

# آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته



فصل

## آشنایی با فیزیک حالت جامد و ساختار هسته

نگاهی به فصل: در فصل قبل با برخی از مفهوم‌های فیزیک جدید آشنا شدیم و دانستیم که نظریه‌های نسبیت و کوانتومی، در سده بیستم میلادی، فیزیک را به‌طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک نظریه مکانیک کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌ها به توجیه‌هایی کاملاً سازگار با تجربه دست یافته‌اند.

ما در این فصل، به توصیف برخی از این نظریه‌ها و چگونگی توجیه نتیجه‌های تجربی توسط آنها می‌پردازیم. نخست مسئله رسانش الکتریکی در جسم‌های جامد را بررسی می‌کنیم تا نشان دهیم که با استفاده از نظریه نواری می‌توان تفاوت بین رسانش جسم‌های مختلف را توجیه کرد. مبحث دیگری نیز در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد و آن ساختار هسته اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن است.

### ۱-۸ - مواد رسانا و نارسانا

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که در فلزات، برخی از الکترون‌ها به‌راحتی از اتم خود جدا می‌شوند. چون این الکترون‌ها می‌توانند آزادانه درون جسم حرکت کنند، آنها را الکترون‌های آزاد می‌نامند. شارش بار الکتریکی در رساناها به‌حرکت این الکترون‌ها مربوط می‌شود. در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه نیز مقاومت الکتریکی را تعریف کردیم و دیدیم که مقاومت ویژه پاره‌ای از رساناها، مانند نقره و مس، کم و پاره‌ای دیگر، مانند تنگستن و آهن، نسبتاً زیاد است.

#### فعالیت ۱-۸

با بحث و بررسی در گروه خود، مطالب مربوط به قانون اهم و مقاومت الکتریکی را که در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه خواندید مرور کنید.

با انجام فعالیت بالا به یاد آورده‌اید که،

الف) هر ماده مقاومت ویژه الکتریکی مخصوص به خود را دارد.

ب) هر چه مقاومت ویژه الکتریکی یک جسم کم‌تر باشد آن جسم رسانای الکتریکی بهتری است.

مقاومت ویژه الکتریکی یک رسانای خوب، مانند نقره خالص، در دمای اتاق ( $27^{\circ}\text{C}$ ) به کوچکی

$10^{-14}$  اهم متر است. در حالی که مقاومت ویژه الکتریکی یک نارسانا مانند تفلون، به بزرگی  $10^{14}$

اهم متر است. به اختلاف بزرگ بین این دو عدد توجه کنید. مقاومت ویژه پاره‌ای از مواد در جدول ۸-۱

داده شده است. همان‌گونه که در این جدول می‌بینید، دسته‌ای از مواد، مانند ژرمانیوم و سیلیسیوم، نیز

هستند که مقاومت ویژه الکتریکی آنها در دمای اتاق بین مقاومت ویژه الکتریکی رساناها و نارساناهاست.

این دسته از مواد که نیمرسانا نام دارند، ویژگی‌های جالب توجه دیگری نیز دارند که آنها را هم از رساناها

و هم از نارساناها متمایز می‌سازد. برخی از این ویژگی‌ها را در بخش ۸-۴ خواهیم شناخت.

جدول ۸-۱ — مقاومت ویژه برخی از مواد (در دمای اتاق)

ماده	مقاومت ویژه بر حسب اهم متر
آلومینیم	$2/8 \times 10^{-8}$
برنج	$\approx 8 \times 10^{-8}$
آلیاژ کنستانتان (مس ۶٪ نیکل ۴٪)	$\approx 4 \times 10^{-8}$
مس	$1/7 \times 10^{-8}$
آهن	$\approx 1 \times 10^{-8}$
آلیاژ منگانی (مس ۸۴٪ منگنز ۱۲٪ نیکل ۴٪)	$44 \times 10^{-8}$
جیوه	$96 \times 10^{-8}$
آلیاژ نیکروم (نیکل ۵۹٪ مس ۲۳٪ کرم ۱۷٪)	$1 \times 10^{-8}$
پلاتین	$1 \times 10^{-8}$
نقره	$1/6 \times 10^{-8}$
تنگستن	$5/5 \times 10^{-8}$
ژرمانیوم	$4/6 \times 10^{-1}$
سیلیسیوم	$1 - 1$
شیشه	$1 - 1 - 10^{14}$
تفلون	$10^{14}$
خون	$1/5$

در ساده‌ترین مدل، یک جسم جامد را به صورت مجموعه‌ای از اتم‌ها در نظر می‌گیرند. حال اگر در یک جسم الکترون‌های هر اتم به هسته خود مقید باشند، به طوری که نتوانند از ریبایش الکتروستاتیکی آن‌ها شوند، آن ماده نارسانا (عایق) است. از سوی دیگر اگر برخی از الکترون‌ها بتوانند از قید هسته آزاد شوند، و در نتیجه بار الکتریکی را منتقل کنند، ماده رساناست.

این مدل ساده گرچه تفاوت بین یک جسم رسانا و یک جسم نارسانا را توجیه می‌کند، ولی نمی‌تواند برای بسیاری از پرسش‌هایی که دربارهٔ رسانش الکتریکی مطرح می‌شود پاسخ دهد. از جمله اینکه :

● مواد نیمرسانا چه ویژگی‌هایی دارند که هم با رساناها و هم با نارساناها متفاوت‌اند؟ مثلاً مقاومت ویژهٔ رساناها با افزایش دما زیاد می‌شود ولی همان‌گونه که در بخش ۸-۴ خواهیم دید مقاومت ویژهٔ نیمرساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد.

● چرا الکترون‌ها در برخی از شرایط مقید به هسته می‌مانند و در برخی شرایط نه؟ مثلاً چرا کربن وقتی به شکل الماس متبلور می‌شود نارسانا است ولی به صورت گرافیت رسانای الکتریکی است؟

● چرا رسانش الکتریکی نه تنها بین رساناها و نارساناها متفاوت است، بلکه رساناها مختلف نیز همان‌گونه که جدول ۸-۱ نشان می‌دهد، مقاومت‌های ویژهٔ الکتریکی متفاوت دارند؟

برای یافتن پاسخ چنین پرسش‌هایی است که به مدل کامل‌تری برای یک جسم جامد نیاز داریم. این مدل توسط نظریه‌ای که نظریهٔ نواری جسم جامد نام دارد ارائه می‌شود.

## ۸-۲- نظریهٔ نواری

در فصل ۳ دیدیم که در اتم، الکترون‌ها بر روی مدارهایی، که هر یک انرژی معینی دارد، در اطراف هستهٔ اتم حرکت می‌کنند. این مقدار انرژی را تراز انرژی آن مدار می‌نامند. علاوه بر این دیدیم که هر یک از این مدارها با تراز انرژی وابسته به آن را یک حالت کوانتومی برای الکترون در اتم می‌نامند. دربارهٔ نحوهٔ توزیع الکترون‌ها روی ترازها هم دیدیم که الکترون‌ها ترجیحاً مدارهای کم انرژی‌تر (ترازهای انرژی پایین‌تر) را اشغال می‌کنند. در نتیجه حالت‌های کوانتومی در هر اتم از تراز پایین به بالا توسط الکترون‌های آن اتم اشغال می‌شود. در این وضعیت می‌گوییم اتم در حالت پایهٔ خود قرار دارد. همچنین دیدیم که الکترون می‌تواند با جذب مقدار معینی انرژی تراز خود را ترک کند و به تراز بالاتر که خالی است برود، یعنی اتم به حالت برانگیخته درآید. مقدار انرژی لازم برای این گذار از یک تراز به تراز بالاتر درست برابر اختلاف انرژی دو تراز است.

همهٔ این اطلاعات دربارهٔ توزیع الکترون‌ها در اتم، با استفاده از روش‌های متداول در مکانیک کوانتومی و بر پایهٔ اصول مکانیک کوانتومی و با در نظر گرفتن یک هستهٔ با بار مثبت و الکترون‌های

اطراف آن، به دست می‌آید.

اکنون این سؤال پیش می‌آید که ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد چگونه‌اند؟ نظریه نواری پاسخی است که مکانیک کوانتومی به این سؤال می‌دهد و ما در این جا به زبان ساده و کاملاً به طور کیفی به شرح آن می‌پردازیم.

در یک جسم جامد به جای یک اتم، مجموعه‌ای از اتم‌ها وجود دارد که بسیار نزدیک به یکدیگر هستند، در نتیجه دیگر تنها یک هسته با بار مثبت و الکترون‌های اطراف آن نیست که بررسی شود، بلکه با مسئله مکانیک کوانتومی جدیدی روبه‌رو هستیم که در آن الکترون‌ها تحت تأثیر نیروهای حاصل از تمام هسته‌های مثبت حرکت می‌کنند.

این مسئله یک مسئله تخصصی در زمینه فیزیک حالت جامد است که دانشمندان برای حل آن برای هر جسم روش‌های ویژه‌ای به کار برده‌اند. چون بررسی این روش‌ها و شگردهای مربوط بسیار فراتر از سطح این کتاب است؛ ما در این جا تنها به توضیح مهم‌ترین ویژگی‌های پاسخی که از حل این مسئله به دست می‌آید می‌پردازیم. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

الف) ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد (مانند مدارهای اتمی) مقدارهای انرژی ویژه خود را دارند.

ب) ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد نیز همانند ترازهای اتمی گسسته‌اند.

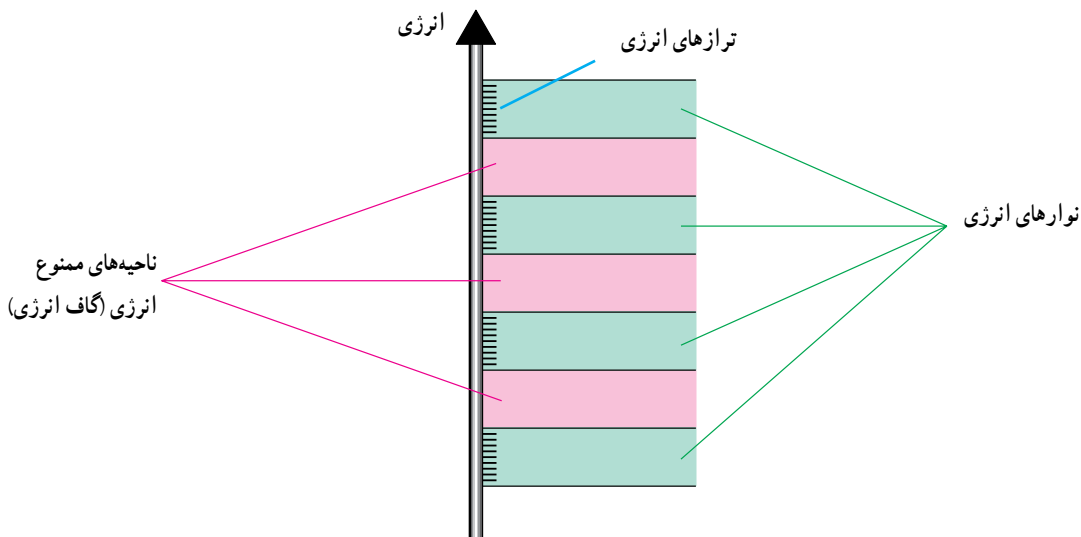
پ) هر تراز انرژی تنها توسط یک الکترون می‌تواند اشغال شود.\*

ت) از همه مهم‌تر این که ترازهای انرژی الکترون در جسم جامد تشکیل نوارهایی می‌دهند. هر نوار شامل تعداد بسیار زیادی ترازهای گسسته است که (از نظر مقدار انرژی) بسیار نزدیک به هم هستند. ولی بین نوارهای مختلف در برخی از موارد ممکن است از نظر انرژی فاصله زیادی باشد. یعنی بین بالاترین تراز انرژی در یک نوار و پایین‌ترین تراز انرژی در نوار بعدی ممکن است اختلاف انرژی زیادی وجود داشته باشد. در این فاصله هیچ تراز انرژی وجود ندارد. این فاصله را ناحیه ممنوع یا گاف انرژی می‌نامند.

نمودار نوارهای انرژی در شکل ۸-۱ نمایش داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود ترازهای انرژی فقط در قسمت نوارها وجود دارند و در گاف‌های انرژی، تراز انرژی وجود

---

\* در برخی موارد ترازهای الکترونی مربوط به اسپین‌های مختلف به عنوان ترازهای جداگانه در نظر گرفته می‌شوند که به هر کدام یک حالت کوانتومی متمایز نسبت داده می‌شود. در این کتاب نیز این روش مورد استفاده قرار گرفته است. در بعضی موارد نیز به طور معادل، ترازهای با اسپین مخالف به عنوان یک تراز در نظر گرفته می‌شوند در این حالت گفته می‌شود که هر تراز با دو الکترون اشغال می‌شود.



شکل ۸-۱

ندارد. شایان ذکر است که در این نوع نمودارهای انرژی محور قائم محور انرژی است و محور افقی کمیت بخصوصی را نشان نمی‌دهد.

اکنون ببینیم الکترون‌ها چگونه بین ترازهای مختلف توزیع می‌شوند. در دماهای بسیار پایین الکترون‌های موجود در جسم جامد معمولاً پایین‌ترین ترازهای انرژی موجود را اشغال می‌کنند. ولی چون هیچ دو الکترونی نمی‌توانند یک تراز را اشغال کنند، در نتیجه همه الکترون‌ها نمی‌توانند در پایین‌ترین تراز باشند. از این رو ترازهای انرژی از پایین به بالا اشغال می‌شوند، تا جایی که دیگر تراز خالی در پایین‌ترین نوار (نوار اول) موجود نباشد. حال اگر تعداد الکترون‌ها در جسم جامد بیش از تعداد ترازها در نوار اول باشد، ترازهای انرژی نوار بعدی اشغال می‌شود، و این روند تا جایی ادامه می‌یابد که همه الکترون‌ها در ترازهای موجود، در پایین‌ترین نوارها، جای گیرند. به این ترتیب آخرین نواری که با الکترون‌ها اشغال می‌شود ممکن است یا کاملاً پر باشد (یعنی همه ترازهای آن اشغال شده باشد) و یا بخشی پر باشد (یعنی ترازهای اشغال شده هم داشته باشد). روشن است که در این صورت نوارهای بالاتر خالی‌اند (یعنی هیچ الکترونی ترازهای آنها را اشغال نکرده است). نتیجه اینکه، یک نوار انرژی، ممکن است پر یا بخشی پر و یا خالی باشد.

**در جسم جامد یک الکترون چگونه می‌تواند تراز انرژی خود را تغییر دهد؟**  
دیدیم که در یک اتم، الکترون می‌تواند با جذب مقداری انرژی (که درست برابر است با اختلاف

انرژی بین تراز‌ی که اشغال کرده است با یک تراز خالی بالاتر) به تراز بالاتر برود. همین فرایند در جسم جامد نیز روی می‌دهد. یعنی الکترون با جذب انرژی برانگیخته می‌شود و به تراز انرژی خالی بالاتر برود. این فرایند را گذار الکترون از یک تراز به تراز انرژی دیگر می‌نامند.

## فعالیت ۲-۸

با بحث در گروه خود، دو گذار متفاوت زیر را برای الکترون بررسی کنید.

الف) گذار الکترون از یک تراز به تراز خالی دیگر در همان نوار (گذار درون نواری)

ب) گذار الکترون از یک تراز به تراز خالی دیگر در نوار انرژی بالاتر (گذار بین نواری)

با استدلال توضیح دهید که کدام گذار به جذب انرژی کمتری نیاز دارد؟

همان‌گونه که با انجام فعالیت بالا دریافته‌اید، اگر درون یک نوار، الکترونی انرژی جذب کند به تراز بالاتر می‌رود و در صورتی که بر اثر برخورد با الکترون‌های دیگر انرژی از دست دهد به تراز پایین‌تر در همان نوار می‌رود. همچنین گذار الکترون از یک تراز به تراز دیگر در همان نوار، در مقایسه با گذار از یک نوار به نوار دیگر، به انرژی کمتری نیاز دارد. این‌گونه گذارها البته تنها در صورتی ممکن است انجام شوند که بخشی از نوار پر باشد.

بر اساس نظریه نواری، الکترون‌های نوارهای پر، سهمی در رسانش الکتریکی ندارند، زیرا با انرژی‌ای که در میدان الکتریکی کسب می‌کنند، نمی‌توانند نوار خود را ترک کنند و درون نوار پر هم، تراز خالی برای گذار وجود ندارد. در نتیجه این الکترون‌ها نمی‌توانند از میدان الکتریکی انرژی بگیرند. به عبارت دیگر تنها آن دسته از الکترون‌ها در رسانش الکتریکی نقش دارند که در نوارهای بخشی پر هستند.

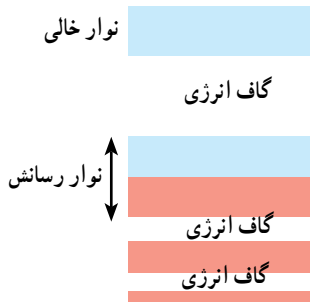
لازم به یادآوری است: انرژی موردنیاز الکترون برای انجام گذار بین ترازهای مختلف در یک جسم جامد از دو منبع می‌تواند تأمین شود؛ یکی میدان الکتریکی‌ای که جسم جامد در آن قرار گرفته و دیگری برانگیختگی گرمایی.

در ادامه این مطلب به بررسی این موضوع می‌پردازیم که با مدل ساختار نواری جسم جامد چگونه می‌توان رسانش الکتریکی جسم‌های مختلف را تفسیر کرد.

## ۳-۸- رسانش الکتریکی در مدل ساختار نواری

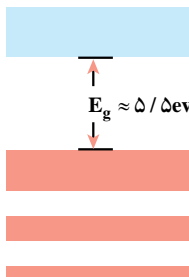
رساناها، نارساناها و نیمرساناها، ساختارهای نواری متفاوتی دارند، که هر یک به خوبی توجیه کننده ویژگی‌های الکتریکی آنهاست.

الف) ساختار نواری اجسام رسانا: اگر در ساختار نواری جسمی، نواری وجود داشته باشد که بخشی از آن پُر باشد، آن جسم رسانا است؛ زیرا الکترون‌های آن نوار، به آسانی می‌توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی تراز انرژی خود را عوض کنند، و در رسانش شرکت جویند. این الکترون‌ها را الکترون‌های رسانش و نواری که بخشی از آن پُر است را نوار رسانش می‌نامند. تعداد الکترون‌های نوار رسانش، در یک رسانای فلزی بسیار زیاد است. در شکل ۲-۸ ساختار نواری یک رسانا نشان داده شده است. مشخصه اصلی یک رسانا، در ساختار نواری، داشتن نوار بخشی پر است.



شکل ۲-۸- ساختار نواری یک رسانا. نوارهای پر شده به رنگ قرمز و نوارهای خالی به رنگ آبی است. توجه کنید تنها بخشی از نوار رسانش پر شده است.

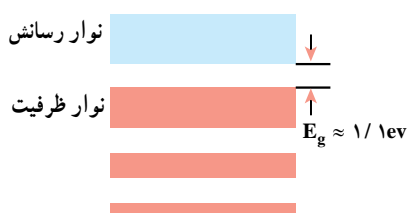
ب) ساختار نواری اجسام نارسانا: نارساناها در ساختار نواری خود نواری ندارند که بخشی از آن خالی باشد. ساختار نواری یک نارسانا در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. گاف انرژی بین آخرین نوار پر و اولین نوار خالی در نارساناها بزرگ است، به گونه‌ای که هیچ الکترونی نمی‌تواند برانگیخته شود و از نوار پر به نوار خالی برود. از این رو رسانش الکتریکی در این مواد صورت نمی‌گیرد.



شکل ۳-۸- ساختاری نواری یک عایق. نوارهای پر شده به رنگ قرمز و نوارهای خالی به رنگ آبی است. گاف انرژی  $E_g$  به حدی زیاد است که الکترون‌ها نمی‌توانند از نوار ظرفیت به نوار خالی بروند.



پ) ساختار نواری اجسام نیمرسانا: یک جسم نیمرسانا، در دماهای خیلی پایین مانند نارساها دارای نوارهای پر و خالی است و نوار بخشی پر ندارد، با این تفاوت که گاف انرژی بین بالاترین نوار پر و پایین‌ترین نوار خالی در نیمرساناها بسیار کوچک‌تر از این گاف در نارساهاست. در مبحث نیمرساناها بالاترین نوار پر را نوار ظرفیت و پایین‌ترین نوار خالی را نوار رسانش می‌نامند. کوچک بودن گاف انرژی بین نوار ظرفیت و نوار رسانش موجب می‌شود که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت در دمای اتاق نیز، با برانگیختگی گرمایی، انرژی لازم برای گذار بین نواری از نوار ظرفیت به نوار رسانش، به‌دست آورند و به نوار رسانش بروند. روشن است هرچه دما بالاتر رود تعداد بیشتری از الکترون‌ها می‌توانند این گذار را انجام دهند. ساختار نواری یک نیمرسانا در شکل ۸-۴ نشان داده شده است.



شکل ۸-۴- ساختار نواری یک نیمرسانا. نوارهای پر شده به رنگ قرمز و نوارهای خالی به رنگ آبی است. این ساختار مشابه نقش ساختار نواری یک عایق است، با این تفاوت که گاف انرژی  $E_g$  بسیار کوچک‌تر است و بنابراین الکترون‌ها می‌توانند به دلیل اغتشاش گرمایی از این گاف عبور کنند.

## ۸-۴- برخی از ویژگی‌های نیمرساناها

نیمرساناها ویژگی‌های جالب توجهی دارند که آنها را به‌طور کامل از رساناها متمایز می‌سازد. یکی از این ویژگی‌ها نحوه تغییر مقاومت ویژه الکتریکی نیمرساناها با دماست. در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه در مبحث «اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی» دیدیم که افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه رساناها می‌شود. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه نیز دیدیم که عامل ایجاد مقاومت الکتریکی در رساناها برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های در حال نوسان است؛ یعنی هرچه دما بالاتر رود این نوسان‌ها پر دامنه‌تر می‌شود و در نتیجه مقاومت ویژه الکتریکی بالا می‌رود.

در نیمرساناها هرچه دما افزایش یابد، مقاومت ویژه الکتریکی (برخلاف مقاومت ویژه رساناها) کاهش می‌یابد. این نحوه تغییر را تنها با توجه به ساختار نواری نیمرسانا می‌توان توجیه کرد.

در دماهای بسیار پایین، نیمرسانا، نوار ظرفیت کاملاً پر و نوار رسانش کاملاً خالی دارد، از این رو همان‌گونه که پیش از این گفته شد، نه الکترون‌های نوار ظرفیت (که پر است) در رسانش شرکت می‌کنند و نه در نوار رسانش الکترونی وجود دارد. بدین ترتیب در دماهای بسیار پایین، نیمرسانا مثل

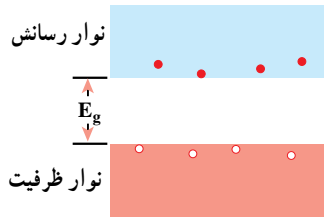
یک نارساناست. یعنی الکترون‌های آن نمی‌توانند از میدان الکتریکی انرژی کسب کنند و لذا مقاومت ویژه الکتریکی آن بسیار بالاست. حال اگر دما افزایش یابد تعدادی از الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌روند. در نتیجه هم تعداد بسیار کم الکترون در نوار رسانش، در رسانش الکتریکی شرکت می‌کنند و هم چند تراز خالی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود که گذار الکترون‌ها از یک تراز پر در نوار ظرفیت به یکی از این ترازهای خالی در همان نوار میسر می‌شود و در نتیجه نوار ظرفیت نیز سهمی در رسانش الکتریکی پیدا می‌کند و از مقاومت ویژه الکتریکی آن کاسته می‌شود. ولی با توجه به کم بودن تعداد الکترون‌هایی که به نوار رسانش رفته‌اند و کم بودن ترازهای خالی در نوار ظرفیت، میزان مقاومت ویژه الکتریکی هنوز زیاد است.

بدین ترتیب هرچه دما بالاتر رود تعداد الکترون‌های نوار رسانش و تعداد ترازهای خالی نوار ظرفیت بیشتر می‌شود و سهم هر دو نوار در رسانش الکتریکی بیشتر می‌شود که در نتیجه از مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر کاسته می‌شود.

ویژگی دیگر نیمرسانا این است که تاکنون هر جا از انتقال بار الکتریکی سخن گفته‌ایم الکترون‌ها را به‌عنوان حاملان بار معرفی کرده‌ایم. ولی آزمایش نشان می‌دهد که برخی از نیمرساناها به‌گونه‌ای رفتار می‌کنند که گویی حاملان بار الکتریکی در آنها تنها الکترون‌های با بار منفی نیستند، بلکه ذره‌هایی با بار مثبت نیز حامل بار هستند.

اینک ببینیم چگونه می‌توانیم این خصوصیت را به کمک نظریه نواری توجیه کنیم. نوارهای ظرفیت و رسانش یک نیمرسانا در دمای اتاق در شکل ۸-۴ نمایش داده شده‌اند. پیش از این گفتیم که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت برانگیخته می‌شوند و به نوار رسانش می‌روند. چنین الکترون‌هایی می‌توانند آزادانه در ماده حرکت و در رسانش الکتریکی شرکت کنند.

اکنون به بررسی سهم الکترون‌هایی که در نوار ظرفیت مانده‌اند در رسانش می‌پردازیم. این الکترون‌ها پیش از آنکه الکترون‌های دیگر برانگیخته شوند و نوار ظرفیت را ترک کنند، سهمی در رسانش الکتریکی نداشتند، زیرا تمام ترازهای انرژی موجود در نوار ظرفیت اشغال شده بود، ولی پس از آنکه تعدادی از الکترون‌ها به نوار رسانش می‌روند، چند تراز خالی در نوار ظرفیت پیدا می‌شود. این جای خالی الکترون در نوار ظرفیت را حفره می‌نامند (شکل ۸-۵). در این وضعیت الکترون‌هایی که در نوار ظرفیت مانده‌اند می‌توانند با کسب مقدار نسبتاً کمی انرژی، از تراز خود به یکی از این ترازهای خالی گذاری انجام دهند و در رسانش شرکت کنند. در این صورت همان‌گونه که پیش از این گفتیم نوار ظرفیت نیز در رسانش الکتریکی سهم دارد.



شکل ۸-۵- اغتشاش گرمایی باعث می‌شود چند الکترون معدود از گاف بین نوار ظرفیت و نوار رسانش بگذرند و بدین ترتیب تعداد یکسانی حفره در نوار ظرفیت بر جا می‌ماند.

این گذار الکترون از تراز اولیه خود به تراز خالی، مشابه آن است که حفره از تراز قبلی خود به تراز اولیه الکترون رفته است. به این ترتیب می‌توانیم به‌جای آنکه بگوییم «الکترون، گذاری را درون نوار ظرفیت انجام داده است» بگوییم «حفره تراز خود را تغییر داده است» و بدین ترتیب می‌توان رسانش مربوط به نوار ظرفیت را، برحسب حفره، توضیح داد، و به‌جای اینکه گذار تعداد بسیار زیاد الکترون‌های نوار ظرفیت را در نظر بگیریم، گذار تعداد کم حفره‌ها را بررسی کنیم که در نتیجه توضیح پدیده‌ها بسیار ساده‌تر می‌شود. هنگامی که یک نیم‌رسانا در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، الکترون‌های نوار رسانش در خلاف جهت میدان و حفره‌های نوار ظرفیت در جهت میدان حرکت می‌کنند. برای نیم‌رسانایی که ناخالصی نداشته باشد، تعداد الکترون‌های موجود در نوار رسانش و تعداد حفره‌های موجود در نوار ظرفیت با هم برابرند. چنین نیم‌رسانایی را نیم‌رسانای ذاتی می‌گویند.

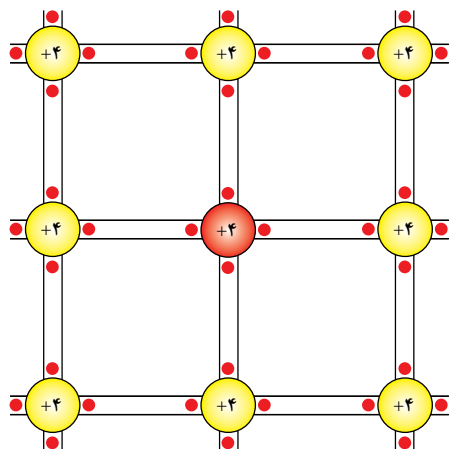
### پرسش ۸-۱

چرا در نیم‌رسانای ذاتی تعداد الکترون‌های نوار رسانش با تعداد حفره‌های نوار ظرفیت برابر است؟

### ۸-۵- آرایش نیم‌رساناها

در بخش قبل دیدیم که تعداد حاملان بار (الکترون‌های نوار رسانش و حفره‌های نوار ظرفیت) با افزایش دما زیاد می‌شود. اما روش دیگری نیز برای افزایش تعداد حاملان بار وجود دارد و آن اضافه کردن ناخالصی به نیم‌رساناست. منظور از ناخالصی، اتم‌هایی است که از جنس اتم‌های نیم‌رسانای ذاتی (اتم‌های میزبان) نباشند. افزودن مقدار کمی ناخالصی به نیم‌رسانا را آرایش نیم‌رسانا می‌نامند. این کار تأثیر چشمگیری بر مقاومت الکتریکی نیم‌رسانا دارد. مقاومت نیم‌رسانا با افزایش ناخالصی‌ها کم می‌شود، و رسانش الکتریکی در آن بهتر انجام می‌گیرد.

در موردی که رسانش بیشتر به دلیل وجود ناخالصی باشد، نیمرسانا را غیرذاتی می‌گویند. آلایش نیمرساناها به دو روش مختلف انجام می‌شود. روش اول آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد و روش دوم آن است که اتم ناخالصی، یک الکترون ظرفیت کمتر از اتم‌های نیمرسانای ذاتی داشته باشد. نیمرسانایی را که به روش اول آلایش یافته باشد، نیمرسانای نوع  $n$  و نیمرسانایی را که به روش دوم آلایش یافته باشد نیمرسانای نوع  $p$  می‌نامند. برای مثال سیلیسیوم و ژرمانیوم دو ماده نیمرسانا هستند که معمولاً در قطعه‌های الکترونیکی به کار می‌روند. اتم‌های هر دوی این عناصرها، هر یک چهار الکترون ظرفیت دارند (شکل ۸-۶). حال اگر در هر یک از این نیمرساناها به جای یکی از اتم‌ها یک اتم ناخالصی پنج یا سه ظرفیتی وارد کنیم، نیمرسانا را آلاییده‌ایم، و به ترتیب نیمرسانای غیرذاتی نوع  $n$  یا  $p$  به دست آورده‌ایم.

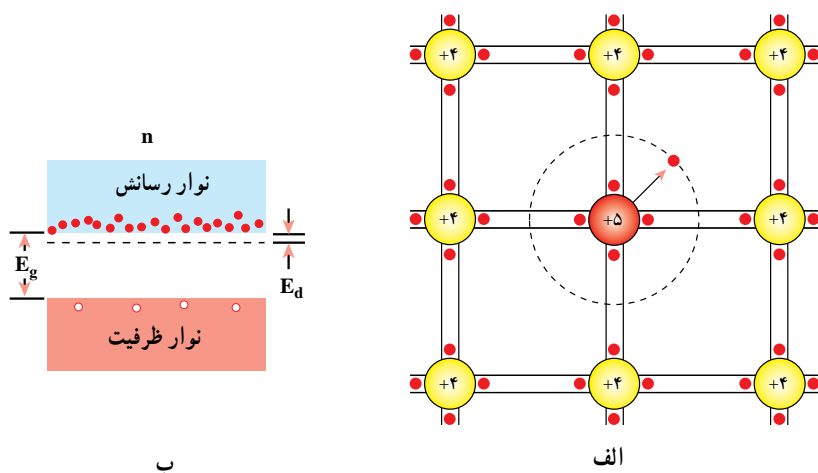


شکل ۸-۶- نمایشی مسطح از ساختار شبکه سیلیسیوم خالص. هر یون سیلیسیوم توسط یک پیوند کووالانس دو الکترونی به چهار نزدیک‌ترین همسایه خود جفت شده است (که با یک جفت نقطه بین دو خط تیره موازی نشان داده شده است). توجه کنید که الکترون‌ها به پیوند - و نه اتم‌های مجزا - تعلق دارند و تشکیل یک پیوند ظرفیتی را می‌دهند.

**نیمرسانای نوع  $n$** : فرض کنیم که به نیمرسانایی از جنس سیلیسیوم یک اتم ناخالصی پنج ظرفیتی - مانند آرسنیک - وارد کنیم. همان‌گونه که در شکل ۸-۷ الف نشان داده شده است، چهار تا از الکترون‌های ظرفیت اتم آرسنیک در پیوند کووالان بین این اتم و اتم‌های سیلیسیوم همسایه شرکت می‌کنند. این چهار الکترون به جای الکترون‌های اتم سیلیسیوم ترازهای انرژی را در نوار ظرفیت اشغال می‌کنند.

حضور اتم ناخالصی ساختار نواری را تغییر می‌دهد. به این ترتیب که الکترون اضافی (الکترون پنجم) بر روی تراز قرار می‌گیرد به نام تراز دهنده که مطابق شکل ۸-۷ ب در فاصله بسیار کمی زیر نوار رسانش قرار دارد. چون فاصله این تراز از نوار رسانش بسیار کم است، تنها مقدار کمی

انرژی برای برانگیخته کردن الکترون و بردن آن از این تراز به نوار رسانش کافی است. در نتیجه در نوار رسانش علاوه بر الکترون های ذاتی، یک الکترون دیگر نیز خواهیم داشت. این نوع اتم های ناخالصی را که یک الکترون اضافی به نوار رسانش می دهند، ناخالصی دهنده می نامند. نیم رساناهایی را که با اتم های دهنده آلاینده شده باشند، نیم رسانای نوع n می نامند زیرا بیشتر حاملان بار در آنها از نوع منفی (negative) هستند.



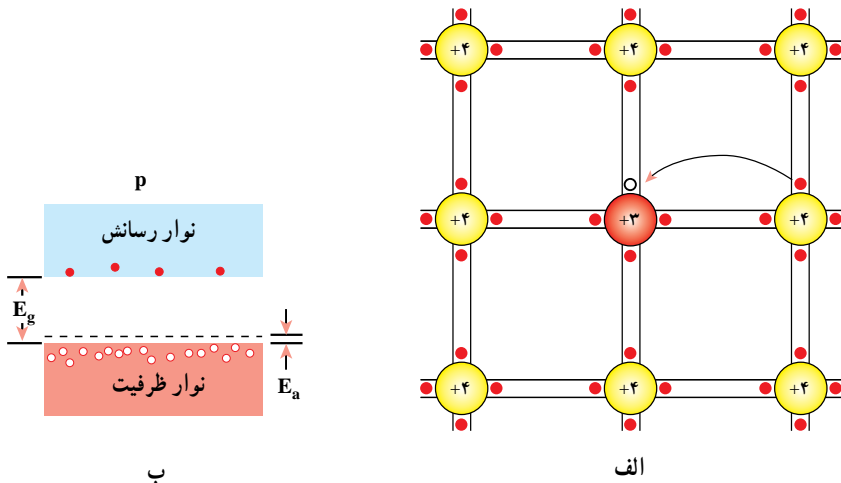
شکل ۸-۷- الف) یک اتم سیلیسیوم با یک اتم پنج ظرفیتی جایگزین شده است. الکترون اضافی به سستی به مغز یونی خود مقید است و به سادگی می تواند به نوار رسانش بالا برود. (ب) در یک نیم رسانای آلاینده نوع n، ترازهای انرژی الکترون های دهنده در فاصله کوچک  $E_d$  زیر نوار رسانش قرار دارند. چون الکترون های دهنده می توانند به آسانی به نوار رسانش برانگیخته شوند، اکنون تعداد بسیار زیادی الکترون در این نوار وجود دارند. نوار ظرفیت شامل همان تعداد کم حفره ها، به اندازه بیش از اضافه کردن آلاینده است.

**نیم رسانای نوع p:** اگر به نیم رسانایی از جنس سیلیسیوم اتم های ناخالصی سه ظرفیتی - مانند ایندیوم یا آلومینیوم - وارد کنیم، سه الکترون ظرفیت اتم ناخالصی مطابق شکل ۸-۸- الف در پیوند بین اتم های سیلیسیوم شرکت می کنند. ولی برای کامل شدن پیوند بین اتم ها یک الکترون کمبود داریم. الکترون های موجود در نوار ظرفیت نیم رسانا با جذب مقدار کمی انرژی جای این الکترون را پر می کنند که این عمل باعث می شود یک حفره اضافی در نوار ظرفیت ایجاد شود. در نتیجه، در نوار ظرفیت، علاوه بر تراز خالی مربوط به الکترون هایی که به نوار رسانش رفته اند، یک تراز خالی یا حفره اضافی نیز خواهیم

داشت. این نوع اتم‌های ناخالصی را پذیرنده می‌نامند.

ساختار نواری در حضور اتم ناخالصی پذیرنده در شکل ۸-۸-ب نشان داده شده است. تراز پذیرنده در فاصله بسیار کمی در بالای نوار ظرفیت قرار دارد. به گونه‌ای که در دمای اتاق، الکترون‌های نوار ظرفیت انرژی کافی برای گذار به تراز پذیرنده را در دسترس دارند. در نتیجه این گذار، یک حفره اضافی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود.

نیمرساناهایی را که با اتم‌های پذیرنده آلییده شده باشند، نیمرسانای نوع p می‌نامند، زیرا بیشتر حاملان بار در آن‌ها حفره‌ها هستند و آن‌ها مانند حامل‌های بار مثبت (positive) رفتار می‌کنند.



شکل ۸-۸-الف). یک اتم سیلیسیوم با یک اتم سه ظرفیتی جایگزین شده است. اکنون حفره‌ای در یکی از پیوندهای کووالانسی و بنابراین در نوار ظرفیت ایجاد شده است. این حفره می‌تواند هنگامی که الکترون‌های پیوندهای مجاور برای پر کردن آن حرکت می‌کنند، به سادگی در سر تا سر شبکه حرکت کند. در شکل، حفره به سمت راست حرکت می‌کند. (ب) در یک نیمرسانای آلییده نوع p، ترازهای پذیرنده در فاصله کوچک  $E_a$  بالای نوار ظرفیت قرار دارند. اکنون تعداد بسیار بیشتری حفره در نوار ظرفیت وجود دارد. نوار رسانش شامل همان تعداد کم الکترون‌ها به اندازه پیش از افزودن آلییده است.

افزودن حتی مقدار بسیار کم ناخالصی به یک نیمرسانا، بر مقاومت آن تأثیر عمده می‌گذارد. تراکم‌های ناخالصی نوعاً در حدود یک اتم ناخالصی به ازای هر صد میلیون اتم از جنس ماده نیمرساناست.

## ۸-۶- دیود و پیوندگاه p-n

اگر یک نیم‌رسانای نوع n را به یک نیم‌رسانای نوع p متصل کنیم، قطعه حاصل را یک پیوند p-n و مرز مشترک آن دو را پیوندگاه p-n می‌نامند.

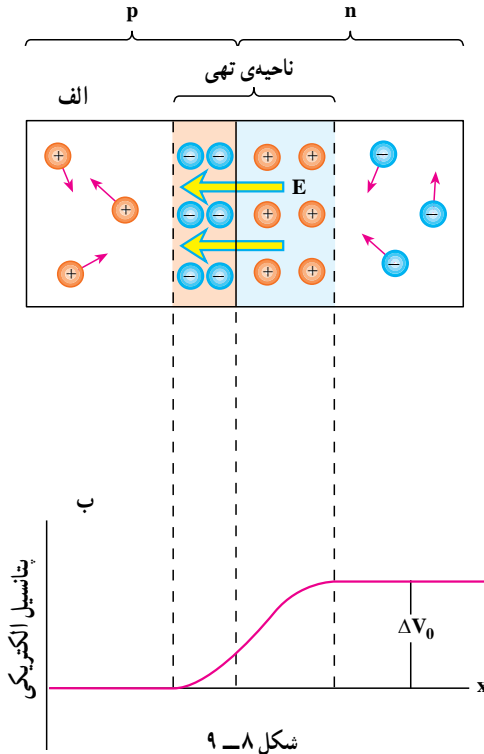
پیوند p-n ویژگی جالب توجهی دارد و آن این است که هرگاه در مدارای قرار گیرد، جریان الکتریکی را تنها از یک سو عبور می‌دهد. قطعه‌ای را که دارای این خاصیت باشد یک دیود می‌نامند. پس دیود قطعه‌ای است که مقاومت آن برای جریان‌هایی که در یک سوی معین می‌گذرند بسیار زیاد، و برای جریان‌هایی که در سوی مخالف می‌گذرند عملاً ناچیز است. به همین دلیل دیود را یک سوکننده نیز می‌نامند. در مدارهای الکتریکی دیود را با نماد  $\rightarrow|$  نمایش می‌دهند. پیکان جهت جریان را نشان می‌دهد.

اکنون سازوکار یک سوکنندگی پیوند p-n را بررسی می‌کنیم. می‌دانیم که یک نیم‌رسانای نوع n، الکترون آزاد و یک نیم‌رسانای نوع p حفره آزاد دارد. هنگامی که مطابق شکل ۸-۹ الف پیوند p-n را تشکیل می‌دهیم، الکترون‌هایی که در طرف n، در نزدیکی پیوندگاه، یعنی در ناحیه‌ای که در شکل با رنگ آبی نشان داده شده است، قرار دارند، به طرف p پخش می‌شوند و یون‌های مثبت را که قادر به حرکت نیستند، بر جای می‌گذارند. به همین ترتیب در طرف p هم حفره‌ها به طرف n می‌روند و ناحیه‌ای از بارهای منفی ثابت را بر جای می‌گذارند. وقتی الکترون‌های آزاد و حفره‌های آزاد که از دو طرف می‌آیند به یکدیگر می‌رسند، یکدیگر را خنثی می‌کنند و از تعداد حاملان بار آزاد در این لایه کم می‌شود. در نتیجه، در ناحیه پیوندگاه تعداد حامل‌های بار آزاد بسیار کم است. به همین دلیل این ناحیه را ناحیه تهی می‌نامند. ناحیه تهی عرض معینی دارد، زیرا به دلیل حضور یون‌های ثابت یک میدان الکتریکی داخلی به وجود می‌آید که از رفتن الکترون‌ها از ناحیه n و حفره‌ها از ناحیه p جلوگیری می‌کند و نمی‌گذارد که عرض ناحیه تهی بیشتر شود.

جهت این میدان الکتریکی داخلی همان‌گونه که در شکل ۸-۹ الف نشان داده شده است از ناحیه n به طرف ناحیه p است.

### دیود چگونه از عبور جریان الکتریکی در یک جهت جلوگیری می‌کند؟

خصوصیت‌های ناحیه‌های مختلف یک دیود را می‌توانیم با مراجعه به نمودار پتانسیل الکتریکی در شکل ۸-۹ ب درابیم. میدان الکتریکی موجود در ناحیه تهی باعث می‌شود که یک طرف این ناحیه، نسبت به طرف مقابل، پتانسیل الکتریکی بیشتری داشته باشد. اگر اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه تهی را با  $\Delta V$  نمایش دهیم، نیرویی که از میدان الکتریکی داخلی بر هر حفره‌ای که بخواهد از ناحیه



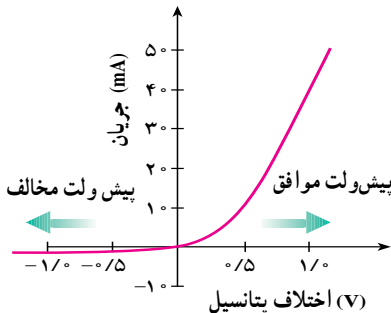
شکل ۸-۹

p به ناحیه n برود وارد می‌شود، در جهتی است که آن را به طرف p می‌راند. در نتیجه برای غلبه بر میدان الکتریکی داخلی، به انرژی اضافی  $e\Delta V$  نیاز خواهد داشت. نیروی وارد بر الکترونی هم که بخواهد از ناحیه n به ناحیه p برود، در جهتی است که آن را به طرف n می‌راند. در نتیجه الکترون‌ها نیز برای عبور از ناحیه تهی نیاز به انرژی اضافی دارند.

انرژی اضافی لازم برای حرکت الکترون‌ها از سمت راست به چپ ناحیه تهی و حفره‌ها از سمت چپ به راست ناحیه تهی را می‌توان به وسیله یک منبع ولتاژ خارجی تأمین کرد. برای این کار باید ولتاژ خارجی به گونه‌ای به دو طرف پیوندگاه اعمال شود که پایانه مثبت به p و پایانه منفی به n وصل شود.

به این ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو طرف ناحیه تهی کاهش می‌یابد و موجب می‌شود که الکترون‌ها بتوانند از n به p و حفره‌ها از p به n حرکت کنند و جریان الکتریکی را به وجود آورند. در چنین شرایطی می‌گوییم دیود دارای پیش ولت موافق (بایاس مستقیم) است.

در صورتی که ولتاژ خارجی در جهت عکس اعمال شود، اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه تهی افزایش می‌یابد و از عبور الکترون‌ها از n به p و عبور حفره‌ها از p به n جلوگیری می‌کند که در نتیجه جریان بسیار کمی از پیوندگاه عبور می‌کند. در این صورت می‌گوییم که دیود دارای پیش ولت مخالف (بایاس معکوس) است.



شکل ۸-۱۰

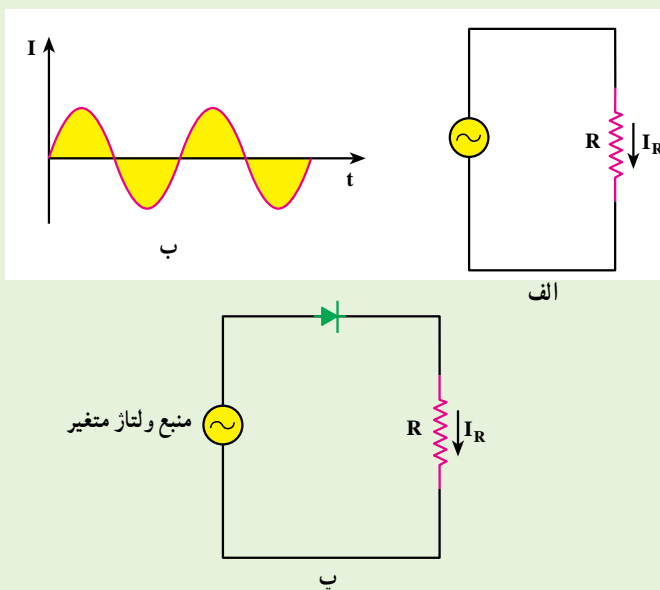
منحنی تغییرات جریان برحسب اختلاف پتانسیل دو سر دیود در شکل ۸-۱۰ رسم شده است. به این نکته توجه داشته باشید که دیود از قانون اهم پیروی نمی‌کند. منحنی تغییرات جریان برحسب ولتاژ برای مقاومت‌هایی که از قانون اهم پیروی می‌کنند، به صورت خط راستی است که



از مبدأ می‌گذرد و شیب ثابت آن برابر عکس مقاومت است. چنین مقاومت‌هایی را مقاومت‌های اهمی می‌خوانند. در نتیجه می‌توان گفت که دیود، غیر/همی است. بنابراین دیدیم که دیود جریان را در یک جهت از خود عبور می‌دهد و در جهت دیگر عبور نمی‌دهد.

### فعالیت ۳-۸

در شکل ۸-۱۱، نمودار (ب) منحنی تغییرات شدت جریان بر حسب زمان را برای مدار (الف) نشان می‌دهد. شما نیز با بحث و بررسی در گروه خود نمودار تغییرات شدت جریان بر حسب زمان را برای مدار (پ) به دست آورید.





شکل ۸-۱۱

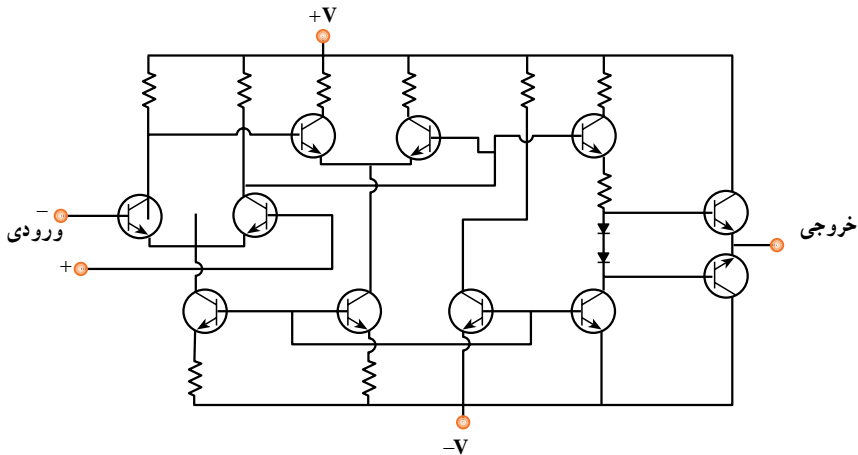
### مطالعه آزاد

#### ترانزیستور

از وصل کردن سه قطعه نیم‌رسانای  $p$ ،  $n$ ،  $p$  و یا  $n$ ،  $p$ ،  $n$  قطعه‌ای به نام ترانزیستور به دست می‌آید. ترانزیستورها برخلاف بیشتر قطعات الکتریکی، سه محل اتصال به سیم‌های

رابط دارند که هر محل به یکی از سه قطعه نیم رسانای  $p$ ،  $n$ ،  $p$  (و یا  $n$ ،  $p$ ،  $n$ ) متصل می‌شود. در مدارهای الکتریکی، ترانزیستور  $pnp$  را با نماد  و ترانزیستور  $npn$  را با نماد  نمایش می‌دهند. از ترانزیستورها به عنوان تقویت کننده جریان یا ولتاژ استفاده می‌شود. شرح سازوکار ترانزیستور در تقویت جریان یا ولتاژ فراتر از سطح این کتاب است.

**مدارهای جمعی IC:** مدارهای جمعی را «مهم‌ترین فناوری ساخته بشر» نامیده‌اند. این مدارها، شالوده رایانه‌ها، ساعت‌ها، دوربین‌ها، اتومبیل‌ها، هواپیماها، روبات‌ها، سفینه‌های فضایی و انواع و اقسام شبکه‌های ارتباطی و... را تشکیل می‌دهند. به بیان ساده یک مدار جمعی مجموعه‌ای از ترانزیستورها، دیودها، مقاومت‌ها و خازن‌هاست که بر روی یک تکه بسیار کوچک سیلیسیوم به نام تراشه تعبیه شده است. بعضی از تراشه‌ها دارای چند صد هزار جزء بر روی سطحی به مساحت کمتر از یک روی سکه هستند. یک نمودار بسیار ساده شده از یک IC در شکل ۸-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱۲

## ۸-۷- ابر رساناها

پیش از این یادآوری کردیم که افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه رساناها می‌شود. این افزایش را این‌طور توجیه می‌کنند که در اجسام جامد اتم‌ها و یون‌ها در دمای بالاتر از صفر مطلق به‌طور

دائم در حال ارتعاش هستند، حال هرچه دما بالاتر رود دامنه این ارتعاش‌ها بیشتر می‌شود که در نتیجه آن الکترون‌های رسانش مشکل‌تر می‌توانند از بین آنها عبور کنند.

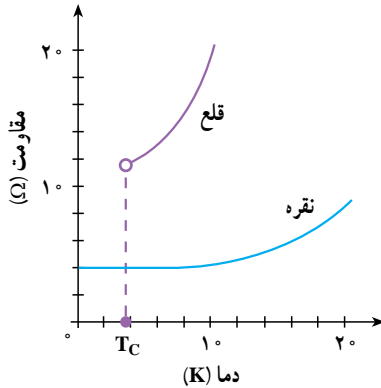
برای درک بهتر این وضعیت مثالی می‌زنیم. دانش‌آموزی را در نظر بگیرید که می‌خواهد در حیاط شلوغ مدرسه حرکت کند. اگر همه افراد در جای خود بی‌حرکت ایستاده باشند، دانش‌آموز مورد نظر بسیار آسان‌تر از وقتی حرکت می‌کند که این افراد در حال حرکت باشند، و البته هرچه حرکت دانش‌آموزان پرمانه‌تر باشد، حرکت وی مشکل‌تر خواهد شد.

اگر ارتعاش‌های اتمی تنها سازوکار مقاومت در مقابل حرکت الکترون‌ها باشد، باید انتظار داشته باشیم که با کاهش دما و رسیدن به صفر مطلق، مقاومت ویژه رسانا هم به تدریج و به آرامی به سمت صفر میل کند. در حالی که آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در عمل وضعیت به این صورت نیست، بلکه دو نوع رفتار بسیار متفاوت در مقاومت ویژه الکتریکی جامدهای بسیار سرد دیده می‌شود. یا مقاومت ویژه الکتریکی در دمایی که بالاتر از صفر مطلق است، به‌طور ناگهانی (و نه به تدریج) صفر می‌شود، و یا اینکه اصلاً صفر نمی‌شود. همان‌گونه که در شکل ۸-۱۳ می‌بینید اگر نمونه‌ای از جنس نقره را سرد کنیم، مقاومت ویژه الکتریکی آن به تدریج کاهش می‌یابد ولی در دماهای کمتر از  $2^\circ\text{K}$  این کاهش مقاومت متوقف می‌شود و مقاومت ثابت می‌ماند. این نشان می‌دهد که علاوه بر ارتعاش‌های اتمی، سازوکار دیگری نیز در جسم جامد برای ایجاد مقاومت الکتریکی وجود دارد که تنها وقتی اثر مقاومتی ارتعاش‌های اتمی ناچیز شود قابل تشخیص می‌شود. این سازوکار، ناشی از بی‌نظمی‌هایی است که در ترتیب قرار گرفتن اتم‌ها ممکن است وجود داشته باشد.

برای روشن شدن این وضعیت فرض کنید که شما می‌خواهید از میان جمعیت شلوغی عبور کنید. اگر همه افراد در صف‌هایی مرتب بایستند عبور از میان آنها آسان است، ولی اگر یکی از صف خود خارج شده و در میان دو صف متوالی ایستاده باشد و یا کسی بسته بزرگی را سر راه قرار داده باشد، حرکت شما مشکل خواهد شد. این‌گونه بی‌نظمی‌ها در ساختار جسم جامد را ناکاملی می‌نامند. ناکاملی‌ها، حتی وقتی که ارتعاش‌های اتمی هم متوقف شود، باعث مقاومت در مقابل حرکت الکترون‌ها می‌شوند. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک رسانای فلزی در صفر مطلق را مقاومت ویژه باقیمانده می‌نامند.

حال اگر این آزمایش را با نمونه‌ای از جنس قلع تکرار کنیم، همان‌گونه که در شکل پیداست مقاومت ویژه الکتریکی قلع (که در دماهای بالا بیشتر از مقاومت ویژه نقره است) در دمایی حدود  $4^\circ\text{K}$  کلون افت سریع پیدا می‌کند و ناگهان صفر می‌شود. در این وضعیت می‌گوییم قلع ابر رسانا شده است. دمایی را که در آن «افت سریع مقاومت ویژه» روی می‌دهد دمای بحرانی می‌نامند و آن را با  $T_C$

نمایش می‌دهند.



شکل ۸-۱۳

بنابراین قلع در دماهای بالاتر از  $T_C$  یک رسانای معمولی و در زیر  $T_C$  یک ابر رساناست. از این رو  $T_C$  را دمای گذار به حالت ابر رسانایی نیز می‌گویند. دمای گذار به ابر رسانایی برای رساناهای مختلف یکسان نیست. هر عنصر یا آلیاژ دمای گذار ویژه خود را دارد. برخی از فلزات که عموماً رساناهای بهتری هستند - مانند نقره - گذار به ابر رسانایی را از خود نشان نمی‌دهند. دمای گذار چند ماده مختلف در جدول ۸-۲ ارائه شده است.

جدول ۸-۲

ماده	دمای گذار بر حسب کلوین
Zn	۸۸/
Al	۱/۱۹
Sn	۳/۷۲
Hg	۴/۱۵
Nb	۹/۴۶
Nb <sub>3</sub> Ge	۲۳/۲
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	۹
Tl-Ba-Ca-Cu-O	۱۲۵
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	۱۳۵

## مطالعه آزاد

### نظریه BCS در مورد ابر رسانایی

اولین مورد ابر رسانایی در سال ۱۹۱۱ میلادی در جیوه مشاهده شد. ولی از آن زمان تا سال ۱۹۵۷ میلادی هیچ توجیه قانع کننده‌ای برای صفر شدن ناگهانی مقاومت ویژه الکتریکی عرضه نشد. اما در این سال سه دانشمند، به نام‌های جان باردین، لئون کوپر و رابرت شریفر توانستند نظریه‌ای برای پدیده ابر رسانایی ارائه کنند. این نظریه با استفاده از

اول حرف نام‌های آن سه نفر، نظریه BCS خوانده شد.

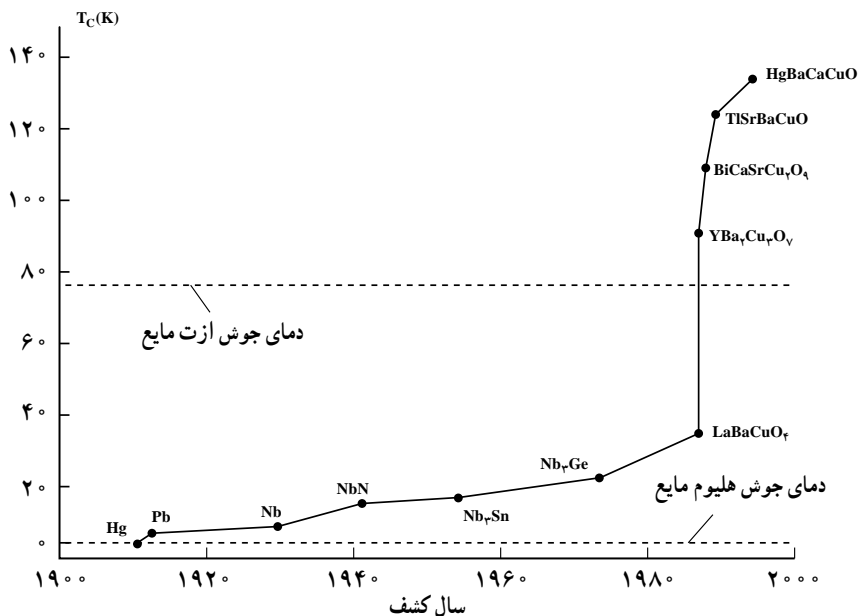
بنابر نظریه BCS، در پدیده ابر رسانایی الکترون‌ها به صورت زوج در رسانش شرکت می‌کنند که هر یک از این زوج الکترون‌ها را یک زوج کوپر می‌نامند. مقاومت در مقابل حرکت زوج‌های کوپر بسیار ناچیز است. به عبارت دیگر زوج‌های کوپر در اثر برخورد با ارتعاش‌های اتمی یا ناکاملی‌ها تکانه زیادی از دست نمی‌دهند.

دلیل این که چرا حالت ابر رسانایی در دماهای کم دیده می‌شود آن است که انرژی بستگی دو الکترون در زوج کوپر بسیار کم است و در دماهای بالاتر انرژی گرمایی باعث می‌شود که پیوند دو الکترون یک زوج کوپر، از هم گسسته شود.

## مطالعه آزاد

### کاربردهای ابر رسانایی

گذار به حالت ابر رسانایی برای بسیاری از مواد در دمای بسیار پایین، نزدیک به صفر مطلق، روی می‌دهد. این موضوع استفاده از ابر رسانا برای کاربردهای معمولی را مشکل می‌سازد، زیرا ایجاد چنین دماهای پایینی معمولاً بسیار پرهزینه است. در واقع برای ابر رساناهای اولیه نیاز به استفاده از هلیوم مایع یا هیدروژن مایع بود که هر دو بسیار گران و اولی بسیار نادر است. ولی همان‌گونه که در جدول ۸-۲ آمده است، رده جدیدی از مواد کشف شده‌اند که در دماهای بسیار بالاتری ابر رسانا می‌شوند. دمای گذار بسیاری از این مواد بالاتر از ۷۷K، یعنی نقطه جوش ازت مایع، است. این نکته مهمی است، چون عمل سرد کردن برای رسیدن به دمای گذار را می‌شود با استفاده از ازت مایع انجام داد که نه گران است و نه نادر و در ضمن بی‌اثر نیز هست. در حال حاضر جست‌وجو برای یافتن موادی که در دمای اتاق ابر رسانا شوند ادامه دارد. روند افزایش بالاترین دمای گذار شناخته شده در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۸-۱۴

## مطالعه آزاد

### ابر رسانایی و تحول الکترونیکی

اینکه مقاومت ویژه الکتریکی ابر رسانا صفر است، در امر انتقال کم اتلاف انرژی الکتریکی مزیت بسیار بزرگی به حساب می‌آید. اگر خط‌های انتقال از نوع رساناهای معمولی باشد بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی الکتریکی در حال انتقال تلف می‌شود. در حالی که با استفاده از ابر رسانا، این اتلاف از بین می‌رود و صرفه‌جویی عمده‌ای در مصرف انرژی انجام می‌شود.

ابر رساناهای با دمای  $T_c$  نسبتاً زیاد، که ابر رساناهای گرم نام دارند، در امر فناوری الکترونیکی نیز تأثیر عمده‌ای دارند. برای مثال پیوندگاه دو ابر رسانا نیز همانند پیوندگاه دو نیم رسانا - ویژگی‌های خاص خود را دارد. برای مثال در صنعت رایانه از لایه‌های نازک ابر رسانا برای اتصال تراشه‌های رایانه استفاده می‌شود که باعث افزایش سرعت عمل رایانه می‌شود.

علاوه بر این از حلقه‌های ابر رسانا می‌توان به عنوان ابزار ذخیره‌سازی جریان یا

انرژی الکتریکی استفاده کرد. جریانی که در یک حلقه ابر رسانا برقرار می‌شود همواره برقرار خواهد بود، زیرا هیچ مقاومتی در مقابل آن وجود ندارد و لذا از این انرژی الکتریکی می‌توان در هر زمان که نیاز باشد استفاده کرد.

**ویژگی‌های مغناطیسی ابر رساناها:** در کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه دیدیم که در اطراف سیم رسانای حامل جریان الکتریکی، یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. در این صورت اگر آهنربایی در نزدیکی سیم قرار گیرد، به سوی آن رانده و یا از آن رانده خواهد شد. این پدیده، اساس پدیده بالابری (معلق‌سازی) مغناطیسی را تشکیل می‌دهد. منظور از بالابری مغناطیسی آن است که جسمی به دلیل رانش مغناطیسی ناشی از یک آهنربا در هوا معلق نگه داشته شود. آهنربایی که معمولاً به این منظور به کار می‌رود یک آهنربای الکتریکی است. ولی مشکلی که وجود دارد آن است که مقدار زیادی از انرژی، به دلیل مقاومت الکتریکی سیم‌های آهنربای الکتریکی، تلف می‌شود. راه حل این مشکل آن است که در آهنربای الکتریکی از سیم‌های ابر رسانا استفاده شود.

تعلیق مغناطیسی، کاربردهای احتمالی زیادی در زمینه حمل و نقل دارد. هم‌اکنون در کشور ژاپن قطاری به صورت نمونه ساخته شده است که بر روی آهنرباهای ابر رسانا حرکت می‌کند.

یکی دیگر از کاربردهای مهم آهنرباهای ابر رسانا در پزشکی است. این آهنرباها در ابزار تشخیصی به نام «تصویربرداری تشدید مغناطیسی»<sup>۱</sup> یا MRI به کار می‌روند. در این روش برای ایجاد تصویر، به جای پرتوهای ایکس از تابش با بسامد رادیویی که نسبتاً بی‌خطر است استفاده می‌شود.

تا اینجا پدیده رسانش الکتریکی و تفاوت‌هایی را که بین جسم‌های مختلف از این نظر وجود دارد بررسی کردیم. سایر ویژگی‌های فیزیکی اجسام جامد مانند رسانش گرمایی، انبساط، خواص مغناطیسی، ویژگی‌های کشاینده و ... نیز به کمک مفهوم‌های فیزیک جدید و مکانیک کوانتومی توجیه شده است. ولی چون حجم محدود این کتاب گنجایش پرداختن به این موضوع‌ها را ندارد به همین مقدار بسنده می‌کنیم و در ادامه این فصل یکی دیگر از موضوع‌هایی که در فیزیک جدید مطرح می‌شود، یعنی ساختار هسته اتم و برخی از ویژگی‌های هسته اتم‌ها را مطرح می‌کنیم.

۱ - Magnetic Resonance Imaging (MRI)

## ۸-۸- ساختار هسته اتم

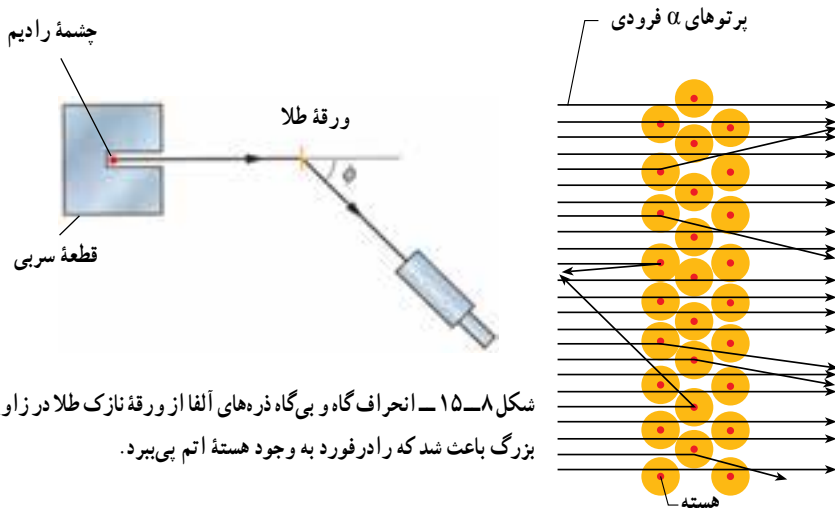
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ ه.ش) آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعه بشری داشت.

### کشف هسته اتم

چند سال پس از آنکه اینشتین اثر فوتوالکتریک را توجیه کرد، ارنست رادرفورد آزمایشی را انجام داد که معلوم کرد اتم تقریباً از فضای تهی تشکیل شده و بیشتر جرم آن در بخش مرکزی به نام هسته متمرکز شده است.

در این آزمایش، باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت (ذره‌های آلفا) گسیل شده از چشمه‌ای پرتوزا بر ورقه‌ای نازک از طلا فرود می‌آمدند (شکل ۸-۱۵). چون ذره‌های آلفا بسیار سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند، انتظار می‌رفت که این ذره‌ها بدون برخورد با مانع از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می‌گذشتند و در برخورد با صفحه فلورئورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با این همه، برخی از این ذره‌ها در هنگام خروج از ورقه در زاویه‌های بزرگ منحرف می‌شدند و حتی تعدادی از آنها به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد می‌گفت: «مثل آن بود که گلوله توپیی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله، توپ بازگردد.»

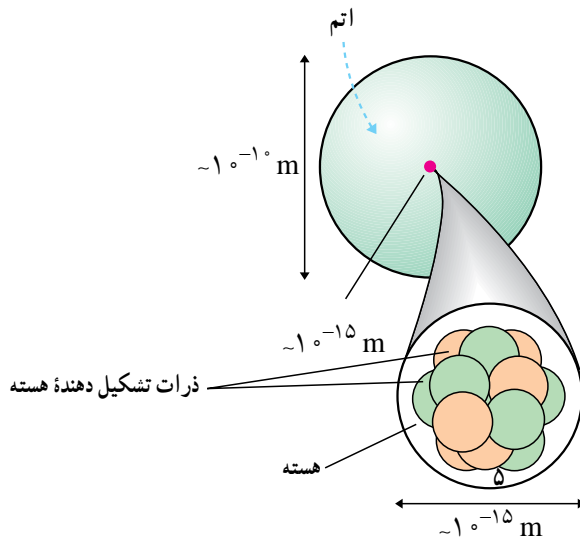
این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده بودند. او نتیجه گرفت که هر اتم باید دارای هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت باشد.



شکل ۸-۱۵- انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقه نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هسته اتم پی‌برد.



بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هستهٔ اتم در حدود  $10^{-15} \text{ m}$  (۱۰ افتمومتر یا فرمی) و در حدود صد هزار مرتبه کوچک‌تر از ابعاد اتم ( $10^{-10} \text{ m}$ ) است (شکل ۸-۱۶).



شکل ۸-۱۶- مقایسه ابعاد هسته اتم و اتم

## فعالیت ۴-۸

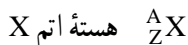
در یک زمین ورزشی ناحیه‌ای را مشخص کنید که ابعاد آن به همان اندازه کوچک‌تر از ابعاد زمین باشد که ابعاد هسته کوچک‌تر از ابعاد اتم است.

در زمان کشف هستهٔ اتم فقط ذره‌های شناخته شدهٔ زیر اتمی، الکترون و هستهٔ هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. تعداد پروتون‌های هسته با  $Z$  مشخص می‌شود و آن را «عدد اتمی» می‌نامند. چون اتم به لحاظ الکتریکی خنثی است،  $Z$  تعداد الکترون‌های اتم نیز هست. تعداد نوترون‌های هسته را با  $N$  نشان می‌دهند و آن را «عدد نوترونی» می‌نامند. مجموع عدد اتمی و عدد نوترونی یعنی  $Z + N$  را «عدد جرمی» می‌نامند و آن را با  $A$  نشان می‌دهند.

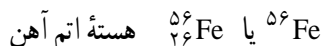
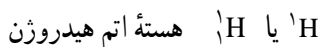
$$A = Z + N$$

(۸-۱)

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و A و Z را به صورت زیر مشخص می‌کنند.



مشخص کردن N ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از تفاضل A و Z به دست آورد. همین‌طور در بسیاری موارد Z را هم ذکر نمی‌کنند؛ زیرا نماد شیمیایی معرف آن است؛ مثلاً:



ایزوتوپ‌ها: ویژگی‌های هر اتم را تعداد الکترون‌های آن اتم مشخص می‌کند. اما ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند؛ بنابراین، تعداد هسته‌های متفاوت موجود در طبیعت بسیار بیشتر از تعداد اتم‌های متفاوت است. اتم‌های با تعداد پروتون معین و تعداد نوترون‌های مختلف را ایزوتوپ (هم‌مکان) می‌نامند؛ زیرا همگی در جدول مندلیف یک خانه را اشغال می‌کنند. ایزوتوپ‌ها دارای خواص شیمیایی یکسان و خواص هسته‌ای کاملاً متفاوت‌اند. این تفاوت ویژگی‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های مختلف را می‌توان با توجه به دو ایزوتوپ اورانیم - ۲۳۵ و اورانیم - ۲۳۸ به خوبی نشان داد.  ${}^{235}\text{U}$  به راحتی شکافته می‌شود و می‌توان از آن در راکتورهای هسته‌ای به عنوان سوخت استفاده کرد.  ${}^{238}\text{U}$  این ویژگی را ندارد و چون به راحتی شکافته نمی‌شود نمی‌توان از آن مستقیماً به عنوان سوخت هسته‌ای استفاده کرد. هر عنصر هم دارای ایزوتوپ‌های پایدار و هم پرتوزاست. عناصری هم وجود دارند که ایزوتوپ پایدار ندارند؛ مانند: رادون. از برخی ایزوتوپ‌های پرتوزا به عنوان ردیاب در موارد مختلف پزشکی، کشاورزی و صنعت استفاده می‌کنند. چون این ایزوتوپ‌های پرتوزا از نظر شیمیایی تفاوتی با ایزوتوپ‌های پایدار ندارند، پس رفتار آنها هنگام جذب در بدن یا گیاهان مانند ایزوتوپ‌های پایدار است و چون پرتوهایی را از خود گسیل می‌دارند، می‌توان محل و تراکم آنها را به دقت مشخص کرد.

### جدول ۸-۳

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm)
الکترون	$-1.6 \times 10^{-19} = -e$	$9.1 \times 10^{-31} = M_e$	کوچکتر از $10^{-2}$
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19} = +e$	$1.67 \times 10^{-27} = M_p$	۱/۲
نوترون	صفر	$1.68 \times 10^{-27} = M_n$	۱/۲

نیروی هسته‌ای: دیدیم که ابعاد هسته بسیار کوچک است (در حدود  $10^{-15}$  m). همین‌طور گفتیم که بیشتر جرم اتم در هسته متمرکز شده است. با توجه به این نکته‌ها می‌توان چگالی هسته را به راحتی محاسبه کرد. با محاسبه آن به مقدار تقریباً  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب  $1$  g/cm<sup>3</sup>). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که توجه کنیم نیروی کولنی شناخته شده بین پروتون‌های دارای بار مثبت رانشی است. پس اصلاً انتظار نداریم که دستگاه متشکل از ذرات دارای بار هم‌نام پایدار باشد تا چه رسد به این که تا این حد هم چگال باشد. البته نیروی گرانشی موجود بین اجزای هسته ربایشی است اما، نیروی گرانشی بسیار ضعیف‌تر از نیروی کولنی است؛ پس نمی‌تواند عامل پایداری هسته و چگال بودن آن باشد.

این موضوع وجود نیروی جدیدی را در طبیعت مطرح کرد که به نیروی هسته‌ای قوی مشهور شد. این نیرو، با نیروی شناخته شده کولنی و گرانشی تفاوت بسیار دارد؛ زیرا اولاً، بسیار قوی‌تر از این نیروهاست؛ چون اجزای هسته را به رغم نیروی رانشی بین پروتون‌های آن به صورت بسیار فشرده در کنار هم نگه می‌دارد. دوم اینکه، این نیرو، برخلاف نیروهای کولنی و گرانشی، کوتاه‌برد است؛ زیرا در ابعاد اتمی ( $10^{-10}$  m)، دیگر اثری از آن مشاهده نمی‌شود و اتم به کمک نیروی کولنی بین هسته دارای بار مثبت و الکترون دارای بار منفی بررسی می‌شود.

## فعالیت ۵-۸

با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۳-۴ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصله  $r$  از یکدیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

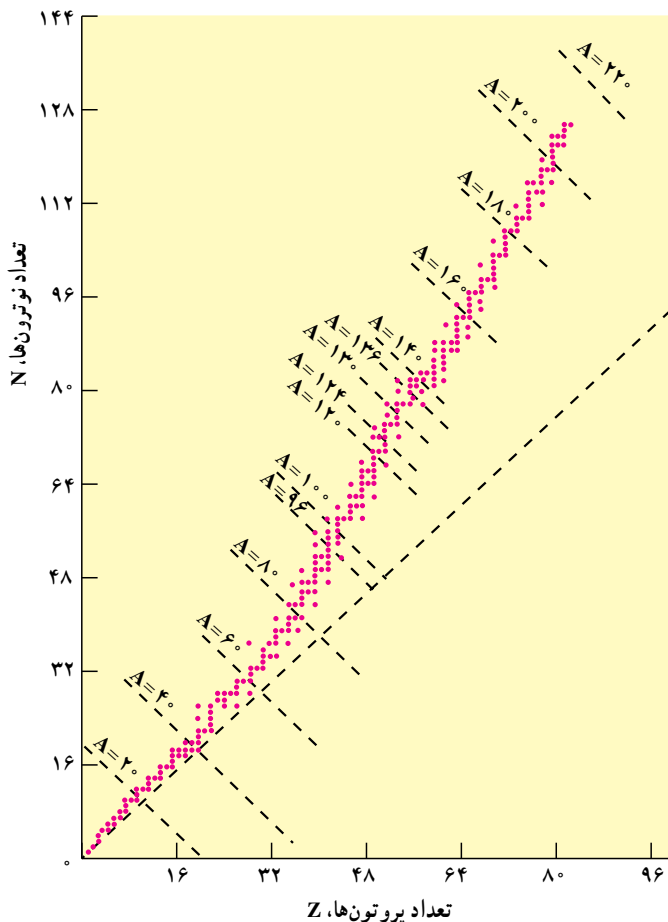
**پایداری هسته‌ها:** دیدیم که در هسته علاوه بر نیروی رانش کولنی بین پروتون‌ها، نیروی ربایش هسته‌ای بین کلیه اجزاء هسته اعم از پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز حکمفرماست. از دید نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد. از این رو آنها را با نام عام «نوکلئون» نیز می‌نامند. پس وقتی می‌گوییم نوکلئون منظورمان پروتون یا نوترون است و آنها از نظر نیروی هسته‌ای تفاوتی ندارند. نیروی هسته‌ای گرچه بسیار قوی بوده اما کوتاه‌برد است؛ بنابراین، هر نوکلئون فقط به نوکلئون‌های مجاور خود نیروی هسته‌ای وارد می‌کند. اما، نیروی کولنی گرچه دارای شدت کمتری است اما بلند برد است و هر پروتون به تمام پروتون‌های موجود در هسته نیروی رانشی وارد می‌سازد؛ بنابراین، به

تدریج با زیاد شدن تعداد پروتون‌ها در هسته نقش نیروی کولنی بارز می‌شود و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این موضوع سبب ناپایداری هسته می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفتیم، اغلب ایزوتوپ‌های عناصر، ناپایدارند. ایزوتوپ‌های ناپایدار با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند و سرانجام به ایزوتوپ‌های پایدار تبدیل می‌شوند.

واپاشی برخی از ایزوتوپ‌ها بسیار سریع صورت می‌گیرد، در حالی که واپاشی بعضی از آنها به قدری کند است که از زمان تشکیل زمین تاکنون هنوز کاملاً از بین نرفته‌اند.

عدد اتمی عنصرهای طبیعی موجود در طبیعت  $1 \leq Z \leq 92$  است. عناصر با  $Z > 92$  را به طور مصنوعی در آزمایشگاه تولید می‌کنند و به آنها «عناصر فرا اورانیمی» می‌گویند. همین‌طور عدد نوترونی عنصرهای موجود در طبیعت  $0 \leq N \leq 146$  است.

خط  $N = Z$  و نمودار تغییرات  $N$  و  $Z$  عنصرهای پایدار در شکل ۸-۱۷ نشان داده شده است.



همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط پایداری ایزوتوپ‌ها ابتدا بر خط  $N = Z$  منطبق است اما با زیاد شدن  $Z$  به تدریج از آن منحرف می‌شود و ایزوتوپ‌های پایدار سنگین‌تر دارای تعداد نوترون بیش از پروتون‌اند. دلیل آن نیز روشن است؛ زیرا نوترون به هسته رپاش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون اینکه رانش کولنی داشته باشد.

شکل ۸-۱۷

## فعالیت ۸-۶

با توجه به شکل ۸-۱۷ و با بحث در گروه خود به پرسش‌های زیر پاسخ دهید.

الف) خط راست خط چین به چه مقدارهای  $Z$ ،  $N$ ، و  $A$  مربوط می‌شود؟

ب) آیا نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا تغییر می‌کند؟ اگر تغییر می‌کند این تغییر چگونه است؟

پ) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از شکل تشخیص داد؟

اکنون با استفاده از راکتورهای هسته‌ای و شتاب‌دهنده‌ها می‌توان ایزوتوپ‌های مختلف را به طور مصنوعی تولید کرد. همان‌طور که قبلاً هم توضیح دادیم این ایزوتوپ‌ها کاربردهای روزافزونی در پزشکی برای تشخیص و درمان، در کشاورزی برای بررسی چگونگی جذب مواد در گیاهان، و در صنعت برای ردیابی جریان‌ها و کنترل کیفیت دارند.

**انرژی بستگی هسته:** اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهد که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده‌اش اندکی کمتر است. این موضوع در مورد اتم‌ها نیز کاملاً صدق می‌کند. به طوری که جرم اتم هم از مجموع جرم هسته و الکترون‌های آن کمتر است اما این تفاوت جرم برای هسته بیشتر است؛ اگر جرم هسته  $X$  را با  $M_x$  و جرم پروتون را با  $M_p$  و جرم نوترون را با  $M_n$  نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$M_x < ZM_p + NM_n \quad (۲-۸)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطه بالا را با  $\Delta M$  نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \quad (۳-۸)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه معروف اینشتین:

$$E = mc^2 \quad (۴-۸)$$

به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می‌نامند و آن را با  $B$  نشان می‌دهند. پس داریم:

$$B = \Delta mc^2 = [ZM_p + NM_n - M_x]c^2 \quad (۵-۸)$$

در موقع تشکیل هسته  $X$  از  $Z$  پروتون و  $N$  نوترون این انرژی آزاد می‌شود و برای جدا کردن هسته به اجزای تشکیل دهنده‌اش، این انرژی را باید مصرف کرد.

توجه داریم که در فرایندهای هسته‌ای معمولاً جرم محصولات فرایند از جرم ذرات اولیه اندکی کمتر است. این تفاوت جرم طبق رابطهٔ  $E=mc^2$  به انرژی تبدیل می‌شود. چون این اختلاف جرم در  $c^2$  ضرب می‌شود، اختلاف جرم بسیار مختصر سبب تولید انرژی قابل ملاحظه می‌شود.

یکای جرم اتمی: در واکنش‌های هسته‌ای، با تبدیل جرم به انرژی سروکار داریم و جرمی که به انرژی تبدیل می‌شود، بسیار کوچک است؛ بنابراین، نمی‌توان از یکاهای متداول جرم چون کیلوگرم و گرم استفاده کرد. یکای مورد استفاده در فیزیک هسته‌ای یکای جرم اتمی است که آن را با  $u$  نشان می‌دهند

و عبارت است از  $\frac{1}{12}$  جرم اتم کربن ۱۲ که آن را طبق تعریف  $u = \frac{1}{12} \times 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$  در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون  $u = 1.007276$ ، جرم الکترون  $u = 0.000549$  و جرم نوترون  $u = 1.008665$  است.

### مثال ۸-۱

الف) یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.

ب) اگر  $1u$  تبدیل به انرژی شود، این انرژی معادل چند الکترون ولت است؟

پاسخ

می‌دانیم که یک مول از هر ماده حاوی تعداد ذرات (اتم، مولکول یا هر چیز دیگر)

مساوی زیر است:

به ازای هر مول  $N_A = 6.022137 \times 10^{23}$

پس یک مول کربن یعنی  $12 \text{ kg}$  نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است؛ پس:

$$1u = \frac{1}{12} \left( \frac{1}{6.022137 \times 10^{23}} \right) (12 \text{ kg}) = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = 1u \times c^2$$

$$= (1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}) (2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

می‌دانیم که

$$1 \text{ J} = 6.24151 \times 10^{18} \text{ eV} = 6.24151 \times 10^{12} \text{ MeV}$$

پس، انرژی معادل جرم  $1u$  برابر است با:

$$E = 931.5 \text{ MeV}$$

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده در فرایندهای هسته‌ای کافی است اختلاف جرم دو طرف واکنش برحسب  $u$  را در  $931/5$  ضرب کنیم تا انرژی برحسب  $MeV$  به دست آید. در فرایندهای هسته‌ای اصل پایستگی جرم و انرژی به تنهایی برقرار نیستند بلکه در این فرایندها مجموع جرم و انرژی در برهم کنش پایسته می‌ماند.

### مثال ۸-۲

هسته دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترون» می‌نامند. جرم اتمی  ${}^2H$  برابر  $2/0.14102u$  است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید. پاسخ: ابتدا جرم هسته دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم یک الکترون جرم اتم دو تریوم جرم هسته دوتریوم

$$m({}^2H) = M({}^2H) - M(e)$$

$$2/0.14102u - 0/000549u$$

$$2/0.13553u$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته دوتریم برابر است با

$$B = [m_n + m_p - m({}^2H)]c^2$$

$$= [1/0.08665u + 1/0.07276u - 2/0.13553u] \times 931/5 = 2/22MeV$$

### تمرین ۸-۱

انرژی بستگی  ${}^4He$  را به دست آورید. جرم اتمی  ${}^4He$  برابر  $4/0.02603u$  است.

ترازهای انرژی هسته: انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم کوانتیده‌اند و نوکلئون وابسته به هسته نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی را اختیار کند. اما اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون در هسته بسیار بیش از این اختلاف در اتم‌هاست. در فصل قبل دیدیم که اختلاف انرژی ترازهای الکترون‌ها در اتم حدود چند الکترون‌ولت است. در حالی که اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون‌ها در هسته‌های سبک حدود میلیون الکترون‌ولت (MeV) و در هسته‌های سنگین حدود کیلوالکترون‌ولت (keV) است.

همان‌گونه که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از حالت پایه به حالت برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و هسته را برانگیخته سازند.

هسته‌های برانگیخته نیز درست مانند اتم‌های برانگیخته می‌توانند با گسیل فوتون به حالت پایه برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هسته برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد  ${}^A_Z X$  به صورت  ${}^A_Z X^*$  مشخص می‌کنند.

## فعالیت ۸-۷

با استفاده از طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۲، نوع تابش گسیل شده از هسته را مشخص کنید.

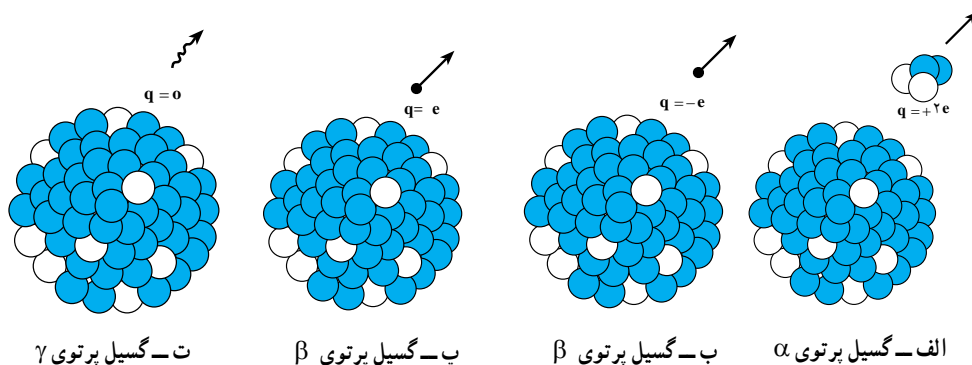
همان‌گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون‌ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته‌ها معمولاً در محدوده کیلوالکترون‌ولت تا میلیون الکترون‌ولت است؛ از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

## ۸-۹- پرتوزایی

همان‌طور که قبلاً گفتیم، تحول‌هایی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته‌ای انجامید با کشف پدیده پرتوزایی شکل گرفت. در سال ۱۸۹۶ میلادی، هانری بکرل به صورت



کاملاً تصادفی متوجه شد که سنگ معدن اورانیم پرتوهای نافذی را از خود گسیل می‌دارد. هسته‌های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیرپذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می‌دارند و به تدریج به هسته‌های پایدار تبدیل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است، هسته‌های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می‌شوند.



شکل ۸-۱۸

۱- واپاشی آلفا: در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته  ${}^A_Z X$  با گسیل ذره  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ) متشکل از دو پروتون و دو نوترون و می‌باشد (شکل ۸-۱۸ الف).



هسته  $X$  را «هسته مادر» و هسته  $Y$  را «هسته دختر» می‌نامند؛ هسته  $Y$  محصول واپاشی دارای عددجرمی ۴  $A$  و عدد اتمی ۲  $Z$  است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می‌شود و بخش عمده آن را ذره  $\alpha$  به همراه می‌برد. ذره‌های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت‌اند. بُرد این ذره‌ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می‌شوند ولی اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲- واپاشی بتا: این متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست. در این واپاشی هسته ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره‌ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته جدیدی تبدیل می‌شود (شکل ۸-۱۸ ب و پ).

و اپاشی  $\beta$  بسیار شگفت‌انگیز است؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می‌آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می‌شود. فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت<sup>۱</sup>:



در فرایند گسیل پوزیترون  $\beta$  یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:



محصول این نوع واپاشی هسته جدیدی است که عدد اتمی آن برخلاف مورد گسیل الکترون که عدد اتمی هسته دختر یک واحد بیشتر از هسته مادر است، یک واحد از هسته مادر کمتر است.

**۳- واپاشی گاما:** در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی‌کند بلکه هسته‌ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد (شکل ۸-۱۸-ت). این فرایند را می‌توان به صورت زیر نشان داد:



اغلب هسته‌ها پس از گسیل ذره‌های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسند؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پرانرژی‌تر است و می‌تواند در ماده بیشتر نفوذ کند.

در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است:

۱- مجموع بارالکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۷-۸ تا ۹-۸) یکسان است.

۲- مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

### مثال ۳-۸

در واپاشی هسته اورانیم - ۲۳۸  $[{}^{238}_{92}U]$  یک ذره آلفا گسیل می‌شود. معادله این

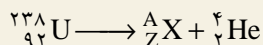
۱ در واپاشی بتا ذره دیگری (که نوترینو یا پادنوترینو نام دارد و با نماد  $\bar{\nu}$  یا  $\nu$  نشان داده می‌شود) را نیز باید در نظر گرفت که در

اینجا برای سادگی از آن صرف‌نظر شده است.

واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که بر اثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادله واپاشی به صورت زیر است :



با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم :

$$238 = A + 4$$

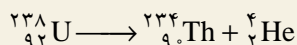
$$A = 234$$

و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم :

$$92 = Z + 2$$

$$Z = 90$$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با  $Z = 90$  توریم است؛ پس داریم :



### تمرین ۸-۲

فسفر - ۳۲  $[{}_{15}^{32}\text{P}]$  با گسیل الکترون و امی باشد. معادله این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

### تمرین ۸-۳

آلومینیم - ۲۵  $[{}_{13}^{25}\text{Al}]$  با گسیل پوزیترون و امی باشد. معادله واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

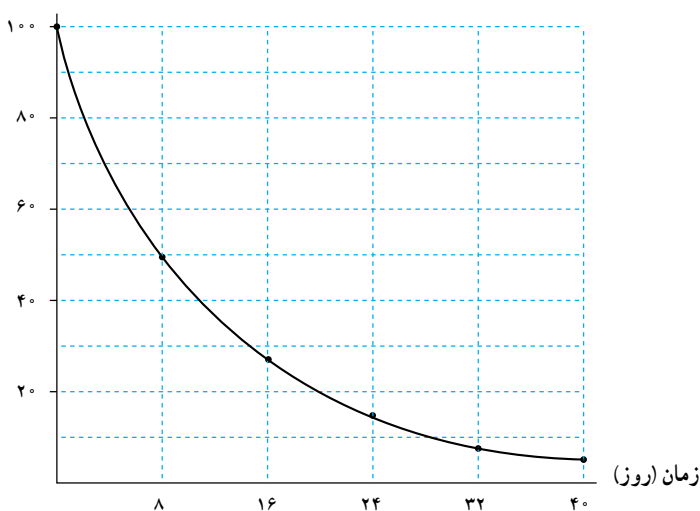
### واپاشی پرتوزا و نیمه عمر

ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. احتمال واپاشی یک هسته پرتوزا در

یک ثانیه با ثابت واپاشی  $\lambda$  مشخص می‌شود.  $\lambda$  فقط تابع نوع هسته‌ای است که واپاشیده می‌شود و عامل‌های خارجی مانند دما، فشار، یا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیری در آن ندارند.

اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های موجود در یک نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۸-۱۹ به دست می‌آید. معمولاً سرعت واپاشی یک ایزوتوپ را با نیمه عمر مشخص می‌کنند. نیمه عمر زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های پرتوزای موجود در یک نمونه به نصف برسد. اغلب ایزوتوپ‌های پرتوزا دارای نیمه عمرهای در حدود چند روز تا چند سال هستند که بسیار کوتاه‌تر از سن زمین ( $10^9 \times 4/5$  سال) است. بنابراین بیشتر این ایزوتوپ‌ها به عنصر پایدار واپاشیده‌اند. اما، برخی از آنها دارای نیمه عمرهای در حدود سن زمین هستند. این عناصر هنوز در اطراف ما وجود دارند و زمینه پرتوزایی طبیعی را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.

تعداد هسته‌های  $^{131}\text{I}$



شکل ۸-۱۹- نمودار واپاشی ایزوتوپ  $^{131}\text{I}$

## مثال ۸-۴

در حادثه چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد  $^{131}\text{I}$  بود. این ایزوتوپ، فزّار است و همراه با جریان‌های جوّی تا نقطه‌های دور دست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که

این گیاهان را می‌خورند. نیمه عمر این ایزوتوپ  $^{131}\text{I}$  روز است؛ پس از گذشت  $40$  روز از حادثه، چه کسری از هسته‌های  $^{131}\text{I}$  باقی مانده بود؟

پاسخ

$40$  روز برابر  $5$  نیمه عمر  $^{131}\text{I}$  است. اگر  $N_0$  تعداد هسته‌های اولیه باشد، می‌توان

جدول زیر را تنظیم کرد.

تعداد نیمه عمرهای سپری شده	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های باقی مانده	$N$	$\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2} \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{16}$
					$\frac{1}{2} \frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت  $40$  روز تعداد هسته‌های پرتوزای موجود و در نتیجه،

فعالیت آنها به  $\frac{1}{32}$  مقدار اولیه می‌رسد. نیمه عمر کوتاه  $^{131}\text{I}$  باعث شد که خسارت وارد به محصولات کشاورزی چندان شدید نباشد.

برای تعداد نیمه عمرهای عدد صحیح، تعداد هسته‌های فعال باقی مانده را می‌توانیم از رابطه  $\frac{N_0}{2^n}$  به دست آوریم، که در آن  $n$  از رابطه  $n = \frac{t}{T_{1/2}}$  به دست می‌آید.  $t$  زمان مورد نظر برای واپاشی و  $T_{1/2}$  نیز زمان نیمه عمر ایزوتوپ است.

## مطالعه آزاد

### نکته‌های ایمنی

حفاظت در برابر پرتوها: یکی از ویژگی‌های مهم ذرات و پرتوهایی که از مواد پرتوزا گسیل می‌شود این است که حواس معمولی ما به آنها حساس نیستند؛ مثلاً، وقتی دستان را به آتش نزدیک می‌کنیم سوزش ناشی از آن باعث می‌شود که آن را عقب بکشیم

ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آنچه از مواد پرتوزا خارج می‌شود، صادق نیست؛ بنابراین باید به کمک دستگاه‌هایی آنها را آشکار ساخت و به وجود آنها پی برد. ذره‌های دارای بار الکتریکی مانند ذره‌های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطه بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم‌های محیط می‌شوند و می‌توان از این موضوع برای آشکارسازی آنها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهایی شیمیایی را در بدن به وجود می‌آورد که باعث آسیب‌رساندن به بافت‌های زنده می‌شود. البته هر چه این ذره‌ها انرژی خود را در مسافت کوتاه‌تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدیدتر و ترمیم آن دشوارتر خواهد بود؛ بدین سبب، آسیب ذره‌های آلفا بسیار شدیدتر از ذره‌های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و  $\gamma$  نیز بر اثر برهم‌کنش با ماده، ذره‌های باردار ثانویه به وجود می‌آورند و این ذره‌های ثانویه به بافت‌های زنده آسیب می‌رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده‌های سرطانی بهره می‌گیرند؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده‌ها آنها را نابود می‌سازند. این کار را «پرتودرمانی» می‌نامند. نوترون‌ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن‌های آب - که بخش اعظم بدن را تشکیل می‌دهد - انرژی خود را به آن منتقل می‌کنند و باعث به حرکت درآمدن یک پروتون پرانرژی در بدن می‌شوند که اثر زیان‌بار آن بسیار شدید است؛ بنابراین، نوترون‌ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک‌اند.

آسیب وارد از تابش بر بدن ممکن است، یا بافت زنده را کاملاً از بین ببرد یا بدون از بین بردن آن باعث جهش در ژن‌های آن شود. یاخته‌هایی که از این یاخته‌های جهش یافته به وجود می‌آیند، با آن تفاوت خواهند داشت. این جهش‌ها می‌تواند به تولید بافت‌های سرطانی یا نوزادان ناقص‌الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش‌ها برای تولید گیاهانی استفاده می‌شود که از گیاهان معمولی مقاوم‌ترند یا ویژگی بهتری دارند.

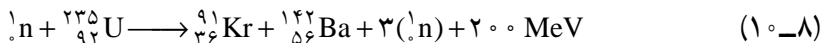
به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کمترین مقدار ممکن برسد. چشمه‌های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آنها را به کمک وسیله‌هایی در فاصله دور از بدن نگه داشت.

**فعالیت ۸-۸:** فضانوردان در معرض انواع گوناگونی از تابش‌ها، از جمله تابش‌های کیهانی و بادهای خورشیدی قرار دارند. تحقیق کنید فضانوردان چگونه خود را در برابر بخشی از این تابش‌ها مصون می‌دارند؟

## ۸-۱۰-۱ انرژی هسته‌ای

در اواخر سال ۱۹۳۸ میلادی، دو دانشمند آلمانی، اوتوهان<sup>۱</sup> و فریتس اشتراسمن<sup>۲</sup>، به طور تصادفی کشفی کردند که جهان را تغییر داد. آنها در حین بمباران نمونه‌ای از اورانیم با نوترون به امید به وجود آوردن عناصر جدید، در نهایت تعجب متوجه تولید باریوم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجه آزمایش خود نداشتند. اوتوهان خبر این کشف را برای همکار سابق خود لیزماینتر<sup>۳</sup> که پناهنده‌ای از آلمان نازی بود و در سوئد کار می‌کرد فرستاد. او در طول تعطیلات کریسمس در این باره با خواهرزاده‌اش، اوتوفریش<sup>۴</sup>، که او هم به دانمارک پناهنده شده بود، بحث کرد. این دو به اتفاق هم توصیفی برای این پدیده یافتند که بدین صورت بود؛ هسته اورانیم بر اثر بمباران نوترونی به دو قسمت تقسیم شده است. ماینتر و فریش این فرایند را با توجه به فرایند مشابه در زیست‌شناسی «شکافت» نامیدند.

در تمام هسته‌های شناخته شده، نیروهای جاذبه هسته‌ای بر دافعه کولنی غلبه می‌کنند. در هسته اورانیم غلبه نیروی هسته‌ای بر نیروی کولنی بسیار شکننده است و با اندک اختلالی چون جذب یک نوترون که سبب تغییر شکل هسته می‌شود، از بین می‌رود. اگر هسته اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۸-۲۰)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحله بحرانی بگذرد، نیروهای هسته‌ای تسلیم نیروهای الکتریکی می‌شوند و هسته به دو بخش تقسیم می‌شود. جذب نوترون در هسته اورانیم انرژی لازم جهت این کشیده شدن را تأمین می‌کند و هسته شکافته می‌شود. در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

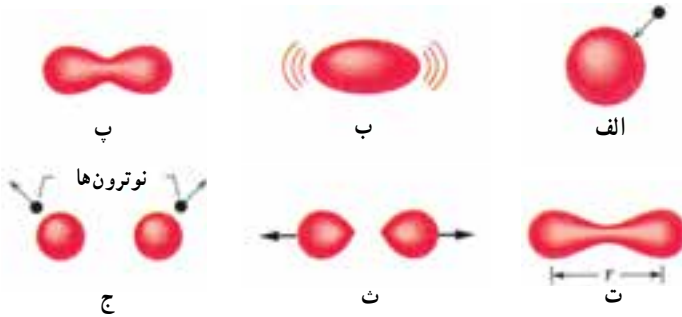


۱- Otto Hahn

۲- Fritz Strassman

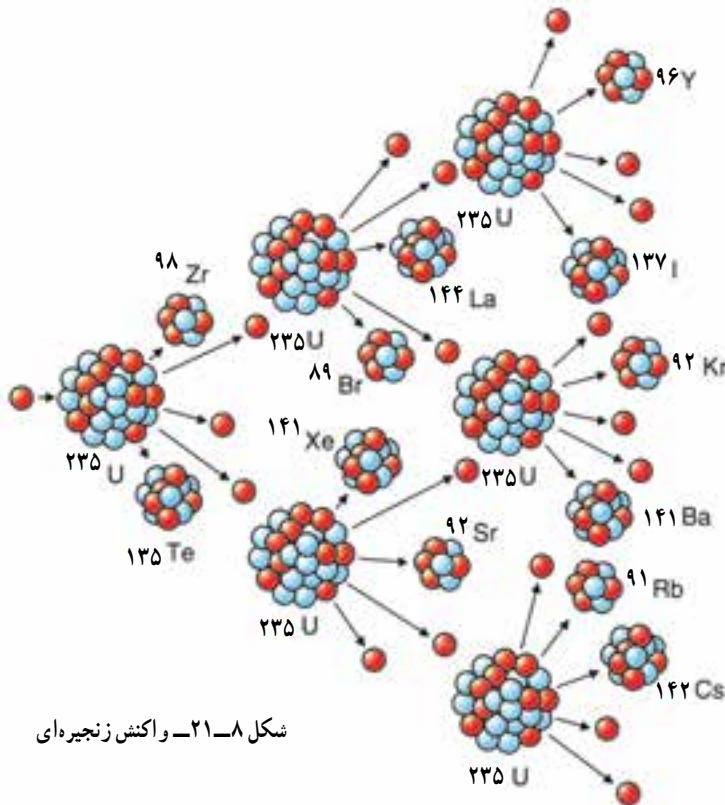
۳- Lise Meitner

۴- Otto Frisch



شکل ۸-۲۰- تغییر شکل هسته‌ای وقتی به وجود می‌آید که نیروی دافعه الکتریکی بر نیروی جاذبه هسته‌ای غلبه کند (شکل ت)، که در این صورت شکافت صورت می‌گیرد.

توجه کنید که در این واکنش، یک نوترون، شکافت اورانیم را آغاز می‌کند و بر اثر شکافت، سه نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته آنها را دفع نمی‌کند و به راحتی و بدون برخورد با مانع در آن نفوذ می‌کند و در نتیجه، باعث شکافت در سه هسته اورانیم دیگر شده و نه نوترون آزاد می‌کند. اگر این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت اتم‌های اورانیم شوند، بیست و هفت نوترون آزاد می‌شود و ... این رشته را «واکنش زنجیره‌ای» می‌نامند (شکل ۸-۲۱). در هر واکنش شکافت  $200,000,000$  الکترون



شکل ۸-۲۱- واکنش زنجیره‌ای



ولت ( $200 \text{ MeV}$ ) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط  $30$  الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود). مجموع جرم پاره‌های شکافت و نوترون‌های تولید شده در واکنش از جرم اورانیم اولیه اندکی کمتر است. این اختلاف جرم مختصر طبق رابطه  $E = mc^2$  اینشتین به انرژی تبدیل می‌شود. بد نیست بدانید که بیشتر این انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات شکافت در می‌آید که همراه نوترون‌ها از محل واکنش خارج می‌شوند. بخش اندکی از این انرژی نیز به صورت پرتوهای مختلف در می‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب  $^{235}\text{U}$  که فقط  $0.72\%$  درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان‌تر  $^{238}\text{U}$  نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی معمولاً شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

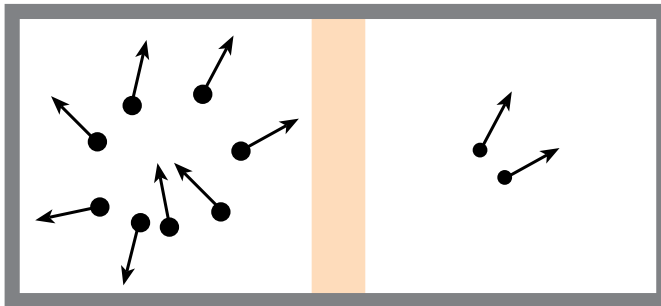
اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازه کافی بزرگ رخ دهد، به احتمال زیاد انفجاری به وقوع می‌پیوندد اما؛ واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای کوچک از اورانیم، انفجاری را به وجود نمی‌آورد؛ زیرا نوترون‌های تولید شده در فرایند شکافت در اورانیم، پیش از برخورد با هسته اورانیم باید مسافتی را طی کنند. اگر اندازه قطعه اورانیمی که در آن شکافت صورت می‌گیرد کوچک باشد، نوترون‌ها پیش از برخورد با هسته اورانیم دیگر، از قطعه فرار می‌کند.

**جرم بحرانی :** جرمی است که برای آن هر شکافت به طور میانگین شکافت دیگری را به وجود می‌آورد. جرم زیر بحرانی، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای ادامه نمی‌یابد. جرم فوق بحرانی، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای به صورت انفجاری رشد می‌کند.

**غنی‌سازی اورانیم :** واکنش زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص به وقوع نمی‌پیوندد؛ زیرا بخش اعظم آن ( $99/3\%$  درصد) از  $^{238}\text{U}$  تشکیل شده است. برای انفجارهای هسته‌ای به  $^{235}\text{U}$  خالص نیاز داریم و برای استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز باید فراوانی  $^{235}\text{U}$  را به صورت مصنوعی زیاد کرد که این کار را «غنی‌سازی» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب  $^{235}\text{U}$  از ایزوتوپ فراوان  $^{238}\text{U}$  بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ براساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد.

یکی از روش‌های انجام این عمل استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلورور به صورت گاز هگزا فلورید اورانیم ( $\text{UF}_6$ ) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک‌تر  $^{235}\text{U}$  در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیشتر از ایزوتوپ  $^{238}\text{U}$  است و با آهنگ بیشتری از غشایی نازک می‌گذرد. پخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونه اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار

برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۸-۲۲- مولکول‌های سبک‌تر در دمای یکسان سریع‌تر از مولکول‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند و در نتیجه، با سرعت بیشتری از غشای نازک می‌گذرند.

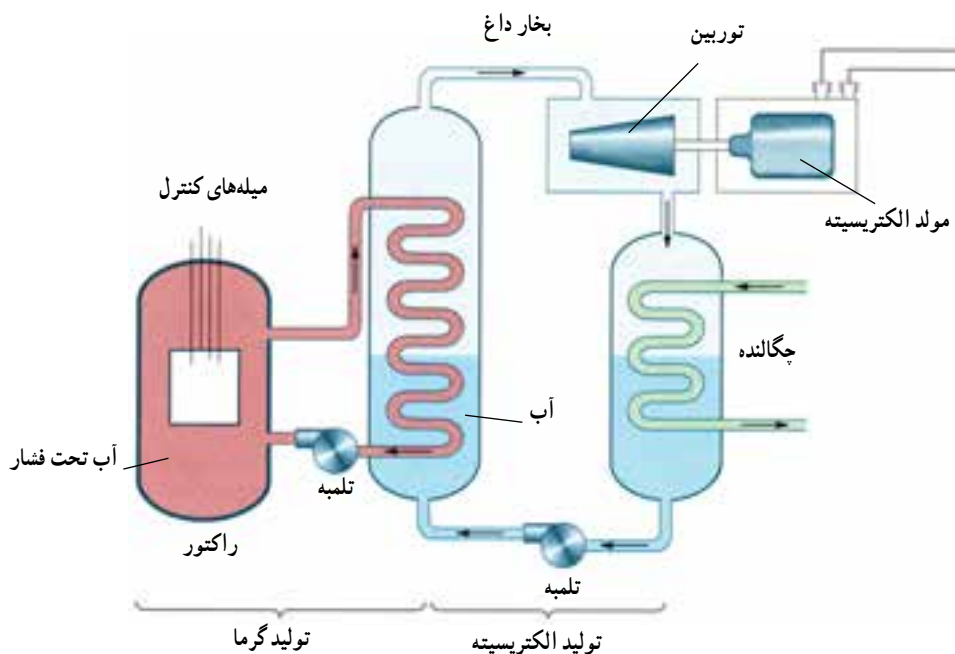
امروزه جداسازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی راحت‌تر صورت می‌گیرد. گاز هگزا فلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت‌های فوق‌العاده زیاد از مرتبه  $1500$  کیلومتر در ساعت چرخانده می‌شود. مولکول‌های گاز حاوی  $^{238}\text{U}$  سنگین، مانند شیر در جداکننده‌های لبنیات، به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های گاز حاوی  $^{235}\text{U}$  سبک‌تر، از مرکز استخراج می‌شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال‌های اخیر برطرف شده است.

**راکتورهای شکافت هسته‌ای:** دیدیم که واکنش شکافت زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص صورت نمی‌گیرد، زیرا بخش اعظم آن  $^{238}\text{U}$  است، و نوترون‌های آزاد شده در شکافت  $^{235}\text{U}$  که نوترون‌های سریع هستند را اتم‌های  $^{238}\text{U}$  جذب می‌کنند بدون اینکه باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون‌های کند را  $^{235}\text{U}$  با احتمال بیشتر از  $^{238}\text{U}$  جذب می‌کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون‌ها را بتوان کند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم  $^{235}\text{U}$  دیگر، حتی در حضور  $^{238}\text{U}$ ، افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای به‌وجود آوردن واکنش زنجیره‌ای کافی باشد.

در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته‌ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه‌های کوچک‌تر تقسیم شود و در بین این قطعه‌ها ماده‌ای قرار گیرد که نوترون‌های حاصل از شکافت را کند و احتمال جذب آنها در اورانیم را زیاد سازد، می‌توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره‌ای به‌وجود آورد.

۱- انرژی جنبشی متوسط این نوترون‌ها  $2\text{MeV}$  است.

این روش را اولین بار انریکو فرمی در ۲ دسامبر ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ ه.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره‌ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون‌ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از دست می‌داد. اگر نوترون از هسته‌ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هسته سبک کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود. می‌گویند گرافیت «کُند کننده» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می‌نامند.



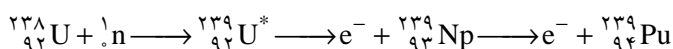
شکل ۸-۲۳- نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

راکتورهای هسته‌ای کنونی علاوه بر سوخت هسته‌ای دارای کُند کننده، میله‌های کنترل و شماره‌ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته‌ای در درجهٔ اول  $^{235}\text{U}$  به علاوه ۳ درصد  $^{238}\text{U}$  است. چون  $^{235}\text{U}$  با  $^{238}\text{U}$  بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته‌ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است معمولاً تحت فشار

زیاد قرار می‌دهند تا بدون جوشیدن به دماهای زیاد برسد. آبی که بر اثر واکنش شکافت هسته‌ای گرم شده است، به دستگاهی با فشار آب کمتر منتقل می‌شود که با تولید بخار توربین و ژنراتور الکتریسیته را به کار می‌اندازد؛ از این رو، از دو دستگاه آب، به طور جداگانه، استفاده می‌شود تا مواد پرتوزا وارد توربین نشوند.

**تولید پلوتونیم :** وقتی  $^{238}\text{U}$  نوترونی را جذب می‌کند، شکافتی صورت نمی‌گیرد. هسته حاصل از جذب نوترون،  $^{239}\text{U}$ ، پرتوزاست. این هسته با نیمه عمر ۲۳ دقیقه، یک ذره بتا گسیل می‌کند و به اولین عنصر فرا اورانیمی به نام نپتونیم ( $\text{Np}$ )؛ نام اولین سیاره‌ای که از طریق قانون گرانث نیوتون کشف شد) تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ  $^{239}\text{Np}$  نیز پرتوزاست و با نیمه عمر ۲/۳ روز و گسیل ذره بتا به پلوتونیم تبدیل می‌شود ( $\text{Pu}$ )؛ نام پلوتون، دومین سیاره‌ای که به کمک قانون گرانث نیوتون کشف شد).

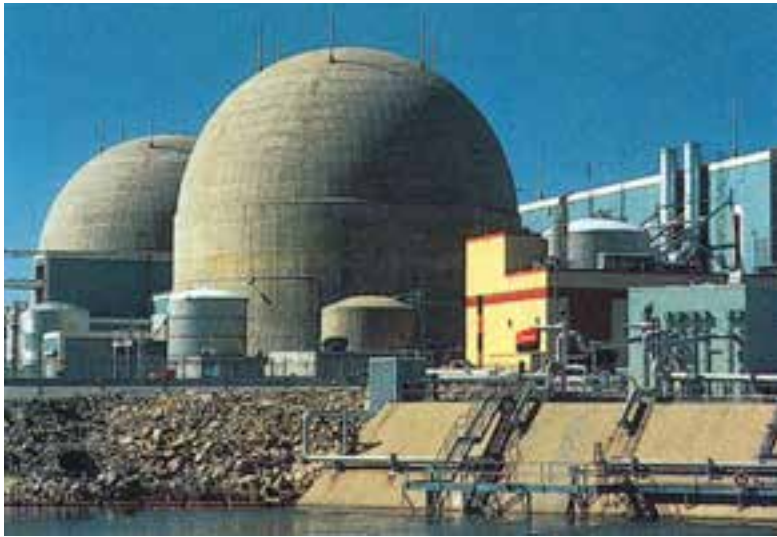
نیمه عمر ایزوتوپ  $^{239}\text{Pu}$  برابر ۲۴۰۰۰ سال است.  $^{239}\text{Pu}$  نیز مانند  $^{235}\text{U}$  با جذب نوترون شکافته می‌شود. جالب توجه آنکه  $^{239}\text{Pu}$  از  $^{235}\text{U}$  شکافت پذیرتر است.



$^{238}\text{U}$  با جذب نوترون به  $^{239}\text{U}$  تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ با گسیل ذره بتا به  $^{239}\text{Np}$  تبدیل می‌شود که آن هم با گسیل یک ذره بتای دیگر به  $^{239}\text{Pu}$  تبدیل می‌شود.

**استفاده از شکافت در تولید انرژی :** انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای با انفجار بمب‌های هیروشیما و ناگازاکی به جهانیان معرفی شد. این تصویر هولناک هنوز از تفکری که در مورد انرژی هسته‌ای وجود دارد، رخت برنسته است. فاجعه انفجار چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ میلادی (۱۳۶۵ ه.ش) نیز به این وحشت از انرژی هسته‌ای اضافه کرد. با وجود این، در بسیاری از کشورها بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز از این طریق تأمین می‌شود. راکتور هسته‌ای درست مانند کوره‌ای معمولی، آب را به جوش می‌آورد و بخار تولید می‌کند. مهم‌ترین تفاوت آن، مقدار سوخت دخیل در این کار است. یک کیلوگرم سوخت اورانیم، قطعه‌ای کوچک‌تر از یک توپ تیس، بیش از ۳۰ کامیون بزرگ پراز زغال سنگ انرژی تولید می‌کند.

نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط ۱/۲ و در هسته سنگینی چون سرب ۱/۵



شکل ۸-۲۴- نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

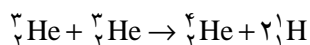
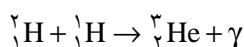
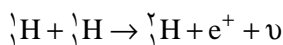
است. وقتی هسته سنگینی چون اورانیم دو پاره می‌شود، این پاره‌ها دیگر برای پایداری به نسبت نوترون به پروتونی مانند اورانیم نیاز ندارند و باید این نسبت را کم کنند؛ بنابراین، تعدادی از نوترون‌ها مستقیماً در فرایند شکافت آزاد می‌شوند و بقیه در فرایند واپاشی پرتوزای پاره‌های شکافت به تدریج به پروتون تبدیل می‌شوند؛ بنابراین، پاره‌های شکافت پرتوزا هستند اما بیشتر آنها دارای نیمه عمر کوتاه‌اند و به سرعت از بین می‌روند. با این همه، تعدادی از آنها دارای نیمه عمرهای هزاران ساله‌اند. دور ریختن همراه با ایمنی این پسماندها و موادی که در جریان تولید سوخت‌های هسته‌ای به وجود می‌آیند به روش‌ها و استفاده از محفظه‌های خاص نیاز دارد. گرچه بیش از نیم قرن از به کارگیری انرژی هسته‌ای می‌گذرد، اما فناوری دورریزی پسماندهای هسته‌ای هنوز در مرحله‌های اولیه است.

مزیت‌های توان هسته‌ای عبارت‌اند از (۱) توانایی تولید الکتریسیته فراوان با استفاده از این انرژی؛ (۲) حفظ بیلیون‌ها تن زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی که عملاً هر سال به گرما و دود تبدیل می‌شود و در دراز مدت می‌توان از آنها به عنوان منابع غنی از مولکول‌های آلی گرانبها استفاده کرد؛ و (۳) حذف میلیون‌ها تن دی‌اکسید گوگرد و سایر مواد سمی و همین‌طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن که هر سال با سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد جو می‌شود و با به‌وجود آوردن مسئله گرم‌شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

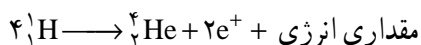
## همجوشی هسته‌ای

در واکنش شکافت هسته‌ای، دیدیم که هسته سنگین با جذب یک نوترون به دو هسته سبک‌تر شکافته می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌شود.

یک نوع واکنش هسته‌ای دیگر نیز وجود دارد که همجوشی هسته‌ای نام دارد و در آن دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته سنگین‌تری تولید می‌کنند. در این واکنش نیز جرم هسته تولید شده کمتر از جرم هسته‌های اولیه است و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود.



کل فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت



در این واکنش چهار هسته اتم هیدروژن (یعنی چهار پروتون) با هم ترکیب می‌شوند و یک هسته هلیوم ۴ (یعنی یک ذره آلفا) به اضافه یک پوزیترون ( $e^+$ ) تولید می‌کنند و مقداری انرژی نیز آزاد می‌نمایند. پوزیترون پاد ذره الکترون است که جرم آن با جرم الکترون برابر و بار آن مثبت است.

واکنش همجوشی هسته‌ای با یک مشکل بزرگ همراه است و آن اینکه ذره‌هایی که در این واکنش باید با هم ترکیب شوند بار مثبت دارند و برای آنکه با هم ترکیب شوند (به هم جوش بخورند) باید بر نیروی رانشی الکتریکی غلبه کنند. برای این کار در ابتدای فرایند باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد.

برای مثال برای اینکه دو پروتون را به اندازه کافی به هم نزدیک کنیم باید آنها را با انرژی حدود  $1 \text{ MeV}$  به طرف هم برانیم. این کار را می‌توان به کمک دستگاه‌هایی به نام شتاب دهنده انجام داد. اما انرژی لازم برای راه‌اندازی چنین دستگاهی خیلی بیشتر

از انرژی حاصل از واکنش همجوشی است.

راه دیگری که برای تأمین این انرژی وجود دارد گرما دادن به هسته‌ها تا دمای  $10^8 \text{ } ^\circ\text{C}$  است. در چنین دمایی انرژی جنبشی هسته‌ها برای غلبه بر انش الکتریکی بین آنها کافی خواهد بود.

چنین دمای بالایی در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً دمای درونی خورشید در حدود  $10^8 \times 2$  است، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به‌طور عادی صورت می‌گیرد.

بخش عمده انرژی خورشیدی از طریق واکنش همجوشی تأمین می‌شود. این انرژی به اندازه‌ای است که هم خورشید را داغ نگه می‌دارد و هم انرژی لازم را برای منظومه خورشیدی و از آن جمله سیاره زمین فراهم می‌کند.

## تمرین‌های فصل هشتم

- ۱- در نظریه نواری الکترون در جسم جامد، گذار درون نواری در چه صورتی روی می‌دهد؟
- ۲- آیا الکترون‌های نوارهای پر، سهمی در رسانش الکتریکی دارند؟ توضیح دهید.
- ۳- انرژی موردنیاز الکترون، برای انجام گذار بین ترازهای مختلف انرژی در یک جسم جامد، از چه منابعی می‌تواند تأمین شود؟
- ۴- با استفاده از نظریه نواری جسم جامد، خاصیت رسانایی، نارسانایی و نیمرسانایی مواد مختلف را توضیح دهید.
- ۵- چگونه می‌توان سهم نوار ظرفیت در رسانش را برحسب حفره توضیح داد؟
- ۶- دو روش برای افزایش تعداد حاملان بار در نیمرساناها را نام ببرید.
- ۷- تفاوت نیمرسانای نوع n و نیمرسانای نوع P را شرح دهید.
- ۸- معمولاً دیود را یکسوکننده نیز می‌نامند. چرا؟
- ۹- آیا دیود یک مقاومت اهمی است؟ توضیح دهید.
- ۱۰- علاوه بر ارتعاش‌های اتمی، سازوکار دیگری نیز در جسم جامد برای ایجاد مقاومت وجود دارد. توضیح دهید این سازوکار چه موقعی قابل تشخیص است و ناشی از چه عواملی است؟
- ۱۱- استرانتیوم  $^{90}_{38}\text{Sr}$  در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم‌عمر آن ۲۸ سال

است. این ایزوتوپ را گیاهان جذب می‌کنند و از طریق غذا وارد بدن انسان می‌شود. تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌های موجود در هر اتم با هسته  ${}^{91}_{38}\text{Sr}$  چقدر است؟

۱۲- آیا ایزوتوپ  ${}^{61}_{25}\text{X}$  را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ  ${}^{59}_{25}\text{Y}$  جدا کرد؟ از ایزوتوپ  ${}^{61}_{26}\text{Z}$

چطور؟

۱۳- هنگامی که از ایزوتوبی یک ذره آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟

هنگام گسیل یک ذره بتا چطور؟ هنگام گسیل پرتوی گاما چطور؟

۱۴- گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.

۱۵- گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی موجود ناشی از انرژی هسته‌ای‌اند. آیا سوخت‌هایی

مانند زغال‌سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به‌دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.

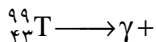
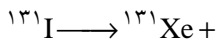
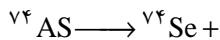
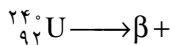
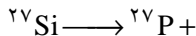
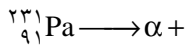
۱۶- هریک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟

الف) بریلیوم ۹ (ب) کلسیم ۴۰ (پ) نقره ۱۰۷

ت) طلا ۱۹۷ (ث) سرب ۲۰۸ (ج) اورانیم ۲۳۸

۱۷- واکنش‌های زیر را کامل کنید و برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده

کنید.



۱۸- نیم‌عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری

از ماده اولیه باقی مانده است؟



- ۱۹- آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار  $^{27}_{13}\text{Al}$  به جرم اتمی  $26/98154\text{u}$  دارد. جرم اتمی دو ایزوتوپ ناپایدار  $^{26}_{13}\text{Al}$  و  $^{28}_{13}\text{Al}$  به ترتیب برابر  $25/986982\text{u}$  و  $27/981905\text{u}$  است. انرژی بستگی هر یک از سه ایزوتوپ را بر حسب MeV حساب کنید.
- ۲۰- انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A، را برای  $^{56}_{26}\text{Fe}$  و  $^{238}_{92}\text{U}$  حساب کنید. (جرم  $^{56}_{26}\text{Fe}$  برابر  $9/29 \times 10^{-26}\text{kg}$  و جرم  $^{238}_{92}\text{U}$  برابر  $3/95 \times 10^{-25}\text{kg}$  است.)
- ۲۱- در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت و پز کشف می‌شود. کربن موجود در زغال اجاق، ۱/۵۶ درصد (معادل  $\frac{1}{4}$ ) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال چه مقدار است؟ (نیم عمر کربن ۱۴ برابر  $5730$  سال است.)