم مرکزی سقوط کند. اگر سرعت آن بسیار زیاد باشد، ممکن است از مدار خارج شود.

منظومه شمسی دارای سیاره‌های سنگی و سیاره‌های گازی یا یخی است. سیاره‌های سنگی مانند عطارد، زهره، زمین و مریخ کوچک‌ترند و سطح جامد دارند. سیاره‌های بیرونی مانند مشتری، زحل، اورانوس و نپتون بزرگ‌ترند و بیشتر از گازها یا مواد یخی تشکیل شده‌اند.





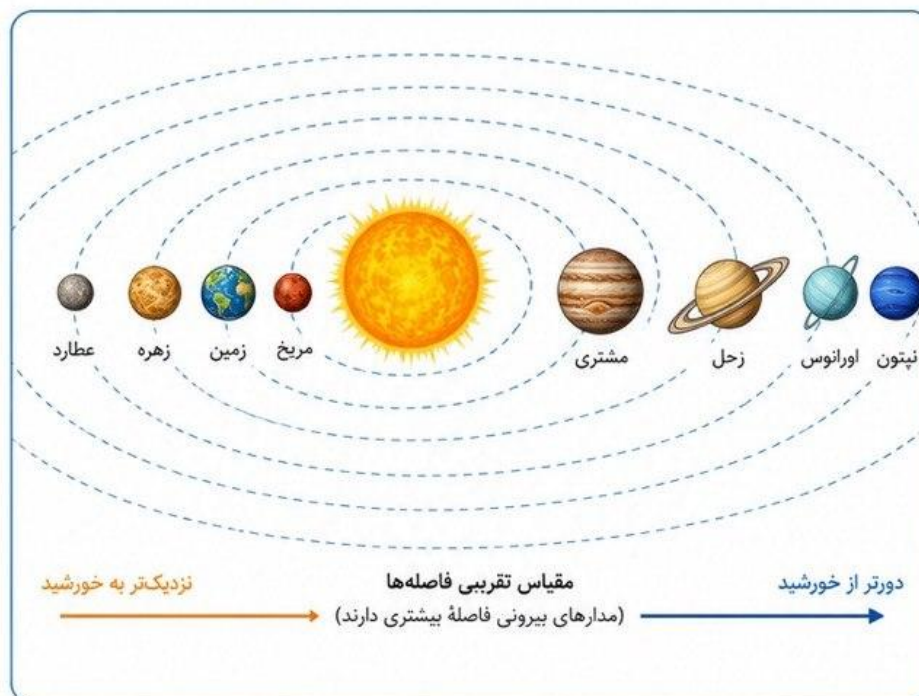
شماره	سیاره	ویژگی اصلی	شماره	سیاره	ویژگی اصلی	
1		عطارد	نزدیک‌ترین سیاره به خورشید	5		بزرگ‌ترین سیاره
2		زهره	اتمسفر ضخیم و بسیار گرم	6		حلقه‌های مشهور
3		زمین	دارای آب مایع و حیات	7		محور چرخش بسیار مایل
4		مریخ	سطح سرخ و احتمال آب در گذشته	8		بادهای شدید و فاصله زیاد از خورشید

نکات مهم سطح دو

- سیاره‌ها به دلیل سرعت خود می‌خواهند در خط مستقیم حرکت کنند، اما جاذبه خورشید آن‌ها را به طرف مرکز می‌کشد. نتیجه این دو اثر، حرکت مداری است.
- اگر سرعت یک ماهواره یا سیاره کم شود، جاذبه آن را بیشتر به طرف جسم مرکزی می‌کشد و ممکن است به طرف آن سقوط کند.
- اگر سرعت جسم بسیار زیاد شود، ممکن است از مدار خارج شود و از جاذبه جسم مرکزی دور شود.
- ماهواره همیشه به طرف زمین سقوط می‌کند، اما سرعت افقی آن آنقدر زیاد است که سطح زمین همزمان از زیر آن خم می‌شود. بنابراین ماهواره به دور زمین حرکت می‌کند و به زمین برخورد نمی‌کند.
- اگر جسمی سرعت کافی داشته باشد، می‌تواند از جاذبه زمین خارج شود. این سرعت را سرعت فرار می‌نامند. اگر سرعت کمتر باشد، جسم یا به زمین برمی‌گردد یا در مدار قرار می‌گیرد.



فعالیت عملی: ساخت مدل منظومه شمسی



مراحل ساخت مدل

1

خورشید را
در مرکز
رسم کنید.



2

سیاره‌ها را به ترتیب از
خورشید قرار دهید:
عطارد، زهره، زمین،
مریخ، مشتری، زحل،
اورانوس، نپتون.



3

سیاره‌های سنگی و
فشنده‌یخی را با رنگ
متفاوت مشخص کنید.
(سنگی: رنگ‌های گرم
(گازی/یخی: رنگ‌های سرد)



4

فاصله‌ها را با یک مقیاس
ساده و تقریبی نشان دهید.
مدارهای بیرونی را با
فاصله بیشتر رسم کنید.



سیاره‌های سنگی (داخلی)



کوچک‌تر، سطح سخت و سنگی



عطارد



زهره



زمین



مریخ

سیاره‌های گازی/یخی (بیرونی)



بزرگ‌تر، عمدتاً از گازها یا یخ‌ها ساخته شده‌اند



مشتری



زحل



اورانوس



نپتون

ویژگی‌های مهم هر سیاره

شماره	سیاره	ویژگی مهم	نماد
1	عطارد	نزدیک‌ترین سیاره به خورشید	
2	زهره	اتمسفر ضخیم و بسیار گرم	
3	زمین	دارای آب مایع و حیات	
4	مریخ	سطح سرخ و احتمال آب در گذشته	
5	مشتری	بزرگ‌ترین سیاره	
6	زحل	حلقه‌های مشهور	
7	اورانوس	محور چرخش بسیار مایل	
8	نپتون	بادهای شدید و فاصله زیاد از خورشید	



نتیجه: منظومه شمسی ساختار منظم دارد و حرکت سیاره‌ها
به جاذبه و سرعت مداری وابسته است.



تمرین‌های محاسباتی و تحلیلی این موضوع

۱. اگر زمین با سرعت تقریبی 30 km/s به دور خورشید حرکت کند، در یک ساعت چند کیلومتر طی می‌کند؟

حل: 1 ساعت = 3600 s

$$\text{فاصله} = \text{سرعت} \times \text{زمان} = 30 \times 3600 = 108000 \text{ km}$$

جواب: زمین در یک ساعت حدود 108000 km طی می‌کند.

۲. اگر فاصله زمین تا خورشید $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ باشد، نور با سرعت $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ در چند ثانیه و چند دقیقه از خورشید به زمین می‌رسد؟

حل: زمان = فاصله ÷ سرعت

$$\text{زمان} = 500 \text{ s} = (3 \times 10^5) \div (1.5 \times 10^8)$$

$$8.3 \approx 500 \div 60 \text{ دقیقه}$$

جواب: نور تقریباً در 500 s یا 8.3 دقیقه از خورشید به زمین می‌رسد.

۳. اگر یک سیاره در 365 روز یک دور کامل به دور خورشید بزند، در 30 روز چه کسری از مدار خود را طی می‌کند؟

$$\text{حل: کسر مدار} = 365 \div 30 = 0.082$$

$$8.2\% = 100 \times 0.082$$

جواب: سیاره حدود 0.082 یا 8.2% مدار خود را طی می‌کند.

۴. اگر سرعت یک ماهواره کاهش یابد، از نظر مدار چه خطری ایجاد می‌شود؟

جواب: ممکن است ماهواره به مدار پایین‌تر برود و در نهایت به طرف زمین سقوط کند.

۵. اگر نور از ماه تا زمین در حدود 1.3 s برسد، فاصله ماه تا زمین را با $v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ حساب کنید.

$$\text{حل: } d = v \times t$$

$$d = 3 \times 10^8 \times 1.3 = 3.9 \times 10^8 \text{ m}$$

جواب: فاصله ماه تا زمین تقریباً $3.9 \times 10^8 \text{ m}$ است.

۶. اگر یک فضاپیما برای خروج از جاذبه زمین به سرعت 11.2 km/s نیاز داشته باشد، این سرعت چند m/s است؟

$$\text{حل: } 1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$$

$$11.2 \text{ km/s} = 11.2 \times 1000 = 11200 \text{ m/s}$$

جواب: سرعت فرار تقریباً 11200 m/s است.

جمع‌بندی فصل

در این فصل آموختیم که فهم انسان از اتم با گذشت زمان و با شواهد تجربی تغییر کرده است. مدل دالتون، مدل تامسون، مدل رادرفورد، مدل بوهر و مدل کوانتومی هرکدام مرحله‌ای از پیشرفت علم را نشان می‌دهند. همچنین فهمیدیم که اتم بیشتر از فضای خالی ساخته شده است، اما تقریباً تمام کتله آن در هسته کوچک و متمرکز قرار دارد. نظریه کوانتومی نشان می‌دهد که انرژی به شکل بسته‌های کوچک انتقال می‌یابد و نور می‌تواند هم خاصیت موجی و هم خاصیت ذره‌ای داشته باشد. در بخش هسته‌ای، با پروتون‌ها، نوترون‌ها، ایزوتوپ‌ها، تابش‌های آلفا، بتا، گاما و نوترون آشنا شدیم. دانستیم که نیمه‌عمر برای شناخت رفتار مواد رادیواکتیف اهمیت دارد و رعایت اصول ایمنی در برابر تابش ضروری است. در پایان، شکافت و همجوشی هسته‌ای را بررسی کردیم. شکافت در راکتورهای هسته‌ای برای تولید برق استفاده می‌شود، در حالی که همجوشی منبع انرژی خورشید است. منظومه شمسی نیز نمونه‌ای بزرگ از ارتباط میان جاذبه، حرکت، انرژی و فیزیک فضایی است.

تمرین‌های محاسباتی مرور نهایی فصل

۱. قطر اتم $1 \times 10^{-10} m$ و قطر هسته $1 \times 10^{-15} m$ است. نسبت قطر اتم به هسته را حساب کنید.

$$\text{حل: } 10^{-10} \div 10^{-15} = 10^5 = 100000$$

جواب: قطر اتم حدود 100000 برابر قطر هسته است.

۲. برای ${}^{235}_{92}\text{U}$ تعداد نوترون‌ها را محاسبه کنید.

$$\text{حل: } N = A - Z = 235 - 92 = 143$$

جواب: 143 نوترون دارد.

۳. معادله آلفا را کامل کنید: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow __ + {}^4_2\text{He}$

$$\text{حل/جواب: } {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$$

۴. معادله بتا منفی را کامل کنید: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow __ + {}^0_{-1}\beta$

$$\text{حل/جواب: } {}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\beta$$

۵. فوتونی با فریکونسی $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ دارد. انرژی آن را با $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ حساب کنید.

$$\text{حل: } E = hf = 6.63 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14} = 3.315 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{جواب: } 3.315 \times 10^{-19} \text{ J}$$

۶. اگر انرژی آستانه فلز $3 \times 10^{-19} \text{ J}$ و انرژی فوتون $5 \times 10^{-19} \text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی الکترون چند است؟

$$\text{حل: } K.E. = 5 \times 10^{-19} - 3 \times 10^{-19} = 2 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{جواب: } 2 \times 10^{-19} \text{ J}$$

۷. طول موج دوبروی ذره‌ای با مومنتم $6.63 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$ را حساب کنید.

$$\text{حل: } \lambda = h/p = 6.63 \times 10^{-34} \div 6.63 \times 10^{-24} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\text{جواب: } 1 \times 10^{-10} \text{ m}$$

۸. فعالیت یک نمونه از 1200 Bq به 150 Bq رسیده است. چند نیمه عمر گذشته است؟

$$\text{حل: } 1200 \rightarrow 600 \rightarrow 300 \rightarrow 150$$

جواب: 3 نیمه عمر گذشته است.

۹. اگر نیمه عمر ماده ای 4 ساعت باشد، بعد از 16 ساعت از 80 g چند گرام باقی می ماند؟

$$\text{حل: } 4 = 16 \div 4 \text{ نیمه عمر، پس } 5 \text{ g} = 80 \div 2^4$$

جواب: 5 g باقی می ماند.

۱۰. اگر تابش از 2000 cpm به 500 cpm کاهش یابد، کاهش فیصدی را حساب کنید.

$$\text{حل: کاهش} = 2000 - 500 = 1500$$

$$\text{فیصدی کاهش} = 1500 \div 2000 \times 100 = 75\%$$

جواب: 75%

۱۱. اگر $3 \times 10^{-6} \text{ kg}$ کتله به انرژی تبدیل شود، انرژی آزاد شده را با $E = mc^2$ حساب کنید.

$$\text{حل: } E = 3 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{16} = 2.7 \times 10^{11} \text{ J}$$

جواب: $2.7 \times 10^{11} \text{ J}$

۱۲. اگر نیروگاه 800 MW توان داشته باشد، در 5 ساعت چند MWh انرژی تولید می کند؟

$$\text{حل: } E = P \times t = 800 \times 5 = 4000 \text{ MWh}$$

جواب: 4000 MWh

۱۳. اگر CT scan دوز 6 mSv و X-ray ساده دوز 0.2 mSv داشته باشد، CT چند برابر دوز بیشتر دارد؟

$$\text{حل: } 30 = 6 \div 0.2$$

جواب: 30 برابر

۱۴. نور خورشید در 500 s به زمین می رسد. فاصله زمین تا خورشید را با سرعت نور $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ حساب کنید.

$$\text{حل: } d = vt = 3 \times 10^8 \times 500 = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

جواب: $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$

۱۵. اگر بازده یک نیروگاه 40% باشد و توان گرمایی 2500 MW باشد، توان برقی چند MW است؟

$$\text{حل: توان برقی} = 1000 \text{ MW} = 0.40 \times 2500$$

جواب: 1000 MW

۱۶. یک نمونه پس از 3 نیمه عمر 25 g باقی دارد. مقدار اولیه آن چند گرام بوده است؟

حل: پس از 3 نیمه عمر مقدار $\div 8$ می شود، پس مقدار اولیه $= 200 \text{ g} = 25 \times 8$

جواب: مقدار اولیه 200 g بوده است.

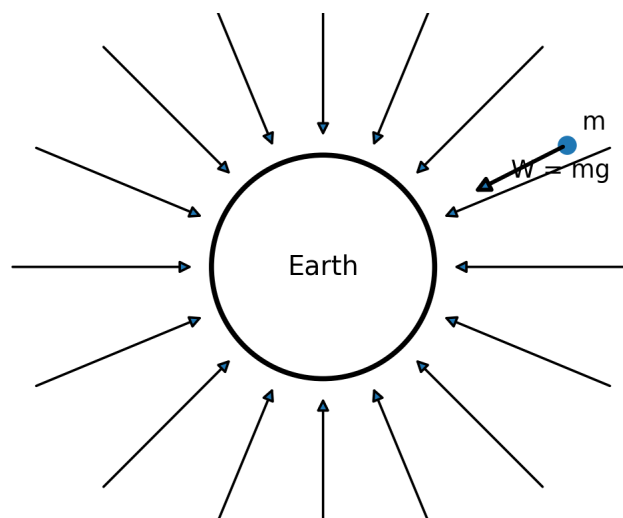
منابع

1. International Atomic Energy Agency. (2014). Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA.
2. Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2016). University physics: Volume 3. OpenStax, Rice University.
3. Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N., & Tiesinga, E. (2024). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022. Reviews of Modern Physics .
4. National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). Solar system exploration. NASA.
5. Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). Physics for scientists and engineers with modern physics (10th ed.). Cengage Learning.
6. Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). Physics for scientists and engineers (6th ed.). W. H. Freeman and Company.
7. Young, H. D., & Freedman, R. A. (2019). University physics with modern physics (15th ed.). Pearson.

فصل هفتم

درک میدان‌های ثقلی، برقی و مقناطیسی

بخش اول: درک میدان‌ها و قوه‌های ثقلی



توضیح مفصل مفاهیم ۱,۱ تا ۱,۵ همراه با جدول‌ها، مثال‌های حل‌شده و تصویرهای آموزشی

فهرست مطالب

هدف‌های آموزشی

واژه‌های کلیدی و نمادها

۱,۱ مفهوم میدان قوه و میدان ثقلی

۱,۲ قانون عکس مجذور برای قوه ثقل

۱,۳ اثر میدان ثقلی بر حرکت اجسام

۱,۴ راکت‌ها، سفینه‌ها، سرعت مداری و سرعت فرار

۱,۵ سرعت نهایی و نقش چتر نجات

هدف‌های آموزشی

- مفهوم میدان قوه را تعریف کنید و آن را در مورد میدان ثقلی زمین به کار ببرید.
- میان کتله، وزن، قدرت میدان ثقلی و شتاب سقوط آزاد ارتباط برقرار کنید.
- قانون جهانی ثقل و قانون عکس مجذور را تشریح و در مسائل عددی استفاده کنید.
- تفاوت حرکت روی زمین، سقوط آزاد، مدار و پی‌وزنی ظاهری را توضیح دهید.
- اصل کار راکت و سفینه فضایی را با قانون سوم نیوتن، تکانه و رانش توضیح دهید.
- سرعت مداری و سرعت فرار را تعریف کرده و عوامل مؤثر بر آن‌ها را مشخص کنید.
- مفهوم سرعت نهایی، مقاومت هوا و نقش چتر نجات را به صورت کیفی و کمی تحلیل کنید.

واژه‌های کلیدی و نمادها

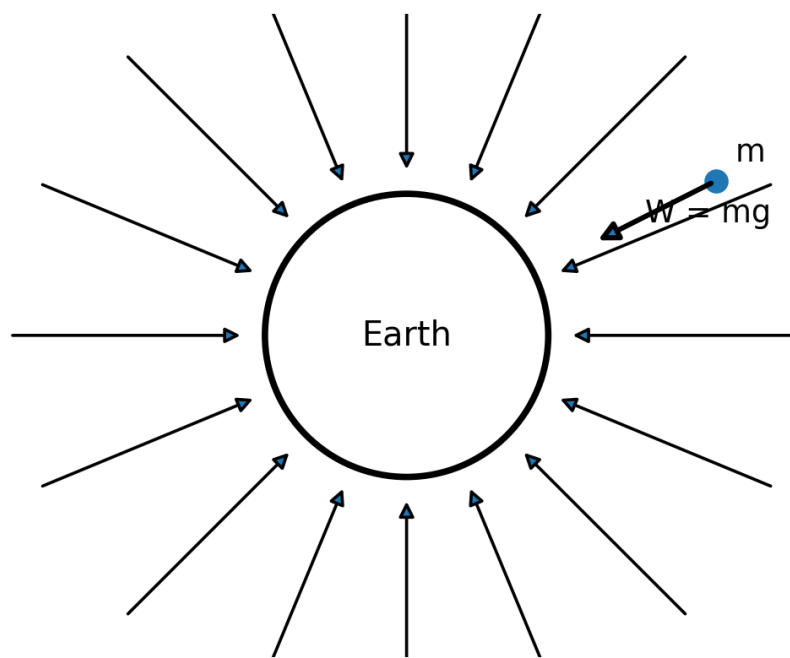
معنا	واحد SI	نماد یا اصطلاح
کتله (جرم)	kg	m
وزن یا قوه ثقلی وارد بر جسم	N	W
قدرت میدان ثقلی یا شتاب سقوط آزاد	N/kg یا m/s^2	g
ثابت جهانی ثقل	$N \cdot m^2/kg^2$	G
فاصله از مرکز جسم	m	r
سرعت	m/s	v
مقاومت هوا یا قوه درگ	N	D

نکته زبانی: در این متن «کتله» برای مقدار ماده جسم و «وزن» برای قوه ثقلی وارد بر جسم استفاده شده است. وزن و کتله یک معنا ندارند.

میدان قوه چیست؟

میدان قوه ناحیه‌ای از فضا است که در آن یک جسم می‌تواند بدون تماس مستقیم، بر جسم دیگری قوه وارد کند. وجود میدان به این معنا نیست که فضا با ماده قابل مشاهده پُر شده است؛ بلکه نشان می‌دهد اگر جسم مناسب در آن نقطه قرار گیرد، قوه‌ای را احساس خواهد کرد. برای نمونه، زمین در اطراف خود میدان ثقلی ایجاد می‌کند و هر جسم دارای کتله که وارد این میدان شود، به سوی مرکز زمین کشیده می‌شود.

در فزیک، میدان را در هر نقطه با دو ویژگی توصیف می‌کنیم: «اندازه» و «جهت». به همین دلیل میدان ثقلی یک کمیت برداری است. جهت میدان ثقلی در هر نقطه، جهت قوه‌ای است که بر یک کتله آزمایشی کوچک وارد می‌شود. در اطراف یک جسم کروی مانند زمین، جهت میدان به سوی مرکز آن جسم است.



شکل ۱: خطوط میدان ثقلی به سوی مرکز زمین جهت دارند و وزن جسم نیز در همین جهت عمل می‌کند.

قدرت میدان ثقلی

قدرت میدان ثقلی در یک نقطه نشان می‌دهد که بر هر کیلوگرام کتله در آن نقطه چه مقدار قوه ثقلی وارد می‌شود. نماد آن g و واحد آن نیوتن بر کیلوگرام (N/kg) است.

$$g = F / m$$

قدرت میدان ثقلی = قوه ثقلی ÷ کتله

فزیک سطح دو
در نزدیکی سطح زمین، مقدار متوسط g تقریباً 9.8 N/kg است. این بدان معناست که بر هر 1 kg کتله، تقریباً 9.8 N قوهٔ ثقلی وارد می‌شود. در مسائل سادهٔ مکتب گاهی g را 10 N/kg در نظر می‌گیرند تا محاسبه آسان‌تر شود؛ اما اگر مقدار دقیق‌تر لازم باشد، از 9.8 استفاده می‌کنیم.

رابطهٔ کتله و وزن

کتله مقدار مادهٔ موجود در جسم است و با تغییر مکان معمولاً تغییر نمی‌کند. وزن قوه‌ای است که میدان ثقلی بر جسم وارد می‌کند؛ بنابراین با تغییر قدرت میدان، وزن نیز تغییر می‌کند.

$$W = m g$$

وزن = کتله $\times$ قدرت میدان ثقلی

وزن	کتله	ویژگی
قوهٔ ثقلی وارد بر جسم	مقدار مادهٔ جسم	تعریف
W	m	نماد
نیوتن (N)	کیلوگرام (kg)	واحد
با تغییر g تغییر می‌کند	معمولاً ثابت می‌ماند	تغییر با مکان
نیروسنج یا فنرسنج	ترازو	وسیلهٔ اندازه‌گیری

مثال حل شده ۱

کتلهٔ یک شاگرد 50 kg است. وزن او روی زمین چقدر است؟

گام 1: داده‌ها را می‌نویسیم: $g = 9.8 \text{ N/kg}$ و $m = 50 \text{ kg}$

گام 2: رابطه را انتخاب می‌کنیم: $W = mg$

گام 3: اعداد را جای گذاری می‌کنیم: $W = 50 \times 9.8 = 490 \text{ N}$

پاسخ نهایی: وزن شاگرد تقریباً 490 N است.

چرا g هم N/kg و هم m/s^2 است؟

از قانون دوم نیوتن می‌دانیم $F = ma$. اگر قوهٔ ثقلی را جای F بگذاریم، $W = mg$ به دست می‌آید. بنابراین g هم قدرت میدان ثقلی و هم شتاب سقوط آزاد را نشان می‌دهد. از نظر واحد نیز 1 N/kg برابر 1 m/s^2 است؛ زیرا یک نیوتن برابر $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ است.

نکته کلیدی: میدان ثقلی وجود دارد، حتی اگر جسمی برای آشکار کردن آن در آن نقطه قرار نداشته باشد. جسم آزمایشی فقط اثر میدان را نشان می‌دهد.

نمایش میدان با خطوط میدان

- پیکان خطوط میدان جهت قوه بر یک کتله آزمایشی را نشان می‌دهد.
- هرچه خطوط به هم نزدیک‌تر باشند، میدان قوی‌تر است.
- در اطراف زمین، خطوط تقریباً شعاعی و رو به مرکز هستند.
- در فاصله‌های بسیار کوچک نزدیک سطح زمین، خطوط را می‌توان تقریباً موازی در نظر گرفت؛ به همین دلیل میدان نزدیک سطح زمین تقریباً یکنواخت فرض می‌شود.

نتیجه برای جسم 10 kg	مقدار تقریبی g	مکان
وزن $\approx 98 \text{ N}$	9.8 N/kg	سطح زمین
وزن $\approx 16 \text{ N}$	1.6 N/kg	سطح ماه
وزن بسیار کم، اما کتله همان 10 kg	بسیار کوچک	فضای دور از اجرام

۱,۲ قانون عکس مجذور برای قوه ثقل میان جرم‌های نقطه‌ای

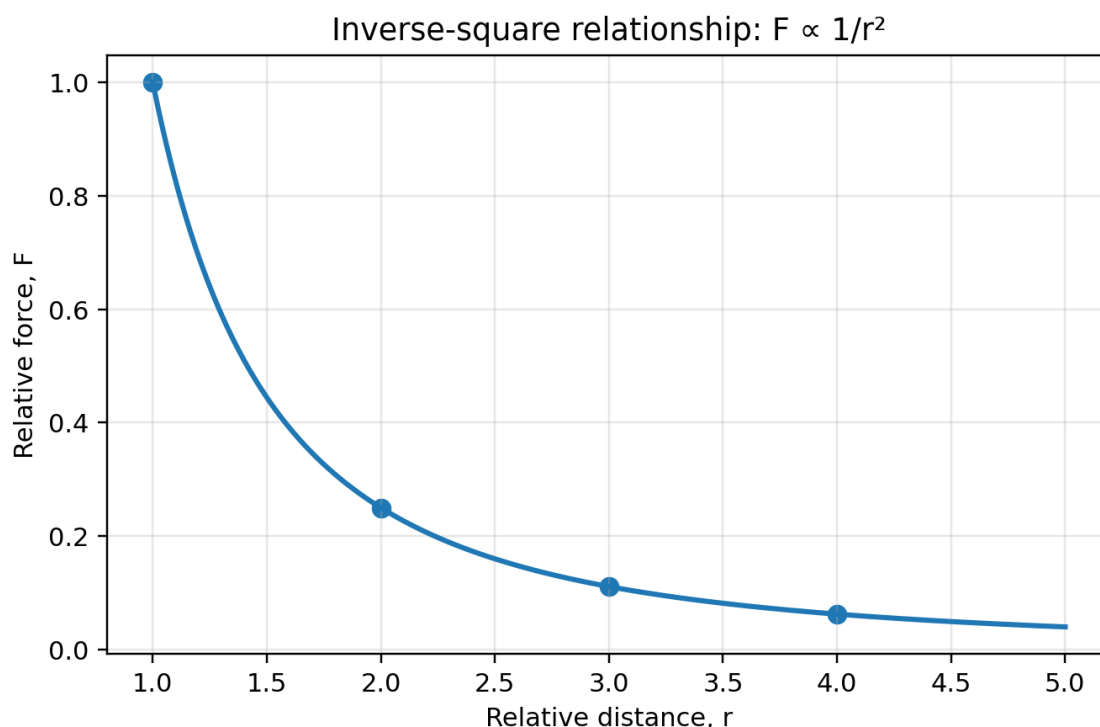
قانون جهانی ثقل نیوتن

هر دو جسم دارای کتله، یکدیگر را با قوه ثقلی جذب می‌کنند. مقدار این قوه به حاصل ضرب کتله‌های دو جسم وابسته است و با مجذور فاصله میان مرکزهای آن‌ها نسبت معکوس دارد. اگر اندازه اجسام در مقایسه با فاصله میان آن‌ها بسیار کوچک باشد، می‌توان آن‌ها را «جرم نقطه‌ای» فرض کرد. برای اجسام کروی متقارن نیز می‌توان تمام کتله را به گونه‌ای در نظر گرفت که در مرکز جسم متمرکز شده است.

$$F = G m_1 m_2 / r^2$$

$$r \text{ و } G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 \text{ فاصله میان مرکزهای دو جسم است.}$$

این رابطه چهار پیام مهم دارد: اگر یکی از کتله‌ها دو برابر شود، قوه دو برابر می‌شود؛ اگر هر دو کتله دو برابر شوند، قوه چهار برابر می‌شود؛ اگر فاصله دو برابر شود، قوه به یک‌چهارم می‌رسد؛ و اگر فاصله سه برابر شود، قوه به یک‌نهم کاهش می‌یابد.



شکل ۲: کاهش قوهٔ ثقلی مطابق رابطهٔ عکس مجذور؛ افزایش اندک فاصله، قوه را به سرعت کاهش می‌دهد.

درک قانون عکس مجذور

عبارت «عکس مجذور» یعنی قوه با $1/r^2$ متناسب است. بنابراین باید عامل تغییر فاصله را ابتدا به توان دوم برسانیم و سپس معکوس آن را بگیریم. این کاهش سریع به دلیل گسترش اثر میدان در سطح کره‌های بزرگ‌تر است. مساحت سطح کره برابر $4\pi r^2$ است؛ وقتی فاصله افزایش می‌یابد، همان اثر در مساحت بزرگ‌تری پخش می‌شود.

قوهٔ جدید نسبت به قوهٔ اول	عامل تغییر فاصله	فاصلهٔ جدید
F	1	r
F/4	2	2r
F/9	3	3r
F/16	4	4r
4F	1/2	r/2

مثال حل شده ۲

قوة ثقلی میان دو جسم در فاصله r برابر 80 N است. اگر فاصله به $2r$ افزایش یابد، قوه چقدر می شود؟

گام 1: فاصله دو برابر شده است؛ بنابراین عامل فاصله 2 است.

گام 2: مطابق قانون عکس مجذور، قوه بر 2^2 تقسیم می شود.

گام 3: $F_{\text{جدید}} = 80/4 = 20\text{ N}$

پاسخ نهایی: قوه جدید 20 N است.

مثال حل شده ۳

اگر فاصله میان دو جسم نصف شود، قوه ثقلی چند برابر می شود؟

گام 1: عامل فاصله $2/1$ است.

گام 2: قوه با معکوس مجذور فاصله تغییر می کند. $1/(1/2)^2 = 4$

گام 3: بنابراین قوه چهار برابر می شود.

پاسخ نهایی: $4F$ جدید

رابطه قدرت میدان ثقلی با فاصله

اگر جسم بزرگی با کتله M میدان ایجاد کند و یک کتله آزمایشی m در فاصله r قرار گیرد، با تقسیم قوه بر m رابطه قدرت میدان به دست می آید:

$$g = G M / r^2$$

قدرت میدان ثقلی به کتله جسم ایجادکننده و فاصله از مرکز آن بستگی دارد.

در این رابطه، کتله جسم آزمایشی حذف می شود. به همین دلیل در یک نقطه مشخص، همه اجسام — در صورت ناچیز بودن مقاومت هوا — شتاب یکسانی دارند. یک سنگ بزرگ و یک سنگ کوچک در خلأ با شتاب برابر سقوط می کنند، هرچند وزن سنگ بزرگ تر بیشتر است.

اشتباه رایج: فاصله r از سطح زمین اندازه گیری نمی شود؛ بلکه از مرکز زمین اندازه گیری می شود. اگر جسم در ارتفاع h بالای سطح زمین باشد، $r = R + h$ است.

ثابت جهانی ثقل G بسیار کوچک است. بنابراین قوهٔ ثقلی میان دو جسم معمولی، مانند دو کتاب یا دو انسان، بسیار ضعیف است و در برابر اصطکاک، قوه‌های برقی و سایر اثرها قابل مشاهده نیست. اما زمین و ستاره‌ها کتلهٔ بسیار بزرگی دارند؛ از این رو قوهٔ ثقلی آن‌ها قابل توجه است.

اثر بر قوهٔ ثقلی	تغییر
قوه 2 برابر می‌شود	m_1 دو برابر شود
قوه 3 برابر می‌شود	m_2 سه برابر شود
قوه 4 برابر می‌شود	هر دو کتله دو برابر شوند
قوه $4/1$ می‌شود	فاصله دو برابر شود
قوه 4 برابر می‌شود	فاصله نصف شود

۱,۳ اثر میدان‌های ثقلی بر حرکت اجسام روی زمین و در فضا

سقوط آزاد نزدیک سطح زمین

سقوط آزاد حالتی است که تنها قوهٔ قابل توجه وارد بر جسم، قوهٔ ثقل باشد. در خلأ، همهٔ اجسام نزدیک سطح زمین با شتاب تقریباً 9.8 m/s^2 به سوی پایین حرکت می‌کنند. عبارت « 9.8 m/s^2 » یعنی سرعت جسم در هر ثانیه تقریباً 9.8 m/s افزایش می‌یابد، تا زمانی که مقاومت هوا یا برخورد با زمین حرکت را تغییر دهد.

$$a = g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$$

در سقوط آزاد نزدیک سطح زمین و با صرف نظر از مقاومت هوا

اگر جسم از حالت سکون رها شود، پس از یک ثانیه سرعتش تقریباً 9.8 m/s ، پس از دو ثانیه 19.6 m/s و پس از سه ثانیه 29.4 m/s خواهد بود. این محاسبه فقط زمانی دقیق است که مقاومت هوا ناچیز باشد و g تقریباً ثابت فرض شود.

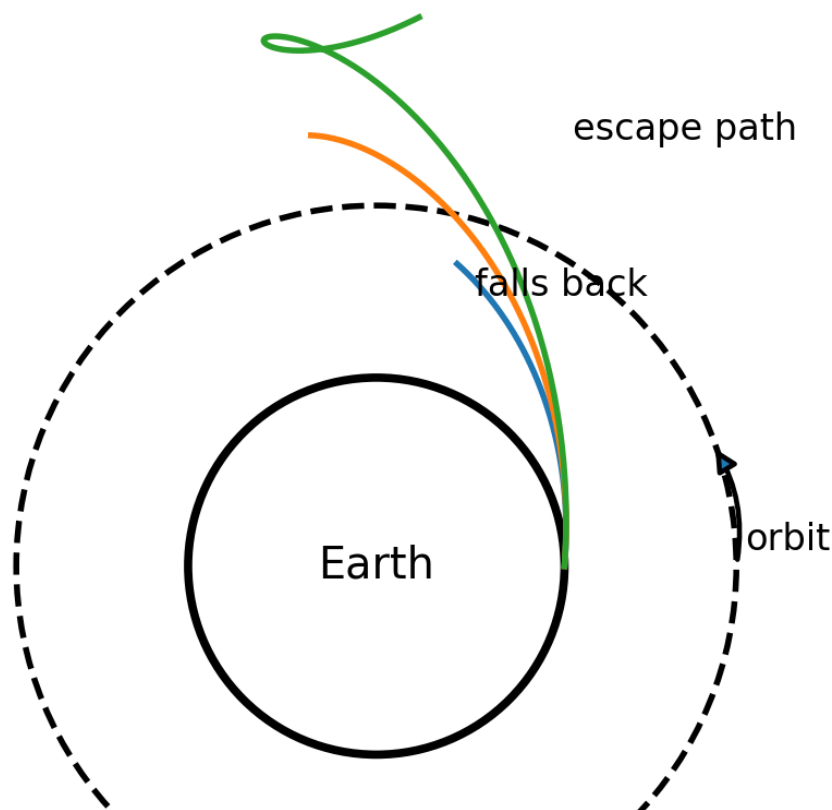
مسافت تقریبی سقوط	سرعت تقریبی در خلأ	زمان سقوط
0 m	0 m/s	0 s
4.9 m	9.8 m/s	1 s
19.6 m	19.6 m/s	2 s
44.1 m	29.4 m/s	3 s

وقتی جسمی به صورت افقی یا مایل پرتاب می‌شود، حرکت آن ترکیبی از دو حرکت است: در جهت افقی، در نبود مقاومت هوا سرعت تقریباً ثابت می‌ماند؛ در جهت عمودی، میدان ثقلی جسم را شتاب می‌دهد. نتیجه این دو حرکت، مسیر خمیده یا سهمی شکل است. قوه ثقل همواره به سوی پایین عمل می‌کند، حتی هنگامی که جسم رو به بالا حرکت می‌کند.

در بالاترین نقطه پرتاب عمودی، سرعت لحظه‌ای جسم ممکن است صفر شود، اما شتاب آن صفر نیست؛ شتاب همچنان g و رو به پایین است. همین شتاب سبب می‌شود جسم دوباره به سوی زمین برگردد.

مدار: سقوط پیوسته به دور زمین

ماهواره در مدار از قوه ثقل فرار نکرده است. برعکس، قوه ثقل همان قوه مرکزگرا است که مسیر ماهواره را خم می‌کند. ماهواره به طور پیوسته به سوی زمین سقوط می‌کند، اما سرعت افقی آن آنقدر زیاد است که هم‌زمان با سقوط، سطح خمیده زمین نیز از زیر آن دور می‌شود. به همین دلیل ماهواره به زمین برخورد نمی‌کند و در مسیر مداری باقی می‌ماند.



شکل ۳: سرعت کم سبب بازگشت جسم به زمین می‌شود؛ سرعت مناسب مدار ایجاد می‌کند و سرعت بسیار زیاد می‌تواند مسیر فرار بسازد.

پی‌وزنی ظاهری در فضا

فضانوردان در ایستگاه فضایی پی‌وزن به نظر می‌رسند، اما میدان ثقلی زمین در آن ارتفاع هنوز قابل توجه است. فضانورد و سفینه هر دو با شتاب تقریباً یکسان در حال سقوط آزاد به دور زمین هستند؛ بنابراین سطحی وجود ندارد که بر بدن فضانورد قوه تکیه‌گاه وارد کند. نبود قوه تکیه‌گاه، احساس پی‌وزنی ایجاد می‌کند.

نکته مهم: بی وزنی ظاهری به معنای نبود قوهٔ ثقل نیست. جسم در مدار همچنان تحت اثر قوهٔ ثقل قرار دارد.

حرکت سیاره‌ها و ماه‌ها

قوهٔ ثقلی خورشید، زمین را در مدار نگه می‌دارد و قوهٔ ثقلی زمین، ماه را در مدار خود حفظ می‌کند. اگر قوهٔ ثقلی ناگهان از بین می‌رفت، جسم مداری در امتداد خط مماس بر مدار حرکت می‌کرد. میدان ثقلی با تغییر پیوستهٔ جهت سرعت، مسیر را منحنی می‌سازد.

نتیجهٔ حرکت	قوهٔ اصلی	وضعیت
سقوط با شتاب	قوهٔ ثقلی رو به پایین	جسم رها شده نزدیک زمین
مسیر سهمی شکل	قوهٔ ثقلی رو به پایین	توپ پرتاب شده
حرکت مداری	قوهٔ ثقلی به سوی مرکز زمین	ماهواره در مدار
بی وزنی ظاهری	فضانورد و سفینه هر دو در سقوط آزاد	فضانورد داخل سفینه
مدار سیاره‌ای	قوهٔ ثقلی خورشید	سیاره به دور خورشید

انرژی در میدان ثقلی

جسمی که در ارتفاع قرار دارد، انرژی پتانسیل ثقلی دارد. نزدیک سطح زمین می‌توان از رابطهٔ $E_p = mgh$ استفاده کرد. هنگام سقوط، انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد و به انرژی حرکتی تبدیل می‌شود. در نبود مقاومت هوا، مجموع انرژی مکانیکی ثابت می‌ماند. اگر مقاومت هوا وجود داشته باشد، بخشی از انرژی به گرما و صوت تبدیل می‌شود.

$$E_p = m g h$$

برای ارتفاع‌های کوچک در مقایسه با شعاع زمین

مثال حل شده ۴

یک بستهٔ 3 kg در ارتفاع 5 m قرار دارد. انرژی پتانسیل ثقلی آن نسبت به زمین چقدر است؟

گام 1: $h = 5 \text{ m}$ و $g = 9.8 \text{ N/kg}$ ، $m = 3 \text{ kg}$

گام 2: $E_p = mgh = 3 \times 9.8 \times 5$

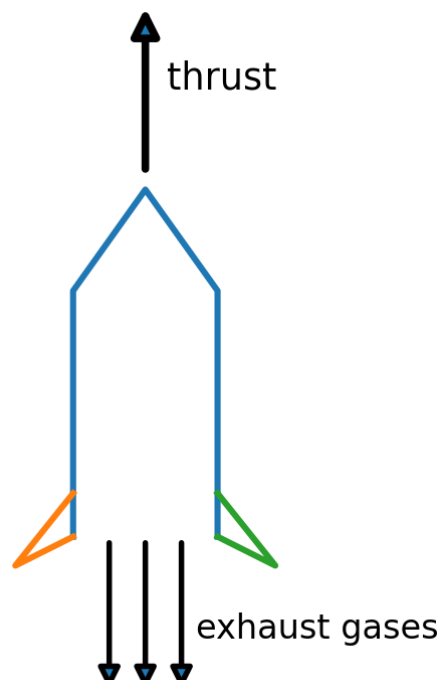
گام 3: $E_p = 147 \text{ J}$

پاسخ نهایی: انرژی پتانسیل ثقلی بسته 147 ژول است.

۱,۴ کار راکت‌ها و سفینه‌های فضایی، سرعت مداری و سرعت فرار

اصل کار راکت

راکت برای حرکت به هوا نیاز ندارد و در خلأ نیز کار می‌کند. موتور راکت سوخت و اکسیدکننده را می‌سوزاند و گازهای داغ را با سرعت زیاد به سوی عقب پرتاب می‌کند. مطابق قانون سوم نیوتن، راکت قوه‌ای مساوی و مخالف به سوی جلو دریافت می‌کند. این قوه را رانش می‌نامند.



شکل ۴: گازها به سوی پایین و عقب خارج می‌شوند و راکت رانشی رو به بالا و جلو دریافت می‌کند.

$$\text{Thrust} \approx \dot{m} v_e$$

رانش تقریباً برابر است با نرخ خروج کتله گاز $\times$ سرعت خروج گاز

برای بلند شدن راکت، رانش باید از وزن راکت بیشتر باشد. در لحظه پرتاب، راکت بسیار سنگین است زیرا مقدار زیادی سوخت حمل می‌کند. با مصرف سوخت، کتله کاهش می‌یابد و شتاب می‌تواند افزایش یابد، مشروط بر آن‌که رانش کافی باقی بماند.

چرا راکت‌ها چند مرحله‌ای ساخته می‌شوند؟

- مخزن‌ها و موتورهای خالی دیگر مفید نیستند و فقط کتله اضافی ایجاد می‌کنند.
- با جدا کردن مرحله مصرف‌شده، کتله کل کاهش می‌یابد و مرحله بعدی مؤثرتر شتاب می‌گیرد.
- هر مرحله برای بخش خاصی از پرواز طراحی می‌شود؛ مرحله اول رانش زیاد و مرحله‌های بالایی کارایی بیشتر در خلأ دارند.
- سامانه‌های هدایت، جهت رانش را تغییر می‌دهند تا راکت از مسیر عمودی به مسیر افقی مناسب مدار وارد شود.

قوه	توضیح	جهت
رانش	بر اثر خروج گازها از موتور	رو به بالا/جلو
وزن	$W = mg$	به سوی مرکز زمین
مقاومت هوا	در جو مهم است و با سرعت افزایش می‌یابد	مخالف حرکت
قوة برا	در برخی وسایل و مراحل پرواز نقش دارد	گاهی عمود بر حرکت

در آغاز، اگر رانش فقط اندکی بیشتر از وزن باشد، شتاب کم است. با کاهش کتله و تغییر مقاومت هوا، شتاب تغییر می‌کند. مهندسان باید فشار هوا، گرم شدن بدنه، لرزش، سوخت، مسیر و پایداری را هم‌زمان کنترل کنند.

سرعت مداری

سرعت مداری سرعتی است که جسم در فاصله مشخص از مرکز یک سیاره نیاز دارد تا در مدار دایروی باقی بماند. در مدار دایروی، قوه ثقلی نقش قوه مرکزگرا را دارد. با برابر قرار دادن این دو قوه، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{(GM / r)}$$

M کتله سیاره و r فاصله ماهواره از مرکز سیاره است.

این رابطه نشان می‌دهد هرچه مدار بالاتر باشد، سرعت مداری دایروی کمتر است. با این حال ماهواره در مدار بالاتر مسیر طولانی‌تری دارد و مدت گردش آن بیشتر می‌شود. ماهواره‌های مدار پایین زمین معمولاً سرعتی نزدیک 7.8 km/s دارند، در حالی که ماهواره زمین‌آهنگ در فاصله بسیار بیشتر با سرعت کمتر حرکت می‌کند.

نوع مسیر	نتیجه	سرعت تقریبی نزدیک زمین
کمتر از سرعت مداری لازم	جسم به زمین برمی‌گردد یا وارد مدار بیضوی پایین می‌شود	کمتر از حدود 7.8 km/s
سرعت مناسب مدار پایین	مدار نزدیک و تقریباً دایروی	حدود 7.8 km/s
بیشتر از سرعت مداری ولی کمتر از فرار	مدار بیضوی بزرگ‌تر	میان 7.8 و 11.2 km/s
سرعت فرار یا بیشتر	جسم می‌تواند بدون پیشرانیش بیشتر از زمین دور شود	حدود 11.2 km/s یا بیشتر

سرعت فرار کمترین سرعت اولیه‌ای است که یک جسم باید در فاصله مشخص داشته باشد تا بدون استفاده بیشتر از موتور، بتواند از میدان ثقلی جسم آسمانی دور شود و در پی نهایت سرعتش به صفر نزدیک گردد. این مفهوم از برابری انرژی حرکتی اولیه و انرژی لازم برای غلبه بر جاذبه به دست می‌آید.

$$v_e = \sqrt{(2 G M / r)}$$

سرعت فرار از سطح زمین تقریباً 11.2 km/s است.

سرعت فرار به کتله جسم پرتاب‌شونده وابسته نیست؛ یک سنگ و یک سفینه در مکان یکسان، در مدل ایده‌آل سرعت فرار یکسان دارند. اما در عمل، مقاومت هوا، گرما، مسیر و نیاز به کنترل باعث می‌شود سفینه‌ها با موتور در مدت طولانی شتاب بگیرند، نه این که فوراً به 11.2 km/s برسند.

مثال مفهومی ۵

چرا سرعت فرار از ماه کمتر از زمین است؟

گام 1: کتله ماه بسیار کمتر از کتله زمین است.

گام 2: قدرت میدان ثقلی ماه ضعیف‌تر است.

گام 3: در رابطه $v_e = \sqrt{(2GM/r)}$ ، مقدار M کوچک‌تر سبب سرعت فرار کمتر می‌شود.

پاسخ نهایی: سرعت فرار از ماه حدود 2.4 km/s است، بسیار کمتر از 11.2 km/s زمین.

تفاوت سرعت مداری و سرعت فرار

ویژگی	سرعت مداری	سرعت فرار
هدف	باقی ماندن در مدار	رهایی از میدان ثقلی
رابطه	$v = \sqrt{(GM/r)}$	$v_e = \sqrt{(2GM/r)}$
نسبت در یک فاصله	v	$2v$ برابر سرعت مداری
مسیر ایده‌آل	دایروی یا بیضوی بسته	مسیر باز
وابستگی به کتله سفینه	ندارد	ندارد

نکته امتحانی: قرار گرفتن در مدار فقط «بالا رفتن» نیست. بخش بزرگی از انرژی پرتاب برای ایجاد سرعت افقی بسیار زیاد مصرف می‌شود.

سفینه فضایی چگونه مسیر خود را تغییر می‌دهد؟

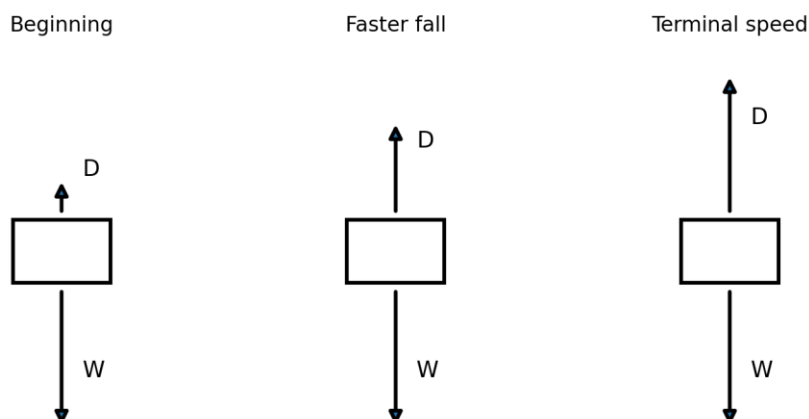
سفینه با روشن کردن موتور در جهت‌های حساب‌شده، سرعت و مسیر خود را تغییر می‌دهد. افزایش سرعت در جهت حرکت می‌تواند مدار را بلندتر کند؛ کاهش سرعت می‌تواند مدار را پایین بیاورد. برای برگشت به زمین، سفینه معمولاً یک سوختن کوتاه در خلاف جهت حرکت انجام می‌دهد تا سرعت مداری کم شود و مسیر وارد جو گردد. هنگام ورود دوباره، مقاومت هوا انرژی حرکتی را به گرما تبدیل می‌کند؛ بنابراین سپر حرارتی ضروری است.

عمل موتور	نتیجه مداری معمول	اثر فوری
رانش در جهت حرکت	بالا رفتن بخش مقابل مدار	افزایش سرعت
رانش خلاف جهت حرکت	پایین آمدن مدار و امکان ورود دوباره	کاهش سرعت
رانش جانبی	اصلاح صفحه یا جهت مدار	تغییر جهت بردار سرعت

۱,۵ مفهوم سرعت نهایی و نقش چتر نجات

نیروهای وارد بر جسم در حال سقوط

هنگامی که جسم در هوا سقوط می‌کند، دست‌کم دو قوه مهم بر آن وارد می‌شود: وزن رو به پایین و مقاومت هوا رو به بالا. وزن تقریباً ثابت می‌ماند، اما مقاومت هوا به سرعت، شکل، مساحت سطح، چگالی هوا و وضعیت جسم وابسته است.



شکل ۵: در آغاز مقاومت هوا کم است؛ با افزایش سرعت بیشتر می‌شود و در سرعت نهایی با وزن برابر می‌گردد.

$$F_{\text{net}} = W - D = m g - D$$

اگر جهت پایین را مثبت در نظر بگیریم، D مقاومت هوا است.

در لحظهٔ رها شدن، سرعت صفر است و مقاومت هوا تقریباً صفر؛ بنابراین قوهٔ خالص نزدیک به وزن و شتاب نزدیک g است. با افزایش سرعت، مقاومت هوا بیشتر می‌شود و قوهٔ خالص کاهش می‌یابد. سرانجام مقاومت هوا با وزن برابر می‌شود؛ قوهٔ خالص صفر و شتاب صفر می‌گردد. از این لحظه جسم با سرعت ثابت سقوط می‌کند که آن را سرعت نهایی می‌نامند.

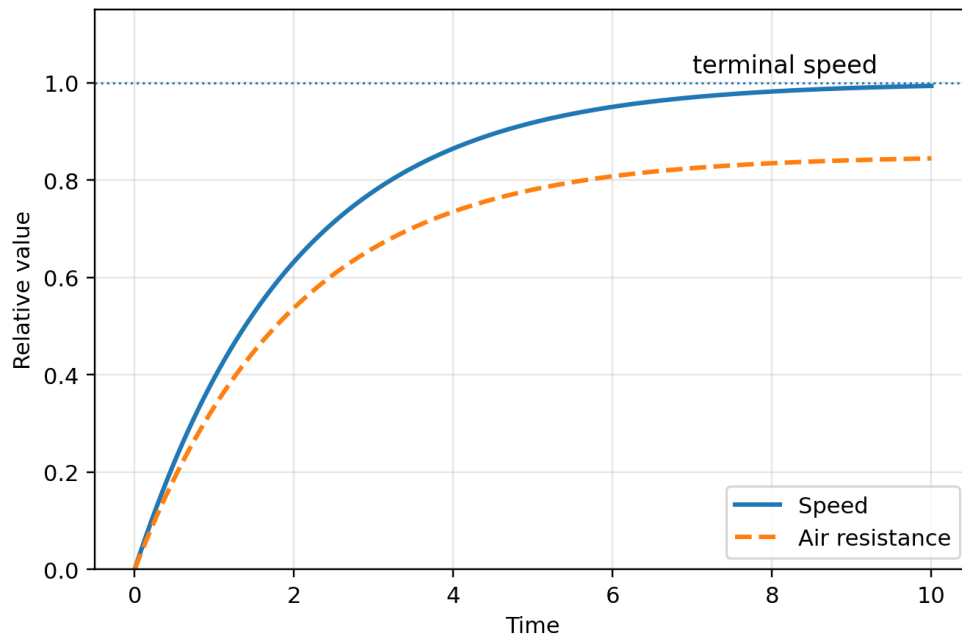
سرعت نهایی به چه عواملی بستگی دارد؟

برای بسیاری از اجسام در سرعت‌های معمول، مقاومت هوا تقریباً با مربع سرعت متناسب است:

$$D \approx \frac{1}{2} \rho C_D A v^2$$

ρ چگالی هوا، C_D ضریب شکل، A مساحت روبه‌جریان و v سرعت است.

- کتله و وزن بیشتر، در صورت ثابت بودن سایر عوامل، معمولاً سرعت نهایی را افزایش می‌دهد.
- مساحت سطح بزرگ‌تر، مقاومت هوا را بیشتر و سرعت نهایی را کمتر می‌کند.
- شکل پهن و نامنظم ضریب مقاومت بیشتری نسبت به شکل باریک و آیرودینامیکی دارد.
- هوای چگال‌تر مقاومت بیشتری ایجاد می‌کند؛ در ارتفاع زیاد که هوا رقیق‌تر است، مقاومت کمتر است.
- وضعیت بدن یا جسم مهم است؛ چتر باز با باز کردن دست و پا سرعت نهایی را کاهش می‌دهد.

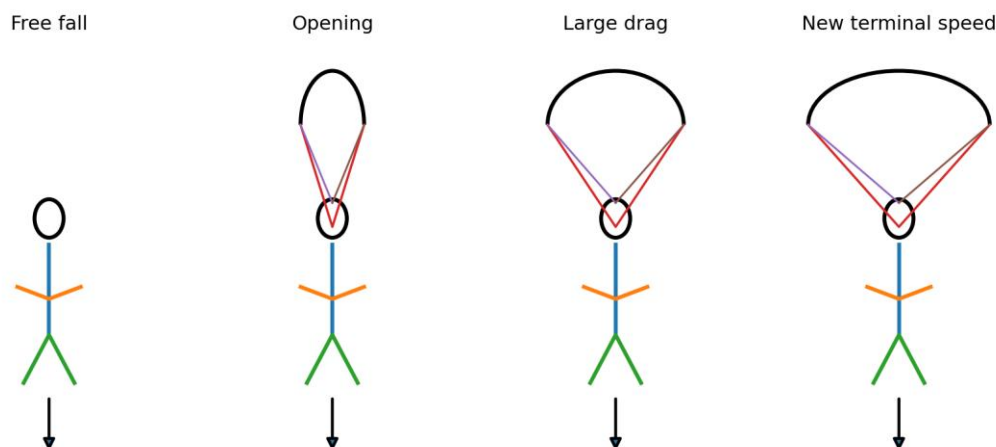


شکل ۶: سرعت به تدریج به مقدار ثابت نزدیک می‌شود؛ هم‌زمان مقاومت هوا افزایش می‌یابد تا با وزن برابر گردد.

مراحل سقوط یک چتر باز

مرحله	شتاب و حرکت	مقایسهٔ قوه‌ها
لحظهٔ پرش	شتاب زیاد رو به پایین	$W > D$ و تقریباً صفر
افزایش سرعت	سرعت افزایش می‌یابد ولی شتاب کمتر می‌شود	$W > D$ اما اختلاف کمتر می‌شود

مرحله	شتاب و حرکت	مقایسه قوه‌ها
سرعت نهایی اول	شتاب صفر؛ سرعت ثابت و نسبتاً زیاد	$W = D$
باز شدن چتر	شتاب رو به بالا؛ سرعت سقوط کاهش می‌یابد	$W < D$ ناگهان
سرعت نهایی دوم	سقوط ثابت و ایمن‌تر	$W = D$ در سرعت کمتر



شکل ۷: باز شدن چتر مساحت سطح را زیاد می‌کند، مقاومت هوا افزایش می‌یابد و سرعت نهایی جدید و کوچک‌تری شکل می‌گیرد.

نقش چتر نجات

چتر نجات با افزایش بسیار زیاد مساحت سطح روبه‌جریان، مقاومت هوا را زیاد می‌کند. درست پس از باز شدن چتر، مقاومت هوا ممکن است از وزن بیشتر شود؛ بنابراین قوه خالص رو به بالا است. این به آن معنا نیست که چتر باز رو به بالا حرکت می‌کند؛ او هنوز رو به پایین حرکت دارد، اما سرعت رو به پایینش کاهش می‌یابد. پس از مدتی، در سرعت پایین‌تر، مقاومت هوا دوباره با وزن برابر می‌شود و سرعت نهایی دوم به وجود می‌آید.

تفاوت جهت حرکت و جهت شتاب: ممکن است جسم رو به پایین حرکت کند، اما شتاب آن رو به بالا باشد. در این حالت سرعت رو به پایین کاهش می‌یابد؛ نمونه آن لحظه‌های پس از باز شدن چتر است.

چرا ورق صاف آهسته‌تر از ورق گلوله‌شده سقوط می‌کند؟

هر دو ورق کتله و وزن تقریباً یکسان دارند، اما ورق صاف مساحت بیشتری در برابر هوا قرار می‌دهد و مقاومت هوای بیشتری ایجاد می‌کند. ورق گلوله‌شده سطح مؤثر کوچک‌تر و شکل فشرده‌تری دارد، بنابراین مقاومت کمتر و سرعت نهایی بیشتری دارد. در خلأ هر دو هم‌زمان سقوط می‌کردند.

مثال مفهومی ۶

دو چتر باز با چترهای هم اندازه سقوط می کنند، اما یکی کتله بیشتری دارد. کدام یک سرعت نهایی بیشتری خواهد داشت؟

گام 1: چتر باز سنگین تر وزن بیشتری دارد.

گام 2: برای برابری مقاومت هوا با وزن بیشتر، باید مقاومت بیشتری ایجاد شود.

گام 3: با چتر و شرایط یکسان، مقاومت بیشتر در سرعت بالاتر به دست می آید.

پاسخ نهایی: چتر باز سنگین تر معمولاً سرعت نهایی بیشتری دارد.

کاربردهای مفهوم سرعت نهایی

کاربرد	نقش مقاومت هوا و سرعت نهایی
چتر نجات	کاهش سرعت فرود انسان یا محموله
چتر ترمزی طیاره	کاهش فاصله توقف پس از فرود
بارگشت کپسول فضایی	کمک جو و چترها به کاهش سرعت
طراحی وسایل ورزشی	کنترل حرکت توپ، دوچرخه و لباس ورزشکار
بارش باران	قطره ها پس از مدتی با سرعت تقریباً ثابت سقوط می کنند

فعالیت عملی ساده: مقایسه مقاومت هوا

بخش	توضیح
مواد لازم	دو ورق کاغذ هم اندازه، متر یا خط کش و ساعت در صورت امکان
روش	یک ورق را صاف نگه دارید و ورق دیگر را گوله کنید. هر دو را هم زمان از ارتفاع یکسان رها کنید.
مشاهده	ورق گوله شده معمولاً زودتر به زمین می رسد.
نتیجه	اختلاف زمان سقوط به دلیل تفاوت مقاومت هوا است، نه تفاوت قوه ثقل.
کنترل متغیرها	جنس کاغذ، کتله، ارتفاع و زمان رها کردن باید یکسان باشد.

خلاصه بخش اول

- میدان قوه ناحیه ای است که در آن جسم می تواند بدون تماس مستقیم قوه ای را تجربه کند.
- قدرت میدان ثقلی g قوه بر واحد کتله است و نزدیک سطح زمین حدود 9.8 N/kg است.
- وزن با $W = mg$ محاسبه می شود؛ کتله ثابت تر است، اما وزن با مکان تغییر می کند.

- قوهٔ ثقلی با حاصل ضرب کتله‌ها متناسب و با مجذور فاصله نسبت معکوس دارد.
- در خلأ همهٔ اجسام در یک نقطه شتاب سقوط یکسان دارند.
- ماهواره در مدار در حال سقوط آزاد پیوسته است و قوهٔ ثقل نقش قوهٔ مرکزگرا را دارد.
- راکت با بیرون راندن گازها رانش می‌گیرد و برای رسیدن به مدار به سرعت افقی بسیار زیاد نیاز دارد.
- سرعت مداری برای ماندن در مدار و سرعت فرار برای رهایی از میدان ثقلی است.
- سرعت نهایی هنگامی ایجاد می‌شود که مقاومت هوا با وزن برابر و قوهٔ خالص صفر شود.
- چتر نجات با افزایش مساحت سطح، مقاومت هوا را زیاد و سرعت نهایی را کاهش می‌دهد.

سوال‌های تمرینی

1. میدان قوه را تعریف کنید و یک مثال ثقلی بیاورید.
2. چرا جهت میدان ثقلی زمین به سوی مرکز زمین است؟
3. کتلهٔ جسمی 12 kg است. وزن آن را با $g = 9.8 \text{ N/kg}$ محاسبه کنید.
4. اگر فاصلهٔ دو جسم سه برابر شود، قوهٔ ثقلی به چه کسری از مقدار اول می‌رسد؟
5. اگر کتلهٔ هر دو جسم دو برابر شود و فاصله ثابت بماند، قوه چند برابر می‌شود؟
6. توضیح دهید چرا یک ماهواره در مدار به زمین سقوط نمی‌کند، با آن که قوهٔ ثقل بر آن وارد می‌شود.
7. پی‌وزنی ظاهری فضانوردان را توضیح دهید.
8. اصل کار راکت را با قانون سوم نیوتن بیان کنید.
9. دو تفاوت سرعت مداری و سرعت فرار را بنویسید.
10. چرا راکت‌ها معمولاً چندمرحله‌ای ساخته می‌شوند؟
11. سرعت نهایی را تعریف کنید و وضعیت قوه‌ها را در این حالت بنویسید.
12. پس از باز شدن چتر، جهت حرکت و جهت شتاب چتر باز چگونه است؟
13. سه عامل مؤثر بر مقاومت هوا را نام ببرید.
14. چرا ورق گلوله‌شده سریع‌تر از ورق صاف سقوط می‌کند؟
15. یک جسم 4 kg در ارتفاع 8 m قرار دارد. انرژی پتانسیل ثقلی آن را با $g = 9.8 \text{ N/kg}$ محاسبه کنید.

پاسخ‌های کوتاه

1. ناحیه‌ای که جسم در آن بدون تماس مستقیم قوه احساس می‌کند؛ مانند میدان ثقلی زمین.
2. زیرا قوهٔ جاذبهٔ جسم کروی متقارن به سوی مرکز کتلهٔ آن جهت دارد.
3. $W = 12 \times 9.8 = 117.6 \text{ N}$.
4. به 9/1 مقدار اول.
5. 4 برابر.
6. سرعت افقی ماهواره باعث می‌شود هنگام سقوط، انحنای زمین نیز از زیر آن دور شود؛ قوهٔ ثقل مسیر را خم می‌کند.
7. فضانورد و سفینه هر دو در سقوط آزاد هستند و قوهٔ تکیه‌گاه محسوس وجود ندارد.
8. گازها به عقب رانده می‌شوند و راکت قوه‌ای مساوی و مخالف به جلو دریافت می‌کند.

9. سرعت مداری برای مدار بسته است؛ سرعت فرار برای رهایی. سرعت فرار در فاصله یکسان $2v$ برابر سرعت مداری دایروی است.

10. برای دور انداختن مخزن و موتور خالی و کاهش کتله اضافی.

11. سرعت ثابت سقوط هنگامی که $D = W$ و قوه خالص و شتاب صفر است.

12. حرکت هنوز رو به پایین است، اما شتاب رو به بالا است و سرعت سقوط کم می‌شود.

13. سرعت، مساحت سطح، شکل، چگالی هوا و وضعیت جسم — هر سه مورد پذیرفته است.

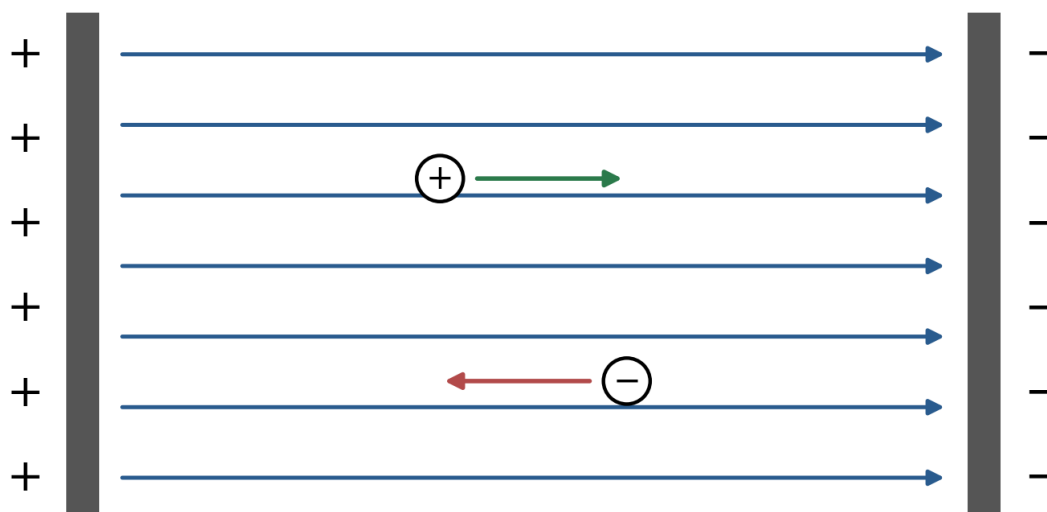
14. ورق صاف مقاومت هوای بیشتری دارد؛ ورق گلوله شده سطح مؤثر کوچک‌تری دارد.

$$15. E_p = 4 \times 9.8 \times 8 = 313.6 \text{ J.}$$

جدول جمع‌بندی فرمول‌ها

موضوع	کاربرد	فرمول
وزن	محاسبه قوه ثقلی نزدیک سطح سیاره	$W = mg$
قدرت میدان	قوه بر واحد کتله	$g = F/m$
قانون جهانی ثقل	قوه میان دو کتله	$F = Gm_1m_2/r^2$
میدان جسم کروی	قدرت میدان در فاصله r	$g = GM/r^2$
انرژی پتانسیل نزدیک زمین	تغییر انرژی در ارتفاع‌های کوچک	$E_p = mgh$
سرعت مداری	مدار دایروی	$v = \sqrt{GM/r}$
سرعت فرار	رهایی ایده‌آل از میدان	$v_e = \sqrt{2GM/r}$
قوه خالص سقوط	تحلیل شتاب با مقاومت هوا	$F_{\text{net}} = mg - D$

پایان بخش اول: این بخش پایه لازم برای مطالعه میدان‌های برقی و مقناطیسی را فراهم می‌کند؛ زیرا در هر سه نوع میدان، مفاهیم قدرت میدان، جهت، خطوط میدان و قوه بر جسم آزمایشی اهمیت دارند.



نمای ساده میدان برقی یکنواخت میان دو صفحه موازی

هدف‌های آموزشی

- تشریح کنید که چارج برقی چگونه ایجاد می‌شود و اجسام چگونه به روش مالش، تماس و القا چارج‌دار می‌گردند.
- مفهوم میدان برقی، جهت خطوط میدان و اثر میدان بر چارج مثبت و منفی را توضیح دهید.
- قانون کولن و تعریف شدت میدان برقی را در حل مسائل ساده به کار ببرید.
- پتانسیل برقی و اختلاف پتانسیل را بر اساس انرژی منتقل‌شده به ازای هر کولن چارج تشریح کنید.
- میدان برقی و میدان ثقلی را از نظر منبع، جهت، نوع قوه، شدت و اثر بر اجسام مقایسه نمایید.
- ویژگی‌های میدان برقی یکنواخت را توضیح داده و کاربردهای عملی آن را نام ببرید.
- فعالیت‌های ساده الکترواستاتیکی را با رعایت نکات ایمنی انجام داده و نتیجه‌گیری کنید.

فهرست بخش‌ها

شماره	عنوان
۲/۱	ایجاد میدان برقی و اثر آن بر چارج‌ها
۲/۲	پتانسیل برقی و اختلاف پتانسیل
۲/۳	مقایسه میدان برقی و میدان ثقلی
۲/۴	میدان‌های برقی یکنواخت و کاربردهای آن‌ها
—	فعالیت‌های عملی، خلاصه، تمرین‌ها و پاسخ‌ها

واژه یا نماد	معنا / واحد
چارج برقی (q یا Q)	خاصیتی که سبب ایجاد قوه برقی می‌شود؛ واحد: کولن (C)
میدان برقی (E)	قوه واردشده بر واحد چارج مثبت آزمایشی؛ واحد: N/C یا V/m
قوه برقی (F)	قوه جذب یا دفع میان چارج‌ها؛ واحد: نیوتن (N)
پتانسیل برقی (V)	انرژی پتانسیل برقی به ازای هر کولن؛ واحد: ولت (V)
اختلاف پتانسیل (ΔV)	انرژی منتقل‌شده به ازای هر کولن میان دو نقطه
فاصله (r یا d)	فاصله از چارج یا فاصله میان صفحات؛ واحد: متر (m)
ثابت کولن (k)	$k \approx 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$
چارج بنیادی (e)	$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ؛ مقدار چارج پروتون یا قدر مطلق چارج الکترون

نکته زبانی و علمی

در این فصل از واژه «چارج» برای electric charge و از «قوه برقی» برای electric force استفاده شده است. جهت میدان برقی همیشه بر اساس جهت قوه بر یک چارج مثبت آزمایشی تعریف می‌شود.

۲/۱ میدان‌های برقی چگونه به وجود می‌آیند و بر چارج‌ها چگونه اثر می‌گذارند؟

چارج برقی چیست؟

تمام مواد از اتم‌ها ساخته شده‌اند. هر اتم دارای پروتون‌های مثبت، الکترون‌های منفی و نوترون‌های بدون چارج است. در یک جسم خنثی، مجموع چارج مثبت و منفی برابر است. اگر جسم الکترون از دست بدهد، مثبت می‌شود و اگر الکترون به دست آورد، منفی می‌شود. در مواد جامد معمولاً پروتون‌ها در هسته ثابت‌اند و الکترون‌ها انتقال می‌یابند.

حالت جسم	تعداد نسبی الکترون و پروتون	چارج خالص
خنثی	تعداد الکترون‌ها و پروتون‌ها برابر است	صفر
مثبت	الکترون از دست داده است	مثبت
منفی	الکترون به دست آورده است	منفی

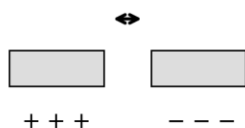
اصل بقای چارج

چارج برقی ایجاد یا نابود نمی‌شود؛ بلکه از جسمی به جسم دیگر انتقال می‌یابد. اگر یک جسم به اندازه مشخصی منفی شود، جسم دیگر یا محیط به همان اندازه چارج مثبت خالص به دست می‌آورد.

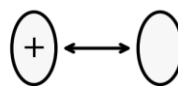
روش‌های چارج‌دار کردن اجسام

روش	چگونگی انجام	نتیجه معمول
مالش	دو ماده متفاوت به هم مالیده می‌شوند و الکترون‌ها میان آن‌ها انتقال می‌یابند.	دو جسم معمولاً چارج‌های مخالف می‌گیرند.
تماس	جسم چارج‌دار با رسانای خنثی تماس پیدا می‌کند و بخشی از چارج جابه‌جا می‌شود.	رسانای دوم اغلب هم‌نوع چارج جسم اول را می‌گیرد.
القا	جسم چارج‌دار بدون تماس به رسانا نزدیک می‌شود و چارج‌ها در رسانا جدا می‌شوند. با اتصال مناسب به زمین، چارج خالص باقی می‌ماند.	چارج‌دار شدن بدون تماس مستقیم ممکن می‌شود.

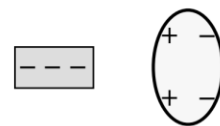
friction



contact



induction



سه روش اصلی چارج‌دار کردن: مالش، تماس و القا

هر چارج برقی فضای اطراف خود را تغییر می‌دهد و در آن ناحیه میدان برقی ایجاد می‌کند. اگر چارج دیگری وارد این ناحیه شود، قوه برقی را احساس می‌کند. میدان وسیله‌ای برای توضیح قوه بدون تماس است؛ یعنی دو چارج لازم نیست با هم تماس داشته باشند تا بر یکدیگر اثر کنند.

$$E = F / q$$

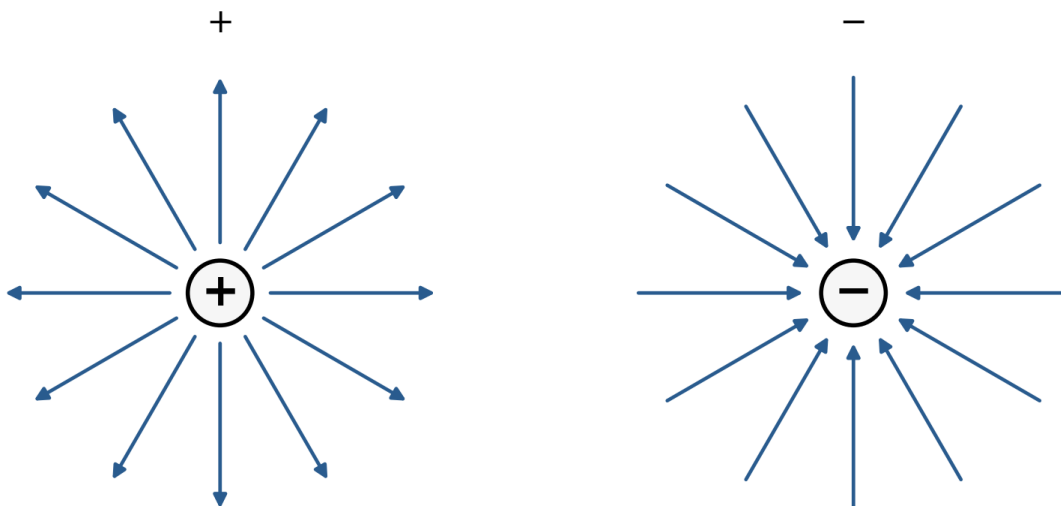
E شدت میدان برقی، F قوه وارد شده بر چارج آزمایشی و q مقدار چارج آزمایشی است.

تعریف بالا نشان می‌دهد که شدت میدان در یک نقطه خاصیت همان نقطه است. برای اندازه‌گیری میدان، یک چارج مثبت کوچک فرضی یا آزمایشی در آن نقطه قرار می‌دهیم؛ چارج باید آنقدر کوچک باشد که میدان اصلی را تغییر ندهد.

جهت خطوط میدان

- خطوط میدان از چارج مثبت خارج می‌شوند و به چارج منفی وارد می‌شوند.
- جهت پیکان، جهت قوه بر یک چارج مثبت آزمایشی را نشان می‌دهد.
- چارج منفی در جهت مخالف پیکان‌های میدان قوه می‌گیرد.
- هرچه خطوط میدان متراکم‌تر باشند، میدان قوی‌تر است.
- خطوط میدان هیچ‌گاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند، زیرا میدان در هر نقطه تنها یک جهت دارد.

Electric field direction



جهت میدان در اطراف چارج نقطه‌ای مثبت و منفی

قوه جذب و دفع میان چارج‌ها

چارج‌های هم‌نام یکدیگر را دفع می‌کنند و چارج‌های ناهم‌نام یکدیگر را جذب می‌کنند. این قوه بر هر دو چارج وارد می‌شود و مطابق قانون سوم نیوتن، دو قوه از نظر اندازه برابر و از نظر جهت مخالف‌اند.



same signs



opposite signs

چارج‌های هم‌نام دفع و چارج‌های ناهم‌نام جذب می‌شوند

قانون کولن و قانون عکس مجذور

برای دو چارج نقطه‌ای، اندازهٔ قوهٔ برقی با حاصل‌ضرب مقدار چارج‌ها متناسب و با مربع فاصلهٔ میان آن‌ها نسبت معکوس دارد. بنابراین، زیاد شدن فاصله اثر بسیار بزرگی بر کاهش قوه دارد.

$$F = k |q_1 q_2| / r^2$$

در این رابطه r فاصلهٔ میان مرکز دو چارج و k ثابت کولن است. علامت چارج‌ها نوع جذب یا دفع را تعیین می‌کند؛ فرمول بالا اندازهٔ قوه را می‌دهد.

تغییر فاصله	قوهٔ جدید نسبت به قوهٔ اول
فاصله ۲ برابر شود	$F/4$
فاصله ۳ برابر شود	$F/9$
فاصله نصف شود	$4F$
فاصله یک‌سوم شود	$9F$

مثال حل‌شده ۱

دو چارج $3 \mu\text{C} -$ و $2 \mu\text{C} +$ به فاصلهٔ 0.20 m قرار دارند. اندازهٔ قوه را بیابید.

$$F = (8.99 \times 10^9)(2 \times 10^{-6})(3 \times 10^{-6}) / (0.20)^2$$

$F \approx 1.35 \text{ N}$. چون چارج‌ها ناهم‌نام‌اند، قوه جاذبه است.

شدت میدان یک چارج نقطه‌ای

اگر میدان توسط یک چارج نقطه‌ای Q ایجاد شود، شدت میدان در فاصلهٔ r از آن با رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود. جهت میدان برای Q مثبت به بیرون و برای Q منفی به سوی چارج است.

$$E = k |Q| / r^2$$

شدت میدان مستقل از مقدار چارج آزمایشی است و تنها به چارج منبع و فاصله بستگی دارد.

مثال حل شده ۲

شدت میدان در فاصله 0.30 m از چارج $+4 \mu\text{C}$ را بیابید.

$$E = (8.99 \times 10^9)(4 \times 10^{-6}) / (0.30)^2$$

و $E \approx 4.0 \times 10^5 \text{ N/C}$ جهت آن از چارج مثبت به بیرون است.

اثر میدان بر چارج مثبت و منفی

$$F = qE$$

برای q مثبت، قوه هم جهت میدان است؛ برای q منفی، قوه خلاف جهت میدان است. اندازه قوه برابر $|q|E$ می باشد.

نوع چارج آزمایشی	جهت قوه نسبت به میدان	نمونه
مثبت	هم جهت پیکان های میدان	پروتون در میدان برقی
منفی	خلاف جهت پیکان های میدان	الکترون در میدان برقی
خنثی	قوه خالص مستقیم ندارد؛ ولی ممکن است قطبی شود	تکه های کاغذ نزدیک شانه چارج دار

چرا جسم خنثی گاهی جذب می شود؟

جسم خنثی مقدار مساوی چارج مثبت و منفی دارد، اما چارج نزدیک می تواند چارج های داخل آن را اندکی جدا یا قطبی کند. بخش ناهم نام نزدیک تر، قوه جاذبه قوی تری نسبت به بخش هم نام دورتر ایجاد می کند؛ در نتیجه جسم خنثی جذب می شود.

رسانا و عایق

ویژگی	رسانا	عایق
حرکت چارج	الکترون ها نسبتاً آزادانه حرکت می کنند	چارج ها به اتم ها یا مولکول ها محکم تر بسته اند
نمونه	فلزها، بدن انسان، آب دارای یون	پلاستیک، شیشه، لاستیک خشک
رفتار در میدان	چارج ها بازتوزیع می شوند؛ داخل رسانای ساکن تقریباً میدان صفر است	قطبی شدن ممکن است، اما چارج آزادانه حرکت نمی کند

- چرا جسمی که الکترون از دست می‌دهد مثبت می‌شود؟
- جهت میدان در اطراف چارج منفی چگونه است؟
- اگر فاصله دو چارج دو برابر شود، قوه چند برابر می‌شود؟
- چرا الکترون در خلاف جهت میدان حرکت شتاب‌دار پیدا می‌کند؟

۲/۲ پتانسیل برقی و اختلاف پتانسیل

از قوه به انرژی

میدان برقی می‌تواند بر یک چارج قوه وارد کند و هنگام جابه‌جایی آن کار انجام دهد. بنابراین، چارج در میدان برقی می‌تواند انرژی پتانسیل داشته باشد. برای نمونه، جدا کردن دو چارج ناهم‌نام به انرژی نیاز دارد، زیرا باید بر قوه جاذبه غلبه کنیم. نزدیک کردن دو چارج هم‌نام نیز به انرژی نیاز دارد، زیرا آن‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند.

تشبیه ثقلی

در میدان ثقلی، بالا بردن یک جسم انرژی پتانسیل ثقلی آن را افزایش می‌دهد. در میدان برقی، جابه‌جایی چارج میان نقاط مختلف می‌تواند انرژی پتانسیل برقی را تغییر دهد. تفاوت مهم این است که چارج می‌تواند مثبت یا منفی باشد؛ از این رو جهت تغییر انرژی به علامت چارج نیز وابسته است.

پتانسیل برقی چیست؟

پتانسیل برقی در یک نقطه برابر انرژی پتانسیل برقی به ازای هر واحد چارج مثبت است. پتانسیل یک کمیت اسکالر است؛ یعنی اندازه دارد، اما جهت ندارد. واحد آن ولت است و هر ولت برابر یک ژول بر کولن می‌باشد.

$$V = U / q$$

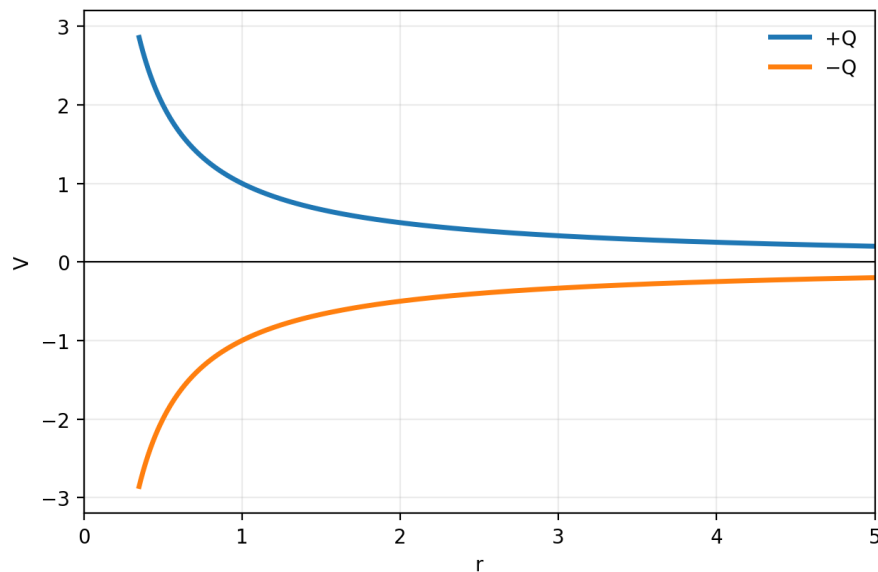
V پتانسیل برقی، U انرژی پتانسیل برقی و q چارج است. $V = 1 \text{ J/C}$

پتانسیل یک چارج نقطه‌ای

$$V = kQ / r$$

پتانسیل می‌تواند مثبت یا منفی باشد؛ علامت آن با علامت چارج منبع Q تعیین می‌شود. نقطه مرجع معمولاً بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود.

پتانسیل در نزدیکی چارج مثبت مثبت و با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. در نزدیکی چارج منفی، پتانسیل منفی است و با دور شدن به صفر نزدیک می‌شود. برخلاف شدت میدان، پتانسیل با $1/r$ تغییر می‌کند، نه $1/r^2$.



تغییر پتانسیل برقی با فاصله از چارج نقطه‌ای مثبت و منفی

اختلاف پتانسیل چیست؟

اختلاف پتانسیل میان دو نقطه نشان می‌دهد هنگام انتقال هر یک کولن چارج از یک نقطه به نقطه دیگر چه مقدار انرژی منتقل می‌شود. در مدارها، باتری به چارج‌ها انرژی می‌دهد و وسایل برقی بخشی از این انرژی را به نور، گرما، حرکت یا صدا تبدیل می‌کنند.

$$\Delta V = \Delta U / q = W / q$$

ΔV اختلاف پتانسیل، ΔU تغییر انرژی پتانسیل، W کار یا انرژی منتقل شده و q چارج انتقال یافته است.

$$\Delta U = q\Delta V$$

برای چارج مثبت، حرکت به پتانسیل بالاتر انرژی پتانسیل را افزایش می‌دهد؛ برای چارج منفی، علامت q سبب می‌شود رابطه جهت تغییر انرژی برعکس شود.

مثال حل شده ۳

برای انتقال 3 C چارج میان دو نقطه، 18 J انرژی منتقل می‌شود. اختلاف پتانسیل را بیابید.

$$\Delta V = W/q = 18/3 = 6 \text{ V.}$$

پس به ازای هر کولن چارج، 6 ژول انرژی منتقل شده است.

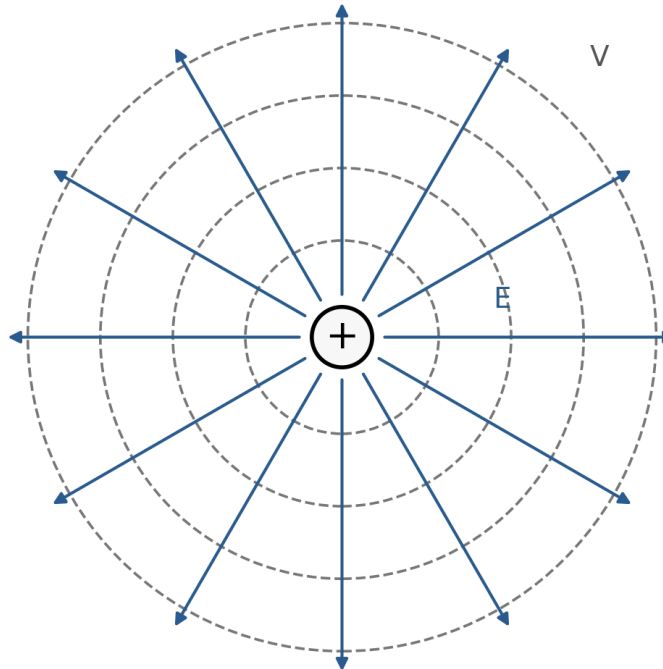
یک الکترون از اختلاف پتانسیل 200 V عبور می‌کند. اندازه تغییر انرژی آن را بیابید.

$$|\Delta U| = e\Delta V = (1.60 \times 10^{-19})(200)$$

$$|\Delta U| = 3.20 \times 10^{-17} \text{ J. این مقدار برابر 200 eV نیز گفته می‌شود.}$$

سطوح هم‌پتانسیل

سطح هم‌پتانسیل مجموعه‌ای از نقاط است که پتانسیل برقی یکسان دارند. حرکت یک چارج روی یک سطح هم‌پتانسیل تغییر انرژی پتانسیل ایجاد نمی‌کند. خطوط میدان همیشه بر سطوح هم‌پتانسیل عمود هستند؛ زیرا میدان در جهتی قرار دارد که پتانسیل سریع‌تر کاهش می‌یابد.



خطوط میدان و حلقه‌های هم‌پتانسیل در اطراف یک چارج مثبت

رابطه میدان و پتانسیل در حالت یکنواخت

در میدان یکنواخت میان دو صفحه موازی، تغییر پتانسیل با فاصله تقریباً خطی است. هرچه اختلاف پتانسیل بیشتر یا فاصله صفحات کمتر باشد، میدان قوی‌تر می‌شود.

$$E = \Delta V / d$$

این رابطه تنها برای میدان یکنواخت یا تقریباً یکنواخت به کار می‌رود. E بر حسب V/m یا N/C است.

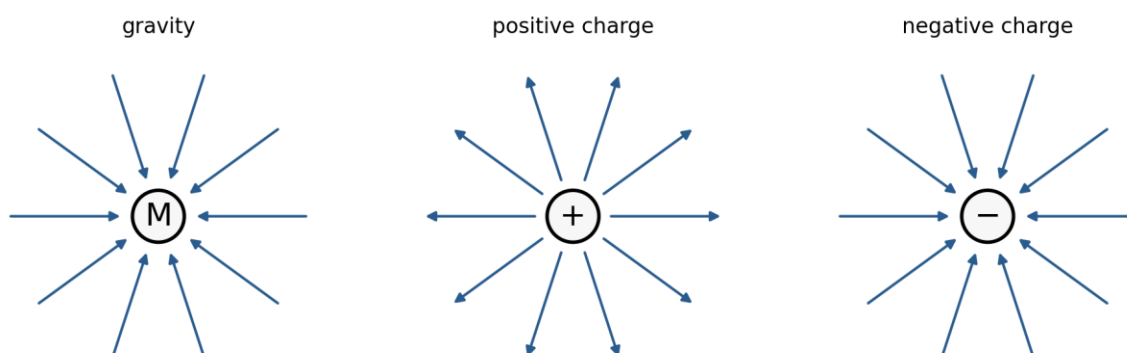
کمیت	مفهوم	اسکالر یا برداری	واحد
قوة برقی F	اثر میدان بر یک چارج مشخص	برداری	N
میدان برقی E	قوة به ازای هر کولن چارج مثبت	برداری	N/C یا V/m
پتانسیل برقی V	انرژی به ازای هر کولن	اسکالر	V یا J/C
انرژی پتانسیل U	انرژی یک چارج مشخص در میدان	اسکالر	J

خودآزمایی ۲/۲

- تفاوت پتانسیل برقی و انرژی پتانسیل برقی چیست؟
- چرا پتانسیل یک کمیت اسکالر است؟
- اگر 20 J انرژی برای انتقال 4 C چارج مصرف شود، اختلاف پتانسیل چند ولت است؟
- در حرکت روی یک سطح همپتانسیل، چرا کار برقی انجام نمی‌شود؟

۲/۳ تفاوت‌ها و شباهت‌های میدان برقی و میدان ثقلی

هر دو میدان، قوه‌های بدون تماس را توضیح می‌دهند و برای منبع نقطه‌ای از قانون عکس مجذور پیروی می‌کنند. با این حال، تفاوت علامت چارج‌ها سبب می‌شود میدان برقی رفتار متنوع‌تری نسبت به میدان ثقلی داشته باشد.



مقایسه جهت خطوط میدان ثقلی و میدان برقی

جدول مقایسه جامع

ویژگی	میدان ثقلی	میدان برقی
منبع یا حامل خاصیت	کته	چارج برقی مثبت یا منفی
جسم آزمایشی	کته کوچک	چارج مثبت آزمایشی
جهت میدان	همیشه به سوی کته منبع	از چارج مثبت بیرون و به چارج منفی داخل
نوع قوه	فقط جاذبه	جاذبه یا دافعه

ویژگی	میدان ثقلی	میدان برقی
قانون قوه	$F = Gm_1m_2/r^2$	$F = k q_1q_2 /r^2$
شدت میدان	$g = F/m$ ؛ واحد N/kg	$E = F/q$ ؛ واحد N/C
پتانسیل	پتانسیل ثقلی؛ معمولاً نسبت به بی‌نهایت منفی	پتانسیل برقی می‌تواند مثبت یا منفی باشد
اثر علامت منبع	کته‌ل معمولی تنها مثبت در نظر گرفته می‌شود	دو علامت مثبت و منفی وجود دارد
قدرت نسبی	برای ذرات بنیادی بسیار ضعیف‌تر	در مقیاس اتمی بسیار قوی‌تر از ثقل
خنثی‌سازی یا پوشش	نمی‌توان کته‌ل منفی معمولی برای خنثی‌سازی ساخت	چارج‌های مثبت و منفی می‌توانند میدان را کاهش یا خنثی کنند
اثر بر اجسام	بر همه اجسام دارای کته‌ل اثر دارد	مستقیماً بر اجسام چارج‌دار اثر می‌کند؛ اجسام خنثی می‌توانند قطبی شوند
شکل خطوط	برای کته‌ل کروی شعاعی و رو به داخل	برای چارج نقطه‌ای شعاعی؛ جهت به علامت وابسته است

مقایسه از نظر جهت میدان

جهت میدان ثقلی در اطراف یک جسم کروی مانند زمین همیشه به طرف مرکز آن است، زیرا ثقل در فیزیک کلاسیک فقط جاذبه ایجاد می‌کند. میدان برقی در اطراف چارج مثبت به بیرون و در اطراف چارج منفی به داخل است. بنابراین، جهت میدان برقی می‌تواند با تغییر علامت منبع کاملاً وارونه شود.

مقایسه از نظر نوع قوه

دو کته‌ل معمولی همیشه یکدیگر را جذب می‌کنند. اما دو چارج هم‌نام دفع و دو چارج ناهم‌نام جذب می‌شوند. این تفاوت سبب می‌شود برهم‌نهی میدان‌های برقی بتواند ناحیه‌هایی با میدان صفر، میدان قوی یا الگوهای پیچیده ایجاد کند.

مقایسه از نظر حامل‌های قوه یا منبع میدان

در این سطح آموزشی، منظور از «حامل یا منبع قوه» خاصیتی است که میدان را ایجاد و قوه را احساس می‌کند: کته‌ل منبع میدان ثقلی و چارج منبع میدان برقی است. در فیزیک ذرات، بحث ذرات واسطه قوه موضوع پیشرفته‌تری است و برای توضیح این فصل ضروری نیست.

مقایسه از نظر شدت میدان

شدت میدان ثقلی قوه بر واحد کته‌ل است و با N/kg سنجیده می‌شود. شدت میدان برقی قوه بر واحد چارج مثبت است و با N/C سنجیده می‌شود. هر دو برای منبع نقطه‌ای با مربع فاصله کاهش می‌یابند؛ یعنی اگر فاصله دو برابر شود، شدت میدان به یک‌چهارم می‌رسد.

رابطه مشابه	میدان ثقلی	میدان برقی
قوه بر جسم آزمایشی	$F = mg$	$F = qE$
شدت منبع نقطه‌ای	$g = GM/r^2$	$E = kQ/r^2$
پتانسیل منبع نقطه‌ای	$\phi = -GM/r$	$V = kQ/r$

رابطه مشابه	میدان ثقلی	میدان برقی
انرژی پتانسیل	$U = m\phi$	$U = qV$

نکته مهم

شباهت فرمول‌ها به معنای یکسان بودن میدان‌ها نیست. در میدان برقی علامت چارج‌ها نقش اساسی دارد؛ اما در میدان ثقلی معمولی، کتله‌ها مثبت‌اند و قوه جاذبه است.

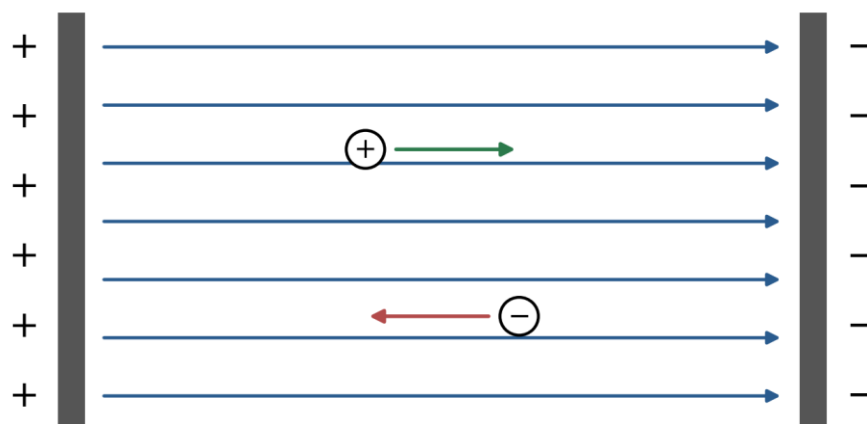
خودآزمایی ۲/۳

- دو شباهت بنیادی میان میدان برقی و ثقلی بنویسید.
- چرا خطوط میدان ثقلی از زمین به بیرون جهت ندارند؟
- چرا میدان برقی می‌تواند در نقطه‌ای صفر شود، حتی اگر چند چارج نزدیک باشند؟
- واحد شدت میدان ثقلی و شدت میدان برقی را بنویسید.

۲/۴ میدان‌های برقی یکنواخت و کاربردهای عملی آن‌ها

میدان یکنواخت چیست؟

میدان برقی یکنواخت میدانی است که اندازه و جهت آن در تمام نقاط ناحیه تقریباً ثابت باشد. این میدان را می‌توان میان دو صفحه فلزی بزرگ، موازی و دارای چارج‌های مخالف ایجاد کرد. در بخش مرکزی میان صفحات، خطوط میدان مستقیم، موازی و با فاصله برابر اند. در نزدیکی لبه‌ها میدان خمیده می‌شود که به آن اثر لبه گفته می‌شود.



میدان یکنواخت میان صفحات موازی و جهت قوه بر چارج مثبت و منفی

ویژگی‌های میدان یکنواخت

- خطوط میدان مستقیم و موازی‌اند.
- فاصله خطوط تقریباً برابر است؛ بنابراین شدت میدان تقریباً ثابت می‌باشد.
- جهت میدان از صفحه مثبت به صفحه منفی است.
- پتانسیل در امتداد میدان کاهش می‌یابد و میان صفحات تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کند.
- یک چارج ثابت در این ناحیه قوه ثابت $F = qE$ دریافت می‌کند؛ در نتیجه اگر مقاومت یا قوه دیگری نباشد، شتاب آن ثابت است.

$$E = \Delta V / d$$

ΔV اختلاف پتانسیل میان صفحات و d فاصله عمودی میان آن‌ها است. برای دقت، از واحدهای ولت و متر استفاده کنید.

مثال حل شده ۵

دو صفحه به اختلاف پتانسیل 600 V و فاصله 0.020 m قرار دارند. شدت میدان را بیابید.

$$E = 600 / 0.020 = 3.0 \times 10^4 \text{ V/m.}$$

چون $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$ ، شدت میدان $3.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ نیز است.

مثال حل شده ۶

چارج $5 \mu\text{C}$ در میدان یکنواخت $2.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ قرار دارد. قوه وارد بر آن را بیابید.

$$F = qE = (5 \times 10^{-6})(2.0 \times 10^4) = 0.10 \text{ N.}$$

چون چارج مثبت است، قوه در جهت میدان وارد می‌شود.

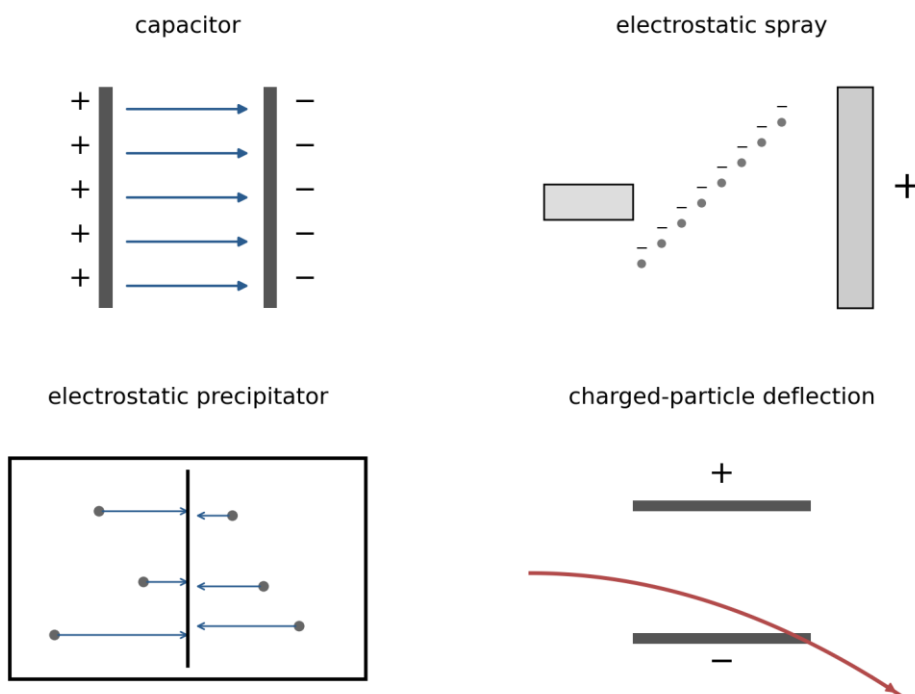
حرکت ذرات چارج‌دار در میدان یکنواخت

اگر ذره از حالت سکون آزاد شود، قوه ثابت سبب شتاب ثابت می‌شود. چارج مثبت به سوی صفحه منفی و چارج منفی به سوی صفحه مثبت شتاب می‌گیرد. اگر ذره با سرعت افقی وارد میدان عمودی شود، مسیر آن خمیده و تقریباً سهمی می‌شود؛ مشابه حرکت پرتابه در میدان ثقی یکنواخت.

حالت ورود ذره	اثر میدان	شکل حرکت
از سکون	شتاب مستقیم در راستای قوه	خط مستقیم
سرعت اولیه موازی میدان	تند یا کند شدن در خط مستقیم	حرکت یک‌بعدی با شتاب ثابت
سرعت اولیه عمود بر میدان	سرعت افقی تقریباً ثابت و شتاب عمودی	مسیر خمیده یا سهمی
ذره منفی	جهت شتاب خلاف میدان است	وابسته به سرعت اولیه

کاربردهای عملی میدان‌های برقی

اصل فیزیکی	نتیجه یا فایده	کاربرد
دو صفحه مخالف میدان ایجاد و چارج/انرژی ذخیره می‌کنند.	ذخیره کوتاه‌مدت انرژی، هموارسازی ولتاژ و زمان‌بندی مدارها	خازن
قطرات رنگ چارج‌دار به جسم با چارج مخالف یا زمین شده جذب می‌شوند.	پوشش یکنواخت و کاهش ضایعات رنگ	رنگ‌آمیزی الکترواستاتیکی
الگوی چارج روی درام، ذرات تونر را جذب و سپس به کاغذ منتقل می‌کند.	تشکیل تصویر دقیق	چاپگر لیزری و فتوکاپی
ذرات دود چارج‌دار و به صفحات مخالف جذب می‌شوند.	کاهش گردوغبار و آلودگی خروجی کارخانه	رسوب‌گیر الکترواستاتیکی
میدان میان صفحات مسیر ذرات چارج‌دار را منحرف می‌کند.	کنترل و اندازه‌گیری باریکه‌ها در وسایل علمی	انحراف باریکه الکترونی یا یونی
قطره‌های چارج‌دار با میدان هدایت می‌شوند.	قرارگیری دقیق قطره‌ها	چاپ جوهرافشان ویژه
نزدیک شدن انگشت یا جسم ظرفیت برقی را تغییر می‌دهد.	صفحه لمسی و کلیدهای حساس	حسگرهای خازنی



نمونه‌هایی از کاربرد میدان برقی: خازن، رنگ‌آمیزی، رسوب‌گیر و انحراف ذرات

اثر لبه و محدودیت مدل یکنواخت

میدان میان صفحات تنها در ناحیه مرکزی و هنگامی تقریباً یکنواخت است که اندازه صفحات نسبت به فاصله آنها بزرگ باشد. نزدیک لبه‌ها، خطوط میدان خمیده و شدت میدان تغییر می‌کند. در مسائل مکتب معمولاً اثر لبه نادیده گرفته می‌شود.

ایمنی در کار با الکتریسیته ساکن و ولتاژ بلند

- برای فعالیت‌های صنفی از وسایل ساده و ولتاژ پایین استفاده کنید.
- هیچ‌گاه خازن‌های بزرگ یا وسایل برقی باز شده را لمس نکنید؛ خازن ممکن است پس از قطع برق چارج داشته باشد.
- فعالیت‌های الکترواستاتیکی را از گاز، بخار سوخت و مواد قابل اشتعال دور انجام دهید.
- در هوای توفانی از اجسام بلند، ساحه باز و سیم‌های برق دور بمانید.

خودآزمایی ۲/۴

- سه ویژگی خطوط یک میدان یکنواخت را بنویسید.
- اگر فاصله صفحات ثابت بماند و اختلاف پتانسیل دو برابر شود، شدت میدان چه تغییری می‌کند؟
- چرا مسیر الکترون در میدان عمودی، خلاف جهت حرکت یک پروتون خم می‌شود؟
- دو کاربرد میدان برقی را تشریح کنید و نقش چارج را در هر یک بیان نمایید.

فعالیت 1: جذب کاغذ با شانه چارج‌دار

هدف فعالیت

مشاهده ایجاد چارج با مالش و اثر میدان بر اجسام خنثی.

مواد لازم: شانه پلاستیکی یا قلم پلاستیکی، تکه‌های بسیار کوچک کاغذ و پارچه خشک.

روش اجرا

1. تکه‌های کاغذ را روی میز پخش کنید.
 2. شانه یا قلم پلاستیکی را ۲۰ تا ۳۰ ثانیه با پارچه خشک یا موی خشک بمالید.
 3. آن را بدون تماس مستقیم به تکه‌های کاغذ نزدیک کنید.
 4. فاصله را تغییر دهید و میزان جذب را مقایسه کنید.
- مشاهده و نتیجه:** شانه پس از مالش چارج‌دار می‌شود. میدان آن چارج‌ها را در کاغذ قطبی می‌سازد و بخش نزدیک‌تر با قوه بیشتر جذب می‌شود.

نکته ایمنی

شانه را به پرز، سیم یا وسیله برقی نزدیک نکنید.

فعالیت 2: خم کردن جریان باریک آب

هدف فعالیت

نشان دادن اثر میدان بر مولکول‌های قطبی آب.

مواد لازم: شانه یا قلم پلاستیکی، پارچه خشک و شیر آب.

روش اجرا

1. شیر را چنان باز کنید که جریان بسیار باریک و پیوسته آب ایجاد شود.
 2. شانه را با پارچه خشک بمالید.
 3. شانه را بدون تماس، به کنار جریان آب نزدیک کنید.
 4. جهت خم شدن آب را مشاهده و فاصله را تغییر دهید.
- مشاهده و نتیجه:** مولکول‌های آب قطبی‌اند. میدان شانه جهت‌گیری آن‌ها را تغییر می‌دهد و جریان آب به سوی شانه خم می‌شود.

شانه و دست‌ها را خشک نگه دارید و فعالیت را دور از پریش برق انجام دهید.

فعالیت 3: ساخت آونگ الکترواستاتیکی ساده

هدف فعالیت

مشاهده جذب اولیه، انتقال چارج و سپس دفع.

مواد لازم: نخ نازک، یک گلوله کوچک فویل المونیم، پایه یا قلم، بادکنک یا قلم پلاستیکی.

روش اجرا

1. گلوله بسیار سبک فویل را به نخ ببندید و آویزان کنید.
 2. بادکنک یا قلم را با پارچه مالش دهید.
 3. جسم چارج‌دار را به گلوله نزدیک کنید؛ نخست بدون تماس و سپس با تماس کوتاه.
 4. پس از تماس، رفتار گلوله را مشاهده کنید.
- مشاهده و نتیجه:** در آغاز، گلوله خنثی به علت قطبی‌شدن جذب می‌شود. پس از تماس، بخشی از چارج انتقال می‌یابد و گلوله ممکن است هم‌نام شده و دفع گردد.

فعالیت 4: ساخت الکتروسکوپ ساده

هدف فعالیت

تشخیص وجود چارج و بررسی دفع چارج‌های هم‌نام.

مواد لازم: بوتل شیشه‌ای یا پلاستیکی، سیم فلزی، دو نوار باریک فویل المونیم، مقوا برای سرپوش و شانه پلاستیکی.

روش اجرا

1. سیم را از سوراخ سرپوش عبور دهید و در پایین آن دو نوار فویل سبک آویزان کنید.
 2. سر بالایی سیم را به شکل حلقه یا صفحه کوچک بسازید.
 3. شانه چارج‌دار را به سر فلزی نزدیک کنید و باز شدن برگ‌ها را ببینید.
 4. سپس شانه را تماس دهید و تغییر ماندگارتر برگ‌ها را بررسی کنید.
- مشاهده و نتیجه:** چارج‌های هم‌نام روی دو برگ پخش می‌شوند و برگ‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند. نزدیک کردن جسم چارج‌دار نیز می‌تواند با القا جدایی چارج ایجاد کند.

از سیم متصل به برق استفاده نکنید؛ این وسیله تنها برای الکتریسیته ساکن است.

موضوع	نکته اصلی	رابطه مهم
ایجاد چارج	انتقال الکترون به روش مالش، تماس یا القا	$Q = ne$
میدان برقی	قوه به ازای واحد چارج مثبت	$E = F/q$
قانون کولن	قوه با حاصل ضرب چارج‌ها متناسب و با r^2 معکوس است	$F = k q_1q_2 /r^2$
میدان چارج نقطه‌ای	شدت میدان با فاصله به سرعت کاهش می‌یابد	$E = k Q /r^2$
قوه در میدان	علامت q جهت قوه را تعیین می‌کند	$F = qE$
پتانسیل	انرژی به ازای واحد چارج	$V = U/q$
اختلاف پتانسیل	انرژی منتقل شده به ازای هر کولن	$\Delta V = W/q$
میدان یکنواخت	میدان میان صفحات بزرگ و موازی تقریباً ثابت است	$E = \Delta V/d$
مقایسه با ثقل	هر دو میدان و قانون عکس مجذور دارند؛ ثقل فقط جاذبه است	$g = GM/r^2$ و $E = kQ/r^2$

نقشه حل مسائل

- ابتدا داده‌ها را با واحدهای SI بنویسید: کولن، متر، نیوتن، ژول و ولت.
- مشخص کنید مسئله درباره قوه، میدان، پتانسیل، انرژی یا اختلاف پتانسیل است.
- رابطه مناسب را انتخاب کنید و علامت چارج‌ها را برای جهت یا نوع قوه بررسی نمایید.
- محاسبه را انجام دهید و در پایان واحد و جهت پاسخ را بنویسید.
- پاسخ را از نظر منطقی بررسی کنید؛ مثلاً افزایش فاصله باید قوه و میدان را کاهش دهد.

الف) پرسش‌های مفهومی

1. چارج برقی مثبت و منفی چگونه در یک جسم جامد ایجاد می‌شود؟
2. جهت میدان برقی در یک نقطه چگونه تعریف می‌شود؟
3. چرا خطوط میدان برقی یکدیگر را قطع نمی‌کنند؟
4. تفاوت قوه بر یک پروتون و یک الکترون در میدان یکسان چیست؟
5. چرا شانه چارج‌دار می‌تواند کاغذ خنثی را جذب کند؟
6. پتانسیل برقی با شدت میدان برقی چه تفاوتی دارد؟
7. سطح هم‌پتانسیل چیست و چه رابطه‌ای با خطوط میدان دارد؟
8. چهار تفاوت میان میدان ثقلی و میدان برقی بنویسید.
9. چرا میدان میان صفحات موازی تنها در ناحیه مرکزی تقریباً یکنواخت است؟
10. اصل کار رسوب‌گیر الکترواستاتیکی را توضیح دهید.

ب) مسائل عددی

11. بر چارج C 2.0 در یک نقطه قوه 10 N وارد می‌شود. شدت میدان را بیابید.
12. چارج $3.0 \mu\text{C}$ در میدان $4.0 \times 10^4 \text{ N/C}$ قرار دارد. اندازه و جهت قوه را پیدا کنید.
13. دو چارج $2.0 \mu\text{C}$ و $5.0 \mu\text{C}$ به فاصله 0.30 m قرار دارند. اندازه و نوع قوه را محاسبه کنید.
14. اگر فاصله دو چارج سه برابر شود، قوه چند برابر مقدار اول خواهد شد؟
15. شدت میدان در فاصله 0.50 m از چارج $6.0 \mu\text{C}$ - بیابید و جهت را مشخص کنید.
16. برای انتقال C 5.0 چارج، J 60 انرژی منتقل می‌شود. اختلاف پتانسیل را محاسبه کنید.
17. چارج mC 4.0+ از اختلاف پتانسیل V 25 عبور می‌کند. تغییر انرژی پتانسیل آن را بیابید.
18. دو صفحه اختلاف پتانسیل V 900 و فاصله cm 3.0 دارند. شدت میدان میان آن‌ها چقدر است؟
19. الکترونی در میدان یکنواخت $2.5 \times 10^5 \text{ N/C}$ قرار دارد. اندازه قوه بر الکترون را محاسبه کنید.
20. اگر شدت میدان میان دو صفحه ثابت باشد و فاصله صفحات از 2 cm به 5 cm افزایش یابد، برای ثابت ماندن میدان اختلاف پتانسیل باید چند برابر شود؟

ج) پرسش‌های تحلیلی و کاربردی

21. در رنگ‌آمیزی الکترواستاتیکی، چرا بهتر است قطرات رنگ هم‌نام باشند و جسم مورد نظر چارج مخالف یا اتصال به زمین داشته باشد؟
22. دو چارج هم‌اندازه و ناهم‌نام در فاصله کم قرار دارند. الگوی کلی خطوط میدان و نقطه‌های احتمالی میدان ضعیف را توصیف کنید.
23. دانش‌آموزی می‌گوید: «اگر پتانسیل در نقطه‌ای صفر باشد، میدان نیز حتماً صفر است.» با یک مثال توضیح دهید چرا این سخن همیشه درست نیست.
24. چرا یک قفس فلزی بسته می‌تواند داخل خود را از میدان‌های الکترواستاتیکی بیرونی محافظت کند؟

25. یک پروتون و یک الکترون از حالت سکون در میدان یکنواخت رها می‌شوند. اندازه قوه‌ها، جهت حرکت و اندازه شتاب آن‌ها را مقایسه کنید.

پاسخ پرسش‌های مفهومی

1. با انتقال الکترون: از دست دادن الکترون جسم را مثبت و گرفتن الکترون جسم را منفی می‌کند.
2. جهت قوه بر یک چارج مثبت آزمایشی.
3. زیرا در هر نقطه میدان تنها یک جهت مشخص دارد.
4. اندازه قوه برای چارج‌های هم‌اندازه برابر است؛ جهت بر پروتون هم‌جهت و بر الکترون خلاف میدان است.
5. به علت قطبی‌شدن چارج‌های داخل کاغذ و قوی‌تر بودن جذب بخش نزدیک.
6. E برداری و قوه بر واحد چارج است؛ V اسکالر و انرژی بر واحد چارج است.
7. مجموعه نقاط با V یکسان؛ خطوط میدان بر آن عمود اند.
8. منبع کتله/چارج؛ فقط جذب/جذب یا دفع؛ جهت همیشه داخل/وابسته به علامت؛ واحد N/kg در برابر N/C .
9. به علت اثر لبه و خم شدن خطوط در نزدیکی کناره‌های صفحات.
10. ذرات دود چارج‌دار می‌شوند و به صفحات با چارج مخالف جذب می‌گردند.

جواب مسائل عددی

11. $E = F/q = 10/2.0 = 5.0 \text{ N/C}$.
12. $F = qE = (3.0 \times 10^{-6})(4.0 \times 10^4) = 0.12 \text{ N}$ ؛ هم‌جهت میدان.
13. $F = kq_1q_2/r^2 \approx 1.0 \text{ N}$ ؛ چون هر دو مثبت‌اند، قوه دافعه است.
14. $1/3^2 = 1/9$ مقدار اول.
15. $E = k|Q|/r^2 \approx 2.16 \times 10^5 \text{ N/C}$ ؛ جهت به سوی چارج منفی.
16. $\Delta V = W/q = 60/5.0 = 12 \text{ V}$.
17. $\Delta U = q\Delta V = (4.0 \times 10^{-3})(25) = 0.10 \text{ J}$.
18. $d = 0.030 \text{ m}$ ؛ $E = 900/0.030 = 3.0 \times 10^4 \text{ V/m}$.
19. $|F| = eE = (1.60 \times 10^{-19})(2.5 \times 10^5) = 4.0 \times 10^{-14} \text{ N}$ ؛ خلاف میدان.
20. چون $\Delta V = Ed$ ، نسبت جدید $2.5 = 2/5$ است؛ اختلاف پتانسیل باید 2.5 برابر شود.

راهنمای پرسش‌های تحلیلی

21. هم‌نام بودن قطرات سبب دفع متقابل و پخش یکنواخت می‌شود؛ جسم مخالف یا زمین‌شده قطرات را جذب می‌کند.
22. خطوط از مثبت خارج و به منفی وارد می‌شوند. میان دو چارج متراکم‌اند؛ در بعضی نواحی دورتر میدان ضعیف‌تر است، اما برای دو چارج برابر و ناهم‌نام نقطه میدان صفر محدود در میان آن‌ها وجود ندارد.
23. در نقطه میانی دو چارج برابر و هم‌نام، میدان می‌تواند صفر باشد در حالی که پتانسیل‌ها جمع می‌شوند و صفر نیستند؛ برعکس، در میانه دو چارج برابر و ناهم‌نام پتانسیل می‌تواند صفر باشد ولی میدان‌ها هم‌جهت و غیرصفر اند.
24. چارج‌های آزاد رسانا بازتوزیع می‌شوند تا در حالت الکتروستاتیکی میدان داخل فلز و فضای بسته محافظت‌شده بسیار کم یا صفر شود.
25. اندازه قوه‌ها برابر eE و جهت‌ها مخالف است. چون جرم الکترون بسیار کمتر است، شتاب آن بسیار بزرگ‌تر از شتاب پروتون است.

واژه	تعریف ساده
الکترواستاتیک	مطالعهٔ چارج‌های ساکن و قوه‌ها و میدان‌های ناشی از آن‌ها.
چارج آزمایشی	چارج کوچک فرضی برای تعیین اندازه و جهت میدان.
خط میدان	خطی که مماس آن جهت میدان را نشان می‌دهد.
قطبی‌شدن	جدایی نسبی چارج‌های مثبت و منفی در یک جسم خنثی.
هم‌پتانسیل	نقاط یا سطحی با پتانسیل برقی یکسان.
خازن	وسیله‌ای برای ذخیرهٔ چارج و انرژی برقی با دو رسانای جداسده.
اثر لبه	خم شدن و غیریکنواخت شدن میدان در کناره‌های صفحات.
القا	چارج‌دار یا جداسدن چارج‌ها بدون تماس مستقیم با جسم چارج‌دار.

پایان بخش دوم

پس از مطالعهٔ این فصل، دانش‌آموز باید بتواند از مدل میدان برای توضیح قوه‌های برقی استفاده کند، پتانسیل و اختلاف پتانسیل را با انرژی ارتباط دهد، میدان برقی را با میدان ثقلی مقایسه کند و کاربردهای میدان یکنواخت را در فناوری تشریح نماید.

درک میدان‌های مقناطیسی و القای الکترومقناطیسی

بخش سوم

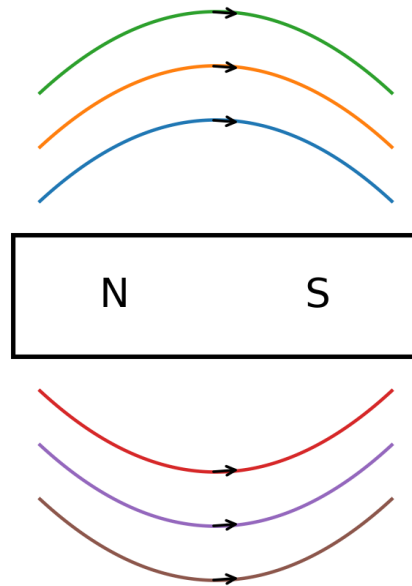
اهداف آموزشی

- ویژگی‌ها و رفتار میدان‌های مقناطیسی را تشریح کند.
- قوهٔ واردشده بر سیم حامل جریان و چارج متحرک را محاسبه کند.
- شار مقناطیسی و القای الکترومقناطیسی را توضیح دهد.
- قانون فارادی و قانون لنز را برای تعیین مقدار و جهت EMF به کار برد.
- کاربردهای القای الکترومقناطیسی را در زندگی روزمره و فناوری شناسایی کند.

۱.۳ ویژگی‌ها و رفتار میدان‌های مقناطیسی

میدان مقناطیسی ناحیه‌ای در اطراف آهن‌ریا، سیم حامل جریان یا چارج متحرک است که در آن قوهٔ مقناطیسی احساس می‌شود. میدان مقناطیسی را با نماد B نشان می‌دهند و واحد آن تسلا (T) است.

فزیک سطح دو
هر آهن‌ریا دو قطب دارد: قطب شمال و قطب جنوب. قطب‌های هم‌نام یکدیگر را دفع و قطب‌های ناهم‌نام یکدیگر را جذب می‌کنند. خطوط میدان در بیرون آهن‌ریا از قطب شمال به قطب جنوب می‌روند و در داخل آهن‌ریا مسیر بسته را تکمیل



می‌کنند

شکل ۱: نمایش ساده خطوط میدان در اطراف آهن‌ریای میله‌ای

- خطوط میدان هیچ‌گاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند.
- هرچه خطوط میدان متراکم‌تر باشند، میدان قوی‌تر است.
- جهت میدان در هر نقطه، جهت مماس بر خط میدان است.
- میدان‌های مقناطیسی همواره حلقه‌های بسته می‌سازند.
- زمین نیز مانند یک آهن‌ریای بزرگ، میدان مقناطیسی دارد.

میدان اطراف سیم حامل جریان

عبور جریان برقی از سیم، در اطراف سیم میدان مقناطیسی حلقوی ایجاد می‌کند. جهت این میدان با قاعده دست راست تعیین می‌شود: شست در جهت جریان قرار می‌گیرد و خمیدگی انگشتان جهت خطوط میدان را نشان می‌دهد. در سیم‌پیچ، میدان‌های حلقه‌های متعدد با هم جمع شده و میدان قوی‌تری می‌سازند.

عامل	اثر بر میدان مقناطیسی
افزایش جریان	قدرت میدان بیشتر می‌شود.
افزایش تعداد دورهای سیم‌پیچ	میدان در داخل سیم‌پیچ قوی‌تر می‌شود.
استفاده از هسته آهنی	میدان بسیار تقویت می‌شود.
افزایش فاصله از سیم	قدرت میدان کاهش می‌یابد.

۲.۳ قوه بر سیم حامل جریان و چارج متحرک

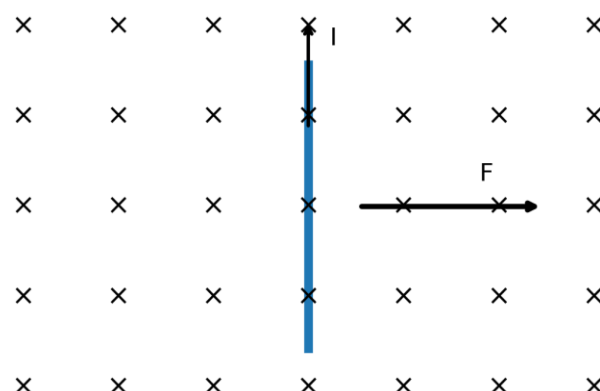
اگر سیم حامل جریان در یک میدان مقناطیسی قرار گیرد، بر سیم قوه وارد می‌شود. این پدیده اساس کار موتور برقی است. هنگامی که سیم بر جهت میدان عمود باشد، مقدار قوه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = B I L$$

در حالت عمومی که سیم با میدان زاویه θ بسازد:

$$F = B I L \sin \theta$$

نماد	واحد	کمیت
F	نیوتن (N)	قوة وارد شده بر سیم
B	تسلا (T)	چگالی شار مغناطیسی
I	آمپر (A)	جریان برقی
L	متر (m)	طول سیم در میدان
θ	درجه	زاویه میان سیم و میدان



شکل ۲: جهت جریان، میدان و قوه بر سیم حامل جریان

قانون دست چپ فلمینگ

انگشت اول جهت میدان، انگشت دوم جهت جریان قراردادی و شست جهت حرکت یا قوه را نشان می‌دهد. این سه جهت بر یکدیگر عمود هستند.

مثال حل شده ۱

سیمی به طول ۰٫۳۰ متر، جریان ۴ آمپر را در میدان ۰٫۵ تسلا حمل می‌کند. اگر سیم بر میدان عمود باشد، قوه را بیابید.

$$F = 0.5 \times 4 \times 0.30 = 0.60 \text{ N}$$

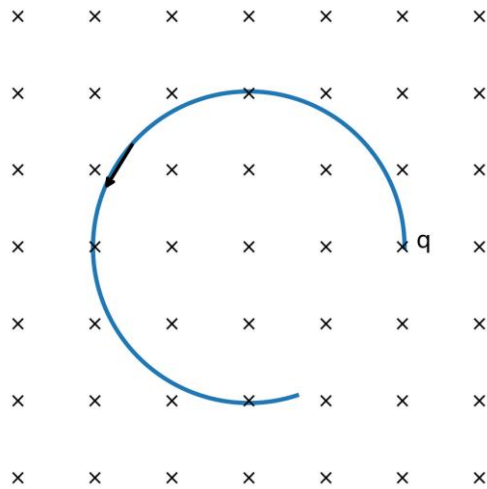
بنابراین قوه وارد شده بر سیم ۰٫۶۰ نیوتن است.

قوه بر چارج متحرک

چارجی که در میدان مغناطیسی حرکت می‌کند، در صورتی قوه احساس می‌کند که حرکت آن مؤلفه‌ای عمود بر میدان داشته باشد.

$$F = B q v \sin \theta$$

فیزیک سطح دو
اگر حرکت موازی میدان باشد، $\theta = 0$ و قوه صفر است. اگر حرکت عمود بر میدان باشد، قوه بیشترین مقدار را دارد. چون قوه همواره بر سرعت عمود است، معمولاً جهت حرکت را تغییر می‌دهد نه مقدار سرعت را؛ در نتیجه ذره می‌تواند مسیر دایروی یا مارپیچی طی کند.



شکل ۳: مسیر خمیده یک چارج متحرک در میدان مقناطیسی

مثال حل شده ۲

چارجی به مقدار 2×10^{-6} کولن با سرعت 3×10^4 متر بر ثانیه، عمود بر میدان 0.2 تسلا حرکت می‌کند.

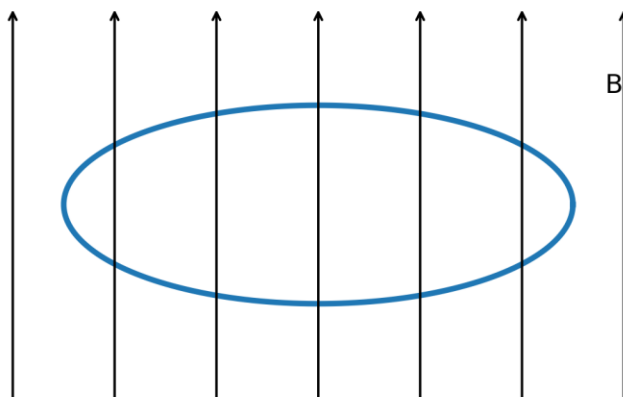
$$F = 0.2 \times (2 \times 10^{-6}) \times (3 \times 10^4) = 1.2 \times 10^{-2} \text{ N}$$

۳.۳ شار مقناطیسی و القای الکترومقناطیسی

شار مقناطیسی مقدار میدان مقناطیسی عبوری از یک سطح است. شار با نماد Φ نشان داده می‌شود و واحد آن وبر (Wb) است.

$$\Phi = B A \cos \theta$$

در این رابطه، θ زاویه میان جهت میدان و خط عمود بر سطح است. اگر سطح عمود بر میدان باشد، شار بیشینه است؛ اگر سطح موازی میدان باشد، شار صفر می‌شود.

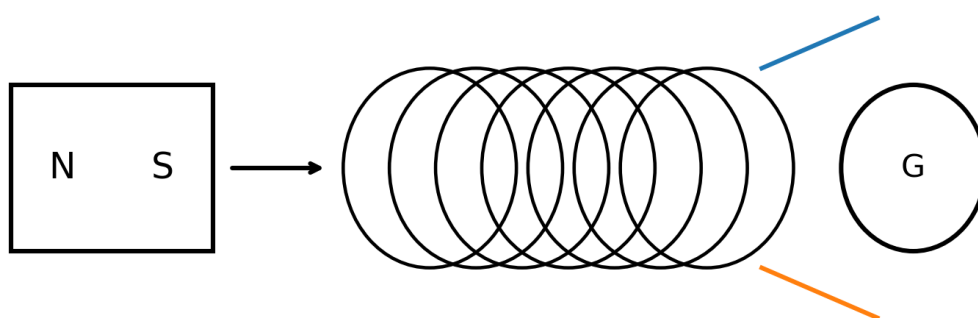


شکل ۴: عبور خطوط میدان از سطح یک حلقه و مفهوم شار مغناطیسی

تغییر	نتیجه بر شار
افزایش B	شار افزایش می یابد.
افزایش مساحت A	شار افزایش می یابد.
چرخاندن حلقه	زاویه و در نتیجه شار تغییر می کند.
موازی شدن سطح با میدان	شار به صفر نزدیک می شود.

القای الکترومغناطیسی

هرگاه شار مغناطیسی پیوندشده با یک حلقه یا سیم پیچ تغییر کند، در آن قوه محرکه برقی القایی ایجاد می شود. اگر مدار بسته باشد، جریان القایی نیز برقرار می گردد. صرف موجودیت میدان کافی نیست؛ تغییر شار ضروری است.



شکل ۵: نزدیک کردن آهن ربا به سیم پیچ و ایجاد جریان القایی

- حرکت دادن آهن ربا نسبت به سیم پیچ
- حرکت دادن سیم پیچ در میدان
- تغییر قدرت میدان
- چرخاندن سیم پیچ
- تغییر مساحت مؤثر حلقه

۴.۳ قانون فارادی و قانون لنز

قانون فارادی

قانون فارادی بیان می‌کند که مقدار EMF القایی با سرعت تغییر شار مغناطیسی متناسب است. برای سیم‌پیچی با N دور:

$$EMF = -N (\Delta\Phi / \Delta t)$$

هرچه تغییر شار در زمان کوتاه‌تری صورت گیرد، EMF بزرگ‌تر می‌شود. علامت منفی نشان‌دهنده قانون لنز است.

روش‌های افزایش EMF

- افزایش تعداد دورهای سیم‌پیچ
- استفاده از آهن‌ربای قوی‌تر
- حرکت سریع‌تر آهن‌ربا یا سیم‌پیچ
- افزایش مساحت سیم‌پیچ
- استفاده از هسته آهنی مناسب

قانون لنز

قانون لنز جهت جریان القایی را تعیین می‌کند: جریان القایی همیشه چنان جهتی دارد که میدان مغناطیسی تولیدشده توسط آن، با تغییری که باعث ایجاد جریان شده است مخالفت کند. این قانون نتیجه اصل بقای انرژی است.

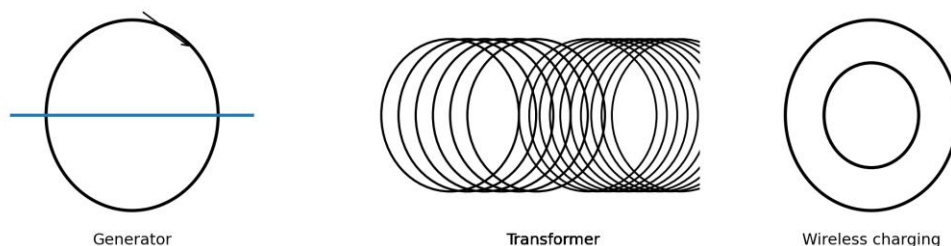
مثلاً وقتی قطب شمال آهن‌ربا به سیم‌پیچ نزدیک می‌شود، سمت نزدیک سیم‌پیچ به قطب شمال تبدیل می‌شود تا با نزدیک شدن آهن‌ربا مخالفت کند. وقتی آهن‌ربا دور می‌شود، همان سمت به قطب جنوب تبدیل می‌شود تا آهن‌ربا را جذب کرده و با دور شدن آن مخالفت کند.

مثال حل‌شده ۳

شار هر دور سیم‌پیچی ۵۰ دوری در مدت ۰٫۱۰ ثانیه از ۰٫۰۲ و بر به ۰٫۰۵ و بر کاهش می‌یابد. مقدار EMF القایی را بیابید.

$$|EMF| = 50 \times |0.005 - 0.020| / 0.10 = 7.5 \text{ V}$$

۵.۳ کاربردهای القای الکترومغناطیسی



شکل ۶: چند کاربرد مهم القای الکترومغناطیسی

کاربرد	چگونگی استفاده از القا
ژنراتور	انرژی میخانیکی را با چرخش سیمپیچ یا آهنربا به انرژی برقی تبدیل می کند.
ترانسفورمر	با میدان متغیر، ولتاژ جریان متناوب را افزایش یا کاهش می دهد.
میکروفون دینامیکی	حرکت سیمپیچ در میدان، سیگنال برقی تولید می کند.
اجاق القایی	جریان های گردابی در ظرف فلزی، گرما تولید می کنند.
شارژر بی سیم	انرژی میان دو سیمپیچ از راه میدان متغیر منتقل می شود.
دینام بایسکل	چرخش آهنربا یا سیمپیچ برق چراغ را فراهم می کند.
ترمز الکترومقناطیسی	جریان های گردابی قوه ای مخالف حرکت ایجاد می کنند.
کارت ها و حسگرهای القایی	تغییر میدان برای انتقال اطلاعات یا تشخیص فلز استفاده می شود.

فعالیت های عملی

فعالیت ۱: مشاهده خطوط میدان

مواد لازم: آهنربای میله ای، کاغذ و براده آهن

روش اجرا: آهنربا را زیر کاغذ بگذارید و براده ها را آرام روی کاغذ بریزید.

نتیجه و مشاهده: براده ها در امتداد خطوط میدان قرار می گیرند و تراکم بیشتر در نزدیکی قطب ها دیده می شود.

فعالیت ۲: ساخت الکترومقناطیس

مواد لازم: میخ آهنی، سیم مسی روکش دار، باتری و گیره کاغذ

روش اجرا: سیم را چندین دور دور میخ بپیچید و دو سر آن را برای چند ثانیه به باتری وصل کنید.

نتیجه و مشاهده: میخ به آهنربای موقت تبدیل می شود. با افزایش دورها، قدرت جذب بیشتر می شود.

فعالیت ۳: بررسی القای الکترومقناطیسی

مواد لازم: سیمپیچ، آهنربا و گالوانومتر

روش اجرا: آهنربا را آرام و سپس سریع داخل سیمپیچ حرکت دهید و جهت انحراف عقربه را مقایسه کنید.

نتیجه و مشاهده: حرکت سریع تر انحراف بزرگ تر می دهد؛ برعکس کردن حرکت، جهت جریان را برعکس می کند.

فعالیت ۴: مدل ساده موتور

مواد لازم: باتری، سیم، آهنربا و پایه ایمن

روش اجرا: یک حلقه سیم سبک را میان قطب های آهنربا قرار دهید و با رعایت ایمنی جریان کوتاه مدت برقرار کنید.

نتیجه و مشاهده: بر سیم حامل جریان قوه وارد شده و حلقه تمایل به چرخش پیدا می کند.

نکته ایمنی: باتری را برای مدت طولانی به سیم وصل نکنید؛ سیم می تواند گرم شود. از برق شهری در این فعالیت ها استفاده نکنید.

تمرین‌های مفهومی و عددی

۱. چهار ویژگی مهم خطوط میدان مقناطیسی را بنویسید.
۲. چرا خطوط میدان در نزدیکی قطب‌های آهن‌ریا متراکم‌ترند؟
۳. سیمی به طول ۰٫۲۵ متر جریان ۶ آمپر را در میدان ۰٫۴ تسلا و عمود بر آن حمل می‌کند. قوه را محاسبه کنید.
۴. اگر زاویه سیم با میدان ۳۰ درجه باشد، قوه در سؤال پیشین چه مقدار می‌شود؟
۵. چارج $۱۰^{-6} \times ۵$ کولن با سرعت $۱۰^3 \times ۲$ متر بر ثانیه عمود بر میدان ۰٫۳ تسلا حرکت می‌کند. قوه را بیابید.
۶. شار عبوری از سطحی به مساحت ۰٫۴ متر مربع در میدان ۰٫۵ تسلا و با زاویه صفر چند وبر است؟
۷. تفاوت «میدان مقناطیسی ثابت «و» تغییر شار «را در ایجاد جریان القایی توضیح دهید.
۸. چرا حرکت سریع‌تر آهن‌ریا در سیم‌پیچ EMF بیشتری ایجاد می‌کند؟
۹. قانون لنز چگونه با بقای انرژی ارتباط دارد؟
۱۰. سیم‌پیچ ۲۰۰ دوری در ۰٫۵ ثانیه تغییر شار ۰٫۰۱ وبر را تجربه می‌کند. مقدار EMF را حساب کنید.
۱۱. دو تفاوت ژنراتور و موتور برقی را بنویسید.
۱۲. سه کاربرد روزمره القای الکترومقناطیسی را نام ببرید و برای هرکدام یک جمله توضیح دهید.

پاسخ‌های کوتاه تمرین‌ها

۱. حلقه‌های بسته‌اند، قطع نمی‌شوند، جهت مشخص دارند و تراکم آن‌ها نشان‌دهنده قدرت میدان است.
۲. چون میدان در آن ناحیه قوی‌تر است.
۳. $F = 0.4 \times 6 \times 0.25 = 0.60 \text{ N}$
۴. $F = 0.4 \times 6 \times 0.25 \times \sin 30^\circ = 0.30 \text{ N}$
۵. $F = 0.3 \times 5 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 = 3 \times 10^{-3} \text{ N}$
۶. $\Phi = 0.5 \times 0.04 = 0.020 \text{ Wb}$
۷. میدان ثابت بدون تغییر شار الزاماً جریان القایی ایجاد نمی‌کند؛ تغییر شار ضروری است.
۸. چون $\Delta\Phi/\Delta t$ بزرگ‌تر می‌شود.
۹. جریان القایی با تغییر مخالفت می‌کند تا انرژی بدون منبع تولید نشود.
۱۰. $EMF = 200 \times 0.01 / 0.5 = 4 \text{ V}$
۱۱. موتور انرژی برقی را به حرکت تبدیل می‌کند؛ ژنراتور حرکت را به انرژی برقی تبدیل می‌کند.

خلاصه فصل

- میدان مقناطیسی در اطراف آهن‌ریا، سیم حامل جریان و چارج متحرک وجود دارد.
- قوه بر سیم از $F = BIL \sin\theta$ و بر چارج از $F = Bqv \sin\theta$ محاسبه می‌شود.
- شار مقناطیسی با $\Phi = BA \cos\theta$ بیان می‌شود.
- تغییر شار باعث ایجاد EMF القایی می‌شود.
- قانون فارادی مقدار و قانون لنز جهت EMF و جریان القایی را مشخص می‌کنند.
- ژنراتور، ترانسفورمر، میکروفون، اجاق القایی و شارژر بی‌سیم از کاربردهای مهم القا هستند.

منابع

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2021). *Fundamentals of physics* (12th ed.). Wiley.
- Hewitt, P. G. (2015). *Conceptual physics* (12th ed.). Pearson.
- Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2016a). *University physics: Volume 1*. OpenStax.
- Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2016b). *University physics: Volume 2*. OpenStax.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W., Jr. (2019). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (10th ed.). Cengage Learning.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2019). *University physics with modern physics* (15th ed.). Pearson.
- Ding, L., Chabay, R., Sherwood, B., & Beichner, R. (2006). Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment. *Physical Review Special Topics—Physics Education Research*, 2(1), 010105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.010105>
- Guisasola, J., Almudí, J. M., & Zubimendi, J. L. (2004). Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university. *Science Education*, 88(3), 443–464. <https://doi.org/10.1002/sce.10119>
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Maloney, D. P., O’Kuma, T. L., Hieggelke, C. J., & Van Heuvelen, A. (2001). Surveying students’ conceptual knowledge of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 69(S1), S12–S23. <https://doi.org/10.1119/1.1371296>
- McDermott, L. C., & Redish, E. F. (1999). Resource letter: PER-1: Physics education research. *American Journal of Physics*, 67(9), 755–767. <https://doi.org/10.1119/1.19122>
- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1998). Assessing student learning of Newton’s laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula. *American Journal of Physics*, 66(4), 338–352. <https://doi.org/10.1119/1.18863>