اقتصاد برق هسته‌ای

هزینه‌های تولید برق در نیروگاه‌های زغال‌سنگ سوز، گازی و هسته‌ای بسته به محل احداث آن‌ها بسیار متفاوت است. تا زمانی که انتشار کربن هزینه‌ای در بر نداشته باشد (هزینه‌های اجتماعی آن در نظر گرفته نشود)، استفاده از نیروگاه‌های زغال‌سنگی برای کشورهایی نظیر چین، آمریکا و استرالیا که منابع داخلی فراوان و قابل دسترسی از زغال سنگ دارند، از دید اقتصادی جذاب خواهد بود.

در بسیاری از کشورها با وجود هزینه‌های سرمایه‌ای نسبتاً بالا و همچنین هزینه‌های از کاراندازی و دفع پسماند، تولید برق هسته‌ای با تولید برق از نیروگاه‌های فسیلی رقابت می‌کند. در صورتی که هزینه‌های اجتماعی سلامت و هزینه‌های زیست‌محیطی نیروگاه‌های فسیلی نیز به حساب آورده شوند، جنبه‌های اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای قابل توجه خواهند بود.

عباس فدایی - وحید کریمیان
کارشناسان ارشد اقتصاد انرژی دانشگاه تهران

هزینه‌های خارجی[۱]

در اواسط سال ۲۰۰۱، گزارشی از مطالعه‌ای جامع از هزینه‌های خارجی در چرخه‌های مختلف سوخت با تمرکز بر نیروگاه‌های فسیلی و هسته‌ای منتشر شد. این گزارش نشان می‌داد که تولید برق هسته‌ای در حدود یک دهم نیروگاه‌های زغال‌سنگ سوز، هزینهٔ خارجی (هزینه اجتماعی) دارد.

هزینه‌های خارجی به هزینه‌های قابل اندازه‌گیری گفته می‌شود که مرتبط با سلامتی و محیط‌زیست هستند و به اقتصاد ملی تحمیل می‌شوند اما در هزینهٔ تولید برق به حساب آورده نمی‌شوند و اگر به حساب آورده شوند قیمت برق نیروگاه‌های زغال سنگی در اتحادیهٔ اروپا دو برابر شده و قیمت برق به دست آمده از نیروگاه‌های گازی نیز ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت. در حالی که این محاسبات هنوز بدون در نظر گرفتن هزینه‌های خارجی گرمایش زمین است.

کمیسیون اروپا در سال ۱۹۹۱ با همکاری دپارتمان انرژی آمریکا پروژه‌ای را شروع کردند که اولین پروژه در نوع خود برای "بدست آوردن ارقام مالی خسارات ناشی از اشکال مختلف تولید برق در سرتاسر اروپا " بود. در این مطالعه، انتشار، پراکندگی و اثر نهایی آلودگی مدنظر قرار گرفت. در مورد انرژی هسته‌ای، همان طور که ریسک حوادث به حساب آورده شده است، اثرات پرتوهای

رادیواکتیو پسماندهای معدنی نیز مدنظر قرار گرفته شد. البته هزینه‌های مدیریت پسماند و هزینه‌های از کاراندازی نیروگاه‌های هسته‌ای از قبل جزء هزینه‌ها تولید برق آن محاسبه می‌شوند.

متوسط هزینه‌های خارجی برای برق هسته‌ای در هر کیلووات ساعت ۰/٤ سنت است، که این رقم تقریباً برابر برق‌آبی است. این هزینه برای زغال سنگ بیشتر از ٤ سنت (٤/۱ تا ۷/۳) و برای گاز بین دامنهٔ تغییرات ۱/۳ تا ۲/۳ است و فقط برق تولید شده توسط باد با متوسط هزینهٔ خارجی ۰/۱ تا ۰/۲ سنت در هر کیلووات ساعت ارزان‌تر از هسته‌ای است.

هزینهٔ سوخت

جذابیت اولیهٔ انرژی هسته‌ای، هزینهٔ پایین سوخت آن در مقایسه با نیروگاه‌های زغال‌سنگی، نفتی و گازی است. اورانیوم برای این که به سوخت تبدیل شود باید مراحلی را طی کند، فرآوری گردد، غنی شود و به میله‌های سوخت تبدیل شود. نیمی از هزینه برای غنی‌سازی و ساخت میله‌های سوخت است. در ارزیابی جنبه‌های اقتصادی نیروگاه هسته‌ای باید مقادیری از هزینه برای مدیریت رادیواکتیو سوخت مصرف شده، یا دفع نهایی سوخت استفاده شده و یا پسماندی که از آن جدا می‌شود در نظر گرفته شود.

ارقام مطالعهٔ Areva در اوایل سال ۲۰۰۸ نشان داد که، ۱۷ درصد از کل هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه راکتور آب سنگین اروپا، مربوط به تأمین سوخت آن است که اجزاء این هزینه عبارتند از ۵۱ درصد اورانیوم طبیعی، ۳ درصد هزینهٔ تبدیل، ۳۲ درصد غنی‌سازی و ۱٤درصد ساخت میله‌های سوخت.

در ژانویهٔ ۲۰۱۰ هزینهٔ تقریبی برای به دست آوردن یک کیلوگرم سوخت اورانیوم برای راکتور UO_2 محاسبه شده است که (براساس قیمت تقریبی خرید اورانیوم از معدن) در جدول (۱) آورده شده است:

اما با در نظر گرفتن این موارد، کل هزینه‌های سوخت یک نیروگاه هسته‌ای در کشورهای OECD یک سوم نیروگاه‌های زغالی و بین یک چهارم تا یک پنجم نیروگاه‌های گازی سیکل ترکیبی است.

هزینه‌های سوخت، امکانی برای افزایش مداوم کارایی و کاهش هزینهٔ برق هسته‌ای است. برای مثال در اسپانیا بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ هزینهٔ برق هسته‌ای ۲۹ درصد کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش توان غنی‌سازی و کنترل فرسایش سوخت برای رسیدن به کاهش ٤۰ درصدی در هزینهٔ سوخت است. علاوه بر آن در آینده نیز افزایش ۸ درصدی در فرسایش سوخت، ۵ درصد کاهش بیشتر را در هزینهٔ سوخت ایجاد خواهد کرد.

جدول(۱): مقایسه هزینهٔ تقریبی به دست آوردن یک کیلوگرم اورانیوم

اورانیوم	کیلوگرم اورانیوم ۸/۹ ×۱۱۵/۱۵۰دلار	۱۰۲۸ دلار آمریکا
تبدیل	کیلوگرم اورانیوم ۷/۵ ×۱۲ دلار	۹۰ دلار آمریکا
غنی سازی	۷/۳ swu× ۱٦٤ دلار	۱۱۹۷ دلار آمریکا
تولید سوخت	در هر کیلوگرم	۲٤۰ دلار آمریکا
جمع (با تقریب)		۲۵۵۵ دلار آمریکا

مقایسهٔ اقتصادی اشکال مختلف تولید الکتریسته

برای نیروگاه‌های هسته‌ای ارقام هزینه شامل: مدیریت سوخت مصرفی، هزینهٔ از کار اندازی نیروگاه پس از پایان عمر آن و هزینهٔ دفع پسماند نهایی است. این هزینه‌ها که به طور معمول برای سایر فناوری‌ها، خارجی محسوب می‌شوند برای نیروگاه‌های هسته‌ای داخلی هستند. بدین معنی که این هزینه‌ها باید توسط شرکت‌های تولید برق هسته‌ای پرداخت و یا کنار گذاشته شود و در تعرفه‌های واقعی برق به مصرف‌کننده انتقال یابد.

به غیر از مواردی که دسترسی مستقیم به سوخت فسیلی ارزان وجود دارد، نیروگاه هسته‌ای از نظر هزینه با سایر روش‌های تولید برق قابل رقابت هستند.

هزینهٔ از کاراندازی تقریباً ۹ تا ۱۵درصد از هزینه‌های سرمایه‌ای اولیهٔ نیروگاه هسته‌ای را تشکیل می‌دهد. امّا وقتی که به زمان حال تنزیل می‌شود تنها درصد کمی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری را تشکیل می‌دهد و حتی درصد کمتری از هزینه‌های تولید را شامل می‌شود. در آمریکا این هزینه‌ها ۰/۱تا ۰/۲ سنت در هر کیلووات ساعت است که کمتر از ۵ درصد هزینهٔ برق تولیدی می‌باشد.

بخش انتهائی چرخه سوخت، شامل ذخیره یا دفع سوخت مصرف شده در یک انبار پسماند، تا ۱۰ درصد دیگر به کل هزینه‌های سوخت در هر کیلووات ساعت اضافه می‌نماید و در صورتی که دفع پسماند به جای باز فرآوری مستقیم صورت گیرد، از این مقدار نیز کمتر می شود. در آمریکا با وضع ۰/۱ سنت مالیات برای هر کیلووات ساعت، ۲٦ میلیارد دلار روی برنامهٔ سوخت مصرف شده، سرمایه‌گذاری شده است.

هزینهٔ تولید برق هسته‌ای در طول دههٔ ۱۹۹۰ و در دو دههٔاخیر کاهش یافته است که به دلیل کاهش هزینه‌های سوخت (شامل غنی‌سازی) و تعمیر و نگه‌داری است، اما هزینه‌هایی برای رفع نگرانی در مورد نیروگاه‌های هسته‌ای و یا حداقل آرام کردن این نگرانی‌ها پرداخت شده است. در حالت کلی هزینهٔ ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از نیروگاه‌های گازی یا زغال‌سنگی است که ناشی از بکارگیری مواد اولیه خاص و رعایت کردن استانداردهای پیشرفتهٔ ایمنی و تجهیزات کنترل و

پشتیبانی است. این هزینه سهم بیشتری از نیروگاه‌های هسته‌ای را تشکیل می‌دهد اما زمانی که نیروگاه ساخته شد تغییرات این هزینه حداقل است.

ارقام هزینه‌ای آمریکا برای سال ۲۰۰۷ که توسط گروه هزینهٔ خدمات عمومی انرژی منتشر شد، نشان می‌دهد که متوسط هزینه‌های تولید برق هسته‌ای ۲/۸۶۶ سنت در هر کیلووات ساعت است، که از ۱/۸۳۲ سنت هزینهٔ تعمیر و نگهداری و ۰/۴۹۹ سنت هزینه سوخت و ۰/۵۸۵ سنت هزینه سرمایه‌ای تشکیل شده است (شامل هزینهٔ استهلاک نیست). ارقام آمریکا برای سال ۲۰۰۸ که توسط NEI منتشر شده نشان می‌دهد که هزینهٔ سوخت به علاوهٔ تعمیر و نگهداری ۱/۸۷ سنت در هر کیلووات ساعت است.

رقابت هزینه در آینده

در آینده رقابت نیروگاه هسته‌ای به هزینه‌های اضافی که به نیروگاه زغال‌سنگی تعلق خواهد گرفت و هزینهٔ گاز برای نیروگاه‌های گازی، وابسته خواهد بود. در مورد این که هزینه‌های رسیدن به اهداف تعیین شده، برای کاهش گازهای‌گلخانه‌ای و دی‌اکسید سولفور در نیروگاه‌های فسیلی از کجا باید تأمین شود، تردید وجود دارد. هزینهٔ سرمایه ممکن است از چندین جزء تشکیل شده باشد:

هزینهٔ ساخت نیروگاه (مهندسی، تجهیزات، ساخت)، هزینه‌های ملکی (زمین، زیر ساخت سیستم خنک‌کننده، مدیریت و ساختمان‌های مرتبط، آماده‌سازی سایت، مدیریت پروژه، گواهینامه‌ها و غیره)، افزایش هزینه‌ها و تورم.

هزینه‌های تأمین مالی بستگی به نرخ بهره وام، نسبت بدهی به مجموع دارایی‌ها و در صورتی که این هزینه‌ها تضمین شده باشد به چگونگی پوشش هزینه‌های سرمایه‌ای بستگی دارد.

هزینه‌های عملیاتی– شامل تعمیر و نگهداری به علاوهٔ سوخت است که لازم است که بازده سرمایه را نیز به آن اضافه کنیم.

هزینه تراز شده که به معنی متوسط هزینه‌های تولید برق شامل سرمایه، تأمین مالی و هزینه‌های ملکی، سوخت و عملیات در طول دوران عمر پروژه است، که هزینه برای دفع پسماند و از کاراندازی نیز در آن لحاظ می‌گردد.

تمام ارقام هزینه سرمایه‌ای که از طرف یک فروشنده راکتور ارائه می‌شود و یا ارقامی که عمومی هستند و وابسته به مشخصات سایت نمی‌شوند، معمولاً به عنوان هزینه‌های مهندسی و ساخت منظور می‌شود. این موضوع به این علت است که هزینه‌های ملکی با توجه به این که آیا نیروگاه در زمین جدید یا در مکان یک نیروگاه دیگر (مثل اینکه یک نیروگاه قدیمی را جایگزین کنیم) ساخته می‌شود، بسیار متفاوت است.

یک مطالعه در سال ۲۰۱۰ توسط OECD، هزینه‌های پیش‌بینی شده تولید برق پایه و نیز برق بدست آمده از منابع تجدیدپذیر را در سال ۲۰۰۹ با سال ۲۰۱۵ مقایسه کرده است و نشان می‌دهد که برق هسته‌ای با احتساب هزینه ۳۰ دلار برای هر تن CO_2 منتشره در نیروگاه‌های سوخت فسیلی و نرخ تنزیل پایین، قابل رقابت با سایر روش‌های تولید برق است.

این مطالعه شامل داده‌های ۱۹۰ نیروگاه از ۱۷ کشور OECD و نیز داده‌های برزیل، چین و روسیه و آفریقای جنوبی است، که در آن هزینهٔ تراز شده در طول دوران عمر نیروگاه با وارد شدن هزینهٔ کربن (تنها برای OECD) و نقدینگی تنزیل شده با نرخ ۵ الی ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. رقابت همه جانبه بین فناوری‌های مختلف تولید برق بستگی به ویژگی‌های محلی، هزینهٔ تأمین مالی و هزینهٔ سوخت دارد.

هزینه‌های یک کاسه در مطالعه OECD برای نیروگاه‌های هسته‌ای در دامنهٔ تغییرات ۱۵۵۶ دلار در هر کیلووات برای راکتور APR–۱۴۰۰ در کرهٔ جنوبی و ۳۰۰۹ دلار برای راکتور ABWR در ژاپن و ۳۳۸۲ دلار در هر کیلووات برای Gen III+ در آمریکا، ۳۸۶۰ دلار برای EPR در فرانسه تا ۵۸۶۳ دلار در هر کیلووات برای EPR در سوئیس، با متوسط جهانی ۴۱۰۰ دلار در هر کیلووات می‌باشد. این رقم برای بلژیک،

پرتال جامع علوم انسانی

هلند، چک و مجارستان ۵۰۰۰ دلار در هر کیلووات بود. در چین هزینه‌های یک کاسه برای نیروگاه CPR-۱۰۰۰، ۱۷۴۸ دلار در هر کیلووات و برای AP۱۰۰۰، ۲۳۰۲ دلار در هر کیلووات و در روسیه برای راکتور VVER-۱۱۵۰، ۲۹۳۳ دلار در هر کیلووات بود.

مؤسسه تحقیقاتی انرژی برق آمریکا (EPRI) برای راکتور APWR یا برای راکتور ABWR، رقم هزینهٔ معادل ۲۹۷۰ دلار در هر کیلووات را ارئه می‌کند و مؤسسه یورو الکتریک ٤٧٢٤ دلار در هر کیلووات را برای راکتور EPR محاسبه نموده است. هزینهٔ احداث نیروگاه‌های زغال‌سنگ سیاه در OECD بین ۸۰۷ تا ۲۷۱۹ دلار برای هر کیلووات بود که با در نظر گرفتن هزینهٔ خروجی کربن به ۳۲۲۲ تا ۵۸۱۱ دلار در هر کیلووات می‌رسد. برای نیروگاه زغال‌سنگ قهوه‌ای این هزینه برابر ۱۸۰۲ تا ۳٤۸۵ دلار در هر کیلووات و برای نیروگاه گازی بین ٦۳۵ تا ۱۷٤۷ دلار در هر کیلووات و برای نیروگاه بادی کنار ساحل بین ۱۸۲۱ تا ۳۷۱٦ دلار در هر کیلووات ساعت است.

هزینه‌های روش‌های مختلف تولید برق در نرخ‌های تنزیل ۵ درصد و ۱۰درصد در جدول(۲) مقایسه شده است. در نرخ تنزیل ۵ درصد برق هسته‌ای به مراتب از برق تولیدی در نیروگاه زغال‌سنگی و گازی در همهٔ کشورها ارزان‌تر است. در نرخ تنزیل ۱۰درصد به جز یوروالکتریک و سه کشور اروپایی که در این سه کشور گاز ارزانترین است، گزینهٔ هسته‌ای هنوز ارزان‌تر از زغال‌سنگی است.

نیروگاه‌های زغال سنگی که از روش جذب کربن CCS[۲] استفاده می‌کنند اغلب بسیار گران‌تر از نیروگاه‌های هسته‌ای و یا نیروگاه‌های زغال‌سنگی که برای هر تن CO_2 منتشره ۳۰ دلار پرداخت می‌کنند، هستند. البته گزارش بیان می‌کند که در پیش‌بینی هزینه روش جذب کربن نااطمینانی زیادی وجود دارد. همچنین در نرخ تنزیل ۱۰ درصدهزینه‌های سرمایه‌گذاری سهم بسیار بیشتری از هزینه‌های تولید انرژی را نسبت به نرخ تنزیل ۵درصد ایجاد می‌کند.

کمیسیون اروپا در ژانویهٔ ۲۰۰۷ ، بر اساس ارقام مطالعهٔ OECD در سال ۲۰۰۵، تخمین‌های هزینه‌ای برای سوخت‌های مختلف را مقایسه کرده است.

در مطالعهٔ صنعت الکتریستهٔ اروپا در سال ۱۹۹۷ هزینه‌های نیروگاه بار پایه[۳] هسته‌ای، زغالی و گازی که در سال ۲۰۰۵ سفارش داده شده بود، مقایسه شده است. در فرانسه و اسپانیا در نرخ تنزیل ۵ درصد قیمت برق هسته‌ای ۳/٤٦ سنت در هر کیلووات ساعت است که از همه به جز گاز که پایین‌ترین قیمت را دارد، ارزان‌تر است. اما در نرخ تنزیل ۱۰درصد گزینهٔ هسته‌ای ۵/۰۷ سنت در هر کیلووات ساعت است که به جز گاز که قیمت بالاتری دارد، از همه گران‌تر است.

در سال ۱۹۹۹ Siemens یک مقایسهٔ اقتصادی بین نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با طراحی جدید نظیر (راکتور آبی تحت فشار) EPR[٤] و راکتور آب جوش SWR-۱۰۰۰ را منتشر نمود. هر دو راکتور EPR ۱۵۵۰ مگاوات (اگر بصورت یک سری پشت سر هم در فرانسه یا آلمان ساخته شود) و SWR-۱۰۰۰ (با نرخ تنزیل ۸ درصد) قابل رقابت با نیروگاه سیکل ترکیبی در قیمت ۲/٦ یورو

جدول(۲): پیش‌بینی OECD برای سال ۲۰۱۰ با نرخ سنت در هر کیلووات ساعت

کشور	هسته ای		زغال سنگ		زغال‌سنگ با احتساب ccs		گاز CCGT		باد ساحلی	
نرخ تنزیل	۵ درصد	۱۰ درصد	۵ درصد	۱۰ درصد	۵ درصد	۱۰ درصد	۵ درصد	۱۰ درصد	۵ درصد	۱۰ درصد
بلژیک	٦/۱	۱۰/۹	۸/۲	۱۰	–	–	۹	۹/۳-۹/۹	۹/٦	۱۳/٦
چک	۷	۱۱/۵	۹/٤-۸/۵	۱۳/۳-۱۱/٤	۹/۳-۸/۸	۱٤/۱-۱۳/٦	۹/۲	۱۰/٤	۱٤/٦	۲۱/۹
فرانسه	۵/٦	۹/۲	–	–		۱۱-۹/۵	–	–	۹	۱۲/۲
آلمان	۵	۸/۳	۷/۹-۷	۹/٤-۸/٤	۸/۵-٦/۸	–	۵/۸	۹/۳	۱۰/٦	۱٤/۳
مجارستان	۸/۲	۱۲/۲	–	–	–	–	–	–	–	–
ژاپن	۵	۷/٦	۸/۸	۱۰/۷	–	–	۱۰/۵	۱۲	–	–
کره	۳/۳-۲/۹	٤/۸-٤/۲	٦/۸-٦/٦	۷/٤-۷/۱	–	–	۹/۱	۹/۵	–	–
هلند	٦/۳	۱۰/۵	۸/۲	۱۰	–	–	۷/۸	۸/۲	۸/٦	۱۲/۲
اسلواکی	٦/۳	۹/۸	۱۲	۱٤/۲			–	–	–	–
سویس	۷/۸-۵/۵	۱۳/٦-۹	–	–	۹/٤	۹/٤	۹/٤	۱۰/۵	۱٦/۳	۲۳/٤
آمریکا	٤/۹	۷/۷	۷/۵-۷/۲	۹/۳-۸/۸	٦/۸		۷/۷	۸/۳	٤/۸	۷
چین	۳/٦-۳	۵/۵-٤/٤	۵/۵	۵/۸	–		٤/۹	۵/۲	۸/۹-۵/۱	۱۲/٦-۷/۲
روسیه	٤/۳	٦/۸	۷/۵	۹	۸/۷	۱۱/۸	۷/۱	۷/۸	٦/۳	۹
آمریکا (EPRI)	٤/۸	۷/۳	۷/۲	۸/۸	–		۷/۹	۸/۳	٦/۲	۹/۱
برق یورو	٦	۱۰/٦	۷/٤-٦/۳	۹/۰-۸/۰	۷/۵	۱۰/۲	۸/٦	۹/٤	۱۱/۳	۱۵/۵

سنت در هر کیلووات ساعت است. نیروگاه KONVOI که در آلمان عملیاتی شده برق را با تمامی هزینهٔ سرمایه آن در نرخ ۳ سنت در هر کیلووات ساعت تولید می‌نماید.

در مطالعهٔ کاملی از جنبه‌های اقتصادی نیروگاه‌های هسته‌ای که در اواسط سال ۲۰۰۰ در فنلاند منتشر شد، نشان داده شد که انرژی هسته‌ای گزینه‌ای با حداقل هزینه برای ظرفیت‌های جدید تولید برق خواهد بود. این مطالعه گزینه‌های هسته‌ای، زغال‌سنگ، سیکل ترکیبی، توربین گازی و زغال کک را مقایسه کرده است. گزینهٔ هسته‌ای هزینهٔ سرمایه‌ای بسیار بالاتری نسبت به سایر گزینه‌ها دارد که این رقم ۱۷۴۹ یورو در هر کیلووات، شامل بارگذاری سوخت اولیه (که سه برابر هزینهٔ نیروگاه گازی است) نیز می‌شود. اما هزینه‌های سوخت در این نیروگاه‌ها بسیار پایین‌ترند و هنگامی که ضریب ظرفیت بالای ٦٤ درصد است ارزان‌ترین گزینه محسوب می‌شوند.

ارقام آگوست ۲۰۰۳ انرژی هسته‌ای را در ۲/۳۷ یورو سنت در هر کیلووات ساعت، زغال سنگ را در ۲/۸۱یورو سنت در هر کیلووات ساعت و گاز طبیعی را در ۳/۲۳یورو سنت در هر کیلووات ساعت برآورد می‌کند. (بر اساس ضریب ظرفیت ۹۱درصد و نرخ بهرهٔ ۵درصد و طول عمر نیروگاه ٤٠ سال) با در نظر گرفتن ۲۰ یورو برای انتشار هر تن CO_2 قیمت‌های الکتریسته برای نیروگاه گازی و زغالی به ترتیب به ٤/٤٣ و ۳/۹۲ سنت در هر کیلووات ساعت افزایش می‌یابد.

هزینهٔ سرمایه‌ای نسبتاً بالای نیروگاه هسته‌ای بدان معنی است که هزینهٔ تأمین مالی و زمان صرف شده در ساخت در مقایسه با نیروگاه‌های گازی و یا حتی زغال‌سنگی مهم‌تر است. اما هزینهٔ سوخت بسیار کمتر است و بنابراین زمانی که یک نیروگاه هسته‌ای ساخته می‌شود هزینهٔ تولیدش نسبت به نیروگاه گازی و یا حتی زغالی به مراتب قابل پیش‌بینی‌تر است. اثر اضافه نمودن هزینهٔ انتشار کربن یا هزینه‌هایی از این دست را نیز می‌توان به این هزینه‌ها اضافه نمود. مطالعهٔ انجام شده در فنلاند در سال ۲۰۰۰ حساسیت قیمت سوخت محاسبه شده را نیز نسبت به هزینه‌های برق نشان می‌دهد.

هزینه‌های سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای جزء کوچکی از کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهند امّا هزینه‌های سرمایه‌ای در این نیروگاه‌ها از نیروگاه‌های زغال‌سنگ سوز بیشتر است و از نیروگاه‌های گازی بسیار بیشتر است.

این بررسی نشان می‌دهد که دو برابر نمودن هزینهٔ سوخت نتیجه‌اش افزایش ۹ درصدی در هزینهٔ برق هسته‌ای است این رقم برای نیروگاه زغالی ۳۱ درصد و برای نیروگاه گازی ٦٦ درصد است. این ارقام مشابه گزارش ۱۹۹۲ OECD است. قیمت‌های برق به دست آمده از نیروگاه گازی از زمان مطالعه به طور قابل توجهی افزایش یافته‌اند.

در سال ۲۰۰۳، MIT نتیجهٔ یک مطالعهٔ دو ساله برای چشم انداز انرژی هسته‌ای در آمریکا را منتشر کرد. با تعدیل فروض برای انتظارات صنعت (۱۵۰۰ دلار در هر کیلووات ساعت برای چهار سال ساخت و فاکتور ظرفیت ۹۰درصد با نرخ بهره ۱۲درصد و با اضافه نمودن مالیات) هزینه تولید ٤/۲ سنت در هر کیلووات ساعت می‌شود که همانند نیروگاه زغالی بدون هزینهٔ کربن است (این مطالعه در سال ۲۰۰۹ به روز شده است).

دبیرخانهٔ انرژی فرانسه در سال ۲۰۰۳ ارقام به روز شده‌ای را برای نیروگاه‌های جدید منتشر نمود. بر این اساس هزینهٔ ساخت راکتور PWR پیشرفته اروپایی (EPR) برای هر کیلووات معادل ۱٦٥٠تا۱۷۰۰یورو است و این با ۵۰۰ تا۵۵۰ یورو برای نیروگاه سیکل ترکیبی و ۱۲۰۰ تا۱٤۰۰ یورو برای هر کیلووات برای نیروگاه زغالی قابل مقایسه است.

نیروگاه EPR برق را در قیمت ۲/۷٤ سنت در هر کیلووات ساعت تولید می‌نماید که قابل رقابت با نیروگاه گازی است که بسیار وابسته به قیمت سوخت می‌باشد. هزینهٔ سرمایه‌ای ٦٠ درصد قیمت برق هسته‌ای را تشکیل می‌دهد اما این هزینه برای برق گازی ۲۰ درصد است. در حالی که که ارقام برای نیروگاهی با عمر ٤٠

جدول(۳): مقایسهٔ هزینهٔ تولید در اتحادیهٔ اروپا با نرخ تنزیل ۱۰ درصد

نوع نیروگاه	۲۰۰۵ سال	پیش‌بینی برای ۲۰۳۰ با هزینه ۲۰ تا ۳۰ یورو در هر تن CO_2
گازی	٤/٥-۳/٤	٥/٥-٤/٠
زغال‌سنگ (Pulverised)	٤/٠-۳/٠	٦/٠-٤/٥
زغال‌سنگ (Fluidised bed)	٤/٥-۳/٥	٦/٥-٥/٠
زغال IGCC	٥/٠-٤/٠	۷/٠-٥/٥
هسته‌ای	٥/٥-٤/٠	٥/٥-٤/٠
باد ساحلی	۱۱-۳/٥	۸/٠-۲/۸
باد غیر ساحلی	۱٥/٥-٦/٠	۱۲/٠-٤/٠

جدول(٤): هزینهٔ تولید برق انگلستان برای سال ۲۰۰٤ (پوند در هر کیلووات ساعت) در نیروگاه جدید

	هزینه اولیه	با پشتیبانی	هزینه ۳۰ پوند در هر تن CO_2
هسته‌ای	۲/۳	n/a	n/a
گاز -CCGT	۲/۲	n/a	۳/٤
زغال pulverised	۲/٥	n/a	٥
زغال fluidised bed	۲/٦	n/a	٥/۱
باد ساحلی	۳/۷	٥/٤	n/a
باد غیر ساحلی	٥/٥	۷/۲	n/a

* با در نظر گرفتن ۱۱۰ پوند در هر تن کربن

ساله است، نیروگاه EPR برای ۶۰ سال طراحی شده است (این ارقام در سال ۲۰۰۸ مجدداً به روز شده‌اند).

گزارش آکادمی رویال مهندسی بریتانیا در سال ۲۰۰۴ به هزینه‌های برق از منظر یک نیروگاه جدید در بریتانیا نگریسته است که پایهٔ معتبرتری نسبت به مطالعات قبلی دارد. همان‌طور که نشان داده شده برق به دست آمده از نیروگاه بادی بیش از دو برابر گران‌تر از برق به دست آمده از نیروگاه هسته‌ای است.

بدون اضافه کردن هزینه‌های کربن، هزینهٔ تولید برق زغالی، هسته‌ای و سیکل ترکیبی[۵] در دامنهٔ تغییرات ۲/۲ تا ۲/۶ پوند در هر کیلووات و زغالی IGCC[۶] ۳/۲پوند در هر کیلووات است(که تماماً مربوط به نیروگاه‌های بار پایه است). با اضافه کردن هزینهٔ کربن (تا ۲/۵پوند) هزینهٔ نیروگاه‌های زغالی به نیروگاه بادی کنار ساحل (در نرخ ۵/۴ پوند در هر کیلووات) نزدیک می‌شود این هزینه برای نیروگاه بادی دریائی ۷/۲ پوند در هر کیلووات است. در حالی که برای نیروگاه هسته این هزینه در ۲/۳ پوند در هر کیلووات باقی می‌ماند.

در سال ۲۰۰۴ گزارش انتشار یافته توسط دانشگاه شیکاگو که به وسیله دپارتمان انرژی آمریکا تهیه شده است، هزینه‌های تراز شده تولید برق را در نیروگاه‌های آینده هسته‌ای، زغال‌سنگی و گازی در آمریکا با هم مقایسه کرده است. گزینه‌های زیادی در نیروگاه‌های هسته‌ای مورد توجه قرار گرفته است و برای یک واحد ابتدایی ABWR یا AP۱۰۰۰ عددی بین ۴/۳ تا ۵ سنت در هر کیلووات را بر پایه هزینه‌های یک کاسه ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ دلار آمریکا برای هر کیلووات برای طول عمر ۶۰ ساله، ۵ سال دوره ساخت و ظرفیت ۹۰ درصد بدست آورده‌اند. این عدد برای زغال سنگ ۳/۵ تا ۴/۱ سنت به ازاء هر کیلووات ساعت و برای سیکل ترکیبی ۳/۵ تا ۴/۵ سنت به ازاء هر کیلووات ساعت را نتیجه می‌دهد (که شدیداً به قیمت سوخت وابسته است).

۲۹ درصد از هزینه‌های تراز شدهٔ تولید برق در نیروگاه هسته‌ای را نرخ بهره تشکیل می‌دهد. همچنین این گزارش خاطر نشان می‌سازد که تا ۲۴ درصد از هزینه‌های سرمایه یک کاسه نیز باید برای طراحی اولین واحد از انواع پیشرفته مثل AP۱۰۰۰ به هزینه‌های تراز شده اضافه شود. برای نیروگاه‌های پیشرفته‌تر مثل EPR و SWR۱۰۰۰ هزینهٔ سرمایه یک کاسه۱۸۰۰ دلار برای هر کیلووات در نظر گرفته می‌شود و هزینه‌های تولید برق بیشتر از محدوده گفته شده در بالا قرار می‌گیرند. با این حال با فرض این که یک سری ۸ تایی از یک نوع خاص از نیروگاه‌ها ساخته شود و با در نظر گرفتن اینکه کارایی با توجه به تجربه کسب شده افزایش پیدا کند و به تبع آن هزینه‌های سرمایه‌ای نیز کاهش یابد، هزینهٔ تراز شدهٔ تولید برق به میزان ۲۰ درصد از آنچه در بالا آمد کمتر خواهد شد. همچنین زمانی که هزینه‌های طراحی و مهندسی اولین نوع از این واحدها مستهلک شد (برای مثال ۱۵۰۰ دلار برای هر کیلووات در مورد بالا) این هزینه‌ها به میزان ۳۲ درصد کاهش خواهد یافت و آن را به حدود ۳/۴ سنت برای هر کیلووات ساعت می‌رساند که قدرت رقابت با سایر روش‌های تولید برق را به آن می‌دهد.

این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که با اضافه کردن کمترین هزینهٔ کنترل کربن به میزان ۱/۵سنت در هر کیلووات برای زغال‌سنگ و ۱ سنت در هر کیلووات برای گاز به اعداد فوق، انرژی هسته‌ای قابلیت رقابت به مراتب بیشتری نیز پیدا می‌کند. اما این تحقیق به دنبال سیاست‌های دیگری است تا ریسک را متعادل کند و هزینه‌های مهندسی ایجاد اولین نوع از هر نیروگاه را برای تشویق کردن سرمایه‌گذاران تأمین کند.

اداره بودجهٔ کنگره آمریکا در طول سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ مطالعه‌ای را بر روی میزان اثرات هزینه‌های انتشار احتمالی کربن و یارانه‌های فدرال بر روی امکان تجاری شدن فناوری جدید پیشرفته هسته‌ای در آمریکا انجام داد. نتایج حاکی از آن است که با هزینهٔ انتشار کربن درحدود ۴۵ دلار برای هر تن دی‌اکسیدکربن، نیروگاه هسته‌ای با نیروگاه زغالی و گازی حتی بدون سایر انگیزه‌ها قابل رقابت است. همچنین سوبسید ارائه شده به اولین نیروگاه ۶۰۰۰ مگاواتی با ظرفیت هسته‌ای پیشرفته، سرمایه‌گذاری را حتی بدون در نظر گرفتن انتشار کربن جذاب می‌نماید. اگرچه نااطمینانی‌ها در مورد هزینه‌های ساخت نیروگاه و قیمت‌های آتی گاز می‌تواند مانع سرمایه‌گذاری در پروژه‌های هسته‌ای شود.

در نوامبر ۲۰۰۸ هیئت مدیرهٔ شرکت French Energy & Climate ، مطالعهٔ سال ۲۰۰۳ خود را به روز کرد. این مطالعه به دلیل تغییرات سریع در هزینهٔ سوخت و سرمایه، به میزان زیادی از ارقام اولیه فاصله گرفته بود، اما نشان داده شده است که در هر رقمی فراتر از ۶۰۰۰ ساعت تولید در هر سال (۶۸درصد فاکتور ظرفیت)، گزینهٔ هسته‌ای ارزان‌تر از گزینهٔ زغالی، گازی و یا سیکل ترکیبی است. همچنین در ۱۰۰درصد ظرفیت، سیکل ترکیبی ۲۵ درصد گران‌تر از هسته‌ای است. در کمتر از ۴۷۰۰ ساعت در هر سال، هزینهٔ برق سیکل ترکیبی ارزان‌تر است (تمام موارد بالا بدون در نظر گرفتن هزینه‌های CO_2 است). هزینه‌های ثابت نیروگاه‌های هسته‌ای تقریباً ۷۵ درصد هزینه کل به حساب می‌آید در صورتی که برای سیکل ترکیبی کمتر از ۲۵درصد هزینه ثابت می‌باشد.

در ماه می سال ۲۰۰۹ گزارش به روز شده‌ای از مطالعه سال

جدول(۵): هزینه تولید برق (دلار آمریکا در هر کیلووات ساعت)

	MIT ۲۰۰۳	فرانسه ۲۰۰۳	شیکاگو ۲۰۰۴	کانادا ۲۰۰۴	۲۰۰۷ EU
هسته‌ای	۴/۲	۳/۷	۴/۶–۴/۲	۵	۷/۴–۵/۴
گازی	۴/۲		۴/۱–۳/۵	۴/۵	۶/۱–۴/۷
زغالی	۵/۸	۱۰/۱–۵/۸	۷–۵/۵	۷/۲	۶/۱–۴/۶
باد ساحلی					۱۴/۸–۴/۷
باد غیرساحلی					۲۰/۲–۸/۲

۲۰۰۳ دانشگاه MIT، منتشر شد. این گزارش نشان می‌دهد که هزینه‌های ساخت برای تمام انواع پروژه‌های مهندسی با مقیاس بزرگ به طور قابل توجهی افزایش یافته است. هزینهٔ ساخت نیروگاه هسته‌ای با وجود رکود اقتصادی اخیر با نرخ ۱۵ درصد در سال افزایش یافته است. که این براساس هزینهٔ ساخت واقعی در کره و ژاپن و هزینهٔ پیش‌بینی شده برای ایالات متحده است. هزینهٔ سرمایه‌ای برای نیروگاه‌های زغال‌سنگ و گاز طبیعی نیز افزایش یافته است، اگرچه این افزایش مقدارش چندان قابل توجه نیست. هزینهٔ گاز و زغال که به طور قابل توجهی افزایش یافته بود اکنون کاهش یافته است. با در نظر گرفتن این موارد، این افزایش هزینه‌ها، موقعیت را به آنچه که در سال ۲۰۰۳ بود نزدیک می‌کند.

چندین احتمال برای تغییرات وجود دارد که جلوی یک مقایسهٔ قابل اطمینان از هزینه‌های یک شبه و یا هزینه سرمایه‌ای را می‌گیرند. برای مثال این که آیا هزینهٔ بارگیری هستهٔ سوخت در هزینه‌ها محاسبه شده و یا خیر؟ این موضوع زمانی واضح‌تر می‌شود که قیمت یا تنها برای راکتور هسته‌ای باشد (سیستم عرضهٔ برق هسته‌ای) یا کل نیروگاه شامل توربین‌ها و یا ژنراتورها (تمام ارقام بالا شامل این ها هستند). تفاوت‌های بیشتر مربوط هستند به کارهای مربوط به سایت مثل برج‌های خنک‌کننده و زمین و اخذ جواز که معمولاً جزو هزینه‌های ملک به شمار می‌رود که قبلاً مورد بحث قرار گرفت. هزینه‌های تأمین مالی تقریباً حدود ۳۰درصد به مجموع اضافه می‌کنند و نهایتاً این سؤال مطرح می‌شود که آیا ارقام هزینه به دلار کنونی هستند و یا به دلاری که در سال هزینه شدن خرج گردیده؟

مقایسه پیش‌بینی هزینه

با جمع‌آوری مطالعات بالا تا سال ۲۰۰۷ و مقایسهٔ آن‌ها جدول (۵) به دست می‌آید. اورانیوم منبعی است که مزیت آن در تمرکز بالای انرژی است که به آسانی و به ارزانی قابل نقل و انتقال است. مقادیر موردنیاز آن بسیار کمتر از زغال‌سنگ و یا نفت است. یک کیلوگرم اورانیوم طبیعی در حدود ۲۰۰۰۰ برابر انرژی بیشتری نسبت به میزان مشابهی از زغال‌سنگ تولید می‌کند. بنابراین ذاتاً کالایی با قابلیت حمل و نقل و مبادلهٔ بسیار بالا است. سهم سوخت در کل هزینه‌ها نسبتاً پایین است به طوری که افزایش قیمت شدید آن اثرات نسبتاً کمی در بر خواهد داشت. راه‌های دیگری نیز جهت صرفه‌جویی وجود دارد برای مثال اگر سوخت مصرف شده باز فرآوری شود و پلوتونیوم و اورانیوم بهبود یافته در سوخت MOX مصرف شود انرژی بیشتری قابل استحصال است.

منبع: مقاله اقتصاد هسته‌ای از انتشارات انجمن جهانی انرژی هسته‌ای

پی نوشت:

۱. External Costs
۲. Carbon Capturing and Storage

فرایند جذب وذخیره‌سازی کربن (CCS) شامل فرایندهای شمیایی و ترمودینامیکی می‌شود که طی آن دی اکسید کربن از گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های هیدروکربونی در نیروگاه‌ها و صنایع انرژی بر جدا شده، متراکم می‌شود و از طریق لوله‌های تحت فشار به نقاط عمیق بستر دریا که فشار آب بسیار زیاد است فرستاده می‌شود. در واقع دی اکسید کربن متراکم به مخازن و حفره‌های درونی زمین تزریق می‌شود.

۳. Base-load
۴. European Pressurized Water Reactor
۵. Combined Cycle Gas Turbines
۶. Integrated gasification combined cycle