INC31
1404

کتابچه مقالات

۳۱ امین کنفرانس هسته ای ایران

در این کتابچه، مقالات منتخب ارائه‌شده در ۳۱ امین کنفرانس ملی هسته‌ای ایران که از ۲۳ تا ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ در مشهد برگزار شد، خواهید یافت.
امیدواریم آن را مفید و لذت‌بخش بیابید!

مقالات حوزه:

مطالعات راهبردی و نرم

انجمن هسته ای ایران
سازمان انرژی اتمی ایران
پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ایران

پیام رئیس کنفرانس

پژوهشگران گرامی، اساتید ارجمند و همکاران محترم،

مایه افتخار و مسرت بنده است که به عنوان رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران، خیرمقدم گرم و صمیمانه خود را تقدیم شما عزیزان می‌نمایم. در ادامه موفقیت چشمگیر دوره‌های پیشین این کنفرانس، امسال نیز شاهد گردهمایی استثنایی و پربار دانشجویان، پژوهشگران و اندیشمندان برجسته از دانشگاه‌های کشور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران و کارشناسان صنعت هستیم. کنفرانس امسال، باتوجه به بازخوردهای ارزشمند دوره‌های قبل و نیازهای روز جامعه علمی و صنعتی، با رویکردی جامع‌تر و کاربردی‌تر برگزار می‌شود. محورهای متنوع کنفرانس شامل تکنولوژی و ایمنی راکتورهای هسته‌ای، چرخه سوخت، مواد و پسماند هسته‌ای، غنی سازی و تولید ایزوتوپ پایدار، پرتوپزشکی و پزشکی هسته‌ای ،کاربرد پرتوها در صنعت، کاربرد پرتوها در غذا، دامپروری و کشاورزی، شتابدهنده و دستگاه‌های مولد پرتو، آشکارسازی و دزیمتری، فیزیک و فناوری پلاسما و گداخت هسته‌ای، فیزیک هسته‌ای ، فناوری کوانتومی ، مطالعات راهبردی و نرم می‌باشد.با افتخار اعلام می‌کنم که امسال بیش از ۳۷۰ مقاله کامل پذیرفته شده برای ارائه در این کنفرانس خواهیم داشت که از میان ۷۳ ارائه به صورت شفاهی و ۳۰۱ ارائه به صورت پوستر خواهند بود. همچنین با توجه به استقبال گسترده سال‌های گذشته، حدود ۳۰ نشست تخصصی و نیز نمایشگاه جانبی با رویکردی کاربردی‌تر و متنوع‌تر برگزار خواهند شد. پیش‌بینی می‌شود با احتساب فعالیت‌های جانبی، در حدود ۱۰۰۰ پژوهشگر در این رویداد علمی-فرهنگی در شهر مقدس مشهد حضور یابند.یکی از اهداف اصلی کنفرانس امسال، ایجاد پل ارتباطی مؤثرتر میان دانشگاه و صنعت است. ما معتقدیم دستاوردهای علمی زمانی ارزشمندتر خواهند بود که در مسیر حل مسائل واقعی جامعه و صنعت به کار گرفته شوند. از این رو، بخش ویژه‌ای به ارائه فرصت‌های همکاری میان پژوهشگران و صنایع اختصاص یافته است.در پایان، برای تمامی شرکت‌کنندگان، تجربه‌ای سرشار از دستاوردهای علمی، آموزنده و تحول‌آفرین را آرزومندم و امیدوارم این کنفرانس بتواند در ایجاد مسیری هموارتر برای گسترش کاربردهای یافته‌های علمی در صنعت و زندگی روزمره فراهم سازد.

با احترام،

دکتر جواد کریمی ثابت

رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران

برگزار کنندگان:

انجمن هسته‌ای ایران

سازمان انرژی اتمی ایران

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

حمایت کنندگان:

دانشگاه فردوسی مشهد

دانشگاه شهید بهشتی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشگاه صنعتی شریف

دانشگاه شیراز

دانشگاه اصفهان

دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان

دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

شرکت مهندسی و توسعه صنایع انرژی نوین

شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی ایران

تولید مواد اولیه و سوخت هسته‌ای ایران

شرکت مصباح انرژی

شرکت توسعه کاربرد پرتوها

مرکز نظام ایمنی هسته ای کشور

مرکز ملی نظام کیفیت و استانداردسازی اتمی ایران

شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

فهرست مقالات

بررسی تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای (کد مقاله : ۱۲۹۲) ۷

مروری بر ملاحظات پادمانی راکتورهای مدولار کوچک (کد مقاله : ۱۳۲۶) ۱۴

مواد هسته‌ای از نگاه پادمان آژانس و نقطه شروع حسابرسی آن (کد مقاله : ۱۳۳۰) ۲۱

بررسی چالش‌ها و فرصت‌های توسعه‌ی اقتصاد انرژی گداخت هسته‌ای در ایران؛ رویکردی به سوی آینده‌ی پایدار انرژی (کد مقاله : ۱۳۹۵) ۲۷

بررسی سناریوهای پیش روی سیاست هسته ای ایران در دولت جدید ترامپ (کد مقاله : ۱۴۳۵) ۴۷

امنیت هسته‌ای در ایران؛ چالش‌ها و راهکارها (کد مقاله : ۱۴۴۱) ۵۳

بررسی تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای (کد مقاله : ۱۲۹۲)

زرنوشه فراهانی، عارف الدین*[۱]

۱. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

تاب‌آوری، به عنوان توانایی یک سیستم برای پیش‌بینی، پیشگیری، جذب، سازگاری و بازیابی از اختلالات و بازگشت به حالت عادی یا بهتر، نقش حیاتی در تضمین ایمنی و عملکرد پایدار نیروگاه‌های هسته‌ای ایفا می‌کند علی‌رغم تحقیقات فراوان در مورد ایمنی هسته‌ای، شکاف‌های تحقیقاتی در مورد چگونگی یکپارچه‌سازی دانش‌های مختلف برای افزایش تاب‌آوری وجود دارد. .. چالش‌های اصلی، نظیر تعریف و اندازه‌گیری دقیق خسارات در حوادث هسته‌ای ، موانع اجتماعی و فرهنگی که در مسیر تبدیل به یک جامعه پایدار وجود دارند، هنوز به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در این مقاله، به بررسی مفهوم تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای، چالش‌ها و رویکردهای ارتقای و راهکارهای بهبود آن در نیروگاه‌های هسته‌ای آن می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: تاب‌آوری، نیروگاه های هسته‌ای، ایمنی هسته‌ای، حوادث وخیم

Investigating Resilience in Nuclear Power Plants

Zarnousheh Farahani, Arefoddin

۱. Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Nuclear Engineering

Abstract:

Resilience, defined as a system's ability to anticipate, prevent, absorb, adapt to, and recover from disruptions while returning to normal or improved conditions, plays a critical role in ensuring the safety and sustainable performance of nuclear power plants. Despite extensive research on nuclear safety, research gaps remain regarding the integration of diverse knowledge domains to enhance resilience. Major challenges, such as accurately defining and measuring damages during nuclear incidents, as well as social and cultural barriers hindering the transition to a sustainable society, have not yet been thoroughly addressed. This article explores the concept of resilience in nuclear power plants, identifies existing challenges, and examines approaches and practical solutions to enhance and improve resilience in these facilities.

Key words: Resilience, Nuclear Power Plants, Nuclear Safety, Severe Accidents

۱- مقدمه:

فاجعه فوکوشیما دایچی، که ناشی از زمین‌لرزه و سونامی بود، تأثیرات عمیقی بر جامعه و صنعت هسته‌ای گذاشت. این حادثه نه تنها چالش‌های فنی را نمایان کرد، بلکه نیاز به یک رویکرد جدید در مدیریت ریسک و ایمنی را نیز برجسته ساخت. مفهوم تاب‌آوری به معنای توانایی سیستم‌ها برای تحمل و بازیابی از حوادث شدید است و شامل ابعاد اجتماعی، فرهنگی و فنی می‌شود. تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا عدم وجود آن می‌تواند منجر به حوادث شدید و اثرات طولانی‌مدت بر محیط زیست و جوامع انسانی شود. با توجه به افزایشن نیاز به انرژی هسته‌ای به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار، درنظر گرفتن تاب‌آوری این سیستم‌ها ضروری است. علاوه بر این، فقدان اعتماد عمومی به دولت و اپراتورهای نیروگاه‌های هسته‌ای پس از حوادث گذشته، نیاز به رویکردهای جدید و موثر برای افزایش تاب‌آوری را برجسته می‌کند.

نیروگاه‌های هسته‌ای سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که در معرض خطرات و تهدیدات متنوعی قرار دارند. این خطرات می‌توانند منشأ داخلی داشته باشند، مانند نقص فنی تجهیزات یا خطای انسانی، یا منشأ خارجی داشته باشند، مانند بلایای طبیعی (زلزله، سیل، سونامی و طوفان)، حملات تروریستی، جنگ‌های سایبری و یا حتی اختلالات در زنجیره تامین سوخت و قطعات یدکی. تاب‌آوری به عنوان یک ویژگی کلیدی در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های هسته‌ای، برای مقابله با این خطرات و تضمین ایمنی و عملکرد پایدار آنها ضروری است.

۱-۱- تعریف تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای:

تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای به معنای توانایی این سیستم‌ها برای ادامه عملکرد و بازیابی سریع پس از حوادث است. تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای به توانایی پیش‌بینی، پیشگیری، جذب، سازگاری و بازیابی از اختلالات و بازگشت به حالت عادی یا بهتر اطلاق می‌شود. این مفهوم شامل چهار فاز اصلی است:

پیش‌بینی: این رکن شامل شناسایی و ارزیابی مخاطرات بالقوه و سناریوهای محتمل است. این امر نیازمند تحلیل‌های دقیق ریسک، مدل‌سازی‌های پیشرفته و پایش مستمر محیط عملیاتی است.

پیشگیری: این رکن بر اتخاذ تدابیر پیشگیرانه برای کاهش احتمال وقوع حوادث و کاهش شدت آنها متمرکز است. این امر شامل طراحی مقاوم، سیستم‌های ایمنی چندلایه، کنترل‌های کیفی سختگیرانه و برنامه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌شود.

جذب: این رکن به توانایی سیستم برای تحمل و مقابله با اختلالات بدون از دست دادن عملکردهای حیاتی اشاره دارد. این امر نیازمند وجود سیستم‌های پشتیبان، افزونگی در تجهیزات و زیرساخت‌ها و ظرفیت‌های ذخیره‌سازی کافی است.

سازگاری و بازیابی: این رکن به توانایی سیستم برای انطباق با شرایط جدید و بازیابی سریع و موثر از حوادث اشاره دارد. این امر شامل برنامه‌های مدیریت بحران، آموزش‌های تخصصی برای پرسنل، و وجود زیرساخت‌های لازم برای بازیابی سریع است.

۲- چالش‌های ارتقای تاب‌آوری:

ارتقای تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای با چالش‌های متعددی روبرو است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، **پیچیدگی** این سیستم‌ها است. نیروگاه‌های هسته‌ای از هزاران قطعه و زیرسیستم تشکیل شده‌اند که به طور پیچیده‌ای با یکدیگر در ارتباط هستند.

همانطور که در کتاب «طراحی و بهره برداری از نیروگاه های هسته ای[۱]» نوشته‌ی جی.آر. لامارش و آنتونی باراتا، بیان شده، درک کامل اندرکنش‌های بین اجزای مختلف نیروگاه و پیش‌بینی رفتار آنها در شرایط غیرعادی دشوار است.

چالش دیگر، عدم قطعیت است، ماهیت، شدت و احتمال بسیاری از مخاطرات، به ویژه مخاطرات خارجی، با عدم قطعیت بالایی همراه است. به عنوان مثال، پیش‌بینی دقیق شدت یک زلزله یا احتمال وقوع یک حمله تروریستی یا تاثیر دقیق یک پدیده محیطی بر عملکرد نیروگاه، امری چالش‌برانگیز است و بسیار دشوار است. مقاله‌ی «ارزیابی تاب‌آوری نیروگاه های هسته ای در برابر مخاطرات خارجی[۲]» منتشر شده در سال ۲۰۲۰ به بررسی روش‌های ارزیابی تاب‌آوری در برابر خطرات خارجی می‌پردازد و بر پیچیدگی‌های ارزیابی ریسک در شرایط عدم قطعیت بالا تاکید می‌کند.

علاوه بر این، هزینه‌های بالای ارتقای تاب‌آوری نیز یک مانع مهم است. پیاده‌سازی سیستم‌های ایمنی اضافی و ارتقای زیرساخت‌ها و انجام مطالعات و تحلیل‌های پیچیده برای ارتقای تاب‌آوری، می‌تواند بسیار پرهزینه باشد. کتاب «اقتصاد انرژی هسته‌ای[۳]» نوشته‌ی جوسکو به تفصیل به این موضوع پرداخته و نشان می‌دهد که چگونه ملاحظات اقتصادی می‌توانند بر تصمیمات مربوط به ایمنی و تاب‌آوری تاثیر بگذارند.

محدودیت‌های فناوری به عنوان یکی از چالشهای اساسی این حوزه شناخته می‌شود. در برخی موارد، فناوری‌های موجود برای مقابله با برخی مخاطرات خاص کافی نیستند. به عنوان مثال، مقابله با امواج سونامی بسیار بلند یا حملات سایبری پیچیده نیازمند توسعه فناوری‌های جدید است.

عوامل انسانی و یا خطاهای انسانی می‌توانند نقش مهمی در وقوع حوادث داشته باشند. آموزش ناکافی، فرهنگ ایمنی ضعیف و فشار کاری بالا می‌توانند احتمال خطاهای انسانی را افزایش دهند.

تکامل مداوم مقررات و استانداردهای ایمنی می‌تواند چالش‌هایی را برای اپراتورهای نیروگاه‌های هسته‌ای ایجاد کند. سازگاری با این تغییرات و به‌روزرسانی سیستم‌ها نیازمند زمان و منابع قابل توجهی است.

همچنین چالش‌های اجتماعی و پذیرش عمومی به عنوان چالشهای مهم در ارتقای تاب آوری میبایست پرداخته شود. حوادث هسته‌ای گذشته، نگرانی‌هایی را در افکار عمومی نسبت به ایمنی و تاب‌آوری نیروگاه‌های هسته‌ای ایجاد کرده‌اند. ایجاد اعتماد عمومی و جلب حمایت جامعه برای توسعه انرژی هسته‌ای، نیازمند شفافیت، ارتباطات موثر و آموزش عمومی در مورد اقدامات ایمنی و تاب‌آوری در این صنعت است.

۳- الزامات، اجزا و سیستم‌های ضروری برای دستیابی به نیروگاه‌های هسته‌ای تاب‌آور:

برای دستیابی به نیروگاه‌های هسته‌ای تاب‌آور، باید مجموعه‌ای از الزامات، اجزا و سیستم‌های ضروری را در نظر گرفت. در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود:

۳-۱- الزامات:

رویکرد جامع و یکپارچه: تاب‌آوری باید به عنوان یک اصل راهبردی در تمام مراحل طراحی، ساخت، بهره‌برداری و از رده خارج کردن نیروگاه در نظر گرفته شود.

تحلیل‌های دقیق ریسک و آسیب‌پذیری: انجام تحلیل‌های جامع ریسک و آسیب‌پذیری برای شناسایی مخاطرات بالقوه و نقاط ضعف سیستم ضروری است.

فرهنگ ایمنی قوی: ایجاد یک فرهنگ ایمنی قوی که در آن تمام کارکنان به ایمنی متعهد باشند و گزارش‌دهی حوادث و شبه‌حوادث تشویق شود.

همکاری و هماهنگی: همکاری و هماهنگی بین اپراتورهای نیروگاه، نهادهای نظارتی، سازمان‌های دولتی و سایر ذینفعان برای ارتقای تاب‌آوری ضروری است.

یادگیری مستمر: یادگیری از حوادث گذشته و به‌کارگیری درس‌آموخته‌ها برای ارتقای تاب‌آوری ضروری است.

۲-۳- اجزا و سیستم‌های ضروری:

- **طراحی مقاوم[۱]:**

طراحی ضد زلزله: استفاده از اصول مهندسی مقاوم در برابر زلزله، شامل جداسازی لرزه‌ای[۲] [۴] و تحلیل‌های دقیق دینامیکی، برای محافظت از سازه‌ها و تجهیزات در برابر زلزله‌های شدید.

طراحی در برابر سیل و طوفان: در نظر گرفتن سطوح ایمنی مناسب در برابر سیل، طوفان و سونامی، و استفاده از موانع فیزیکی و سیستم‌های زهکشی کارآمد.

طراحی در برابر آتش‌سوزی: استفاده از مواد مقاوم در برابر حریق، سیستم‌های اطفاء حریق خودکار و طراحی مناسب برای جلوگیری از گسترش آتش‌سوزی.

- **سیستم‌های ایمنی چندلایه و متنوع[۳]:**

دفاع در عمق[۴]: این مفهوم، که در گزارش‌های IAEA [۵] به طور مفصل تشریح شده، شامل فلسفه چندین لایه حفاظتی مستقل است که هر کدام برای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو در صورت بروز حادثه طراحی شده‌اند.

سیستم‌های خاموش‌سازی اضطراری راکتور[۵]: این سیستم‌ها باید به صورت خودکار و در سریع‌ترین زمان ممکن، واکنش زنجیره‌ای هسته‌ای را متوقف کنند.

سیستم‌های خنک‌کننده اضطراری قلب[۶]: این سیستم‌ها برای خنک نگه داشتن هسته راکتور در صورت از دست رفتن سیستم خنک‌کننده اصلی طراحی شده‌اند.

سیستم‌های محفظه ایمنی راکتور[۷]: این سیستم‌ها برای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو به محیط زیست در صورت بروز حادثه طراحی شده‌اند.

تنوع و افزونگی[۸] : استفاده از سیستم‌های ایمنی با طراحی‌ها و مکانیزم‌های عملکردی متفاوت (تنوع) و همچنین وجود چندین نسخه از یک سیستم ایمنی (افزونگی) برای افزایش قابلیت اطمینان.

---

۱ Robust Design
۲ Seismic Isolation
۳ Diverse and Redundant Safety Systems
٤ Defense in Depth
٥ Reactor Scram Systems
٦ Emergency Core Cooling Systems - ECCS
۷ Containment Systems
۸ Diversity and Redundancy

- **مدیریت حوادث شدید (SAM[۹]):**

تدوین راهنماها و دستورالعمل‌های مدیریت حوادث شدید[۱۰] [۶]: این راهنماها، که بر اساس تحلیل‌های دقیق و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری تدوین می‌شوند، گام‌های لازم برای کنترل و کاهش پیامدهای حوادث شدید را به اپراتورها آموزش می‌دهند.

آموزش و تمرین پرسنل: برگزاری دوره‌های آموزشی و مانورهای منظم برای آشنایی پرسنل با راهنماهای مدیریت حوادث شدید و ارتقای مهارت‌های آن‌ها در شرایط بحرانی.

تجهیزات ویژه مدیریت حوادث شدید: تامین تجهیزات و ابزارهای لازم برای کنترل و کاهش پیامدهای حوادث شدید، مانند سیستم‌های تخلیه فشار محفظه مهار.

- ✓ سیستم‌های پایش و کنترل پیشرفته: استفاده از سیستم‌های پایش و کنترل پیشرفته برای شناسایی سریع انحرافات از شرایط عادی و اتخاذ اقدامات اصلاحی به موقع.
- ✓ سیستم‌های ارتباطی اضطراری: وجود سیستم‌های ارتباطی اضطراری قابل اعتماد برای برقراری ارتباط بین پرسنل نیروگاه و سازمان‌های خارجی در شرایط بحرانی.
- ✓ ذخیره‌سازی منابع برق و آب خنک‌کننده: ذخیره‌سازی کافی منابع برق و آب خنک‌کننده برای حفظ عملکرد نیروگاه در صورت قطع برق یا اختلال در زنجیره تامین.
- ✓ تجهیزات و زیرساخت‌های پشتیبان: وجود تجهیزات و زیرساخت‌های پشتیبان مانند ژنراتورهای برق اضطراری، پمپ‌های یدکی و سیستم‌های تهویه اضطراری.
- ✓ برنامه‌های مدیریت بحران: تدوین و اجرای برنامه‌های جامع برای مدیریت حوادث شدید و کاهش پیامدهای آنها، شامل برنامه‌های تخلیه اضطراری، پناهگاه‌ها و مراکز کنترل اضطراری.

- **فرهنگ ایمنی قوی[۱۱]:**

آموزش و ارتقای آگاهی: برگزاری دوره‌های آموزشی مستمر برای کارکنان در تمامی سطوح، به منظور ارتقای دانش و آگاهی آن‌ها در مورد اصول ایمنی و تاب‌آوری.

گزارش‌دهی و یادگیری از حوادث: ایجاد سیستمی برای گزارش‌دهی شفاف حوادث و شبه حوادث، و تحلیل دقیق آن‌ها برای شناسایی علل ریشه‌ای و درس‌آموزی.

ارتباطات موثر: ایجاد کانال‌های ارتباطی باز و شفاف بین مدیریت و کارکنان، و همچنین بین نیروگاه و جامعه محلی.

- **استفاده از فناوری‌های نوین: هوش مصنوعی و یادگیری ماشین:**

بهره‌گیری از این فناوری‌ها برای پیش‌بینی و پیشگیری از حوادث، بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های ایمنی و ارتقای قابلیت‌های سیستم‌های پایش و کنترل[۸].

رباتیک و اتوماسیون: استفاده از ربات‌ها برای انجام بازرسی‌ها و تعمیرات در محیط‌های خطرناک، و اتوماسیون فرآیندهای حیاتی برای کاهش خطاهای انسانی.

---

[۹] Severe Accident Management
[۱۰] SAM Guidelines
[۱۱] Strong Safety Culture

سنسورهای پیشرفته: بهره‌گیری از سنسورهای پیشرفته برای پایش دقیق پارامترهای کلیدی نیروگاه و تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها. مقاله «حسگرها و ابزار دقیق نیروگاه های هسته ای» منتشر شده در سال ۲۰۲۰ [۹] به بررسی آخرین پیشرفت‌ها در این زمینه می‌پردازد.

٤- راهکارهای بهبود تاب‌آوری:

در این مقاله برای افزایش تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای، چندین راهکار عملی پیشنهاد شده است:

- تعریف و شناسایی آسیب و خسارت‌ها: اولین گام در افزایش تاب‌آوری، تعریف و شناسایی دقیق خسارات احتمالی در حوادث هسته‌ای است. چارچوب جدید برای شناسایی و توصیف خسارات حوادث هسته‌ای وخیم میبایست ارائه شود. این چارچوب کمک می‌کند تا اقدامات اصلاحی بر اساس تعریف دقیق خسارات انجام گیرد.
- اندازه‌گیری آسیب و خسارت‌ها: اندازه‌گیری دقیق خسارات یکی از عوامل کلیدی در افزایش تاب‌آوری است. روش‌های کیفی و کمی برای اندازه‌گیری خسارات می‌پردازد و تلاش‌های جاری برای توسعه روش‌ها و ابزارهای جدید معرفی شده است. این روش‌ها شامل استفاده از رویکردهای بیزین چندمقیاسی برای نقشه‌برداری آلودگی رادیونوکلئیدها و ارزیابی اقتصادی هزینه‌های حوادث هسته‌ای است.
- استفاده از فناوری‌های نوین: فناوری‌های جدید مانند سیستم‌های نظارت جامع و مدل‌های پیشرفته برای پیش‌بینی شرایط محیطی می‌توانند به افزایش تاب‌آوری کمک کنند. این فناوری‌ها امکان شناسایی سریع حوادث و واکنش مناسب را فراهم می‌کنند.
- آموزش و تمرین: آموزش کارکنان و برگزاری تمرینات منظم برای واکنش به شرایط اضطراری، نقش مهمی در افزایش آمادگی نیروگاه‌ها دارد. این آموزش‌ها باید شامل شبیه‌سازی سناریوهای مختلف باشد تا کارکنان بتوانند با شرایط واقعی آشنا شوند.
- مشارکت عمومی: مشارکت جامعه محلی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی می‌تواند اعتماد عمومی را افزایش دهد. توسعه یک سیستم مدیریت دانش برای انرژی مبتنی بر بازخورد عمومی نشان می‌دهد که چگونه بازخورد عمومی می‌تواند به بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری کمک کند.
- ارزیابی مستمر ریسک: ارزیابی مستمر ریسک‌ها و آسیب‌پذیری‌ها باید جزء جدایی‌ناپذیر مدیریت ایمنی باشد. این ارزیابی‌ها باید بر اساس داده‌های دقیق و تحلیل‌های علمی انجام شود تا بتوانند تغییرات محیطی و فناوری را منعکس کنند.
- یکپارچگی بین رشته‌ای: یکپارچگی دانش‌های مختلف، از جمله علوم طبیعی، مهندسی، علوم اجتماعی و مدیریت بحران، برای ایجاد یک رویکرد جامع در مدیریت ایمنی هسته‌ای ضروری است. این یکپارچگی می‌تواند به شناسایی بهتر ریسک‌ها و توسعه راهکارهای مؤثر کمک کند.
- موانع اجتماعی و فرهنگی : موانعی که در مسیر تبدیل به یک جامعه پایدار وجود دارد، می بایست احصاء شود . این موانع شامل نمایندگی اجتماعی ریسک‌ها، چالش‌های فرهنگی و تعاملات بین بازیگران جامعه مدنی است. برای مثال، موضوعات فرهنگی و چگونگی ارائه صنعت هسته‌ای، و چالش‌های یادگیری از حوادث نشان می‌دهند که چگونه عوامل اجتماعی و فرهنگی می‌توانند بر تاب‌آوری تاثیر بگذارند.
- تصمیم‌گیری در شرایط وخیم: تصمیم‌گیری در شرایط وخیم پس از یک حادثه هسته‌ای از عوامل مهم در افزایش تاب‌آوری است. چالش‌های موجود در فرآیندهای تصمیم‌گیری و اهمیت یکپارچه‌سازی نظارت دقیق و مشارکت عمومی در فرآیندهای

تصمیم‌گیری حائز اهمیت هستند. تصمیم‌گیری در شرایط وخیم و چشم‌انداز اخلاقی نشان می‌دهند که چگونه تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و مشارکتی می‌توانند به افزایش تاب‌آوری کمک کنند.

۵- نتیجه‌گیری:

تاب‌آوری در نیروگاه‌های هسته‌ای یک مفهوم چندوجهی و حیاتی است که نیازمند رویکردی جامع و یکپارچه در تمامی مراحل چرخه عمر این تاسیسات است. با وجود چالش‌های موجود، دستیابی به نیروگاه‌های هسته‌ای تاب‌آور از طریق به‌کارگیری الزامات، اجزا و سیستم‌های ضروری که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شد، امری امکان‌پذیر است. سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، به‌روزرسانی مداوم استانداردها و مقررات، ارتقای فرهنگ ایمنی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، گام‌های اساسی در مسیر ارتقای تاب‌آوری و تضمین ایمنی و عملکرد پایدار نیروگاه‌های هسته‌ای در برابر طیف وسیعی از مخاطرات داخلی و خارجی هستند. این امر نه تنها برای صنعت هسته‌ای، بلکه برای جامعه جهانی که به دنبال منابع انرژی پاک و پایدار است، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۶- منابع:

[۱] Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (۲۰۰۱), Design and Operation of Nuclear Power Plants, CRC Press.

[۲] Resilience Assessment of Nuclear Power Plants against External Hazards, Nuclear Engineering and Design, (۲۰۲۰).

[۳] Joskow, P. L. (۲۰۱۲), The Economics of Nuclear Power, MIT Press.

[٤] Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (۲۰۱۵), Seismic Design of Nuclear Power Plants. John Wiley & Sons.

[٥] International Atomic Energy Agency (IAEA), (۲۰۱٦), Defense in Depth for Nuclear Power Plant Safety, IAEA.

[٦] Sehgal, B. R. (۲۰۱۲), Severe Accident Management in Nuclear Power Plants, Springer.

[۷] Resilience of Nuclear Power Plants to Extreme External Events, Science and Technology of Nuclear Installations, (۲۰۱۸).

[۸] Application of Artificial Intelligence in Nuclear Power Plants, Progress in Nuclear Energy, (۲۰۲۱).

[۹] Advanced Sensors and Instrumentation for Nuclear Power Plants, IEEE Transactions on Nuclear Science, (۲۰۲۰).

مروری بر ملاحظات پادمانی راکتورهای مدولار کوچک (کد مقاله : ۱۳۲۶)

قربانعلی، زهرا[1] – رضایی، حامد[1]

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، اداره کل پادمان هسته‌ای ملی

چکیده:

بسیاری از کشورها یا برنامه‌هایی برای ساختن نسل جدید راکتورهای هسته‌ای دارند یا در حال ساخت آن‌ها هستند. یکی از انواع راکتورهای نوظهور پیشرفته و در حال ورود به بازارهای تجاری برق، راکتورهای کوچک مدولار (SMR) می‌باشند. ویژگی‌های اصلی SMRها که ذاتاً با ماهیت طراحی آن‌ها مرتبط است عبارتند از: کوچک بودن، ساختار مدولار یکپارچه، قابلیت حمل و نقل، راکتورهای متعدد در یک موسسه، سوخت‌گیری خارج از محل، طرح‌های بسیار متنوع، قابلیت استفاده در کشتی‌های بزرگ، قابلیت استفاده در مکان‌های دورافتاده. علیرغم مزایای ذکر شده، ممکن است برخی از چالش‌های پادمان هسته‌ای در به‌کارگیری این راکتورها نمایان شود که خلاصه آن‌ها در این مقاله ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: راکتور مدولار کوچک، پادمان هسته‌ای

A Review of Safeguards Considerations for Small Modular Reactors

Ghorbanali, Zahra[1]* – Rezaei, Hamed[1]

۱. AEOI, National Nuclear Safeguards Department (NNSG)

Abstract:

Many countries either have plans to or are building new generations of nuclear reactors. One type of advanced emerging reactors nowadays entering to commercial electricity markets are small modular reactors (SMRs). The main features of SMRs which are inherently linked to the nature of their designs are included in smallness, integrated modular structure, transportability, having multiple reactors in one facility, offsite refueling, wide variety of designs, capability to be used in huge ships and remote locations. Despite benefits of mentioned features, some nuclear safeguards challenges may appear with utilization of these reactors which are summarized in this paper.

Key words: Small Modular Reactor (SMR), Nuclear Safeguards

۱ - مقدمه:

طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی[۱۲]، اصطلاح راکتور مدولار کوچک[۱۳] به راکتورهای قدرتی اطلاق می‌شود که تا ۳۰۰ مگاوات انرژی الکتریکی تولید می‌کنند و طبق تقاضای مشتری ،اجزا و سامانه‌های آن‌ها به‌طور جداگانه ساخته می‌شوند و سپس به‌عنوان ماژول به محل نصب منتقل می‌گردند [۱].

بیشتر ایده‌های مربوط به طراحی راکتورهای SMRرا می‌توان به پنج دسته کلی دسته‌بندی کرد: الف) SMRهای آب سبک تک واحدی (یکپارچه). ب) SMRهای آب سبک[۱۴] چند ماژول که ظرفیت تولید بیشتری دارند. ج) SMRهای سیار/قابل حمل که به راحتی از مکانی به مکان دیگر منتقل می‌شوند. د) SMRهای نسل چهارم (Gen IV) که از فناوری‌های پیشرفته غیر از LWRاستفاده می‌کنند. ه)راکتورهای میکرو مدولار به طرح‌هایی با ظرفیت کمتر از ۱۰ مگاوات اشاره می‌کنند و اصولاً برای عملیات خارج از شبکه در مکان‌های دورافتاده در نظر گرفته شده‌اند [۲].

از آنجایی که ده‌ها طرح منحصربه‌فرد SMRبرای هر یک از دسته‌های بالا وجود دارد، ارائه تدابیر کلی در مورد اعمال پادمان هسته‌ای بر SMRها دشوار است. در ادامه، خلاصه‌ای از موارد پادمانی مربوط به SMRو روشی برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد ویژگی‌های طراحی از نقطه نظر پادمانی ارائه می‌شود.

۲ - شناسایی چالش‌های پادمانی بالقوه:

با توجه به تنوع طرح‌های SMR، مفاهیم استقرار و سایر عوامل مرتبط، مجموعه ساده‌ای از تدابیر پادمان هسته‌ای وجود ندارد که برای همه سناریوهای استقرار SMRاعمال شود. در ادامه این قسمت، تعدادی از چالش‌های کلیدی مرتبط با این سناریوها شرح داده می‌شود.

۱-۱- مدیریت مواد هسته‌ای و سوخت‌گذاری:

الف) محل سوخت‌گذاری/وجود سوخت در محل: سوخت‌گذاری و سوخت‌برداری تعدادی از SMRها در مکان‌های جدا از محل استقرار آن‌ها انجام می‌گیرد. سپس راکتور سوخت‌گذاری شده به محل عملیات حمل می‌شود. در نتیجه، هیچ سوخت تازه یا مصرف‌شده‌ای در محل استقرار ذخیره نخواهد شد. این امر ممکن است مزایایی به همراه داشته باشد، زیرا راستی‌آزمایی سوخت تازه و مصرف‌شده در محل سوخت‌گذاری انجام می‌گیرد. با این حال، این فعالیت ممکن است به این معنی باشد که مراقبت و نظارت[۱۵] (برای مثال پلمب و دوربین) و سایر تجهیزات پادمانی مربوطه باید در هنگام سوخت‌گذاری روی راکتور نصب شوند.

---

[۱۲] International Atomic Energy Agency (IAEA)

[۱۳] Small Modular Reactor (SMR)

[۱۴] Light Water Reactor (LWR)

[۱۵] Containment and Surveillance (C/S)

اگر این فعالیت در یک کشور دارای سلاح هسته‌ای و بدون راستی‌آزمایی در مبدا (محل سوخت‌گذاری) انجام گیرد جهت حفظ تداوم دانش[۱۶] باید راستی‌آزمایی در مقصد انجام پذیرد.

ب) تناوب سوخت‌گذاری و روش ذخیره‌سازی: برخی از SMRها دوره‌های سوخت‌گذاری بسیار طولانی‌تری نسبت به راکتورهای برق فعلی دارند یا حتی از هسته مادام‌العمر یکبار مصرف برخوردارند. این مورد سبب کاهش فرصت‌های راستی‌آزمایی مستقیم سوخت و افزایش اتکا به C/S جهت حفظ تداوم دانش سوخت در هسته می‌گردد. اگر سوخت‌گذاری به ندرت یا در مکان دیگری انجام شود، ممکن است تعدادی از راکتورهای فعال به تجهیزات جابجایی سوخت در محل مجهز نباشند، و چنین تجهیزاتی معمولا در ناوگانی از SMRهایی که به طور مشابه طراحی شده‌اند به اشتراک گذاشته می‌شوند. در چنین حالتی، در صورت از بین رفتن CoKدر سوخت، بررسی مستقیم مواد هسته‌ای در محل استقرار دشوارتر خواهد بود. راستی‌آزمایی مجدد مستلزم حمل تجهیزات سوخت‌گذاری به محل راکتور، انتقال قلب به محل سوخت‌گذاری مشخص‌شده، یا استفاده از ابزارهای جدید جهت سنجش فضای داخلی مخزن راکتور می‌باشد.

ج) عناصر سوخت: برخی از SMRها از عناصر یا مجموعه‌های سوخت کوچک‌تری نسبت به اکثر نیروگاه‌های هسته‌ای نسل فعلی برخوردار هستند. این بدان معناست که تعداد بیشتری از اقلام سوخت منحصر به فرد باید حذف شوند تا باعث انحراف SQ۱ گردد، و این موضوع ممکن است به نفع پادمان باشد یا نباشد. همچنین برخی از SMRها طرح‌های ذخیره‌سازی سوخت غیر معمول‌تری مانند سوخت مصرف‌شده انباشته به صورت عمودی یا افقی خواهند داشت که می‌تواند تدابیر پادمانی مبتنی بر مشاهده ساده مجموعه‌های سوخت را به چالش بکشد.

د) غنای بالای ۲۰ درصد: استفاده از HEU[۱۷] به عنوان سوخت SMR، چالش به کارگیری مواد شکافت پذیر ویژه را در سلاح‌های هسته‌ای یا سرقت آن‌ها به وجود می‌آورد. استفاده از این مواد نیازمند افزایش فعالیت‌های پادمانی و در نتیجه افزایش هزینه‌ها می‌شود [۳].

۱- ۲- حالت ساخت و تولید راکتور:

SMRها ممکن است در مقایسه با نیروگاه‌های هسته‌ای بزرگتر، از سطح بالاتری از مدولار بودن و یکپارچگی برخوردار باشند. به طوریکه قلب راکتور، خنک‌کننده، مولدهای بخار و سامانه‌های کمکی فشار بالا در یک ظرف فشرده محصور شده‌اند. سطح بسیار بالای یکپارچگی اجزا ممکن است توانایی بازرسان در دسترسی فیزیکی به سامانه‌های خاص برای انجام بازرسی یا راستی‌آزمایی اطلاعات طراحی محدود کند. به ویژه اگر مواد هسته‌ای در محل ساخت راکتور مورد استفاده قرار نگیرد، دسترسی بازرسان به آن محل محدود می‌شود [۴].

---

[۱۶] Continuity of Knowledge (CoK)

[۱۷] High Enriched Uranium

۱- ۳- هم مکانی ماژول‌های راکتور:

در حالی که نیروگاه‌های هسته‌ای فعلی اغلب دارای چندین واحد نزدیک به هم در یک سایت هستند، SMRها ممکن است چندین واحد در یک سالن راکتور داشته باشند، یعنی شاید از یک توربین بخار، یک ماشین سوخت، یک استخر سوخت مصرف‌شده، یا سایر تجهیزات کمکی و پشتیبانی به صورت مشترک استفاده کنند. این پیکربندی ممکن است امکان بهره‌برداری متنوع‌تری را برای موسسه فراهم کند که این امر سبب پیچیده‌تر شدن اقداماتی مانند راستی‌آزمایی اطلاعات طراحی یا مراقبت و نظارت گردد.

۱- ۴- مکان‌های استقرار دور افتاده یا موارد استفاده غیر معمول:

استقرار SMRها به ویژه در مکان‌هایی که حمل و نقل سوخت‌های فسیلی گران یا دشوار است، مانند مکان‌های دور افتاده در قطب شمال، استقرار در یک کشتی دریایی یا پایگاه نظامی و یا فعالیت راکتور با حداقل کارکنان می‌تواند با سخت کردن دسترسی به راکتورها، محدود کردن زیرساخت‌ها/پشتیبانی بازرسان در دسترسی به محل و کاهش پتانسیل فعالیت‌های راستی‌آزمایی اعلام‌نشده، بازرسی‌های پادمانی را دشوارتر و پرهزینه‌تر کند.

۱- ۵- قابلیت حمل و نقل:

برخی از SMRها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که قابلیت حمل یا جابجایی داشته باشند و امکان نصب بسیار سریع‌تری (در حد روزها و هفته‌ها برای میکروراکتورهای خاص) فراهم می‌کنند. از برخی جهات، تدابیر پادمانی برای یک راکتور قابل حمل پلمپ شده می‌تواند با یک کسک سوخت مصرف شده[۱۸] شباهت‌هایی داشته باشد. با این حال، راکتورهای قابل حمل به رویه‌های پیچیده‌تر آژانس در مورد پرسشنامه اطلاعات طراحی و راستی‌آزمایی اطلاعات طراحی، برنامه‌ریزی پادمانی و احتمالاً ردیابی مکان نیاز دارند، به‌ویژه اگر راکتورها از یک کشور به کشور دیگر ارسال شوند.

۱- ۶- صادرات از کشورهای دارنده سلاح هسته‌ای[۱۹] به کشورهای فاقد سلاح هسته‌ای[۲۰] :

صادرات راکتورهای بسیار یکپارچه یا راکتورهای مجهز به سوخت از یک NWSبه یک NNWSممکن است چالش‌های ویژه‌ای ایجاد کند. اگر تامین‌کننده NWSبه طور کامل اعمال پادمان را در کشور خود تسهیل نکند، معضلات احتمالی شامل بازرسی از موجودی اولیه سوخت، نصب تجهیزات مراقبت و نظارت، و اظهار/راستی‌آزمایی اطلاعات طراحی می‌باشد [۴]. مفاهیم حقوقی مختلفی برای ارائه اطلاعات پادمانی لازم و دسترسی در چنین شرایطی وجود دارد.

۱- ۷- دیگر چالش‌ها:

SMRها ممکن است چالش‌های سامانه‌ای دیگری برای پادمان معرفی کنند که مختص به موسسه مربوطه نمی‌شوند. به عنوان مثال، هزینه‌های پادمانی به ازای هر مگاوات ظرفیت نصب شده برای SMRها به دلیل نیاز به بررسی تعداد بیشتری از موسسات مجهز به این راکتورها بیشتر است. SMRها (به ویژه SMRهای قابل حمل) ممکن است تازه‌واردان به صنعت هسته‌ای را قادر

[۱۸] Spent Fuel Cask
[۱۹] Nuclear Weapon State (NWS)
[۲۰] Non-Nuclear Weapon State (NNWS)

سازند تا برنامه‌های انرژی هسته‌ای را به صورت شتاب‌زده توسعه دهند و زمان کمتری برای ظرفیت‌سازی در تعامل و اجرای پادمان اختصاص دهند.

۱- ۸- راکتیویته اضافی:

یک راکتور SMR که برای تناوب کم تعویض سوخت طراحی شده است احتمالاً طراحی قلب آن به گونه‌ای است که در شروع، راکتیویته اضافی زیاد و همچنین جاذب‌های نوترون سوختنی[۲۱] زیادی دارند. چنین قلبی ممکن است قابلیت تابش‌دهی یک هدف[۲۲] بدون تأثیر بر پارامترهای کلیدی بهره‌برداری را داشته باشد به طوریکه ردیابی تابش‌دهی قابل نظارت نباشد. بنابراین طراحی راکتور باید به گونه ای باشد که امکان راستی‌آزمایی این موضوع که قرار دادن قطعه هدف و برداشت آن در قلب راکتور وجود نداشته را برآورده کند [۳].

۲ - ارائه نتایج بدست دسته‌بندی طرح‌های SMRبر اساس ویژگی‌های پادمانی آن‌ها:

هر طرح SMRزیرمجموعه‌های متفاوتی از این ملاحظات پادمانی را در بر می‌گیرد. نویسندگان این مقاله در ادامه، چگونگی توسعه یک مجموعه داده را بر اساس اطلاعات منبع باز جهت دستیابی به این مورد تشریح کرده است:

ویژگی‌های اساسی: این ویژگی‌ها شامل قدرت راکتور، نوع راکتور، ویژگی‌های سوخت (نوع، شکل، غنا)، وضعیت طراحی (به عنوان مثال طراحی پیش مفهومی، طراحی مفهومی، طراحی تفصیلی، ارائه‌شده برای دریافت پروانه، در دست ساخت، عملیاتی) و طرح‌های استقرار می‌باشد.

میکروراکتور: نشان می‌دهد که این راکتور قدرت الکتریکی کمتر از ۱۰ مگاوات تولید می‌کند.

حالت سوخت‌گذاری: نحوه سوخت‌گذاری و نحوه دسترسی به سوخت در محل راکتور را نشان می‌دهد. دسته‌بندی آن عبارت است از:

- سوخت‌گذاری دسته‌ای[۲۳] رایج: سوخت‌گذاری دسته‌ای هر ۵-۰ سال یکبار.
- قلب با عمر طولانی: سوخت‌گذاری دسته‌ای با فواصل بیش از ۵ سال.
- قلب با عمر طولانی: سوخت‌گذاری دسته‌ای با فواصل بیش از ۵ سال.
- هسته یکبار مصرف با سوخت‌گذاری در محل.
- سوخت‌گذاری خارج از محل در یک موسسه مشخص.
- سوخت‌گذاری برخط.

حالت ساخت‌وساز و حمل‌ونقل: حالت ساخت و قابلیت حمل‌ونقل یک SMRرا می‌توان در گروهای مختلفی دسته‌بندی کرد، مانند:

- ساخت و ساز معمول: راکتور در محل عملیات از اجزای تفکیک شده ساخته می‌شود.

سامانه اصلی مدولار: سیستم اصلی از چند ماژول یکپارچه تشکیل شده است.

---

[۲۱] Burnable absorbers
[۲۲] target
[۲۳] Batch refueling

سامانه اصلی یکپارچه: سامانه اصلی اساساً به عنوان یک واحد ساخته شده مجزا ارسال می‌شود.

- حمل با سوخت: سامانه اصلی به طور کاملا یکپارچه و قبل از ارسال به سایت راکتور سوخت‌گذاری می‌شود.
- راکتور متحرک: راکتور به ساخت‌وساز بسیار کمتری نیازمند است و طوری طراحی شده که به صورت سوخت‌گذاری شده بین سایت‌های عملیاتی جابجا می‌شود.

موسسات چند واحدی: راکتور با چندین واحد هم‌مکان یا مرتبط از نظر عملکردی در حال عملیات باشد.

استقرار غیر معمول: راکتور برای استفاده در یک کشتی دریایی، در یک مکان دور افتاده طراحی می‌شود.

بهره‌برداری خودکار: راکتور بدون حضور مستمر کارکنان در آن محل عملیات انجام دهد.

جدول ۱ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان این معیارها را برای طراحی یک راکتور به کار برد. در این مورد، این معیارها برای طراحی یک میکروراکتور قابل حمل خنک‌شونده با لوله حرارتی که در یک گزارش فنی در سال ۲۰۱۵ توسط آزمایشگاه ملی لوس آلاموس اظهار شده است، بررسی شده‌اند [۵].

جدول ۱. مثال استفاده از معیارهای جمع‌آوری داده‌ها بر اساس منبع [۵].

ردیف	ویژگی	توضیحات	ردیف	ویژگی	توضیحات
۱	قدرت	۵ مگاوات حرارتی	۷	فواصل سوخت‌گذاری	۵ سال (با قدرت کامل موثر)
۲	نوع راکتور	راکتور سریع خنک‌شونده با لوله حرارتی	۸	حالت ساخت و ساز/ عملیات	راکتور سیار
۳	مرحله طراحی	مفهومی	۹	موسسات چند واحدی	در منبع ذکر نشده است
۴	سوخت	قرص‌های دی‌اکسید اورانیوم در مونولیت فولادی (غنا<۲۰٪)	۱۰	استقرار غیر معمول	برای تامین برق تاسیسات نظامی و غیرنظامی دورافتاده/موقت
۵	میکروراکتور	بله	۱۱	بهره‌برداری خودکار	در منبع ذکر نشده است
۶	حالت سوخت‌گذاری	سوخت‌گذاری خارج از محل	۱۲	برنامه استقرار	در منبع ذکر نشده است

۳ - نتیجه گیری:

در طول دهه آینده، SMRهای بیشتری به مرحله استقرار خواهند رسید، و پادمان نیازمند پیاده‌سازی مفاهیم و رویکردهای جدید یا اقتباس شده برای مقابله با چالش‌هایی مانند آنچه در بخش ۲ مورد بررسی قرار گرفت، خواهد بود. درک ویژگی‌های

طراحی راکتورهای نوظهور می‌تواند به ذینفعان کمک کند تا این مورد را به طور مؤثر اولویت‌بندی کنند. برخی از زمینه‌های مورد توجه عبارتند از:

- شناسایی و اطمینان از پذیرش اقدامات قانونی یا سیاستی مناسب برای تسهیل پادمان در سناریوی صادرات این نوع راکتور از NWSبه NNWS. این مورد به ویژه برای SMRهای قابل حمل مجهز به سوخت بسیار مهم است.
- تعهدات پادمانی برای حمل یک سامانه کامل مجهز به سوخت نیازمند ابزارهای بازرسی جدیدی خواهد بود.
- اعمال پادمان بر SMRهایی که برای چندین دهه به هیچ نوع دسترسی به قلب یا سوخت‌گذاری نیاز ندارند، مشکلاتی برای راستی‌آزمایی مجدد سوخت‌ها در صورت از بین رفتن تداوم دانش در زمینه دسترسی و راستی‌آزمایی ایجاد می‌کند.
- آژانس در حال توسعه فرآیندی برای در نظر گرفتن ملاحظات پادمان هسته‌ای در تمام مراحل موسسات هسته‌ای می‌باشد. این مراحل طراحی اولیه مفهومی تا ساخت، بهره‌برداری و از کاراندازی آن‌ها را در بر می‌گیرد. فرآیند مذکور «پادمان از مرحله طراحی[۲۴]» نامیده می‌شود. SBDیک اقدام اختیاری از طرف کشور متعهد به پادمان است و برای انواع موسسات هسته‌ای کاربرد دارد. این فرآیند با توجه به مشکلات خاص پادمانی SMRها بیشتر توصیه می‌شود، بدین معنی که تعامل بین آژانس و طراحان این راکتورها (البته از طریق مسئولین پادمان کشور) زودتر آغاز شود تا نکات چالش‌برانگیز در نقطه شروع شناسایی و راه‌حل‌های مناسب برای آن‌ها انتخاب شود. باید توجه داشت این به معنای الزامات جدید پادمانی نیست بلکه تسهیل اجرای بهینه الزامات موجود است.

۴ - مراجع:

[۱] Subki, Hadid. "Advances in small modular reactor technology developments." (۲۰۲۰)

[۲] Vaya Soler, Antonio, et al. "Small modular reactors: Challenges and opportunities." (۲۰۲۱).

[۳] Virgili, Nicole. "The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards." Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation (VCDNP), Vienna (۲۰۲۰).

[٤] Donnelly, David A., et al. "IAEA design information verification authorities for small modular reactors: Potential challenges and solutions." ١٤th International Nuclear Fuel Cycle Conference, GLOBAL ٢٠١٩ and Light Water Reactor Fuel Performance Conference, TOP FUEL ٢٠١٩. ٢٠٢٠.

[٥] McClure, P., D. Poston, and V. R. Dasari. "Design of megawatt power level heat pipe reactors: LA-UR-١٥-٢٨٨٤٠." Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM (٢٠١٥).

[۲۴] Safeguards By Design (SBD)

مواد هسته‌ای از نگاه پادمان آژانس و نقطه شروع حسابرسی آن (کد مقاله : ۱۳۳۰)

فلاحت‌راد، بهمن* – میرزائی، ابراهیم

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، اداره‌کل پادمان هسته‌ای ملی

چکیده:

بر اساس موافقت‌نامه پادمان جامع، صلح‌آمیز بودن فعالیت‌های هسته‌ای کشورهای فاقد سلاح هسته‌ای عضو پیمان منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای (NPT) توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی راستی‌آزمایی می‌شود. هدف این راستی‌آزمایی، اطمینان از منحرف نشدن مواد هسته‌ای اظهار شده کشورها به سمت ساخت سلاح هسته‌ای یا سایر سامانه‌های انفجاری هسته‌ای است. از آنجایی‌که در این موافقت‌نامه، پادمان بر تمامی مواد هسته‌ای موجود در فعالیت‌های صلح‌آمیز هسته‌ای کشورها اعمال می‌شود، لذا ضرورت دارد انواع مواد هسته‌ای تحت شمول پادمان و نحوه اعمال آن بر مواد هسته‌ای به‌خوبی شناخته شده تا ضمن پیش‌گیری از تفاسیر گوناگون، تعهدات پادمانی کشور به‌درستی اجرا شود. از این‌رو در این مقاله ضمن اشاره به روند تدریجی گسترش نظام راستی‌آزمایی پادمان و همچنین تبیین واژه «مواد هسته‌ای» در موافقت‌نامه‌ها و اسناد پادمانی آژانس، سعی شده تا گستره اعمال پادمان و نقطه شروع حسابرسی مواد هسته‌ای معرفی شود.

کلمات کلیدی: معاهدهٔ منع گسترش، مواد هسته‌ای، پادمان هسته‌ای و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی

Nuclear Material Definition in the scope of IAEA's Safeguards and the starting points for applying its accounting for

Falahatrad, Bahman - Mirzaei, Ebrahim

Iran Nuclear Regulatory Authority (INRA), National Nuclear Safeguards Department

Abstract:

The IAEA's verification activities are carried out based on the Comprehensive Safeguards Agreement in non-nuclear-weapon States that are parties to the Treaty on the Non-Proliferation of nuclear weapons. These activities are carried out with the aim of ensuring that the declared nuclear materials of the States are not diverted to nuclear weapons or other nuclear explosive devices. Since in this agreement, safeguards are applied to all nuclear materials in peaceful nuclear activities of the States, it is necessary to have a precise understanding of nuclear materials covered by safeguards and how it is applied to different types of nuclear materials in order to avoid broad interpretations and to ensure that the implementation of the country's safeguards obligations is carried out correctly. Therefore, this article, while referring to the gradual process of expanding the safeguards verification regime and also explaining the term "nuclear material" in the Agency's safeguards agreements and documents, attempts to present the scope of safeguards application and the starting point for nuclear material accounting.

Key words: Non-Proliferation Treaty, Nuclear Material, Nuclear Safeguards, and the International Atomic Energy Agency (IAEA)

۱ - مقدمه:

اصطلاح «پادمان» برای اولین بار در سال ۱۹۴۵ برای توصیف فعالیت‌هایی استفاده شد که هدف آن جلوگیری از انحراف مواد هسته‌ای موجود در فعالیت‌های صلح‌آمیز به سمت ساخت سلاح هسته‌ای بود. رئیس‌جمهور وقت ایالات متحده آمریکا و نخست‌وزیران وقت بریتانیا و کانادا در ۱۵ نوامبر۱۹۴۵ طی «اعلامیه موافقت‌شده درباره انرژی اتمی»، نسبت به انتشار اطلاعات خاص درباره کاربرد غیرصلح‌آمیز انرژی اتمی هشدار داده و همچنین خواستار اعمال پادمان قابل پذیرش برای همه کشورها شدند [۱].

در ابتدا تنها بین کشورهایی که تعاملات و همکاری‌های هسته‌ای داشتند، موافقت‌نامه‌های دوجانبه‌ای برای رعایت ملاحظات اعلامیه یادشده منعقد می‌شد. بیشتر این موافقت‌نامه‌ها بین ایالات متحده آمریکا و سایر کشورها بود، اما پس از آن اتحاد جماهیر شوروی، بریتانیا، فرانسه، کانادا و سایر تأمین‌کنندگان مواد هسته‌ای نیز چنین رویه‌ای را دنبال نمودند. با این حال، موافقت‌نامه‌های دوجانبه ایالات متحده پیش‌بینی می‌کرد که مسئولیت اعمال پادمان می‌تواند به آژانس بین‌المللی انرژی اتمی که در سال ۱۹۵۷ تأسیس شد، منتقل شود. در نهایت، در اوایل ۱۹۶۰ مسئولیت اعمال پادمان به آژانس محول شد [۱].

انتقال مسئولیت‌های پادمانی به آژانس، منجر به شکل‌گیری چارچوب‌های حقوقی و نظام پادمانی مرتبط شد. شورای حکام آژانس در سال ۱۹۶۱ سندی را با عنوان «اصول و رویه‌های الحاق و اعمال پادمان توسط آژانس» تصویب نمود که پس از بررسی و بازنگری، در قالب مدرکی با عنوان «اولین سند پادمان» معرفی شد. این سند تنها اعمال پادمان بر راکتورهای کوچک (تا توان ۱۰۰ مگاوات) را پوشش می‌داد. آژانس اولین بار در سال ۱۹۶۲ بر اساس این سند یک راکتور تحقیقاتی نروژ را بازرسی کرد. در سال ۱۹۶۵ سند جدیدی تصویب شد که اعمال پادمان بر تمام راکتورها با هر توانی در آن پیش‌بینی شده بود. سپس، در سال‌های ۱۹۶۶ و ۱۹۶۸، شورای حکام آژانس این سند را برای پوشش‌دهی کارخانه‌های ساخت سوخت و بازفرآوری به‌¬روزرسانی کرد . مطابق این سند، فعالیت‌های هسته‌ای کشورها بر اساس موافقت‌نامه‌های همکاری هسته‌ای صلح‌جویانه دوجانبه یا چندجانبه، و یا به طور داوطلبانه و به درخواست کشور عضو بازرسی پادمانی می‌شد. به عبارت دیگر، در آن برهه از زمان، آن دسته از فعالیت‌های هسته‌ای که کشورها با توانایی‌های داخلی خود به آن دست می‌یافتند، شامل نظارت‌های پادمانی آژانس نمی‌شد [۱].

در ۱ ژوئیه ۱۹۶۸، پس از تأیید مجمع عمومی سازمان ملل متحد، پیمان منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای تصویب و از مارس ۱۹۷۰ لازم الاجرا شد. این پیمان، حاصل توافق بین ایالات متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی بود که متعاقباً توسط سایر کشورها در کمیته خلع سلاح ژنو تقویت شد. بر اساس این پیمان، کشورهای فاقد سلاح هسته‌ای (تمامی کشورها به جز پنج کشور دارنده سلاح هسته‌ای در آن زمان، یعنی چین، فرانسه، بریتانیا، ایالات متحده آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی) که به این پیمان می‌پیوندند، موظف به انعقاد موافقت‌نامه با آژانس برای اعمال پادمان بر تمامی فعالیت‌های هسته‌ای صلح‌آمیز خود می‌شوند [۲].

هدف از اعمال پادمان پیش‌بینی شده در این پیمان، راستی‌آزمایی اجرای تعهدات کشورهای عضو برای جلوگیری از انحراف انرژی هسته‌ای از مصارف صلح‌آمیز به سمت سلاح‌های هسته‌ای یا سایر سامانه‌های انفجاری هسته‌ای است. بر اساس این پیمان، کشورهای غیرهسته‌ای از استفاده از انرژی هسته‌ای برای مصارف نظامی غیر انفجاری مانند زیردریایی‌های هسته‌ای یا سایر

شناورهای دریایی با پیشران هسته‌ای منع نمی‌شوند. همچنین، تمامی کشورهایی که به این پیمان ملحق می‌شوند، متعهد می‌شوند که مواد هسته‌ای یا سایر اقلامی را که به طور خاص برای فرآوری، استفاده یا تولید مواد شکافت‌پذیر ویژه طراحی شده‌اند، به هیچ کشور فاقد سلاح هسته‌ای برای اهداف صلح‌آمیز صادر نکنند، مگر اینکه زیر پوشش پادمان آژانس باشد [۳].

پس از لازم‌الاجرا شدن این پیمان، اولین وظیفه آژانس تهیه یک موافقت‌نامه استاندارد بود که می‌توانست در مذاکرات با کشورها برای اعمال پادمان بر همه فعالیت‌های صلح‌آمیز کشورهای فاقد سلاح هسته‌ای استفاده شود. شورای حکام آژانس پیش از پایان سال ۱۹۷۰، یک «موافقت‌نامه الگو»را تهیه و تصویب کرد که به نام «موافقت‌نامه پادمان جامع» شناخته می‌شود. در تنظیم این موافقت‌نامه، شورا از تجربه اسناد پادمانی قبلی آژانس بهره برد که در اواسط دهه ۱۹۶۰ تنظیم شده بودند. اسناد پادمانی پیشین، در حال حاضر نیز به عنوان مبنای موافقت با کشورهایی که عضو پیمان منع گسترش سلاح هسته‌ای نیستند، استفاده می‌شوند [۲].

هدف اصلی این موافقت‌نامه راستی‌آزمایی منحرف نشدن مواد هسته‌ای به سمت ساخت جنگ‌افزارهای هسته‌ای است. با توجه به روند رو به رشد فعالیت‌های هسته‌ای کشورها، مقدار مواد هسته‌ای مشمول اعمال پادمان و به تبع آن فعالیت‌های راستی‌آزمایی آژانس افزایش یافته است. برای شناخت بهتر تعهدات پادمانی کشورها، تشریح دقیق مواد هسته‌ای مشمول اعمال پادمان امری ضروری است. در این مقاله به بیان ملاحظات فنی و حقوقی نقطه شروع اعمال پادمان و مواد هسته‌ای مشمول حسابرسی هسته‌ای آژانس پرداخته می‌شود.

۲ - مواد هسته‌ای از منظر اسناد آژانس بین‌المللی انرژی اتمی:

۲-۱- اساسنامه آژانس

اعمال پادمان مطابق اساسنامه آژانس ، کشور عضو را ملزم به حفظ و ایجاد سوابق عملیاتی برای حسابرسی «مواد چشمه» و «مواد شکافت‌پذیر ویژه» مورد استفاده یا تولید شده در فعالیت‌های هسته¬ای کشور می‌کند. به عبارت دیگر، مطابق اساسنامه آژانس، تعهدات کشورها بر روی حسابرسی مواد چشمه و مواد شکافت‌پذیر ویژه متمرکز است و عبارت «مواد هسته‌ای» در این اساسنامه تعریف نشده است.

در اساسنامه آژانس «مواد شکافت‌پذیر ویژه» به پلوتونیوم-۲۳۹؛ اورانیوم-۲۳۳، اورانیوم غنی‌شده در ایزوتوپ‌های ۲۳۵ یا ۲۳۳؛ هر نوع موادی که محتوی یک یا چند مورد از مواد مذکور بوده و هرگونه مواد شکافت‌پذیر دیگری که شورای حکام هر چند مدت یک‌بار تعیین می‌نماید، گفته می‌شود . همچنین «مواد چشمه» به اورانیوم حاوی ترکیب ایزوتوپ‌های موجود در طبیعت، اورانیوم تهی‌شده در ایزوتوپ-۲۳۵؛ توریوم، هر یک از مواد یادشده به شکل فلز، آلیاژ، ترکیبات شیمیایی یا کنسانتره، هر مواد دیگری که از یک یا چند ماده فوق به مقدار غلظتی که شورای حکام هر چند مدت یک‌بار تعیین می‌نماید، تشکیل شده باشد و نیز هر مواد دیگری که شورای حکام هر چند مدت یک‌بار اعلام می‌نماید، گفته می‌شود . این مواد را از آن جهت «مواد چشمه» می‌نامند که منشاء یا مواد اولیه تولید مواد شکافت‌پذیر ویژه به روش‌های غنی‌سازی یا بازفرآوری هستند.

۲-۲- پیمان منع گسترش سلاحهای هستهای:

مطابق پیمان منع گسترش سلاح هسته¬ای، تعهدات پادمانی کشورهای فاقد سلاح معطوف به اعمال پادمان بر مواد چشمه یا مواد شکاف‌پذیر ویژه است که در هر موسسه هسته‌ای یا در خارج از آن تولید، فرآوری و یا استفاده شده‌اند. به عبارت دیگر، در

مشابهت با اساسنامه آژانس، پیمان منع گسترش سلاح¬های هسته¬ای بر اعمال پادمان بر «مواد شکافت‌پذیر ویژه» و «مواد چشمه» تصریح نموده و تعریف مواد هسته‌ای در متن این پیمان نیز ذکر نشده است.

۲-۳- موافقت‌نامه پادمان جامع:

اجرای پادمان پیش¬بینی شده در پیمان منع گسترش سلاح¬های هسته¬ای، طبق موافقت‌نامه پادمان جامع صورت می¬پذیرد. در این موافقت‌نامه، مواد هسته‌ای به مواد چشمه یا هر ماده شکافت‌پذیر ویژه‌ای گفته می‌شود که مطابق اساسنامه آژانس تعریف می‌شوند. عبارت مواد چشمه شامل سنگ‌معدن (کانی‌ها) یا باقی‌مانده آنها نمی‌شود. پس از لازم‌الاجرا شدن این موافقت‌نامه، هر تصمیمی از طرف شورای حکام که موجب الحاق موادی به عنوان مواد چشمه یا مواد شکافت‌پذیر ویژه شود، تنها پس از موافقت کشور موثر واقع خواهد شد . به این ترتیب، عبارت «مواد هسته‌ای» در موافقت‌نامه پادمان جامع، به عنوان یک واژه جدید برای «مواد شکافت‌پذیر ویژه» و «مواد چشمه» تعریف می‌شود که از قبل نیز در اساسنامه آژانس و پیمان منع‌گسترش گنجانده شده بود.

۳- تعهدات پادمانی در خصوص اطلاع رسانی و حسابرسی مواد هسته‌ای:

پس از بیان تعریف موجود برای واژه «مواد هسته¬ای» به تشریح تعهدات پادمانی کشورها برپایه موافقت¬نامه پادمان جامع پرداخته می¬شود. در این موافقت¬نامه نقطه شروع و نحوه اعمال پادمان برای تمامی مواد هسته¬ای یکسان نبوده به سه بخش زیر تقسیم¬ شده است. در این تقسیم¬بندی باید توجه شود که در اعمال پادمان سطوح مختلفی وجود دارد به گونه¬ای که در سطح ابتدایی آن صرفاً اطلاع¬رسانی به آژانس بدون اعمال حسابرسی بر بخشی از مواد هسته¬ای و در سطح بعدی، با حسابرسی هسته¬ای بر بخش دیگری از مواد هسته¬ای انجام می-شود.

۱-۳- مواد هسته¬ای مشمول عدم اعمال پادمان:

بر اساس موافقت¬نامه پادمان جامع، پادمان بر مواد هسته¬ای موجود در فعالیت¬های معدن¬کاری یا فرآوری سنگ‌معدن اعمال نمی‌شود. به عبارت دیگر مواد تولید شده در کارخانجات تغلیظ اورانیوم و توریوم مانند «کیک زرد» که به عنوان مواد چشمه شناخته می¬شوند مشمول اعمال پادمان تحت موافقت¬نامه پادمان جامع نیستند.

۲-۳- مواد هسته¬ای مشمول اطلاع¬رسانی به آژانس:

بر اساس موافقت¬نامه پادمان جامع، هرگاه مواد دارای اورانیوم یا توریوم که به مرحله چرخه سوخت هسته‌ای نرسیده و مناسب برای ساخت سوخت و یا غنی¬سازی ایزوتوپی نیستند، به طور مستقیم یا غیرمستقیم به یک کشور غیردارنده سلاح هسته‌ای صادر یا از آن وارد شوند، آن کشور باید مقدار و ترکیب آن را به آژانس اطلاع دهد، مگر آن که این مواد برای اهداف خاص غیرهسته‌ای صادر یا وارد شده باشد . به عبارت دیگر صادرات یا واردات چنین مواد هسته¬ای (کیک زرد) برای مصارف هسته¬ای مشمول حسابرسی هسته¬ای نبوده و تنها اعمال پادمان بر آن¬ها معطوف به اطلاع¬رسانی واردات و صادرات آن¬ها است. بدیهی است واردات و صادرات این مواد¬ هسته¬ای برای مصارف غیرهسته¬ای مانند ساخت سرامیک مشمول اعمال پادمان نیست.

۳-۳- مواد هسته¬ای مشمول اعمال حسابرسی:

بر اساس موافقت¬نامه پادمان جامع، هرگاه مواد هسته‌ای با ترکیب و خلوص مناسب برای تولید سوخت یا غنی‌سازی ایزوتوپی، از کارخانه یا مرحله فرآیندی که در آن تولید گشته، خارج شود، یا هرگاه این‌گونه مواد هسته‌ای یا هر نوع مواد هسته‌ای دیگر تولید شده در مراحل بعدی چرخه سوخت هسته‌ای، وارد کشور شوند، مشمول اعمال حسابرسی هسته¬ای برطبق این موافقت‌نامه خواهد شد .

بر این اساس، ملاحظه می¬شود نقطه شروع اعمال حسابرسی بر مواد هسته¬ای زمانی است که توأمان «ترکیب» و «خلوص» چنین موادی برای تولید سوخت یا غنی¬سازی ایزوتوپی مناسب باشد. به عبارتی هرگاه یکی از مشخصه¬های «ترکیب» یا «خلوص» مواد هسته¬ای مناسب برای تولید سوخت یا غنی¬سازی ایزوتوپی نباشد، پادمان بر آن اعمال نمی¬شود. به عنوان نمونه می¬توان به کیک زرد با خلوص بالا اشاره نمود که علی¬رغم مناسب بودن خلوص آن برای ساخت سوخت هسته¬ای، ولی به دلیل ترکیب نامناسب آن جهت استفاده در سوخت هسته¬ای، مشمول اعمال حسابرسی هسته¬ای تا قبل از ورود آن به مرحله فرآوری اورانیوم نیست.

حال به این موضوع پرداخته می¬شود که اعمال حسابرسی هسته¬ای در مؤسسات تبدیلات اورانیوم از چه نقطه¬ای آغاز خواهد شد. برای پاسخ دادن به این سؤال و با رجوع به سوابق مذاکراتی موجود و نظرات اندیشمندان حوزه عدم اشاعه مشخص می‌شود که دیدگاه¬های مختلفی در این خصوص وجود دارد.

دیدگاه اول که هم‌سو با رویه اجرایی آژانس نیز هست، مبتنی بر این است که اعمال حسابرسی هسته¬ای هنگامی شروع می¬شود که کیک زرد به مؤسسات تبدیل اورانیوم و خالص¬سازی آن، وارد شده و در مرحله تولید نیترات اورانیل قرار گرفته که شرایط «ترکیب» و «خلوص» آن مناسب برای تولید سوخت است . اما به دلیل نبود محدودیت¬های فرآیندی در اعمال حسابرسی، نقطه شروع پادمان به مرحله ورود خوراک کیک زرد در کارخانه تبدیل اورانیوم منتقل می¬شود. به عبارت دیگر تا قبل از خوراک¬دهی کیک زرد به کارخانه تبدیل اورانیوم، مکان نگه¬داری چنین موادی حسابرسی نمی‌شود.

دیدگاه دوم تفسیر متفاوتی از نقطه شروع اعمال حسابرسی هسته¬ای ارائه می¬دهد. در این دیدگاه با استناد به موافقت¬نامه پادمان این‌گونه تفسیر شده که حسابرسی مواد هسته¬ای با ترکیب و خلوص مناسب برای تولید سوخت یا غنی‌سازی ایزوتوپی، زمانی شروع می‌شود که این مواد از «کارخانه یا مرحله فرآیندی که در آن تولید شده‌اند»، خارج شده باشند. بر این اساس، نقطه شروع حسابرسی هسته¬ای در کارخانه تبدیل اورانیوم اولین مرحله¬ای است که ماده هسته¬ای با ترکیب و خلوص مناسب برای تولید سوخت یا غنی¬سازی ایزوتوپی از فرآیند خارج می¬شود. باوجود این، در اسناد داخلی آژانس، نقطه شروع حسابرسی هسته¬ای به نحوی تفسیر شده که این نقطه شروع، به جای اعمال بر اولین محصول خروجی از فرآیند تبدیل اورانیوم، به کیک زرد به عنوان خوراک ابتدایی تغییر یابد.

۴- بحث و نتیجه گیری:

بر اساس موافقت¬نامه پادمان جامع، پادمان در سطح مختلفی بر مواد هسته¬ای اعمال می¬شود. در بخشی از مواد چشمه که شامل مواد هسته¬ای تولید شده در کارخانجات تغلیظ اورانیوم و توریوم است، پادمان اعمال نمی‌شود. در سطحی دیگر و برای مواد هسته¬ای مورد استفاده در چرخه سوخت هسته¬ای (با کاربردهای هسته¬ای) که ترکیب و خلوص آن¬ها مناسب برای

ساخت سوخت و یا غنی¬سازی ایزوتوپی نیست (یعنی محصولات تولیدی کارخانجات تغلیظ اورانیوم و توریوم)، پادمان صرفاً در حد ارسال اعلامیه اطلاع¬رسانی صادرات یا واردات آن مواد به/از کشور به آژانس اعمال شده و مشمول حسابرسی هسته¬ای نیست. در سطحی دیگر، آن دسته از مواد هسته¬ای حسابرسی پادمانی می‌شوند که مشخصه¬های «ترکیب» و «خلوص» آن‌ها برای تولید سوخت یا غنی-سازی ایزوتوپی مناسب باشد. چنین حسابرسی نیازمند ارائه گزارش‌های حسابرسی توسط کشور و راستی¬آزمایی آن¬ها توسط آژانس است.

۵- مراجع:

[۱] ZASZ, P.C., The Law and Practices of the International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna (۱۹۷۰) ۱۲.

[۲] History of the International Atomic Energy Agency: the first forty years / by David Fischer. Vienna: The Agency, ۱۹۹۷.

[۳] INFCIRC/۱٤۰, IAEA, Treaty on The Non-Proliferation of Nuclear Weapons, ۲۲ April ۱۹۷۰.

[٤] INFCIRC/٦٦/Rev.۲, IAEA, THE AGENCY SAFEGUARDS SYSTEM (۱۹٦٥, As Provisionally Extended In ۱۹٦٦ and ۱۹٦۸), ۱٦ September ۱۹٦۸.

[٥] INFCIRC/۱٥۳ (Corrected), IAEA, THE STRUCTURE AND CONTENT OF AGREEMENTS BETWEEN THE AGENCY AND STATES REQUIRED IN CONNECTION WITH THE TREATY ON THE NON-PROLIFERATION OF NUCLEAR WEAPONS, Reprinted by the IAEA in Austria June ۱۹۷۲.

[٦] Moving the starting point of nuclear safeguards, Cindy Vestergaard, Danish Institute for International Studies, ۳ Mar. ۲۰۱٥.

[۷] Capturing the Starting Point: Evolving Nuclear Safeguards and the Front End of the Nuclear Fuel Cycle, Technical Report, Stimson Center, July ۲۰۱۸.

بررسی چالش‌ها و فرصت‌های توسعه‌ی اقتصاد انرژی گداخت هسته‌ای در ایران؛ رویکردی به سوی آینده‌ی پایدار انرژی (کد مقاله : ۱۳۹۵)

نیکوصفت، محمد[۱*]- تقی‌پور نیار، پریسا [۲]

۱. دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم وفنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده

انرژی گداخت هسته‌ای، با تولید انرژی عظیم و پاک از طریق فرآیند همجوشی هسته‌ای، به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین راه‌حل‌ها برای چالش‌های انرژی آینده جهان شناخته می‌شود. ایران، با برخورداری از پتانسیل‌های علمی، نیروی انسانی متخصص و تجربه موفق در توسعه فناوری‌های هسته‌ای، می‌تواند به یکی از پیشگامان این عرصه نوظهور تبدیل شود. این مقاله با بررسی چالش‌های فنی، مالی و آموزشی پیش‌روی ایران، فرصت‌های استراتژیک این فناوری را تحلیل می‌کند، از جمله کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، ایجاد صنایع پیشرفته، اشتغال‌زایی و تقویت جایگاه ایران در بازار انرژی جهانی. همچنین، راهکارهای عملی برای توسعه این فناوری ارائه می‌شود، همچون تقویت زیرساخت‌های تحقیقاتی، آموزش نیروی انسانی، جذب سرمایه‌گذاری و تدوین سیاست‌های کلان انرژی. با توجه به پتانسیل‌های موجود و برنامه‌ریزی هدفمند، ایران می‌تواند با توسعه انرژی گداخت هسته‌ای، گام‌های بلندی در جهت تحقق اقتصاد انرژی پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی بردارد و به عنوان یکی از بازیگران اصلی در این حوزه نوین انرژی ایفای نقش کند.

کلمات کلیدی: انرژی گداخت هسته‌ای، اقتصاد انرژی، توسعه پایدار، فناوری همجوشی، ایران، انرژی پاک.

Examining the Challenges and Opportunities of Developing the Fusion Energy Economy in Iran: A Path Toward a Sustainable Energy Future

Nikoosefat, Mohammad[۱*], Taghipour Niar, Parisa[۲]

۱- Comprehensive University of Imam Hossein, Faculty of Basic Science, Nuclear Physics Group.

۲- AEOI, Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Applications Research School.

Abstract

Nuclear fusion energy, which generates massive and clean energy through the fusion process, is recognized as one of the most promising solutions to the world's future energy challenges. With its scientific potential, skilled workforce, and successful experience in nuclear technology development, Iran has the capability to become a leading player in this emerging field. This paper examines the technical, financial, and educational

challenges Iran faces while analyzing the strategic opportunities that fusion technology offers, including reducing dependence on fossil fuels, fostering advanced industries, creating employment, and strengthening Iran's position in the global energy market. Furthermore, practical strategies for developing this technology are presented, such as enhancing research infrastructure, training human resources, attracting investment, and formulating comprehensive energy policies. Given Iran's existing potential and strategic planning, the country can take significant steps toward achieving a sustainable fusion energy economy, mitigating environmental impacts, and positioning itself as a key player in this innovative energy sector.

Keywords: Nuclear fusion energy, energy economy, sustainable development, fusion technology, Iran, clean energy.

۱. مقدمه

۱-۱- اهمیت انرژی گداخت هسته‌ای در آینده انرژی جهانی:

انرژی گداخت هسته‌ای به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع انرژی پاک و پایدار در آینده جهانی مطرح شده است. این فناوری با تقلید از فرآیندهای طبیعی که در خورشید رخ می‌دهد، قادر است مقادیر عظیمی از انرژی را بدون تولید گازهای گلخانه‌ای یا پسماندهای رادیواکتیو بلندمدت آزاد کند. با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و ضرورت کاهش انتشار کربن، گداخت هسته‌ای می‌تواند نقش کلیدی در تأمین انرژی پایدار و امن ایفا کند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA)، گداخت هسته‌ای پتانسیل آن را دارد که تا پایان قرن حاضر، بخش قابل توجهی از نیازهای انرژی جهان را برآورده سازد [۱].

با این حال، دستیابی به انرژی گداخت هسته‌ای با چالش‌های فنی و اقتصادی قابل توجهی همراه است. کنترل و نگهداری پلاسما در دماهای بسیار بالا، توسعه مواد مقاوم در برابر شرایط شدید و کاهش هزینه‌های ساخت راکتورهای گداخت از جمله موانع اصلی هستند. پروژه‌های بین‌المللی مانند ITER (راکتور آزمایشی گرماهسته‌ای بین‌المللی) در حال پیشبرد این فناوری هستند و پیش‌بینی می‌شود که تا دهه ۲۰۵۰، اولین راکتورهای گداخت تجاری به بهره‌برداری برسند. با تحقق این هدف، انرژی گداخت هسته‌ای می‌تواند تحولی اساسی در سیستم انرژی جهانی ایجاد کند و راه‌حلی پایدار برای بحران‌های انرژی و محیط‌زیست ارائه دهد [۲].

۱-۲- ضرورت توجه به این فناوری در ایران:

با توجه به افزایش روزافزون نیاز ایران به منابع انرژی پایدار و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توجه به فناوری گداخت هسته‌ای به عنوان یک راه‌حل بلندمدت ضروری به نظر می‌رسد. ایران با دارا بودن منابع غنی انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین تجربه‌های موفق در حوزه فناوری هسته‌ای، پتانسیل بالایی برای ورود به این عرصه نوین دارد. گداخت هسته‌ای به دلیل تولید انرژی عظیم بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای و پسماندهای رادیواکتیو خطرناک، می‌تواند نقش مهمی در تحقق اهداف توسعه

پایدار و کاهش آلایندگی محیط‌زیست ایفا کند. بر اساس مطالعات سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، ایران می‌تواند با سرمایه‌گذاری در این فناوری، گامی بلند در جهت تنوع بخشیدن به سبد انرژی خود بردارد [۳].

با این حال، توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در ایران نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، سرمایه‌گذاری کلان و همکاری‌های بین‌المللی است. پروژه‌های جهانی مانند ITER نشان داده‌اند که پیشرفت در این حوزه مستلزم مشارکت کشورهای مختلف و انتقال دانش فنی است. ایران می‌تواند با استفاده از ظرفیت‌های علمی و فنی موجود در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی، به ویژه سازمان انرژی اتمی ایران، گام‌های اولیه را در این مسیر بردارد. به گفته محققانی چون دکتر احمدی در کتاب «انرژی هسته‌ای و آینده انرژی جهان»، ورود به فناوری گداخت هسته‌ای نه تنها یک ضرورت استراتژیک، بلکه فرصتی برای قرار گرفتن در خط مقدم تحولات انرژی جهانی است. با توجه به این موارد، ایران می‌تواند با اتخاذ سیاست‌های هوشمندانه، جایگاه خود را در آینده انرژی جهان تثبیت کند [۴].

۲. مروری بر فناوری گداخت هسته‌ای

۲-۱- اصول علمی همجوشی هسته‌ای:

همجوشی هسته‌ای فرآیندی است که در آن دو هسته‌ی سبک، معمولاً ایزوتوپ‌های هیدروژن مانند دوتریوم و تریتیوم، تحت شرایط دما و فشار بسیار بالا به یک هسته‌ی سنگین‌تر تبدیل می‌شوند و در این فرآیند، مقدار عظیمی انرژی آزاد می‌گردد. این فرآیند مشابه واکنش‌هایی است که در خورشید و سایر ستارگان رخ می‌دهد. برای دستیابی به همجوشی، باید شرایط پلاسما (حالت چهارم ماده) فراهم شود، که در آن الکترون‌ها از هسته‌ها جدا شده و گاز یونیزه‌شده‌ای با دمای بیش از ۱۰۰ میلیون درجه سانتیگراد ایجاد می‌شود. بر اساس مطالعات منتشر شده در مجله‌ی Nature Physics، کنترل و نگهداری پلاسما در میدان‌های مغناطیسی قوی، یکی از چالش‌های اصلی در دستیابی به همجوشی پایدار است [۵].

از نظر تئوری، همجوشی هسته‌ای مزایای قابل توجهی نسبت به شکافت هسته‌ای دارد. این فرآیند نه تنها انرژی بیشتری تولید می‌کند، بلکه پسماندهای رادیواکتیو آن کم‌عمرتر و کم‌خطرتر هستند. همچنین، سوخت مورد نیاز برای همجوشی، مانند دوتریوم، به راحتی از آب دریا استخراج می‌شود و تریتیوم نیز می‌تواند در داخل راکتور تولید شود. با این حال، دستیابی به شرایط پایدار برای همجوشی به دلیل نیاز به دما و فشار بسیار بالا و کنترل دقیق پلاسما، هنوز در مرحله‌ی آزمایشی قرار دارد. به گفته‌ی محققان در مقاله‌ای از Journal of Fusion Energy ، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های محصورسازی مغناطیسی و لیزر، امیدواری‌ها برای دستیابی به همجوشی عملی را افزایش داده‌اند. این پیشرفت‌ها می‌توانند راه را برای توسعه‌ی اقتصادی انرژی همجوشی هموار کنند [۶].

۲-۲- مقایسه با انرژی شکافت هسته‌ای:

انرژی گداخت هسته‌ای و انرژی شکافت هسته‌ای هر دو از فرآیندهای هسته‌ای برای تولید انرژی استفاده می‌کنند، اما از نظر اصول علمی، ایمنی و پایداری تفاوت‌های قابل توجهی دارند. در شکافت هسته‌ای، هسته‌های سنگین مانند اورانیوم-۲۳۵ به هسته‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند و انرژی آزاد می‌کنند. این فرآیند اگرچه در حال حاضر به عنوان یک منبع انرژی کارآمد مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما با چالش‌هایی مانند تولید پسماندهای رادیواکتیو بلندمدت و خطرات ناشی از حوادث هسته‌ای

همراه است. بر اساس مطالعه‌ای در مجله‌ی Progress in Nuclear Energy، مدیریت پسماندهای رادیواکتیو و خطرات مرتبط با گسترش سلاح‌های هسته‌ای از جمله نگرانی‌های اصلی انرژی شکافت هستند [۷].

در مقابل، انرژی گداخت هسته‌ای از ترکیب هسته‌های سبک مانند دوتریوم و تریتیوم برای تولید انرژی استفاده می‌کند. این فرآیند نه تنها انرژی بیشتری نسبت به شکافت تولید می‌کند، بلکه پسماندهای آن عمدتاً هلیوم غیررادیواکتیو و مقادیر محدودی از تریتیوم هستند که خطرات زیست‌محیطی بسیار کمتری دارند. علاوه بر این، گداخت هسته‌ای به دلیل نیاز به شرایط بسیار خاص برای وقوع واکنش، ذاتاً ایمن‌تر است و خطر حوادث فاجعه‌بار مانند ذوب شدن راکتور را ندارد. به گفته‌ی محققان در مقاله‌ای از Renewable and Sustainable Energy Reviews ، گداخت هسته‌ای پتانسیل آن را دارد که به عنوان یک منبع انرژی پایدار و ایمن، جایگزین مناسبی برای شکافت هسته‌ای و سوخت‌های فسیلی باشد. با این حال، چالش‌های فنی و اقتصادی دستیابی به گداخت پایدار هنوز نیاز به تحقیقات و توسعه‌ی بیشتر دارد [۸].

۲-۳- پیشرفت‌های جهانی در این زمینه:

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در توسعه‌ی فناوری گداخت هسته‌ای به‌عنوان یک منبع پایدار و پاک برای تولید انرژی صورت گرفته است. یکی از مهم‌ترین پروژه‌های بین‌المللی در این حوزه، راکتور آزمایشی بین‌المللی گداخت هسته‌ای (ITER) است که در فرانسه و با مشارکت کشورهای پیشرو از جمله اتحادیه اروپا، چین، هند، ژاپن، کره جنوبی، روسیه و ایالات متحده در حال ساخت است. این پروژه با هدف دستیابی به تولید انرژی پایدار از طریق گداخت مغناطیسی طراحی شده و موفقیت آن می‌تواند مسیر تجاری‌سازی نیروگاه‌های گداخت را هموار کند [۹].

علاوه برITER ، برخی شرکت‌های خصوصی نیز در حال توسعه‌ی راکتورهای کوچک‌تر و کارآمدتر هستند. به‌عنوان مثال، شرکت‌های Commonwealth Fusion Systems (CFS) و Tokamak Energy از ابررساناهای دمای بالا برای ایجاد میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر و بهبود پایداری پلاسما استفاده می‌کنند. این پیشرفت‌ها می‌توانند بهره‌وری راکتورهای گداختی را افزایش داده و زمان دستیابی به تولید برق از این فناوری را کاهش دهند [۱۰].

در حوزه‌ی گداخت اینرسی، آزمایشگاه ملی لاورنس لیورمور (LLNL) در ایالات متحده موفق شد در دسامبر ۲۰۲۲ به «احتراق خودپایدار» در یک سامانه‌ی گداخت لیزری دست یابد. این دستاورد که در مرکز تسهیلات احتراق ملی (NIF) حاصل شد، امکان تولید انرژی بیش از مقدار ورودی را نشان داد و یکی از موانع اساسی در مسیر تجاری‌سازی این فناوری را برطرف کرد [۱۱].

همچنین، پژوهش‌ها بر روی سوخت‌های جایگزین مانند دوتریوم-هلیوم-۳ در حال انجام است که می‌تواند تولید نوترون‌های پرانرژی را کاهش داده و مانع از آسیب به دیواره‌ی راکتور شود. در این راستا، پروژه‌هایی مانند DEMO در اروپا و SPARC در ایالات متحده به‌عنوان مراحل تکاملی پس از ITER در حال توسعه هستند. این برنامه‌ها با هدف ایجاد نیروگاه‌های گداختی عملیاتی تا دهه‌ی ۲۰۵۰ طراحی شده‌اند و می‌توانند مسیر تولید برق تجاری از گداخت هسته‌ای را هموار کنند. به‌طور کلی، پیشرفت‌های جهانی در این حوزه شامل بهبود کنترل پلاسما، طراحی راکتورهای پیشرفته، توسعه‌ی مواد مقاوم در برابر نوترون

و روش‌های نوین گرمایش پلاسما است. این تحولات نه‌تنها مسیر تجاری‌سازی گداخت را هموار می‌کنند، بلکه فرصت‌های مهمی را برای کشورهایی مانند ایران جهت مشارکت در این فناوری و توسعه‌ی زیرساخت‌های مورد نیاز فراهم می‌سازند [۱۲].

۳- چالش‌های توسعه انرژی گداخت هسته‌ای در ایران

۳-۱- موانع فنی و علمی:

پیچیدگی‌های فیزیکی و مهندسی سامانه‌های گداخت: فرایند گداخت هسته‌ای مستلزم دماهای فوق‌العاده بالا (بیش از ۱۰۰ میلیون درجه کلوین) و محصورسازی پایدار پلاسما است. روش‌های اصلی برای محصورسازی، ازجمله محصورسازی مغناطیسی (توکامک، استلراتور) و محصورسازی لختی (با استفاده از لیزرهای پرقدرت)، نیازمند فناوری‌های پیشرفته و توسعه‌یافته هستند. در ایران، محدودیت‌های زیرساختی و تجربی در این حوزه چالش مهمی محسوب می‌شود [۱۳].

محدودیت‌های تحقیقاتی و فناوری‌های بومی: ایران دارای زیرساخت‌های علمی در حوزه‌ی فیزیک پلاسما و مهندسی هسته‌ای است، اما توسعه‌ی فناوری‌های گداخت نیازمند سرمایه‌گذاری گسترده در تحقیق و توسعه (R&D) و ایجاد آزمایشگاه‌های پیشرفته است. کمبود منابع مالی و عدم دسترسی به تجهیزات مدرن مانند مگنت‌های ابررسانا و لیزرهای پرانرژی از موانع جدی در این مسیر هستند [۱۴].

چالش‌های مواد و مهندسی پیشرفته: سامانه‌های گداخت هسته‌ای در معرض شارهای نوترونی شدید هستند که موجب تخریب مواد سازه‌ای می‌شود. توسعه‌ی مواد مقاوم در برابر این شرایط، مانند فولادهای خاص و کامپوزیت‌های سرامیکی، نیازمند تحقیق در سطح بالاست. در حال حاضر، ایران در تولید برخی از این مواد وابسته به فناوری‌های خارجی است [۱۵].

محدودیت‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های عددی: شبیه‌سازی‌های دقیق برای طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های گداخت ضروری هستند. نرم‌افزارهای پیشرفته مانند COMSOL، ANSYS و نرم‌افزارهای اختصاصی گداخت در مراکز تحقیقاتی بین‌المللی توسعه یافته‌اند، اما محدودیت در دسترسی به این ابزارها و کمبود متخصصان با تجربه در زمینه‌ی دینامیک پلاسما و هیدرودینامیک محاسباتی از چالش‌های مهم است [۱۶].

وابستگی به همکاری‌های بین‌المللی: پروژه‌های بزرگ گداخت مانند ITER و NIF نیازمند مشارکت چندملیتی و سرمایه‌گذاری‌های کلان هستند. ایران به دلیل تحریم‌ها و محدودیت‌های سیاسی، امکان عضویت در این پروژه‌ها را ندارد، که این امر تبادل دانش و فناوری را دشوار می‌کند [۱۷].

۳-۲- نیاز به سرمایه‌گذاری کلان:

هزینه‌های بالای تحقیق و توسعه (R&D): فناوری گداخت هسته‌ای به دلیل ماهیت پیچیده و پیشرفته‌ی خود، نیازمند سرمایه‌گذاری کلان در تحقیق و توسعه است. ساخت و بهره‌برداری از سامانه‌های آزمایشی مانند توکامک‌ها، استلراتورها و سامانه‌های محصورسازی لختی، هزینه‌های هنگفتی را به همراه دارد. برای مثال، پروژه‌ی بین‌المللی ITER تاکنون بیش از ۲۵ میلیارد دلار هزینه داشته است. در ایران، تأمین چنین بودجه‌ای از طریق منابع دولتی یا خصوصی با چالش‌هایی مانند محدودیت‌های اقتصادی، تحریم‌ها و اولویت‌بندی سایر بخش‌های انرژی مواجه است [۱۸].

هزینه‌های زیرساختی و تجهیزات پیشرفته: اجرای برنامه‌های گداخت نیازمند تأسیس مراکز تحقیقاتی مجهز به ابزارهای پیشرفته مانند مگنت‌های ابررسانا، ژنراتورهای پالس ولتاژ بالا، لیزرهای پرقدرت و راکتورهای تست مواد در برابر تابش نوترونی است. کشورهای پیشرو مانند ایالات متحده، چین و اتحادیه‌ی اروپا سالانه میلیاردها دلار برای توسعه‌ی این فناوری هزینه می‌کنند. اما در ایران، کمبود تجهیزات مدرن و وابستگی به واردات فناوری‌های حساس، موانع جدی در این مسیر ایجاد کرده است [۱۹].

هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سامانه‌های گداخت: حتی پس از راه‌اندازی یک سامانه‌ی گداخت، هزینه‌های عملیاتی آن به‌طور مداوم بالا خواهد بود. مصرف بالای انرژی برای گرم‌کردن و پایدارسازی پلاسما، نیاز به سامانه‌های خنک‌کاری پیشرفته و نگهداری مداوم اجزای تحت تابش، چالش‌هایی هستند که بر هزینه‌های کلی پروژه می‌افزایند [۲۰].

چالش‌های تأمین سرمایه‌گذاری بخش خصوصی: جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در فناوری گداخت به دلیل دوره‌ی بازگشت سرمایه‌ی طولانی و عدم اطمینان از زمان رسیدن به بهره‌وری اقتصادی، بسیار دشوار است. در کشورهای توسعه‌یافته، دولت‌ها با ارائه‌ی مشوق‌های مالی و معافیت‌های مالیاتی، سرمایه‌گذاران را به ورود به این حوزه ترغیب می‌کنند. در ایران، نبود یک مدل اقتصادی مشخص و پایدار برای سرمایه‌گذاری در انرژی گداخت، یکی از موانع کلیدی در تأمین منابع مالی به شمار می‌رود [۲۱].

تأثیر تحریم‌های اقتصادی بر تأمین مالی و انتقال فناوری: تحریم‌های بین‌المللی، دسترسی ایران به منابع مالی بین‌المللی و مشارکت در پروژه‌های گداخت مانند ITER را محدود کرده است. این موضوع باعث می‌شود که تأمین فناوری‌های پیشرفته، قطعات حساس و سرمایه‌گذاری خارجی با دشواری‌های جدی همراه باشد. در چنین شرایطی، ایران نیازمند تدوین راهبردهای جایگزین برای تأمین مالی و توسعه‌ی بومی فناوری‌های موردنیاز است [۲۲].

۳-۳- چالش‌های آموزشی و نیروی انسانی متخصص:

کمبود متخصصان در حوزه‌ی گداخت هسته‌ای: فناوری گداخت هسته‌ای به دانش پیشرفته در زمینه‌های فیزیک پلاسما، مهندسی هسته‌ای، مواد پیشرفته، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و فناوری‌های برودتی نیاز دارد. با وجود پیشرفت‌های ایران در علوم هسته‌ای، تعداد متخصصان آموزش‌دیده در این حوزه هنوز محدود است. درحالی‌که کشورهای پیشرو مانند ایالات متحده و اتحادیه‌ی اروپا، برنامه‌های آموزشی گسترده‌ای برای تربیت نیروی انسانی در این بخش دارند، در ایران، برنامه‌های تخصصی محدود به برخی دانشگاه‌های برتر است و هنوز نیاز به گسترش و تقویت دارد [۲۳].

نبود دوره‌های آموزشی جامع و تخصصی: در کشورهای توسعه‌یافته، برنامه‌های آموزشی در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری به‌طور مستقیم بر روی فناوری‌های گداخت متمرکز شده‌اند. دانشگاه‌های معتبری مانند MIT و دانشگاه آکسفورد، دوره‌های تخصصی در زمینه‌ی فیزیک گداخت و مهندسی توکامک ارائه می‌دهند. در ایران، اگرچه برخی دانشگاه‌ها دوره‌هایی در حوزه‌ی فیزیک پلاسما و مهندسی هسته‌ای دارند، اما آموزش جامع و متمرکز بر گداخت هنوز به‌صورت گسترده در دسترس نیست [۲۴].

کمبود آزمایشگاه‌های آموزشی و تحقیقاتی پیشرفته: آموزش عملی در زمینه‌ی گداخت مستلزم دسترسی به آزمایشگاه‌های پیشرفته‌ی پلاسما، سامانه‌های محصورسازی مغناطیسی و تجهیزات تخصصی است. درحال‌حاضر، ایران در برخی حوزه‌های

تحقیقاتی فیزیک پلاسما فعالیت دارد، اما نبود امکاناتی مانند راکتورهای آزمایشی توکامک در مقیاس صنعتی، محدودیت‌هایی را برای تربیت نیروی انسانی متخصص ایجاد کرده است [۲۵].

مهاجرت نخبگان و چالش‌های حفظ نیروهای متخصص: یکی از موانع بزرگ توسعه‌ی نیروی انسانی در حوزه‌ی گداخت، مهاجرت نخبگان به کشورهای دارای امکانات تحقیقاتی پیشرفته است. بسیاری از فارغ‌التحصیلان ایرانی در حوزه‌ی فیزیک پلاسما و مهندسی هسته‌ای برای ادامه‌ی فعالیت‌های تحقیقاتی خود به کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی مهاجرت می‌کنند. این روند باعث کاهش ظرفیت علمی و عملی کشور در توسعه‌ی فناوری گداخت می‌شود [۲۶].

وابستگی به همکاری‌های بین‌المللی برای آموزش و تبادل دانش: پروژه‌های بزرگ گداخت مانند ITER به‌شدت وابسته به همکاری‌های بین‌المللی و انتقال دانش هستند. کشورهایی مانند چین، کره‌ی جنوبی و هند، از طریق مشارکت در این پروژه‌ها، نیروی انسانی خود را آموزش داده و فناوری‌های مرتبط را توسعه داده‌اند. با توجه به تحریم‌ها و محدودیت‌های همکاری علمی ایران در این زمینه، دسترسی به دانش روز دنیا و تربیت نیروهای متخصص با موانعی جدی مواجه است [۲۷].

۳-۴- مسائل ایمنی و محیط زیستی:

چالش‌های ایمنی در سامانه‌های گداخت: با وجود اینکه گداخت هسته‌ای برخلاف شکافت، فاقد خطر واکنش‌های زنجیره‌ای مهارنشدنی است، اما همچنان چالش‌های ایمنی قابل‌توجهی دارد. حفظ پایداری پلاسما در دماهای بسیار بالا (بیش از ۱۰۰ میلیون درجه‌ی کلوین) و جلوگیری از ناپایداری‌های مغناطیسی در توکامک‌ها، یکی از مهم‌ترین مسائل ایمنی در این فناوری است. در ایران، با توجه به محدودیت در تجربه‌ی عملیاتی و تحقیقاتی در این زمینه، مدیریت این چالش‌ها به‌طور کامل بررسی نشده است [۲۸].

تولید و مدیریت مواد پرتوزا: اگرچه گداخت هسته‌ای پسماندهای پرتوزای بلندعمر مانند شکافت تولید نمی‌کند، اما برخی از اجزای داخلی راکتور، به‌ویژه دیواره‌ی اولیهٔ آن که در معرض برخورد نوترون‌های پرانرژی قرار دارد، به‌مرور زمان پرتوزا می‌شود. استفاده از مواد کم‌فعال (low-activation materials) و توسعه‌ی روش‌های بهینه برای مدیریت این پسماندها، چالشی است که نیازمند تحقیق و توسعه‌ی پیشرفته است. ایران در این زمینه هنوز نیاز به ایجاد زیرساخت‌های تخصصی برای مدیریت مواد پرتوزای حاصل از واکنش‌های گداخت دارد [۲۹].

تأثیرات زیست‌محیطی و مصرف منابع: گداخت هسته‌ای برخلاف انرژی‌های فسیلی، آلایندگی کربنی ندارد و در بلندمدت می‌تواند به‌عنوان یک منبع انرژی پایدار عمل کند. بااین‌حال، مصرف بالای آب برای سامانه‌های خنک‌کاری و کنترل دمای اجزای داخلی، می‌تواند در مناطقی با محدودیت منابع آبی، چالش‌ساز باشد. ایران که با بحران کمبود آب روبه‌رو است، نیازمند ارزیابی دقیق تأثیرات زیست‌محیطی و یافتن راهکارهای جایگزین برای خنک‌کاری این سامانه‌ها است [۳۰].

چالش‌های ایمنی هیدروژن و تریتیوم: تریتیوم، یکی از سوخت‌های کلیدی در راکتورهای گداخت، ماده‌ای رادیواکتیو با نیمه‌عمر ۱۲.۳ سال است که در صورت نشت، می‌تواند به محیط‌زیست و انسان آسیب برساند. کنترل دقیق نشت تریتیوم و طراحی سامانه‌های مدیریت و بازیافت آن، از جمله مسائل ایمنی در فناوری گداخت است. در ایران، با توجه به محدودیت در

زیرساخت‌های تحقیقاتی در این زمینه، توسعه‌ی روش‌های ایمن‌سازی ذخیره و بازیافت تریتیوم یک چالش اساسی محسوب می‌شود [۳۱].

الزامات قانونی و استانداردهای ایمنی بین‌المللی: کشورهای پیشرو در حوزه‌ی گداخت، استانداردهای ایمنی سخت‌گیرانه‌ای را برای طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سامانه‌های گداخت اجرا می‌کنند. سازمان‌هایی مانند آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و مقررات ایمنی هسته‌ای اروپا، دستورالعمل‌های جامعی برای مدیریت ریسک در این حوزه ارائه کرده‌اند. ایران برای توسعه‌ی انرژی گداخت، نیازمند تدوین استانداردهای ملی و همگام‌سازی مقررات ایمنی با معیارهای بین‌المللی است [۳۲].

۴- فرصت‌های اقتصادی و استراتژیک برای ایران

۴-۱- کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی:

تأمین پایدار انرژی و امنیت انرژی ملی: ایران با داشتن ذخایر عظیم نفت و گاز، یکی از بازیگران اصلی در بازار انرژی جهان است. بااین‌حال، اتکا به منابع فسیلی نه‌تنها موجب ناپایداری اقتصادی در بلندمدت می‌شود، بلکه به دلیل کاهش ذخایر و نوسانات قیمت جهانی، امنیت انرژی کشور را نیز تهدید می‌کند. توسعه‌ی فناوری گداخت هسته‌ای به ایران این امکان را می‌دهد که یک منبع انرژی پایدار، کم‌کربن و قابل‌اتکا برای آینده ایجاد کند [۳۳].

افزایش ارزش افزوده و کاهش خام‌فروشی: با توسعه‌ی انرژی گداخت، ایران می‌تواند از منابع فسیلی خود نه‌تنها برای تولید برق، بلکه برای صنایع پتروشیمی، تولید فرآورده‌های با ارزش‌افزوده بالا و حتی به‌عنوان ذخیره‌ی استراتژیک برای صادرات استفاده کند. درحالی‌که بسیاری از کشورهای جهان به سمت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی حرکت می‌کنند، توسعه‌ی فناوری‌های جایگزین مانند گداخت می‌تواند نقش کلیدی در آینده‌ی اقتصاد انرژی ایران ایفا کند [۳۴].

کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های ناشی از آلودگی: مصرف گسترده‌ی سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های ایران، منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی شدید هوا، به‌ویژه در کلان‌شهرها شده است. گداخت هسته‌ای یک منبع انرژی پاک است که می‌تواند به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و آلودگی محیط‌زیست کمک کند. با کاهش آلودگی، هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی ناشی از مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی نیز کاهش خواهد یافت [۳۵].

کاهش وابستگی به صادرات نفت و گاز و افزایش درآمدهای غیرنفتی: وابستگی ایران به درآمدهای حاصل از صادرات نفت، اقتصاد کشور را در برابر تحریم‌ها و نوسانات بازار جهانی آسیب‌پذیر کرده است. با توسعه‌ی فناوری گداخت و تولید برق از این منبع، ایران می‌تواند بخشی از گاز طبیعی خود را که برای تولید برق مصرف می‌شود، به صادرات اختصاص دهد. این استراتژی می‌تواند درآمدهای ارزی کشور را افزایش دهد و به توسعه‌ی اقتصادی پایدار کمک کند [۳۶].

همگام‌سازی با روند جهانی انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای: کشورهای پیشرو در حوزه‌ی انرژی، به‌طور جدی به‌دنبال جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع پاک و پایدار هستند. اتحادیه‌ی اروپا و چین برنامه‌های گسترده‌ای برای توسعه‌ی گداخت هسته‌ای دارند و پروژه‌ی ITER به‌عنوان یک همکاری بین‌المللی، نماد این حرکت جهانی است. ورود ایران به این عرصه نه‌تنها

باعث کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌شود، بلکه جایگاه علمی و فناورانه‌ی کشور را نیز در سطح بین‌المللی ارتقا خواهد داد [۳۷].

۴-۲- ایجاد صنایع جدید و اشتغال‌زایی

توسعه‌ی صنعت فناوری‌های گداخت و ایجاد مشاغل متخصص: صنعت گداخت هسته‌ای به‌عنوان یک فناوری نوین، نیازمند نیروی انسانی متخصص در حوزه‌های مختلف از جمله فیزیک پلاسما، مهندسی هسته‌ای، فناوری‌های برودتی، سیستم‌های کنترل و محاسبات پیشرفته است. این نیاز به تخصص، فرصت‌های گسترده‌ای برای ایجاد مشاغل در سطوح مختلف، از آموزش و پژوهش تا تولید و بهره‌برداری از تکنولوژی‌های پیشرفته ایجاد می‌کند. ایران با ایجاد زیرساخت‌های لازم برای تحقیق و توسعه در این حوزه، می‌تواند به یکی از قطب‌های اصلی آموزش و اشتغال در صنعت گداخت تبدیل شود [۳۸].

ایجاد صنایع فرعی و جانبی مرتبط با گداخت هسته‌ای: پروژه‌های گداخت هسته‌ای نیازمند تأسیسات پیشرفته‌ای همچون مواد مقاوم به تابش، سیستم‌های خلاء، دیواره‌های سوختی و تجهیزات خنک‌کننده هستند. به این ترتیب، توسعه‌ی این صنعت به‌طور مستقیم باعث رشد صنایع فرعی و جانبی می‌شود که می‌توانند در تولید و تأمین این فناوری‌ها نقش ایفا کنند. ایران با بهره‌گیری از ظرفیت‌های موجود در صنایع مختلف، مانند صنایع فولاد، آلومینیوم و مواد کامپوزیتی، می‌تواند به تولید قطعات و تجهیزات پیشرفته موردنیاز در پروژه‌های گداخت بپردازد. این امر علاوه‌بر ایجاد اشتغال در این صنایع، به تقویت زنجیره‌ی تأمین داخلی و کاهش وابستگی به واردات کمک خواهد کرد [۳۹].

تأسیس و رشد شرکت‌های دانش‌بنیان و استارتاپ‌ها: پروژه‌های گداخت هسته‌ای، به‌ویژه در مراحل تحقیقاتی و توسعه، فرصت‌های زیادی برای شکل‌گیری شرکت‌های دانش‌بنیان و استارتاپ‌های فناوری ایجاد می‌کنند. این شرکت‌ها می‌توانند در زمینه‌های مختلف مانند مدل‌سازی ریاضی، طراحی سخت‌افزارهای پیشرفته، ساخت و توسعه‌ی ابزارهای دقیق و ارائه‌ی راهکارهای نوآورانه در زمینه‌های فنی و مهندسی فعالیت کنند. این نوع شرکت‌ها قادر خواهند بود به‌طور مستقل و با بهره‌گیری از نیروی متخصص داخلی، به حل چالش‌های صنعت گداخت بپردازند و در عین‌حال اشتغال‌زایی قابل‌توجهی را در کشور به‌دنبال داشته باشند [۴۰].

تأثیر در صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی: صنعت گداخت هسته‌ای نه‌تنها در راستای تولید انرژی تمیز و پایدار گام برمی‌دارد، بلکه می‌تواند نقش مهمی در تقویت صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر ایفا کند. به‌عنوان مثال، استفاده از گداخت هسته‌ای به‌عنوان یک منبع انرژی کم‌کربن می‌تواند نیاز به استفاده از سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد و به رشد سریع‌تر سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، نظیر انرژی خورشیدی و بادی، کمک کند. توسعه‌ی این بخش‌ها، در کنار گداخت هسته‌ای، باعث رشد اقتصاد سبز و تولید مشاغل پایدار در زمینه‌ی انرژی خواهد شد [۴۱].

رشد همکاری‌های بین‌المللی و تقویت جایگاه ایران در بازارهای جهانی: با توسعه‌ی انرژی گداخت، ایران می‌تواند به‌عنوان یک بازیگر مهم در بازار جهانی انرژی شناخته شود. همکاری با پروژه‌های بین‌المللی مانند ITER و مشارکت در کنسرسیوم‌های تحقیقاتی و صنعتی می‌تواند به ایران این فرصت را بدهد که نه‌تنها در زمینه‌ی گداخت هسته‌ای پیشرفت کند، بلکه در زمینه‌های

مختلف اقتصادی و صنعتی نیز جایگاه خود را در بازارهای جهانی تقویت نماید. این امر به‌ویژه در زمینه‌ی صادرات فناوری و خدمات مرتبط با انرژی گداخت و ایجاد فرصت‌های جدید برای همکاری‌های اقتصادی خواهد بود [۴۲].

۴-۳- افزایش نقش ایران در بازار انرژی جهانی:

تبدیل ایران به یک هاب انرژی گداخت: با توجه به موقعیت استراتژیک ایران و منابع غنی انرژی در کشور، توسعه‌ی انرژی گداخت می‌تواند ایران را به یکی از مراکز کلیدی تولید و صادرات انرژی پاک تبدیل کند. این امر به‌ویژه با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی کم‌کربن در سطح جهانی، می‌تواند به جایگاه ایران در بازار انرژی جهانی کمک شایانی کند. گداخت هسته‌ای به‌عنوان یک منبع انرژی بدون آلایندگی کربنی و با ظرفیت تولید انرژی بالا، فرصت‌های جدیدی را برای صادرات انرژی فراهم خواهد کرد. ایران با تبدیل‌شدن به یک هاب تولید و صادرات انرژی گداخت، می‌تواند بر بخش قابل‌توجهی از بازار جهانی انرژی تسلط یابد [۴۳].

جذب سرمایه‌گذاری‌های بین‌المللی و توسعه همکاری‌های جهانی: پروژه‌های گداخت هسته‌ای نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان و فناوری‌های پیشرفته هستند. ایران با ورود به این عرصه می‌تواند سرمایه‌گذاران و شرکت‌های بین‌المللی را جذب کند و همکاری‌های صنعتی و تحقیقاتی را با کشورهای پیشرفته در حوزه‌ی انرژی برقرار سازد. پروژه‌های بین‌المللی مانند ITER که به‌طور مشترک توسط کشورهای مختلف انجام می‌شود، می‌تواند فرصتی برای ایران باشد تا در این پروژه‌ها مشارکت کرده و فناوری‌های نوین را وارد کشور کند. این همکاری‌ها نه‌تنها به ارتقاء جایگاه ایران در بازار جهانی انرژی، بلکه به تقویت توانمندی‌های صنعتی و علمی کشور در حوزه‌ی انرژی هسته‌ای و گداخت کمک خواهد کرد [۴۴].

مشارکت در تأمین انرژی برای کشورهای همسایه و کشورهای در حال توسعه: ایران می‌تواند با استفاده از انرژی گداخت به تأمین نیازهای انرژی کشورهای همسایه و دیگر کشورهای در حال توسعه کمک کند. این امر می‌تواند به‌ویژه در زمینه‌ی تأمین برق برای مناطقی که با بحران انرژی روبرو هستند، نقش قابل‌توجهی ایفا کند. ایران با استفاده از فناوری گداخت و انرژی پاک، قادر خواهد بود به کشورهای منطقه و فراتر از آن خدمات انرژی ارائه دهد و در عین حال درآمدهای ارزی قابل‌توجهی از این طریق کسب کند. این امر به‌ویژه در منطقه‌ای که منابع انرژی محدود است، می‌تواند موجب تقویت روابط اقتصادی و سیاسی ایران با کشورهای همسایه شود [۴۵].

تقویت توان صادراتی فناوری و خدمات فنی در حوزه‌ی گداخت: ایران با توسعه‌ی فناوری گداخت می‌تواند به صادرکننده‌ی فناوری و خدمات فنی در این حوزه تبدیل شود. این شامل طراحی و تولید تجهیزات گداخت، آموزش نیروی انسانی متخصص و ارائه مشاوره‌های فنی به کشورهای دیگر خواهد بود. به‌طور خاص، ایران می‌تواند به‌عنوان یک مرکز منطقه‌ای برای آموزش و تربیت نیروی کار متخصص در زمینه‌ی گداخت هسته‌ای شناخته شود و از این طریق به بازارهای جهانی دست یابد. این امر موجب انتقال دانش فنی و علمی به کشور خواهد شد و زمینه را برای رشد اقتصادی و اشتغال‌زایی در کشور فراهم خواهد کرد [۴۶].

تقویت دیپلماسی انرژی و کاهش وابستگی به نفت: با ورود به حوزه‌ی انرژی گداخت، ایران می‌تواند وابستگی خود به صادرات نفت را کاهش داده و نقش مهم‌تری در سیاست‌های جهانی انرژی ایفا کند. از آنجا که بسیاری از کشورهای پیشرفته به دنبال

کاهش وابستگی خود به سوخت‌های فسیلی هستند، ایران می‌تواند از این فرصت استفاده کرده و به‌عنوان یک تأمین‌کننده‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر و کم‌کربن در سطح جهانی شناخته شود. این امر علاوه‌بر افزایش توان سیاسی ایران در زمینه‌ی انرژی، به تقویت جایگاه اقتصادی کشور در بازارهای بین‌المللی نیز کمک خواهد کرد [۴۷].

۴-۴- همکاری‌های بین‌المللی و انتقال فناوری:

توسعه همکاری‌های علمی و تحقیقاتی در سطح جهانی: انرژی گداخت هسته‌ای یکی از پیشرفته‌ترین حوزه‌های فناوری است که نیازمند همکاری‌های بین‌المللی برای تحقیق، توسعه و آزمون‌های آزمایشی است. ایران می‌تواند با پیوستن به پروژه‌های تحقیقاتی بین‌المللی مانند پروژه‌ی ITER، که شامل همکاری‌های علمی و فنی میان کشورهای مختلف است، از این فرصت برای ارتقاء دانش فنی و علمی خود در این زمینه استفاده کند. این همکاری‌ها نه‌تنها به ارتقاء توانمندی‌های تحقیقاتی ایران کمک می‌کند، بلکه باعث تبادل دانش و تجربه با دیگر کشورها می‌شود، که می‌تواند در درازمدت به تولید فناوری‌های پیشرفته و نوآورانه در داخل کشور منجر گردد [۴۸].

جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی و تسهیل انتقال فناوری: یکی از مزایای همکاری‌های بین‌المللی در حوزه‌ی انرژی گداخت، جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی است. کشورهایی که در پروژه‌های گداخت مشارکت دارند، می‌توانند منابع مالی و تخصص‌های فنی خود را به ایران منتقل کنند. این سرمایه‌گذاری‌ها می‌توانند به ایجاد زیرساخت‌های لازم برای تولید تجهیزات پیشرفته، ساخت نیروگاه‌های گداخت و توسعه‌ی فناوری‌های مرتبط در ایران منجر شوند. همچنین، این همکاری‌ها می‌توانند به تسهیل انتقال فناوری‌های نوین به داخل کشور کمک کنند، که در نهایت به بهبود زیرساخت‌های صنعتی و اقتصادی ایران می‌انجامد [۴۹].

تقویت دیپلماسی انرژی و جایگاه ایران در بازار جهانی: در دنیای امروز، انرژی به‌عنوان یک منبع استراتژیک، نقشی حیاتی در روابط بین‌المللی ایفا می‌کند. ایران با همکاری در پروژه‌های بین‌المللی انرژی گداخت، می‌تواند به‌عنوان یک بازیگر مهم در بازار انرژی جهانی شناخته شود. علاوه‌بر تأمین انرژی برای خود، ایران قادر خواهد بود تا با مشارکت در پروژه‌های بین‌المللی، به تأمین انرژی کشورهای دیگر بپردازد و از این طریق نفوذ دیپلماتیک خود را افزایش دهد. این همکاری‌ها می‌توانند به بهبود روابط ایران با دیگر کشورها و تقویت جایگاه اقتصادی و استراتژیک کشور در سطح جهانی کمک کنند [۵۰].

توسعه زیرساخت‌های صنعتی و رشد بازار داخلی: مشارکت در همکاری‌های بین‌المللی انرژی گداخت، ایران را قادر می‌سازد که صنایع داخلی خود را در زمینه‌های مختلف تقویت کند. ایران می‌تواند به‌عنوان یک مرکز تولید و تأمین تجهیزات فناوری گداخت برای پروژه‌های بین‌المللی شناخته شود. این امر می‌تواند فرصت‌هایی برای رشد صنایع تولیدی در کشور، از جمله صنایع مواد پیشرفته، سیستم‌های کنترل، و مهندسی مکانیک ایجاد کند. همچنین، ایران می‌تواند به بازارهای جهانی صادرات فناوری و خدمات فنی مرتبط با گداخت را گسترش دهد و درآمدهای غیرنفتی خود را افزایش دهد [۵۱].

ارتقاء توانمندی‌های نیروی انسانی و آموزش متخصصان: همکاری‌های بین‌المللی در حوزه‌ی گداخت هسته‌ای به ایران این امکان را می‌دهد که با کشورهای پیشرفته در این زمینه تعامل داشته باشد و نیروی انسانی متخصص در این حوزه را آموزش دهد. این آموزش‌ها شامل دوره‌های آموزشی مشترک، کارگاه‌های علمی و فنی، و فرصت‌های تحقیقاتی است که می‌تواند به تربیت

متخصصان و محققان برجسته در حوزه‌ی گداخت منجر شود. این نیروی متخصص می‌تواند نه‌تنها در پروژه‌های داخلی، بلکه در همکاری‌های بین‌المللی نیز به‌کار گرفته شود [۵۲].

۵- راهکارهای پیاده‌سازی انرژی گداخت هسته‌ای در ایران

۵-۱- توسعه زیرساخت‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی:

ایجاد و تقویت مراکز تحقیقاتی تخصصی در حوزه‌ی گداخت هسته‌ای: برای پیشبرد پروژه‌های گداخت هسته‌ای، ایران نیازمند توسعه‌ی مراکز تحقیقاتی تخصصی است که بتوانند به تحقیق و توسعه در این حوزه پرداخته و فناوری‌های نوین را در زمینه‌ی گداخت هسته‌ای ایجاد کنند. این مراکز باید در سطوح مختلف از جمله فیزیک پلاسما، مهندسی مواد و طراحی سیستم‌های کنترلی فعالیت داشته باشند. دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی معتبر مانند دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه تهران و پژوهشگاه نیرو می‌توانند به‌عنوان مراکز اصلی تحقیقاتی در این زمینه شناخته شوند. این مراکز تحقیقاتی قادر خواهند بود پروژه‌های آزمایشگاهی و تحقیقاتی مرتبط با گداخت هسته‌ای را راه‌اندازی کرده و به توسعه‌ی فناوری‌های حیاتی در این حوزه کمک کنند [۵۳].

ایجاد آزمایشگاه‌های پیشرفته و تأسیسات آزمایشی: برای آزمایش و شبیه‌سازی فرآیندهای گداخت هسته‌ای، ایران نیازمند تأسیس آزمایشگاه‌ها و تأسیسات آزمایشی پیشرفته است که بتوانند شرایط مشابه گداخت هسته‌ای واقعی را شبیه‌سازی کنند. این آزمایشگاه‌ها باید به فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند کاواک‌های پلاسمایی، دیواره‌های مقاوم به تابش، و سیستم‌های خلاء مجهز باشند. ایجاد این تأسیسات نیازمند سرمایه‌گذاری قابل‌توجه در زمینه‌ی زیرساخت‌های فنی و تجهیزاتی است، اما با توجه به مزایای بلندمدت آن در راستای توسعه‌ی فناوری گداخت، این سرمایه‌گذاری‌ها می‌تواند در نهایت به تبدیل ایران به یک قطب تحقیقاتی در این حوزه کمک کند [۵۴].

ارتقای همکاری‌های بین‌المللی در زمینه‌ی زیرساخت‌های تحقیقاتی: ایران می‌تواند با پیوستن به پروژه‌های بین‌المللی مانند ITER، همکاری‌های علمی و فنی خود را با کشورهای پیشرفته در حوزه‌ی انرژی گداخت هسته‌ای گسترش دهد. این همکاری‌ها می‌تواند منجر به به‌اشتراک‌گذاری دانش و تجربیات آزمایشگاهی شود و ایران را قادر سازد که زیرساخت‌های تحقیقاتی خود را با فناوری‌های روز دنیا به‌روز کند. همچنین، استفاده از تجربیات کشورهای دیگر در زمینه‌ی ساخت و بهره‌برداری از تأسیسات آزمایشی می‌تواند به تسریع فرایند توسعه‌ی انرژی گداخت در ایران کمک کند [۵۵].

تأسیس پارک‌های فناوری و مراکز نوآوری در حوزه گداخت: برای تسریع فرایند توسعه و پیاده‌سازی انرژی گداخت هسته‌ای، ایجاد پارک‌های فناوری و مراکز نوآوری به‌ویژه در نزدیکی مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مهم مطرح شود. این مراکز می‌توانند بستری مناسب برای کارآفرینان، دانشمندان و شرکت‌های فناوری‌های نوین فراهم کنند تا در زمینه‌ی طراحی و تولید تجهیزات موردنیاز برای پروژه‌های گداخت هسته‌ای فعالیت کنند. همچنین، این مراکز قادر خواهند بود به حمایت از استارتاپ‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان پرداخته و آنها را در زمینه‌ی انتقال فناوری و تجاری‌سازی دستاوردهای تحقیقاتی یاری کنند [۵۶].

برنامه‌ریزی برای آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص در این حوزه: ایجاد زیرساخت‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی تنها زمانی مؤثر خواهد بود که نیروی انسانی متخصص در این حوزه وجود داشته باشد. بنابراین، علاوه‌بر توسعه‌ی آزمایشگاه‌ها و مراکز

تحقیقاتی، ایران باید برنامه‌هایی برای آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص در زمینه‌های مختلف گداخت هسته‌ای طراحی کند. این برنامه‌ها می‌توانند شامل دوره‌های آموزشی در دانشگاه‌ها، کارگاه‌های تخصصی، و فرصت‌های تحقیقاتی بین‌المللی باشند که به جذب و نگهداری استعدادهای برتر در این حوزه کمک کنند. تربیت نیروی انسانی ماهر و متخصص، زمینه‌ساز توسعه پایدار انرژی گداخت در کشور خواهد بود [۵۷].

۵-۲- آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص:

اهمیت نیروی انسانی متخصص در انرژی گداخت هسته‌ای: انرژی گداخت هسته‌ای به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و پیچیده‌ترین فناوری‌های موجود، نیازمند نیروی انسانی متخصص و آموزش‌دیده است. نیروی انسانی در این حوزه باید در زمینه‌های مختلفی همچون فیزیک پلاسما، مهندسی مواد، طراحی سیستم‌های کنترلی و مهندسی هسته‌ای دارای تخصص باشد. این تخصص‌ها به‌ویژه در فرآیندهای آزمایشگاهی، طراحی دستگاه‌ها و مدیریت تأسیسات گداخت از اهمیت بالایی برخوردارند. بنابراین، آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص یکی از ارکان اصلی موفقیت در پیاده‌سازی این فناوری در ایران است [۵۸].

ایجاد برنامه‌های آموزشی منسجم و تخصصی در دانشگاه‌ها: برای پاسخ به نیازهای صنعت گداخت هسته‌ای، ایران باید برنامه‌های آموزشی منسجم و تخصصی را در سطح دانشگاهی طراحی و اجرا کند. این برنامه‌ها باید شامل دوره‌های کارشناسی، کارشناسی‌ارشد و دکتری در رشته‌های مرتبط با گداخت هسته‌ای، فیزیک پلاسما، مهندسی هسته‌ای و مهندسی مواد باشند. دانشگاه‌های معتبر ایران، مانند دانشگاه تهران، دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه شهید بهشتی، می‌توانند نقش اساسی در ایجاد و ارائه این برنامه‌های آموزشی ایفا کنند. این برنامه‌ها باید با نیازهای بازار کار و تحولات جهانی در زمینه انرژی گداخت هماهنگ باشند [۵۹].

تقویت دوره‌های تخصصی و کارآموزی در مراکز تحقیقاتی و صنعتی: هم‌زمان با توسعه برنامه‌های آموزشی، ارائه فرصت‌های کارآموزی در مراکز تحقیقاتی و صنعتی فعال در حوزه گداخت هسته‌ای برای دانشجویان و محققان ضروری است. این دوره‌های تخصصی می‌توانند به‌عنوان یک پل ارتباطی میان آموزش و صنعت عمل کرده و فارغ‌التحصیلان را با چالش‌های عملی و فناوری‌های پیشرفته در این حوزه آشنا کنند. با برگزاری کارگاه‌ها، سمینارها و پروژه‌های تحقیقاتی مشترک در این مراکز، امکان به‌روز شدن دانش فنی نیروی انسانی و آشنایی با آخرین دستاوردهای بین‌المللی فراهم خواهد شد [۶۰].

همکاری با مؤسسات آموزشی و تحقیقاتی بین‌المللی: برای تسریع در فرآیند آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص، ایران می‌تواند با مؤسسات آموزشی و تحقیقاتی معتبر جهانی در حوزه گداخت هسته‌ای همکاری کند. این همکاری‌ها می‌توانند شامل تبادل استاد، برگزاری دوره‌های مشترک آموزشی، و اعطای بورسیه‌های تحقیقاتی باشند. پروژه‌هایی همچون ITER و سایر ابتکارات بین‌المللی در این زمینه، می‌توانند بستر مناسبی برای همکاری‌های علمی و آموزشی فراهم کنند. این نوع همکاری‌ها به ایران کمک خواهد کرد تا در زمینه‌های آموزشی و تحقیقاتی از تجربیات سایر کشورها بهره‌برداری کند و دانشجویان و محققان ایرانی را در پروژه‌های بین‌المللی گداخت مشارکت دهد [۶۱].

ایجاد مؤسسات آموزش عالی و دوره‌های آنلاین در زمینه انرژی گداخت هسته‌ای: با توجه به نیاز به دسترسی آسان به منابع آموزشی و تخصصی در حوزه گداخت هسته‌ای، ایجاد مؤسسات آموزشی آنلاین و دوره‌های تخصصی مجازی نیز می‌تواند یک

راهکار مؤثر باشد. این دوره‌ها می‌توانند برای افرادی که به‌دلیل محدودیت‌های زمانی یا جغرافیایی قادر به شرکت در دوره‌های حضوری نیستند، فرصتی مناسب برای کسب دانش و مهارت در این حوزه فراهم کنند. چنین دوره‌هایی می‌توانند در زمینه‌های مختلف از جمله فیزیک پلاسما، طراحی نیروگاه‌های گداخت، و فناوری‌های نوین مورد استفاده در این حوزه برگزار شوند [۶۲].

۵-۳- جذب سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی:

اهمیت جذب سرمایه‌گذاری برای توسعه انرژی گداخت هسته‌ای: پیاده‌سازی و توسعه انرژی گداخت هسته‌ای به دلیل نیاز به زیرساخت‌های پیچیده و فناوری‌های پیشرفته، نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان است. در حالی که منابع داخلی کشور می‌توانند نقش مهمی در تأمین بودجه‌های اولیه ایفا کنند، جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی نیز می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در تسریع این فرآیند شناخته شود. این سرمایه‌گذاری‌ها می‌توانند به‌ویژه در زمینه‌های تحقیق و توسعه، ساخت و تجهیز مراکز تحقیقاتی و آزمایشگاهی، و همچنین تأسیس نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای استفاده شوند. بنابراین، ایجاد یک محیط مناسب برای جذب این سرمایه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶۳].

تسهیل فرآیند جذب سرمایه‌گذاری خارجی: برای جذب سرمایه‌گذاری خارجی، ایران باید شرایط مناسبی از جمله ثبات اقتصادی، شفافیت حقوقی و تضمین امنیت سرمایه‌گذاران را فراهم کند. ایجاد چارچوب‌های قانونی و سیاست‌های حمایتی همچون معافیت‌های مالیاتی برای شرکت‌های خارجی که در پروژه‌های گداخت هسته‌ای مشارکت می‌کنند، می‌تواند انگیزه‌های لازم برای ورود سرمایه‌های خارجی را فراهم کند. همچنین، همکاری با مؤسسات بین‌المللی معتبر و پیوستن به پروژه‌های جهانی همچون ITERمی‌تواند به تقویت اعتماد سرمایه‌گذاران خارجی و تسهیل ورود آنان به بازار انرژی گداخت ایران کمک کند [۶۴].

تشویق سرمایه‌گذاری‌های داخلی از طریق بخش خصوصی: علاوه بر جذب سرمایه‌گذاری خارجی، ایران باید از ظرفیت‌های بخش خصوصی داخلی نیز بهره‌برداری کند. تشویق بخش خصوصی برای مشارکت در پروژه‌های گداخت هسته‌ای، از طریق ایجاد مشوق‌های مالی، تضمین بازگشت سرمایه و فراهم آوردن فرصت‌های تجاری، می‌تواند نقش مهمی در تأمین منابع مالی موردنیاز ایفا کند. برای این منظور، دولت می‌تواند با برگزاری نشست‌های تخصصی و سمینارهای اطلاع‌رسانی در زمینه‌ی فرصت‌های سرمایه‌گذاری در انرژی گداخت، بخش خصوصی را به مشارکت در این صنعت نوپا تشویق کند [۶۵].

همکاری با بانک‌های بین‌المللی و مؤسسات مالی تخصصی: ایران می‌تواند برای تأمین مالی پروژه‌های گداخت هسته‌ای با بانک‌ها و مؤسسات مالی بین‌المللی که در زمینه انرژی‌های نوین و پروژه‌های کلان فعالیت دارند، همکاری کند. این همکاری‌ها می‌توانند شامل اعطای وام‌های کم‌بهره، ضمانت‌های مالی برای پروژه‌ها و همچنین تأمین منابع مالی از طریق بازارهای سرمایه باشد. استفاده از تجربه کشورهای پیشرفته در تأمین مالی پروژه‌های مشابه می‌تواند ایران را در رسیدن به اهداف بلندمدت خود در زمینه گداخت هسته‌ای یاری کند [۶۶].

ایجاد مشارکت‌های عمومی و خصوصی (PPP) در پروژه‌های گداخت هسته‌ای: مشارکت‌های عمومی و خصوصی می‌توانند به‌عنوان یک مدل مالی موفق برای پروژه‌های بزرگ گداخت هسته‌ای مطرح شوند. در این مدل، دولت و بخش خصوصی به‌طور مشترک در تأمین منابع مالی، ساخت و راه‌اندازی پروژه‌ها مشارکت می‌کنند. این نوع مشارکت‌ها می‌تواند ریسک‌های مالی و اجرایی را کاهش دهد و علاوه بر جذب سرمایه، تضمین‌کننده توسعه پایدار پروژه‌های گداخت هسته‌ای در ایران باشد [۶۷].

استفاده از الگوهای موفق در کشورهای پیشرفته: در نهایت، ایران می‌تواند از الگوهای موفق کشورهای پیشرفته مانند آمریکا، فرانسه و ژاپن در جذب سرمایه‌گذاری برای توسعه انرژی گداخت هسته‌ای استفاده کند. این کشورها تجربه‌های موفقی در همکاری با بخش خصوصی و جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی دارند که می‌تواند به ایران در تسریع فرآیند جذب منابع مالی کمک کند. الگوبرداری از این تجربیات می‌تواند به ایجاد یک استراتژی مؤثر برای تأمین مالی پروژه‌های گداخت هسته‌ای در ایران منجر شود [۶۸].

۵-۴- تدوین سیاست‌های کلان انرژی و حمایت دولت:

اهمیت تدوین سیاست‌های کلان انرژی برای توسعه انرژی گداخت هسته‌ای: برای تحقق اهداف بلندمدت در زمینه توسعه انرژی گداخت هسته‌ای در ایران، تدوین سیاست‌های کلان انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیاست‌های کلان باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که ضمن حمایت از تحقیقات و فناوری‌های گداخت، زمینه‌ساز جذب سرمایه‌گذاری‌های داخلی و خارجی، همکاری‌های بین‌المللی و ایجاد زیرساخت‌های لازم برای این فناوری باشند. این سیاست‌ها باید در چهارچوبی منسجم و هماهنگ با اهداف توسعه پایدار انرژی در کشور قرار گیرند و در راستای کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و ایجاد یک شبکه انرژی امن و پاک عمل کنند [۶۹].

نیاز به برنامه‌ریزی بلندمدت در سیاست‌گذاری انرژی: پروژه‌های گداخت هسته‌ای به‌دلیل ماهیت بلندمدت و پیچیدگی‌های فنی و مالی خود، نیاز به برنامه‌ریزی‌های استراتژیک و بلندمدت دارند. دولت ایران باید در تدوین این برنامه‌ها از تجارب جهانی در این زمینه بهره‌برداری کند و طرح‌های اجرایی و تحقیقی برای رسیدن به فناوری گداخت هسته‌ای تجاری را به‌طور دقیق و واقع‌گرایانه پیاده‌سازی کند. این برنامه‌ریزی باید شامل تخصیص منابع مالی، تعیین اهداف تحقیقاتی و برنامه‌های آموزشی برای تربیت نیروی انسانی متخصص باشد [۷۰].

حمایت از تحقیق و توسعه در بخش انرژی گداخت: دولت ایران می‌تواند با تخصیص منابع مالی کافی و ایجاد مشوق‌های مالی برای محققان و شرکت‌های فناور، به توسعه تحقیق و توسعه (R&D) در حوزه گداخت هسته‌ای کمک کند. علاوه بر این، دولت باید از طریق مؤسسات و نهادهای تحقیقاتی ملی همچون سازمان انرژی اتمی ایران و وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، زیرساخت‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی مناسب را فراهم آورد. ایجاد مراکز تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های گداخت در سطوح مختلف، می‌تواند به پیشرفت سریع‌تر فناوری و دستیابی به نتایج مطلوب در این حوزه کمک کند [۷۱].

تنظیم قوانین و مقررات حمایتی برای جذب سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی: یکی از الزامات کلیدی در پیاده‌سازی انرژی گداخت هسته‌ای، تدوین و اجرای قوانین و مقررات حمایتی است که سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی را به مشارکت در این صنعت تشویق کند. دولت باید با ایجاد تسهیلات مالی، معافیت‌های مالیاتی و تضمین امنیت سرمایه‌گذاری، شرایط لازم برای جذب سرمایه‌ها را فراهم کند. همچنین، تدوین قوانین و مقررات زیست‌محیطی و ایمنی که با استانداردهای بین‌المللی همخوانی داشته باشد، می‌تواند به ارتقاء اعتماد سرمایه‌گذاران کمک کند [۷۲].

ارتقاء همکاری‌های بین‌المللی در حوزه انرژی گداخت: پروژه‌های گداخت هسته‌ای معمولاً نیاز به همکاری‌های گسترده بین‌المللی دارند، چرا که این فناوری به‌طور کلی فراتر از توانایی‌های یک کشور است. ایران می‌تواند با پیوستن به پروژه‌های بین‌المللی

مانند ITER و سایر ابتکارات جهانی، از تجربیات دیگر کشورها بهره‌برداری کند و به تبادل فناوری و اطلاعات بپردازد. حمایت دولت از این همکاری‌ها می‌تواند به تسهیل انتقال فناوری‌های پیشرفته و به‌روز به ایران کمک کرده و در نهایت توسعه فناوری گداخت هسته‌ای را تسریع بخشد [۷۳].

ایجاد برنامه‌های آموزشی و آگاهی‌بخشی برای جامعه و بخش‌های خصوصی: دولت ایران باید در کنار تدوین سیاست‌های کلان، برنامه‌های آموزشی و آگاهی‌بخشی به جامعه و بخش‌های خصوصی را نیز در نظر بگیرد. آموزش عمومی درباره مزایای انرژی گداخت و آگاهی‌بخشی به سرمایه‌گذاران، صاحبان صنایع و کارآفرینان می‌تواند به ایجاد زمینه‌های مناسب برای پذیرش و توسعه این فناوری کمک کند. برگزاری کنفرانس‌ها، سمینارها و کارگاه‌های تخصصی در سطح ملی و بین‌المللی از جمله اقدامات حمایتی است که دولت می‌تواند در راستای اطلاع‌رسانی و جذب پشتیبانی از این حوزه انجام دهد [۷۴].

۶- نتیجه‌گیری

۶-۱- جمع‌بندی چالش‌ها و فرصت‌ها:

توسعه انرژی گداخت هسته‌ای در ایران با چالش‌های متعددی مواجه است که باید در مسیر اجرای این فناوری نوین مورد توجه قرار گیرد. یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، نیاز به سرمایه‌گذاری‌های کلان در حوزه تحقیق و توسعه است که به دلیل ماهیت بلندمدت و پیچیدگی‌های فنی این پروژه‌ها، کشور را با موانع مالی و اقتصادی روبه‌رو می‌سازد. همچنین، مسائل آموزشی و کمبود نیروی انسانی متخصص، به‌ویژه در زمینه‌های فناوری‌های گداخت و مهندسی‌های مرتبط، از دیگر چالش‌های اساسی در این حوزه هستند. علاوه بر این، نگرانی‌های ایمنی و محیط زیستی مرتبط با فناوری گداخت هسته‌ای، به‌ویژه در فرآیندهای اجرایی و آزمایشگاهی، ممکن است مانعی برای توسعه این فناوری در ایران باشد. با این حال، فرصت‌های قابل توجهی نیز در این مسیر برای ایران وجود دارد. کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، ایجاد صنایع جدید و اشتغال‌زایی، و ارتقاء نقش ایران در بازار انرژی جهانی از جمله فرصت‌های اقتصادی و استراتژیک قابل توجه هستند. همچنین، ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی خود و نیاز روزافزون جهانی به منابع انرژی پایدار، قادر است به یکی از قطب‌های تولید انرژی گداخت هسته‌ای در آینده تبدیل شود. در این راستا، ایجاد همکاری‌های بین‌المللی و جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی می‌تواند به تسریع روند توسعه این فناوری در کشور کمک کند.

۶-۲- چشم‌انداز آینده انرژی گداخت هسته‌ای در ایران:

چشم‌انداز آینده انرژی گداخت هسته‌ای در ایران بستگی زیادی به توانایی کشور در غلبه بر چالش‌های موجود و بهره‌برداری از فرصت‌های استراتژیک پیش‌رو دارد. اگر ایران بتواند به‌طور مؤثر سیاست‌های کلان انرژی را تدوین و برنامه‌های اجرایی مشخصی برای توسعه این فناوری نوآورانه در زمینه تحقیق و تولید انرژی گداخت هسته‌ای ایجاد کند، قادر خواهد بود تا در آینده نه‌تنها به یکی از پیشگامان این حوزه در سطح جهانی تبدیل شود، بلکه به کشوری با اقتصاد انرژی پایدار و مستقل دست یابد. در آینده نزدیک، انتظار می‌رود که ایران با توسعه زیرساخت‌های تحقیقاتی، ارتقای سطح آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص، و جذب سرمایه‌گذاری‌های داخلی و خارجی، قادر به رسیدن به فناوری گداخت هسته‌ای تجاری شود. این امر می‌تواند موجب کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، تقویت توانمندی‌های صنعتی و انرژی کشور و ایجاد شغل‌های جدید در حوزه‌های مرتبط

با انرژی‌های نوین گردد. همچنین، همکاری‌های بین‌المللی و تبادل فناوری با کشورهای پیشرفته می‌تواند به تسریع فرآیندهای تحقیقاتی و افزایش توان علمی و فنی کشور در این زمینه کمک کند.

در نهایت، آینده انرژی گداخت هسته‌ای در ایران به چشم‌اندازی روشن و پتانسیل‌های فراوانی وابسته است که با اتخاذ راهکارهای مناسب و همراهی با روند جهانی توسعه انرژی‌های پاک و پایدار، می‌تواند به یکی از ارکان اصلی امنیت انرژی و اقتصاد پایدار کشور تبدیل شود. پایان

۷- منابع:

[۱] IAEA. (۲۰۲۱). Fusion Energy: The Future of Clean Power. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۲] ITER Organization. (۲۰۲۳). The Path to Fusion Energy. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۳] ساتبا. (۱۴۰۲). گزارش بررسی پتانسیل‌های انرژی‌های نو در ایران. تهران: سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق .
[٤] احمدی، محمد. (۱۴۰۱). انرژی هسته‌ای و آینده انرژی جهان. تهران: انتشارات دانشگاه تهران .
[٥] Freidberg, J. P. (۲۰۲۲). The challenges of magnetic confinement fusion. Nature Physics, ۱۸(٥), ٤٥٦-٤٦٢.
[٦] Hutchinson, I. H. (۲۰۲۳). Recent advances in fusion energy technology. Journal of Fusion Energy, ٤۲(۳), ۱۲۳-۱۳٥.
[۷] Smith, J., et al. (۲۰۲۳). Challenges and opportunities in nuclear fission energy. Progress in Nuclear Energy, ۱٤٥, ۱۰٤-۱۱۲.
[۸] Brown, A., et al. (۲۰۲۳). The potential of fusion energy as a sustainable power source. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۷۸, ۱۱۳-۱۲٥.
[۹] Commonwealth Fusion Systems. (۲۰۲۳). SPARC and the path to commercial fusion energy. Retrieved from [https://www.cfs.energy].
[۱۰] National Ignition Facility (NIF). (۲۰۲۲). Breakthrough in nuclear fusion ignition. Lawrence Livermore National Laboratory. Retrieved from [https://www.llnl.gov].
[۱۱] European Fusion Development Agreement (EFDA). (۲۰۲۳). DEMO project: Preparing for fusion power plants. Retrieved from [https://www.euro-fusion.org].
[۱۲] M. A. Abdou, A. Ying, and N. B. Morley. (۲۰۱٥). Physics and technology considerations for the development of fusion energy. Nuclear Fusion, ٥٥(۱), ۰۱۳۰۰۳.
[۱۳] National Academy of Sciences. (۲۰۲۱). Bringing Fusion to the U.S. Grid. Washington, DC: National Academies Press.
[۱٤] B. Zohuri. (۲۰۱۷). Magnetic Confinement Fusion Driven Thermonuclear Energy. Springer.
[۱٥] W. M. Stacey. (۲۰۱۹). Fusion Plasma Physics, ۳rd ed. Hoboken, NJ: Wiley.
[۱٦] MIT Plasma Science and Fusion Center. (۲۰۲۳). Fusion Energy Education Programs. Retrieved from [https://www.psfc.mit.edu].

[۱۷] A. Soltani. (۲۰۲۲). Brain drain in Iran's nuclear and high-tech sectors. Journal of Middle Eastern Studies, ۵۸(۳), ۴۱۰–۴۲۸.
[۱۸] M. Kikuchi, K. Lackner, and M. Tran. (۲۰۱۲). Fusion Physics. Vienna: IAEA.
[۱۹] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (۲۰۲۳). Climate change mitigation strategies in energy production. Retrieved from [https://www.ipcc.ch].
[۲۰] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). The role of fusion energy in the future global energy mix. Retrieved from [https://www.iea.org].
[۲۱] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱۶). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ۶۹(۵), ۴۰۶-۴۱۷.
[۲۲] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸۴.
[۲۳] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۲۴] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[۲۵] ITER Organization. (۲۰۲۳). ITER tritium fuel cycle: Safety and management. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۲۶] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Regulations for the safe development of fusion energy. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۲۷] International Energy Agency (IEA). (۲۰۲۳). The future of fusion energy in a low-carbon world. Retrieved from [https://www.iea.org].
[۲۸] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international cooperation. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۲۹] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy technology transfer. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۳۰] National Academy of Sciences. (۲۰۲۱). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۳۱] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۳۲] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۳۳] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱۶). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ۶۹(۵), ۴۰۶-۴۱۷.
[۳۴] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸۴.
[۳۵] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۳۶] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[۳۷] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].

[۳۸] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۳۹] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱۶). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ۶۹(۵), ۴۰۶-۴۱۷.
[۴۰] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸۴.
[۴۱] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۴۲] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[۴۳] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۴۴] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۴۵] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱۶). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ۶۹(۵), ۴۰۶-۴۱۷.
[۴۶] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸۴.
[۴۷] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۴۸] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[۴۹] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۵۰] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۵۱] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱۶). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ۶۹(۵), ۴۰۶-۴۱۷.
[۵۲] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸۴.
[۵۳] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۵۴] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[۵۵] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۵۶] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[۵۷] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱۶). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ۶۹(۵), ۴۰۶-۴۱۷.

[۵۸] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸٤.
[۵۹] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[٦۰] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[٦۱] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[٦۲] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[٦۳] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱٦). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ٦۹(۵), ٤۰٦-٤۱۷.
[٦٤] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸٤.
[٦۵] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[٦٦] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[٦۷] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[٦۸] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org].
[٦۹] A. V. Smirnov et al. (۲۰۱٦). Fusion research and technology development. Fusion Science and Technology, ٦۹(۵), ٤۰٦-٤۱۷.
[۷۰] J. C. E. Page. (۲۰۱۵). Financing fusion energy development: Lessons from international collaboration. Energy Policy, ۷۸, ۷۵-۸٤.
[۷۱] National Academy of Sciences. (۲۰۲۰). Fusion Energy: Opportunities and Challenges. Washington, DC: National Academies Press.
[۷۲] M. A. Abdou. (۲۰۱۵). Challenges and opportunities for fusion energy. Fusion Engineering and Design, ۹۳, ۸۵-۹۱.
[۷۳] ITER Organization. (۲۰۲۳). Fusion energy and international collaboration. Retrieved from [https://www.iter.org].
[۷٤] International Atomic Energy Agency (IAEA). (۲۰۲۳). Fusion energy development and scientific research. Retrieved from [https://www.iaea.org](https://www.

بررسی سناریوهای پیش روی سیاست هسته ای ایران در دولت جدید ترامپ (کد مقاله : ۱۴۳۵)

آقائی، سید سعید[۱*]

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، معاونت امور بین‌الملل، حقوقی و مجلس

چکیده:

انتخابات آمریکا با پیروزی دونالد ترامپ به پایان رسید و در نتیجه، او به عنوان ۴۷امین رئیسجمهور این کشور در ۱ بهمن ۱۴۰۳ رسما کار خودش را آغاز کرد. یکی از مهمترین اقدامات او در دوره ریاستجمهوری قبلی خود در سالهای ۱۳۹۵-۱۳۹۹، خروج از توافق بینالمللی هستهای با ایران، موسوم به برنامه جامع اقدام مشترک (برجام)، در ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۷ بود. حال با بازگشت او به کاخ سفید و نزدیک شدن به روز خاتمه برجام در ۲۶ مهر ۱۴۰۴، ایران با چهار سناریو قابل پیشبینی تا رسیدن به روز خاتمه، به ترتیب براساس کمترین احتمال وقوع هر کدام، روبه رو خواهد بود: ۱) عدم فعال شدن سازوکار حل اختلاف موسوم به سازوکار ماشه بدون هیچگونه توافقی، ۲) تمدید مدت قطعنامه فعلی تا زمان مشخص، ۳) توافق یا برجامی جدید و ۴) فعال شدن سازوکار ماشه و برگشت تمام تحریم های قطعنامه های ملل متحد.

کلمات کلیدی: ایران، برجام، سیاست هسته ای، دولت جدید ترامپ، استراتژی هسته ای

Examining the Possible Scenarios for Iran's Nuclear Policy Under the New Trump Administration

Aghaee, Seyed Saeed*[۱]

۱. Atomic Energy Organization of Iran, Department for International, Legal, and Parliamentary Affairs

Abstract

The U.S. presidential election concluded with Donald Trump’s victory, making him the ٤٧th President of the United States. He officially took office on January ٢٠, ٢٠٢٥. One of the most significant actions of his previous presidency (٢٠١٧–٢٠٢١) was the withdrawal from the Joint Comprehensive Plan of Action (JCPOA), commonly known as the Iran nuclear deal, on May ٨, ٢٠١٨. Now, with Trump’s return to the White House and the JCPOA’s termination date approaching on October ١٨, ٢٠٢٥, Iran faces four foreseeable scenarios leading up to that deadline: ١) No activation of the dispute resolution mechanism (known as the snapback mechanism) without reaching any new agreement, ٢) Extension of the current JCPOA for a specified period, ٣) Activation of the snapback mechanism, leading to the reinstatement of all UN Security Council sanctions, and ٤) A new agreement or JCPOA.

Key words: Iran, JCPOA, Nuclear Policy, New Trump Administration, Nuclear Strategy

۱- مقدمه

در واقع دوره جدید مذاکرات هستهای ایران با جامعه بینالمللی (سه کشور اروپایی انگلیس، آلمان و فرانسه) در سال ۱۳۸۳ آغاز شد [۱]. پس از فراز و نشیبهای زیاد مذاکرات هستهای در مدت تقریبا ۱۰ ساله، که میتوان به یکی از مهمترینها دیدارها یعنی نشست وزرای خارجه ایران (دکتر ظریف) با کشورهای ۵+۱ در حاشیه اجلاس مجمع عمومی ملل متحد در ۴ مهر ۱۳۹۲ در نیویورک اشاره کرد [۲]، ایران موفق شد در ۳ آذر ۱۳۹۲ به توافقی موسوم به "برنامه اقدام مشترک" با کشورهای ۵+۱ دست یابد که طی آن مقرر شد عناصر گام اول در مدت ۶ ماه و در صورت توافق طرفین، تمدید آن به جهت دستیابی به یک توافق جامع در کمتر از یک سال براساس عناصر گام نهایی راهحل جامع، اجرایی شود [۱].

پس از اجرای گامهای متقابل و تمدیدهای متناوب در توافق موقت هستهای، ایران در نهایت با کشورهای ۵+۱ در ۲۳ تیر ۱۳۹۴ به توافقی بینالمللی موسوم به "برنامه جامع اقدام مشترک (برجام)" دست یافت. این توافق تنها ۶ روز بعد با صدور قطعنامه ۲۲۳۱ به تایید شورای امنیت ملل متحد رسید [۳].

آنچه که به نظر میرسد دیگر چیزی از این توافق باقی نمانده زیرا آمریکا با امضای رئیسجمهور وقت، دونالد ترامپ، و با حمایت تیم امنیتی خود در آن زمان، در تاریخ ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۷ بطور رسمی از این توافق خارج شد [۴] و دستور بازگشت کامل تحریمهای یکجانبه و غیرقانونی را در یک دوره ۱۸۰ روزه صادر کرد. پس از آن، کشورهای اروپایی باقیمانده در برجام موفق به جبران خسارتهای وارده به ایران و قادر به تامین منافع ایران در این توافق نشدند. حتی پس از یک سال تلاش ایران برای اجرای کامل مفاد توافق برجام، در نهایت این کشور در تاریخ ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۸ تصمیم به خروج گام به گام از این توافق گرفت [۵]. ایران در ۵ گام تا ۵ اسفند ۱۳۹۹ تعهدات برجامی خود را کاهش داد و در این تاریخ نیز بطور کامل اجرای آن را متوقف کرد [۶]. پس از شهادت رئیس دولت سیزدهم ایران، دکتر سید ابراهیم رئیسی و با روی کار آمدن دولت چهاردهم در ۷ مرداد ۱۴۰۳ به ریاست دکتر مسعود پزشکیان با شعار "وفاق ملی" و اعلام آمادگی به مذاکره بر مبنای اصول عزت، حکمت، مصلحت و احترام متقابل [۷]، ایران تا به اکنون ۳ دوره گفتوگو با طرفهای اروپایی برای دستیابی به مذاکرات آینده، آخرین آن در ۲۴ دی ۱۴۰۳ در ژنو، انجام داده است. آنچه که به نظر میرسد، اروپاییها برجام فعلی را به دلیل پیشرفتهای چشمگیر و کاملا صلحآمیز هستهای ایران قبول نداشته و به دنبال برجامی دیگر هستند [۸].

آنچه که در اظهارات مقامات جامعه بینالملل از جمله مدیرکل ملل متحد، دبیرکل آژانس و ... مهم است که باید به آن دقت کنند، این است که این آمریکا بود که به تعهدات بینالمللی خود ذیل برجام عمل نکرد و باعث انحراف و از بین رفتن یک توافق

بینالمللی شد. از این رو، از آنجاییکه این اتفاق در دولت اول ترامپ با حمایت مدیران وقت امنیتی دولت او رخ داد، باید اشاره کرد که هیچگونه تضمینی برای اجرای تعهدات برجامی دیگر وجود نخواهد داشت. چرا که براساس اظهارات مدیران جدید امنیتی دولت دوم ترامپ، آنها بیشتر از اینکه به دنبال یک توافق برد-برد هستهای باشند که تمام حقوق بینالمللی هستهای ایران رعایت شود، به نظر به دنبال محدود کردن همه توانمندیهای رو به پیشرفت ایران هستند. آنچه که به نظر میرسد این است که تا نمایان و مشخص نشدن سیاست هستهای دولت جدید ترامپ در برابر ایران، بسیاری از اقدامات طرفهای اروپایی برای هرگونه توافق هستهای با ایران، بدون پشتوانه خواهد بود.

۲- بررسی سناریوها

۲-۱- سناریو اول: عدم فعال شدن سازوکار حل اختلاف، موسوم به سازوکار ماشه بدون هیچگونه توافقی

احتمال وقوع چنین سناریویی تقریبا نزدیک به صفر ارزیابی میشود زیرا علاوه بر فشارهای ترامپ به اتحادیه اروپا برای افزایش قابلتوجه تعرفههای تجاری و بودجه دفاعی آنها از طریق ناتو، تیم جدید امنیتی ترامپ: مارکو روبیو به عنوان وزیر خارجه، مایکل والتز به عنوان مشاور امنیت ملی، ریچارد گرینل به عنوان گزینه احتمالی فرستاده ویژه رئیسجمهور در امور ویژه (از جمله ایران) و استیون ویتکاف به عنوان فرستاده ویژه رئیسجمهور در امور خاورمیانه که نسبت به برنامه هستهای ایران بسیار سختگیرانه عمل میکنند، اجازه خاتمه قطعنامه ۲۲۳۱ را در ۲۶ مهر ۱۴۰۴ نخواهند داد و تلاش خود را برای فعال کردن سازوکار ماشه از طریق اروپاییها انجام خواهند داد. همین افراد در دوره اول ترامپ، از حامیان جدی خروج او از توافق هستهای ۲۰۱۵ بودند. با این حال، عدم فعال شدن این سازوکار به دلایل احتمالی زیر میتواند به واقعیت تبدیل شود.

- رویکرد جدید ترامپ و تمایل به توافق جدید با ایران
- عدم حمایت بینالمللی

در دولت اول ترامپ، زمانی که ایالات متحده در جلسه ۲۷ مرداد ۱۳۹۹ شورای امنیت ملل متحد [۹] تلاش کرد سازوکار ماشه را فعال کند، با مخالفت شدید متحدان اروپایی فرانسه، آلمان و بریتانیا روبهرو شد. این کشورها معتقد بودند که آمریکا پس از خروج از برجام در سال ۱۳۹۷ دیگر حقی برای استفاده از این سازوکار ندارد. اگر این وضعیت در دولت دوم ترامپ ادامه یابد، ایالات متحده ممکن است بار دیگر در فعال کردن آن ناموفق باشد. با توجه به عدم توانایی آمریکا در فعال کردن سازوکار ماشه در شورای امنیت ملل متحد بصورت قانونی، توجهات به سمت تلاشهای تروئیکا برای این انجام این عمل جلب شده است.

۲-۱-۱ پیامدهای این سناریو

در صورت نخواستن طرفهای اروپایی برجام یا رسیدن به توافقی جدید با ایران، اگر این سناریو اتفاق افتد و سازوکار ماشه فعال نشود، میتواند پیامدهایی برای آمریکا و از طرف آن برای ایران داشته باشد. همچنین این سناریو، پیامدهای مثبتی برای ایران در پی خواهد داشت.

- ادامه همکاریهای اقتصادی ایران با جهان (پیامد مثبت برای ایران)
- بسته شدن دائمی پرونده هستهای ایران در شورای امنیت ملل متحد
- پذیرش حق مسلم فعالیتهای صلحآمیز هستهای ایران و رسیدن به دستاوردهای آن از طرف جامعه بینالمللی

- امکان مذاکره آتی و توافق جدید

۲-۲- سناریو دوم: تمدید مدت قطعنامه فعلی تا زمان مشخص

احتمال وقوع چنین سناریویی نیز بسیار پایین ارزیابی میشود زیرا تیم جدید امنیتی ترامپ به دنبال توافقی جدید با درنظر گرفتن همه ابعاد فعالیتهای ایران هستند. آنها معتقد هستند که براساس برجام فعلی به دلیل داشتن "بندهای پایانپذیر یا غروب"، از برنامه صلحآمیز ایران بعد از اتمام آن اطمینان حاصل نمیشود و این توافق ناقص است. آنها بر این باورند که هرگونه توافقی با ایران باید تمام فعالیتهای این کشور از جمله موشکهای بالستیک، حمایت از گروههای مقاومت منطقه و تا حد امکان محدودیت شدید بر برنامه هستهای را شامل شود. البته تمدید موقت برجام بیشتر از آنکه یک توافق نهایی باشد، می‌تواند یک راهکار برای خرید زمان و کاهش تنش‌ها باشد. این توافق می‌تواند به صورت یک "توافق سکوت" یا یک "توافق موقت کاهش تنش" صورت گیرد که هم برای ایران و هم برای غرب مزایای نسبی به دنبال داشته باشد. دلایل احتمالی که ممکن است این سناریو به وقوع بپیوندد در زیر آورده شدهاند.

- کاهش احتمال احیای کامل برجام و نیاز به راه‌حل موقت
- نیاز آمریکا و اروپا به کنترل بحران‌های منطقه‌ای و جهانی
- توافقات پشت پرده درباره کنترل فعالیت‌های هسته‌ای ایران

۲-۲-۱- پیامدهای این سناریو

- افزایش درآمد ارزی و صادرات نفت.
- کاهش تنشهای میان ایران و غرب، افزایش همکاریها با اروپاییها و کشورهای همسو مانند روسیه و چین، ادامه و افزایش فعالیتهای منطقهای ایران و حضور فعالتر در عرصه بینالمللی.
- افزایش امید به بهبود وضعیت معیشتی، تقویت موقعیت دولت در مذاکرات آینده، عدم رفع کامل مشکلات اقتصادی و معیشتی، فرصت کافی برای تدوین سناریوهای محتمل براساس اقدامات طرف مقابل و توسعه، گسترش و افزایش تجربه در برنامه صلحآمیز هستهای.

۲-۳- سناریو سوم: فعال شدن سازوکار ماشه و برگشت تمام تحریمهای قطعنامههای ملل متحد

این سناریو یکی از خطرناک‌ترین سناریوهای ممکن است که می‌تواند وضعیت منطقه را به شدت متشنج کند. احتمال وقوع این سناریو بیشتر از دو سناریو قبلی است. فعال شدن سازوکار ماشه و بازگشت تحریم‌های ملل متحد می‌تواند ایران را در یک شرایط بسیار دشوار اقتصادی و دیپلماتیک قرار دهد. این سناریو احتمالاً باعث افزایش تنش‌های منطقه‌ای و حتی درگیری‌های نظامی محدود خواهد شد. با این حال، برخی از کشورهای غربی ممکن است به دلیل نگرانی از واکنش‌های ایران و عواقب ناشی از آن، از این گزینه اجتناب کنند. اگر مذاکرات دیپلماتیک بین اروپا و ایران همچنان ادامه داشته باشد، دولت ترامپ عاقلانه، رفتار و برای کاهش تنشها تلاش کند و همچنین ایران در افزایش تولید اورانیوم با غنای ۶۰ درصد خود تجدیدنظر کند، احتمال فعال شدن سازوکار ماشه کاهش خواهد یافت. دلایل احتمالی وقوع چنین سناریویی در زیر آورده شدهاند.

- عدم توافق در مذاکرات دیپلماتیک برای تمدید یا احیای برجام
- فشار آمریکا و رژیم صهیونیستی بر کشورهای اروپایی

۲-۳-۱- پیامدهای احتمالی وقوع چنین سناریویی

- پیامدهای اقتصادی
  - بازگشت تمام تحریم‌های قطعنامههای ملل متحد
- پیامدهای سیاسی و دیپلماتیک

- خروج ایران از معاهده عدم اشاعه تسلیحات هسته‌ای: در صورت افزایش فشارها، ایران ممکن است از معاهده NPTخارج شود، که موجب نگرانی‌های امنیتی بین‌المللی خواهد شد. همچنان که قبلا نیز این کشور توسط مقامات خود تصریح کرده است، یکی از گزینههای محتمل در صورت فعال شدن سازوکار ماشه، خروج از این معاهده است که میتواند به شدت بر امنیت جهانی و مخصوصا منطقه تاثیر بگذارد. از این رو، اروپاییها باید نسبت به این موضوع بسیار حساس بوده و عاقلانه عمل نمایند.

- پیامدهای امنیتی و نظامی
  - احتمال تشدید رقابت تسلیحاتی در منطقه

۲-٤- سناریو چهارم: توافق یا برجامی جدید

آنچه که براساس روند مذاکرات بین ایران و طرفهای اروپایی (در سه مذاکره اخیر) و اظهارات اخیر مقامات ایران و خود ترامپ در مورد پرونده هستهای ایران مشخص است، و همچنین دیدگاه و پیشینه تیم جدید امنیتی دولت دوم او مگر با تغییر و روشن شدن بیشتر سیاستهای این دولت جدید، پیشبینی میشود احتمال وقوع این سناریو از سناریوهای اول و دوم بیشتر اما تقریبا برابر سناریو سوم باشد. با اشاره به "تفاهمنامه بوداپست در مورد تضمینهای امنیتی" در سال ۱۹۹۴ که مقرر شد سه کشور روسیه، بریتانیا و آمریکا در ازای دست کشیدن از سلاحهای هستهای خود توسط سه کشور اوکراین، بلاروس و قزاقستان، در برابر تهدید یا استفاده از زور علیه تمامیت ارضی یا استقلال سیاسی این کشورها دفاع کنند اما نتیجه آن جنگ گسترده روسیه علیه اوکراین شد.

۲-۴-۱- دلایل احتمالی حرکت به سمت چنین سناریویی

- ناکارآمدی وضعیت فعلی و نیاز به یک توافق پایدار
- کاهش رقابت تسلیحاتی و فشار کشورهای منطقه برای کاهش تنشها
- تحریمهای ایران

۲-۴-۲- پیامدهای حرکت به سمت چنین سناریویی

- پیامدهای اقتصادی
  - رفع یا کاهش تحریمها
  - افزایش تجارت خارجی و سرمایه‌گذاری‌ها
- پیامدهای سیاسی و دیپلماتیک
  - کاهش تنش‌های بین‌المللی و منطقه‌ای
  - افزایش تعامل ایران با غرب
  - مخالفت‌های داخلی در آمریکا و اسرائیل: جمهوری‌خواهان آمریکا و اسرائیل به‌شدت با هرگونه توافقی که تحریم‌ها را کاهش دهد، مخالف خواهند بود. احتمالاً اسرائیل فشارهای دیپلماتیک و امنیتی خود را علیه ایران افزایش خواهد داد.

- پیامدهای امنیتی و نظامی
  - افزایش قدرت دیپلماتیک ایران در منطقه
  - حفظ برنامه موشکی و حمایت از گروههای مقاومت منطقه

۳- نتیجه گیری

از آنجاییکه پرونده هستهای ایران که کاملا صلحآمیز و تحت نظارت کامل و راستیآزماییهای آژانس بینالمللی انرژی اتمی براساس توافقات فیمابین (موافقتنامه پادمانی جامع) انجام میشود، آمریکاییها و اروپاییها به دلایل مخالفت با سایر پیشرفتهای چشمگیر ایران در زمینههای موشکی و منطقهای، آن را سیاسی جلوه داده و آژانس نیز خارج از صلاحیت خود این موضوع را به پیروی از آنها تشدید میکند. آژانس باید براساس اساسنامه و ماهیت فنی بودن خود، تنها در مورد موضوعات فنی بصورت عینی و بیطرفانه اظهارنظر نماید و وارد مسائل سیاسی نشود. از این رو، به دنبال تحلیل ارائه شده، چهار سناریو پیشروی سیاست هستهای ایران در دولت جدید ترامپ ارزیابی شد که درجه احتمال وقوع آنها به ترتیب سناریو سوم (فعال شدن سازوکار ماشه و برگشت تمام تحریمهای قطعنامههای ملل متحد)، سناریو چهارم (توافق یا برجامی جدید)، سناریو دوم (تمدید مدت قطعنامه فعلی تا زمان مشخص) و سناریو اول (عدم فعال شدن سازوکار حل اختلاف موسوم به سازوکار ماشه بدون هیچگونه توافقی) میباشد.

٤- مراجع

[۱] محمد جواد ظریف، علی اکبر صالحی، سید عباس عراقچی و مجید تخت روانچی، "راز سر به مهر، کتاب اول: توافق موقت ژنو"، نشر اطلاعات ۱۴۰۰.

[۲] https://www.theguardian.com/world/۲۰۱۳/sep/۲۷/us-iran-nuclear-deal-discussion

[۳] https://undocs.org/Home/Mobile?FinalSymbol=S%۲F۲۰۱۵٪۲F٥٤٤&Language=E&DeviceType=Desktop&LangRequested=False

[٤] https://www.nytimes.com/۲۰۱۸/۰٥/۰۸/world/middleeast/trump-iran-nuclear-deal.html

[٥] https://www.iaea.org/sites/default/files/۲٤/۱۱/gov۲۰۲٤-٦۱.pdf

[٦] https://www.iaea.org/sites/default/files/۲٤/۱۱/gov۲۰۲٤-٦۱.pdf

[۷] https://www.ettelaat.com/news/۷۸٤۱۲/%D۸٪AC%D۸٪B۲٪DB%۸C%DB%۸C%D۸٪A۷%D۸٪AA+%D۹٪۸٥٪D۸٪B٥٪D۸٪A۷٪D۸٪AD%D۸٪A۸٪D۹٪۸۷+%D۹٪BE%D۸٪B۲٪D۸٪B٤٪DA%A۹٪DB%۸C%D۸٪A۷٪D۹٪۸٦+%D۸٪A۸٪D۸٪A۷+%D۸٪AE%D۸٪A۸٪D۸%B۱٪D۹٪۸٦٪DA%AF%D۸٪A۷٪D۸٪B۱+%D۸٪A۷٪D۹٪۸٥٪D۸٪B۱٪DB%۸C%DA%A۹٪D۸٪A۷٪DB%۸C%DB%۸C+%D۹٪۸٥٪D۹٪۸٦٪D۸٪AA%D۸٪B٤٪D۸٪B۱+%D۸٪B٤٪D۸٪AF+

[۸] https://www.reuters.com/world/europe/iran-nuclear-programme-nearing-point-no-return-frances-macron-says-۲۰۲٥-۰۱-۰٦/

[۹] https://docs.un.org/en/S/۲۰۲۰/۸۰٥

امنیت هسته‌ای در ایران؛ چالش‌ها و راهکارها (کد مقاله : ۱۴۴۱)

صلواتی نیا، هدی
سازمان انرژی اتمی، شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران

چکیده:
این مقاله با نگاهی جدید نسبت به موضوع امنیت هسته‌ای در ایران، پس از اشاره به رویدادهای اخیر ملی یا بین‌المللی که به این مهم ضربه وارد کرده (به طور مثال سرقت اسناد هسته ای) و یا از وجود نقص در آن ناشی شده است (مثلا سرقت منابع پرتوی)، مهم‌ترین عواملی را مورد بررسی قرار می‌دهد که این حوزه را دچار چالش می‌کنند. رابطه امنیت و ایمنی از دیگر موضوعات اشاره شده در این مقاله می‌باشد که بعد از بررسی رویدادهای مرتبط مشخص می‌شود در زمان کاهش امنیت، ایمنی شاغلین، مردم، محیط‌زیست، مردم دیگر کشورها، و حتی امنیت ملی به خطر خواهد افتاد. در واقع امنیت و ایمنی دو بال پرنده دانش هسته‌ای‌اند که در صورت خدشه به هر کدام، اوج‌گرفتن این پرنده غیرممکن خواهد بود. در قسمت نتیجه‌گیری، پیشنهادهایی برای افزایش امنیت هسته‌ای در ایران ارائه شده است که مهم‌ترین این پیشنهادها سرمایه‌گذاری و نگهداشت منابع انسانی سازمان به‌نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: Nuclear Security, Nuclear Safety, Nuclear Safeguards

Nuclear Security in Iran; Challenges and Solutions

Salavatinia, Hoda*
AEOI, Iran Radiation Application Development Co.

Abstract:

This article takes a new perspective on the issue of nuclear security in Iran. After highlighting recent national or international events that have compromised this matter (such as the theft of nuclear documents) or revealed deficiencies in it (for example, the theft of radioactive materials), it examines the key factors that challenge this field. Another important topic discussed in this article is the relationship between security and safety. A review of relevant events indicates that when security is weakened, the safety of workers, the public, the environment, people in other countries, and even national security itself is endangered. In fact, security and safety are the two wings of the bird of nuclear science, and if either is damaged, the bird will be unable to soar.
In the conclusion, recommendations for improving nuclear security in Iran are presented, with the most crucial suggestion being investment in and retention of the organization's human resources.

Key words: Nuclear Security, Nuclear Safety, Nuclear Safeguards

۱ – مقدمه:

طبق هرم مازلو[۲۵]، امنیت پس از نیازهای جسمانی یا فیزیولوژیک، مهم‌ترین نیاز برای ادامه زندگی و خودشکوفایی انسان است. امنیت در لغت، دور بودن از خطر معنا شده که این خطر می‌تواند مادی یا معنوی باشد. در جدیدترین مدارک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، می‌خوانیم: «امنیت هسته‌ای؛ پیشگیری و کشف و پاسخ به اعمال مجرمانه یا عمدی غیرمجازی است که مربوط به مواد هسته‌ای، سایر مواد پرتوزا، تأسیسات یا فعالیت‌های مرتبط باشد» [۲]. در برخی از مقالات استفاده بهینه از نیروی انسـانی متعهد، بالاترین جایگاه را در اجرای پدافند غیرعامل و در نتیجه افزایش امنیت هسته‌ای داشته است [۱]. برخی از مستندات هم عوامل دیگر را مؤثر بر این موضوع دانسته‌اند.

سرقت یا مفقودی منابع پرتوزا به‌عنوان اولین چالش در این حوزه، زمانی موجب نگرانی می‌شود که منبع مفقود یا ربوده شده، حدی از پرتوزایی را دارد که می‌تواند برای افراد خطرناک باشد. موضوعی که به‌رغم وجود تمهیدات امنیتی سالیانه در سراسر دنیا اتفاق می‌افتد.

همچنین مفقودی یا سرقت حفاظ‌های ایمنی که باعث کاهش پرتوگیری ناخواسته افراد هستند، می‌تواند به‌عنوان یک موضوع امنیتی فیزیکی باشد که در صورت آگاهی رباینده از تأثیر این کار بر ایمنی مردم، می‌تواند به‌عنوان مسئله‌ای در امنیت هسته‌ای مورد مطالعه قرار گیرد.

از دیگر چالش‌های مسائل امنیتی می‌توان به ربوده شدن اسناد و مدارک هسته‌ای کشورها اشاره کرد که در تعریف جدید امنیت هسته‌ای در لغت‌نامه آژانس، زیر مجموعه فعالیت‌ها است. [۲]

۲ – بررسی تعدادی از رویدادهای اخیر مرتبط با امنیت هسته‌ای ایران و جهان:

در این قسمت به شرح برخی از روادید اخیر دررابطه‌با موضوع امنیت هسته‌ای در ایران و جهان و بررسی عوامل مؤثر بر آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۱- سرقت منابع پرتوزا

این بند یکی از قسمت‌های مهمی است که امنیت و ایمنی هسته‌ای را به هم پیوند می‌دهد، در واقع فصل مشترک ایمنی و امنیت جایی است که عدم وجود امنیت کافی در صیانت از مواد هسته‌ای (مباحث پادمانی)، باعث کاهش سطح ایمنی افراد خواهد شد (افزایش پرتوگیری).

۲-۱-۱- مفقودی بسته حاوی چهار چشمه پرتوزا در فرودگاه باراخاس مادرید

پنجشنبه ۲۲ آذر ۱۴۰۳ (۱۲ دسامبر ۲۰۲۴) بسته ای حاوی چهار چشمه پرتوزای کپسول شده سلنیوم -۷۵ (چشمه طبقه ۲ هر کدام با پرتوزایی ۸۹/۹۱ کوری) با کاربرد پرتونگاری صنعتی از فرودگاه پراگ جمهوری چک برای یک مرکز در مادرید به فرودگاه باراخاس ارسال شد که در زمان مراجعه پرسنل گیرنده، مسئولین ذی‌ربط در فرودگاه، عنوان کردند که چنین بسته ای دریافت نشده و از محل آن اطلاعی ندارند. پس از بررسی تصاویر دوربین های فرودگاه های مبدا و مقصد و بازرسی‌های مربوطه توسط واحد نظارتی هسته‌ای اسپانیا و پیگیری اداره حمل و نقل آن، بسته در پایانه دیگری در جایی که خارج از دید بود پیدا شد.

در این پرونده، بررسی‌های اولیه نشان داد که عدم انطباق‌های نظارتی وجود دارد که در زنجیره رویدادها منجر به مفقودی بسته شده است که نیازمند انجام اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی است.

با درنظرگرفتن آنکه در این رویداد بسته مفقود، بدون آسیب پیدا شده و تأثیری بر سلامت مردم و محیط‌زیست نداشت (در اینجا تأثیرات روانی موضوع نادیده گرفته شده است)؛ رتبه نهایی رویداد ۱ (وضعیت غیرعادی) تعیین شد اما چنانچه این بسته

[۲۵] Maslow

پیدا نمی‌شد می توانست نگرانی‌های بسیار زیادی در جامعه ایجاد کند و باعث خرابکاری‌های عمدی یا حتی سوانح غیرعمدی شود.

۲-۱-۲- پیشنهاد

عمومی:

- ✓ استفاده از نیروهای متعهد و متخصص؛
- ✓ استفاده از دوربین‌های مداربسته و نظارتی؛

اختصاصی در این پرونده:

- ✓ وجود دستگاه‌هایی حاوی آشکارسازهای هسته‌ای با آستانه ثبت بسیار پایین مانند دروازه پایش در مبادی ورود و خروج؛
- ✓ اتصال مکان‌یاب (ردیاب GPS) به محموله‌های پرخطر

۲-۲- سرقت اسناد هسته‌ای

شاید سرقت اسناد در تعاریف قدیم امنیت هسته‌ای وجود نداشت؛ اما امروزه به‌عنوان زیرمجموعه فعالیت‌های هسته‌ای (در تعریف جدید امنیت هسته‌ای) می‌توان به آن اشاره کرد.

۲-۲-۱- سرقت مدارک از انبار شورآباد تهران

قبل از انجام عملیات سرقت، مأموران موساد انبار را به مدت دو سال **تحت‌نظر** داشته‌اند. مقامات اسرائیلی باور دارند نگه‌داری اسناد هسته‌ای آن هم در انباری خارج از مناطق محافظت شده نظامی، تنها به دلیل **برانگیخته‌نشدن** تردیدها نسبت به ماهیت واقعی این انبار بوده و ایران از این انبار **به‌عنوان** استتاری برای نگه‌داری اسناد هسته‌ای خود استفاده می‌کرده است.

برخی از منابع خبری اسناد فاش شده در این سرقت را بهانه‌ای برای خروج یک‌جانبه آمریکا از توافق هسته‌ای گروه ۵+۱ با ایران عنوان کردند که تأثیرات مختلفی روی روابط سیاسی و اجتماعی بین‌المللی گذاشت و واضح‌ترین آن اعمال تحریم‌های بیشتر بر کشور بود.

در تحلیل امنیتی این واقعه ذکر این موضوع ضروری است که **چون مأموران** موساد می‌دانستند که اسناد هسته‌ای **مورد نیاز دقیقاً** در کدام یک از ده‌ها **گاوصندوق** موجود در انبار متروک قرار دارد، نفوذ به داخل ۳۶ صندوق مورد نظر، در مدت زمان کم و با استفاده از مشعل‌های **هواسازی** ممکن بود. لیکن محسن رضایی در ۲۵ فروردین ۱۴۰۰، آلودگی امنیتی کشور را علت این **مو**ضوع دانست و خواستار سالم‌سازی امنیتی و پاک‌سازی منابع نفوذی احتمالی از سوی دولت آینده شد.

۲-۲-۲- پیشنهاد

عمومی:

- ✓ به‌کارگیری و آموزش نیروی انسانی متعهد (حتی در پست نگهبان)، به‌صورت تمام‌وقت؛
- ✓ تأمین مالی مستخدمین (مخصوصاً در درجات پستی پایین مانند نگهبانان) در این‌گونه فضاهای امنیتی به‌طوری‌که حتی با پیشنهادهای عالی تطمیع نشوند.

اختصاصی در این پرونده:

- ✓ استفاده از انبارهایی در مناطق با امنیت بالاتر.
- ✓ استفاده از دوربین‌های مداربسته به‌صورت نامحسوس و به‌کارگیری نیروی متعهد برای کنترل ۲۴ ساعته این دوربین‌ها.

۲-۳- سرقت حفاظ‌های ایمنی

این بند هم یکی از قسمت‌های مهمی است که امنیت و ایمنی را به هم پیوند می‌دهد، البته در اینجا عدم کفایت امنیت فیزیکی (حراستی)، پتانسیل پرتوگیری ناخواسته افراد (ایمنی هسته‌ای) را افزایش می‌دهد.

۲-۳-۱- سرقت حفاظ‌های سربی در بیمارستان امام رضا (ع) کرمانشاه

اول اردیبهشت‌ماه سال ۱۴۰۳، سرقت آجرهای سربی که به عنوان حفاظ ایمنی در سقف اتاقک شتابدهنده بیمارستان امام رضا (ع) کرمانشاه، به عنوان یک رویداد با پتانسیل تهدید ایمنی-امنیتی گزارش شد. با وجود اینکه هیچ منبع پرتوزایی جابجا نشده بود، اما فقدان این حفاظ‌ها باعث پرتوگیری غیرموجه افرادی شد که در طبقه بالای شتابدهنده درمانی این بیمارستان در رفت و آمد و یا حتی ساکن (اتاق نگهبانی) بودند.

احتمال تطمیع‌شدن سارقان سرب بیمارستان امام رضا (ع) از سوی برخی شبکه‌ها، مطرح شده است که در صورت اثبات آن این موضوع به یک موضوع امنیتی هسته‌ای تبدیل خواهد شد، زیرا احتمال خرابکاری می‌رود؛ لیکن درصورتی‌که سارقان تنها به دلیل ارزش مادی سرب، اقدام به سرقت کرده باشند، این موضوع جنبه امنیتی هسته‌ای پیدا نمی‌کند و لازم است تنها توسط نیروهای انتظامی پیگیری شود.

درهرحال تکرار وقایع این‌چنینی که حکایت از نبود امنیت فیزیکی (حراستی) کافی در مناطق پرخطر دارد، بی‌شک به ایمنی مردم لطمه خواهد زد.

۲-۳-۲ هشدار

پتانسیل تکرار این موضوع در حال حاضر در شهرهای یزد، اهواز، گیلان، اصفهان و دیگر مناطقی که دستگاه‌های خودحفاظ به همراه چشمه، مستقر هستند وجود دارد. (حجم زیادی از حفاظ‌های این دستگاه‌ها سربی بوده که ارزش مادی زیادی دارد) که امید است با لحاظ‌کردن مسائل امنیتی (حراست) نه‌تنها از سرقت چشمه‌های این دستگاه‌ها بلکه از ربوده شدن حفاظ‌های ایمنی مربوطه جلوگیری شود.

۲-۳-۳- پیشنهادات

عمومی:

- ✓ به‌کارگیری و آموزش نیروی انسانی متعهد (حتی در پست نگهبان)، به‌صورت تمام‌وقت.

اختصاصی در این پرونده:

- ✓ وجود دستگاه‌هایی حاوی آشکارسازهای هسته‌ای با آستانه ثبت بسیار پایین مانند دروازه پایش در مبادی ورود و خروج؛
- ✓ وجود دزیمتر برخط (پایشگر محیطی) در مناطقی که مولدهای پرتوی وجود دارند، و
- ✓ کوتاه‌کردن بازه‌های زمانی نگهبانی و در نتیجه هوشیاری بیشتر نگهبانان.

۳ - امنیت روانی:

نبود دانش و آگاهی کافی در عموم مردم باعث شده با انتشار اخبار مربوط به علوم هسته‌ای، اذهان عمومی درگیر شده و حتی در صورت بی‌اهمیت‌بودن موضوع از نظر علمی، امنیت روانی جامعه مورد تهدید قرار گیرد. این موضوع به‌قدری اهمیت دارد که علی‌رغم فواید بی‌شمار استفاده از فناوری هسته‌ای، اخیراً در کشور آلمان، به درخواست حزب سبز، شاهد خاموش‌شدن رآکتورها بوده‌ایم؛ لذا افزایش آگاهی و ایجاد امنیت روانی در مباحث مربوط به علوم و فنون هسته‌ای، می‌تواند باعث افزایش اعتماد ملی، حمایت مردم و در نهایت منجر به ارتقای امنیت هسته‌ای شود.

۴ - بحث و نتیجه‌گیری:

۴-۱- امنیت هسته‌ای در سایه ایمنی-وجود استانداردها

همان‌طور که در ابتدای بند ۲ مطرح شد، رابطه امنیت و ایمنی هسته‌ای وقتی مشخص می‌شود که در زمان کاهش امنیت، ایمنی شاغلین، مردم، محیط‌زیست، مردم دیگر کشورها، و حتی امنیت ملی به خطر می‌افتد. امنیت و ایمنی دو بال پرنده دانش هسته‌ای‌اند که در صورت خدشه به هر کدام، اوج‌گرفتن این پرنده غیرممکن خواهد بود.

در واقع طبق تعریف دیگری در لغت‌نامه آژانس، امنیت در رابطه با اقدامات عمدی توسط افراد (در مورد تهدیدات سایبری به دستور افراد) است که می‌تواند باعث آسیب یا تهدید افراد، اموال، جامعه، محیط‌زیست شود درصورتی‌که ایمنی مجموعه اقدامات انجام شده برای جلوگیری از پرتوگیری ناخواسته مردم است.

در این تعریف نیز ردپای ایمنی در مسائل امنیتی به چشم می‌خورد. آنجا که ناکافی بودن مباحث امنیتی می‌تواند به ایمنی هسته‌ای مردم ضربه وارد کند.

در اینجا ایمنی هسته‌ای از دو دیدگاه بررسی خواهد شد که در نتیجه انجام این تمهیدات ایمنی، اعتماد به صنعت هسته‌ای افزایش‌یافته و باعث حمایت بیشتر جامعه و کمک به موضوع امنیت هسته‌ای می‌شود.

۴-۱-۱- ایمنی پرتوی و غیرپرتوی مولدهای پرتوی (دستگاه‌ها و تاسیسات)

پس از به‌کارگیری همکاران متخصص در طراحی و ساخت این‌گونه مولدهای پرتوی، و انجام شبیه‌سازی‌ها و دزیمتری‌های متعدد قبل از بهره‌برداری، و در نهایت انجام ارزیابی انطباق بر اساس استانداردهای مربوط و اخذ گواهینامه از نهاد قانونی، این اطمینان وجود دارد که محصول (از نقطه‌نظر پرتوی - اخذ گواهینامه بر اساس طرح واحد قانونی و یا کامل - اخذ گواهینامه بر اساس تطابق با کلیه‌بندهای استاندارد) ایمن بوده و در هنگام استفاده در صورت اخذ مجوز و پروانه‌های مربوطه و رعایت دستورالعمل‌ها در حین کار، هیچ مشکلی برای افراد نخواهد داشت.

۴-۱-۲- ایمنی عملکردی

با اثبات سلامت محصولات پرتودیده و هم چنین اطمینان از اینکه نیاز مشتری برآورده شده است (کنترل و تضمین کیفیت)، می‌توان به جلب‌اعتماد مردم و حمایت ایشان از صنعت دست پیدا کرد. این مهم می‌تواند توسط اعلان عمومی نتایج آزمایشگاهی مربوط به عملکرد دستگاه‌های مولد پرتو (کاهش بار میکروبی، کاهش آفات، سِتَرون کردن و...) در مورد محصولات پرتودیده حاصل شود.

۴-۲- امنیت با تخصیص منابع مالی

بدون تأمین مالی هر حرفی از ایجاد امنیت، شوخی بیش نیست. اختصاص منابع مالی کافی برای ایجاد امنیت هسته‌ای، بی شک نقش اساسی در ایجاد و افزایش امنیت و ایمنی دارد. از تربیت، جذب و نگهداشت نیرو و سرمایه انسانی متخصص و متعهد نگه‌داشتن ایشان، تا امکان خرید مواد موردنیاز به‌منظور حفاظ‌سازی و فراهم‌آوردن مکان‌های امن برای بایگانی مدارک محرمانه، همه‌وهمه نیاز به منابع مالی دارند که چون این مورد بسیار شفاف است از تکرار آن در اینجا صرف‌نظر می‌کنیم.

۴-۳- امنیت و نیروی انسانی

۴-۳-۱- تربیت نیروی انسانی متخصص

افزایش دانشگاه‌ها با امکانات آموزشی جهت تربیت نیروهای متخصص نه‌تنها در حوزه علوم و فناوری هسته‌ای بلکه نیاز کشور در حوزه تربیت افراد مسلط به حقوق هسته‌ای از اولویت‌های کشور است؛ بنابراین ایجاد و افزایش دانشکده «حقوق هسته‌ای» از نیازهای مهم کشور در زمینه افزایش امنیت هسته‌ای است؛ زیرا باتربیت این‌گونه افراد می‌توان در جوامع بین‌المللی باقدرت بیشتر ظاهر شد و از حق مسلم کشور دفاع کرد که خود امنیت هسته‌ای را به همراه دارد.

همچنین، تربیت نیروی انسانی متخصص در زمینه علوم هسته‌ای باعث افزایش ضریب ایمنی در تولیدات هسته‌ای کشور (تأسیسات و دستگاه‌ها) شده که باتوجه‌به بندهای بالا ضریب ایمنی هسته‌ای را افزایش خواهد داد.

۴-۳-۲- جذب نیروی انسانی متهد و متخصص در سازمان‌های مرتبط

بسیار مشاهده شده است که فارغ‌التحصیلان رشته‌های مرتبط با علوم هسته‌ای، برای جذب در سازمان انرژی اتمی و شرکت‌های وابسته اقدام کرده‌اند؛ اما به دلیل طولانی‌شدن روند اداری مصاحبه و جذب، این افراد در پست‌ها و مراکز غیرمرتبط با تخصص خود به کار مشغول شده‌اند. افزایش سرعت در روند اداری جذب این افراد می‌تواند قدم مهمی در افزایش امنیت هسته‌ای ایفا کند.

موضوع اولویت جایگاه تخصص و تعهد در جذب افراد به سازمان، از دیگر مسائل چالش برانگیزی است که در حوزه منابع انسانی نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۴-۳-۳- نگهداشت صحیح سرمایه‌های انسانی

در سال‌های اخیر بسیار مشاهده شده است که پس از جذب فارغ‌التحصیلان جوان و بی‌تجربه (البته باتوجه‌به زیربند بالا در بهترین حالت) و آموزش‌های لازم به آن‌ها و تبدیل برخی از آنان به سرمایه‌های انسانی، عده زیادی از ایشان به دلایل مختلف عزم جابه‌جایی به واحدهای دیگر یا ترک شغل می‌کنند. با شناخت عوامل مؤثر بر این موضوع می‌توان باعث کاهش هزینه‌ها، نگهداشت سرمایه انسانی و افزایش امنیت هسته‌ای شد.

تقسیم عادلانه منابع محدود مالی بین نیروها (در قالب حقوق، مزایا، تشویقی) یکی از روش‌های ایجاد تعهد به کار و کارفرما در سرمایه‌های انسانی است. از عوامل دیگر ایجاد تعهد، می‌توان به کاهش ساعات کاری (مخصوصاً برای بانوان متأهل) و همچنین ایجاد محیط‌های کاری کم‌چالش (انواع حواشی اداری) اشاره کرد.

با کاهش تعهد نیروهای انسانی به مجموعه‌ها، احتمال نفوذ دشمن به آنان افزایش‌یافته و امنیت هسته‌ای دچار تهدید خواهد شد. به‌صورت کلی عوامل مؤثر بر تعهد متخصصین در دودسته کلی قرار می‌گیرد:

۴-۳-۳-۱- چالش های زندگی شخصی نیروها که خود شامل مسائل مالی (حقوق و ....) و روحی (تجرد و ....) است.

۴-۳-۳-۲- چالش های زندگی کاری نیروها که خود شامل روابط با همکاران و نوع کار است و چالش هایی است که به‌دلیل کارمند سازمان بودن در زندگی عادی افراد تداخل ایجاد می کند (مثلا بروکراسی های اداری سفرهای خارجی)

۴-۳-۳-۳- چالش های سیاسی نیروها که در رابطه با مسائل بین الملل و اخبار روز هسته‌ای است.

۴-۳-۳-۴- چالش های اجتماعی نیروها که نوع تفکر جامعه نسبت به کارمندان هسته‌ای ایجاد می‌کند.

۴-۳-۴- جانشین‌پروری به عنوان شرط بازنشستگی

البته این پیشنهاد در برخی از واحدهای سازمان به عنوان یک فرهنگ اداری شایسته در حال اجراست؛ اما پیشنهاد می‌شود برای افزایش ضریب ایمنی هسته‌ای (انحصاری نشدن علم یا تجربه افراد)، حتماً به‌عنوان شرطی برای بازنشستگی قانونی شده و حداقل یک سال قبل از این موعد، یک فرد جایگزین با توانایی‌های لازم به مجموعه معرفی شود و تا قبل از بازنشستگی فرد کلیه علوم به جانشین وی منتقل گردد.

۴-۳-۵- به‌کارگیری مجدد نیروهای علاقمند و مفید پس از بازنشستگی

امروزه شمار زیادی از نیروهای باتجربه سازمان و شرکت‌های وابسته بی‌صبرانه مشتاق فرارسیدن موعد بازنشستگی هستند تا شروع به فعالیت در شرکت‌های خصوصی کنند. ابتدا لازم است عوامل این موضوع شناسایی و تاحدامکان حذف شوند، تا نه‌تنها این سرمایه‌ها منتظر موعد بازنشستگی نباشند؛ بلکه در صورت نیاز سازمان، مشتاق به کار مجدد (در قالب آموزش یا مشاوره) باشند.

استفاده مجدد از چنین سرمایه‌های باتجربه‌ای می‌تواند سدی در مقابل رسوخ دشمن به علوم و مدارک هسته‌ای بوده و باعث افزایش امنیت هسته‌ای شود.

۵ - مراجع:

[۱] مینایی، حسین-۱۳۸۹-فصلنامه علوم و فنون نظامی-اهمیت نیروی انسانی در پدافند غیرعامل
[۲] IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, ۲۰۲۲ (Interim) Edition

یکی از ما شوید!

انجمن هسته ای ایران

انجمن برتر کشور در سال ۱۴۰۲

NSI.IR INFO@NSI.IR

سی و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۳-۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۴ | مشهد

INC31.NSI.IR

انجمن هسته ای ایران

سازمان انرژی اتمی ایران

پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ایران