گزارش پژوهشی:

بررسی چالش‌ها و الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای

اندیشکده اقتصاد مقاومتی

گروه انرژی

خرداد ماه ۱۴۰۱

رهبر معظّم انقلاب: علاج برون رفت از مشکلات کشور «اقتصاد مقاومتی» است.

معرفی اندیشکده اقتصاد مقاومتی

اندیشکده اقتصاد مقاومتی یک کانون تفکّر با ماموریت «تصمیم سازی برای حل مسائل اقتصاد کشور در راستای تحقق اقتصاد مقاومتی» است که در سال ۱۳۹۵ فعالیت رسمی خود را آغاز نمود.

شناسایی شبکه مسائل در هر حوزه موضوعی، طراحی راهکار برای حل مسائل احصاء شده و هم‌اندیشی جهت ارزیابی و تدقیق آن، بررسی تجربیات جهانی، طرح مباحث در فضای نخبگانی و رسانه‌ای و پیگیری راهکارهای ارائه شده از دستگاه‌ها و مسئولین مرتبط به منظور اتّخاذ تصمیمات لازم، از جمله فعالیت‌هایی است که در اندیشکده انجام می‌شود.

علاقه‌مندان می‌توانند از طریق سایت Mett.ir با اندیشکده اقتصاد مقاومتی در ارتباط باشند و نظرات، انتقادات و پیشنهادهای خود را در خصوص این گزارش و همچنین سایر فعالیت‌های اندیشکده، مطرح کنند.

بررسی چالش‌ها و الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای

گروه موضوعی:	انرژی
نوع گزارش:	پژوهشی
شناسه:	۱۴۰۱۰۳۱۲۱
تاریخ انتشار:	۱۴۰۱/۰۳/۳۱
تهیه و تدوین:	محمدحسین احمدی
مدیر مطالعه:	صالح رحیمی
ناظر علمی:	افشین غلامعلی پور
	محمدمهدی یزدانی

خلاصه مدیریتی

یکی از الزامات توسعه و پیشرفت یک کشور، در اختیار داشتن منابع پایدار انرژی است. با توجه به افزایش روزافزون تقاضای جهانی انرژی، در بسیاری از کشورهای توسعه یافته، سیاستگذاران صنعت انرژی به دنبال «تنوع بخشی به ترکیب سبد انرژی» در راستای امنیت عرضه آن هستند. از مسیرهای مورد توجه دنیا در تأمین انرژی و تنوع بخشی به سبد آن، استفاده از فناوری هسته‌ای برای تولید برق است.

توسعه برق هسته‌ای در سطح جهانی پنج مرحله را تجربه کرده است. این مراحل شامل: مرحله کشف (از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۵۰)، مرحله مدل آزمایشی (از سال ۱۹۵۱ تا ۱۹۶۸)، مرحله توسعه سریع (از سال ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹)، مرحله توسعه راکد (از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰) و مرحله بهبودی (از ابتدای قرن ۲۱ تا کنون) است. در طول این مراحل، فناوری برق هسته‌ای از نسل اول تا نسل چهارم توسعه یافته است.

در حال حاضر راکتورهای نسل اول منسوخ شده‌اند، راکتورهای نسل دوم بیشترین تعداد راکتورهای در حال کار را تشکیل می‌دهند، راکتورهای نسل سوم در مرحله ساخت و تجاری قرار دارند و راکتورهای نسل چهارم اکثراً در حال طراحی هستند. شرکت‌های مطرحی از آمریکا، فرانسه، چین، روسیه و کره‌جنوبی در عرصه ساخت راکتور فعالیت می‌کنند. ساخت نیروگاه هسته‌ای از منظر مدیریتی و فنی پیچیده است که اغلب با همکاری چندین پیمانکار بزرگ به همراه پیمانکاران فرعی متعدد انجام می‌شود و مفاد قرارداد نیز از نیروگاهی به نیروگاه دیگر متفاوت است.

مجموع منابع کشف شده اورانیوم جهان حدود ۵.۵ میلیون تن تخمین زده می‌شود که با تکنولوژی PWR امروزی، در صورتی که تمام برق مورد نیاز جهان از هسته‌ای تامین شود، تنها برای ۱۰ سال کافی است، در حالی که یکی از جنبه‌های مهم و اساسی انرژی هسته‌ای این است که به‌جای یک‌بار استفاده از سوخت هسته‌ای و سپس احتساب آن به عنوان ضایعات، بیشتر سوخت مصرف شده قابل بازیافت است. بازفرآوری سوخت مصرف شده در نیروگاه‌های هسته‌ای و استفاده از چند نوع فناوری راکتور از جمله آب سبک، راکتورهای زاینده و آب سنگین، امکان استفاده چند باره از سوخت را ایجاد می‌کند که موجب تشکیل چرخه سوخت بسته شده است و از این روش می‌توان حتی چند صد سال برق مورد نیاز را تأمین کرد.

بررسی تاریخچه هسته‌ای کشور چین نشان می‌دهد این کشور برای رسیدن به جایگاه کنونی خود در صنعت برق هسته‌ای بیش از ۶۰ سال زمان و هزینه مالی زیادی صرف کرده است. پس از سرد شدن روابط چین با شوروی، این کشور با اختصاص منابع بیشتر سعی در بومی سازی این فناوری کرد. با اختصاص منابع مالی زیاد، اولین راکتور تماماً چینی «گینشان» ساخته شد. پس از آن چین با خرید راکتورهای فرانسوی و استفاده از این فناوری، راکتورهای خود را توسعه داد. ساخت نیروگاه‌های آزمایشی در پاکستان، راکتور سازان چینی را خبره‌تر

کرد و خرید امتیاز فناوری راکتور ساخت آمریکا موجب توسعه راکتورهای نسل سوم چین شد. پس از آن ایمنی هسته‌ای اولویت این کشور قرار گرفت و راکتورهای چینی ملزم به قبولی در آزمون‌های ملی و بین‌المللی شدند.

چین اعلام کرده است که قصد دارد در تولید سوخت برای نیروگاه‌های هسته‌ای خودکفا شود. با این حال هنوز تا حدی به تأمین‌کنندگان خارجی برای تمام مراحل چرخه سوخت، از استخراج اورانیوم تا ساخت و فرآوری مجدد، بویژه برای تأمین اورانیوم متکی است. از آنجایی که این کشور به سرعت تعداد راکتورهای جدید را افزایش می‌دهد، برای تامین نیازهای سوخت هسته‌ای خود، تعدادی پروژه داخلی را با همکاری تأمین‌کنندگان خارجی آغاز کرده است. سیاست ملی چین، تأمین یک سوم اورانیوم مورد نیاز از داخل، یک سوم از سهام چین در معادن خارجی و یک سوم از بازار آزاد است و سایر مراحل چرخه سوخت بومی خواهند بود.

جدول زیر خلاصه‌ای از وضعیت صنعت برق هسته‌ای در کشورهای بررسی شده در گزارش را از نظر شاخص‌های مهم نشان می‌دهد:

شاخص	امارات	برزیل	ترکیه	هند	سوئد	بریتانیا	ایران	چین
سهم هسته‌ای از کل ظرفیت نیروگاهی(٪)	۸	۱	۰	۱.۵	۱۸	۸.۶	۱.۲	۲.۱
سهم هسته‌ای از تولید برق (٪)	-	۲.۶	۰	۳.۱	۲۹.۸	۱۶	۲	۵
تعداد راکتور فعال	۲	۲	۰	۲۳	۶	۱۱	۱	۵۳
فناوری ساخت راکتور	ندارد	در حال توسعه	ندارد	دارد	دارد	دارد	ندارد	دارد
فناوری تولید سوخت	ندارد	دارد	ندارد	تنها آب سنگین	دارد	دارد	ندارد	دارد
تأمین مالی خارجی	۴۰ درصد	۱۰۰ درصد وام	BOO	-	مشارکت	مشارکت	-	-
داخلی‌سازی	تربیت نیرو	افزایش تدریجی سهم	-	۱۰۰ درصد	مشارکت	۱۰۰ درصد	-	۱۰۰ درصد
مالکیت و بهره‌برداری	داخلی	داخلی	خارجی	داخلی	داخلی	داخلی و خارجی	داخلی	داخلی

با بررسی منابع متعدد مطالعاتی و مصاحبه با چند تن از کارشناسان این حوزه سعی شده است تا موانع و چالش‌های توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور شناسایی و الزامات آن بیان شود. در بخش چالش‌های سیاستی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نگاه کوتاه مدت و عدم ثبات سیاستگذاری و برنامه ریزی: یکی از چالش‌های پررنگ در تصمیم‌گیری برای توسعه برق هسته‌ای، بلندمدت بودن نتایج و آثار تصمیم است. تصمیم‌گیری برای ساخت نیروگاه هسته‌ای از زمان شروع فرآیند ساخت، بهره‌برداری و در نهایت تعطیلی نیروگاه و خاموشی ایمن آن، فرآیندی است که نزدیک به چند دهه به طول می‌انجامد. با توجه به طولانی بودن زمان ساخت نیروگاه هسته‌ای، تغییر دولتمردان و نگرش حاکمیت و تصمیم‌گیران این حوزه، چالش بزرگی برای متولیان امر ایجاد می‌کند.

پیوند امنیتی-سیاسی برنامه هسته‌ای جمهوری اسلامی ایران: در اغلب کشورها ساخت و توسعه نیروگاه هسته‌ای ساختاری غیرسیاسی دارد و همکاری شرکت‌های خصوصی در زمینه فناوری نیروگاه هسته‌ای بسیار برجسته است. در حالی که صنعت هسته ای ایران بواسطه شرایط کشور دارای محرمانگی است.

عدم توافق و تمایل اغلب تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان با توسعه انرژی هسته‌ای: عدم همکاری بین بخش‌های مختلف دولت با سازمان انرژی اتمی بدلیل مخالفت‌های سیاسی و کارشناسی در راستای پیشبرد اهداف توسعه برق هسته‌ای یکی دیگر از موانع به شمار می‌رود. یکی از این نمونه‌ها قرار ندادن امکان قرارداد فروش تضمینی برق پیش روی سازمان است. از نتایج این موضوع دشواری روش‌های تأمین مالی نیروگاه‌های جدید است.

ضعف در وضع قوانین الزام آور و شفاف: با بررسی اسناد بالادستی سازمان انرژی اتمی و طرح‌ها می‌توان دریافت که جای خالی قوانینی که در بازه‌ی زمانی مشخص، سازمان انرژی اتمی و دستگاه‌های اجرایی را مکلف به اجرای تعهدات کند حس می‌شود. اکثر قوانین وضع شده و طرح‌ها به صورت کیفی به مسئله توسعه نیروگاه هسته‌ای پرداخته‌اند و راهکار روشنی در آن دیده نمی‌شود.

در بخش چالش‌های عملیاتی توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای موارد زیر مورد توجه است:

وضعیت منابع اورانیوم ایران و مبادی وارداتی آن: اطلاعات مربوط به منابع داخلی اورانیوم طبیعی و ظرفیت تولید آن (کیک زرد) در ایران، همه ساله از سازمان به آژانس بین‌المللی انرژی اتمی ارائه و در گزارش دو سالانه عرضه و تقاضای اورانیوم در جهان درج می‌شود و برای عموم در دسترس است. با بررسی این گزارش می‌توان دریافت که ایران جزو ۱۲ کشور اول دارنده ذخایر اورانیوم در جهان قرار ندارد. لذا با توجه به وضعیت کنونی تحریم، مبادی واردات اورانیوم به کشور محدود (تحت قرارداد ساخت نیروگاه محدود به مجتمع سوخت) می‌شود.

روش‌های تأمین مالی احداث نیروگاه هسته‌ای و موانع آن: هزینه اولیه بالای ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای و دوره بازگشت سرمایه بلندمدت و در نتیجه جذابیت کم سرمایه‌گذاری، مالکیت دولت، پیوند سیاسی-امنیتی برنامه هسته‌ای ایران در تمام بخش‌ها، استفاده از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی داخلی را به چالش بزرگی تبدیل کرده است. علاوه بر تأمین مالی مستقیم توسط دولت و سرمایه‌گذاری‌های خارجی که هر کدام روند خاص خود را دارند، قراردادهای ساخت، بهره‌برداری، انتقال و واگذاری (BOT) و قراردادهای ساخت، تملک و بهره‌برداری (BOO) توسط شرکت‌های خارجی در سایر کشورها رواج دارد. علاوه بر تحریم، اقتصاد معیوب برق در کشور مانعی دیگر برای جذب سرمایه‌گذاری خارجی است.

توانمندی ساخت نیروگاه هسته‌ای در داخل و همکاری با شرکت‌های خارجی: میزان مشارکت داخلی قابل انتظار در احداث نیروگاه‌های برق هسته‌ای، در افق دو دهه آتی در بازه ۲۰ الی ۳۰ درصد قرار دارد. این میزان مشارکت در صورت تحقق برای کسب تجربه در احداث نیروگاه هسته‌ای قابل توجه است، اما از سوی دیگر به معنای وابستگی ۷۰ الی ۸۰ درصدی به فناوری خارجی است که باید در چهارچوب سیاست‌های کلی کشور ارزیابی شود.

اهمیت بازفراوری سوخت در کشور: با توجه به محدودیت منابع اورانیوم در کشور، دستیابی به فناوری بازفرآوری سوخت و چند مدل راکتور از جمله راکتورهای آب سبک و زاینده برای دهه‌های آینده کشور ضروری و امنیت انرژی در کشور در گرو این امر است که نیاز به هزینه زیاد و بودجه مجزا و تصمیم‌گیری فرادولتی دارد. در صورت امکان می‌توان از توان تحقیقاتی کشورهای همسو در این زمینه استفاده کرد.

وضعیت بهره‌برداری از نیروگاه اتمی بوشهر: شرکت بهره‌برداری از نیروگاه بوشهر به منظور بهره‌برداری نیروهای داخلی از این نیروگاه تأسیس شده است. از زمان راه‌اندازی نیروگاه بوشهر، مشارکت داخلی در زمینه‌های مختلف بهره‌برداری تجاری نیروگاه سال به سال افزایش داشته و با جایگزینی تقریباً کامل کارشناسان روسی با ایرانی همراه بوده است. بیش از ۹۰ درصد فعالیت‌های تعمیر و نگهداری سالانه و ادواری نیروگاه داخلی انجام می‌شود، اما همچنان وجود نیروی متخصص روسی برای شرایط غیرعادی الزامی است. البته قرار است تا بهره‌برداری کامل نیروگاه پس از ۱۵ سال به طور دائم و ۱۰۰ درصدی تحویل طرف ایرانی شود.

با توجه به چالش‌های مذکور، الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشور مطابق با بررسی‌های کارشناسی و جمع‌بندی نظر خبرگان این حوزه، به قرار زیر است:

- برای تصمیم‌گیری در زمینه توسعه این نیروگاه‌ها باید فراجناحی و ملی اندیشید. پس از بررسی تمام جوانب و دستیابی به راه‌حل منطقی و مسیر درست توسعه و اتخاذ تصمیم، این مسیر نباید با نگرش‌های گوناگون افراد در دولت‌های مختلف خدشه‌دار شود، لذا بازنگری در شیوه اتخاذ تصمیم باید لحاظ شود.

- تصمیم‌گیری برای آینده صنعت هسته‌ای کشور، نیازمند یکپارچگی و همکاری تمام قوا و دستگاه‌های ذیربط است، این امر وجود یک شورای تصمیم‌گیری کلان مانند شورای سیاست‌گذاری هسته‌ای در سطح کلان را ضروری می‌سازد. با اینکه این شورا در اساسنامه سازمان اندیشیده شده اما تا کنون نتایج روشنی از این شورا علنی نشده یا اینکه به مرحله اجرا نرسیده است.
- تولید مجتمع‌های سوخت مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای یکی دیگر از الزامات مهم است. بومی کردن این فرایند راهبردی، اهمیت زیادی دارد و از نظر امنیت انرژی نقطه اتکای مهمی به‌شمار می‌رود.
- مدیریت فناوری در راستای بومی‌سازی امر مهمی است تا کشور در این زمینه از فناوری بین‌المللی عقب نباشد.
- در حال حاضر سازمان انرژی اتمی در حال تدوین برنامه ساخت چند گیگاوات نیروگاه هسته‌ای جدید است و با در نظر گرفتن عمر این نیروگاه‌ها مصرف سوخت سالانه مجموع ۱۰ گیگاوات ظرفیت هسته‌ای نزدیک به ۲۰۰۰ تن اورانیوم خواهد بود که در طی ۶۰ سال به ۱۲۰۰۰۰ تن اورانیوم می‌رسد (با در نظر گرفتن مصرف راکتورهای فعلی نسل سوم). لذا می‌توان دریافت که منابع داخلی کفاف این میزان را نخواهد داد و باید برای تأمین سوخت این نیروگاه‌ها به فکر واردات سوخت و اورانیوم بود.
- تاکنون مطالعات گسترده و قابل استنادی از منابع توریم در داخل کشور به عنوان یکی دیگر از منابع مهم سوخت برای راکتورهای هسته‌ای انجام نشده است. با توجه به محدودیت منابع اورانیوم، لازم است مطالعات زمین‌شناسی مرتبط در این خصوص برای استحصال اقتصادی از این منابع در کشور صورت گیرد.
- محدودیت منابع اورانیوم در جهان، اهمیت بازفرآوری سوخت مصرف شده در نیروگاه‌ها را دوچندان کرده است. با توجه به محدودیت منابع اورانیوم در کشور، این مهم در کشور توجیه اقتصادی دارد و سوخت مصرف شده در نیروگاه بوشهر یکی از منابع برای بازفرآوری به‌شمار می‌رود و تمهیدات ذخیره این سوخت در کشور باید صورت گیرد.
- فناوری بازفرآوری سوخت هسته‌ای، امنیت انرژی هسته‌ای را افزایش می‌دهد؛ لذا پیشنهاد می‌شود تحقیق و توسعه در این زمینه در اولویت سازمان انرژی اتمی باشد و هدف خودکفایی در تأمین سوخت راکتورها در آینده با استفاده از این فناوری قابل دستیابی است.
- طرح چرخه بسته سوخت هسته‌ای شرکت روس اتم عملاً نیاز به سوخت جدید را بسیار محدود می‌کند. تحقیق و توسعه این طرح در کشور، امنیت انرژی هسته‌ای را بیش از پیش افزایش می‌دهد و می‌توان گفت آینده صنعت انرژی هسته‌ای به این سمت پیش می‌رود.
- اطمینان از تأمین مالی پروژه‌هایی که در آینده قرار است تعریف شوند مهم است تا با افزایش هزینه ناشی از تعلیق شدن و طولانی شدن روند ساخت مواجه نشود.

- یکی از روش‌های تأمین مالی نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهایی که منابع مالی هنگفت ندارند سرمایه‌گذاری B.O.O و B.O.T توسط شرکت سازنده است، اما پیش از آن برای کاهش ریسک سرمایه‌گذاری سازنده و افزایش جذابیت نیاز به اصلاح ساختار اقتصاد برق وجود دارد. هرچند مزایا و معایب این روش‌ها متناسب با شرایط کشور باید سنجیده شود.
- ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای در دنیا در صورتی به صرفه است که حداقل در واحدهای چهارتایی مشابه هم ساخته شود که هزینه تعدیل شده کاهش یابد. برای تعریف پروژه جدید این موضوع باید لحاظ شود.

در نهایت مطابق با بررسی‌های کارشناسی انجام شده و نظر خبرگان، با توجه محدودیت‌های فعلی و چالش‌های توسعه این نیروگاه‌ها در کشور، اقدام اولویت دار، تکمیل پروژه‌های در دست ساخت در بوشهر است. همچنین با توجه به محدودیت منابع اورانیوم در کشور، دستیابی به چرخه بسته سوخت هسته‌ای یک الزام برای آینده امنیت انرژی کشور تلقی می‌شود. لذا بازفرآوری که نقطه گلوگاهی این چرخه است و استقرار فناوری چند مدل راکتور، باید به عنوان برنامه آتی کشور برای این حوزه در دستور کار قرار گیرد.

فهرست مطالب

مقدمه ۱۲

فصل ۱. بررسی فناوری تولید برق هسته‌ای وشرکت‌های مطرح در این حوزه ۱۴

۱-۱- معرفی فناوری راکتور هسته‌ای ۱۴

۱-۱-۱- اجزای تشکیل دهنده یک راکتور هسته‌ای ۱۵

۱-۱-۲- انواع راکتورهای تجاری ۱۷

۱-۱-۳- نسل‌های مختلف راکتورهای تجاری ۲۵

۱-۱-۴- فناوری‌های آزمایشی و درحال‌ساخت ۲۶

۱-۲- چرخه سوخت هسته‌ای ۳۲

۱-۲-۱- اورانیوم ۳۳

۱-۲-۲- استخراج اورانیوم ۳۳

۱-۲-۳- آسیاب اورانیوم ۳۴

۱-۲-۴- تبدیل و غنی‌سازی ۳۵

۱-۲-۵- ساخت سوخت ۳۵

۱-۲-۶- تولید برق و مصرف سوخت ۳۶

۱-۲-۷- سوخت مصرف شده ۳۷

۱-۲-۸- بازفرآوری ۳۸

۱-۲-۹- زباله و ضایعات هسته‌ای ۳۹

۱-۲-۱۰- سوخت‌های در دست تحقیق و توسعه ۴۰

۱-۳- شرکت‌های مطرح در حوزه فناوری برق هسته‌ای ۴۵

۱-۳-۱- طراحی، مهندسی و ساخت راکتورهای هسته‌ای ۴۶

۱-۳-۲- چرخه سوخت ۵۴

فصل ۲. بررسی صنعت برق هسته‌ای کشورهای منتخب ۶۱

۲-۱- امارات متحده عربی ۶۱

۲-۲- برزیل ۶۶

۲-۳- ترکیه ۶۹

۲-۴- هند ۷۳

۲-۵- سوئد ۷۷

۲-۶- بریتانیا ۸۰

۲-۷- ایران ۸۲
فصل ۳. وضعیت و روند بومی‌سازی فناوری هسته‌ای چین ۸۹
۳-۱- تاریخچه و بومی‌سازی فناوری هسته‌ای ۸۹
۳-۱-۱- مرحله شروع توسعه هسته‌ای چین (از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۳) ۹۰
۳-۱-۲- مرحله توسعه آرام هسته‌ای چین (از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۵) ۹۱
۳-۱-۳- مرحله توسعه سریع هسته‌ای چین (از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱) ۹۲
۳-۱-۴- مرحله توسعه ایمن و کارآمد هسته‌ای چین (از سال ۲۰۱۲ تا کنون) ۹۳
۳-۲- چرخه سوخت هسته‌ای در چین ۹۵
۳-۲-۱- معادن داخلی و خارجی اورانیوم چین ۹۶
۳-۲-۲- پارک‌های صنعتی تولید سوخت هسته‌ای چین ۹۷
۳-۲-۳- ظرفیت تبدیل اورانیوم به UF۶ در چین ۹۷
۳-۲-۴- غنی‌سازی اورانیوم در چین ۹۸
۳-۲-۵- تولید سوخت مصرفی راکتورها در چین ۹۸
۳-۳- وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای چین ۹۹
۳-۴- تحقیق و توسعه و برنامه آینده هسته‌ای چین ۱۰۳
فصل ۴. معرفی ساختار، بازیگران، چالش‌ها و الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای کشور ۱۰۴
۴-۱- ساختار و بازیگران صنعت برق هسته‌ای ایران ۱۰۴
۴-۱-۱- قانون سازمان انرژی اتمی مصوب سال ۱۳۵۳ ..... ۱۰۴
۴-۱-۲- معاونت‌ها، مراکز و شرکت‌ها ۱۰۹
۴-۱-۳- مدیران، اساسنامه‌ها واسناد بالادستی ۱۱۲
۴-۲- بررسی چالش‌های توسعه برق هسته‌ای کشور ۱۱۵
۴-۲-۱- چالش‌ها و موانع سیاستی توسعه برق هسته‌ای ۱۱۵
۴-۲-۲- چالش‌ها و موانع عملیاتی توسعه برق هسته‌ای ۱۱۶
۴-۳- الزامات توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای ۱۲۰
فصل ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۲
منابع ۱۲۹

فهرست جداول

جدول ۱. مشخصات راکتورهای تجاری فعال حال حاضر جهان ۲۴
جدول ۲. راکتورهای نسل سوم که در حال ساخت و بازاریابی هستند و توسعه دهندگان آن‌ها ۲۷
جدول ۳. انواع راکتورهای نسل چهارم و مشخصات آن‌ها ۲۹
جدول ۴. تعداد راکتورهای ساخته‌شده و درحال ساخت توسط شرکت‌های مختلف تا سال ۲۰۰۸ ..... ۴۶
جدول ۵. میزان استخراج اورانیوم توسط شرکت‌های مختلف در سال ۲۰۲۰ ..... ۵۵
جدول ۶. ظرفیت نامی و مورد استفاده شرکت‌های تبدیل اورانیوم در سال ۲۰۲۰ برحسب تن در سال ۵۶
جدول ۷. ظرفیت غنی‌سازی در شرکت‌های مختلف در سال ۲۰۲۰ ..... ۵۷
جدول ۸. شرکت‌های سازنده سوخت راکتورهای آب سبک و ظرفیت تولید هر کدام برحسب تن در سال ۵۸
جدول ۹. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در امارات ۶۵
جدول ۱۰. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در برزیل ۶۸
جدول ۱۱. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در ترکیه ۷۳
جدول ۱۲. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در هند ۷۷
جدول ۱۳. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در سوئد ۷۹
جدول ۱۴. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در بریتانیا ۸۱
جدول ۱۵. وضعیت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران ۸۶
جدول ۱۶. خلاصه‌ای از وضعیت هسته‌ای در کشورهای منتخب ۸۷
جدول ۱۷. معادن داخلی استخراج اورانیوم چین و میزان استخراج هرکدام در سال ۲۰۲۰ ..... ۹۶
جدول ۱۸. منابع بین‌المللی اورانیوم چین و میزان سهام این کشور ۹۷
جدول ۱۹. وضعیت فعلی هسته‌ای چین ۱۰۱
جدول ۲۰. خلاصه روند توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای در کشورهای منتخب ۱۲۶

فهرست اشکال

شکل ۱. ترسیمی از نحوه عملکرد دو راکتور BWR و PWR و تفاوت آن‌ها ۱۵
شکل ۲. سیکل عملکرد راکتور آب تحت فشار (PWR) ۱۷
شکل ۳. سیکل راکتور آب جوشان (BWR) ۱۹
شکل ۴. سیکل راکتور آب سنگین تحت فشار (PHWR) ۲۰
شکل ۵. سیکل عملکرد راکتور پیشرفته خنک‌کننده گازی ۲۱
شکل ۶. سیکل راکتورتعدیل‌کننده گرافیتی آب سبک ۲۲
شکل ۷. سیکل راکتور نوترون سریع ۲۳
شکل ۸. سیکل عملکرد راکتور خنک‌کننده گازی با دمای بالا ۲۴
شکل ۹. چند نمونه SMR طراحی شده در کشورهای مختلف ۳۲

شکل ۱۰. چرخه مرسوم سوخت هسته‌ای ۳۳
شکل ۱۱. سوختن سوخت استاندارد و فراورده‌های حاصل از واکنش هسته‌ای ۳۷
شکل ۱۲. میزان مصرف سوخت در میل‌های سوختی براساس فناوری LWR مرسوم ۴۰
شکل ۱۳. سوختن MOX و فراورده‌های حاصل از واکنش ۴۲
شکل ۱۴. طرح پیشنهادی چرخه سوخت بسته هسته‌ای شرکت ROSATOM ۴۳
شکل ۱۵. برنامه هسته‌ای سه مرحله‌ای هند ۷۴
شکل ۱۶. افق چین در چرخه سوخت هسته‌ای ۱۰۳

فهرست نمودارها

نمودار ۱. سهم ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای از ظرفیت کل نیروگاه‌های امارات در ۱۰ سال اخیر برحسب درصد ۶۶
نمودار ۲. تولید برق هسته‌ای برزیل در سی سال اخیر برحسب گیگاوات ساعت ۶۸
نمودار ۳. سهم برق هسته‌ای از مصرف برق برزیل طی ۱۰ سال برحسب درصد ۶۹
نمودار ۴. سهم ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای از ظرفیت نصب شده برزیل برحسب درصد ۶۹
نمودار ۵. تولید برق هسته‌ای در هند در سی سال اخیر بر حسب گیگاوات ساعت ۷۵
نمودار ۶. سهم برق هسته‌ای از برق مصرفی در هند طی ۱۰ سال برحسب درصد ۷۶
نمودار ۷. سهم ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای از ظرفیت نصب شده در هند ۷۶
نمودار ۸. تولید برق هسته‌ای سوئد در سی سال اخیر بر حسب گیگاوات ساعت ۷۹
نمودار ۹. سهم برق هسته‌ای از سبد تولید سوئد در طی ۱۰ سال برحسب درصد ۸۰
نمودار ۱۰. سهم ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای از ظرفیت نصب شده سوئد برحسب درصد ۸۰
نمودار ۱۱. سهم برق هسته‌ای از کل مصرف برق بریتانیا طی ۱۰ سال برحسب درصد ۸۲
نمودار ۱۲. سهم ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای از ظرفیت نصب شده در بریتانیا برحسب درصد ۸۲
نمودار ۱۳. سهم نیروگاه هسته‌ای بوشهر از ظرفیت نامی برق کشور از زمان راه‌اندازی ۸۶
نمودار ۱۴. میزان تولید نیروگاه بوشهر از زمان راه‌اندازی و مقایسه با تولید غیرهسته‌ای ۸۷
نمودار ۱۵. میزان تولید برق هسته‌ای چین در سی سال اخیر برحسب گیگاوات ساعت ۱۰۰
نمودار ۱۶. سهم منابع عمده تولید برق در چین در سال ۲۰۲۰ برحسب درصد ۱۰۰
نمودار ۱۷. سهم برق هسته‌ای از مصرف کل برق چین در ۲۰ سال اخیر برحسب درصد ۱۰۱
نمودار ۱۸. سهم ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای از ظرفیت کل نصب شده در چین در ۲۰ سال اخیر برحسب درصد ۱۰۲
نمودار ۱۹. ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای چین برحسب مگاوات در ۲۰ سال اخیر ۱۰۲