# چرخه سوخت هسته‌ای جمهوری اسلامی ایران

منصور حاتمی‌راد
کادر علمی پژوهشکده تحقیقات اسلامی

## چکیده

چرخه سوخت هسته‌ای، اشاره به مراحل مختلف دستیابی به سوخت هسته‌ای دارد. این مراحل شامل: «اکتشاف و استخراج اورانیوم»، «فرآوری اورانیوم و تولید کیک زرد»، «تبدیل کیک زرد به گاز هگزافلورایـد اورانیوم $uf_6$»، «فرایند فوق‌العاده پیچیده و پرهزینه غنی‌سازی اورانیوم»، «تهیه قرص‌ها و میله‌های سوخت» و قرار دادن آن در غلاف‌های ساخته شده از آلیاژ زیرکونیوم، «بارگذاری» در راکتورهای اتمی آب سبک نیروگاههای هسته‌ای و در نهایت «بازفرآوری زباله‌های اتمی» می‌باشد.

این مقاله به تشریح مراحل گوناگون یاد شده به منظور آشنایی هر چه بیشتر خوانندگان عزیز با «صنعت هسته‌ای» و به ویژه «چرخه سوخت هسته‌ای» جمهوری اسلامی ایران پرداخته است.

**کلیدواژه‌ها:** چرخه سوخت هسته‌ای، انرژی اتمی، جمهوری اسلامی ایران.

## مقدمه

این پرسش همواره مطرح بوده که انرژی هسته‌ای چیست؟ و چرا امروزه افکار عمومی جهان را به سوی خود جلب کرده است؟ چرا به طور دائم بر تعداد مصرف‌کنندگان و هواداران انرژی هسته‌ای افزوده می‌شود؟ در پاسخ به این سؤالات باید گفت:

انرژی هسته‌ای یکی از خروجی‌های «صنعت هسته‌ای» است و در مقایسه با سایر انرژی‌ها کمترین تأثیر منفی را بر محیط زیست اطراف (آب، هوا، زمین، حیوانات و جنگل) دارد.

اقتصادی بودن آن نیز یکی از عمده‌ترین مزیت‌های آن می‌باشد. به علاوه این انرژی، سهم بسزایی در امنیت ملی کشورها دارد و به عنوان یک جزء مکمل در سبد انرژی کشورها، منبعی مطمئن بوده که می‌توان به آن تکیه کرد.

انرژی هسته‌ای برخلاف دیگر منابع انرژی تابعی از شرایط آب و هوایی غیر قابل اطمینان، عدم تعادل، غیر قابل پیش‌بینی در قیمت، یا وابستگی به عرضه‌کنندگان خارجی نیست.

در حقیقت انرژی هسته‌ای یک صنعت بین‌المللی است که در عین حال به صورت بومی نیز از این منبع در مقیاس وسیع می‌توان بهره‌برداری کرد.

کشوری که بتواند به فن‌آوری هسته‌ای دست یابد، به مرحله‌ای می‌رسد که علاوه بر تثبیت اقتدار سیاسی و ایجاد قدرت اقتصادی، از مواضع بالایی در دیپلماسی نیز برخوردار می‌شود؛ و بر شرایط سیاسی و اقتصادی در هر نقطه‌ای از جهان و با هر کشوری در روابط دیپلماتیک و مبادلات اقتصادی تأثیرگذار خواهد بود.

واقعیت این است که هر کشوری بخواهد رو به جلو حرکت کند و به خودکفایی علمی و صنعتی برسد، به انرژی هسته‌ای نیاز دارد؛ و باید به دنبال منابع انرژی باشد. منابع انرژی شناخته شده جهان، نفت، گاز، آب، باد و ذغال سنگ است که منابعی محدود و غیر قابل دوامند؛ اما انرژی هسته‌ای هزاران برابر سایر انرژی‌ها، قدرت، دوام و کارایی دارد و استفاده از آن هزاران برابر صرفه‌جویی در مصرف انرژی را پدید می‌آورد. استفاده از انرژی اتمی به عنوان بهترین، مطمئن‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه برای کسب نیروی برق ارزان و مطمئن معرفی می‌شود.

با این اوصاف در پرتو دستیابی به دانش این فناوری برتر، می‌توان به اقتداری دست یافت که انرژی اتمی برای صاحبان آن در دنیای حاضر فراهم آورده است، و نیز می‌توان از آن به عنوان اهرم تنظیم کننده معادلات جهانی در عرصه‌های سیاسی و دیپلماتیک استفاده کرد. امروزه تلاش یک کشور جهت دستیابی به کاربردهای صلح‌جویانه فناوری هسته‌ای، نمایانگر توان علمی، تکنولوژیکی و پیشرفت عالی آن کشور در علوم مختلف همانند فیزیک، شیمی، ریاضیات، هندسه، مکانیک و انواع رشته‌های مهندسی به کار گرفته شده در فناوری هسته‌ای است، و موجب ارتقای سطح زندگی مردم آن کشور در میان ملل مختلف جهان می‌گردد.

چرخه سوخت هسته‌ای، اشاره به مراحل مختلف دستیابی به سوخت نیروگاههای اتمی دارد که طی یک فرایند فوق‌العاده پیچیده و پرهزینه با استفاده از تکنولوژی و فن‌آوری بسیار

پیشرفته سنگ اورانیوم تبدیل به قرص‌ها و میله‌های سوخت شده و در راکتورهای آب سبک بارگذاری می‌گردد.

کشورهایی که موفق به تولید سوخت هسته‌ای شوند، از قدرت بازدارندگی بالایی برخوردار شده، حاضر نیستند استقلال، عزت و اقتدار خود را در مقابل کشورهای پیشرفته مولد انرژی قربانی کنند.

در این عرصه جمهوری اسلامی ایران پس از سالها تلاش بی‌وقفه دانشمندان جوان هسته‌ای موفق شد فرایند پیچیده سوخت هسته‌ای را کامل کرده، سخت‌افزارهای مورد نیاز غنی‌سازی اورانیوم را تولید کرده، به فن‌آوری عظیم «چرخه سوخت هسته‌ای» دست یابد و نام خود را بر بلندای بام هسته‌ای جهان قرار دهد. این مقاله که در دو بخش تنظیم شده است، تلاشی است جهت تشریح چرخه سوخت هسته‌ای. در بخش نخست ضمن آشنایی با تاریخچه انرژی هسته‌ای، مراحل مختلف تهیه سوخت هسته‌ای که امروزه به نام «چرخه سوخت» شناخته می‌شود تشریح شده است. در بخش دوم مقاله، چرخه سوخت هسته‌ای ایران از آغاز تا پایان مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در پایان، خلاصه مجموعه مطالب مطرح شده در قالب نتیجه بحث به خوانندگان عزیز تقدیم می‌شود.

## بخش اول

## الف. تعاریف

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

### ۱. فناوری هسته‌ای

دانش تبدیل اورانیوم طبیعی به اورانیوم غنی‌شده، به منظور آزاد سازی انرژی عظیم نهفته در اتم را فناوری هسته‌ای گویند.

### ۲. اتم

هر عنصر از ذرات بسیار کوچک و غیر قابل شمارشی به نام اتم تشکیل شده است. هر اتم دارای یک هسته و قشری الکترونی است. تمامی اتم‌های یک عنصر دارای یک خاصیت، یک اندازه و یک شکل می‌باشند و با اتم‌های عنصر دیگر تفاوت دارند.[۱]

### ۳. انرژی هسته‌ای

انرژی حاصل از هسته اتم می‌باشد؛ واکنشی است که در هسته اتم رخ می‌دهد که در نهایت منجر به آزادسازی انرژی عظیم موجود در آن می‌شود.

### ۴. چرخه سوخت هسته‌ای

اشاره به مراحل مختلف آماده‌سازی اورانیوم و دستیابی به سوخت هسته‌ای دارد؛ که نیاز به فناوری و تکنولوژی فوق‌العاده پیشرفته‌ای دارد.

### ۵. اورانیوم

متداول‌ترین ماده سوخت برای راکتورهای هسته‌ای و سنگین‌ترین عنصر موجود در طبیعت است که هم می‌تواند برای سوخت نیروگاه اتمی و همچنین ساخت بمب اتم مورد استفاده قرار گیرد.[۲]

### ۶. فرآوری اورانیوم

مراحل تبدیل سنگ اورانیوم به کیک زرد را اصطلاحاً فرآوری اورانیوم می‌گویند.

### ۷. تبدیل

عملیات خالص‌سازی اورانیوم است. به تعبیر دیگر، فرایند بسیار پیچیده‌ای که در نهایت موجب تولید گاز «هگزافلوراید اورانیوم» ($uf_6$) از کیک زرد می‌شود.[۳]

### ۸. غنی‌سازی

عملیات مربوط به افزایش غلظت اورانیوم نیمه سنگین ($U_{235}$) از ۰/۷ درصد به حدود ۵ درصد را اصطلاحاً غنی‌سازی اورانیوم می‌گویند. به عبارت دیگر غنی‌سازی یعنی تولید اورانیوم ۲۳۵ به روش مصنوعی.[۴]

### ۹. میله سوخت

فرایند تبدیل گاز $uf_6$ به قرص سوخت است.

اجتماع منظم قرص‌های سوخت تولید شده از گاز $uf_6$ در یک فرایند فیزیکی، جهت انتقال به نیروگاه هسته‌ای را «میله سوخت» می‌گویند.[۵]

### ۱۰. زباله اتمی

ضایعات سوخت هسته‌ای مصرف شده که از رآکتور خارج می‌شود و حاوی عناصر رادیواکتیو است و طی فرایندی سردسازی و بازفرآوری می‌شود؛ «زباله اتمی» نام دارد.[۶]

### ۱۱. بازفرآوری

عملیات شیمیایی است که سوخت قابل استفاده را از زباله‌های اتمی جدا می‌کند.[۷]

## ب. تاریخچه

حدود سه قرن قبل از میلاد مسیح، دانشمند یونانی به نام دموکریت با مطالعه بر روی اشیای پیرامونی به این نتیجه رسید که اشیاء به رغم شکل ظاهری متفاوتی که دارند، از ذرات بسیار ریز و غیر قابل تجزیه‌ای تشکیل شده‌اند. اسم این ذرات را «اتم» گذاشت؛ که به زبان یونانی به معنی «غیر قابل تقسیم» است.[۸]

دو هزار سال بعد از دموکریت، دانشمند انگلیسی به نام جان دالتون هم به این نتیجه رسید که اتم را نمی‌توان شکست. سالها پس از مرگ او نظریه‌اش مورد تأیید دانشمندان فیزیکی قرار گرفت.

در قرن بیستم آلبرت اینشتین، دانشمند آلمانی مقیم امریکا پس از تحقیقات گسترده، به این نتیجه رسید که «اتم قابل شکستن است» و چنانچه شکافته شود، انرژی خارق‌العاده‌ای آزاد می‌شود. او با فرمول معروف $E=Mc^2$، میزان انرژی آزاد شده از شکستن هسته اتم را به نمایش گذاشت.

بعدها شاگرد ممتاز انیشتین به نام اپنهایمر، موفق شد نظریه استاد خود راکامل و اجرایی کند و انرژی توفنده و بی‌رقیب حاصل از شکستن هسته اتم را آزاد سازد.[۹]

او به کمک تنی چند از دانشمندان نامدار هسته‌ای، اولین بمب اتم را ساخت و با موفقیت آن را در صحرای نوادا آزمایش کرد و طولی نکشید که بدترین، جنایت‌بارترین و خطرناک‌ترین نوع استفاده از انرژی هسته‌ای در قالب دو بمب اتمی، توسط دولت امریکا، بر شهرهای هیروشیما و ناکازاکی ژاپن فرود آمد و تلخ‌ترین فاجعه قرن بیستم رقم خورد. اینک در اولین دهه قرن بیست و یکم، تکنولوژی هسته‌ای یکی از پیشرفته‌ترین مراحل علم و فن‌آوری است و کشورهای قدرتمند تلاش می‌کنند آن را در انحصار خویش نگاه دارند.

هرچند تجلی و ظهور این تکنولوژی در آغاز به صورت غیرصلح‌جویانه بود، اما به تدریج روند صلح‌آمیز استفاده از آن در زندگی بشر ریشه دوانید. کشورهای مختلف هر یک برحسب توان خود به این تکنولوژی روی آوردند و هر کدام استراتژی و تاکتیک‌های خاصی را برای خود برگزیدند.

## ج. چرخهٔ سوخت هسته‌ای

چرخهٔ سوخت هسته‌ای فرایند بسیار پیچیده‌ای است که با استخراج سنگ اورانیوم از معدن آغاز و پس از طی مراحل چندگانه با استفاده از تکنولوژی فوق‌العاده پیشرفته، سوخت هسته‌ای تولید و در نیروگاههای اتمی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در چرخهٔ سوخت هسته‌ای علوم گوناگونی مانند فیزیک، شیمی، ریاضیات، هندسه، مکانیک و انواع رشته‌های مهندسی به کار گرفته می‌شود و موجب ارتقای سطح زندگی مردم می‌گردد.

اینک به تشریح مراحل چندگانه این چرخه می‌پردازیم:

### مرحله اول: اکتشاف و استخراج اورانیوم

#### الف. اکتشاف

ذخایر طبیعی اورانیوم، سنگ معدن اورانیوم است که براساس مقدار قابل استحصال از معدن محاسبه می‌شود. با تکنیک‌ها و روشهای زمین‌شناسی، معدن اورانیوم، شناسایی می‌شود و نمونه‌هایی از سنگ معدن به آزمایشگاه ارسال می‌گردد. در آنجا محلولی از سنگ معدن تهیه و اورانیوم ته نشین شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه، میزان احتمالی استحصال اورانیوم و هزینه‌های استخراج از آن معدن برآورد می‌گردد.[۱۰]

#### ب. استخراج

هنگامی که معدن اورانیوم شناسایی شد به سه روش می‌توان اورانیوم را استخراج کرد:

۱. استخراج از سطح زمین

۲. استخراج از معادن زیرزمینی

۳. تصفیه در معدن

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

دو روش نخست همانند دیگر روشهای استخراج فلزات هستند؛ ولی در روش سوم، معمولاً سنگ در خود معدن تصفیه می‌شود و اورانیوم به دست می‌آید. با توجه به اینکه اورانیوم متداول‌ترین ماده سوخت برای راکتورهای هسته‌ای است، در اینجا به معرفی و تشریح این فلز با ارزش پرداخته می‌شود:

**اورانیوم (uranium)**

فلز نسبتاً نرم و قابل کششی است که در دمای بالا، به آسانی در هوا و آب، اکسید می‌شود. نقطه ذوب آن ۱۰۳۳ درجه سانتی‌گراد است. این فلز، سنگین‌ترین عنصر موجود در طبیعت است که

می‌تواند هم به عنوان سوخت برای نیروگاههای هسته‌ای و هم برای ساخت بمب اتم مورد استفاده قرار گیرد.

اورانیوم با علامت اختصاری u و عدد اتمی ۹۲، فلزی است که در پوسته زمین به مقدار نسبتاً زیاد یافت می‌شود و در مقایسه با سایر سوختهای هسته‌ای مانند پلوتونیوم، کاربرد وسیع‌تری دارد.[۱۱]

**انواع اورانیوم:** اورانیومی که از معدن به دست می‌آید یک دست نیست، به عبارت دیگر همه اتم‌های اورانیوم هم‌وزن نیستند، بلکه دارای وزنهای متفاوتی می‌باشند. دانشمندان برای نامگذاری اورانیوم، تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها را با هم حساب می‌کنند. بدین ترتیب اورانیوم را به سه دسته تقسیم می‌کنند:

| | | | | مقدار |
|---|---|---|---|---|
| الف | اورانیوم سنگین | $u_{238}$ | ۹۲ | ۱۴۶ | ۹۹/۳ |
| ب | اورانیوم نیمه سنگین | $u_{235}$ | ۹۲ | ۱۴۳ | ۰/۷ |
| ج | اورانیوم سبک | $u_{234}$ | ۹۲ | ۱۴۲ | ۰/۰۰۵ |

همه اتمهای اورانیوم در درون هسته خود، دارای ۹۲ پروتون می‌باشند اما تعداد نوترون‌های* آنها متفاوت است.[۱۲]

بیشترین اورانیوم موجود در طبیعت را، اورانیوم سنگین ($u_{238}$) تشکیل می‌دهد (۹۹/۳٪).

**طبقه‌بندی:** منابع اورانیوم شناخته شده جهان براساس قیمت تمام شده تولید در رده‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از:

| | | |
|---|---|---|
| ۱ | اورانیوم ارزان‌قیمت | هر کیلو از این نوع اورانیوم بین ۳۰ تا ۳۵ دلار قیمت دارد |
| ۲ | اورانیوم با قیمت متوسط | قیمت این نوع اورانیوم بین ۳۵ تا ۵۲ دلار است |
| ۳ | اورانیوم گرانقیمت | قیمت این نوع اورانیوم معمولاً بالاتر از ۵۲ دلار است |

به نظر می‌رسد تا سال ۲۰۱۰ میلادی منابع اورانیوم ارزان و متوسط تأمین کننده اصلی بازار جهانی اورانیوم باشد؛ ولی بعد از آن تولید کنندگان اورانیوم به منابع گران‌تر روی می‌آورند.[۱۳]

**معادن اورانیوم:** بهره‌برداری از معادن اورانیوم به دو صورت انجام می‌گیرد:

*. پروتون و نوترون ذراتی هستند که در داخل هسته اتم قرار دارند.

**الف. معادن روباز:** این معادن معمولاً در نزدیکی سطح زمین و عمق کمتر از ۳۰۰ متر قرار دارد که با حفاری قابل استحصال می‌باشد. در کشورهایی مانند کانادا، اسپانیا و امریکا معادنی از این نوع وجود دارد.

**ب. معادن زیرزمینی:** این نوع معادن معمولاً در محدوده‌های عمیق‌تری از سطح زمین وجود دارد که با حفر تونل اقدام به بهره‌برداری می‌شود. برای استفاده از این معادن، علاوه بر مشکل وجود گازهای «رادان» لازم است بعد از پایان بهره‌برداری از معدن، مراحل ایمن‌سازی و جلوگیری از پخش احتمالی مواد رادیواکتیو در خاک و آب‌های زیرزمینی با دقت انجام گیرد.

کشورهای ایران و افریقای جنوبی از این نوع معادن بهره‌مند هستند.

**کشورهای تولیدکننده**

در حال حاضر کشورهای معدودی در جهان وجود دارند که این عنصر طبیعی را تولید می‌کنند. امریکا، روسیه، کانادا، ازبکستان، نامیبیا، استرالیا، نیجریه، افریقای جنوبی، گابن، چک، قزاقستان، فرانسه، چین، اوکراین، اسپانیا، هندوستان، رومانی، آرژانتین، پاکستان، پرتغال و جمهوری اسلامی ایران از جمله مهم‌ترین تولیدکنندگان اورانیوم در جهان می‌باشند.[۱۴]

**ذخایر اورانیوم**

مهم‌ترین ذخایر اورانیوم جهان در کشورهای استرالیا، قزاقستان، کانادا، ایران، امریکا، روسیه، برزیل، نیجریه، نامیبیا و ازبکستان می‌باشد.

**مصرف**

میزان مصرف سالانه اورانیوم در کشورهای مختلف جهان تا سال ۲۰۰۵ بالغ بر ۶۵۰۰ تن می‌باشد. انتظار می‌رود مقدار مصرف تا سال ۲۰۲۰ میلادی به مرز ۷۵۰۰۰ تن در سال افزایش یابد.[۱۵]

**اورانیوم فقیر**

پس از جداسازی اورانیوم نیمه سنگین ($u_{235}$)، آنچه باقی می‌ماند به نام «اورانیوم فقیر» یا «تهی شده»، شناخته می‌شود؛ که فلز بسیار سنگینی است و اندکی خاصیت رادیواکتیویته (۰/۰۲ درصد) دارد که از آن برای ساخت گلوله‌های توپ ضد زره‌پوش و اجزای برخی جنگ‌افزارها استفاده می‌شود.

گلوله‌های اورانیوم فقیر شده به همان آسانی که چاقو در پنیر فرو می‌رود، می‌تواند در تانک، زره‌پوش، ناوشکن و زیردریایی‌ها نفوذ کند.[۱۶]

**مرحله دوم: فرآوری اورانیوم**

**تولید کیک زرد** (yellow cake)

اورانیوم در معادن هرگز به صورت خالص پیدا نمی‌شود، بلکه به صورت اکسید اورانیوم و مخلوط با سایر مواد شیمیایی در داخل سنگهای معدنی وجود دارد.

غلظت اورانیوم موجود در سنگهای معدنی بین ۳ تا ۵ دهم درصد می‌باشد، که برای هر نوع بهره‌برداری لازم است فرآوری و آماده‌سازی شود لذا سنگ اورانیوم استخراج شده از معدن، در آسیاب‌های مخصوص خرد شده و به پودر بسیار ریزی تبدیل می‌شود.

سپس خاک و سنگ را از آن جدا کرده و آن را در حوضچه‌های اسید سولفوریک غرق می‌کنند.

در ادامه محلول‌های دیگری به آن افزوده و در نهایت محصول تولید شده را تصفیه و خشک می‌کنند. این محصول را کنسانتره جامد اورانیوم یا کیک زرد (yellow cake) می‌گویند که پودری زبر و غیر قابل حل شدن در آب و فوق‌العاده سمی و شامل ۷۰ درصد اورانیوم با خاصیت پرتوزایی و رادیو اکتیو می‌باشد. البته این پودر همیشه به رنگ زرد نیست و گاهی سبز یا قهوه‌ای و بعضاً سیاه‌رنگ می‌باشد؛ که بستگی به نوع معدن و حلّال‌هایی که برای استحصال آن به کار می‌رود، دارد.[۱۷]

**مرحله سوم: تبدیل** (ucf)*

محصول کیک زرد به منظور سوخت نیروگاههای اتمی آماده نیست و نیاز به خالص‌سازی دارد. بنابراین به تأسیسات خالص‌سازی اورانیوم (ucf) ارسال می‌شود؛ و با انجام فرایند بسیار پیچیده‌ای، ابتدا اکسید اورانیوم ($uo_2$) به دست می‌آید؛ چنانچه مسئله غنی‌سازی اورانیوم در نظر نباشد این محصول قابلیت استفاده در نیروگاههای آب سنگین را دارد. چنانچه بخواهیم اورانیوم حاصله را در نیروگاه آب سبک استفاده کنیم، لازم است محصول اکسید اورانیوم ($uo_2$) را به گاز تبدیل نماییم.

برای این منظور اکسید اورانیوم را با گاز فلوئور ترکیب کرده و محصولی به نام تترا فلوراید اورانیوم ($uf_4$) به دست می‌آید ولی این گاز هم برای غنی‌سازی آماده نیست و باید با ادامه فرایند، تبدیل به گاز فوق‌العاده حساس، سمّی و خطرناکی به نام «هگزا فلوراید اورانیوم ($uf_6$)»

*. تأسیسات تبدیل اورانیوم Uranium Conversion Facilty

شود. این محصول نهایی برای غنی‌سازی به مرحله بعد ارسال می‌گردد. جابجایی این گاز با دقت فراوان صورت می‌گیرد.[۱۸]

**مرحله چهارم: غنی‌سازی اورانیوم** (uranium enrichment)

یکی از تکنولوژی‌های بسیار پیچیده در صنعت عظیم هسته‌ای، فرایند غنی‌سازی اورانیوم است. کشوری که به غنی‌سازی اورانیوم دست یابد می‌تواند اقتدار سیاسی و اقتصادی خود را در جهان کنونی تثبیت کند. در واقع اورانیوم، امروزه خود به یک قدرت و عالی‌ترین تعیین کننده سیطره قدرت در جهان تبدیل شده و به همین علت است که می‌توان آن را مرحله‌ای از ترقی بشریت و پیشرفت سلطه و استیلا دانست.[۱۹]

در جهان کنونی، کشورهای انگشت‌شماری هستند که صاحب این تکنولوژی عظیم و پیچیده بوده و خدماتی را به کشورهایی که عضو باشگاه هسته‌ای دنیا می‌باشند ارائه می‌دهند.

این مرحله به دلیل اهمیت و حساسیتی که در نظام بین‌الملل دارد به طور مختصر توضیح داده می‌شود:

**تعریف:** غنی‌سازی اورانیوم یعنی بالا بردن درصد فراوانی نسبی اورانیوم نیمه سنگین ($u_{235}$) از ۰/۷ درصد به بالاتر از ۳ درصد.

اورانیوم طبیعی دارای ۹۹/۳ درصد اورانیوم سنگین ($u_{238}$) می‌باشد که در آن واکنش زنجیره‌ای انجام نمی‌گیرد و فقط ۰/۷ درصد آن اورانیوم نیمه‌سنگین ($u_{235}$) است که می‌تواند در واکنش زنجیره‌ای به کار رود؛ بنابراین اورانیوم طبیعی که در معادن وجود دارد برای استفاده در نیروگاه اتمی به عنوان سوخت هسته‌ای مطلوب نیست و باید غنی‌سازی شود.[۲۰]

برای آنکه $uf_6$ تولید شده در مرحله تبدیل، به عنوان سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد، باید ایزوتوپ قابل شکافت آن غنی‌سازی شود؛ البته سطح غنی‌سازی بستگی به کاربرد سوخت هسته‌ای دارد. به طور مثال، برای سوخت راکتور اتمی آب‌سبک، سوختی با حداکثر ۵ درصد اورانیوم ۲۳۵ مورد نیاز است؛ در حالی که در یک بمب اتمی، اورانیوم باید حداقل ۹۰ درصد غنی‌سازی شده باشد.[۲۱]

فرایند غنی‌سازی اورانیوم، یکی از پرهزینه‌ترین مراحل چرخه سوخت هسته‌ای می‌باشد؛ که نیازمند تکنولوژی بالایی است.

## روش‌های غنی‌سازی اورانیوم

غنی‌سازی با استفاده از یک یا چند روش جداسازی ایزوتوپ‌های سبک و سنگین صورت می‌گیرد. در عصر حاضر روشهای گوناگونی برای غنی‌سازی وجود دارد که برخی از آنها کاربردهای علمی و صنعتی ندارند و بیشتر اهمیت تاریخی پیدا کرده‌اند. مانند روش آیرودینامیک، میدان مغناطیسی، جداسازی شیمیایی، جداسازی پلاسما و...[۲۲]. در حال حاضر متداول‌ترین روش برای غنی‌سازی عبارتند از:

### ۱. روش پخش گازی (دیفیوژن) (Diffusion)

یکی از روش‌های متداول غنی‌سازی اورانیوم می‌باشد که در بسیاری از کشورها رایج است؛ اما با توجه به هزینه بسیار بالا، این روش کم کم در حال منسوخ شدن است. در این روش گاز $uf_6$ با فشار بالا از درون مجرای مشبک نیکل عبور داده می‌شود، در نتیجه اورانیوم ۲۳۵ که حجم کمتری از اورانیوم ۲۳۸ دارد، با سرعت بیشتری از منافذ مجرا عبور می‌کنند.[۲۳]

مهم‌ترین عیب این روش این است که جداسازی ایزوتوپ‌های سبک در هر مرحله نرخ نسبتاً پایینی دارد، لذا برای رسیدن به سطح غنی‌سازی مطلوب باید این فرایند به دفعات زیادی تکرار شود، که این عمل نیازمند امکانات زیاد و مصرف بالای انرژی الکتریکی است و معمولاً هزینه عملیات نیز بسیار افزایش خواهد یافت. دانشمندان به روش گازی موفق شدند اورانیوم خالص تهیه کنند اما متأسفانه به جای بهره‌برداری صلح‌جویانه و خدمت به بشریت اولین اقدام آنان ساختن بمب اتم و انفجار آن در هیروشیما و ناکازاکی ژاپن و کشتار دهها هزار انسان بود.

### ۲. سانتریفیوژ گازی (Gaseous Centrifugation Method)

مهم‌ترین و متداول‌ترین روش غنی‌سازی اورانیوم در صنعت هسته‌ای جهان روش سانتریفیوژ گازی است که اقتصادی‌ترین روش هم محسوب می‌شود.

سانتریفیوژ گازی به ماشینی گفته می‌شود که دارای طبل‌های چرخان است و با سرعت بسیار زیاد به دور خود می‌چرخد. (هر دقیقه ۶۴۰۰۰ دور). این روش در سال ۱۹۱۹ میلادی پیشنهاد شد ولی تلاشها تا سال ۱۹۳۴ ناموفق بود. اولین بار در سال ۱۹۴۰ م در اروپا به نمایش درآمد. امروزه با توجه به هزینه پایین و سرعت بالاتر غنی‌سازی با سانتریفیوژ، این روش در حال گسترش است.[۲۴] در این روش ابتدا گاز $uf_6$ را با فشار بالا به مخزن‌های استوانه‌ای شکل سانتریفیوژ، تزریق می‌کنند و با سرعت بسیار زیادی می‌چرخانند (۶۴ هزار دور در دقیقه)

نیروی گریز از مرکز موجب می‌شود ایزوتوپ ۲۳۵ که اندکی از ایزوتوپ ۲۳۸ سبک‌تر است، از مولکول سنگین‌تر جدا و در وسط سیلندر جمع شوند و ایزوتوپ‌های ۲۳۸ که وزن سنگین‌تری دارد به جداره‌های سیلندر نزدیک گردد. گازی که در مرکز سیلندر متمرکز شده و سبک‌تر است وارد سیلندر بعدی می‌شود و عمل چرخش تکرار می‌شود. مجدداً به سیلندر بعدی منتقل می‌شود. این فرایند در مجموعه‌ای از سیلندرها صورت می‌گیرد که اصطلاحاً «**آبشار سانتریفیوژ**» نامیده می‌شود و معمولاً در گروههای ۱۶۴ تایی سازمان‌دهی شده‌اند. در نهایت اورانیوم به غنای ۳ تا ۵ درصد می‌رسد که برای سوخت نیروگاه اتمی آب سبک قابل استفاده می‌باشد.[۲۵]

هرچند روش سانتریفیوژ گازی نیازمند تجهیزات گرانقیمتی است، اما هزینه انرژی تولید شده نسبت به روش قبلی کمتر است. کشورهای روسیه، انگلستان، هلند، آلمان، امریکا، ژاپن، چین، پاکستان، برزیل، کره شمالی و جمهوری اسلامی ایران به روش سانتریفیوژ گازی اقدام به غنی‌سازی اورانیوم می‌کنند.[۲۶]

### ۳. روش جداسازی لیزری

این روش پیشرفته‌ترین راه، برای غنی‌سازی اورانیوم است که هنوز به مرحله تجاری و صنعتی نرسیده و مراحل آزمایشگاهی را طی می‌کند. در غنی سازی به روش لیزری مواد خام بیشتری با سطح غنی‌سازی بالاتری مورد استفاده قرار می‌گیرد، و به دو صورت انجام می‌شود:

**الف. روش Avlis**

در این روش یک اشعهٔ لیزر با فرکانسی که فقط ایزوتوپ ۲۳۵ جذب می‌گردد، به اورانیوم تابانده می‌شود که باعث تحریک اتم این ایزوتوپ شده و در نتیجه اتم‌های آن یک الکترون از دست می‌دهند و تبدیل به یون می‌گردند (بار مثبت پیدا می‌کنند). سپس یون‌های ایزوتوپ ۲۳۵ به یک میدان مغناطیسی قوی جذب و جدا می‌گردد.[۲۷]

**ب. روش Molis**

در این روش هم مانند روش Avlis ابتدا اشعه لیزر با فرکانس جذب شونده توسط ایزوتوپ ۲۳۵ بر گاز $uf_6$ تابانده می‌شود و به این وسیله ایزوتوپ ۲۳۵ اورانیوم در گاز $uf_6$ یونیزه می‌گردند.

سپس مجدداً با تاباندن لیزر دیگری بر این یون‌ها یک اتم فلوئور را از آن جدا کرده تا به

صورت پودر درآمده و از گاز $uf_6$ جدا شود. هر دو روش فوق بر این نکته تأکید دارند که ایزوتوپ‌های ۲۳۵ و ۲۳۸ اورانیوم هرکدام فرکانس‌های متفاوتی از اشعه لیزر را دریافت می‌کنند.[۲۸]

**مرحله پنجم: تولید میله‌های سوخت**

پس از غنی‌سازی اورانیوم، گاز $uf_6$ به پودر «دی‌اکسید اورانیوم» ($uo_2$) تبدیل می‌شود تا به منظور سوخت نیروگاه قابل استفاده باشد. سپس $uo_2$ را به صورت قرص‌های فشرده و کوچکی به اندازه قرص آسپرین درآورده و در معرض حرارت بالا قرار می‌دهند، تا پس از طی چند فرایند فیزیکی، قرص‌های سرامیکی سخت با ابعاد یکسان حاصل شود. اینک متناسب با طراحی رآکتور و نوع سوخت مورد نیاز، این قرص‌های کوچک را دسته دسته کرده تا «میله‌های سوخت» (fuel red) تهیه می‌شود. از اجتماع میله‌های سوخت، «**لوله‌های سوخت**» (fuel Aassembly) تولید می‌شود. برای جابجایی میله‌های سوخت، آنها را در غلاف‌های مخصوص قرار می‌دهند. غلافهای سوخت از آلیاژ بسیار مقاومی بنام «**زیرکونیوم**» ساخته شده که در برابر خوردگی بسیار مقاوم است و در عین حال از رسانای حرارتی بسیار بالایی برخوردارند.

در نهایت، میله سوخت آماده شده را جهت استفاده و بهره‌برداری به نیروگاه اتمی ارسال و در رآکتور اتمی آب سبک «بارگذاری» می‌کنند.[۲۹]

**مرحله ششم: باز فرآوری زباله‌های اتمی**

بازفرآوری یا پردازش، یک عملیات شیمیایی است که سوخت قابل استفاده را از زباله‌های اتمی جدا می‌کند. سوخت مصرف شده که از راکتور خارج می‌شود، بسیار داغ و رادیو اکتیو است و تشعشع و یون‌های فراوانی را می‌تاباند. به همین دلیل هم باید سرد شود و هم از تابیدن پرتوهای رادیواکتیو آن به محیط جلوگیری کرد. (سالانه $\frac{1}{3}$ کل سوخت هسته‌ای در راکتور مصرف می‌شود که باید از نیروگاه خارج و سوخت جدید جایگزین شود.)

در کنار هر رآکتور، استخرهایی برای انبار کردن سوخت مصرف شده وجود دارد. این استخرها، مخزن‌هایی بتنی، مسلح به لایه‌های فولادی ضد زنگ هستند که ۸ متر عمق دارند و پر از آب می‌باشند. آب هم میله‌های سوخت مصرف نشده را خنک می‌کند و هم به عنوان پوشش حفاظتی در برابر تابش رادیواکتیو عمل می‌کند.

به مرور زمان، شدت گرما و تابش رادیواکتیو کاهش می‌یابد، به طوری که پس از ۴۰ سال، به $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ مقدار اولیه (زمانی که از راکتور خارج شده) می‌رسد.[۳۰]

سه درصد سوخت مصرف شده در یک رآکتور آب سبک را ضایعات بسیار خطرناک رادیواکتیو تشکیل می‌دهد؛ ولی بقیه آن حاوی مقادیر قابل توجهی اورانیوم نیمه سنگین ($u_{235}$)، پلوتونیوم ($pu_{239}$)، اورانیوم سنگین ($u_{238}$) و دیگر مواد رادیواکتیو است. این مواد را می‌توان با روشهای شیمیایی از یکدیگر جداکرد.[۳۱]

اگر شرایط اقتصادی و قوانین حقوقی اجازه دهد، می‌توان سوخت مصرف شده را برای تهیه سوخت هسته‌ای جدید بازیافت کرد.

همه رآکتورهای هسته‌ای، پلوتونیوم هم تولید می‌کنند و همین موضوع سبب می‌شود استخراج پلوتونیوم با کمک بازفرآوری به گزینه‌ای جذاب برای کشورهایی که قصد انجام برنامه‌های غیر قانونی ساخت سلاحهای اتمی را دارند، تبدیل شود.[۳۲]

## انواع زباله‌های اتمی

زباله‌های اتمی براساس مقدار و نوع ماده رادیواکتیو به سه گروه تقسیم می‌شوند:

**۱. سطح پائین (LLW)**

این نوع زباله‌ها معمولاً در بیمارستان‌ها، صنعت و نیز در اثر چرخه سوخت هسته‌ای تولید می‌شود و شامل: کاغذ، پارچه، ابزارآلات، پوشاک، فیلتر و غیره است که به مقادیر کمی از رادیو آکتیویته آلوده است، و اغلب عمر کوتاهی دارند و نیازی به پوشش حفاظتی ندارند و معمولاً فشرده شده یا آتش زده می‌شوند و یا در چاله‌های کم عمق دفن می‌شوند.[۳۳]

**۲. سطح متوسط (ILW)**

این قبیل زباله‌ها حاوی مقدار بیشتری رادیو آکتیویته است و بعضاً احتیاج به محافظت دارند؛ و معمولاً فضولات شیمیایی، پوشش میله سوخت و مواد نیروگاههای برق هسته‌ای را شامل می‌شوند که عمر کوتاهی دارند ولی نیاز به پوشش محافظ دارند. احتمال دارد این مواد را برای دور ریختن با بتون یا قیر به صورت جامد درآورند و در مخزن زباله‌ها در اعماق زمین دفن کنند.[۳۴]

کارخانه‌هایی در فرانسه و انگلستان وجود دارند که مرحله بازفرآوری سوخت نیروگاههای کشورهای اروپایی و ژاپن را انجام می‌دهند.

رایج‌ترین شیوه بازفرآوری "PUREX" نام دارد که مخفف عبارت «جداسازی اورانیوم و پلوتونیوم» است. در این شیوه ابتدا میله‌های سوخت را از یکدیگر جدا و در اسید نیتریک حل می‌کنند؛ سپس با استفاده از مخلوطی از فسفات‌تری بوتیل و یک حلّال هیدرو کربن، اورانیوم و پلوتونیوم مصرف نشده را جدا می‌کنند و به عنوان سوخت جدید به مراحل تهیه سوخت هسته‌ای می‌فرستند.

در زمینه بازفرآوری سوخت هسته‌ای، ایالات متحده امریکا بیشترین سهم بازفرآوری را در جهان دارد و پس از آن کشورهای فرانسه، انگلستان، روسیه، هند و ژاپن قرار دارند.[۳۵]

**۳. زباله سطح بالا (HLW)**

همان سوخت مصرف شده راکتورهای اتمی است و نیاز به پوشش حفاظتی و سردسازی دارد و شامل سه مرحله می‌باشد:

**الف. انبارداری موقت**؛ باید زباله‌ها سرد شود و از پرتوافشانی آنها ممانعت گردد.

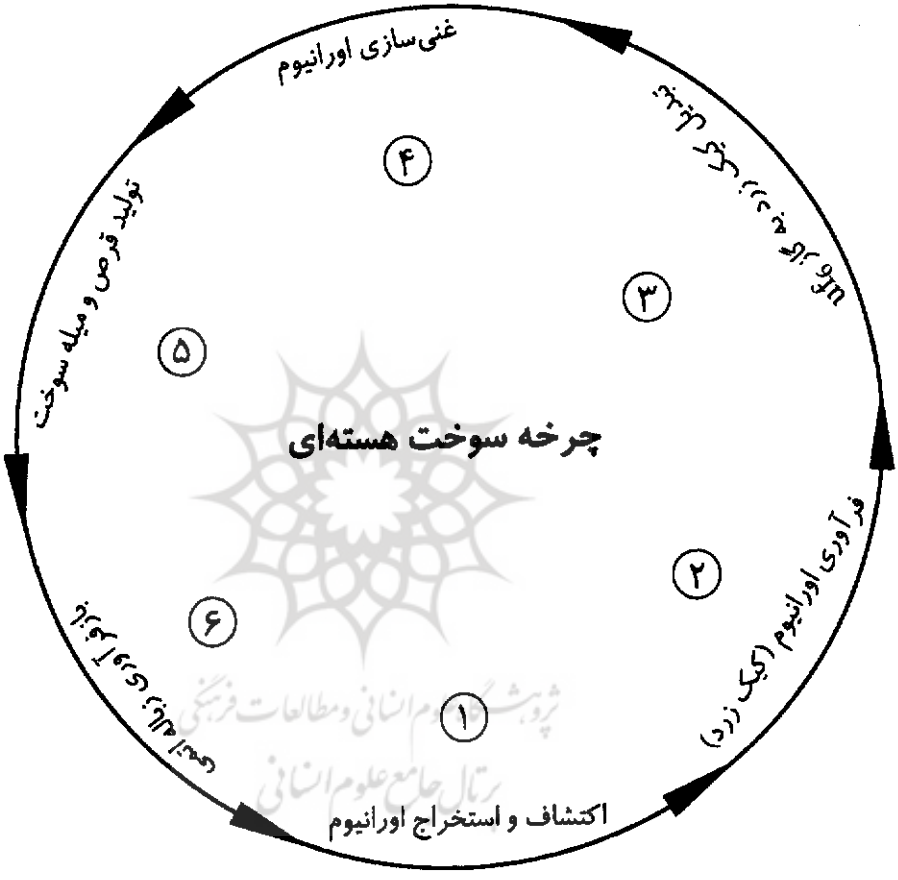
**ب. بازفرآوری**؛ پلوتونیوم از زباله جدا می‌شود و تبدیل به پودر می‌گردد.

**ج. شیشه‌سازی**؛ پودر با شیشه مخلوط می‌شود تا ضایعات در محفظه‌ای محبوس شود. شیشه مایع در محفظه‌های فولادی قرار می‌گیرند و در منطقه‌ای پایدار انبارداری می‌شود. پس از یک هزار سال، شدت تابش‌های رادیو اکتیو ضایعات هسته‌ای به مقدار طبیعی کاهش پیدا می‌کند. این نقطه تا به امروز، انتهای چرخه سوخت هسته‌ای است. کشور فرانسه در زمینه آماده‌سازی برای دفع HLW پیشتاز است. کشور سوئد از نظر برنامه‌های دفع مستقیم سوخت مصرفی بسیار پیشرفته است. در آلمان مباحث سیاسی در مورد یافتن یک مخزن نهایی برای زباله رادیو اکتیو وجود دارد.[۳۶]

ایالات متحده امریکا یک مخزن نهایی در کوه yucoa در نوادا برگزیده است. پیشنهاداتی برای یک مخزن HLW بین‌المللی در مناسب‌ترین مکان‌ها از نظر زمین‌شناختی ـ که احتمالاً روسیه یا استرالیا ـ باشند، مطرح شده که اعتراضات گسترده سیاسی را در این کشورها به دنبال داشته است. همچنین پیشنهاد شده راکتورهایی که زباله هسته‌ای را مصرف و آن را به زباله‌های کم ضرر تبدیل کنند، ساخته شود، که بعدها متوقف شد.[۳۷]

## نمودار چرخه سوخت هسته‌ای

آنچه در بخش اول مقاله به طور مفصل شرح داده شد، در قالب یک نمودار خلاصه شده و به خوانندگان محترم تقدیم می‌گردد:




پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

بخش دوم

## الف. چرخه سوخت هسته‌ای ایران

### ۱. تاریخچه

تلاش ایران برای دستیابی به انرژی هسته‌ای، از سالها قبل از پیروزی انقلاب اسلامی آغاز شد؛ که براساس آن ساخت ۲۳ نیروگاه برق هسته‌ای با ظرفیت ۲۳ هزار مگاوات در سراسر کشور، در یک چشم‌انداز ۱۵ ساله از جمله اصلی‌ترین و اساسی‌ترین و از سویی پرهزینه‌ترین اهداف دولت وقت ایران بود.

به همین منظور صدها کارشناس جهت فراگیری علوم هسته‌ای به عنوان بورسیه به کشورهای دارای فناوری هسته‌ای اعزام شدند. امریکا، انگلستان، آلمان غربی، فرانسه، کانادا، ایتالیا و بلژیک محل آموزش کارشناسان ایران بود.[۳۸]

فرمان تأسیس سازمان انرژی هسته‌ای ایران (AEOI) در اسفندماه سال ۱۳۵۲ صادر شد و در فروردین ماه ۱۳۵۳ به طور رسمی آغاز به کار کرد. همزمان با شروع فعالیت‌های این سازمان، دولت ایران اقداماتی را برای خرید چند نیروگاه اتمی آغاز کرد و با کشورهای امریکا، فرانسه و آلمان غربی وارد مذاکره شد.[۳۹]

دولت آلمان غربی متعهد شد نیروگاه اتمی بوشهر را با ظرفیت دو رآکتور ۱۲۰۰ مگاواتی نصب و راه‌اندازی کند. دولت فرانسه هم موافقت کرد دو نیروگاه هسته‌ای با ظرفیت ۹۰۰ مگاوات در منطقه دارخوین (خوزستان) تکمیل و تأسیس نماید. به منظور پشتیبانی علمی و فنی از راکتورهای هسته‌ای و تولید سوخت هسته‌ای مصرفی نیروگاهها، مرکز هسته‌ای ucf اصفهان با نظارت شرکت «تکنیک اتم» فرانسه توسط شرکت‌های چینی، تأسیس شد. ساخت این تأسیسات جهت پشتیبانی از راکتورهای اتمی آشکارترین فعالیت‌های هسته‌ای کشور ایران به شمار می‌رفت.

همزمان با رشد چشمگیر فعالیت‌های هسته‌ای کشور، در زمینه غنی‌سازی نیز دولت ایران اقدام به خرید ۱۰ درصد سهام شرکت اوردیف (Eurodif) فرانسه، به منظور تأمین سوخت نیروگاهها، نمود.

مجموعه این تلاشها با حمایت جدی دولت امریکا و شخص ریاست جمهوری وقت این کشور (آیزنهاور) صورت می‌گرفت و نه تنها اعتراضی به تلاشهای روزافزون ایران نمی‌شد، بلکه رییس‌جمهور وقت امریکا به دوستان غربی خود گفته بود:

**«برای حفظ منافع امریکا لازم است ایران اتمی شود.»**[۴۰]

با پیروزی انقلاب اسلامی، با توجه به شرایط انقلابی کشور روند هسته‌ای شدن ایران متوقف شد. شرکت‌های طرف قرارداد ایران، از آشفتگی‌های سیاسی بعد از انقلاب سوء استفاده کرده، همکاری خود را برای ساخت و تکمیل نیروگاههای اتمی متوقف و کشور را ترک کردند.

در دوران جنگ تحمیلی بارها این نیروگاهها مورد بمباران هواپیماهای دشمن بعثی قرار گرفت. پس از پایان جنگ تحمیلی و پذیرش قطعنامه ۵۹۸، از سال ۱۳۶۸ به بعد، جمهوری اسلامی مصمم شد نیروگاه هسته‌ای بوشهر را تکمیل و راه‌اندازی کند. در این ارتباط پس از سالها پیگیری و مذاکره با کشورهای صاحب تکنولوژی، نهایتاً دولت روسیه قرار داد تکمیل پروژه نیروگاه بوشهر را امضاء و علی‌رغم کارشکنی‌های مکرر دولت امریکا، کار را آغاز نمود.

### ۲. جهش هسته‌ای ایران

در طول سالهای پس از پیروزی انقلاب، اکثر کشورها، همکاری‌های هسته‌ای خود را با ایران قطع و جمهوری اسلامی را برای دستیابی به فناوری هسته‌ای صلح‌آمیز، تنها گذاشتند، امّا جمهوری اسلامی ایران مصمم بود راه خود را در مسیر پرپیچ و خم استفاده صلح‌آمیز انرژی اتمی بازنماید، لذا برای رسیدن به این مهم اقدامات زیر را انجام داد:

#### الف. تکمیل مرکز ucf اصفهان*

در اواخر سال ۱۳۷۶ شورای فن‌آوری هسته‌ای ایران تشکیل شد و تصمیم گرفته شد علاوه بر نیروگاه هسته‌ای بوشهر ۶ واحد نیروگاه هسته‌ای دیگر راه‌اندازی و در عین حال، سوخت نیروگاههای هسته‌ای در داخل کشور تأمین شود. براساس این تصمیم، به رغم قطع همکاری شرکت‌های طرف قرارداد در تکمیل تأسیسات ucf اصفهان که فاز اول تولید سوخت هسته‌ای ایران و یکی از پیشرفته‌ترین پروژه‌های هسته‌ای جهان است؛ با تمام ناباوری‌ها، توسط مهندسین و دانشمندان جوان هسته‌ای ایران در سال ۱۳۷۹ آغاز و در مدت ۴ سال تکمیل و بالاخره در فروردین ماه سال ۱۳۸۳ به بهره‌برداری رسید؛ پروژه‌ای که قرار بود چینی‌ها در مدت ۱۱ سال تکمیل کنند و تحویل دهند.![41]

#### ب. ساخت و راه‌اندازی تأسیسات غنی‌سازی نطنز

همزمان با تلاش ایران جهت تکمیل و راه‌اندازی مرکز تبدیل اورانیوم اصفهان (ucf)، ساخت تأسیسات غنی‌سازی اورانیوم در نطنز که از سالها پیش آغاز شده بود و مهم‌تر از آن ساخت دستگاههای فوق‌العاده پیشرفته و پیچیده سانتریفیوژ، که اصلی‌ترین نقش را در غنی‌سازی

---

*. ucf مخفف Uranium Conversion Facility به معنی تأسیسات تبدیل اورانیوم می‌باشد.

اورانیوم دارد توسط دانشمندان جوان هسته‌ای ایران آغاز و با موفقیت آزمایش و به ثمر نشست و به سایت نطنز منتقل شد.

## چرخهٔ سوخت هسته‌ای ایران

شاید بتوان این چرخه را یکی از پیچیده‌ترین و پرزحمت‌ترین فرایندهای صنعتی از آغاز تا پایان کار در صنعت هسته‌ای به حساب آورد. زیرا همانطور که اشاره شد، شامل مراحل فوق‌العاده حساس و ویژه‌ای بوده و تکنولوژی بالایی به همراه کار اجرایی بسیار جهت نصب تأسیسات عظیم و پرهزینه آن طلب می‌کند.

به منظور آشنایی با سیکل سوخت هسته‌ای کشورمان به اختصار به تشریح مراحل مختلف آن می‌پردازیم:

**۱. استخراج اورانیوم (ساغند یزد)**

معدن اورانیوم ساغند یزد، بزرگ‌ترین معدن اورانیوم خاورمیانه است. و به اعتقاد بسیاری از کارشناسان هسته‌ای، نمایشی از نهایت تکنولوژی معدنی در جمهوری اسلامی ایران و یک شهر زیرزمینی مدرن در کویر مرکزی ایران است. این معدن دارای ۲ چاه قائم به عمق بیش از ۳۵۰ متر است. وسعت آن بیش از ۱/۸ کیلومتر مربع بوده و یکی از پیشرفته‌ترین معادن ایران است.[۴۲]

بهره‌برداری از این معدن عظیم بیانگر این واقعیت است که ایران پیشرفت فراوانی در تجهیز معادن اورانیوم داشته و به فن‌آوری مدرن معادن عمیق اورانیوم دست یافته است. اگرچه در ایران معادن بالقوه اورانیوم دیگری هم در استانهای هرمزگان و آذربایجان غربی وجود دارد؛ اما در حال حاضر، تنها معدن قابل بهره‌برداری، معدن ساغند (یزد) است.

**۲. فرآوری اورانیوم، تولید کیک زرد (اردکان یزد)**

پس از استخراج سنگ اورانیوم از معدن عمیق ساغند، آن را برای آسیاب کردن به تأسیسات فرآوری اورانیوم اردکان می‌فرستند. سنگ‌های اورانیوم طی فرایندی به «کیک زرد» تبدیل می‌شود. محصول نهایی را برای ادامه عملیات به تأسیسات تبدیل اورانیوم «ucf» که در اصفهان قرار دارد ارسال می‌کنند.

**۳. تبدیل اورانیوم به گاز (یو. سی. اف. اصفهان)**

در این کارخانه عظیم، ابتدا کیک زرد به اکسید اورانیوم ($uo_2$) و در مرحله بعد به گاز تترا فلوراید اورانیوم ($uf_4$) و در نهایت به گاز سمی و خطرناک هگزا فلوراید اورانیوم ($uf_6$) تبدیل می‌گردد. این گاز خوراک اصلی غنی‌سازی در سایت نطنز است.

دستیابی به گاز $uf_6$ یکی از بزرگ‌ترین موفقیت‌های جمهوری اسلامی در سیکل سوخت هسته‌ای است. دست نیافتن به آن یعنی بی‌ثمر بودن سایت‌های عظیم، پیچیده و پیشرفته غنی‌سازی نطنز.

ایران هشتمین کشور دارنده تأسیسات کامل خالص‌سازی اورانیوم (ucf) در جهان است.

**۴. غنی‌سازی اورانیوم (نطنز)**

گاز تولید شده در تأسیسات ucf اصفهان جهت غنی‌سازی که حقیقتاً یکی از پیچیده‌ترین و پرهزینه‌ترین حلقه‌های چرخه سوخت هسته‌ای است به سایت عظیم و زیرزمینی نطنز ارسال می‌شود؛ تا به دستگاههای فوق‌العاده پیچیده، حساس و پیشرفته سانتریفیوژ که به صورت زنجیره‌های ۱۶۴ تایی «**آبشارهای سانتریفیوژ**» را تشکیل داده‌اند، تزریق شود.[۴۳]

در ماشین‌های سانتریفیوژ، گاز $uf_6$ بین ۳ تا ۵ درصد غنی‌سازی می‌شود و برای ادامه کار و تبدیل گاز به **قرص‌ها و میله‌های سوخت**، به مرحله بعد ارسال می‌شود.

**۵. تولید قرص و میله سوخت (تأسیسات غنی‌سازی نطنز)**

در آخرین مرحله تولید سوخت، گاز $uf_6$ غنی‌سازی شده در تأسیسات نطنز، طی فرایندی، خشک شده و به پودر $uo_2$ تبدیل می‌گردد. سپس با دستگاههای پرس به شکل قرص درمی‌آید. «**قرص‌های اورانیوم**» را در دمای بالا به قرص‌های سرامیکی یک اندازه تبدیل و در کنار هم قرار می‌دهند تا «**میله‌های سوخت**» حاصل شود. از اجتماع میله‌های سوخت، لوله‌های سوخت تولید می‌گردد این لوله‌ها در غلافی ساخته شده از فلز زیرکونیوم* قرار داده می‌شود[۴۴] تا به نیروگاه اتمی بوشهر ارسال گردد که در واقع آخرین مرحله چرخه سوخت هسته‌ای ایران است.

**۶. بارگذاری (بوشهر)**

سوخت هسته‌ای تهیه شده در تأسیسات غنی‌سازی نطنز جهت بارگذاری در راکتور آب سبک به نیروگاه بوشهر ارسال می‌گردد و در قلب راکتور اتمی، کار گذاشته می‌شود.

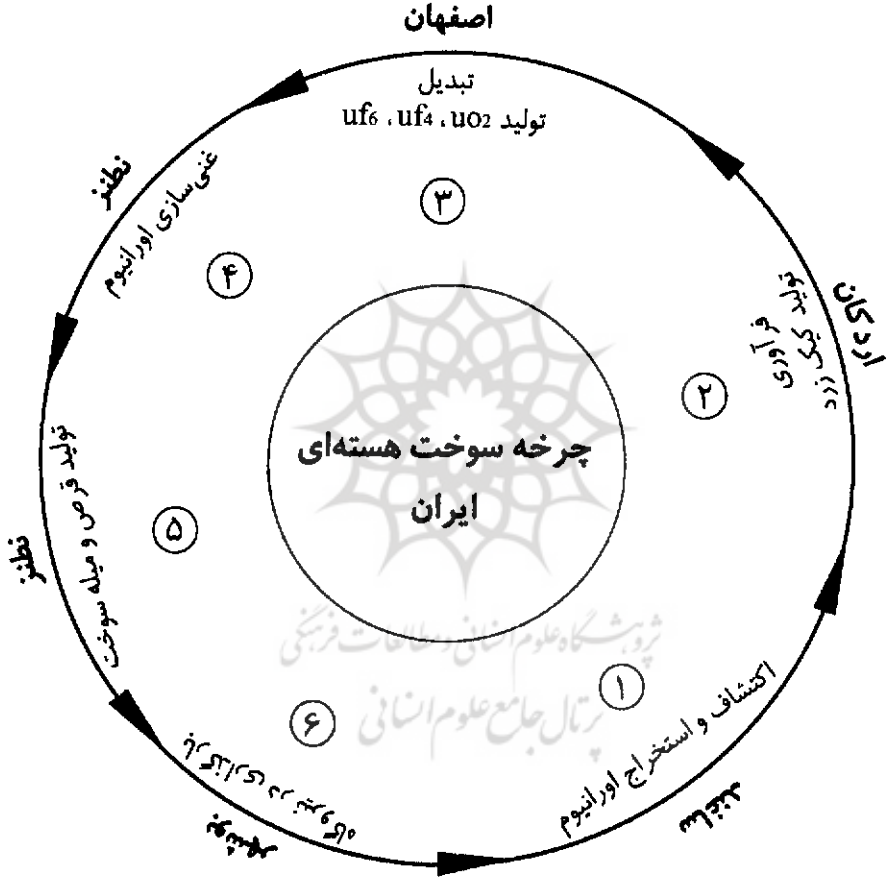
انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای اورانیوم، و رآکتورهای قدرت، سبب بخار شدن آب و به حرکت درآمدن توربین‌ها جهت تولید برق می‌شود.

---

* با ساخت کارخانه زیرکونیوم (ZPP) در مرکز تکنولوژی هسته‌ای اصفهان، ایران اسلامی موفق به تولید فلز زیرکونیوم با خلوص ۹۳ درصد مطابق با استانداردهای جهانی شد؛ و با تولید آن تمامی راکتورهای هسته‌ای قدرتی و تحقیقاتی کشور از واردات فلز زیرکونیوم، بی‌نیاز شدند.

**نمودار چرخه سوخت هسته‌ای ایران**

خلاصه مطالب بخش دوم مقاله، به صورت نمودار زیر تقدیم خوانندگان عزیز می‌شود. لازم به ذکر است که جمهوری اسلامی ایران در بحث بازفرآوری زباله‌های اتمی، فعالیتی نداشته است. آخرین گزارش بازرسان بین‌المللی انرژی اتمی نیز عدم فعالیت ایران را در این خصوص تأیید می‌کند.




**نمودار چرخه سوخت هسته‌ای ایران**

## نتیجه

۱. کشف انرژی هسته‌ای، یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین کشفیات بشر، در طول تاریخ بوده است.

۲. انرژی هسته‌ای یکی از خروجی‌های صنعت هسته‌ای است که از جهت اقتصادی قابل مقایسه با سایر انرژی‌ها نیست؛ به همین دلیل در رأس برنامه‌های سیاسی و اقتصادی کشورها قرار گرفته است.

۳. دستیابی به انرژی هسته‌ای، باعث تثبیت اقتدار سیاسی، ایجاد قدرت اقتصادی وبرخورداری از دیپلماسی تأثیرگذار کشورهای صاحب این تکنولوژی بوده و سهم بسزایی در امنیت ملی کشورها دارد.

۴. در آغازین دهه قرن بیست و یکم، اورانیوم به یک قدرت و عالی‌ترین تعیین کننده پیشرفت سلطه و استیلا در جهان تبدیل شده است.

۵. ساخت رآکتورهای هسته‌ای به منظور تولید برق، از مهم‌ترین منابع استفاده صلح‌جویانه از انرژی اتمی است.

۶. راه‌اندازی نیروگاههای اتمی، شرایط سلطه از پیش تعیین شده راکه پس از پایان جنگ سرد و شکل‌گیری روابط بین‌الملل به وجود آمده بود، به چالش کشانده است.

۷. تکنولوژی هسته‌ای، به خاطر نقش ویژه آن در تولید و تأمین انرژی و استفاده گسترده آن در مقاصد صلح‌جویانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۸. نیروگاههای هسته‌ای علاوه بر صرفه‌جویی دهها میلیون بشکه نفت در سال، از انتشار هزاران تُن گاز و مواد آلاینده محیط زیست ممانعت می‌کند.

۹. سوخت هسته‌ای مصرف شده در راکتورهای اتمی، حاوی تشعشعات بسیار خطرناک رادیو اکتیو است و لازم است مهار شود.

۱۰. بهترین فناوری در مهار زباله‌های اتمی سطح بالا و خطرناک دفن در اعماق زمین می‌باشد.

۱۱. امروزه کشورهای محدودی در جهان به فناوری چرخه سوخت هسته‌ای دست پیدا کرده‌اند.

۱۲. کشور ایران بیش از ۴۰ سال سابقه تلاش در برنامه‌های هسته‌ای دارد؛ و سالها پیش از انقلاب برای رسیدن به این فناوری، اقدامات خود را به کمک ایالات متحده امریکا آغاز کرد که با پیروزی انقلاب اسلامی متوقف شد.

۱۳. جمهوری اسلامی ایران با تکیه بر نیروهای داخلی پس از سالها تلاش و فعالیت موفق به تکمیل چرخه سوخت هسته‌ای و رسیدن به «نقطه بازگشت‌ناپذیر» در برنامه‌ها و اهداف صلح‌جویانه هسته‌ای خود شده است.

۱۴. جمهوری اسلامی ایران بزرگ‌ترین دارندهٔ ذخایر اورانیوم در منطقه خاور میانه می‌باشد.

**جمهوری اسلامی ایران در ۲۰ فروردین ماه ۸۶ با ورود به مرحله صنعتی غنی‌سازی اورانیوم و تولید انبوه ماشین‌های سانتریفیوژ، به جمع گروه کشورهای تولید کننده صنعتی سوخت هسته‌ای پیوست و تحقق و شکوفایی فن‌آوری هسته‌ای را جشن گرفت.**

## پی‌نوشتها:

۱. اصطلاحات رایج در بحث هسته‌ای، همشهری دیپلماتیک، ۲۰ / ۶ / ۱۳۸۳.
۲. من اورانیوم هستم، امراللهی، رضا (۱۳۸۴)، نشر فاقد، ص ۱۵.
۳. همان، ص ۱۹.
۴. اورانیوم از پیدایش تا غنی‌سازی، غفاریان، بهرام، نشریه خراسان، ۱۳ / ۸ / ۱۳۸۳.
۵. انرژی هسته‌ای در جهان، طاهری، علیرضا، همشهری دیپلماتیک، ۲۰ / ۷ / ۱۳۸۲.
۶. همان.
۷. چرخه سوخت هسته‌ای، شاه‌محمدی، عزیز، همشهری دیپلماتیک، ۲۰ / ۶ / ۱۳۸۳.
۸. بهره‌برداری صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای، بشارتی، علی‌محمد، همبستگی، ۵ / ۸ / ۱۳۸۲.
۹. همان.
۱۰. فناوری هسته‌ای و صلح، عباسپور تهرانی، علی، رسالت، ۵ / ۲ / ۱۳۸۳.
۱۱. همان.
۱۲. ایران و دانش هسته‌ای، معاونت سیاسی نمایندگی ولی فقیه در نیروی هوایی سپاه (۱۳۸۵)، ص ۶۵.
۱۳. انرژی هسته‌ای، نشریه آبادی، ۲۶ / ۸ / ۱۳۸۲.
۱۴. انرژی هسته‌ای، ضرورتها و سیاستها، یوسف‌پور، بابک، اقتصاد انرژی، شماره ۴۰ـ۳۹، ص ۳۸.
۱۵. اتم در خدمت صلح، خاتمی‌فر، عبدالله، شرق، ۲۸ / ۸ / ۱۳۸۲.
۱۶. بازدارندگی هسته‌ای، فتاحی، حمیدرضا، شرق، ۱۱ / ۸ / ۱۳۸۲.
۱۷. روند هسته‌ای ایران از آغاز تاکنون، فصلنامه روز، اداره سیاسی نمایندگی ولی فقیه در سپاه، تابستان ۱۳۸۳، ص ۵۰ـ۳۵.
۱۸. همان.
۱۹. ایران هسته‌ای، روندها و چالش‌ها، باقری، سیامک، (۱۳۸۴) اداره سیاسی، ستاد نمایندگی ولی فقیه در سپاه، ص ۱۸۲.

۲۰. باقری، همان.
۲۱. غنی‌سازی اورانیوم، عظیمی، شیدا، روزنامه شرق، ۱۵ / ۸ / ۱۳۸۴.
۲۲. همان.
۲۳. پرسش و پاسخ درباره، مسایل سیاسی روز، اداره سیاسی نمایندگی ولی فقیه در سپاه (۱۳۸۵)، صص ۳۵ ـ ۳۰.
۲۴. باقری، همان.
۲۵. نگاهی به تاریخچه انرژی هسته‌ای و جایگاه آن، کیانی، حسن، جهان اقتصاد، ۱۰ / ۱۲ / ۸۲، ص ۳۵.
۲۶. آشنایی با مرکز تحقیقات هسته‌ای ایران، سایت سازمان انرژی اتمی، (www.aeoi.org.ir)، تاریخ ۱۰ / ۱۰ / ۱۳۸۵.
۲۷. اداره سیاسی، همان، ص ۳۲.
۲۸. همان، ص ۳۵.
۲۹. کیک زرد چیست، موسوی، سید رسول، همشهری دیپلماتیک ۱۲ / ۹ / ۱۳۸۴.
۳۰. با زباله‌های هسته‌ای چه کنیم، عبدالعظیمی، یاسان، شرق، ۱۰ / ۸ / ۱۳۸۴.
۳۱. پرونده هسته‌ای ایران و نگرانی محافل بین‌المللی، راوندی، رامیش، همشهری ۹ / ۱۰ / ۱۳۸۴.
۳۲. همان.
۳۳. کیائی، حسن، همان، ص ۳۹.
۳۴. یوسف‌پور، همان، ص ۴۲.
۳۵. عبدالعظیمی، همان.
۳۶. هفته‌نامه صبح صادق، ۲۹ / ۳ / ۱۳۸۵.
۳۷. همان.
۳۸. برنامه اتمی ایران، کیهان، ۱۶ / ۳ / ۱۳۸۳.
۳۹. ۳۹ سال تلاش اتمی ایران سایت بازتاب، ۱۴ / ۱۱ / ۱۳۸۳.
۴۰. نیروگاه اتمی بوشهر و چشم‌انداز آینده، صادقیان، غلامرضا، کیهان ۲۴ / ۱۳۸۳.
۴۱. سیاست هسته‌ای ایران، لاریجانی، علی، همشهری دیپلماتیک، ۱۲ / ۹ / ۱۳۸۴.
۴۲.
۴۳. کیائی، همان.
۴۴. سازمان انرژی هسته‌ای ایران، ماهنامه انرژی هسته‌ای، شماره ۱۲، ص ۳۷.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی