پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران
سال پنجم، شماره ۱۸، بهار ۱۳۹۵، صفحات ۲۷-۱

رقابت‌پذیری برق زمین‌گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق در ایران

فریبا اسدی[۱]، محمدحسین کریم[۲]، مجید فشاری[۳]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

چکیده:

با وجودِ پتانسیل بالای انرژی زمین‌گرمایی در ایران، تنها ۱۰۰ مگاوات برق زمین‌گرمایی در سال ۱۳۹۶ بهره‌برداری خواهد شد، زیرا هزینه سوخت که حدود ۷۰ تا ۹۰ درصدِ هزینه تمام شده مرسوم(غیر واقعی) نیروگاه‌های حرارتی را تشکیل می‌دهد، یارانه‌های بالایی در چند سال اخیر به آن اختصاص یافته است و هزینه آثار خارجی در هزینه تمام شده برق لحاظ نمی‌شود. در این پژوهش برآنیم تا هزینه تمام شده واقعی برق زمین‌گرمایی را به تفکیک اجزاء با نیروگاه‌های متداول در ایران مقایسه نماییم. روش هزینه همترازشده شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری، سوخت و آلایندگی هر یک از فناوری‌های تولید برق می‌باشد. مقایسه هزینه‌های تمام شده برق مفروض بر قیمت صادراتی سوخت و هزینه آثار خارجی نشان می‌دهد که ضریب ظرفیت بالا، عدم نیاز به سوخت‌های فسیلی و هزینه آلایندگی ناچیز، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی را با سایر نیروگاه‌های مرسوم در ایران رقابت‌پذیر می‌سازد، در حالی که مقایسه هزینه تمام شده برق مفروض بر قیمت فعلی سوخت و عدم ملاحظات زیست‌محیطی نشان می‌دهد که نیروگاه زمین‌گرمایی در مقایسه با سایر نیروگاه‌های متداول در اولویت آخرِ اقتصادی قرار دارد. این پژوهش پیشنهاد می‌دهد که آزادسازی قیمت تمام شده انرژی و لحاظ هزینه آثار خارجی، اثر قابل توجهی بر توسعه صنعت برق زمین‌گرمایی در ایران دارد و امکان صادرات بیشتر گاز طبیعی را فراهم می‌آورد.

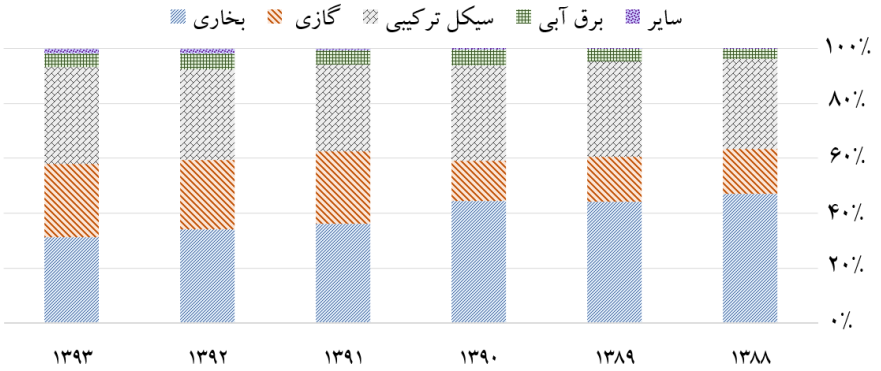
واژه‌های کلیدی: برق زمین‌گرمایی، آزادسازی قیمت انرژی، رقابت‌پذیری، هزینه همترازشده برق

طبقه‌بندی JEL : D61، Q48، Q39، Q29

۱- مقدمه

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اجتماعی- اقتصادی دانشگاه خوارزمی تهران(مستخرج از پایان‌نامه) (نویسنده مسئول)
Email: Asadif47@gmail.com
۲. دانشیار اقتصاد، عضو هیئت علمی دانشگاه خوارزمی تهران
Email: Irda87@gmail.com
۳. استادیار اقتصاد، عضو هیئت علمی دانشگاه خوارزمی تهران
Email: Majid.feshari@gmail.com

با وجود اینکه تمایل به کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده از منابع تجدیدپذیر را حمایت می‌کند، اما اقتصادِ انرژی‌های تجدیدپذیر هنوز بزرگ‌ترین مانع بکارگیری آن در ایران است(موسوی و همکاران، ۲۰۱۲). در ایران، مطابق اطلس زمین‌گرمایی پتانسیل بالایی جهت استحصال برق زمین‌گرمایی وجود دارد(یوسفی و همکاران، ۲۰۰۷)؛ با این وجود، صنعت برق تجدیدپذیر همچون برق زمین‌گرمایی مطابق چشم‌انداز برنامه پنجم توسعه پیش نرفته است و تولید برق کشور همچنان به نیروگاه‌های حرارتی وابسته است. همان‌طور که در نمودار(۱) ملاحظه می‌شود، تولید برق در چند سال اخیر بیش از ۹۰ درصد به نیروگاه‌های فسیلی متّکی بوده است که بزرگ‌ترین خطر در امنیت انرژی تلقّی می‌گردد. در سال ۱۳۹۳، بیش از ۲۷۴ تراوات ساعت برق تولید شده است که بیش از ۹۳ درصد سهم نیروگاه‌های متداول می‌باشد. سوخت‌های فسیلی همچون گاز طبیعی، نفت‌کوره و نفت‌گاز اساسی‌ترین منابع نیروگاه‌های حرارتی هستند. در جدول(۱) مقدار و نوع سوخت مصرفی در نیروگاه‌های کشور ارائه شده است.



نمودار(۱): سهم نیروگاه‌ها از تولید برق در ایران، ۱۳۸۸-۱۳۹۳ (ترازنامه انرژی ایران،۱۳۹۳)

جدول(۱): مقدار و نوع سوخت مصرفی در نیروگاه‌های کشور، ۱۳۸۸-۱۳۹۳

سال/ نوع سوخت	نفت‌گاز (میلیون لیتر)	نفت‌کوره (میلیون لیتر)	گاز طبیعی (میلیون مترمکعب)
۱۳۸۸	۴۹۳۴	۹۵۴۲	۴۳۴۰۴
۱۳۸۹	۵۹۱۹	۸۸۵۹	۴۴۸۹۰
۱۳۹۰	۹۴۰۶	۱۲۰۱۹	۳۸۹۰۱
۱۳۹۱	۷۷۶۸	۱۴۴۵۰	۴۰۶۹۲
۱۳۹۲	۱۲۱۸۶	۱۵۲۶۴	۳۶۶۴۸
۱۳۹۳	۸۸۷۲	۱۰۲۷۳	۵۰۱۷۲

منبع: ترازنامه انرژی ایران،۱۳۹۳

قیمت نازل سوخت نیروگاه‌ها و قیمت پایین برق در ایران بترتیب موجب افزایش نرخ رشد تولید و مصرف برق شده است، درنتیجه آلایندگی نیروگاه‌ها روندی رو به رشد داشته است. هزینه آثار خارجی هر یک از نیروگاه‌های حرارتی بر اساس مطالعه بانک جهانی در جدول(۲) ارائه شده است. در نظر گرفتن هزینه آثار خارجی[1] در قیمت تمام شده برق، از مهمترین استراتژی‌های اتخاذ شده توسط کشورهای توسعه یافته جهت کنترل آلاینده‌های نیروگاهی می‌باشد(امینی و همکاران، ۱۳۹۲). مطابق نمودار(۲) میزان انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن از بخش نیروگاهی در چند سال اخیر روندِ رو به رشدی داشته است. محاسبه هزینه تمام شده واقعی برق، مستلزم در نظرگرفتن قیمت‌های صادراتی سوخت و لحاظ هزینه‌های آثار خارجی می‌باشد، در این شرایط مقایسه هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی با سایر نیروگاه‌های متداول در کشور منصفانه است. این پژوهش تلاش دارد به این پرسش اساسی پاسخ دهد که آیا «استحصال برق از انرژی زمین‌گرمایی با آزادسازی قیمت سوخت و لحاظ هزینه آثار خارجی از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر است یا خیر». بدین منظور به مقایسه هزینه تمام شده واقعی تولید برق نیروگاه زمین‌گرمایی با نیروگاه‌های

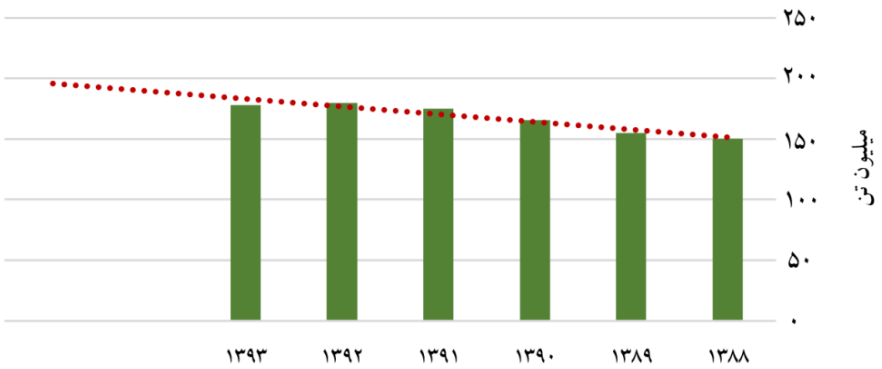
1. Externality Costs

بخاری، گازی و سیکل ترکیبی پرداخته می‌شود. این پژوهش در پی آزمودن فرضیه ذیل است: «آزادسازی قیمت سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی آثار مثبتی در توسعه برق زمین گرمایی دارد». در ادامه به مبانی نظری و مروری بر مطالعات تجربی در بخش دوّم، روش‌شناسی پژوهش در بخش سوّم، تجزیه و تحلیل داده‌ها و تحلیل حساسیت در بخش چهارم و نتیجه‌گیری در بخش پنجم پرداخته می‌شود.

جدول(۲): هزینه آثار خارجی نیروگاه‌های متداول حرارتی کشور بر حسب سنت بر کیلووات ساعت

نوع نیروگاه فسیلی	CH_4	CO_2	PM	SO_2	NO_x	مجموع
گازی	۰.۰۰۰۷	۱.۵۲	۰.۱۱	۰.۳۷	۰.۱۴	۲.۱۹
بخاری	۰.۰۰۰۵	۱.۰۳	۰.۰۸۹	۱.۲۳	۰.۰۹۲	۲.۵۱
سیکل ترکیبی	۰.۰۰۰۳	۰.۶۶	۰.۰۴	۰.۱۴	۰.۰۶	۰.۹۳

منبع: گزارش بانک جهانی، ۲۰۰۹



نمودار(۲): انتشار گاز گلخانه‌ای کربن دی‌اکسید(CO_2) از بخش نیروگاهی، ۱۳۸۸-۱۳۹۳ (ترازنامه انرژی ایران،۱۳۹۳)

۲- مبانی نظری و مروری بر مطالعات تجربی

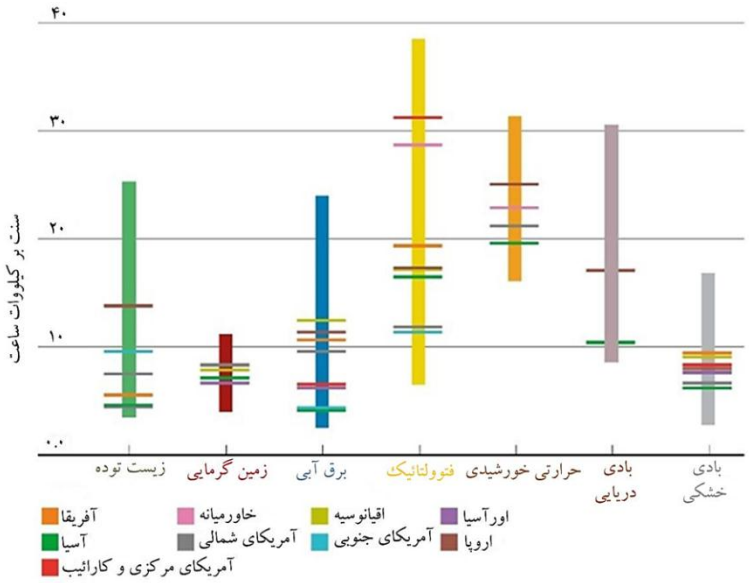
این پژوهش در پی بررسی هزینه تمام شده برق زمین گرمایی و مقایسه آن با سایر نیروگاه‌های متداول در کشور است. هزینه همترازشده برق شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری، سوخت و آثار خارجی می‌باشد که الگوریتمی رایج و متداول برای

محاسبه هزینه تمام شده برق نیروگاه‌ها در جهان است، در نتیجه امکان مقایسه تفکیک هزینه‌ها و در نهایت تمییز هزینه تمام شده برق از فناوری‌های مختلف را میسّر می‌سازد. تصمیم‌گیری درباره بکارگیری نوع فناوری تولید برق بر اساس هزینه‌های تولید اتخاذ می‌شود(محمودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مطهری و همکاران، ۱۳۹۳)، لذا مطالعات خارجی بسیاری تمایز هزینه‌های تولید برق از فناوری‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند.(کوویک و وسلر[1] (۲۰۱۰)، ال کوردی و همکاران[2] (۲۰۰۲)، آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر[3] (۲۰۱۴)، راس و امبس[4] (۲۰۰۴) و سنر و همکاران[5] (۲۰۰۹)) در این مطالعات از روش‌های مختلفِ ارزیابی اقتصادی نظیر تحلیل طول عمر مفید(LCA[6]) و هزینه همترازشده برق(LCOE[7]) جهت مقایسه هزینه تولید برق نیروگاه‌ها با یکدیگر استفاده شده است.

کوویک و وسلر(۲۰۱۰) به تحلیل هزینه‌های خصوصی تولید انرژی از منابع زیست‌توده در سیاست انرژی اروپا پرداخته‌اند. آن‌ها سه فناوری بیودیزل‌های جلبکی، بیودیزل‌های کلزایی و سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل اتحادیه ۲۵- اروپا را مورد مقایسه قرار داده‌اند. آن‌ها با تحلیل هزینه‌ها نشان دادند که بیودیزل های جلبکی تحت شرایط خاص قابل رقابت با روش‌های دیگر می‌باشند. ال‌کوردی و همکاران(۲۰۰۲)، تحلیل طول عمر مفید(LCA) برای تولید برق توسط سیستم‌های مرسوم و تجدیدپذیر را در کشور مصر مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش به‌منظور رقابت مبدل‌های انرژی خورشیدی و بادی با سیستم‌های متداول تولید برق، هزینه آثار خارجی لحاظ شده است. نتایج حاکی از آن بود که با گذشت زمان استانداردهای زیست‌محیطی تقویت، مخازن فسیلی تقلیل و هزینه‌های سیستم‌های متداول افزایش می‌یابند، درنتیجه نیروگاه‌های تجدیدپذیر قابلیت رقابت‌پذیری با نیروگاه‌های مرسوم را پیدا خواهند

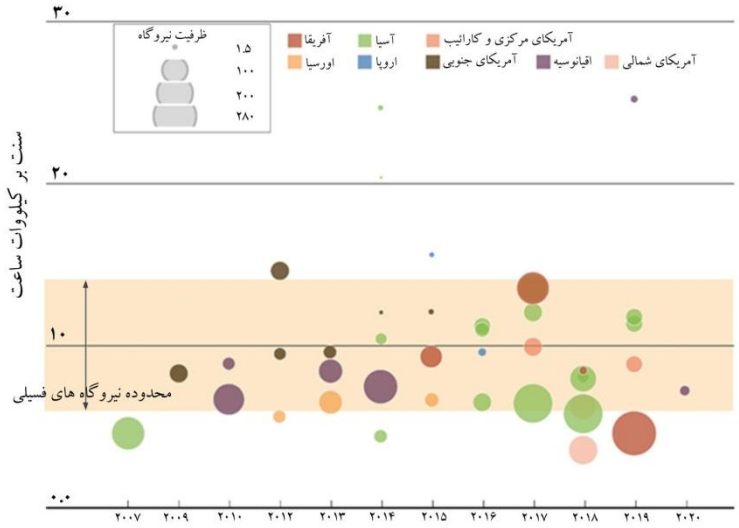
1. Kovacevic and Wesseler
2. EL-Kordy et al
3. International Renewable Energy Agency(IRENA)
4. Roth and Ambs
5. Sener et al
6. Life Cycle Analysis
7. Levelized Cost of Electricity (LCOE)

کـرد. آژانـس بـین‌المللـی انـرژی‌هـای تجدیدپـذیر(۲۰۱۴)، هزینـه همترازشـده تکنولوژی‌های تولید برق را در نواحی مختلف جهان مورد بررسی قـرار داده اسـت. در این گزارش میانگین هزینـه همترازشـده بـرق زمـین‌گرمـایی در سـال ۲۰۱۴ در نـواحی مختلف جهان حدود ۷ سنت بر کیلووات ساعت می‌باشد که نسبت به سایر انـرژی‌هـای تجدیدپذیر و فسیلی در وضعیتی مطلوب‌تری قرار دارد. ذکر این نکتـه ضـروری اسـت که برق زمین‌گرمایی به دلیـل عـدم نیـاز بـه سـوخت و آلاینـدگی نـاچیز، سـهم هزینـه سوخت و هزینه آثار خارجیِ آن در هزینه تمام شده برقِ واقعی انـدک اسـت، بنـابراین اختلاف محسوسی میان هزینه تمام شده غیر واقعی(مرسوم) و هزینـه تمـام شـده واقعـی برق زمین‌گرمایی وجود ندارد. امّا در نیروگاه‌های حرارتی سهم عمده هزینه‌هـای تمـام شده واقعی برق، هزینه سـوخت و آلاینـدگی اسـت و بـا توجـه بـه سیاسـتِ کشـورهای مختلف جهان در پرداخت یارانه به سوخت نیروگاه‌ها و عدم لحاظ هزینه آثار خارجی، هزینه تمام شده واقعی برق نیروگاه‌های حرارتی متفاوت می‌باشد از ایـن حیـث مقایسـه هزینه تمام شده واقعی برق زمین‌گرمـایی بـا بـرق نیروگـاه‌هـای حرارتـی در مقتضـیات مکانی و زمانی مختلف، حائز اهمیت است و هر ساله هزینه تمام شـده تکنولـوژی‌هـای مختلف تولید برق در نقاط مختلـف جهـان، توسـط مراکـز و سـازمان هـای بـین‌المللـی همچون آژانس بـین‌المللـی انـرژی هـای تجدیدپـذیر، اداره اطلاعـات انـرژی آمریکـا، آژانس بین‌المللی انرژی و ... گزارش می‌شـود. در نتـایج شـکل(۱) و (۲)، هزینـه آثـار خارجی از قبیل هزینه آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای لحاظ نشده است. بـا در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی در هزینه همترازشده برق، هزینـه‌هـای تولیـد بـرق نیروگاه‌های فسـیلی افـزایش خواهـد یافـت و بـرق زمـین‌گرمـایی رقـابتی تنگاتنـگ بـا نیروگاه‌های حرارتی پیدا خواهد کرد.



شکل(۱): هزینه تمام شده تولید برق فناوری‌های تجدیدپذیر

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، ۲۰۱٤



شکل(۲): هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی در مقایسه با برق نیروگاه‌های فسیلی

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، ۲۰۱٤

راس و امبس(۲۰۰۴)، هزینه تمام شده چهارده فناوری تولید برق را مورد مقایسه قرار دادند. هزینه آثار خارجی در این پژوهش در نظر گرفته شد. لحاظ هزینه آثار خارجی در هزینه تمام شده تولید برق، جایگزین‌های مناسبی برای نیروگاه‌های فسیلی مطرح کرده است؛ به‌طوری که نتایج نشان‌دهنده توجیه اقتصادی نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌باشد. سنر و همکاران(۲۰۰۹)، چشم‌انداز اقتصادی برق زمین‌گرمایی را در بازار برق غرب آمریکا مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نوسانات قیمت برق، اثرات مالیات و عوامل مؤثر بر قیمت برق در نظر گرفته شده است. از مدل هزینه تصادفی زمین‌گرمایی(SGCM[1]) برای مقایسه هزینه همتراز شده با سطوح قیمت‌های گذشته و انتظارات آینده استفاده گردید و هزینه همتراز شده برق زمین‌گرمایی در بازه ۶/۸- ۱۱/۸ سنت بر کیلووات ساعت محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه برق زمین‌گرمایی به حدِ بالای قیمت‌های گاز طبیعی وابسته می‌باشد و زمانی که قیمت گاز طبیعی با نوسانات شدیدی روبرو بوده سرمایه‌گذاری در برق زمین‌گرمایی جذاب‌تر شده است.

بررسی مطالعات داخلی در زمینه نیروگاه‌های زمین‌گرمایی نشان می‌دهد که جهت‌گیری اغلب این مطالعات بررسی فنی- اقتصادی احداث نیروگاه است.(خسروی(۱۳۷۶)، طاهری فرد و شهاب(۱۳۸۹)، بلوریان و همکاران(۱۳۹۳) و مقدّس تفرشی(۱۳۹۳)) در این مطالعات عموماً هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی محاسبه و با سایر نیروگاه‌های متداول در کشور مقایسه شده است.

خسروی(۱۳۷۶) در مقاله «ارزیابی فنی- اقتصادی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی» با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در هزینه تولید برق، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی و فسیلی را مورد مقایسه قرار داده است. هزینه‌های زیست‌محیطی در این مقایسه لحاظ و تأثیر پارامترهایی همچون نرخ تنزیل و ضریب ظرفیت بر هزینه‌های تولید برق اعمال شده است. در نتیجه هزینه تمام شده تولید برق زمین‌گرمایی در حدود ۴ تا ۶ سنت بر کیلووات ساعت برآورد شد، که در پایین‌ترین طیف هزینه‌های تولید برق از منابع نفت، زغال‌سنگ و انرژی هسته‌ای و به مراتب پایین‌تر از هزینه تولید الکتریسیته از سایر منابع غیرمتعارف است.

1. Stochastic Geothermal Cost Model

طاهری فرد و شهاب(۱۳۸۹) جنبه‌های فنی- اقتصادی تولید برق زمین‌گرمایی را به صورت مطالعه موردی در منطقه مشکین‌شهر مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش هزینه‌های ثابت و عملیاتی تولید برق زمین‌گرمایی مشکین‌شهر برای سه سناریوی کمترین هزینه، میانگین و بیشترین هزینه در بخش بالادستی و نیروگاهی محاسبه شد. با توجه به نتایج، هزینه تولید برق برای سه سناریوی حداقل هزینه، میانگین و حداکثر هزینه به ترتیب در حدود ۴/۳، ۷ و ۱۶/۲ سنت بر کیلووات ساعت برآورد شده است. لحاظ ننمودن مؤلفه‌های فنی مؤثر بر هزینه مانند ضریب ظرفیت، مدت‌زمان دسترسی در سال، مدت‌زمان ساخت و نرخ تنزیل سبب شده تا هزینه تمام شده تولید برق زمین‌گرمایی مشکین‌شهر در شرایط واقعی محاسبه نشود. از آنجا که نیروگاه مشکین‌شهر هنوز به بهره‌برداری نرسیده است و داده‌های ورودی متقن نمی‌باشند؛ بنابراین بررسی حساسیت‌های هزینه تمام شده نسبت به متغیرهای فنی امری مهم و ضروری تلقی می‌شود. بلوریان و همکاران(۱۳۹۳) و مقدس تفرشی(۱۳۹۳) هزینه تمام شده برق نیروگاه‌های زمین‌گرمایی را با نیروگاه‌های بادی و فسیلی تحت دو سناریو افزایش یک درصدی قیمت جهانی سوخت و بدون در نظر گرفتن افزایش قیمت جهانی سوخت در دو نرخ تنزیل ۶ و ۸ درصدی و لحاظ قیمت صادراتی و وارداتی سوخت مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در سناریو عدم لحاظ افزایش قیمت جهانی سوخت، در صورتی که قیمت سوخت بر اساس سوخت صادراتی محاسبه شود، نیروگاه زمین‌گرمایی در نرخ تنزیل ۶ درصد مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد. در سناریو اعمال افزایش یک درصدی قیمت سوخت، هزینه تمام شده نیروگاه زمین‌گرمایی در دو نرخ تنزیل ۶ و ۸ درصد کمتر از نیروگاه بخاری است. همچنین در مقایسه هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی بادی، نیروگاه زمین‌گرمایی مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد، به‌طوری که هزینه تمام شده برق از تکنولوژی‌های هسته‌ای پیشرفته، خورشیدی فتوولتائیک، زمین‌گرمایی باینری، زمین‌گرمایی دو فازی، برق‌آبی کوچک و بادی به ترتیب ۹/۷، ۲۸.۱، ۷/۶، ۷/۴ ، ۱۶/۵ و ۹/۷ سنت بر کیلووات ساعت محاسبه شده است.

با بررسی‌های صورت گرفته در پایگاه‌های معتبر داخلی نظیر پژوهشگاه علم و فناوری ایران[1] و کتابخانه ملی[2] مشخص گردید که سیاست‌های آزادسازی قیمت در زمینه‌های مختلفی مانند محصولات کشاورزی و صنعت خودرو مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. اما در زمینه سیاست‌های آزادسازی قیمت تمام شده انرژی بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر بخصوص انرژی زمین گرمایی که ابعاد مختلف را مورد بررسی قرار داده باشد؛ مطالعه‌ای انجام نشده است.

با وجود آنکه پژوهش‌های فراوانی در زمینه رقابت‌پذیری برق زمین گرمایی نسبت به سایر تکنولوژی های تولید برق شده است؛ لیکن تحقیق علمی که منطبق بر داده‌های فنی– اقتصادی وزارت نیرو ایران، هزینه تمام شده برق زمین گرمایی را با نیروگاه‌های حرارتی(بخاری، گازی و سیکل ترکیبی) ساخت جدید با لحاظ هزینه‌های آثار خارجی مقایسه کرده باشد، صورت نگرفته است. از آنجا که هنوز در ایران از انرژی زمین گرمایی، برق استحصال نشده است، داده‌های ورودی متقن نبوده و نتایج مستلزم تحلیل حساسیت نسبت به متغیرهای مؤثر می‌باشند. با توجه به ضرورت آزادسازی قیمت انرژی در کشور با هدف افزایش بهره‌وری، کاهش شدت مصرف انرژی و توزیع عادلانه یارانه انرژی، لازم است جنبه‌های مختلف تأثیرگذاری این سیاست در گسترش نیروگاه‌های زمین گرمایی مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه این پژوهش به محققان، سیاست‌گذاران و مجریان بخش انرژی کشور کمک خواهد کرد تا شناخت بیشتری از آثار این سیاست ها بدست آورند و در صورت نیاز نسبت به بازبینی و اصلاح سیاست‌های موجود اقدام نمایند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش بر اساس نوع هدف، نظری و بر اساس ماهیت و روش، توصیفی- تحلیلی می‌باشد و اطلاعات اولیه تحلیل به روش کتابخانه‌ای گردآوری شده است.

1. http://www.irandoc.ac.ir
2. http://www.nlai.ir

۳-۱- انتخاب روش پژوهش: اقتصاد مهندسی

اقتصاد مهندسی مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی، برای مقایسه اقتصادی پروژه‌ها است. روش‌های متفاوتی جهت ارزیابی اقتصادی پروژه‌های احداث نیروگاه وجود دارد که در چند سال اخیر در تحقیقات داخلی و خارجی بکار گرفته شده است. در این بخش پس از معرفی رایج‌ترین روش‌های ارزیابی اقتصادی به مقایسه آن‌ها پرداخته و سپس روش نهایی را برمی‌گزینیم.

۳-۱-۱- روش ارزش حال خالص

این شاخص ازجمله رایج‌ترین شاخص‌های تنزیل طرح می‌باشد. برای ارزیابی یک پروژه به روش ارزش حال خالص، ابتدا باید تمامی درآمدها و هزینه‌ها را به ارزش حال تبدیل کرد و از تفاضل درآمدها از هزینه‌ها، ارزش حال خالص منافع را بدست آورد. اگر NPV کوچک‌تر از صفر باشد پروژه غیراقتصادی است، ولی اگر NPV مثبت باشد پروژه اقتصادی می‌باشد و بدین معنی است که ارزش فعلی هزینه‌ها کوچک‌تر از ارزش فعلی درآمدها است.(اسکونژاد، ۱۳۸۹)

$$NPV\ (i,n) = \sum_{t=0}^{n} \frac{R_t}{(1+i)^t} \qquad (1)$$

در رابطه(۱)، t دوره جریان نقدی، i نرخ بهره و R_t جریان نقدی خالص می‌باشد.

۳-۱-۲- روش نرخ بازدهی داخلی

نرخی است که در آن ارزش حال خالص پروژه صفر باشد. به‌منظور محاسبه این نرخ رابطه ذیل برابر با صفر قرار داده می‌شود. نرخ (عدد i) به‌دست‌آمده از حل این معادله در واقع، نرخ بازدهی داخلی پروژه محسوب می‌گردد.(مجیدیان، ۱۳۸۲)

$$NPV\ (i,n) = \sum_{t=0}^{n} \frac{R_t}{(1+i)^t} = 0 \rightarrow i = r\% \qquad (2)$$

نرخ بازدهی بدست‌آمده با حداقل نرخ جذب‌کننده یا حداقل نرخ قابل‌انتظار(MARR[1]) مقایسه و سپس توجیه یا عدم توجیه اقتصادی طرح تعیین می‌گردد.

۳-۱-۳- روش هزینه همترازشده برق

در روش هزینه همترازشده، رویکرد مشابه ارزش فعلی استفاده می‌شود. در این روش هزینه‌ها به پرداخت سالیانه یکنواخت تبدیل می‌شوند. به بیان دیگر هزینه همترازشده میزان ثابت درآمد به ازای فروش یک واحد محصول است که می‌تواند تمام مخارج پروژه را در طول عمر خدماتی پوشش دهد. هزینه یکنواخت یا همترازشده، روشی مبتنی بر محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تولید برق در کل دوره عمر پروژه می‌باشد که در آن تولید یک کیلووات ساعت برق از تقسیم ارزش فعلی کل هزینه‌های انجام‌شده بر کل برق تولیدی محاسبه می‌شود. رابطه(۳) تا (۷)، معادله این شاخص را نشان می‌دهد.

$$LCOE = C_k + \left[\sum_{t=0}^{PL} \frac{C_{O\&M} \times (1+e_{O\&M})^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^{PL} \frac{C_{Fuel} \times (1+e_{Fuel})^t}{(1+r)^t} \right] \times \frac{r(1+r)^{PL}}{(1+r)^{PL}-1} + C_{EC} \qquad (۳)$$

$$C_K = \frac{DR \times TPC \left(1+r\right)^{CL}}{HY \times CF} \qquad (۴)$$

$$C_{O\&M} = \frac{FOM}{HY \times CF} + VOM \qquad (۵)$$

$$C_{Fuel} = FC \times HR \qquad (۶)$$

$$C_{EC} = EF \times HR \times VED \qquad (۷)$$

1. Minimum Attractive Rate of Return (MARR)

جدول(۳): تعریف پارامترهای معادله هزینه همتراز شده

متغیر	واحداندازه‌گیری	نام لاتین	نام فارسی
C_K	$/KWh	Capital Cost	هزینه سرمایه‌گذاری
DR	%	Depreciation Rate	نرخ استهلاک
TPC	$/KW	Total Plant Cost	کل هزینه ساخت
CL	Year	Construction Life	مدت‌زمان ساخت نیروگاه
r	%	Discount Rate	نرخ تنزیل
HY	Hours	Hours Per Year	تعداد ساعات دسترسی در سال
CF	%	Capacity Factor	ضریب ظرفیت
$C_{O\&M}$	$/KWh	Total O&M Cost	هزینه تعمیرات و نگهداری
$e_{o\&m}$	%	Escalation Rate Of O&M Cost	نوسانات هزینه تعمیرات و نگهداری
FOM	$/KWYear	Total Fixed O&M Cost	هزینه ثابت تعمیرات و نگهداری
VOM	$/Kwh	Total Variable O&M Cost	هزینه متغیر تعمیرات و نگهداری
HR	MMB/KWh	Heat Rate	نرخ گرما
PL	Year	Plant Life	طول عمر نیروگاه
FC	$/MMBtu	Fuel Cost	هزینه سوخت نیروگاه
e_{FUEL}	%	Escalation Rate Of Fuel Cost	نوسانات هزینه سوخت
C_{EC}	$/KWh	External Cost	هزینه اثرات خارجی
VED	$/gr	Value Of Environmental Damage	خسارت آلاینده
EF	gr/Btu	Emission Cost	فاکتور آلودگی
LCOE	$/KWh	Levelized Cost of Electricity	هزینه همتراز شده برق

منبع: موسوی و همکاران، ۲۰۱۲، ص٦٥٣؛ راس و همکاران، ۲۰۰٤، ص۲۱۲۷[1]

۱. راس و همکاران(۲۰۰۴) از شاخصِ LCOE برای مقایسه رقابت‌پذیری ۱۴ فناوری مختلف تولید برق استفاده نموده‌اند؛ لذا رابطه(۳) محدود به فناوری خاصی نبوده و می‌توان از آن برای مقایسه هزینه‌های نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی با نیروگاه زمین‌گرمایی استفاده کرد.

مطابق روابط فوق، هزینه‌ها به هزینه‌ی سال جاری منتقل‌شده تا ارزش حال پروژه محاسبه شود. ضرب کردن ارزش حال متغیرهای هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات و هزینه سوخت با فاکتور $\frac{r(1+r)^{PL}}{(1+r)^{PL}-1}$ آن‌ها را به هزینه یکنواخت سالیانه تبدیل می‌کند. در رابطه(۷)، C_{EC} بیانگر هزینه‌های تحمیل‌شده بر جامعه(هزینه‌های آثار خارجی) توسط گازهای آلاینده می‌باشد. فاکتور آلودگی میزان آلودگی‌ها در یک واحد مصرفی انرژی سوختی را نشان می‌دهد. HR نرخ حرارتی نیروگاه‌های برق بوده و VED بیانگر خسارت تخریب محیط‌زیست است. فاکتور آلودگی(EF) و نرخ حرارتی(HR) مقادیر فیزیکی بوده که قابل محاسبه می‌باشند، درحالی‌که VED را می‌توان با برآورد مستقیم هزینه یا کاهش هزینه‌ها یا ترکیب آن‌ها محاسبه نمود. VED پارامتر مهمی برای تحلیل قوانین تنظیم‌کننده می‌باشد؛ امّا محاسبه آن دشوار است. هزینه آثار خارجی در واحد برق تولیدشده با استفاده از این عوامل و واردکردن آن‌ها در فرمول LCOE به‌طور مستقیم محاسبه می‌گردد. همان‌گونه که در رابطه بالا دیده می‌شود، LCOE را می‌توان بر پایه مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری، هزینه سوخت و اثرات خارجی مشخص کرد. از آنجا که LCOE معیار اندازه‌گیری هزینه تولید برق در چرخه عمر نیروگاه است، بر این اساس می‌بایست تمام هزینه‌ها را در محاسبه هزینه نهایی[1] وارد کرد. جهت محاسبه این پارامترها به اطلاعاتی از قبیل پارامترهای عملیاتی نیروگاه، هزینه ساخت و اجرای نیروگاه، پارامترهای بازار انرژی و پارامترهای کلان اقتصاد نیاز است. در جدول(۳)، فهرست متغیرهای استفاده شده در معادله‌های فوق ارائه شده است.

۳-۱-٤- مقایسه روش‌ها و انتخاب روش نهایی

پروژه‌های تولید برق از تکنولوژی‌های مختلف نسبت به هم ناسازگارند[2] به عبارتی اگر یک تکنولوژی انتخاب شود، فناوری دیگر حذف می‌شود. از دیدگاه دولت و سرمایه‌گذار

1. Marginal Cost
2. Mutually Exclusive

بخش خصوصی عموماً سرمایه‌گذاری در طرح‌هایی انجام می‌شود که هزینه تمام‌شده پایین‌تری دارند، به عبارت دیگر برای سرمایه‌گذار، نیروگاهی که هزینه تمام‌شده تولید یک واحد انرژی الکتریکی در آن پایین‌تر باشد در اولویت احداث قرار می‌گیرد.(مطهری و همکاران، ۱۳۹۳؛ موسوی و همکاران، ۲۰۱۲) روش ارزش حال خاص و نرخ بازده داخلی عموماً در تحلیل‌های مالی و تصمیم‌گیری به ورود یا عدم ورود به سرمایه‌گذاری در پروژه‌ها استفاده می‌شود و در مورد هزینه‌های تمام‌شده صحبتی نمی‌کنند. از آنجا که هدف از این پژوهش بدست آوردن هزینه تمام‌شده برق نیروگاه زمین‌گرمایی است، از روش های ارزش حال خالص و نرخ بازده داخلی استفاده نشده است. در این حالت استفاده از روش هزینه همترازشده دارای مزیت می باشد، زیرا یکسان‌سازی عمر مفید پروژه‌ها ضروری به نظر نمی‌رسد. حقیقت این است که در تمامی روش‌های ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها یکسان نمودن عمر مسئله‌ای ضروری محسوب می‌شود. در روش هزینه همترازشده نیز عمر مشترک یا کوچک‌ترین مضرب مشترک عمر چند پروژه در نظر گرفته می شود، امّا از آنجا که مقدار ارزش یکنواخت سالیانه هر پروژه در هر تکرار برابر می‌باشد، بنابراین عنوان می‌گردد که در این روش لحاظ نمودن عمر مشترک ضروری نیست(اسکونژاد، ۱۳۸۹). همچنین در نظر گرفتن فاکتورهایی همچون ضریب ظرفیت نیروگاه، مدّت‌زمان دسترسی در سال، نوسانات قیمت سوخت و نوسانات هزینه تعمیرات و نگهداری در شاخص هزینه همترازشده میسّر می‌باشد.

با توجه به تشریحات یاد شده، از روش هزینه همترازشده به‌عنوان روش مورد استفاده در تحلیل اقتصادی پروژه‌های نیروگاهی استفاده می‌شود، به‌طوری که در حال حاضر بسیاری از کشورها به‌ویژه در اروپا و ایالات‌متحده آمریکا از آن استفاده می‌کنند و توسط آن مطالعات فراوانی در این حوزه انجام داده‌اند(کاست و همکاران[1]، ۲۰۱۳). در مورد ایران باید گفت که به دلیل استفاده کمتر از روش‌های قیمت‌گذاری مطلوب نظیر الگوریتم هزینه همترازشده و همچنین حمایت‌های فراوانی که تاکنون از طریق دولت نظیر ارائه یارانه در بخش انرژی به‌ویژه برق انجام‌شده است، در حال حاضر شاهد قیمت‌های غیرواقعی

1. Kost et al

هستیم(محمودی و همکاران، ۱۳۹۴).

۳-۲- داده‌ها و مفروضات پژوهش

در این پژوهش جهت تعیین جایگاه و اهمیت اقتصادی برق زمین‌گرمایی در ایران، هزینه تمام شده واقعی برق نیروگاه زمین‌گرمایی با نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی مقایسه می‌شود.(نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی با سهم ۹۳ درصدی از کل تولید برق کشور در سال ۱۳۹۳ جزء فناوری‌های متداول تولید برق در ایران تلقی می‌شوند.) نیروگاه‌های حرارتی عموماً از سوخت گاز طبیعی، نفت کوره و نفت گاز بهره می‌برند. سهم گاز طبیعی در تولید کل برق کشور بیش از سایر سوخت‌های فسیلی است.(سهم ۷۱ درصدی بین سوخت‌های نیروگاه‌های فسیلی در سال ۱۳۹۳) همچنین از هزینه سوخت و هزینه آثار خارجی کمتری نسبت به نفت‌کوره و نفت‌گاز بهره می‌برد. درنتیجه برای محاسبه هزینه همترازشده نیروگاه‌های حرارتی، گاز طبیعی نوع سوخت مورد نظر مفروض شده است. در راستای سیاست آزادسازی قیمت انرژی، هزینه فرصت سوخت یا همان ارزش صادراتی سوخت در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، قیمت یارانه‌ای گاز طبیعی برای نیروگاه‌ها در سال ۱۳۹۳، ۸۰۰ ریال بر مترمکعب و ارزش صادراتی آن ۲/۵۶ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو(۹/۰۳ سنت بر مترمکعب گاز طبیعی) محاسبه می‌شود.[۱] نرخ تنزیل با توجه به نرخ تورم عمومی و شرایط اقتصادی کشور در سال‌های گذشته و با استفاده از اطلاعات میدانی از تحلیل‌گران اقتصادی، ۱۴ درصد در نظر گرفته شده است.

شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای نیروگاه‌های حرارتی کشور مطابق جدول(۴) ارائه شده است که برگرفته از آخرین گزارش سالیانه انرژی ایران در سال ۱۳۹۳ می‌باشد. از آنجا که هنوز نیروگاه زمین‌گرمایی در ایران به بهره‌برداری نرسیده است، شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای برق زمین‌گرمایی از گزارش سال ۲۰۱۳ میلادی اداره اطلاعات انرژی آمریکا(EIA) برگرفته شده است. این شاخص مطابق رابطه(۷)،

---

۱. آمار تفضیلی صنعت برق ایران در سال ۱۳۹۳

حاصل‌ضرب فاکتور انتشار(EF) در نرخ حرارتی نیروگاه(HR) است. مطابق جدول(۵) خسارت هر یک از آلاینده‌ها(VED) بر اساس گزارش سال ۲۰۰۹ بانک جهانی در بخش نیروگاهی ارائه شده است. بدین ترتیب هزینه آثار خارجی هر یک از نیروگاه‌های حرارتی(بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی) و زمین‌گرمایی در ایران قابل محاسبه است. سایر مشخصات فنی- اقتصادی نیروگاه‌های بخاری، گازی، سیکل‌ترکیبی و زمین‌گرمایی مطابق جدول(۶)، از گزارش سال ۱۳۹۰ دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو گردآوری و داده های مربوط به نرخ استهلاک آن به روش خط مستقیم یا اقساط مساوی برآورد شده است.

جدول(٤): شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای نیروگاه‌های کشور برحسب گرم بر کیلووات ساعت

نوع نیروگاه فسیلی	CH_4	CO_2	PM	SO_2	NO_x
بخاری	۰/۰۳۲	۱۲۰۷/۳۵۰	۰/۲۳۷	۹/۵۵۸	۳/۲۵۲
گازی	۰/۰۲۶	۱۲۴۸/۶۰۲	۰/۱۹۲	۰/۹۱۷	۳/۵۳۸
سیکل‌ترکیبی	۰/۰۱۷	۷۱۱/۸۸۶	۰/۱۲۴	۰/۴۲۸	۴/۴۶۴
زمین‌گرمایی	۰/۰۰۰	۱۰۲/۶۲۷	۰/۰۰۰	۰/۰۷۸	۰/۰۰۰

منبع: گزارش سالیانه انرژی، ۱۳۹۳

جدول(۵): خسارت آلاینده‌های نیروگاهی بر حسب سنت بر گرم

نوع نیروگاه فسیلی	CH_4	CO_2	PM	SO_2	NO_x
هزینه خسارت	۰/۰۳۳۵	۰/۰۰۱۶۱	۰/۶۹۲۳	۰/۲۹۳۶	۰/۰۹۶۵

منبع: گزارش بانک جهانی، ۲۰۰۹

جدول(٦): مشخصات فنی- اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی و زمین‌گرمایی در ایران

مؤلفه‌های فنی- اقتصادی	واحد	زمین‌گرمایی	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی
هزینه اولیه	دلار بر کیلووات	۴۱۰۰	۱۰۷۰	۵۰۵	۷۲۰
مدت‌زمان ساخت	سال	۴	۵	۲	۵
نرخ استهلاک	درصد	۳/۳	۳/۳	۸/۳	۳/۳
ضریب ظرفیت	درصد	۸۵	۷۸	۸۴	۸۲
طول عمر	سال	۳۰	۳۰	۱۲	۳۰
تعداد ساعات دسترسی	ساعت	۷۴۴۶	۶۱۳۲	۷۳۵۸/۴	۷۳۵۸/۴
هزینه تعمیرات و نگهداری ثابت	دلار بر کیلووات سال	۸۴	۹/۴	۴/۴	۴/۳۴
هزینه تعمیرات و نگهداری متغیر	دلار بر کیلووات سال	۹/۶	۴/۲۳	۵/۶	۳/۵۷
نوسانات هزینه تعمیرات و نگهداری	درصد	۲	۲	۲	۲
نرخ حرارتی	میلیون بی تی یو بر کیلووات ساعت	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹
هزینه سوخت(گاز طبیعی)	دلار بر میلیون بی تی یو	-	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶
نوسانات قیمت سوخت	درصد	-	۵	۵	۵

منبع: دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، ۱۳۹۰

٤- تجزیه و تحلیل نتایج

هزینه همترازشده برق برای نیروگاه‌ها را می‌توان تحت سناریوهای مختلفی محاسبه کرد. قیمت سوخت و هزینه آثار خارجی از مهم‌ترین سناریوهای محاسبه هزینه تمام شده می‌باشند. هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی در مقایسه با سایر نیروگاه‌های متداول در کشور مفروض بر سیاست آزادسازی قیمت سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی مطابق نمودار(۳) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود؛ با توجه به مفروضات این پژوهش یعنی: ۱)

آزادسازی سازی قیمت سوخت و ۲) در نظر گرفتن هزینه آثار خارجی، هزینه تمام شده واقعی برق زمین‌گرمایی کمتر از نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل‌ترکیبی قرار گرفته است. به‌طوری که می‌توان نیروگاه سیکل‌ترکیبی را مهم‌ترین رقیب نیروگاه زمین‌گرمایی بشمار آورد. سهم هزینه سوخت و هزینه آثار خارجی این نیروگاه‌ها در جدول(۷) نشان داده شده است. مطابق نتایج، سهم عمده هزینه‌های نیروگاه‌های متداول در کشور شامل هزینه سوخت و هزینه آثار خارجی می‌باشد، در حالی که سهم عمده هزینه نیروگاه‌های زمین‌گرمایی شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است.

نمودار(۳): هزینه تمام شده برق

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول(۷): سهم هزینه سوخت و آثار خارجی از هزینه تمام شده واقعی نیروگاه‌های مورد بررسی

هزینه / نوع نیروگاه	زمین‌گرمایی(٪)	بخاری(٪)	گازی(٪)	سیکل‌ترکیبی(٪)
سوخت	–	۳۵.۸	۵۴.۳	۵۸.۸
آثار خارجی	۳.۶	۴۸.۷	۳۳.۲	۲۷.۷
سرمایه‌گذاری اولیه	۶۹.۶	۱۳.۳	۱۰.۶	۱۱.۸
تعمیرات و نگهداری	۲۶.۷	۲.۰	۱.۷	۱.۷

منبع: یافته‌های پژوهش

بررسی نتایج در شرایط خارج از چارچوب مفروض بر این پژوهش(هزینه تمام شده واقعی) به تبیین نتایج کمک خواهد کرد. بر این اساس در جدول(۸) سایر حالت‌های قیمت سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی ملاحظه می‌شود. سناریو۱: هزینه تمام شده واقعی برق است که قیمت صادراتی سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی را در محاسبات در نظر گرفته است. سناریو۴: هزینه تمام شده غیرِ واقعی برق است که شرایط فعلی حاکم بر صنعت برق ایران را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که سوخت با سوبسید به نیروگاه‌ها عرضه شده و به هزینه‌های آلایندگی در هزینه تمام شده برق توجه نمی‌شود. سناریو۳ گامی مهم به سمت پیشرفت در صنعت برق ایران است که با وجود اینکه قیمت سوخت سوبسیدی می‌باشد، امّا هزینه‌های اجتماعی در هزینه تمام شده برق در نظر گرفته می‌شود. سناریو۲ را می‌توان گامی بلند به سمت پیشرفت در صنعت برق ایران دانست، که با وجود اینکه هزینه‌های آلایندگی در محاسبات قید نشده، اما از مزیت آزادسازی قیمت‌های سوخت برخوردار می‌باشد. سناریو۱ گامی ایده‌آل به سمت پیشرفت در صنعت برق ایران تلقی می‌شود که هم اکنون در کشورهای توسعه‌یافته حاکم است. به‌طوری که علاوه بر آزادسازی قیمت‌های انرژی، هزینه‌های اجتماعی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جدول(۸): هزینه تمام شده برق و رتبه‌بندی (از کمترین به بیشترین) تحت سناریوهای قیمت سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی

نوع نیروگاه/ سناریو	سناریو۱ [a]		سناریو۲ [b]		سناریو۳ [c]		سناریو۴ [d]	
	هزینه تمام شده	رتبه‌بندی	هزینه تمام شده	رتبه‌بندی	هزینه تمام شده	رتبه‌بندی	هزینه تمام شده	رتبه‌بندی
زمین گرمایی	۵/۲۳	۱	۵/۰۵	۲	۵/۲۳	۳	۵/۰۵	۴
بخاری	۱۰/۷۲	۴	۵/۴۹	۳	۷/۸۴	۴	۲/۶۱	۳
گازی	۸/۳۰	۳	۵/۵۴	۴	۴/۹۱	۲	۲/۱۵	۲
سیکل ترکیبی	۶/۵۳	۲	۴/۷۲	۱	۳/۶۵	۱	۱/۸۴	۱

[a] سناریو۱ : قیمت صادراتی سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی(فرض این پژوهش: هزینه تمام شده واقعی برق)

[b] سناریو۲ : قیمت صادراتی سوخت و عدم ملاحظات زیست‌محیطی

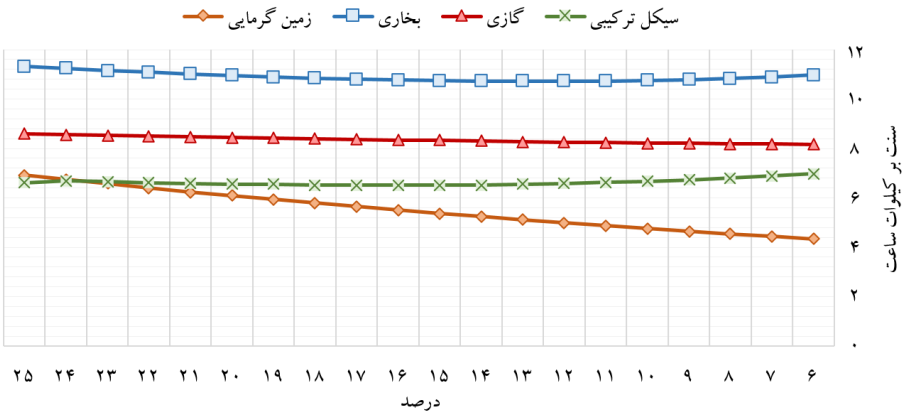
[c] سناریو۳ : قیمت فعلی سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی

[d]سناریو۴ : قیمت فعلی سوخت و عدم ملاحظات زیست‌محیطی(وضعیت کنونی: هزینه تمام شده غیر واقعی برق)

منبع: یافته‌های پژوهش

مطابق بررسی نتایج جدول(۸) مشاهده می‌شود که هر چه محاسبه هزینه تمام شده برق به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر باشد(سناریو۱)، صنعت برق زمین‌گرمایی از شرایط بهتری برخوردار می‌شود و بالعکس، ادامه وضعیت کنونی(سناریو۴) به توسعه نیروگاه‌های فسیلی می‌انجامد.

حساسیت هزینه تمام شده واقعی(سناریو ۱) نسبت به نرخ تنزیل مطابق نمودار(۴) ارائه شده است. تغییر نرخ تنزیل در اولویت احداث نیروگاه‌ها مؤثر می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود؛ در نرخ تنزیل ۲۴ درصد هزینه تمام شده نیروگاه زمین‌گرمایی و سیکل ترکیبی برابرند و به ازای نرخ تنزیل کمتر از ۲۴ درصد، نیروگاه زمین‌گرمایی دارای کمترین هزینه تمام شده می‌باشد، اما در نرخ تنزیل‌های بیش از ۲۴ درصد، نیروگاه سیکل ترکیبی کمترین هزینه تمام شده را به خود اختصاص می‌دهد.

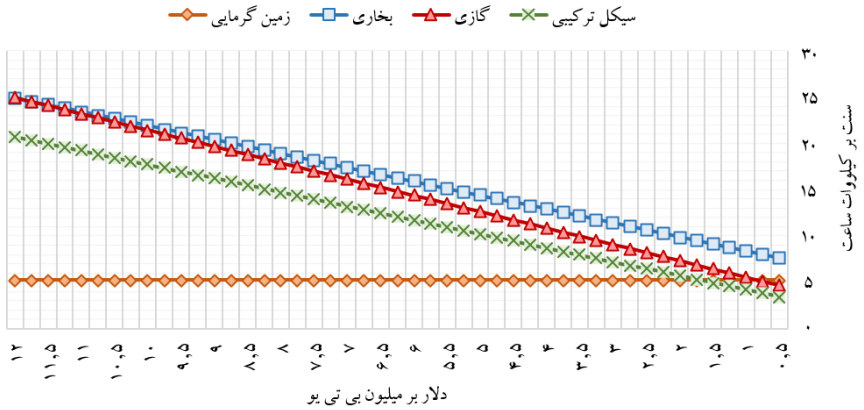


نمودار(٤): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به نرخ تنزیل

منبع: یافته‌های پژوهش

حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به قیمت سوخت(گاز طبیعی) بسیار مهم و حائز اهمیت است و در تعیین اولویت اقتصادی احداث نیروگاه بسیار مؤثر می‌باشد. مطابق

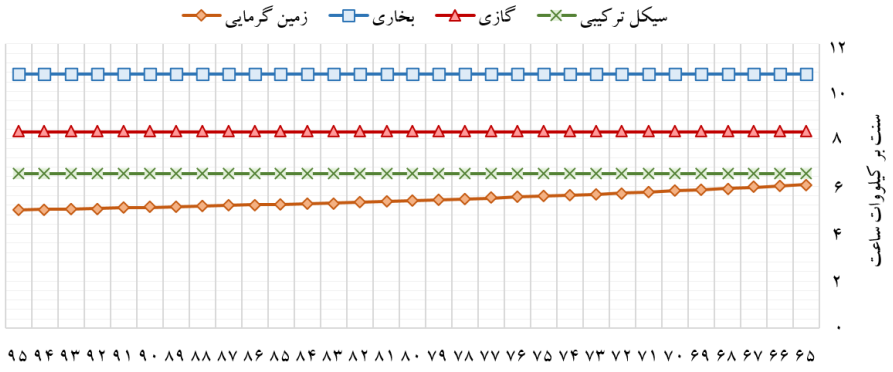
نمودار(۵) به ازای قیمت‌های بیشتر از ۱.۷۵ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو(۶.۱۷ سنت بر مترمکعب گاز) نیروگاه زمین گرمایی مقرون به‌صرفه است، اما در قیمت‌های کمتر از ۱.۷۵ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو احداث نیروگاه سیکل ترکیبی در اولویت می‌باشد.



نمودار(۵): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به قیمت گاز طبیعی

منبع: یافته‌های پژوهش

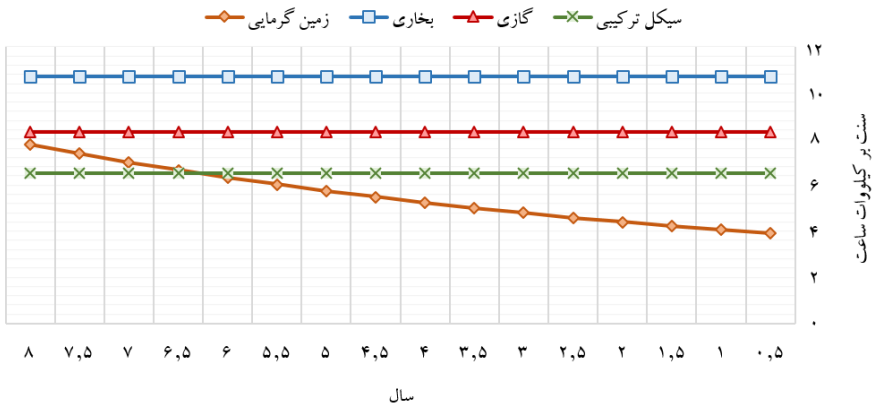
ضریب ظرفیت اکثر نیروگاه‌های زمین گرمایی در جهان در حدود ۷۰- ۹۵ درصد می‌باشد، مطابق نمودار(۶) حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به ضریب ظرفیت نیروگاه زمین گرمایی تأثیری بر جابجایی اولویت‌ها نداشته است.



نمودار(٦): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به ضریب ظرفیت نیروگاه زمین‌گرمایی

منبع: یافته‌های پژوهش

حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به مدت‌زمان ساخت نیروگاه زمین‌گرمایی مطابق نمودار(۷) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود؛ اگر احداث نیروگاه بیشتر از ۶/۵ سال به طول بیانجامد، استحصال برق از انرژی زمین‌گرمایی مقرون به‌صرفه نمی‌باشد.



نمودار(۷): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به مدت‌زمان ساخت نیروگاه زمین‌گرمایی

منبع: یافته‌های پژوهش

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یارانه‌های انرژی و عدم توجه به خسارت آلاینده‌های نیروگاهی، مهم‌ترین عوامل عدم توسعه صنعت برق تجدیدپذیر می‌باشند. آزادسازی قیمت انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی موجب می‌شود تا برق با بهای واقعی به مصرف‌کنندگان عرضه شود و مقدار بهینه تقاضای برق مشخص گردد. در این شرایط مقایسه هزینه تمام شده برق نیروگاه‌های تجدیدپذیر با نیروگاه‌های فسیلی منصفانه می‌باشد. محاسبه هزینه تمام شده واقعی برق نشان می‌دهد که نیروگاه زمین‌گرمایی نسبت به سایر روش‌های متداول تولید برق در ایران رقابت‌پذیر است. سهم عمده هزینه تمام شده واقعی نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی که متداول‌ترین روش‌های تولید برق در ایران هستند، شامل هزینه سوخت و هزینه

آلایندگی است، این در حالی است که هزینه سرمایه‌گذاری بخش عمده هزینه تمام شده واقعی برق زمین‌گرمایی را تشکیل می‌دهد. حفظ برتری اقتصادی برق زمین‌گرمایی نسبت به سایر روش‌های متداول تولید برق در ایران وابسته به پارامترهای فنی- اقتصادی، بازار انرژی و کلان اقتصادی است؛ به‌طوری که اگر هر یک از شرایط ذیل مهیّا نباشد؛ جایگاه اقتصادی خود را از دست می‌دهد.

۱) نرخ تنزیل بیشتر از ۲۴ درصد

۲) قیمت‌های کمتر از ۶/۱۷ سنت بر مترمکعب گاز طبیعی صادراتی

۳) مدت‌زمان احداث بیشتر از ۶/۵ سال

تجزیه و تحلیل داده‌ها بیانگر آن است که با ادامه روندی کنونی در محاسبه هزینه تمام شده برق در ایران، نیروگاه‌های فسیلی توسعه می‌یابند و اگر صنعت برق هر یک از گام‌های ملاحظات زیست‌محیطی و قیمت واقعی سوخت را بردارد؛ توسعه صنعت برق تجدیدپذیر همچون برق زمین‌گرمایی از وضعیت مطلوب‌تری برخوردار خواهد شد. با توسعه برق زمین‌گرمایی، تولید کارآمد و محیط‌زیست محفوظ می‌ماند و امکان ایجاد ارزش‌افزوده و صادرات منابع فسیلی مهیّا می‌گردد.

٦- توصیه‌های سیاستی

بر اساس مطالعه حاضر هر چند تاکنون به فرضیه پژوهش پاسخ داده شده است، با این وجود، توجه به موارد ذیل را می‌توان از یافته‌های پژوهش مستخرج و با عنوان توصیه‌های سیاستی ارائه نمود:

الف) حفظ سیاست فعلی در محاسبه هزینه تمام شده برق در ایران یعنی قیمت سوخت یارانه‌ای و لحاظ ننمودن هزینه آثار خارجی، نیروگاه سیکل‌ترکیبی را در اولویت تولید برق قرار می‌دهد، در این صورت هزینه تمام شده برق تولید شده از نیروگاه سیکل ترکیبی با اختلافی محسوس، ارزان‌تر از برق زمین‌گرمایی خواهد بود(۳/۲۱ سنت بر هر کیلووات ساعت ارزان‌تر) و استحصال برق از انرژی زمین‌گرمایی از لحاظ اقتصادی در اولویت آخر

قرار می‌گیرد.

ب) در نظر گرفتن هزینه آثار خارجی در هزینه تمام شده برق را می‌توان گامی مهم در پیشرفت صنعت برق ایران دانست، اگر چه در این وضعیت کماکان برق تولید شده از نیروگاه سیکل ترکیبی در اولویت اقتصادی قرار دارد اما برق زمین‌گرمایی نسبت به وضعیت کنونی رقابت‌پذیرتر می‌شود و اختلاف هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی با نیروگاه سیکل‌ترکیبی به ۱/۵۸ سنت بر کیلووات ساعت تقلیل می‌یابد. لازم به ذکر است در این شرایط، تولید برق از نیروگاه زمین‌گرمایی در اولویت نسبت به نیروگاه بخاری قرار می‌گیرد.

ج) آزادسازی قیمت سوخت را می‌توان گامی بلند در پیشرفت صنعت برق ایران تلقی نمود، در این وضعیت هزینه تمام شده برق زمین‌گرمایی تفاوتی اندک با برق تولید شده از نیروگاه سیکل‌ترکیبی خواهد داشت و تولید برق از نیروگاه‌های بخاری و گازی در اولویت بعد از نیروگاه زمین‌گرمایی قرار می‌گیرند.

د) در نظر گرفتن هزینه آثار خارجی و هزینه صادراتی سوخت در هزینه تمام شده برق، گامی ایده آل در پیشرفت صنعت برق در ایران است. در این وضعیت استحصال برق از انرژی زمین‌گرمایی در اولویت برتر اقتصادی قرار دارد، به‌طوری که برق زمین‌گرمایی با اختلافی محسوس، ارزان‌تر از برق تولید شده از نیروگاه سیکل‌ترکیبی است.(۱/۳ سنت بر کیلووات ساعت ارزان‌تر)

۷- منابع

الف) فارسی

اسکونژاد، محمدمهدی(۱۳۸۹)، *اقتصاد مهندسی: اقتصاد مهندسی یا ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)، ص ۱۱۱ و ۱۳۹.

امینی، امیر، فلقی، حمید و رمضانی. مریم(۱۳۹۲)، توزیع بار بین نیروگاه‌ها به‌منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و آلاینده‌های زیست‌محیطی، *نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و*

مدیریت انرژی، سال سوّم، شماره ۱، ص ۲-۱۵.

بلوریان، امیرحسین، سیدحسینی، سید محمد و جلالی مجیدی، محسن(۱۳۹۳)، ارزیابی انرژی زمین‌گرمایی در مقایسه با انرژی باد و سایر نیروگاه‌های تجدید پذیر، اولین همایش مدیریت انرژی‌های نو و پاک، همدان: دانشگاه شهید مفتح، ص ۱-۱۳.

خسروی، خسرو(۱۳۷۶)، ارزیابی فنی اقتصادی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران: وزارت نیرو، ص ۱-۷.

سازمان انرژی‌های نو ایران(سانا)(۱۳۹۱)، معاونت فنی و اجرایی، دفتر انرژی زمین‌گرمایی ، اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی سال ۱۳۸۹.

شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت برنامه‌ریزی، دفتر برنامه‌ریزی تولید (۱۳۸۵)، اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی کشور .

طاهری فرد، علی و شهاب، مرضیه(۱۳۸۹)، جنبه فنی- اقتصادی نیروگاه زمین‌گرمایی مشکین‌شهر، *فصلنامه اقتصاد انرژی ایران(انجمن اقتصاد انرژی ایران)*، سال ششم، شماره ۱۲۵و۱۲۶، ص ۳۱- ۳۹.

مجیدیان، داوود(۱۳۷۶)، *ارزیابی طرح‌های صنعتی*، انتشارات سازمان مدیریت صنعتی، تهران، ص ۱۸۶.

محمودی، سعید، برهمندپور، همایون و حیدری، کیومرث(۱۳۹۴)، تعیین قیمت تمام شده برق بر اساس الگوریتم پیشنهادی LCOE منطبق با تکنولوژی‌های مختلف و مطالعه موردی آن در ایران، سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران: پژوهشگاه وزارت نیرو، ص ۱-۷.

مطهری، سید علی اکبر، احمدیان، مجید، عابدی، زهرا و غفارزاده، حمیدرضا(۱۳۹۳)، ارزیابی اقتصادی بهره‌گیری از نیروگاه‌های بادی در ایران با در نظر گرفتن اثر سیاست آزادسازی قیمت انرژی، *پژوهشنامه علمی-پژوهشی اقتصاد انرژی ایران*، سال سوم، شماره ۱۰، ص ۱۷۹-۲۰۰.

مقدّس تفرشی، سیّد مسعود (۱۳۹۳)، *منابع تولید انرژی در قرن بیست و یکم*، تهران: دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، ویرایش دوم، ص ۵۵۰-۵۵۲.

وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی(۱۳۹۰)، طرح‌ریزی ساختار عرضه انرژی الکتریکی و تنظیم پایگاه اطلاعات مورد نیاز.

وزارت نیرو، شرکت مادر تخصصی توانیر (۱۳۹۲)، آمار تفضیلی صنعت برق ایران سال ۱۳۹۰.

وزارت نیرو، معاونت برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان بـرق و انـرژی (۱۳۹۵)، ترازنامـه انرژی سال ۱۳۹۳.

ب) انگلیسی

El-Kordy, M. N., Badr, M. A., Abed, K. A., and Ibrahim, S. M (2002), "Economical evaluation of electricity generation considering externalities", *Renewable Energy*, Vol. 25, Issue. 2, pp. 317-328.

International Renewable Energy Agency(IRENA) (2014), "Renewable Energy Generation Costs in 2014", pp. 30-141.

Kost, C., Mayer, J. N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., ... and Schlegl, T, (2013), "Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

Kovacevic, V., and Wesseler, J (2010), "Cost-Effectiveness Analysis of Algae Energy Production in the EU", *Energy Policy*, Vol. 38, Issue. 10, pp. 5749-5757.

Mousavi, S. M., Ghanbarabadi, M., and Moghadam, N (2012) "The Competitiveness of Wind Power Compared to Existing Methods of Electricity Generation in Iran", *Energy Policy*, Vol. 42, pp. 651-656.

Roth, I. F., and Ambs, L. L (2004), "Incorporating Externalities into a Full Cost Approach to Electric Power Generation Life-Cycle Costing", *Energy*, Vol. 29, Issue. 12 , pp. 2125-2144.

Sener, A. C. Van Dorp, J. R., & Keith, J. D (2009), "Perspectives on the Economics of Geothermal Power", GRC Transactions, 33.

World Bank (2009), "Environmental Cost Evaluation for Iran Power Generation Sector", The Report was Provided to Iran Ministry of Energy.

Yousefi, H., Ehara, S., and Noorollahi, Y (2007), "Geothermal Potential Site Selection Using GIS in Iran", In Proceedings of the 32nd workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California, pp. 174-182.