پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران
سال هفتم، شماره ۲۷، تابستان ۱۳۹۷، صفحات ۲۰۱-۱۵۹

ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های فتوولتائیک در کاربری تجاری و شبیه‌سازی پویای قیمت برق

حسین مهرابی بشرآبادی[۱]
زین‌العابدین صادقی[۲]
حمیده شجاع‌الدینی[۳]

تاریخ پذیرش:۱۳۹۷/۰۶/۲۰ تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

چکیده

تعاملات انرژی و اقتصاد تا بدان جا پیش رفته است که در ادبیات اقتصادی امروزی، میزان منابع انرژی درکشورها، میزان عرضه و مصرف سرانه انرژی اولیه و میزان سرانه کیلووات ساعت برق مصرفی به صورت یکی از شاخص‌های مقایسه سطح توسعه کشورها درآمده است. سوخت‌های فسیلی موجب هزینه‌های اجتماعی از طریق آلودگی محیط زیست و پدیده گرمایش زمین می‌شود؛ میانگین اشعه خورشیدی در کرمان روزانه ۵,۲ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز است که قابل استفاده در بخش‌های مختلف صنعتی و خانگی است. هدف از نگارش این پژوهش ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی سیستم‌های فتوولتائیک در تأمین انرژی برق یک برج تجاری با متوسط مصرف ۳۲۰۰۰کیلووات ساعت برق در روز در شهر کرمان با استفاده از روش هزینه چرخه عمر می‌باشد. در سناریو اول تمام هزینه‌های مربوط به سیستم توسط مصرف‌کننده پرداخت می‌شود و در سناریو دوم فرض بر این است که ۵۰ درصد از هزینه سرمایه گذاری اولیه توسط دولت پرداخت و مابقی آن نیز به صورت وامی با نرخ ۲ درصد با دوره بازپرداخت ده ساله تأمین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک به منظور تولید برق تحت سناریو اول توجیه اقتصادی ندارد، اما با وجود حمایت‌های دولتی این طرح توجیه اقتصادی دارد. همچنین در این پژوهش به تحلیل و پیش‌بینی قیمت برق با توجه به عوامل موثر بر تولید برق با استفاده از روش سیستم دینامیک پرداخته شده است. نتایج با توجه به فروض پژوهش حاکی از آن است که طی صد سال قیمت برق با لحاظ کردن هزینه‌های آلودگی اجتماعی به ۳۰۰۰۰ ریال به ازای هر کیلو وات ساعت می‌رسد.

طبقه‌بندی JEL: H43, O33,Q4,Q43,Q47,Q53

کلیدواژه‌ها: سیستم فتوولتائیک، هزینه چرخه عمر، سیستم دینامیک

---

۱. استاد بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
hmehrabi2000@gmail.com
۲. دانشیار بخش اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان
abed.sadeghi@gmail.com
۳. کارشناس ارشد برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی دانشکده اقتصاد، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان (نویسنده مسئول)
hshojaadini.92@gmail.com

۱. مقدمه

رشد اقتصادی، پیشرفت اجتماعی و ارتقای سطح رفاه از اهداف ملی کشور به شمار می-روند که تحقق آن‌ها نیازمند برنامه‌ریزی‌های صحیح و صیانت از ثروت‌های ملی و خدادادی است. یکی از مهم‌ترین این ثروت‌ها، ذخایر نفت خام و گاز طبیعی کشور می-باشد که متأسفانه غنی‌بودن آن‌ها در کشور سبب بروز الگوهای غیرمنطقی مصرف شده است. در سال‌های اخیر، آسیب‌های ناشی از توسعه سریع تقاضای انرژی بر محیط زیست، مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، رو به افزایش است که با توجه به وضعیت مناسب جغرافیایی و سایر مزیت‌های راهبردی ایران، برای گسترش تولید و مصرف انرژی، می‌توان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را به عنوان خط مشی ملی پیشنهاد کرد(لاریجانی و همکاران،۱۳۹۳).

استفاده بهینه از انرژی در فرایند توسعه اقتصادی، همواره به عنوان یک هدف مهم در توسعه پایدار مد نظر است، برای اجتناب از تأثیرات ناشی از سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان انرژی سازگار با محیط زیست، پیشنهاد می‌شود (معینی و دهقان‌منشادی، ۱۳۸۹).

انرژی خورشیدی[1] فراوان‌ترین انرژی جهان محسوب می‌شود. عمده‌ترین کاربردهای انرژی خورشیدی به دو دسته، سیستم‌های حرارتی خورشیدی (تبدیل کننده انرژی تابشی خورشید را به انرژی گرمایی) و سیستم‌های فتوولتائیک[2](تبدیل کننده انرژی تابشی خورشید را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی) طبقه‌بندی می‌شوند. سیستم‌های فتوولتائیک به علت داشتن مزایایی از جمله: عمر طولانی (حدود ۳۰ سال)، قابلیت نصب و راه‌اندازی در شرایط جغرافیایی ویژه مانند مناطق صعب‌العبور و کوهستانی، قابلیت استفاده در سیستم های متحرک، نگهداری آسان، عدم وابستگی به شبکه در نقاط دوردست و قابلیت استفاده

1.Solar energy.
2.Photovoltaic Systems.

به صورت متصل به شبکه و غیره کاربردهای فراوانی دارند که آینده درخشانی برای استفاده از این سیستم‌ها ترسیم می‌کند.

ایران با عرض جغرافیایی ۲۵ الی ۴۵ درجه شمالی در منطقه‌ای از کره زمین واقع شده است که با داشتن میانگین بیش از ۲۸۰ روز آفتابی (به جز سواحل دریای خزر)، میانگین تابش خورشیدی پنج کیلووات ساعت بر متر مربع در روز از ظرفیت بالایی برای استفاده از انرژی خورشیدی برخوردار است و از نظر مقدار دریافت انرژی تابشی خورشیدی، از جمله بهترین کشورها محسوب می‌شود. (وزارت نیرو، ۱۳۹۰).

اگرچه انرژی خورشید رایگان است ولی تجهیزات تولید برق از انرژی خورشیدی به سرمایه اولیه زیادی احتیاج دارند که قابل رقابت با انرژی سوخت‌های فسیلی ارزان قیمت نیست. بنابراین با توجه به فواید تولید برق از سیستم‌های فتوولتائیک، ارزیابی اقتصادی این سیستم‌ها هم برای بخش دولتی و هم بخش خصوصی به منظور سرمایه گذاری بهینه راهگشا است.

همان‌طور که بیان شد مصرف انرژی الکتریکی در افزایش رفاه و توسعه اقتصادی کشورها سهم انکارناپذیری دارد. همچنین به دلیل حفظ سطح قابل اطمینان کل سیستم برق در سطح قابل قبول و عدم امکان ذخیره سازی در حجم بالا انرژی الکتریسیته، تعادل بازار برق از حساسیت بالایی برخوردار است. قیمت تعادلی انرژی برق برآیند همه عوامل موثر بر تعادل بازار است که توسط بازیگران اصلی بازار (نهادهای سمت عرضه و تقاضای برق) تعیین می‌شود.

بسیاری از تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهند که قیمت بهینه عمده فروشی برق، برگرفته از هزینه‌های دراز مدت و توزیع است. الگوهای قیمت‌گذاری برق در طی دهه‌های مختلف با تأثیر از فضای سیاست‌گذاری اقتصادی حاکم بر جهان، شکل یافته‌اند. در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی روش قیمت‌گذاری با هزینه کاملا توزیع شده[1] مورد توجه قرار گرفته است و

1.Fully distributed costs.

بیش‌تر کشورهای در حال توسعه از جمله ایران در تدوین تعرفه‌های خود از این الگو استفاده می‌نمایند. در این روش مجموع هزینه‌ها به دو مؤلفه هزینه‌های تأمین برق و هزینه-های فروش برق سرشکن می‌شوند و هزینه‌های تأمین برق به عنوان هزینه‌های عمومی برقراری انشعاب برق و هزینه‌های فروش برق با عنوان بهای انرژی و دیماند و آبونمان از مشترکین دریافت می‌شوند (دفتر برنامه ریزی راهبردی وزارت نیرو ۱۳۸۴).

بنابراین در این پژوهش با توجه به این موضوع که بخش خانگی و تجاری یکی از مهم‌ترین بخش‌های مصرف کننده انرژی در کشور است. در ابتدا به ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک با استفاده از روش هزینه چرخه عمر[1] در یک برج تجاری در شهرستان کرمان با مصرف ۳۲۰۰۰کیلووات ساعت در روز پرداخته و در ادامه با توجه به این‌که قیمت برق یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر تقاضای برق و ایجاد بازارهای رقابتی است به تعیین و پیش‌بینی قیمت تعادلی برق با توجه به تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از روش سیستم دینامیک[2] پرداخته شده است.

۲. پیشینه پژوهش

مولایی و همکاران (۱۳۹۱)، به تعیین قیمت تعادلی در بازار برق ایران با رویکرد پویایی سیستمی در دو بازه زمانی یک روزه در ماه مرداد و یک ماهه (مرداد ماه) در سال ۱۳۸۶ با استفاده از نرم‌افزار ونسیم پرداخته‌اند. فروض این تحقیق، افزایش پنج درصدی تقاضا در ابتدای هر دوره، تعادل بازار و عدم امکان افزایش تولید نیروگاه‌های داخل هستند. بر اساس نتایج ، فقط در دوره زمانی یک ماه در صورت امکان افزایش واردات، امکان تعادل بازار وجود داشته و در این حالت، قیمت تعادلی ۲۹۹,۹۲ ریال بر کیلووات ساعت تعیین شده و همچنین تعادل عرضه و تقاضا در مقدار ۱۶۴۶۲,۷ گیگاوات ساعت وجود داشته است.

1.Life-cycle Cost.
2.System dynamics.

منظور و رضایی (۱۳۹۲)، اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها، بر قیمت برق در بازار تجدید ساختاریافته با رویکرد پویایی سیستمی را بررسی کرده‌اند. تغییر قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها متغیر سیاستی مدل است. نتایج نشان داده، در صورت عدم اصلاح قیمت سوخت نیروگاه‌ها پیش‌بینی می‌شود قیمت بازار برق تا پایان دوره به ۴۰۹ ریال بر کیلووات ساعت برسد. با اصلاح قیمت سوخت تحویلی به نیروگاه‌ها، قیمت بازار برق در پایان دوره با فرض نرخ‌های رشد ۵ و ۸ درصد به ترتیب به سطح ۵۶۶ و ۵۸۵ ریال بر کیلووات ساعت خواهد رسید. در بخش پایانی مقاله، اثر افزایش نرخ رشد اقتصادی و اعمال مالیات بر ارزش افزوده بر روی قیمت بازار برق در قالب مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. و با فرض نرخ‌های رشد ۵ و ۸ درصد، قیمت بازار برق به ترتیب به ۶۱۱ و ۶۴۱ ریال بر کیلووات ساعت در پایان دوره خواهد رسید.

مهدوی عادلی و همکاران (۱۳۹۳)، امکان سنجی استفاده از یک سیستم فتوولتائیک، به منظور تأمین بار الکتریکی مورد نیاز یک واحد مسکونی در شهر مشهد، با استفاده از نرم‌افزار کامفار را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سیستم فتوولتائیک با سرمایه‌گذاری ۹۰ میلیون ریال، نرخ بازدهی داخلی در یک واحد مسکونی با متوسط مصرف ۴۰۰ کیلو وات ساعت در ماه برابر با ۲۲٫۸۳ درصد، دوره بازگشت سرمایه ۱۳ سال و خالص ارزش فعلی به میزان ۹۶٫۳۸۰ میلیون ریال باشد.

خاوری و شیرازی (۱۳۹۳)، به ارزیابی تأمین برق پایگاه استقرار فرستنده و گیرند[1] با استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند. در این پژوهش ابتدا راه‌های تأمین انرژی مورد نیاز پایگاه معرفی شده، و سپس برای اقلیم آب و هوایی یک منطقه خاص سیستم‌های فتوولتاوئیک مورد نیاز با توجه به بار مصرفی پایگاه طراحی شده‌اند. در ادامه، در چند سناریوی مختلف توسط نرم افزار هومر، این سیستم‌ها شبیه سازی شده و از نظر اقتصادی با سایر تأمین کننده‌های انرژی نظیر دیزل، ژنراتور و شبکه برق سراسری مقایسه گردیده‌اند.

1.Base Tranceiver Station.

دلایل استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک جهت تأمین انرژی واحدهای پایگاه عبارتند از: ۱- بالا بودن هزینه توسعه شبکه برق: شبیه سازی‌های انجام شده بر روی مورد نمونه شهرستان بم نشان داده‌اند که چنانچه فاصله واحد از شبکه سراسری بیش از ۲۰ کیلومتر باشد، حتی حداقل استانداردهای موجود نیز نمی‌تواند طرح توسعه شبکه را نسبت به احداث سیستم فتوولتائیک از لحاظ اقتصادی توجیه نماید. ۲- بالا بودن قیمت گازوئیل و شدت تابش خورشیدی: با توجه به هزینه‌های سنگین حمل دیزل ژنراتور، آلودگی زیست محیطی، اشتغال‌زایی بالا و هزینه تعمیر نگهداری بالای دیزل ژنراتور ، نتایج حاکی از آن است که در تابش نور بیشتر از چهار کیلووات ساعت بر متر مربع در روز و قیمت گازوئیل بالاتر از ۰,۸ دلار، استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک مقرون بصرفه‌تر خواهد بود.

حاتمی و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی، به ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک مستقل از شبکه، به جای توسعه‌ی شبکه‌ی برق سراسری در روستاهای تهران پرداخته‌اند. در این پژوهش با توجه به عدم قطعیت‌های موجود برای مدل سازی، از شبیه سازی مونت کارلو با ۲۰۰۰ بار تکرار استفاده شده است. ارزیابی باتوجه به هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سیستم‌های فتوولتائیک برای یک دوره بین ۲۵ تا ۳۰ سال و هزینه‌های توسعه شبکه برق سراسری انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک نسبت به توسعه‌ی شبکه‌ی برق سراسری اقتصادی‌تر و این فاصله با افزایش نرخ تنزیل نسبت عکس وبا تعداد روز ابری متوالی و تعداد خانوار روستا نسبت مستقیم دارد.

صادقی و همکاران (۱۳۹۳)، پژوهشی با هدف ارزیابی تأثیر برق تولیدی از انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن ایران با بهره‌گیری از روش خودرگرسیونی با وقفه‌های گسترده انجام داده‌اند. مطابق نتایج، یک درصد افزایش در تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر با کاهش ۰,۳۱ درصدی انتشار سرانه دی‌اکسیدکربن همراه خواهد بود. و انتشار سرانه دی‌اکسیدکربن نسبت به مصرف انرژی کاملاً با کشش بوده و فرضیه کوزنتس زیست‌محیطی نیز مورد تأیید قرار نگرفت.

مهدوی عادلی و خواجه نائینی (۱۳۹۳)، در پژوهشی در ابتدا از روش هزینه – فایده و با استفاده از نرم افزار کامفار احداث نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی ۲۵ مگاواتی را مورد تحلیل قرار داده‌اند و سپس تأثیر به کارگیری مشوق‌هایی مالی که در احداث چنین نیروگاه‌هایی در کشورهای مختلف دنیا مورد استفاده قرارگرفته اند را، بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد مشوق‌های تعرفه‌های اشتراک بیشترین اثر را بر بهبود شاخص‌های مالی طرح و میزان مالیات پرداختی بنگاه اقتصادی نیز در رتبه بعدی قرار دارد.

بوترود[1] (۲۰۰۲)، با استفاده از رویکرد پویایی سیستم به تحلیل بلندمدت بازار برق پرداخته است. وی قیمت بازار را با استفاده از چارچوب بهینه‌یابی خطی و بر اساس هزینه نهایی، برای هر دوره زمانی(سالیانه) محاسبه کرده است. این مدل از زیرمدل‌های تقاضا، توسعه ظرفیت، تولید برق و زیرمدل مالی و حسابداری تشکیل شده است.

وگستاد[2] (۲۰۰۵)، در بازار برق نروژ، مدل قیمت برق را تابعی از مدل مازاد تقاضا قرار داده است. در این مدل قیمت برق، پیوسته با سه بازخورد زمان واقعی، بازار آتی ها و بازار لحظه‌ای، خود را تعدیل و تصحیح می‌کند. این مدل فرآیند تعیین قیمت در بازار برق را بیان می‌کند.

ایواساکی و یاماتو [3] (۲۰۱۴)، پژوهشی با هدف ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک برای تولید برق در خانه‌های معمولی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام داده‌اند. نتایج را می‌توان در سه دیدگاه خلاصه کرد.۱) سود و زیان و دوره بازپرداخت به منظور بررسی نصب و راه اندازی تولید برق فتوولتائیک، با در نظر گرفتن قیمت تجهیزات، راندمان تبدیل ماژول باتری خورشیدی، یارانه، قیمت خرید برق، سرویس دهی در طول عمر، نرخ فروش برق را تعیین می‌کنند.۲) استفاده از یک باتری خورشیدی راندمان تبدیل ماژول را بیش از ۱۵٪ افزایش می‌دهد، که ممکن است دوره بازپرداخت

1.Botterud.
2.Vogstad.
3.Iwasaki & Yamamoto.

کوتاه‌تر از طول عمر ۲۰ سال شود و سود درتمامی مناطق پیش‌بینی می‌شود. ۳) مناطق مناسب برای تولید برق فتوولتائیک شهر کاوازاکی و ماچی هستند و لازم است اقداماتی برای افزایش یارانه نصب سیستم‌های تولید برق فتوولتائیک در مکان‌های خاص انجام گیرد.

رزوک و میلیت[1] (۲۰۱۵)، امکان سنجی اقتصادی و فنی استفاده از سیستم انرژی هیبریدی فتوولتائیک- دیزل- باتری برای تأمین برق یک واحد تحقیقاتی واقع شده در شمال الجزایر را با سناریوهای مختلف شامل: سیستم فتوولتائیک مستقل، سیستم دیزل مستقل و ترکیبی از این سیستم‌ها را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده که سیستم انرژی هیبریدی فتوولتائیک- دیزل- باتری بهترین مصالحه را بین کارائی فتوولتائیک، هزینه انرژی و ثبات سیستم را دارد. تحلیل حساسیت سیستم انرژی هیبریدی بهینه به منظور مطالعه اثر برخی از پارامترهای متغیر (تابش جهانی خورشیدی، قیمت دیزل، نرخ بهره واقعی و مصرف بار) روی هزینه کل، هزینه انرژی، کارایی فتوولتائیکی و مصرف سوخت انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن است که افزایش تابش جهانی خورشید تأثیر قابل توجهی بر کارائی سیستم فتوولتائیک در سیستم انرژی هیبریدی و در نتیجه افزایش سرمایه‌گذاری اولیه و تأثیر مستقیم بر کاهش خالص هزینه فعلی، هزینه انرژی، مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. حداکثر قیمت دیزل ۰,۲۵ دلار تعیین شده و در قیمت بالاتر سودآور نیست. افزایش مصرف بار تأثیر مستقیم بر کاهش خالص هزینه فعلی، هزینه انرژی و نفوذ فتوولتائیک و نرخ بهره رابطه معکوسی با خالص هزینه فعلی سیستم انرژی هیبریدی و رابطه مستقیم با هزینه انرژی دارد.

راملی و همکاران[2] (۲۰۱۵)، در پژوهشی عملکرد یک سیستم انرژی هیبریدی فتوولتاوئیک- دیزل بعنوان منابع انرژی که به چرخ فلایویل برای ذخیره مازاد انرژی تو لید

1.Rezzouk & Mellit.
2.Rmli.

شده توسط سیستم فتوولتائیک مجهز شده است، را با استفاده از نرم افزار هومر[1] برای مطالعه مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی این سیستم در عربستان سعودی (مکه) بر اساس معیارهای تولید برق، هزینه انرژی و خالص هزینه فعلی ارزیابی می‌کنند. برای این منظور سه پیکره‌بندی متفاوت سیستم یعنی سیستم هیبریدی دیزل- فلایویل، سیستم هیبریدی فتوولتائیک- دیزل- فلایویل و سیستم هیبریدی فتوولتائیک- دیزل- باتری- فلایویل را شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که سیستم هیبریدی فتوولتائیک- دیزل- باتری- فلایویل کمترین هزینه انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را دارد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. مراحل و معیارهای ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک

۳-۱-۱. محاسبه میزان شدت تابش خورشید

گام اول در ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک، بررسی میزان شدت تابش خورشید در منطقه مورد مطالعه است. مفهوم میزان تابش کلی به این معناست که در طول یک دوره زمانی خاص، چه مقدار از انرژی خورشید در برخورد با یک سطح افقی در یک منطقه جذب می‌شود (باقری طولابی، ۱۳۹۲). در کشورهای در حال توسعه، اندازه‌گیری مستقیم میزان تابش کلی خورشیدی معمولا در سایت‌های اندکی انجام می‌شود، زیرا تعداد ایستگاه‌های هواشناسی محدود و تجهیزات گران قیمتی مورد نیاز می‌باشد (چن[2]،۲۰۰۴).

به منظور غلبه بر این مشکل، تاکنون مطالعات بسیاری با هدف پیش‌بینی میزان تابش خورشیدی با استفاده از پارامترهای جغرافیایی و هواشناسی از قبیل حداقل و حداکثر دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، ارتفاع، میزان بارش باران، سرعت باد و غیره، توسط

2.Homer.
2.Chen.

محققان انجام شده است (بریستو و کامپبل[1]،۱۹۸۴). این مطالعات منجر به ارائه مدل‌های مختلفی به منظور ارزیابی تابش خورشیدی گردیده است (آلمورکس و هانتوریا[2]،۲۰۰۴).

معادله آنگستروم - پرسکات[3]، یکی از مهم‌ترین معادلات موجود در زمینه میزان شدت تابش خورشید است. این معادله دارای ضرایب تجربی می‌باشد که برای هر موقعیت متفاوت است. ضرایب رابطه آنگستروم - پرسکات بر اساس نسبت ساعات آفتابی (n) به حداکثر ساعات آفتابی (N) واسنجی می‌شوند. همچنین یک معادله رگرسیونی منطقه‌ای با در نظر گرفتن عوامل مختلف هواشناسی، شامل اطلاعات روزانه مقدار کمبود فشار بخار اشباع، بارش، میانگین دمای هوا، درصد رطوبت نسبی و نسبت n/N می‌باشد.

در این پژوهش از معادله آنگستروم - پرسکات به منظور محاسبه میزان تابش خورشید با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان استفاده می‌شود.

رابطه آنگستروم - پرسکات به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{Rs}{Ro} = a + b\frac{n}{N} \Rightarrow Rs = \left(a + b\frac{n}{N}\right)Ro \qquad (۱)$$

Rs، تابش واقعی خورشیدی (بر حسب کیلووات ساعت بر متر مربع)، Ro میزان انرژی دریافتی واحد سطح در واحد زمان در مرز جو (بر حسب کیلووات ساعت بر متر مربع)، N طول روز نجومی (بر حسب ساعت)، n ساعات آفتابی ، a و b ضرایب خط رگرسیون هستند که با ارقام ۰,۲۳ و ۰,۴۸ به ثابت‌های آنگستروم موسوم و این ضرایب برای ایستگاه-های مختلف کشور به ارقام جهانی به طور نسبی نزدیک می‌باشند(علیزاده، ۱۳۸۸).

۳-۱-۲. محاسبه تولید برق سیستم‌های فتوولتائیک

گام دوم، محاسبه تولید برق از سیستم‌های فتوولتائیک است. توان خروجی در شرایط استاندارد را می‌توان از فرمول زیر حساب کرد:

1.Bristow and Campbell.
2.Almorox and Hontoria.
3.Angstrom-prescott.

$$P_i = A_c * G_t * \eta_p * \eta_{inv} \quad (۲)$$

Pi میزان برق تولید شده (بر حسب کیلو وات ساعت)، Ac منطقه آرایه (متر مربع)، G_t تشعشع خورشیدی تابیده شده روی آرایه (کیلو وات ساعت بر متر مربع)، η_c کارای تبدیل آرایه، η_{inv} کارایی تبدیل کننده DC به AC است(عدالتی و همکاران[1]، ۲۰۱۷). میزان انرژی دریافتی واحد سطح در واحد زمان در مرز جو، ثابت خورشیدی می‌نامند که میزان آن به طور متوسط ۱,۳۶۸ کیلووات ساعت بر متر مربع برآورد شده است.

به طور معمول در سناریوهای مختلفی که برای ارزیابی اقتصادی نصب و راه‌اندازی سیستم‌های فتوولتائیک انجام می‌گیرد، طول عمر ماژول‌ها بین ۲۰ تا ۳۰ سال فرض می‌شود (تالاورا و همکاران[2]،۲۰۰۷)؛ در این پژوهش نیز طول عمر سیستم‌های فتوولتائیک ۲۵ سال در نظر گرفته می‌شود. عدالتی و همکاران (۲۰۱۵)، در پژوهشی که به بررسی عملکرد مقایسه‌ای ماژول‌های فتوولتائیک تک و پلی کریستالی سیلیکونی برای استفاده در سیستم-های فتوولتائیک متصل به شبکه در آب و هوای خشک انجام داده‌اند؛ کارایی ماژول را ۱۴,۳ درصد و حداکثر کارایی تبدیل کننده را ۹۶,۵ درصد و منطقه ماژول برای سیستم-های تک کریستالی ، چند کریستالی که بر حسب متر مربع بیان می‌شوند ۱,۶۱، ذکر کرده-اند. در این پژوهش نیز از اعداد محاسبه شده توسط عدالتی و همکاران(۲۰۱۵) استفاده شده است.

۳-۱-۳. ارزیابی اقتصادی و معیارهای اقتصادی بودن طرح

۳-۱-۳-۱. ارزش فعلی جریانات خروجی حاصل از سیستم (شاخص هزینه چرخه عمر)

گام سوم، ارزیابی اقتصادی طرح است. به طور معمول طرح مناسب از لحاظ فنی بدون توجیه اقتصادی مناسب، معمولا ناموفق و غیر اقتصادی است و مهندسی دقیق به همراه طراحی اقتصادی مناسب، موفقیت تجاری را به همراه دارد. یکی از روش‌های ارزیابی

1.Edalati et al.
2.Talavera et al.

عملکرد نسبی فن‌آوری‌های تولید برق، روش هزینه چرخه عمر که عبارت است از سنجش نحوه عملکرد نیروگاه با یک یا چند پارامتر مرجع، از قبیل سوخت، هزینه تعمیرات و بهره‌برداری سالانه و نشر آلاینده‌های زیست محیطی است (لطفعلی‌پور و بیگم حسینی، ۱۳۹۰). ارزیابی مذکور عمر کامل نیروگاه را با شروع ساخت اجزایی که برای نصب مجموعه نیروگاه به کار رفته‌اند، تا اتمام دوره کاری آن پوشش می‌دهد (نیشیمورا و همکاران[1]،۲۰۰۶). از مزایای استفاده از این نوع ارزیابی چرخه بالانس انرژی کلی نیروگاه است (لی[2]،۲۰۱۰).

شاخص هزینه چرخه عمر به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$LCC_{USP} = PV[PV_{UIN}] + PV[PV_{OM}] \quad (۳)$$

و ارزش فعلی هزینه عملیاتی و نگهداری $PV[PV_{OM}]$ برابر است با:

$$PV[PV_{OM}] = PV_{A_{OM}} \times \frac{K_{PV}(1-K_{PV}^{N})}{1-K_{PV}} \quad (۴)$$

PV_{AOM} ، هزینه عملیاتی و هزینه نگهداری سالانه و K_{PV} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_{PV} = {(1+\varepsilon_{PVOM})}\Big/{(1+d)} \quad (۵)$$

N ، طول عمر سیستم و شاخص ε_{PVOM} نرخ افزایش سالانه هزینه عملیاتی و تعمیر و نگهداری سیستم می‌باشند.

اگر PV_{IN} برابر با سرمایه گذاری اولیه و در حالیکه PV_{BD}[3] به عنوان کمک مالی در نظر گرفته می‌شود ، PV_{IN}-PV_{BD} باید به وسیله مالک پرداخت شود. اگر این مقدار به صورت وام با نرخ بهره سالانه قرض گرفته شود، کل پرداخت در هر سال ($ANNPMT$[4]) در طی دوره وام (N_1) برابر است با:

1.Nishimura۱ et al.

2.Li.

3.BD: Buy-Down subsidy.

4.Annual payment.

$$ANNPMT = (PV_{IN} - PV_{BD}) i_1 [\frac{(1+i_1)N^1}{(1+i_1)N^1 - 1}] \quad (۶)$$

بنابراین :

$$PV[PV_{UIN}] = ANNPMT \frac{1-q^{N1}}{1-q} \quad (۷)$$

$$q = 1/(1+d) \quad (۸)$$

d برابر است با نرخ تنزیل اسمی.

۳-۱-۳-۲. ارزش فعلی جریانات ورودی نقدی حاصل از سیستم

ارزش فعلی جریانات ورودی نقدی حاصل از سیستم مقدار پولی است که استفاده کننده از سیستم می‌تواند به دلیل عدم استفاده از برق شبکه در طول عمر سیستم پس‌انداز کند، ارزش فعلی این جریانات $PV[CIF(N)]$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$PV[CIF(N)] = P_g . E_{PV} \frac{K_{pg}(1-K_{pg}^N)}{1-K_{pg}} \quad (۹)$$

P_g قیمت برق خریداری شده از سیستم، E_{PV} میزان برق تولید شده در هر سال،

$$K_{pg} = \frac{(1+\varepsilon_{pg})}{(1+d)} \quad (۱۰)$$

ε_{pg} نرخ افزایش قیمت برق است(تالاورا،۲۰۰۷).

۳-۱-۳-۳. هزینه – فایده حاصل از سیستم

تحلیل هزینه - فایده[1] علاوه بر ارزیابی مالی، مسائل دیگری همچون مسائل محیط‌زیستی و اجتماعی را نیز در نظر می‌گیرد. تحلیل هزینه - فایده روشی برای ارزیابی مزیت نسبی پروژه‌های سرمایه‌گذاری بر حسب تخصیص بهینه و کارآمد منابع است. هدف تحلیل هزینه - فایده بهبود کارایی منابع در جهت رفاه اقتصادی است. به عبارتی دیگر، هدف از

1.Cost-benefit.

ارزیابی کمک کردن به انتخاب بهترین نوع تصمیم گیری در جهت استفاده بهینه و مطلوب از منابع است(ویک[1]،۱۹۹۹).

منظور از هزینه و فایده در طرح‌های فتوولتائیک، افزایش یا کاهش آلودگی هوا در اثر نصب و راه‌اندازی این سیستم‌ها یا استفاده از سیستم فعلی برای تولید برق است. به گونه‌ای که با نصب و راه اندازی سیستم‌های فتوولتائیک برای تولید برق، آلودگی ناشی از به کارگیری سوخت‌های فسیلی در نیروگاه کاهش می‌یابد و به تبع آن هزینه اضافی به جامعه تزریق نخواهد شد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای اندازه‌گیری هزینه اجتماعی تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی شاخص انتشار گاز دی‌اکسیدکربن[2] می‌باشد. کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن را می‌توان به عنوان یک منفعت در نظر گرفت. ارزش فعلی جریان این منافع در طول سیستم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$PV(S_{CC}) = S_{CC} * \frac{K_S(1-K_S^N)}{1-K_S} \qquad (۱۱)$$

S_{cc}[3] ، هزینه اجتماعی سالانه انتشار دی‌اکسیدکربن به دلیل تولید برق از نیروگاه‌های مختلف به ازای هر خانوار یا واحد تجاری

$$K_S = \frac{(1+\varepsilon_S)}{(1+d)} \qquad (۱۲)$$

Ks، کاهش تدریجی در هزینه‌های انتشار دی‌اکسیدکربن، ε_s، نرخ افزایش سالانه S_{cc} . در نتیجه ارزش فعلی کل منافع طرح $PV(TB)$ عبارت است از مجموع ارزش فعلی جریانات ورودی نقدی و ارزش فعلی منافع حاصل از کاهش دی‌اکسیدکربن برابر است. بنابراین:

$$PV(TB) = PV(CIF) + PV(S_{CC}) \qquad (۱۳)$$

1.Weick.
2.Co2.
3.Social cost of carbon emission.

۳-۱-۳-٤. ارزش خالص فعلی طرح[1]، دورهٔ بازگشت[2]، نرخ بازده داخلی[3]

معیار ارزش خالص فعلی سعی دارد تا با در نظر گرفتن تعدیل زمانی پول، تعادلی میان پرداخت‌های سرمایه گذاری و درآمد حاصل از اجرای طرح سرمایه گذاری پیدا نماید. ارزیابی این تعادل در مقایسه با نرخ بهره استانداردی است که مدیریت طرح برای سرمایه گذاری و به کار گیری وجوه از قبل تعیین نموده است. بنابراین ارزش خالص فعلی طرح برابر با ارزش فعلی کل منافع حاصل از سیستم منهای هزینه چرخه عمر. در نتیجه:

$$NPV = PV[CIF(N)] - LCC \qquad (۱۴)$$

یک سیستم فتوولتائیک زمانی مطلوب است که ارزش خالص فعلی طرح بزرگتر از صفر باشد.

دورهٔ بازگشت یک طرح سرمایه گذاری، مقطع زمانی است که در آن سود خالص تجمعی طرح در طی سال‌های مختلف معادل رقم مربوط به سرمایه گذاری انجام شده (در طول دوران احداث و یا دوران بهره برداری) باشد، یا به عبارتی تعداد سال‌های مورد نیاز برای برابر شدن ارزش فعلی جریانات ورودی با ارزش فعلی جریانات خروجی طرح است که واحد آن براساس سال است.

نرخ بهره‌ای که بتواند درآمد و هزینه را متعادل ساخته و کارایی نهایی سرمایه را به دست آورد، نرخ بازدهی داخلی نام دارد. اهمیت ویژه این روش در آن است که در شرایط نبودن بازار متشکل مالی و نرخ تنزیل واحد در اقتصاد، نرخ بازدهی داخلی را می‌توان به کار گرفت.

اگر ارزش خالص پروژه‌ای مثبت باشد، چنین نتیجه می‌شود که نرخ بازدهی داخلی آن پروژه از نرخ بازدهی قابل قبولی که برای سرمایه‌گذاری به کار برده شده است، بیشتر است

1.Net Present Value
2.Pay Back Period
3.Internal Rate of Return.

وبالعکس، اگر ارزش فعلی خالص پروژه‌ای منفی باشد نرخ بازده داخلی آن از نرخ مورد قبول کمتر است و نیز اگر ارزش خالص پروژه‌ای صفر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تمام سرمایه به کار رفته در پروژه به انضمام بهره‌های متعلق به آن در هر سال، برگشت داده شده و نرخ بازده داخلی پروژه معادل نرخ بازدهی مورد قبول است(مجیدیان، ۱۳۷۷).

۳-۲. پویایی سیستم

پویایی سیستم‌ها یک روش برای مطالعه و مدیریت سیستم‌های پیچیده و دارای بازخورد است. این سیستم‌ها می‌توانند در حوزه‌های مختلفی مثل کسب و کار، اقتصاد، محیط زیست، مدیریت انرژی، مسائل شهری و سایر حوزه‌های اجتماعی و انسانی وجود داشته باشند. رویکرد پویایی سیستم‌ها در اوایل سال‌های دهه ۶۰ توسط جی فارستر[1] از دانشگاه *MIT* معرفی شد. ایده اولیه این حوزه پروژه‌ای بود که فارستر برای شرکت جنرال الکتریک در جواب به سوال که چه عواملی باعث نوسان در سیستم موجودی و انبار و به تبع آن نیروی انسانی شرکت می‌شود، شکل گرفت. می‌توان گفت مهم‌ترین اصل اساسی که پویایی سیستم‌ها بیان می‌دارند این است که بازخوردها و تأخیرها رفتار سیستم‌ها را می‌سازند و پویایی رفتاری سیستم نتیجه ساختار حاکم بر سیستم است.

٤. معرفی پروژه

شهرکرمان از نظر دریافت انرژی خورشیدی جایگاه مطلوبی دارد به طوری که میانگین اشعه خورشیدی روزانه در این شهر ۵,۲ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز و ساعات آفتابی ۳۱۵۷ ساعت در سال برآورد شده است(نیکنام و همکاران ۱۳۹۴).

بر طبق نظر کارشناسان شرکت برق شهر کرمان و بررسی اطلاعات و آمار، مصرف برق یک برج تجاری در این شهر به طور تقریبی معادل ۳۲۰۰۰ کیلووات ساعت در روز است. بنابراین برای محاسبه هزینه‌های سیستم‌های فتوولتائیک فرض می‌شود که این برج در

---

1. Forrester.

روز **۳۲۰۰۰** کیلووات ساعت برق مصرفی دارد. این میزان مصرف با شدت انرژی در ماه-های تابستان نیز هماهنگی دارد. بر اساس اطلاعات شرکت سازنده پانل‌های فتوولتائیکی در ایران (شرکت فیبر نوری و برق خورشیدی ایران) و مصاحبه با کارشناسان برق و با توجه به انرژی مورد نیاز و مقدار ساعات خورشیدی، دستگاه اینورتر و توان نامی پانل‌ها، می‌توان تعداد پانل‌های فتوولتائیک مورد نیاز را محاسبه کرد(یزدانی‌راد، ۱۳۷۷). جدول (۱) مشخصات فنی پانل‌های فتوولتائیک استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات فنی پانل‌های فتوولتائیک

توان در نقطه بیشینه (w)	۲۳۰	جریان در نقطه توان بیشینه (A)	۷,۹۱
کارایی (بازده) ماژول (درصد)	۱۴,۳	جریان اتصال کوتاه (A)	۸,۳۹
ولتاژ در نقطه توان بیشینه (v)	۲۹,۱	ناحیه پانل (m2)	۱,۶۱
ولتاژ مدار باز (v)	۳۶,۴	ضریب ظرفیت (درصد)	۲۵

منبع: عدالتی و همکاران(۲۰۱۵)

ویژگی خاص سیستم‌های فتوولتائیک نشان می‌دهد که هر جریان نقدی درگیر در آن باید تحت یکی از دو مفهوم ذیل قرار می‌گیرد. الف- هزینه طول عمر سیستم از نظر مصرف کننده. ب- ارزش فعلی جریانات نقدی حاصل از سیستم. هر دو مفهوم در این پژوهش تحت دو سناریو بررسی شده‌اند. در سناریو اول فرض بر این است که هیچ گونه حمایت دولتی وجود ندارد و مصرف کننده باید تمام هزینه اولیه سرمایه گذاری را بپردازد. با توجه به مزایای استفاده سیستم‌های فتوولتائیک، در سناریو دوم فرض می‌شود که دولت برای تشویق سرمایه گذاران برای استفاده از این سیستم‌ها، ۵۰ درصد از هزینه اولیه خرید سیستم را یارانه دهد[1] و مابقی آن را نیز به مصرف کننده وامی با بهره ۲ درصد و دوره باز

۱.در بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان، سیاست های تشویقی در جهت جذب سرمایه گذاری در انرژی های تجدیدپذیر به چند دسته تقسیم بندی می‌شوند اما مهمترین این طبقه بندی ها به صورت زیر می باشند: سیاست های تشویقی مالی، مالیاتی، و قانونی.

سیاست‌های مالی : به دلیل اینکه هزینه سرمایه گذاری پروژه های انرژی تجدیدپذیر، معمولاً بالاتر از روش تولید معمولی انرژی است، نیاز به مشوق های مالی به شدت احساس می شود. حفظ یارانه های موجود سوخت‌های

پرداخت ۱۰ سال بپردازد که منبع تأمین این وام از اعتبارات دولتی است. بنابراین تفاوتی که در انجام محاسبات دو سناریو وجود دارد، مربوط به هزینه طول عمر سیستم از نظر مصرف کننده است و درآمدهای سیستم در هر دو سناریو یکسان می‌باشد. جدول‌های شماره (۲) و (۳) به ترتیب خلاصه فروض مشترک هر دو سناریو و فروض محاسبات سناریو دوم را نشان می‌دهد.

جدول (۲): فروض مشترک هر دو سناریو

هزینه سرمایه گذاری اولیه (میلیون ریال)	۲۴۲۴۰۰	قیمت برق (ریال)	۴۳۷۱
هزینه تعمیر و نگهداری سالانه (میلیون ریال)	۳۶۶۰	نرخ افزایش هزینه انتشار	٪۱,۵
نرخ رشد هزینه تعمیر و نگهداری (ریال)	۰	نرخ تنزیل اسمی	٪۱۷
میزان انتشار CO_2 (تن)	۹۰۳۰,۳۳۱۸۲۷	ظرفیت سیستم (وات)	۲۳۰
طول عمر سیستم فتوواتائیک (سال)	۲۵	کارایی ماژول فتوولتائیک	٪۱۴,۳
مصرف سالانه برق (کیلووات ساعت)	۱۱۶۸۰۰۰۰	کارایی تجهیزات جانبی	٪۹۶

منبع: یافته‌های پژوهش

فسیلی دیگر برای محیط زیست و اقتصاد ملی پایدار نیستند، حتی اگر این یارانه ها برای کمک به افـزایش سـرمایه گذاری در پروژه های مربوط به سوخت فسیلی باشـد. یکـی از راه‌هـای افـزایش سـرمایه‌گذاری در پروژه‌هـا انـرژی اصلاحات قیمت است. یکی از مقررات جدید، طرح صکوک است. صکوک نشان دهنده گواهی سـهام تقسـیم نشـده مالکیت دارایی های ملموس و خاص پروژه ها و یا فعالیت های سرمایه گذاری ویژه است. در هر حال ایـن رویـه در بازار بین المللی وجود دارد، مانند نیروگاه خورشیدی ۲۵۰ مگاوات در انـدونزی، عـلاوه بـر انـواع پـروژه هـای بـرق متعارف، در حال حاضر در خاورمیانه به این طریق تأمین مالی می شود. برخی از کشورها خاورمیانه، مطالعه گزینـه تامین مالی توسعه کم کربن و یا پروژه های زیست محیطی از طریق «صکوک سبز» صادره از بانک جهـانی را آغـاز کرده اند. در برخی کشورها (اسپانیا و آلمان) دولت‌های تا ۵۰ درصد هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت انرژی‌های نـو را پرداخت می‌کنند.

سیاست‌های مالیاتی: انگیزه های مالیاتی برای کمک به غلبه بر موانع مالی توسعه انرژیهای تجدید پذیر وجـود دارد. آنها در اشکال مختلف و متفاوت ارائه شده‌اند، معافیت مالیات بـر تجهیـزات وارداتـی، اسـتهلاک شـتاب‌دار در هزینه سرمایه نیروگاه ها یا معافیت مالیات بر درآمد از جمله سیاست های اصلی مشوق مالیاتی هستند.

سیاست‌های قانونی: نوع اول سیاست‌های قانونی استفاده از تعرفه‌ی انرژی هـای نـو(*Feed-in Tariff*) کـه از پیش تعیین شده و باعث افزایش انگیزه تولیدکنندگان مستقل انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود. *FIT* یک نوع تعرفـه پیشرفته انرژی نو یا پرداخت برای انرژی نو می‌باشد که یک مکانیزم سیاستی بـرای سـرعت بخشـیدن بـه سـرمایه گذاری در فناوری های انرژی تجدیدپذیر است(*Abdmouleh, Alammari, & Gastli, 2015*).

جدول(۳): فروض سناریو دوم

میزان یارانه پرداختی	٪۵۰ هزینه اولیه
نرخ بهره وام	٪۲
دوره بازپرداخت وام (سال)	۱۰

منبع: یافته‌های پژوهش

لازم به ذکر است سال پایه در این پژوهش سال **۱۳۹۲** در نظر گرفته شده است.

۵. محاسبات و یافته‌های پژوهش

۵-۱. محاسبات ارزیابی اقتصادی

۵-۱-۱. محاسبه هزینه - فایده سیستم‌های فتوولتائیک

بخش برق، از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای درسطح جهان می‌باشد. طبق محاسبات به عمل آمده، حدود **۳۷,۵** درصد از انتشار کربن در سطح جهان ناشی از فعالیت‌های تولید برق می‌باشد (میرزا حسینی و طاهری[1]،۲۰۱۲). و مصارف خانگی و تجاری در بیش‌تر موارد در ساعات پیک وارد مدار می‌شوند، از سویی چیدمان اقتصادی نیروگاه‌ها بر اساس هزینه ثابت و متغیر است و به دلیل هزینه ثابت پایین نیروگاه دیزلی و گازی و هزینه متغیر بالای این دو نیروگاه نسبت به سایر نیروگاه‌ها، صرفه اقتصادی در این است که در ساعت پیک، نیروگاه‌های دیزلی و گازی در مدار قرار گیرند، بنابراین بیش-ترین میزان برق مصرفی خانگی و تجاری توسط دو نیروگاه دیزلی و گازی به دست می-آید (زینل‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین با توجه به مصرف سالیانه برج تجاری و با در نظر گرفتن میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از دو نیروگاه گازی و دیزلی (در استان کرمان فقط نیروگاه گازی وجود دارد)، می‌توان هزینه اجتماعی برق مصرفی سالانه برج تجاری را محاسبه کرد. در این پژوهش هزینه انتشار هر تن گاز دی‌اکسیدکربن

1.Mirzahosseni and Taheri.

۲۳۰۰۰۰[1]ریال در نظر گرفته شده است. جدول (۴) هزینه اجتماعی ناشی از برق مصرفی برج را نشان می‌دهد.

جدول (٤): هزینه اجتماعی ناشی از برق مصرفی سالانه برج

مصرف برق سالانه برج (کیلووات ساعت)	میزان انتشار دی اکسیدکربن در سال (تن)	هزینه اجتماعی (ریال)
۱۱۶۸۰۰۰۰	۹۰۳۰,۳۳۱۸۲۷	۲۰۷۶۹۷۶۳۲۰

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-۱-۲.ارزش فعلی کل منافع سیستم‌های فتوولتائیک

استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک باعث ایجاد درآمدها و منافعی برای مصرف کننده برق می‌گردد که این درآمدها نیز در هنگام محاسبه هزینه چرخه عمر مورد بررسی قرار می گیرند. مهم‌ترین درآمدهای ناشی از تولید سیستم‌های فتوولتائیک درآمد اجتناب از خرید برق است. بر طبق اعلام وزارت نیرو متوسط قیمت فروش برق به بخش تجاری در سال ۱۳۹۲ برابر با ۴۳۷۱ ریال و نرخ افزایش سالانه آن ۵ درصد است که متناسب با قیمت جهانی است در این پژوهش نیز همین میزان در نظر گرفته شده و نرخ افزایش سالانه هزینه انتشار هر تن گاز دی‌اکسیدکربن ۱,۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه ارزش فعلی کل منافع طرح، ابتدا با استفاده از معادلات (۹) و (۱۱) ارزش فعلی جریانات نقدی و ارزش فعلی منافع ناشی از کاهش گاز دی‌اکسیدکربن را محاسبه و در نهایت با استفاده از معادله (۱۳) ارزش فعلی کل منافع طرح محاسبه شده است.جدول (۵) ارزش فعلی درآمد ناشی از عدم خرید برق شبکه یا ارزش فعلی جریانات نقدی طرح را نشان می‌دهد.

۱.برگرفته از تحقیق زینل‌زاده و همکاران (۱۳۹۲)

جدول (۵): ارزش فعلی جریانات نقدی طرح

قیمت فروش برق شبکه (ریال)	میزان برق تولید شده سیستم (کیلووات ساعت)	ارزش فعلی جریانات نقدی طرح (میلیون ریال)
۴۳۷۱	۴۰۲۰۰۰۰	۱۴۳۴۷۲

منبع: یافته‌های پژوهش

بدین ترتیب ارزش فعلی کل منافع سیستم‌های فتوولتائیک از حاصل‌جمع ارزش فعلی منافع ناشی از کاهش انتشار گاز CO_2 و ارزش فعلی جریانات نقدی طرح به‌دست می‌آید. با توجه به نتایج به دست آمده ارزش فعلی کل منافع این برج تجاری در طول عمر سیستم-های فتوولتائیک معادل ۱۵۶۶۸۳ میلیون ریال است. جدول (۶) ارزش فعلی کل منافع طرح را نشان می‌دهد.

جدول (٦): ارزش فعلی کل منافع طرح

ارزش فعلی جریانات نقدی طرح (میلیون ریال)	ارزش فعلی منافع ناشی از کاهش انتشار CO_2 (میلیون ریال)	ارزش فعلی کل منافع (میلیون ریال)
۱۴۳۴۷۲	۱۳۲۱۱	۱۵۶۶۸۳

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-۱-۳. ارزش فعلی هزینه‌های طرح (جریانات خروجی)

هزینه طول عمر سیستم از نظر مصرف کننده برابر است با سرمایه گذاری اولیه بر روی سیستم‌های فتوولتائیک که شامل اقلامی هم‌چون پانل‌ها، باتری، مبدل، کابل‌های رابط، شارژ کنترل، به اضافه ارزش فعلی هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سالیانه می‌باشد. در این پژوهش اطلاعات مربوط به هزینه‌های سیستم‌های فتوولتائیک از اطلاعات و آمار آژانس بین‌المللی انرژی که اطلاعات هزینه‌های سرمایه گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری این سیستم‌های را به تفکیک مناطق مختلف جهان در سال ۲۰۱۰ داراست، استفاده شده است. هم‌چنین فرض بر این است که کاهش قیمت حاصل از پیشرفت تکنولوژی افزایش قیمت ناشی از تورم را خنثی می‌کند. بر این اساس ارزش فعلی هزینه‌های تعمیر و نگهداری سالانه

و هزینه طول عمر سیستم‌های فتوولتائیک در دو سناریو با استفاده از معادله (۴) محاسبه و نتایج در جداول زیر بیان می‌شود.

۵-۱-۳-۱. ارزش فعلی هزینه‌های سیستم‌های فتوولتائیک در سناریو اول

در سناریو اول فرض بر این است که هیچ گونه حمایت دولتی وجود ندارد و مصرف کننده باید تمام هزینه اولیه و هزینه سالانه را خود بپردازد. جدول شماره (۶) نتایج حاصل از ارزش فعلی کل هزینه‌های طرح را در سناریو اول را نشان می‌دهد.

جدول (٦): ارزش فعلی کل هزینه‌های طرح در سناریو اول

ارزش فعلی هزینه سرمایه گذاری اولیه (میلیون ریال)	ارزش فعلی هزینه‌های نگهداری سالانه (میلیون ریال)	ارزش فعلی کل هزینه‌ها (میلیون ریال)
۲۴۲۴۰۰	۲۹۸۸۴,۲	۲۷۲۲۸۴

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-۱-۳-۲. ارزش فعلی هزینه‌های سیستم‌های فتوولتائیک در سناریو دوم

در سناریو دوم فرض می‌شود که ۵۰ درصد از هزینه سرمایه گذاری اولیه خرید سیستم‌های فتوولتائیک را دولت یارانه داده و مابقی آن را نیز به مصرف کننده وامی با نرخ ۲ درصد و دوره پرداخت ۱۰ ساله می‌پردازد. با استفاده از معادله (۷) ارزش فعلی هزینه سرمایه گذاری اولیه سیستم‌های فتوولتائیک محاسبه و سپس ارزش فعلی کل هزینه‌های طرح در سناریو دوم محاسبه می‌شود. جدول (۷) نتایج محاسبه ارزش فعلی کل هزینه‌های طرح در سناریو دوم را نشان می‌دهد.

جدول (۷): ارزش فعلی کل هزینه‌های طرح در سناریو دوم

ارزش فعلی هزینه سرمایه گذاری اولیه (میلیون ریال)	ارزش فعلی هزینه‌های نگهداری سالانه (میلیون ریال)	ارزش فعلی کل هزینه‌های (میلیون ریال)
۷۳۵۴۳	۲۹۸۸۴,۲	۱۰۳۴۲۷

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-۱-٤. خالص ارزش فعلی سیستم‌های فتوولتائیک

برای محاسبه خالص ارزش فعلی کافی است ارزش فعلی کل هزینه‌های طرح از ارزش فعلی کل منافع طرح کم شود. جدول شماره (۸) نتایج محاسبات خالص ارزش فعلی طرح در هر دو سناریو را نشان می‌دهد.

جدول (۸): محاسبات خالص ارزش فعلی طرح در هر دو سناریو

خالص ارزش فعلی: سناریو اول (میلیون ریال)	خالص ارزش فعلی: سناریو دوم (میلیون ریال)
-۱۱۵۶۰۱	۵۳۲۵۶

منبع: یافته‌های پژوهش

همانطور که نتایج نشان می‌دهد خالص ارزش فعلی طرح سیستم فتوولتائیک در سناریو اول که هیچ‌گونه حمایت دولتی ندارد منفی است؛ بنابراین در این حالت اجرای سیستم فتوولتائیک توجیه اقتصادی ندارد. اما در حالت دوم که دولت ۵۰ درصد هزینه اولیه طرح را یارانه و مابقی آن را نیز وامی با نرخ ۲ درصد و باز پرداخت ۱۰ ساله به مصرف کننده می‌پردازد، خالص ارزش فعلی طرح مثبت می‌شود، یعنی اجرای سیستم فتوولتائیک با وجود حمایت‌های دولت توجیه پذیر می‌شود.

۵-۱-۵.نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت سرمایه

بدیهی است در حالتی که خالص ارزش فعلی طرح منفی باشد، دوره بازگشت سرمایه از طول عمر طرح بیش‌تر است بنابراین در سناریو اول که خالص ارزش فعلی طرح منفی است، محاسبه نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت سرمایه برای این طرح ضرورتی ندارد. اما در سناریو دوم که خالص ارزش فعلی مثبت است می‌توان این دو معیار را نیز محاسبه کرده و با استفاده از آن‌ها نیز اقتصادی بودن طرح را تأیید کرد. نتایج محاسبات نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت سرمایه طرح سیستم فتوولتائیک در جدول (۹) گزارش شده است.

جدول (۹): نتایج محاسبات نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت سرمایه طرح سیستم‌های فتوولتائیک

$NPV2$ با نرخ ۴۱درصد (میلیون ریال)	$NPV2$ با نرخ تنزیل ۴۲ درصد (میلیون ریال)	$NPV2$ با دوره ۶ سال (میلیون ریال)	$NPV2$ با دوره ۷ سال (میلیون ریال)
۹۷۷	-۱۸۶۷۷	-۴۱۸۸	۸۳۷

منبع: یافته‌های پژوهش

نرخ‌های تنزیل پایین‌تر سبب افزایش خالص ارزش فعلی می‌شود، بنابراین باید نرخ مورد نظر بیشتر از ۱۷ درصد باشد. به همین دلیل نرخ‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در نرخ ۲۹ درصد خالص ارزش فعلی تغییر علامت می‌دهد و منفی می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که نرخ بازدهی داخلی طرح بین ۴۱ و ۴۲ درصد قرار دارد. از آنجا که در سناریو دوم خالص ارزش فعلی مثبت است، لذا دوره بازگشت سرمایه باید کمتر از طول عمر سیستم فتوولتائیک (۲۵ سال) باشد. در نتیجه N های کمتر از ۲۵ در نظر گرفته شده و خالص ارزش فعلی به ازای آن‌ها محاسبه می‌شود این کار را تا جایی ادامه می‌دهیم که خالص ارزش فعلی تغییر علامت دهد و منفی شود. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که دوره بازگشت سرمایه برای پروژه سیستم فتوولتائیک در یک برج تجاری تحت سناریو دوم بین سال‌های ششم و هفتم است به این معنی که طرح از سال هفتم به بعد دارای سود می‌شود.

۵-۱-٦.آنالیز حساسیت

با توجه به این‌که بررسی توجیه‌پذیری طرح‌ها معمولا در حالت عدم اطمینان انجام می‌شود، تحلیل حساسیت معیار مهمی در بررسی ریسک سرمایه گذاری به حساب می‌آید. در واقع تحلیل حساسیت، با تکرار محاسبات مالی از طریق تغییر پارامترهای تأثیر گذار بر نتایج ارزیابی، نتایج به دست آمده با نتایج اولیه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اگر تغییرات ایجاد شده در متغیرها، طرح را از توجیه‌پذیری خارج نسازد، سرمایه‌گذاری با اطمینان بیشتری انجام خواهد شد.

متغیرهای قیمت برق، هزینه‌های سیستم و نرخ بهره از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیرها در جریان ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشند. در این قسمت به بررسی

آنالیز حساسیت این سه متغیر در جریان ارزیابی سیستم‌های فتوولتائیک و تولید برق پرداخته شده است و نتایج بیان شده‌اند.

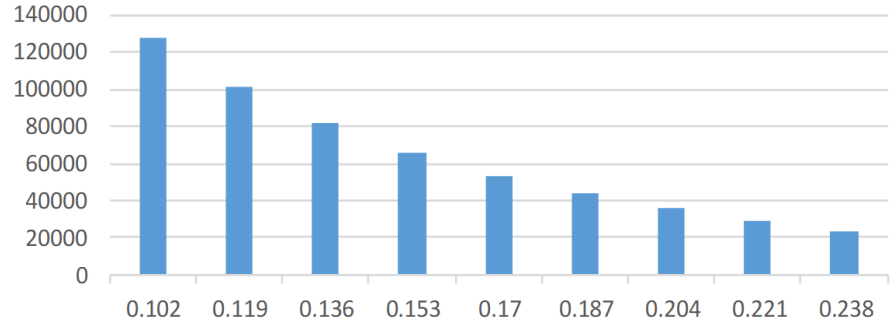
۵-۱-٦-۱. آنالیز حساسیت نرخ بهره

نرخ بهره یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در ارزیابی طرح‌های اقتصادی است بطوری‌که تغییرات این پارامتر هم ارزش منافع طرح و هم هزینه‌های طرح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جدول (۱۰) و نمودار (۱) میزان تغییرات و وضعیت مقدار خالص ارزش فعلی طرح، در اثر تغییر در نرخ بهره را نشان می‌دهند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند افزایش نرخ بهره موجب کاهش خالص ارزش فعلی می‌شود.

جدول (۱۰): تحلیل حساسیت خالص ارزش فعلی نسبت به نرخ بهره

درصدتغییرات	نرخ بهره	خالص ارزش فعلی (میلیون ریال)	درصدتغییرات	نرخ بهره	خالص ارزش فعلی (میلیون ریال)
-۴۰	۰,۱۰۲	۱۲۷۵۵۲	۱۰	۰,۱۸۷	۴۳۴۴۰
-۳۰	۰,۱۱۹	۱۰۱۴۱۶	۲۰	۰,۲۰۴	۳۵۵۵۷
-۲۰	۰,۱۳۶	۸۱۲۸۱	۳۰	۰,۲۲۱	۲۹۱۶۵
-۱۰	۰,۱۵۳	۶۵۵۶۶	۴۰	۰,۲۳۸	۲۳۹۳۳
۰	۰,۱۷	۵۳۲۵۶			

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار (۱): روند تغییرات ارزش خالص فعلی به علت تغییر در نرخ بهره

منبع: یافته های پژوهش

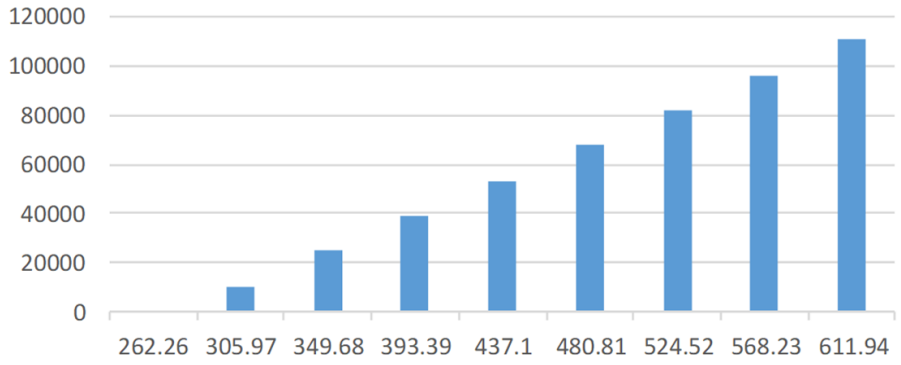
۵-۱-٦-۲. آنالیز حساسیت قیمت برق

قیمت برق یک عامل مهم در سیستم‌های فتوولتائیک است. به نحوی که با افزایش قیمت برق درآمد حاصل از اجتناب خرید برق افزایش می‌یابد و باعث افزایش منافع طرح می-شود. همانطور که نتایج به دست آمده از جدول (۱۱) و نمودار(۲) نشان می‌دهند افزایش قیمت برق موجب افزایش خالص ارزش فعلی می‌شود.

جدول(۱۱): آنالیز حساسیت خالص ارزش فعلی نسبت به قیمت برق

درصدتغییرات	قیمت برق (ریال)	خالص ارزش فعلی (میلیون ریال)	درصدتغییرات	قیمت برق (ریال)	خالص ارزش فعلی (میلیون ریال)
-۴۰	۲۶۲,۲۶	-۴۱۳۳	۱۰	۴۸۰,۸۱	۶۷۶۰۳
-۳۰	۳۰۵,۹۷	۱۰۲۱۴	۲۰	۵۲۴,۵۲	۸۱۹۵۰
-۲۰	۳۴۹,۶۸	۲۴۵۶۲	۳۰	۵۶۸,۲۳	۹۶۲۹۷
-۱۰	۳۹۳,۳۹	۳۸۹۰۹	۴۰	۶۱۱,۹۴	۱۱۰۶۴۵
۰	۴۳۷,۱	۵۳۲۵۶			

منبع: یافته‌های پژوهش



نمودار(۲): روند تغییرات خالص ارزش فعلی به علت تغییرات قیمت برق

منبع: یافته های پژوهش

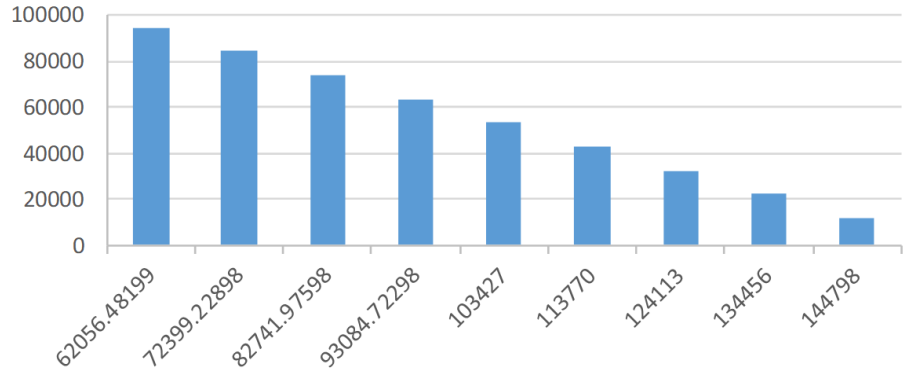
۵-۱-۶-۳. آنالیز حساسیت هزینه سرمایه گذاری اولیه

از آنجایی که هزینه سرمایه گذاری اولیه سیستم‌های فتوولتائیک زیاد است می‌توان گفت مهم‌ترین عامل در عدم سرمایه گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک هزینه اولیه است. همان-طور که در بخش قبل نشان داده شد اجرای سیستم‌های فتوولتائیک بدون اعطای یارانه دولت در هزینه سرمایه گذاری اولیه توجیه اقتصادی ندارد . نتایج به دست آمده از جدول (۱۲) و نمودار (۳) نشان می‌دهند که با افزایش هزینه‌های سیستم خالص ارزش فعلی طرح کاهش می‌یابد.

جدول (۱۲): تحلیل حساسیت خالص ارزش فعلی نسبت به هزینه‌های سیستم

درصد تغییرات	هزینه‌های سیستم (میلیون ریال)	خالص ارزش فعلی (میلیون ریال)	درصد تغییرات	هزینه‌های سیستم (میلیون ریال)	خالص ارزش فعلی (میلیون ریال)
-۴۰	۶۲۰۵۶	۹۴۶۲۷	۱۰	۱۱۳۷۷۰	۴۲۹۱۳
-۳۰	۷۲۳۹۹	۸۴۲۸۴	۲۰	۱۲۴۱۱۳	۳۲۵۷۰
-۲۰	۸۲۷۴۱	۷۳۹۴۱	۳۰	۱۳۴۴۵۶	۲۲۲۲۸
-۱۰	۹۳۰۸۵	۶۳۵۹۹	۴۰	۱۴۴۷۹۸	۱۱۸۸۵
۰	۱۰۳۴۲۷	۵۳۲۵۶			

منبع: یافته‌های پژوهش



مودار (۳): روند تغییرات ارزش خالص فعلی به علت تغییر در هزینه‌های سیستم

منبع: یافته های پژوهش

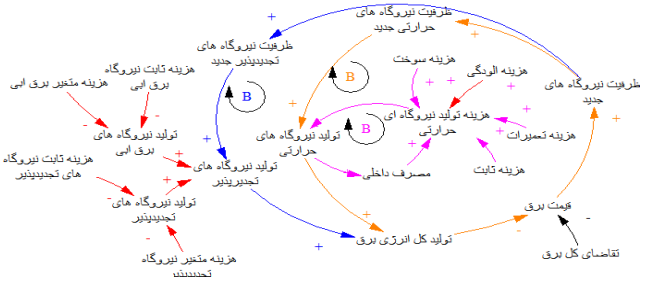
۵-۲. تعیین پویای قیمت تعادلی برق

تکنیک پویایی سیستمی رویکردی بسیار قوی برای حل مسئله و الگوی بسیار خوبی برای تبدیل الگوهای ذهنی به مدل‌های کمی است. در ادامه پژوهش به تعیین قیمت تعادلی برق با توجه به تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر با استفاده از این رویکرد پرداخته شده است. در ابتدا زیر سیستم‌های اصلی بیان می شوند.

۵-۲-۱. معرفی نمودارهای علی- معلولی

نمودارهای علی - معلولی ضمن بیان روابط علی بین دو یا چند متغیر، جهت تأثیر آنها را نیز مشخص می‌کنند. این تأثیر برروی متغیر مورد نظر می‌تواند بصورت مستقیم یا غیرمستقیم و یا از طریق متغیرهای واسطه صورت پذیرد.

در بازارهای رقابتی قیمت برق از تعادل تولید کل و تقاضای کل برق تعیین می‌شود. در این پژوهش تمرکز اصلی بر روی عوامل مؤثر بر تولید کل برق است و در نهایت اثر تولید کل و تقاضای کل برق با هم با استفاده از تابع لوکاپ بر روی قیمت برق تأثیر داده شده‌اند. کل برق تولید شده در کشور بوسیله نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های تجدیدپذیر تولید می‌شود. طبق آمار وزارت نیرو در سال ۹۲ برق تولید شده نیروگاه‌های حرارتی ۹۲ درصد و مابقی آن توسط نیروگاه‌های تجدیدپذیر تولید شده است. نمودار شماره (۴) نمودار علی و معلولی تولید کل برق در کشور را نشان می‌دهد.

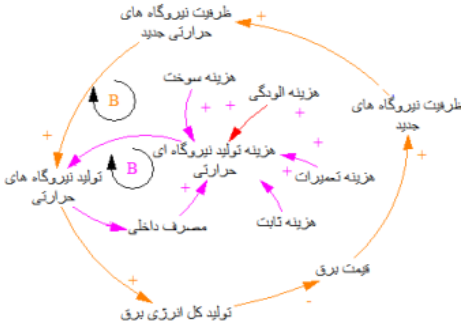


نمودار (٤): حلقه علی- معلولی کل مدل

منبع: یافته های پژوهش

در این پژوهش تقاضای کل برق بصورت یک متغیر مستقل وارد مدل شده است و عوامل مؤثر بر تقاضای برق مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته است. همانطور که می‌دانیم ارتباط تقاضای کل برق و قیمت برق یک ارتباط معکوس است.

نمودار شماره (۵) حلقه علی تولید نیروگاه‌های حرارتی و عوامل موثر بر تولید برق این نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد. در این حلقه ارتباط تولید نیروگاه‌های حرارتی با تولید کل مثبت است یعنی با افزایش تولید نیروگاه‌های حرارتی تولید کل نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه قیمت برق کاهش می‌یابد. از مهم‌ترین عوامل موثر بر تولید نیروگاه‌های حرارتی هزینه‌های نیروگاه‌ها هستند که با افزایش هزینه‌ها، تولید نیروگاه کاهش می‌یابد.



نمودار (۵): حلقه علی تولید نیروگاه‌های حرارتی

در کشور دو نوع نیروگاه تجدیدپذیر وجود دارد، نیروگاه‌های برق‌آبی و نیروگاه‌های انرژی‌های نو مانند نیروگاه‌های خورشیدی، نیروگاه‌های بادی، بیومس، زمین گرمایی و غیره. مهم‌ترین عامل موثر بر افزایش ظرفیت تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر هزینه‌های اولیه یا سرمایه گذاری است بطوریکه با افزایش سرمایه گذاری در این نیروگاه‌ها تولید افزایش می‌یابد؛ لازم به ذکر است که هزینه‌های اولیه این نیروگاه‌ها زیاد اما هزینه تعمیر و نگهداری پایینی دارند؛ این نیروگاه‌ها هزینه سوخت و هزینه آلودگی ندارند. حلقه علی تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر در نمودار شماره (۶) نشان داده شده است. این حلقه ارتباط تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر با تولید کل برق را نشان می‌دهد. به این صورت که با

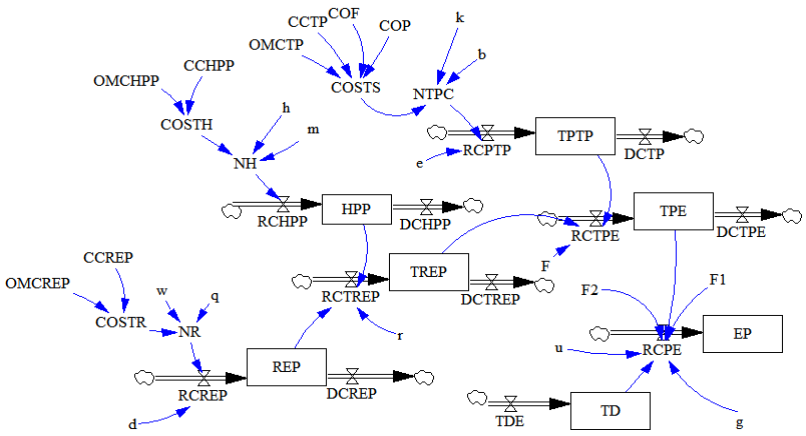
افزایش تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر تولید کل نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه قیمت برق کاهش می‌یابد.

نمودار (٦): حلقه علی تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر

منبع: یافته های پژوهش

۵-۲-۲. نمودار جریان مدل

مدل شبیه‌سازی شده تعیین پویای قیمت برق با توجه به نمودارهای علی - حلقوی توضیح داده شد، با استفاده از نرم‌افزار ونسیم در نمودار شماره (۷) نشان داده شده است.



نمودار (۷): نمودار جریان مدل

منبع: یافته های پژوهش

در ادامه به معرفی متغیرهای حالت، نرخ و کمکی مدل در جداول شماره(۱۳)، (۱۴) و (۱۵) پرداخته شده است.

جدول (۱۳): متغیرهای حالت

متغیر	عنوان متغیر	شرح متغیر
TD	تقاضای کل برق (کیلو وات ساعت)	کل تقاضای برق کشور
EP	قیمت برق(ریال)	متوسط قیمت فروش برق
TPE	کل تولید برق کشور (کیلووات ساعت)	شامل تولید کل نیروگاه‌های حرارتی و تجدیدپذیر
TPTP	تولید کل نیروگاه‌های حرراتی (کیلووات ساعت)	شامل تولید نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و گازی
TREP	تولید کل نیروگاه‌های تجدیدپذیر (کیلووات ساعت)	شامل تولید نیروگاه‌های برق‌آبی و تجدیدپذیر
HPP	تولید کل نیروگاه برق‌آبی (کیلووات ساعت)	
REP	تولید کل نیروگاه‌های انرژی‌های نو (کیلووات ساعت)	

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول (۱٤): متغیرهای نرخ

متغیر	عنوان متغیر	شرح متغیر
TDE	نرخ تغییر تقاضای کل برق	این متغیر بیانگر تغییرات تقاضا در طول زمان است.
RCTPE	نرخ تغییر در تولید کل برق	تغییرات در تولید کل برق در طول زمان
RCPTP	نرخ تغییر در تولید کل برق نیروگاه های حرراتی	تغییرات در تولید کل برق نیروگاه های حرراتی در طول زمان
RCTREP	نرخ تغییر در تولید کل برق نیروگاه های تجدیدپذیر	تغییرات در تولید کل برق نیروگاه های تجدیدپذیر در طول زمان
RCHPP	نرخ تغییر در تولید نیروگاه برق آبی	تغییرات در تولید نیروگاه برق آبی در طول زمان
RCREP	نرخ تغییر در تولید نیروگاه تجدیدپذیر	تغییرات در تولید نیروگاه تجدیدپذیر در طول زمان
RCPE	نرخ تغییر در قیمت برق	تغییرات در قیمت برق در طول زمان
DCTPE	مصرف برق داخلی کل نیروگاه ها	
DCTP	مصرف برق داخلی نیروگاه های حرارتی	
DCTREP	کل مصرف برق داخلی نیروگاه تجدیدپذیر	
DCHPP	مصرف برق داخلی نیروگاه برق آبی	
DCREP	مصرف برق داخلی نیروگاه تجدیدپذیر	

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول (۱۵): متغییرهای کمکی

متغیر	عنوان متغیر	متغیر	عنوان متغیر
COSTS	کل هزینه نیروگاه حرارتی	OMCHPP	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه نیروگاه برق آبی
COP	هزینه سوخت نیروگاه حرارتی	CCREP	هزینه اولیه سرمایه‌گذاری نیروگاه تجدیدپذیر
COF	هزینه آلودگی نیروگاه حرارتی	OMCREP	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه نیروگاه تجدیدپذیر
COSTR	کل هزینه نیروگاه تجدیدپذیر	CCHPP	هزینه اولیه سرمایه گذاری نیروگاه برق آبی
K	متغیر کمکی	CCTP	هزینه اولیه سرمایه گذاری نیروگاه حرارتی
M	متغیر کمکی	NR	ظرفیت نیروگاه‌های جدید تجدیدپذیر
d	متغیر کمکی	OMCTP	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه نیروگاه حرارتی
u	متغیر کمکی	NTPC	ظرفیت نیروگاه‌های جدید حرارتی
g	متغیر کمکی	NH	ظرفیت نیروگاه های برق‌آبی جدید
F1	تابع لوکاپ	COSTH	کل هزینه نیروگاه برق‌آبی
F2	تابع لوکاپ		

منبع: یافته‌های پژوهش

۵-۲-۳. تعیین روابط بین متغیرها و بررسی نتایج

COSTS کل هزینه نیروگاه‌های حرارتی برابر با حاصل جمع کل هزینه‌های نیروگاه شامل هزینه سوخت سالانه، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری سالانه و هزینه آلودگی سالانه است. در این پژوهش اطلاعات و آمار هزینه اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری سالانه همه نیروگاه‌ها، از سایت آژانس بین‌الملل انرژی که این هزینه‌ها را برای مناطق مختلف جهان داراست، استفاده شده است. بنابراین:

$$COSTS = (COP + COF + CCTP + OMCTP) \qquad (۱۵)$$

هزینه‌ها دارای واحد سنجش ریال هستند.

متغیر K یک متغیر کمکی است که میزان تغییرات تولید کل نیروگاه‌های برق حرارتی را نسبت به تغییر هزینه‌های سالانه تولید برق نیروگاه‌های حرارتی را نشان می‌دهد برحسب کیلووات ساعت بر ریال است.

NTPC ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی جدید در سال است که به هزینه‌های سالانه تولید نیروگاه حرارتی بستگی دارد به این ترتیب که با افزایش هزینه‌های تولید برق نیروگاه‌های

حرارتی میزان سرمایه گذاری برای ایجاد ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی جدید کاهش می-یابد. $NTPC$ دارای واحد سنجش کیلووات ساعت می‌باشد. در نتیجه:

$$NTPC = NTPC - K * COSTS \quad (۱۶)$$

$TPTP$ تولید کل نیروگاه‌های حرارتی کشور بر حسب کیلووات ساعت که مقدار آن در سال ثابت است تغییرات تولید کل نیروگاه‌های حرارتی کشور به میزان تغییر در نرخ تولید این نیروگاه در سال‌های متوالی بستگی دارد. و میزان تغییر در نرخ تولید این نیروگاه-ها به میزان تغییر در ظرفیت نیروگاه‌های جدید حرارتی که در سال‌های متوالی وارد شبکه تولید می‌شود، بستگی دارد. بنابراین:

$$RCPTP = NTPC * K \quad (۱۷)$$

$$TPTP = RCPTP - DCTP \quad (۱۸)$$

$COSTH$ هزینه کل نیروگاه‌های برق‌آبی بر حسب ریال است که از حاصل جمع هزینه ثابت سرمایه گذاری نیروگاه و هزینه متغیر نیروگاه به دست می‌آید.

$$COSTH = CCHPP + OMCHPP \quad (۱۹)$$

متغیر m یک متغیر کمکی است که میزان تغییرات تولید کل نیروگاه‌های برق‌آبی را نسبت به تغییرات هزینه تولید برق نیروگاه‌های برق‌آبی را نشان می‌دهد واحد این متغیر کیلووات ساعت بر ریال است. نیروگاه‌های برق‌آبی که جزو نیروگاه‌های تجدیدپذیر محسوب می-شوند هزینه سالانه کم، و هزینه سوخت و هزینه آلودگی ندارند و میزان تغییرات تولید کل نیروگاه‌های برق‌آبی در سال به ظرفیت نیروگاه‌های برق‌آبی جدید که در سال وارد شبکه تولید برق می‌شود، بستگی دارد. میزان تغییر در ظرفیت نیروگاه‌های برق‌آبی جدید به میزان سرمایه گذاری ثابت یا هزینه اولیه این نیروگاه‌ها بستگی دارد. از آنجا که اطلاعات مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری این نیروگاه‌ها در سال‌های مختلف در کشور وجود ندارد در این تحقیق میزان تغییر در هزینه سرمایه گذاری اولیه این نیروگاه‌ها متناسب با تغییرات نرخ ارز و نرخ تورم در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که با افزایش این هزینه‌ها میزان سرمایه گذاری کم می شود. بنابراین روابط به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$NH = NH_1 - m * COSTH \quad (۲۰)$$

NH_1: مقدار اولیه ظرفیت تولید

$$RCHPP = NH \quad (۲۱)$$

$$HPP = RCHPP \quad (۲۲)$$

با توجه به مطالب و روابط بیان شده نمودار شماره (۸) پیش بینی تولید نیروگاه‌های برق آبی با مفروضات بیان شده را طی صد سال نشان می‌دهد. نمودار نشان می دهد که تولید برق این نیروگاه‌ها دارای رشد مناسبی است.

کل هزینه نیروگاه‌های تجدیدپذیر $COSTR$ برابر است با مجموع هزینه اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری سالانه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، بنابراین:

$$COSTR = CCREP + OMCREP \quad (۲۳)$$

NR ظرفیت نیروگاه تجدیدپذیر جدید به میزان سرمایه گذاری یا میزان هزینه اولیه بستگی دارد به طوری که با افزایش میزان سرمایه گذاری ظرفیت نیروگاه های تجدیدپذیر جدید نیز افزایش می‌یابد. w یک متغیر کمکی است بنابراین روابط به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$RCREP = NR * d \quad (۲۴)$$

$$NR = NR_1 - w * COSTR \quad (۲۵)$$

REP تولید نیروگاه تجدیدپذیر شامل نیروگاه‌های اتمی و بادی، خورشیدی، بیومس و غیره است که برابر است با:

$$REP = RCREP - DCREP \quad (۲۶)$$

نمودار (۹) پیش بینی تولید برق نیروگاه‌های تجدیدپذیر را با توجه به مفروضات پژوهش نشان می‌دهد. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر در حال افزایش است. و با توجه به نمودار، رشد تولید نیروگاه‌های تجدیدپذیر بیشتر از نیروگاه‌های برق آبی است. این می‌تواند حاکی از آن باشد که در سال‌های اخیر توجه

جهانیان بیشتر به سمت تولید انرژی‌های پاک و نو مانند انرژی خورشیدی ، بادی و غیره باشد.

TREP تولید کل نیروگاه تجدیدپذیر برابر است با حاصل جمع تولید کل نیروگاه‌های برق‌آبی و تجدیدپذیر است. بنابراین رابطه *TREP* به صورت زیر بیان می‌شود.

$$RCTREP = RCHPP + RCREP \quad (۲۷)$$

$$TREP = RCTREP - DCREP \quad (۲۸)$$

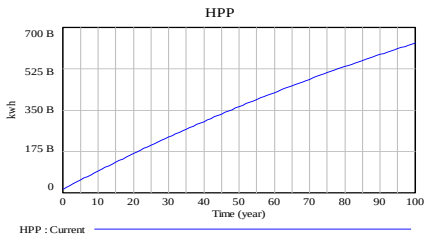
نمودار (۱۰) پیش بینی کل تولید برق نیروگاه‌های تجدیدپذیر (برق‌آبی و تجدیدپذیر) را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت تولید کل نیروگاه‌های تجدیدپذیر (برق‌آبی و تجدیدپذیر) دارای روندی مثبت و صعودی است.

TPE تولید کل برق برابر است با جمع تولید کل نیروگاه‌های حرارتی و تولید کل نیروگاه‌های تجدیدپذیر است. بنابراین:

$$RCTPE = RCPTP + RCTREP \quad (۲۹)$$

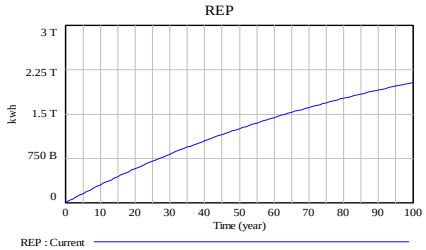
$$TPE = RCTPE - DCTPE \quad (۳۰)$$

پیش بینی کل تولید برق در نیروگاه‌های کشور در نمودار (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که نمودار نشان می‌دهد کل تولید برق نیروگاه‌های کشور دارای روندی مثبت و صعودی دارد.



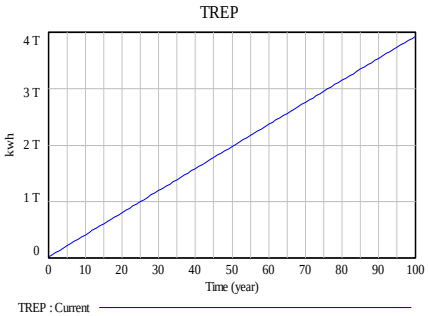
نمودار(۸): پیش بینی تولید نیروگاه‌های برق‌آبی

منبع: یافته های پژوهش



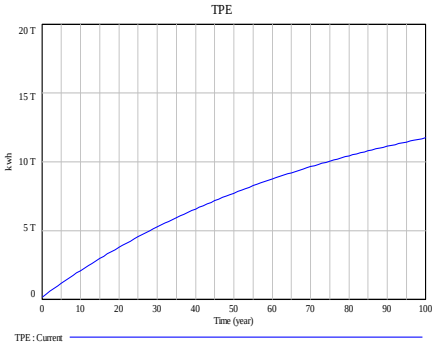
نمودار (۹): پیش بینی تولید برق نیروگاه‌های تجدیدپذیر

منبع: یافته های پژوهش



نمودار (۱۰): پیش بینی کل تولید برق نیروگاه‌های تجدیدپذیر(برق‌آبی و تجدیدپذیر)

منبع: یافته های پژوهش



نمودار (۱۱): پیش بینی کل تولید برق نیروگاه‌های کشور

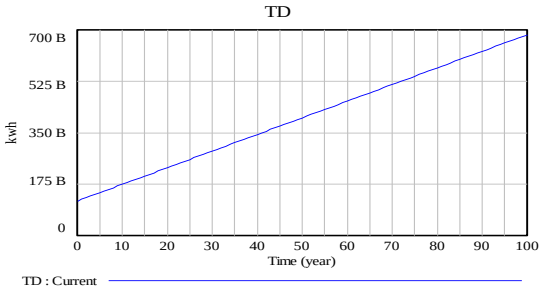
منبع: یافته های پژوهش

در بازارهای جهانی قیمت برق واقعی است و از تعامل تولید برق و تقاضای برق تعیین می‌شود. در کشور به علت پرداخت یارانه‌ها به حامل‌های انرژی قیمت برق ارزان‌تر از

قیمت واقعی آن تعیین می‌شود. در این پژوهش برای آن‌که بتوانیم ارتباط درست و منطقی بین قیمت برق، تولید برق و تقاضای برق ایجاد کنیم؛ از تابع لوکاپ استفاده کردیم. یکی از مزیت‌های تابع لوکاپ این است که با استفاده از داده‌های تولید برق در سال‌های مختلف، شوک‌های قیمتی و یا سایر شوک‌ها را بطور خودکار وارد مدل می‌کند و نتایج را بررسی می‌کند. در این پژوهش تابع لوکاپ $F1$ ارتباط بین قیمت برق و تولید برق و تابع لوکاپ $F2$ ارتباط بین تقاضای کل و قیمت برق را نشان می‌دهد. بنابراین نرخ تغییر در قیمت برق که در نتیجه، تغییر تقاضا و تولید برق تغییر می‌کند به صورت زیر بیان می‌شود.

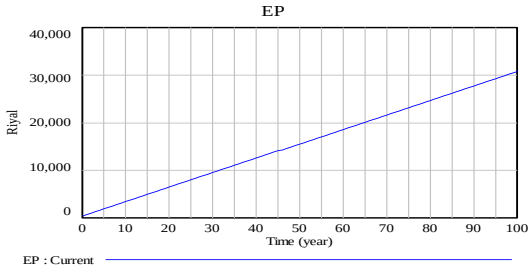
$$RCPE = F1(TPE * g * u) + F2(TD * g * u) \quad (۳۱)$$

نمودارهای (۱۲) و (۱۳) به ترتیب پیش بینی کل تقاضای برق و قیمت برق را در طی صد سال نشان می‌دهند. هر دو نمودار دارای روندی صعودی و مثبت هستند. از آنجا که تولید برق بیشتر از تقاضا برق است این اختلاف مانع از افزایش بیش از حد قیمت برق شود. قیمت برق دارای رشدی جزئی و منطقی است بطوری که قیمت برق با لحاظ کردن هزینه‌های آلودگی اجتماعی در سال صدم به ۳۰۰۰۰ریال به ازای هر کیلووات ساعت می رسد که می‌توان نتیجه گرفت هزینه تمام شده تولید برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر پایین است.



نمودار (۱۲): پیش بینی کل تقاضای برق

منبع: یافته های پژوهش



نمودار (۱۳): پیش بینی قیمت برق

منبع: یافته های پژوهش

٦. نتیجه‌گیری و توصیه‌های سیاستی

در این پژوهش به ارزیابی اقتصادی، زیست محیطی سیستم‌های فتوولتائیک در یک برج تجاری در شهر کرمان پرداخته شد. در ابتدا میزان برق تولید شده از سیستم‌های فتوولتائیک با توجه به میزان شدت تابش نور خورشید محاسبه شد. و در ادامه با استفاده از معیار هزینه چرخه عمر ارزش فعلی منافع و ارزش فعلی هزینه‌های اجرای طرح سیستم‌های فتوولتائیک تحت دو سناریو محاسبه شد و سپس ارزیابی اقتصادی، زیست محیطی و شاخص‌های سود آوری طرح بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که در سناریو اول که بدون حمایت دولت، اجرای طرح بررسی شد هزینه‌های طرح بیشتر از منافع اجرای طرح بوده و اجرای طرح دارای توجیه اقتصادی نیست. اما در سناریو دوم که ۵۰ درصد از هزینه اولیه طرح را دولت یارانه می‌دهد و مابقی آن را به صورت وام کم بهره و با دوره بازپرداخت ده ساله به مصرف کننده می‌پردازد، اجرای طرح دارای توجیه اقتصادی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که خالص ارزش فعلی طرح در سناریو دوم مثبت است و دوره بازگشت سرمایه از سال ششم به بعد است یعنی از این سال به بعد طرح سودده می‌شود. نتایج تجزیه وتحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل نشان می‌دهد که، نرخ بهره یکی از مهم‌ترین پارامترها در ارزیابی اقتصادی است، پروژه در نرخ‌های بهره پایین خالص ارزش فعلی بیشتری دارد. نتایج آنالیز حساسیت نرخ بهره نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بهره خالص ارزش فعلی کاهش می‌یابد و موجب کاهش سرمایه گذاری می‌شود. نتایج آنالیز حساسیت قیمت برق

نیز نشان می‌دهد که با افزایش قیمت برق، خالص ارزش فعلی طرح افزایش می‌یابد این حاکی از آن است که با افزایش قیمت برق درآمد ناشی از اجتناب خرید برق شبکه افزایش می‌یابد و باعث افزایش منافع طرح شود که نشان دهنده اهمیت تعرفه‌ی انرژی های نو(*Feed-in Tariff*) در افزایش سود آوری در انرژی‌های نو و در نتیجه افزایش سرمایه‌گذاری در آنها است. آنالیز حساسیت هزینه‌های سیستم نشان می‌دهد که افزایش هزینه‌های طرح باعث کاهش خالص ارزش فعلی طرح می‌شود و باعث کاهش منافع طرح می‌شود. یکی از منافع اجرای طرح سیستم فتوولتائیک کاهش هزینه خارجی استفاده از انرژی‌های فسیلی است. استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک باعث می‌شود که میزان انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از تولید برق کاهش یابد و در نتیجه موجب کاهش هزینه‌های اجتماعی آلودگی شود.

هم‌چنین در این پژوهش تحلیل و پیش بینی قیمت برق با استفاده از روش سیستم دینامیک انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که طی صد سال و با توجه با مفروضات پژوهش قیمت برق با لحاظ کردن هزینه‌های آلودگی اجتماعی در سال صدم به ۳۰۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت می‌رسد.

۷. منابع

الف) فارسی

باقری طوبی، هاجر، مرادی، محمد حسین و باقری طوبی، سحر (۱۳۹۲)، روشی نوین جهت پیش بینی کلی تابش خورشیدی بر روی سطح افقی»، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۷۶-۶۱.

مهدی، حاتمی، ناظمی، علی، دولت‌آبادی، اعظم و مصطفی‌پور، مصطفی (۱۳۹۳)، «ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه در روستاها با شبیه‌سازی مونت‌کارلو»، *فصلنامه راهبردهای توسعه روستایی*، دوره ۱، شماره ۲، صص ۳۳-۱۹.

خاوری، فرشاد و شیرازی، معین (۱۳۹۳)، ارزیابی تأمین برق *BTS* با استفاده از سیستم فتوولتائیک، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۷، شماره ۲، صص ۱۳۸-۱۲۵.

زینل‌زاده، رضا، صادقی، زین‌العابدین، دهقان‌پور، محمدرضا و مهدی، قائدی (۱۳۹۱)، ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های فتوولتائیک: مطالعه موردی منطقه جنوب شرق ایران، *مطالعات اقتصاد انرژی*، سال ۹، شماره ۳۳، صص ۱۴۹-۱۱۵.

صادقی، حسین، نوری شیرازی، مهسا و بیابانی خامنه، کاظم (۱۳۹۳)، نقش تولید برق از منابع تجدیدپذیر در کاهش گازهای گلخانه‌ای: یک رویکرد اقتصادسنجی، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۷، شماره ۳، صص ۳۸-۲۳.

علیزاده، امین و خلیلی، نجمه (۱۳۸۸)، تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه مشهد)، *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۳ ، شماره ۱، صص ۲۳۸- ۲۲۹.

لاریجانی، مریم، شبیری، محمد و ابوالحسنی وظیفه‌خوران، الناز (۱۳۹۳)، بررسی رابطه بین میزان پذیرش اجتماعی سیستم‌های انرژی خورشیدی و عوامل مؤثر آن (مطالعه موردی :شهر تبریز، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۷، شماره ۴، صص ۱۴-۱.

لطفعلی‌پور، محمدرضا و بیگم حسینی، عصمت (۱۳۹۱)، بررسی اقتصادی هزینه برق تولیدی در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نیشابور و بادی بینالود با توجه به ملاحظات زیست محیطی، مجموعه مقالات دومین کنفرانس سالانه انرژی پاک.

مجیدیان، داوود (۱۳۷۷). ارزیابی طرح‌های صنعتی: مطالعات فنی - اقتصادی – مالی. چاپ دوم. سازمان مدیریت صنعتی.

معینی، سام و دهقان‌منشادی، محسن (۱۳۸۹). انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگاه آن‌ها در تأمین انرژی، *نشریه گستره انرژی*، سال چهارم، شماره ۴۱، صص ۴۸-۴۵.

منظور، داود و رضائی، حسین (۱۳۹۲)، اثرات اصلاح قیمت سوخت مصرفی نیروگاه‌ها بر قیمت برق در بازار تجدیدساختاریافته: رویکرد پویایی سیستمی، *فصلنامه برنامه ریزی و بودجه*، سال ۱۸، شماره۱، صص ۱۰۸-۹۵.

مهدوی عادلی، محمدحسین، سلیمی‌فر، مصطفی و قزلباش، اعظم (۱۳۹۳)، ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی(فتولتائیک) و برق فسیلی در مصارف خانگی(مطالعه موردی مجتمع سه واحدی در شهرستان مشهد)، *سیاست‌گذاری اقتصادی*، سال ۶، شماره ۱۱، صص ۱۴۷-۱۲۳.

مهدوی عادلی، محمدحسین و خواجه نائینی، رضا (۱۳۹۳)، بررسی و ارزیابی مالی تولید برق با استفاده از انرژی خورشیدی در ایران، *دو فصلنامه اقتصاد مالی-پولی*، سال ۲۱، شماره ۷، صص ۱۲۵-۱۰۵.

مولایی، محمدعلی، منظور، داود و رضائی، حسین (۱۳۹۱)، فرآیند تعیین قیمت تعادلی در بازار برق ایران با رویکرد پویایی سیستمی، *فصلنامه اقتصاد مقداری*، دوره۹، شماره۲، صص ۷۱-۸۶.

نیکنام، ندا، میرزا حسینی، علیرضا، محمدی، علی و تقوی، لعبت (۱۳۹۴)، بررسی و ارزیابی موقعیت جغرافیایی احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک درکاهش میزان انتشار *CO2* با استفاده از نرم افزار *RetScreen*، *فصلنامه انسان و محیط زیست*، شماره ۳۲، صص ۱۱-۱.

وزارت نیرو (۱۳۹۰). انرژی خورشیدی. معاونت امور انرژی، سازمان انرژی‌های نو ایران.

وزارت نیرو (۱۳۹۲).آمار تفضیلی صنعت برق ایران در سال ۱۳۹۲. معاونت منابع انسانی و تحقیقات شرکت مادر تخصصی توانیر، دفتر فن‌آوری اطلاعات و آمار.

یزدانی راد، رحیم، کوچری، آلبرت و عزیزی، هوشنگ (۱۳۷۷)، ارزیابی اقتصادی سیستم‌های انرژی فتوولتایی و گسترش شبکه برق و مولدهای دیزلی برای تأمین برق روستاها در ایران، *نشریه علمی پژوهشی برق*، شماره ۲۲، صص ۱۳۴-۱۲۳.

ب) انگیسی

Abdmouleh, Z., Alammari, R. A. M., and Gastli, A. (2015). Recommendations on Renewable Energy Policies for the GCC Countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.50, pp.1181-1191.

Almorox, J. and Hontoria, C. (2004). Global Solar Radiation Estimation Using Sunshine Duration in Spain, *Energy Conversion and Management journal*, Vol. 45, pp. 1529-1535.

Bristow, K.L., Campbell, G.S. (1984). On the Relationship Between Incoming Solar Radiation and Daily Maximum and Minimum Temperature, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 31, pp. 150-166.

Botterud, A. (2002). Long-term Planning in Restructured Power Systems Dynamic Modeling of Investments in New Power Generation Under Uncer Uncertainly, *The Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*, pp. 27-47.

Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., Zhao, W. (2004). Validation of Five Global Radiation Models with Measured Daily Data in China, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 1759-1769.

Edalati, S., Ameri, M., Iranmanesh, M., Sadeghi, Z. (2017). Technical and Economic Assessment of Solar Photovoltaic Power Plants in Oil-Producing Countries: a Prospective Approach with Case Study in Iran, *EU PVSEC Programme Planner, Hamburg- Germani*, pp, 3177-3182.

Edalati, S., Ameri, M., Iranmanesh, M. (2015). Comparative Performance Investigation of Mono-and Poly-Crystalline Silicon Photovoltaic Modules for Use in Grid-Connected Photovoltaic Systems in Dry Climates", *Applied Energy*, Vol. 160, pp. 255-265.

Iwasaki, Y., Yamamoto, K. (2014). Economic Evaluation Method of Photovoltaic Power Generation Installed in Ordinary Homes, *Smart Grid and Renewable Energy*, NO. 5, pp. 137-151.

Li, Zhidong. (2010). Quantitative Analysis of Sustainable Energy Strategies in China, *Energy Policy*, Vol. 38, pp.2149–2160.

Mirzahosseni, S., Taheri, T. (2012). Environmental, Technical and Financial Feasibility Study of Solar Power Plants by RET Screen, According to the Targeting of Energy Subsidies in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp.2806-2811.

Nishimura, A., Hayashi, Y., Tanaka, K., Hirota, M., Kato, S., Ito, M., Araki, K., Hud, E.J. (2010). Life Cycle Assessment and Evaluation of Energy Payback Time on High Concentration Photovoltaic Power Generation System, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 2797-2807.

Ramli, M. A., Hiendro, A., and Twaha, S. (2015). Economic Analysis of PV/Diesel Hybrid System with Flywheel Energy Storage, *Renewable Energy*, Vol. 78, pp. 398-405.

Rezzouk, H., and Mellit, A. (2015). Feasibility Study and Sensitivity Analysis of a Stand-Alone Photovoltaic–Diesel–Battery Hybrid Energy System in the North of Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp.1134-1150.

Talavera, D. L., Nofuentes, G., Aguilera, J., and Fuentes, M. (2007), Tables for the Estimation of the Internal Rate of Return of Photovoltaic Grid-Connected Systems, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 11, pp. 447-466.

Weick, ed. (1993).Cost-Benefit Analysis and its Possible Application to the EARP Process, ESASINC, No.22.

Vogstad, K. O. (2005). A System Dynamics Analysis of the Nordic electricity market: the transition from fossil fuelled towards a renewable Supply within a Liberalised Electricity Market, *The Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*, pp.1- 156.