

ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه

با نیروگاه دیزلی

دکتر رحمان خوش اخلاق*

دکتر علیمراد شریفی**

میثم کوچک زاده***

تاریخ ارسال: ۱۳۸۳/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۴/۴/۷

چکیده

انرژی خورشیدی^۱ یکی از مهمترین انواع انرژیهای تجدید پذیر^۲ در ایران است؛ زیرا اکثر مناطق به ویژه کویر مرکزی از توانایی قابل توجهی در استفاده از انرژی خورشیدی برخوردار است. هدف از نگارش این مقاله ارزیابی اقتصادی استفاده از نیروگاه خورشیدی (فتوولتائیک)^۳ در مقایسه با نیروگاه دیزلی و اتصال به شبکه سراسری برق به منظور تأمین برق روستاهای مرکزی در ایران است. در این باره با توجه به اطلاعات در دسترس و با استفاده از تحلیل هزینه چرخه عمر^۴، هزینه تولید برق با روشهای مختلف محاسبه می‌گردد. نتایج به دست آمده از ارزیابی

* دانشیار گروه اقتصاد دانشگاه اصفهان

e-mail: rahmankh44@yahoo.com

** استادیار گروه اقتصاد دانشگاه اصفهان

e-mail: asharifi@istt.org

*** دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد دانشگاه اصفهان

e-mail: maisam123@yahoo.com

1. Solar Energy
2. renewable energy
3. photovoltaic power planet
4. life cycle cost analysis (LCCA)

اقتصادی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که هزینه واحد انرژی سیستم فتوولتائیک با 960 Rls/kWh از هزینه واحد انرژی در گزینه های دیگر کمتر است.

طبقه بندی Jel : L94, Q42

واژگان کلیدی: منابع تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، نیروگاه فتوولتائیک، هزینه واحد انرژی، تحلیل هزینه چرخه عمر

مقدمه

زندگی روزمره مردم وابسته به تولید و مصرف انرژی است؛ لذا عرضه و تقاضای آن در جوامع بشری به طور مستمر رو به افزایش است. در حال حاضر، ۷۷ درصد کل انرژی مصرفی جهان را سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند که با تولید گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در فرایند تبدیل و در نتیجه تخریب لایه اوزن، محیط زیست را به شدت مورد تهدید قرار داده و موجب گرم شدن بیشتر دمای کره زمین می‌شوند. بنابراین به منظور حفظ محیط زیست، توجه به انرژی‌های جایگزین (انرژی‌های نو) ضروری به نظر می‌رسد. آنچه همگان را به استفاده از انرژی‌های نو ترغیب می‌کند، محدودیت ذخایر فسیلی و اثرهای نامطلوب زیست محیطی پسماندهای آنها، نوسان قیمت‌ها و بحران‌های انرژی است، و آنچه همگان را از جانشینی سریع انرژی‌های نو باز می‌دارد، بازده پایین آنها در مقایسه با انرژی‌های فسیلی، بالابودن هزینه استفاده و تبدیل، آزمایشی بودن بسیاری از طرح‌ها و بی‌رغبتی دولتها و صنایع به حمایت از آنهاست. هدف اساسی مقاله حاضر بررسی امکان سنجی اقتصادی استفاده از نیروگاه فتوولتائیک، نیروگاه دیزلی و اتصال به شبکه سراسری توزیع برق به منظور تأمین برق روستاهای کویر مرکزی ایران است. در بخش‌های اول و دوم مقاله به ترتیب به بررسی وضعیت انرژی خورشیدی در ایران، پیشینه تحقیق و سپس تشریح مبانی نظری مدل می‌پردازیم. نتایج تجربی مدل در بخش سوم و نتیجه‌گیری و ارائه گزینه مناسب در بخش چهارم آورده شده است.

۱. ادبیات موضوع**۱-۱. انرژی خورشیدی**

انرژی خورشیدی، یکی از مهمترین نوع انرژی‌های نو است. این انرژی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، یکی از مهمترین گزینه‌های جایگزین برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌آید که نگرانی‌های بشر را در مورد پایان پذیری، افزایش آلودگی‌های ناشی از تبدیل آن به انرژی‌های دیگر و... برطرف کرده است.

خورشید نه تنها خود منبع عظیم انرژی است، بلکه سرآغاز حیات و منشأ تمام انرژی‌های دیگر نیز است. طبق برآوردهای علمی در حدود ۶۰۰۰ میلیون سال از تولد این گوی آتشین می‌گذرد و در هر ثانیه ۴/۲ میلیون تن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می‌شود؛ با توجه به وزن خورشید که حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است، این کره نورانی را می‌توان به عنوان منبع عظیم انرژی تا ۵ میلیارد سال آینده به حساب آورد. میزان دما در مرکز خورشید حدود ۱۰ تا ۱۴ میلیون درجه سانتیگراد است که از سطح آن با حرارتی نزدیک به ۵۶۰۰ درجه و به صورت امواج الکترو مغناطیسی در فضا منتشر می‌شود.

زمین در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری خورشید قرار دارد و سهم آن در دریافت انرژی از خورشید تنها در حدود $\frac{1}{2 \times 10^9}$ از کل انرژی تابشی آن است. با وجود این مقدار انرژی تابشی خورشید بر روی کره زمین، ۱۰۰۰۰ برابر کل مصرف انرژیهای سالیانه بر روی زمین است که این مطلب نشان دهنده اهمیت توجه به این منبع در تأمین نیازهای روزمره بشر است (کعبی نژادیان، ۱۳۷۶). اگر تا به حال انرژی خورشیدی رقیبی جدی برای سوختهای فسیلی محسوب نمی شده است به دلیل پایین بودن تاریخی قیمت سوختهای فسیلی بوده است. اگرچه هنوز هم فن آوری استفاده از انرژی خورشیدی به بلوغ خود نرسیده است، اما رسیدن به این تکامل نزدیک است. به طوری که امروزه سیستم فتوولتاییک توان رقابت در شرایط مناسب را دارد (Leasourd, 2001). به این علت بسیاری از کشورهای جهان در تلاشند تا با جایگزینی انرژی خورشیدی در تولید حرارت و الکتریسیته حداکثر استفاده از این منبع انرژی را به دست آورده و زیانهای ناشی از مصرف سوختهای فسیلی را کاهش دهند. به عنوان مثال، کشور یونان با وضع تخفیفهای مالیاتی برای خانوارهایی که از انرژی خورشیدی بهره می گیرند، مردم را به استفاده از این انرژی تشویق کرده است. در انگلستان (با تابش ۹ مگا ژول در مترمربع در روز یعنی نصف تابش در ایران) استفاده از انرژی خورشیدی اجباری شده است و در شهرهایی مثل بروکسل و توکیو (با میانگین تابش سالانه ۱۰ مگا ژول در متر مربع در روز) استفاده از انرژی خورشیدی بسیار رایج است. دولت اسپانیا نیز در جهت سیاست بهینه سازی تولید و مصرف انرژی، نصب صفحات جذب نور خورشید (پانلهای فتوولتاییک) را در ساختمانهای جدید این کشور اجباری کرده است. اتحادیه اروپا با توجه به افزایش قیمت هر بشکه نفت خام به بیش از ۵۰ دلار، درصدد است ۱۰۰ میلیون مترمربع از صفحات خورشیدی را تا سال ۲۰۱۰ میلادی در کشورهای عضو نصب نماید (روزنامه شرق، ۱۳۸۳/۸/۲۶). همچنین، پیش بینی می شود تا سال ۲۰۰۵ تعداد خانوارهای استفاده کننده از انرژی خورشیدی در انگلستان، آلمان و ژاپن به ترتیب به ۱۴۰، ۶ و ۴۰۰ هزار خانوار برسد (انجمن انرژی خورشیدی ایران، ۱۳۸۱).

خوشبختانه کشور ما به دلیل موقعیت ویژه جغرافیایی، توان بالایی در دریافت انرژی خورشیدی دارد؛ به طوری که میانگین سالانه تابش خورشیدی در کشور ۵ کیلووات ساعت در روز برآورد شده که این رقم در مقایسه با دیگر کشورها بسیار قابل ملاحظه است. بنابراین می توان با استفاده از انرژی خورشیدی در مناطق مختلف کشور به ویژه مناطق آفتاب خیز در کویر مرکزی (باحداقل ۵/۳ کیلووات ساعت تابش روزانه)، ضمن بهره مندی از این انرژی رایگان و حفظ ذخایر فسیلی برای نسلهای آینده، آلودگیهای زیست محیطی نیروگاههای دیزلی را در اثر کاهش ساعات عملکرد کاهش داده و زمینه را برای رسیدن به توسعه پایدار فراهم آورد. در این باره، صرفه جوییهای حاصل شده در بلند مدت (صرفه جویی در مصرف سوخت و صرفه جویی حاصل از کاهش آلودگی) می تواند دولت را در تخصیص بهینه منابع محدود خود در تأمین انرژی یاری رساند.

به عنوان نمونه، طبق آمار رسمی وزارت نیرو تا سال ۱۳۸۱ تنها ۳۱ درصد روستاهای زیر بیست خانوار کشور برق دار شده‌اند و نزدیک به ۲۱ هزار روستا فاقد برق هستند. با توجه به اینکه برق رسانی به روستاهای کم جمعیت و پراکنده واقع در کویر مرکزی، به دلیل افزایش تلفات شبکه توزیع توجیه اقتصادی ندارد، استفاده از نیروگاههای فتوولتاییک (با قابلیت تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریسیته) به دلیل استفاده نکردن از سوخت و پایین بودن هزینه‌های عملیاتی آن می‌تواند ضمن تأمین برق مورد نیاز، هزینه‌های بلندمدت کمتری نسبت به گسترش شبکه یا احداث نیروگاه دیزلی داشته باشد.

جدول - ۱. وضعیت روستاهای مسکونی کشور از نظر برق رسانی در پایان سال ۱۳۸۱

شرح	کل روستاهای مسکونی		روستاهای برق دار تا پایان ۱۳۸۱		درصد برق دار شدن
	روستا	خانوار	روستا	خانوار	
روستا بابتش از ۲۰ خانوار	۳۶۵۱۴	۴۰۷۷۸۶۳	۳۶۵۰۲	۳۹۷۷۰۳۹	۹۹/۷
روستا با کمتر از ۲۰ خانوار	۳۱۵۲۰	۲۶۰۶۳۴	۹۷۳۳	۱۰۰۵۴۰	۳۰/۸۷
جمع	۶۸۰۳۴	۴۳۳۸۴۹۷	۴۶۲۳۵	۴۰۷۷۵۷۹	۶۷/۹۵

منبع: صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۱

در این مقاله ضمن بررسی سه گزینه برق رسانی به روستاهای کویر مرکزی (احداث نیروگاه خورشیدی از نوع فتوولتاییک، احداث نیروگاه دیزلی و گسترش شبکه برق رسانی)، هزینه واحد انرژی^۱ برای سه گزینه، در طول دوره عمر پیش‌بینی شده برای هر گزینه و با استفاده از تحلیل هزینه چرخه عمر به دست می‌آید و اقتصادی‌ترین روش معرفی می‌شود.

۱-۲. پیشینه تحقیق

با توجه به اهمیت روزافزون انرژی خورشیدی و اختلاف نظرهای موجود در مورد اقتصادی بودن استفاده از آن، صاحب‌نظران و کارشناسان مطالعات زیادی در این زمینه انجام داده‌اند که جالب توجه است. بانک جهانی در بررسیهای جداگانه‌ای در این مورد به مطالعه ویژگیهای فنی و اقتصادی انرژیهای تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی پرداخته است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای با عنوان "انرژی خورشیدی" که لیبنتال و همکاران^۲ انجام داده‌اند، برق رسانی به مناطق روستایی جزایر اقیانوسیه، به وسیله نیروگاه دیزلی و نیروگاه فتوولتاییک مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفته است. در این پژوهش که از روش تحلیل

1. energy unit cost
2. A.S.Liebenthal (1994)

هزینه‌های چرخه عمر استفاده شده است، برق رسانی به مناطق روستایی به وسیله گزینه‌های مورد نظر مقایسه شده و هزینه نهایی تولید انرژی به وسیله نیروگاههای دیزلی و فتولتاییک محاسبه شده است. طبق نتایج در این پژوهش که با توجه به تجربه کشورهای جزایر اقیانوسیه به دست آمده است، برای برق رسانی به مناطق روستایی با ظرفیت بار پایین (عمدتاً برای روشنایی منازل)، تولید برق با نیروگاه فتولتاییک ارزان‌تر از نیروگاه دیزلی خواهد بود. در مطالعه دیگری که کلثوم احمد (Ahmed, 1994) انجام داده است هزینه‌های استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر منتخب (حرارتی- خورشیدی، فتولتاییک و زیست توده) با روشهای ارزش حال و چرخه عمر محاسبه شده است. نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در این مقاله حاکی از آن است که هزینه‌های تکنولوژی فتولتاییک در پانزده سال گذشته (۱۹۹۴-۱۹۷۹) روند نزولی داشته است و این روند تا سال ۲۰۲۰ ادامه خواهد یافت؛ اما هزینه تولید برق از تکنولوژی حرارتی - خورشیدی و تکنولوژی زیست توده (بیوماس) روند متغیری داشته است. در مقاله‌ای که کارلوس و همکاران^۱ در مورد شمال برزیل انجام داده اند این نتیجه به دست آمده است، که به منظور برق رسانی به روستاهای زیر صد خانوار، استفاده از نیروگاه ترکیبی دیزل و فتولتاییک گزینه مناسبی است و با توجه به پیش‌بینی کاهش قیمت اجزای سیستم فتولتاییک در آینده، استفاده از آن از لحاظ اقتصادی توجیه پذیرتر خواهد شد. نویسندگان در این پژوهش با در نظر گرفتن مقدار متوسط مطلوبی از مصرف روزانه یک خانوار روستایی که شامل استفاده از لامپ کم مصرف، رادیو، تلویزیون، یخچال و غیره است و با استفاده از مدل ارزش حال، به محاسبه هزینه تولید برق برای ساکنان این روستا از طریق روشهای گوناگون برق رسانی پرداخته‌اند. در پژوهش دیگری به وسیله نوتون و همکاران^۲، ضمن استفاده از تحلیل هزینه چرخه عمر، هزینه واحد انرژی سیستم فتولتاییک در دو حالت پشتیبانی و عدم پشتیبانی با موتور دیزلی کمی محاسبه شده، و هزینه سیستم به تفکیک اجزای آن برآورد گردیده است. لزورد^۳ در مقاله‌ای با عنوان "سیستمهای فتولتاییک خورشیدی: اقتصاد منابع تجدیدپذیر" ضمن به دست آوردن هزینه واحد انرژی سیستم فتولتاییک از روش تحلیل هزینه چرخه عمر و مقایسه آن با هزینه واحد انرژی نیروگاههای متعارف، به بررسی مزایای استفاده از نیروگاه فتولتاییک پرداخته است. در این پژوهش هزینه تولید برق با سیستم فتولتاییک در سال ۱۹۹۷، ۲۵ سنت به ازای هر کیلو وات ساعت برآورد گردیده است که در مقایسه با هزینه تولید برق متعارف که ۱۰ سنت به ازای هر کیلو وات ساعت برق است، بالاتر است اما پیش‌بینی شده است که به دلیل پیشرفت فن‌آوریهای موجود، در آینده نزدیک هزینه برق خورشیدی به نصف کاهش یابد که با توجه به این امر و همچنین روند صعودی قیمت جهانی سوخت، استفاده از انرژی خورشیدی مقرون به صرفه خواهد شد. در پژوهش دیگری که

1. Carlos etal (1998)
2. Notton etal (1998)
3. Lesourd (2002)

کال و همکاران^۱ انجام داده‌اند، نیروگاه‌های ترکیبی دیزلی و فتوولتاییک مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفته است. نویسندگان در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل ذخایر چرخه عمر^۲ به این نتیجه رسیده اند که در منطقه ویژه ای از شمال برزیل استفاده از نیروگاه‌های ترکیبی دیزلی و فتوولتاییک مقرون به صرفه است. شبابی و همکاران^۳ (۱۳۷۶) در مقاله «ارزیابی فنی و اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک در ایران» با محاسبه میزان انرژی متوسط دریافتی با پانلهای فتوولتاییک در مناطق آفتاب خیز کشور، با توجه به میزان انرژی قابل تولید، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، بهره برداری و نگهداری نیروگاه، هزینه تولید برق با نیروگاه فتوولتاییک را با استفاده از روش هزینه معادل انرژی^۴ محاسبه کرده‌اند. در این مقاله نتیجه‌گیری شده است که مناسب‌ترین مناطق برای احداث نیروگاه‌های فتوولتاییک در جنوب مرکزی کشور است و هزینه تولید برق با نیروگاه فتوولتاییک بیش از ۴۰۰ ریال به ازای هر کیلو وات ساعت است که در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی و فسیلی به طور قابل ملاحظه ای بالاتر است. لذا این نیروگاهها، برای مناطق دور افتاده با مصارف محدود که برق رسانی آنها از طریق شبکه های برق بسیار پرهزینه و مشکل است، توصیه شده است. همچنین در پژوهش دیگری که شریفی و همکاران^۵ (۱۳۷۹) با استفاده از روش تحلیل هزینه عمر انجام داده اند، این نتیجه به دست آمده است که با توجه به پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در منطقه خوروبیابانک، امکان بهره‌برداری از نیروگاه خورشیدی وجود دارد و با در نظر گرفتن دو حالت با دو نرخ تنزیل، نتیجه‌گیری شده است که در حالتی که نرخ تنزیل ۸ درصد در نظر گرفته شود، نیروگاه حرارتی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه فتوولتاییک و نیروگاه دیزلی از جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها از اولویت بالاتری برخوردار است؛ و نیروگاه فتوولتاییک نیز از توجیه اقتصادی برخوردار است. همچنین در حالتی که نرخ تنزیل ۱۵ درصد در نظر گرفته شود، کماکان نیروگاه حرارتی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه‌های دیگر از مزیت نسبی قابل توجهی برخوردار است، لیکن هزینه نهایی تولید برق با نیروگاه فتوولتاییک بیش از سایر تکنولوژیهای انرژی خواهد بود.

در مجموع، می‌توان گفت که در اکثر مطالعات انجام شده در مورد محاسبه هزینه تولید انرژی الکتریکی با روشهای مختلف موجود به ویژه سیستم فتوولتاییک، از روش تحلیل هزینه چرخه عمر استفاده شده است که با توجه به استفاده از این روش در این مقاله، در بخش بعدی به آن پرداخته خواهد شد.

1. Colle etal (2004)

2. life cycle savings

۳. شیوا شبابی و مسعود سلطانی‌حسینی (۱۳۷۶)

4. cost equilibrium energy

۵. علیمراد شریفی، دارا فتوحی و بهزاد تیموری (۱۳۸۰)

۲. مبانی نظری مدل

یکی از روشهای ارزیابی اقتصادی نیروگاههای خورشیدی، روش تحلیل هزینه چرخه عمر است. از روش هزینه چرخه عمر معمولاً در تعیین اقتصادی بودن طرح استفاده می‌شود که هزینه‌های آتی به ارزش حال تنزیل داده می‌شود.

در مدل زیر که بر اساس روش تحلیل هزینه چرخه عمر و با توجه به ویژگیهای فنی سیستم فتوولتاییک طراحی شده است با احتساب عواملی چون نرخ تنزیل واقعی، طول عمر سیستم، میزان تابش در منطقه و... هزینه واحد انرژی سیستم فتوولتاییک محاسبه می‌شود. این مدل را کلی و نوتون^۱ و همکاران به کار گرفته‌اند.

$$C_{pv} = \frac{\{ [CRF(i, n) + INS][1 + ID][MOD + BOS + PC.SP.n \text{ mod } .nbos.nt] + OM \}}{n \text{ mod } .nbos.INSOL.pc} \quad (۱)$$

که در آن:

i ، نرخ تنزیل واقعی (٪)

n ، طول عمر سیستم فتوولتاییک (سال)

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

ضریب بازگشت سرمایه^۲

INS ، هزینه بیمه (دلار در سال)

ID ، ضریب هزینه غیرمستقیم

MOD ، هزینه سرمایه‌گذاری مدولها (دلار به مترمربع)

BOS ، هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات جانبی سیستم فتوولتاییک مرتبط با منطقه (دلار به مترمربع)

PC ، هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات جانبی سیستم فتوولتاییک مرتبط با توان (دلار به کیلو وات)

OM ، هزینه تعمیر و نگهداری سالانه (دلار به متر مربع در سال)

SP ، حداکثر تابش خورشیدی (کیلو وات به مترمربع)

$INSOL$ ، تابش سالانه انرژی خورشیدی بر روی پانلهای مسطح و ثابت (کیلووات به مترمربع در سال)

$n \text{ mod}$ ، کارایی مدول فتوولتاییک (٪)

$nbos$ ، کارایی تجهیزات جانبی (٪)

nt ، ضریب تصحیح دمای سلول خورشیدی (٪)

pc ، کارایی وضعیت توان (٪)

C_{pv} ، هزینه واحد تولید برق خورشیدی (دلار به کیلو وات)

1. Kelly, Notton etal (1998)

۲. روش استخراج این ضریب در پیوست (۲) ذکر شده است.

آنچه که در نمادهای بالا قابل ذکر است این است که n در کارایی مدول فتوولتاییک، کارایی تجهیزات جانبی، و ضریب تصحیح دمای سلول خورشیدی را نباید با n طول عمر سیستم فتوولتاییک اشتباه کرد. به طور کلی هزینه تولید برق با سیستمهای فتوولتاییک به چند عامل مهم بستگی دارد:

الف) میزان تابش خورشید در منطقه؛ این عامل مشخص می‌کند که تاجه میزان امکان تولید برق خورشیدی وجود دارد، که از این جهت قابل مقایسه با مقدار سوخت مورد نیاز برای نیروگاههای دیزلی است.

ب) کارایی مدول؛ پژوهشهای بانک جهانی حاکی از آن است که کارایی سیستمهای فتوولتاییک و به ویژه مدولهای خورشیدی طی دهه های اخیر افزایش داشته است، بیشتر این سیستمها دارای کارایی برابر ۷۰ تا ۸۰ درصد است که نقش مهمی در کاهش هزینه برق خورشیدی دارد.

ج) هزینه مدول؛ هزینه مدول خورشیدی بستگی مستقیم به مواد سازنده آن، روش ساخت و اندازه آن دارد.

د) هزینه سیستم؛ این مورد شامل تجهیزات جانبی سیستم فتوولتاییک (PV) از قبیل پایه نگهدارنده، مبدل انرژی از جریان DC به AC، ابزار کنترل و... است. هزینه این تجهیزات به طور میانگین ۴۰ تا ۶۰ درصد هزینههای سرمایه‌گذاری سیستم را در بر می‌گیرد.

ه) طول عمر سیستم؛ منابع اطلاعاتی طول عمرهای متفاوتی را برای سیستمهای PV قید کرده‌اند. لیکن طبق آخرین برآوردهای وزارت انرژی امریکا میانگین طول عمر سیستم PV طی سالهای ۱۹۹۵-۲۰۰۰ حدود ۲۰ سال و طی سالهای ۲۰۱۰-۲۰۳۰ حدود ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. اکثر پژوهشها طول عمر سیستم را ۳۰ سال تخمین زده‌اند.

و) نرخ بهره؛ به دلیل اینکه هزینه سرمایه‌گذاری سیستمهای PV گران است، بنابراین عامل نرخ بهره نقش مهمی را در توجیه اقتصادی این پروژه ایفا می‌کند.

در ارزیابی گزینه های دیگر (مولد دیزلی و گسترش شبکه) به روش تحلیل هزینه چرخه عمر، با توجه به نرخ تنزیل واقعی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی و سایر موارد، هزینه واحد انرژی با استفاده از مدل زیر محاسبه می‌گردد:

$$c = \frac{ALCC}{E} \quad (2)$$

که در آن:

$$ALCC = \frac{LCC}{(P/A)}$$

، هزینه چرخه عمر سالانه

1. module (MOD) cost
2. balance-of-system (BOS) cost

$$LCC = C_0 + PW$$

$$PW = C_1(P/A), i, n_1 + C_2((P/F), i, n_2)$$

C_0 ، هزینه‌های سرمایه‌گذاری

C_1 ، هزینه‌های جاری

C_2 ، هزینه تعمیر اساسی

$$(P/A) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$(P/F) = \frac{1}{(1+i)^n}$$

$$i = \frac{1+r}{1+p} - 1$$

p ، نرخ تورم

r ، نرخ بهره اسمی

n_1 ، طول عمر سیستم

n_2 ، زمان انجام تعمیر اساسی

E ، مصرف سالانه انرژی

C ، هزینه واحد انرژی

در این مدل (P/A) معکوس CRF در مدل قبل است. CRF که ضریب بازگشت سرمایه یا استهلاک سالانه سرمایه ثابت بوده، و به طول عمر سیستم (n) و نرخ تنزیل (r) بستگی دارد. وقتی $n \rightarrow \infty$ یعنی طول عمر سیستم زیاد می‌شود، حد مجانبی CRF برابر با نرخ تنزیل می‌گردد. بنابراین نرخ تنزیل کمتر، هزینه نهایی کمتری را به دنبال خواهد داشت. به عبارت دیگر: $C_{PV} = f(r)$. به منظور جلوگیری از بزرگنمایی C در محاسبات از نرخ تنزیل واقعی (i) به جای نرخ تنزیل اسمی (r) استفاده می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$1 + i = \frac{1 + r}{1 + p}$$

که p برابر با نرخ تورم انتظاری است (Lesourd, 2001). بنابراین می‌توان نوشت

$$C_{PV} = f\left(\frac{1+r}{1+p} - 1\right) \text{ یا } C_{PV} = f(i) \text{ به طوری که } f' < 0 \text{ است. لذا با توجه به}$$

ارتباط معکوس بین هزینه تولید و نرخ تنزیل واقعی می‌تواند نرخ تنزیل اسمی را به طور معکوس و نرخ تورم انتظاری را به طور مستقیم در هزینه تولید مؤثر دانست. بنابراین کل سرمایه‌گذاری به دو عامل نرخ تنزیل اسمی و نرخ تورم وابسته است و چون سهم سیاست‌های پولی و مالی دولت و نرخ تورم به سیستم و ثبات اقتصادی وابسته است، بنابراین به طور غیر مستقیم نقش ثبات اقتصادی و تعدیل منطقی نرخ بهره در امر سرمایه‌گذاری اهمیت دارد.

۳. نتایج تجربی

۳-۱. برآورد مصرف برق در یک روستای دورافتاده

برای برآورد میانگین مصرف برق در روستاهای زیربست خانوار واقع در کویر مرکزی، میزان مصرف باتوجه به شرایط مناطق کویری (استفاده از تجهیزات سرمایشی مانند یخچال، کولرو پنکه) و استفاده از روشنایی (لامپهای کم مصرف ۲۰ وات)، رادیو و تلویزیون محاسبه می‌شود. در مورد روشنایی اماکن عمومی (مانند مسجد، مدرسه و حمام) و روشنایی معابر باتوجه به اینکه با افزایش خانوارها این اماکن موجودیت پیدا می‌کنند، در روستاهای مختلف به تعداد نصف خانوارها برای اماکن عمومی روشنایی در نظر گرفته می‌شود. نکته دیگر این است که به منظور حداقل کردن کاهش تلفات توزیع، برق خانوارها و اماکن عمومی در همان محل و با صفحات فتوسل (پانل خورشیدی) تأمین می‌شود. به منظور برآورد مصرف برق روستا، برق مورد نیاز روزانه هر خانوار در جدول (۲) محاسبه شده است.^۱

طبق نظر کارشناسان فنی، برای جبران اتلاف انرژی در پانل و کابل‌های رابط، ۱۰ درصد میزان مصرف، به مصرف کل هر خانوار اضافه می‌شود. در نتیجه، انرژی مورد نیاز برای تأمین برق روزانه یک خانوار، ۲/۴ کیلو وات ساعت در روز است. همچنین، میزان انرژی مورد نیاز برای هر واحد روشنایی معابر و اماکن عمومی در روستا با احتساب استفاده از لامپ کم مصرف در شب برابر با ۲۰۰ است که به ازای هر خانوار، میزان آن ۱۰۰ خواهد بود. بنابراین انرژی مورد نیاز هر خانوار با احتساب روشنایی اماکن عمومی برابر با ۲/۵ کیلووات ساعت در روز است.

۱. با توجه به موجود نبودن اطلاعات آماری در مورد میزان و نوع مصرف خانوارهای روستاهای کویر مرکزی، دربرآورد های انجام شده، از مطالعات مشابه مانند مطالعه بانک جهانی در روستاهای جزایر اقیانوسیه که لیبتال و همکاران (Liebenthal et al., 1994) انجام داده‌اند و همچنین نظر کارشناسان شرکت توزیع برق یزد استفاده شده است.

جدول ۲- برآورد مصرف روزانه برق یک خانوار روستایی

نوع مصرف	توان مصرفی (W)	مدت زمان (h/d)	انرژی* (Wh/d)
روشنایی اتاق نشیمن	۴۰+۲۰	۵	۳۰۰
روشنایی آشپزخانه	۲۰	۳	۶۰
روشنایی حیاط	۲۰	۳	۶۰
روشنایی سرویس بهداشتی	۶۰	۲	۱۲۰
تلویزیون	۲۵	۴×۰/۵	۵۰
پنکه	۳۵	۶×۰/۵	۱۰۵
کولر	۲۰۰	۶×۰/۵	۶۰۰
یخچال	۱۰۰	۸	۸۰۰
رادیو ضبط	۱۵	۶	۹۰
مصرف کل هر خانوار			۲۱۸۵ Wh/day

منبع: محاسبات نگارندگان با استفاده از نظرات کارشناسان شرکت توزیع برق یزد
* وات ساعت در روز

۳-۲. محاسبه فنی سیستم فتوولتاییک

در حدود نیمی از روستاهای زیربست خانوار بدون برق کشور در مناطق کویری و خشک با حداقل $5/3 \text{ kWh/M}^2 \cdot \text{d}$ تابش بر سطوح شیبدار (با زاویه‌ای برابر عرض جغرافیایی محل) قرار دارند. براساس اطلاعات شرکت سازنده مدولهای فتوولتاییک در ایران (شرکت کابل‌های مخابراتی شهید قندی) و باتوجه به انرژی موردنیاز هر خانوار و مقدار ساعات خورشیدی قله (PSH) و همچنین، تلفات تجهیزات جانبی سیستم فتوولتاییک (۱۰ درصد)، دستگاه اینورتر یا وارونگر (۱۰ درصد)، سیستم ذخیره‌کننده (۱۰ درصد)، ضریب همزمانی برای انواع مصارف (۶ درصد) و توان نامی پانلها (۴۵ وات قله)^۱ می‌توان تعداد مدولهای فتوولتاییک (پانل) موردنیاز هر خانوار را محاسبه کرد. همچنین برای ذخیره نمودن انرژی تولیدشده با پانلها و مصرف آن در شب یا روزهای ابری از باتریهای سرب-اسیدی ساخت داخل کشور استفاده می‌شود (یزدانی راد، ۱۳۷۷)؛ که باتوجه به مقدار انرژی تولیدشده روزانه با پانلها و تعداد روزهای ابری (حداکثر ۳ روز ابری متوالی) می‌توان ظرفیت باتریها را نیز محاسبه کرد، این برآورد در جدول (۳) آورده شده است.

به منظور تأمین برق سیستم روشنایی اماکن و معابر عمومی، به ازای هر خانوار یک سیستم فتوولتاییک شامل دو عدد پانل ۴۵ ولت، دو عدد باتری ۱۲ ولت، یک عدد اینورتر (مبدل DC به AC) و یک عدد لامپ کم مصرف تخصیص داده می‌شود.

۱. اطلاعات به دست آمده از نظرات کارشناسان فنی شرکت کابل‌های قندی

جدول ۳- برآورد تعداد پانل و باتری موردنیاز جهت تأمین برق مصرفی یک خانوار روستایی

برآورد آمپر- ساعت در روز (Ah/day) برای شارژ باتری		برآورد انرژی تولیدی روزانه یک پانل	
۲۱۸۵ Wh/d	انرژی خالص موردنیاز برای مصرف هر خانوار	۴۵ w	ظرفیت پانل (w _p یا وات قله)
۲۴ V (دو عدد باتری ۱۲ ولت)	ولتاژ باتری	۳/۴۳	ضریب تبدیل (wh/d per w _p)
$\frac{2185}{24} = 91 \text{ Ah/d}$	آمپر ساعت موردنیاز در روز (تقریباً برای ۱۲ ساعت از روز) ^۱	۱۵۴/۳۵	تولید انرژی (ظرفیت × ضریب تبدیل)
برآورد حداقل ظرفیت باتری موردنیاز		برآورد حداقل تعداد پانلهای موردنیاز برای هر خانه	
۹۱ Ah/d	آمپر ساعت موردنیاز در هر روز	۲۴۰۰ Wh/d	کل انرژی موردنیاز
۳d	تعداد روزهای ابری متوالی (حداکثر استقلال از پانل)	۱۵۴/۳۵ Wh/d	انرژی تولید شده توسط یک پانل
۹۱×۳=۲۷۳	اندازه مورد نیاز باتری	$\frac{2400}{154/35} \approx 16$	پانلهای موردنیاز

۳-۳. محاسبه اقتصادی سیستم فتوولتائیک

هزینه خریداری، نصب و بهره‌برداری از سیستم فتوولتائیک شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری (اولیه) و هزینه‌های عملیاتی است. برآوردی که در سال ۱۹۹۷ از هزینه سیستمهای فتوولتائیک شده است، ۵/۵ دلار بر وات قله است (Lesourd, 2001).

طبق تحقیقات به عمل آمده، هزینه (قیمت تمام شده) پانلهای فتوولتائیک ۴۵ وات تولیدشده با شرکت کابل‌های مخابراتی شهید قندی در سال ۱۳۸۳ معادل یک میلیون و سیصد هزار ریال است. لیکن علاوه بر پانل، تجهیزات دیگری نیز در سیستم فتوولتائیک به کار می‌رود. طبق نظر کارشناسان، قیمت پانلهای خورشیدی بین ۵۳ تا ۷۰ درصد کل سیستم فتوولتائیک است. نظر به اینکه رقم ۵۳ درصد از منابع خارجی و رقم ۷۰ درصد از منابع ایرانی سازنده پانلها گرفته شده است، به نظر می‌رسد رقم ۷۰ درصد در ایران از اعتبار بیشتری برخوردار باشد (فتوحی، ۱۳۷۹).

بنابراین کل هزینه سیستم فتوولتائیک (شامل پانل و پایه، باتری، مبدل، کابل‌های رابط، شارژ کنترل، هزینه نصب و...) در حدود ۱۸۶۰۰۰۰ ریال محاسبه می‌شود که قیمت کل سیستم فتوولتائیک به ازای هر وات قله ۴۱۰۰۰ ریال معادل ۵/۱ دلار است و کل هزینه لازم جهت تأمین برق هر خانه (شامل ۱۶ عدد

۱. طبق تعریف، یک وات برابر با یک ولت-آمپر (W=V*A) است. بنابراین از تقسیم صورت کسر (بر حسب وات-ساعت) بر مخرج کسر (بر حسب ولت)، حاصل بر حسب آمپر-ساعت خواهد بود.

پانل ۴۵ وات به همراه تجهیزات جانبی ذکر شده) ۳۰ میلیون ریال محاسبه می‌شود. همچنین قیمت سیستم فتوولتاییک لازم برای روشنایی اماکن عمومی (شامل دو عدد پانل ۴۵ وات و تجهیزات جانبی لازم) به ازای هر خانوار ۱۸۶۰۰۰۰ ریال است. در نتیجه کل هزینه تولید برق روستا به روش فتوولتاییک به ازای هر خانوار ۳۱۸۶۰۰۰۰ ریال خواهد شد.

جدول ۴- محاسبه هزینه واحد انرژی سیستم فتوولتاییک

متغیرها	علامت اختصاری	(سناریوی الف) متغیر	(سناریوی ب) متغیر	(سناریوی ج) متغیر
نرخ تنزیل واقعی	i	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۵
طول عمر سیستم فتوولتاییک (سال)	N	۳۰	۳۰	۳۰
ضریب بازگشت سرمایه	CRF	۰/۱۵۲۳	۰/۰۸۸۸	۰/۰۶۵۱
هزینه بیمه	INS	۰	۰	۰
ضریب هزینه غیرمستقیم	ID	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
هزینه سرمایه‌گذاری مدولها (دلار بر مترمربع)	MOD	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
هزینه تجهیزات جانبی مرتبط با منطقه (دلار بر مترمربع)	BOS	۵۰	۵۰	۵۰
هزینه تجهیزات جانبی مرتبط با توان (دلار بر کیلووات)	PC	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
هزینه تعمیر و نگهداری سالانه (دلار بر مترمربع در سال)	OM	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲
حداکثر تابش خورشیدی (کیلو وات بر متر مربع)	SP	۱	۱	۱
تابش سالانه خورشید بر پانلهای مسطح (کیلووات ساعت بر مترمربع)	INSOL	۱۹۵۸/۱	۱۹۵۸/۱	۱۹۵۸/۱
کارایی مدول فتوولتاییک (%)	nmod	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
کارایی تجهیزات جانبی (%)	nbos	۰/۹	۰/۹	۰/۹
ضریب تصحیح دمای سلول خورشیدی (%)	nt	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳
کارایی وضعیت توان (%)	pc	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵
هزینه تولید برق خورشیدی (دلار بر کیلووات ساعت)	C_{pv} (\$/kWh)	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۱۲
هزینه تولید برق خورشیدی (ریال بر کیلووات ساعت) ^۱	C_{pv} (RIs/kWh)	۲۲۵۰	۱۳۲۰	۹۶۰

منبع: محاسبات نگارندگان

۱. هر یک دلار معادل ۸۰۰۰ ریال منظور شده است.

به منظور محاسبه هزینه واحد انرژی سیستم فتوولتاییک از روش تحلیل هزینه چرخه عمر (مدل ۱) با تعریف سه سناریو و با فرض نرخ تنزیلهای متفاوت برای هر سناریو، نتایج جدول (۴) به دست می‌آید. بنابراین طبق محاسبات به روش تحلیل هزینه چرخه عمر، هزینه واحد انرژی سیستم فتوولتاییک در سناریوی سوم با نرخ تنزیل ۵ درصد برابر با ۹۶۰ ریال در کیلووات ساعت است. دلیل انتخاب سناریوی سوم از بین سناریوهای مختلف (بانرخ تنزیلهای مختلف)، محاسبه نرخ تنزیل واقعی به وسیله نرخ تورم و نرخ بهره اسمی است. زیرا با توجه به اینکه عمده منابع مورد استفاده در سیستم فتوولتاییک به صورت کالاهای سرمایه‌ای و با ملاحظه نرخ تورم دارای افزایش قیمت هستند، لازم است در محاسبه نرخ بهره واقعی نرخ تورم نیز لحاظ شود. به این ترتیب با در نظر گرفتن نرخ بهره ۲۴ درصد و نرخ تورم ۱۸ درصد، نرخ تنزیل واقعی برابر با ۵ درصد خواهد شد.

$$i = \frac{1+r}{1+p} - 1 = 0.05 \quad (3)$$

۳-۴. ارزیابی اقتصادی گسترش شبکه برق به روستاهای کویر مرکزی

بر اساس قیمت‌های جهانی، هزینه سرمایه‌ای ساخت نیروگاه‌های حرارتی در مقیاس بزرگ، ۱۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات است (یزدانی راد، ۱۳۷۷). از سویی اگر پیک مصرف هر خانوار ۵۰۰ وات در نظر گرفته شود، باید معادل آن به ظرفیت نیروگاه‌های کشور اضافه گردد. هزینه افزودن ظرفیت مورد نیاز به ازای هر خانوار برابر است با:

$$150 \cdot (\$/kW) \times \frac{500W}{1000} = 75 \cdot \$ = 600000 \cdot Rls \quad (4)$$

طبق بررسی‌های به عمل آمده، هزینه احداث هر یک کیلومتر شبکه توزیع در مناطق روستایی کشور برابر با ۶۷ میلیون ریال و هزینه نصب هر دستگاه ترانسفورماتور ۲۲ میلیون ریال است، که با توجه به تفاوت تقاضای بار و ولتاژ در مناطق مختلف، میانگین هزینه کل سرمایه‌گذاری برای نصب شبکه در مناطق روستایی به ازای هر کیلومتر ۷۲ میلیون ریال است. به منظور توسعه شبکه توزیع، مناطق روستایی، دولت به شرکتهای توزیع برق یارانه پرداخت می‌کند که هزینه کل سرمایه‌گذاری با احتساب یارانه دولتی به ازای هر کیلومتر، ۶۰ میلیون ریال است (شرکت سهامی برق منطقه ای یزد، ۱۳۸۳). با وجود این، با در نظر گرفتن رقم ۷۲ میلیون ریال به ازای هر کیلومتر، هزینه واقعی نصب شبکه برای فواصل ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلومتر به ترتیب برابر ۳۶۰، ۷۲۰، ۱۴۴۰ و ۲۱۶۰ میلیون ریال خواهد شد. همچنین متوسط قیمت تمام شده تولید برق در کشور در سال ۱۳۸۲ رقمی معادل ۳۳۱/۴ ریال به ازای هر کیلووات ساعت بوده است (وزارت نیرو، ۱۳۸۲) که با توجه به استفاده نیروگاه‌های داخلی از سوخت یارانه‌ای، به منظور برآورد هزینه‌های واقعی، قیمت جهانی تولید برق منظور می‌گردد که این نرخ در سال ۱۳۸۲، ۷/۲ سنت معادل ۶۰۰ ریال به ازای یک کیلو وات ساعت برق است (دپارتمان انرژی

امریکا، ۲۰۰۴). بنابراین برای تأمین برق هر خانوار روستایی با مصرف ۲/۵ کیلووات ساعت در روز، سالانه ۵۴۷۵۰۰ ریال هزینه می‌شود:

$$600 \text{ Rls} / kWh \times 2/5 \text{ kWh/d} \times 365 \text{ d/y} = 547500 \text{ Rls/year} \quad (5)$$

روشهای گوناگونی برای ارزیابی اثرات زیست محیطی منابع وجود دارد که براساس آنها می‌توان هزینه‌های غیرمستقیم آلودگی و تخریب طبیعت و نیز هزینه‌های بیماری و درمان ساکنین را محاسبه کرد. به دلیل محدودیت اطلاعات، به منظور ملاحظه هزینه غیرمستقیم آلودگی محیط زیست، ۱۵ درصد به هزینه‌های عملیاتی اضافه می‌گردد (بانک جهانی). پس مجموع هزینه‌های جاری تأمین برق هر خانوار روستایی از شبکه سراسری برابر با ۶۳۰۰۰۰ ریال می‌شود.

اگر مدت زمان بهره‌برداری از شبکه ۲۰ سال، نرخ بهره شبکه ۱۶ درصد و نرخ تورم ۳ درصد (تقریباً برابر نرخ افزایش قیمت جهانی سوخت) در نظر گرفته شود، ارزش فعلی مجموع هزینه‌های جاری هر خانوار در طول ۲۰ سال برابر خواهد شد با:

$$i = \frac{1+r}{1+p} - 1 = 0/126 \quad (6) \quad \text{نرخ تنزیل واقعی شبکه}$$

$$(P/A) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} = 7/18 \quad (7) \quad \text{فاکتور ارزش فعلی سری یکنواخت}$$

(۸) ارزش فعلی مجموع هزینه‌های جاری

$$PW = 630000 \times (P/A) = 630000 \times 7/18 = 452000 \text{ Rls}$$

به عنوان مثال، هزینه چرخه عمر و هزینه چرخه عمر سالانه برای روستایی با ۵ خانوار در فاصله ۵ کیلومتری از شبکه توزیع مطابق با مدل (۲) به صورت زیر خواهد بود:

$$LCC = (5 \times 600000) + 360000 + (5 \times 452000) = 4126000 \text{ Rls} \quad (9)$$

(۶ میلیون ریال از رابطه (۴)، ۴/۵۲ میلیون ریال از رابطه (۸) و ۳۶۰ میلیون ریال از محاسبه هزینه نصب شبکه برای ۵ کیلومتر به دست آمده است).

$$ALCC = \frac{LCC}{(P/A)} = \frac{4126000}{7/18} = 5746500 \text{ Rls/year} \quad (10)$$

و از آنجا هزینه واحد انرژی شبکه به دست می‌آید (انرژی تولید شده سالانه = E):

$$c = \frac{ALCC}{E} = \frac{5746500}{5 \times 2/5 \times 365} = \frac{5746500}{4560} = 1260 \text{ Rls/kWh} \quad (11)$$

نتایج محاسبه هزینه واحد انرژی گسترش شبکه برق در فواصل مختلف برای روستاهایی با تعداد خانوار مختلف در جدول (۵) درج شده است.

جدول ۵- هزینه واحد انرژی گسترش شبکه برق برای روستاهای ایران (ریال بر کیلووات ساعت)

کمترین فاصله از شبکه	۵ خانوار	۱۰ خانوار	۱۵ خانوار	۲۰ خانوار
۵ کیلومتر	۱۲۶۰۰	۷۱۰۰	۵۳۰۰	۴۳۰۰
۱۰ کیلومتر	۲۳۶۰۰	۱۲۶۰۰	۸۹۰۰	۷۱۰۰
۲۰ کیلومتر	۴۵۵۰۰	۲۳۶۰۰	۱۶۳۰۰	۱۲۶۰۰
۳۰ کیلومتر	۶۷۵۰۰	۳۴۶۰۰	۲۳۶۰۰	۱۸۰۰۰

منبع: محاسبات نگارندگان

۳-۵. ارزیابی اقتصادی مولد دیزلی

به منظور محاسبه هزینه واحد انرژی تولید برق با مولد دیزلی، ابتدا باتوجه به تعداد خانوار و پیک برق مصرفی روستا، مولدهای مورد نیاز برآورد گردیدند. در مشورتی که با کارشناسان فنی انجام گردید، دو عدد مولد دیزلی به ظرفیتهای ۱۰ تا ۱۲ کیلووات آمپر که با تناوب ۸ یا ۱۲ ساعتی به طور پیوسته فعالیت کنند می‌توانند برق مورد نیاز یک روستا با ۲۰ خانوار (با پیک مصرف ۵۰۰ وات برای هر خانوار) را تأمین کنند. مولدها از نوع دور پایین (مثلاً ۷۵۰ یا ۳۷۵ دور در دقیقه) و با طول عمر مفید ۱۰ سال در نظر گرفته می‌شوند. در محاسبه هزینه‌های تولید، دو سناریو را در نظر می‌گیریم؛ سناریوی اول، محاسبه نرخ سوخت و روغن به قیمت فعلی (با بارانه دولتی) و سناریوی دوم، محاسبه نرخ سوخت و روغن به قیمت واقعی و جهانی. آنچه مسلم است در سناریوی دوم هزینه واحد انرژی به دست آمده تقریباً بیشتری به واقعیت خواهد داشت.

سناریوی اول محاسبه هزینه سالانه مصرف سوخت (گازوییل) و روغن برای مولد دیزلی به ازای هر خانوار؛ در این محاسبه تقاضای انرژی هر خانوار ۹۱۲/۵ کیلووات ساعت در سال، بازدهی مولدها ۳۰ درصد، تلفات موجود در تجهیزات و شبکه داخلی روستا جمعاً ۲۰ درصد، میانگین مصرف سوخت ۰/۳ لیتر برای تولید هر کیلو وات ساعت برق و قیمت گازوییل و هزینه حمل آن (قیمت گازوییل در محل)، ۲۰۰ ریال فرض شده است. هزینه سالانه گازوییل:

$$(۱۲) \quad ۹۱۲/۵ (kWh / y) \times \frac{۱}{۰/۳۰} \times \frac{۱}{۰/۸۰} \times ۰/۳ (Litre / kWh) \times ۲۰۰ (Rls / Litre) = ۲۲۸۰۰۰ Rls$$

هزینه روغن مصرفی باتوجه به زمان کار هر مولد (نیمی از ساعات یک سال یعنی ۴۳۸۰ ساعت)، مصرف روغن (۰/۱۵ لیتر در ساعت برای تأمین برق ۲۰ خانوار) و قیمت آن (هر لیتر ۴۰۰۰ ریال) محاسبه می‌شود:

هزینه سالانه روغن:

$$(13) \quad 2 \times 4380 \cdot (h/y) \times 0.15 \cdot (Litre/h) \times 4000 \cdot (Rls/L) = 525600 \cdot Rls$$

سناریوی دوم) قیمت گازوییل با توجه به قیمت جهانی آن در سال ۱۳۸۱ یعنی ۸۱ سنت در هر لیتر (DOE, 2004) معادل ۶۵۰۰ ریال و قیمت روغن لیتری ۴۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته می‌شود:

هزینه سالانه گازوییل:

$$(14) \quad 912/5 \cdot (kWh/y) \times \frac{1}{0.3} \times \frac{1}{0.8} \times 0.3 \cdot (Litre/kWh) \times 6500 \cdot (Rls/Litre) = 740000 \cdot Rls$$

هزینه سالانه روغن:

$$(15) \quad 2 \times 4380 \cdot (h/y) \times 0.15 \cdot (L/h) \times 4000 \cdot (R/L) = 526500 \cdot R$$

باتوجه به توصیه بانک جهانی، هزینه غیرمستقیم آلودگی ناشی از مصرف سوخت و روغن معادل ۱۵ درصد ضرب در هزینه آنها و عمر مفید هر مولد ۱۰ سال در نظر گرفته و فرض می‌شود که پس از ۱۰ سال دو مولد موجود با دو دستگاه جدید با همان مشخصات تعویض می‌شوند. همچنین، فرض می‌شود که در طول عمر هر مولد دیزلی یک تعمیر اساسی در سال پنجم بهره‌برداری صورت گیرد. مشروح محاسبات هزینه واحد انرژی مولد دیزلی برای دو سناریوی ذکر شده (سوخت یارانه‌ای و غیریارانه‌ای) به روش تحلیل هزینه چرخه عمر و با استفاده از مدل (۲) در جداول (۶) و (۷) بیان شده است.

جدول ۶- محاسبه اقتصادی هزینه واحد انرژی مولد دیزلی برای روستاهای ایران در سناریوی

اول (هزار ریال)

متغیر	۵ خانوار	۱۰ خانوار	۱۵ خانوار	۲۰ خانوار
تقاضای بار سالانه (kWh/y)	۴۵۰۰	۹۰۰۰	۱۳۵۰۰	۱۸۰۰۰
هزینه‌های سرمایه‌گذاری				
خرید مولدهای دیزلی	۲×۲۰۰۰۰	۲×۳۰۰۰۰	۲×۳۵۰۰۰	۲×۴۵۰۰۰
حمل و نصب مولد	۲×۱۰۰۰	۲×۱۲۰۰	۲×۱۵۰۰	۲×۱۷۰۰
موتورخانه	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۸۰۰۰
هزینه‌های عملیاتی				
نگهداری و هزینه کاربر	۱۲×۱۰۰۰	۱۲×۱۲۰۰	۱۲×۱۵۰۰	۱۲×۱۸۰۰
مصرف سوخت و هزینه آلودگی آن	۱۳۰۰	۲۶۰۰	۳۹۰۰	۵۲۰۰
مصرف روغن و هزینه آلودگی آن	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰
تعمیر اساسی	۲×۸۰۰۰	۲×۱۲۰۰۰	۲×۱۵۰۰۰	۲×۲۰۰۰۰
هزینه واحد انرژی (Rls/kWh)	۵۰۰۰	۳۶۰۰	۳۰۰۰	۲۷۵۰

منبع: محاسبات نگارندگان

جدول ۷- محاسبه اقتصادی هزینه واحد انرژی مولد دیزلی برای روستاهای ایران در سناریوی دوم (هزار ریال)

متغیر	۵ خانوار	۱۰ خانوار	۱۵ خانوار	۲۰ خانوار
تقاضای بار سالانه (kWh/y)	۴۵۰۰	۹۰۰۰	۱۳۵۰۰	۱۸۰۰۰
هزینه‌های سرمایه‌گذاری				
خرید مولدهای دیزلی	۲×۲۰۰۰۰	۲×۳۰۰۰۰	۲×۳۵۰۰۰	۲×۴۵۰۰۰
حمل و نصب مولد	۲×۱۰۰۰	۲×۱۲۰۰	۲×۱۵۰۰	۲×۱۷۰۰
موتورخانه	۵۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۸۰۰۰
هزینه‌های عملیاتی				
نگهداری و هزینه کاربر	۱۲×۱۰۰۰	۱۲×۱۲۰۰	۱۲×۱۵۰۰	۱۲×۱۸۰۰
مصرف سوخت و هزینه آلودگی	۴۲۵۰۰	۸۵۰۰۰	۱۲۷۵۰۰	۱۷۰۰۰۰
مصرف روغن و هزینه آلودگی	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۴۵۰۰	۶۰۰۰
تعمیر اساسی	۲×۸۰۰۰	۲×۱۲۰۰۰	۲×۱۵۰۰۰	۲×۲۰۰۰۰
هزینه واحد انرژی (Rls/kWh)	۱۴۷۰۰	۱۳۰۰۰	۱۲۵۰۰	۱۲۲۰۰

منبع: محاسبات نگارندگان

۴. نتیجه‌گیری و انتخاب بهترین گزینه

نتایج این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- نیروگاه فتوولتاییک با وجود هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، به دلیل عدم نیاز به هزینه‌های جاری مانند سوخت و ... در طول دوره استفاده، هزینه واحد کمتری نسبت به گزینه‌های مولد دیزلی و گسترش شبکه برق دارد. البته باید توجه داشت که این محاسبات مربوط به کویر مرکزی با حداقل تابش سالانه ۵/۳ کیلووات ساعت به مترمربع در روز (معادل ۱۹/۲ مگاژول به مترمربع در روز) بر سطوح افقی است و در دیگر مناطق کشور این محاسبات مجدداً باید انجام گیرد؛ زیرا در مناطق با تابش کمتر، به دلیل افت بازدهی پانلها، هزینه تولید برق افزایش خواهد یافت.

- در گزینه مولد دیزلی با استفاده از سوخت بارانه‌ای، حداقل هزینه واحد انرژی ۲۷۵۰ ریال (مربوط به روستای ۲۰ خانوار) و حداکثر آن ۵۰۰۰ ریال (مربوط به روستای ۵ خانوار) است. این ارقام در حالت استفاده نکردن از سوخت بارانه‌ای، حداقل ۱۲۲۰۰ ریال (مربوط به روستای ۲۰ خانوار) و حداکثر ۱۴۷۰۰ ریال (مربوط به روستای ۵ خانوار) است که نشان می‌دهد با افزایش تعداد خانوار در یک روستا و به دنبال آن افزایش تولید برق، هزینه واحد انرژی کاهش محسوسی پیدا می‌کند.

- در گزینه گسترش شبکه، حداقل هزینه واحد انرژی مربوط به روستای ۲۰ خانوار با ۵ کیلومتر فاصله از شبکه (۴۳۰۰ ریال) و حداکثر آن مربوط به روستای ۵ خانوار با ۳۰ کیلومتر فاصله از شبکه (۶۷۵۰۰)

ریال) است و در گزینه سوم یعنی نیروگاه فتوولتاییک، هزینه واحد انرژی در نرخ تنزیل ۵ درصد، ۹۶۰ ریال بوده که مشاهده می‌شود این میزان، حداقل هزینه را در مقایسه با سایر گزینه‌ها در بردارد.

- در صورتی که دولت با دادن یارانه‌های لازم به خانوارهای کم‌درآمد روستایی، به آنها در تأمین سرمایه اولیه و خرید تجهیزات فتوولتاییک کمک کند، ضمن رسیدن به هدف برقرار کردن روستاها، می‌تواند از افزایش هزینه‌های بلندمدت خود که از انتخاب گزینه‌های دیگر (احداث نیروگاه دیزلی یا گسترش شبکه برق به روستاها) ناشی می‌شود، جلوگیری کند.

- حتی اگر از دید سرمایه‌گذاری اولیه به موضوع نگاه کنیم، برای تأمین برق روستاها (با مصرف روزانه ۲/۵ کیلووات ساعت برق توسط هر خانوار) از بین دو گزینه سیستم فتوولتاییک و گسترش شبکه برق، در برخی از موارد سیستم فتوولتاییک هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کمتری برای دولت در بر خواهد داشت که به طور مسلم صرفه‌جویی‌های حاصل در طول عمر استفاده از سیستم (عدم نیاز به اضافه تولید نیروگاهها به منظور تأمین بار مناطق روستایی، عدم اتلاف انرژی در شبکه توزیع نصب شده برای برق رسانی به روستاهای دور افتاده، عدم آلودگی‌های زیست محیطی و...) نیز خود مزید بر علت خواهند بود. برای مثال چند نمونه عینی از هزینه‌های سرمایه‌ای گسترش شبکه برق و مقایسه آن با استفاده از سیستم فتوولتاییک در پیوست ارائه گردیده است.

همان‌گونه که در پیوست (۱) ملاحظه می‌گردد، هزینه کل سیستم فتوولتاییک از هزینه کل گسترش شبکه برق برای روستاهای نمونه کمتر است. بنابراین، دولت می‌تواند با استفاده از نیروگاه فتوولتاییک در برق‌رسانی به روستاها، ضمن کمک به توسعه اقتصادی-اجتماعی روستاهای کشور و کاهش آمار مهاجرت روستائیان، اهداف بزرگی چون دستیابی به توسعه پایدار، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، حفظ بخشی از ذخایر فسیلی برای نسل‌های آینده، صرفه‌جویی در بلندمدت، بهره‌گیری از انرژی رایگان خورشید و ... را نیز تأمین کند.

منابع

- انجمن انرژی خورشیدی ایران. (۱۳۸۱). *خبرنامه انرژی خورشیدی ایران*. سال هفتم، شماره ۲۵. شبابی، شیوا و سلطانی حسینی، مسعود. (۱۳۷۶). ارزیابی فنی و اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک در ایران. *نشریه علمی و پژوهشی برق*، شماره ۲۲، صص ۳۵-۴۳.
- شریفی علمیراد، فتوحی، دارا و تیموری، بهزاد. (۱۳۸۰). مدل هزینه نهایی انرژی الکتریکی در منطقه خور و بیابانک. *مجموعه مقالات سومین همایش ملی انرژی*، تهران.
- شرکت سهامی برق منطقه‌ای یزد. (۱۳۸۳). *موافقتنامه طرح توزیع نیروی برق استان یزد*. فتوحی، دارا. (۱۳۷۹). *بررسی فنی و اقتصادی برق‌رسانی به منطقه خور و بیابانک با استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر*. کمیته مرکزی تحقیقاتی منطقه اصفهان، شورای تحقیقات برق، وزارت نیرو.
- کعبی‌نژادیان، عبدالرزاق. (۱۳۷۶). *موقعیت فعلی و آینده انرژی*. *مجموعه مقالات انرژیهای نو*، دفتر انرژیهای نو، امور انرژی، وزارت نیرو.
- وزارت نیرو. (۱۳۸۲). *انرژی خورشیدی*. معاونت امور انرژی، سازمان انرژیهای نو ایران (سانا).
- وزارت نیرو. (۱۳۸۲). *ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۱*. معاونت امور انرژی، دفتر برنامه‌ریزیهای انرژی.
- وزارت نیرو. (۱۳۸۲). *صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۱*. مرکز اطلاع‌رسانی شرکت مادر تخصصی توانیر، گروه تحلیل و انتشار آمار.
- یزدانی‌راد، رحیم و 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 و پژوهشی برق*، شماره ۲۲، صص ۱۲۳-۱۳۴.
- Colle Sergio, Abrev Samuel Luna and Ruther Ricardo. (2004). Economic Evaluation and Optimization of Hybrid Diesel/Photovoltaic Systems Integrated to Utility Grids. *Solar Energy*, No 76, PP. 295-299.
- <http://www.apect-vc.or.jo>
- <http://www.eia.doe.gov>
- <http://www.sun.org.ir>
- Kelly, H. (1993). Introduction to Photovoltaic Technology. In T. Johnsson et al., *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Island Press, Washington D. C.
- Kulsum Ahmed. (1994). Renewable Energy Thechnologies. *World Bank Technical Paper*, No. 240, PP. 201-234.
- Lesourd, Jean-Baptiste. (2001). Solar Photovoltaic Systems: the Economics of a Renewable Energy Resource. *Environmental Modeling & Software*, No.16, PP. 147-156.
- Liebenthal, A., Mathur S., and Herbert Wade. (1994). Solar Energy: Lessons from the Pacific Island Experience. *World Bank Technical Paper*, No. 24.

-
- Luiz Carlos Guedes Valente and Almeida, S. (1998). Economic Analysis of A Diesel/Photovoltaic Hybrid System for Decentralized Power Generation in Northern Brazil. *Energy*, Vol. 23, No. 4, PP.317-323.
- Notton G., Muselli M. and Poggi P. (1998). Costing of a Stand-alone Photovoltaic System. *Energy*, Vol. 23, No. 4, PP. 289-308.
- The World Bank. (1992). *World Development Report*. Development and the Environmental, Oxford University Press, Oxford.

پیوست ۱:

پروژه نصب نیروگاه فتوولتاییک برای روستا (پیش‌بینی ^{**})			پروژه برق رسانی به مناطق روستایی استان یزد*					
هزینه کل سیستم فتوولتاییک روستا (میلیون ریال)	هزینه سیستم فتوولتاییک به ازاء هر خانوار (میلیون ریال)	تعداد خانوار	قیمت کل (یارانه‌ای) + طراحی و نظارت (میلیون ریال)	طول شبکه (کیلومتر)		تعداد خانوار	نام روستا	ردیف
				فشار متوسط	فشار ضعیف			
۱۲۸	۳۲	۴	۲۴۰	۰/۱	۴	۴	دلاکوک (طیس)	۱
۶۴۰	۳۲	۲۰	۸۴۱/۷	۰/۳	۱۵	۲۰	بورویبه (خانم)	۲
۱۲۸	۳۲	۴	۱۴۲/۶	۰/۲	۲	۴	کپو (طیس)	۳
منبع: اطلاعات جمع آوری شده از کارخانه کابل شهید قندی و نظرات کارشناسان فنی			منبع: موافقت‌نامه طرح توزیع نیروی برق استان یزد (مصوب ۱۳۸۲)					

پیوست ۲ (روش استخراج ضریب بازگشت سرمایه)

طبق تعریف، ضریب بازگشت سرمایه (CRF) فاکتوری است که هزینه‌های سرمایه‌گذاری (سرمایه‌گذاری) را با توجه به نرخ بهره (i) در طی مدت زمانی که سرمایه مولد است (n) به صورت جریانی از پرداخت‌های مساوی توزیع می‌کند به گونه‌ای که در طی دوره مذکور تمامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه جبران گردد. این ضریب عکس فاکتور ارزش فعلی سری یکنواخت است. ضریب مذکور عامل بسیار مهمی در تبدیل و تقسیم هزینه‌های سرمایه‌گذاری به هزینه‌های عملیاتی در طی دوره عملکرد تجهیزات است و نقش اساسی در محاسبات هزینه نهایی تولید الکتریسیته هم در مورد نیروگاه‌های سوخت فسیلی و هم نیروگاه‌های خورشیدی ایفا می‌کند. به منظور اثبات ریاضی از نمادهای زیر استفاده می‌کنیم:

- C، هزینه کل سرمایه‌گذاری
- c، هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری
- i، نرخ تنزیل
- n، عمر تجهیزات سرمایه‌گذاری
- η، موجودی سرمایه اولیه
- CRF، ضریب بازگشت سرمایه

فرض این است که طول عمر مفید تجهیزات سرمایه‌ای که نمایش داده شده به فواصل زمانی یکسان تقسیم شده است و تمامی پرداختهای مساوی در انتهای هر فاصله زمانی انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه کل سرمایه‌گذاری در سال اول صورت می‌گیرد، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= C \\ \eta_1 &= \eta_0(1+i) - c \\ &\vdots \\ \eta_k &= \eta_{k-1}(1+i) - c \\ &\vdots \\ \eta_n &= \eta_{n-1}(1+i) - c = 0 \end{aligned}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\eta_n = \eta_0(1+i)^n - c \sum_{k=1}^n (1+i)^{k-1} = 0$$

با حل رابطه فوق برای c خواهیم داشت:

$$c = \frac{\eta_0(1+i)^n}{\sum_{k=1}^n (1+i)^{k-1}} \quad (A)$$

حال اگر مخرج کسر در سمت راست رابطه فوق را به صورت زیر گسترش دهیم:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{k=1}^n (1+i)^{k-1} \\ S &= 1 + (1+i) + (1+i)^2 + \dots + (1+i)^{n-1} \end{aligned} \quad (B)$$

با ضرب دو طرف در $(1+i)$ داریم:

$$(1+i)S = (1+i) + (1+i)^2 + (1+i)^3 + \dots + (1+i)^n \quad (C)$$

در صورتی که رابطه C را از رابطه B کم کنیم:

$$[1 - (1+i)]S = 1 - (1+i)^n$$

$$S = \frac{1 - (1+i)^n}{-i}$$

با جایگزینی رابطه فوق در A و همچنین ملاحظه $\eta_0 = c$ خواهیم داشت:

$$c = \frac{C(1+i)^n(-i)}{1 - (1+i)^n} = \frac{-Ci}{(1+i)^n - 1} = \frac{Ci}{1 - (1+i)^{-n}}$$

$$CRF = \frac{c}{C} = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

رابطه اخیر، ضریب بازگشت سرمایه (CRF) را نشان می‌دهد. به منظور اطلاعات بیشتر می‌توان به مأخذ زیر مراجعه کرد:

David A. Kendrick and Ardy J. Stoutjesdijk (1978), *The Planning of Industrial Investment Programs: A Methodology*, The John Hopkins University Press.