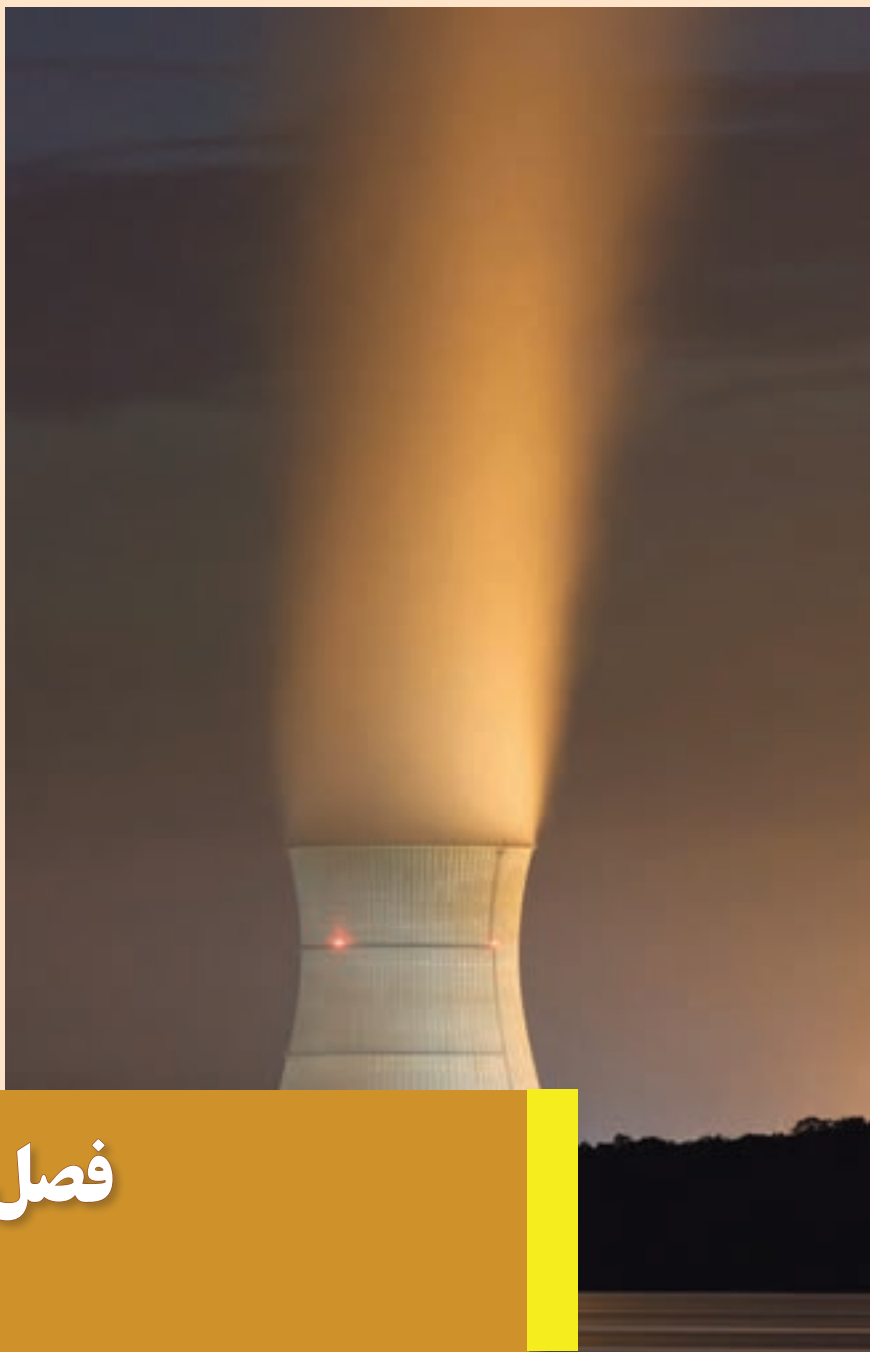


# آشنایی با ساختار هسته



## فصل



## آشنایی با ساختار هسته

در فصل قبل با برخی از مفهومی‌های فیزیک جدید آشنا شدیم. نظریه‌های نسبیت و کوانتومی در سده بیستم میلادی، فیزیک را به طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک مفهومی‌ها و نظریه‌های مکانیک کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌ها به توجیه‌های کاملاً سازگار با تجربه دست یافته‌اند. در این فصل یکی از موضوع‌هایی که در فیزیک جدید مطرح می‌شود؛ یعنی ساختار هسته اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن را بررسی می‌کنیم.

### ۸-۱ - ساختار هسته اتم

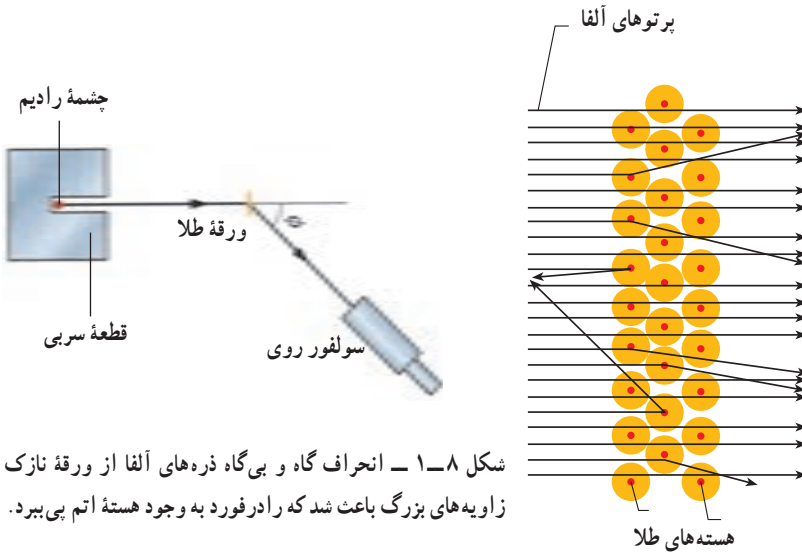
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ ه.ش) آغازی برای پی‌بردن به وجود هسته اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعه بشری داشت.

**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. 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 تویی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله، توپ بازگردد.»

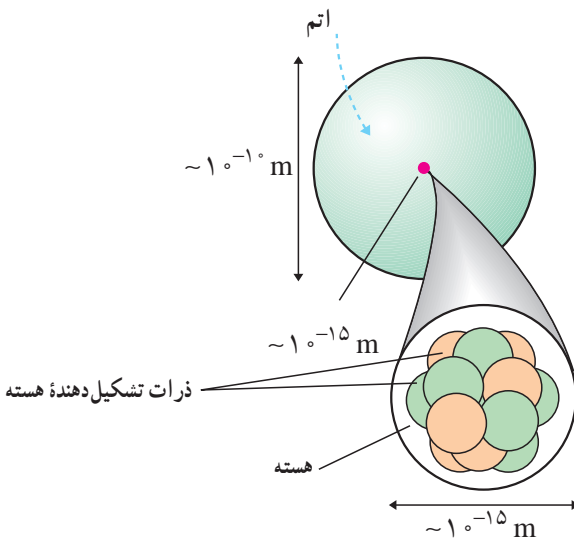
این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های

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 ۸-۱ - انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقه نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هسته اتم پی ببرد.

بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هسته اتم در حدود  $10^{-15} \text{ m}$  (۱ فرمی یا ۱ فمتومتر) و ابعاد اتم  $10^{-1} \text{ m}$  (۱ آنگستروم) است.



شکل ۸-۲ - مقایسه اتم با هسته آن

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 هسته اتم فقط ذره‌های شناخته شده زیر اتمی الکترون و هسته هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. جدول ۱-۸، جرم، بار الکتریکی و شعاع هر یک از این ذرات را نشان می‌دهد.

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.

$$A = Z + N \quad (1-8)$$

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

$$X = {}^A_Z X$$

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:

$${}^1_1\text{H} \text{ یا } {}^1_0\text{H} = \text{هسته اتم هیدروژن}$$

$${}^{16}_8\text{O} \text{ یا } {}^{16}_6\text{O} = \text{هسته اتم اکسیژن}$$

$${}^{56}_{26}\text{Fe} \text{ یا } {}^{56}_{30}\text{Fe} = \text{هسته اتم آهن}$$

**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 مانند رادون که ایزوتوپ پایدار ندارند؛ از برخی ایزوتوپ‌های پرتوزا به عنوان رادیاب 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 ۸-۱

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm)
الکترون	$-1/6 \times 10^{-19} = -e$	$9/1 \times 10^{-31} = \text{Me}$	غیرقابل اندازه‌گیری با وسایل موجود
پروتون	$+1/6 \times 10^{-19} = +e$	$1/67 \times 10^{-27} = \text{Mp}$	۱/۲
نوترون	صفر	$1/68 \times 10^{-27} = \text{Mn}$	۱/۲

۱- فمتومتر یا فرمی

**نیروی هسته‌ای:** دیدیم که ابعاد هسته بسیار کوچک است (در حدود  $10^{-15}\text{m}$ ). 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  $10^{14}\text{g/cm}^3$  می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب  $1\text{g/cm}^3$ ). 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 هم نام پایدار باشد تا چه رسد به اینکه 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 نکه می‌دارد. دوم اینکه، این نیرو، برخلاف نیروهای کولنی و گرانشی، کوتاه بُرد 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 ۲-۸

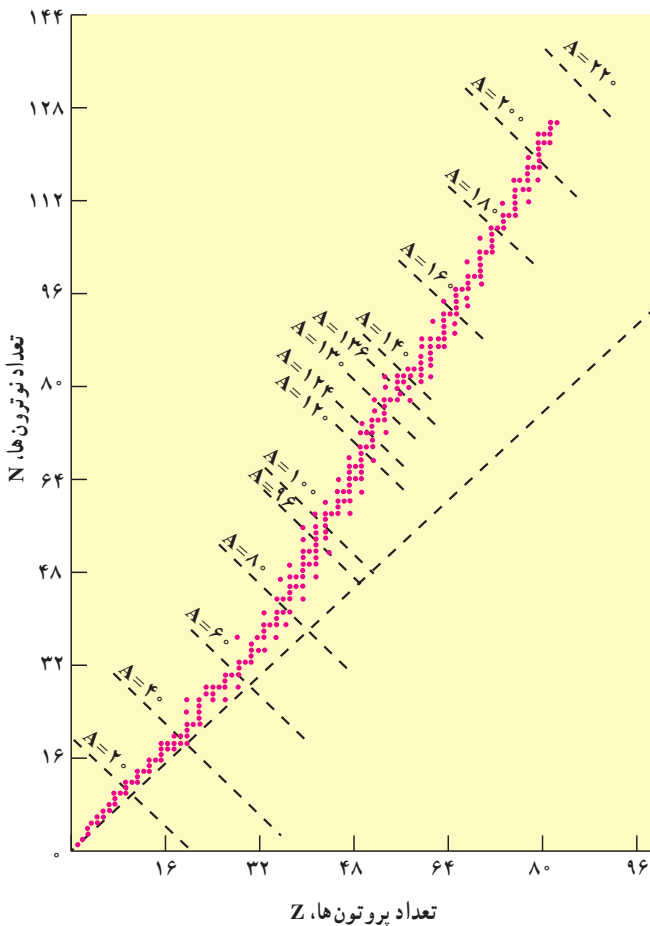
با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۸-۱ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصله  $r$  از یکدیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

**پایداری هسته‌ها:** دیدیم که در هسته علاوه بر نیروی رانش کولنی بین پروتون‌ها، نیروی ربایش هسته‌ای بین کلیه اجزای 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 کوتاه بُرد 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» گویند. 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 ۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳

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 رابیش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون اینکه رانش کولنی داشته باشد.

### فعالیت ۸-۳

با توجه به شکل ۸-۳ 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 شتابگرها 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 تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. این موضوع در مورد اتم‌ها نیز درست است. 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:

$$M_x < ZM_p + NM_n \quad (2-8)$$

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

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \quad (3-8)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه معروف اینشتین:

$$E = mc^2 \quad (4-8)$$

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

$$B = \Delta mc^2 = [ZM_p + NM_n - M_x]c^2 \quad (5-8)$$

در موقع تشکیل هسته  $X$  از  $Z$  پروتون و  $N$  نوترون این انرژی آزاد می‌شود و برای جدا کردن هسته به اجزاء تشکیل‌دهنده‌اش، 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 رابطه ۸-۵ 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 بکاهای 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  $12/000000000000$  u در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون  $1/007276$  u، جرم الکترون  $0/000549$  u و جرم نوترون  $1/008665$  u است.



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:

$$1u = \frac{1}{12} (0.012 \text{ kg}) \frac{1}{6.022137 \times 10^{23}} = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با:

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

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

$$= (1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}) (2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

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  $\text{MeV}$  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.

هسته دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترن» می‌نامند. جرم اتمی  ${}^2\text{H}$  برابر  $2.014102\text{u}$  است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید.  
**پاسخ:** ابتدا جرم هسته دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم یک الکترون - جرم اتم دوتریوم = جرم هسته دوتریوم

$$\begin{aligned} m({}^2\text{H}) &= M({}^2\text{H}) - M(e) \\ &= 2.014102\text{u} - 0.000549\text{u} \\ &= 2.013553\text{u} \end{aligned}$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته دوتریم برابر است با

$$\begin{aligned} B &= [m_n + m_p - m({}^2\text{H})]c^2 \\ &= [1.008665\text{u} + 1.007276\text{u} - 2.013553\text{u}] \times 931.5 = 2.22\text{ MeV} \end{aligned}$$

### تمرین ۱-۸

انرژی بستگی  ${}^4\text{He}$  را به دست آورید. جرم اتمی  ${}^4\text{He}$  برابر  $4.002603\text{u}$  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 کیلو الکترون‌ولت (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

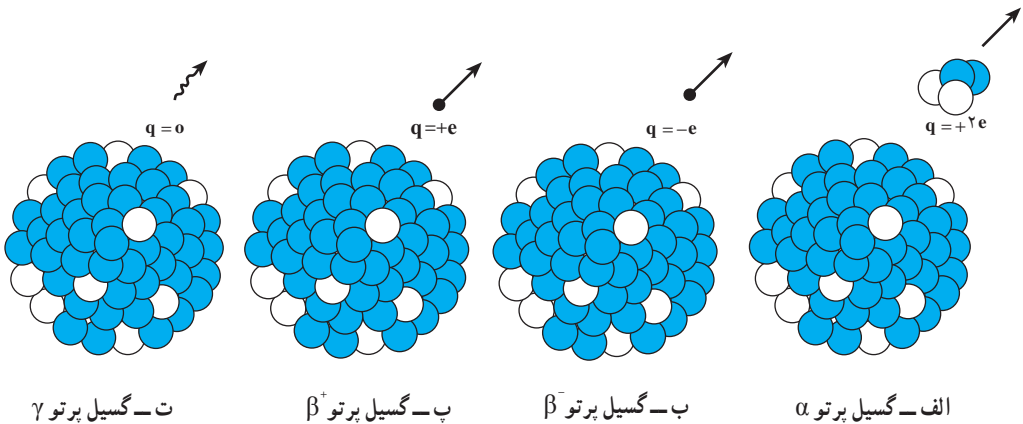
برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هسته برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد  ${}^A_Z X$  به صورت  ${}^A_Z X^*$  مشخص می کنند.

همان گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته ها معمولاً در محدوده کیلو الکترون ولت تا میلیون الکترون ولت است؛ از این رو، هسته ها در واکنش های شیمیایی برانگیخته نمی شوند.

## ۸-۲- پرتوزایی

همان طور که قبلاً گفتیم، تحول هایی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته ای 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 می دارد. هسته های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیر پذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می دارند و به تدریج به هسته های پایدار تبدیل می شوند. همان گونه که در شکل ۸-۴ نشان داده شده است، هسته های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می شوند.

۱- واپاشی آلفا: در این نوع واپاشی که در هسته های سنگین صورت می گیرد، هسته  ${}^A_Z X$  با گسیل ذره  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ) متشکل از دو پروتون و دو نوترون و می باشد (شکل ۸-۴ الف).



شکل ۸ - ۴

هسته  $X$  را «هسته مادر» و هسته  $Y$  را «هسته دختر» می نامند؛ هسته  $Y$  محصول واپاشی دارای عددجرمی  $A - 4$  و عدد اتمی  $Z - 2$  است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می شود و بخش عمده آن را ذره  $\alpha$  به همراه می برد. ذره های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت اند. بُرد این ذره ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می شوند ولی اگر این ذره ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت های بدن می شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲- واپاشی بتا ز: این متداول ترین نوع واپاشی در هسته هاست. در این واپاشی هسته ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته جدیدی تبدیل می شود (شکل ۸-۴ ب).

این نوع واپاشی بسیار شگفت انگیز است؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می شود. فرایند را می توان به صورت زیر نوشت\*:



در فرایند گسیل پوزیترون یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می شود (شکل ۸-۴ پ) که می توان 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 ز: در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی کند بلکه هسته ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می رسد (شکل ۸-۴ ت). این فرایند را می توان به صورت زیر نشان داد :



اغلب هسته ها پس از گسیل ذره های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می رسند؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان

\* در واپاشی بتا ز ذره دیگری (که نوترینو یا پادنوترینو نام دارد) نیز باید در نظر گرفت که برای سادگی از آنها صرف نظر شده است.

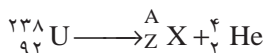
- ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پر انرژی‌تر است و می‌تواند در ماده بیشتر نفوذ کند.
- در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است:
- ۱- مجموع بار الکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۷-۸ تا ۹-۸) یکسان است.
  - ۲- مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

### مثال ۳-۸

در واپاشی هسته اورانیم  $^{238}_{92}\text{U}$  یک ذره آلفا گسیل می‌شود. معادله این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که براثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

**پاسخ**

معادله واپاشی به صورت زیر است:



با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم:

$$238 = A + 4$$

$$A = 234$$

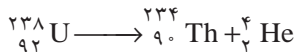
و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم:

$$92 = 2 + Z$$

$$Z = 90$$

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

داریم:



### تمرین ۲-۸

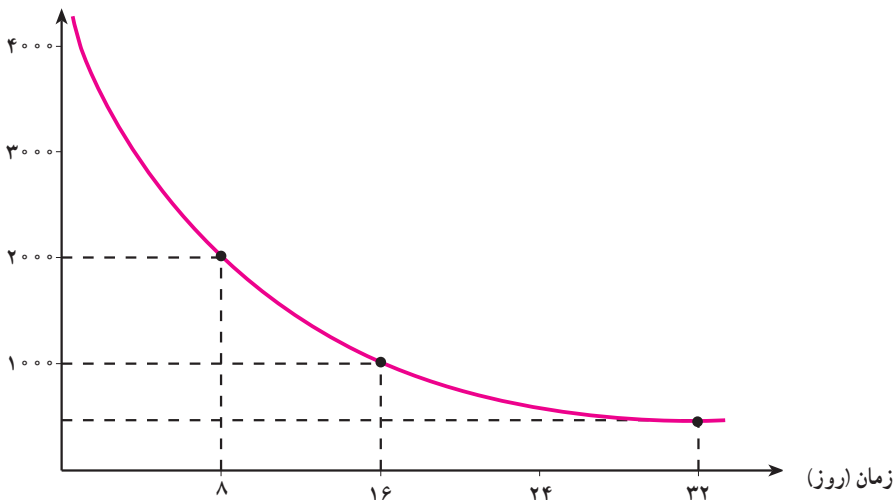
فسفر  $^{32}_{15}\text{P}$  با گسیل الکترون و امی باشد. معادله این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

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

### نیمه عمر ماده پرتوزا

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 ۸-۵ 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 عمرهایی 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 ۸-۵ - نمودار واپاشی ایزوتوپ  $^{131}\text{I}$

در حادثه چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد  $^{131}\text{I}$  بود. این ایزوتوپ، فزار است و همراه با جریان‌های جوی تا نقطه‌های دور دست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی که این گیاهان را می‌خوردند، شد. نیمه عمر این ایزوتوپ  $8/0$  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.

۵	۴	۳	۲	۱	۰	تعداد نیمه‌عمرهای سپری شده
$\frac{1}{2^5} N_0 = \frac{N_0}{32}$	$\frac{1}{2^4} N_0 = \frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2^3} N_0 = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2^2} N_0 = \frac{N_0}{4}$	$\frac{N_0}{2}$	$N_0$	هسته‌های باقیمانده

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 باقیمانده 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  $T_{1/2}$  نیمه عمر ایزوتوپ است.

## نکته های ایمنی

**حفاظت در برابر پرتوها:** یکی از ویژگی های مهم ذرات و پرتوهایی که از مواد پرتوزا گسیل می شود این است که حواس معمولی ما به آنها حساس نیستند؛ مثلاً، وقتی دستمان را به آتش نزدیک می کنیم سوزش ناشی از آن باعث می شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آنچه از مواد پرتوزا خارج می شود، صادق نیست؛ بنابراین باید به کمک دستگاه هایی آنها را آشکار ساخت و به وجود آنها پی برد.

ذره های دارای بار الکتریکی مانند ذره های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطه بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم های محیط می شوند و می توان از این موضوع برای آشکار سازی آنها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهای شیمیایی را در بدن به وجود می آورد که باعث آسیب رساندن به بافت های زنده می شود. البته هر چه این ذره ها انرژی خود را در مسافت کوتاه تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدید تر و ترمیم آن دشوار تر خواهد بود؛ بدین سبب، آسیب ذره های آلفا بسیار شدید تر از ذره های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و  $\gamma$  نیز بر اثر برهم کنش با ماده، ذره های باردار ثانویه به وجود می آورند و این ذره های ثانویه به بافت های زنده آسیب می رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده های سرطانی بهره می گیرند؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده ها آنها را نابود می سازند. این کار را «پرتودرمانی» می نامند. نوترون ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن های آب - که بخش اعظم بدن را تشکیل می دهد - انرژی خود را به آن منتقل می کنند و باعث به حرکت در آمدن یک پروتون پراانرژی در بدن می شوند که اثر زیان بار آن بسیار شدید است؛ بنابراین، نوترون ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک اند. 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 ژن های آن شود. **یاخته هایی که از این یاخته های جهش یافته به وجود می آیند، با آن تفاوت خواهند داشت.** این جهش ها می تواند به تولید بافت های سرطانی یا نوزادان ناقص الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش ها برای تولید گیاهانی استفاده می شود که از گیاهان معمولی مقاوم ترند 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. چشمه های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آنها را به کمک وسیله هایی در فاصله دور از بدن نگه داشت.

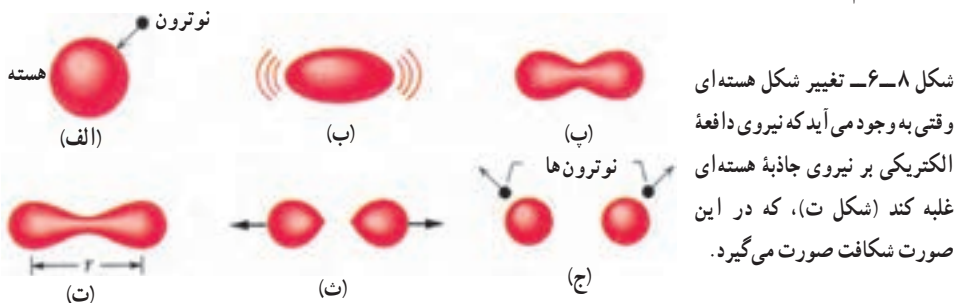


فضانوردان در معرض انواع گوناگونی از تابش‌ها، از جمله تابش‌های کیهانی و بادهای خورشیدی قرار دارند. تحقیق کنید فضانوردان چگونه خود را در برابر بخشی از این تابش‌ها مصون می‌دارند؟

### ۸-۳- 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 لیزمایتنر<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. مایتنر 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 ۸-۶)، 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.



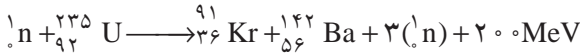
۱- Otto Hahn

۲- Fritz Strassman

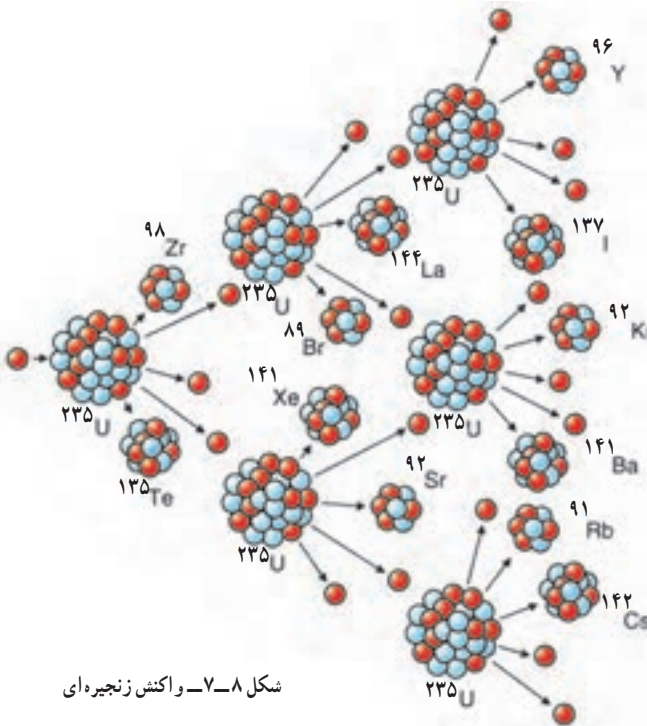
۳- Lise Meitner

۴- Otto Frisch

در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:



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 ۸-۷). در هر واکنش شکافت  $200/000/000$  الکترون‌ولت انرژی ( $200\text{MeV}$ ) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط  $30$  الکترون‌ولت 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 به‌طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟



شکل ۸-۷- واکنش زنجیره‌ای

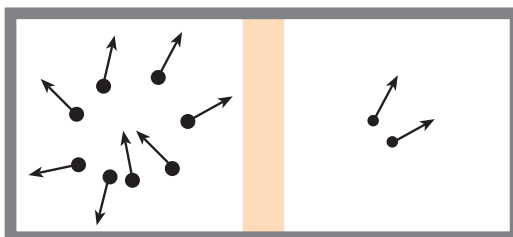
پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب  $^{235}\text{U}$  که فقط ۰/۷۲ درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان تر  $^{238}\text{U}$  نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی معمولاً شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

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.

**غنی سازی اورانیم:** واکنش زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص به وقوع نمی‌پیوندد؛ زیرا بخش اعظم آن (۹۹/۳ 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 «غنی سازی» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب  $^{235}\text{U}$  از ایزوتوپ فراوان بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان اند 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 فلز تور به صورت گاز هگزا فلورید اورانیم ( $\text{UF}_6$ ) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک تر  $^{235}\text{U}$  در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیش از ایزوتوپ  $^{238}\text{U}$  است و با آهنگ بیشتری از غشایی نازک می‌گذرد. بخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونه اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۸-۸ — 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 سانتیفوژ گازی راحت تر صورت می گیرد. گاز هگزافلورید اورانیم در یک استوانه با سرعت های فوق العاده زیاد از مرتبه  $1500$  کیلومتر در ساعت چرخانده می شود. مولکول های گاز حاوی  $^{238}\text{U}$  سنگین، مانند شیر در جدا کننده های لیبیات، به خارج رانده می شوند و مولکول های گاز حاوی  $^{235}\text{U}$  سبک تر، از مرکز استخراج می شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال های اخیر برطرف شده است.

**راکتورهای شکافت هسته ای:** دیدیم که واکنش شکافت زنجیره ای معمولاً در اورانیم طبیعی خالص صورت نمی گیرد، زیرا بخش اعظم آن  $^{238}\text{U}$  است، و نوترون های آزاد شده در شکافت  $^{235}\text{U}$  که نوترون های سریع هستند را اتم های  $^{238}\text{U}$  جذب می کنند بدون اینکه باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون های کُند را  $^{235}\text{U}$  با احتمال بیشتر از  $^{238}\text{U}$  جذب می کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم  $^{235}\text{U}$  دیگر، حتی در حضور  $^{238}\text{U}$ ، افزایش می یابد. این افزایش احتمال می تواند برای به وجود آوردن واکنش زنجیره ای کافی باشد.

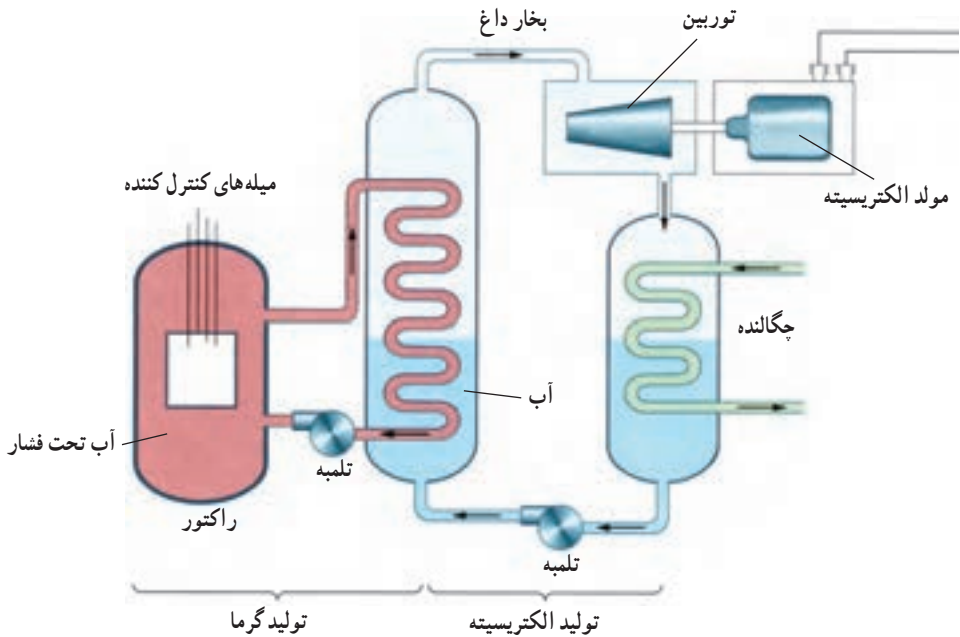
در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه های کوچک تر تقسیم شود و در بین این قطعه ها ماده ای قرار گیرد که نوترون های حاصل از شکافت\* را کند و احتمال جذب آنها در اورانیم را زیاد سازد، می توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره ای به وجود آورد.

این روش را اولین بار انریکو فرمی در سال ۱۹۴۲ میلادی (۱۳۲۱ ه.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه ای از انرژی خود را از دست می داد. اگر نوترون از هسته ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هسته سبک کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه ای کم می شود. می گویند گرافیت «کُند کننده» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می نامند.

راکتورهای هسته ای کنونی علاوه بر سوخت هسته ای دارای کُند کننده، میله های کنترل، و شماره ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته ای در درجه اول  $^{238}\text{U}$  به علاوه ۳ درصد  $^{235}\text{U}$  است. چون  $^{235}\text{U}$  با  $^{238}\text{U}$  بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با وارد کردن میله های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون های موجود برای به وجود آوردن شکافت، تنظیم می شود. میله های کنترل معمولاً از مواد جذب کننده نوترون،

\* انرژی جنبشی متوسط این نوترون ها  $2\text{MeV}$  است.

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.



شکل ۸-۹- نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

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 تنیس، بیش از ۳۰ کامیون بزرگ پر از زغال سنگ انرژی تولید می‌کند.



شکل ۸-۱۰- نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

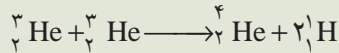
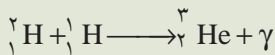
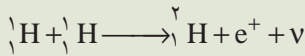
نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط  $1/2$  و در هسته سنگینی چون سرب  $1/5$  است. وقتی هسته سنگینی چون اورانیم 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 عبارتند 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 همین طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، که هر سال با سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد جو می‌شود و با به وجود آوردن مسئله گرم شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

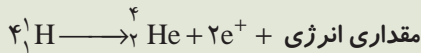
## همجوشی هسته‌ای

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 ۰/۱ 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

$10^7$ °C است. در چنین دمایی انرژی جنبشی هسته‌ها برای غلبه بر رانش الکتریکی بین آنها کافی خواهد بود.

چنین دمای بالایی در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً دمای درونی خورشید در حدود  $10^7 \times 2$ °C است، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به طور 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.

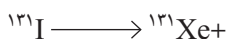
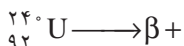
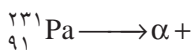
### تمرین‌های فصل هشتم

- ۱- استرانسیوم  $^{90}_{38}\text{Sr}$  در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم عمر 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  $^{90}_{38}\text{Sr}$  چقدر است؟
- ۲- آیا ایزوتوپ  $^{61}_{25}\text{X}$  را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ  $^{59}_{25}\text{Y}$  جدا کرد؟ از ایزوتوپ  $^{61}_{26}\text{Z}$  چگونه؟
- ۳- هنگامی که از ایزوتوبی یک ذره آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟ هنگام گسیل یک ذره بتا چگونه؟ هنگام گسیل پرتو گاما چگونه؟
- ۴- گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.
- ۵- گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی از انرژی هسته‌ای حاصل شده‌اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.
- ۶- هر یک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟
 

الف) برلیوم ۹	ب) کلسیم ۴۰	پ) نقره ۱۰۷
ت) طلا ۱۹۷	ث) سرب ۲۰۸	ج) اورانیوم ۲۳۸



۷- واکنش‌های زیر را کامل کنید برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده کنید.



۸- نیم عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری

از ماده اولیه باقی مانده است؟

۹- آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار  ${}_{13}^{27}\text{Al}$  به جرم اتمی  $26/981541\text{u}$  دارد. جرم اتمی

ایزوتوپ ناپایدار  ${}_{13}^{26}\text{Al}$  آن برابر  $25/986982\text{u}$  است. انرژی بستگی هر یک از دو ایزوتوپ را بر حسب MeV حساب کنید.

۱۰- انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A، را برای  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  و  ${}_{92}^{238}\text{U}$

حساب کنید. (جرم  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  برابر  $9/29 \times 10^{-26}\text{kg}$  و جرم  ${}_{92}^{238}\text{U}$  برابر  $3/95 \times 10^{-25}\text{kg}$  است.)

۱۱- در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت و پز کشف می‌شود. کربن

موجود در زغال اجاق،  $1/56$  درصد (معادل  $\frac{1}{4}$ ) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال چه

مقدار است؟ (نیمه عمر کربن ۱۴ برابر  $5730$  سال است).

**H**  
هیدروژن  
۱

**Li**  
لیتیم  
۳

**Na**  
سدیم  
۱۱

**K**  
پتاسیم  
۱۹

**Rb**  
روبیدیم  
۳۷

**Cs**  
سزیم  
۵۵

**Fr**  
فرانسیسم  
۸۷

**Be**  
بریلیم  
۴

**Mg**  
منیزیم  
۱۲

**Ca**  
کلسیم  
۲۰

**Sr**  
استراسیم  
۳۸

**Ba**  
باریم  
۵۶

**Ra**  
رادیوم  
۸۸

**V**  
وانادیم  
۲۳

**Nb**  
نیوبیم  
۴۱

**Ta**  
تانتال  
۷۳

**Hf**  
هافنیم  
۷۲

**Rf**  
رادرفوریم  
۱۰۴

**Cr**  
کروم  
۲۴

**Mo**  
مولیبدن  
۴۲

**W**  
تنگستن  
۷۴

**Sg**  
سینورگیم  
۱۰۶

**Mn**  
منگنز  
۲۵

**Tc**  
تکنسیم  
۴۳

**Re**  
رینم  
۷۵

**Bh**  
بوریم  
۱۰۷

**Fe**  
آهن  
۲۶

**Ru**  
روتنم  
۴۴

**Os**  
اوسمیم  
۷۶

**Hs**  
هاسیم  
۱۰۸

**Co**  
کوبالت  
۲۷

**Rh**  
رودیم  
۴۵

**Ir**  
ایریدیم  
۷۷

**Mt**  
مایتنیم  
۱۰۹

**Ni**  
نیکل  
۲۸

**Pd**  
پالادیم  
۴۶

**Pt**  
پلاتین  
۷۸

**Cu**  
مس  
۲۹

**Ag**  
نقره  
۴۷

**Au**  
طلا  
۷۹

**Zn**  
روی  
۳۰

**Cd**  
کادمیم  
۴۸

**Hg**  
جیوه  
۸۰

**Al**  
آلومینیم  
۱۳

**Ga**  
گالیم  
۳۱

**In**  
ایندیم  
۴۹

**Tl**  
تالیوم  
۸۱

**Si**  
سیلیسیم  
۱۴

**Ge**  
ژرمانیم  
۳۲

**Sn**  
قلع  
۵۰

**Pb**  
سرب  
۸۲

**P**  
فسفر  
۱۵

**As**  
آرسنیک  
۳۳

**Sb**  
آنتیموان  
۵۱

**Bi**  
بیسموت  
۸۳

**S**  
گوگرد  
۱۶

**Se**  
سلنیم  
۳۴

**Te**  
تلوریم  
۵۲

**Po**  
پلونیوم  
۸۴

**Cl**  
کلر  
۱۷

**Br**  
برم  
۳۵

**I**  
ید  
۵۳

**At**  
استاتین  
۸۵

**F**  
فلور  
۹

**O**  
اکسیژن  
۸

**N**  
نیتروژن  
۷

**He**  
هلیوم  
۲

**Ne**  
نئون  
۱۰

**Ar**  
آرگون  
۱۸

**Kr**  
کریتون  
۳۶

**Xe**  
زنون  
۵۴

**Rn**  
رادون  
۸۶

**Lu**  
لوئسیوم  
۷۱

**Lr**  
لارنسیوم  
۱۰۳

**Yb**  
ایتربیم  
۷۰

**No**  
نوبلیوم  
۱۰۲

**Tm**  
تولیم  
۶۹

**Md**  
مداونیوم  
۱۰۱

**Er**  
اریتم  
۶۸

**Fm**  
فرمیوم  
۱۰۰

**Ho**  
هولمیوم  
۶۷

**Es**  
اشتنیوم  
۹۹

**Dy**  
دیسمیورزم  
۶۶

**Cf**  
کالیفرنیم  
۹۸

**Tb**  
تریتم  
۶۵

**Bk**  
برکلیم  
۹۷

**Gd**  
گادولینیوم  
۶۴

**Cm**  
کوریوم  
۹۶

**Eu**  
یوربیم  
۶۳

**Am**  
امرسیوم  
۹۵

**Sm**  
ساماریوم  
۶۲

**Pu**  
پلوتونیوم  
۹۴

**Pm**  
پرومتیم  
۶۱

**Np**  
نیپتونیوم  
۹۳

**Nd**  
نئودیم  
۶۰

**U**  
اورانیم  
۹۲

**Pr**  
پرازئودیم  
۵۹

**Pa**  
پروتکتینیوم  
۹۱

**Ce**  
سزیم  
۵۸

**Th**  
توریم  
۹۰

فلز

شبه فلز

فلز

جدول تناوبی عناصرها