بررسی مشکلات موجود در توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم

INC29-1144

(مطالعه موردی کشورهای ژاپن، پاکستان و جمهوری اسلامی ایران)

منوچهر منطقی [۱]، رضا ذبیحی [۲*]، سروش فیاض [۳]

۱. مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع ، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ، تهران- ایران
۲. دانشجوی دکترای مدیریت دولتی ، دانشگاه تهران، ایران
۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

چکیده:

کشورهای دارنده فناوری غنی‌سازی اورانیوم برای توسعه این فناوری با مشکلات زیادی مواجه بوده‌اند. در این پژوهش مشکلات توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم موردبررسی قرار گرفته است و بر اساس آن سطح بلوغ فناوری(TRL) نیز برآورد شده است. داده‌های به‌دست‌آمده بر اساس دو شاخص «حیطه دانش» و «تجربه و تخصص»، در سه موضوع مشکل فنی، حادثه طبیعی و خرابکاری صنعتی به ترتیب برای سه کشور ژاپن، پاکستان و جمهوری اسلامی ایران موردبررسی و تحلیل قرار گرفته است. پژوهش حاضر نشان داد توجه و دقت کافی به مراحل سطح بلوغ فناوری (TRL) از بعد فنی و اتخاذ تدابیر لازم جهت مقابله با حوادث طبیعی و انسان‌ساخت از اهمیت ویژه‌ای در صنعت غنی‌سازی برخوردار است. همچنین در یک نگاه کلان، عزم مسئولین مربوطه در خوداتکایی در حوزه غنی‌سازی را می‌توان پیشران اصلی جهت غلبه بر مشکلات موجود در توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم برشمرد.

کلیدواژه‌ها: فناوری هسته‌ای، سطح بلوغ فناوری (TRL)، صنعت غنی‌سازی

Investigating the Problems in the Development of Uranium Enrichment Technology (Case Study of Japan, Pakistan and the Islamic Republic of Iran)

M. Manteghi[1], R. Zabihi[2*], S. Fayaz[3]

1. Management and Industrial Engineering Complex, Malek Ashtar University of Technology.Tehran, Iran.
2. PhD student in public administration, University of Tehran, Iran
3. Master's degree in executive management, Iran University of Science and Technology, Iran

Abstract:

Countries with uranium enrichment technology have faced many difficulties in developing this technology. In this study, the problems of developing uranium enrichment technology have been investigated and based on that, the Technology Readiness Level (TRL) has been estimated. The obtained data have been analyzed based on two indicators of "knowledge area" and "experience and expertise" in three subjects of technical problem, natural disaster and industrial sabotage for three countries, Japan, Pakistan and the Islamic Republic of Iran, respectively. The present study showed that sufficient attention and accuracy to the stages of TRL from a technical point of view and taking the necessary measures to deal with natural and man-made disasters is of particular importance in the enrichment industry. Also, in a big way, the determination of the relevant authorities in self-reliance in the field of enrichment can be considered as the main drivers to overcome the existing problems in the development of uranium enrichment technology.

Keywords: Nuclear technology, Technology Readiness Level (TRL), enrichment industry

۱. مقدمه

غنی‌سازی اورانیوم را می‌توان قلب چرخه سوخت هسته‌ای به‌حساب آورد. در حال حاضر جامعه جهانی هسته‌ای، ۱۳ کشور چین، ایالات‌متحده، فرانسه، ژاپن، روسیه، آلمان، انگلیس، هلند، جمهوری اسلامی ایران، برزیل، آرژانتین، هند و پاکستان را به‌عنوان دارنده تأسیسات غنی‌سازی اورانیوم با ظرفیت‌های مختلف تولید صنعتی به رسمیت می‌شناسد[۱]. کشورهای دارنده فناوری غنی‌سازی اورانیوم برای دستیابی و توسعه این فناوری با مشکلات و موانع زیادی مواجه بوده‌اند. در این پژوهش سه نوع مشکل فنی، حادثه طبیعی و خرابکاری صنعتی به ترتیب برای سه کشور ژاپن، پاکستان و جمهوری اسلامی ایران براساس دو شاخص "حیطه دانش" و "تجربه و تخصص"، موردبررسی قرارگرفته و بر اساس آن سطح بلوغ فناوری (TRL: Technology Readiness Level) برای فناوری غنی‌سازی اورانیوم -که شامل مجموعه فناوری‌هایی با محوریت ماشین سانتریفیوژ در نظر گرفته شده است - نیز برآورد شده است.

۲. مرور ادبیات

۲-۱. غنی‌سازی اورانیوم

چرخه سوخت هسته‌ای شامل مراحل استخراج اورانیوم، فرآوری و تولید کیک زرد (U_3O_8)، تبدیل کیک‌زرد به UF_6 طبیعی (غنی‌نشده)، غنی‌سازی (تبدیل UF_6 طبیعی به UF_6 غنی‌شده)، ساخت سوخت هسته‌ای (تبدیل UF_6 غنی‌شده به پودر UO_2، ساخت قرص‌های سوخت و مونتاژ آن‌ها، ساخت مجتمع‌های سوخت)، تولید برق در نیروگاه هسته‌ای، بازفراوری و استفاده مجدد و در انتها پسمانداری و انتقال سوخت مصرف‌شده به انبار است. غنی‌سازی اورانیوم را می‌توان قلب چرخه سوخت هسته‌ای به‌حساب آورد. تاکنون ۱۱ روش غنی‌سازی اورانیوم شامل نازل جداسازی (جت – نازل) فرآیند یوکور، پخش[1] جرمی، پخش گرمایی، استخراج با حلال، تبادل یونی و جداسازی ایزوتوپ‌ها (توسط لیزر بخار اتمی، لیزر مولکولی، تحریک با لیزر، الکترومغناطیس و پلاسما) در مقیاس آزمایشگاهی و دو روش سانتریفیوژ گازی و پخش گازی در مقیاس صنعتی استفاده شده‌اند[۲]. هم‌اکنون تنها روش صنعتی غنی‌سازی اورانیوم در جهان روش غنی‌سازی با سانتریفیوژ گازی است[۳].

۲-۲. سطح بلوغ فناوری

مفهوم سطح بلوغ فناوری (TRL) به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری فاصله فناوری از استقرار در فضا، توسط ناسا آغاز و متعاقباً به‌عنوان یک فرآیند ۹ مرحله‌ای از تحقیقات پایه اولیه تا تجاری‌سازی در جهان شایع شد[۴]. ناسا اعلام کرده است فناوری‌ها باید پیش از آنکه در برنامه مأموریت ناسا قرار بگیرند حداقل تا TRL6 رسیده باشند. وزارت دفاع آمریکا نیز TRL7 را سطح موردقبول برای گنجانده شدن یک فناوری در برنامه سیستم تسلیحاتی اعلام کرده است[۵]. به زبان ساده می‌توان ۹ مرحله TRL را در چهار دسته ۱-تحقیقات پایه، امکان‌پذیری و آزمایشگاهی، ۲- پایلوت، ۳- نیمه‌صنعتی و ۴- صنعتی خلاصه کرد. مرحله پایلوت معمولاً یک‌صدم مرحله صنعتی و تجاری و مرحله نیمه‌صنعتی یک‌دهم مرحله صنعتی است[۶]. با توجه به اینکه در این پژوهش، فناوری غنی‌سازی اورانیوم شامل مجموعه فناوری‌هایی با محوریت ماشین سانتریفیوژ در نظر گرفته شده است[۲]، TRL7 معادل مرحله پایلوت، TRL8 معادل مرحله نیمه‌صنعتی و TRL9 معادل مرحله صنعتی در نظر گرفته شده است.[۳]

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی است زیرا باعث توسعه دانش کاربردی در زمینه توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم و آشنایی با موانع عمده توسعه این فناوری برای مخاطب می‌شود. از طرف دیگر، این پژوهش توصیفی است زیرا شرایط حال حاضر

---

[1] Diffusion

[۲] برای دستیابی به توان عملیاتی جهت دستیابی به میزان SWU مشخص، تعدادی ماشین سانتریفیوژ با چیدمان مشخص می‌بایست با یکدیگر متصل شده تا تشکیل یک آبشار (Cascade) را بدهند. [۷]

[۳] ظرفیت غنی‌سازی برای تأسیسات پایلوت و نیمه صنعتی درشرکت غنی‌سازی URENCO (شامل کشورهای آلمان، انگلیس و هلند) به ترتیب ۲۵ هزار سو در سال و ۲۰۰ هزار سو در سال اعلام شده است. [۸]

در صنعت غنی‌سازی اورانیوم در کشورهای موردبررسی را شرح می‌دهد. در پژوهش حاضر از روش اسنادی استفاده و اطلاعات موردنیاز نیز با استفاده از روش‌های مرور نظام‌مند و فیش‌برداری در بازخوانی و بررسی پایگاه‌های الکترونیکی و کتب و مقالات این حوزه جمع‌آوری شده است.

اطلاعات ارائه‌شده در خصوص سطح بلوغ فناوری غنی‌سازی برای هر کشور، با در نظر گرفتن فناوری غنی‌سازی اورانیوم به‌عنوان یک فناوری و فارغ از ورود به سطح بلوغ فناوری هرکدام از زیرسیستم‌ها و بر اساس مقایسه تطبیقی با سطوح نه‌گانه بلوغ فناوری (TRL) و براساس دو شاخص "حیطه دانش" و "تجربه و تخصص" صورت پذیرفته است.

۴. یافته‌ها

۴-۱. موردکاوی صنعت غنی‌سازی در ژاپن: مشکلات فنی

تأسیسات هسته‌ای Ningoyo Togo در ژاپن برای مراحل پایلوت و نیمه‌صنعتی فناوری غنی‌سازی ژاپن در نظر گرفته شده بود. واحدهای آزمایشی (پایلوت) OP-1 و OP-2 (شکل شماره ۱) به ترتیب در ۱۹۷۹ و ۱۹۸۲ با هدف ایجاد فناوری تولید انبوه برای سانتریفیوژها، دستیابی به داده‌های اقتصادی و ... برای ورود به مرحله نیمه‌صنعتی غنی‌سازی اورانیوم، شروع به عملیات کرده و در سال ۱۹۹۰ به مجموع ۵۰ هزار سو[۱] در سال، ظرفیت غنی‌سازی خود پایان داده است[۹].[۲]

واحدهای نیمه‌صنعتی با هدف ایجاد فناوری تولید انبوه سانتریفیوژها برای تجاری‌سازی غنی‌سازی اورانیوم، دستیابی به فناوری بهره‌برداری و دستیابی به داده‌های اقتصادی برای ورود به مرحله صنعتی در دو واحد نیمه‌صنعتی DOP-1 و DOP-2 (شکل شماره ۲) هرکدام با ظرفیت ۱۰۰ هزار سو[۳] در سال شروع به کار کردند. واحد نیمه‌صنعتی DOP-1 در سال ۱۹۸۸ شروع به کار کرده و در سال ۲۰۰۱ به کار خود خاتمه داده و واحد نیمه‌صنعتی DOP-2 در سال ۱۹۸۹ شروع به کارکرده و در سال ۱۹۹۹ به کار خود خاتمه داده است.[۹].

کارخانه غنی‌سازی اورانیوم روکاشو[۴] در سال ۱۹۸۸ شروع به ساخت و در سال ۱۹۹۲ با ۱۵۰ هزار سو در سال با هدف دستیابی به ۱/۵ میلیون سو در سال وارد فاز عملیاتی شد[۱۱]. اما ساخت فازهای عملیاتی به دلیل توقف برخی از سانتریفیوژهای نصب‌شده[۵]، تنها به ظرفیت کل ۱۰۵۰ هزار سو در سال رسید. هنگامی‌که تعداد سانتریفیوژهای متوقف‌شده در آبشارهای سانتریفیوژ به‌جایی رسید که به‌سختی توانستند غنی‌سازی اورانیوم را ادامه دهند، کل آبشارهای سانتریفیوژ مطابق جدول شماره ۱ متوقف شدند.

---

[۱] SWU : این واژه مخفف کلمات Separative Work Unit به معنای واحدکار جداسازی است و برای جداسازی ایزوتوپهای مختلف اورانیوم به کار می‌رود.

[۲] در واحدهای OP-1 و OP-2 در مجموع ۷۰۰۰ سانتریفیوژ نصب شده است[۱۰].

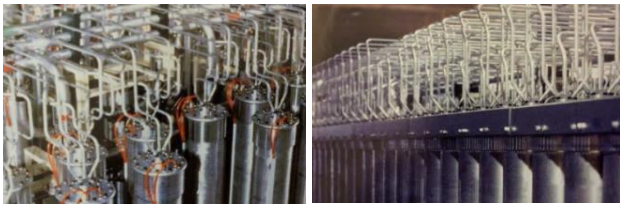
[۳] ظرفیت غنی‌سازی با دو واحد SWU U و یا SWU UF_6 بیان می‌شود. برای تبدیل تقریبی SWU UF_6 به SWU U، می‌بایست عدد را در ۰/۶۸ ضرب نمود و برای حالت برعکس آن باید در ۱/۴۸ ضرب شود، شایان ذکر است در ایران SWU با UF6 و در ژاپن و بسیاری از کشورهای جهان با U بیان می‌شود.

[4] Rokkasho

[۵] مشکلات فنی به عنوان دلیل اصلی توقف ماشین‌های سانتریفیوژ اعلام شده و در برخی منابع این موضوع به صورت خاص به دلیل چسبیدن اورانیوم‌ها به بدنه روتور ذکر شده است[۱۲].

جدول ۱ : ظرفیت و تاریخ شروع و پایان کار واحدهای غنی‌سازی اورانیوم [۱۲]

نام واحد	ظرفیت (هزار سو در سال)	سال شروع عملیاتی	تعداد سانتریفیوژ های متوقف‌شده	سال توقف کار واحد
RE-1A	۱۵۰	۱۹۹۲	۴۲۴۴	۲۰۰۰
RE-1B	۱۵۰	۱۹۹۲	۴۲۱۶	۲۰۰۲
RE-1D	۱۵۰	۱۹۹۳	۳۴۹۹	۲۰۰۵
RE-1C	۱۵۰	۱۹۹۴	۴۰۹۶	۲۰۰۳
RE-2A	۱۵۰	۱۹۹۷	۲۶۴۶	۲۰۰۶
RE-2B	۱۵۰	۱۹۹۸	>۳۰۰۰	۲۰۱۰
RE-2C	۱۵۰	۱۹۹۸	۲۵۰۷	۲۰۰۸



شکل ۱: سانتریفیوژهای مرحله پایلوت واحد OP-1 (شکل سمت راست) و واحد OP-2 (شکل سمت چپ) [۱۳]

شکل ۲: سانتریفیوژهای مرحله نیمه صنعتی واحد DOP-1 (شکل سمت راست) و واحد DOP-2 (شکل سمت چپ) [۱۳]

دلیل اصلی اینکه واحدهای غنی‌سازی باید کاملاً تعطیل شود، خرابی تعداد زیادی از سانتریفیوژها بود، اما علت ریشه‌ای آن عدم پیشرفت در فناوری بوده است. موضوعی که ماساتوشی تویودا مدیر سابق شرکت JNFL در یادداشتی تحت عنوان "غنی‌سازی اورانیوم - خلأ ۲۰ سال ازدست‌رفته" علت این مشکل فنی را کافی نبودن مرحله نیمه‌صنعتی توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم اعلام کرده است. لذا JNFL سعی دارد سانتریفیوژهای قدیمی با روتور فلزی را با سانتریفیوژهای جدید با روتور کامپوزیتی جایگزین کند[۱۲].

شرکت JNFL[۱] که مسئولیت ۴ فاز تحقیق و توسعه، طراحی، تولید و بهره‌برداری از ماشین‌های سانتریفیوژ را بر عهده دارد، با استقرار مرکز توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم، از سال ۲۰۰۰ سانتریفیوژهای جدید را در دست‌ساخت داشته و در سال ۲۰۰۷ آزمایش‌های لازم برای تائید عملکرد آبشار سانتریفیوژ جدید را شروع کرده است. ماشین‌های جدید از روتور کامپوزیتی به‌جای فلزی استفاده کرده و توانسته‌اند ظرفیت جداسازی را به ۴ تا ۵ برابر نوع روتور فلزی برسانند.[۲]

به دنبال تائید نهایی و استقرار یک سیستم تضمین کیفیت فرآیند تولید، در کارخانه تولید ماشین سانتریفیوژ (شکل شماره ۳)، تولید سانتریفیوژ جدید در سال ۲۰۱۰ آغاز شد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، JNFL تصمیم گرفته سانتریفیوژها را به مدل‌های جدید به‌روز کند و برای این منظور در گام اول، در قسمتی از واحد RE-2 ، دو واحد و هرکدام با ظرفیت ۳۷۵۰۰ سو در سال را در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ ایجاد کرده تا نهایتاً به ظرفیت ۱/۵ میلیون سو در سال برسد [۱۴]. بر اساس اطلاعات منتشرشده، تأسیسات JNFL از سال ۲۰۱۳ تا سال ۲۰۲۲ تنها در سال ۲۰۱۸ به میزان ۴ تن اورانیوم غنی‌شده زیر ۵٪ را به کارخانه تولید سوخت ارسال کرده است[۱۵]. به نظر می‌رسد عدم افزایش در میزان SWU از سال ۲۰۱۳ به جهت طی کردن فرآیند رسیدن به مرحله صنعتی سازی است. بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده، مراحل دستیابی به تأسیسات غنی‌سازی در ژاپن را می‌توان به‌صورت جدول زیر خلاصه نمود:

[1] JAPAN NUCLEAR FUEL LIMITED

[۲] با توجه به اینکه در واحد پایلوت ۷۰۰۰ سانتریفیوژ نصب بوده است و ظرفیت غنی سازی کل آن ۵۰ هزار سو در سال بوده است، در صورتیکه ماشین‌های سانتریفیوژ مرحله پایلوت را با یک میزان ظرفیت جداسازی فرض کنیم، ظرفیت جداسازی هر ماشین سانتریفیوژ با روتور فلزی حدود ۷ سو در سال بوده است و با این حساب ظرفیت جداسازی ماشین های سانتریفیوژ نسل جدید با روتور کامپوزیتی حدود ۲۸ تا ۳۵ سو در سال می‌باشد.

جدول ۲: مراحل صنعتی سازی تأسیسات غنی‌سازی در ژاپن

مراحل صنعتی سازی	واحدها	سال شروع	سال پایان	میزان ظرفیت (SWU/year)
پایلوت (Ningoyo) (Togo	Op-1	۱۹۷۹	۱۹۹۰	۵۰
	Op-2	۱۹۸۲		
نیمه‌صنعتی (Ningoyo) (Togo	DOP-1	۱۹۸۸	۲۰۰۱	۱۰۰
	DOP-2	۱۹۸۹	۱۹۹۹	۱۰۰
صنعتی (Rokkasho)	روتور فلزی	۱۹۹۲	۲۰۱۰	۰۵۰
	روتور کامپوزیتی	۲۰۱۲	-	۷۵ (چشم

شکل ۳ :کارخانه ساخت ماشین سانتریفیوژ نسل جدید [۱۶]

شکل ۴ : آبشار معمولی با روتور فلزی(سمت راست) و آبشار سانتریفیوژ جدید با روتور کامپوزیتی (سمت چپ) [۱۴]

فرآیند بلوغ فناوری غنی‌سازی در کشور ژاپن نشان می‌دهد، غنی‌سازی با ماشین سانتریفیوژ روتور فلزی به‌ظاهر تا سطح TRL9 نیز دست‌یافته است ولی در عمل به دلیل عدم رعایت شاخص‌های گذر از یک سطح بلوغ فناوری به سطح دیگر، مجبور به جمع‌آوری ماشین‌های سانتریفیوژ شده و فرآیند غنی‌سازی به‌وسیله ماشین سانتریفیوژ با روتور کامپوزیتی را در دستور کار قرار داده است. مطابق اطلاعات منتشرشده، این کشور از سال ۲۰۱۳ ظرفیت ۷۵ هزار سو در سال را تا پایان سال ۲۰۲۲ ثابت نگه داشته و این موضوع نشان‌دهنده آن است که با توجه به عدم موفقیت در صنعتی سازی غنی‌سازی اورانیوم با روتور فلزی، اینک این کشور در مرحله نیمه‌صنعتی یعنی در TRL8 تمرکز کرده تا اطلاعات کامل‌تری از ماشین با روتور کامپوزیتی جمع‌آوری و آنگاه به مرحله صنعتی گذار نماید.

با توجه به بروز زلزله‌ها و گردبادهای بزرگ در ژاپن و با استفاده از درس آموخته‌های حاصل‌شده، اتخاذ تدابیر لازم در افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان از طریق ابتکارات لازم در طراحی و ساخت و همچنین پایش‌های جغرافیایی در زمین و دریا در خصوص بررسی حرکت گسل‌ها از دیگر توانمندی‌های این کشور است [۱۷].

۲-۴. موردکاوی صنعت غنی‌سازی در پاکستان: حادثه طبیعی

پاکستان در سال ۱۹۷۸ در آزمایشگاه تحقیقاتی Kahuta (KRL[1]) به اولین نمونه سانتریفیوژ خود دست یافت و متعاقباً در سال ۱۹۷۹ اولین آبشار ۵۴ ماشینی خود را راه‌اندازی کرد. سالن‌های سانتریفیوژ، در سال ۱۹۸۱ آماده شروع برای کار بودند و رئیس‌جمهور پاکستان (ضیاءالحق) در چهارمین ماه از سال ۱۹۸۱ با خوشحالی از سالن‌های سانتریفیوژ بازدید کرد. این بازدید در حالی بود که حدود یک ماه بعد، رژیم صهیونیستی، تأسیسات هسته‌ای اوسیراک عراق را منهدم و پاکستان از اقدام مشابه هند علیه خود که در تقابل با پاکستان بود وحشت کرد. اما این خوشحالی و وحشت، ۵ ماه بیشتر دوام نیاورد، چراکه یک زمین‌لرزه قوی (۶/۱ ریشتر)، اسلام‌آباد و منطقه اطراف آن شامل منطقه Kahuta را لرزاند و حدود چهار هزار سانتریفیوژ، درهم‌شکسته[2] شده و از بین رفتند. بعدازاین حادثه، عبدالقدیرخان (مسئول برنامه هسته‌ای پاکستان)، نزد ضیاءالحق رفته و اعلام کرد: «ما یک لوح تمیز داریم و باید از ابتدا شروع کنیم» و برای رفع نگرانی

[1] Khan Research Laboratories
[2] crash

رئیس‌جمهور گفت:«یک فاجعه غیرمنتظره اتفاق افتاده ... اما ما امکانات، مواد و دانش لازم را داریم». بعد از دو سال عبدالقدیر خان اعلام کرد: «ما ۵ هزار ماشین سانتریفیوژ نصب کرده کرده‌ایم» [۱۸]. [۱]

متعاقباً پاکستان در سال‌های بعد به ماشین‌های پیشرفته‌تر هجرت کرده[۲] و در سال‌های ابتدایی قرن جدید برنامه ایجاد ظرفیت SWU/year ۶۰۰۰۰۰ در چهار مرحله و هرکدام SWU ۱۵۰۰۰۰ برای رسیدن به ظرفیت تأمین سوخت ۸۸۰۰ مگاوات برق خود تا سال ۲۰۳۰ را از طریق غنی‌سازی اورانیوم اعلام کرد[۱۸]. هم‌اکنون پاکستان دارای شش نیروگاه هسته‌ای فعال با ظرفیت تولید ۳۲۵۶ مگاوات است که سوخت آن‌ها با توجه به قراردادهای قبلی از چین تأمین می‌شود و این کشور هدف‌گذاری برای دستیابی به ۸۸۰۰ مگاوات برق هسته‌ای تا سال ۲۰۳۰ صورت داده است [۱۹].

در حال حاضر، پاکستان طبق قوانین گروه تأمین‌کنندگان هسته‌ای[۳] از خرید راکتور و به‌تبع آن دریافت سوخت برای آن‌ها منع شده است[۴][۱۸]. اقدام پاکستان برای تولید سوخت هسته‌ای به جهت خوداتکایی و اطمینان از سوخت پایدار - که ممکن است در هر زمان به دلیل سیاست و فشار بین‌المللی تحت تأثیر قرار بگیرد- – صورت می‌پذیرد[۲۰].

در اسناد منتشرشده، به‌صورت شفاف به میزان ظرفیت غنی‌سازی اورانیوم در پاکستان اشاره نشده است ولی درصورتی‌که بالاترین برآوردها یعنی ۷۵ هزار سو در سال را در نظر بگیریم می‌توان بیان کرد که سطح بلوغ فناوری غنی‌سازی اورانیوم در پاکستان در مرحله نیمه‌صنعتی با TRL8 است[۱۸].

همچنین با توجه به زلزله‌خیز بودن منطقه کاهوتا[۵] عدم انتقال تأسیسات غنی‌سازی از منطقه کاهوتا (بعد از زلزله سال ۱۹۸۱) و اتخاذ تدابیر لازم در جلوگیری از خراب شدن ماشین‌های سانتریفیوژ در زلزله‌های بعدی نشان‌دهنده ایجاد توانمندی در جلوگیری از بروز خسارات است.

۲-۴. موردکاوی صنعت غنی‌سازی در جمهوری اسلامی ایران : خرابکاری صنعتی

پس از حمله ویروس استاکس نت به تأسیسات غنی‌سازی نطنز (مجتمع غنی‌سازی شهید احمدی روشن) در سال ۱۳۸۸، برخی منابع ادعا کردند که حدود ۱۰۰۰ ماشین سانتریفیوژ از این حمله متأثر شدند[۲۴]. اما باوجوداین خرابکاری، جمهوری اسلامی ایران، با جلوگیری از گسترش تخریب ویروس استاکس نت و خنثی‌سازی آن، تعداد بیشتری از ماشین‌های سانتریفیوژ را نصب کرده و تا سال ۱۳۹۲ و قبل از توافق برجام، حدود ۱۹۵۰۰ سانتریفیوژ از انواع مختلف ماشین سانتریفیوژ را نصب داشته است[۲۵].

همچنین پس از خرابکاری در سیستم برق تأسیسات غنی‌سازی نطنز(مجتمع غنی‌سازی شهید احمدی روشن) و از کار انداختن تعدادی از ماشین‌های سانتریفیوژ در فروردین ۱۴۰۰، جمهوری اسلامی ایران، غنی‌سازی ۶۰٪ برای استفاده در تولید عنصر مولیبدن(جهت به‌کارگیری در ساخت انواع رادیوداروها) را در دستور کار قرار داده و اعلام کرد ماشین‌های نسل جدید را جایگزین ماشین‌های خراب خواهد کرد[۲۶].

همه این نوع پیشرفت‌ها باعث شده است که دشمنان ایران اعتراف کنند که جمهوری اسلامی ایران تنها کشوری است که با تلاش‌های گسترده سیستماتیک و فشارها و خرابکاری‌های منحصربه‌فرد روبرو بوده و این توسعه و رشد را علی‌رغم این فشارها، نشان‌دهنده ذکاوت علمی ایرانیان دانسته‌اند[۲۷]. از منظر آمارهای جهانی و بر اساس رتبه‌بندی منتشرشده توسط SJR، رشد علمی ایران در حوزه انرژی هسته‌ای از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۱ از رتبه ۸۶ به رتبه ۱۱ جهان افزایش داشته است[۲۸].

---

[۱] توسعه تاسیسات غنی‌سازی در Kahuta با حضور تکنسین‌های چینی میسر شده است [۲۱].

[۲] پاکستان بعد از ماشین سانتریفیوژ P1 با ۱ الی ۳ سو توانست به ماشینهای P2، P3 و P4 به ترتیب با سوهای تقریبی ۵، ۱۲ و ۲۰ دست یابد. [۱۸].

[3] Nuclear Suppliers Group (NSG)

[۴] هم اکنون ۴۸ کشور عضو NSG می باشند. [۲۲].

[۵] از حدود ۴۰ سال گذشته ۷۲ زلزله بالای ۵ ریشتر در منطقه کاهوتا رخ داده است[۲۳].

با توجه به محدودیت‌ها و فشارهای کشورهای غربی، ایران توانسته در ماشین IR1 ده‌ها آبشار ماشین سانتریفیوژ را نصب کرده و به سطح نیمه‌صنعتی با TRL8 با محوریت این ماشین دست یابد[۱] [۲۵]. همچنین با اجرای کامل قانون اقدام راهبردی برای لغو تحریم‌ها و صیانت از منافع ملت ایران (مصوب ۱۳۹۹/۰۹/۱۸) در حوزه نصب ماشین‌های سانتریفیوژ نسل جدید، می‌توان گفت این ماشین‌های سانتریفیوژ نیز در سطح TRL8 قرار گرفته‌اند [۲۹]. اقدامات ایران در حوزه سایبری در جلوگیری از گسترش تخریب ویروس استاکس‌نت، بیانگر توانمندی جمهوری اسلامی ایران در این حوزه است. همچنین دستیابی سریع به غنی‌سازی ۲۰ و ۶۰ درصد حاکی از توان صنعتی و علمی در ایران در رسیدن به غناهای مختلف است.

۵. نتیجه‌گیری

غنی‌سازی اورانیوم قلب چرخه سوخت هسته‌ای بوده وکشورهای دارای فناوری غنی‌سازی اورانیوم، برای دستیابی به این فناوری با مشکلات و چالش‌های فراوانی مواجه بوده‌اند. در طی این پژوهش سه چالش مشکلات فنی و کیفی در صنعت غنی سازی ژاپن، حوادث طبیعی برای صنعت غنی سازی پاکستان و خرابکاری صنعتی برای جمهوری اسلامی ایران موردبررسی قرار گرفته و عکس‌العمل و نحوه مواجهه این کشورها با این چالش‌ها بیان شده است. همچنین TRL این فناوری در کشورهای مذکور برآورد شده و برخی توانمندی‌های شاخص آن‌ها در این حوزه به شرح جدول زیر احصاء شدند:

جدول ۳: سطح بلوغ فناوری غنی‌سازی اورانیوم و سایر توانمندی‌ها

نام کشور	ژاپن	پاکستان	جمهوری اسلامی ایران
سطح TRL	TRL8 (برای ماشین با روتور کامپوزیتی)	TRL 8	TRL8 (برای ماشین IR1 و در صورت اجرای کامل قانون اقدام راهبردی برای ماشین‌های نسل جدید)
سایر توانمندی‌ها	اتخاذ تدابیر لازم در برابر زلزله و گردبادها	اتخاذ تدابیر لازم در برابر زلزله	قدرت سایبری و توان صنعتی و علمی در رسیدن سریع به غناهای مختلف اورانیوم

براساس مطالعه صورت گرفته در این پژوهش، مهمترین عامل غلبه بر مشکلات، سطح بالای بلوغ فناوری غنی‌سازی اورانیوم در این سه کشور است. همچنین با توجه به اهمیت مرحله غنی‌سازی در چرخه تولید سوخت هسته‌ای و با توجه به لزوم خوداتکایی و اطمینان از وجود سوخت پایدار، کشورهای مذکور، توانمندی در حوزه غنی‌سازی را به‌عنوان هدف راهبردی خود در نظر گرفته‌اند. با این توصیف، عزم مسئولین مربوطه در خوداتکایی در حوزه غنی‌سازی را می‌توان پیشران اصلی جهت غلبه بر مشکلات موجود در توسعه فناوری غنی‌سازی اورانیوم برشمرد.

[۱] تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ در هر آبشار در برخی کشورها متفاوت می‌باشد و در ایران آبشارهایی با حدود ۱۷۰ ماشین سانتریفیوژ ملاک عمل می‌باشد[۲۵].

۶. مراجع

1. How many countries master uranium enrichment technology?; URL: http://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/quantos-pa%C3%ADses-dominam-a-tecnologia-de-enriquecimento-de-uranio?Origem=1102
2. Enrichment in the world (In Persian). URL:https://www.aeoi.org.ir/portal/file/?66682/Enrichment.pdf
3. Uranium Enrichment ; URL: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx
4. Heder ,M; "*From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation*" , The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal, Volume 22(2), article 3, 2017 URL: https://www.innovation.cc/discussion-papers/2017_22_2_3_heder_nasa-to-eu-trl-scale.pdf
5. Sauser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., and Gove, R; "*From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels*". In Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA (P 1) ; 2006
6. Expanded Technology Readiness Level (TRL) Definitions for the Bioeconomy; URL: https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/10/01/expanded-technology-readiness-level-trl-definitions-for-the-bioeconomy/
7. Enrichment Cascades; URL: https://fas.org/issues/nonproliferation-counterproliferation/nuclear-fuel-cycle/uranium-enrichment-gas-centrifuge-technology/enrichment-cascades/
8. Profile of World Uranium Enrichment Programs; URL: https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub8538.pdf
9. Yagi, N. Mita, Y & Kanda, N; "*Current Status of JAEA Ningoyo-togo Decommissioning Project (Technical Report)*". *Journal of RANDEC,* 61, 2-11 ;

   URL:http://www.randec.or.jp/publish/documents/gihou/Decommissioning%20gihou_61.pdf ; 2020
10. Ningyo Toge uranium enrichment pilot plant comes into full; URL:

    https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=14794953; 1982
11. Corporate Porfile (JNFL); URL: https://www.jnfl.co.jp/en/about/company/
12. Uranium Enrichment Plant Turns into a Big Waste Dump Nuke Info Tokyo No. 140 ; URL: https://cnic.jp/english/?p=2458 ; 2015
13. Yamamoto, F; "*Visit to independent technology development Uranium enrichment centrifuge method*" URL: http://www.engy-sqr.com/media-open2/20210630nousyukurekisi.pdf
14. Technology Development (JNFL);URL: https://www.jnfl.co.jp/en/activity/technology/
15. Uranium Enrichment (JNFL) ; URL: https://www.jnfl.co.jp/en/business/uran/
16. Study on Japan's Nuclear Materials; URL: http://www.cacda.org.cn/ueditor/php/upload/file/20151010/1444439848122903.pdf
17. Safety (JNFL); URL: https://www.jnfl.co.jp/en/activity/safety/

18. ZIA MIAN , A. H. NAYYAR & R. RAJARAMAN ; "*Exploring Uranium Resource Constraints on Fissile Material Production in Pakistan*" , Science and Global Security, 17:2-3, 77-108, DOI: 10.1080/08929880902975834 ; 2009
19. Nuclear power in Pakistan; URL: https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/pakistan.aspx
20. Plan for enhanced use of N-energy; URL: https://www.dawn.com/news/260195 ; 2007
21. Kahuta Khan Research Laboratories A.Q. Khan Laboratories Engineering Research Laboratories (ERL) .URL: https://www.globalsecurity.org/wmd/world/pakistan/kahuta.htm
22. Participants of NSG; URL: https://www.nuclearsuppliersgroup.org/en/participants1
23. Past earthquakes in Kahuta ; URL: https://www.volcanodiscovery.com/place/13140/earthquakes/kahuta/archive/1981-05-01-2022-05-02.html
24. Israeli Test on Worm Called Crucial in Iran Nuclear Delay ; URL: https://www.nytimes.com/2011/01/16/world/middleeast/16stuxnet.html?_r=1
25. IAEA Board Report: Implementation of the NPT Safeguards Agreement and relevant provisions of Security Council resolutions in the Islamic Republic of Iran, 18 November 2015; URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/gov-2015-65.pdf
26. The start of the executive operation of 60% enrichment (In Persian). URL: https://www.aeoi.org.ir/portal/home/?news/316140/316157/316403/کمالوندی-عملیات-اجرایی-غنی-سازی-۶۰-درصد-از-امشب-آغاز-می-شود
27. The march toward a nuclear iran; URL: https://www.washingtonpost.com/opinions/the-march-toward-a-nuclear-iran/2011/07/29/gIQAFcypsI_story.htmlc

Scimago Journal & Country Rank; URL : https://www.scimagojr.com/countryrank.php?category=2104&area=2100&year=2021

29. Strategic action law to cancel sanctions and protect the interests of the Iranian nation (In Persian). URL: https://rc.majlis.ir/fa/law/show/1632857