

# انرژی گداخت هسته‌ای راهبردی اجتناب‌ناپذیر در افق چشم‌انداز انرژی کشور

سید امیرحسین قرشی\*

اصغر صدیق‌زاده\*\*

## چکیده

در این مقاله چالش‌های پیش‌روی بخش انرژی و محدودیت‌های موجود در حل این چالش‌ها، به ویژه مشکل چگونگی تأمین و یا کنترل روند افزایشی تقاضای انرژی و سیاست‌های راهبردی در راستای هدایت بحران انرژی و رهیافتن به اولویت و رویکردی اجتناب‌ناپذیر به سوی پاک‌ترین و ماندگارترین منبع تأمین انرژی مرور و بررسی می‌شوند. این بررسی دارای نتیجه‌ای متفاوت از بررسی‌های معمول است که در نهایت بر اولویت و توسعه بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید دارند. اولویت مطرح در این مقاله دسترسی به فرایند تولید انرژی در خورشید (انرژی گداخت هسته‌ای) که سرچشمه و منشأ تمامی منابع انرژی اعم از فسیلی و غیرفسیلی در کره خاکی است، می‌باشد. در وهله اول روند پژوهش برای مهار انرژی گداخت هسته‌ای در جهان و ایران بررسی شده است، سپس با ارائه توجیهات لازم، ضرورت دستیابی به انرژی گداخت هسته‌ای، به عنوان یک راهبرد اجتناب‌ناپذیر در تحقق اهداف افق چشم‌انداز ۲۰ ساله کشور که همانا دستیابی به مرزهای تحول‌گرایانه دانش است، در این مقاله مورد بررسی و تأکید قرار می‌گیرد.

## واژگان کلیدی

انرژی، گداخت هسته‌ای، رهیافت راهبردی، افق چشم‌انداز

---

\* عضو پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران سازمان انرژی اتمی ایران  
Email: aghorashi@yahoo.com

\*\* عضو پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران سازمان انرژی اتمی ایران  
Email: asadigzadeh@aeoi.org.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۰

تاریخ ارسال: ۹۳/۱۰/۲۵

فصلنامه راهبرد / سال بیست و چهارم / شماره ۷۴ / بهار ۱۳۹۴ / صص ۲۳۴-۲۰۵

## جستار گشایی

امروزه مؤلفه‌های اصلی قدرت ملی یک کشور را چهار مقوله قدرت علمی و فرهنگی، اقتصادی، سیاسی و نظامی تعیین می‌کنند. هرچند در خصوص نسبت ارجحیت هریک از این قدرت‌های چهارگانه بحث‌های مختلفی وجود دارد، اما بدون شک این چهار مقوله با هم تعامل تنگاتنگ داشته و بر یکدیگر تأثیرگذار هستند. رهیافت‌های علمی و پژوهشی در زمینه انرژی و دسترسی به فناوری‌های نوین انرژی، به ویژه انرژی هسته‌ای، از جمله موارد مهم و تأثیرگذاری هستند که در ارتقاء هریک از چهار مقوله مزبور ایفای نقش می‌نمایند. تأثیر و جایگاه انرژی در تأمین رفاه و پیشرفت زندگی بشر غیرقابل اجتناب است و داشتن منابع مختلف تأمین انرژی و استفاده بهینه از آنها جزء رویکرد اصلی دولت‌ها جهت توسعه اقتصادی و اجتماعی در کشور متبوع شان است.

انرژی هسته‌ای یکی از دستاوردهای عمده علوم و فنون هسته‌ای است و هم‌اکنون نقش مهمی در تأمین انرژی کشورها به ویژه در کشورهای پیشرفته دارد. جمهوری اسلامی ایران بیش از سه دهه است که تحقیقات متنوعی را در زمینه‌های مختلف علوم و فنون هسته‌ای انجام داده و براساس اصول راهبردی خود، مصمم به توسعه مؤثر و بهره‌برداری از آنها در راستای تحقق اهداف برنامه‌های توسعه در افق چشم‌انداز است. در قالب این برنامه‌ها، جامعه ایرانی در افق سال ۱۴۰۴ هجری شمسی، باید توسعه‌یافته، برخوردار از دانش پیشرفته، توانا در تولید علم و فناوری و جایگاه اول اقتصادی، علمی و فناوری در سطح منطقه آسیای جنوب‌غربی (شامل آسیای میانه، قفقاز، خاورمیانه و کشورهای همسایه) با تأکید بر جنبش نرم‌افزاری و تولید علم و... باشد.

چشم‌انداز تأمین انرژی آینده بشر از طریق مهار انرژی گداخت هسته‌ای با توجه به مشکلات و محدودیت‌های منابع دیگر، بسیار امیدوارکننده است. رهیافتی که علاوه بر تأمین انرژی بشر به شکل نامحدود، خطری برای امنیت، صلح و سلامت در بر ندارد و برخلاف سوخت‌های تجدیدناپذیر، فاقد آلودگی‌های زیست‌محیطی است. در کنار حصول انرژی از فرایند گداخت هسته‌ای، امروزه صنعت گداخت به عنوان یک فناوری فراگیر شناخته شده است؛ به‌طوری که میزان رهیافتن به افق مرزهای دانش و پیشرفت هر کشور را در آینده‌ای نه چندان دور میزان دسترسی و اشراف بر فناوری گداخت هسته‌ای مشخص خواهد کرد. این تحول، لزوم اتخاذ تصمیمات راهبردی در خصوص اهداف چشم‌انداز فوق‌الذکر که همانا اهتمام به توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در کشور است را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.

اولین پرسش بنیادی در مبحث ضرورت‌سنجی این است که آیا ایران باید به سمت دستیابی به انرژی گداخت هسته‌ای برود یا خیر؟ نظر به اینکه فرایند ضرورت‌سنجی در حقیقت یک فرایند پردازش داده‌ها است و خروجی این پردازش پاسخ به سؤال اساسی مزبور می‌باشد، لذا لازم است نسبت به کمیت و کیفیت داده‌های ورودی دقت کافی بشود تا این پردازش به درستی انجام پذیرد. از جمله داده‌های ورودی، بررسی وضعیت کنونی و مقتضیات زمانی و جغرافیایی کشور است؛ چرا که این‌گونه ضرورت‌ها در ظرف مکان و زمان قابل طرح هستند و نباید آنها را ایستا قلمداد نمود. لذا باید برنامه‌های راهبردی کشور به ویژه در بخش انرژی را به خوبی بررسی کرد و با ارائه آمار تولید و مصرف انرژی، برآورد مصرف آینده، چالش‌های بخش انرژی و راهکارهای مربوط به آنها، وضعیت کنونی و مقتضیات زمانی کشور در این خصوص را ترسیم نمود. همچنین در این مقاله برنامه و رویکرد جهانیان به گداخت هسته‌ای نیز به دقت مطالعه و بررسی می‌شود تا در نهایت بتوان جایگاه گداخت هسته‌ای در یک چشم‌انداز درازمدت را تبیین نمود.

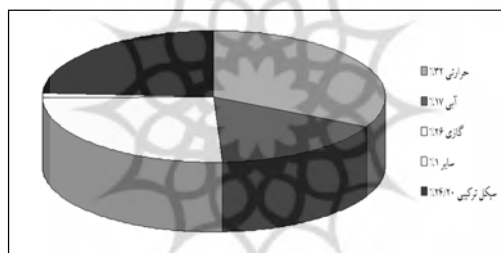
### ۱. چشم‌انداز انرژی: چالش‌ها و محدودیت‌ها

تأمین انرژی از منابع سوخت‌های فسیلی تا زمانی دارای اولویت خواهد بود که در مقایسه با سایر منابع انرژی همچون انرژی هسته‌ای، انرژی‌های تجدیدپذیر مقرون به صرفه باشند. ادامه روند متغیر قیمت نفت موجب تسریع در برنامه‌های جایگزینی، بهینه‌سازی مصرف سوخت و در نهایت تلاش هرچه بیشتر جهت کم‌شدن وابستگی اقتصاد جهانی به نفت می‌شود. در حال حاضر تناسبی بین کشف ذخایر فسیلی و ضریب مصرف وجود ندارد. ولع در مصرف انرژی در جوامع صنعتی، سایه سنگین خود را بر تمامی کشورهای صادرکننده حامل‌های انرژی گسترده است. ازدیاد جمعیت جهان که طبق محاسبات گزارش شده تا سال ۲۰۲۵ میلادی به ۸ میلیارد نفر خواهد رسید از یک طرف و رشد اقتصادی از طرف دیگر، بالا رفتن مصرف انرژی را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. دگرگونی‌های ژرفی که در طی قرن حاضر در نحوه زندگی انسان رخ داده است و همچنین تکنولوژی‌های نوین همچون اطلاعات، ارتباطات، بیوتکنولوژی، نانو و... که به تازگی عرصه گسترده‌ای را در علوم و فنون به خود اختصاص داده‌اند، نه تنها از اهمیت و نقش دیرین انرژی و تکنولوژی‌های مرتبط نکاسته‌اند بلکه چشم‌انداز کنونی نشان می‌دهد که این مقوله در آینده نیز واجد اهمیت فوق‌العاده خواهد بود.

میزان مصرف انرژی در جهان در هر دهه به دو برابر افزایش یافته است و برآوردها حاکی از آن است که مصرف جهانی انرژی تا سال ۲۰۳۵ میلادی، بیش از ۵۸ درصد افزایش خواهد یافت و جالب توجه اینکه در این چشم‌انداز، بیشترین میزان مصرف انرژی در کشورهای در حال

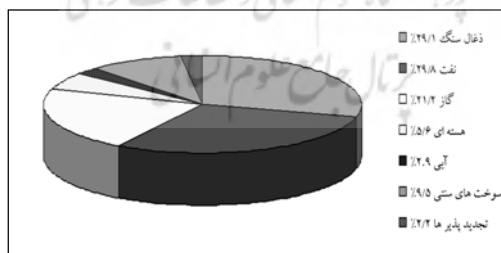
توسعه است (Key World Energy Statistics, 2014) و (International Energy Outlook, 2014). اکثریت جمعیت رو به رشد جهان در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه زندگی می‌کنند که غالباً از ابتدایی‌ترین امکانات نیز محروم می‌باشند. این اکثریت جمعیت نیاز مبرم به رشد اقتصادی جهت بهبود شرایط زندگی خود دارند. اما در حال حاضر انرژی مصرفی آنها کمتر از یک دهم میزان مصرف انرژی تنها چند کشور توسعه یافته است. لذا چشم‌انداز آتی توسعه اقتصادی بیانگر روند رشد تصاعدی مصرف انرژی در این کشورها به ویژه در هند و چین است. بدون شک حتی با احتساب تحقق خوش‌بینانه بسیاری از برنامه‌های بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی برق‌آبی و هسته‌ای، پیش‌بینی غیرقابل اجتناب بیانگر آن است که در افق چشم‌انداز بیش از ۶۰٪ انرژی مورد نیاز از منابع فسیلی تأمین خواهند شد. شکل ۱ و ۲ سهم هریک از منابع انرژی در تأمین انرژی مورد نیاز آتی ایران و جهان را نشان می‌دهد (World Factbook, 2013; Key World Energy Statistics, 2014 & International Energy Outlook, 2014).

شکل شماره (۱) - سهم هریک از منابع انرژی در تأمین انرژی مورد نیاز ایران در سال ۲۰۳۰



(International Energy Outlook, 2014)

شکل شماره (۲) - سهم هریک از منابع انرژی در تأمین انرژی مورد نیاز جهان در سال ۲۰۳۰



(International Energy Outlook, 2014)

با توجه به میزان مصرف انرژی در جهان و عدم تناسب بین تولید و مصرف آن، پیش‌بینی می‌شود که دوام ذخایر فسیلی جهان برای نفت خام، گاز طبیعی و زغال سنگ به ترتیب به حدود ۵۰، ۱۶۶ و ۴۱۵ سال برسد. همچنین بنابر پیش‌بینی‌های آژانس بین‌المللی انرژی

اتمی<sup>۱</sup>، دوام عمر ذخایر اورانیوم با توجه به مقدار ذخایر فعلی و میزان تقاضا به حدود ۱۰۰ سال می‌رسد. چنین وضعیتی بر میزان ذخایر انواع حامل‌های انرژی در ایران نیز حاکم است. نگاره شماره (۱) محدودیت منابع فسیلی کشور به ویژه در قالب اهداف برنامه‌های توسعه در افق چشم‌انداز را نشان می‌دهد. از طرفی طبق همین برنامه راهبردی و با کسب رشد اقتصادی ۸ درصد، میزان برق مورد نیاز کشور در سال ۲۰۳۰ حدود ۲۰۰ هزار مگاوات برآورد شده است (Ghorashi, 2007).

### نگاره شماره (۱) - روند فناپذیری ذخایر فسیلی ایران بر مبنای آمار ترازنامه انرژی

#### سال ۱۳۹۱ (در شرایط تحریم)

نوع سوخت	ذخایر قابل استحصال	تولید	مصرف داخلی	صادرات	مصرف نیروگاه‌ها	الزام بر تولید در افق چشم‌انداز (شرایط غیر تحریم)	عمر مفید
نفت (میلیون بشکه)	۱۵۶۵۳۰	۱۰۵۸	۶۴۵/۶	۴۱۳/۵	۹۰	تا سقف ۳۰۰۰	۵۰-۶۰
گاز (میلیاردمترمکعب)	۳۴۰۰۰	۲۳۲	۱۵۱/۷	۹/۳	۴۰/۷	تا سقف ۶۵۰	۶۰-۷۰
ذغال سنگ (میلیون تن)	۱۱۰۰۰	۹۴۰	۸۶۸	۳۳۳	-	-	-
		۵۲۷	۱۴۰۰	-	-	-	-
ورانیوم (تن)	۱۵۰۰۰	-	-	-	۲۰۰*	۴۰۰۰	-

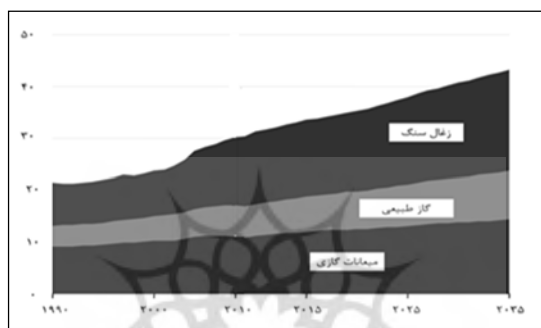
(منبع: نویسندگان)

(\*: نیروگاه بوشهر)

از طرفی افزایش میزان انتشار انواع آلودگی‌ها در محیط‌زیست، تغییرات اقلیمی و بحران گرمایش زمین، چالشی جدی برای جوامع انسانی به شمار می‌آید. در این میان عمده آلودگی‌های اتمسفری به علت انتشار انواع گازهای آلاینده همچون دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) و دی‌اکسید نیتروژن (NO<sub>2</sub>) است که عمدتاً ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی هستند. انتشار گازهای مذکور که ناشی از مصرف انواع حامل‌های انرژی در بخش‌های خانگی، تجاری، حمل‌ونقل، صنعت، کشاورزی و... است، علاوه بر تأثیرات مستقیم زیست‌محیطی، هزینه‌های اجتماعی گوناگونی بر انواع اکوسیستم‌ها، حیات وحش و سلامت جسمی و روحی انسان وارد می‌سازند. شکل شماره میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در جهان را از دهه ۱۹۹۰ به همراه پیش‌بینی افزایش انتشار آن تا سال ۲۰۳۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان انتشار از حدود ۲۰ میلیارد تن در سال ۱۹۹۰ با بیش از ۵۰ درصد رشد، به حدود ۴۳/۲ میلیارد تن در سال ۲۰۳۵ می‌رسد. در این میان سهم آلاینده‌ی زغال سنگ از سایر حامل‌های

انرژی بالاتر است (CIA World Factbook, 2013; Key World Energy Statistics, 2014 & International Energy Outlook, 2014). در ایران نیز، میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای طی سالیان اخیر رشد فزاینده‌ای داشته به نحوی که شاخص انتشار گاز دی‌اکسیدکربن (CO2) در سال ۱۳۸۶، از ۴۹۲۲۶۴۹۵۷ تن به ۵۵۶۸۶۶۴۴۲ تن در سال ۱۳۹۱ رسیده است. همچنین آمار حاکی از آن است که بخش نیروگاهی و حمل‌ونقل بیشترین سهم در انتشار گازهای آلاینده را در این سال به خود اختصاص داده‌اند (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳).

### شکل شماره (۳) - میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از دهه ۹۰ تا سال ۲۰۳۵



(CIA World Factbook, 2013)

- با توجه به مطالب فوق و در یک نگاه، محدودیت‌ها و چالش‌های پیش‌روی بخش انرژی در افق چشم‌انداز را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:
- با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی، چشم‌انداز تأمین انرژی برای جمعیت رو به رشد جهان نشانگر یک چالش جدی است. این در حالی است که میزان رشد مصرف با میزان تولید و ذخایر اثبات شده انرژی‌های فسیلی هم‌خوانی ندارد.
  - ادامه و ارتقاء روند رشد اقتصادی در کشورهای در حال توسعه یعنی رشد تصاعدی در مصرف انرژی به ویژه مصرف برق است.
  - برای رفع فقر و گرسنگی در کشورهای توسعه نیافته و متعاقباً حرکت آنها به سمت توسعه، جهان نیازمند منابع عظیم انرژی است.
  - در حال حاضر انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای به عنوان تنها جایگزین موثر که دارای آلاینده‌گی بسیار کم‌تری نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی است، مورد بهره‌برداری و توسعه قرار گرفته، ولی متأسفانه ذخایر قابل استحصال اورانیوم بسیار محدود هستند (کم‌تر از ۵ میلیون تن) و با توجه به مصرف کنونی (۶۶۵۰۰ تن در سال) این ذخایر

کمتر از ۱۰۰ سال دوام می‌آورند که با اضافه شدن تعداد نیروگاه‌های هسته‌ای، دوام ذخایر اورانیوم به مراتب کمتر نیز خواهد شد.

- انرژی‌های جایگزین اعم از انرژی شکافت هسته‌ای و تجدیدپذیرها حتی در صورت تحقق برنامه‌های توسعه بهره‌برداری از آنها تنها جوابگوی بخش اندکی از تقاضای عظیم انرژی در افق چشم‌انداز خواهند بود.

- بشر همچنان ناگزیر به بهره‌برداری بیشتر از منابع انرژی فسیلی خواهد بود. ادامه بهره‌برداری از منابع فسیلی یعنی فنای سریع‌تر منابع فسیلی، بحران غیرقابل کنترل و مرگبار محیط‌زیست، تولید گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمای متوسط زمین به میزان ۵/۸ سانتیگراد در قرن حاضر و در نتیجه افزایش فرکانس شرایط هواشناسی بحرانی (Extreme) و بروز تغییرات آب و هوای اقلیمی است.

- اگر ایران بخواهد به عنوان دومین تولیدکننده عضو ایک سهم حدود ۱۵ درصدی خود را حفظ کند، در ۲۰ سال آینده باید حداقل تولید نفت را به بیش از ۸ میلیون بشکه در روز برساند.

- مخازن پر بازده و کم هزینه کشور، دوران پیری خود را می‌گذرانند و در نیمه دوم عمر خود هستند و ظرفیت تولید آنها سالانه بطور متوسط حدود ۲۰۰ هزار بشکه کاهش می‌یابد و بقیه مخازن نفتی نیز پرهزینه و کم بازده هستند. بنابراین به نظر می‌رسد ایران در چند دهه آینده با توجه به منابع موجود، به وارد کننده نفت با هزینه‌های سرسام‌آور تبدیل شود.

- چشم‌انداز تولید برق در ایران با رشد اقتصادی ۸ درصد تا سقف ۲۰۰ هزار مگاوات در سال ۲۰۳۰ برآورد می‌شود. قابل پیش‌بینی است که تحقق سهم برنامه‌ریزی شده برای انواع منابع انرژی غیرفسیلی نظیر برنامه راه‌اندازی ۲۰ هزار مگاوات نیروگاه انرژی شکافت هسته‌ای با چالش‌هایی جدی مواجه شود.

- زغال سنگ سهم قابل توجهی از انرژی جهان را تأمین خواهد نمود (حدود ۳۰ درصد) ولی ایران فاقد منابع با توجیه اقتصادی و برنامه راهبردی در این خصوص است؛ چراکه عمر منابع زغال سنگ کشور نیز بسیار محدود است.

- عمر منابع انرژی‌های فسیلی محدود است و با روند مصرف فزاینده کنونی و برنامه‌های توسعه‌ای پیش‌روی، فناپذیری آنها در محدوده زمان پیش‌بینی شده در نگاره (۱) قطعی است.

## ۲. چشم‌انداز انرژی: راهکارها و اولویت‌ها

چالش‌ها و محدودیت‌های فوق‌الذکر همگی مباحث جهان‌شمولی هستند که فکر اندیشمندان در یافتن راهکارهای مناسب در حل معضلات انرژی در جهان را به خود مشغول داشته است. تحولات شگرف علوم مهندسی که خود ناشی از وسعت دید و استفاده از آخرین دستاوردهای علمی است، هم‌زمان با پیشرفت تکنولوژی در اکثر ابعاد و زمینه‌های علمی و نیز توسعه وسیع صنعتی و اقتصادی در جهان، همگی حاکی از نیاز مبرم به شناخت و اشاعه تکنولوژی پیشرفته در استفاده بهینه از منابع انرژی، مدیریت و صرفه‌جویی است. کشورهای نفت‌خیز همچون ایران نباید تنها به دلیل داشتن منابع نفتی و گاز دچار غفلت شده و نسبت به این تحولات بی‌توجه باشند و منابع فسیلی را که در توسعه کشور نقش حیاتی دارند، با هدف کسب انرژی بدون بررسی و تحلیل کارشناسانه تلف نمایند. صاحبان منابع فسیلی باید واقع‌گرایانه توجه کنند که استحصال هرچه بیشتر ذخایر فسیلی مستلزم بهره‌برداری کم‌تر فردا و در نهایت تهی‌شدن منابع‌شان در مدت زمانی کوتاه خواهد بود. بنابراین لازم است در کنار توسعه علم و صنعت، پویایی در راستای افزایش فرصت‌ها و یافتن روش‌های اقتصادی، معرفی الگوهای مصرفی جدید و مدل‌های مناسب جهت دوام منابع فسیلی، انتخاب جایگزین‌های مانا و در نهایت یافتن راهکارهای بهینه‌سازی در فرایند بهره‌برداری و کاهش سرعت تهی‌شدن منابع فسیلی، بسیار جدی تلقی شود. چه‌بسا اگر امروز به فکر هم‌فاز شدن با تحولات نوین در جهان نباشیم، روزی خواهد رسید که برای جبران کمبود انرژی دست‌نیاز به دامان کشورهای پیشتاز برنیم. با توجه به این واقعیت‌ها، تحقیقات گسترده در مورد انرژی و یافتن منابع جایگزین مناسب از ضروریات اولیه محسوب می‌شوند. این یافته‌ها که دستاورد بررسی، تجزیه و تحلیل، مقایسه انجام شده بین انواع مختلف حامل‌های انرژی و وضعیت هریک از آنها در کشور است، به عنوان مهم‌ترین علل تکامل تکنولوژی مدرن تلقی می‌شوند و اهمیت پژوهش، سامان بخشیدن و تدوین مسئولیت‌ها در این راستا را آشکار می‌سازند.

امروزه توسعه بهره‌برداری هرچه بهتر و بیشتر از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی خورشید و باد، در دستورکار و برنامه‌های راهبردی کشورها از جمله ایران قرار گرفته است. اتخاذ این‌گونه راهکارها هرچند ضروری است؛ ولی مطمئناً دغدغه چگونگی تأمین مصرف روزافزون انرژی جوامع در درازمدت و حتی کوتاه‌مدت را مرتفع نمی‌سازد. در میان انرژی‌های جایگزین، انرژی شکافت هسته‌ای از جمله منابع انرژی حائز اهمیتی است که بهره‌برداری از آن به طور انبوه و به سرعت توسعه یافته و در حال حاضر ۴۳۰ نیروگاه با ظرفیتی در حدود ۳۷۲۰۰۰ مگاوات در سطح جهان در حال بهره‌برداری است. مضافاً اینکه ۶۲ نیروگاه هسته‌ای با



ظرفیتی در حدود ۵۹۰۰۰ مگاوات نیز در دست احداث است. علی‌رغم این‌که نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای توانسته‌اند به میزان قابل توجهی تقاضای انرژی را تأمین کرده و به همان مقدار جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند، ولی با توجه به محدودیت منابع قابل استحصال اورانیم در جهان، این حقیقت بر تصمیم‌سازان حوزه انرژی روشن است که در نهایت انرژی شکافت هم نمی‌تواند نقطه نهایی در پاسخ به نیاز انرژی نسل‌های آتی باشد. لذا همزمان با روند توسعه استفاده از انرژی شکافت هسته‌ای، سرمایه‌گذاری‌های کلان در راستای مهار انرژی حاصل از فرایند همجوشی هسته‌ای نیز توسط کشورهای پیش‌رو در فناوری‌های هسته‌ای انجام شده است. به طور نمونه، در سال ۱۹۸۲، میزان سرمایه‌گذاری برای تحقیقات گداخت هسته‌ای بیش از ۲/۵ میلیارد دلار بوده است (Leiser, 1982).

با توجه به بررسی‌های انجام شده بارزترین راهکارها و گزینه‌های برتر در مواجهه با محدودیت‌های پیش‌روی در بخش انرژی در افق چشم‌انداز را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی نمود:

- بدون اتلاف وقت، زمان آن فرارسیده که با به کارگیری روش‌های مدیرانه در بهره‌برداری از منابع کنونی انرژی و نیز با به حداقل رساندن فاصله تکنولوژیکی با جایگزینی تکنولوژی‌های فرسوده، میزان بهره‌وری در بخش انرژی کشور به‌طور مستمر ارتقاء یافته و تلفات انرژی به ویژه در بخش تولید، توزیع و حمل‌ونقل به حداقل برسند (Ghorashi & Rahimi, 2011)
- اتخاذ برنامه‌های راهبردی جهت مصرف کم‌تر از منابع فسیلی آلاینده محیط‌زیست و حتی‌الامکان توسعه بهره‌برداری از انرژی‌های پاک؛
- توسعه نیروگاه‌های هسته‌ای به‌رغم محدودیت‌های تأمین سوخت و بحران‌های سیاسی؛
- همراه و هم‌فاز شدن با کشورهای پیشرفته در زمینه فناوری و صنعت گداخت هسته‌ای که موفقیت در مهار انرژی آن، اقتصاد جهانی متحول و تمامی چالش‌های انرژی جهان مرتفع خواهند شد.

### ۳. انرژی گداخت هسته‌ای

دستیابی به انرژی هسته‌ای از دو مسیر شکافت<sup>۲</sup> و گداخت<sup>۳</sup> هسته‌ای امکان‌پذیر است. در فرایند شکافت، اتم سنگینی مانند اورانیوم در اثر برخورد نوترون به اجزای سبک‌تر تبدیل می‌شود که این واکنش با آزادسازی انرژی همراه است. شکافت اورانیوم یک واکنش زنجیره‌ای است؛ بدین

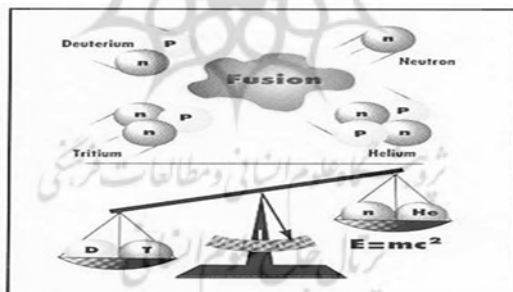
2. Fission

3. Fusion

معنی که در هر واکنش به طور متوسط ۲/۵ نوترون تولید می‌شود که آغازگر واکنش‌های جدیدی است که مجدداً تولید نوترون می‌کنند. در راکتورهای شکافت، سوخت لازم برای یک سال در راکتور قرار می‌گیرد و با وارد کردن منبع اولیه نوترون، واکنش‌های زنجیره‌ای آغاز و با کنترل نوترون‌های حاصل از شکافت، نرخ تولید انرژی کنترل می‌شود.

در فرایند همجوشی یا گداخت هسته‌ای که به طور طبیعی در خورشید و ستارگان اتفاق می‌افتد، هسته‌های سبک به منظور تشکیل هسته بزرگ‌تر مطابق شکل (۴) با هم آمیخته می‌شوند. طی این فرایند، انرژی بسیار عظیمی آزاد می‌شود که بزرگی آن مطابق رابطه تبدیل جرم به انرژی قابل محاسبه است ( $E = mc^2$ ). زمانی که دو هسته به یکدیگر بسیار نزدیک می‌شوند، نیروی جاذبه قوی هسته‌ای به نیروهای دافعه الکترواستاتیک کولمبی غالب شده و امکان تشکیل هسته سنگین‌تر فراهم می‌شود. برای اینکه هسته‌ها خیلی به هم نزدیک شوند و بر نیروی الکترواستاتیک بین یونها غلبه کنند، لازم است که با سرعت زیادی با یکدیگر برخورد کنند. به عبارتی ذرات به انرژی جنبشی بالایی نیاز دارند. معادل دمایی این انرژی جنبشی بیش از ۱۰۰ میلیون درجه سانتیگراد است که در این دما ماده در حالتی به غیر از سه حالت جامد، مایع و گاز قرار می‌گیرد که به آن حالت پلازما و یا حالت چهارم ماده گفته می‌شود.

#### شکل شماره (۴) - تبدیل جرم به انرژی در واکنش گداخت هسته‌ای



(منبع: نویسندگان)

مقطع برخورد ایزوتوپ‌های دوتریم و تریتیوم هیدروژن، نسبتاً بالا است. لذا، در شرایط ساده‌تری نسبت به سایر عناصر امکان انجام فرایند گداخت را فراهم می‌آورند. دوتریم دارای یک نوترون و تریتیوم دارای ۲ نوترون اضافی نسبت به هیدروژن است. هر لیتر از آب معمولی دارای حدوداً ۳۳ میلی‌گرم دوتریم است که به‌طور معمول در کاربردهای صنعتی و علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیمه عمر تریتیوم نسبتاً کوتاه است و به ندرت در طبیعت یافت می‌شود و برای تولید آن باید از برخورد نوترون تولید شده در واکنش گداخت با لیتیم استفاده نمود

(اسناد مطالعات امکان‌سنجی طرح ملی گداخت هسته‌ای، ۱۳۹۱) و اما انجام فرایند گداخت هسته‌ای بر روی زمین بسیار مشکل است و دارای پیچیدگی‌های فنی بسیار زیادی است؛ چراکه اگر بتوانیم سوخت را در یک راکتور گداخت به دمایی معادل میلیون‌ها درجه برسانیم، در اولین فرصت دیواره راکتور ذوب و نابود خواهد شد. بنابراین باید اجازه ندهیم که این گرما به دیواره منتقل شود و به طریقی دما و به بیانی پلاسما محصورسازی شود. محصورسازی مغناطیسی و محصورسازی اینرسی از جمله روش‌های معمول محصورسازی هستند که در حال حاضر پروژه‌های بزرگ پژوهشی توسط این دو روش در سطح جهان در دست انجام است. از آن جمله راکتور آزمایشی بین‌المللی گرما هسته‌ای (ITER)<sup>۴</sup> در فرانسه است که بر مبنای محصورسازی مغناطیسی طراحی شده است.

انرژی حاصل از واکنش‌های گداخت به طور معمول چهار میلیون بار بیشتر از انرژی تولید شده از واکنش‌های شیمیایی مانند زغال‌سنگ، نفت و گاز است (نگاره شماره ۴). همچنین پاکیزگی به معنای عدم تولید گازهای گلخانه‌ای، عدم تولید پسماندهای دارای ایزوتوپ‌های عناصر سنگین با نیمه عمر بالا و در نتیجه ایمنی و دوستدار محیط‌زیست بودن از مزایای راکتورهای گداخت به شمار می‌آیند؛ لذا در میان گزینه‌های مختلف انرژی‌های جایگزین، انرژی گداخت هسته‌ای به عنوان پاک‌ترین، ایمن‌ترین و دارای منبع انرژی لایزال مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که در حال حاضر سرمایه‌گذاری‌های هنگفتی در قالب پروژه‌های بزرگ نظیر ITER، NIF<sup>۵</sup> و JT-60<sup>۶</sup> توسط کشورهای پیشرفته صنعتی بصورت مشترک و یا مستقل در دست انجام است. مضافاً اینکه با توجه به فراگیر بودن فناوری گداخت هسته‌ای به‌عنوان یک فناوری مولد، دستاوردهای پژوهشی حاصل از آن در زمینه‌های مختلف علمی تا حدی گسترده است که باعث پیشرفت مضاعف در تمام رشته‌های علمی-فنی می‌شود. به عنوان مثال در کشورهای سهیم در طرح ایتر از شاخص ایترگرید<sup>۷</sup> به‌جای گرید هسته‌ای<sup>۸</sup> و یا گرید نظامی<sup>۹</sup> که بیانگر کیفیت برتر است، استفاده می‌شود. در یک نگاه ویژگی‌های مهم انرژی گداخت هسته‌ای به عنوان تنها منبع انرژی آتی بشر عبارتند از: سوخت نامحدود و ارزان؛ ایمن؛ انرژی حاصل از گداخت ۸ برابر انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای و یک میلیون برابر انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی در واحد جرم است؛ حفظ محیط‌زیست و نداشتن پسماند

4. International Thernuclear Experimental Reactor

5. National Inertial Fusion

6. Japan Torus

7. ITER grade

8. Nuclear grade

9. Military grade

هسته‌ای؛ حمل و نقل آسان سوخت؛ کاربرد صلح‌آمیز و عدم ایجاد چالش‌های سیاسی؛ فناوری مولد و فراگیر بودن زمینه‌های علمی و فناوریانه مرتبط؛ جایگزینی دیگر منابع انرژی و بی‌ارزش شدن آنها، یعنی ایجاد انقلاب و تحولی عظیم در نظام اقتصادی جهان و رسمیت یافتن فناوری گداخت به عنوان افق مرزهای دانش و یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های اقتدار ملی کشور.

### ۳-۱. تاریخچه گداخت هسته‌ای در خارج از ایران

ایده عملیاتی نمودن فرایند گداخت هسته‌ای توسط بشر ابتدا در سال ۱۹۵۱، توسط دانشمند آرژانتینی به نام رونالد ریچر مطرح شد. متعاقباً سه کشور پیشرفته یعنی آمریکا، انگلیس و روسیه تحقیقات در این زمینه را دنبال کردند. ابتدا سیستم‌های الکترومغناطیس محصورساز پلاسما طراحی و ساخته شدند. از آن جمله سیستم‌های توکامک، استلراتور و پینچ‌ها هستند که به ترتیب توسط روسیه، آمریکا و انگلیس ساخته شدند. به تدریج سیستم‌های گداخت بسیار توسعه یافتند و با پیشرفت شتاب‌دهنده‌ها و لیزرها در دهه ۱۹۶۰، از ویژگی اینرسی سوخت نیز برای ایجاد گداخت استفاده شد. به طور کلی می‌توان روش‌های شناخته شده در زمینه گداخت هسته‌ای را به سه دسته: (۱) روش‌های محصورسازی مغناطیسی<sup>۱۰</sup> (۲) روش‌های محصورسازی اینرسی<sup>۱۱</sup> و (۳) روش‌های ترکیبی/سایر روش‌ها تقسیم‌بندی نمود.

یکی از مشکلات عمده راکتورهای گداخت هسته‌ای، بحث دیواره اول راکتور است که در معرض تابش مقدار زیادی هلیوم، دوتریم و نوترون پر انرژی در گستره چندین میلیون درجه کلوین قرار می‌گیرد. دانشمندان آمریکایی و کانادایی با مطالعه بر روی روش‌های گوناگون گداخت هسته‌ای، به خصوص (MCF) و (ICF)، در سال‌های اخیر روش‌های نوینی را ارائه کرده‌اند که با استفاده از ترکیب روش‌های موجود و انجام گداخت هسته‌ای پروتون-بور و سوخت‌های پیشرفته گداخت هسته‌ای، علاوه بر حل مشکل دیواره اول راکتور، هزینه و حجم نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای را به شدت کاهش می‌دهد. این روش به عنوان واکنش گداخت هسته‌ای غیرراديواکتیو، هیچ‌گونه مشکلی برای تجاری شدن نخواهد داشت. ضمن اینکه راکتور آن قبل از رسیدن به بهره‌واکنش بالا، به دلیل حجم و هزینه بسیار پایین دارای محصولات جانبی مانند چشمه نوترون و پروتون پرنرژی و تک‌انرژی، از کاربردهای وسیع صنعتی و پزشکی برخوردار است. از جمله سایر روش‌ها، می‌توان از روش پلاسمای کانونی و محصورسازی الکترودینامیکی نیز جهت تحقیقات در زمینه گداخت هسته‌ای استفاده نمود. تا به امروز

10. Magnetic Confinement Fusion (MCF)

11. Inertial Confinement Fusion (ICF)

نمونه‌های آزمایشی بسیاری از سیستم‌های گداخت ساخته شده‌اند که به پیشرفت تحقیقات و امید رهیافتن به مهار انرژی گداخت کمک شایانی کرده‌اند. به منظور شناخت مسائل فنی و رفع موانع موجود و در نهایت رسیدن به نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای، دو پروژه عظیم در معیار راکتور آزمایشی در حال راه‌اندازی است: یکی پروژه ایترا<sup>۱۲</sup> به روش محصورسازی مغناطیسی در شاخه توکامک و دیگری پروژه‌های نیف<sup>۱۳</sup> و مگاژول<sup>۱۴</sup> در شاخه محصورسازی اینرسی.

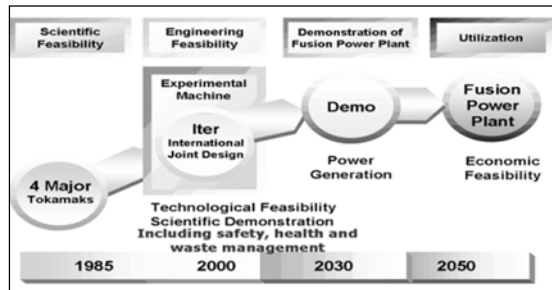
طرح ملی تسهیلات افروزش آمریکا به روش محصورسازی اینرسی پلاسما با باریکه لیزر در آزمایشگاه ملی لارنس لیورمور در کالیفرنیا آمریکا از سال ۲۰۰۰ در دست ساخت و مرحله به مرحله در دست راه‌اندازی و بهره‌برداری است. دو پروژه عظیم LMJ در فرانسه و GEKKO در ژاپن، از جمله طرح‌هایی هستند که به روش ICF و با سرمایه‌گذاری‌های کلان در حال اجرا است. اخیراً کشور آمریکا بعد از تحقیقات چندین ساله و کسب موفقیت‌های آزمایشگاهی، اقدام به سرمایه‌گذاری هنگفت برای طراحی و ساخت راکتورهای گداخت هسته‌ای به روش محصورسازی الکترودینامیکی نموده که در آن هم‌زمان با میدان‌های الکتریکی، از میدان‌های بسیار قوی مغناطیسی برای محصورسازی پلاسما استفاده می‌شود. طرح بین‌المللی راکتور گرما- هسته‌ای ایترا با مشارکت اتحادیه اروپا، آمریکا، ژاپن، روسیه، کانادا، چین، هند و کره جنوبی، هم‌اکنون در شهر کاداراش کشور فرانسه در حال ساخت است و پیش‌بینی می‌شود نهایتاً تا سال ۲۰۳۵، نیروگاه آزمایشی گداخت هسته‌ای راه‌اندازی شود. شکل (۵) فرایند جهانی رهیافت به نیروگاه گداخت هسته‌ای را نشان می‌دهد (Stewart, 2003). این فرایند نمایانگر اعتماد و عزم جهانی در دسترسی به نیروگاه گداخت هسته‌ای در قالب یک برنامه‌ریزی مشخص است. چنانکه ملاحظه می‌شود، فاز امکان‌سنجی نیل به نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای به اتمام رسیده و فاز امکان‌سنجی مهندسی با طراحی و ساخت ابرتوکامک ایترا (Q=10)، فاکتور کیو به نسبت انرژی خروجی به انرژی راه‌انداز راکتور گداخت هسته‌ای اطلاق می‌شود، 500MW در دست اقدام است.

12. ITER

13. NIF

14. MegaJoule

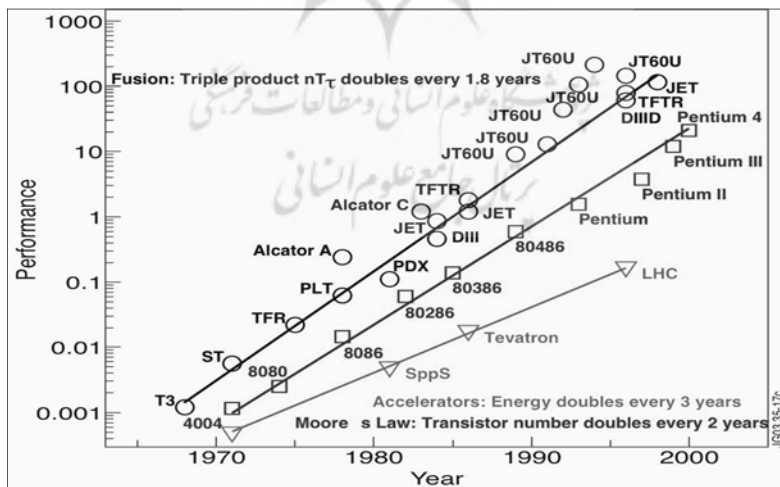
شکل شماره (۵) - فرایند جهانی رهیافت به نیروگاه گداخت هسته‌ای



(Stewart, 2003)

سرمایه‌گذاری‌های نجومی انجام شده دال بر امیدواری و حصول اطمینان در مهار انرژی گداخت هسته‌ای است که در نهایت از طریق یک یا چند روش از روش‌های محصورسازی گداخت هسته‌ای امکان‌پذیر می‌شود. جهت تاکید بر این مدعا، در شکل (۶) میزان توسعه ماشین‌های گداخت هسته‌ای با روش محصورسازی مغناطیسی از نوع توکامک در جهان طبق معیار لاوسون (Lawson)، در مقایسه با میزان توسعه پردازش‌گرهای رایانه‌ای و شتاب‌دهنده‌ها نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، به‌رغم توسعه چشمگیر جهانی در زمینه رایانه، به طور هم‌زمان روند توسعه انواع توکامک‌ها از سرعت تندتری برخوردار بوده است (ITER and Fusion Energy, 2015).

شکل شماره (۶) - منحنی توسعه توکامک‌ها در مقایسه با پردازشگرها و شتاب‌دهنده‌ها



(ITER and Fusion Energy, 2015)

### ۳-۲. تاریخچه گداخت هسته‌ای در ایران

ایران نیز از بدو تأسیس سازمان انرژی اتمی، تحقیقات اولیه توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در کشور را همگام با کشورهای پیش‌تاز آغاز کرد، ولی متأسفانه به دلایلی نظیر جنگ تحمیلی و محدودیت سرمایه‌گذاری، این حرکت به طور هم‌فاز ادامه نیافت. ایران در دهه ۱۳۶۰، با راه‌اندازی ماشین Theta-Pinch به عنوان کشوری هم‌فاز با کشورهای پیشرفته در زمینه گداخت شناخته شد. متعاقباً در دهه ۱۳۷۰، دو توکامک الوند و دماوند در سازمان انرژی اتمی راه‌اندازی و به بهره‌برداری رسید؛ ولی باید اذعان نمود که در طی این مدت به استثنای برخی پژوهش‌های پراکنده آن هم با اراده پژوهش‌گران سازمان انرژی اتمی و برخی دانشگاه‌ها که البته تعدادی از آنها بسیار حائز اهمیت نیز هست، حرکتی هدفمند و در قالب یک برنامه ملی در کشور صورت نگرفته است. البته در سال ۱۳۸۸، طرح کلان ملی "طراحی و ساخت راکتور آزمایشی گداخت هسته‌ای" مورد تأیید معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری قرار گرفت و طی دو سال فاز مطالعات امکان‌سنجی آن با موفقیت توسط پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران در قالب ۱۶ سند راهبردی به اتمام رسید (اسناد مطالعات امکان‌سنجی طرح ملی گداخت هسته‌ای، ۱۳۹۱). این اسناد مسیر انجام برنامه ملی توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در کشور را ترسیم نموده است. انجام این طرح کلان، نقطه عطفی در علوم و فنون گداخت هسته‌ای در کشور بود و تفکر کارشناسان و به‌ویژه مدیران این حوزه را به سوی صنعت کلان گداخت هسته‌ای و نیل به مرزهای دانش در این فناوری سوق داد. در این راستا و به اعتبار پشتوانه علمی موجود در پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، تعداد پنج طرح کلان در سال ۱۳۹۳ تعریف و به تصویب شورای عالی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران رسید. با اجرای این طرح‌ها ضمن ارتقاء زیرساخت‌های علمی موجود، بستر لازم جهت انجام طرح‌های بزرگ و در سطح انجام همکاری‌ها و مشارکت در طرح‌های بین‌المللی فراهم خواهد شد.

### ۴. توجیه سرمایه‌گذاری در زمینه فناوری گداخت هسته‌ای

#### ۴-۱. توجیه اقتصادی

برآورد قیمت تمام شده انرژی، به‌خصوص به شکل انرژی الکتریکی (برق)، امر پیچیده‌ای است که ناشی از وجود عوامل متعدد در امر محاسبات مربوطه است. برای برآورد هزینه تولید برق، باید توامان دو هزینه محاسبه شود: هزینه‌های متغیر که شامل هزینه‌های تولید انرژی عرضه شده و هزینه‌های ثابت که دربرگیرنده هزینه‌های آمادگی مستمر نیروگاه برای عرضه انرژی به میزان مورد نیاز است. همچنین، به منظور مقایسه اقتصادی سیستم‌های مختلف تولید برق، تشخیص دو نوع هزینه حائز اهمیت است: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه که شامل کل مخارج

احداث یک نیروگاه و برحسب هزینه راه‌اندازی هر کیلووات ظرفیت نیروگاه مشخص می‌شود. هزینه دوم نیز شامل هزینه تولید برق مشتمل بر برآورد کل هزینه تمام شده برای تولید نیرو است که معمولاً برای سهولت مقایسه با هزینه تمام شده برای هر کیلووات ساعت برق تولیدی سنجیده می‌شود. هزینه تولید برق خود به سه جزء اصلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و یا مخارج سرمایه‌ای ثابت، هزینه‌های سوخت و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری تفکیک می‌شود. نگاره‌های شماره (۲) و (۳) اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های کشور را مشخص می‌کنند. همان‌طور که در نگاره شماره (۲) مشاهده می‌شود، هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق نیروگاه‌های بخاری ۳۲۰ مگاواتی ۲/۸ سنت، سیکل ترکیبی ۴۰۰ مگاواتی ۲/۶ سنت و گازی ۱۳۰ مگاواتی ۳/۳۴ سنت محاسبه شده است. هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق نیروگاه هسته‌ای از نوع شکافت  $2 \times 1000$  مگاواتی نیز دارای هزینه‌ای معادل ۲/۹۵ سنت بر کیلووات ساعت است که در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت فسیلی، کاملاً رقابتی و قابل مقایسه است (بررسی فنی و اقتصادی نیروگاه‌های برق هسته‌ای در ایران، ۱۳۸۴).

#### نگاره (۱) - اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های سوخت فسیلی کشور

نوع نیروگاه	زمان احداث (سال)	عمر (سال)	نرخ خروج اضطراری (درصد)	میانگین سالیانه زمان تعمیرات (روز)	ضریب قابلیت دسترسی (درصد)	ضریب تعیین قدرت مطمئن (درصد)	مصرف داخلی (درصد)	راندمان (درصد)	هزینه احداث	
									ثابت	متغیر
									دلار	دلار
									(کیلووات)	(کیلووات)
گازی کوچک	۱	۲۰	۹/۸	۳۵	۸۲	۷۰	۰/۸	۲۵	۱۵۱۹۸	۰/۰۹۴۸
گازی بزرگ (۱۳۰ مگاواتی)	۲	۱۵	۱۰/۲	۴۰	۸۰	۶۸	۰/۶	۳۴/۴	۸۹۹۸	۰/۱۱۲۱
بخاری (۳۲۰ مگاواتی)	۵	۳۰	۱۲/۹	۵۶	۷۴	۶۹	۶/۴	۳۸/۵	۲۶۸۸۷	۰/۰۱۸۸
سیکل ترکیبی (۴۰۰ مگاواتی)	۴	۳۰	۱۳/۶۷	۴۲	۷۶	۶۷	۱/۶	۵۰	۹۷۰۹	۰/۰۷۹۸
بخش بخار سیکل ترکیبی	۴	۳۰	۱۲	۵۰	۷۶	۷۳	۴/۱	۶۲/۲	۱۱۱۲۳	۰/۰۱۵۳

(باقرزاده، ۱۳۸۴)



**نگاره شماره (۲) - جزئیات برآورد هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه‌های**
**مختلف کشور**

هزینه‌های تولید هر کیلو وات ساعت (سنت) برای هر نیروگاه				شرح هزینه‌ها
بخاری	سیکل ترکیبی	گازی	جدید پوشهر ۲×۱۰۰۰	
۱/۰۹	۱/۳۶	۰/۷	۱/۹	سرمایه‌گذاری اولیه
۰/۰۷۵	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹	۰/۵۲	هزینه ثابت سالیانه
۰/۰۳۶	۰/۰۲۷	۰/۱۲	۰/۴۳	هزینه تعمیر و نگهداری
۱/۶۲	۱/۲	۲/۵	۰/۱	هزینه سوخت
۰/۰۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	هزینه آب
۲/۸	۲/۶	۳/۳۴	۲/۹۵	جمع هزینه تولید

(باقرزاده، ۱۳۸۴)

گزارش‌های مشابهی در سطح جهانی جهت مقایسه هزینه برق تولید شده توسط نیروگاه‌های با سوخت فسیلی با هزینه برق نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای ارائه شده‌اند. نتایج این مقایسه با آمار برآمده از مطالعات داخلی مطابقت دارد که حاکی از قابل رقابت بودن نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای با نیروگاه‌های فسیلی است (Kivistö & Tarjanne, 2008; Costs

of Generating Electricity, 2004)

اما برای نیروگاه‌های گداخت هسته‌ای، مرجعی که به صورت دقیق و جزئی هزینه این نوع نیروگاه‌ها را گزارش نماید در دسترس نیست و تنها برخی پیش‌بینی‌ها برای هزینه این نوع نیروگاه‌ها وجود دارد. به عنوان مثال، براساس گزارشی که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط آزمایشگاه ملی لورنس لیورمور<sup>۱۵</sup> منتشر شده است، هزینه تولید برق برای یک راکتور ۱۰۰۰ مگاواتی به روش گداخت و شکافت هسته‌ای با سوخت‌های فسیلی قیاس شده است (Lawrence Livermore, 1997). این مقایسه که در شکل (۷) نشان داده شده است، براساس فناوری‌های موجود سال ۱۹۹۲ ارائه شده است. اگرچه مطابق این قیاس انواع راکتورهای گداخت ارزان‌ترین روش تولید الکتریسیته نیستند؛ اما به دلایل مزایای زیست‌محیطی، این راکتورها را می‌توان در قیاس با نیروگاه‌های گازی اقتصادی دانست.

افزون بر این، با تهی شدن منابع گاز در آینده نه چندان دور، انتظار آن می‌رود که تولید برق گداخت هسته‌ای بیش از پیش اقتصادی شود. مقایسه مشابهی نیز توسط محققین ژاپنی برای محاسبه هزینه الکتریسیته (COE)<sup>۱۶</sup> انجام شده که در شکل شماره (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مبنای محاسبه هزینه‌ها برای راکتورهای گداخت براساس هزینه‌های

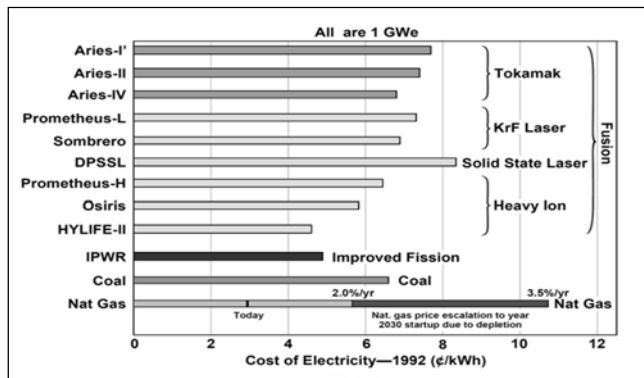
15. Lawrence Livermore

16. Cost Of Electricity

دو توکامک‌های (ASSTR-2) و (CREST) انجام شده است و گویای اقتصادی بودن این راکتورهاست (Okano, et al., 2001).

شکل شماره (۷). مقایسه هزینه تخمینی تولید الکتریسیته نیروگاه‌های گداخت با

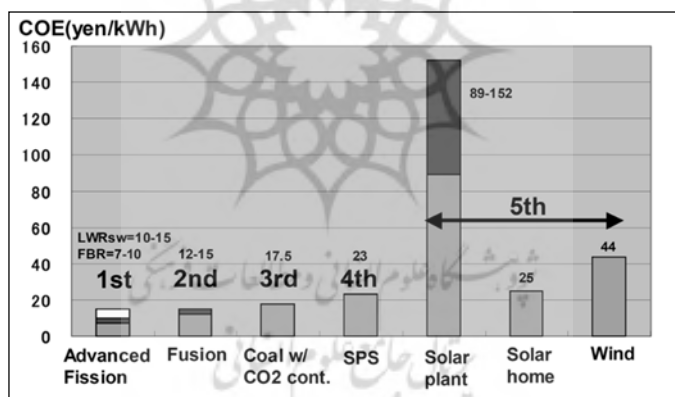
### شکافت، گازی و زغال سنگ



(Lawrence Livermore, 1997)

شکل شماره (۸) - مقایسه هزینه تولید الکتریسیته به روش‌های گوناگون

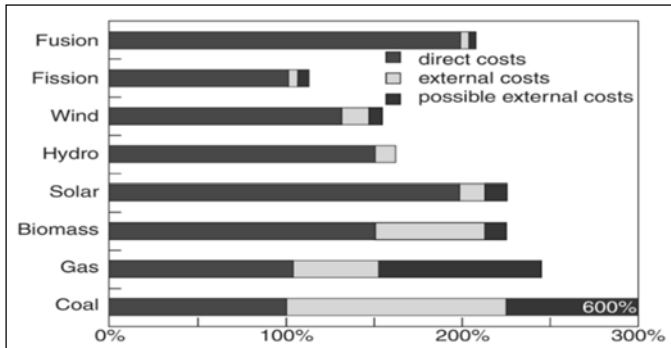
(ین بر کیلووات ساعت)



(Okano, et al., 2001)

در گزارش دیگری که توسط مؤسسه مشترک انرژی و محیط‌زیست منتشر شده، بر قابلیت رقابت هزینه تولید برق با فرایند گداخت با سوخت‌های فسیلی اذعان شده است (Sheffield, et al., 2000). در نهایت اینکه برآوردهای انجام شده با استفاده از مدل‌های استاندارد پیش‌بینی انرژی، نشان می‌دهند که بهای برق گداخت هسته‌ای قابل بهره‌برداری در میانه قرن بیست‌ویکم، مقرون به صرفه خواهد بود. همان‌گونه که در شکل شماره (۹) مشاهده می‌شود، گستره مقادیر هزینه‌ها مبین عدم قطعیت در مقادیر است (McCracken & Stott, 2005).

## شکل شماره (۹) - مقایسه برآورد هزینه نسبی تولید الکتریسیته با انواع سوخت‌ها



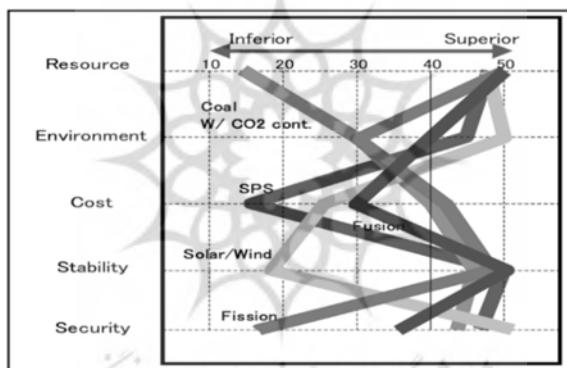
(McCracken &amp; Stott, 2005)

البته تردیدهای زیادی در خصوص محاسبات اقتصادی درازمدت وجود دارند؛ چراکه در مورد سوخت‌های فسیلی اطلاعات اولیه برای انجام محاسبات را در اختیار داریم و به راحتی هزینه اولیه ساخت و راه‌اندازی نیروگاه‌های سوخت فسیلی قابل محاسبه است، اما درباره بهای آینده سوخت ابهامات عمده‌ای وجود دارد. از طرفی قیمت نفت و گاز کشورها با هم متفاوت است و این امر مقایسه را دشوار می‌سازد. عوامل دیگری که باید در پیش‌بینی‌های بلندمدت لحاظ شوند، ملاحظات زیست‌محیطی است که استفاده از سوخت‌های مخرب محیط‌زیست را در آینده با اعمال استانداردهای سختگیرانه، محدود ساخته و در نتیجه هزینه استفاده از این سوخت‌ها بالاتر خواهد رفت. البته محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی به دلیل گستردگی خسارات وارده بسیار دشوار است. برخی از متخصصین محاسبه کرده‌اند که اگر هزینه‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شوند، بهای واقعی برق تولیدی از زغال سنگ، می‌تواند شش برابر بیشتر از مقدار کنونی باشد (Sheffield et al., 2000). از طرفی امکان دارد که در آینده فناوری‌های نوینی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر مواد آلاینده ابداع شوند، ولی این رهیافت‌ها هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی نیروگاه‌ها را بسیار افزایش خواهند داد. هزینه سوخت در یک نیروگاه گداخت هسته‌ای به مراتب کم‌تر است؛ چراکه چند گرم از سوخت گداخت هسته‌ای، انرژی معادل ده‌ها تن زغال سنگ، نفت یا گاز تولید می‌کند. به‌طور مثال، طبق جدول ۴ انرژی حاصل از ۱/۱۳۳ کیلوگرم سوخت گداخت هسته‌ای، معادل انرژی تولیدی از ۹۰۰۰ تن زغال سنگ است. در جدول مزبور، مزایای انرژی حاصل از فرایند گداخت در قیاس با سوخت‌های فسیلی، از منظر تولید انرژی نسبت به جرم و تولید آلاینده‌های محیطی نیز مشخص شده است (اسناد مطالعات امکان‌سنجی طرح ملی گداخت هسته‌ای، ۱۳۹۱).

از طرفی بخش عمده هزینه برق تولید شده از فرایند گداخت هسته‌ای ناشی از سرمایه‌گذاری‌های کلان اولیه در ساخت نیروگاه و هزینه‌های سرویس و نگهداری در طول عمر

مفیدشان است. البته هزینه بخش‌های زیادی از یک نیروگاه گداخت از جمله ساختمان‌ها، توربین‌ها و ژنراتورها که مشابه تأسیسات مربوطه در نیروگاه‌های معمولی هستند، به راحتی قابل تخمین است، ولی ساختن سیستم‌های محصورسازی پلاسما به علت پیچیدگی‌های فنی، بسیار پرهزینه است. آنچه مسلم است، هزینه‌های ساخت، تحقیق و توسعه و تعمیر و نگهداری تنها یک جنبه از توجیحات فنی-اقتصادی به شمار می‌روند، ولی برای این امر باید ملزومات دیگری نیز مورد توجه قرار گیرند که عبارتند از: فراوانی و گستردگی منابع انرژی مورد نظر؛ سازگاری با محیط‌زیست به لحاظ انتشار گازهای گلخانه‌ای و پسماندها؛ تطابق هزینه‌ها با ظرفیت نیروگاه؛ منبع انرژی پایدار بدون وابستگی به امور بین‌المللی و ایمنی به لحاظ خطرات و سوانح. لذا با در نظر گرفتن موارد فوق برای تمامی منابع انرژی، همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که انرژی گداخت هسته‌ای به لحاظ فنی-اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است (Okano, et al, 2001).

شکل شماره (۱۰) - مقایسه مزیت‌های نسبی منابع مختلف تولید انرژی



(Okano, et al., 2001)

نگاره شماره (۳) - مصرف سوخت و میزان تولید آلاینده‌ها در روز برای نیروگاه ۱۰۰۰

مگاواتی

گداخت هسته‌ای (سوخت D-T)	زغال سنگ	نوع نیروگاه معیار مقایسه
D <sub>2</sub> گرم ۴۵۲ Li <sup>6</sup> گرم ۱۳۵۹ T <sub>2</sub> گرم ۶۷۹/۵	۹۰۰۰ تن زغال سنگ	سوخت
He <sup>4</sup> گرم ۱۸۱۲	CO <sub>2</sub> تن ۳۰۰۰۰ SO <sub>2</sub> تن ۶۰۰ NO <sub>2</sub> تن ۸۰	آلاینده‌ها

(منبع: نویسندگان)

همچنین، برآورد قیمت انرژی تولیدی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و جزر و مد نیز به همان میزان مشکل است. در حال حاضر برق تولید شده بدین روش‌ها به طور کلی بسیار گران‌تر از برق تولیدی توسط سوخت‌های فسیلی است. از طرفی برآورد قیمت‌ها تابع شرایط متغیر اقلیمی نیز است که از محلی به محل دیگر بسیار متفاوت هستند. مضافاً اینکه انرژی بادی و خورشیدی مقطعی هستند و اگر بنا باشد این سیستم‌ها به عنوان منابع بزرگ تأمین انرژی به حساب آیند، باید هزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی نیز در نظر گرفته شوند. البته با گسترش فناوری‌های مربوطه قیمت‌ها نیز نسبتاً کاهش خواهند یافت و انتظار می‌رود که با افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر بتدریج قادر به رقابت با آنها باشند؛ ولی همان‌طور که قبلاً ذکر شد، هرگز قادر به تأمین مقدار قابل توجهی از انرژی مورد نیاز جهانیان نخواهند بود. همین امر در مورد ایران نیز صادق است. بررسی توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر، مطابق شتابی که در حال حاضر در زمینه استفاده از انرژی‌های نو وجود دارد، حاکی از آن است که در پایان افق چشم انداز توسعه کشور (سال ۱۴۰۴)، میزان تولید برق از این منابع به ۳۶۴۷ مگاوات خواهد رسید (رادپور و همکاران، ۱۳۸۹). اگرچه برق تولید شده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر موجب کاهش ظرفیت تولید نیروگاه‌های گازی شده و در این صورت در حدود ۱۷۱۳۶ تن از انتشار آلاینده  $\text{NO}_x$ ، ۱۳۵۹۱ تن از انتشار آلاینده  $\text{SO}_2$ ، ۲۱۰ تن از انتشار  $\text{SO}_3$ ، ۲۶۲۶ تن از مقدار آلاینده CO و در حدود ۱۸۲۵ تن از انتشار ذرات ائروسول جامد کاسته خواهد شد، ولی برق تولیدی به این روش تنها معادل با ۴ درصد از کل تقاضای برق کشور در زمان مورد نظر خواهد بود (رادپور و همکاران، ۱۳۸۹). مضافاً اینکه عملاً تفاوت فاحشی میان ظرفیت اسمی و میزان بهره‌برداری و بازدهی نیروگاه‌های انرژی‌های نو وجود دارد؛ به طوری که میانگین سالانه بازدهی آنها حداکثر در محدوده ۲۰ الی ۳۰ درصد از بیشینه ظرفیت اسمی این نیروگاه‌ها قرار دارد. لذا میزان برق تولید شده به کمک انرژی‌های نو هرگز تکافوی رشد مصرف کشور را نخواهد کرد، ضمن اینکه انرژی‌های نو دارای هزینه نگهداری بالا و برخی اثرات نامطلوب بر محیط‌زیست نیز می‌باشند. بدین ترتیب، لزوم دستیابی به روش‌های پایدار تولید برق اجتناب‌ناپذیر است.

#### ۴-۲. توجه فنی و نقش فناوری گداخت هسته‌ای بر پیشرفت علمی کشور

فناوری‌های به کار رفته در انواع روش‌های گداخت هسته‌ای، کاربردهای بسیاری دارند که این کاربردها کمک زیادی به فعالیت‌های علمی کشور خواهد کرد. افزون بر این، با تلاش‌های علمی جهت دستیابی به این فناوری‌ها، فناوری‌های جانبی دیگری نیز حاصل می‌شود که می‌توانند در سایر حوزه‌های علمی و صنعتی کشور مورد استفاده قرار گرفته و موجب ارتقاء آنها شوند.

فناوری پیشرفته گداخت در حوزه‌های گسترده‌ای نظیر پزشکی و دارویی، هوافضا، مخابرات و سایر صنایع کاربرد داشته که عنوان برخی از شاخص‌ترین اثرات مثبت فناوری گداخت هسته‌ای بر پیشرفت علمی کشور در مرزهای دانش به این شرح است: نیل به دانش فنی طراحی و ساخت پیچیده‌های مغناطیسی ابررسانا؛ نیل به دانش فنی طراحی و ساخت سیستم‌های کرایونیک؛ نیل به دانش فنی سیستم‌های کنترل دیجیتال پیشرفته؛ نیل به دانش فنی طراحی و ساخت محفظه خلاء پیشرفته؛ نیل به توسعه دانش فنی مواد پیشرفته؛ نیل به دانش فنی سیستم‌های تشخیصی پیشرفته پلاسما؛ دستیابی به تکنولوژی ساخت منابع تأمین انرژی و توان بالای پالسی؛ دستیابی به تکنولوژی طراحی و ساخت سیستم‌های داده‌گیری و داده‌پردازی فوق پیشرفته؛ تقویت صنایع کشور در زمینه سیستم‌های پوشش‌دهی، مشخصه‌یابی و سوخت‌رسانی؛ امکان برقراری ارتباط موثرتر با صنایع مخصوصاً در زمینه تولید محفظه‌های فشار بالا، سیستم‌های خلأ، تجهیزات برودتی و تولید گازهای هیدروژن، دوتریوم، تریتوم و آرگون؛ تقویت دانش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کشور در زمینه شبیه‌سازی و ابررایانه‌ها؛ تولید دانش فنی و جنبش نرم‌افزاری در زمینه فیزیک پلاسما؛ تقویت صنایع کشور در زمینه لیزر، مواد لیزری و طراحی و ساخت سیستم‌های لیزری پرتوان؛ کاربرد سامانه‌های تشخیصی در بسیاری از صنایع دیگر مانند پزشکی، نفت و گاز، تحقیقات فیزیکی؛ تقویت زیرساخت‌های صنعتی و تحقیقاتی کشور در زمینه امواج رادیوفرکانسی، ماکروویو و کاربرد تجهیزات سامانه‌های گرمایشی رادیوفرکانسی در صنایع دفاعی، هوافضا، پزشکی و....

#### ۳-۴. توجیه سیاسی و امنیتی

امروزه تأثیر و جایگاه انرژی در تأمین رفاه و پیشرفت زندگی بشر غیرقابل اجتناب است و تداوم تمدن مدنی متکی به اقتصاد پویا، به انرژی وابسته است و با اختلال و یا توقف در عرضه انرژی، چرخه اقتصاد فلج شده و جامعه از حرکت بازمی‌ایستد. بنابراین کشورها درصدد هستند به هر نحو ممکن برخوردار از عرضه انرژی مستمر و پایدار باشند. لذا در عصر گفتمان ژئواکونومیک، اهمیت انرژی بدان حد است که قدرت‌های بزرگ، کشورهای تولیدکننده و مسیرهای انتقال انرژی و تکنولوژی‌های مربوط به آن را از جمله عوامل تأمین‌کننده امنیت ملی خود قرارداده‌اند و برای ازدیاد وزن ژئوپولیتیکی و نیل به اهداف فرامنطقه‌ای همواره در کنترل این مناطق تلاش می‌کنند. از این روست که در برهه‌هایی از زمان، بعضی از کشورهای مقتدر با طمع نسبت به ذخایر و منابع انرژی کشورها اقدام به تحرک‌های سیاسی و نظامی نموده و در امور سیاسی و امنیتی این کشورها دخالت کرده و یا بدین امر تمایل می‌ورزند و یا در جهت تضعیف ارزش حامل‌های انرژی و در مجموع اختلال در روند رشد و توسعه و اقتدار ملی این کشورها اقدام

می‌نمایند. لذا تأثیر انرژی بر امنیت ملی را می‌توان از ابعاد مثبت و منفی آن بررسی کرد. از طرفی، با توجه به رشد روزافزون استفاده از منابع انرژی که به صورت یک شاه‌رگ حیاتی برای بسیاری از کشورها به ویژه مصرف‌کنندگان آن درآمده است، کشورهای تولیدکننده و برخوردار از منابع انرژی جایگاه ویژه و حائز اهمیتی را در جغرافیای سیاسی جهان برای خود به وجود آورده‌اند و قادرند در رانت‌های سیاسی جهان تأثیرگذار بوده، نقطه نظرات خود را اعمال و بر مبنای یک سیاست پایدار و دوراندیشانه، اقتدار و امنیت ملی خود را تأمین و تضمین نمایند.

اما جنبه منفی تأثیر مقوله انرژی بر امنیت ملی را می‌توان روند معکوس آن دانست. به عبارتی فقدان و یا وابستگی به خارج از کشور در رابطه با امنیت و تأمین انرژی، نه تنها نقش مستقیم بر تضعیف مؤلفه‌های اقتدار ملی و در نتیجه تزلزل در امنیت ملی را ایفاء خواهد کرد، بلکه دخالت کشورهای مقتدر در امور سیاسی و امنیتی را نیز به دنبال خواهد داشت. در صورت عدم اتخاذ سیاست‌گذاری پایدار در قالب یک برنامه استراتژیک درازمدت در راستای صیانت و بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی، بعد منفی بر جنبه مثبت رابطه انرژی بر امنیت ملی فائق شده و در آن صورت است که برخوردار از منابع انرژی چون نفت و گاز موجب دخالت و مزاحمت‌های مستمر قدرت‌های خارجی در کشور مربوطه خواهد شد.

در این میان باید تأکید کرد که نوع حامل‌های انرژی و امنیت ملی نیز با یکدیگر ارتباط تنگاتنگی دارند. هرچند در مجموع و در درازمدت بهره‌برداری و برخوردار از کلیه منابع انرژی را می‌توان به عنوان محور اصلی پیشرفت و توسعه و امنیت ملی تلقی نمود، ولی متناسب با جو حاکم جهانی در هر برهه از زمان، اثرات انواع گوناگون انرژی بر امنیت ملی متفاوت است. به عنوان نمونه، در حال حاضر منابع اورانیوم به لحاظ میزان تأمین انرژی دارای تأثیر و بروز حساسیت‌های زیاد و تعیین‌کننده در سطح جهان نیستند، اما پیش‌بینی می‌شود این امر در آینده به یکی از عوامل حیاتی مبدل شود. در مقابل، هم‌اکنون نفت قادر است امنیت جهان را تهدید و یا تأمین نماید. از سوی دیگر دسترسی به برخی از منابع انرژی چون بهره‌گیری از انرژی هسته‌ای، از سوی برخی کشورها تهدید مستقیم علیه امنیت ملی به حساب می‌آید و برخی دیگر نظیر نفت، عامل اصلی تأمین مستقیم امنیت محسوب می‌شود. بنابراین طبیعی است که این‌گونه واکنش‌ها در برابر انواع مختلف انرژی از سوی نظام بین‌الملل نمی‌تواند تأثیر یکسانی بر امنیت ملی کشورها بگذارد. پس به اقتضای استراتژی حاکم بر هر زمان، نه تنها می‌بایست بر گونه ویژه‌ای از انرژی تأکید داشته و آن را مورد توجه و حساسیت بیشتری قرارداد، بلکه باید برای دستیابی به منابع آینده انرژی بشر که همانا انرژی شکافت و گداز هسته‌ای است، برنامه‌ریزی راهبردی نمود. قدر مسلم است که کشور ایران در این برهه از زمان

که مقوله انرژی بر محوریت نفت می‌چرخد، ضمن صیانت از این منبع حیاتی از مزیت‌های به روز جهانی در ابعاد مختلف آن بهره‌برداری کرد و به موازات آن بر توسعه بهره‌برداری از دیگر منابع انرژی بخصوص انرژی‌های شکافت و گداخت هسته‌ای نیز همت گمارد؛ چراکه به طور یقین، چرخش محوریت منابع انرژی همواره بر نفت قائم نخواهد ماند و به تدریج انرژی شکافت هسته‌ای و متعاقب آن انرژی گداخت هسته‌ای نیز در سناریوی جهانی انرژی نقش به‌سزایی را ایفا خواهند کرد. در آن صورت است که مقوله انرژی به عنوان یکی از مبانی اقتدار و امنیت ملی، همواره و در تمام شرایط امکان انعطاف و جهت‌گیری را داشته و صیانت از امنیت ملی را تضمین خواهد نمود.

#### ۴-۴. توجیه فرهنگی و اجتماعی

پیش از انقلاب صنعتی، تقریباً ۸۵ درصد انرژی‌های مکانیکی توسط حیوانات و یا نیروی بدنی انسان تأمین می‌شد و مابقی توسط انرژی آب یا باد به‌دست می‌آمد. اما پس از انقلاب صنعتی، سوخت‌های فسیلی به شدت بر جوامع و نیروی انسانی تأثیر گذاشتند. کشتی‌های بخار، اتومبیل‌ها، قطار و سایر تجهیزاتی که مبتنی بر سوخت‌های فسیلی هستند، علاوه بر جایگزینی نیروی کار، موجب اتصال و ارتباط هرچه بیشتر جوامع انسانی با یکدیگر شدند. در حقیقت فرهنگ دنیای مدرن امروز مبتنی بر مصرف پیوسته از انرژی است. شرایط محیطی ما متناوباً میان روشنایی و تاریکی، گرما و سرما در تغییر است و با معرفی روشنایی و گرمایش/سرمايش الکتریکی، سازگاری با این تغییرات متناوب راحت‌تر شده است. اکنون هر زمان که نیاز باشد، می‌توان از روشنایی الکتریکی بهره برد و به کمک سیستم‌های تهویه به راحتی شرایط دمایی یکنواختی به صورت مطلوب ایجاد کرد. به خصوص، کشورهای پیشرفته با شتاب بیشتری این‌گونه تغییرات را در فرهنگ جوامع اعمال نموده‌اند و با ترویج فرهنگ مصرف‌گرایی، وابستگی جوامع به مصرف انرژی روزافزون شده است. ورود مقدار بالایی از انرژی به خانه‌ها بر ظاهر و درون آنها تأثیر گذاشته به‌طوری که افزون‌بر ورود به معماری و ساختار خانه‌ها، تجهیزات متنوعی نیز که بر مبنای انرژی کار می‌کنند، موجب تسهیل در جابه‌جایی و حمل و نقل شده‌اند. علاوه بر جابه‌جایی انسان، انرژی سبب نقل و انتقال سریع‌تر کالاهای تولیدی توسط کشورهای مختلف و به نوبه خود بسط و توسعه فرهنگ آن کشورها شده است، لذا به جرأت می‌توان ادعا داشت که انرژی دربردارنده فرهنگ امروزی است و پیوسته بر آن تأثیرگذار است. انرژی و حرکتهای اجتماعی نیز همواره در طول تاریخ با هم ارتباط تنگاتنگ داشته‌اند و حتی تغییر حامل انرژی از یک نوع به نوع دیگر بر رفتارهای اجتماعی تأثیرگذار بوده است. به عبارت دیگر، جنبش‌های اجتماعی را می‌توان به عنوان یک عامل مهم در تعیین خطمشی و



سیاست‌های انرژی به شمار آورد. به عنوان مثال، همواره از جنبش‌های متعدد کارگران معادن زغال سنگ به عنوان عامل مهمی در شتاب پدیدآمدن صنایع بزرگ نفتی یاد می‌شود؛ چراکه اعتراضات گسترده در دهه ۱۸۸۰ میلادی، دسترسی پیوسته به زغال سنگ را در معرض خطر قرارداده بود. همچنین اعتصابات گسترده کارگران صنعت نفت که در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ رخ داد و یا استقلال‌طلبی کشورهای متعدد در زمینه ملی‌سازی صنعت نفت، موجب شد که کشورهای سلطه‌طلب و قدرت‌های اول جهان نظیر ایالات متحده آمریکا سرمایه‌گذاری‌های کلانی برای یافتن منابع نوین انرژی نظیر انرژی‌های نو و انرژی هسته‌ای انجام دهند.

بنابراین لازم است که مفهوم انرژی نه فقط به عنوان منبع تولید قدرت، بلکه به عنوان یک رابطه اجتماعی درگیر با شبکه‌های قدرت و تغییرات اجتماعی تلقی شود. در خلال این شبکه‌ها، انرژی می‌تواند تأثیرات بی‌شمار متقابلی تولید نماید که بعضاً در جهت عکس یکدیگر فعالیت می‌کنند. از یک سو در مفهوم بازار جهانی، انرژی به شدت سودآور است و سنگ بنای تولید محصولات گوناگون صنعتی به شمار می‌رود؛ از سوی دیگر از منظر اجتماعی، انرژی ضرورتی برای زیستن و ادامه حیات است و لذا صیانت و حفاظت از آن لازم است. بنابراین همواره میان این دو کارکرد گوناگون انرژی تنش و تقابل وجود داشته است. ایجاد ابرشهرها و کلان‌شهرهای صنعتی حاصل بهره‌برداری نامحدود از منابع انرژی در راستای تحقق برنامه‌های توسعه اجتماعی است که توأمان بروز بحران‌های عدیده فرهنگی را نیز به همراه داشته‌اند. از طرفی بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی، مستلزم اعمال برنامه‌های فرهنگی و آموزشی در راستای آموزش و فرهنگ‌سازی‌های لازم در خصوص تحقق این امر مهم است. بنابراین رابطه انرژی با امور فرهنگی و اجتماعی یک رابطه رفت و برگشتی و دوجانبه است.

در کشور ایران، تأثیر مقوله انرژی با فرهنگ و اجتماع از موارد فوق نیز فراتر می‌رود؛ چراکه موضوع معضلات اجتماعی با بحث یارانه‌ها، به خصوص یارانه حامل‌های انرژی به طور ویژه‌ای در هم تنیده شده‌اند. در بین کالاهای یارانه‌ای، حامل‌های انرژی بیشترین سهم را در سبد کالاهای یارانه‌ای به خود اختصاص داده‌اند که طی سالیان اخیر مهم‌ترین دغدغه مسئولین اقتصادی کشور در نحوه بهینه‌سازی این موضوع بوده است. اما تاکنون این مهم محقق نشده و انرژی و یارانه‌های آن بیشترین پیچیدگی را برای دولتمردان و تصمیم‌گیران اقتصادی کشور ایجاد کرده و تقریباً تبدیل به معضلی اجتماعی شده است. از طرفی مصرف سرانه انرژی و شدت انرژی از جمله شاخص‌های تعیین‌کننده در راستای بهره‌برداری بهینه از انرژی و یا میزان اعمال فرهنگ بهینه‌سازی مصرف انرژی در هر کشور است. متأسفانه تا به حال آمار مرتبط با دو شاخص مزبور در ایران مبین دو واقعیت نامطلوب (۱) تأثیر منفی وجود منابع سرشار و ارزان

انرژی بر فرهنگ اجتماعی و ۲) ضعف فرهنگ اجتماعی در بهره‌برداری بهینه از انرژی، در کشور است. بنابراین بر خورداری از یک برنامه و استراتژی ملی و درازمدت انرژی که بر مبنای بهره‌برداری بهینه از منابع مختلف انرژی در قالب اولویت‌بندی منسجم و پایدار و موافق محیط‌زیست تدوین شده باشد، از ملزومات اجتناب‌ناپذیر در حوزه سیاست و فرهنگ ملی بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشور است. این برنامه باید چگونگی تأمین مصرف روزافزون انرژی در چشم‌انداز آتی در قالب یک سبد انرژی که در آن تمام منابع انرژی در آرایش نیروگاهی کشور منظور شده باشند را مشخص نماید.

از طرفی کیفیت محیط‌زیست نه تنها بر کیفیت زندگی بشر تأثیرگذار است بلکه خود زندگی را نیز تهدید می‌کند. به عبارتی امنیت فرهنگی و اجتماعی به سلامت و کیفیت محیط‌زیست مرتبط است و بنابراین اتخاذ برنامه‌های توسعه‌ای استفاده از منابع انرژی‌های غیرمخرب محیط‌زیست همچون انرژی گداخت هسته‌ای از جمله اولویت‌های استراتژی ملی انرژی کشورها و همچنین از دستورالعمل‌های لازم‌الاجرای بین‌المللی است.

یکی از دغدغه‌های مهم در حوزه انرژی به‌ویژه برای کشورهای نفت‌خیز، عمر محدود سوخت‌های فسیلی است که در صورت عدم جایگزینی مطلوب، تبعات اجتماعی گسترده‌ای را به همراه خواهد داشت. به عنوان مثال در زمینه احداث نیروگاه شکافت هسته‌ای در ایران، چندین دهه است که کشور دچار چالش‌های متعدد اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی شده است. لذا در صورت اقدام به سرمایه‌گذاری در زمینه گداخت هسته‌ای و دستیابی به انرژی گداخت همگام با دیگر کشورها طبعاً از تکرار یک بحران خیلی جدی‌تر از بحران انرژی شکافت هسته‌ای جلوگیری به عمل خواهد آمد؛ چراکه هرگونه تغییر در نحوه تأمین تقاضای انرژی مستقیماً طبقات فرهنگی و اجتماعی خود را به دنبال خواهد داشت.

#### ۴-۵. مقتضیات برنامه‌های توسعه کشور

به مقتضای عنوان این مقاله که در اصل بر لزوم دسترسی به انرژی گداخت هسته‌ای بر مبنای مقتضیات برنامه‌های توسعه‌ای کشور تأکید دارد و اصولاً در قسمت مقدمه باید به اهمیت و تبیین موضوع مقاله پرداخته شود، مطالبی مکفی در مقدمه این مقاله نیز ارائه شده‌اند. لذا، به لحاظ مطابقت آن با آنچه می‌بایست در ذیل عنوان این بخش از مقاله مطرح شود، از تکرار مطالب پیشین امتناع ورزیده و تنها جهت تأکید بر اینکه دسترسی به انرژی گداخت هسته‌ای از جمله مقتضیات برنامه‌های توسعه‌ای کشور نیز محسوب می‌شود، نظر خواننده را تنها به بخشی از مطالبی که پیش‌تر در مقدمه مقاله اشاره شد، معطوف می‌داریم؛ تأثیر و جایگاه انرژی در تأمین رفاه و پیشرفت زندگی بشر غیرقابل اجتناب است و اهمیت انرژی و منابع مختلف تأمین

آن جزء رویکردهای اصلی دولت‌ها در برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی و استفاده بهینه از منابع مختلف انرژی در کشور متبوع‌شان است. در این راستا، جمهوری اسلامی ایران نیز براساس اصول راهبردی خود، مصمم به توسعه و بهره‌برداری از منابع نوین انرژی در راستای تحقق اهداف برنامه‌های توسعه در افق چشم‌انداز است.

با توجه به اهداف برنامه‌های توسعه در افق چشم‌انداز که نگاشت مسیر فعالیت‌های توسعه‌ای کشور را به سوی عاری نمودن اقتصادی مبتنی بر منابع نفتی سوق می‌دهد، باید اذعان کرد که توسعه فناوری گداحت هسته‌ای نیز به درستی در راستای همین مسیر به شمار می‌آید. لذا می‌توان آن را به عنوان یکی از مقتضیات عملیاتی شدن برنامه‌های مزبور توجیه و لحاظ نمود.

## فرجام

انسان به عنوان اشرف مخلوقات تا به حال قادر بوده است به بسیاری از حقایق غیرمشهود آفرینش همچون شکافت هسته‌ای تسلط یابد. بنابراین با شناخت و اشراف دیرباز بشر بر کیهکشان‌ها و ستارگان به ویژه خورشید به عنوان نشانه بارز و مشهود عظمت آفرینش که منشاء حیات بر روی زمین است، بعید است که بشر قادر نباشد نمونه‌ای از تولید انرژی عظیم خورشیدی را در زمین مهار و شبیه‌سازی کند؛ چراکه تا به حال پژوهشگران موفق به انجام فرایند گداحت در مدت بسیار کوتاه شده‌اند و برنامه‌ریزی‌های آتی مبین آن است که انسان بتواند در آینده نه چندان دور به مهار این انرژی عظیم جهت بهره‌برداری خود نایل آید.

تحولات شگرف علوم مهندسی که خود ناشی از وسعت دید و استفاده از آخرین دستاوردهای علمی است، همزمان با پیشرفت تکنولوژی در اکثر ابعاد و زمینه‌های علمی و نیز توسعه وسیع صنعتی و اقتصادی در جهان، همگی حاکی از نیاز مبرم کشورمان به سرمایه‌گذاری کلان جهت دستیابی به منابع متنوع انرژی است. در حالی که اغلب ممالک جهان به اهمیت یافتن روش‌های نوین تأمین انرژی پاک و نامحدود پی‌برده و اقدام به تحقیقات جامع و سرمایه‌گذاری‌های کلان نموده‌اند، فقدان برنامه کلان راهبردی انرژی در کشور بیش از پیش احساس می‌شود. تجربه‌های موفق کشورهای پیشرفته در زمینه دستیابی به انرژی‌های پاک و نامحدود، می‌تواند راهنمای مناسبی در سامان بخشیدن به روند برنامه‌ریزی، سرمایه‌گذاری و تحقیق و پژوهش برای توسعه بهره‌برداری از انرژی‌های جایگزین در کشور باشد.

آنچه مسلم است پیشرفت در زمینه فناوری گداحت هسته‌ای موجبات ارتقاء سطح پژوهش در تمام زمینه‌های علمی و فنی کشور را فراهم نموده و مسیر رهیافتن به قله و مرزهای دانش

را برای موطن اسلامی‌مان هموارتر خواهد کرد. بنابراین با توجه به اینکه تا به امروز کشورهای پیشرفته مراحل امکان‌سنجی علمی و فنی مهار انرژی گداخت را پشت‌سر گذاشته‌اند، نباید کوچک‌ترین ابهام در ادامه پژوهش و سرمایه‌گذاری در این زمینه ایجاد شود. چرا که با توجه به جایگاه، اهمیت و کارایی انرژی گداخت هسته‌ای در آینده، اندک کم‌کاری در این راستا برای کشورمان غیرقابل جبران خواهد بود. لذا زمان آن فرا رسیده که بدون اتلاف وقت همراه و همگام با کشورهای پیشرفته در زمینه فناوری گداخت هسته‌ای و در نتیجه مهار انرژی گداخت، برنامه‌ریزی و اقدامات جدی صورت پذیرد و نباید با از دست دادن فرصت‌ها اجازه دهیم که دسترسی به فناوری گداخت نیز همچون فناوری شکافت هسته‌ای انحصاری شده و کشور برای بهره‌مند شدن از آن در آینده متحمل هزینه‌های مادی و سیاسی فراوان شود.

با توجه به غیرقابل اجتناب بودن چالش‌ها و محدودیت‌های تشریح شده در مقاله و عدم دسترسی به راهکاری فراگیر جهت حل معضل تأمین انرژی و مسائل زیست محیطی، تلاش جهت مهار انرژی گداخت به عنوان مانع‌تراز و پاک‌ترین انرژی از بدیهیات برنامه‌های افق چشم‌انداز است.

کشورهای صنعتی در زمینه طراحی و ساخت دستگاه‌های گداخت هسته‌ای بیش از ده‌ها سال تجربه دارند. ایران نیز بعد از کشورهای پیشرفته چنددهه است که در زمینه گداخت هسته‌ای دارای تجربیاتی است، بنابراین اگر در این زمینه به موقع و درست سرمایه‌گذاری کنیم، قادر به جبران تاخیر می‌شویم. برای نیل به این هدف، لازم است تربیت نیروی انسانی متخصص با همکاری مراکز علمی و دانشگاهی، حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان، ایجاد بستر لازم برای انجام تحقیقات گسترده در زمینه گداخت هسته‌ای، نهادینه‌سازی ارتباطات و همکاری علمی و فنی با مراکز ملی و بین‌المللی صورت پذیرد.

کشورهای پیشرفته مصمم هستند که حاصل همه تحقیقات خود را در پروژه بین‌المللی ایتر به منصفه ظهور برسانند. ورود و همکاری جمهوری اسلامی ایران در پروژه مزبور می‌تواند بستر همکاری‌های بین‌المللی در راستای تحقق اهداف برنامه ملی توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در کشور را فراهم کند. لذا اخذ این امتیاز برای کشور بسیار مهم است و اگر این اهمیت از دیگر امور هسته‌ای بیشتر نباشد، کم‌تر هم نیست.

در صورت حمایت تصمیم‌گیران کشور و اجرای برنامه ملی توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در چارچوب خطوط راهنمای مندرج در اسناد مطالعات امکان‌سنجی توسعه فناوری گداخت هسته‌ای (اسناد مطالعات امکان‌سنجی طرح ملی گداخت هسته‌ای، ۱۳۹۱)، می‌توان ادعا کرد

که جمهوری اسلامی ایران نیز همزمان با کشورهای صنعتی در چند دهه آتی از نیروگاه‌های برق گداحت هسته‌ای بهره‌مند شود.

## منابع فارسی

- پژوهشکده پلاسما و گداحت هسته‌ای، **پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای**، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری، (آذر ۱۳۹۱)، اسناد مطالعات امکان‌سنجی طرح ملی گداحت هسته‌ای.
- ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۱، (بهار ۱۳۹۳).
- دفتر برنامه‌ریزی و ارزیابی فنی اقتصادی، **سازمان انرژی اتمی ایران** (بهار ۱۳۸۴)، بررسی فنی و اقتصادی نیروگاه‌های برق هسته‌ای در ایران.
- رادپور، س، ایران‌خواه، ع، هاشمی، س و باقری مقدم، ن (۱۳۸۹)، جایگاه انرژی‌های نو و تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور در افق چشم انداز ۱۴۰۴، **کنفرانس مدیریت و بهینه‌سازی**، تهران.
- کاظمی، خلیل، غلامعلی رحیمی و آرزو باقرزاده (زمستان ۱۳۸۴)، محاسبه هزینه تمام شده تولید برق از منابع مختلف با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی، **فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی**، شماره ۷.

## منابع لاتین

- CIA World Factbook, (2013), <https://www.cia.gov/library/publications/download/download-2013/>
- Costs of Generating Electricity (2004), **The Royal Academy of Engineering, London**, 29 Great Peter Street, Westminster, SW1P 3LW.
- Ghorashi, A. H. (2007), Prospects Of Nuclear Power Plants For Sustainable Energy Development In Islamic Republic Of Iran, **Energy Policy**, vol. 35, pp. 1643-47.
- Ghorashi, A. H. & Rahimi, A. (2011), "Renewable and Non-Renewable Energy Status in Iran: Art of Know-How and Technology-Gaps", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, pp 729-736.
- Inertial Fusion Energy (1997), **Opportunity for Fusion Innovation**, California, Technical Report UCRL-MI-125743 94550-9234.
- International Energy Outlook, (2014), <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>
- ITER and Fusion Energy (Jan. 2015), **International Collaboration**, [http:// iter.rma.ac.be/en/ community/worldwide/index.php](http://iter.rma.ac.be/en/community/worldwide/index.php)
- Key World Energy Statistics (2014), **International Energy Organization**, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2014.html>
- Kivistö, A. & Tarjanne, R. (2008), "Comparison of Electricity Generation Costs", Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, **Department of Energy and Environmental Technology**, Research Report EN A-56.

Lawrence Livermore National Laboratory Lasers Program (1997), *Inertial Fusion Energy*. Opportunity for Fusion Innovation, Lawrence Livermore National Laboratory, California, Livermore, Technical Report UCRL-MI-125743 94550-9234.

Leiser, par M.(1982), *AIEA Bulletin*, vol. 24, No. 4, p.43.

McCracken, G. & Stott, P. (2005), *Fusion -The Energy of the Universe*, ElsevierAcademic Press, Burlington and San Diego, ISBN 0-12-481851-X.

Okano, K., Asaoka, Y., Ryouji Hiwatari, R., Yoshida, T., and Tomabechi, K. (2001), "Comparison of the Fusion with Other Prospective Energy Sources", *Central Research Institute of Electric Power Industry*, Japan.

Sheffield, J., Brown, W., Garrett, G., Shields, T., & Wagner, L., (2000), "A Study of Options for the Deployment of Large Fusion Power plants", *JIEET*, pp. 2000-06.

Stewart, J. Murray, (2003), Fusion and the ITER Project, The opportunity for Canada, *Alpha Annual Conference*.

