ارزیابی اقتصادی تولید برق هسته‌ای

علی طاهری فرد[1]
فرج‌اله طاهری فرد[2]
مرضیه شهاب[3]
(تاریخ دریافت ۸۸/۱۱/۱ - تاریخ تصویب ۸۸/۱۱/۲۰)

چکیده

یکی از مهم‌ترین کاربردهای انرژی هسته‌ای، تولید برق است. در این مطالعه هزینه تولید برق هسته‌ای به تفکیک هزینه سوخت، عملیات و نگهداری و سرمایه‌ای محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج این مطالعه، هزینه تولید هرکیلووات ساعت برق هسته‌ای بین ۶/۰۱ تا ۸/۲۴ سنت است. همچنین نشان می‌دهیم هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق هسته‌ای بدون لحاظ هزینه‌های اجتماعی، بیش از هزینه برق تولیدی نیروگاه‌های فسیلی (بجز نیروگاه‌های گازی) است. بر این اساس در این مقاله پیشنهاد می‌کنیم توسعه نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌بایست مورد توجه وزارت نیرو قرار گیرد. لیکن برای تصمیم‌گیری در مورد سهم مناسب انرژی هسته‌ای در اقتصاد ملی، علاوه بر هزینه تولید برق هسته‌ای، باید به منافعی که از صرفه‌جویی در سایر حامل‌های انرژی حاصل می‌شود نیز توجه کرد.

واژگان کلیدی: نیروگاه برق هسته‌ای، چرخه سوخت هسته‌ای، هزینه سوخت، هزینه سرمایه‌ای، رآکتور آب تحت فشار.

۱- دانشجوی دکتری اقتصاد دانشگاه فردوسی مشهد، taherifard1361@yahoo.com
۲- کارشناس مهندسی مکانیک سیالات دانشگاه آزاد اسلامی.
۳- کارشناس مهندسی شیمی صنایع گاز دانشگاه فردوسی مشهد.

۱- مقدمه

امروزه انرژی هسته‌ای یکی از منابع اصلی تولید برق در جهان است و از رقبای سوخت‌های فسیلی در این زمینه به حساب می‌آید. در حال حاضر سهم انرژی هسته‌ای در تولید برق جهان ۱۶ ٪ ، زغال سنگ ۴۱٪ ، گاز ۱۹٪ ، نفت ۵ درصد، انرژی‌های آبی و دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر ۱۹ درصد است.

بر اساس آمار آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در حال حاضر ۴۴۲ رآکتور اتمی در دنیا در حال بهره‌برداری است که ۳۷۷ گیگاوات توان الکتریکی تولید می‌کنند. در حال حاضر در ۱۹ کشور جهان، نیروگاه‌های اتمی۲۰ تا ۷۵ درصد از کل نیروی برق را تأمین می‌کنند. بیشترین ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های هسته‌ای متعلق به آمریکا به میزان ۱۰۰/۶ گیگاوات است که حدود ۲۰ درصد برق مصرفی این کشور را تأمین می‌کند. اگر چه هم اکنون آمریکا هیچ واحد نیروگاهی در حال ساخت ندارد.

ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های هسته‌ای در فرانسه ۶۳ گیگاوات بوده و حدود ۷۵ درصد برق مصرفی این کشور است که از لحاظ سهم برق تولیدی رتبه اول را در جهان به خود اختصاص داده است. پس از آمریکا و فرانسه، ژاپن بیشترین ظرفیت نیروگاهی تولید برق هسته‌ای را داراست و هنوز نیز پتانسیل زیادی برای توسعه نیروگاه‌های برق هسته‌ای دارد، اما به دلیل حادثه‌هایی که تا به حال در این نیروگاه‌ها رخ داده‌است، نگرانی‌ها در مورد مسائل زیست محیطی نیروگاه‌های برق هسته‌ای در این کشور افزایش یافته و یافتن منطقه‌ای برای ساخت نیروگاه هسته‌ای با مشکل مواجه شده است(انجمن جهانی هسته‌ای[۱]،۲۰۰۸).

در حال حاضر ۳۵ واحد نیروگاهی با ظرفیت ۲۸ گیگاوات در جهان در حال ساخت است. ساخت ۶ واحد از این نیروگاه‌ها از ۲۰ سال پیش آغاز شده و زمان اتمام آن هنوز مشخص نیست. ۶ رآکتور هم در آینده نزدیک به علت پایان عمر مفید آنها تعطیل خواهند شد. چین، روسیه و کره جنوبی به ترتیب با ۵۵۴۰ ، ۴۹۰۰ و ۳۰۰۰ مگاوات بیشترین واحدهای در حال ساخت را دارا هستند. کشورهای آرژانتین، برزیل، مکزیک، آفریقای جنوبی، هند، پاکستان، چین و تایوان هم سعی در افزایش نیروگاه‌های هسته‌ای خود دارند.

---

۱ - World Nuclear Association

در بخش دوم این مقاله، ساختار نیروگاه‌های هسته‌ای تشریح می‌شود. سپس چرخه سوخت هسته‌ای بررسی می‌شود و پارامترهای اقتصادی مؤثر بر تولید برق هسته‌ای و محاسبه هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق هسته‌ای به تفکیک بخش‌های مختلف تولید برق هسته‌ای، شامل استخراج اورانیوم و جداسازی اکسید اورانیوم، فرآوری اورانیوم، تولید غلاف‌های سوخت، مدیریت سوخت مصرف‌شده، هزینه عملیاتی و نگهداری نیروگاه و هزینه ساخت نیروگاه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش پنجم مقاله هزینه تولید برق هسته‌ای با سایر نیروگاه‌ها مقایسه می‌شود. در پایان نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری صورت می‌گیرد.

۲- ساختار نیروگاه هسته‌ای

یک نیروگاه هسته‌ای بسیار شبیه به یک نیروگاه بخار تولیدکننده انرژی الکتریکی است و مهمترین تفاوتی که دارد، منبع گرمایی تولید بخار است. این وظیفه در نیروگاه هسته‌ای برعهده راکتور هسته‌ای است. درون یک راکتور هسته‌ای، اورانیوم ۲۳۵ به صورت کنترل‌شده توسط نوترون‌ها بمباران می‌شود. برخورد نوترون‌ها به هسته اتم اورانیوم۲۳۵ سبب شکست این هسته شده که نتیجه شکست مذکور تولید انرژی و تولید نوترون‌های بیشتر است. کنترل این نوترون‌های پُرانرژی حاصل شده، ضروری است زیرا می‌توانند درون راکتور طی یک فرایند زنجیره‌ای سبب شکست هسته‌های بیشتر اورانیوم۲۳۵ و بروز حادثه شوند. برای کاهش انرژی نوترون‌های آزاد شده و جذب آن‌ها، از مواد کُندکننده (از قبیل آب سبک، آب سنگین، گرافیت) و میله‌های مهار کننده (از قبیل کادیوم و یا بور) درون راکتور استفاده می‌شود.

البته تعدادی از این نوترون ها نیز پس از شکست هسته اورانیوم۲۳۵ با هسته اورانیوم۲۳۸ برخورد کرده و سبب پیدایش ایزوتوپ جدید و ناپایداری از اورانیوم به نام اورانیوم۲۳۹ می‌شوند که خود این ماده نیز در نهایت به یک عنصر رادیواکتیو دیگر به نام پلوتونیوم۲۳۹ بدل می‌شود. پلوتونیوم۲۳۹ همانند اورانیوم۲۳۵ خود می‌تواند به عنوان سوخت هسته‌ای مجدداً مورد استفاده قرار گیرد.

انرژی گرمایی آزاد شده در پی شکست هسته اورانیوم۲۳۵ درون راکتور، توسط مواد خنک کننده و به منظور به حرکت درآوردن توربین‌های تولید برق، به خارج از راکتور منتقل می‌شود. این مواد خنک‌کننده یا انتقال‌دهنده انرژی حرارتی از قبیل گاز دی اکسیدکربن، آب، آب سنگین، گاز هلیم و یا سدیم مذاب، پس از انتقال انرژی به بیرون از راکتور و خنک

شدن مجدداً به داخل راکتور برمی‌گردند و این فرایند به صورت مداوم برای تولید برق ادامه می‌یابد.

سوخت مصرف شده در راکتور در پایان کار حاوی حدود ۹۵ درصد اورانیوم۲۳۸، حدود یک درصد اورانیوم۲۳۵ شکافته نشده، حدود یک درصد پلوتونیوم و حدود سه درصد مواد پرتوزای حاصل از شکافته‌شدن اورانیوم۲۳۵ و همچنین عناصر فوق سنگین به وجود آمده درون راکتور است. این سوخت مصرف شده معمولاً در تجهیزات بازفرآوری به سه جزء اصلی اورانیوم، پلوتونیوم و پسماندهای پرتوزا تقسیم می‌شود.

۱-۲- انواع راکتورهای هسته‌ای

راکتورها بر اساس نوع خنک‌کننده یا کُندکننده مورد استفاده به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. در این مقاله، چهار گونه‌ای که بیشترین استفاده را در تولید برق دارند، مختصراً معرفی می‌گردد.

۱-۱-۲- راکتور آب تحت فشار

راکتور آب تحت فشار[۱] یکی از رایج‌ترین راکتورهای هسته‌ای است که در آن از آب معمولی هم به عنوان کندکننده نوترون‌ها و هم به عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود. در یک راکتور آب تحت فشار، مدار خنک اولیه از آب تحت فشار استفاده می‌کند. آب تحت فشار، در دمایی بالاتر از آب معمولی به جوش می‌آید. چرخه اولیه خنک‌ساز را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که آب با وجود آنکه دمایی بسیار بالا دارد، به بخار تبدیل نشود. این آب داغ و تحت فشار در یک مبدل حرارتی، گرما را به چرخه دوم منتقل می‌کند که یک نوع چرخه بخار است و از آب معمولی استفاده می‌کند. در این چرخه آب جوش می‌آید و بخار داغ تشکیل می‌شود، بخار داغ یک توربین بخار را می‌چرخاند توربین هم ژنراتور و در نهایت ژنراتور انرژی الکتریکی تولید می‌کند.

این نوع راکتور، رایج‌ترین نوع راکتورهای هسته‌ای است و در حال حاضر بیش از ۲۳۰ عدد از آن‌ها در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید برق و صدها راکتور دیگر برای تأمین انرژی تجهیزات دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

---

۱ - Pressured Water Reactor

۲-۱-۲- راکتور آب‌جوشان

در راکتور آب جوشان[۱] از آب سبک استفاده می‌شود. آب سبک، آبی است که در آن فقط هیدروژن معمولی وجود دارد. راکتور آب‌جوشان اختلاف زیادی با راکتور آب تحت فشار ندارد، غیر از اینکه در راکتور آب جوشان فقط یک چرخه خنک‌کننده وجود دارد و آب مستقیماً در قلب راکتور به جوش می‌آید. فشار آب در راکتور آب جوشان کمتر از آب تحت فشار است، به طوری که در بیشترین مقدار به ۷۵ برابر فشار جو می‌رسد (۷/۵ مگا پاسکال) و بدین ترتیب آب در دمای ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد به جوش می‌آید. سپس این بخار آب از توربین عبور داده شده و ژنراتور به چرخش در می‌آید و انرژی الکتریکی تولید می‌شود.

۳-۱-۲- راکتور آب سنگین

در نیروگاه‌های راکتور آب سنگین[۲]، آب سنگین تحت فشار، انرژی گرمایی ناشی از انرژی هسته‌ای را به مبدل‌های بخار منتقل می‌کند. سپس بخار تولیدشده در این مبدل‌ها، به توربین منتقل شده و ژنراتور را به چرخش در می‌آورد. سوخت این نیروگاه‌ها اورانیوم طبیعی است و نیاز به غنی‌سازی ندارد.

٤-۱-۲- راکتور با خنک کننده‌های گازی

در نیروگاه‌ها با خنک‌کننده گازی برای خنک کردن راکتور از گاز و برای کندکردن نوترون‌ها از گرافیت و از اورانیوم طبیعی یا کم غنی شده به عنوان سوخت استفاده می‌شود. در این راکتورها، گاز که معمولاً هلیوم، نیتروژن ویا دی‌اکسیدکربن است، از بالا وارد راکتور شده و پس از عبور از مجاورت میله‌های سوخت به پایین جریان پیدا می‌کند و انرژی خود را به آبی که در داخل یک مبدل حرارتی است، انتقال می‌دهد. مبدل حرارتی، این انرژی را به صورت بخار به توربین منتقل می‌کند. در برخی راکتورهای جدید، راکتور به قدری گرما تولید می‌کند که چگالی خنک‌کن می‌تواند مستقیماً یک توربین گازی را بچرخاند و تولید الکتریسیته نماید. روشن است که هزینه سرمایه‌ای و عملیات و نگهداری نیروگاه‌های هسته‌ای برای هر یک از

---

۱ - Boiling Water Reactor

۲ - Heavy Water Reactor

تکنولوژی‌های فوق متفاوت است. ما در این مقاله هزینه‌های نیروگاه هسته‌ای با راکتور آب تحت فشار را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳- چرخه سوخت هسته‌ای

چرخه سوخت هسته‌ای شامل استخراج اورانیوم و جداسازی اکسید اورانیوم، فرآوری اورانیوم، غنی‌سازی اورانیوم، تولید غلاف‌های سوخت و مدیریت سوخت مصرف‌شده است، که در زیر شرح داده می‌شود:

۱-۳- استخراج سنگ معدن اورانیوم[۱] جداسازی اکسید اورانیوم[۲](کیک زرد) از سنگ معدن

عیار اورانیوم در معادن اورانیوم حدوداً بین پنج صدم درصد تا یک دهم درصد است. ۱۰ تا ۳۰ درصد اورانیوم استخراجی از معدن را کیک زرد تشکیل می‌دهد. کیک زرد جداسازی شده شامل ۸۵٪ اکسید اورانیوم و ۱۵٪ ناخالصی است. پس از خالص‌سازی، سهم اکسید اورانیوم در کیک زرد به حدود ۹۵٪ افزایش می‌یابد. بازدهی این قسمت را حدود ۹۹ درصد در نظر می‌گیریم(ریموند[۳]، ۱۹۸۱:۱۸).

از آنجایی‌که یک نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی سالانه حدود ۳۰ تن اورانیوم غنی شده نیاز دارد و برای تهیه یک کیلوگرم اورانیوم غنی شده ۶/۸۳ کیلوگرم هگزا فلوراید اورانیوم[۴] لازم است. کیک زرد مورد نیاز برای تأمین سوخت سالانه نیروگاهی با این ظرفیت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$۳۰۰۰۰ \times ۵/۳ \times ۱/۰۵ \times ۱/۰۲ \times ۱/۰۱ = ۱۷۱۹۹۱/۸۹ \text{ Kg}$$

لازم به ذکر است که برای تهیه ۶/۸۳ کیلوگرم هگزا فلوراید اورانیوم به ۴/۶۲ کیلوگرم اورانیوم نیاز داریم که از ۵/۳ کیلوگرم اکسید اورانیوم بدست می‌آید. ۸۸ ٪ اکسید اورانیوم را اورانیوم

---

۱ - Uraninum Milling

۲ - U_3O_8

۳ - Raymond

۴ - نحوه محاسبه این رقم در قسمت(۲-۴) ارائه می‌شود.

تشکیل می‌دهد.

رابطه فوق نشان می‌دهد سالانه حدود ۱۷۲ تن کیک زرد به منظور دستیابی به ۳۰ تن اورانیوم غنی شده نیاز است.

۲-٤- فرآوری اورانیوم

کیک زرد جامد است. ولی مرحله بعد (غنی‌سازی) از تکنولوژی بخصوصی بهره می‌برد که نیازمند حالت گازی است. بنابراین کنسانتره اکسید اورانیوم جامد در واحد فرآوری اورانیوم[۱] طی فرایندی شیمیایی به هگزافلوراید اورانیوم[۲] تبدیل می‌شود. هگزافلوراید اورانیوم در دمای اتاق جامد است، ولی در دمایی نه چندان بالا به گاز تبدیل می‌شود.

کارآیی واحد فرآوری اورانیوم حدود ۹۸٪ تا ۹۸/۵٪ است. برای محاسبه مقدار هگزا فلوراید اورانیوم مورد نیاز برای هر واحد اورانیوم غنی‌شده از رابطه زیر استفاده می‌کنیم. بر اساس این رابطه، برای هر کیلوگرم اورانیوم غنی‌شده حدود ۶/۸۳ کیلوگرم هگزا فلوراید اورانیوم مورد نیاز است(ریموند،۱۹۷۶:۹۴).

$$\frac{F}{P} = \frac{X_p - X_t}{X_f - X_t} = \frac{۰/۰۳۴ - ۰/۰۰۲۵}{۰/۰۰۷۱۱ - ۰/۰۰۲۵} = ۶/۸۳$$

X_p=درصد غنی سازی اورانیوم

X_t=درصد زباله اورانیوم ۲۳۵

X_f=درصد اورانیوم ۲۳۵ در خوراک ورودی

بر این اساس میزان هگزا فلوراید اورانیومی که برای تأمین سوخت سالانه نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی باید فرآوری شود عبارتست از:

$$۳۰۰۰۰\text{kg} \times ۶/۸ \times ۱/۰۱ = ۲۰۶۰۴۰\ \text{kg}$$

---

۱ - Uraninium Conversion

۲ - Hexafluoride Uranium

۳-٤- غنی سازی اورانیوم

برای آنکه هگزا فلوراید اورانیوم بدست آمده در مرحله فرآوری اورانیوم، به عنوان سوخت هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد، باید ایزوتوپ قابل شکافت آن را غنی کرد. غنی‌سازی عبارت است از هر فرآیندی که طی آن ایزوتوپ‌های معین موجود در یک عنصر افزایش یابد. در فرآیند غنی‌سازی اورانیوم[۱] ایزوتوپ‌های معین موجود اورانیوم۲۳۵ از ۰/۷ درصد به مقادیر بالاتری افزایش می‌یابد. سطح غنی‌سازی بسته به کاربرد سوخت هسته‌ای متفاوت است. برای یک راکتور آب سبک، سوختی با ۳/۵ درصد اورانیوم۲۳۵ مورد نیاز است. غنی‌سازی با استفاده از یک یا چند روش جداسازی ایزوتوپ های سنگین و سبک صورت می‌گیرد. در حال حاضر دو روش رایج برای غنی‌سازی اورانیوم وجود داردکه عبارتند از انتشار گاز[۲] و سانتریفوژ گاز.

در روش انتشار گازی، گاز هگزا فلوراید اورانیوم با فشار بالا از یک سری سدهای انتشاری عبور می‌کند. این سدها که غشاهای نیمه تراوا هستند، اتم‌های سبک‌تر را با سرعت بیشتری عبور می‌دهند. در نتیجه هگزا فلوراید اورانیوم۲۳۵ سریع‌تر از هگزافلوراید۲۳۸ عبور می‌کند. با تکرار این فرآیند در مراحل مختلف گازی که در نهایت به دست می‌آید که غلظت اورانیوم ۲۳۵ بیشتری دارد. مهمترین عیب این روش این است که جداسازی ایزوتوپ‌های سبک در هر مرحله نرخ نسبتاً پایینی دارد، لذا برای رسیدن به سطح غنی‌سازی مطلوب باید این فرآیند را به دفعات زیادی تکرار کرد که این خود نیازمند امکانات زیاد و مصرف بالای انرژی الکتریکی است و بالتبع هزینه عملیات نیز بسیار افزایش خواهد یافت.

در روش سانتریفوژ گاز، گاز هگزافلوراید اورانیوم را به مخزن‌هایی استوانه‌ای تزریق می‌کنند و گاز را با سرعت بسیار زیادی می‌چرخانند. نیروی گریز از مرکز موجب می‌شود هگزا فلوراید اورانیوم۲۳۵ که اندکی از هگزافلوراید اورانیوم۲۳۸ سبک‌تر است، از مولکول سنگین‌تر جدا شود. این فرآیند در مجموعه‌ای از مخزن‌ها صورت می‌گیرد و در نهایت، اورانیوم با سطحی غنی‌شده مطلوب به دست می‌آید. هر چند روش سانتریفوژ گازی نیازمند تجهیزات گران‌قیمتی است، هزینه انرژی آن نسبت به روش قبلی کمتر است.

امروزه فناوری‌های غنی‌سازی جدیدی نیز توسعه یافته است که همگی بر پایه استفاده از لیزر

---

۱ - Uranium Enrichment

۲ - Gas Diffusion

پیشرفت کرده‌اند. این روش‌ها که روش جداسازی ایزوتوپ با لیزر بخار اتمی[۱] و جداسازی ایزوتوپ با لیزر مولکولی[۲] نام دارند، می‌توانند مواد خام بیشتری را در هر مرحله غنی کنند و سطح غنی‌سازی آنها نیز بالاتر است.

همان طور که گفته شد یکی از روش‌های مهمی که تا کنون برای غنی‌سازی اورانیوم به کار گرفته شده، روش سانتریفوژ است. بازدهی این روش حدود ۹۹٪ است. برای محاسبه واحد کار انجام شده توسط سانتریفوژها برای غنی‌سازی هر کیلوگرم اورانیوم از رابطه زیر استفاده می‌کنیم(کامونوف[۳]،۱۹۷۶:۵۰۵).

$$\frac{SWU}{P} = V(X_p) - V(X_t) - \frac{F}{P}\left(V(X_t) - V(X_t)\right)$$

$$V(x) = (2x - 1)\,\mathrm{In}\left(\frac{x}{1 - x}\right)$$

$X_p =$ ۰/۰۳۵ $V(X_p) =$ ۳/۱۱

$X_f =$ ۰/۰۰۷ $V(X_f) =$ ۴/۸۶

$X_t =$ ۰/۰۰۲۵ $V(X_t) =$ ۵/۹۵

$$\frac{SWU}{P} = ۴/۶$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

بر این اساس برای غنی‌سازی هر کیلوگرم اورانیوم نیاز به ۴/۶ واحد کار انجام شده(SWU) توسط سانتریفوژها است. بنابراین، بر اساس رابطه زیر، حدود ۱۴۰ هزار (SWU) مورد نیاز است تا سوخت سالانه یک نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی فراهم شود.

۳۰۰۰۰ Kgu × ۱/۰۱ × ۴/۶ = ۱۳۹۳۸۰ swu

---

۱ - Atomic Vapor Laser Isotope Severance (AVLIS)

۲ - Molecular Laser Severance

۳ - Komanoff

٤-٤- تولید غلاف‌های سوخت

اورانیوم غنی شده (دی اکسید اورانیوم) را به صورت قرص‌هایی با ارتفاع یک اینچ و قطر نیم اینچ در غلاف‌هایی به ارتفاع ۱۲ فوت قرار می‌دهند. ۲۰۰ عدد از این غلاف‌ها یک مجموعه سوخت را تشکیل می‌دهند که در هر راکتور ۲۰۰ مجموعه سوخت مورد نیاز است(پیرس[1]،۱۹۹۶: ۱۷۸).

٥-٤- مدیریت پسماندهای هسته‌ای

پسماندهای هسته‌ای از نظر نیمه عمر عناصر رادیواکتیو به سه دسته تقسیم می‌شوند: پسماندهای با نیمه عمر کوتاه، که در محفظه‌های فولادی قرارگرفته و در عمق بسیار کم زمین مدفون می‌شوند. نگهداری پسماندها با نیمه عمر متوسط و بالا مشکل‌تر است. این پسماندها ابتدا در بشکه‌های دو جداره فولادی قرار گرفته و سپس در زیر تپه‌ها در اعماق حدود ۵۰۰ متری دفن می‌شوند.

بخش عمده‌ای از زباله‌های اتمی مربوط به سوخت مصرف‌شده در راکتور نیروگاه‌های هسته‌ای است که شامل زباله‌های بسیار رادیواکتیو و کم رادیواکتیو است و با توجه به نیمه عمر بالای آن، هزینه‌های بسیار زیادی را به طرح تحمیل می‌کند. برای مدیریت سوخت در این بخش دو روش وجود دارد:

۱- گزینه نابودی مستقیم؛ در این روش سوخت مصرف‌شده در نیروگاه به صورت مستقیم به تأسیسات نهایی منتقل می‌شود. جایی که طراحی و بسته‌بندی آن، برای نابودی سوخت مصرف شده، متناسب با محیط‌زیست است.

۲- بازفرآوری اورانیوم[2]؛ در این روش، ابتدا سوخت مصرف‌شده در راکتورها، بازفرآوری می‌شود تا اورانیوم۲۳۵ و پلوتونیوم موجود درآن جدا شده و به چرخه سوخت مصرفی نیروگاه باز گردد. سپس بخش باقیمانده سوخت مصرف‌شده به تأسیسات نابودی سوخت مصرف‌شده منتقل می‌شود. این روش بسیار سرمایه‌بر و

---

۱ - Pierce

۲ - حدود ۹۵ درصد سوخت هسته‌ای به واحد بازفرآوری ارسال می‌شود.

پیچیده است و در کشورهای فرانسه، روسیه، انگلیس و ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵- محاسبه هزینه تولید برق هسته‌ای

در این قسمت هزینه تولید برق هسته‌ای را در دو بخش هزینه چرخه سوخت و هزینه نیروگاهی محاسبه می‌کنیم.

۵-۱- هزینه چرخه سوخت هسته‌ای

بر اساس جدول شماره(۱) هزینه تولید سوخت برای نیروگاه هسته‌ای ۱۰۰۰ مگاواتی در سال بین ۶۷ تا ۱۰۶ میلیون دلار است.

جدول شماره(۱)- هزینه تولید سوخت برای نیروگاه هسته‌ای

نام فرآیند	هزینه برای هر واحد*	هزینه کل به میلیون دلار **
استخراج اورانیوم	۵۳ -۱۰۸ $/kg	۹/۱ -۱۸/۶
فرآوری اورانیوم	۶ -۱۲ $/kg	۱۲/۳ -۲۴/۷
غنی‌سازی اورانیوم	۱۰۰ -۱۳۵ $/kg	۱۳/۹ -۱۸/۸
تولید غلاف سوخت	۲۰۰ -۳۵۰ $/kg	۶ -۱۰/۵
هزینه مدیریت سوخت ***	۸۰۰ -۱۰۰۰ $/kg	۲۲/۸ -۲۸/۵
هزینه کل (میلیون دلار)	۶۴/۱ -۱۰۱/۱	

*منبع: انجمن هسته‌ای جهانی سال ۲۰۰۸

**منبع: محاسبات نگارندگان

***منبع: سازمان انرژی اتمی ترکیه سال ۲۰۰۰

۵-۲- هزینه سرمایه‌ای نیروگاه

در بسیاری از پروژه‌های ساخت نیروگاه هسته‌ای هزینه‌های واقعی به میزان قابل ملاحظه‌ای بیش از پیش‌بینی اولیه است. به عنوان مثال بر طبق گزارش «دفتر عملکرد و نوآوری در هیأت دولت

انگلستان[۱]» هزینه ساخت نیروگاه سایز ول بی.[۲] در انگلستان حدود ۳۵ درصد بیش از برآورد اولیه بوده است. بنابراین پیش‌بینی هزینه نیروگاه هسته‌ای با مشکلات جدی روبرو است. به طور کلی در مقایسه با نیروگاه‌های دیگر تفاوت زیادی در اعلام هزینه ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای وجود دارد که در اینجا به برخی عوامل تأثیرگذار در متفاوت بودن هزینه سرمایه‌گذاری و گسترده‌بودن محدوده فرضیات اشاره می‌گردد:

- تکنولوژی راکتورهای نیروگاه‌های هسته‌ای با هم متفاوت است که مسلماً این امر سبب می‌شود تا این نیروگاه‌ها قیمت‌های تمام شده متفاوتی داشته باشند.
- حدود ۸۰٪ هزینه احداث نیروگاه مربوط به هزینه‌های مهندسی، تجهیزات و ساخت است. از طرفی بیش از ۶۰ درصد فعالیت‌های مهندسی لازم برای احداث نیروگاه در محل سایت انجام می‌گیرد و هزینه ساخت تجهیزاتی مانند توربین، ژنراتورها، مولد بخار و دیگ بخار راکتور که در کارخانه و خارج از سایت ساخته می‌شود که بخش کوچکی از هزینه‌های فوق‌الذکر را تشکیل می‌دهد. لذا در چنین پروژه‌هایی که نیازمند انجام عملیات گسترده مهندسی در سایت می‌باشد، کنترل هزینه ها تا حدود زیادی مشکل است.
- عامل دیگر، متفاوت بودن زمان ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد که این عامل تأثیر زیادی بر هزینه سرمایه‌گذاری دارد. در کشورهای پیشرفته این دوره را معمولاً بین ۵ تا ۷ سال در نظر می‌گیرند، ممکن است زمان ساخت نیروگاه هسته‌ای به دلایل سیاسی بسیار طولانی شود که موجب خواهد شد هزینه تولید برق هسته‌ای بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد.

حتی در کشورهای پیشرفته نیز ممکن است تأخیرات طولانی در زمان ساخت روی دهد. مثلاً تصمیمات لازم برای ساخت نیروگاه سایز ول بی. در انگلستان در سال ۱۹۷۹ میلادی گرفته شود ولی ساخت این نیروگاه در سال ۱۹۸۷ آغاز شد و در سال ۱۹۹۵ میلادی وارد مدار گردید، یعنی ساخت این نیروگاه حدود ۱۶سال طول کشید.

---

۱ - Performance and Innovation Unit

۲ - Size Well B

با توجه به عوامل یاد شده هزینه سرمایه‌ای نیروگاه هسته‌ای، گستره متغیری دارد و بین ۳۵۰۰ – ۲۵۰۰ دلار برای هر کیلووات برای نیروگاه‌های مختلف با تکنولوژی‌های متفاوت گزارش شده است(انجمن هسته‌ای جهانی،۲۰۰۸).

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر هزینه تولید برق، ضریب ظرفیت نیروگاه است. افزایش نرخ تولید نیروگاه موجب کاهش هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق هسته‌ای می‌شود. در سال‌های اخیر، غالب نیروگاه‌ها با نرخ تولید برنامه‌ریزی شده فعالیت می‌کنند و ریسک‌های احتمالی قطع تولید برق به حداقل کاهش یافته است. ضریب ظرفیت نیروگاه‌های هسته‌ای که در دهه ۱۹۸۰ میلادی به طور میانگین ۶۰ درصد بود، در حال حاضر بیش از ۸۰٪ است(توماس[1]،۲۰۰۵:ص۱۲).

۳-۵- هزینه عملیات و نگهداری نیروگاه‌های هسته‌ای

هزینه‌های عملیات و نگهداری نیروگاه هسته‌ای شامل هزینه نیروی متخصص هسته‌ای، هزینه‌های تعویض سوخت، پمپ‌ها و لوله‌ها است. هزینه این بخش ۱/۶ تا ۱/۹ سنت برای هر کیلووات ساعت است(انجمن جهانی هسته‌ای،۲۰۰۸).

بر اساس موارد فوق، هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق هسته‌ای به تفکیک در جدول زیر آمده است. در این محاسبات عمر مفید نیروگاه ۳۰ سال و نرخ بهره ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.

جدول شماره (۲)- محاسبه هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق هسته‌ای

نوع هزینه	سنت هر کیلووات ساعت
هزینه سرمایه‌ای نیروگاهی	۳/۵ -۴/۹
هزینه نگهداری و عملیات	۱/۶ -۱/۹
هزینه سوخت	۰/۹۱ -۱/۴۴
هزینه کل	۶/۰۱ -۸/۲۴

منبع: محاسبات نگارندگان

۱ - Thomas

٦- مقایسه هزینه تولید برق در نیروگاه‌های هسته‌ای و فسیلی

در این قسمت هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق را در نیروگاه‌های ایران با هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک مقایسه می‌نماییم. لازم به ذکر است قیمت هر میلیون بی تی یو گاز شش دلار و قیمت هر تن زغال سنگ ۱۰۷ دلار در نظر گرفته شده است.

بر اساس جدول شماره(۳) هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه هسته‌ای بیش از نیروگاه‌های زغال‌سنگی، سیکل ترکیبی و بخاری است. لیکن باید توجه داشت تولید برق در نیروگاه هسته‌ای موجب صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی خواهد شد که هم از نظر اقتصادی و هم از نظر فنی منافع فراوانی برای کشور دارد.

جدول شماره(۳)- میانگین هزینه تولید برق در نیروگاه‌های مختلف

نوع نیروگاه	هزینه تولید هر کیلووات ساعت
سیکل ترکیبی	۵/۸
زغال سنگ	۶/۲۶
بخاری	۷/۰۵
گازی کوچک	۸/۰۷
گازی بزرگ	۸/۰۱
هسته‌ای	۷/۱۲

منبع:(انجمن جهانی هسته‌ای، مارس ۲۰۰۸ و گزارش بانک جهانی در سال ۲۰۰۶ و محاسبات نگارندگان)

نتیجه

امروزه انرژی هسته‌ای یکی از منابع اصلی تولید برق در جهان است و از رقبای سوخت‌های فسیلی در این زمینه به حساب می‌آید. یکی از مهمترین عوامل تصمیم‌گیری برای توسعه منابع عرضه، برآورد هزینه تمام شده تولید برق در سیستم‌های مختلف تولید نیرو است.

قیمت تمام شده برق در نیروگاه‌های هسته‌ای، به عواملی همچون مدت زمان ساخت نیروگاه، هزینه‌های سرمایه‌ای، ضریب ظرفیت، هزینه تولید سوخت هسته‌ای و هزینه‌های عملیات و

نگهداری نیروگاه بستگی دارد. یک نیروگاه هزار مگاواتی آب سبک تحت فشار، سالانه به حدود ۳۰ تن اورانیوم غنی‌شده نیاز دارد. بر اساس نتایج این مقاله، به این منظور، حدوداً ۱۷۲ تن کیک زرد و همچنین حدود ۱۴۰ هزار واحد کار انجام شده سانتریفوژ (SWU) مورد نیاز است. نتیجه این که تولید هر کیلو وات‌ساعت برق هسته‌ای بین ۶/۰۱ تا ۸/۲۴ سنت هزینه در بر خواهد داشت.

مقایسه هزینه تولید برق در نیروگاه‌های مختلف بدون لحاظ نمودن هزینه‌های اجتماعی نشان می‌دهد که تولید هر کیلووات‌ساعت برق در نیروگاه‌های هسته‌ای پس از نیروگاه‌های گازی، بیشترین هزینه را در بر خواهد داشت. بنابر مقایسه انجام شده راهکار پیشنهادی مؤلفین، گسترش نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در تأمین برق مورد نیاز داخلی است. برای این منظور می‌توان هم به احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی جدید و هم تبدیل نیروگاه‌های گازی موجود به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی دست یازید. خوشبختانه بر اساس ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۶ رویکرد کشور نیز به همین سمت می‌باشد؛ به قسمی که احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با رشدی معادل ۳۳/۳ درصد، بیشترین رشد را در میان نیروگاه‌های مختلف داشته است که این مهم از طریق تبدیل نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی صورت گرفته است.

البته برای تصمیم‌گیری در مورد سهم مناسب انرژی هسته‌ای در اقتصاد ملی نباید تنها به هزینه تولید برق هسته‌ای توجه کرد بلکه منافعی که در صورت عدم استفاده از سایر حامل‌های انرژی مانند گاز طبیعی، گازوئیل و نفت کوره نصیب کشور می‌گردد را نیز می‌بایست مد نظر قرار داد.

منابع

- ـــــ(۱۳۸۸)، ***بررسی اقتصادی نیروگاه‌های بخاری با سوخت مازوت و سوخت زغال سنگ***، وزارت نفت، معاونت برنامه ریزی و نظارت بر منابع هیدروکربنی.
- ترابی‌اردکانی، عباس(۱۳۸۶)، ***رقابت پذیری اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای در ایران***، تهران: بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق.
- توانیر(۱۳۸۵)، دفتر برنامه ریزی و تولید، اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی.
- توانیر(۱۳۸۶)، نیروگاه هسته‌ای، ***ماهنامه بولتن بین‌الملل***، شماره ۱۰۷، دی ماه

۱۳۸۶.

- خزانه، رضا(۱۳۸۵)، *مروری بر کاربردهای فناوری هسته‌ای*، تهران: دفتر نشر فرهنگ اسلامی.
- ریموند، مورای(۱۳۸۴)، ***انرژی هسته‌ای مقدمه‌ای بر مفاهیم، سیستم‌ها و کاربردهای فرآیندهای هسته‌ای***، ترجمه سید محمد علوی، تهران: نشر علوم دانشگاهی.
- وزارت نیرو(۱۳۸۷)، ***ترازنامه انرژی سال ۱۳۸٦***، معاونت انرژی، زمستان ۸۷.
- وزارت نیرو(۱۳۸۷)، ***خلاصه گزارش بانک جهانی در خصوص صنعت برق ایران در سال ۲۰۰٦***، دفتر برنامه‌ریزی انرژی وزارت نیرو.

- ___(2002), ***The Economics of Nuclear Power***, London: Performance and Innovation Unit.
- Aktürk, Serpil, Gerçeker, Nilgün(2000), Spent Nuclear Fuel Management: Trends And Back End Scenarios, Turkish Atomic Energy Authority, Bennett, "***International Conference on the Nuclear Power Option***", IAEA, Vienna, 5-8 September
- Brian, Frost(1982), ***Nuclear fuel elements***, Pergaman Press, Oxford.
- *Economic Perspective for Uranium Enrichment*, http://www.fas/sqp/othergov/toe/publs/00416661
- Energy Agency(2003), *"Nuclear Electricity Generation: What Are the External Costs?"*, OECD2003
- *Gas Centrifuge Uranium Enrichment*, http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-centrifuge.htm
- Komanoff, Charles(1967), ***Power Plant Performance: Nuclear and Coal Capacity Factors and Economics***,University of Michigan, Council on Economic Priorities.
- Marry, Raymond(1967), ***Nuclear Energy***, Pergaman Press, California.
- Spangar, Pierce, William(1996), ***Economics of the Energy Industrials,*** Praeger Publishers. New York.
- Steve, Thomas(2005), ***The Economics of Nuclear Power:***

Analysis of Recent Studies, Public Services International Research Unit (PSIRU), July.

- World Nuclear Association(2008), ***The Economics of Nuclear Power***, 2008
- Wymer, Raymond(1981), ***Light Water Reactor Nuclear Fuel Cycle***, CRC Press, Florida.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی