

غنى سازی در جهان



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

فهرست

۱- چرخه سوخت هسته‌ای	۲
۲- صنعت غنی سازی در جهان	۴
۳-۱- تاریخچه غنی سازی در جهان	۵
۳-۲- کاربردها و لزوم غنی سازی	۶
۳-۳-۱- روش‌های مورد استفاده در غنی‌سازی اورانیوم	۷
۳-۳-۲- کشورهای فعال در زمینه جداسازی به روش آبیودینامیکی	۸
۳-۳-۳-۱- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی	۸
۳-۳-۳-۲- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی به روش تبادل یونی و شیمیابی	۹
۳-۳-۳-۳-۱- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی توسط لیزر	۱۰
۳-۳-۳-۲- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی توسط الکترومغناطیس	۱۱
۳-۳-۴-۱- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی توسط پلاسما	۱۱
۴-۱- روش‌های متداول غنی‌سازی در مقیاس صنعتی	۱۲
۴-۲- روش سانتریفیوژ	۱۵
۴-۳-۱- بررسی سازمان‌ها و کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی اورانیوم	۱۶
۴-۳-۲- مراجع	۲۲

۱- چرخه سوخت هسته‌ای

اساس بیانیه چشم‌انداز توسعه چرخه سوخت هسته‌ای کشور:

"در راستای سند چشم‌انداز ۲۰ ساله، ایران کشوری توسعه یافته (پیشرفت) و خوداتکا در دانش، فناوری و صنعت چرخه سوخت هسته‌ای، برخوردار از جایگاه رقابتی در مقیاس جهانی، تأمین‌کننده سوخت موردنیاز راکتورهای هسته‌ای کشور و توانمند در صادرات محصولات و خدمات مرتبط در چارچوب قوانین، مقررات و استانداردهای ملی و بین‌المللی است".

چشم‌انداز بخش غنی سازی اورانیوم در چرخه سوخت هسته‌ای

بخش غنی‌سازی اورانیوم در چشم‌انداز چرخه سوخت هسته‌ای کشور، به عنوان بخش کلیدی، با دستیابی به فناوری‌های پیشرفت، هگزافلوراید اورانیوم غنی شده مورد نیاز انواع سوخت‌های هسته‌ای کشور را در مقیاس صنعتی-اقتصادی تولید می‌نماید.

مأموریت بخش غنی سازی اورانیوم در چرخه سوخت هسته‌ای

بخش غنی سازی اورانیوم با دستیابی به دانش فنی و فناوری‌های پیشرفت و بهره‌گیری از امکانات ملی و بین‌المللی، هگزافلوراید اورانیوم غنی شده مورد نیاز سوخت راکتورهای هسته‌ای کشور را تولید می‌نماید. این بخش با تأکید بر تحقیق و توسعه و منابع انسانی توانمند ضمن صیانت از ارزش‌های محوری به رشد و بالندگی دست یافته و به اقتدار ملی کمک می‌نماید.

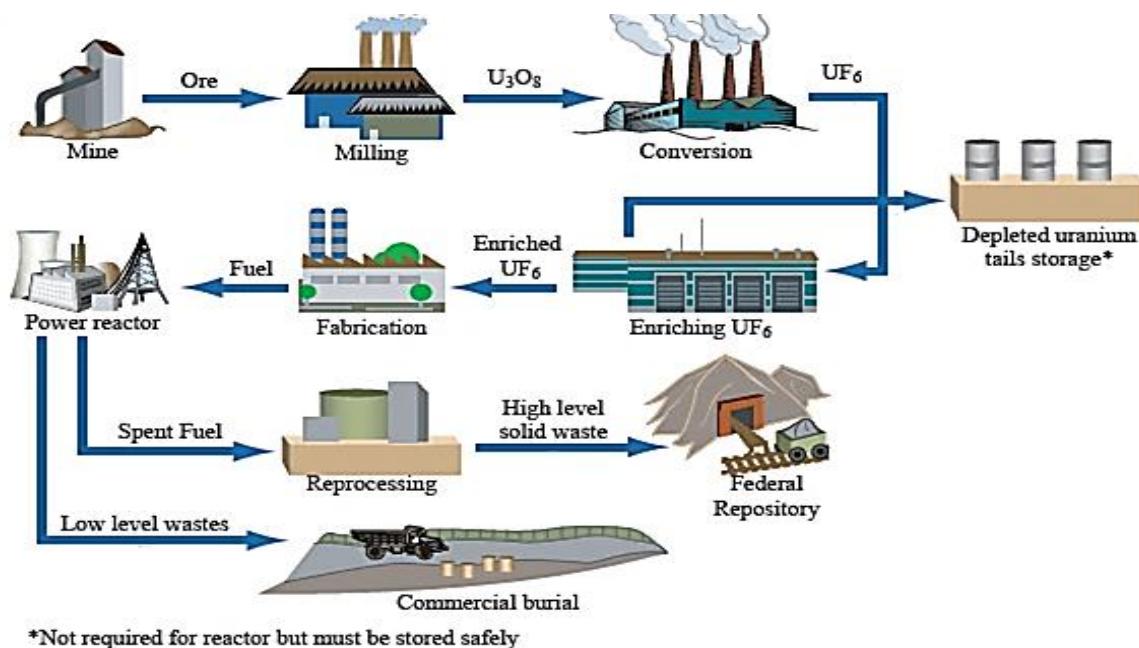
اولین گام در چرخه سوخت، اکتشاف کانسارهای اورانیوم و برآورد مقدار اورانیوم موجود در آن‌ها و تعیین هزینه استخراج است، چون عیار اورانیوم در سنگ معدن اغلب در گستره چند صد گرم در تن می‌باشد. پس از انجام مطالعات امکان سنجی و اثبات صرفه اقتصادی، کانسار مورد نظر معدن تلقی شده و عملیات استخراج سنگ معدن و سپس استحصال و تغليظ توسط تجهیزات کانه آرایی کانسنگ اورانیوم‌دار انجام می‌گیرد.

فرایندهای تغليظ و فراوری اورانیوم مرحله بعدی عملیات در چرخه سوخت است که شامل فروشوبی، رسوب گیری، استخراج توسط حلال و تبادل یون می‌باشد. در نتیجه عملیات کانه آرایی و تغليظ (فراوری) کانسنگ‌های اورانیوم‌دار، ترکیب سدیم دی اورانات یا آمونیوم دی اورانات بدست می‌آید که کیک زرد نامیده شده و در نهایت به U_3O_8 تبدیل می‌شود. محصول U_3O_8 به منظور انجام سایر عملیات به کارخانه تخلیص و تبدیل اورانیوم منتقل می‌گردد.

در کارخانه تبدیل اورانیوم، ناخالصی شیمیایی باقی مانده در کیک زرد حذف شده و اورانیوم تخلیص شده به ترکیب شیمیایی مورد نظر برای قسمت بعدی چرخه سوخت تبدیل می‌شود. پس از آن بسته به نیاز سوخت به غنی سازی، فرایندهای شیمیایی مشخص می‌شوند. در صورتی که سوخت مورد نظر به غنی سازی نیاز داشته باشد، تنها ترکیب مناسب در مقیاس صنعتی هگزا فلوراید اورانیوم است که برای تولید آن باید فرایندهای واکنش دی اکسید اورانیوم با اسید فلوریدریک و تهیه تترا فلوراید اورانیوم و سپس واکنش با گاز فلوئور و تهیه هگزا فلوراید اورانیوم در شرایط خاص انجام شود. محصول غنی شده با حفظ نکات ایمنی به کارخانه تولید سوخت فرستاده می‌شود. واحد مورد استفاده در غنی سازی، واحد کار جداسازی نام دارد. این کمیت با وزن، درجه غنای ماده اولیه و ماده غنی شده و ماده پسمان ارتباط دارد. ظرفیت جداسازی یک واحد تولیدی با کیلوگرم U SWU در سال و مصرف انرژی آن با $kWh/kgSWU$ نشان داده می‌شود.

در کارخانه تولید سوخت ابتدا هگزا فلوراید اورانیوم به صورت ترکیب مورد نظر در آمده و سپس سایر مراحل تولید سوخت بر روی آن انجام می‌شود. برای راکتورهای آب سبک مانند راکتور بوشهر که از دی اکسید اورانیوم به عنوان سوخت استفاده می‌کنند، ابتدا تبدیل به دی اکسید اورانیوم و تهیه پودر و متعاقب آن تهیه قرص، پرس آن، سینتر کردن و پرداخت قرص انجام شده و سپس قرص‌ها به همراه سایر لوازم مورد نیاز مانند سرپوش پایین، قرص آلومین، فنر و سرپوش بالایی در داخل میله سوخت قرار داده شده و بعد از تزریق گاز هلیوم و جوشکاری در آرایش مجتمع سوخت قرار گرفته و جهت بهره برداری به داخل راکتور منتقل می‌شود.

همان‌گونه که ذکر شد، دست‌یابی به سوخت هسته‌ای مستلزم استخراج اورانیوم، تبدیل و فرآوری اورانیوم، غنی‌سازی و تولید میله‌های سوخت جهت استفاده در راکتورهای هسته‌ای خواهد بود. تا این مرحله از چرخه را نیمه اول چرخه سوخت هسته‌ای^۱ می‌نامند. نیمه دوم چرخه سوخت^۲ مدیریت پسمان‌های پرتوزای حاصل از بهره‌برداری تمام مراحل چرخه سوخت، برچیدن تأسیسات هسته‌ای، انبارداری، باز فرآوری، نگهداری و یا دفن سوخت‌های مصرف شده را شامل می‌گردد. هر یک از مراحل چرخه سوخت، پسمان‌های خاص آن مرحله را داراست که از نظر میزان اکتیویته و حجم تولید شده متفاوت است. شکل ۱ به صورت شماتیک چرخه سوخت هسته‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک کلی از چرخه سوخت هسته‌ای

۲- صنعت غنی‌سازی در جهان

در راکتورهای شکافت هسته‌ای از واکنش شکافت هسته‌ای برای تولید انرژی گرمایی استفاده می‌شود. حرارت تولید شده توسط مواد خنک کننده جذب شده و با کمک توربین به انرژی مکانیکی و در نهایت توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. به علت خواصی که اورانیوم یا ترکیباتی از این فلز در جذب نوترون و شکافت هسته‌ای دارد، اغلب به عنوان سوخت راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ Front end

² -Back End

ایزوتوپ U^{235} مهمترین ایزوتوپ شکافت‌پذیر اورانیوم بوده و چون غلظت آن در اورانیوم طبیعی کم است، عملیات غنی‌سازی بر روی اورانیوم صورت می‌گیرد. از آنجایی که سوخت اکثر راکتورهای شکافت هسته‌ای اورانیوم غنی شده می‌باشد، غنی‌سازی اورانیوم یکی از قسمت‌های اصلی و کلیدی چرخه سوخت به حساب می‌آید.

اورانیوم غنی شده ماده‌ای استراتژیک است که عمل غنی‌سازی آن نیز نیاز به فناوری و دانش فنی پیچیده‌ای دارد. ساخت تجهیزات مورد نیاز این صنعت از فناوری بسیار بالائی برخوردار است بطوریکه هم اکنون این اطلاعات فقط در انحصار تعداد محدودی از کشورها بوده و انتقال دانش فنی به سایر کشورها صورت نمی‌پذیرد.

۲-۱- تاریخچه غنی‌سازی در جهان

پس از کشف رادیواکتیو، در اوایل قرن بیستم ایزوتوپ‌ها نیز شناسایی شدند. کلمه ایزوتوپ نخستین بار در سال ۱۹۱۳ در انگلستان توسط سادی مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۱۹، استون و لیندمان چهار روش را برای جداسازی ایزوتوپ‌ها پیشنهاد نمودند: تقطیر، دیفیوژن، گراویتی (جادبه یا نیروی گریز از مرکز) و روش‌های الکترومغناطیسی.

بین سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ تحقیقات آزمایشگاهی بر روی روش‌های مختلف جداسازی ایزوتوپ‌ها صورت گرفت. روش دیفیوژن گازی اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط استون برای جداسازی ایزوتوپ‌های نئون استفاده گردید. تحقیقات آزمایشگاهی بر روی دیفیوژن گرمایی اولین بار در سال ۱۹۳۰ شروع شد و اولین برج دیفیوژن گرمایی در سال ۱۹۳۸ در آلمان ساخته شد. همچنین اولین سانتریفیوژ گازی خلاء در سال ۱۹۳۴ ساخته شد.

تاریخچه غنی‌سازی اورانیوم به جنگ جهانی دوم بر می‌گردد که اورانیوم غنی شده (باغنای بیش از ۹۰٪) برای ساخت سلاح اتمی مورد نیاز بود. در آن زمان کشورهای آمریکا، انگلیس و آلمان تلاش گسترده‌ای را برای دست‌یابی به روش مناسب برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم در جهت ساخت بمب اتمی آغاز کردند.

اورانیوم به صورتی که در طبیعت یافت می‌شود، اورانیوم طبیعی نامیده شده و عمدهاً از سه ایزوتوپ U^{238} و U^{235} و U^{234} تشکیل شده است. در جدول ۱ غلظت ایزوتوپ‌های مختلف اورانیوم در سنگ معدن اورانیوم و همچنین مقدار پروتون و نوترون و نیمه عمر آن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات ایزوتوپ‌های اورانیوم

نیمه عمر (سال)	تعداد نوترون‌ها	تعداد پروتون‌ها	درصد فراوانی ایزوتوپ در اورانیوم طبیعی	نام ایزوتوپ
۴/۴۶ میلیارد	۱۴۶	۹۲	۹۹/۲۸۴	۲۳۸ اورانیوم
۷۰۴ میلیون	۱۴۳	۹۲	۰/۷۱۱	۲۳۵ اورانیوم
۲۴۵۰۰	۱۴۲	۹۲	۰/۰۰۵۵	۲۳۴ اورانیوم

۲-۲-کاربردها و لزوم غنی سازی

راکتورهای آب سبک مورد استفاده در نیروگاههای هسته‌ای از قبیل راکتورهای آب تحت فشار و راکتورهای آب جوشان^۱ نیاز به اورانیوم با غنای ۲-۵٪ ^۲U²³⁵ دارند که به آن ۲ LEU نیز گفته می‌شود. هرچه میزان غنی‌سازی بیشتر باشد سایز راکتور مورد استفاده کوچکتر خواهد بود.

در سیستم حمل و نقل کشتی‌ها از اورانیوم با غنای بیش از ۱۰٪ ^۲U²³⁵ استفاده می‌شود. زیردریایی‌های اتمی، ماهواره‌ها و راکتورهای تحقیقاتی کوچک عمدتاً از اورانیوم با غلظت ۹٪ ^۲U²³⁵ و حتی بالاتر استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است پس از پیشنهاد ایالت متحده در سال ۱۹۷۸ در قالب برنامه^۳ RERTR مبنی بر تغییر سوت راکتورهای تحقیقاتی از HEU به LEU (سوخت با غنای کمتر از ۲۰٪) و حمایت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی از این طرح، در حال حاضر تنها تعداد محدودی از راکتورهای تحقیقاتی با غنای بیش از ۲۰٪ در حال کار می‌باشند.

از آنجایی که جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم با روش‌های شیمیایی به دلیل محدودیت تکنولوژی یا اقتصادی نبودن این روش‌ها متداول نمی‌باشد، جداسازی از طریق روش‌های فیزیکی صورت می‌گیرد. اکثر روش‌های جداسازی بر اساس اختلاف کم در جرم دو ایزوتوپ اورانیوم در مولکول‌های UF₆ استوار است. بر اساس تئوری سینتیک گازها هر مولکول یک انرژی جنبشی میانگین دارد، بنابراین مولکول‌های سبک‌تر سرعت بیشتری خواهند داشت و مولکول‌های سنگین‌تر سرعت کمتر. جداسازی ایزوتوپی در روش‌های دیگر غنی‌سازی بر اساس اختلاف در جذب اشعه لیزر توسط سطوح انرژی از یک نوکلئید خاص یا تفاوت کم در واکنش‌های شیمیایی تعادلی آن‌ها صورت می‌پذیرد.

¹ PWR ,BWR

² Low Enriched Uranium

³ Reduced Enrichment For Research and Test Reactors

در آلمان از سال ۱۹۴۱ روش سانتریفیوژ مورد توجه قرار گرفت و در انگلیس روش دیفیوژن گازی در مقیاس وسیع استفاده شد. از اواخر سال ۱۹۴۳ آمریکا و انگلیس با همکاری مشترک یکدیگر کارخانه‌ای را در آمریکا پایه‌گذاری نمودند.

در آمریکا و تحت پروژه منهتن چهار روش دیفیوژن گازی، دیفیوژن گرمایی، الکترومغناطیس و سانتریفیوژ گازی مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، در سال ۱۹۴۴ روش سانتریفیوژ به دلیل معایب تکنیکی که در آن زمان داشت، متوقف گردید اما آزمایش بر روی سانتریفیوژها در جهت بهبود مواد مورد استفاده در ساخت

و همچنین بالا بردن سرعت دوران آن‌ها ادامه یافت و در نتیجه تحقیقات صورت گرفته، از سال ۱۹۷۰ سانتریفیوژها توانستند با روش دیفیوژن گازی رقابت کرده و رفته رفته جایگزین این روش گردند.

۳-۲-روش‌های مورد استفاده در غنی‌سازی اورانیوم

فرآیندهای مختلفی برای غنی‌سازی اورانیوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند که مهمترین آن‌ها عبارتند از: دیفیوژن (پخش) گازی، سانتریفیوژ، جداسازی ایزوتوب‌ها توسط لیزر، تبادل یونی و غیره. جدول ۲ فرآیندهای مختلف غنی‌سازی اورانیوم که در مقیاس صنعتی یا آزمایشگاهی استفاده شده‌اند را نشان می‌دهد.

جدول ۲: روش‌های مورد استفاده در غنی‌سازی اورانیوم

مثال	مبناي جداسازی
سانتریفیوژ گازی	گرادیان فشار
نازل جداسازی	
فرآیند یوکور ^۱ آفریقای جنوبی	
دیفیوژن گازی	نفوذ
دیفیوژن جرمی	
دیفیوژن گرمایی	
استخراج با حلال	تبادل شیمیایی
تبادل یونی	
جداسازی ایزوتوب‌ها توسط لیزر بخار اتمی ^۲	برانگیختگی نوری
جداسازی ایزوتوب‌ها توسط لیزر مولکولی ^۳	
جداسازی ایزوتوب‌ها توسط تحریک با لیزر ^۴	
جداسازی ایزوتوب‌ها توسط الکترومغناطیس ^۵	الکترومغناطیس
جداسازی ایزوتوب‌ها توسط پلاسمای ^۶	

¹ UCOR

² Atomic Vapor Laser Isotope Separation (AVLIS)

³ Molecular Laser Isotope Separation (MLIS)

⁴ Separation of Isotopes by Laser Excitation (SILEX)

⁵ Electro Magnetic Isotope Separation (EMIS)

⁶ Plasma Separation Process (PSP)

۲-۳-۱- کشورهای فعال در زمینه جداسازی به روش آیرودینامیکی

- آلمان -

دانشمندان آلمانی تحقیق بر روی این روش را در دهه ۱۹۵۰ آغاز نمودند. در سال ۱۹۶۷ یک آزمایشگاه تحقیقاتی بر روی نازل جداسازی شروع به کار نمود. در سال ۱۹۷۶ دو کشور آلمان و بروزیل موافقتنامه‌ای را برای کار مشترک بر روی این روش امضاء نمودند و در همین سال اولین کارخانه در مقیاس نیمه‌صنعتی به طور موفقیت‌آمیز شروع به کار نمود، که این کارخانه در سال ۱۹۸۰ به بروزیل منتقل گردید. سال ۱۹۸۹ کلیه تحقیقات بر روی این روش در کشور آلمان متوقف گردید.

- بروزیل

پس از امضا موقutaname بین بروزیل و آلمان، کشور بروزیل شروع به برنامه‌ریزی برای ساخت اولین کارخانه غنی‌سازی خود نمود. این کشور پس از سال ۱۹۸۰ که کارخانه نیمه‌صنعتی آلمانی به این کشور منتقل گردید شروع به تکمیل طرح نمود، تا سال ۱۹۸۵ که موفق به تکمیل آن گردید. اما در سال ۱۹۹۴ به دلیل هزینه بالای تولید و مسائل تکنیکی بوجود آمده این کارخانه تعطیل گردید.

- آفریقای جنوبی -

در کشور آفریقای جنوبی تحقیقات بر روی روش جداسازی آیرودینامیکی در سال ۱۹۶۰ آغاز گردید. در سال ۱۹۶۷ یک کارخانه در مقیاس آزمایشگاهی راهاندازی گردید و در سال ۱۹۷۴ ساخت کارخانه‌ای در مقیاس نیمه‌صنعتی به پایان رسید. این کارخانه به دلیل مسائل تکنیکی موجود در سال ۱۹۷۹ متوقف گردید و پس از بازسازی و رفع نواقص در سال ۱۹۸۱ مجدداً شروع به کار نمود. در سال ۱۹۸۸ اولین طرح صنعتی راهاندازی گردید. از آنجایی که این کارخانه به دلیل مصرف انرژی بالای آن قادر به رقابت با بازار جهانی نبود در سال ۱۹۹۵ متوقف گردید.

۲-۳-۲- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی

- ایالات متحده آمریکا -

کشور آمریکا تا سال ۱۹۵۴ سه کارخانه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی را احداث نمود. تا سال ۱۹۷۶ این کارخانه‌ها بیش از ۹۰٪ اورانیوم مورد نیاز غرب را تأمین می‌نمودند. به دلیل مسائل و مشکلات ذکر شده، در حال حاضر فقط یک کارخانه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی در آمریکا مشغول به کار می‌باشد.

- اتحاد جماهیر شوروی سابق

در کشور شوروی، ساخت اولین کارخانه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی در سال ۱۹۴۶ آغاز گردید. سه کارخانه دیگر نیز بین سال‌های ۱۹۴۹ و ۱۹۶۴ ساخته شدند. اما به دلیل مصرف انرژی بالای این کارخانه‌ها و ساخت سانتریفیوژهای با راندمان بالاتر، غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی در سال ۱۹۹۱ در این کشور متوقف گردید.

- انگلیس

کشور انگلیس ساخت اولین کارخانه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی خود را در سال ۱۹۵۰ آغاز نمود و در سال ۱۹۵۲ موفق به تولید LEU گردید. این کارخانه نیز به دلیل مسائل و مشکلات موجود در سال ۱۹۸۲ از سرویس خارج گردید.

- چین

کشور چین تجهیزات اولیه مورد نیاز برای غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی را از شوروی سابق خریداری نمود. این کشور ساخت اولین کارخانه خود را در سال ۱۹۵۸ آغاز نموده و تا سال ۱۹۶۱ آن را به اتمام رسانید.

- فرانسه

ساخت اولین کارخانه دیفیوژن گازی فرانسوی برای مقاصد نظامی در سال ۱۹۶۰ آغاز گردید و فاز نهایی آن در سال ۱۹۶۷ به اتمام رسید. اولین تولید LEU در این کارخانه در سال ۱۹۶۴ صورت گرفت. کشور فرانسه اولین کارخانه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی در مقیاس صنعتی خود را در سال ۱۹۷۴ آغاز نموده و تا سال ۱۹۷۹ آن را به اتمام رسانید.

- آرژانتین

کشور آرژانتین ساخت اولین کارخانه غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی خود را در سال ۱۹۷۹ به صورت مخفیانه آغاز نمود. این کارخانه در سال ۱۹۸۷ آغاز به کار نمود. پس از یک بار توقف و انجام تعمیرات کلی در سال ۱۹۹۴، این کارخانه نهایتاً در سال ۱۹۹۷ به طور کامل از سرویس خارج گردید اما آرژانتین واحد غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی خود را پس از بیش از ۲۰ سال توقف، در سال ۲۰۱۱ مجدداً راهاندازی کرده است.

۳-۳-۲- کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی به روش تبادل یونی و شیمیایی

- فرانسه

در کشور فرانسه تحقیقات بر روی این روش در سال ۱۹۶۸ پس از کشف یک روش شیمیایی جدید برای غنی‌سازی اورانیوم توسط دانشمندان گسترش یافت و تا سال ۱۹۷۴ دو کارخانه غنی‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی راهاندازی شدند. در سال ۱۹۸۴ نیز اولین

کارخانه نیمه صنعتی راهاندازی گردید. اما در سال ۱۹۸۷ فرانسه تصمیم به توقف تحقیقات بر روی این روش گرفت و تحقیقات بر روی غنیسازی توسط لیزر را آغاز نمود.

- ژاپن -

ژاپن تحقیق بر روی این روش را در سال ۱۹۷۲ آغاز نمود و در سال ۱۹۷۹ اولین کارخانه خود را در مقیاس کوچک تکمیل کرده و در سال ۱۹۸۲ موفق شد اورانیوم را تا ۰.۲٪ غنی نماید. در سال ۱۹۸۴ با بمبود این روش آنها توانستند در یک کارخانه بزرگتر، اورانیوم را تا ۳٪ غنی نمایند. ساخت کارخانه‌ای در مقیاس صنعتی در دستور کار آنها قرار داشت، اما مقامات ژاپنی در سال ۱۹۹۲ تصمیم به توقف این روش گرفتند.

- آمریکا -

علاوه بر کشورهای فرانسه و ژاپن، این روش در کشور آمریکا نیز مورد استفاده قرار گرفت. در این کشور نیز از فرآیند استخراج مایع-مایع و تبادل بین محلول‌های UF_6 و $NOUF_6$ برای غنیسازی اورانیوم استفاده گردید.

- عراق -

کشور عراق اطلاعات مربوط به دستگاه‌های فرانسوی و ژاپنی را مخفیانه جمع‌آوری نمود و در سال ۱۹۹۱ ادعا نمود که به هر دو فناوری دست یافته است، اما هرگز موفق به غنیسازی توسط این روش نگردید.

۴-۳-۲- کشورهای فعال در زمینه غنیسازی توسط لیزر

در جدول لیست کشورهای فعال در زمینه این فناوری آورده شده است.

جدول ۳: لیست کشورهای فعال در زمینه فناوری غنیسازی با لیزر

نام کشور	فن آوری مورد استفاده	دوره زمانی کار بر روی این روش	علت توقف کار
استرالیا	SILEX	۱۹۸۲-اکنون	---
انگلیس	MLIS	۱۹۹۴-۱۹۸۳	توقف بودجه
فرانسه	SILVA	۱۹۹۶-۱۹۸۴	تصمیم به کار بر روی MLIS
فرانسه/آفریقای جنوبی	MLIS	۱۹۹۷-۱۹۹۶	کناره‌گیری کشور فرانسه
ژاپن	AVLIS	۲۰۰۱-۱۹۸۲	لغو شدن پروژه توسط وزارت اقتصاد ژاپن
ایالات متحده آمریکا	AVLIS	۱۹۹۹-۱۹۸۴	توقف بودجه
ایالات متحده آمریکا / استرالیا	SILEX	۱۹۹۷-اکنون	---

۳-۲-۵- کشورهای فعال در زمینه غنیسازی توسط الکترومغناطیس

- ایالات متحده آمریکا

این روش در کشور آمریکا در سال ۱۹۴۴ برای تولید اولین بمب اتم مورد استفاده قرار گرفت. در پروژه اکریج^۱ دو مدل از کالوترون‌ها برای تولید HEU مورد استفاده قرار گرفتند، نوع اول یا α ، اورانیومی که ابتدا توسط فرآیند دیفیوژن گازی تا $8\% \text{U}^{235}$ غنی شده بود را تا $90\% \text{U}^{235}$ غنیسازی می‌کرد و نوع دوم یا β ، محصول نوع α را تا حدود $20\% \text{U}^{235}$ غنیسازی می‌نمود. این روش پس از در دستور کار قرار گرفتن دستگاه‌های دیفیوژن گازی متوقف گردید.

- اتحاد جماهیر شوروی

کشور شوروی اولین کالوترون خود را در سال ۱۹۳۴ برای تولید Pu^{239} ساخت و در سال ۱۹۴۶ شروع به ساخت کالوترون‌های شبیه با کالوترون‌های ساخت آمریکا نمود که موفقیت آمیز نبودند. چون ظرفیت غنیسازی بسیار پائینی داشتند. پس از اینکه در سال ۱۹۵۰، شوروی اولین کارخانه دیفیوژن گازی خود را راهاندازی نمود، کار بر روی روش EMIS در این کشور متوقف گردید.

- عراق

کشور عراق تحقیقات خود را بر روی این روش در سال ۱۹۷۹ آغاز نمود و در سال ۱۹۸۲ شروع به ساخت اولین کارخانه خود نمود. در سال ۱۹۹۰ ساخت کارخانه به پایان رسید اما مسائل تکنیکی بر سر راه تولید اورانیوم غنی‌شده وجود داشت. قبل از اینکه آن‌ها بتوانند مشکلات تکنیکی بوجود آمده را رفع کنند، در سال ۱۹۹۰ این کارخانه به طور کامل نابود گردید.

۳-۲-۶- کشورهای فعال در زمیه غنیسازی توسط پلاسما

فرانسه و آمریکا دو کشوری هستند که روی این فناوری کار کرده‌اند. آمریکا تحقیقاتش را در سال ۱۹۸۲ متوقف کرد و فرانسه در سال ۱۹۹۰.

¹ OAK-Ridge

۴-۲-روش‌های متداول غنی‌سازی در مقیاس صنعتی

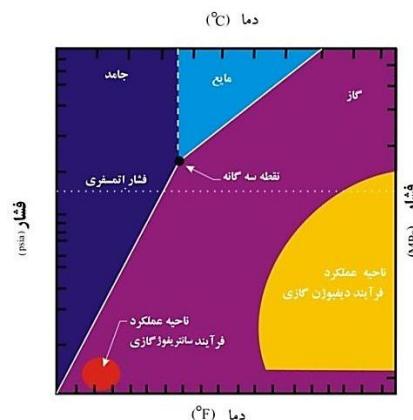
از میان روش‌های ذکر شده برای غنی‌سازی اورانیوم تنها دو روش سانتریفیوژ و دیفیوژن در مقیاس صنعتی برای تولید اورانیوم غنی شده به کار رفته اند. در هر دو فرآیند اورانیوم به صورت گاز UF_6 برای غنی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. UF_6 ماده‌ای است که در دمای اتاق به صورت جامد بوده و دارای وزن مولکولی بالاست. همان‌طور که در دیاگرام فازی UF_6 (شکل) مشاهده می‌شود دمای تصحیح UF_6 زیر نقطه سه گانه^۱ آن است. دمای تصحیح دمایی است که در آن فشار بخار جامد برابر با فشار اتمسفر می‌شود. زمانی که UF_6 در فشار اتمسفر در حالت تعادلی است UF_6 جامد بدون عبور از فاز مایع مستقیماً به بخار تبدیل می‌شود (تصحیح). برای اینکه UF_6 مایع داشته باشیم به فشاری بالاتر از 15 MPa و دمای بالاتر از 65°C نیاز داریم. خصوصیات فیزیکی و شرایط تغییر فاز UF_6 در جدول و جدول آورده شده است.

جدول ۴: خصوصیات فیزیکی و شرایط تغییر فاز UF_6

وضعیت فیزیکی	شکل ظاهری	دانسیته
جامد	سفید	20°C در $5/0.9 \text{ g/cm}^3$
مایع	شفاف	100°C در $3/4 \text{ g/cm}^3$
گاز	بی‌رنگ	

جدول ۵: شرایط تغییر فاز UF_6

نقاطه تصحیح	$56/4^\circ\text{C}$ در فشار 101 مگاپاسکال
نقاطه سه گانه	$64/0.2^\circ\text{C}$ در فشار 152 مگاپاسکال
نقاطه بحرانی	$230/2^\circ\text{C}$ در فشار $4/5 \text{ مگاپاسکال}$



شکل ۲: دیاگرام فازی UF_6

در جدول نتایج مقایسه دو روش سانتریفیوژ و دیفیوژن گازی با یکدیگر ذکر شده است.

¹ Triple point

جدول ۶: مقایسه روش‌های سانتریفیوژ و دیفیوژن گازی

سانتریفیوژ گازی	دیفیوژن گازی	ویژگی
زیاد	کم	میزان غنی‌سازی توسط یک مرحله
کم	زیاد	میزان جریان موجود در یک مرحله
کم	متوسط	فشل فرآیند
کم	زیاد	موجودی مواد در داخل آشlar
کم	زیاد	میزان خنک کننده مورد نیاز
کم	خیلی زیاد	توان مصرفی`
خیلی کم	زیاد	میزان روانسازهای مورد نیاز
زیاد	کم	میزان تعمیرات یا جایگزینی تجهیزات
زیاد	کم	پرسنل مورد نیاز

نتایج زیر پس از بررسی و مقایسه دو روش سانتریفیوژ و دیفیوژن گازی به دست آمده است:

۱- مزیت عمده فرآیند سانتریفیوژ نسبت به دیفیوژن گازی در این است که ۵۰ تا ۲۵ kWh/SWU برابر انرژی کمتری نسبت به دیفیوژن

گازی مصرف می‌کند. انرژی مورد نیاز در فرآیند دیفیوژن گازی $3000 \sim 4000$ kWh/SWU و در فرآیند سانتریفیوژ

$100 \sim 50$ kWh/SWU می‌باشد. بنابراین اگر غنی‌سازی توسط روش دیفیوژن گازی صورت گیرد در حدود ۴~۳٪ برق

تولیدی و اگر توسط روش سانتریفیوژ انجام شود در حدود ۱٪ برق تولیدی به مصرف غنی‌سازی می‌رسد. در نتیجه به

ازای یک ظرفیت جداسازی معین انرژی مورد نیاز برای غنی‌سازی توسط سانتریفیوژ در حدود ۴٪ انرژی مصرفی توسط

روش دیفیوژن گازی است.

۲- مصرف انرژی برق در کارخانجات پخش گازی نه تنها به علت وجود تعداد زیاد کمپرسور بلکه اصطکاک گاز در لوله‌ها و

عوامل دیگر بسیار زیاد است و تقریباً ۵٪ از انرژی تولیدی توسط راکتورهای آب سبک برای واحد غنی‌سازی آن مورد نیاز

می‌باشد.

۳- هزینه برق مصرفی در کارخانه‌های دیفیوژن در حدود ۶۰٪ هزینه تولید را در برمی‌گیرد در صورتی که در کارخانه‌های

سانتریفیوژ هزینه برق مصرفی ۶~۷٪ هزینه تولید را شامل می‌شود.

۴- از معایب فرآیند سانتریفیوژ می‌توان کم بودن ظرفیت غنی‌سازی هر کدام از سانتریفیوژها را نام برد. فاکتور جداسازی در

سانتریفیوژها بستگی به اختلاف بین جرم‌های مولکولی ایزوتوپ‌ها دارد در صورتی که در دیفیوژن گازی این فاکتور

بستگی به نسبت آنها دارد.

۵- اگر چه ظرفیت یک مرحله سانتریفیوژ از یک مرحله دیفیوژن گازی کمتر است اما قابلیت آن در جداسازی ایزوتوپ‌ها

بیشتر می‌باشد.

- ۶- فضای مورد استفاده توسط تجهیزات فرآیند سانتریفیوژ از فرآیند دیفیوژن گازی کمتر است و بنابراین توسعه یک کارخانه سانتریفیوژ در فضای کمتری امکان پذیر است.
- ۷- به طور کلی کار کردن با سانتریفیوژها بسیار مشکل است چون به دلیل سرعت بالا و همچنین بزرگ بودن آنها بالанс کردن شان مشکل می‌باشد.
- ۸- ساخت و نگهداری غشاء‌های مناسب در روش دیفیوژن گازی مسئله قابل توجهی می‌باشد.
- ۹- در روش دیفیوژن گازی مقدار موجودی مواد در داخل فرآیند زیاد است. به عنوان مثال برای تولید یک مول UF_6 با غنای ۹٪ در حدود ۴۲ میلیون مول ماده باید در داخل فرآیند گردش کند.
- ۱۰- برای تولید ۱۰ میلیون SWU هزینه عملیاتی یک کارخانه سانتریفیوژ در حدود ۳۰~۲۵٪ کمتر از یک کارخانه دیفیوژن گازی می‌باشد.

شکل سایت غنی‌سازی بزرگ I Georges Besse در فرانسه با روش دیفیوژن گازی را نشان می‌دهد. چهار راکتور هسته‌ای که در قسمت جلوی تصویر مشخص است، با توان الکتریکی بیش از ۳۰۰۰ مگاوات، انرژی مورد نیاز این سایت غنی‌سازی را تامین می‌نمایند.



شکل ۳: سایت غنی‌سازی بزرگ I Georges Besse در فرانسه با روش دیفیوژن گازی

در جدول تأسیسات غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی در جهان و ظرفیت هر یک مشخص شده است.

جدول ۷: تأسیسات مهم غنی سازی به روش دیفیوژن گازی در جهان

شرکت سازنده	تأسیسات	کشور	تاریخ بهره برداری تجاری	ظرفیت اسمی (SWU/yr)	ظرفیت واقعی (SWU/yr)
USEC	Paducah GDP	امریکا	اواسط دهه ۶۰ تا ماه می ۲۰۱۳	۱۱/۳ میلیون	۶ میلیون
USEC	Portsmouth GDP	امریکا	۱۹۵۴ تا ماه می ۲۰۰۱	۷/۴ میلیون	۵/۹ میلیون
AREVA	Georges-Besse I	فرانسه	۱۹۷۹ تا اواسط ۲۰۱۲	۱۰/۸ میلیون	۸/۵ میلیون
CNNC	Lanzhou	چین	۱۹۷۷ تا ۱۹۸۰	-	۱/۱ میلیون
TENEX	ECP, UEIP, etc.	روسیه	دهه ۴۰ تا دهه ۸۰	-	-
U.K.	Capenhurst	بریتانیا	۱۹۸۲ تا ۶۰	-	۳۲۵۰۰
Argentina	Pilcaniyeu	آرژانتین	۱۹۸۳ تا ۱۹۸۹ ۲۰۱۱ تا کنون	۳ میلیون	۲۰۰۰

بهره‌برداری تجاری از آخرین واحد صنعتی غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی جهان (USEC/Paducah – 11.3 million SWU/yr) در سال ۲۰۱۳ پایان یافت (این واحد در سال ۲۰۱۴ به منظور مدیریت ذخایر، تحويل سفارشات مشتریان و ... فعالیت خواهد داشت).

همچنین آرژانتین واحد غنی‌سازی به روش دیفیوژن گازی خود را پس از بیش از ۲۰ سال توقف، در سال ۲۰۱۱ مجدداً راه‌اندازی کرد (CNEA/Pilcaniyeu-20,000 SWU/yr).

۲-۵-روش سانتریفیوژ

جداسازی ایزوتوب‌ها توسط سانتریفیوژ اولین بار در سال ۱۹۱۹ توسط لیندمان و استون پیشنهاد گردید. اولین استفاده موفقیت آمیز از این روش توسط جیمز و همکارانش در سال ۱۹۳۸ بود که از اولتراسانتریفیوژهای تحت خلاء برای جداسازی ایزوتوب‌های کلر در ترکیب تتراکلرید کربن (CCl_4) استفاده کردند.

جداسازی ایزوتوب‌های اورانیوم توسط روش سانتریفیوژ برای اولین بار در سال ۱۹۴۱ توسط بیمز و همکارانش در دانشگاه ویرجینیا صورت گرفت آنها توانستند ۲/۱٪ گرم اورانیوم با غنای ۴٪ تولید کنند. در آن زمان بزرگترین سانتریفیوژی که ساخته شد با سرعت ۲۰۶ متر بر ثانیه دوران می‌کرد و توانایی غنی‌سازی یک کیلوگرم SWU در سال را داشت. بعد از جنگ جهانی دوم، هنگامی که موفقیت فناوری دیفیوژن گازی ثبت شد کار بر روی سانتریفیوژها در آمریکا متوقف گردید.

بعدها در روسیه توسط یک تیم از دانشمندان اتریشی و آلمانی که در جنگ جهانی دوم به اسارت در آمدند غنی‌سازی توسط سانتریفیوژ گسترش یافت. سرپرست این گروه از دانشمندان پس از آزاد شدن این فناوری را به آمریکا و اروپا برد. اما تحقیقات بر

روی این روش همچنان ادامه یافت تا دهه ۱۹۶۰ که فناوری سانتریفیوژ قابل مقایسه با فناوری دیفیوژن گازی گردید. در حال حاضر سانتریفیوژها در مقیاس وسیع در اروپای غربی، روسیه و ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۶-بررسی سازمان‌ها و کشورهای فعال در زمینه غنی‌سازی اورانیوم

در حال حاضر فقط در کشورهای روسیه، فرانسه، آمریکا، انگلیس، آلمان، هلند، ژاپن و چین غنی‌سازی در مقیاس وسیع صورت می‌گیرد که عبارتند از: AREVA^۱، JNFL^۲، Minatom^۳، URENCO^۴ و USEC^۵.

– CNNC شرکت اتمی ملی چین دو کارخانه سانتریفیوژ با ظرفیت کل یک میلیون SWU/year را در دست دارد.

– AREVA فرانسه یک کارخانه دیفیوژن گازی را در تریکاستین فرانسه (۱۰/۸ میلیون SWU/year) و سایت جدید

GBII را در اختیار دارد.

– میناتوم سازمان فدراسیون روسیه کارخانه‌های سانتریفیوژ را در انگرسک^۶، اکاترینبورگ^۷، کراسنویارسک^۸ و تامسک^۹ اداره می‌کند.

– USEC یک کارخانه دیفیوژن گازی در کنتاکی (پادوکا) با ظرفیت کل ۱۱/۳ میلیون SWU/year را دارا می‌باشد.

– JNFL سازمان سوخت هسته‌ای ژاپن کارخانه‌ای با ظرفیت ۱/۱ میلیون SWU/year در سال ۱۹۹۲ راهاندازی کرده است.

– URENCO که یک مشارکت از شرکت‌هایی در آلمان، هلند و انگلیس می‌باشد، کارخانه‌هایی را در آلمان، هلند و انگلیس و امریکا راهاندازی کرده است که همه این کارخانه‌ها از نوع سانتریفیوژ با ظرفیت کل می‌باشند.

شكل موقعیت سایت‌های غنی‌سازی در مقیاس تجاری در جهان را نشان می‌دهد.

¹ Japan Nuclear Fuel Limited

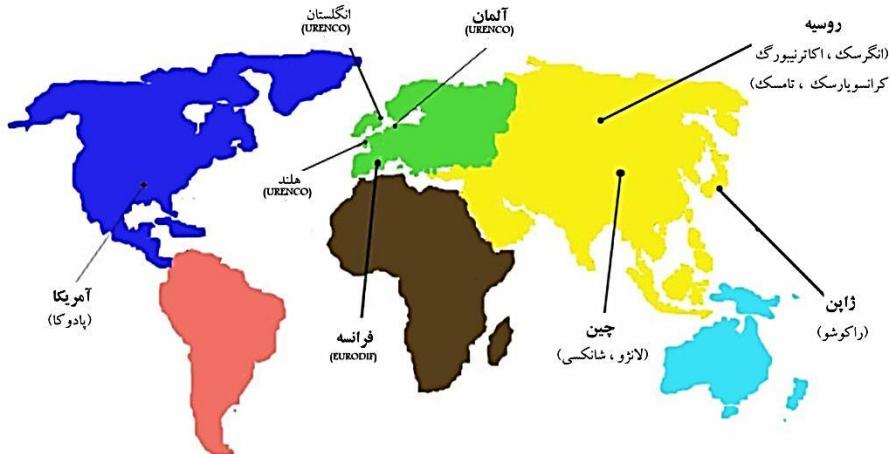
² Angersk

³ Ekaterinburg

⁴ Krasnoyarsk

⁵ Tomsk

⁶ JNFL

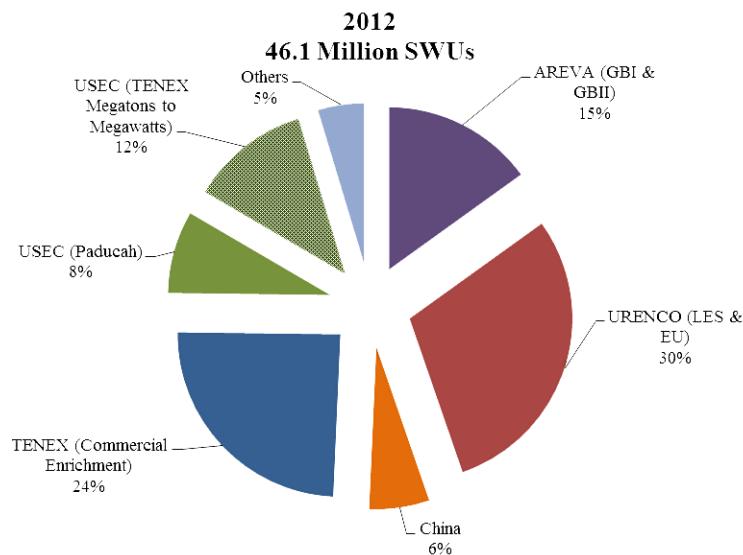


شکل ۴: موقعیت کارخانه‌های غنی‌سازی در جهان

لازم به ذکر است سهم چین و ژاپن در بازار جهانی غنی سازی نسبت به کشورهای دیگر ذکر شده اند که بوده و کشورهای فوق عملده محصولات تولیدی را صرف نیازهای داخلی می نمایند. چهار سازمان اصلی غنی سازی که بیش از ۹۰٪ غنی سازی مورد نیاز در سال ۲۰۱۲ را تأمین نموده اند، عبارتند از:

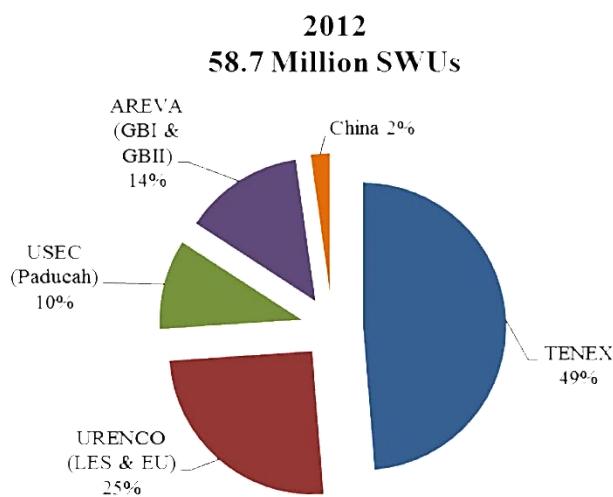
AREVA	-
TENEX	-
URENCO	-
USEC	-

در شکل سهم هر کدام از سازمان‌ها در بازار جهانی غنی‌سازی اورانیوم (تولیدات مازاد بر نیازهای داخلی) در سال ۲۰۱۲ نشان داده شده است. با وجودی که به نظر می‌رسد چهار تامین کننده اصلی سوخت غنی شده در جهان به صورت مستقل باشند، AREVA و URENCO پس از مشارکت در طرح ETC عملأً به هم پیوسته اند.



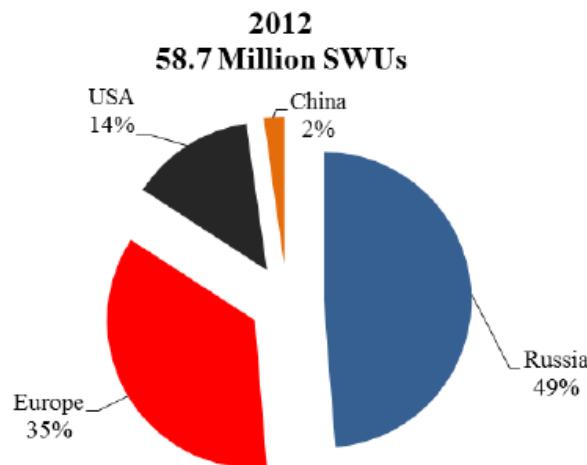
شکل ۵: سهم سازمان‌های ذیربیط با اورانیوم غنی شده در بازار جهانی سال ۲۰۱۲

همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین سهم از آن URENCO با ۳۰٪ از سهم کل بازار جهانی است. پس از آن TENEX با ۲۴٪ مقام دوم را دارا می‌باشد. همچنین سهم تخمینی ظرفیت جهانی غنی سازی از نظر تولیدکنندگان در سال ۲۰۱۲ در شکل نشان داده شده است.



شکل ۶: سهم تخمینی ظرفیت جهانی غنی سازی از نظر تولیدکنندگان در سال ۲۰۱۲

شرکای کنونی صنعت غنی سازی توانایی گسترش میزان تولید در مدت زمان نسبتاً کوتاهی (تقریباً یکسال) با اضافه نمودن ظرفیت در تاسیسات موجود را دارا می‌باشند. شکل سهم تخمینی تولیدکنندگان اصلی صنعت غنی سازی از نظر موقعیت جغرافیایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: سهم ظرفیت غنی سازی تخمینی جهانی بر حسب موقعیت مکانی در سال ۲۰۱۲

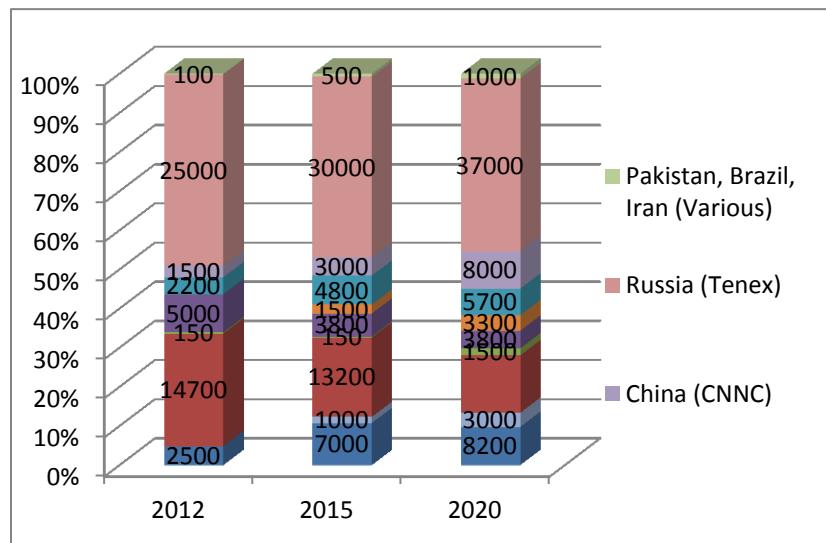
همان‌گونه که در شکل‌های فوق نشان داده شد، غنی‌سازی اورانیوم فقط در کشورهای محدودی انجام می‌شود و مابقی کشورها اورانیوم غنی شده مورد نیاز خود را از سازمان‌های ذکر شده فعال در زمینه غنی‌سازی اورانیوم خریداری می‌نمایند.

ظرفیت موجود و پیش‌بینی شده برای کارخانه‌های غنی‌سازی به روش سانتریفیوژ در مقیاس صنعتی و سهم کشورهای صاحب این تکنولوژی در جدول و

شکل نشان داده شده است.

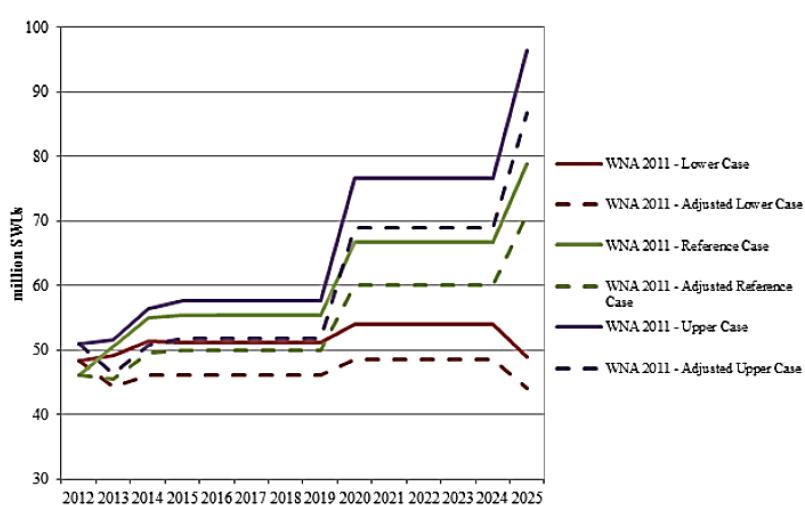
جدول ۸: ظرفیت موجود و پیش‌بینی شده برای کارخانه‌های غنی‌سازی به روش سانتریفیوژ در مقیاس صنعتی $1000 \text{SWU}/\text{yr}$

نام کشور	بهره بردار	سال ۲۰۱۲	سال ۲۰۱۵ *	سال ۲۰۲۰ *
روسیه	Tenex: Anfarsk, Novouralsk, Zelenogorsk, Seversk	۲۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۷۰۰۰
فرانسه	AREVA, Georges Bess II	۲۵۰	۷۰۰	۷۵۰
آمریکا	URENCO, New Mexico	۲۲۰	۴۸۰	۵۷۰
	AREVA, Idaho Falls	۰	۱۵۰	۳۳۰
ژاپن	JNFL, Rokkaasho	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
چین	CNNC: Hanzhun & Lanzhou	۱۵۰	۳۰۰	۸۰۰
انگلیس آلمان هلند	URENCO: Capenhurst, Gronau, Almelo	۱۴۷۰۰	۱۳۲۰۰	۱۳۲۰۰



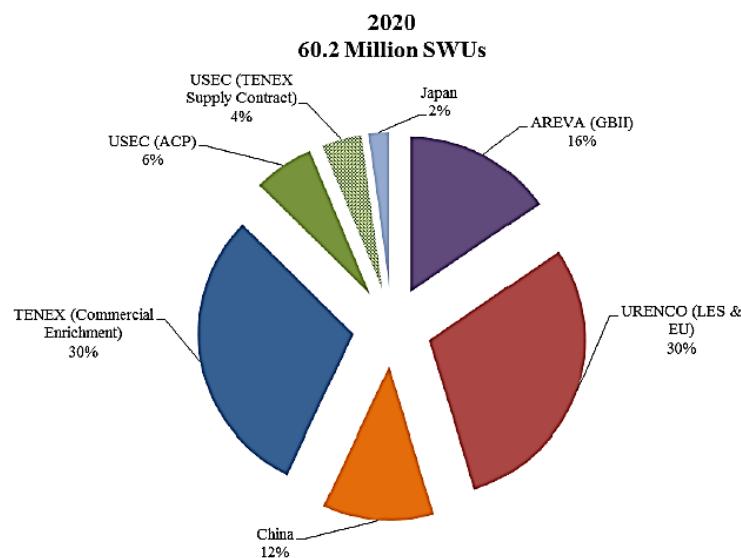
شکل ۸: توسعه تأسیسات غنی‌سازی اورانیوم تا سال ۲۰۲۰، ۱۰۰۰SWU/yr

اصلی ترین محرك برای غنی سازی، تقاضا برای تامین سوخت هسته ای مورد نیاز برای بهره برداری نیروگاه های هسته ای می باشد. بر این اساس بررسی تعداد، ظرفیت و وضعیت نیروگاه های هسته ای در حال بهره برداری و مدت زمان تخمینی کارکرد هر نیروگاه، دید مناسبی از میزان تقاضا برای غنی سازی ارائه می دهد. این بررسی می تواند شامل نیروگاه های هسته ای طراحی شده، در حال توسعه و در حال ساخت نیز باشد. شکل پیش بینی انجام شده برای میزان غنی سازی مورد نیاز تا سال ۲۰۲۵ را نشان می دهد.



شکل ۹: تقاضای جهانی برای غنی سازی، از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۵

بر اساس آمار ارائه شده تا پایان سال ۲۰۱۲، تعداد ۴۳۶ نیروگاه هسته‌ای در سرتاسر جهان در حال کار بوده و انتظار می‌رود ۵۵۰ نیروگاه هسته‌ای در ۱۵ سال آینده به بهره برداری برسد. شکل ظرفیت غنی سازی در سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: ظرفیت غنی سازی تخمینی برای سال ۲۰۲۰

٣- مراجع

- [1] J. M. Whitaker, "Uranium Enrichment Plant Characteristics - A Training Manual for the IAEA", May 2005
- [2] Allan S. Krass, Peter Boskma, Boelie Elzen, Wim A. Smith, "Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation", Taylor & Francis Ltd, London and New York, 1983
- [3] "DOE Handbook"-Chapter 3, April 1998
- [4] Alexander Glaser, "Life in a Nuclear Powered Crowd (The Problem of Uranium Enrichment)", June 2005
- [5] US Nuclear Fuel Cycle, World Nuclear Association, February 2014
- [6] Kenneth R. Czerwinski; Martin F. Polz, "Uranium Enrichment Using Microorganisms", 2004
- [7] ACP & World Enrichment Market - USEC, 2013
- [8] Nuclear Technology Review 2013 – IAEA
- [9] URENCO Annual Report And Accounts 2013