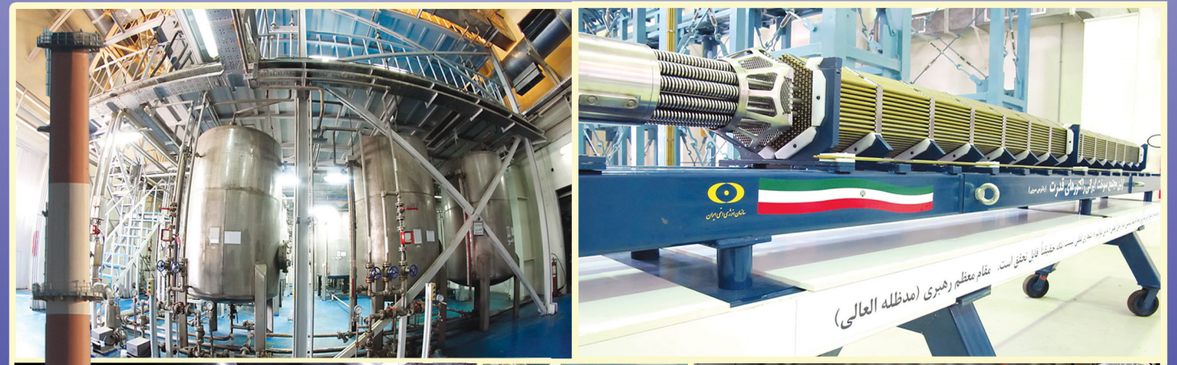
سازمان انرژی اتمی ایران

آشنایی با انرژی هسته ای و کاربردهای آن

جلد اول

سطح متوسطه



دل هر ذره را که بشکافی
آفتابیش در میان بینی

عنوان: آشنایی با انرژی هسته‌ای و کاربردهای آن - جلد اول.

پدیدآورندگان: دفتر تدوین برنامه و طرح‌های راهبردی (معاونت برنامه‌ریزی هسته‌ای و نظارت راهبردی).

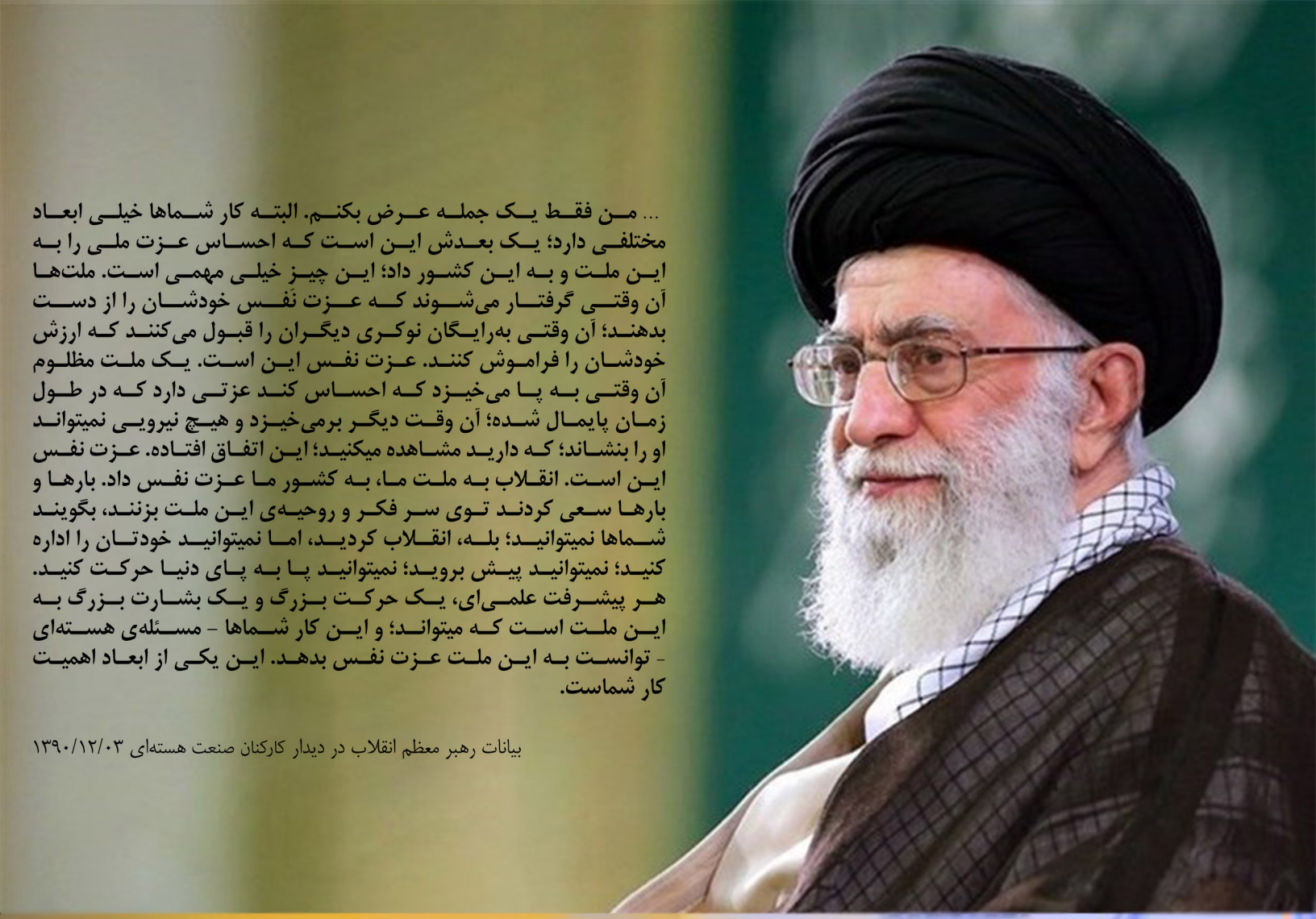
مشخصات ظاهری: ۶۶ص.: مصور (رنگی).

موضوع: انرژی هسته‌ای.

چاپ: سال ۱۴۰۱. حق چاپ محفوظ.

آدرس اینترنتی فایل الکترونیکی کتاب:

www.aeoi.org.ir **(بخش منابع علمی – کتاب‌ها)**



... من فقط یک جمله عرض بکنم. البته کار شماها خیلی ابعاد مختلفی دارد؛ یک بعدش این است که احساس عزت ملی را به این ملت و به این کشور داد؛ این چیز خیلی مهمی است. ملت‌ها آن وقتی گرفتار می‌شوند که عزت نَفس خودشان را از دست بدهند؛ آن وقتی به‌رایگان نوکری دیگران را قبول می‌کنند که ارزش خودشان را فراموش کنند. عزت نفس این است. یک ملت مظلوم آن وقتی به پا می‌خیزد که احساس کند عزتی دارد که در طول زمان پایمال شده؛ آن وقت دیگر برمی‌خیزد و هیچ نیرویی نمیتواند او را بنشاند؛ که دارید مشاهده میکنید؛ این اتفاق افتاده. عزت نفس این است. انقلاب به ملت ما، به کشور ما عزت نفس داد. بارها و بارها سعی کردند توی سر فکر و روحیه‌ی این ملت بزنند، بگویند شماها نمیتوانید؛ بله، انقلاب کردید، اما نمیتوانید خودتان را اداره کنید؛ نمیتوانید پیش بروید؛ نمیتوانید پا به پای دنیا حرکت کنید. هر پیشرفت علمی‌ای، یک حرکت بزرگ و یک بشارت بزرگ به این ملت است که میتواند؛ و این کار شماها - مسئله‌ی هسته‌ای - توانست به این ملت عزت نفس بدهد. این یکی از ابعاد اهمیت کار شماست.

بیانات رهبر معظم انقلاب در دیدار کارکنان صنعت هسته‌ای ۱۳۹۰/۱۲/۰۳

فهرست

پیشگفتار أ

مفاهیم مقدماتی فیزیک هسته‌ای ۱

نیروگاه‌های هسته‌ای ۹

چرخه سوخت هسته‌ای ۲۵

آب سنگین و ایزوتوپ‌های پایدار ۴۶

پیشران‌های هسته‌ای و هم‌جوشی هسته‌ای ۵۵

❖ پیشگفتار

"اوّلِ دفتر به نام ایزدِ دانا صانعِ پروردگارِ حیِّ توانا"

توسعهٔ روز افزون بهره‌برداری از مواهب فناوری صلح‌آمیز هسته‌ای به ویژه در دهه‌های اخیر و تأثیرات گسترده آن در تأمین رفاه جوامع بشری موجب آن شده است تا گسترش فعالیت‌های سازمان انرژی اتمی ایران خاصّه در سال‌های پس از پیروزی شکوهمند انقلاب اسلامی با هدف بهره‌مندی کشور از مزایای این فناوری نوین، با رشدی شتابان همراه شده و تثبیت حقوق انکارناپذیرِ نسل‌های کنونی و آیندهٔ ایران اسلامی با قدرت و صلابت در دستور کار قرار گیرد. برنامه‌ریزی بلند مدت به منظور تولید برق هسته‌ای، تکمیل زنجیرهٔ تأمین سوختِ مورد نیازِ واحدهای نیروگاهی، توسعهٔ روزافزون کاربرد پرتوها در حوزهٔ بهداشت و درمان، صنعت، کشاورزی و نیز ایجاد بسترِ مناسب برای بهره‌مندی بهینه از امکانات و ظرفیت‌های موجود در حوزه علوم و فنون لیزر و کوانتوم، بخشی از چشم‌انداز ترسیم شده برای پیشبرد اهداف کلانِ صنعت هسته‌ای است.

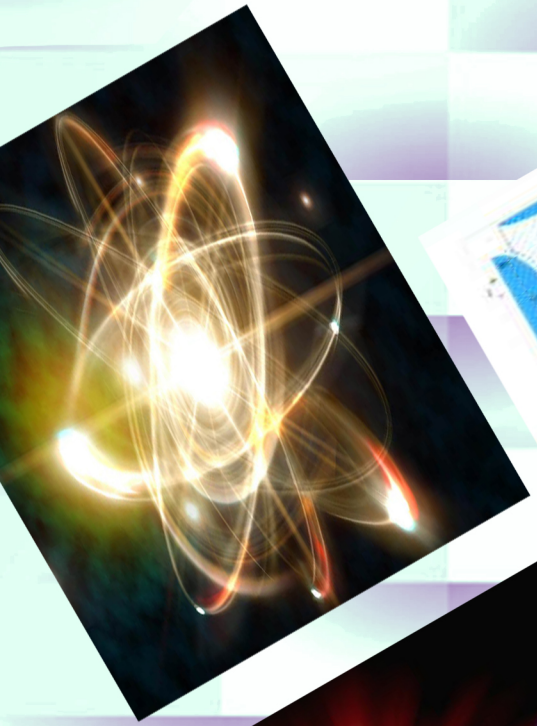
لازم به توضیح است که مطالب مندرج در دو جلد کتابِ حاضر با هدف آشنایی کلیهٔ شهروندان عزیز ایرانی به ویژه دانش‌آموزان در سطوح پایان دورهٔ متوسطه با مبانی دانش هسته‌ای و کاربردهای متنوع آن تهیه شده است. در نگارش این اثر، این نکته مدّ نظر قرار گرفته که بخش وسیعی از افراد جامعه و کسانی که از آشنایی مختصری با علوم و فنون هسته‌ای برخوردارند، از این توانایی بهره‌مند شوند تا خود را مخاطب اصلی ما بیابند.

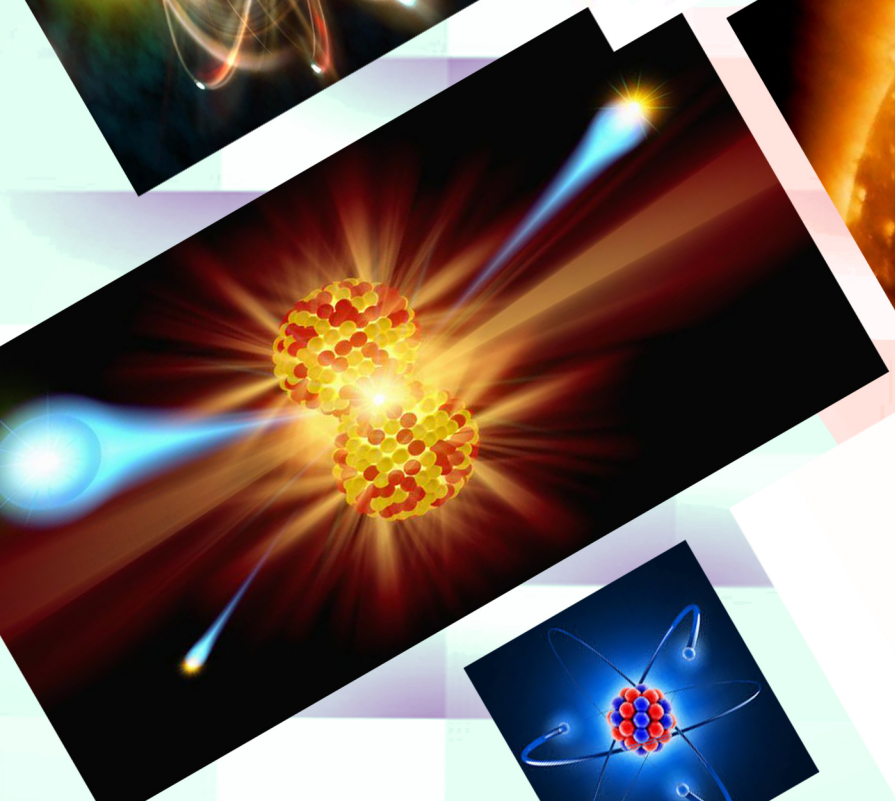
در جلد اوّل، به استفاده از ظرفیتِ نیروگاه‌های هسته‌ای جهت تأمین بخشی از برق مورد نیاز جهان و معرفی نیروگاه اتمی بوشهر پرداخته شده است. افزون بر این، مراحل تولید سوخت هسته‌ای در کنار تأسیساتِ مربوط به چرخهٔ سوخت به طور اجمالی مورد اشاره قرار گرفته است. در ادامه به بررسی روش‌های تولید آب سنگین و سایر ایزوتوپ‌های پایدار، آشنایی با سیستم پیشران هسته‌ای و انرژی همجوشی هسته‌ای و دستاوردهای کشور در حوزه‌های فوق پرداخته شده است.

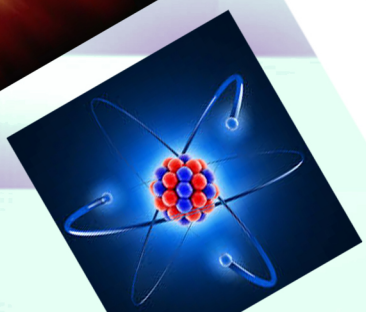
در جلد دوّم نیز برخی از کاربردهای متنوع و متعدّد پرتوها در حوزه‌های مختلف از جمله در عرصهٔ پزشکی، صنعت، کشاورزی و مواد غذایی و همچنین در زمینهٔ محیط‌زیست تشریح شده و در ادامه به بررسی فناوری‌هایی همچون راکتورهای تحقیقاتی، شتاب‌دهنده‌ها، لیزر، کوانتوم و سانتریفیوژهای مورد استفاده در سلامت و صنعت و دستاوردهای

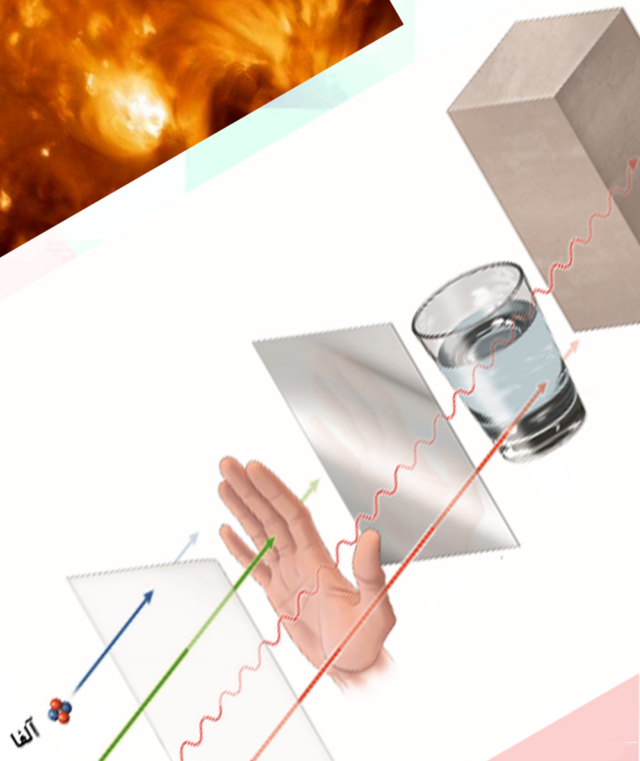
کشور در حوزه‌های فوق پرداخته شده است. در پایان نیز، به‌منظور آشنایی مخاطبانِ ارجمند با اهمیّت و حساسیّت مبحث ایمنی در صنعت هسته‌ای و پسمانداری، برخی از اقداماتی که در این بخش با موفقیّت صورت پذیرفته، معرفی شده است. لازم به توضیح است که تهیه کنندگانِ این اثر با عطف توجّه به آثاری که پیش از این در این حوزه به نگارش در آمده است، بر آن بوده‌اند تا با رویکردی متفاوت و در قالبی به‌روز و کارآمد، تصویری اجمالی و در عین حال جامع و کاربردی از مطالب و موضوعاتِ علمی ارائه نمایند. باشد تا از این رهگذر، فضای مناسبی جهت معرفی دقیق‌ترِ دستاوردها و افتخاراتِ صنعت هسته‌ای کشورمان فراهم آید. در پایان ضمن سپاس و قدردانی فراوان از ریاست محترم سازمان، معاونین و همهٔ بزرگوارانی که ما را در مسیر تهیه و انتشار این اثر یاری رساندند و به‌ویژه همکاران محترم در اداره کل دیپلماسی عمومی و اطلاع رسانی، از پیشگاه همهٔ خوانندگانِ گرانقدر استدعا داریم تا با ارائه پیشنهادات و دیدگاه‌های راهگشای خود بیش از پیش ما را در راه ارتقاء کیفیتِ ارائه مطالب یاری فرمایند.

مفاهیم مقدماتی فیزیک هسته ای





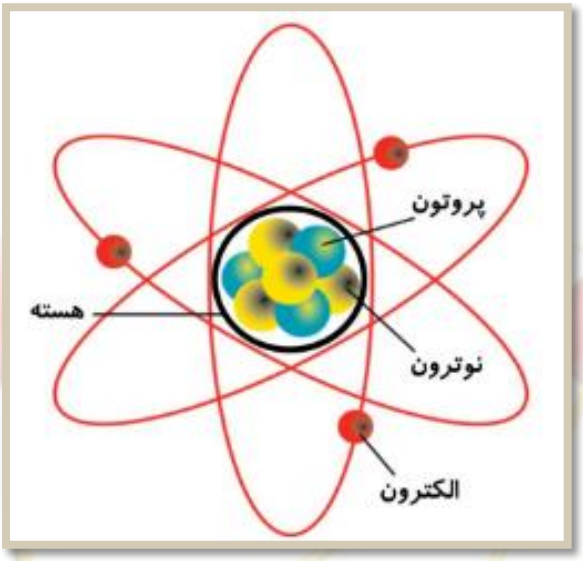




❖ مفاهیم مقدماتی فیزیک هسته‌ای

برای آشنایی بیشتر با انرژی هسته‌ای و موضوعات مرتبط با آن، لازم است ابتدا با برخی مفاهیم مقدماتی فیزیک هسته‌ای مانند پرتوزایی، ایزوتوپ‌های پایدار و ناپایدار، واپاشی و شکافت آشنا شویم.

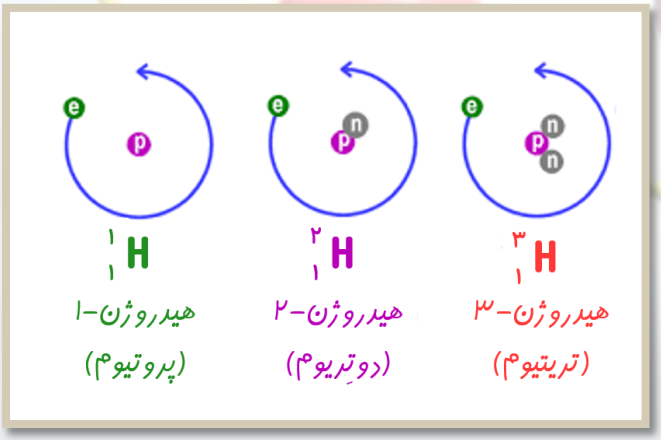
۱-۱ ساختار هسته اتم



اتم، شامل یک هسته در مرکز و یک یا چند الکترون در اطراف هسته است که به دور آن در حال چرخش هستند. ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک است اما با این وجود، بیش از ۹۹/۹ ٪ از جرم اتم در هسته متمرکز شده است. هسته یک اتم، از نوترون و پروتون تشکیل شده است که به طور کلی نوکلئون نامیده می‌شوند. ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند.

پروتون‌ها دارای بار الکتریکی مثبت، الکترون‌ها دارای بار منفی و نوترون‌ها از نظر الکتریکی خنثی هستند. تعداد پروتون‌های هسته را عدد اتمی، تعداد نوترون‌ها را عدد نوترونی و مجموع تعداد پروتون و نوترون‌ها را عدد جرمی می‌نامند. در یک اتم با بار خنثی، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌های دور هسته برابر است.

۱-۲ ایزوتوپ و رادیوایزوتوپ

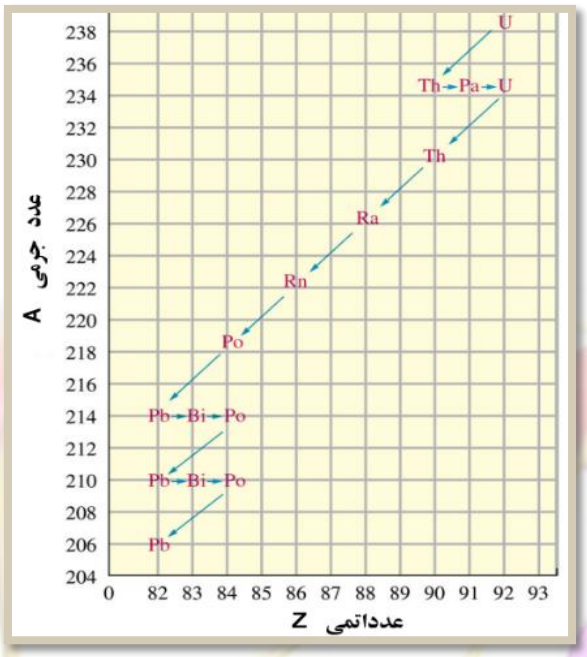


خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی) تعیین می‌کند. به همین دلیل هسته‌هایی که تعداد پروتون برابر ولی تعداد نوترون متفاوت دارند، خواص شیمیایی یکسانی دارند. این هسته‌ها در جدول تناوبی هم‌مکان هستند و به همین دلیل آن‌ها را ایزوتوپ (هم‌مکان) می‌نامند. به‌عنوان مثال، ایزوتوپ‌های هیدروژن را می‌توانید در شکل روبرو ببینید.

اکثر ایزوتوپ‌ها به‌طور طبیعی پایدار هستند اما برخی ایزوتوپ‌ها ناپایدار بوده و با واپاشی، انرژی را از طریق تابش آزاد می‌کنند و به پایداری می‌رسند. این ایزوتوپ‌ها را ایزوتوپ پرتوزا یا رادیوایزوتوپ می‌گویند.

۱-۳ پرتوزایی

هرگاه هسته‌ای دارای مازاد نوترون یا پروتون باشد، به احتمال بالا ناپایدار خواهد بود. چنین هسته‌هایی در حال تجزیه و واپاشی تا رسیدن به حالت پایدار هستند. این فرآیند دگرگونی و تغییر را که به طور طبیعی و خودبه‌خود رخ می‌دهد، پرتوزایی یا واپاشی می‌نامند که از خصوصیات هسته پرتوزا است.



زنجیره واپاشی پرتوزایی طبیعی اورانیوم-۲۳۸

هسته پرتوزای اصلی را هسته مادر و ایزوتوپ تولیدشده را محصول دختر می‌نامند. در صورتی که محصول دختر ناپایدار باشد، مجدداً تجزیه می‌شود تا به ایزوتوپ پایدار برسد. به‌عنوان نمونه، زنجیره واپاشی اورانیوم $^{238}_{92}U$ را در تصویر روبرو می توان مشاهده کرد.

با توجه به تعریف پرتوزایی، می‌توان به سادگی نشان داد که در اثر واپاشی، تعداد هسته‌های پرتوزای یک رادیو ایزوتوپ به صورت نمایی نسبت به زمان کاهش می‌یابد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا پرتوزایی ماده مورد نظر به نصف کاهش یابد، نیمه‌عمر آن ماده پرتوزا نامیده می‌شود که از مشخصه‌های این مواد است.

۱-۴ پرتو

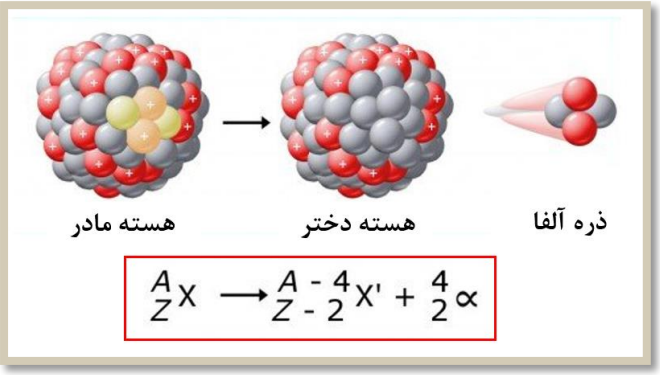
پرتو عبارت است از موج یا ذره کوچک دارای انرژی. پرتوها از نقطه نظر ویژگی‌های موجی نظیر طول موج یا فرکانس متفاوت هستند و همین تفاوت باعث می‌شود خصوصیات متفاوتی از خودشان نشان دهند. پرتو آلفا، بتا، گاما، نوترون و غیره از انواع مختلف پرتوها هستند.

از یک منظر، پرتوها را به دو دسته کلی یون‌ساز (یونیزان) و غیر یون‌ساز (غیر یونیزان) تقسیم‌بندی می‌کنند. پرتوهای یون‌ساز با عبور از محیط، یونش ایجاد می‌کنند؛ به این معنی که ذرات باردار منفی و مثبت در آن محیط تولید می‌شود. از جمله منابع مولد پرتوهای یون‌ساز می‌توان به چشمه‌های پرتوهای آلفا، بتا، گاما، ایکس، پرتوهای کیهانی حاصل از خورشید و مواد پرتوزای موجود در پوسته زمین اشاره کرد. در مقابل، پرتوهای غیر یون‌ساز انرژی کافی برای یونش اتم‌ها و شکستن پیوندهای شیمیایی را ندارند. این پرتوها می‌توانند سبب تغییرات مولکولی یا رهاسازی انرژی به صورت گرما شوند. پرتوهای نوری (نور مرئی، فروسرخ، فرابنفش، لیزر) و میدان‌های مغناطیسی ثابت از جمله این پرتوها هستند.

مقایسه طول موج و انرژی پرتوها

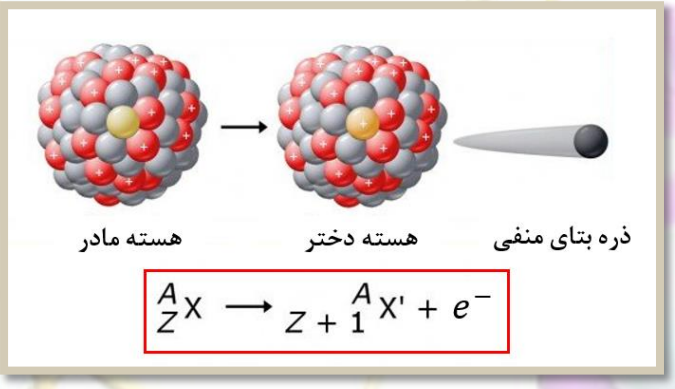
۱-۴-۱ برخی از انواع پرتوهای یونیزان

❖ پرتو آلفا



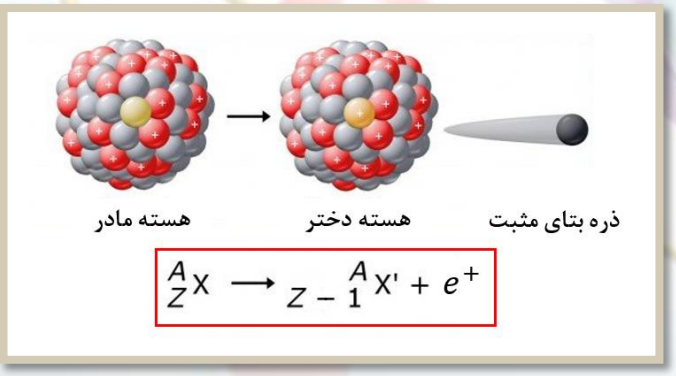
پرتو آلفا در واقع همان هسته اتم هلیوم است. این ذره دارای بار مثبت است و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده است. برخی از هسته‌های سنگین مانند رادون، اورانیوم و نپتونیوم با گسیل ذره آلفا به پایداری می‌رسند. در اثر این واپاشی، عدد اتمی ایزوتوپ مادر به اندازه ۲ واحد و عدد جرمی به اندازه ۴ واحد کاهش می‌یابد.

❖ پرتو بتا

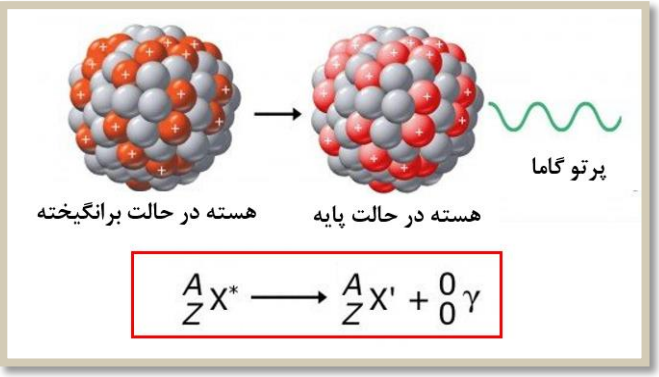


هسته‌هایی که دارای فزونی نوترون هستند، عموماً با گسیل پرتو بتا به پایداری می‌رسند. در اثر گسیل ذره بتای منفی که در واقع همان الکترون است، نوترون درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل می‌شود.

در مقابل، هسته‌هایی که دارای فزونی پروتون هستند، از طریق گسیل ذره پوزیترون (بتای مثبت) به پایداری می‌رسند. این واپاشی همراه با تبدیل یکی از پروتون‌های هسته به نوترون و پوزیترون اتفاق می‌افتد. پوزیترون دارای جرم یکسانی با الکترون می‌باشد ولی به‌جای بار منفی حامل بار مثبت است.



❖ پرتو گاما و ایکس

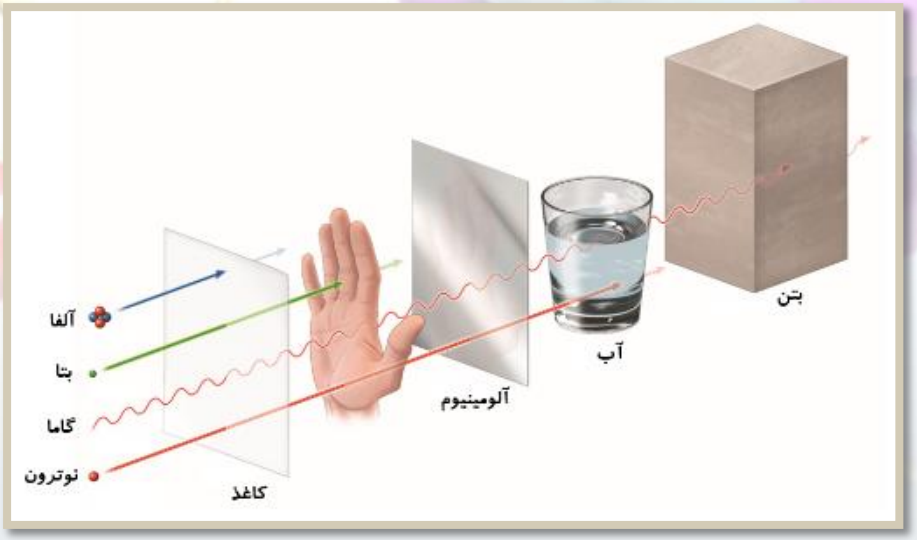


اغلب هسته‌ها، پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته و با سطح انرژی بالاتر از حالت پایدار قرار می‌گیرند. در این حالت، هسته‌ها با گسیل پرتو گاما (فوتون) به حالت پایدار می‌رسند. در این فرایند عدد اتمی و جرمی هسته تغییری نمی‌کند.

پرتو ایکس نیز ماهیتی مشابه پرتو گاما دارد با این تفاوت که پرتو ایکس ناشی از جابه‌جایی الکترون‌ها در مدارهای الکترونی است. در واقع این پرتو منشأ اتمی دارد و مربوط به تغییرات هسته نیست.

۱-۴-۲ قدرت نفوذ پرتوها

هریک از انواع پرتوها، قدرت نفوذ و برد متفاوتی دارند. برد به مقدار مسیر حرکتی پرتو در اجسام و محیط‌های مختلف گفته می شود. ذرات آلفا سنگین بوده و برد کمی دارند. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. ذرات بتا برد بیشتری دارند و در برابر مانعی مانند دست انسان متوقف می‌شوند. اما آنچه باعث کاستن انرژی نوترون‌ها و متوقف کردن آن‌ها می‌شود، برخورد با هسته‌های سبک و دارای هیدروژن است. پرتو گاما نسبت به سایر پرتوها دارای برد بلندتری است و در اثر عبور از لایه بتنی تضعیف می‌شود.

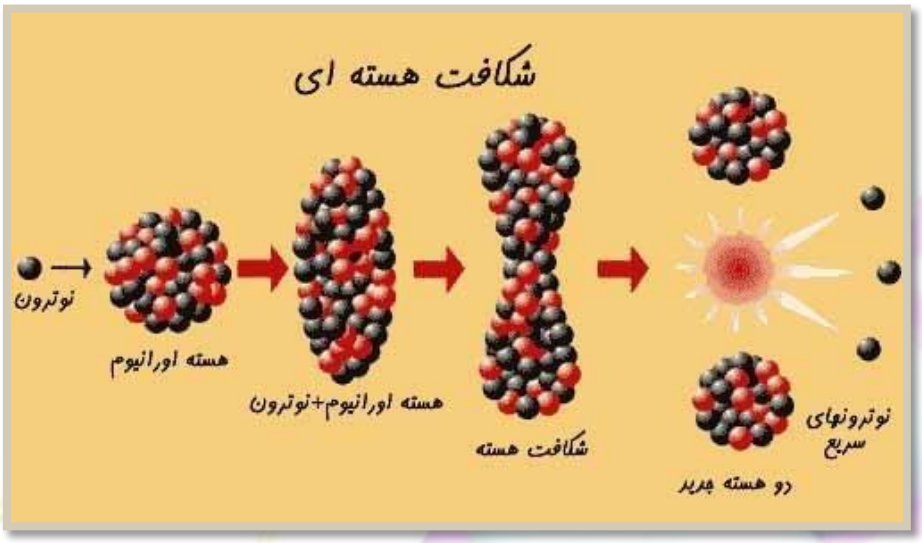


قدرت نفوذ پرتوها

۵-۱ شکافت هسته‌ای

در فرایند شکافت هسته‌ای، یک هسته سنگین مانند هسته اورانیوم-۲۳۵ پس از جذب نوترون، به دو هسته کوچک‌تر تقسیم می‌شود که مجموع جرم دو هسته کمتر از هسته اولیه است. هسته‌های تولید شده که به پاره‌های شکافت معروف هستند، یکسان نبوده و در هر واکنش شکافت ممکن است عناصر مختلفی تولید شود. در فرآیند شکافت، تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۳) و انرژی نیز تولید می‌شود. این نوترون‌ها در شکافت هسته بعدی شرکت نموده و به این ترتیب واکنش به صورت زنجیره‌ای و مداوم تا هنگامی که هسته قابل شکافت وجود داشته باشد، ادامه خواهد یافت. معادله این واکنش به صورت زیر است:

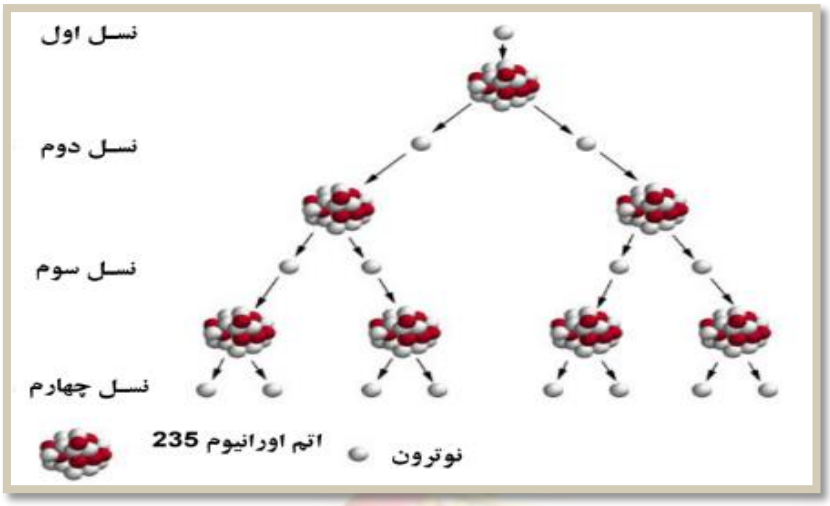
$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow \mathrm{A}_1 + \mathrm{A}_2 + (2-3)\,n + Q(200MeV)$$



نوترون‌های آزادشده در فرآیند شکافت ایزوتوپ اورانیوم- ۲۳۵ انرژی جنبشی بالایی دارند و با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ اورانیوم- ۲۳۸ می‌شوند. اگر انرژی این نوترون‌های سریع را بکاهیم، احتمال جذب آن‌ها توسط ایزوتوپ‌های اورانیوم- ۲۳۵ و وقوع واکنش‌های شکافت بعدی افزایش می‌یابد. کاهش انرژی نوترون از طریق برخورد با اتم عناصر سبک مانند اتم هیدروژن در آب معمولی (H_2O)، اتم دوتریوم در آب سنگین (D_2O) و اتم کربن در گرافیت صورت می‌گیرد که به این مواد کندکننده نوترون گفته می‌شود.

بحرانی شدن در راکتور هنگامی پیش می‌آید که حداقل یکی از چندین نوترون تولیدشده در فرآیند شکافت، باعث شکافت هسته دیگری شود. در صورتی که تعداد نوترون‌های تولیدی کنترل نشود و به ازای هر واکنش شکافت بیش از یک شکافت در مرحله بعدی رخ دهد، واکنش زنجیره‌ای شکافت، فوق بحرانی می‌شود و مانند بمب‌های هسته‌ای، به صورت تصاعدی باعث آزاد شدن ناگهانی و تقریباً آنی انرژی فراوانی خواهد شد. کنترل نسبت نوترون در ایمنی راکتور نیز اهمیت بسیار دارد و واکنش زنجیره‌ای

شکافت در راکتور به شکل کنترل‌شده رخ می‌دهد. در راکتورهای قدرت از مواد جاذب نوترون استفاده می‌شود تا در صورت بروز حادثه و نیاز به خاموشی راکتور، تعداد نوترون‌ها کنترل و راکتور خاموش شود.



شکافت اتم اورانیوم

۱-۶ انرژی پرتو و دُز

❖ انرژی:

پرتو عبارت است از موج یا ذره کوچک دارای انرژی. بنابراین ویژگی مشترک همه انواع پرتوها، دارا بودن انرژی است. وقتی که پرتوها با مواد مختلف برخورد می‌کنند، انرژی خود را به این مواد انتقال می‌دهند.

واحد انرژی در دستگاه SI، ژول است؛ اما انرژی پرتوها به‌جای واحد بزرگ ژول، با واحد دیگری به نام الکترون‌ولت (eV) بیان می‌شود. یک الکترون‌ولت عبارت است از انرژی کسب‌شده توسط یک الکترون در خلأ، هنگامی که از اختلاف پتانسیل یک ولت عبور می‌کند. سایر یکاهای متداول عبارت‌اند از:

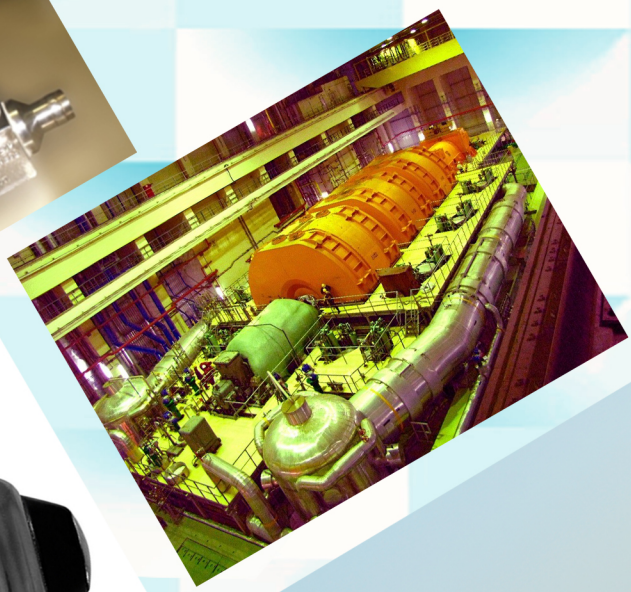
$1\ keV = 1000\ eV$

$1\ MeV = 10^6\ eV$

❖ دز جذبی:

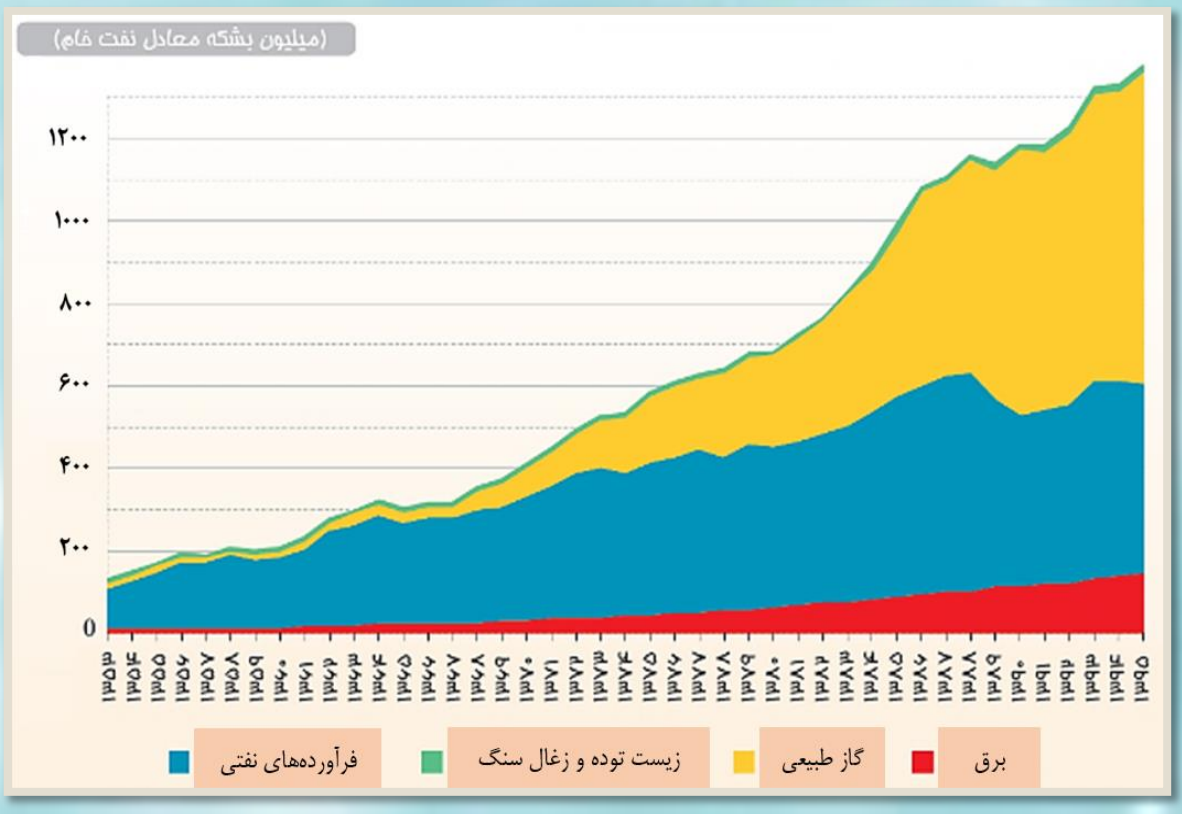
دز جذبی بیان‌کننده انرژی جذب‌شده از کلیه پرتوها در واحد جرم هر ماده است. واحد دز جذبی ژول بر کیلوگرم (J/kg) می‌باشد که نام ویژه آن گِرِی است.

نیروگاه های هسته ای



❖ انرژی و انواع آن

انرژی، موتور محرک تولیدات صنعتی، ارائه خدمات و افزایش رفاه اجتماعی است و میزان مصرف انرژی و به صورت خاص سرانه مصرف برق و دسترسی به برق مطمئن و پایدار، یک شاخص مهم توسعه یافتگی کشورها به شمار می‌آید. در سال‌های گذشته به دلیل صنعتی شدن و رشد رفاه در کشورهای مختلف جهان، مصرف انرژی در اشکال مختلف آن نیز روند صعودی بسیار سریعی داشته است.



روند رشد مصرف انرژی در ایران و سهم هر کدام از حامل‌های انرژی در آن (اشکال مختلف انرژی به معادل بشکه نفت خام تبدیل شده است)

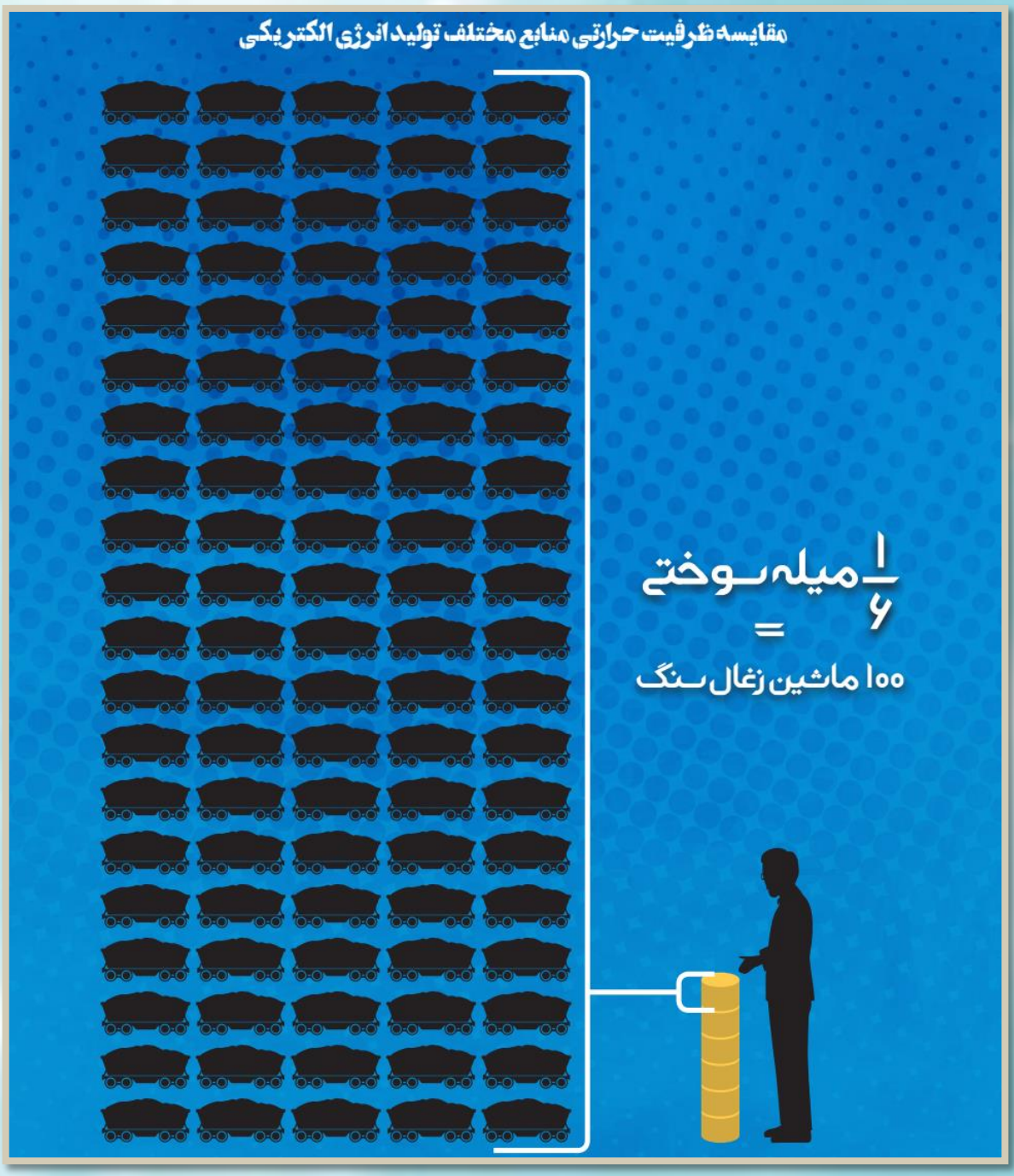
انرژی به لحاظ قابلیت تولید مجدد، به دو دسته تجدیدپذیر شامل انرژی برق‌آبی، خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده (چوب و گیاهان) و تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ) و اورانیوم طبقه‌بندی می‌شود. برای تشکیل انرژی‌های تجدیدناپذیر میلیون‌ها سال زمان صرف شده است و به همین دلیل جایگزینی آن‌ها پس از مصرف، تقریباً غیرممکن است اما منابع تجدیدپذیر، پایان‌ناپذیر هستند.

انواع مختلف انرژی به تفکیک تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

سوخت‌های فسیلی پس از مصرف، دی‌اکسید کربن و گازهای آلاینده دیگری را در جو زمین آزاد می‌کنند. انباشت این گازها به سبب خاصیت گلخانه‌ای، سبب افزایش دمای کره زمین و گرمایش جهانی می‌شود. بعد از عبور نور از جو و انعکاس آن از سطح کره زمین، این گازها اجازه عبور نور به بیرون از جو را نمی‌دهد و نور مجدداً به سطح زمین فرستاده و باعث گرمایش زمین می‌شود.

در مقابل، انرژی‌های پاک شامل انرژی هسته‌ای و منابع تجدیدپذیر میزان انتشار دی‌اکسید کربن بسیار پایینی دارند و زمین، اقیانوس و هوا را آلوده نمی‌کنند. منابع تجدیدپذیر با وجود پاک بودن، معایبی نیز دارند که مهم‌ترین آن، وابستگی به شرایط محیطی است. میزان برق تولیدی در شرایط کاهش بارش، کند شدن حرکت باد و تاریکی شب، کاهش می‌یابد و برق تولیدی به دلیل تغییرات زیاد طبیعی، نوسان داشته و به صورت یکنواخت و پایدار نمی‌باشد.

انرژی هسته‌ای به عنوان یک انرژی پاک، معایب سوخت‌های فسیلی مانند تولید گازهای گلخانه‌ای یا سایر آلاینده‌ها را ندارد و برخلاف انرژی‌های تجدیدپذیر، برقی پایدار و مطمئن تولید می‌نماید.


مقایسه ظرفیت حرارتی منابع مختلف تولید انرژی الکتریکی
۱/۶ میله سوختی
=
۱۰۰ ماشین زغال سنگ

❖ راکتورهای هسته‌ای قدرت

عملکرد نیروگاه‌های هسته‌ای مشابه نیروگاه‌های حرارتی است با این تفاوت که حرارت لازم برای تولید بخار آب از واکنش‌های شکافت هسته اورانیوم (سوخت هسته‌ای) به دست می‌آید. بخار آب، برای چرخاندن توربین استفاده می‌شود که به دنبال آن، ژنراتور به حرکت در می‌آید و باعث تولید برق می‌شود. همچنین می‌توان بخار تولیدی در نیروگاه قدرت هسته‌ای را به جای تولید برق، در تولید آب گرم مورد نیاز برای گرمایش خانه‌ها، شیرین‌سازی آب دریا و غیره استفاده کرد.

۲-۱ قلب راکتور هسته‌ای

قلب راکتور، سوخت هسته‌ای است که در داخل محفظه اصلی راکتور قرار می گیرد. میله‌های سوخت، میله‌هایی توخالی از جنس آلیاژ زیرکونیوم هستند که سوخت دی‌اکسید اورانیوم به شکل قرص در داخل این میله قرار داده می‌شود. میله‌های کنترل از اجزا بسیار مهم در راکتور و از جنس مواد جاذب نوترون هستند. این میله‌ها با جذب نوترون باعث کاهش سرعت واکنش شکافت می‌شوند و برای خاموشی راکتور و یا تنظیم توان راکتور کاربرد دارند.

نمونه‌ای از میله سوخت هسته‌ای

نمونه‌ای از قرص سوخت هسته‌ای

میله‌های سوخت در کنار هم قرار می‌گیرند و بسته‌ی سوخت یا همان مجتمع سوخت را شکل می‌دهند که داخل محفظه و مخزن اصلی راکتور قرار می‌گیرد.

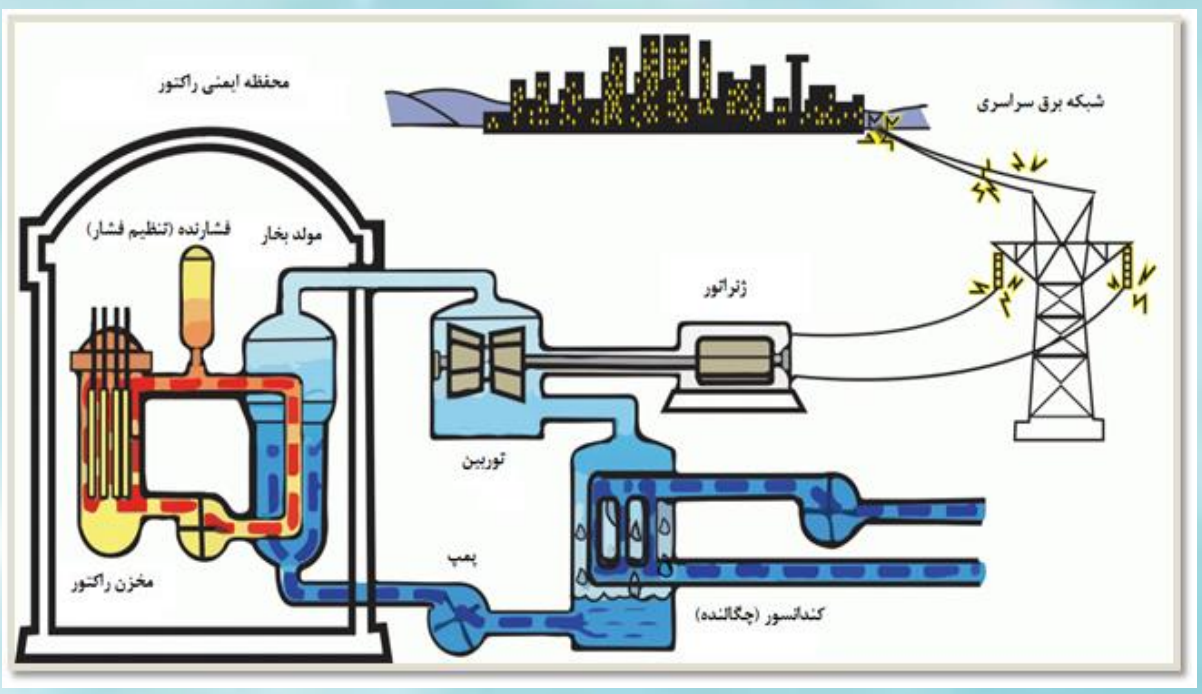
نمونه‌ای از مجتمع سوخت هسته‌ای

اجزاء قلب راکتور هسته‌ای

۲-۲ اصول کلی عملکرد نیروگاه هسته‌ای از نوع خنک‌کننده آب سبک

۲-۲-۱ راکتور آب سبک تحت فشار (PWR)

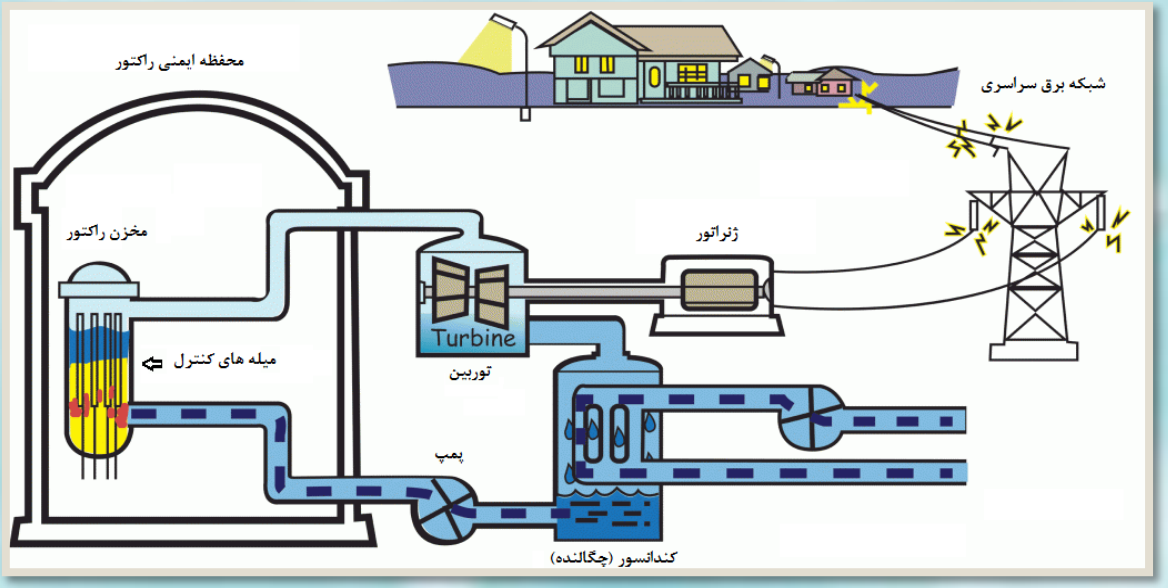
راکتورهای آب سبک تحت فشار از جمله متداول‌ترین راکتورهای هسته‌ای هستند. در ساختار این راکتور، مدارهای آب جدا از یکدیگرند. در مدار اولیه، آب در اثر حرارت تولید شده به دلیل واکنش شکافت هسته‌ای در قلب راکتور، گرم می‌شود. سپس با عبور آب گرم از مولد بخار، آب موجود در سمت دیگر آن، تبخیر می‌شود. بخار تولید شده در این مرحله، وارد توربین بخار می‌شود و پره‌های توربین را به چرخش درمی‌آورد. نهایتاً بخار از انتهای توربین راهی کندانسور (چگالنده) می‌شود و پس از میعان، به مولد بخار برمی‌گردد. چرخش پره‌های توربین توسط بخار منجر به چرخش محور متصل به ژنراتور می‌شود و به این ترتیب آنتالپی بخار به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در راکتور آب سبک تحت فشار، آبی که در قلب راکتور جریان پیدا می‌کند، به جوش نمی‌آید.



تصویر نمادین از راکتور آب سبک تحت فشار

۲-۲-۲راکتور آب سبک جوشان(BWR)

راکتورهای آب سبک جوشان، بعد از راکتورهای آب سبک تحت فشار، متداول‌ترین نوع راکتور هسته‌ای مورد استفاده در جهان هستند. در این راکتورها، آب داخل قلب راکتور در اثر حرارت تولیدی به جوش می‌آید و به بخار تبدیل می‌شود و نیازی به مولدهای بخار وجود ندارد. بخار بعد از میعان (کندانس)، مجدداً به قلب راکتور برمی‌گردد.



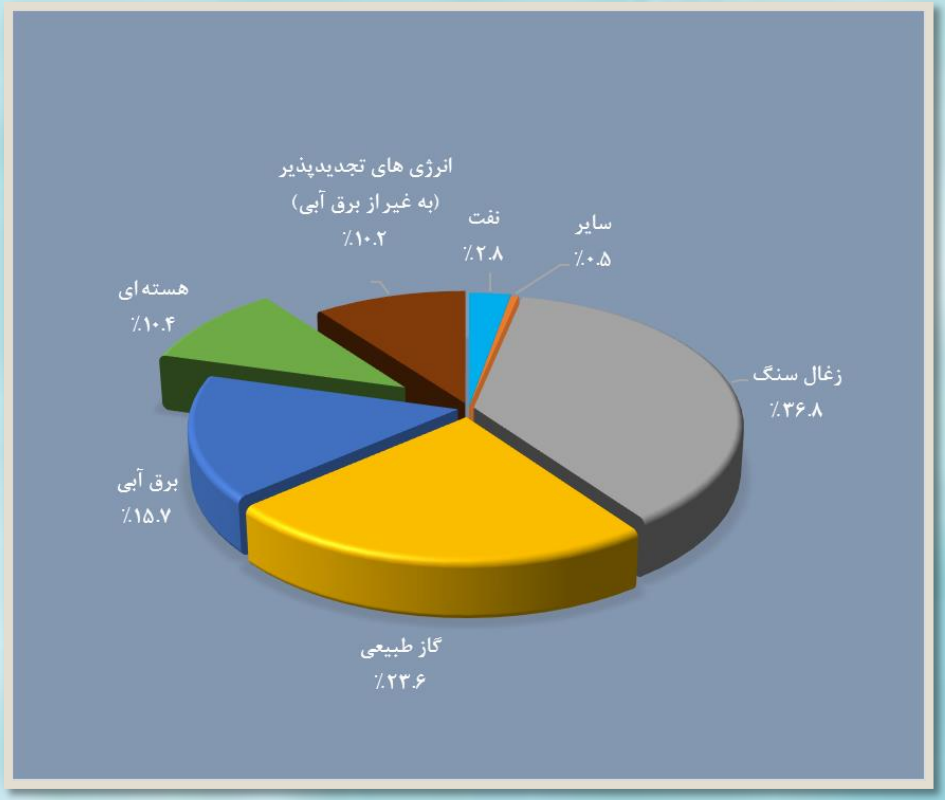
تصویر نمادین از راکتور آب سبک جوشان

تصویر یک نیروگاه آب سبک جوشان

۳-۲ آخرین وضعیت تولید برق هسته‌ای در جهان

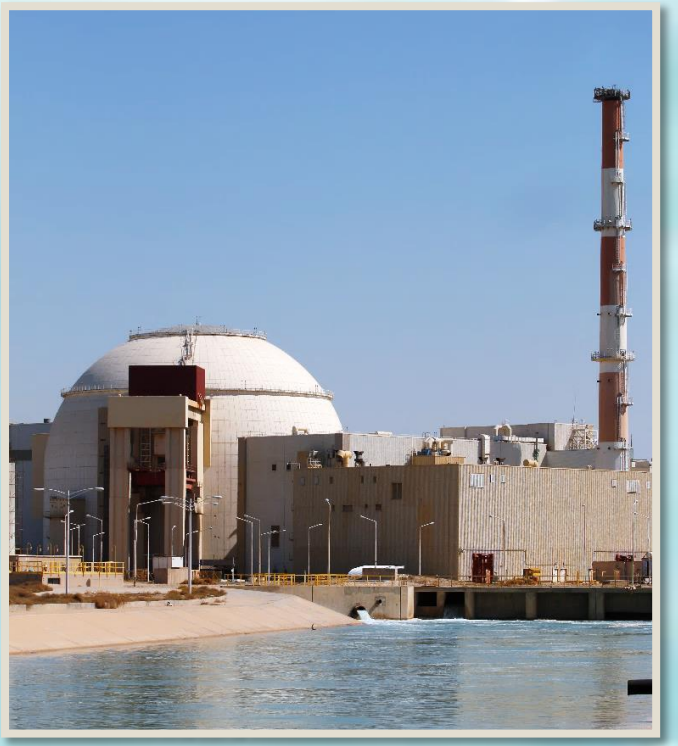
تا ماه آوریل سال ۲۰۲۲ میلادی، ۴۴۱ راکتور با ظرفیت کل نصب شده ۳۹۳/۵ گیگاوات در سراسر جهان فعال بوده و ۵۲ راکتور با ظرفیت ۵۳/۷ گیگاوات در حال ساخت است. عمده راکتورهای قدرت موجود و در حال ساخت از نوع آب سبک تحت فشار و آب سبک جوشان هستند. سی کشور از مجموع کشورهای عضو آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، در زمینه نیروگاه‌های هسته‌ای فعالیت می‌کنند. آمریکا، فرانسه، چین، ژاپن و روسیه دارای بیشترین تعداد راکتور قدرت هسته‌ای در جهان هستند و فرانسه، اسلواکی، اوکراین، مجارستان و بلژیک بیشترین سهم برق هسته‌ای را از تولید برق کشور خود دارند.

در سال ۲۰۱۹ میلادی، بیش از ۱۰ درصد از برق تولید شده در جهان از انرژی هسته‌ای به دست آمده است؛ اما همچنان سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ بیشترین سهم را در تولید برق مورد نیاز جهان دارند.



سهم منابع مختلف انرژی در تولید برق در سال ۲۰۱۹ در جهان

❖ واحد یکم نیروگاه هسته‌ای بوشهر



قرارداد ساخت، نصب و تحویل دو واحد نیروگاه هسته‌ای از نوع آب سبک تحت فشار در سال ۱۳۵۴ بین دولت‌های ایران و آلمان غربی منعقد گردید. شرکت آلمانی در سال‌های نخست جنگ تحمیلی، علیرغم اینکه بخش عمده‌ای از کارهای نیروگاه تکمیل شده بود، از ادامه کار برای راه‌اندازی و تحویل واحدها منصرف شد. سپس، در سال ۱۳۷۱ موافقت‌نامه همکاری برای استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای بین جمهوری اسلامی ایران و روسیه به امضا رسید و تکمیل نیروگاه به این کشور سپرده شد.

۲-۴ مشخصات فنی راکتور بوشهر

راکتور واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر از نوع آب سبک تحت فشار VVER-1000 و ساخت روسیه است. این راکتور دارای توان حرارتی در حدود ۳۰۰۰ مگاوات و توان الکتریکی در حدود ۱۰۰۰ مگاوات است. راکتور برای طول عمر ۴۰ سال طراحی شده و مدار اول آن دارای ۴ مولد بخار و ۴ پمپ اصلی آب خنک‌کننده است. قلب راکتور در محفظه فولادی قرار گرفته است و شامل ۱۶۳ مجتمع سوخت است. فشار آب خنک کننده درون محفظه در حدود ۱۵/۷ مگاپاسکال و دمای آن در حدود ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد است. استانداردهای ایمنی این راکتور قابل رقابت با راکتورهای مدرن غربی است.

ماکت واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر

۲-۵ تولید برق و بهره‌برداری از نیروگاه هسته‌ای بوشهر

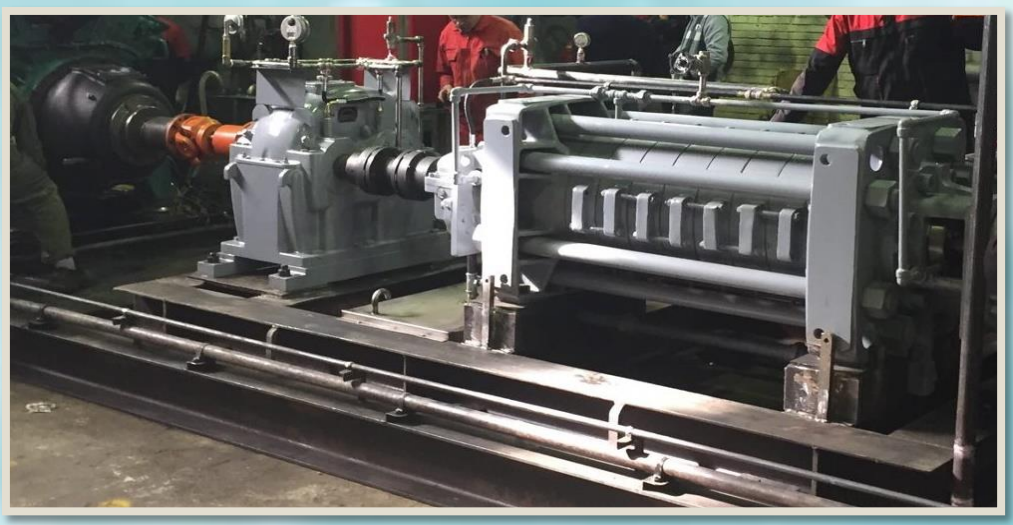
برای اولین بار در شهریورماه سال ۱۳۹۰ واحد یکم نیروگاه هسته‌ای بوشهر پس از پشت سر گذاشتن موفقیت‌آمیز آزمون‌های راه‌اندازی، به شبکه برق سراسری متصل شد. در مهرماه سال ۱۳۹۲ نیروگاه تحویل بهره‌بردار ایرانی و تولید تجاری آن آغاز گردید. این نیروگاه در مجموع تا پایان سال ۱۴۰۰ بیش از ۵۲ میلیارد کیلووات ساعت برق تحویل شبکه داده است.

ساختمان توربین نیروگاه هسته‌ای بوشهر

نیروگاه هسته‌ای بوشهر به عنوان یک منبع تولید کننده برق پاک، از نیاز به سوخت‌های فسیلی در بخش برق کشور کاسته و از سال ۱۳۹۰ تا پایان سال ۱۴۰۰ از مصرف بیش از ۸۲ میلیون بشکه معادل نفت خام و انتشار بیش از ۴۶ میلیون تن گازهای آلاینده جلوگیری نموده است.

طراحی، ساخت و تست تجهیزات و قطعات مورد نیاز نیروگاه هسته‌ای با استفاده از توان و تخصص نیروهای صنعت هسته‌ای و صنایع داخلی، یکی از راهبردهای اصلی جهت کسب دانش و بومی‌سازی این صنعت است.

پمپ نیروگاهی کندانس دمای بالا



دیزل پمپ اضطراری

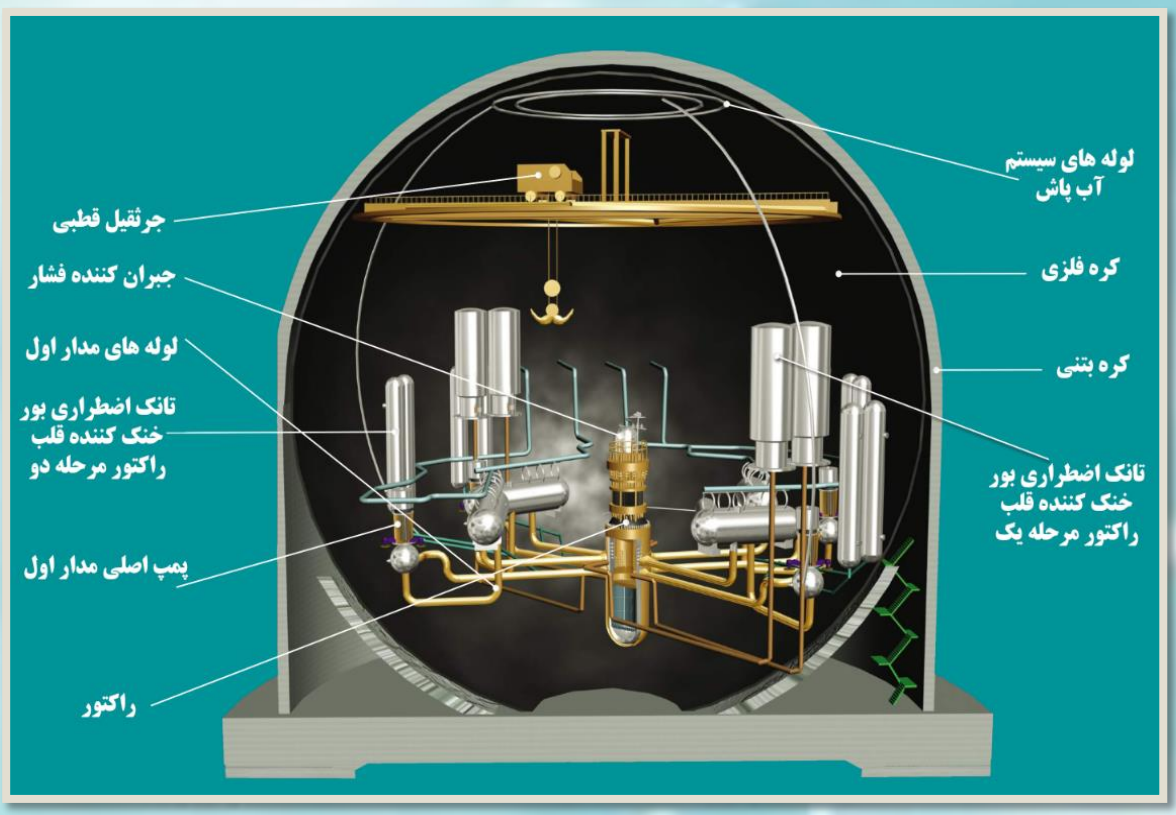
۲-۶ ایمنی در نیروگاه هسته‌ای بوشهر

اگرچه نیروگاه‌های هسته‌ای مزایای زیادی دارند اما چنانچه موارد ایمنی در آن‌ها رعایت نگردد، می‌تواند منجر به حوادث جبران‌ناپذیر گردد. هدف اصلی از برقراری ایمنی در نیروگاه‌های هسته‌ای، حفاظت از کارکنان، مردم و محیط‌زیست در برابر اثرات زیان‌بار پرتوهای یون‌ساز در تمام طول عمر نیروگاه و در کلیه مراحل راه‌اندازی، بهره‌برداری و از کاراندازی است.

در نیروگاه هسته‌ای بوشهر، در صورت بروز یک حادثه احتمالی، سیستم‌های ایمنی به صورت ۴ سیستم موازی، وظیفه خاموش کردن راکتور و برداشت انرژی حرارتی از قلب راکتور را به عهده دارند. وجود ۴ مجموعه موازی از هر سیستم ایمنی، جهت بالا بردن ضریب اطمینان عملکرد سیستم در نظر گرفته شده است.

همچنین ساختمان راکتور بوشهر در مقابل برخورد مستقیم هواپیمای مسافربری، هواپیمای جنگی و زلزله‌ای به‌شدت ۸ ریشتر مقاوم است و هیچ صدمه‌ای به تأسیسات راکتور و قلب آن وارد نمی‌شود. در چنین شرایطی سیستم کنترل و حفاظت خودکار نیروگاه، راکتور را خاموش و به وضعیت ایمن می‌رساند. همچنین برای پایش ایمنی این نیروگاه، اقدامات زیر به صورت مداوم در حال انجام است:

- بررسی آلودگی محیط به رادیوایزوتوپ‌ها (نمونه‌برداری از آب، خاک، گیاهان، هوا، محصولات گیاهی و جانوری در محیط اطراف نیروگاه و آنالیز نمونه‌ها از نظر میزان مواد پرتوزای موجود)؛
- بررسی غیر پرتوی محیط (بررسی عوامل فیزیکی و شیمیایی مانند دما، pH، میزان ناخالصی‌ها و سایر عناصر در آب ورودی به نیروگاه و خروجی از نیروگاه و در آب دریا)؛
- بررسی پرتوگیری کارکنان نیروگاه و وضعیت پرتوی در سطح نیروگاه؛
- تحلیل و بررسی رخدادهای مربوط به ایمنی نیروگاه؛
- ارائه خدمات بهداشتی و مراقبت‌های پرتویی برای ساکنین مجاور نیروگاه؛
- اجرای مانورهای شرایط اضطراری با همکاری استانداری و سازمان‌های مرتبط؛
- توزیع قرص ید برای استفاده در شرایط بروز حادثه پرتویی در بین ساکنین مجاور نیروگاه برای پیشگیری از آسیب‌های احتمالی به مردم.



تجهیزات اصلی و مرتبط با ایمنی در ساختمان اصلی راکتور

۷-۲ برنامه توسعه برق هسته‌ای در کشور

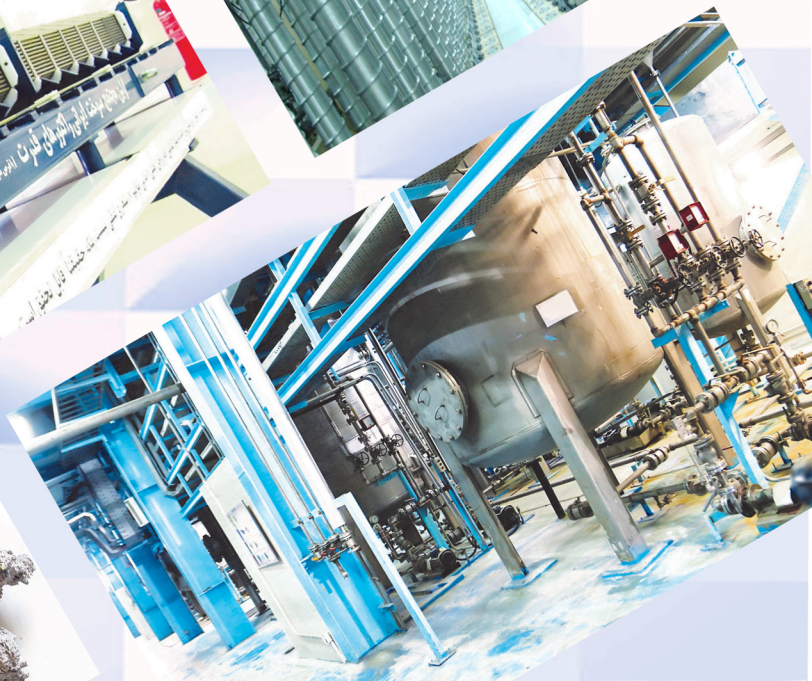
در سال‌های اخیر قرارداد ساخت دو واحد جدید نیروگاه هسته‌ای در کنار واحد یکم با کشور روسیه منعقد شده و در آبان سال ۱۳۹۸ عملیات بتن‌ریزی واحد دوم نیروگاه اتمی بوشهر آغاز شده است. بر اساس برنامه‌ریزی‌های انجام شده، واحد دوم در سال ۱۴۰۴ و واحد سوم در سال ۱۴۰۶ به بهره‌برداری خواهند رسید. مشخصات فنی این راکتورها به شرح زیر است:

- نوع راکتور: سری VVER-1000 ارتقاء یافته در سال ۲۰۰۸،
- توان الکتریکی خروجی هر واحد: ۱۰۵۷ مگاوات الکتریکی،
- عمر راکتور: ۶۰ سال.

همچنین برنامه کشور بر این است که تا سال ۱۴۲۰ علاوه بر این واحدها، ده هزار مگاوات برق هسته‌ای جدید به ظرفیت تولید برق کشور اضافه شود.

آغاز عملیات بتن‌ریزی واحد ۲ نیروگاه اتمی بوشهر

چرخه سوخت هسته‌ای

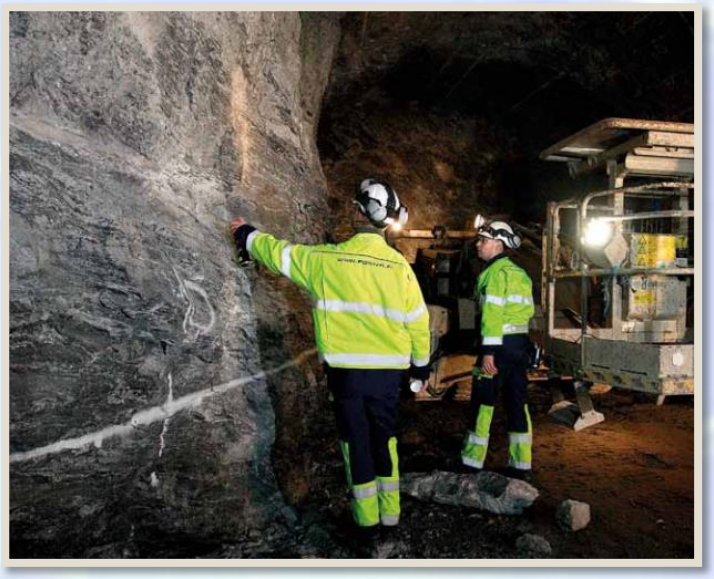


❖ آشنایی با اورانیوم و چرخه سوخت هسته‌ای

سنگ حاوی اورانیوم

اورانیوم یکی از عناصر موجود در طبیعت است که عدد اتمی آن ۹۲ و نشانه آن U است و در جدول تناوبی جزو آکتنیدها طبقه‌بندی می‌شود. ایزوتوپ‌های معروف آن ۲۳۸، ۲۳۵ و ۲۳۴ هستند که بیش از ۹۹٪ مربوط به اورانیوم –۲۳۸ و در حدود ۰/۷۲ ٪ مربوط به اورانیوم–۲۳۵ است. این عنصر در بسیاری از مناطق دنیا در سنگ، خاک و حتی آب دریا و اقیانوس‌ها وجود دارد و میزان و پراکندگی آن از طلا، نقره یا جیوه بیشتر است. اورانیوم از نظر فراوانی در میان عناصر طبیعی پوسته زمین در رده چهل و هشتم قرار دارد.

ایزوتوپ اورانیوم–۲۳۵ در نیروگاه‌های هسته‌ای به عنوان سوخت استفاده می‌شود. میزان منابع مشخص‌شده اورانیوم جهان در حدود ۸ میلیون تن و منابع مشخص‌شده ایران در حدود ۸۱۰۰ تن است. البته کانسارهای قابل معدنکاری با عیار بالا، محدود به مناطق خاصی در جهان است.



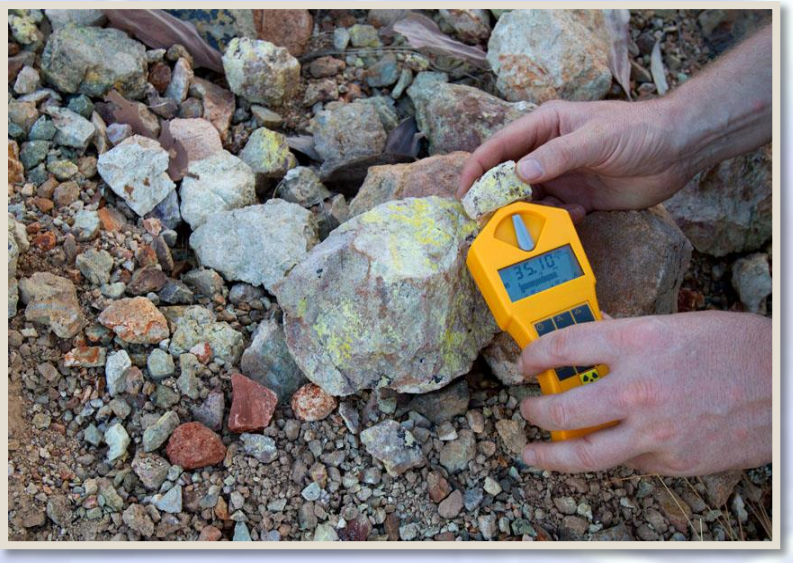
معدن اورانیوم

با توجه به میزان اورانیوم موردنیاز برای نیروگاه‌ها، طبق آمار سال ۲۰۱۶ و مقدار منابع قطعی و تخمینی، منابع اورانیوم برای بیش از ۱۰۰ سال آینده جواب‌گو است. البته با استفاده از تکنولوژی‌های نوین در نیروگاه‌های هسته‌ای و استفاده از سایر عناصر به عنوان سوخت هسته‌ای مانند توریوم و پلوتونیوم، منابع در دسترس تا قرن‌ها برای تولید برق هسته‌ای کافی خواهد بود.

به‌منظور استفاده از اورانیوم به عنوان سوخت برای راکتورهای هسته‌ای لازم است مجموعه فرآیندهایی که از اکتشاف معدن اورانیوم و استخراج سنگ معدن شروع شده و به مصرف اورانیوم در راکتورهای هسته‌ای به عنوان سوخت و پس از آن به بازفرآوری یا نگهداری

سوخت مصرف‌شده ختم می‌شود، انجام پذیرد که مجموعه این فرآیندها، چرخه سوخت هسته‌ای نام دارد. به‌طور کلی این مراحل عبارت‌اند از:

- **اکتشاف معدن و استخراج اورانیوم از معدن:** اولین قدم در چرخه تولید سوخت هسته‌ای، شناسایی و اکتشاف ماده معدنی اورانیوم است. اکتشاف اولیه مناطق دارای اورانیوم به صورت هوایی با هواپیما یا بالگرد و با کمک ابزار اندازه‌گیری تابش انجام می‌شود. بعد از عملیات هوایی و تکمیل اطلاعات هوابرد و مشخص شدن مناطق دارای پتانسیل بالا مرتبط با اورانیوم و توریوم، از آن‌ها نمونه‌برداری شده و با انجام آزمایش‌های لازم، نوع و میزان ذخیره کانی‌های حاوی اورانیوم مشخص می‌گردد.



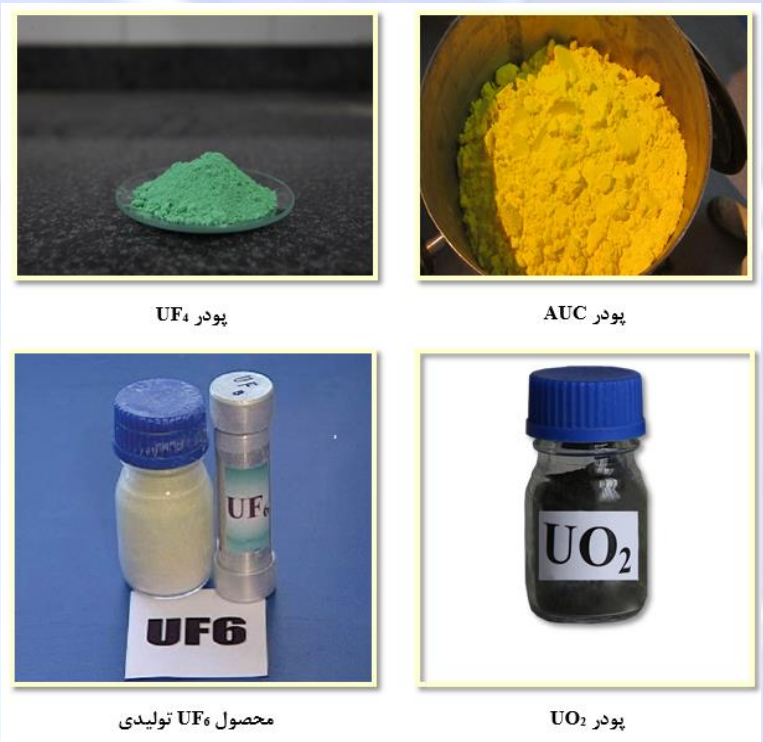
اندازه‌گیری تابش نمونه کانی اورانیوم

استخراج معادن به دو صورت کلی روباز و زیرزمینی صورت می‌گیرد. اگر رگه شناسایی‌شده در سطح یا در عمق کم باشد، از روش روباز استفاده می‌شود. در این روش با لایه‌برداری از سطح زمین به رگه موردنظر می‌رسند و نیازی به حفر تونل نیست؛ اما اگر عمق رگه شناسایی‌شده بالا باشد، باید با حفر تونل‌هایی به محل موردنظر رسیده و عملیات معدنکاری را در آنجا انجام داد که به این روش، روش زیرزمینی می‌گویند. همچنین کانی‌های اورانیوم را می‌توان به صورت مایع نیز استخراج نمود که برای این منظور، محلول‌هایی از مجاری حفر شده به معدن تزریق می‌شوند. این محلول‌ها در سنگ معدن نفوذ و آن را حل کرده و به‌صورت نیمه‌مایع از مجاری در نظر گرفته شده، خارج می‌شوند.

- **کانه‌آرایی (تولید کیک زرد از سنگ معدن):** در فرآیند تولید کیک زرد، سنگ‌های استخراجی، خرد شده و به قطعات بسیار ریز تبدیل شده و با آب شسته می‌شوند تا برای عملیات استخراج اورانیوم از سنگ‌ها آماده شوند. برای خارج کردن عنصر اورانیوم از سنگ معدن، سنگ در مواد اسیدی یا قلیایی حل می‌گردد و در ادامه اورانیوم از ناخالصی‌های موجود در محلول به روش تبادل یونی، یا با حلال‌های مخصوصی جدا می‌شود. سپس با افزودن مواد شیمیایی، ترکیبات اورانیومی رسوب داده شده و رسوبات با فیلتر از محلول جدا می‌شوند. رسوبات فیلتر شده، در کوره حرارت داده می‌شوند تا به U_3O_8 (کیک زرد) تبدیل گردند. حداقل میزان اورانیوم در کیک زرد در حدود ۷۵٪ است.

مخزن نگهداری کیک زرد اورانیوم

- **تبدیل و فرآوری ترکیبات اورانیوم (تولید هگزا فلوراید اورانیوم از کیک زرد):** در واحد تبدیل، ابتدا کیک زرد در اسید نیتریک حل شده و به فرم نیترات اورانیل تبدیل می‌شود. در مرحله بعد در عملیات خالص‌سازی، اورانیوم موجود در محلول از ناخالصی‌ها توسط حلال‌هایی مانند تری بوتیل فسفات جدا می‌شود. سپس اورانیوم در واکنش با عوامل شیمیایی رسوب‌گیری شده و در عملیات حرارتی در کوره به دی‌اکسید اورانیوم طبیعی تبدیل می‌شود. دی‌اکسید اورانیوم تولیدی در واکنش هیدروفلوریناسیون با ماده فلوراید هیدروژن (HF) به تترافلوراید اورانیوم (UF_4) و سپس در واکنش فلوریناسیون با ماده فلوئور (F_2) به هگزافلوراید اورانیوم (UF_6) تبدیل می‌شود.



پودر AUC — پودر UF_4

پودر UO_2 — محصول UF_6 تولیدی

انواع ترکیبات اورانیوم

- **غنی‌سازی هگزا فلوراید اورانیوم:** به منظور استفاده از اورانیوم به عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک، غنای ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ باید از مقدار طبیعی تا حدود ۳ تا ۵ درصد در طی فرآیند غنی‌سازی افزایش یابد. این بخش یکی از دشوارترین مراحل در فرآیند تولید سوخت هسته‌ای است، چرا که دو ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۸ از نظر وزنی خیلی به هم نزدیک هستند و جدا کردن این دو ایزوتوپ از یکدیگر نیازمند فرآیند پیچیده‌ای است. برای انجام این کار، روش‌های مختلفی همچون ماشین‌های سانتریفیوژ، سیستم نفوذ گازی، لیزر و الکترومغناطیس وجود دارد.

ماشین‌های سانتریفیوژ گازی از سال ۱۹۳۴ میلادی برای جداسازی گازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در مقایسه با روش نفوذ گازی نیازمند صرف انرژی کمتری هستند و بازدهی جداسازی بالاتری دارند. در حال حاضر اورانیوم غنی شده مورد نیاز جهت استفاده در سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای، عمدتاً با استفاده از روش سانتریفیوژ تولید می‌شود.

سانتریفیوژ استوانه‌ای عمودی است که به دور محور خود می‌چرخد. این دستگاه مواد را با سرعت زیاد به گردش درمی‌آورد و مواد متناسب با جرمی که دارند از محور مرکزی فاصله می‌گیرند. هنگامی‌که گاز هگزا فلوراید اورانیوم به داخل این سیلندر دمیده شود، نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش آن باعث می‌شود که مولکول‌های سبک‌تر حاوی اورانیوم-۲۳۵ در مرکز سیلندر متمرکز شده و مولکول‌های سنگین‌تری حاوی اورانیوم ۲۳۸ دور از محور سیلندر انباشته شوند. جریان حاوی اورانیوم-۲۳۵ غنی شده به داخل سانتریفیوژ دیگری دمیده می‌شود تا درجه غنای آن باز هم بالاتر رود. این عمل بارها و بارها توسط سانتریفیوژهای متعددی که به‌طور سری به یکدیگر متصل شده‌اند، تکرار می‌شود تا جایی که اورانیوم-۲۳۵ با درصد غنای موردنیاز به دست آید.

ساخت سوخت دی‌اکسید اورانیوم و تبدیل آن

به مجتمع سوخت: ساخت سوخت اورانیوم غنی‌شده دارای سه بخش عمده تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم غنی‌شده، تولید غلاف و سایر قطعات لازم برای ساخت مجتمع سوخت و بخش تولید قرص دی‌اکسید اورانیوم و ساخت مجتمع سوخت نهایی است.

مجتمع‌های سوخت هسته‌ای

هگزافلوراید اورانیوم غنی‌شده در سیلندرهایی ذخیره و منجمد شده و به واحد تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم غنی‌شده ارسال می‌شود. قبل از ارسال در واحد اختلاط باید غنای سوخت به میزان موردنیاز برای راکتور تنظیم شود.

هگزافلوراید اورانیوم موجود در سیلندر، تبخیر و وارد فرایند هیدرولیز (آبکافت) می‌شود و به UO_2F_2 تبدیل می‌گردد. این ماده در واحد رسوب‌گیری به رسوب آمونیوم دی‌اورانات تبدیل می‌شود و رسوب بعد از آبگیری و خشک شدن، در مرحله دیگر در کوره و تحت اتمسفر هیدروژن گرم و به دی‌اکسید اورانیوم تبدیل می‌شود. پودر دی‌اکسید اورانیوم در بخش پرس و قالب‌گیری به قرص‌های سوخت خام تبدیل و سپس در کوره گرم و به قرص سرامیکی دی‌اکسید اورانیوم تبدیل می‌شود تا تحمل دمای بالای راکتور را داشته باشد.

پودر دی‌اکسید اورانیوم

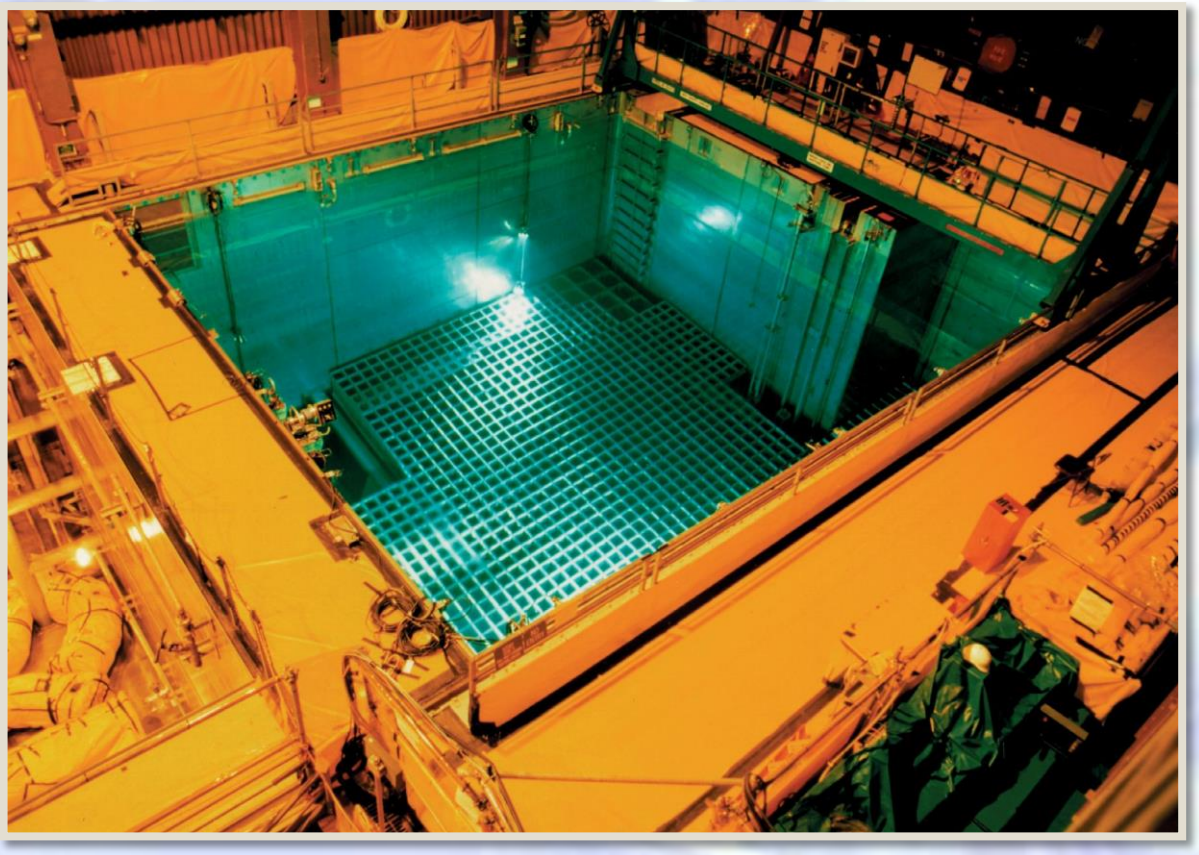
میله توخالی (غلاف) مورد نیاز و سایر قطعات که معمولاً از جنس آلیاژهای زیرکونیوم هستند، در واحد دیگر تولید می‌شوند. قرص‌های تولید شده بعد از بازرسی فنی و تأیید کیفیت در درون این میله‌ها قرار داده می‌شوند. سایر قطعات مانند فنرهای لازم، درپوش‌ها و قرص آلومینیوم نیز در درون این میله‌ها قرار داده می‌شوند و بعد از تزریق گاز هلیوم، عملیات جوشکاری دو سر میله

انجام می‌شود. میله‌های تولید شده بعد از تست و تأیید کیفیت و سایر عملیات لازم در قالب مجتمع سوخت گردآوری می‌شوند و آماده ارسال برای استفاده در راکتور خواهند بود.

برشی از مجتمع سوخت هسته‌ای تولید شده در کارخانه اصفهان

- **ذخیره‌سازی یا بازفرآوری سوخت مصرف‌شده:** بعد از خروج مجتمع سوخت مصرف شده از راکتور هسته‌ای، به دلیل ادامه واکنش‌های واپاشی در درون سوخت، هنوز درون میله‌های سوخت حرارت تولید می‌شود. به همین دلیل ابتدا میله‌های سوخت در استخرهایی در کنار نیروگاه نگه‌داری می‌شوند تا میزان واکنش‌های پرتوزایی و حرارت تولیدی آن‌ها کاهش یابد. در ادامه دو راهکار در مورد سوخت مصرف شده وجود دارد. برخی کشورها هیچ استفاده دیگری از سوخت مصرف شده نمی‌کنند و آن‌ها را در انبارهایی نگهداری می‌نمایند. برخی کشورها در طولانی مدت برنامه‌هایی برای نگهداری سوخت مصرف شده در محفظه‌های ویژه‌ای، در تونل‌هایی در اعماق زمین و یا در دل کوه‌ها و معادن متروکه دارند.

گزینه دیگر در نحوه مدیریت سوخت مصرف شده، جداسازی اورانیوم باقی‌مانده، پلوتونیوم و سایر عناصر مفید تولیدی در سوخت مصرف شده و دفن پسماندهای باقیمانده است. اورانیوم و پلوتونیوم حاصل از بازفرآوری می‌تواند در ساخت سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در حال حاضر کشورمان در این زمینه فعالیتی ندارد.



استخر نگهداری سوخت مصرف شده

۳-۱ اکتشاف و استخراج

برای تأمین بخشی از اورانیوم مورد نیاز صنعت هسته‌ای کشور، فعالیت‌های اکتشافی معادن اورانیوم کشور، دو سال پیش از پیروزی انقلاب آغاز شده و پس از پیروزی انقلاب نیز این فعالیت ادامه داشته است. بررسی نقاط مستعد کشور از حیث منابع اورانیوم، بیشتر با کمک خودرو و بالگرد انجام شده است. نتایج این بررسی‌ها منجر به اکتشاف معادن ساغند یزد و گچین بندرعباس شده است.

تجهیزات مربوط به اکتشاف مناطق مستعد با خودرو

عملیات حفر گمانه اکتشافی

عملیات گمانه‌نگاری (چاه پیمایی) گمانه اکتشافی

- **معدن ساغند**

سایت معدن ساغند در بخش مرکزی ایران، در شمال شرقی شهر یزد واقع شده است. بخش کمی از معدن روباز و قسمت عمده آن به صورت زیرزمینی استخراج می‌شود. عیار این معدن حدود ۵۰۰ گرم U_3O_8 در هر تن سنگ معدن و کل ذخیره همراه با ناخالصی آن حدود ۹۰۰ هزار تن سنگ معدن تخمین زده شده است و میزان استخراج سالیانه ۱۲۰ هزار تن سنگ معدن (روزانه ۵۰۰ تن) در نظر گرفته شده است. این معدن ماده اولیه مورد نیاز تولید کیک زرد کارخانه شهید رضایی نژاد اردکان را تأمین می‌نماید.

بخش روباز معدن ساغند

بخش زیر زمینی معدن ساغند

- **معدن گچین بندرعباس**

معدن گچین بندرعباس در غرب شهر بندرعباس قرار دارد. این معدن در طول سال‌های گذشته به‌صورت روباز مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. عیار متوسط این معدن حدود ۶۸۰ گرم اورانیوم در هر تن سنگ معدن است. ذخایر معدن گچین حدود ۱۷۰ هزار تن سنگ معدن برآورد شده که در حال حاضر بهره‌برداری از آن به پایان رسیده است.

۳-۲ تولید کیک زرد اورانیوم

- **مجتمع تولید کیک زرد بندرعباس**

این کارخانه در مجاورت معدن گچین بندرعباس قرار گرفته است. ظرفیت تولید این واحد ۲۱ تن اکسید اورانیوم در سال و خوراک سالیانه ۱۵ هزار تن سنگ معدن است. با توجه به اتمام ذخایر معدن گچین بندرعباس، بهره‌برداری از این کارخانه فعلاً متوقف شده است.

مجتمع تولید کیک زرد بندرعباس

- **کارخانه تولید کیک زرد شهید رضایی‌نژاد (اردکان)**

کارخانه تولید کیک زرد شهید رضایی‌نژاد در شهرستان اردکان قرار دارد. این مجتمع سنگ استخراجی از معدن اورانیوم ساغند را طی یک فرآیند چند مرحله‌ای به کیک زرد تبدیل می‌کند. ظرفیت تولید این واحد ۵۰ تن اکسید اورانیوم در سال و خوراک سالیانه ۸۴ هزار تن سنگ معدن است.

نمایی از خط تولید کارخانه تولید کیک زرد شهید رضایی‌نژاد

نمای بیرونی کارخانه تولید کیک زرد شهید رضایی‌نژاد

۳-۳ کارخانه فرآوری و تبدیل اورانیوم اصفهان

کارخانه فرآوری و تبدیل اورانیوم اصفهان، UF_6 طبیعی که خوراک اولیه برای کارخانه‌های غنی‌سازی است را تولید می‌کند. ایران در سال ۱۳۸۳ اولین محصول هگزا فلوراید اورانیوم UF_6 خود را جهت غنی‌سازی در مجتمع غنی‌سازی شهید احمدی روشن (نطنز) تولید کرده است. ظرفیت تولید این کارخانه سالانه ۲۸۰ تن هگزا فلوراید اورانیوم طبیعی است.

نمایی از خط تولید کارخانه فرآوری و تبدیل اورانیوم اصفهان

نمای بیرونی کارخانه فرآوری و تبدیل اورانیوم اصفهان

۳-۴ غنی‌سازی اورانیوم

میزان غنای اورانیوم-۲۳۵ در کارخانه غنی‌سازی شهید احمدی روشن در نطنز و کارخانه غنی‌سازی شهید علی‌محمدی در فردو جهت ساخت سوخت مورد نیاز نیروگاه‌های هسته‌ای تا ۳ الی ۵ درصد افزایش می‌یابد. در این دو کارخانه برای انجام فرآیند غنی‌سازی از زنجیره‌ای از ماشین‌های سانتریفیوژ استفاده می‌شود که فرایند غنی‌سازی را به صورت متوالی انجام می‌دهند. تاکنون در کشور چندین نسل از این ماشین‌ها با ویژگی‌های متفاوت به دست متخصصین داخلی ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است و مدل‌های پیشرفته‌تری نیز در حال طراحی و ساخت هستند. توان غنی‌سازی هر ماشین با واحدی بنام سو (SWU)[۱] سنجیده می‌شود که هر چه بالاتر باشد، توان جداسازی ماشین بالاتر و به تعداد ماشین‌های کمتری برای رسیدن به درصد مطلوب نیاز است. لازم به توضیح است که فعالیت کشور در حوزه غنی‌سازی اورانیوم و کسب دانش ساخت و راه‌اندازی انواع زنجیره‌های سانتریفیوژ، زمینه‌ساز دست‌یابی کشور به فناوری جداسازی سایر ایزوتوپ‌ها شده که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. متخصصان صنعت غنی‌سازی موفق به بومی‌سازی و ساخت دستگاه‌های سانتریفیوژ در طرح‌ها و مشخصات مختلف شده‌اند که برخی در حال تولید انبوه و برخی نیز در فاز تحقیق و توسعه هستند.

ظرفیت عملیاتی انواع سانتریفیوژهای داخلی

ماشین سانتریفیوژ	IR1	IR2	IR2M	IR3	IR4	IR5	IR6	IR7	IR8	IR9
ظرفیت عملیاتی ماشین‌ها در زنجیره برحسب واحد سو (SWU)	۱/۴۸	۱/۸	۵/۶	۲	۵/۳	۹	۹/۵	۱۸	۲۱/۴	۵۰

[۱] separation work unit

زنجیره ماشین‌های سانتریفیوژ

همچنین برای افزایش ظرفیت ساخت سانتریفیوژهای مدرن در کشور، مرکز مونتاژ سانتریفیوژ ایران مطابق استانداردهای جهانی در کارخانه شهید احمدی روشن در نطنز ساخته شده است.

در فرآیند غنی‌سازی علاوه بر ماشین‌های سانتریفیوژ به تجهیزات مکانیکی، الکتریکی و ابزار دقیق دیگری نیاز است که از جمله آن‌ها می‌توان به تجهیزات خلأ، آشکارساز ماده فلوراید هیدروژن (HF)، دستگاه طیف‌سنج جرمی و غیره اشاره نمود. با توجه به اینکه طراحی و ساخت تجهیزات ذکرشده به تکنولوژی بالایی نیاز دارد، ساخت آن‌ها در انحصار کشورهای محدودی است که به دلیل تحریم‌های تجاری و صنعتی موجود، تأمین آن‌ها از منابع خارجی دشوار است، لذا در سازمان انرژی اتمی پروژه‌های مختلفی در راستای طراحی و ساخت انواع تجهیزات تعریف شده و پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای نیز حاصل شده است.

تجهیزات ایجاد و کنترل خلأ در صنعت غنی‌سازی از کاربرد گسترده‌ای برخوردارند. با توجه به تحریم‌های تجاری و صنعتی موجود در تأمین این تجهیزات، ساخت و تأمین داخلی این تجهیزات در دستور کار سازمان انرژی اتمی قرار دارد.

۳-۵ واحدهای تولید سوخت هسته‌ای در ایران

با هدف تولید سوخت برای راکتورهای تحقیقاتی و قدرت کشور، مجموعه کارخانه‌های مرتبط با تولید سوخت هسته‌ای در اصفهان در مجاورت کارخانه تبدیل و فرآوری اورانیوم تأسیس شده است. این مجموعه از پنج کارخانه تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم طبیعی و غنی شده، تولیدات آلیاژ زیرکونیوم و قطعات مورد نیاز به‌خصوص غلاف، تولید و مونتاژ مجتمع سوخت هسته‌ای و واحد تولید سوخت صفحه‌ای تشکیل شده است.

➢ کارخانه تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم طبیعی و غنی‌شده

این کارخانه پودر دی‌اکسید اورانیوم لازم برای ساخت سوخت را تولید می‌کند. در کارخانه تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم غنی‌شده، گاز هگزافلوراید اورانیوم غنی‌شده به‌عنوان خوراک وارد و به پودر دی‌اکسید اورانیوم غنی‌شده تبدیل می‌شود که از آن برای تولید قرص سوخت برای نیروگاه بوشهر استفاده می‌شود. در کارخانه تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم طبیعی، کیک زرد اورانیوم (U_3O_8) در طی فرایند انحلال، خالص‌سازی، رسوب‌گیری و عملیات حرارتی به UO_2 برای ساخت قرص سوخت راکتورهای آب سنگین تبدیل می‌شود. لازم به توضیح است با توجه به تغییرات صورت گرفته در سوخت مورد نیاز راکتور آب سنگین اراک، این واحد در حال حاضر مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرد.

بخشی از خط تولید کارخانه تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم غنی‌شده

بخشی از خط تولید کارخانه تولید پودر دی‌اکسید اورانیوم طبیعی

➢ کارخانه تولید آلیاژ و قطعات زیرکونیومی اصفهان

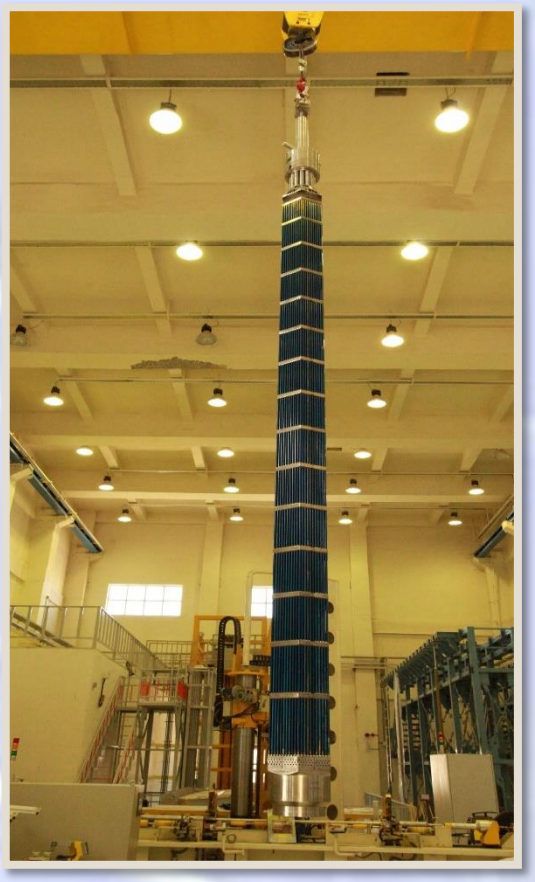
زیرکونیوم به لحاظ دارا بودن خواصی همچون برخورداری از جذب نوترونی پایین و خواص مناسبی همچون استحکام کافی، مقاومت در برابر خوردگی و ضریب انتقال حرارتی مناسب، در تولید مجتمع‌های سوخت کاربرد فراوانی دارد. کارخانه تولید آلیاژ و قطعات زیرکونیومی اصفهان با هدف تولید محصولات اصلی و جانبی مورد استفاده در ساخت مجتمع‌های سوخت، مانند شمش آلیاژ زیرکونیوم، غلاف و سایر قطعات زیرکونیومی تأسیس شده است. در این کارخانه علاوه بر زیرکونیوم، فلزات جانبی ارزشمند دیگری نظیر منیزیم و هافنیوم نیز تولید می‌شوند.

غلاف زیرکونیومی

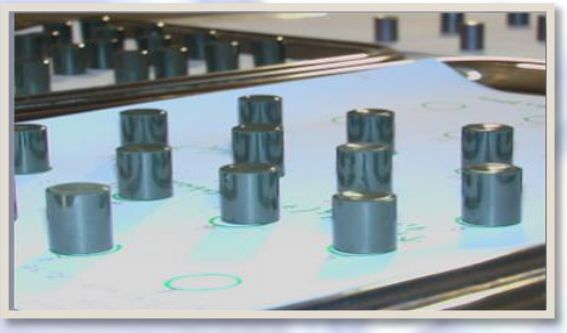
اسفنج منیزیم

اسفنج زیرکونیوم

در این کارخانه ابتدا پودر دی‌اکسید اورانیوم بعد از اختلاط با برخی مواد لازم و همگن شدن، در دستگاه قالب‌زنی و پرس، به قرص خام و در ادامه در کوره به قرص‌های سرامیکی تبدیل می‌شود. قرص و سایر قطعات مورد نیاز در میله‌های سوخت قرار داده شده و بعد از تزریق گاز هلیوم به داخل میله، دو سر آن جوش داده می‌شود. سایر قطعات مورد نیاز مجتمع سوخت و میله‌های سوخت با یکدیگر مونتاژ شده و مجتمع سوخت بعد از تست‌های نهایی آماده می‌شود.



مجتمع سوخت هسته‌ای



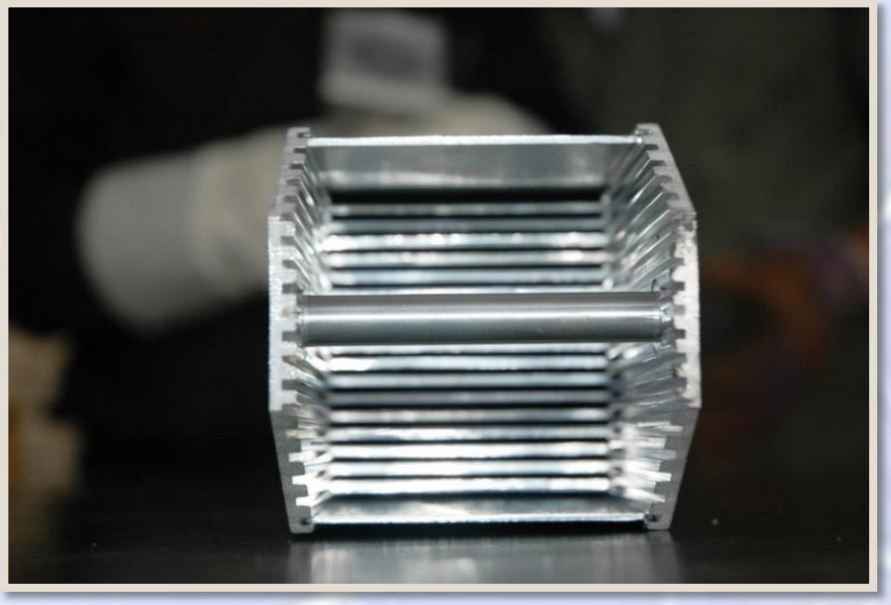
نمونه‌ای از قرص‌های سرامیکی تولید شده

مجتمع سوخت هسته‌ای راکتور قدرت

➢ کارخانه تولید سوخت صفحه‌ای

این تأسیسات با هدف تأمین سوخت صفحه‌ای مورد نیاز راکتور تحقیقاتی تهران به دست متخصصان داخلی طراحی و ساخته شده است و شامل دو بخش اصلی زیر است:

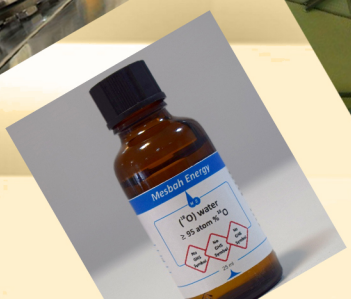
- تولید پودر اکسید اورانیوم با غنای ۲۰٪: خوراک این بخش گاز UF_6 غنی‌شده است که طی مراحل واکنش با آب، رسوب‌گیری و حرارت دادن رسوبات، در نهایت به پودر U_3O_8 با غنای ۲۰٪ تبدیل می‌شود.
- تولید سوخت صفحه‌ای: مراحل این بخش شامل اختلاط پودر U_3O_8 و پودر آلومینیوم و تولید ورق سوخت در دستگاه پرس، قرار دادن صفحات آلومینیومی در اطراف ورق خام و انجام جوشکاری، کاهش ضخامت صفحات سوخت، برش در ابعاد نهایی، مونتاژ مجتمع سوخت و کنترل کیفیت در مراحل مختلف است.



مجتمع سوخت صفحه‌ای مورد نیاز راکتور تحقیقاتی تهران

مجتمع سوخت صفحه‌ای مورد نیاز راکتور تحقیقاتی تهران

آب سنگین و ایزوتوپ های پایدار



❖ آب سنگین و سایر ایزوتوپ‌های پایدار

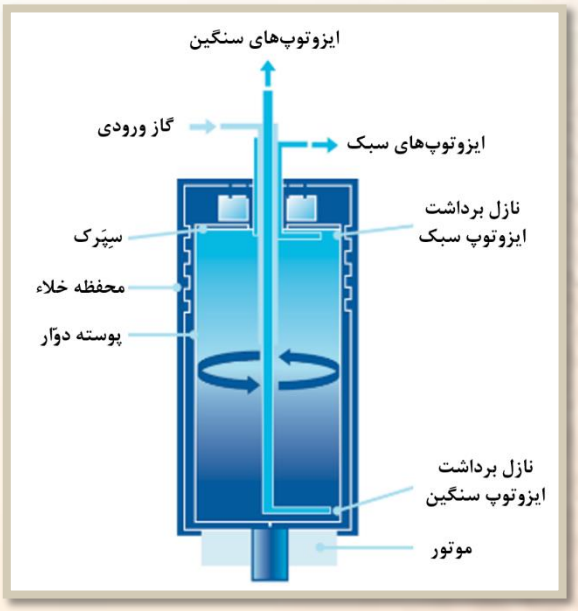
ایزوتوپ‌ها بطور کلی به دو دسته پایدار و ناپایدار (پرتوزا) تقسیم می‌شوند. در حدود ۲۸۳ ایزوتوپ پایدار و بیش از ۳۲۰۰ ایزوتوپ ناپایدار وجود دارد. ایزوتوپ‌های پایدار پرتوزا نیستند و خاصیت پرتوزایی ندارند.

ایزوتوپ‌های پایدار کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف مانند صنعت، پزشکی، فناوری هسته‌ای، زمین‌شناسی، باستان‌شناسی، کشاورزی، داروسازی، تست و آنالیز و سایر تحقیقات علمی دارند.

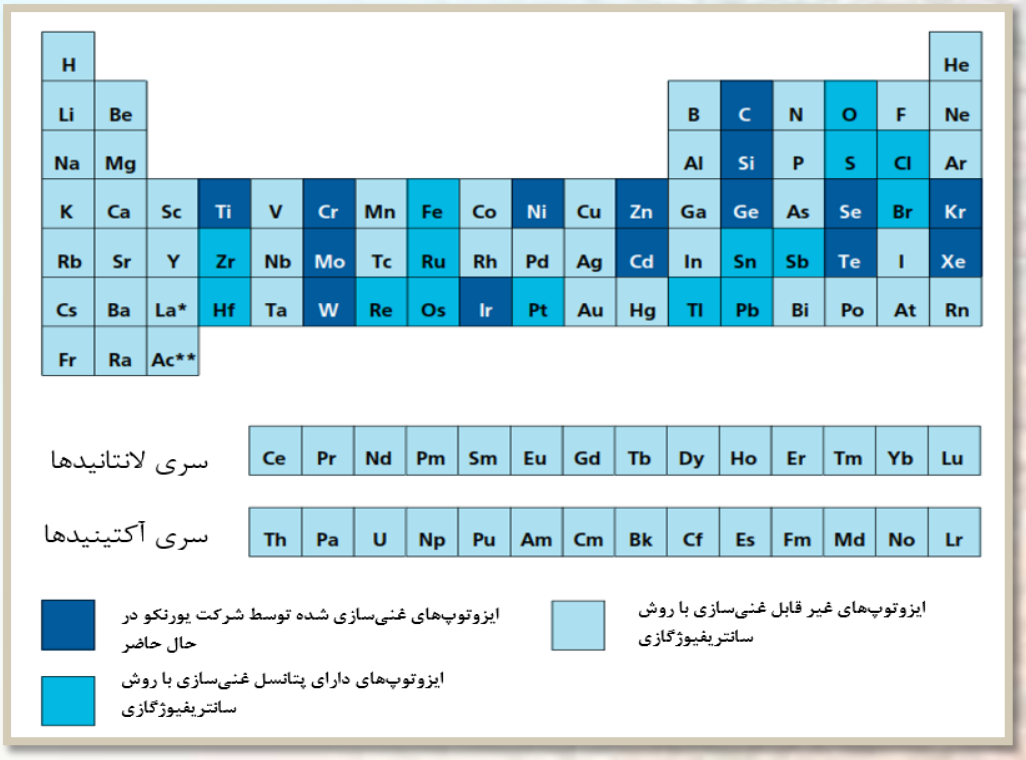
یکی از حیاتی‌ترین کاربردهای ایزوتوپ‌های پایدار، استفاده از آن‌ها به عنوان ماده اصلی و یا خام در تولید رادیوداروهای مختلف است. یکی از پرکاربردترین ایزوتوپ‌های پایدار، آب سنگین است که در ادامه بیشتر در خصوص آن خواهیم آموخت.

۴-۱ روش‌های جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار

چند مورد از روش‌ها و ابزارهایی که برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار به کار برده می‌شوند، عبارت‌اند از:

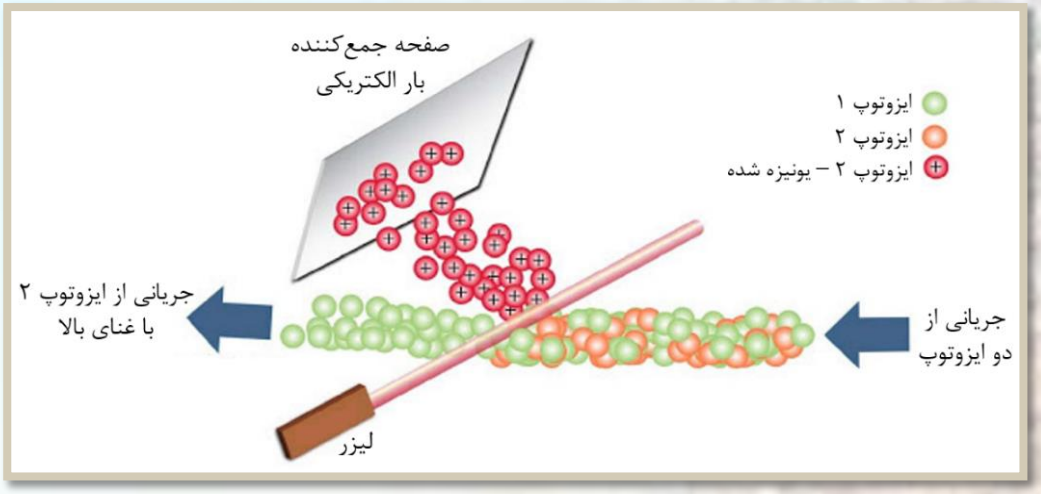


سانتریفیوژ: استفاده از سانتریفیوژ یکی از روش‌های صنعتی جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار است. در این روش، جداسازی ایزوتوپ‌ها بر اساس نیروی گریز از مرکز انجام می‌شود و ضریب جداسازی به اختلاف جرم اتمی ایزوتوپ‌های تحت جداسازی بستگی دارد. در یک سانتریفیوژ چرخان با سرعت بالا، نیروی بیشتری بر مولکول‌های سنگین‌تر اعمال می‌شود و در نتیجه مولکول‌های سنگین‌تر، بیشتر به سمت جداره سانتریفیوژ متمایل می‌شوند. اتصال چندین سانتریفیوژ متوالی در یک زنجیره، منجر به غنی‌سازی ایزوتوپ مورد نظر تا درصد مطلوب خواهد شد. امروزه شرکت بین المللی یورنکو یکی از بزرگترین شرکت‌های تولید کننده ایزوتوپ های پایدار در جهان با استفاده از روش سانتریفیوژ گازی، حدود ۱۵ عنصر را با این روش، جداسازی ایزوتوپی می‌کند و اعلام کرده است ۱۵ عنصر دیگر نیز قابلیت جداسازی با این روش را دارند.

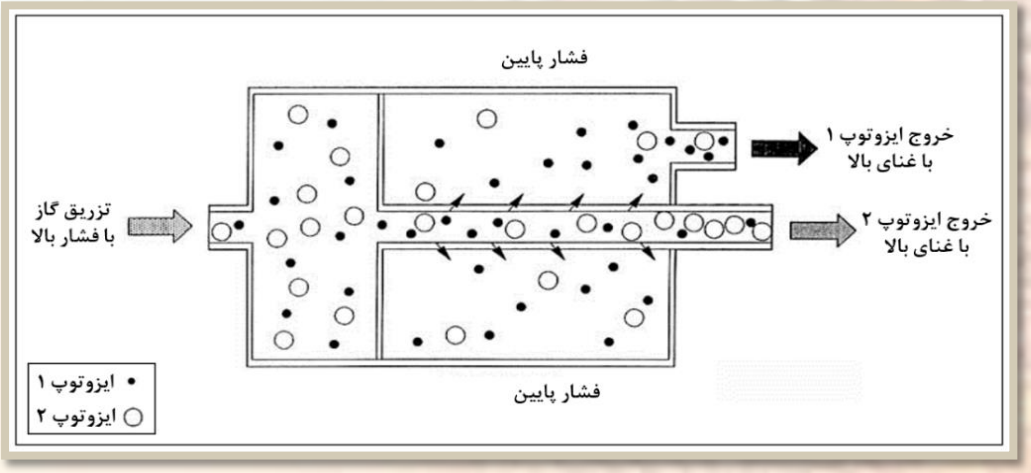


فعالیت‌های شرکت یورنکو در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار با روش سانتریفیوژ

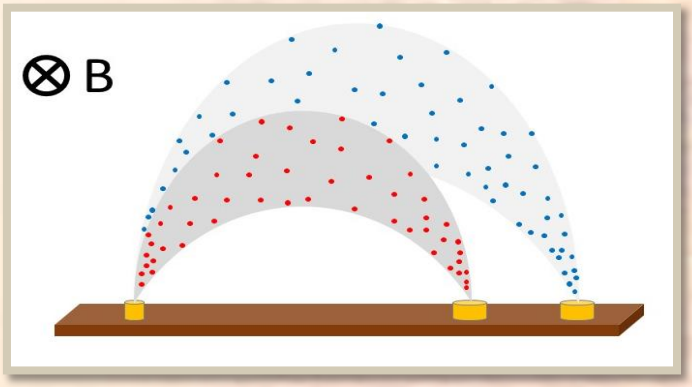
- **تقطیر:** یکی از تفاوت‌های ترکیبات ایزوتوپی با یکدیگر، تفاوت در خواص ترمودینامیکی مانند فشار بخار و دمای جوش است. روش تقطیر بر مبنای این تفاوت کار می‌کند و یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای جداسازی ایزوتوپ‌ها در مقیاس صنعتی در مورد بسیاری از عناصر سبک مثل کربن، نیتروژن، اکسیژن، نئون و ... به شمار می‌آید.
- **روش‌های شیمیایی:** تبادل شیمیایی یکی از روش‌های کارآمد و مهم در زمینه جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار برای عناصری مانند بور، لیتیوم، نیتروژن، کربن، هیدروژن، سیلیسیوم و گوگرد می‌باشد. کروماتوگرافی، استخراج توسط حلال و روش‌های الکتروشیمیایی از جمله سایر روش‌های جداسازی شیمیایی هستند.
- **نفوذ گرمایی:** مبنای روش نفوذ گرمایی، ایجاد تفاوت در غلظت بر اثر تفاوت دما در یک مخلوط همگن است. در حال حاضر این روش برای جداسازی ایزوتوپ‌های گران‌قیمت و نادر و در ابعاد آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- **لیزر:** روش جداسازی با کمک لیزر بر این اساس است که ایزوتوپ‌های مختلف از یک عنصر، طول موج‌های متفاوتی از نور لیزر را جذب می‌کنند. بر همین اساس می‌توان پرتو نور لیزر را به نحوی تنظیم نمود که تنها اتم‌های ایزوتوپ مورد نظر را یونیده کند. نهایتاً اتم‌های یونیده در یک صفحه که دارای بار الکتریکی هستند، جذب می‌شوند و عمل جداسازی اتفاق می‌افتد.



❖ **غشاء:** غشاء لایه‌ای نازک است که می‌تواند اجزاء یک سیال را به‌طور گزینشی جدا نماید. این جداسازی عموماً بر اساس تفاوت در اندازه‌های مولکولی اجزاء و یا تفاوت در دیگر خواص فیزیکی آن‌ها انجام می‌شود.



❖ **میدان‌های الکترومغناطیسی:** در روش جداسازی الکترومغناطیسی، از آهنرباهای بزرگ برای جداسازی یون‌های دو ایزوتوپ استفاده می‌شود. در این روش یون‌هایی که دارای انرژی یکسان اما جرم مختلف هستند، در میدان الکترومغناطیسی مسیرهای مختلفی را طی می‌کنند. جداسازی با این روش نیاز به صرف مقادیر زیادی انرژی دارد.



۴-۲ آب سنگین

۴-۲-۱ آب سنگین و کاربردهای آن

آب سنگین آبی است که به جای دو اتم هیدروژن، دو اتم دوتریوم دارد. جرم مولکولی آب سنگین ۲۰ و جرم مولکولی آب معمولی ۱۸ است. هیدروژن سنگین یا همان دوتریوم در آب طبیعی با فراوانی ۱ در ۷۰۰۰ وجود دارد. به عبارت دیگر، از هر یک میلیون مولکول آب، حدوداً ۱۴۵ مولکول دوتریوم دارد.

خواص مهم آب سنگین که موجب محبوبیت این ماده برای استفاده در راکتورهای هسته‌ای شده است عبارت‌اند از سبک بودن هسته، کم بودن میزان جذب نوترون، عدم تغییر خواص در مقابل تشعشعات هسته‌ای و عدم واکنش با میله سوخت. از جمله مزیت‌های استفاده از آب سنگین برای راکتور، عدم نیاز به اورانیوم غنی‌شده به‌عنوان سوخت راکتور و حذف مرحله غنی‌سازی از فرآیند تولید سوخت به دلیل استفاده از سوخت اورانیوم با غنای طبیعی است.

در گذشته از این ماده تنها به عنوان کندکننده نوترون‌های پرانرژی یا خنک‌کننده میله‌های سوخت در راکتورهای آب سنگین استفاده می‌شد اما امروزه آب سنگین پرمصرف‌ترین ایزوتوپ پایدار دنیاست و کاربردهای پزشکی، دارویی، بهداشتی و زیست‌محیطی آن رو به افزایش است. عمده کاربردهای غیر راکتوری این ماده شامل استفاده از دوتریوم به عنوان ردیاب برای واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی است. در این نوع کاربرد، مولکول آب سنگین به عنوان یک مولکول نشان‌دار شده می‌تواند در محیط مورد بررسی، رصد شود و فعل و انفعالات آن مورد ارزیابی قرار گیرد. آب سنگین به عنوان ردیاب در مطالعه مکانیسم تنفس موجودات زنده و فتوسنتز گیاهان، بررسی متابولیسم و سوخت‌وساز در بدن انسان و حیوانات، در زیست‌فناوری، در آب‌شناسی، اقلیم‌شناسی و صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۲-۲ فرآیندهای تولید آب سنگین

از زمان ساخت اولین تأسیسات آب سنگین جهان در سال ۱۹۳۴ تاکنون روش‌های مختلفی برای تولید آب سنگین، پیشنهاد و عملیاتی شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های شیمیایی (مبتنی بر انجام واکنش شیمیایی) و فیزیکی (مبتنی بر تفاوت در خواص فیزیکی اجزا) تقسیم‌بندی نمود.

❖ روش‌های فیزیکی

- تقطیر آب: روش تقطیر آب، روش مستقیم رسیدن به آب سنگین است؛ اما هزینه بسیار بالایی دارد.
- تقطیر هیدروژن: این روش بر مبنای تفاوت بین فشار بخار دوتریوم و هیدروژن عمل می‌کند.

- الکترولیز آب: الکترولیز آب در تولید آب سنگین بازدهی بالایی دارد؛ اما این روش انرژی بالایی مصرف می‌کند.
- جداسازی ایزوتوپ‌ها توسط لیزر: این کار بر اساس فرکانس تشدید پیوندهایی است که به هیدروژن و دوتریوم ختم می‌شوند. این روش هزینه‌بر است و بازده بالایی نیز ندارد.

❖ روش‌های شیمیایی

روش‌های تبادل شیمیایی به مراتب بیشتر از روش‌های فیزیکی مورد توجه‌اند و عمدتاً از نظر اقتصادی مناسب هستند؛ اما در اغلب این فرآیندها باید از کاتالیزور استفاده شود. روش تبادل دوتریوم بین آب و سولفید هیدروژن یکی از پرکاربردترین روش‌های شیمیایی است.

۳-۲-۴ مجتمع تولید آب سنگین خنداب اراک

کشور ما به عنوان یکی از معدود کشورهای تولیدکننده آب سنگین در جهان، دارای یک مجتمع تولید آب سنگین در منطقه خُنداب اراک است. اولین قطرات آب سنگین در سال ۱۳۸۵ در این تأسیسات تولید شده است. این مجتمع سالانه قادر به تولید ۲۰ تن آب سنگین با غنای ۹۹/۸۸ درصد است. تولید سایر محصولات ایزوتوپ پایدار نیز در این مجتمع انجام می‌شود. هم‌اکنون، مجتمع تولید آب سنگین خنداب با عرضه بیش از ۷۲ محصول ایزوتوپی مختلف، تنها تولیدکننده این محصولات در خاورمیانه است و توانسته محصولات خود را به کشورهای مختلف صادر نماید.

مجتمع تولید آب سنگین اراک

در مجتمع تولید آب سنگین خنداب، در مرحله اول که میزان غنای دوتریوم موجود در آب از ppm ۱۴۵ به ۱۵ درصد می‌رسد، از روش تبادل دو دمایی آب و سولفید هیدروژن استفاده می‌شود. در مرحله دوم از طریق روش تقطیر در خلأ، غنای دوتریوم از ۱۵ درصد به ۹۹/۸ درصد می‌رسد. نهایتاً در بخش پایانی میزان روغن، هوا و ناخالصی‌های فلزی به حد مجاز مورد نیاز راکتور هسته ای (حداکثر ۳ دهم در میلیون) می‌رسد و آب سنگین تولید شده، در بشکه‌هایی جمع‌آوری و نگهداری می‌شود.

مجتمع تولید آب سنگین اراک

متخصصان این مجتمع توانسته‌اند با تکیه بر دانش خود، امکان تولید آب سبک، ترکیبات دوتره (ترکیبات دوتریوم‌دار) و ایزوتوپ‌های ارزشمندی همچون اکسیژن-۱۸ ($D_2{}^{18}O$ و $H_2{}^{18}O$) را نیز فراهم کنند.

➢ ایزوتوپ اکسیژن-۱۸

اکسیژن-۱۸ به روش تقطیر آب تهیه می‌شود و تولید آن تحول بسیار مهمی در صنعت پزشکی هسته‌ای کشورمان به شمار می‌رود. اکسیژن-۱۸ ماده اولیه تولید رادیوداروی فلوئور-۱۸ است که در پزشکی هسته‌ای برای تشخیص سلول‌های سرطانی در اوایل شکل-گیری آن‌ها، تعیین میزان پیشرفت بیماری، تشخیص بیماری‌های مغزی نظیر صرع و آلزایمر و تشخیص بیماری‌های قلبی کاربرد دارد. از کاربردهای دیگر این محصول می‌توان به بررسی روند سوخت‌وساز و مصرف انرژی در بدن جانداران و تعیین مقدار دی‌اکسید کربن تولیدی توسط آن‌ها اشاره نمود. این محصول پس از دوتریوم، دومین ایزوتوپ پایدار پرکاربرد دنیا به شمار می‌رود و در حال حاضر به غیر از ایران، تنها آمریکا، روسیه، انگلیس، چین، ژاپن و رژیم صهیونیستی آن را تولید می‌کنند.

$H_2{}^{18}O$ تولیدشده در کشور

➢ آب سبک عاری از دوتریوم

آب سبک که میزان دوتریوم آن کمتر از ۱۴۵ ppm (غنای آب طبیعی) باشد، یک ماده خوراکی است و کاربردهایی از جمله استفاده به عنوان مکمل درمان بیماران سرطانی و به‌کارگیری در ساخت مواد آرایشی و بهداشتی دارد.

➢ ترکیبات دوتره

علاوه بر آب سنگین، در سایر ترکیبات دارای هیدروژن نیز می‌توان هیدروژن را با دوتریوم جایگزین نمود و ترکیبات نشان‌دار شده با دوتریوم تولید نمود. به این ترکیبات اصطلاحاً ترکیبات دوتریم‌دار می‌گویند. تاکنون چندین ترکیب دوتره و نشان‌دار شده با دوتریوم از جمله دوتریوم کلراید، کلروفرم، اسید سولفوریک، دوتریوم کلراید، دی کلرومتان و بسیاری دیگر از ترکیبات دارای دوتریوم در مجتمع آب سنگین اراک تولید و به ۵۰ دانشگاه یا مرکز مطالعاتی یا تحقیقاتی و یا مراکز دارویی فروخته شده است. این مواد در شناسایی و آنالیز ترکیبات، بررسی واکنش‌های

شیمیایی، بررسی عملکرد داروها در بدن، بهینه‌سازی خواص برخی از داروها و نیز ساخت فیبرهای نوری و پلیمرهای رسانا کاربرد دارد.

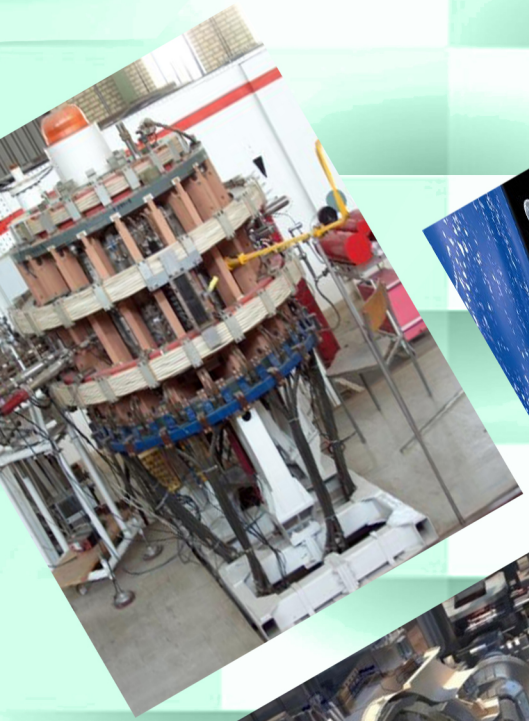
واحدهای صنعتی تولید دی متیل سولفوکسید و کلروفرم دوتریم‌دار

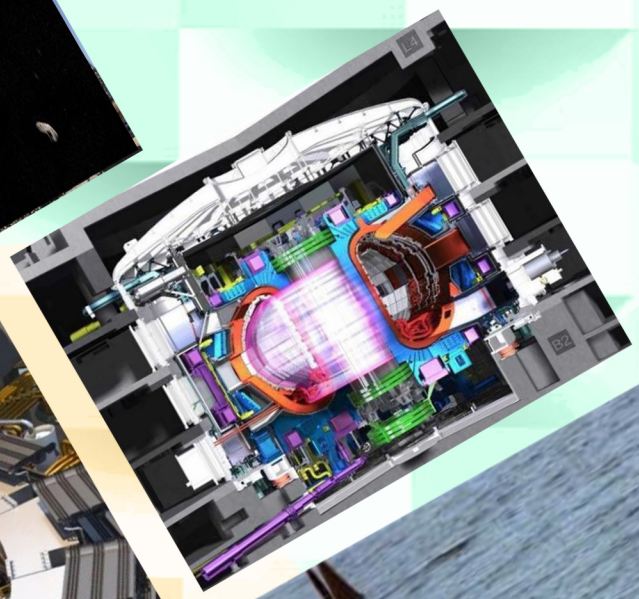
۴-۲-۴ دستاوردهای سازمان انرژی اتمی در زمینه تولید سایر ایزوتوپ‌های پایدار

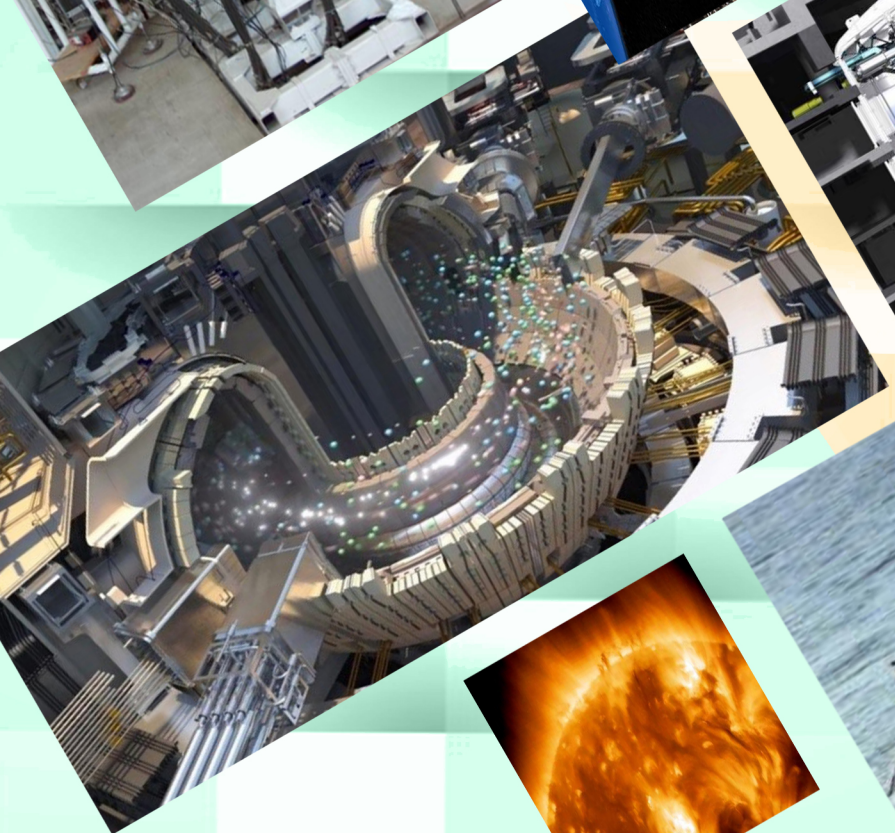
سازمان انرژی اتمی ایران با توجه به اهمیت راهبردی و اقتصادی ایزوتوپ‌های پایدار، جداسازی برخی ایزوتوپ‌های ارزشمند مانند مولیبدن را در بخش تحقیقاتی و پژوهشی خود با استفاده از روش جداسازی الکترومغناطیسی انجام می‌دهد. همچنین با بکارگیری تجارب، دانش و فناوری حاصل از راه‌اندازی مراکز غنی‌سازی اورانیوم در کشور، ساخت مرکز تحقیقات ملی جداسازی و توسعه کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار به روش‌های سانتریفیوژ، تقطیر، تبادل حرارتی و غشایی از سال ۱۳۹۸ در سایت هسته‌ای شهید دکتر مسعود علی‌محمدی (فردو) آغاز شده است. تدوین دانش فنی و بومی‌سازی فناوری و کمک به توسعه کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در سایر صنایع کشور از اهداف این مرکز می‌باشند.

همچنین سازمان انرژی اتمی ایران موفق به راه‌اندازی واحد نیمه‌صنعتی تولید هگزا فلوراید ایریدیوم از ایریدیوم فلزی شده است. این واحد، فاز اول پروژه تولید رادیوایزوتوپ ایریدیوم، برای کاربردهای پزشکی و صنعتی است.

پیشران های هسته ای و
انرژی هم جوشی هسته ای







❖ آشنایی با پیشران‌های هسته‌ای و انرژی همجوشی هسته‌ای

۵-۱ پیشران‌های هسته‌ای

عاملی که باعث می‌شود موشک‌ها، کشتی‌ها و یا زیردریایی‌ها به حرکت درآیند، پیشران است. پیشران‌ها انواع مختلفی دارند؛ اما در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای به منظور استفاده از راکتورهای هسته‌ای با توان کم به عنوان پیشران تأمین‌کننده انرژی حرکتی کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و فضاپیماها انجام شده است. راکتورهای هسته‌ای به دلیل وزن کم سوخت هسته‌ای موردنیاز (در مقایسه با سوخت فسیلی) و فاصله طولانی‌مدت میان دو سوخت‌گیری، پیشران مناسبی به شمار می‌آیند. سازمان انرژی اتمی ایران با هدف پاسخگویی به نیازهای آتی صنایع دریایی کشور، تحقیق و پژوهش بر روی پیشران‌های هسته‌ای را آغاز نموده است.

۵-۱-۱ استفاده از پیشران‌های هسته‌ای در حوزه دریایی

سوخت‌های فسیلی نسبتاً سنگین هستند و فضای زیادی را در کشتی‌ها و زیردریایی‌ها اشغال می‌کنند. از سوی دیگر، عمل سوخت‌گیری باید با فواصل زمانی کم انجام شود و کشتی یا زیردریایی پس از طی مسافت کوتاهی از محل سوخت‌گیری مجدداً نیاز دارند به یک بندر دیگر برای سوخت‌گیری مراجعه کنند. در نتیجه، مدت زمان زیر آب ماندن زیردریایی و سرعت آن‌هم با سوخت‌های فسیلی بسیار محدود می‌شود. از طرفی، استفاده از این نوع سوخت‌ها باعث تولید میزان بسیار زیادی سولفور می‌شود. در مقابل، بعضی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها از اورانیوم به عنوان سوخت استفاده می‌کنند.

سیستم تأمین نیروی محرکه کشتی توسط پیشران‌های هسته‌ای، در واقع یک راکتور آب سبک تحت فشار در ابعاد نسبتاً کوچک است. حرارت تولیدشده در راکتور به آب تحت‌فشار منتقل و این آب به سمت مولدهای بخار پمپ

می‌شود و جهت باز گرمایش به راکتور برمی‌گردد. درون مولدهای بخار، حرارت حاصل از آب مدار اولیه برای تولید بخار استفاده می‌شود. بخشی از بخار وارد توربین می‌شود و برای تولید برق مورد نیاز کشتی به کار می‌رود و بخش عمده آن برای تولید نیروی محرکه کشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۱-۲استفاده از پیشران‌های هسته‌ای در حوزه فضایی

محدودیت‌های فنی در به‌کارگیری پیشران شیمیایی، باعث شده است پیشران‌های حرارتی هسته‌ای به‌عنوان روشی نوین جهت رفع این محدودیت‌ها و انجام کاوش‌های طولانی‌مدت در فضا مطرح گردند. سازمان فضایی ناسا در حال انجام مقدمات استفاده از پیشران‌های حرارتی هسته‌ای برای سفر به مریخ و کاوش‌های عمیق‌تر است.

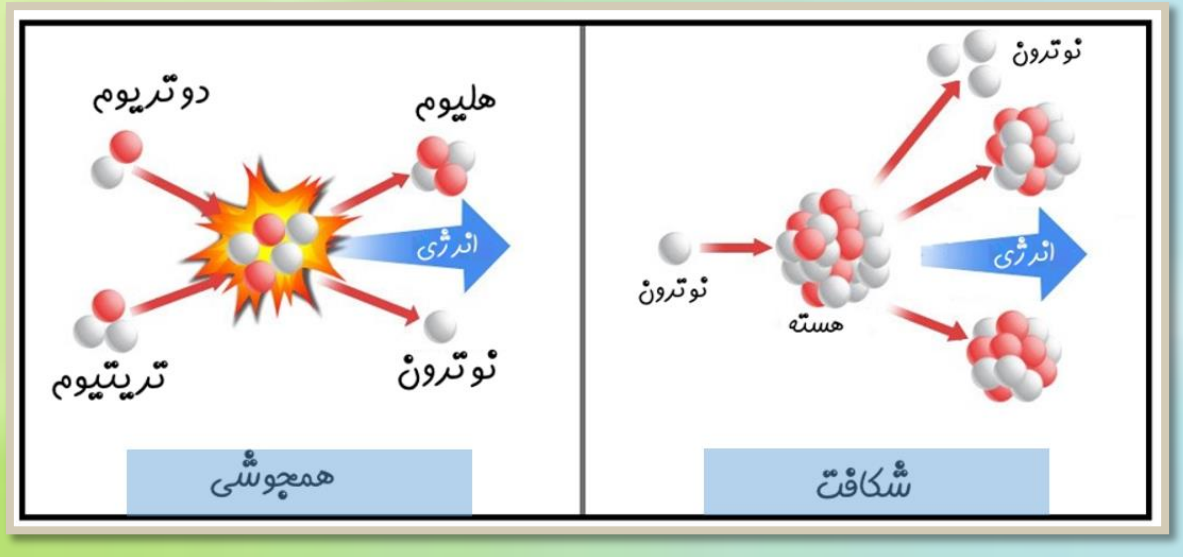
مدلی مفهومی از پیشران هسته‌ای فضایی

۵-۲ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

۵-۲-۱ آشنایی با همجوشی هسته‌ای

واکنش همجوشی هسته‌ای به معنی ترکیب هسته‌های کوچک‌تر و ایجاد یک هسته سنگین‌تر است. در این واکنش که عکس شکافت هسته‌ای است، مجموع جرم محصولات کمتر از مجموع جرم‌های هسته‌های اولیه است و این اختلاف جرم به شکل انرژی آزاد می‌شود. یکی از غالب‌ترین واکنش‌های همجوشی، ترکیب هسته دوتریوم و تریتیوم و تشکیل هسته هلیوم است. حاصل همجوشی ۱۰۰ میلی‌گرم دوتریوم و ۱۵۰ میلی‌گرم تریتیوم، آزاد شدن انرژی معادل انرژی حدود ۱۱۰۰ لیتر نفت (تقریباً ۷ بشکه

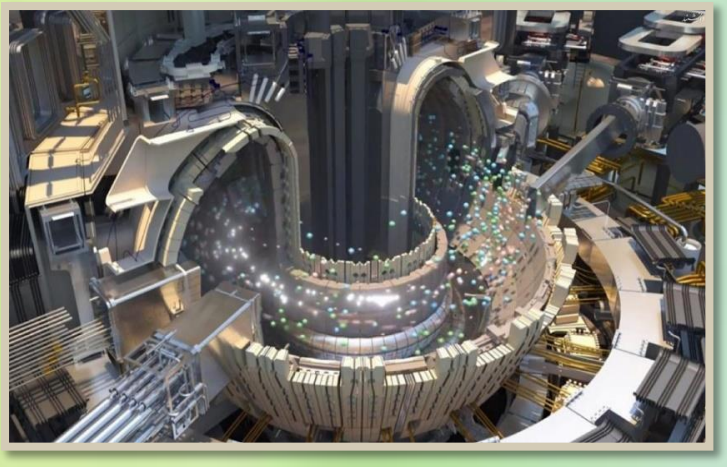
نفت) است. دوتریم و تریتیوم از ایزوتوپ‌های هیدروژن هستند و سوخت اصلی این واکنش همجوشی یعنی دوتریوم، از آب معمولی به دست می‌آید.



در طبیعت، انرژی خورشید و تمام ستارگان نیز برخاسته از همجوشی هسته‌ای است. در خورشید و دیگر ستارگان نیروهای گرانشی قوی باعث می‌شوند ایزوتوپ‌های هیدروژن به اندازه کافی به هم نزدیک و با هم ترکیب شوند تا هسته هلیوم به همراه انرژی بالایی تولید شود.

از آنجایی که هسته‌ها بارهای مثبت دارند، همدیگر را دفع می‌کنند، بنابراین جهت ایجاد واکنش همجوشی با بالا بردن دما تا حدود ۴۰۰ میلیون درجه، انرژی جنبشی هسته‌ها افزایش داده می‌شود تا سریع‌تر حرکت کنند و بر نیروی دافعه‌ی ناشی از بارهای مثبت غلبه نموده و واکنش همجوشی هسته‌ای هنگام برخورد صورت گیرد. مشکل اساسی در تولید انرژی همجوشی، ساخت دستگاهی است که بتواند سوخت را به اندازه کافی تا دمای بالا گرم کند و سپس آن را برای مدت زمان نسبتاً طولانی محصور نماید تا در حین واکنش‌های همجوشی، انرژی بیش‌تری نسبت به انرژی مصرف‌شده برای گرمایش اولیه، آزاد گردد.

یکی از اصلی‌ترین دستگاه‌هایی که برای دستیابی به انرژی حاصل از فرآیند همجوشی هسته‌ای به‌کار می‌رود، توکامَک نام دارد. همجوشی هسته‌ای به طور مصنوعی، برای نخستین بار در دستگاه توکامک و با استفاده از محصورسازی مغناطیسی انجام شد. بالاترین دمای پلاسمای[1] استفاده شده در توکامک‌ها ۵۵۰ میلیون درجه است و از آنجایی که هیچ ظرفی قادر به نگهداری ماده‌ای با این دمای بالا نیست، از میدان‌های مغناطیسی برای نگهداری آن استفاده می‌کنند.



مدلی مفهومی از توکامک

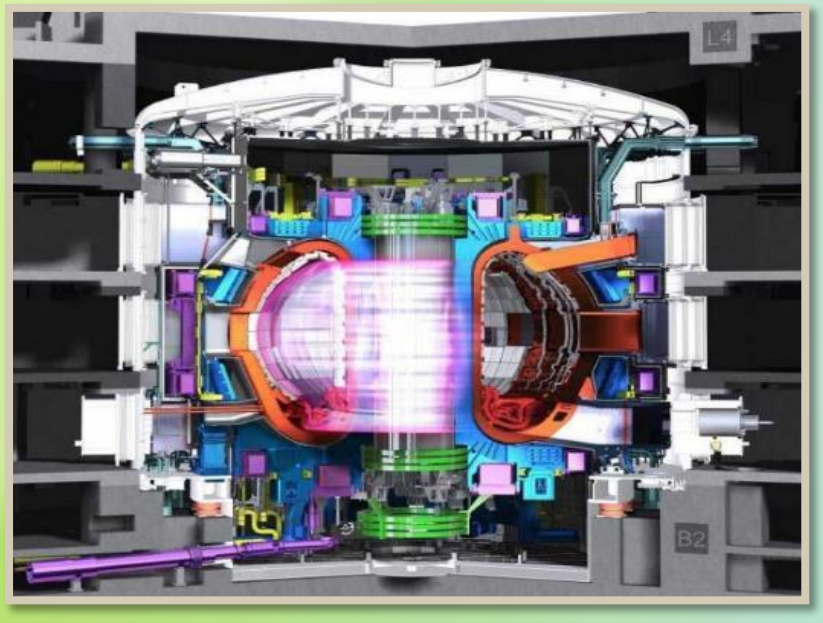
از مزایای انرژی حاصل از همجوشی هسته‌ای به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- منابع سوخت آن بسیار فراوان است. به عنوان مثال دوتریوم به صورت فراوان در آب اقیانوس‌ها وجود دارد و تریتیوم نیز در فرایند جذب نوترون توسط عنصر لیتیوم قابل تولید است. پس همجوشی به‌طور بالقوه، یک منبع انرژی نامحدود است.
- انرژی آزاد شده از یک گرم سوخت در واکنش همجوشی، ده‌ها برابر واکنش شکافت هسته‌ای است.
- روش همجوشی مانند شکافت هسته‌ای، معضل تولید پسماندهای هسته‌ای را ندارد و در هنگام وقوع حوادث احتمالی، واکنش زنجیره‌ای غیر قابل کنترل در آن رخ نمی‌دهد.
- در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، معضل انتشار کربن و ایجاد آلودگی ندارد.

---

[1] پلاسما یکی از چهار حالت اصلی ماده است. در واقع به گاز یونیده‌ای که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده است، پلاسما می‌گویند.

۵-۲-۲ پروژه بین‌المللی ایتر



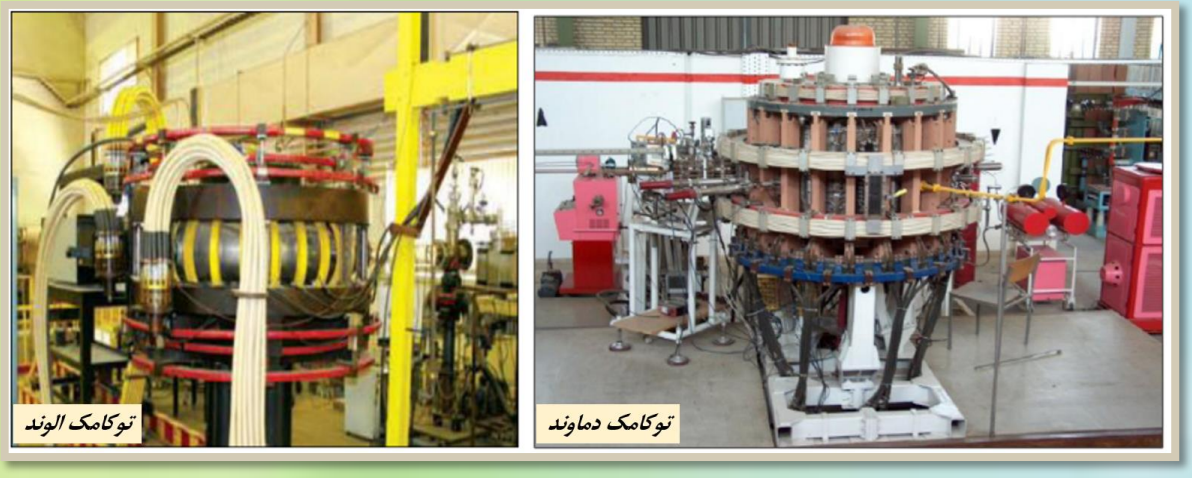
ساختمان اصلی راکتور گداخت هسته‌ای ایتر

تحقیقات جهانی در خصوص همجوشی و حل چالش‌های فنی آن، نیازمند دستگاه‌های عظیم، پیچیده و گران‌قیمت است. به همین دلیل برای تحقیق و توسعه در این زمینه لازم است کشورهای مختلف با یکدیگر مشارکت کنند. در این راستا، پروژه بین‌المللی راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای (ایتر) که پیشرفته‌ترین آزمایش همجوشی جهان در آن اجرا می‌شود، با همکاری چندین کشور در حال انجام است. در سال ۱۹۸۸، کار بر روی طراحی ایتر آغاز شد و قرار است اولین فرآیند همجوشی هسته‌ای در راکتور ایتر تا سال ۲۰۲۵ انجام شود و طی سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۰ به‌صورت تجاری درآید.

پروژه بین‌المللی ایتر در جنوب فرانسه در نزدیکی شهر نیس در حال انجام است و هدف آن، تولید برق ارزان و سالم با استفاده از فرآیند همجوشی در نوع جدید رآکتور هسته‌ای است. در شکل فوق، ناحیه بنفش پلاسمای محصور شده در میدان مغناطیسی ایجادشده توسط مگنت‌های نارنجی‌رنگ است. همچون سایر نیروگاه‌های حرارتی، گرمای تولید شده در اثر همجوشی، برای تولید بخار آب و به حرکت درآوردن توربین استفاده خواهد شد.

۵-۲-۳ آشنایی با تأسیسات و تجهیزات همجوشی هسته‌ای در کشور

امروزه در کشور ما از دستگاه‌های توکامک کوچک برای تحقیقات در زمینه همجوشی هسته‌ای استفاده می‌شود. در این دستگاه‌ها، فرایند همجوشی در ابعاد کوچک و بین چند هسته انجام می‌شود. نخستین توکامک کوچک ایران با نام الوند آغاز بکار نمود و توکامک کوچک دیگری با نام دماوند در سال ۱۳۷۳ از کشور روسیه خریداری شد. بسیاری از بخش‌های این دستگاه مانند سامانه‌های کنترلی از ابتدای ساخت تاکنون، توسط متخصصین داخلی به‌روزرسانی شده‌اند. علاوه بر این، چندین دستگاه تولید پلاسما نیز از انواع مختلف و در توان‌های مختلف در کشور وجود دارد.



نام تأسیسات	توکامک الوند	توکامک دماوند	توکامک IR-T1	توکامک البرز
موقعیت مکانی	سازمان انرژی اتمی ایران	سازمان انرژی اتمی ایران	دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات تهران	دانشگاه صنعتی امیرکبیر
کشور سازنده	ایتالیا	روسیه	چین	ایران
سال ساخت / خرید	۱۳۵۵	۱۳۷۳	۱۳۷۳	۱۳۸۸