

# تاکيون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵



انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد



دانشگاه شاهد  
معاونت فرهنگی و اجتماعی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

نام:

از خلأ تا قدرت

نوع نشریه:

ویژه نامه علمی- دانشجویی

صاحب امتیاز:

انجمن علمی فیزیک دانشگاه شاهد تهران

استاد راهنما:

دکتر وحید فلاحي؛ عضو هیئت علمی گروه فیزیک

مدیر مسئول:

ساجده سلیمانی

سر دبیر:

امیرحسین خواجه

سرپرست اجرایی:

محمد امین شعبانی

گروه تحریریه:

اسماء همتی- فاطمه زهرا تمیزی- زهرا صادقی پور- سیده فاطمه ابوالقاسمی- معصومه اخوی

گروه ویراستاری:

امیدرضا بهزادی- فاطمه سادات موسوی- زینب سادات طباطبایی- مبینا ساریخانی

صفحه آرا:

فاطمه فهیمی

انتشار:

تیرماه ۱۴۰۵



انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## فهرست



۰۱

اتمی که خالی نبود

۰۵

انرژی بستگی هسته؛ از نقض جرم تا پایداری

۰۷

سفری به دل هسته؛ از پرتوزایی تا پزشکی هسته ای

۱۴

تولد ایزوتوپ؛ چند عنصر در یک مکان

۱۷

از سنگ معدن تا پرتوزایی؛ کشف اورانیوم

۱۹

شکافت هسته ای؛ از آزمایشگاه تا انفجار

۲۲

گداخت هسته ای؛ از قلب ستارگان تا آزمایشگاه های زمین

۲۶

راکتورهای هسته ای: قلب تپنده تولید انرژی

۳۰

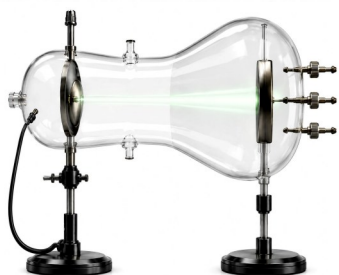
چالش های انرژی هسته ای



# اتمی که خالی نبود



## کشف الکترون (۱۸۹۷) :



پیش از آن‌که رادرفورد به قلب اتم نفوذ کند، استادش، جوزف جان تامسون در کمبریج، نخستین ضربه را بر پیکره‌ی "اتم تجزیه‌ناپذیر" وارد کرده بود. در سال ۱۸۹۷، تامسون با انجام آزمایش‌هایی بر روی پرتوهای کاتدی نشان داد که این پرتوها از ذراتی با جرم بسیار کم و بار منفی تشکیل شده‌اند.

او با بررسی انحراف این ذرات در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، نسبت بار به جرم آن‌ها ( $e/m$ ) را محاسبه کرد و به شناخت ذراتی که بعدها "الکترون" نام گرفتند، رسید. الکترون حدود ۱۸۰۰ برابر سبک‌تر از سبک‌ترین اتم، یعنی هیدروژن، بودند. این کشف، انقلابی در باورهای علمی ایجاد کرد. اگر اتم تجزیه‌ناپذیر است پس این ذرات ریز از کجا آمده‌اند؟

## دنیای پیش از هسته؛ کیک کشمش یا پودینگ آلویی؟



پاسخ تامسون این بود: الکترون‌ها بخشی از خود اتم‌اند. او مدلی ارائه داد که بعدها به "مدل کیک کشمش" معروف شد؛ مدلی که در آن، اتم همچون خمیری از بار مثبت تصور می‌شد که در سراسر فضا پخش شده است و الکترون‌ها، مانند کشمش‌هایی پراکنده درون این کیک، در آن جای گرفته‌اند.

این تصویر، برای مدتی مدل پذیرفته‌شده‌ی علم بود...

تا این‌که ارنست رادرفورد، فیزیک‌دان جسور نیوزیلندی و شاگرد سابق تامسون، شروع به پرسیدن پرسش‌هایی کرد که ذهنش را آرام نمی‌گذاشت:

"اگر این بار مثبت واقعاً به صورت یکنواخت پخش شده است، چگونه می‌تواند چنین نیروی قدرتمندی بر ذرات دیگر وارد کند؟"

## گلوله‌های طلایی و اتاق تاریک



رادرفورد، که در دانشگاه رهبری گروهی از پژوهشگران را بر عهده داشت، به ابزاری بی‌نظیر دسترسی پیدا کرده بود: یعنی پرتوهای آلفا. این ذرات سنگین و دارای بار مثبت، که از مواد رادیواکتیو (مانند رادیوم استخراج‌شده توسط مادام کوری) گسیل می‌شدند، در نگاه رادرفورد، گلوله‌های میکروسکوپی ایده‌آلی برای



برای کاوش در ساختار اتم بودند.

در سال ۱۹۰۹، او به دو همکار جوانش، هانس گایگر و دانشجوی نوزده ساله اش مارسدن، مأموریتی عجیب سپرد:

”بررسی کنید آیا ممکن است ذرات آلفا از یک ورقه‌ی نازک طلا بازگردند یا نه.“

در چارچوب مدل تامسون، چنین اتفاقی تقریباً غیرممکن بود؛ درست مانند این که انتظار داشته باشیم یک گلوله‌ی توپ پس از برخورد با پرده‌ای حریر، به عقب بازگردد.



ورق طلا آن قدر نازک بود که با کوچک‌ترین جریان هوا می‌لرزید و ضخامتش به کمتر از یک ده هزارم میلی‌متر می‌رسید. در یک سوی این ورقه، منبع رادیوم قرار داشت که ذرات آلفا را همچون رگباری نامرئی به سوی طلا پرتاب می‌کرد و در سوی دیگر، صفحه‌ای پوشیده از سولفید روی قرار داده شده بود؛ ماده‌ای که هنگام برخورد ذره‌ی آلفا، جرقه‌ای نورانی و بسیار کوچک تولید می‌کرد.

گایگر و مارسدن ناچار بودند ساعت‌ها در تاریکی مطلق بنشینند تا چشمانشان به تاریکی عادت کند. سپس از پشت میکروسکوپ به صفحه‌ی سولفید روی خیره می‌شدند و تک‌تک جرقه‌ها را می‌شمردند. هر جرقه، نشانه‌ی برخورد یک ذره‌ی آلفا بود.

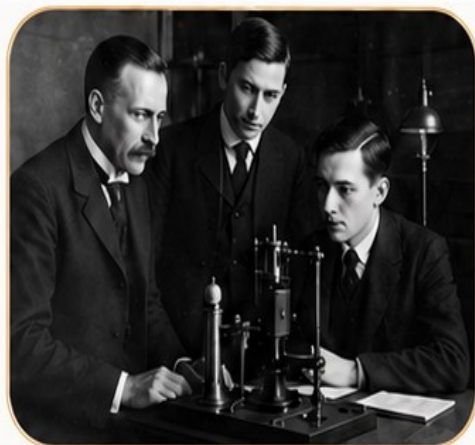
روزها و هفته‌ها گذشت. بیشتر ذرات، بدون هیچ انحراف قابل‌توجهی از ورقه عبور می‌کردند؛ درست همان‌طور که انتظار می‌رفت؛ اما ناگهان، همه‌چیز تغییر کرد. روزی مارسدن با هیجان نزد رادرفورد دوید و گفت:

”پروفسور! برخی از ذرات برمی‌گردند! انگار به چیزی بسیار سخت و کوچک برخورد کرده‌اند و به عقب پرتاب شده‌اند!“

## ”غیرممکن‌ترین اتفاق“ و تولد منظومه‌ی اتمی

رادرفورد درباره‌ی این لحظه نوشت:

”این باورنکردنی‌ترین رویدادی بود که در زندگی‌ام تجربه کردم؛ تقریباً به همان اندازه عجیب که اگر گلوله‌ای بزرگ را به سوی یک دستمال کاغذی شلیک کنی و آن گلوله به عقب بازگردد و به خودت اصابت کند.“



سرانجام، در سال ۱۹۱۱، نظریه‌ای انقلابی ارائه داد: تمام جرم و بار مثبت اتم در ناحیه‌ای بسیار کوچک و چگال در مرکز آن متمرکز شده است؛ ناحیه‌ای که ”هسته“ نام گرفت و الکترون‌ها در فاصله‌هایی دورتر، به دور این هسته در حرکت‌اند.

با این کشف، مدل تامسون فرو ریخت و تصویر تازه‌ای از اتم شکل گرفت: مدلی منظومه‌ای، با هسته‌ای همانند خورشید در مرکز و الکترون‌هایی همچون سیارات در گردش به دور آن.



## ● زنجیره ی کشفیات؛ از هسته تا عصر اتم

کشف هسته پایان ماجرا نبود؛ از این نقطه به بعد، فیزیک وارد دوره‌ای شد که هر کشف، دروازه‌ای به کشفی دیگر می‌گشود.

### ۱۹۱۹: شکافت نخستین هسته و کشف پروتون

رادرفورد، که این بار به کمبریج بازگشته بود، آزمایشی سرنوشت‌ساز انجام داد. او گاز نیتروژن را با ذرات آلفا بمباران کرد. در این فرآیند، ذرات آلفا به درون هسته نیتروژن نفوذ کردند و نتیجه‌ای غیرمنتظره پدید آمد:



ذره‌ای از دل هسته بیرون آمد که همان هسته‌ی اتم هیدروژن بود. رادرفورد این ذره‌ی بنیادی را "پروتون" نامید. این رویداد، نخستین واکنش هسته‌ای مصنوعی در تاریخ بود. او با هیجان به همکارانش گفت: "ما اتم را شکافتیم!"

### ۱۹۳۲: کشف نوترون؛ قطعه‌ی گمشده‌ی پازل

سال‌ها بعد، جیمز چادویک، شاگرد رادرفورد، با ادامه‌ی تحقیقات به کشفی تعیین‌کننده دست یافت.

او ذره‌ای را در هسته شناسایی کرد که نه بار الکتریکی داشت و نه رفتار آن شبیه الکترون یا پروتون بود؛

ذره‌ای با جرمی نزدیک به پروتون، اما خنثی: یعنی "نوترون".

کشف نوترون بسیاری از معماها را حل کرد؛ از جمله دلیل وجود ایزوتوپ‌ها. همچنین راه را برای درک بهتر ساختار هسته و انجام واکنش‌های هسته‌ای پیچیده‌تر هموار ساخت.



## ● مشخصات هسته

پس از کشف هسته، تصویر اتم شفاف‌تر شد و دانشمندان دریافته‌اند که هر عنصر را می‌توان با دو عدد بنیادی تعریف کرد:

### - عدد اتمی (Z):

تعداد پروتون‌های موجود در هسته است. این عدد، هویت شیمیایی هر عنصر را تعیین می‌کند. برای مثال: اورانیوم  $Z=92$

### - عدد جرمی (A):

مجموع تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های درون هسته است:

$$A = Z + N$$

که در آن  $N$  تعداد نوترون‌ها را نشان می‌دهد.

نکته: در اتم خنثی تعداد الکترون با پروتون یا همان عدد اتمی برابر است.



## چرا هسته از هم نمی پاشد؟

با کشف ساختار هسته این پرسشی اساسی پدیدار شد: درون هسته، ده‌ها پروتون با بار مثبت، در فاصله‌ای بسیار کوچک در کنار یکدیگر قرار دارند. طبق قانون کولن، نیروی دافعه‌ی الکتریکی میان آن‌ها باید آن‌قدر بزرگ باشد که هسته را فوراً از هم متلاشی کند.

اما چنین اتفاقی نمی‌افتد. پس چه چیزی این ذرات را در کنار هم نگه می‌دارد؟

پاسخ: نیرویی نهفته که بسیار قوی‌تر از نیروی الکتریکی عمل می‌کند: نیروی هسته‌ای قوی.

این نیرو، در فواصل بسیار کوتاه عمل می‌کند و مانند چسبی کیهانی، پروتون‌ها و نوترون‌ها را در دل هسته به هم پیوند می‌دهد؛ بدون آن، هیچ هسته‌ای پایدار نمی‌ماند، هیچ عنصری شکل نمی‌گرفت و در نهایت، جهانی که می‌شناسیم هرگز به وجود نمی‌آمد.

### -ویژگی‌های نیروی هسته‌ای قوی

- بُرد بسیار کوتاه: تنها در فاصله‌هایی در حدود ۱ تا ۲ فمتومتر مؤثر است؛ یعنی تقریباً هم‌اندازه‌ی قطر یک هسته.

- مستقل از بار الکتریکی: این نیرو میان پروتون-پروتون، پروتون-نوترون و نوترون-نوترون تقریباً به یک شکل عمل می‌کند.

- قدرت خیره‌کننده: در همین فاصله‌ی کوتاه، حدود ۱۰۰ برابر قوی‌تر از نیروی الکترومغناطیسی است.

بدون این نیرو، هیچ هسته‌ای جز ساده‌ترین حالت ممکن، یعنی هیدروژن تک‌پروتونی نمی‌توانست وجود داشته باشد. در نتیجه، نه عناصر سنگین‌تری شکل می‌گرفتند، نه سیارات، و نه حیاتی که ما می‌شناسیم.

در کنار نیروی قوی، نیروی دیگری نیز در دل هسته عمل می‌کند: نیروی هسته‌ای ضعیف. اگر نیروی قوی نگهدارنده و پایدارکننده است، نیروی ضعیف عامل "تغییر" است؛ نیرویی که به ذرات اجازه می‌دهد ماهیت خود را دگرگون کنند.

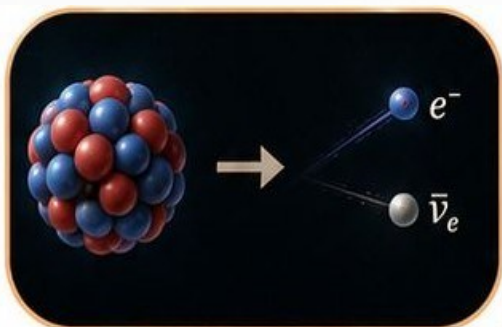
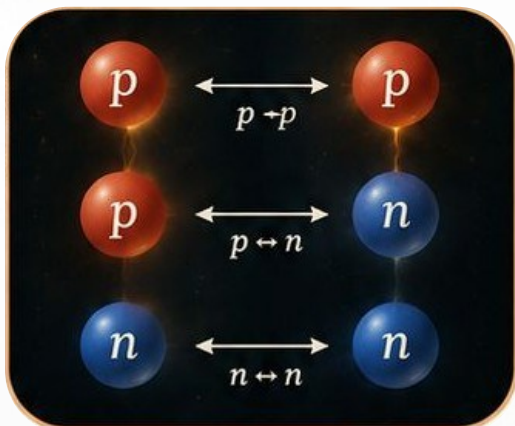
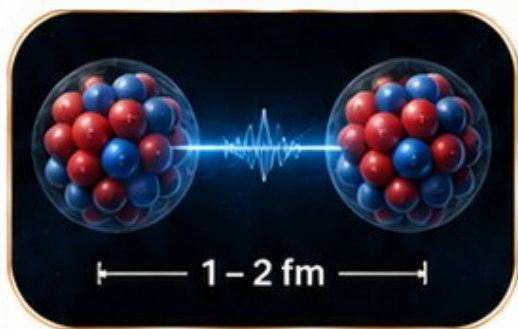
ویژگی‌های نیروی هسته‌ای ضعیف:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

- عامل واپاشی بتا :

- بُرد فوق‌العاده کوتاه: برد این نیرو حتی از قطر یک پروتون نیز کمتر است.

- نقش کیهانی: بدون نیروی ضعیف، همجوشی هسته‌ای در خورشید غیرممکن بود.



## انرژی بستگی هسته؛ از نقص جرم تا پایداری



پاسخ را پیش‌تر دیدیم که نیروی هسته‌ای قوی در فواصل بسیار کوتاه، بسیار قدرتمندتر از نیروی دافعه‌ی الکتریکی عمل می‌کند و ذرات هسته را در کنار هم نگه می‌دارد. اما این "کنار هم ماندن" بی‌هزینه نیست.

برای توصیف این موضوع، فیزیک‌دانان مفهومی به نام انرژی بستگی هسته را معرفی کردند.

انرژی بستگی، مقدار انرژی‌ای است که باید به یک هسته بدهیم تا آن را به‌طور کامل به اجزای سازنده‌اش یعنی پروتون‌ها و نوترون‌ها تجزیه کنیم. هرچه این انرژی بیشتر باشد، هسته پایدارتر است. به بیان دیگر، انرژی بستگی معیاری مستقیم برای سنجش استحکام و پایداری هسته‌هاست.

اما شگفتی اصلی در اینجاست: جرم یک هسته، همیشه کمتر از مجموع جرم تک‌تک پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن است و این "کمبود جرم" که به آن نقص جرم گفته می‌شود، در واقع ناپدید نشده است؛ بلکه به انرژی تبدیل شده است. طبق رابطه‌ی معروف اینشتین:

$$E_b = \Delta m \times c^2$$

که در آن  $E_b$  انرژی بستگی،  $\Delta m$  نقص جرم و  $c$  سرعت نور است. این

معادله نشان می‌دهد که حتی یک نقص جرم بسیار کوچک، به دلیل بزرگ بودن مجذور سرعت نور، به انرژی عظیمی تبدیل می‌شود.

کدام هسته پایدارتر است؟

اکنون که مفهوم انرژی بستگی را می‌شناسیم، می‌توانیم پایداری هسته‌ها را با یکدیگر مقایسه کنیم. مقایسه مستقیم انرژی بستگی کل، معیار دقیقی نیست؛ زیرا هسته‌های بزرگ‌تر به‌طور طبیعی انرژی بیشتری دارند. به همین دلیل، از کمیتی به نام انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون استفاده می‌شود:

$$\frac{E_b}{A}$$

که در آن  $A = Z + N$  عدد جرمی یا تعداد کل نوکلئون‌هاست. این کمیت نشان می‌دهد که هر پروتون یا نوترون به طور متوسط با چه شدتی به هسته چسبیده است.

داستانی که یک نمودار روایت می‌کند: اگر این مقدار را برای عناصر مختلف محاسبه و بر حسب عدد جرمی  $A$  رسم کنیم، به منحنی‌ای معروف می‌رسیم که "نمودار انرژی بستگی" یا "منحنی استون" نام دارد.



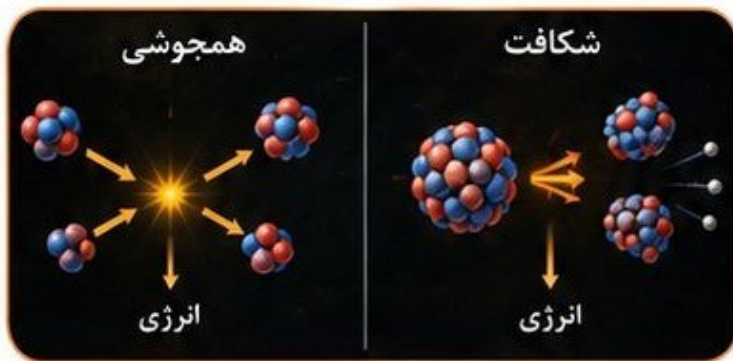
این منحنی، داستان پایداری ماده در جهان را روایت می‌کند:

در هسته‌های بسیار سبک (هلیوم)، منحنی نوسانات شدیدی دارد. هلیوم ۴ با انرژی بستگی حدود  $7.07\text{MeV}$  به ازای هر نوکلئون، نسبت به همسایگان خود یک جزیره پایداری محسوب می‌شود. با سنگین‌تر شدن هسته‌ها، منحنی به آرامی بالا می‌رود تا اینکه در عدد جرمی حدود ۵۶ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این نقطه متعلق به آهن-۵۶ است با مقدار  $8.79\text{MeV}$  به ازای هر نوکلئون. آهن-۵۶ پایدارترین هسته در کل طبیعت است. پس از این نقطه، با سنگین‌تر شدن هسته‌ها، منحنی به تدریج رو به کاهش می‌گذارد. برای مثال، اورانیوم-۲۳۸ که یکی از سنگین‌ترین عناصر طبیعی است، انرژی بستگی حدود  $7.57\text{MeV}$  به ازای هر نوکلئون دارد.

و این شاید عمیق‌ترین درسی باشد که فیزیک هسته‌ای به ما می‌دهد: جهان، در بنیادی‌ترین سطح خود، بیش از آنکه از "ماده" ساخته شده باشد، از انرژی و تعادل ظریف آن شکل گرفته است. همه عناصر دیگر، چه سبک‌تر و چه سنگین‌تر، تمایل دارند دیر یا زود خود را به

آهن نزدیک کنند. این تمایل به این دلیل است که آهن در نقطه‌ای از نمودار قرار دارد که بیشترین انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون را دارد و در نتیجه پایدارترین حالت هسته‌ای محسوب می‌شود.

به کمک این نمودار پی می‌بریم که دو راه اصلی برای تولید انرژی هسته‌ای وجود دارد:



همجوشی برای هسته‌های سبک‌تر از آهن و شکافت برای هسته‌های سنگین‌تر از آهن. در هر دو حالت، هسته‌ها با حرکت به سمت ناحیه‌ای پایدارتر، بخشی از انرژی خود را آزاد می‌کنند.

هسته پایدار زمانی تشکیل می‌شود که برآیند این نیروها (نیروی هسته‌ای قوی و ضعیف و کولنی) به یک "چاه پتانسیل" عمیق و پایدار منجر شود. در هسته‌های سبک، نیروی قوی بر دافعه کولنی غلبه می‌کند، اما هنوز به بیشترین میزان چسبندگی نرسیده است. در هسته‌های متوسط (مانند آهن)، نسبت نوترون به پروتون به حالت بهینه نزدیک می‌شود و نیروی قوی بیشترین اثر خود را نشان می‌دهد. در هسته‌های سنگین، دافعه کولنی بین پروتون‌های زیاد به تدریج اثر نیروی قوی را کاهش می‌دهد و هسته را ناپایدارتر می‌کند. به همین دلیل، این هسته‌ها تمایل دارند از طریق واپاشی یا شکافت به هسته‌های سبک‌تر

تبدیل شوند. در نهایت، هر هسته در جهان، از سبک‌ترین تا سنگین‌ترین، در پی رسیدن به بیشترین انرژی بستگی و بیشترین پایداری است؛ حالتی که در آن تعادل بین نیروهای درون هسته به بهترین شکل برقرار شده باشد.

مسیرکشفیات هسته‌ای، تنها به درک عمیق‌تر طبیعت ختم نشد؛ بلکه جهان انسان را نیز دگرگون کرد. این مسیر از یک سو به ساخت نخستین راکتورهای هسته‌ای و در نهایت تولید بمب اتم انجامید و از سوی دیگر، دریچه‌ای به کاربردهای صلح‌آمیز گشود پزشکی هسته‌ای، پرتودرمانی، تصویربرداری، تعیین قدمت آثار باستانی با کربن-۱۴ و حتی فهم سازوکار ستارگان.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

## سفر به دل هسته ؛ از پرتوزایی تا

### پزشکی هسته‌ای



در مرکز هر اتم، هسته‌ای کوچک، بسیار چگال و سرشار از انرژی نهفته است؛ هسته‌ای که از پروتون‌ها و نوترون‌ها ساخته شده و پایداری آن به تعادلی ظریف میان نیروهای بنیادی طبیعت وابسته است. از یک سو، نیروی هسته‌ای قوی نوکلئون‌ها را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد و از سوی دیگر، دافعه‌ی الکتریکی میان پروتون‌ها می‌کوشد آن‌ها را از هم دور کند. هرگاه این تعادل بر هم بخورد، هسته ناپایدار می‌شود و برای رسیدن به وضعیتی پایدارتر، بخشی از انرژی یا ذرات خود را آزاد می‌کند. این فرایند همان چیزی است که آن را **پرتوزایی** یا **واپاشی رادیواکتیو** می‌نامیم.

واپاشی هسته‌ای در مقیاس تک‌اتمی پدیده‌ای تصادفی است؛ به این معنا که نمی‌توان پیش‌بینی کرد یک هسته‌ی مشخص دقیقاً در چه لحظه‌ای واپاشی خواهد کرد. با این حال، هنگامی که با تعداد بسیار زیادی هسته سروکار داریم، رفتار جمعی آن‌ها کاملاً منظم و آماری می‌شود و از قانون نمایی پیروی می‌کند:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

که در آن  $N_0$  تعداد اولیه‌ی هسته‌ها،  $N(t)$  تعداد هسته‌های باقی‌مانده در

زمان  $t$ ، و  $\lambda$  ثابت واپاشی است. این رابطه نشان می‌دهد که مقدار ماده‌ی

پرتوزا با گذشت زمان به تدریج و با آهنگی منظم کاهش می‌یابد. همین نظم آماری، با وجود تصادفی بودن رفتار تک‌هسته‌ها، یکی از زیباترین ویژگی‌های فیزیک هسته‌ای است.

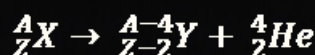
### گونه‌های اصلی واپاشی پرتوزا

هسته‌های ناپایدار معمولاً از سه مسیر اصلی به سوی پایداری حرکت می‌کنند: واپاشی آلفا، واپاشی بتا و تابش گاما. هر یک از این فرایندها سازوکار، ویژگی و کاربرد خاص خود را دارند.



## ۱. واپاشی آلفا

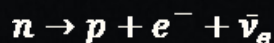
در واپاشی آلفا، هسته یک ذره آلفا - یعنی هسته اتم هلیوم شامل دو پروتون و دو نوترون - گسیل می‌کند. این نوع واپاشی بیشتر در هسته‌های سنگین دیده می‌شود:



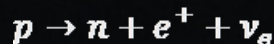
ذره آلفا نسبتاً سنگین و دارای بار مثبت است، از این رو در ماده برد بسیار کمی دارد و حتی با یک برگ کاغذ یا لایه‌ی بیرونی پوست متوقف می‌شود. با این حال، اگر ماده‌ی آلفا وارد بدن شود، می‌تواند بسیار خطرناک باشد؛ زیرا انرژی خود را در حجمی بسیار کوچک از بافت تخلیه می‌کند. بنابراین، کم‌نفوذ بودن آلفا به معنای بی‌خطر بودن آن نیست، بلکه خطر آن به شرایط مواجهه بستگی دارد.

## ۲. واپاشی بتا

در واپاشی بتا، ترکیب درونی هسته تغییر می‌کند. در **بتای منفی**، یک نوترون به پروتون تبدیل می‌شود و یک الکترون به همراه پادنوترینوی الکترونی گسیل می‌گردد:



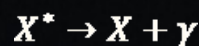
و در **بتای مثبت**، یک پروتون به نوترون تبدیل می‌شود و یک پوزیترون به همراه نوترینوی الکترونی آزاد می‌شود:



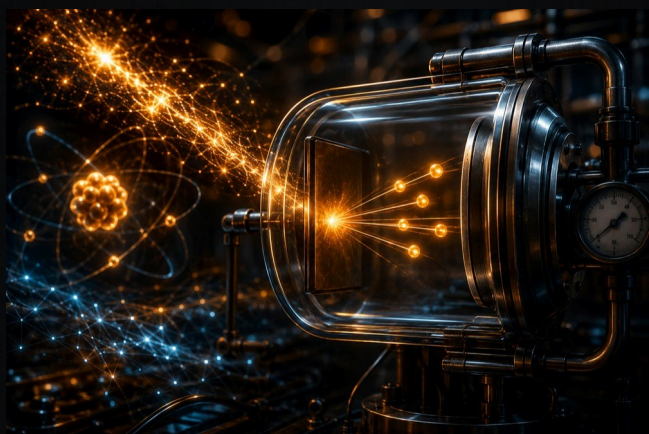
پرتو بتا از آلفا نفوذپذیرتر است، اما هنوز با چند میلی‌متر فلز یا مواد سبک قابل مهار است. ایزوتوپ‌های بتا را در پژوهش، صنعت و برخی روش‌های تصویربرداری پزشکی نقش مهمی دارند. به‌ویژه در فناوری PET، گسیل پوزیترون اساس شکل‌گیری تصویر است.

## ۳. تابش گاما

تابش گاما، برخلاف آلفا و بتا، نه یک ذره مادی بلکه فوتونی بسیار پرانرژی است. هنگامی که هسته پس از یک واپاشی هنوز در حالت برانگیخته باشد، انرژی اضافی خود را به صورت پرتو گاما آزاد می‌کند:



پرتو گاما نه جرم دارد و نه بار، و همین ویژگی سبب می‌شود از قدرت نفوذ بسیار بالایی برخوردار باشد. به همین دلیل، برای مهار آن از موادی مانند سرب، بتن یا آب استفاده می‌شود. این نفوذپذیری زیاد، گاما را از یک سو به ابزاری ارزشمند در فناوری و پزشکی تبدیل کرده و از سوی دیگر، نیاز به حفاظت پرتویی دقیق را ضروری ساخته است.





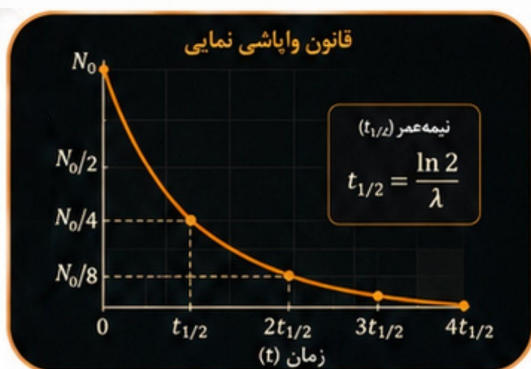
## نیمه‌عمر: ساعت درونی هسته‌ها

برای توصیف رفتار مواد پرتوزا، یکی از مهم‌ترین کمیت‌ها نیمه‌عمر است؛ یعنی زمانی که طی آن نیمی از هسته‌های یک نمونه واپاشی می‌کنند. نیمه‌عمر هر ایزوتوپ مقداری ثابت و ویژه همان هسته است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

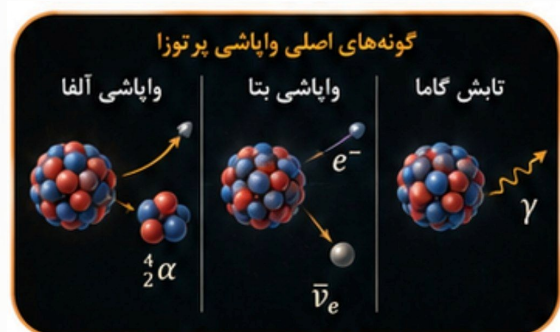
بر این اساس، قانون واپاشی را می‌توان به صورت دیگری نیز نوشت:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$



ویژگی مهم نیمه‌عمر آن است که به دما، فشار یا شرایط معمول محیط وابسته نیست. به همین سبب، ایزوتوپ‌های پرتوزا می‌توانند مانند نوعی "ساعت طبیعی" عمل کنند. این ویژگی در تاریخ‌گذاری آثار باستانی، سن‌سنجی سنگ‌ها و همچنین انتخاب رادیوداروهای مناسب برای پزشکی هسته‌ای اهمیت فراوان دارد. در واقع، از دل همین مفهوم است که پیوند میان فیزیک هسته‌ای و کاربردهای عملی آن آشکار می‌شود.

## برهم‌کنش پرتو با ماده



تابش‌های هسته‌ای پس از گسیل، در خلأ رها نمی‌مانند، بلکه هنگام عبور از ماده با آن برهم‌کنش می‌کنند. بسته به نوع و انرژی تابش، این برهم‌کنش می‌تواند به جذب، پراکندگی یا عبور پرتو بینجامد. شناخت این سازوکارها پایه‌ی آشکارسازی پرتو، طراحی حفاظ‌ها و نیز تصویربرداری پزشکی است. به بیان دیگر، اگر واپاشی هسته‌ای "تولید" پرتو باشد، برهم‌کنش پرتو با ماده "زبان خواندن" آن پرتو است.

### -اثر فوتوالکتریک

یکی از مهم‌ترین برهم‌کنش‌های فوتون با ماده، اثر فوتوالکتریک است. در این فرایند، فوتون تمام انرژی خود را به یک الکترون از لایه‌های داخلی اتم منتقل می‌کند و خود به‌طور کامل از بین می‌رود. الکترون نیز از اتم جدا می‌شود:

$$E_\gamma = E_k + E_b$$

که در آن،  $E_b$  انرژی بستگی الکترون و  $E_k$  انرژی جنبشی الکترون کنده‌شده است.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

اثر فوتوالکتریک بیشتر برای فوتون‌های کم‌انرژی و در موادی با عدد اتمی بالا رخ می‌دهد. اهمیت این پدیده در آن است که جذب پرتو را افزایش می‌دهد و اختلاف جذب میان بافت‌ها یا مواد مختلف را بهتر آشکار می‌کند. به همین دلیل، این اثر در تصویربرداری با پرتو ایکس، به‌ویژه در انرژی‌های پایین‌تر، نقش مهمی در ایجاد کنتراست تصویر دارد.

## -پراکندگی کامپتون

در **پراکندگی کامپتون**، فوتون بخشی از انرژی خود را به یک الکترون منتقل می‌کند و سپس با انرژی کمتر و در جهتی تازه به مسیر خود ادامه می‌دهد. این فرایند از عوامل مهم کاهش کیفیت تصاویر پرتوی است، زیرا فوتون‌های پراکنده می‌توانند به آشکارساز برسند و نویز ایجاد کنند. از همین رو، شناخت و کنترل پراکندگی کامپتون در طراحی سامانه‌های تصویربرداری اهمیت فراوانی دارد.

## -تولید جفت

اگر فوتونی انرژی بسیار زیادی، بیش از  $1.02\text{ MeV}$  داشته باشد، می‌تواند در میدان هسته به یک الکترون و یک پوزیترون تبدیل شود. این پدیده را **تولید جفت** می‌نامند. تولید جفت در فیزیک انرژی‌های بالا و نیز در فناوری PET اهمیت بنیادی دارد، زیرا بنیان فیزیکی بسیاری از فرآیندهای آشکارسازی در این روش را شکل می‌دهد.

## هسته‌ای در پزشکی چه می‌کند؟

تا اینجا، با زبان هسته‌ها و تابش‌ها آشنا شدیم؛ اما اهمیت این مفاهیم زمانی آشکارتر می‌شود که ببینیم چگونه از آن‌ها برای شناخت بدن انسان استفاده می‌شود. کاربرد هسته‌ای در پزشکی، پیش از هر چیز، بر یک ایده‌ی ساده و درخشان استوار است: **پرتو می‌تواند از درون بدن خبر بیاورد، بی‌آنکه نیازی به جراحی و گشودن بدن باشد.**

در پزشکی، مواد پرتوزا یا پرتوهای پرانرژی به دو صورت کلی به کار می‌روند. نخست، برای **بررسی عملکرد اندام‌ها و بافت‌ها**؛ یعنی اینکه یک عضو چگونه کار می‌کند، نه صرفاً چه شکلی دارد. برای مثال، می‌توان بررسی کرد که خون چگونه در قلب جریان می‌یابد یا یک بخش از بدن تا چه اندازه ماده‌ای خاص را جذب می‌کند. دوم، برای **تصویربرداری از ساختارهای داخلی بدن**؛ یعنی به دست آوردن تصویر از استخوان‌ها، بافت‌ها و اندام‌ها با استفاده از پرتوهای پرانرژی و آشکارسازی میزان عبور یا جذب آن‌ها.

نکته‌ی مهم آن است که پزشکی هسته‌ای تنها به "دیدن شکل" بدن محدود نمی‌شود، بلکه در بسیاری از موارد نشان می‌دهد که **درون بدن چه می‌گذرد**. به همین دلیل، برخی تغییرات بیماری‌زا را می‌توان پیش از آنکه در ظاهر بافت دیده شوند، شناسایی کرد.

### - ابزارها و روش‌های اصلی در پزشکی هسته‌ای و تصویربرداری پرتوی

برای آنکه این ایده‌ی کلی به عمل تبدیل شود، مجموعه‌ای از ابزارها و روش‌های دقیق در پزشکی هسته‌ای و تصویربرداری پرتوی به کار گرفته می‌شود.

#### ۱. رادیوداروها

نخستین ابزار، **رادیودارو** است؛ یعنی ماده‌ای که در آن یک ایزوتوپ پرتوزا با یک مولکول زیستی ترکیب می‌شود. این ماده پس از ورود به بدن، در اندام یا بافتی خاص تجمع می‌یابد و سپس پرتوی گسیل‌شده از آن توسط آشکارسازها ثبت می‌شود.

ویژگی مهم رادیوداروها این است که مقدارشان بسیار کم است، نیمه‌عمر مناسبی دارند و معمولاً طوری انتخاب می‌شوند که اطلاعات لازم را فراهم کنند و سپس نسبتاً سریع از بدن حذف شوند. از نمونه‌های مشهور آن می‌توان به **تکنسیوم-۹۹** در تصویربرداری تشخیصی و **فلوئور-۱۸** در PET اشاره کرد.

#### ۲. دوربین گاما و SPECT

اگر رادیودارو از خود پرتو گاما گسیل کند، این پرتوها با وسیله‌ای به نام **دوربین گاما** ثبت می‌شوند. در روش SPECT، آشکارساز پیرامون بدن می‌چرخد و از زوایای مختلف داده جمع‌آوری می‌کند؛ سپس رایانه از این داده‌ها تصویری سه‌بعدی می‌سازد.

این روش برای بررسی عملکرد اندام‌هایی مانند قلب، استخوان، تیروئید و برخی بخش‌های مغز بسیار کاربردی است. در اینجا نیز می‌بینیم که فیزیک تابش مستقیماً به زبان تشخیص پزشکی تبدیل می‌شود.



## ۳. PET

در روش PET، از موادی استفاده می‌شود که پوزیترون گسیل می‌کنند. پوزیترون پس از طی مسافتی کوتاه با یک الکترون برخورد می‌کند و هر دو نابود می‌شوند. حاصل این فرایند، دو فوتون گاما است که در دو جهت تقریباً مخالف گسیل می‌شوند. آشکارسازهای PET همین دو فوتون هم‌زمان را ثبت می‌کنند و از روی آن‌ها محل رخداد را تعیین می‌کنند.

PET به‌ویژه برای مطالعه‌ی سوخت‌وساز بافت‌ها، فعالیت سلولی و تشخیص نواحی غیرعادی در بدن اهمیت فراوان دارد. به همین دلیل، این روش در تشخیص برخی سرطان‌ها، بررسی عملکرد مغز و مطالعه‌ی فرایندهای زیستی بسیار ارزشمند است.

## ۴. سی‌تی‌اسکن

سی‌تی‌اسکن یا CT در معنای دقیق، جزو پزشکی هسته‌ای نیست؛ زیرا از ماده‌ی رادیواکتیو درون بدن استفاده نمی‌کند. با این حال، یکی از مهم‌ترین ابزارهای تصویربرداری پزشکی با پرتو به شمار می‌آید. در این روش، پرتو ایکس از زوایای مختلف از بدن عبور داده می‌شود و رایانه از داده‌های به‌دست‌آمده، تصاویر مقطعی دقیق می‌سازد.

CT بیشتر برای مشاهده‌ی ساختارهای آناتومیک به کار می‌رود و در بسیاری از موارد در کنار PET یا SPECT استفاده می‌شود تا اطلاعات ساختاری و عملکردی به‌طور هم‌زمان در اختیار پزشک قرار گیرد. این هم‌افزایی، دقت تشخیص را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

## ۵. آشکارسازها

در پس همه‌ی این روش‌ها، آشکارسازهای پرتو قرار دارند. این ابزارها انرژی تابش را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کنند تا پردازش رایانه‌ای امکان‌پذیر شود. بلورهای سوسوزن، لوله‌های فوتومولتی‌پلایر و آشکارسازهای نیمه‌رسانا از مهم‌ترین تجهیزات این حوزه‌اند. بدون این ابزارها، تابش‌های هسته‌ای هرگز به تصویر و داده‌ی قابل استفاده تبدیل نمی‌شدند.

## ۶. رایانه و بازسازی تصویر

تصویربرداری پرتو تنها به تولید و آشکارسازی تابش محدود نمی‌شود. بخش بزرگی از کار، به پردازش داده و بازسازی تصویر مربوط است. داده‌های ثبت‌شده از آشکارسازها با کمک الگوریتم‌های ریاضی به تصاویری تبدیل می‌شوند که پزشک بتواند آن‌ها را تفسیر کند. در واقع، بدون رایانه و روش‌های محاسباتی، بخش مهمی از پزشکی هسته‌ای امروز ممکن نبود.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکسیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## - چرا این روش‌ها مهم‌اند؟

مزیت اصلی فناوری هسته‌ای در پزشکی آن است که می‌تواند اطلاعاتی فراتر از تصویر ساده‌ی بافت‌ها در اختیار ما بگذارد. در بسیاری از روش‌های معمول، تنها شکل و اندازه‌ی اندام‌ها دیده می‌شود؛ اما در پزشکی هسته‌ای می‌توان عملکرد، مصرف ماده، توزیع خون و حتی فعالیت سلولی را نیز بررسی کرد. همین ویژگی سبب شده است این شاخه در تشخیص زودهنگام و ارزیابی دقیق بسیاری از بیماری‌ها جایگاهی اساسی پیدا کند.

پرتوزایی را می‌توان زبانی برخاسته از دل هسته‌ی اتم دانست؛ زبانی که با آلفا، بتا و گاما سخن می‌گوید. هسته‌های ناپایدار با واپاشی به سوی تعادل حرکت می‌کنند و در این مسیر، قوانینی دقیق و اندازه‌پذیر را آشکار می‌سازند؛ از قانون نمایی واپاشی و نیمه‌عمر گرفته تا برهم‌کنش‌هایی مانند اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید جفت.

اما اهمیت این پدیده تنها در قلمرو نظریه‌های هسته‌ای خلاصه نمی‌شود. همین تابش‌ها، اگر به‌درستی فهمیده و مهار شوند، به ابزار شناخت جهان و بدن انسان تبدیل می‌شوند. در پزشکی، فناوری هسته‌ای به ما امکان می‌دهد نه فقط درون بدن را ببینیم، بلکه از کارکرد پنهان اندام‌ها، بافت‌ها و سلول‌ها نیز آگاه شویم. از رادیوداروها و دوربین گاما تا PET و CT، همه نشان می‌دهند که فیزیک هسته‌ای تنها علم ذرات و انرژی نیست؛ بلکه دانشی است که از دل ناپایداری، امکان مشاهده، سنجش و فهم دقیق‌تر زندگی را فراهم می‌کند.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## تولد ایزوتوپ؛ چند عنصر در یک مکان



از بن بست دالتون تا راهکار سودی:

ایده اولیه جان دالتون در مورد اتم بر این پایه استوار بود که تمام اتم های یک عنصر از هر نظر، به ویژه از نظر جرم، کاملاً یکسان هستند. اما با پیشرفت روش های توزین در شیمی، این تصور با چالشی جدی رو به رو شد.

نتایج آزمایشگاهی نشان می داد که جرم اتمی بسیاری از عناصر، برخلاف انتظار دالتون، اعداد صحیح نیستند. برای نمونه، وزن اتمی فسفر به جای عدد صحیح ۳۱، مقدار ۳۰٫۷ را نشان می داد!

در اوایل قرن بیستم، کشف پدیده رادیواکتیویته این ابهام را به یک بحران علمی تبدیل کرد.

دانشمندان با انبوهی از محصولات واپاشی رادیواکتیو رو به رو شده بودند که خواص فیزیکی و نیمه عمر های متفاوتی داشتند. براساس دانش آن زمان، تصور می شد هر محصول با جرم متفاوت باید یک عنصر جدید باشد، اما این موضوع دو مشکل اساسی ایجاد کرد:

فضای کافی برای جای دادن این همه عنصر جدید در جدول نبود!

دانشمندان در تلاش برای جداسازی شیمیایی این مواد بودند که شکست میخوردند؛ گویی این مواد با وجود تفاوت در جرم و رفتار هسته ای، از نظر شیمیایی کاملاً یکسان بودند.

در سال ۱۹۱۳، فردریک سودی (Frederick Soddy) با پیوند دادن این دو چالش، راه حلی ساده و در عین حال باور نکردنی ارائه داد:

او دریافت که یک عنصر واحد میتواند اتم هایی با جرم های متفاوت داشته باشد. او این گونه ی مختلف را ایزوتوپ (یعنی هم مکان) نامید؛ چرا که آنها با وجود تفاوت در جرم اتمی، همگی در یک خانه از جدول تناوب قرار می گیرند





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## ● انواع ایزوتوپ:

### - ایزوتوپ های ناپایدار:

عناصر ناپایدار اصولاً رادیواکتیو هستند و طی زمان معین، به ایزوتوپ های گوناگون تبدیل می شوند. هسته های اتم های ناپایدار، دگر شکلی هایی را متحمل می شوند که با انتشار ذرات و انرژی تشعشعی همراه هستند. این فرایند به ظهور پدیده ای می انجامد که به آن رادیواکتیویته گفته می شود. رادیواکتیویته، ویژگی هسته های اتمی ناپایدار برای تبدیل شدن خود به خودی است که در جریان این فرآیند، انرژی همراه با انتشار پرتو های یونیزه آزاد می شود.

ایزوتوپ های پرتوزا دارای هسته هایی ناپایدار هستند که در مقیاس زمان به ایزوتوپ های دیگر متلاشی می شوند. این ایزوتوپ ها، در پزشکی برای تشخیص بیماری و درمان سرطان، در صنعت برای تست غیر مخرب لوله ها، اندازه گیری ضخامت مواد و حتی ضد عفونی کردن تجهیزات پزشکی کاربرد دارند و در انرژی، سوخت اصلی نیروگاه های اتمی هستند که انرژی زیادی نیز تولید می کند. حتی در تاریخ گذاری، با ایزوتوپ هایی مثل کربن ۱۴ می توانیم سن اشیاء باستانی و لایه های زمین را دقیق محاسبه کنیم.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## - ایزوتوپ های هیدروژن:

هیدروژن پروتیوم ( $^1_1H$ )، فراوان ترین ایزوتوپ هیدروژن است و ترکیب اصلی آب و تمام ترکیبات آلی را تشکیل می دهد.

هیدروژن دوتریوم ( $^2_1H$ )، در آب سنگین یافت می شود که به عنوان کند کننده نوترون در راکتور های هسته ای کاربرد دارد. همچنین در تحقیقات شیمیایی و بیوشیمیایی به عنوان ردیاب ایزوتوپی استفاده می شود.

هیدروژن تریتیوم ( $^3_1H$ )، رادیواکتیو است و نیمه عمر کوتاهی دارد. در واکنش های گداخت هسته ای (مثل: انرژی همجوشی) و به عنوان ردیاب در تحقیقات پزشکی و محیط زیستی استفاده می شود.

## - ایزوتوپ های کربن:

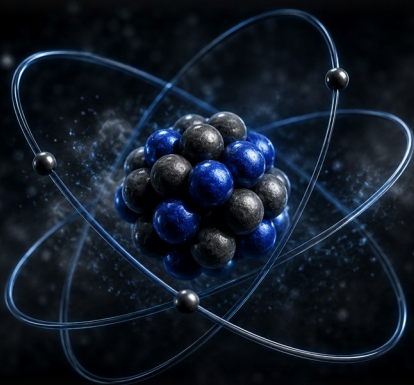
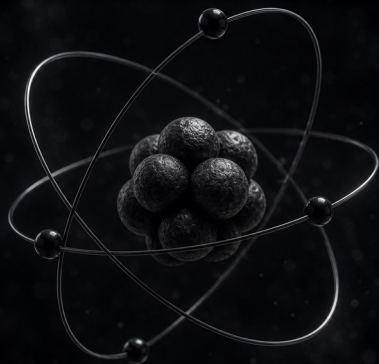
کربن ۱۲ ( $^{12}_6C$ )، فراوان ترین ایزوتوپ کربن است و به عنوان معیار برای سنجش جرم اتمی استفاده می شود.

کربن ۱۳ ( $^{13}_6C$ )، پایدار است و در تحقیقات بیوشیمیایی و علوم مواد به عنوان ردیاب ایزوتوپی کاربرد دارد.

کربن ۱۴ ( $^{14}_6C$ )، رادیواکتیو است و نیمه عمر حدود ۵۷۳۰ سال دارد. به دلیل واپاشی آن، کربن ۱۴ به طور گسترده ای برای تاریخ گذاری رادیومتری بقایای باستانی (مانند استخوان ها، چوب و پارچه) استفاده می شود.

## - ایزوتوپ کبالت:

ایزوتوپ کبالت-۶۰ ( $^{60}_{27}Co$ )، این ایزوتوپ رادیواکتیو است و پرتوهای گاما با انرژی بالا ساطع می کند. به دلیل خواص پرتوتابی اش، در پرتودرمانی برای درمان سرطان، استریل کردن تجهیزات پزشکی و مواد غذایی، و در صنعت، برای بازرسی غیرمخرب کاربرد دارد.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکيئون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## از سنگ معدن تا پرتوزایی: کشف اورانیوم



شیمیدان آلمانی مارتین کلاپروت در سال ۱۷۸۹ هنگام بررسی کانی سیاه پیچ بلند متوجه شد که پس از حل کردن آن در اسید نیتریک و خنثی سازی، رسوب سفید رنگی را به دست می آورد. او با حرارت دادن این رسوب، پودری سیاه را بدست آورد و گمان کرد که فلز جدیدی را یافته است و به افتخار سیاره اورانوس، آن را اورانیوم نامید. هر چند بعداً مشخص شد که آن پودر سیاه، اکسید اورانیوم بوده نه فلز...

پس از ۵۲ سال، اوژن پلیگوت، شیمیدان فرانسوی نشان داد که ماده کلاپروت یک اسید است و با حرارت دادن تتراکلرید اورانیوم در کنار پتاسیم، توانست برای نخستین بار فلز خالص اورانیوم را جدا کند.

در سال ۱۸۹۵ فیزیکدان فرانسوی هانری بکرل به صورت تصادفی، کانی حاوی اورانیوم را در معرض نور خورشید قرار داد که باعث درخشش مواد شد. نمونه را بر روی یک صفحه عکاسی پیچیده شده در کاغذ سیاه قرار داد. پس از باز کردن صفحه، او می توانست مشاهده کند که آیا تشعشع به کاغذ نفوذ کرده است یا خیر...

بکرل تصمیم به توسعه صفحه هایی گرفت که در جعبه خود با مواد معدنی اورانیوم بوده است. آنها در معرض نور خورشید قرار نگرفتند، اما به طور قابل توجهی صفحه ها توسط اورانیوم، بدون فعال سازی نور خورشید، تیره شده بودند! اورانیوم پرتو ها را خود به خود منتشر کرده بود و اینگونه، بکرل پرتوزایی اورانیوم را کشف کرد.



## ● غنی سازی چیست؟

غنی سازی اورانیوم که این روز ها زیاد اسمش را شنیده اید!

یکی از مراحل مهم چرخه سوخت هسته ای می باشد که خوب است کمی بیشتر درباره آن بدانیم. در این فرایند، درصد ایزوتوپ مورد نظر اورانیوم افزایش می یابد تا بتوان از آن در کاربرد های مختلف هسته ای استفاده کرد. به همین دلیل، توسعه روش های موثر و اقتصادی برای غنی سازی همواره یکی از موضوعات مهم در فناوری هسته ای بوده و هست.

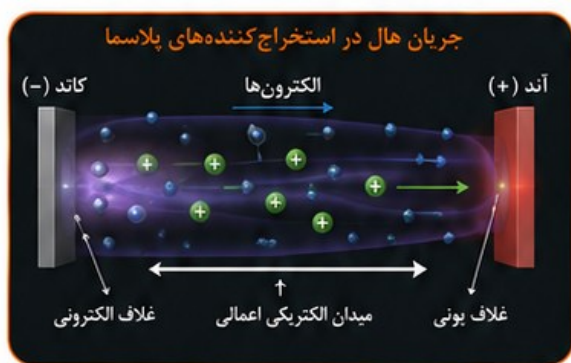
روش های مختلفی شامل نفوذ گازی، سانتریفیوژ گازی، آیرودینامیک، نفوذ جرمی، نفوذ حرارتی، لیزر و الکترومغناطیس اشاره کرد که با توجه به تنوع این روش ها، فقط دو روش نفوذ گازی و سانتریفیوژ گازی تاکنون در ابعاد صنعتی مورد استفاده قرار گرفته اند. در برخی منابع نسبتاً جدید، تفکیک ایزوتوپی اورانیوم، طی واکنش احیای میکروبی توسط برخی از باکتری های بی هوازی تایید و گزارش شده است. این یافته نشان می دهد که حتی فرایندهای زیستی نیز ممکن است در آینده به عنوان روشی بالقوه برای غنی سازی اورانیوم مورد توجه قرار گیرند. اما افق های تازه ای را در این زمینه پیش روی پژوهشگران قرار داده اند.

یکی از روش های نوینی که امروزه به غنی سازی اورانیوم در دستور کار برخی از کشور های پیشرفته دنیا قرار گرفته، روش AVLIS است. توجه به این روش از آن جهت اهمیت دارد که می تواند برخی محدودیت های روش های متداول را برطرف کند. این فناوری در صورت عملی شدن نه تنها امکان غنی سازی اورانیوم با درصد های بالا را فراهم می کند، بلکه به دلیل تک مرحله ای بودن، هزینه های اقتصادی مورد نیاز را تا حد بسیار زیادی کاهش می دهد.

در این روش که بر پایه جابجایی ایزوتوپی طیف جذبی اتم و یونش گزینشی ایزوتوپ های مطلوب استوار است، ابتدا شار اتمی غنی نشده عنصر مورد نظر، به وسیله پرتو های لیزری مناسب به طور گزینشی یونیزه می شود. سپس یون های تولید شده با اعمال میدان های الکتریکی و مغناطیسی مناسبی شتاب گرفته و از سیستم خارج می شوند.

در چنین استخراج کننده هایی که به جریان هال موسوم اند، به سبب قطبیده شدن پلاسما و تشکیل غلاف های یونی و الکترونی در مجاورت آند و کاتد، میدان الکتریکی خارجی اعمال شده به پلاسما به سرعت مهار می شود. بنابراین بخش زیادی از یون های تولید شده از شتاب گرفتن و در نتیجه خروج از سیستم، باز می مانند.

با وجود این محدودیت، مطالعات نظری نشان می دهد که اگر سرعت یون ها در لحظه مهار شدن میدان الکتریکی به مقدار مشخصی رسیده باشد، می توانند به طور دینامیکی از سیستم خارج شوند. این موضوع اهمیت کنترل شرایط فرایند استخراج را بیش از پیش نشان می دهد. از این رو یکی از روش های توسعه استخراج کننده مورد استفاده در غنی سازی لیزری اورانیوم، افزایش حداکثری سرعت یون ها تا قبل از مهار شدن میدان الکتریکی است.



برای رسیدن به این هدف، راهکار های متفاوتی از جمله حذف غلاف یونی، مغناطیسی کردن الکترون های پلاسمای تولید شده و همچنین افزایش اختلاف پتانسیل اعمال شده به الکترودها، در حین فرایند استخراج به کار گرفته می شود.

در مجموع، روش های نوین غنی سازی، به ویژه فناوری های مبتنی بر لیزر، از مهم ترین زمینه های پژوهشی در فناوری هسته ای محسوب می شوند. افزایش بازده، کاهش هزینه ها و بهبود فرایند جداسازی ایزوتوپ ها از جمله اهدافی است که پژوهشگران در توسعه این فناوری ها دنبال می کنند.



انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

## ● اورانیوم غنی شده کی به ایران رسید؟

حمله نظامی عراق در شهریور ۱۳۵۹ به ایران، حکومت تازه تأسیس شده جمهوری اسلامی را غافلگیر کرد. ایران از یک سو سلاح و تجهیزات کافی برای پاسخگویی به حملات موشکی عراق نداشت و از سوی دیگر در معرض تحریم تسلیحاتی و فناوری هایی با کاربرد دوجانه قرار گرفت.

این تجربه ناگوار، ایران را وادار به ساخت کرد تا بر توان داخلی تکیه کنند و راه خودکفایی را پی بگیرند. در دهه ۱۳۶۰، صدام آنی ترین خطر برای ایران بشمار می رفت اما پس از آن آمریکا جایگزین عراق شد.

این واقعیت ها تردیدی برای رزم دانشمندان ایرانی باقی نگذاشت که ایران در کنار تأمین بخشی از برق موردنیاز کشور از طریق نیروگاه هسته ای، باید کنترل چرخه سوخت هسته ای از اکتشاف و استخراج سنگ معدن اورانیوم تا غنی سازی و تولید سوخت هسته ای را در دست گیرد و برای ارتقای جایگاه منطقه ای و بین المللی و افزایش قدرت چانه زنی خود در معادلات جهانی، به فناوری غنی سازی اورانیوم دست یابد. با دستیابی به فناوری غنی سازی ایران میتواند راه تأمین مطمئن و پایدار سوخت راکتور و نیروگاه های اتمی را برای خود پدید آورد و از وابستگی خود به بیگانگان بکاهد.

این راهکار پاسخ به یک نیاز ملی بود تا هم جایگاه بین المللی ایران را بالا ببرد و هم بازدارندگی پایدار و قانونی را برای ایران فراهم کند همچنین ایران به دنبال بهره برداری از فناوری هسته ای صلح آمیز است تا بتواند از طریق آن پاسخگوی تأمین نیروگاه های برق هسته ای، کاربردهای پزشکی، صنعتی، کشاورزی، دارویی و... باشد و این راهی است که با آن بتواند تحریم های ظالمانه خود را مدیریت و استقلال خود را حفظ و با اتکا به نیروی جوان و متخصص خود این فناوری را در دستور کار خود قرار بدهد.

الگوی رفتاری ایران در سه دهه گذشته نشان میدهد که یکی از مهمترین اهداف آن از دست یابی به فناوری غنی سازی اورانیوم، تبدیل شدن به یک

قدرت هسته ای نهفته بوده است تا بدین گونه ضریب امنیت ملی خود را بالا برد و در چارچوب اختیارات و تعهدات خود در NPT بازدارندگی مشروع فراهم کند. در واقع با رسیدن به توانمندی حصار هسته ای، کشوردارنده فناوری غنی سازی اورانیوم، به طور بالقوه از دانش و توانایی ساخت سلاح هسته ای برخوردار است و تا رسیدن به بمب چند گام دیگر برایش مانده است اما در همان جا می ایستد و جلو تر نمی رود تا از آن به صورت صلح آمیز و صرفاً برای پاسخگویی به نیاز های کشور در عرصه مختلف استفاده کند.



فناوری  
صلح آمیز



کاربردهای  
پزشکی



کاربردهای  
صنعتی



کاربردهای  
کشاورزی



کاربردهای  
دارویی



نیروگاههای  
برق هسته ای



## داستان شکافت هسته‌ای؛ از آزمایشگاه تا انفجار



### کشف نوترون و گشوده‌شدن راه نفوذ به هسته:

در آغاز قرن بیستم، فیزیک‌دانان می‌دانستند که بیشتر جرم اتم در هسته‌ای کوچک و متمرکز است. با این حال، بار مثبت پروتون‌ها مانعی جدی برای نفوذ ذرات باردار به هسته ایجاد می‌کرد؛ زیرا نیروی دافعه الکترواستاتیکی اجازه نزدیک شدن آسان به هسته را نمی‌داد.

با کشف نوترون توسط جیمز چادویک، وضعیت تغییر کرد. نوترون ذره‌ای بدون بار الکتریکی بود و برخلاف پروتون یا ذرات آلفا، می‌توانست بدون مواجهه با دافعه الکتریکی به هسته نزدیک شود. این ویژگی، نوترون را به ابزاری ایده‌آل برای بررسی ساختار هسته و انجام واکنش‌های هسته‌ای تبدیل کرد.

دانشمندان دریافتند که برخورد نوترون با هسته عناصر سنگین می‌تواند ساختار آن‌ها را دگرگون کند. انریکو فرمی و گروهش در ایتالیا این ایده را به‌طور جدی دنبال کردند. آنان با بمباران عناصر مختلف، به‌ویژه اورانیوم، با نوترون‌ها تلاش کردند عناصر سنگین‌تر و ناشناخته‌تری تولید کنند.

اهمیت نوترون در این بود که هنگام ورود به هسته، آن را در وضعیتی ناپایدار قرار می‌داد. این ناپایداری می‌توانست به واپاشی یا تغییر ساختار هسته بینجامد؛ پدیده‌ای که بعدها اساس شکافت هسته‌ای شناخته شد. در کنار این پیشرفت علمی، پژوهشگران به‌تدریج دریافتند که انرژی نهفته در هسته اتم بسیار بیشتر از انرژی واکنش‌های شیمیایی معمولی است. همین موضوع، فیزیک هسته‌ای را از شاخه‌ای صرفاً پژوهشی به دانشی با پیامدهای صنعتی، پزشکی و نظامی تبدیل کرد.

### معمای اورانیوم

در اواخر دهه ۱۹۳۰، اتو هان و فریتس اشتراسمن در آلمان آزمایش‌هایی را بر روی اورانیوم انجام دادند. انتظار می‌رفت که بمباران اورانیوم با نوترون‌ها، عناصری سنگین‌تر از آن ایجاد کند؛ اما نتایج آزمایش‌ها شگفت‌آور بود. تحلیل شیمیایی نشان داد که یکی از محصولات واکنش، باریوم است؛ عنصری که جرم اتمی آن تقریباً نصف اورانیوم است.

این نتیجه با تصورات رایج فیزیک هسته‌ای سازگار نبود. چگونه ممکن بود هسته‌ای بسیار سنگین مانند اورانیوم به دو بخش کوچک‌تر تقسیم شود؟

لیزه مایتنر، فیزیک‌دان اتریشی، همراه با اتو فریش این پدیده را تفسیر کرد. آنان با استفاده از مدل "قطره مایع" توضیح دادند که هسته اتم می‌تواند پس از جذب نوترون، ناپایدار شود و سرانجام به دو بخش تقسیم گردد.

مایتنر برای توضیح انرژی عظیم آزادشده از رابطه معروف اینشتین استفاده کرد:  $E=mc^2$

قبلاً اشاره کردیم که مقدار کمی از نقص جرم می‌تواند در واکنش‌های هسته‌ای میلیون‌ها برابر پرانرژی‌تر از واکنش‌های شیمیایی باشد.

اصطلاح "شکافت هسته‌ای" اندکی بعد برای این پدیده انتخاب شد و مقاله مربوط به آن در سال ۱۹۳۹ منتشر گردید. دوره‌ای جدید شکل گرفت که در آن امکان بهره‌گیری از انرژی هسته‌ای، هم برای تولید برق و هم برای ساخت سلاح، به واقعیتی علمی تبدیل شد.



## ● زنجیره‌ای که جهان را تغییر داد

پس از کشف شکافت هسته‌ای، پرسش اصلی دانشمندان این بود که آیا این فرایند می‌تواند به‌صورت خودکار پایدار ادامه پیدا کند یا نه. بررسی‌ها نشان داد که هنگام شکافت هر هسته اورانیوم، چند نوترون جدید آزاد می‌شود. اگر این نوترون‌ها بتوانند هسته‌های دیگر را نیز بشکافند، واکنش به‌صورت زنجیره‌ای ادامه خواهد یافت.

در این میان، ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ اهمیت ویژه‌ای داشت؛ زیرا نسبت به جذب نوترون‌های کند حساس‌تر بود و احتمال شکافت در آن بسیار بیشتر از اورانیوم ۲۳۸ بود. هنگامی که تعداد کافی از هسته‌های شکافت‌پذیر در کنار هم قرار گیرند، "جرم بحرانی" شکل می‌گیرد و واکنش زنجیره‌ای به‌سرعت گسترش می‌یابد.

در راکتورهای هسته‌ای، این واکنش به‌طور کنترل‌شده انجام می‌شود. میله‌های کنترل با جذب بخشی از نوترون‌ها، سرعت واکنش را کاهش می‌دهند و از افزایش ناگهانی انرژی جلوگیری می‌کنند. اما در بمب اتمی، هدف دقیقاً برعکس است: ایجاد واکنشی بسیار سریع و کنترل‌نشده که در زمانی کوتاه انرژی عظیمی آزاد کند.

این تفاوت نشان می‌دهد که یک اصل علمی واحد می‌تواند دو کاربرد کاملاً متفاوت داشته باشد؛ از تولید انرژی برای شهرها گرفته تا ساخت مخرب‌ترین سلاح‌های تاریخ.

## ● از آزمایشگاه تا پروژه منهتن

با آغاز جنگ جهانی دوم، بسیاری از دانشمندان نگران بودند که آلمان زودتر از دیگر کشورها به سلاح هسته‌ای دست یابد. به همین دلیل، گروهی از فیزیک‌دانان از جمله آلبرت اینشتین و لئو زیلارد نامه‌ای به فرانکلین روزولت، رئیس‌جمهور آمریکا، نوشتند و درباره امکان ساخت بمب اتم هشدار دادند.

این هشدار سرانجام به شکل‌گیری "پروژه منهتن" انجامید؛ برنامه‌ای محرمانه که با همکاری صدها دانشمند و مهندس در آمریکا دنبال شد. هدف پروژه، دستیابی به واکنش زنجیره‌ای کنترل‌نشده و ساخت نخستین بمب هسته‌ای بود. دانشمندان این پروژه علاوه بر مسائل نظری، با چالش‌های مهندسی بزرگی روبه‌رو بودند؛ از غنی‌سازی اورانیوم ۲۳۵ گرفته تا طراحی سامانه‌ای که بتواند در کسری از ثانیه جرم بحرانی ایجاد کند. این تلاش‌ها سرانجام در سال ۱۹۴۵ به آزمایش "ترینیتی" و سپس استفاده از بمب اتمی در جنگ انجامید.



## آستانه عصر اتمی

آزمایش ترینیتی در ژوئیه ۱۹۴۵ نخستین نمایش عملی قدرت شکافت هسته‌ای بود. انفجار، نوری خیره‌کننده و موجی عظیم از انرژی آزاد کرد و نشان داد که نظریه‌های فیزیک هسته‌ای اکنون به فناوری واقعی تبدیل شده‌اند. چند هفته بعد، استفاده از بمب‌های اتمی در جنگ جهانی دوم، جهان را وارد عصر تازه‌ای کرد؛ عصری که در آن انرژی هسته‌ای به یکی از مهم‌ترین عوامل سیاسی، نظامی و علمی جهان بدل شد.



پس از جنگ، پژوهش درباره انرژی هسته‌ای تنها به کاربرد نظامی محدود نماند. بسیاری از کشورها به دنبال استفاده صلح‌آمیز از شکافت هسته‌ای رفتند. ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای، تولید برق در مقیاس عظیم و توسعه فناوری‌های پزشکی هسته‌ای از نتایج همین مسیر بود.

در عین حال، خطر گسترش سلاح‌های هسته‌ای و پیامدهای انسانی آن، بحث‌های اخلاقی و سیاسی گسترده‌ای را به وجود آورد. از این‌رو، شکافت هسته‌ای نه تنها یک مفهوم علمی، بلکه نیرویی اثرگذار در تاریخ معاصر شد؛ نیرویی که همچنان آینده جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

## هم‌دانشگاهی مسئولانه

داستان شکافت هسته‌ای نشان می‌دهد که علم تنها مجموعه‌ای از فرمول‌ها و آزمایش‌ها نیست؛ بلکه نیرویی است که می‌تواند به زندگی انسان‌ها خدمت کند یا به ابزاری برای ویرانی تبدیل شود. آنچه مسیر علم را تعیین می‌کند، صرفاً دانش نیست؛ بلکه نوع نگاه دانشمند و مسئولیتی است که در برابر جامعه احساس می‌کند. فرقی نمی‌کند در چه رشته‌ای تحصیل می‌کنی: فیزیک، شیمی، مهندسی، پزشکی، روان‌شناسی، هنر، علوم اجتماعی یا حقوق. آنچه امروز در دانشگاه می‌آموزی، فردا می‌تواند در قالب یک فناوری، پژوهش، سیاست‌گذاری، محصول یا روایت، بر زندگی انسان‌ها اثر بگذارد.

با این حال، یک برداشت نادرست از مفهوم تخصص در بسیاری از محیط‌های دانشگاهی رواج یافته است: اینکه متخصص باید تنها در محدوده رشته خود فعالیت کند و نسبت به سایر حوزه‌ها بی‌تفاوت باشد.

اما دقیقاً همین نگاه می‌تواند ما را از دیدن پیامدهای تصمیم‌هایمان دور کند اگر مهندس باشی و به تو گفته شود که مسائل حکمرانی، اخلاق یا جامعه به تو ارتباطی ندارد، باید به خاطر داشته باشی که فناوری بدون درک پیامدهای انسانی و اجتماعی آن، ناخواسته آسیب می‌آفریند.

اگر در علوم انسانی تحصیل می‌کنی و تصور می‌شود که نیازی به فهم مسائل فنی نداری، باید بدانی که نقد اجتماعی بدون شناخت فناوری و علم معاصر، ناقص خواهد بود.

در هر رشته‌ای که باشی، اگر تنها به تخصص خود بسنده کنی، ممکن است از آثار انسانی، اجتماعی و جهانی فعالیتت غافل بمانی.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

# تاکیون

شماره ۲ | تیرماه ۱۴۰۵

## داستان گداخت هسته‌ای؛ از قلب ستارگان تا آزمایشگاه‌های زمین



### راز در قلب خورشید

هزاران سال، انسان به آسمان شب نگاه می‌کرد و می‌پرسید: خورشید از چه می‌سوزد؟ این نور و گرمای عظیم از کجا تأمین می‌شود؟

در نگاه نخست، شاید پاسخ ساده به نظر برسد؛ اما محاسبات نشان می‌داد اگر خورشید از سوخت‌های شیمیایی متعارف تشکیل شده بود، تنها چند هزار سال دوام می‌آورد، نه میلیارد‌ها سالی که اخترشناسان برای عمر آن برآورد می‌کردند.

در سال ۱۹۲۰، آرتور ادینگتون، اخترفیزیک‌دان بریتانیایی، پاسخی جسورانه ارائه کرد. او پیشنهاد داد که منبع انرژی ستارگان فرایندی است که بعدها "گداخت هسته‌ای" نام گرفت.

ادینگتون استدلال کرد که در اعماق خورشید، هسته‌های هیدروژن با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته‌های هلیوم را تشکیل می‌دهند. در این فرایند، بخشی از جرم اولیه به انرژی تبدیل می‌شود؛ همان ایده‌ای که با معادله مشهور اینشتین بیان می‌شود:

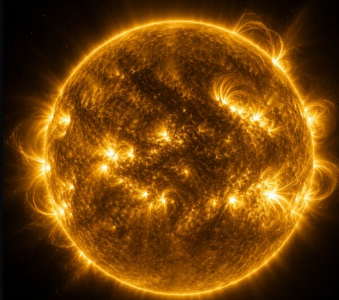
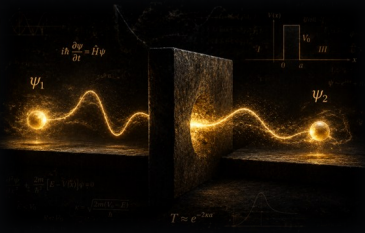
$$E = mc^2$$

بر اساس این رابطه، حتی مقدار اندکی کاهش جرم می‌تواند انرژی عظیمی آزاد کند؛ انرژی‌ای که خورشید را برای میلیارد‌ها سال روشن نگه داشته است.

اما ایده ادینگتون با یک پرسش اساسی روبه‌رو بود: چگونه هسته‌های هیدروژن، با وجود بار مثبت، می‌توانند بر دافعه الکتریکی میان خود غلبه کرده و به اندازه کافی به هم نزدیک شوند؟

پاسخ این معما را مکانیک کوانتومی ارائه کرد. در مرکز خورشید، دما به حدود ۱۵ میلیون درجه سانتی‌گراد می‌رسد و پروتون‌ها انرژی جنبشی بسیار بالایی دارند؛ با این حال، حتی این دما نیز برای عبور کامل از سد کولنی کافی نیست.

اینجاست که پدیده "تونل‌زنی کوانتومی" وارد صحنه می‌شود. این پدیده به ذرات اجازه می‌دهد با احتمال اندکی از سد عبور کنند که از دیدگاه فیزیک کلاسیک، عبور از آن ناممکن است. بدون تونل‌زنی کوانتومی، گداخت هسته‌ای در ستارگان آغاز نمی‌شد و جهان به شکل کنونی وجود نداشت.



## معادله ستارگان

در سال ۱۹۲۹، رابرت اتکینسون و فریتس هوترمانس با بهره‌گیری از نظریه تونل‌زنی کوانتومی نشان دادند که چگونه واکنش‌های گداختی می‌توانند در دماهای ستاره‌ای رخ دهند. این پژوهش حلقه اتصال میان ایده ادینگتون و فیزیک هسته‌ای مدرن بود.

در همان سال‌ها، آزمایش‌های هسته‌ای نیز به تدریج وارد مرحله‌ای تازه شدند. در سال ۱۹۳۲، مارک اولیفانت با استفاده از ایزوتوپ‌های سنگین هیدروژن، موفق شد واکنش‌های گداختی را در آزمایشگاه مشاهده کند و ایزوتوپ‌های هلیوم-۳ و تریتیوم را شناسایی کند. این نخستین نمایش مستقیم گداخت هسته‌ای در محیط آزمایشگاهی بود.

چند سال بعد، هانس پته سازوکار تولید انرژی در ستارگان را به صورت نظری و کمی فرمول‌بندی کرد. او نشان داد که در ستارگانی مانند خورشید، زنجیره پروتون - پروتون مسیر اصلی تولید انرژی است؛ در حالی که در ستارگان پرچرم‌تر، چرخه کربن - نیتروژن - اکسیژن نقش غالب را ایفا می‌کند.

در هر دو مسیر، نتیجه نهایی یکسان است: تبدیل هیدروژن به هلیوم و آزاد شدن مقدار عظیمی انرژی. نکته مهم آن است که گداخت در خورشید فرایندی بسیار آهسته است. یک پروتون ممکن است میلیون‌ها یا حتی میلیاردها سال منتظر بماند تا در یک واکنش گداختی شرکت کند. همین کندی است که عمر طولانی ستارگان را تضمین می‌کند.

## رؤیای گداخت روی زمین

بازآفرینی شرایط مرکز خورشید روی زمین کار ساده‌ای نیست. اگرچه چگالی ماده در خورشید بسیار بیشتر از محیط‌های معمولی است، اما پلاسماهای آزمایشگاهی چگالی بسیار کمتری دارند. برای جبران این موضوع، باید دما را به بیش از ۱۰۰ میلیون درجه سانتی‌گراد رساند.

در دهه ۱۹۵۰، هم‌زمان با توسعه بمب‌های هیدروژنی، ایده استفاده صلح‌آمیز از گداخت هسته‌ای برای تولید برق شکل گرفت. مناسب‌ترین واکنش برای این هدف، گداخت دوتریوم و تریتیوم است؛ زیرا در مقایسه با سایر واکنش‌های گداختی، در دماهای پایین‌تری رخ می‌دهد و انرژی قابل‌توجهی آزاد می‌کند.

چالش اصلی این بود که در چنین دماهایی، ماده به حالت پلاسما درمی‌آید؛ حالتی که در آن الکترون‌ها از هسته‌ها جدا شده‌اند و گازی از ذرات باردار تشکیل می‌شود. هیچ ماده جامدی توان تحمل تماس مستقیم با چنین پلاسماهایی را ندارد. بنابراین، دانشمندان به دنبال روش‌هایی برای محصورسازی پلاسما بدون تماس فیزیکی رفتند.



## - دو مسیر برای مهار آتش ستارگان

با آشکار شدن امکان گداخت هسته‌ای روی زمین، چالش اصلی دیگر آغاز واکنش نبود؛ بلکه حفظ و کنترل پلاسمایی بود که در دماهای ده‌ها میلیون درجه‌ای شکل می‌گرفت. برای حل این مسئله، دو رویکرد اصلی توسعه یافت.

### ۱. محصورسازی مغناطیسی

از آنجا که پلاسما از ذرات باردار تشکیل شده است، می‌توان با استفاده از میدان‌های مغناطیسی قوی مسیر حرکت آن را کنترل کرد و از برخوردش با دیواره‌های راکتور جلوگیری نمود.

در دهه ۱۹۵۰، ایگور تام و آندری ساخاروف در اتحاد جماهیر شوروی طرح «توکامک» را پیشنهاد کردند؛ محفظه‌ای حلقه‌ای شکل که در آن میدان‌های مغناطیسی پیچیده، پلاسما را در مسیری بسته به دام می‌اندازند. توکامک به تدریج به موفق‌ترین طرح محصورسازی مغناطیسی تبدیل شد و امروزه نیز مبنای بسیاری از پروژه‌های بزرگ گداخت در جهان است.

در ایالات متحده، لایمن اسپیتزر طرح دیگری با نام «استراتور» را توسعه داد. اگرچه طراحی استراتور پیچیده‌تر از توکامک است، اما مزیت آن در پایداری بیشتر و کاهش برخی از ناپایداری‌های ذاتی پلاسماست.

### ۲. محصورسازی لختی

رویکرد دوم بر پایه فشرده‌سازی بسیار سریع گداختی استوار است. در این روش، کپسول‌های کوچکی از سوخت دوتریوم - تریتیوم با لیزرهای فوق‌العاده پرقدرت یا پرتوهای یونی از همه جهات بمباران می‌شوند.

در اثر این فرایند، لایه بیرونی کپسول به سمت خارج منبسط می‌شود و مطابق قانون سوم نیوتن، بخش داخلی با فشاری عظیم به سمت مرکز فشرده می‌شود. اگر این فشردگی به اندازه کافی زیاد باشد، شرایط لازم برای وقوع گداخت پیش از پراکنده شدن سوخت فراهم خواهد شد.

صرف‌نظر از روش محصورسازی، همه سامانه‌های گداخت با یک معیار بنیادی سنجیده می‌شوند: **معیار لاوسون**. این معیار بیان می‌کند که برای آن‌که یک راکتور گداختی به نقطه سربه‌سر انرژی برسد، حاصل‌ضرب چگالی پلاسما، زمان محصورسازی و دما باید از مقدار مشخصی فراتر رود. به همین دلیل، معیار لاوسون همچنان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های موفقیت در پژوهش‌های گداخت هسته‌ای است.



## از رقابت نظامی تا همکاری جهانی

در سال‌های نخست پس از جنگ جهانی دوم، پژوهش‌های مرتبط با گداخت هسته‌ای به دلیل ارتباط نزدیک با برنامه‌های تسلیحاتی، عمدتاً محرمانه بودند. کشورها تلاش می‌کردند دستاوردهای خود را پنهان نگه دارند و همکاری علمی گسترده‌ای در این زمینه وجود نداشت.

این وضعیت در سال ۱۹۵۸ و با برگزاری کنفرانس «اتم برای صلح» تغییر کرد. برای نخستین بار، بخش مهمی از نتایج پژوهش‌های گداخت هسته‌ای به صورت عمومی منتشر شد و دانشمندان کشورهای مختلف توانستند یافته‌های خود را با یکدیگر به اشتراک بگذارند.

به تدریج روشن شد که دستیابی به انرژی گداختی کنترل‌شده، چالشی فراتر از توان یک کشور است و نیازمند همکاری‌های گسترده بین‌المللی خواهد بود. در سال ۱۹۸۵، میخائیل گورباچف و رونالد ریگان ایده یک همکاری جهانی برای توسعه فناوری گداخت را مطرح کردند. نتیجه این ابتکار، شکل‌گیری پروژه «ITER» بود؛ بزرگ‌ترین پروژه گداخت هسته‌ای جهان که در جنوب فرانسه در حال ساخت است.

هدف ITER آن است که برای نخستین بار امکان تولید پایدار انرژی گداختی را در مقیاسی نزدیک به کاربرد صنعتی نشان دهد. این راکتور برای تولید حدود ۵۰۰ مگاوات توان گداختی طراحی شده و یکی از بزرگ‌ترین همکاری‌های علمی تاریخ بشر به شمار می‌رود.

## مسیری که همچنان ادامه دارد

با وجود دهه‌ها پیشرفت علمی و مهندسی، گداخت هسته‌ای هنوز با چالش‌های مهمی روبه‌رو است.

نخستین چالش، تأمین سوخت تریتیوم است. این ایزوتوپ در طبیعت بسیار کمیاب است و باید در داخل راکتور، از طریق واکنش‌های هسته‌ای با لیتیموم تولید شود.

چالش دوم به مواد سازنده راکتور مربوط می‌شود. دیواره‌های راکتور باید بتوانند سال‌ها در برابر بمباران مداوم نوترون‌های پرانرژی مقاومت کنند؛ شرایطی که می‌تواند ساختار بسیاری از مواد را تخریب کند.

در کنار این مسائل، گداخت باید از نظر اقتصادی نیز رقابت‌پذیر شود. حتی اگر تولید انرژی گداختی از نظر فنی امکان‌پذیر باشد، تا زمانی که هزینه آن با سایر منابع انرژی قابل رقابت نباشد، استفاده گسترده از آن دشوار خواهد بود.

بسیاری از پژوهشگران امیدوارند که در دهه‌های آینده، نخستین نیروگاه‌های تجاری گداخت به شبکه برق متصل شوند. با این همه، اهمیت گداخت تنها در تولید برق خلاصه نمی‌شود. این فناوری نماد تلاش بشر برای بازآفرینی همان فرایندی است که میلیاردها سال است در قلب ستارگان جریان دارد؛ فرایندی که نور خورشید و در نهایت امکان شکل‌گیری حیات بر روی زمین را فراهم کرده است.

گداخت هسته‌ای شاید هنوز راهی طولانی تا بلوغ صنعتی در پیش داشته باشد، اما هر گام در این مسیر، مرزهای دانش و توانایی انسان را جابه‌جا می‌کند و ما را یک قدم به رؤیای مهار انرژی ستارگان نزدیک‌تر می‌سازد.



## راکتورهای هسته‌ای: قلب تپنده تولید انرژی



راکتور هسته‌ای وسیله‌ای است که در آن انرژی عظیم نهفته در دل اتم‌ها، به صورت کنترل‌شده و آرام آزاد می‌شود. این انرژی به شکل گرمای شدید ظاهر می‌شود و از آن برای تولید برق، به حرکت درآوردن کشتی‌های غول‌پیکر، یا تولید داروهای رادیواکتیو استفاده می‌شود.

انسان همیشه به دنبال منبعی از انرژی بوده که هم چگال باشد (با حجم کم انرژی زیادی بدهد) و هم بی‌وقفه کار کند. یک کامیون زغال‌سنگ برای کارکرد یک نیروگاه یک روز کافی است، در حالی که یک قرص اورانیوم به اندازه یک انگشت‌شست می‌تواند به اندازه یک تن نفت انرژی تولید کند. از طرفی، راکتورهای هسته‌ای در زمان کارکرد عادی، دی‌اکسید کربن منتشر نمی‌کنند، بنابراین برای مقابله با تغییرات اقلیمی گزینه‌ای مهم محسوب می‌شوند.

درون قلب راکتور، میله‌هایی از جنس اورانیوم غنی‌شده قرار دارند. وقتی نوترون‌ها به هسته اتم‌های اورانیوم برخورد می‌کنند، آن اتم‌ها می‌شکنند (شکافت) و انرژی حرارتی و چند نوترون جدید آزاد می‌شود. این نوترون‌های جدید دوباره اتم‌های دیگر را می‌شکنند و یک واکنش زنجیره‌ای شکل می‌گیرد. تفاوت راکتور با بمب اتم در کنترل است: در راکتور، میله‌های جاذب نوترون، سرعت واکنش را طوری تنظیم می‌کنند که هر ثانیه فقط به اندازه نیاز ما گرما تولید شود. به این می‌گویند شکافت کنترل‌شده.

در واقع هدف یک راکتور هسته‌ای، تبدیل «جرم» اتم به «انرژی» بر اساس معادله مشهور انیشتین ( $E=mc^2$ ) است، اما به صورتی آرام، ایمن و سودمند. امروزه بیش از ۴۰۰ راکتور در جهان برق شهرها را روشن نگه داشته‌اند و راکتورهای پژوهشی نیز در بیمارستان‌ها و آزمایشگاه‌ها جان انسان‌ها را نجات می‌دهند.

### - مشخصات راکتور:

۱. قلب راکتور: مرکز تولید انرژی است. در این ناحیه، واکنش زنجیره‌ای شکافت رخ می‌دهد و گرمای عظیم تولید می‌شود. قلب از مجموعه‌ای از مجموعه‌های سوخت تشکیل شده که در کنار هم چیده شده‌اند. هر مجموعه سوخت شامل ده‌ها میله سوخت است. بین این میله‌ها، فضاهایی برای قرارگیری میله‌های کنترل و عبور خنک‌کننده وجود دارد.

نحوه فعالیت: نوترون‌ها در قلب به سوخت برخورد می‌کنند، شکافت انجام می‌شود، نوترون‌های جدید تولید می‌شوند، و واکنش زنجیره‌ای ادامه می‌یابد. حرارت حاصل، میله‌های سوخت را داغ می‌کند و خنک‌کننده که در اطراف آن‌ها جریان دارد، گرما را می‌رباید. دمای مرکز یک قرص سوخت می‌تواند به بیش از ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد، در حالی که پوسته آن حدود ۳۰۰-۴۰۰ درجه است.

### ۲. سوخت هسته‌ای

سوخت ماده‌ای است که حاوی اتم‌های شکافت‌پذیر مانند اورانیوم-۲۳۵ یا پلوتونیوم-۲۳۹ است. در راکتورهای معمولی، سوخت به شکل قرص‌های کوچک دی‌اکسید اورانیوم ( $UO_2$ ) ساخته می‌شود. این قرص‌ها درون لوله‌های بلند و باریکی از جنس زیرکالوی قرار می‌گیرند که به آن پوسته می‌گویند.



کندکننده ماده‌ای است که سرعت نوترون‌های سریع را کاهش می‌دهد تا به نوترون گرمایی تبدیل شوند. نوترون گرمایی احتمال شکافت اورانیوم-۲۳۵ را صدها برابر بیشتر از نوترون سریع دارد. کندکننده معمولاً از اتم‌های سبک (هیدروژن، دوتریوم، کربن) تشکیل شده است که با برخورد الاستیک، انرژی نوترون را می‌گیرند بدون اینکه خودشان نوترون را جذب کنند.

نحوه فعالیت: در راکتورهای آب سبک BWR PWR، خود آب هم نقش کندکننده را دارد. اتم‌های هیدروژن آب تقریباً هم‌جرم نوترون هستند و در هر برخورد، انرژی زیادی از نوترون می‌گیرند. در راکتورهای CANDU (آب سنگین)، کندکننده آب سنگین (D<sub>2</sub>O) است که جذب نوترون بسیار کمی دارد و امکان استفاده از اورانیوم طبیعی را فراهم می‌کند.

. خنک‌کننده

خنک‌کننده ماده‌ای است که گرمای تولید شده در قلب را به خارج از راکتور منتقل می‌کند تا از ذوب شدن سوخت جلوگیری کند و در نهایت این گرما برای تولید بخار و چرخاندن توربین استفاده شود. خنک‌کننده می‌تواند آب (سبک یا سنگین)، گاز (هلیوم یا CO<sub>2</sub>)، یا فلز مایع (سدیم، سرب-بیسموت) باشد.

## ● انواع راکتور: بررسی راکتور آب تحت فشار

رایج‌ترین نوع راکتور قدرت در جهان، راکتور آب تحت فشار (PWR) است که حدود دو سوم راکتورهای فعال جهان را شامل می‌شود. در این راکتور، آب به‌طور هم‌زمان نقش خنک‌کننده و کندکننده را ایفا می‌کند. آب مدار اولیه تحت فشار حدود ۱۵۵ بار نگه داشته می‌شود تا در دمای حدود ۳۱۵ درجه سانتی‌گراد به جوش نیاید. این آب داغ در مولد بخار (مبدل حرارتی لوله لوله پوسته) گرمای خود را به مدار ثانویه منتقل می‌کند. در مدار ثانویه آب به بخار تبدیل شده، توربین را می‌چرخاند و پس از عبور از کندانسور دوباره به آب تبدیل می‌شود.

مزیت مهم PWR این است که سیال رادیواکتیو مدار اولیه هرگز با توربین یا محیط بیرونی تماس مستقیم ندارد.

انواع دیگر شامل:

BWR (راکتور آب جوشان): در آن آب مستقیماً در قلب راکتور می‌جوشد و بخار مستقیماً وارد توربین می‌شود.

CANDU: راکتور کانال فشار قوی با کندکننده و خنک‌کننده آب سنگین و سوخت اورانیوم طبیعی.

برای نمونه، در زیردریایی USS Nautilus (۱۹۵۵) از یک PWR فشرده استفاده شد که امکان مأموریت‌های طولانی زیرسطحی را فراهم می‌کرد. این راکتورها معمولاً از اورانیوم با غنای بالا (۹۰٪) برای افزایش چگالی توان و کوچک‌تر شدن قلب راکتور استفاده می‌کنند.

از اولین جرعه تا امروز؛ تولید برق

تولد یک ایده: اولین نیروگاه هسته‌ای چگونه شکل گرفت؟

اولین جرعه‌ها برای استفاده صلح‌آمیز از انرژی اتم، اوایل دهه ۱۹۵۰ زده شد. دانشمندان به دنبال راهی بودند تا از آن نیروی عظیم نهفته در دل ماده، برق تولید کنند، نه بمب.

اولین گام موفق در سال ۱۹۵۱ در آزمایشگاه ملی آیداهو آمریکا با استفاده از یک راکتور آزمایشی به نام EBR-I توانستند برق کافی برای روشن کردن ۴ لامپ ۲۰۰ وات تولید کنند. این واقعه ساده، لحظه‌ای تاریخی بود که نشان می‌داد می‌توان از شکافت هسته برای تولید برق استفاده کرد. این اولین باری بود که انرژی الکتریکی قابل استفاده‌ای از شکافت هسته به دست می‌آمد و تنها چند روز بعد، این راکتور توانست برق کل مجموعه را تأمین کند.



پس از این موفقیت، صنعتی شدن این ایده در دستور کار قرار گرفت. سرانجام در سال ۱۹۵۶، اولین نیروگاه هسته‌ای تجاری جهان به نام کالدر هال در انگلستان به بهره‌برداری رسید و توانست برق را وارد شبکه ملی کند. از آن نقطه به بعد، عصر انرژی هسته‌ای برای مصارف صلح‌آمیز به طور رسمی آغاز شد.

کارکرد انرژی هسته ای اینبار در تولید برق

اگر یک نیروگاه زغال‌سنگ را تصور کنید، داخل آن زغال می‌سوزد تا آب را به جوش بیاورد. بخار حاصل، یک توربین بزرگ را می‌چرخاند و آن هم یک ژنراتور را برای تولید برق به حرکت درمی‌آورد. نیروگاه هسته‌ای هم دقیقاً از همین ایده پیروی می‌کند، با یک تفاوت بزرگ: به جای سوزاندن زغال، از شکافتن اتم‌های اورانیوم برای جوشاندن آب استفاده می‌کند.

فرآیند تولید برق:

۱. مرکز ماجرا (راکتور): قلب نیروگاه، یک محفظه بسیار قوی به نام «راکتور» است. درون آن، میله‌هایی از جنس اورانیوم (سوخت هسته‌ای) قرار دارد.

۲. شکافت زنجیره‌ای: نوترون‌ها به هسته اتم‌های اورانیوم برخورد می‌کنند. اتم‌ها می‌شکنند (شکافت) و این شکافت انرژی عظیمی به صورت گرما آزاد می‌کند. این فرآیند مانند یک واکنش زنجیره‌ای ادامه می‌یابد و گرمای لازم را تولید می‌کند.

۳. تولید بخار: گرمای تولید شده در راکتور، آب را به بخار تبدیل می‌کند.

۴. چرخاندن توربین: این بخار داغ با فشار زیاد از لوله‌ها عبور کرده و به پره‌های یک توربین غول‌پیکر برخورد می‌کند و آن را با سرعت بالا به چرخش درمی‌آورد.

۵. تولید برق: توربین دوار به یک ژنراتور متصل است. چرخش توربین باعث می‌شود ژنراتور هم بچرخد و در نهایت، انرژی الکتریکی (همان برق مصرفی خانه‌ها) تولید شود.

۶. چرخه بسته: بخاری که پس از چرخاندن توربین، خنک شده، دوباره به آب تبدیل و به راکتور برگردانده می‌شود تا دوباره گرم شود و این چرخه ادامه یابد.



## چرا هسته ای برای تولید برق؟

انرژی هسته‌ای مهم‌ترین مزیت خود را در چگالی فوق‌العاده بالای سوختش نشان می‌دهد. یک قرص کوچک اورانیوم به اندازه یک قرقره نخ، انرژی معادل یک تن زغال‌سنگ یا ۷ بشکه نفت تولید می‌کند. به همین دلیل، یک نیروگاه هسته‌ای می‌تواند سال‌ها با یک محموله کوچک سوخت کار کند، در حالی که یک نیروگاه زغال‌سنگ روزانه به قطارها و کامیون‌های بی‌شمار زغال نیاز دارد. این ویژگی، وابستگی به زنجیره تأمین سوخت را به شدت کاهش می‌دهد و امنیت انرژی را بالا می‌برد.

دومین مزیت بزرگ، آلاینده‌گی نزدیک به صفر در حین کار است. نیروگاه هسته‌ای هیچ دی‌اکسید کربنی عامل اصلی تغییر اقلیم، هیچ گوگردی عامل باران اسیدی و هیچ دود و گردوغباری وارد هوا نمی‌کند. از این نظر، هم‌تراز با نیروگاه‌های خورشیدی و بادی است، اما با یک تفاوت اساسی: پیوستگی و قابلیت اطمینان. خورشید فقط روزها می‌تابد و باد همیشه نمی‌وزد، اما یک راکتور هسته‌ای می‌تواند ۲۴ ساعت شبانه‌روز، ۳۶۵ روز سال، در هر آب و هوایی، با حداکثر توان برق تولید کند. به این ویژگی «برق پایه» می‌گویند که برای حفظ پایداری شبکه برق حیاتی است. در مقابل، نیروگاه‌های خورشیدی و بادی برای تبدیل شدن به منبعی قابل اعتماد، نیاز به باتری‌های گران‌قیمت و حجیم دارند.

در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، مزیت دیگر هسته‌ای نبود هزینه‌های پنهان سلامت و محیط زیست است. آلودگی هوای ناشی از زغال‌سنگ و گاز سالانه میلیون‌ها نفر را بیمار می‌کند و هزاران نفر را زودتر از موعد می‌میراند، در حالی که نیروگاه هسته‌ای با رعایت اصول ایمنی، هوای پاک را حفظ می‌کند. همچنین اگرچه ساخت نیروگاه هسته‌ای هزینه اولیه بالایی دارد، اما سوخت آن بسیار ارزان است و عمر نیروگاه به ۶۰ سال یا بیشتر می‌رسد. در بلندمدت، هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت برق هسته‌ای با زغال‌سنگ و گاز قابل رقابت است و از انرژی خورشیدی خانگی در بسیاری از مناطق ارزان‌تر تمام می‌شود. نهایتاً، حجم پسماند در انرژی هسته‌ای بسیار کم است. تمام سوخت مصرف‌شده یک نیروگاه در طول ۶۰ سال، تنها چند ده مترمکعب جا می‌گیرد و می‌توان آن را در انبارهای زیرزمینی ایمن نگهداری کرد، در حالی که پسماند زغال‌سنگ (خاکستر سمی) کوه‌ها را پر می‌کند و گازهای گلخانه‌ای آن در تمام جو پخش می‌شوند. به همین دلایل، انرژی هسته‌ای برای کشورهایی که به دنبال برق پاک، پایدار و با تراکم بالا هستند، یک مزیت استراتژیک غیرقابل انکار محسوب می‌شود.

بشر قرن بیست‌ویکم میان دو صخره‌ی عظیم گرفتار آمده است: از یک سو، شتاب فزاینده‌ی تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین که نشانه‌هایی نگران‌کننده از آینده‌ی زیست‌بوم جهانی به همراه دارد؛ و از سوی دیگر، عطش سیری‌ناپذیر تمدن برای انرژی که همچنان به سوخت‌های فسیلی وابسته است. در چنین وضعیتی، انرژی هسته‌ای نه صرفاً یک گزینه‌ی فناورانه، بلکه نوعی «پارادوکس بزرگ» به شمار می‌آید؛ پدیده‌ای که در درون خود هم نویدبخش تولید گسترده‌ی انرژی کم‌کربن است و هم یادآور خاطره‌ی حوادثی چون چرنوبیل و فوکوشیما.

از همین رو، مسئله‌ی انرژی هسته‌ای تنها به حوزه‌ی فیزیک و مهندسی محدود نمی‌شود، بلکه در مرز میان علم، اخلاق، سیاست و حتی بقا قرار می‌گیرد. پرسش اصلی این است که آیا شکافت اتم می‌تواند راهی برای رهایی از بحران انرژی و اقلیم باشد، یا آنکه میراثی بلندمدت و پیچیده برای نسل‌های آینده بر جای خواهد گذاشت.





انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد

## چالش های انرژی هسته ای



### سایه سار تردید؛ چرا اتم هنوز ترسناک است؟

در ذهن بسیاری از مردم، فناوری هسته ای همچنان با تصاویر ویرانی چرنوبیل یا سونامی فوکوشیما پیوند خورده است. این نگرانی تا حدی قابل درک است، زیرا تابش هسته ای پدیده ای نامرئی است و پیامدهای آن فراتر از تجربه ای روزمره ای انسان قرار می گیرد. همین نامرئی بودن، ترس از آن را عمیق تر می کند.

با این حال، بررسی علمی نشان می دهد که بسیاری از فجایع هسته ای بیش از آنکه نتیجه ای اجتناب ناپذیر فیزیک شکافت باشند، حاصل ضعف طراحی، کاستی های نهادی یا خطاهای مدیریتی بوده اند. در نسل های نخست نیروگاه ها، اتکا به سامانه های «ایمنی فعال» مانند پمپ ها، ژنراتورها و دخالت مستقیم اپراتور - نقطه ای آسیب پذیر اصلی محسوب می شد؛ زیرا قطع برق یا خطای انسانی می توانست عملکرد این سامانه ها را مختل کند.

پاسخ مهندسی مدرن به این مسئله، توسعه ای سامانه های «ایمنی غیرفعال» بوده است. در بسیاری از راکتورهای نسل سوم و چهارم، خنک سازی اضطراری بر پایه ی قوانین طبیعی فیزیک - مانند جاذبه و جریان همرفتی - طراحی شده است. به این ترتیب، حتی در صورت قطع کامل برق نیز فرایند خنک سازی می تواند به طور خودکار ادامه یابد. با این همه، تجربه ی تاریخی نشان می دهد مهم ترین عامل ایمنی تنها فناوری نیست، بلکه «فرهنگ ایمنی» در مدیریت و بهره برداری از نیروگاه ها است؛ فرهنگی که اگر سست شود، پیشرفته ترین سامانه ها نیز کافی نخواهند بود.

### مخاطره ی نشت پرتوزا در شرایط بحرانی

یکی از چالش های اساسی در بهره برداری از انرژی هسته ای، احتمال آزادسازی یا نشت مواد پرتوزا در شرایط بحرانی است. هرچند این گونه رخدادها در سامانه های هسته ای مدرن نادرند، اما در صورت وقوع می توانند به آلودگی گسترده ی محیط، افزایش خطر مواجهه ی پرتویی برای انسان و اختلال در اکوسیستم های طبیعی بینجامند. دامنه ی این پیامدها به عواملی مانند نوع ماده ی آزاد شده، مقدار پرتوزایی، مسیر انتشار، شرایط جوی و سرعت مداخله ی فنی بستگی دارد. از همین رو، در مهندسی هسته ای، پیشگیری از نشت پرتوزا تنها به طراحی راکتور محدود نمی شود، بلکه سامانه های چندلایه ی حفاظتی، پایش مداوم، مهار آلودگی و برنامه ریزی دقیق برای مدیریت شرایط اضطراری را نیز دربر می گیرد.

### میراث ماندگار؛ چالش پسماند هسته ای

در کنار مزایای انرژی هسته ای، مسئله ی پسماندهای رادیواکتیو یکی از مهم ترین چالش های آن است. برخی از ایزوتوپ های موجود در سوخت مصرف شده می توانند تا هزاران سال فعال باقی بمانند؛ از این رو، مدیریت این پسماندها نیازمند راهکارهایی دقیق، پایدار و بلندمدت



است. یکی از روش‌های پذیرفته‌شده در جهان، «انبارش زمین‌شناسی عمیق» است؛ یعنی دفن پسماند در لایه‌های پایدار زمین تا از چرخه زیستی انسان جدا بماند. در کنار این راهکار، فناوری‌هایی مانند بازفرآوری سوخت و راکتورهای نسل چهارم نیز در حال توسعه‌اند تا بخشی از این پسماندها دوباره به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرند و حجم نهایی آن‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

در اینجا مسئله‌ای فراتر از فناوری مطرح می‌شود: انرژی هسته‌ای فقط راهی برای تولید برق امروز نیست، بلکه نوعی مسئولیت اخلاقی در قبال آینده‌ی زمین و نسل‌های بعدی نیز ایجاد می‌کند. هر تصمیم در این حوزه، افقی بسیار بلندتر از زمان حال را در بر می‌گیرد.

## چالش‌های محیط‌زیستی؛ فراتر از تابش

اگرچه تمرکز عمومی اغلب بر خطرات پرتوزایی است، نیروگاه‌های هسته‌ای از منظر اکولوژی صنعتی با مسائل محیط‌زیستی دیگری نیز روبه‌رو هستند. یکی از مهم‌ترین آن‌ها «آلودگی گرمایی» است؛ زیرا این نیروگاه‌ها برای خنک‌سازی به حجم قابل توجهی آب نیاز دارند و تخلیه‌ی آب گرم می‌تواند تعادل اکوسیستم‌های آبی را بر هم بزند.

از سوی دیگر، چرخه‌ی سوخت هسته‌ای - از استخراج اورانیوم تا فرآوری آن - در صورت مدیریت نادرست می‌تواند موجب تخریب زمین یا آلودگی منابع آب شود. همچنین مسئله‌ی مصرف آب، به‌ویژه در مناطق خشک، اهمیتی دوچندان پیدا می‌کند. به همین دلیل، استفاده از فناوری‌هایی مانند برج‌های خنک‌کننده‌ی خشک یا استقرار نیروگاه‌ها در مناطق ساحلی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

## اقتصاد انرژی هسته‌ای در عصر تجدیدپذیرها

انرژی هسته‌ای از دیدگاه اقتصادی نیز با تناقضی مهم روبه‌رو است: هزینه‌ی ساخت نیروگاه‌ها بسیار بالاست، اما پس از بهره‌برداری می‌توانند انرژی پایدار و کم‌کربن تولید کنند. همین ویژگی، ارزیابی اقتصادی این فناوری را پیچیده می‌کند.

با وجود رشد سریع انرژی‌های خورشیدی و بادی، شبکه‌ی برق مدرن همچنان به منابع «بار پایه» نیاز دارد؛ یعنی منابعی که بدون نوسان و به‌طور مداوم برق تولید کنند. در چنین شرایطی، انرژی هسته‌ای می‌تواند نقشی مکمل برای منابع تجدیدپذیر ایفا کند و به حفظ ثبات شبکه کمک رساند. از این منظر، آینده‌ی انرژی نه لزوماً در حذف یک منبع به سود منبعی دیگر، بلکه در ترکیب هوشمندانه‌ی فناوری‌ها رقم خواهد خورد.



## دانش هسته‌ای و مسئولیت ملی

در جهان امروز، فناوری هسته‌ای تنها یک فناوری انرژی نیست، بلکه بخشی از قدرت علمی و فناورانه‌ی کشورها به شمار می‌آید. توسعه‌ی دانش صلح‌آمیز هسته‌ای می‌تواند به پیشرفت علمی، صنعتی و انرژی یک کشور کمک کند؛ البته به این شرط که با مسئولیت‌پذیری، شفافیت و رعایت اصول ایمنی و محیط‌زیستی همراه باشد.

بحث انرژی هسته‌ای نه ستایش بی‌چون‌وچرای یک فناوری است و نه نفی مطلق آن. این فناوری در نقطه‌ای حساس از تاریخ بشر ایستاده است: جایی میان نیاز فوری به انرژی پاک، خطرهای فنی و انسانی، و مسئولیتی که در برابر آینده بر دوش ما قرار دارد. شاید پرسش اصلی این نباشد که آیا باید به سراغ انرژی هسته‌ای رفت یا نه؛ بلکه این باشد که اگر می‌رویم، چگونه باید آن را با بیشترین خرد، کمترین خطر و بیشترین مسئولیت به کار گیریم.

در پایان این واکاوی، باید پذیرفت که انرژی هسته‌ای نه یک «منجی مطلق» است و نه یک «هیولای فناورانه»؛ بلکه آینده‌ای است در برابر بلوغ تمدنی انسان. ما در میانه‌ی یک گذار تاریخی ایستاده‌ایم؛ جایی که نیاز تمدن به انرژی، با ضرورت حفظ زیست‌بوم در تضاد است. هسته‌ای، در این میانه، نه تنها یک راهکار، که یک «آزمون اراده» است. برای ما ایرانیان، این مسیر نه فقط یک تلاش صنعتی، که پیوندی عمیق با غیرت ملی و خودباوری علمی دارد. یادمان نمیرود که چگونه نخبگان این سرزمین، با تکیه بر دانش بومی، دیوارهای تحریم را درنوردیدند برای ایران. شهادی هم‌چون شهید دکتر شهبازی، شهید دکتر علی‌محمدی،

شهید رضایی‌نژاد و شهید فخری‌زاده، تنها دانشمندی نبودند؛ آنها معماران «استقلال علمی» ما بودند که با نثار خون خود، به ما آموختند که دانش، حقی است که باید با جان حفظ شود. آنها ثابت کردند که مسیر پیشرفت، اگرچه پرخطر، اما پیمودنی است. راهی که آنان آغاز کردند، اکنون میراثی است که در دستان نسل کنونی قرار دارد؛ میراثی که نه فقط برای امروز، بلکه برای فردای روشن این مرز و بوم است.



آیا ما شجاعت آن را داریم که از سایه‌های هراسناک گذشته عبور کنیم و با تکیه بر دانش نوین، زیرساخت‌هایی پایدار پی‌ریزی کنیم؟ آینده متعلق به تمدن‌هایی است که هوشمندانه، انرژی را در ترکیب سبکی متنوع، ایمن و مبتنی بر عدالت و انسانیت تعریف می‌کنند.

## دعوت به اندیشیدن:

آیا ما قادر خواهیم بود این میراث گرانبها که با خون بهترین فرزندان این خاک آبیاری شده را به گونه‌ای مهار کنیم که نه تنها چرخ صنایع را به حرکت درآورد، بلکه پیوندی استوار میان رفاه امروز و سلامت فردای این سرزمین باشد؟ این نه یک پرسش فنی، که یک «تعهد اخلاقی» و یک «دین ملی» است.

انرژی هسته‌ای، اکنون به دست ماست؛ آیا ما آنقدر فرزانه هستیم که این «آتش مهار شده» را به چراغی برای روشن نگاه داشتن مسیر آیندگان بدل کنیم؟ پاسخ، در نگاه ما به «توسعه» نهفته است؛ نگاهی که در آن، پیشرفت، هرگز به معنای گسست از آرمان‌های بلند انسانی و امانتداری زیست‌محیطی نیست. ما وارثان راهی هستیم که با خون نخبگان ما برای اعتلای نام ایران هموار شد؛ بیایید با تدبیر علمی، این مشعل را برافروخته نگاه داریم.



# تاکيون

شماره ۲ | تيرماه ۱۴۰۵



انجمن علمی فیزیک  
دانشگاه شاهد



دانشگاه شاهد  
معاونت فرهنگی و اجتماعی