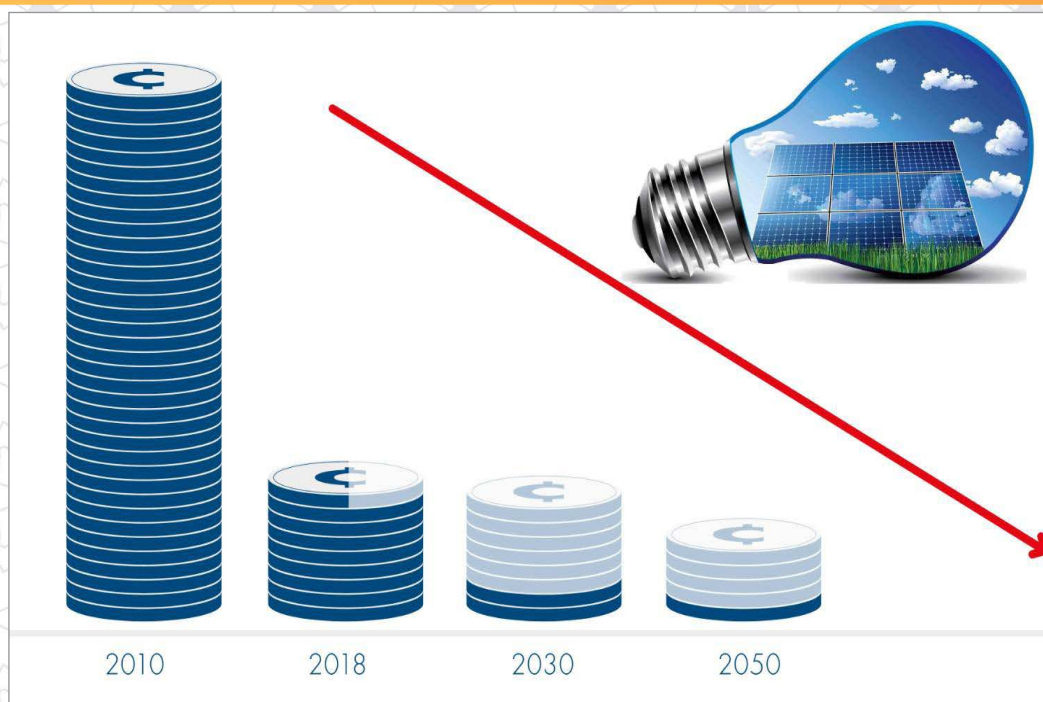


مقایسه هزینه تولید برق از منابع مختلف (به عنوان یکی از مؤلفه‌های تعیین سبد بهینه تولید برق)



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شماره مسلسل:
۲۱۱۵۹



مرکز پژوهش‌های
مجلس شورای اسلامی

تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۹/۹

عنوان گزارش:

مقایسه هزینه تولید برق از منابع مختلف
(به عنوان یکی از مؤلفه‌های تعیین سبد بهینه تولید برق)

نوع گزارش: طرح/ لایحه ☐، نظارتی ☐، راهبردی ☒، پیش نویس قانونی ☐

نام دفتر:

مطالعات انرژی، صنعت و معدن (گروه برق و هسته‌ای)

تهیه و تدوین:

رضا شریفی، ایمان رمضانی (گروه برق و هسته‌ای)

همکاران:

سیده مریم موسوی، علی صابری،
سجاد افشار زرنندی (گروه برق و هسته‌ای)

مدیر مطالعه:

ایمان رمضانی

ناظران علمی:

میلاد بیگی، حبیب اله ظفریان

گرافیک و صفحه آرایی:

نفیسه حاجی صفری

ویراستار ادبی:

اکرم وحدانی فر

واژه‌های کلیدی:

۱. هزینه تولید برق
۲. امنیت انرژی
۳. سبد تولید برق
۴. اقتصاد انرژی

تاریخ شروع مطالعه:

۱۴۰۳/۱۲/۱



فهرست مطالب

چکیده.....	۶
خلاصه مدیریتی.....	۷
۱. مقدمه.....	۹
۲. مطالعه محاسبه هزینه تراز شده تولید برق در مراجع معتبر.....	۱۰
۳. روش محاسبه هزینه تراز شده تولید برق.....	۱۳
۴. داده‌ها و فرضیات مورد نیاز برای محاسبه هزینه تراز شده تولید برق.....	۱۴
۵. نتایج محاسبه هزینه تراز شده برای تولید برق در انواع نیروگاه‌ها.....	۱۹
۶. جمع‌بندی و پیشنهادها.....	۲۲
منابع و مآخذ.....	۲۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۱. نمودار مقایسه میانگین تغییرات سالیانه هزینه تراز شده تولید برق در انواع نیروگاه‌ها از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲.....	۱۲
شکل ۲. نمودار هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در سه سناریوی واقع‌بینانه، خوش‌بینانه و بدبینانه برای ساخت هر کیلووات از انواع نیروگاه‌ها.....	۱۶
شکل ۳. نمودار هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به‌ازای هر کیلووات-ساعت تولید برق در سه سناریوی واقع‌بینانه، خوش‌بینانه و بدبینانه برای نیروگاه‌های مختلف.....	۱۷
شکل ۴. نمودار هزینه عملیاتی ثابت و متغیر به‌ازای هر کیلووات-ساعت تولید برق در سه سناریوی واقع‌بینانه، خوش‌بینانه و بدبینانه برای نیروگاه‌های مختلف.....	۱۸
شکل ۵. نمودار هزینه سوخت به‌ازای هر کیلووات-ساعت تولید برق در سه سناریوی واقع‌بینانه، خوش‌بینانه و بدبینانه برای نیروگاه‌های مختلف.....	۱۸
شکل ۶. نمودار سهم هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه سوخت، هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر از کل هزینه تولید هر کیلووات-ساعت برق برای انواع نیروگاه‌ها.....	۲۱
شکل ۷. نمودار هزینه تراز شده تولید برای هر کیلووات-ساعت برق در سه سناریوی واقع‌بینانه، خوش‌بینانه و بدبینانه برای انواع نیروگاه‌ها.....	۲۱

فهرست جداول

جدول ۱. خلاصه هزینه تراز شده تولید برق از نیروگاه‌های مختلف.....	۸
جدول ۲. شاخص هزینه تراز شده تولید برق برای انواع نیروگاه‌ها در مراجع معتبر جهانی.....	۱۱
جدول ۳. مفروضات کلیدی برای محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه‌های خورشیدی و بادی.....	۱۴
جدول ۴. مفروضات کلیدی برای محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال‌سنگ‌سوز.....	۱۵
جدول ۵. مفروضات کلیدی برای محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی.....	۱۵
جدول ۶. محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق برای انواع نیروگاه‌ها و سهم مؤلفه‌های اصلی.....	۱۹
جدول ۷. مقایسه کیفی شاخص هزینه تراز شده تولید برق و مؤلفه‌های اصلی آن.....	۲۲
جدول ۸. پیشنهاد توصیه سیاستی ویژه گزارشات راهبردی / نظارتی.....	۲۳



مقایسه هزینه تولید برق از منابع مختلف

(به عنوان یکی از مؤلفه‌های تعیین سبد بهینه تولید برق)

Doi: [10.22034/report.mrc.2025.1404.33.9.21159](https://doi.org/10.22034/report.mrc.2025.1404.33.9.21159)

چکیده



طراحی سبدی بهینه برای تولید برق در کشور، مستلزم در نظر گرفتن مجموعه‌ای از عوامل راهبردی، امنیت انرژی، اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی است. در این گزارش، از میان تمامی مؤلفه‌های مؤثر در طراحی سبد بهینه، صرفاً جنبه اقتصادی آن مورد مطالعه قرار گرفته است و در گزارش‌های آتی، سایر ابعاد از جمله ملاحظات فنی مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهند گرفت. شاخص هزینه تراز شده تولید برق امکان مقایسه هزینه تمام شده تولید برق در فناوری‌های مختلف را فراهم می‌سازد. لذا در گزارش حاضر، هزینه تولید برق از منابع گوناگون با استفاده از این شاخص محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی‌ها صرفاً بر فناوری‌هایی متمرکز بوده است که از منظر فنی و شرایط جغرافیایی، پتانسیل توسعه در کشور را دارا هستند؛ از جمله نیروگاه‌های خورشیدی، بادی، گازی، سیکل ترکیبی، هسته‌ای و زغال سنگ سوز. شایان ذکر است با توجه به محدودیت‌های موجود در زمینه توسعه نیروگاه‌های برق آبی، این فناوری از دامنه مطالعات این گزارش خارج شده است.

نتایج بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که نیروگاه‌های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) کمترین هزینه تمام شده تولید برق را دارند و با فرض قیمت صادراتی سوخت، نیروگاه‌های حرارتی (گازی و سیکل ترکیبی) بیشترین هزینه تمام شده تولید برق را خواهند داشت. نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال سنگ سوز نیز از منظر هزینه تمام شده تولید برق وضعیت متوسطی دارند. در این گزارش همچنین پیشنهادهایی برای بهبود اقتصاد بخش نیروگاهی و تنوع بخشی به سبد تولید برق کشور ارائه شده است.

شرح / بیان مسئله

تعیین سهم بهینه حامل های انرژی در سبد تولید برق کشور، مستلزم در نظر گرفتن جنبه های گوناگون از جمله مزیت های راهبردی، امنیت انرژی، اقتصادی، فنی و زیست محیطی است. تمرکز صرف بر یک جنبه خاص، می تواند منجر به اتخاذ تصمیم های نامطلوب و ناپایدار شود. برای مثال، اگر تنها معیار اقتصادی در نظر گرفته شود، ممکن است نیروگاه های خورشیدی به عنوان گزینه های اصلی انتخاب شوند. در این شرایط، در صورت عدم توجه کافی به محدودیت ها و ویژگی های فنی شبکه، احداث گسترده این نیروگاه ها می تواند به کاهش پایداری و قابلیت اطمینان سیستم برق منجر شود. لذا توسعه نیروگاه هایی با تولید پایدار برق، مانند نیروگاه های هسته ای، در کنار نیروگاه های تجدیدپذیر نقش مهمی در پایداری شبکه برق کشور خواهد داشت.

در این گزارش، از میان تمامی مؤلفه های مؤثر در طراحی سبد بهینه، صرفاً جنبه اقتصادی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از متداول ترین معیارها برای سنجش این مؤلفه، شاخص هزینه تراز شده تولید برق (LCOE) است. این شاخص، هزینه متوسط تولید هر واحد کیلووات ساعت برق را در طول عمر مفید هر نیروگاه نشان می دهد.

نقطه نظرات / یافته های کلیدی

بر اساس گزارش های مراجع بین المللی، هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه های تجدیدپذیر در مقایسه با نیروگاه هایی نظیر زغال سنگ سوز و گازی کمتر است. این اختلاف هزینه عمدتاً حاصل دو عامل کلیدی کاهش هزینه های سرمایه گذاری اولیه در فناوری های تجدیدپذیر طی دهه اخیر و استقلال نیروگاه های تجدیدپذیر از نوسانات قیمت حامل های انرژی است.

محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق به داده های کلیدی مانند هزینه سرمایه گذاری اولیه، عمر نیروگاه، قیمت سوخت، نرخ تنزیل و هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر وابسته است. در این مطالعه، داده های مرتبط با هزینه سرمایه، هزینه های عملیاتی، قیمت سوخت، ضریب بهره برداری و راندمان نیروگاه ها از منابع معتبر داخلی و بین المللی گردآوری و با وزن دهی مناسب، استانداردسازی شده است.

بر اساس یافته های گزارش حاضر، متوسط هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه های خورشیدی ۲/۴ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده می شود که بیش از ۷۸ درصد از این هزینه به سرمایه گذاری اولیه اختصاص دارد. متوسط هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه های بادی نیز ۴/۲ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده می شود که بیش از ۷۳ درصد از این هزینه به سرمایه گذاری اولیه اختصاص دارد.

متوسط هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه های سیکل ترکیبی تحت سه سناریوی قیمتی مختلف سوخت بررسی شده است. در قیمت فعلی سوخت تحویلی به نیروگاه ها هزینه تراز شده تولید برق ۱/۷ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده می شود که هزینه سرمایه گذاری اولیه با سهم ۵۴ درصدی، بیشترین سهم را در میان هزینه ها دارد. با اعمال قیمت سوخت معادل حداکثر تعرفه داخلی گاز، هزینه تراز شده تولید برق ۳/۵ سنت دلار بر کیلووات ساعت برآورده می شود. با فرض قیمت سوخت معادل نرخ صادراتی نیز هزینه تراز شده تولید برق معادل ۸/۱ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده می شود و حدود ۸۰ درصد از هزینه کل تولید به سوخت مرتبط است.

هزینه تمام شده تولید برق در نیروگاه های گازی نیز تحت سه سناریوی متفاوت قیمت گذاری سوخت تحلیل شده است. با قیمت کنونی سوخت تحویلی به نیروگاه های گازی، هزینه تولید برق معادل ۲/۲ سنت دلار بر کیلووات ساعت برآورد شده است که در آن سهم سرمایه گذاری اولیه با ۵۲ درصد از کل هزینه ها را به خود اختصاص می دهد. با فرض حداکثر تعرفه داخلی گاز به عنوان نرخ سوخت، هزینه تولید برق به ۴/۸ سنت دلار بر کیلووات ساعت افزایش می یابد. با فرض قیمت سوخت معادل نرخ صادراتی، هزینه تولید برق نیروگاه های گازی ۱۱/۴ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده شده است. در این حالت، ۸۲ درصد از کل هزینه های تولید برق به سوخت مرتبط است.

هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه های هسته ای معادل ۷/۱ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده می شود که هزینه سرمایه گذاری اولیه تقریباً ۷۶ درصد از کل هزینه ها را شامل می شود. هزینه تراز شده تولید هر کیلووات ساعت برق در نیروگاه های



زغال سنگ سوز نیز ۷/۲ سنت دلار بر کیلووات ساعت تخمین زده می‌شود و بیش از ۵۲ درصد از این هزینه به سرمایه‌گذاری اولیه اختصاص می‌یابد.

بر اساس نتایج به دست آمده، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و گازی با قیمت فعلی سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها (یارانه‌ای) و همچنین نیروگاه‌های خورشیدی، کمترین هزینه تمام شده تولید برق را دارند. در رده‌های بعدی، نیروگاه‌های بادی، سیکل ترکیبی و گازی با حداکثر تعرفه داخلی گاز قرار دارند. هزینه تولید برق در نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال سنگ سوز هم در سطح متوسطی قرار دارد. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و گازی با قیمت صادراتی سوخت، بیشترین هزینه تراز شده تولید برق را دارند.

جدول ۱. خلاصه هزینه تراز شده تولید برق از نیروگاه‌های مختلف

هزینه تراز شده تولید برق (سنت بر کیلووات ساعت)			نیروگاه
بدبینانه	واقع بینانه	خوش بینانه	
۴/۳۰	۲/۳۸	۱/۳۶	خورشیدی
۶/۵۲	۴/۱۷	۲/۹۶	بادی
۱۱/۸۵	۷/۰۵	۴/۱۳	هسته‌ای
۱۱/۹۸	۷/۱۹	۴/۳۹	زغال سنگ سوز
۸/۹۲	۸/۱۱	۷/۵۷	سیکل ترکیبی (سوخت با قیمت صادراتی)
۱۲/۴۳	۱۱/۴۰	۱۰/۷۲	گازی (سوخت با قیمت صادراتی)

پیشنهاد راهکار تقنینی، نظارتی یا سیاستی

تخصیص سوخت یارانه‌ای به نیروگاه‌های حرارتی، قیمت تولید برق در این نیروگاه‌ها را به صورت کاذب کاهش داده است. به طوری که در شرایط فعلی، امکان رقابت سایر نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های حرارتی وجود ندارد. این مسئله باعث وابستگی شدید تولید برق کشور به گاز طبیعی و بروز چالش در امنیت تأمین برق کشور شده است. در صورت اجرای ماده (۱۰) قانون مانع‌زدایی از توسعه صنعت برق، قیمت‌گذاری انرژی به تدریج در طول زنجیره تولید، انتقال و توزیع برق حذف، و تمام یارانه‌ها به انتهای زنجیره و قبل از عرضه به مصرف‌کننده منتقل می‌شود. با این رویکرد، تولید برق از منابع مختلف انرژی در کشور به حالت رقابتی خواهد رسید. گفتنی است که برنامه اجرایی این ماده در تاریخ ۱۴۰۳/۰۲/۰۹ توسط هیئت وزیران تصویب شده، اما هنوز به مرحله اجرا نرسیده است.

با توجه به مزایای اقتصادی صرفه‌جویی در مصرف گاز و فراورده‌های نفتی و همچنین برای اقتصادی شدن فعالیت سایر نیروگاه‌ها، پیشنهاد می‌شود از سازوکار بازار بهینه‌سازی مصرف انرژی موضوع ماده (۴۶) قانون برنامه هفتم پیشرفت برای ارائه گواهی صرفه‌جویی سوخت به نیروگاه‌های غیر حرارتی استفاده شود.

۱. مقدمه

یکی از چالش های فعلی بخش برق کشور وابستگی شدید تولید برق به گاز طبیعی است که امنیت تأمین انرژی کشور را با مخاطره روبه رو کرده است. برای رفع این چالش، متنوع سازی سبد تولید برق از طریق توسعه انواع مختلف نیروگاه ها (از جمله نیروگاه های تجدید پذیر، هسته ای، زغال سنگ سوز و...) ضروری است. انتخاب سبد بهینه منابع مختلف تولید برق وابسته به عوامل مختلفی همچون دسترسی به منابع اولیه، محدودیت های فنی، مسائل زیست محیطی و غیره است. در کنار این عوامل، ارزیابی اقتصادی منابع مختلف تولید برق مهم ترین جایگاه را دارد. متداول ترین شاخص برای مقایسه هزینه های تولید برق در انواع نیروگاه ها، شاخص هزینه تراز شده تولید برق (LCOE) است. هزینه تراز شده تولید برق به عنوان ابزار تحلیلی مؤثر، این امکان را فراهم می کند که هزینه های تولید برق در طول عمر مفید نیروگاه های مختلف مقایسه و به عنوان یکی از معیارهای کلیدی در تصمیم گیری های سیاستگذاران و سرمایه گذاران در پروژه های نیروگاهی محسوب می شود. از جمله کاربردهای مهم هزینه تراز شده تولید برق می توان به این موارد اشاره کرد:

■ **مقایسه فناوری های گوناگون تولید برق:** این ابزار به کاربران این امکان را می دهد که هزینه های تولید برق از انواع نیروگاه ها را با یکدیگر مقایسه کنند و با در نظر گرفتن شرایط محلی و هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی، بهترین فناوری را انتخاب کنند.

■ **بررسی اقتصادی فناوری های گوناگون تولید برق:** با محاسبه هزینه تراز شده تولید برق می توان ارزیابی کرد که آیا یک پروژه توانایی تولید برق با هزینه ای رقابتی را دارد یا خیر.

■ **تعیین نرخ تعرفه برق:** هزینه تراز شده تولید برق می تواند به عنوان معیاری برای تعیین نرخ تعرفه برق تولید شده از منابع گوناگون به کار رود.

شاخص هزینه تراز شده تولید برق به عنوان معیاری ساده، شفاف و قابل مقایسه شناخته می شود که فهم آن نیز آسان است، اما در عین حال محدودیت هایی دارد. تحلیل هزینه تراز شده تولید برق به دلیل ماهیت خود نمی تواند تمام جوانب را در نظر بگیرد. به عبارت دیگر، با توجه به اینکه عمر نیروگاه ها چندین دهه است، تخمین دقیق تغییرات در هزینه های آتی، مانند هزینه سوخت، چالش برانگیز است. از دیگر محدودیت های این شاخص می توان به این موارد اشاره کرد [۱]:

■ **سادگی:** هزینه ها را به طرز بیش از حد ساده نمایش می دهد؛ بنابراین قادر به نمایندن تمام پیچیدگی های اقتصادی یک پروژه نیست. به همین دلیل، برای ارزیابی دقیق سودآوری یک نیروگاه مناسب نیست و برای این منظور لازم است محاسبات مالی انجام شود که تمام درآمدها و هزینه ها را با استفاده از مدل جریان نقدی در نظر بگیرد.

■ **بی توجهی به هزینه های غیر مستقیم:** برق، مانند هر کالای اقتصادی دیگر، در فرایند تولید خود هزینه های مستقیم و غیرمستقیم را به همراه دارد. از جمله هزینه های مستقیم سرمایه گذاری اولیه، تعمیرات، نگهداری، بهره برداری و هزینه سوخت است. از سوی دیگر، هزینه های غیرمستقیم تولید برق شامل آسیب های زیست محیطی، عوارض بهداشتی، هزینه های مرتبط و موارد مشابه است که



در محاسبات هزینه تراز شده تولید برق لحاظ نمی‌شود.

■ **عدم قطعیت ذاتی:** همانند هر پیش‌بینی دیگری، بر آورد هزینه تراز شده تولید برق با عدم قطعیت ذاتی همراه است. این عدم قطعیت‌ها شامل احتمال کاهش هزینه‌ها در فناوری‌های جدید، نبود اطمینان در خصوص هزینه‌های آینده شبکه و همچنین قیمت سوخت‌های فسیلی است. برای نمونه، خطرهای مرتبط با عرضه سوخت و نوسانات قیمت نفت و گاز در هزینه تراز شده تولید برق لحاظ نمی‌شود. همچنین، این مدل قادر نیست تغییرات زمانی مانند تغییرات در هزینه‌های عملیاتی را به‌طور دقیق منعکس کند.

■ **بی‌توجهی به مزیت‌های انعطاف‌پذیری:** یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، نوسانات سرعت باد و تغییرات شدت تابش خورشید است که به‌عنوان پدیده‌های تصادفی شناخته شده، باعث نوسان در توان تولیدی خروجی این نیروگاه‌ها می‌شوند. بنابراین، در نظر گرفتن نیروگاه‌های برق حرارتی یا سیستم‌های ذخیره‌سازی به‌عنوان پشتیبان امری ضروری به‌شمار می‌آید. این موضوع به‌معنای تحمیل هزینه‌های اضافی است که در هزینه تراز شده تولید برق خورشیدی یا بادی در نظر گرفته نمی‌شود.

با وجود تمام محدودیت‌های ذکر شده، هزینه تراز شده تولید برق به‌عنوان یک روش مقایسه‌ای، کارآمد و ارزشمند شناخته می‌شود. به‌دلیل سادگی و شفافیت نسبی آن، این روش امکان مقایسه و تحلیل فناوری‌های مختلف تولید برق از نظر هزینه تراز شده برق را فراهم می‌آورد. در گزارش حاضر، پس از بررسی مطالعات بین‌المللی در زمینه هزینه تراز شده تولید برق منابع مختلف و ذکر روش انجام محاسبات، داده‌ها و فرضیات و داده‌های مورد نیاز برای محاسبه هزینه تراز شده تولید برق تشریح، و در نهایت، نتایج حاصل از محاسبه هزینه تراز شده تولید برق برای نیروگاه‌های مختلف ارائه می‌شود.

۲. مطالعه محاسبه هزینه تراز شده تولید برق در مراجع معتبر

تاکنون مطالعات مختلفی درباره محاسبه هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه‌های مختلف انجام شده است. برخی نهادهای بین‌المللی، مانند آژانس بین‌المللی انرژی، هزینه‌های تولید برق را محاسبه و منتشر کرده‌اند. با توجه به فرمول محاسبه هزینه تراز شده تولید برق، برخی داده‌های لازم برای محاسبه این شاخص شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، عمر نیروگاه، قیمت سوخت، نرخ تنزیل، میزان انرژی الکتریکی تولیدی و هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر است. چالش اصلی این است که معمولاً این داده‌ها در مکان‌ها و فناوری‌های گوناگون و حتی برای فناوری‌های مشابه در نقاط مختلف، تفاوت دارند. علاوه بر این، گاهی برخی از این داده‌ها تحت تأثیر عوامل دیگری قرار دارند. برای نمونه، دو نیروگاه خورشیدی کاملاً مشابه، که در دو کشور مختلف یا حتی در دو نقطه متفاوت از یک کشور قرار دارند، به‌دلیل تفاوت در میزان و شدت تابش، دارای ضریب بهره‌برداری متفاوتی خواهند بود. این تفاوت در ضریب بهره‌برداری منجر به اختلاف در هزینه تراز شده تولید برق این دو نیروگاه می‌شود. به همین دلیل، می‌توان پیش‌بینی کرد که نتایج محاسبات این شاخص در مناطق مختلف جهان متفاوت خواهد بود.

در سال ۲۰۲۰، آژانس بین‌المللی انرژی گزارشی منتشر کرد که در آن هزینه‌های تراز شده برق برای فناوری‌های مختلف را در سطح جهانی مقایسه کرده است [۲]. همچنین، شرکت خدمات مالی و بانکداری لازارد، که در حوزه خدمات سرمایه‌گذاری فعالیت می‌کند، از سال ۲۰۰۹ به‌طور پیوسته و هر ساله هزینه‌های تراز شده تولید برق در انواع نیروگاه‌ها را ارائه می‌دهد [۳]. سازمان پژوهشی فراونهوفر آلمان نیز به‌صورت سالیانه گزارش‌هایی را برای محاسبه هزینه برق تراز شده در انواع نیروگاه‌ها در آلمان تهیه می‌کند [۴]. جدول ۱ نتایج کلی محاسبه هزینه تراز شده برق را، که توسط شرکت‌ها و سازمان‌های مذکور محاسبه شده است، نشان می‌دهد.

بررسی تطبیقی گزارش‌های مذکور در محاسبات هزینه تراز شده تولید برق نشان‌دهنده تفاوت‌هایی در فروض کلیدی مورد استفاده است. شرکت خدمات مالی و بانکداری لازارد با تمرکز بر تحلیل‌های مالی و شرایط بازار ایالات متحده، هزینه‌ها را در چارچوب واقعیت‌های اقتصادی این منطقه ارزیابی می‌کند. در مقابل، سازمان پژوهشی فراونهوفر آلمان با اتکا به داده‌های فنی و شرایط بومی آلمان، محاسبات خود را بر پایه الزامات فنی و اقلیمی این کشور پیش می‌برد. از سوی دیگر، آژانس بین‌المللی انرژی با گردآوری داده‌های نیروگاه‌های سراسر جهان و در نظر گرفتن سناریوهای متنوع، چشم‌اندازی جهانی از هزینه تراز شده تولید برق ترسیم می‌کند.

شرکت لازارد در محاسبات خود هزینه‌های خارجی مانند مالیات کربن یا آثار زیست‌محیطی را نادیده می‌گیرد و صرفاً هزینه‌های مستقیم تولید برق در بازار آزاد آمریکا را مقایسه می‌کند؛ حال آنکه آژانس بین‌المللی انرژی این عوامل را در محاسبات خود وارد می‌کند. درباره نرخ

تجزیل نیز آژانس بین المللی انرژی سه سناریوی محاسبات را انجام می دهد، ولی فراونهوفر نرخ تنزیل را معادل هزینه متوسط وزنی سرمایه در نظر می گیرد که ترکیبی از هزینه استقراض (بهره بانکی) و بازده مورد انتظار سهام داران است. این نرخ برای نیروگاه های مختلف در یک کشور نیز ممکن است متفاوت باشد. درباره سایر پارامترهای کلیدی نظیر عمر نیروگاه ها، هزینه نگهداری و بهره برداری نیز اختلافات مشهود است. این ناهمگونی در فروض، به طور طبیعی به تفاوت در نتایج نهایی گزارش ها انجامیده که در جدول ۱ نشان داده شده است. اما به طور کلی یافته ها حاکی از آن است که هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه های تجدیدپذیر (همچون خورشیدی و بادی) و نیروگاه های سیکل ترکیبی، در مقایسه با فناوری های متعارف (نظیر زغال سنگ و گازی)، از مزیت اقتصادی چشمگیری برخوردار است.

جدول ۲. شاخص هزینه تراز شده تولید برق برای انواع نیروگاه ها در مراجع معتبر جهانی [۵-۲]

شاخص هزینه تراز شده تولید برق				فناوری
آژانس بین المللی انرژی های تجدیدپذیر (سنت دلار بر کیلووات ساعت)	سازمان پژوهشی فراونهوفر آلمان (سنت یورو بر کیلووات ساعت)	شرکت خدمات مالی و بانکداری لازارد (سنت دلار بر کیلووات ساعت)	آژانس بین المللی انرژی (سنت دلار بر کیلووات ساعت)	
۲۰۲۲	۲۰۲۴	۲۰۲۴	۲۰۲۰	سال محاسبه
۴/۴	۴/۱۰-۶/۹۰	۶/۱	۳/۴۰-۲۷/۴۰	خورشیدی
۳/۳	۴/۳۰-۸/۹۰	۵	۳/۰۷-۲۴/۱۲	بادی (خشکی)
-	۱۳/۶۰-۴۹	۱۸/۲	۴/۲۰-۱۰/۱۸	هسته ای
-	۱۷/۳۰-۲۹/۳۰	۱۱/۸	۷/۵۶-۱۴/۶۴	زغال سنگ سوز
-	۱۰/۹۰-۱۸/۱۰	۷/۶	۴/۰۳-۱۱/۲۲	سیکل ترکیبی
-	۱۵/۴۰-۳۲/۶۰	۱۶/۹	۸/۶۲-۱۳/۷۰	گازی

برخلاف گزارش هایی مانند گزارش شرکت لازارد که با انتشار سالیانه هزینه تراز شده تولید برق و تمرکز بر داده های به روز، روند تغییرات هزینه ها و تأثیر مستقیم آن را بر هزینه نهایی تولید برق نیروگاه ها آشکار می کند، گزارش آژانس بین المللی انرژی به دلیل ماهیت داده های خود، که از نیروگاه های واقع در کشورهای مختلف و همچنین سال های ساخت مختلف گردآوری شده است، بازه های بزرگی از هزینه تراز شده تولید برق را ارائه می کند. این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت در پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر محاسبات است. برای مثال، با توجه به شیب تند کاهش هزینه سرمایه اولیه در نیروگاه های تجدیدپذیر طی دهه اخیر، داده های آژانس بین المللی انرژی، که شامل نیروگاه های ساخته شده در بازه های زمانی مختلف (از پروژه های قدیمی تا جدید) است، نمی تواند کاهش هزینه های اخیر را به خوبی منعکس کند. بنابراین، مقادیر هزینه تراز شده تولید برق برای انواع نیروگاه ها، که توسط آژانس بین المللی انرژی محاسبه شده است، در بازه های بزرگی قرار دارد.

شکل ۱ روند تغییرات میانگین رشد سالیانه هزینه تراز شده تولید برق در انواع نیروگاه ها را طی بازه زمانی سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۴ براساس گزارش های شرکت لازارد نمایش می دهد [۳]. براساس این داده ها، هزینه تولید برق در نیروگاه های خورشیدی با کاهش چشمگیر سالیانه ۱۱ درصدی از ۳۵/۹ سنت بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۰۹ به ۶/۱ سنت بر کیلووات ساعت در سال ۲۰۲۴ رسیده است. در مقابل، نیروگاه های بادی خشکی نیز روندی مشابه با کاهش ۶۳ درصدی (حدود ۶ درصد سالیانه) را تجربه کرده اند و هزینه تولید برق آنها از ۱۳/۵ به ۵ سنت بر



کیلووات ساعت کاهش یافته است. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با تغییرات محدودتری روبه‌رو بوده‌اند؛ به‌طوری‌که هزینه تولید برق آنها از ۸/۳ به ۷/۶ سنت بر کیلووات ساعت رسیده که نشان‌دهنده کاهش ناچیز سالیانه ۰/۵ درصدی است. در حالی که فناوری‌های تجدیدپذیر روند کاهشی داشته‌اند، نیروگاه‌های زغال سنگ سوز و هسته‌ای با افزایش هزینه مواجه شده‌اند. هزینه تولید برق نیروگاه‌های زغال سنگ سوز از ۱۱/۱ به ۱۱/۸ سنت بر کیلووات ساعت (رشد سالیانه ۰/۴ درصدی) و هزینه نیروگاه‌های هسته‌ای از ۱۲/۳ به ۱۸/۲ سنت بر کیلووات ساعت (رشد سالیانه ۲/۶ درصدی) افزایش یافته است.

شکل ۱. نمودار مقایسه میانگین تغییرات سالیانه هزینه تراز شده تولید برق در انواع نیروگاه‌ها از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ [۳]



باتوجه به نتایج جدول ۱ و شکل ۱، هزینه تراز شده تولید برق در نیروگاه‌های تجدیدپذیر (مانند خورشیدی و بادی)، در مقایسه با سایر فناوری‌های تولید برق (نظیر نیروگاه‌های زغال سنگ سوز یا گازی) پایین‌تر است. این تفاوت عمدتاً ناشی از عواملی نظیر کاهش چشمگیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه در فناوری‌های تجدیدپذیر طی دهه اخیر و عدم وابستگی هزینه‌های عملیاتی نیروگاه‌های تجدیدپذیر به نوسانات قیمت حامل‌های انرژی است.

۳. روش محاسبه هزینه تراز شده تولید برق

شاخص هزینه تراز شده تولید برق نسبت ارزش فعلی خالص^۱ کل هزینه ها در طول عمر یک نیروگاه به خالص برق تولید شده در همان مدت زمان است. برای محاسبه هزینه تراز شده تولید برق، معمولاً از این رابطه استفاده می شود که در این روش، هزینه ها با نرخ تنزیل^۲ به سال پایه منتقل می شوند [۴].

$$LCOE = \frac{(I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t + Fuel_t}{(1+i)^t})}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

I_0

A_t

$Fuel_t$

E_t

i

n

t

هزینه های سرمایه گذاری اولیه^۳

هزینه های سالیانه یا هزینه های تعمیر و نگهداری^۴

هزینه سوخت

مقدار انرژی الکتریکی تولیدی در یک سال (کیلووات ساعت)

نرخ تنزیل

کل چرخه عمر (طول عمر نیروگاه)

سال عمر

باتوجه به رابطه ذکر شده، محاسبه هزینه تراز شده تولید برق نیازمند این داده ها است:

■ **هزینه های سرمایه گذاری اولیه:** به هزینه های ابتدایی که در فرایند ساخت و راه اندازی نیروگاه تا زمان شروع بهره برداری آن صرف شده است اشاره دارد (\$/kW).

■ **هزینه های سالیانه یا هزینه های تعمیر و نگهداری:** به دو بخش قسمت می شود:

– **هزینه های ثابت مربوط به عملیات تعمیر و نگهداری:**^۵ هزینه های تعمیر و نگهداری که تحت تأثیر تغییرات تولید برق نیروگاه قرار نمی گیرند (\$/kW-year).

– **هزینه های متغیر مربوط به عملیات تعمیر و نگهداری:**^۶ هزینه های نیروگاه که به میزان تولید برق آن وابسته است (مانند هزینه آب مصرفی) (\$/kW).

■ **هزینه سوخت:** این بخش به میزان تولید برق وابسته است (\$/kWh).

■ **نرخ تنزیل:** نرخ تنزیل (درصد) به نرخ بهره ای اشاره دارد که برای تنزیل جریان های نقدی آینده استفاده می شود. نرخ های تنزیل پایین به نفع فناوری های سرمایه بر با هزینه های عملیاتی پایین است؛ در حالی که نرخ های تنزیل بالا به نفع فناوری هایی با هزینه سرمایه کم اما هزینه های عملیاتی بالاست.

■ **طول عمر اقتصادی پروژه:** مدت زمان سال هایی که محاسبات مالی در آن صورت می گیرد. طول عمر اقتصادی پروژه معمولاً معادل با عمر تخمینی تجهیزات است.

باتوجه به مطالب مطرح شده، عوامل اصلی تأثیر گذار بر هزینه تراز شده تولید برق شامل هزینه ها (سرمایه ای و سالیانه)، نرخ تنزیل و مقدار برق تولیدی (در کل طول عمر نیروگاه) است.

1. Net Present Value (NPV)

۲. در پروژه ها معمولاً نرخ تنزیل را معادل نرخ بهره به اضافه چند درصد برای پوشش ریسک سرمایه گذاری در نظر می گیرند.

3. Capital Expenditure (CAPEX)

4. Operation and Maintenance (O&M)

5. Fixed Operation and Maintenance (FOM) Costs

6. Variable Operation and Maintenance (VOM) Costs



۴. داده‌ها و فرضیات مورد نیاز برای محاسبه هزینه تراز شده تولید برق

باتوجه به فرمول محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق، که در بخش قبل توضیح داده شد، برخی از داده‌های کلیدی مورد نیاز شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عمر نیروگاه، قیمت سوخت، نرخ تنزیل و هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر است. چالش اصلی این است که معمولاً این داده‌ها در مکان‌ها و فناوری‌های مختلف متفاوت‌اند. به همین دلیل، استفاده از داده‌های یک مکان برای تخمین هزینه تراز شده تولید برق در مکان دیگر دقت کافی نخواهد داشت. بنابراین، تصمیم بر آورد هزینه تراز شده تولید برق انجام شده برای یک کشور و استفاده از آن در مکان‌های دیگر می‌تواند تا حدودی گمراه‌کننده باشد.

در این شرایط، یکی از روش‌های رایج، تعیین مقادیر حداقلی (خوش‌بینانه)، حداکثری (بدبینانه) و همچنین مقادیر واقع‌بینانه برای متغیرهای مورد نیاز در بر آورد هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه‌های مختلف است. از این رو، ورودی‌های مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر، هزینه سوخت، ضریب بهره‌برداری^۱ و راندمان برای محاسبه هزینه تراز شده تولید برق هر یک از نیروگاه‌ها از منابع معتبر داخلی و بین‌المللی جمع‌آوری و پس از وزن‌دهی به هر یک، مقادیر تعیین شده در جدول ۲ برای نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، در جدول ۳ برای نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال‌سنگ‌سوز و در جدول ۴ برای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و گازی ارائه شده است [۲-۶]. همچنین مدت‌زمان ساخت و عمر نیروگاه‌ها مبتنی بر داده‌های آژانس بین‌المللی انرژی است [۵].

در خصوص نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی، هزینه سوخت با بهره‌گیری از اطلاعات قیمتی گاز طبیعی در کشور و در سه سناریوی متفاوت محاسبه شده است. این سناریوها شامل قیمت سوخت فعلی که به نیروگاه‌ها تحویل داده می‌شود، قیمت سوخت با حداکثر تعرفه داخلی گاز^۲ و همچنین قیمت سوخت صادراتی‌اند.

جدول ۳. مفروضات کلیدی برای محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه‌های خورشیدی و بادی

خورشیدی			بادی			واحد	مفروضات کلیدی
خوش‌بینانه	واقع‌بینانه	بدبینانه	خوش‌بینانه	واقع‌بینانه	بدبینانه		
۳۶۰	۴۴۰	۵۲۰	۱۱۰۰	۱۲۲۵	۱۳۵۰	\$/kW	سرمایه‌گذاری اولیه
۷/۷	۸/۶	۹/۵	۱۸/۵	۲۰/۵۵	۲۲/۷	\$/kW-yr.	هزینه‌های عملیاتی ثابت
-	-	-	۰/۲۵	۰/۳۷۵	۰/۵	Cent/kWh	هزینه‌های عملیاتی متغیر
-	-	-	-	-	-	Cent/kWh	هزینه سوخت
۲۵	۲۰	۱۵	۴۵	۳۷/۵	۳۰	%	ضریب بهره‌برداری ^۳
-	-	-	-	-	-	%	راندمان
۲۵			۲۵			سال	عمر نیروگاه
۱۲			۱۲			ماه	مدت‌زمان ساخت
۳	۵	۷	۳	۵	۷	%	نرخ تنزیل

مأخذ: محاسبات نگارنده بر اساس مراجع [۲-۶]

۱. از آنجاکه کیفیت منابع انرژی مانند تابش خورشیدی و باد بر ضریب بهره‌برداری و در نتیجه میزان تولید برق تأثیرگذار است و این کیفیت در نقاط مختلف جهان و حتی در داخل یک کشور متفاوت است، برای محاسبه ضریب بهره‌برداری نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، فقط از داده‌های مربوط به نیروگاه‌های جدیدالاحداث در داخل کشور استفاده شده است.

۲. حداکثر تعرفه داخلی گاز معادل تعرفه خوراک پتروشیمی گازی در نظر گرفته شده است.

۳. براساس ضریب بهره‌برداری نیروگاه‌های خورشیدی کشور که در سال ۱۴۰۱ احداث شده و در سال ۱۴۰۲ به بهره‌برداری رسیده‌اند.

جدول ۴. مفروضات کلیدی برای محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه های هسته ای وزغال سنگ سوز

زغال سنگ سوز			هسته ای			واحد	مفروضات کلیدی
بدبینانه	واقع بینانه	خوش بینانه	بدبینانه	واقع بینانه	خوش بینانه		
۴۰۰۰	۲۸۳۰	۱۶۶۰	۵۵۰۰	۵۰۰۰	۴۵۰۰	\$/kW	سرمایه گذاری اولیه
۵۸	۵۲/۵	۴۷	۶۵	۵۹	۵۳	\$/kW-yr.	هزینه های عملیاتی ثابت
۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۴۲	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۰	Cent/kWh	هزینه های عملیاتی متغیر
۲/۱	۱/۹	۱/۷	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۵۳	Cent/kWh	هزینه سوخت
۵۲	۵۸	۶۴	۶۸	۷۵/۵	۸۳	%	ضریب بهره برداری
۳۵	۳۸/۵	۴۲	-	-	-	%	راندمان
۴۰			۶۰			سال	عمر نیروگاه
۴۸			۸۴			ماه	مدت زمان ساخت
۷	۵	۳	۷	۵	۳	%	نرخ تنزیل

مأخذ: همان.

جدول ۵. مفروضات کلیدی برای محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی

سیکل ترکیبی			گازی			واحد	مفروضات کلیدی
بدبینانه	واقع بینانه	خوش بینانه	بدبینانه	واقع بینانه	خوش بینانه		
۱۰۲۰	۸۳۵	۶۵۰	۶۳۵	۵۱۲/۵	۳۹۰	\$/kW	سرمایه گذاری اولیه
۲۱	۱۹	۱۷	۲۰	۱۸	۱۶	\$/kW-yr.	هزینه های عملیاتی ثابت
۰/۴۹	۰/۴۴۵	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۳۷	Cent/kWh	هزینه های عملیاتی متغیر
۰/۰۵۳			۰/۰۷۷			Cent/kWh	هزینه سوخت (قیمت فعلی) ^۱
۱/۸			۲/۷				هزینه سوخت (حداکثر تعرفه داخلی گاز)
۶/۴			۹/۳				هزینه سوخت (صادراتی)
۶۶	۷۳/۵	۸۱	۳۲	۳۶	۴۰	%	ضریب بهره برداری
۴۶	۵۱	۵۶	۳۲	۳۵/۵	۳۹	%	راندمان
۳۰			۳۰			سال	عمر نیروگاه
۳۶			۲۴			ماه	مدت زمان ساخت
۷	۵	۳	۷	۵	۳	%	نرخ تنزیل

مأخذ: همان.

۱. هزینه سوخت مبتنی بر راندمان نیروگاه در حالت واقع بینانه در نظر گرفته شده است.

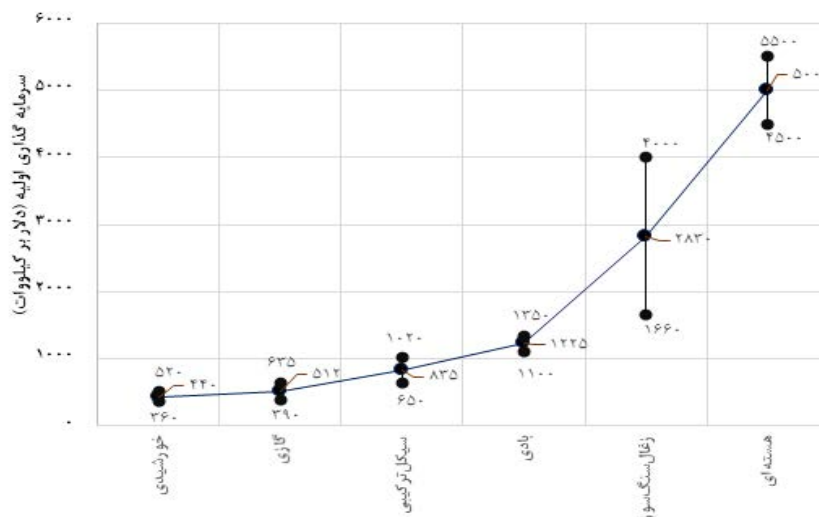
همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، شاخص هزینه تراز شده تولید برق در واقع از تجمیع هزینه‌های چهار مؤلفه (هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه سوخت، هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر) شکل گرفته است. برای به‌دست آوردن تصویر واضح‌تری از تأثیر هر یک از این مؤلفه‌ها بر هزینه تراز شده تولید برق، در ادامه به تحلیل و بررسی هر یک از چهار مؤلفه، براساس داده‌های موجود در جدول‌های ۲ تا ۴ پرداخته خواهد شد.

۴-۱. مؤلفه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه

سرمایه‌گذاری اولیه یکی از مؤلفه‌های مهم در شاخص هزینه تراز شده تولید برق محسوب می‌شود. در شکل ۲، نمودار سرمایه‌گذاری اولیه برای ساخت هر کیلووات از انواع نیروگاه‌های مختلف براساس هزینه‌های واقع بینانه (کم به زیاد) مرتب شده است. برای هر نیروگاه علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری واقعی، هزینه‌ای حداکثری (هزینه بدبینانه) و هزینه‌ای حداقلی (هزینه خوش بینانه) نیز تعیین شده است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، نیروگاه خورشیدی کمترین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را دارد.

در سال‌های اخیر، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌های خورشیدی و بادی به لطف پیشرفت در فناوری‌های ساخت آن، به سرعت در حال کاهش است. نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال سنگ سوز نسبت به سایر نیروگاه‌ها به سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری نیاز دارند. هرچند که این دو نیروگاه به دلیل ضریب بهره‌برداری و عمر مفید طولانی خود گزینه‌های جذابی برای تولید برق بار پایه محسوب می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تفاوت قابل توجهی بین هزینه‌های حداکثری و حداقلی نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال سنگ سوز وجود دارد که به عوامل مختلفی از جمله نوع تکنولوژی ساخت آنها مرتبط است.

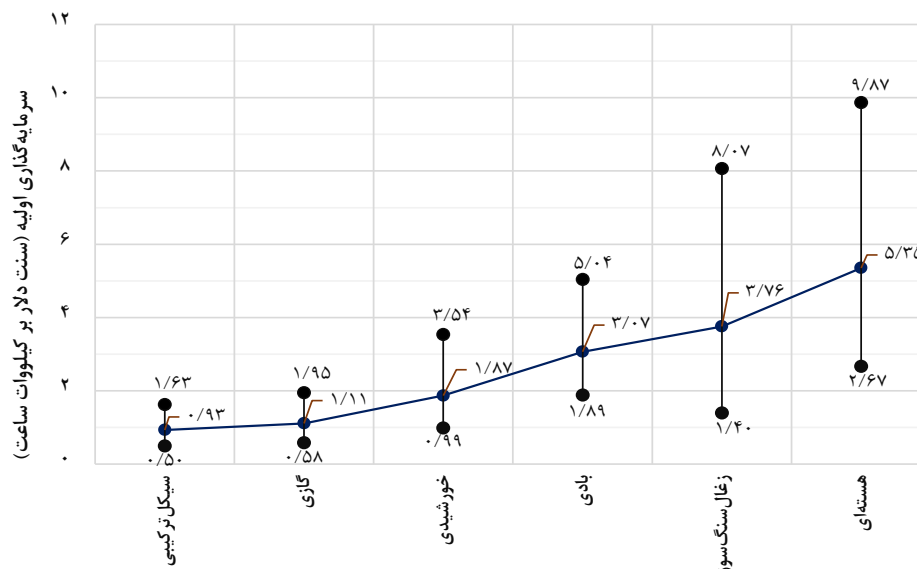
شکل ۲. نمودار هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در سه سناریوی واقع بینانه، خوش بینانه و بدبینانه برای ساخت هر کیلووات از انواع نیروگاه‌ها



مأخذ: محاسبات نگارنده.

در شکل ۳، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق برای انواع نیروگاه‌ها به منظور درک بهتر تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضریب بهره‌برداری، راندمان و عمر نیروگاه‌ها نمایش داده شده است. برای نمونه، در سناریوی واقع بینانه، نسبت هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ساخت هر کیلووات نیروگاه زغال سنگ سوز به نیروگاه گازی ۵/۵ برابر است. با این حال، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای هر کیلووات ساعت تولید برق در این دو نوع نیروگاه ۳/۴ برابر است.

شکل ۳. نمودار هزینه سرمایه گذاری اولیه به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق در سه سناریوی واقع بینانه، خوش بینانه و بدبینانه برای نیروگاه های مختلف



مأخذ: همان.

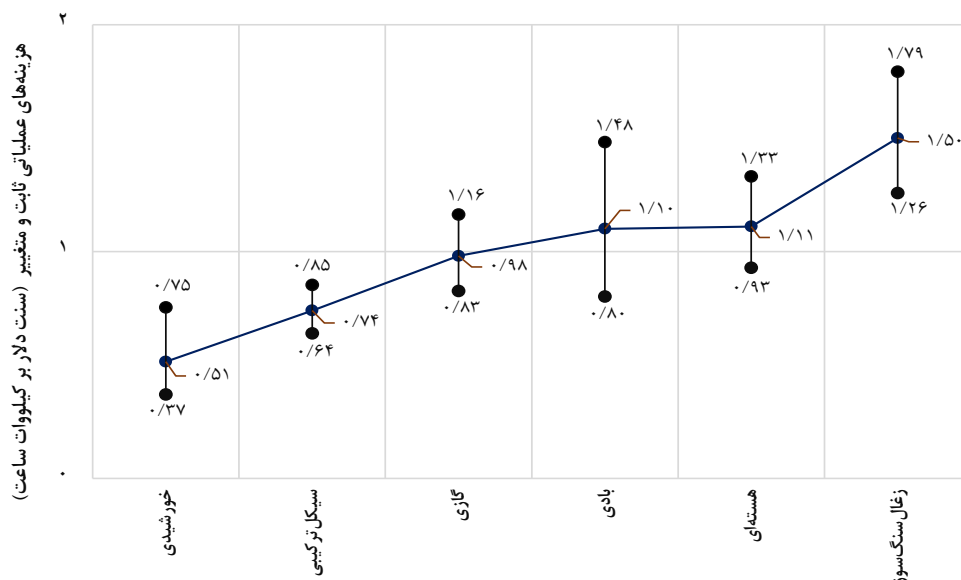
۲-۴. مؤلفه هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر

یکی دیگر از مؤلفه های اصلی شاخص هزینه تراز شده تولید برق، هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر است. در شکل ۴، نمودار هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر برای تولید هر کیلووات ساعت برق در انواع نیروگاه ها براساس هزینه های واقع بینانه که از کم به زیاد مرتب شده، نشان داده شده است.

نیروگاه های خورشیدی به دلیل نبود هزینه های عملیاتی متغیر و نیاز به هزینه های ثابت کم، کمترین هزینه های عملیاتی را دارند. در مقابل، نیروگاه های بادی به دلیل نیاز به سیستم های کنترل و نظارت پیچیده، به نیروی انسانی متخصص احتیاج دارند. همچنین، قرارگیری این نیروگاه ها در شرایط محیطی سخت، مانند وزش بادهای شدید، موجب کاهش عمر بسیاری از قطعات می شود و نیاز به تعمیرات و بازرسی های دوره ای را افزایش می دهد. به همین دلیل، هزینه های عملیاتی این نیروگاه ها نسبتاً بالاست. نیروگاه های هسته ای و زغال سنگ سوز به دلیل پیچیدگی و هزینه های زیاد تجهیزات و تأسیسات و همچنین نیاز به نیروی کار متخصص، هزینه های عملیاتی بالایی را متحمل می شوند.

علاوه بر نکات ذکر شده، در بسیاری از نیروگاه های زغال سنگ سوز، برای حذف ناخالصی های معدنی و گوگردی از زغال سنگ و بهبود راندمان نیروگاه و کاهش خوردگی تجهیزات، شست و شوی زغال سنگ ضروری است. این فرایند ممکن است هزینه های اضافی را به همراه داشته باشد؛ به طوری که این نوع نیروگاه ها بالاترین هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر را نسبت به سایر انواع نیروگاه ها دارند.

شکل ۴. نمودار هزینه عملیاتی ثابت و متغیر به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق در سه سناریوی واقع بینانه، خوش بینانه و بدبینانه برای نیروگاه‌های مختلف

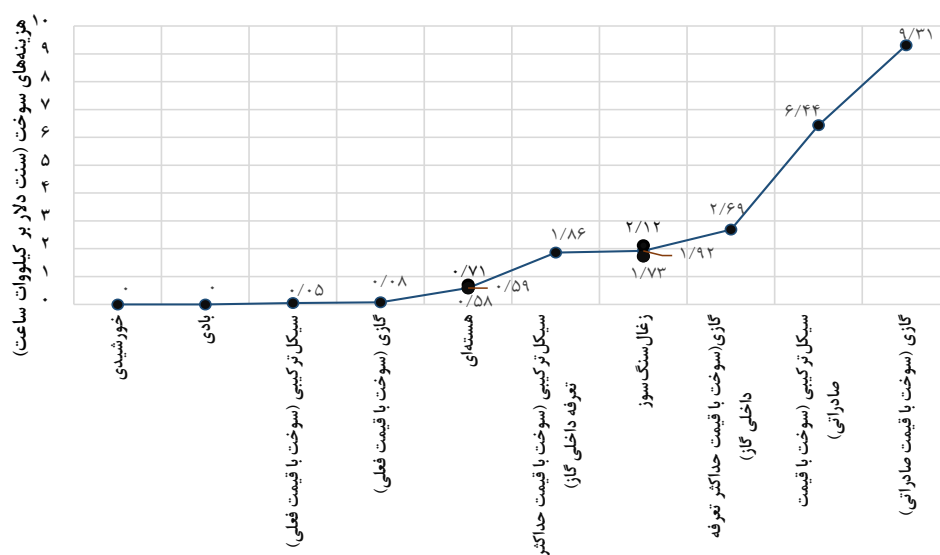


مأخذ: همان.

۳-۴. مؤلفه هزینه سوخت

آخرین مؤلفه از هزینه‌های مرتبط با شاخص هزینه تراز شده تولید برق، هزینه سوخت است که برای هر نیروگاه در شکل ۵ نمایش داده شده است. نیروگاه‌های خورشیدی و بادی هیچ هزینه‌ای برای تأمین سوخت ندارند. همچنین، نیروگاه‌های هسته‌ای نیز هزینه سوخت کمی دارند، به گونه‌ای که اگر قیمت کنونی سوختی که به نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی تحویل داده می‌شود در نظر گرفته نشود، نیروگاه‌های هسته‌ای کمترین هزینه سوخت را نسبت به سایر نیروگاه‌ها دارند. هزینه سوخت نیروگاه‌های زغال سنگ سوز تقریباً معادل هزینه سوخت نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی (با در نظر گرفتن هزینه سوخت برابر با حداکثر تعرفه داخلی گاز) است.

شکل ۵. نمودار هزینه سوخت به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق در سه سناریوی واقع بینانه، خوش بینانه و بدبینانه برای نیروگاه‌های مختلف



مأخذ: همان.

۵. نتایج محاسبه هزینه تراز شده برای تولید برق در انواع نیروگاه ها



باتوجه به روش ها و داده های ارائه شده در بخش های قبلی، هزینه تراز شده تولید برق برای هر کیلووات ساعت شامل چهار مؤلفه اصلی (هزینه سرمایه گذاری اولیه، هزینه سوخت و هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر) است. در جدول ۵، هزینه تراز شده تولید برق و همچنین سهم هر چهار مؤلفه آن در سه حالت خوش بینانه، واقع بینانه و بدبینانه ارائه شده است. به منظور درک بهتر، در شکل ۶ درصد سهم هر یک از این هزینه ها در هزینه تولید برق مربوط به هر نیروگاه نشان داده شده است.

جدول ۶. محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق برای انواع نیروگاه ها و سهم مؤلفه های اصلی

نوع نیروگاه	هزینه تراز شده تولید برق	سهم سرمایه گذاری اولیه از هزینه تراز شده برق	سهم هزینه های عملیاتی ثابت از هزینه تراز شده برق	سهم هزینه های عملیاتی متغیر از هزینه تراز شده برق	سهم سوخت از هزینه تراز شده برق
	Cent/kWh	درصد	درصد	درصد	درصد
خورشیدی	خوش بینانه	۱/۳۶	۷۲/۸۶	۲۷/۱۴	۰
	واقع بینانه	۲/۳۸	۷۸/۴۰	۲۱/۶۰	۰
	بدبینانه	۴/۳۰	۸۲/۴۵	۱۷/۵۵	۰
بادی	خوش بینانه	۲/۶۹	۷۰/۱۵	۲۰/۵۴	۹/۳۰
	واقع بینانه	۴/۱۷	۷۳/۵۷	۱۷/۴۴	۹
	بدبینانه	۶/۵۲	۷۷/۲۶	۱۵/۰۷	۷/۶۷
هسته ای	خوش بینانه	۴/۱۳	۶۴/۶۷	۱۷/۶۵	۴/۸۴
	واقع بینانه	۷/۰۵	۷۵/۸۷	۱۲/۵۶	۳/۱۲
	بدبینانه	۱۱/۸۵	۸۳/۲۸	۹/۲۱	۲/۰۳
زغال سنگ سوز	خوش بینانه	۴/۳۹	۳۱/۸۹	۱۹/۱۰	۹/۵۷
	واقع بینانه	۷/۱۹	۵۲/۳۰	۱۴/۳۸	۶/۵۴
	بدبینانه	۱۱/۹۸	۶۷/۳۶	۱۰/۶۳	۴/۳۴
گازی (سوخت با قیمت فعلی)	خوش بینانه	۱/۴۹	۳۹/۳۰	۳۰/۶۸	۲۴/۸۶
	واقع بینانه	۲/۱۷	۵۱/۲۱	۲۶/۳۳	۱۸/۹۱
	بدبینانه	۳/۱۹	۶۱/۱۶	۲۲/۳۴	۱۴/۰۹
گازی (سوخت با حداکثر تعرفه داخلی گاز)	خوش بینانه	۴/۱۰	۱۴/۲۵	۱۱/۱۳	۹/۰۲
	واقع بینانه	۴/۷۸	۲۳/۲۱	۱۱/۹۳	۸/۵۷
	بدبینانه	۵/۸۱	۳۳/۶۲	۱۲/۲۸	۷/۷۵

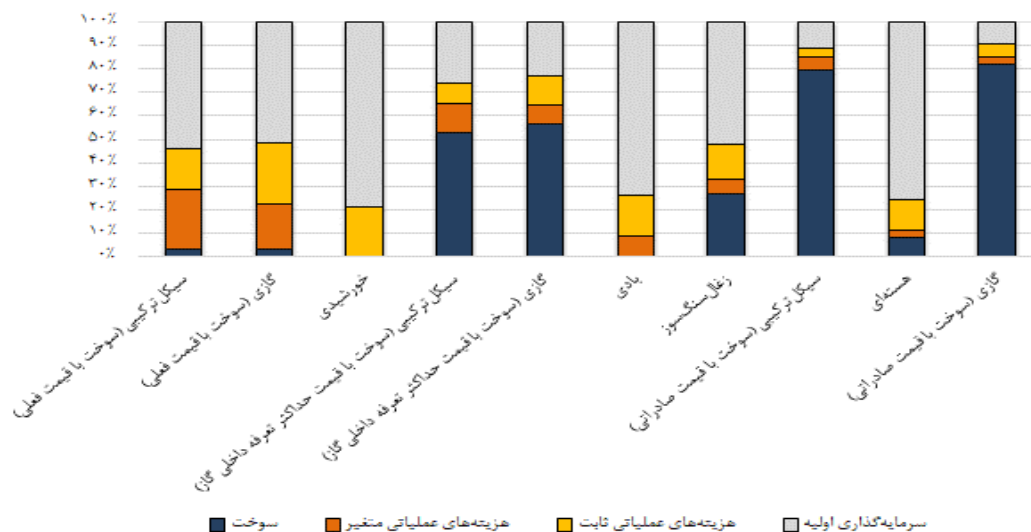


نوع نیروگاه	هزینه‌تراز شده تولید برق	سهم سرمایه‌گذاری اولیه از هزینه تراز شده برق	سهم هزینه‌های عملیاتی ثابت از هزینه تراز شده برق	سهم هزینه‌های عملیاتی متغیر از هزینه تراز شده برق	سهم سوخت از هزینه تراز شده برق
	Cent/kWh	درصد	درصد	درصد	درصد
گازی (سوخت با قیمت صادراتی)	خوش‌بینانه	۱۰/۷۲	۵/۴۶	۴/۲۶	۳/۴۵
	واقع‌بینانه	۱۱/۴۰	۹/۷۴	۵/۰۱	۳/۶
	بدبینانه	۱۲/۴۳	۱۵/۲۷	۵/۷۴	۳/۶۲
سیکل ترکیبی (سوخت با قیمت فعلی)	خوش‌بینانه	۱/۱۹	۴۱/۷۲	۲۰/۱۶	۳۳/۶۵
	واقع‌بینانه	۱/۷۲	۵۳/۹۷	۱۷/۱۲	۲۵/۸۲
	بدبینانه	۲/۵۳	۶۴/۲۳	۱۴/۳۳	۱۹/۳۴
سیکل ترکیبی (قیمت سوخت با حداکثر تعرفه داخلی گاز)	خوش‌بینانه	۳	۱۶/۵۴	۷/۹۹	۱۳/۳۵
	واقع‌بینانه	۳/۵۳	۲۶/۳۳	۸/۳۶	۱۲/۶
	بدبینانه	۴/۳۴	۳۷/۴۸	۸/۳۶	۱۱/۲۸
سیکل ترکیبی (سوخت با قیمت صادراتی)	خوش‌بینانه	۷/۵۷	۶/۵۵	۳/۱۶	۵/۲۸
	واقع‌بینانه	۸/۱۱	۱۱/۴۷	۳/۶۴	۵/۴۹
	بدبینانه	۸/۹۲	۱۸/۲۵	۴/۰۷	۵/۵

مأخذ: محاسبات نگارنده.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در نیروگاه‌های خورشیدی، بادی، زغال‌سنگ‌سوز و هسته‌ای برای تولید هر کیلووات‌ساعت برق سهم هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به سایر هزینه‌ها به‌طور قابل توجهی بیشتر است. اما در زمینه نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی، انتخاب نوع هزینه سوخت (قیمت فعلی سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، قیمت سوخت با حداکثر تعرفه داخلی گاز و قیمت سوخت صادراتی) تأثیر قابل توجهی بر سهم هریک از مؤلفه‌های هزینه در تولید برق دارد. برای نمونه در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، اگر قیمت کنونی سوختی که به نیروگاه‌ها تحویل داده می‌شود مدنظر قرار گیرد، سهم سرمایه‌گذاری اولیه از مجموع هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت برق به بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. اما اگر قیمت سوخت صادراتی در نظر گرفته شود، این سهم به کمتر از ۱۰ درصد کاهش پیدا می‌کند و در عوض، بیش از ۸۰ درصد هزینه تولید برق در این نیروگاه‌ها به هزینه سوخت اختصاص می‌یابد.

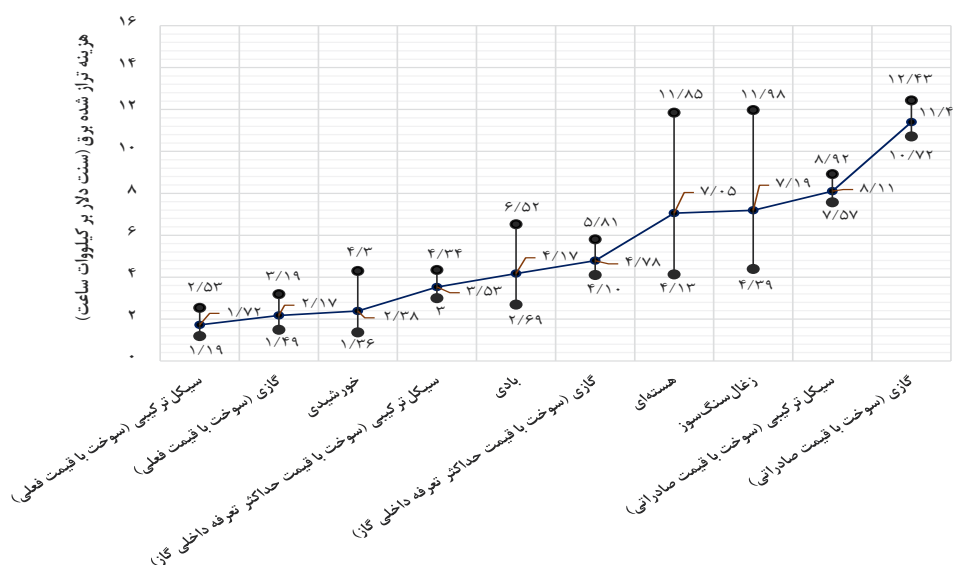
شکل ۶. نمودار سهم هزینه سرمایه گذاری اولیه، هزینه سوخت، هزینه های عملیاتی ثابت و متغیر از کل هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق برای انواع نیروگاه ها



مأخذ: همان.

در شکل ۷، نمودار هزینه تراز شده تولید هر کیلووات ساعت برق برای انواع نیروگاه ها براساس هزینه های واقع بینانه (از کم به زیاد) مرتب شده است. برای هر نیروگاه، علاوه بر هزینه واقع بینانه، هزینه تراز شده برق براساس دو سناریوی حداکثری (بدبینانه) و حداقلی (خوش بینانه) نیز ارائه شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، هزینه های تراز شده تولید برق برای هر کیلووات ساعت در نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی به دلیل تأثیر عمده هزینه های سوخت، بسته به قیمت تعیین شده برای سوخت، تفاوت های قابل توجهی را نشان می دهند؛ به نحوی که کمترین و بیشترین هزینه تراز شده تولید برق مرتبط با این نوع نیروگاه ها و تحت تأثیر قیمت سوخت است. در نیروگاه های هسته ای و زغال سنگ سوز، که هزینه سوخت پایین تری دارند، معمولاً نوسانات قیمت سوخت تأثیر چندانی بر عملکرد آنها ندارد. با این حال، این نیروگاه ها عمدتاً تحت تأثیر هزینه های سرمایه گذاری اولیه قرار دارند و نوع فناوری ساخت این نیروگاه ها تأثیر زیادی بر هزینه تراز شده تولید برق دارد. نیروگاه های خورشیدی و بادی هیچ هزینه سوختی ندارند و بیشتر تحت تأثیر هزینه سرمایه گذاری اولیه قرار دارند.

شکل ۷. نمودار هزینه تراز شده تولید برای هر کیلووات ساعت برق در سه سناریوی واقع بینانه، خوش بینانه و بدبینانه برای انواع نیروگاه ها



مأخذ: همان.



۶. جمع‌بندی و پیشنهادها

تأمین انرژی، به‌ویژه برق، از جمله مهم‌ترین پیش‌نیازهای رشد و توسعه اقتصادی به‌شمار می‌آید. با توجه به وابستگی شدید صنعت برق به گاز و همچنین ناترازی گاز، امنیت تأمین انرژی کشور با مخاطره روبه‌رو شده است. برای رفع این چالش، متنوع‌سازی سبد تولید برق از طریق توسعه انواع مختلف نیروگاه‌ها (از جمله نیروگاه‌های تجدیدپذیر، هسته‌ای، زغال‌سنگ‌سوز و...) ضروری است. در کنار سایر عوامل، ارزیابی اقتصادی منابع مختلف تولید برق نقش مهمی در انتخاب سبد بهینه نیروگاهی دارد.

هزینه تراز شده تولید برق شاخص کلیدی برای مقایسه اقتصادی انواع مختلف نیروگاه‌هاست. این شاخص هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت برق را در طول عمر مفید یک نیروگاه محاسبه می‌کند و به‌عنوان معیاری رایج برای مقایسه هزینه‌های انواع نیروگاه‌ها با یکدیگر استفاده می‌شود. در این گزارش هزینه تولید برق در انواع نیروگاه‌های از طریق محاسبه شاخص هزینه تراز شده تولید برق مطالعه شده است که نتایج اصلی آن شامل هزینه تراز شده تولید هر کیلووات‌ساعت برق از منابع مختلف است. اعداد حاصل در حالت واقع‌بینانه به این شرح‌اند:

■ نیروگاه خورشیدی ۲/۳۸ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت؛

■ نیروگاه بادی ۴/۱۷ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت؛

■ نیروگاه سیکل ترکیبی با قیمت سوخت فعلی تحویلی به نیروگاه‌ها ۱/۷۲ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت، با قیمت سوخت با حداکثر تعرفه داخلی گاز ۳/۵۳ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت و با قیمت سوخت صادراتی ۸/۱۱ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت؛

■ نیروگاه گازی با قیمت سوخت فعلی تحویلی به نیروگاه‌ها ۲/۱۷ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت، با قیمت سوخت با حداکثر تعرفه داخلی گاز ۴/۷۸ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت و با قیمت سوخت صادراتی ۱۱/۴۰ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت؛

■ نیروگاه هسته‌ای ۷/۰۵ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت؛

■ نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز ۷/۱۹ سنت دلار بر کیلووات‌ساعت.

این شاخص متشکل از چندین مؤلفه شامل سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه سوخت، هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر است. در جدول ۶، مقایسه کیفی از شاخص هزینه تراز شده برای تولید هر کیلووات‌ساعت برق در انواع نیروگاه‌ها و مؤلفه‌های اصلی آن ارائه شده است.

جدول ۷. مقایسه کیفی شاخص هزینه تراز شده تولید برق و مؤلفه‌های اصلی آن

نیروگاه	هزینه تراز شده تولید برق	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	هزینه سوخت	هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر
سیکل ترکیبی (سوخت با قیمت فعلی)	پایین	پایین	پایین	نسبتاً پایین
سیکل ترکیبی (سوخت با قیمت حداکثر تعرفه داخلی گاز)	نسبتاً پایین	پایین	متوسط	نسبتاً پایین
سیکل ترکیبی (سوخت با قیمت صادراتی)	بالا	پایین	بالا	نسبتاً پایین
گازی (سوخت با قیمت فعلی)	پایین	نسبتاً پایین	پایین	متوسط
گازی (سوخت با قیمت حداکثر تعرفه داخلی گاز)	نسبتاً پایین	نسبتاً پایین	متوسط	متوسط
گازی (سوخت با قیمت صادراتی)	بالا	نسبتاً پایین	بالا	متوسط
خورشیدی	پایین	متوسط	ندارد	پایین
بادی	نسبتاً پایین	متوسط	ندارد	نسبتاً بالا
هسته‌ای	متوسط	بالا	نسبتاً پایین	نسبتاً بالا
زغال‌سنگ‌سوز	متوسط	نسبتاً بالا	متوسط	بالا

مأخذ: همان.

تخصیص سوخت یارانه ای به نیروگاه های حرارتی، قیمت تولید برق در این نیروگاه ها را به شدت کاهش داده است؛ به طوری که امکان رقابت سایر نیروگاه ها با نیروگاه های حرارتی وجود ندارد. این مسئله باعث وابستگی شدید تولید برق به گاز طبیعی و بروز چالش در امنیت تأمین برق کشور شده است. برای بهبود این شرایط این پیشنهادها قابل ارائه است:

■ در میان انواع نیروگاه ها، نیروگاه های هسته ای با هزینه سرمایه گذاری اولیه ۵/۳۵ سنت دلار و نیروگاه های زغال سنگ سوز با سرمایه گذاری ۳/۷۶ سنت دلار برای تولید هر کیلووات ساعت برق، بیشترین نیاز به سرمایه گذاری اولیه را دارند. با وجود این، این نیروگاه ها عمر مفید طولانی و ضریب بهره برداری بالایی دارند که آنها را به گزینه ای مناسب برای تأمین بار پایه^۱ تبدیل می کند. بنابراین، پیشنهاد می شود بخشی از بار پایه شبکه از این نوع نیروگاه ها تأمین شود.

■ با توجه به اینکه حداکثر تولید برق از نیروگاه های خورشیدی همزمان با اوج مصرف در تابستان اتفاق می افتد، نیروگاه های خورشیدی با سرعت بالای ساخت و هزینه سرمایه گذاری اولیه مناسب، گزینه ای مناسب برای مدیریت اوج بار در تابستان به شمار می روند. از این رو پیشنهاد می شود برای کمک به حل ناترازی تابستان توجه ویژه ای به توسعه و ساخت این نیروگاه ها شود.

■ اجرای ماده (۱۰) قانون مانع زدایی از توسعه صنعت برق مبنی بر حذف تدریجی قیمت گذاری انرژی در طول زنجیره تولید، انتقال و توزیع برق و انتقال تمام یارانه ها به انتهای زنجیره، تأثیر بسزایی در بهبود اقتصاد صنعت برق و افزایش رقابت پذیری در بخش نیروگاهی دارد. گفتنی است برنامه اجرایی این ماده در تاریخ ۱۴۰۳/۰۲/۰۹ به تصویب هیئت وزیران رسیده، اما تاکنون اجرایی نشده است.

■ از مهم ترین چالش ها در ایجاد رقابت بین نیروگاه های حرارتی با سایر نیروگاه ها، تأمین منابع مالی برای توسعه این دسته از نیروگاه ها است. با توجه به مزایای اقتصادی صرفه جویی در مصرف گاز و فرآورده های نفتی و همچنین برای اقتصادی شدن فعالیت سایر نیروگاه ها پیشنهاد می شود از سازوکار بازار بهینه سازی مصرف انرژی موضوع ماده (۴۶) قانون برنامه هفتم پیشرفت برای ارائه گواهی صرفه جویی سوخت به نیروگاه های غیر حرارتی استفاده شود.

■ اگرچه مؤلفه های اقتصادی نقش مهمی در توسعه بخش نیروگاهی دارند، به منظور توسعه متوازن این بخش لازم است سایر ملاحظات، همچون مزیت های راهبردی کشور، مسائل زیست محیطی و ملاحظات فنی در تعیین سبد بهینه نیروگاه های تولید برق، مورد توجه قرار گیرند.

جدول ۸. پیشنهاد توصیه سیاستی ویژه گزارشات راهبردی / نظارتی

ردیف	نوع توصیه		توصیه سیاستی	الزامات و قیود اجرایی	دستگاه متولی	دستگاه معین	زمان بندی اجرا (کوتاه مدت، میان مدت، بلندمدت)
	اصلاح	تداوم					
۱	✓		اجرای کامل ماده (۱۰) قانون مانع زدایی از توسعه صنعت برق و حذف تدریجی یارانه سوخت در زنجیره تولید، انتقال و توزیع	ایجاد سازوکارهای اجباری برای حمایت از مصرف کننده، جلوگیری از شوک قیمتی، هماهنگی میان وزارت نیرو و وزارت نفت	وزارت نیرو	وزارت نفت، سازمان برنامه و بودجه	میان مدت
۲	✓		استفاده از سازوکار بازار بهینه سازی مصرف انرژی (ماده ۴۶) قانون برنامه هفتم پیشرفت برای ارائه گواهی صرفه جویی سوخت به نیروگاه ها	ایجاد زیرساخت بازار گواهی ها، تضمین خرید و قابلیت مبادله، شفافیت در محاسبه صرفه جویی	وزارت نیرو	شرکت بورس انرژی، وزارت نفت، سازمان برنامه و بودجه	کوتاه مدت

۱. بار پایه به حداقل میزان مصرف برق در کل شبکه گفته می شود که باید در تمام ساعات سال تأمین شود.



ردیف	نوع توصیه		توصیه سیاستی	الزامات و قیود اجرایی	دستگاه متولی	دستگاه معین	زمان‌بندی اجرا (کوتاه‌مدت، میان‌مدت، بلندمدت)
	اصلاح	تداوم					
۳		✓	توسعه و حمایت از نیروگاه‌های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) به‌عنوان گزینه‌های اقتصادی	رفع موانع سرمایه‌گذاری، تأمین مالی، تسهیل ورود بخش خصوصی	ساتبا	سازمان برنامه و بودجه	میان‌مدت
۴	✓		کاهش وابستگی تولید برق کشور به گاز طبیعی با تنوع‌بخشی به سبد انرژی	مدیریت ریسک امنیت انرژی، پایش واردات احتمالی، ملاحظات زیست‌محیطی	وزارت نیرو	–	بلندمدت

* تداوم یا تقویت آیتم‌ها یا اقدامات.
** اصلاح رویه‌ها یا ایجاد سازوکارها.

منابع و مآخذ



- [1] LCOE and its Limitations, Energy for Growth Hub, Payne Institute January 2020.
 - [2] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022.
 - [3] Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis, New York, (2024).
 - [4] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. "Levelized Cost of Electricity-Renewable Energy Technologies." (2024), Freiburg, Germany.
 - [5] International Energy Agency, "Projected Costs of Generating Electricity." (2020).
- [۶] اطلاعات دریافتی از شرکت‌ها، انجمن‌ها، نهادها و سازمان‌های مربوطه.

گزیده سیاستی

با فرض قیمت صادراتی سوخت، نیروگاه‌های خورشیدی کمترین هزینه و نیروگاه‌های گازی بیشترین هزینه تراز شده تولید برق را در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها دارند.



مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاسداران، روبروی پارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۵۸۵۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وبسایت: rc@majles.ir