

## رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش های متداول تولید برق در ایران

فریبا اسدی<sup>۱</sup>، محمدحسین کریم<sup>۲</sup>، مجید فشاری<sup>۳</sup>

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

چکیده:

با وجود پتانسیل بالای انرژی زمین گرمایی در ایران، تنها ۱۰۰ مگاوات برق زمین گرمایی در سال ۱۳۹۶ بهره برداری خواهد شد، زیرا هزینه سوخت که حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد هزینه تمام شده مرسوم (غیر واقعی) نیروگاه های حرارتی را تشکیل می دهد، یارانه های بالایی در چند سال اخیر به آن اختصاص یافته است و هزینه آثار خارجی در هزینه تمام شده برق لحاظ نمی شود. در این پژوهش برآیند تمام شده واقعی برق زمین گرمایی را به تفکیک اجزاء با نیروگاه های متداول در ایران مقایسه نماییم. روش هزینه همتراز شده شامل هزینه های سرمایه گذاری، تعمیرات و نگهداری، سوخت و آلایندگی هر یک از فناوری های تولید برق می باشد. مقایسه هزینه های تمام شده برق مفروض بر قیمت صادراتی سوخت و هزینه آثار خارجی نشان می دهد که ضریب ظرفیت بالا، عدم نیاز به سوخت های فسیلی و هزینه آلایندگی ناچیز، نیروگاه های زمین گرمایی را با سایر نیروگاه های مرسوم در ایران رقابت پذیر می سازد، در حالی که مقایسه هزینه تمام شده برق مفروض بر قیمت فعلی سوخت و عدم ملاحظات زیست محیطی نشان می دهد که نیروگاه زمین گرمایی در مقایسه با سایر نیروگاه های متداول در اولویت آخر اقتصادی قرار دارد. این پژوهش پیشنهاد می دهد که آزادسازی قیمت تمام شده انرژی و لحاظ هزینه آثار خارجی، اثر قابل توجهی بر توسعه صنعت برق زمین گرمایی در ایران دارد و امکان صادرات بیشتر گاز طبیعی را فراهم می آورد.

واژه های کلیدی: برق زمین گرمایی، آزادسازی قیمت انرژی، رقابت پذیری، هزینه همتراز شده برق

طبقه بندی JEL: Q29، Q39، Q48، D61

۱- مقدمه

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های اجتماعی- اقتصادی دانشگاه خوارزمی تهران (مستخرج از پایان نامه) (نویسنده مسئول)

Email: Asadif47@gmail.com

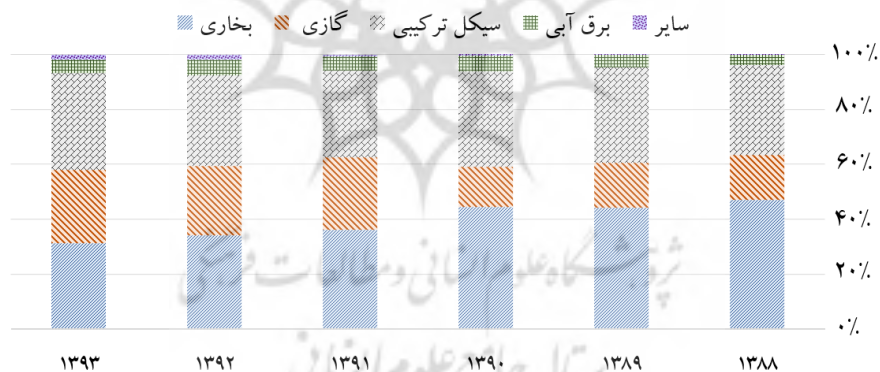
۲. دانشیار اقتصاد، عضو هیئت علمی دانشگاه خوارزمی تهران

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 اقتصاد انرژی‌های تجدیدپذیر هنوز بزرگ‌ترین مانع بکارگیری آن در ایران است (موسوی و همکاران، ۲۰۱۲). در ایران، مطابق اطلس زمین‌گرایی پتانسیل بالایی جهت استحصال برق زمین‌گرایی وجود دارد (یوسفی و همکاران، ۲۰۰۷)؛ با این وجود، صنعت برق تجدیدپذیر همچون برق زمین‌گرایی 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 متکی بوده است که بزرگ‌ترین خطر در امنیت انرژی تلقی 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، نفت کوره و نفت گاز 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)

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش های متداول تولید برق ۳

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

سال/نوع سوخت	نفت گاز (میلیون لیتر)	نفت کوره (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 نیروگاه ها و قیمت پایین برق در ایران بترتیب موجب افزایش نرخ رشد تولید و مصرف برق شده است، در نتیجه آلاینده گی نیروگاه ها روندی رو به رشد داشته است. هزینه آثار خارجی هر یک از نیروگاه های حرارتی بر اساس مطالعه بانک جهانی در جدول (۲) ارائه شده است. در نظر گرفتن هزینه آثار خارجی<sup>۱</sup> در قیمت تمام شده برق، از مهمترین استراتژی های اتخاذ شده توسط کشورهای توسعه یافته جهت کنترل آلاینده های نیروگاهی می باشد (امینی و همکاران، ۱۳۹۲). مطابق نمودار (۲) میزان انتشار گاز گلخانه ای دی اکسید کربن از بخش نیروگاهی در چند سال اخیر روند رو به رشدی داشته است. محاسبه هزینه تمام شده واقعی برق، مستلزم در نظر گرفتن قیمت های صادراتی سوخت و لحاظ هزینه های آثار خارجی می باشد، در این شرایط مقایسه هزینه تمام شده برق زمین گرمایی با سایر نیروگاه های متداول در کشور منصفانه است. این پژوهش تلاش دارد به این پرسش اساسی پاسخ دهد که آیا «استحصال برق از انرژی زمین گرمایی با آزادسازی قیمت سوخت و لحاظ هزینه آثار خارجی از منظر اقتصادی توجیه پذیر است یا خیر». بدین منظور به مقایسه هزینه تمام شده واقعی تولید برق نیروگاه زمین گرمایی با نیروگاه های

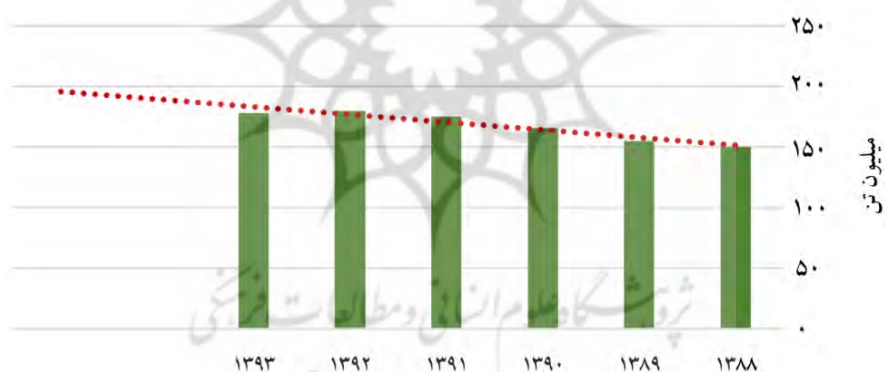
1. Externality Costs

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 زمین‌گرمایی 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 <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	PM	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	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<sub>2</sub>) 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 زمین‌گرمایی و مقایسه آن با سایر نیروگاه‌های متداول در کشور است. هزینه همتراز شده برق شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری، سوخت و آثار خارجی می‌باشد که الگوریتمی رایج و متداول برای

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش های متداول تولید برق ۵

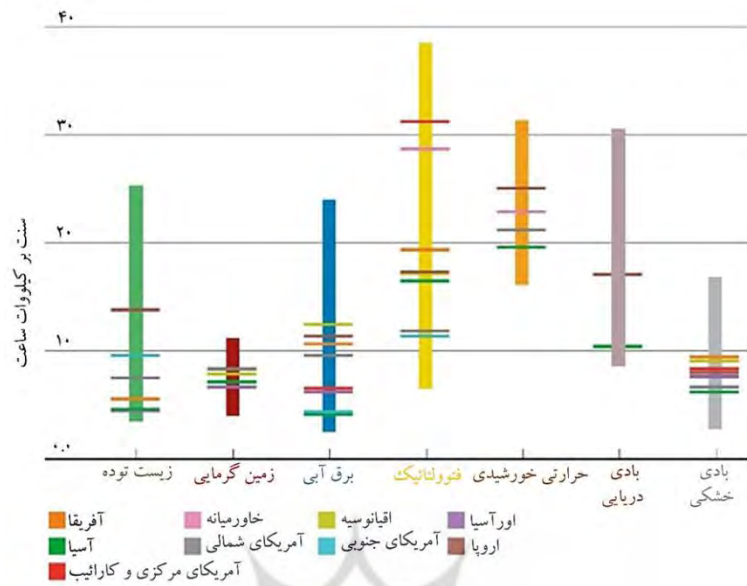
محاسبه هزینه تمام شده برق نیروگاه ها در جهان است، در نتیجه امکان مقایسه تفکیک هزینه ها و در نهایت تمیز هزینه تمام شده برق از فناوری های مختلف را میسر می سازد. تصمیم گیری درباره بکارگیری نوع فناوری تولید برق بر اساس هزینه های تولید اتخاذ می شود (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ مطهری و همکاران، ۱۳۹۳)، لذا مطالعات خارجی بسیاری تمایز هزینه های تولید برق از فناوری های مختلف را مورد بررسی قرار داده اند. (کوویک و وسلر<sup>۱</sup> (۲۰۱۰)، ال کوردی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۲)، آژانس بین المللی انرژی های تجدیدپذیر<sup>۳</sup> (۲۰۱۴)، راس و امبس<sup>۴</sup> (۲۰۰۴) و سنر و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۹)) در این مطالعات از روش های مختلف ارزیابی اقتصادی نظیر تحلیل طول عمر مفید (LCA<sup>۶</sup>) و هزینه همتراز شده برق (LCOE<sup>۷</sup>) جهت مقایسه هزینه تولید برق نیروگاه ها با یکدیگر استفاده شده است.

کوویک و وسلر (۲۰۱۰) به تحلیل هزینه های خصوصی تولید انرژی از منابع زیست توده در سیاست انرژی اروپا پرداخته اند. آن ها سه فناوری بیودیزل های جلبکی، بیودیزل های کلزایی و سوخت های فسیلی در بخش حمل و نقل اتحادیه ۲۵- اروپا را مورد مقایسه قرار داده اند. آن ها با تحلیل هزینه ها نشان دادند که بیودیزل های جلبکی تحت شرایط خاص قابل رقابت با روش های دیگر می باشند. ال کوردی و همکاران (۲۰۰۲)، تحلیل طول عمر مفید (LCA) برای تولید برق توسط سیستم های مرسوم و تجدیدپذیر را در کشور مصر مورد مطالعه قرار داده اند. در این پژوهش به منظور رقابت مبدل های انرژی خورشیدی و بادی با سیستم های متداول تولید برق، هزینه آثار خارجی لحاظ شده است. نتایج حاکی از آن بود که با گذشت زمان استانداردهای زیست محیطی تقویت، مخازن فسیلی تقلیل و هزینه های سیستم های متداول افزایش می یابند، در نتیجه نیروگاه های تجدیدپذیر قابلیت رقابت پذیری با نیروگاه های 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)

کرد. آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر (۲۰۱۴)، هزینه همتراز شده تکنولوژی‌های تولید برق را در نواحی مختلف جهان مورد بررسی قرار داده است. در این گزارش میانگین هزینه همتراز شده برق زمین گرمایی در سال ۲۰۱۴ در نواحی مختلف جهان حدود ۷ سنت بر کیلووات ساعت می‌باشد که نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی در وضعیتی مطلوب‌تری قرار دارد. ذکر این نکته ضروری است که برق زمین گرمایی به دلیل عدم نیاز به سوخت و آلاینده‌گی ناچیز، سهم هزینه سوخت و هزینه آثار خارجی آن در هزینه تمام شده برق واقعی اندک است، بنابراین اختلاف محسوسی میان هزینه تمام شده غیر واقعی (مرسوم) و هزینه تمام شده واقعی برق زمین گرمایی وجود ندارد. اما در نیروگاه‌های حرارتی سهم عمده هزینه‌های تمام شده واقعی برق، هزینه سوخت و آلاینده‌گی است و با توجه به سیاست کشورهای مختلف جهان در پرداخت یارانه به سوخت نیروگاه‌ها و عدم لحاظ هزینه آثار خارجی، هزینه تمام شده واقعی برق نیروگاه‌های حرارتی متفاوت می‌باشد از این حیث مقایسه هزینه تمام شده واقعی برق زمین گرمایی با برق نیروگاه‌های حرارتی در مقتضیات مکانی و زمانی مختلف، حائز اهمیت است و هر ساله هزینه تمام شده تکنولوژی‌های مختلف تولید برق در نقاط مختلف جهان، توسط مراکز و سازمان‌های بین‌المللی همچون آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، اداره اطلاعات انرژی آمریکا، آژانس بین‌المللی انرژی و ... گزارش می‌شود. در نتایج شکل (۱) و (۲)، هزینه آثار خارجی از قبیل هزینه آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای لحاظ نشده است. با در نظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی در هزینه همتراز شده برق، هزینه‌های تولید برق نیروگاه‌های فسیلی افزایش خواهد یافت و برق زمین گرمایی رقابتی تنگاتنگ با نیروگاه‌های حرارتی پیدا خواهد کرد.

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش های متداول تولید برق ۷



شکل (۱): هزینه تمام شده تولید برق فناوری های تجدیدپذیر  
منبع: آژانس بین المللی انرژی های تجدیدپذیر، ۲۰۱۴



شکل (۲): هزینه تمام شده برق زمین گرمایی در مقایسه با برق نیروگاه های فسیلی  
منبع: آژانس بین المللی انرژی های تجدیدپذیر، ۲۰۱۴

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؛ به طوری که نتایج نشان‌دهنده توجیه اقتصادی نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌باشد. سنر و همکاران (۲۰۰۹)، چشم‌انداز اقتصادی برق زمین گرمایی 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 زمین گرمایی (SGCM) برای مقایسه هزینه همتراز شده با سطوح قیمت‌های گذشته و انتظارات آینده استفاده گردید و هزینه همتراز شده برق زمین گرمایی در بازه ۶/۸ - ۱۱/۸ سنت بر کیلووات ساعت محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه برق زمین گرمایی به حد بالای قیمت‌های گاز طبیعی وابسته می‌باشد و زمانی که قیمت گاز طبیعی با نوسانات شدیدی روبرو بوده سرمایه‌گذاری در برق زمین گرمایی جذاب‌تر شده است.

بررسی مطالعات داخلی در زمینه نیروگاه‌های زمین گرمایی 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 مقدس تفرشی (۱۳۹۳)) در این مطالعات عموماً هزینه تمام شده برق زمین گرمایی محاسبه و با سایر نیروگاه‌های متداول در کشور مقایسه شده است.

خسروی (۱۳۷۶) در مقاله «ارزیابی فنی-اقتصادی نیروگاه‌های زمین گرمایی» با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در هزینه تولید برق، نیروگاه‌های زمین گرمایی 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 زمین گرمایی 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.



رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش های متداول تولید برق ۹

طاهری فرد و شهاب (۱۳۸۹) جنبه های فنی - اقتصادی تولید برق زمین گرمایی را به صورت مطالعه موردی در منطقه مشکین شهر مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش هزینه های ثابت و عملیاتی تولید برق زمین گرمایی مشکین شهر 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 نمودن مؤلفه های فنی مؤثر بر هزینه مانند ضریب ظرفیت، مدت زمان دسترسی در سال، مدت زمان ساخت و نرخ تنزیل سبب شده تا هزینه تمام شده تولید برق زمین گرمایی مشکین شهر در شرایط واقعی محاسبه نشود. از آنجا که نیروگاه مشکین شهر هنوز به بهره برداری نرسیده است و داده های ورودی متقن نمی باشند؛ بنابراین بررسی حساسیت های هزینه تمام شده نسبت به متغیرهای فنی امری مهم و ضروری تلقی می شود. بلوریان و همکاران (۱۳۹۳) و مقدس تفرشی (۱۳۹۳) هزینه تمام شده برق نیروگاه های زمین گرمایی را با نیروگاه های 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 کرده اند. نتایج نشان می دهد که در سناریو عدم لحاظ افزایش قیمت جهانی سوخت، در صورتی که قیمت سوخت بر اساس سوخت صادراتی محاسبه شود، نیروگاه زمین گرمایی در نرخ تنزیل ۶ درصد مقرون به صرفه تر می باشد. در سناریو اعمال افزایش یک درصدی قیمت سوخت، هزینه تمام شده نیروگاه زمین گرمایی در دو نرخ تنزیل ۶ و ۸ درصد کمتر از نیروگاه بخاری است. همچنین در مقایسه هزینه تمام شده برق زمین گرمایی با سایر انرژی های تجدیدپذیر همچون انرژی بادی، نیروگاه زمین گرمایی مقرون به صرفه تر می باشد، به طوری که هزینه تمام شده برق از تکنولوژی های هسته ای پیشرفته، خورشیدی فتوولتائیک، زمین گرمایی باینری، زمین گرمایی دو فازی، برق آبی 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<sup>۱</sup> و کتابخانه ملی<sup>۲</sup> 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 تکنولوژی‌های 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 سیاست‌ها بدست آورند و در صورت نیاز نسبت به بازبینی و اصلاح سیاست‌های موجود اقدام نمایند.

### ۳- روش شناسی 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>

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۱۱

### 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 از جمله 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)

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

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

### ۳-۱-۲- روش نرخ بازدهی داخلی

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

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

نرخ بازدهی بدست آمده با حداقل نرخ جذب کننده یا حداقل نرخ قابل انتظار (MARR) مقایسه و سپس توجیه یا عدم توجیه اقتصادی طرح تعیین می گردد.

### ۳-۱-۳- روش هزینه همتراز شده برق

در روش هزینه همتراز شده، رویکرد مشابه ارزش فعلی استفاده می شود. در این روش هزینه ها به پرداخت سالیانه یکنواخت تبدیل می شوند. به بیان دیگر هزینه همتراز شده میزان ثابت درآمد به ازای فروش یک واحد محصول است که می تواند تمام مخارج پروژه را در طول عمر خدماتی پوشش دهد. هزینه یکنواخت یا همتراز شده، روشی مبتنی بر محاسبه ارزش فعلی هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری تولید برق در کل دوره عمر پروژه می باشد که در آن تولید یک کیلووات ساعت برق از تقسیم ارزش فعلی کل هزینه های انجام شده بر کل برق تولیدی محاسبه می شود. رابطه (۳) تا (۷)، معادله این شاخص را نشان می دهد.

$$LCOE = C_k + \left[ \sum_{t=1}^{PL} \frac{C_{O\&M} \times (1+e_{O\&M})^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^{PL} \frac{C_{Fuel} \times (1+e_{Fuel})^t}{(1+r)^t} \right] \times \frac{r(1+r)^{PL}}{(1+r)^{PL} - 1} + C_{EC} \quad (3)$$

$$C_K = \frac{DR \times TPC (1+r)^{CL}}{HY \times CF} \quad (4)$$

$$C_{O\&M} = \frac{FOM}{HY \times CF} + VOM \quad (5)$$

$$C_{Fuel} = FC \times HR \quad (6)$$

$$C_{EC} = EF \times HR \times VED \quad (7)$$

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۱۳

جدول (۳): تعریف پارامترهای معادله هزینه همتراز شده

متغیر	واحد اندازه گیری	نام لاتین	نام فارسی
$C_K$	\$/KWh	Capital Cost	هزینه سرمایه گذاری
DR	%	Depreciation Rate	نرخ استهلاک
TPC	\$/KW	Total Plant Cost	کل هزینه ساخت
CL	Year	Construction Life	مدت زمان 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، ص ۶۵۳؛ راس و همکاران، ۲۰۰۴، ص ۲۱۲۷

۱. راس و همکاران (۲۰۰۴) از شاخص LCOE برای مقایسه رقابت پذیری 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 سیکل ترکیبی با نیروگاه زمین گرمایی استفاده کرد.

مطابق روابط فوق، هزینه‌ها به هزینه‌ی سال جاری منتقل شده 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 تحمیل شده 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 محیط زیست است. فاکتور آلودگی (EF) و نرخ حرارتی (HR) مقادیر فیزیکی بوده که قابل محاسبه می‌باشند، در حالی که VED را می‌توان با برآورد مستقیم هزینه یا کاهش هزینه‌ها یا ترکیب آن‌ها محاسبه نمود. VED پارامتر مهمی برای تحلیل قوانین تنظیم کننده می‌باشد؛ اما محاسبه آن دشوار است. هزینه آثار خارجی در واحد برق تولید شده با استفاده از این عوامل و وارد کردن آن‌ها در فرمول LCOE به طور مستقیم محاسبه می‌گردد. همان گونه که در رابطه بالا دیده می‌شود، LCOE را می‌توان بر پایه مجموع هزینه‌های سرمایه گذاری، تعمیرات و نگهداری، هزینه سوخت و اثرات خارجی مشخص کرد. از آنجا که LCOE معیار اندازه گیری هزینه تولید برق در چرخه عمر نیروگاه است، بر این اساس می‌بایست تمام هزینه‌ها را در محاسبه هزینه نهایی<sup>۱</sup> 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.

### ۳-۱-۴- مقایسه روش‌ها و انتخاب روش نهایی

پروژه‌های تولید برق از تکنولوژی‌های مختلف نسبت به هم ناسازگارند<sup>۲</sup> به عبارتی اگر یک تکنولوژی انتخاب شود، فناوری دیگر حذف می‌شود. از دیدگاه دولت و سرمایه گذار

1. Marginal Cost

2. Mutually Exclusive

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۱۵

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 زمین گرمایی است، از روش‌های ارزش حال خالص و نرخ بازده داخلی استفاده نشده است. در این حالت استفاده از روش هزینه همتراز شده دارای مزیت می‌باشد، 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 همتراز شده نیز عمر مشترک یا کوچک‌ترین مضرب مشترک عمر چند پروژه در نظر گرفته می‌شود، اما 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، مدت‌زمان دسترسی در سال، نوسانات قیمت سوخت و نوسانات هزینه تعمیرات و نگهداری در شاخص هزینه همتراز شده میسر می‌باشد.

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

هستیم (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۳-۲- داده‌ها و مفروضات پژوهش

در این پژوهش جهت تعیین جایگاه و اهمیت اقتصادی برق زمین گرمایی در ایران، هزینه تمام شده واقعی برق نیروگاه زمین گرمایی با نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی مقایسه می‌شود. (نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی 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 نفت کوره و نفت گاز بهره می‌برد. در نتیجه برای محاسبه هزینه همتراز شده 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.<sup>۱</sup> نرخ تنزیل با توجه به نرخ تورم عمومی و شرایط اقتصادی کشور در سال‌های گذشته و با استفاده از اطلاعات میدانی از تحلیل گران 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 زمین گرمایی در ایران به بهره‌برداری نرسیده است، شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای برق زمین گرمایی 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



رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۱۷

حاصل ضرب 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 سیکل ترکیبی) و زمین گرمایی در ایران قابل محاسبه است. سایر مشخصات فنی - اقتصادی نیروگاه‌های بخاری، گازی، سیکل ترکیبی و زمین گرمایی مطابق جدول (۶)، از گزارش سال ۱۳۹۰ دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو گردآوری و داده‌های مربوط به نرخ استهلاك آن به روش خط مستقیم یا اقساط مساوی برآورد شده است.

جدول (۴): شاخص انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای نیروگاه‌های کشور برحسب

گرم بر کیلووات ساعت

NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	نوع نیروگاه فسیلی
۳/۲۵۲	۹/۵۵۸	۰/۲۳۷	۱۲۰۷/۳۵۰	۰/۰۳۲	بخاری
۳/۵۳۸	۰/۹۱۷	۰/۱۹۲	۱۲۴۸/۶۰۲	۰/۰۲۶	گازی
۴/۴۶۴	۰/۴۲۸	۰/۱۲۴	۷۱۱/۸۸۶	۰/۰۱۷	سیکل ترکیبی
۰/۰۰۰	۰/۰۷۸	۰/۰۰۰	۱۰۲/۶۲۷	۰/۰۰۰	زمین گرمایی

منبع: گزارش سالیانه انرژی، ۱۳۹۳

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

NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	نوع نیروگاه فسیلی
۰/۰۹۶۵	۰/۲۹۳۶	۰/۶۹۲۳	۰/۰۰۱۶۱	۰/۰۳۳۵	هزینه خسارت

منبع: گزارش بانک جهانی، ۲۰۰۹

جدول (۶): 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
مدت زمان 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

پروژه نگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

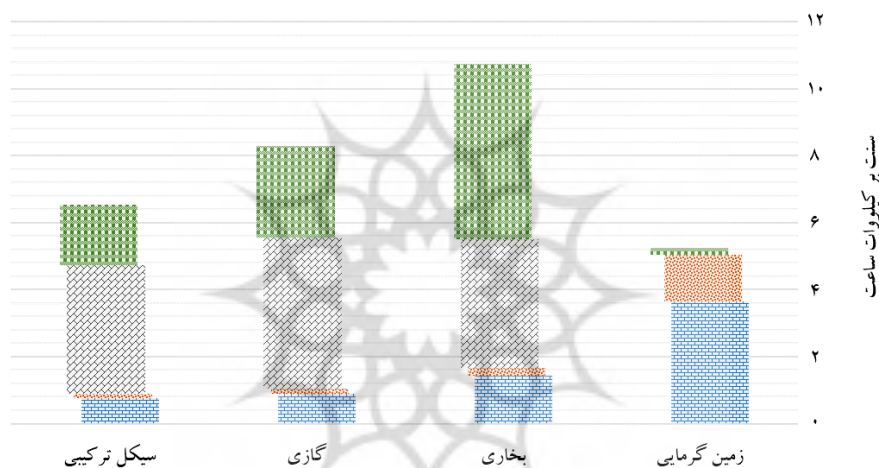
#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

هزینه همتراز شده 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)

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۱۹

آزادسازی سازی قیمت سوخت و ۲) در نظر گرفتن هزینه آثار خارجی، هزینه تمام شده واقعی برق زمین گرمایی کمتر از نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی قرار گرفته است. به طوری که می‌توان نیروگاه سیکل ترکیبی را مهم‌ترین رقیب نیروگاه زمین گرمایی 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 زمین گرمایی شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است.

هزینه آثار خارجی    هزینه سوخت    هزینه تعمیرات و نگهداری    هزینه سرمایه‌گذاری



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	زمین گرمایی (%)	بخاری (%)	گازی (%)	سیکل ترکیبی (%)
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. سناریو ۱: هزینه تمام شده واقعی برق است که قیمت صادراتی سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی را در محاسبات در نظر گرفته است. سناریو ۴: هزینه تمام شده غیر واقعی برق است که شرایط فعلی حاکم بر صنعت برق ایران را نشان می‌دهد؛ به طوری که سوخت با سوبسید به نیروگاه‌ها عرضه شده و به هزینه‌های آلایندگی در هزینه تمام شده برق توجه نمی‌شود. سناریو ۳ گامی مهم به سمت پیشرفت در صنعت برق ایران است که با وجود اینکه قیمت سوخت سوبسیدی می‌باشد، اما هزینه‌های اجتماعی در هزینه تمام شده برق در نظر گرفته می‌شود. سناریو ۲ 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. سناریو ۱ گامی ایده‌آل به سمت پیشرفت در صنعت برق ایران تلقی می‌شود که هم اکنون در کشورهای توسعه‌یافته حاکم است. به طوری 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

	سناریو ۱ <sup>a</sup>		سناریو ۲ <sup>b</sup>		سناریو ۳ <sup>c</sup>		سناریو ۴ <sup>d</sup>	
نوع نیروگاه / سناریو	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

<sup>a</sup> سناریو ۱: قیمت صادراتی سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی (فرض این پژوهش: هزینه تمام شده واقعی برق)

<sup>b</sup> سناریو ۲: قیمت صادراتی سوخت و عدم ملاحظات زیست‌محیطی

<sup>c</sup> سناریو ۳: قیمت فعلی سوخت و ملاحظات زیست‌محیطی

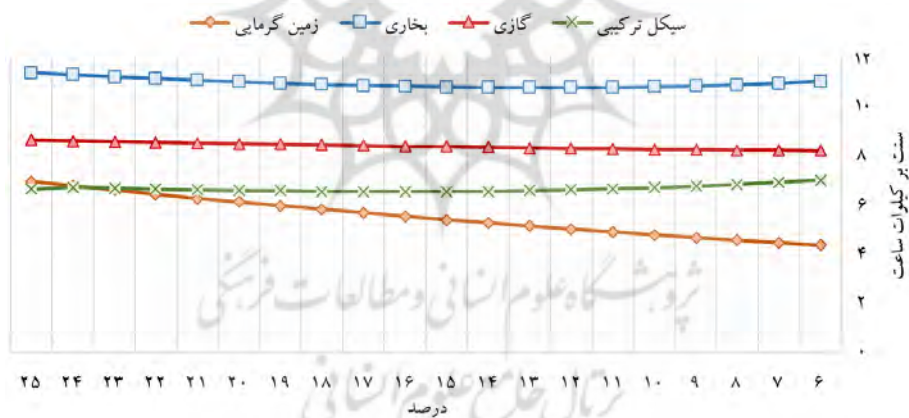
رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۲۱

<sup>d</sup> سناریو ۴: قیمت فعلی سوخت و عدم ملاحظات زیست محیطی (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 (سناریو ۱)، صنعت برق زمین گرمایی از شرایط بهتری برخوردار می‌شود و بالعکس، ادامه وضعیت کنونی (سناریو ۴) 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 زمین گرمایی و سیکل ترکیبی برابرند و به ازای نرخ تنزیل کمتر از ۲۴ درصد، نیروگاه زمین گرمایی 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.

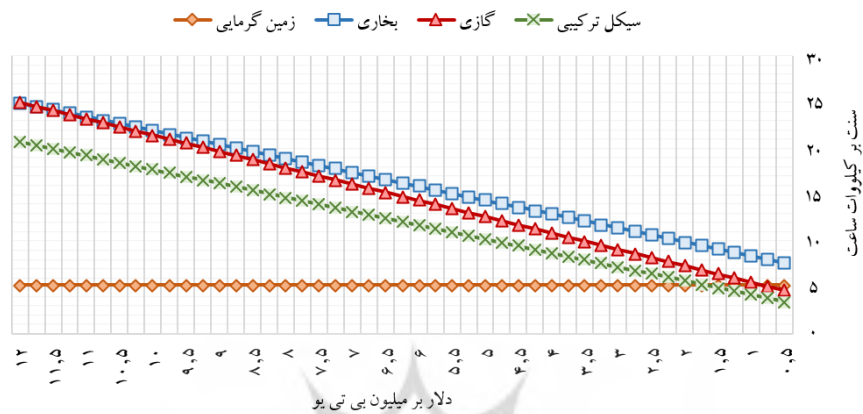


نمودار (۴): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به نرخ تنزیل

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

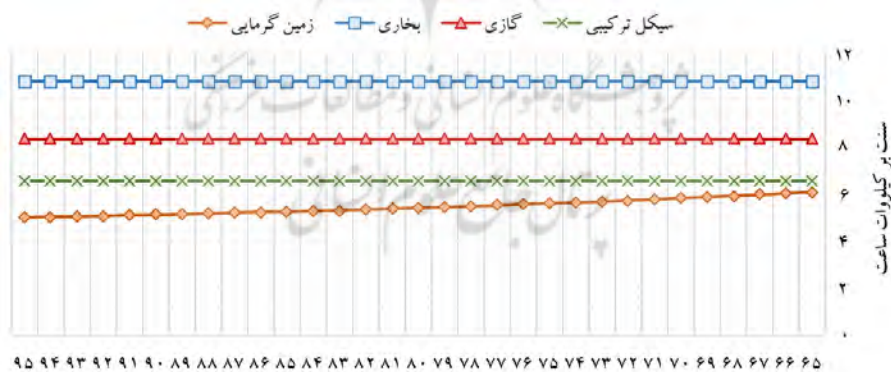
نمودار (۵) به ازای قیمت‌های بیشتر از ۱.۷۵ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو (۶.۱۷ سنت بر مترمکعب گاز) نیروگاه زمین گرمایی مقرون به صرفه است، اما در قیمت‌های کمتر از ۱.۷۵ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو احداث نیروگاه سیکل ترکیبی در اولویت می‌باشد.



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.

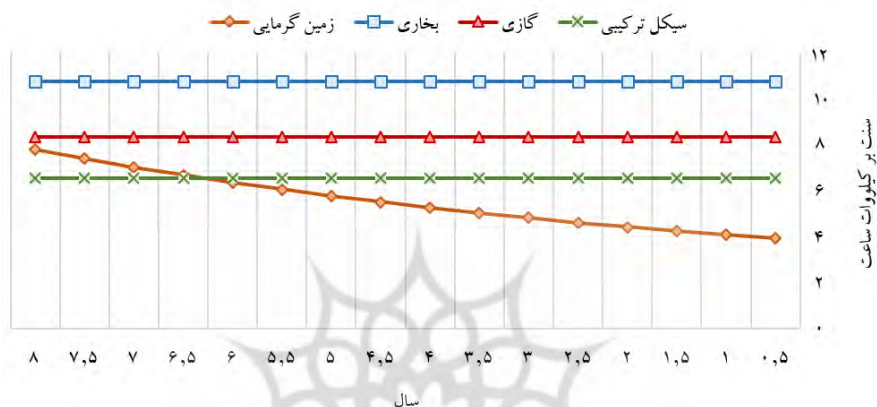


نمودار (۶): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به ضریب ظرفیت نیروگاه زمین گرمایی

منبع: یافته‌های پژوهش

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۲۳

حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به مدت زمان ساخت نیروگاه زمین گرمایی 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 زمین گرمایی مقرون به صرفه نمی‌باشد.



نمودار (۷): حساسیت هزینه تمام شده واقعی نسبت به مدت زمان ساخت نیروگاه زمین گرمایی  
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 زمین گرمایی 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؛ به طوری که اگر هر یک از شرایط ذیل مهیا 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) مدت زمان 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 ارزش افزوده و صادرات منابع فسیلی مهیا می‌گردد.

## ۶- 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 نمودن هزینه آثار خارجی، نیروگاه سیکل ترکیبی 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 زمین گرمایی نسبت به وضعیت کنونی رقابت‌پذیرتر می‌شود و اختلاف هزینه تمام شده برق زمین گرمایی با نیروگاه سیکل ترکیبی به ۱/۵۸ سنت بر کیلووات ساعت تقلیل می‌یابد. لازم به ذکر است در این شرایط، تولید برق از نیروگاه زمین گرمایی 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 زمین گرمایی تفاوتی اندک با برق تولید شده از نیروگاه سیکل ترکیبی خواهد داشت و تولید برق از نیروگاه‌های بخاری و گازی در اولویت بعد از نیروگاه زمین گرمایی 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 زمین گرمایی در اولویت برتر اقتصادی قرار دارد، به طوری که برق زمین گرمایی با اختلافی محسوس، ارزان‌تر از برق تولید شده از نیروگاه سیکل ترکیبی است. (۱/۳ سنت بر کیلووات ساعت ارزان‌تر)

## ۷- منابع

الف) فارسی

اسکونژاد، محمد مهدی (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 رضانی. مریم (۱۳۹۲)، توزیع بار بین نیروگاه‌ها به منظور کاهش هم‌زمان هزینه سوخت و آلاینده‌های زیست‌محیطی، *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و*

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

بلوریان، امیرحسین، سیدحسینی، سید محمد و جلالی مجیدی، محسن (۱۳۹۳)، ارزیابی انرژی زمین گرمایی 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 زمین گرمایی، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران: وزارت نیرو، ص ۱-۷.

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) (۱۳۹۱)، معاونت فنی و اجرایی، دفتر انرژی زمین گرمایی، اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه‌های زمین گرمایی 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 زمین گرمایی مشکین شهر، فصلنامه اقتصاد انرژی ایران (انجمن اقتصاد انرژی ایران)، سال ششم، شماره ۱۲۵ و ۱۲۶، 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، سید مسعود (۱۳۹۳)، منابع تولید انرژی در قرن بیست و یکم، تهران: دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ویرایش دوم، ص ۵۵۰-۵۵۲.

رقابت پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق ۲۷

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 تفصیلی صنعت برق ایران سال ۱۳۹۰.

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

### (ب) انگلیسی

El-Kordy, M. N., Badr, M. A., Abed, K. A., and Ibrahim, S. M (2002), "Economic 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.