آینده

از نیروگاه هسته‌ای تا خورشید مصنوعی

دانشمندان آمریکایی و چینی به‌طور مجزا در حال تلاش برای یک فناوری ویژه هستند که می‌تواند منابع نامحدودی از انرژی را تولید کند. همجوشی هسته‌ای منتکی به سوخت‌های فسیلی نیست و مانع از تولید گازهای گلخانه‌ای مضر می‌شود. بنابراین چنین فناوری‌ای می‌تواند تبدیل به ابزاری برای مقابله با چالش تغییرات آب و هوایی شود. همچنین از دستگاهی که این فرایند در آن اتفاق می‌افتد به‌عنوان «خورشید مصنوعی» نام برده می‌شود، چراکه آنچه در خورشید اتفاق می‌افتد، قرار است در زمین اجرا شود.

همجوشی هسته‌ای چیست؟

همجوشی هسته‌ای (fusion) شبیه فرایندی است که در خورشید اتفاق می‌افتد و باعث می‌شود، انرژی بسیار زیادی تولید شود.

دانشمندان بیش از ۵۰ کشور از دهه ۱۹۶۰ در تلاش برای بازسازی آن در زمین بوده‌اند و امیدوارند که این فرایند در نهایت بتواند مقادیر عظیمی از انرژی پاک را برای جهان فراهم کند. در همجوشی هسته‌ای، جفت‌های ذرات ریز به نام اتم گرم یا فشار به همدیگر فشرده می‌شوند تا یکی از آنها از دیگری سنگین‌تر شود.

این فرایند برعکس شکاف هسته‌ای (fission) است که در آن اتم‌های سنگین از هم جدا می‌شوند. اگرچه اکنون نیروگاه‌های هسته‌ای از شکاف هسته‌ای برای تولید برق استفاده می‌کنند، اما تلاش دانشمندان بعضی از کشورها معطوف به استفاده از همجوشی هسته‌ای است.

اهمیت همجوشی هسته‌ای

شکاف هسته‌ای زباله‌های رادیواکتیو تولید می‌کند که تا حدی خطرناک است که باید صدها سال به شکلی ایمن محفوظ بماند. این در حالی است که زباله‌های تولید شده ناشی از همجوشی هسته‌ای رادیواکتیو کمتری دارند و بسیار سریع‌تر تجزیه می‌شوند.

همجوشی هسته‌ای به سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز نیاز ندارد. همچنین این فرایند گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌کند و به تغییرات آب و هوایی دامن نمی‌زند. بیشتر آزمایش‌های همجوشی از هیدروژن استفاده می‌کنند که می‌توان آن را از آب دریا و لیتیوم و با هزینه پایین استخراج کرد. این موضوع به این معنی است که میلیون‌ها سال می‌توان از این منابع سوخت استفاده کرد. ارزش همجوشی هسته‌ای به حدی است که به‌طور استعاری از آن با عنوان «جام مقدس» تولید انرژی نام برده می‌شود. در افسانه‌های مسیحی قرون وسطا، جام مقدس ظرفی بوده که در «شام آخر» حضرت عیسی(ع) به همراه حواریون از آن نوشید و نماد لطف خداوند به شمار می‌آید.

همجوشی هسته‌ای چگونه کار می‌کند؟

هنگامی که ۲ اتم از یک عنصر سبک مانند هیدروژن گرم یا یکدیگر ترکیب می‌شوند و یک عنصر سنگین‌تر مانند هلیوم را تشکیل می‌دهند، این واکنش هسته‌ای مقادیر زیادی انرژی تولید می‌کند که می‌تواند جذب شود. اما ترکیب ۲عنصر یکسان در واقعیت بسیار سخت است. چون بار مثبت یکسانی دارند و به‌طور طبیعی یکدیگر را دفع می‌کنند. به‌همین خاطر، برای غلبه بر این مقاومت به انرژی زیادی نیاز است. در حرشید، این اتفاق به‌خاطر دمای بسیار بالا (حدود ۱۰ میلیون درجه سانتی گراد) و فشار قابل توجهی معادل بیش از ۱۰۰ میلیارد برابر فشار جو زمین رخ می‌دهد.

این در حالی است که دانشمندان از تکنیک‌های مختلف برای بازسازی این شرایط استفاده کرده‌اند، اما ثابت شده است که حفظ دما و فشار بالا برای زمان لازم این فرایند بسیار دشوار است. با این حال، گروهی از دانشمندان اعلام کرده‌اند که با موفقیت از لیزر ۱۹۲ پرتوی برای تبدیل مقدار کمی هیدروژن به انرژی کافی برای تأمین انرژی حدود ۱۵ تا ۲۰ محفظه استفاده کرده‌اند. این اتفاق به این معنی است که برای نخستین بار دانشمندان توانسته‌اند قدرت بیشتری از لیزرهایی که از آنها برای آزمایش استفاده می‌کردند تولید کنند.

امکان همجوشی هسته‌ای در مقیاس بزرگ

با وجود برخی پیشرفت‌های امیدوارکننده طی چند سال اخیر اما ترسیدن به گداخت یا همان همجوشی هسته‌ای در مقیاس بزرگ سال‌ها فاصله داریم. در مسافر فوریه، دانشمندان اروپایی در آزمایشگاه JET مستقر در بریتانیا رکورد جهانی خود را برای مقدار انرژی تولید شده در طول ۵ثانیه شکستند.

اما حتی آزمایش موفقیت‌آمیز قبلی، انرژی بیشتری از آنچه برای کارکرد لیزرها در وهله اول لازم بود تولید نکرد. همچنین برنامه تحقیقاتی برای رسیدن به این نقطه میلیاردها دلار هزینه داشته است.

ایمنی گداخت هسته‌ای

آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) همجوشی هسته‌ای را «ذاتا ایمن» خوانده است. شرایط لازم برای شروع و حفظ یک واکنش همجوشی به حدی است که از کنترل خارج شدن آن غیرممکن است.

شکیلا گوندالس دی ویسنته، از کارشناسان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی می‌گوید: «فیوژن یا همجوشی یک فرایند خودمحدود کننده است. یعنی اگر نتوانید این واکنش را کنترل کنید، دستگاه خاموش می‌شود.»

میزان کمتر زباله‌های رادیویی تولید شده به وسیله این فرایند در مقایسه با شکافت هسته‌ای نگهداری و حفظ آن را آسان‌تر می‌کند.

مزایای محیط زیستی

در صورتی که دنیا به چنین دستاورد مهمی مجهز شود، بسیاری از دغدغه‌های زیست محیطی برطرف می‌شود. پاک بودن این انرژی مانع از این می‌شود که سوخت‌های فسیلی فعلی در نیروگاه‌ها به کار گرفته شوند.

یک فناوری، چندین کاربرد

فناوری هسته‌ای با تلاش دانشمندان ایرانی وارد حوزه‌های مختلفی شده که می‌تواند زندگی مردم را بهتر کند

عمادالدین قاسمی پناه: فناوری هسته‌ای کاربردهای متعددی دارد که برای زندگی روزمره ما نه تنها لازم بلکه ضروری است. این در حالی است که بخش قابل توجهی از مردم تصور می‌کنند که از انرژی هسته‌ای فقط بمب تولید می‌شود. شناخته‌شده‌ترین کاربردهای صلح‌آمیز، مفید و ضروری فناوری هسته‌ای تولید برق و داروهای تشخیصی و درمانی است. در شرایطی که سوخت‌های فسیلی دنیا آلودگی‌های زیادی به همراه دارند و رو به اتمام هستند، مفرون‌به‌صرفه‌ترین و مطمئن‌ترین منبع برای تولید برق، انرژی هسته‌ای است. هرچند برخی معتقدند که انرژی خورشیدی هم جزو انرژی‌های پاک محسوب می‌شود اما فناوری هسته‌ای به خاطر کاربردهای متعدد آن در زندگی روزمره، در اولویت کشورهای بسیاری قرار گرفته است اما کاربردهای دیگر فناوری هسته‌ای در حوزه‌هایی مانند کشاورزی، صنعت، هنر و اکتشافات فضایی قابل توجه و گاهی اعجاب‌برانگیز است. فناوری هسته‌ای در زندگی روزمره ما نقش برزنگی دارد و در آینده با افزایش کاربردهای این فناوری در سایر حوزه‌ها، بهره‌مندی از فناوری هسته‌ای توجیه و اهمیت بیشتری خواهد یافت.

تحول در پزشکی

تکنیک‌های پزشکی هسته‌ای طی سال‌های اخیر در تجات جان انسان‌ها نقش برزنگی ایفا کرده‌است. تجربه‌ها ثابت شد که دانشمندان ایرانی برای تولید رادیوداروها خودشان دست به کار شوند. همین موضوع موجب شد که نام داروهای رادیواکتیوی بیشتر از گذشته به زبان‌ها جاری شود. دانشمندان ایرانی بر همین اساس، برای تولید رادیوداروهای تشخیصی و درمانی اقدام کردند. اکنون بطورسالانه یک میلیون بیمار از خدمات رادیوداروی سازمان انرژی هسته‌ای ایران بهره‌مند می‌شوند. همچنین ۹۰ مرکز پرتوتهی از خدمات رادیوداروی این سازمان استفاده می‌کنند. همین‌طور ستنرتیوز تولوبالر و ستنرتیوز رونل پوسته برای تولید انبوه واکسن، ستنرتیوز بانک خون و اولترا ستنرتیوز از دستاوردهای دانشمندان ایرانی است. لیزرهای متنوع از جمله لیزر جراحی بروستات، لیزر سنگ‌شکن کلیه، لیزر دندانپزشکی بافت نرم، لیزر کم‌توان و لیزر CO_2 زیبایی بخشی از محصولات فناوری هسته‌ای همچنین خدمات پرتوی و بهداشتی هم برای مردم به ارمغان می‌آورد که تولید پلیمرهای سوپرجاذب بهداشتی، تولید ژل آنتی باکتریال سونوگرافی و دستگاه نمایشگر آلودگی کل بدن برای شناسایی مواد پرتوزای سطحی بخشی از این خدمات به شمار می‌رود. در کشورهای توسعه‌یافته غربی، روش‌های تشخیصی و درمانی به قدری منظم، قابل‌اعتماد و دقیق شده‌اند که تقریبا از هر ۳ بیمار، یک نفر از روش‌های درمانی یا تشخیصی رادیو داروها بهره می‌برد.

فناوری هسته‌ای در شاخه‌های مختلف پزشکی مانند انکولوژی، قلب و عروق، نورولوژی، پنومولوژی و اطفال نقش ایفا می‌کند. پزشکان از تکنیک‌های تشخیصی مانند رادیوداروها، اسکن‌ها یا ایزوتوپ‌های رادیویی استفاده می‌کنند و از درمان‌های مرتبط با پرتودرمانی که شامل پرتوهای ایکس و همچنین تشعشعات عناصر رادیواکتیو یا تجهیزات تولیدکننده تشعشع مانند شتاب‌دهنده‌ها، استفاده می‌کنند. فراتر از تشخیص و درمان بیماری‌ها، استریل کردن تجهیزات پزشکی، یادگیری در مورد فرایندهای بیولوژیک با استفاده از ردیاب‌ها یا مطالعه خواص سلول‌های تومور از جمله موارد دیگر استفاده از فناوری هسته‌ای است.

تولید برق

وقتی به‌تدریج زمزمه‌های افول سوخت‌های فسیلی در دنیا آغاز شد، کشورها استفاده از انرژی هسته‌ای برای تولید برق را جدی‌تر گرفتند. اگر پیش از این از گاز، انرژی آب و سایر عناصر موجود در طبیعت برای تولید برق استفاده می‌گردید، حالا انرژی هسته‌ای باید جایگزین آنها می‌شد؛ انرژی‌ای که پایان آن کمتر محتمل بود. ایران هم اگرچه در سال ۱۳۲۹ هجری‌شمسی فعالیت‌های هسته‌ای خود را آغاز کرد اما در سال ۱۳۵۳ با تاسیس سازمان انرژی اتمی و انعقاد قرارداد ساخت نیروگاه اتمی بوشهر، پروژه تولید برق با انرژی هسته‌ای را کلید زد. اکنون دانشمندان ایرانی با تولید برق از انرژی هسته‌ای تلاش می‌کنند تا سوخت‌های فسیلی برای نسل‌های بعد باقی بماند. برخی منابع ادعا می‌کنند که هر فروز یک نیروگاه هسته‌ای در جهان آغاز به کار می‌کند. این آمار حتی اگر دقیق هم نباشد، نشان از اهمیت انرژی هسته‌ای در تولید برق برای سراسر دنیا دارد. آخرین آمارها دربهشت (۱۴۰۱) بیانگر آن است که آمریکا با ۹۲ راکتور هسته‌ای قابل‌بهره‌برداری بیشترین استفاده را از این فناوری می‌برد و این در حالی است که ایران تنها یک راکتور قابل‌بهره‌برداری دارد. با این حال، برنامه ششم توسعه دولت را ملکه به تولید برق هسته‌ای پایدار کرده بود.

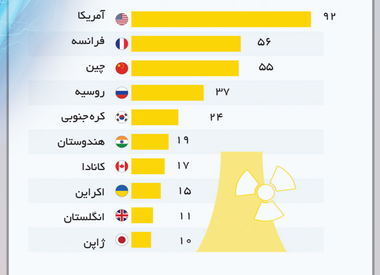
نقش فناوری هسته‌ای برای مدیریت آب

هیدرولوژی یا «آب‌شناسی» درواقع علم مطالعه آب در کره‌زمین است که در مورد پیدایش، چرخش و توزیع آب در طبیعت، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب، واکنش‌های آب در محیط و ارتباط آن با سه‌موجودات زنده بحث می‌کند. آب‌شیرین‌کن‌های هسته‌ای یکی از دستاوردهای فناوری هسته‌ای در کشور است. درواقع از حرارتی که در قلب راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود، برای تبخیر و شیرین‌سازی آب استفاده می‌کنند. همین حالا آب‌شیرین‌کن نیروگاه اتمی بوشهر که در سال ۹۳ به بهره‌برداری رسید، می‌تواند روزانه تا ۱۰ هزار مترمکعب آب دریا را شیرین کند. همچنین فناوری هسته‌ای به کمک متخصصان آمده تا مطالعات در مورد هیدرولوژی از دقت بیشتری برخوردار شود. هیدرولوژی ایزوتوپی یک تکنیک هسته‌ای است که از ایزوتوپ‌های پایدار و رادیواکتیو برای دنبال کردن حرکات آب در چرخه هیدرولوژیکی استفاده می‌کند. از این ایزوتوپ‌ها می‌توان برای تحقیق در مورد منابع آب شیرین زیرزمینی و تعیین منشأشان، نوع باز آنها، وجود خطر نفوذ یا آلودگی توسط آب‌شور و امکان استفاده پایدار از آنها استفاده کرد. با ثبت سطوح تریتیوم رادیواکتیو زمین در اعماق مختلف، می‌توان میزان ذخیره آب را اندازه‌گیری کرد که یک جنبه حیاتی در مدیریت منابع آب است.

دامپزشکی و دامی

فناوران هسته‌ای کشورمان همچنین در حوزه دامپزشکی حضور بسیار مؤثری داشته‌اند. تولید واکسن بیماری پرویسی سندروم لکه سفید میگو، تولید واکسن چهارظرفیتی تب برفکی و تولید آغاز پایدار بخشی از کاربردهای فناوری هسته‌ای در دامپزشکی است که به کمک دامداران و پویایی اقتصاد کشور آمده است.

کدام کشورها دارای بیشترین راکتور هسته‌ای هستند؟



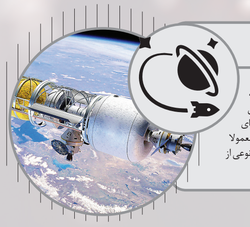
رونق کشاورزی

در حوزه خدمات پزشکی و گیاه‌پزشکی، دانشمندان ایرانی قادر به کنترل آفات گرم گلوگاه انار در باغ‌ها، کنترل مگس میوه مدیترانه و فارچ کش بیولوژیک هستند. این در حالی است که اصلاح نباتات هم‌بخشی از نتایج توسعه فناوری هسته‌ای محسوب می‌شود. تولید برنج مقاوم به تنش شوری و خشکی، ارقام پنبه مونانت، ارقام جدید مونانت جو، گندم مقاوم به شوری و ورس (خمیدگی ساقه)، مونانت لوبیا و انواع گیاهان تزئینی مزایایی است که کشاورزان را بهره‌مند می‌کند. اکنون کشور ما در همه این موارد توانمند شده است. با این حال، در کشاورزی، تکنیک‌های ایزوتوپ رادیویی و تشعشع برای بهبود کیفیت غذا از طریق القای جهش در گیاهان و دانه‌ها با هدف به‌دست آوردن ارقام محصول مورد نظر بدون نیاز به انتظار برای فرایند طولانی جهش طبیعی استفاده می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که ایجاد جهش به معنی تولید محصول تراریخته نیست و نگرانی‌هایی که در مورد محصولات تراریخته مطرح می‌شود ارتباطی با جهش از طریق تکنیک‌های هسته‌ای ندارد. فناوری هسته‌ای همچنین در کنترل آفات، افزایش تولید مواد غذایی و کاهش میزان استفاده از کودهای مختلف بسیار مفید است. پایان دادن به استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند به حفظ محیط‌زیست کمک کند. جلوگیری از زادوولد حشرات در گندم و جو، باردهی بیشتر گندم، برنج و پنبه، جلوگیری از جوانه زدن پیاز و سیب‌زمینی در انبار و استفاده از خاک و آب‌شور در کشاورزی بخشی دیگر از خدمات فناوری هسته‌ای به صنعت کشاورزی است. همچنین جلوگیری از خمیدگی ساقه محصولاتی مانند گندم که در زمان برداشت مشکلات زیادی ایجاد می‌کند، یکی دیگر از تکنیک‌های هسته‌ای به شمار می‌رود.

حفظ محیط‌زیست

فناوری هسته‌ای این امکان را در اختیار اقلیم‌شناسان و دانشمندان محیط‌زیست قرار داده تا داده‌های قابل اعتمادتری در مورد تغییرات آب‌وهایی جمع‌آوری کنند و تأثیر رویدادهای آینده آب‌وهایی را تخمین بزنند. همچنین از تکنیک‌های هسته‌ای برای حل مشکلات آلودگی‌های مختلف محیط‌زیستی مانند مشکلات ناشی از دی‌اکسیدگوگرد استفاده می‌شود.

اکتشافات فضایی



استفاده از باتری‌های هسته‌ای در صنایع فضایی سال‌هاست که مورد توجه قرار گرفته‌است. یکی از کاربردهای اصلی باتری‌های هسته‌ای ناوبری فضایی است. ایران هم با پیشرفت‌های قابل توجهی که در حوزه فضا داشته است، علی‌القاعده باید بتواند به این فناوری دست یابد. استفاده از باتری‌های هسته‌ای در صنایع فضایی به معنی تامین انرژی برای ابزارهای دقیق ماهواره‌ها و کاوشگرهای سیاره‌ای یا ژنراتورهای قوی‌تر است تا بتوانند به سیارات نزدیک زمین برسند و اطلاعات دریافت شده را به زمین ارسال کنند. سفرهای بدون سرنشین به سیارات فراتر از منظومه شمسی در ماموریت‌هایی با تجهیزات روباتیک انجام شده که از برق تولید شده توسط ایزوتوپ رادیویی پلوتونیوم۲۳۸تغذیه می‌شد. نیمه‌عمر این ایزوتوپ ۷۷.۷۴سال است و می‌تواند برای چندین قرن به اندازه کافی فعال بماند تا ماموریت‌های فضایی را تامین کند. به‌عبارت دیگر باتری‌های هسته‌ای در سفرهای بین سیاره‌ای استفاده می‌شوند و می‌توانند چندین سال دوام بیاورند. باتری‌های هسته‌ای معمولا راندمانی معادل ۵- ۱۰ درصد دارند و این در حالی است که دستگاه‌های بتاولتائیک(نوعی از باتری‌های هسته‌ای) با راندمان بالا می‌توانند به بازدهی ۱۶ تا۸درصد برسند.

دستیار صنعت

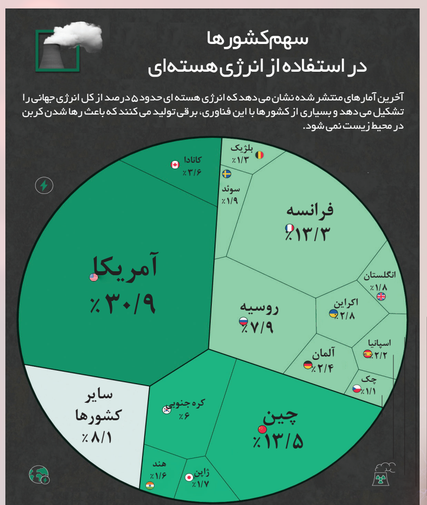
سانتریفیوژهایی به شمار می‌آیند که صرفا برای تولید ثروت و سلامت مردم کاربرد دارند. توانایی عبور پرتو گاما از سنگ‌ها به ما کمک می‌کند منابع مانند نفت و گاز را شناسایی کنیم. از مواد هسته‌ای مانند سزیم۱۳۷ برای شناسایی چگالی آسفالت، خاک و بتن استفاده می‌شود. تکنیک‌های هسته‌ای همچنین برای شناسایی حوزه‌های آب زیرزمینی، هدایت آب‌های سطحی و زیرزمینی، کشف و کنترل نشت و ایمنی سدها کاربرد دارد. علاوه بر این، در شیرین کردن آب‌های شور هم انرژی هسته‌ای کاربرد دارد. این در حالی است که استفاده از ایزوتوپ‌ها و تشعشعات در صنایع مدرن برای توسعه و بهبود فرایندها، اندازه‌گیری، اتوماسیون و کنترل کیفیت بسیار مهم است. اکنون تقریبا همه شاخه‌های علوم به روش‌های مختلف از تکنیک‌های هسته‌ای استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال، ردیاب‌ها در نقش فناوری هسته‌ای در صنعت بسیار قابل توجه است. به‌طوری که دانشمندان ایرانی به تولید انواع ابزارهای صنعتی و کاربردهای آن در صنایع خودروسازی، راه‌ها و دفاعی دست‌یافته‌اند. تولید انواع سانتریفیوژهای صنعتی و کاربرد آن در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، پزشکی، آزمایشگاهی، داروسازی و غذایی هم در شمار

ارزیابی آثار هنری

استفاده از تکنیک‌های هسته‌ای در حوزه هنر شاید عجیب به‌نظر برسد. در حالی که فناوری هسته‌ای امکان پی بردن به قدمت و اصالت آثار هنری را فراهم می‌کند. همچنین برای حفاظت از آثار تاریخی نیازمند استفاده از فناوری‌های جدید تولید مواد غذایی و کاهش میزان استفاده از کودهای مختلف بسیار مفید است. پایان دادن به استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند به حفظ محیط‌زیست کمک کند. جلوگیری از زادوولد حشرات در گندم و جو، باردهی بیشتر گندم، برنج و پنبه، جلوگیری از جوانه زدن پیاز و سیب‌زمینی در انبار و استفاده از خاک و آب‌شور در کشاورزی بخشی دیگر از خدمات فناوری هسته‌ای به صنعت کشاورزی است. همچنین جلوگیری از خمیدگی ساقه محصولاتی مانند گندم که در زمان برداشت مشکلات زیادی ایجاد می‌کند، یکی دیگر از تکنیک‌های هسته‌ای به شمار می‌رود.

یک نقاشی استفاده شد و پس از سال ۱۹۱۴ به‌طور نظام‌مند مورداستفاده قرار گرفت. برای تعیین سن آثار هنری هم از فناوری هسته‌ای استفاده می‌شود. برای چنین کاری، این تکنیک از کربن ۱۴ استفاده می‌کند که شامل تعیین مقدار این ایزوتوپ موجود در یک جسم آلی برای یافتن سن نمونه است.

سهم کشورها در استفاده از انرژی هسته‌ای



آخرین آمارهای منتشر شده نشان می‌دهد که انرژی هسته‌ای حدود ۵ درصد از کل انرژی جهانی را تشکیل می‌دهد و بسیاری از کشورها با این فناوری، برق تولید می‌کنند که باعث رها شدن کربن در محیط زیست نمی‌شود.

برق که از تعداد نیروگاه‌های موجود اکنون تولید می‌شود، معادل ۲۵۵۳ ترا وات‌ساعت است. در حالی که ۳۰/۹ درصد از برق تولید شده از انرژی هسته‌ای در جهان به وسیله آمریکا تولید می‌شود، ۵۲ درصد از برق این کشور به وسیله نیروگاه‌های هسته‌ای تولید می‌شود.

تاریخ

فناوری هسته‌ای از دیروز تا امروز

اطلاعات غالب مردم از پاگیری انرژی هسته‌ای در کشور عموما به دهه ۸۰ شمسی برمی‌گردد. در حالی که برنامه هسته‌ای ایران در اواخر دهه ۴۰ کلید خورد. فرایند ساخت نیروگاه اتمی بوشهر، به‌عنوان شناخته شده‌ترین نیروگاه و قدیمی‌ترین پروژه هسته‌ای ایران در سال ۱۳۵۳ طی یک قرارداد آغاز شد. اما این قرارداد پس از عضویت ایران در آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سال ۱۳۴۷ و سپس عضویت در پیمان عدم تکثیر سلاح‌های هسته‌ای، معروف به «ان‌پی‌تی» در سال ۱۳۴۷ امضا شد.

توقف و حرکت

با پیروزی انقلاب اسلامی در سال ۱۳۵۷ و سپس آغاز جنگ تحمیلی که ۸ سال به طول انجامید، به ناچار فعالیت‌های هسته‌ای ایران به خاطر اولویت‌بندی هزینه‌ها متوقف شد. ۱۳ سال پس از پایان جنگ ایران و عراق و در حالی که به‌نظر می‌رسید طی این مدت کارهای قابل توجهی در این صنعت صورت گرفته است، در ۲۰ فروردین ۱۳۸۱ خبری از سوی رئیس‌جمهور وقت در رسانه‌ها منتشر شد. درواقع، دانشمندان و متخصصان ایرانی طی این مدت توانسته بودند برای نیروگاه‌های هسته‌ای ایران سوخت هسته‌ای تهیه کنند.

از جمله این فعالیت‌ها، قرارداد راه‌اندازی واحد یک نیروگاه اتمی بوشهر بود که در ۱۸ دی ۱۳۷۴ بین ایران و روسیه منعقد شد، هرچند به‌دهبی طرف مقابل مشکلات فراوانی را در مسیر رسیدن به هدف اجرا کرد.

تحمیل هزینه

با این حال در سال ۱۳۸۵ خبر غنی‌سازی اورانیوم به میزان ۳.۵ درصد نشان داد که دانشمندان ایرانی مسیر موفقیت را به درستی طی کرده‌اند، اما این موفقیت هزینه‌های زیادی داشت، چراکه کشورهای متخاصم برای متوقف ماندن فرایند دستیابی به آن، بیکار ننشستند و شهادت مسعود علی‌محمدی به‌عنوان نخستین شهید هسته‌ای در دوم دی‌ماه ۱۳۸۸ کام مردم را تلخ کرد. در حالی که تصور می‌شد ترور این استاد فیزیک دانشگاه تهران و نماینده ایران در پروژه سزامی (مرکز تابش سینکروترون برای تحقیقات و علوم کاربردی در خاورمیانه) روند موفقیت‌های ایران را متوقف یا حداقل با کندی مواجه کند، اما ایران ۲ سال بعد، یعنی در ۲۶ بهمن ۱۳۹۰ از ساخت مبله سوخت هسته‌ای ۲۰ درصد غنی‌شده و بارگذاری آن در رآکتور تحقیقاتی تهران خبر داد. ترورهای سلسله‌وار دانشمندان هسته‌ای تنها پروژه برای متوقف کردن برنامه هسته‌ای ایران نبود. تخریب مراکز هسته‌ای به طرق مختلف، قطعنامه‌های پیاپی و تحریم‌هایی که هیچ‌گاه مدرک مستدلی برای آنها ارائه نشد، بخشی دیگر از اقدامات بین‌المللی برای توقف موفقیت‌های دانشمندان ایرانی بود.

آدرس غلط بمب هسته‌ای

در سراسر دنیا تبلیغ می‌شود که ایران دنبال دستیابی به بمب هسته‌ای است و ایجاد محدودیت‌ها بـا این هدف صورت می‌گیرد. این در حالی است که بعضی از تحلیل‌ها حاکی از این موضوع است که قطعنامه‌ها، تحریم‌ها و محدودیت‌ها برای دست نیافتن ایران به آن بخش از دانش هسته‌ای است که از آن با عنوان لبه تکنولوژی (edge of technology) نام برده می‌شود. همچنین هسته‌ای (fusion) در شمار فناوری‌های لبه تکنولوژی (edge of technology) قرار می‌گیرد. درواقع کشورهایی که به این فناوری دست یابند، به‌عنوان حاکمان آینده جهان تثبیت خواهند شد، چراکه منابع فراوان انرژی در اختیار این کشورها قرار می‌گیرد. اکنون تنها آمریکا و چین در حال تلاش جدی برای ساخت خورشید مصنوعی با همان فناوری همجوشی هسته‌ای هستند، هرچند هنوز موفق نشده‌اند.

تخریب تجهیزات هسته‌ای ایران

آمریکا و اسرائیل همکاری گسترده و دیرینه‌ای برای حملات سایبری به ایران دارند. به ویژه این موضوع در یک حمله به تاسیسات هسته‌ای ایران نمود یافت. در ۲۲ تیر ۱۳۸۹ کشف ویروس استاکس‌نت که برای جاسوسی در تأسیسات هسته‌ای ایران توسط آمریکا و رژیم صهیونیستی طراحی شده بود، یک جنجال تمام‌عیار را در دنیا رقم زد. حمله سایبری به نیروگاه‌های هسته‌ای ایران به وسیله ویروس استاکس‌نت نخستین نمونه از حملات آمریکا به سیستم‌های کامپیوتری یک کشور دیگر بود که تخریب فیزیکی ایجاد کرد. نیویورک‌تایمز ۲ سال پس از این حمله که از سوی ایران کنترل شد، فاش کرده که ساخت این ویروس طی پروژه‌ای به نام بازی‌های المپیک به‌صورت مشترک از سوی آمریکا و رژیم صهیونیستی صورت گرفت. پروژه بازی‌های المپیک در دولت بوش آغاز شد و بعد ادامه یافت. براساس گزارش نیویورک‌تایمز، آمریکا برای آزمایش این ویروس در آزمایشگاه مخفی خود، آن را روی سانتریفیوژهای کهنه‌ای که در سال ۲۰۰۳ از سوی لیبی تحویل غرب داده شده بود، آزمایش کرد. نقش اسرائیل در این حمله از یک واحد نظامی موسوم به واحد ۸۲۰۰ شروع شد. چند سال بعد بدافزار رجین با مشخصاتی شبیه استاکس‌نت کشف شد که گروه‌های امنیتی به آن لقب استاکس‌نت ۲ را دادند.

سیاست استمرار

زمانی که تخریب‌کنندگان دریافتند که با تحمیل هزینه‌های انسانی و مالی به ایران امکان متوقف کردن برنامه هسته‌ای وجود ندارد، استراتژی خود را از «توقف» به «کنترل» تغییر دادند. این استراتژی البته گاهی به‌صورت همزمان هم اجرا می‌شد. در حالی که نخستین مذاکره هسته‌ای با ۳ کشور اروپایی، در ۲۹ مهر ۱۳۸۲ صورت گرفت، اما در نهایت، مذاکرات با اضافه شدن ۳ کشور دیگر به طرف مقابل شکل جدی‌تری به‌خود گرفت. این مذاکرات در انتها پس از سال‌ها کش و قوس نتیجه داد و بالاخره با عنوان برنامه جامع اقدام مشترک یا همان «برجام» در تابستان ۱۳۹۴ از سوی ایران و کشورهای موسوم به ۵+۱ امضا شد. صرف‌نظر از مفاد برجام و مخالفان داخلی و خارجی آن، مدت کوتاهی پس از روی کار آمدن دونالد ترامپ، رئیس‌جمهور وقت آمریکا این قرارداد در عمل از حیز انتفاع خارج شد. اردیبهشت ۱۳۹۷ ترامپ رسما اعلام کرد که از برجام خارج می‌شود. برنامه هسته‌ای ایران از زمانی که آغاز به کار کرد، «توقف»، «تعلیق»، «کندی» و «خشاب» را تجربه کرده است. با این حال آنچه به‌نظر می‌رسد این است که سیاست‌های کلان کشور برای توسعه این فناوری که زمین بازی را برای بازیگران عوض می‌کند، «تداوم با عقلانیت» است.