فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران/ سال هفتم/ شماره ۲۴/ پاییز ۱۳۸۴/ صفحات ۱۷۱-۱۹۲

# 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[1] یکی از مهمترین انواع انرژیهای تجدید پذیر[2] در ایران است؛ زیرا اکثر مناطق به ویژه کویر مرکزی از توانایی قابل توجهی در استفاده از انرژی خورشیدی برخودار است. هدف از نگارش این مقاله ارزیابی اقتصادی استفاده از نیروگاه خورشیدی (فتوولتاییک)[3] درمقایسه با نیروگاه دیزلی و اتصال به شبکهٔ سراسری برق به منظور تأمین برق روستاهای مرکزی در ایران است. در این باره با توجه به اطلاعات در دسترس وبا استفاده از تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر[4]، هزینهٔ 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. photovoltalic power planet
4. life cycle cost analysis (LCCA)

*اقتصادیِ سناریوهای مختلف نشان می‌دهدکه هزینهٔ واحد انرژیِ سیستمِ فتوولتاییک با ۹۶۰ Rls/kWh از هزینهٔ واحد انرژی در گزینه های دیگر کمتر است.*

**طبقه‌بندی Jel** : Q42 ،L94

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

**مقدمه**

زندگی روزمرهٔ مردم وابسته به تولید و مصرف انرژی است؛ لذا عرضه وتقاضای آن در جوامع بشری به طور مستمر رو به افزایش است. درحال حاضر، ۷۷ درصد کلّ انرژی مصرفی جهان را سوختهای فسیلی تأمین می‌کنندکه با تولید گازهای آلاینده وگلخانه ای درفرایند تبدیل ودرنتیجه تخریب لایهٔ اوزن، محیط زیست را به شدت مورد تهدید قرار داده و موجب گرم شدن بیشتر دمای کرهٔ زمین می‌شوند. بنابراین به منظورحفظ محیط زیست، توجّه به انرژیهای جایگزین (انرژیهای نو) ضروری به نظر می رسد. آنچه همگان را به استفاده ازانرژیهای نو ترغیب می‌کند، محدودیت ذخایر فسیلی واثرهای نامطلوب زیست محیطیِ پسماندهای آنها، نوسان قیمتها وبحرانهای انرژی است، وآنچه همگان را از جانشینی سریع انرژیهای نو بازمی دارد، بازده پایین آنها درمقایسه با انرژیهای فسیلی، بالابودن هزینهٔ استفاده و تبدیل، آزمایشی بودن بسیاری از طرحها و بی‌رغبتی دولتها و صنایع به حمایت از آنهاست. هدف اساسی مقالهٔ حاضر بررسی امکان سنجیِ اقتصادیِ استفاده از نیروگاه فتوولتاییک، نیروگاه دیزلی واتصال به شبکهٔ سراسری توزیع برق به منظور تأمین برق روستاهای کویر مرکزی ایران است. در بخشهای اوّل و دوّم مقاله به ترتیب به بررسی وضعیت انرژی خورشیدی در ایران، پیشینهٔ تحقیق وسپس تشریح مبانی نظری مدل می‌پردازیم. نتایج تجربی مدل در بخش سوم و نتیجه‌گیری و ارائه گزینهٔ 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 می آید 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 ومنشأ تمام انرژیهای دیگر نیز است. طبق برآوردهای علمی در حدود۶۰۰۰ میلیون سال از تولد این گوی آتشین می‌گذرد و در هر ثانیه ۴/۲میلیون تُن از جرم خورشید به انرژی تبدیل می‌شود؛ با توجّه به وزن خورشید که حدود ۳۳۳ هزار برابر وزن زمین است، این کرهٔ 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 درجهٔ سانتیگراد است که از سطح آن با حرارتی نزدیک به ۵۶۰۰ درجه و به صورت امواج الکترو مغناطیسی در فضا منتشر می‌شود.

زمین در فاصلهٔ ۱۵۰میلیون کیلومتری خورشید قرار دارد وسهم آن در دریافت انرژی از خورشیدتنها در حدود $\frac{1}{2*10^9}$ از کلّ انرژی تابشی آن است. با وجود این مقدار انرژی تابشی خورشید بر روی کره زمین، ۱۰۰۰۰ برابر کلّ مصرف انرژیهای سالیانه بر روی زمین است که این مطلب نشان دهندهٔ اهمیّت توجّه به این منبع در تأمین نیازهای روزمرهٔ بشر است (کعبی نژادیان،۱۳۷۶). اگر تا به حال انرژی خورشیدی رقیبی جدّی برای سوختهای فسیلی محسوب نمی شده است به دلیل پایین بودن تاریخیِ قیمت سوختهای فسیلی بوده است. اگرچه هنوز هم فن‌آوری 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 علّت 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 راکاهش دهند. به عنوان مثال، کشور یونان با وضع تخفیفهای مالیاتی برای خانوارهایی که از انرژی خورشیدی بهره می‌گیرند، مردم را به استفاده از این انرژی تشویق کرده است. در انگلستان (با تابش ۹ مگا ژول در مترمربع در روزیعنی 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 ومصرف انرژی، نصب صفحات جذب نور خورشید (پانلهای فتوولتاییک) را درساختمانهای جدید این کشوراجباری کرده است. اتحادیّه اروپا با توجّه به افزایش قیمت هر بشکه نفت خام به بیش از ۵۰ دلار، درصدد است ۱۰۰ میلیون مترمربع ازصفحات خورشیدی را تا سال۲۰۱۰ میلادی در کشورهای عضو نصب نماید (روزنامه شرق، ۱۳۸۳/۸/۲۶). همچنین، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۰۵ تعداد خانوارهای استفاده کننده از انرژی خورشیدی در انگلستان،آلمان وژاپن به ترتیب به ۱۴۰،۶و۴۰۰ هزارخانوار برسد (انجمن انرژی خورشیدی ایران،۱۳۸۱).

خوشبختانه کشور ما به دلیل موقعیت ویژهٔ جغرافیایی، توان بالایی در دریافت انرژی خورشیدی دارد؛ به طوری که میانگین سالانهٔ تابش خورشیدی در کشور ۵ کیلووات ساعت در روز برآورد شده که این رقم در مقایسه با دیگر کشورها بسیار قابل ملاحظه است. بنابراین می‌توان 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 وحفظ ذخایر فسیلی برای نسلهای آینده، آلودگیهای زیست محیطی نیروگاههای دیزلی را در اثر کاهش ساعات عملکردکاهش داده و زمینه را برای رسیدن به توسعهٔ پایدار فراهم آورد. در این باره، صرفه جوییهایِ حاصل شده در بلند مدت (صرفه جویی در مصرف سوخت و صرفه جویی حاصل از کاهش آلودگی) می‌تواند دولت را در تخصیص بهینهٔ منابع محدود خود در تأمین انرژی یاری رساند.

به عنوان نمونه، طبق آماررسمی وزارت نیرو تا سال ۱۳۸۱ تنها ۳۱ درصد روستاهای زیر بیست خانوارِ کشور برق دار شده‌اند و نزدیک به ۲۱ هزار روستا فاقد برق هستند. با توجه به اینکه برق رسانی به روستاهای کم جمعیت و پراکندهٔ واقع در کویر مرکزی، به دلیل افزایش تلفات شبکهٔ 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 کشوراز نظر برق رسانی درپایان سال ۱۳۸۱**

| شرح | کل روستاهای مسکونی | | روستاهای برق‌دار تا پایان ۱۳۸۱ | | درصد برق‌دار شدن |
|---|---|---|---|---|---|
| | روستا | خانوار | روستا | خانوار | روستا |
| روستا بابیش 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 درسال ۱۳۸۱

در این مقاله ضمن بررسی سه گزینهٔ برق رسانی به روستاهای کویر مرکزی (احداث نیروگاه خورشیدی از نوع فتوولتاییک، احداث نیروگاه دیزلی وگسترش شبکه برق رسانی)، هزینهٔ واحد انرژی[1] برای سه گزینه، درطول دورهٔ عمر پیش‌بینی شده برای هر گزینه و با استفاده از تحلیل هزینه چرخهٔ عمر به دست می‌آید و اقتصادی‌ترین روش معرفی می‌شود.

### ۲-۱. پیشینهٔ تحقیق

با توجه به اهمیّت روزافزون انرژی خورشیدی واختلاف نظرهای موجود درمورد اقتصادی بودن استفاده از آن، صاحبنظران و کارشناسان مطالعات زیادی در این زمینه انجام داده اند که جالب توجه است. بانک جهانی در بررسیهای جداگانه ای در این مورد به مطالعهٔ ویژگیهای فنی واقتصادی انرژیهای تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی پرداخته است. به عنوان مثال در مطالعه ای با عنوان "انرژی خورشیدی" که لیبنتال و همکاران[2] انجام داده‌اند، برق رسانی به مناطق روستایی جزایر اقیانوسیه، به وسیلهٔ نیروگاه دیزلی و نیروگاه فتوولتاییک مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفته است. دراین پژوهش که از روش تحلیل

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

هزینه‌های چرخهٔ عمر استفاده شده است، برق رسانی به مناطق روستایی به وسیلهٔ گزینه های مورد نظر مقایسه شده و هزینهٔ نهایی تولید انرژی به وسیلهٔ نیروگاههای دیزلی وفتوولتاییک محاسبه شـده اسـت. طبق نتایج در این پژوهش که با توجّه به تجربهٔ کشورهای جزایر اقیانوسیه به دست آمـده اسـت، بـرای برق رسانی به مناطق روستایی با ظرفیت بار پایین (عمدتاً برای روشنایی منازل)، تولید برق بـا نیروگـاه فتوولتاییک ارزان‌تر از نیروگاه دیزلی خواهد بود. در مطالعهٔ دیگری که کلثوم احمد(Ahmed, 1994) انجام داده است هزینه‌های استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر منتخب (حرارتـی- خورشـیدی، فتوولتاییـک وزیست توده) با روشهای ارزش حال و چرخهٔ عمر محاسبه شده است. نتایج حاصـل از مطالعـات انجـام شده در این مقاله حاکی از آن است کـه هزینـه‌هـای تکنولـوژی فتوولتاییـک در پـانزده سـال گذشـته (۱۹۹۴-۱۹۷۹) روند نزولی داشته است و این روند تا سال ۲۰۲۰ ادامه خواهد یافت؛ امّا هزینـهٔ تولیـد برق از تکنولوژی حرارتی - خورشیدی و تکنولوژی زیست توده (بیوماس) روند متغیری داشته است. در مقاله‌ای که کارلوس و همکاران[1] درمورد شمال برزیل انجام داده اند این نتیجه به دست آمده است، کـه به منظور برق رسانی به روستاهای زیرصد خانوار، استفاده از نیروگاه ترکیبی دیزل و فتوولتاییک گزینـهٔ مناسبی است و با توجّه به پیش‌بینی کاهش قیمت اجزای سیستم فتوولتاییک در آینده، اسـتفاده از آن از لحاظ اقتصادی توجیه پذیرتر خواهد شد. نویسندگان در این پژوهش با در نظر گرفتن مقدار متوسـط مطلوبی از مصرف روزانهٔ یک خانوار روستایی که شامل استفاده از لامپ کـم مـصرف، رادیـو، تلویزیـون، یخچال و غیره است و با استفاده از مدل ارزش حال، به محاسبهٔ هزینهٔ تولیـد بـرق بـرای سـاکنان ایـن روستا از طریق روشهای گوناگون برق‌رسانی پرداخته‌اند. در پژوهش دیگری به وسیلهٔ نوتون و همکاران[2]، ضمن استفاده از تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر، هزینهٔ واحد انرژی سیستم فتوولتاییک در دو حالت پشتیبانی و عدم پشتیبانی با موتور دیزلی کمکی محاسبه شده، و هزینـهٔ سیـستم بـه تفکیـک اجـزای آن بـرآورد گردیده است. لزورد[3] در مقاله‌ای با عنوان "سیستمهای فتوولتاییک خورشیدی: اقتصاد منابع تجدیدپذیر" ضمن به دست آوردن هزینهٔ واحد انرژیِ سیستم فتوولتاییک از روش تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر و مقایسهٔ آن با هزینهٔ واحد انرژی نیروگاههای متعارف، به بررسی مزایای استفاده از نیروگاه فتوولتاییک پرداختـه است. دراین پژوهش هزینهٔ تولید برق با سیستم فتوولتاییک در سال۱۹۹۷، ۲۵ سنت به ازای هـر کیلـو وات ساعت برآورد گردیده است که در مقایسه با هزینهٔ تولید برق متعارف که ۱۰ سنت به ازای هر کیلو وات ساعت برق است، بالاتر است اما پیش‌بینی شده است که به دلیل پیشرفت فن‌آوریهـای موجـود، در آیندهٔ نزدیک هزینهٔ برق خورشیدی به نصف کاهش یابدکه با توجه به این امر و همچنین روند صـعودی قیمت جهانی سوخت، استفاده از انرژی خورشیدی مقرون به صرفه خواهد شد. در پژوهش دیگـری کـه

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

کال و همکاران[1] 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[2] به این نتیجه رسیده اندکه در منطقهٔ ویژه ای ازشمال برزیل استفاده از نیروگاههای ترکیبی دیزلی وفتوولتاییک مقرون به صرفه است. شبابی و همکاران[3] (۱۳۷۶) در مقالهٔ «ارزیابی فنی و اقتصادی نیروگاههای خورشیدی فتوولتاییک در ایران» با محاسبهٔ میزان انرژی متوسط دریافتی با پانلهای فتوولتاییک درمناطق آفتاب خیزکشور، با توجّه به میزان انرژی قابل تولید، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، بهره برداری و نگهداری نیروگاه، هزینهٔ تولید برق با نیروگاه فتوولتاییک را با استفاده از روش هزینهٔ معادل انرژی[4] محاسبه کرده‌اند. در این مقاله نتیجه‌گیری شده است که مناسب‌ترین مناطق برای احداث نیروگاههای فتوولتاییک در جنوب مرکزی کشور است و هزینهٔ 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[5] (۱۳۷۹) با استفاده از روش تحلیل هزینهٔ عمر انجام داده اند، این نتیجه به دست آمده است که با توجّه به پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در منطقهٔ خوروبیابانک، امکان بهره‌برداری از نیروگاه خورشیدی وجود داردو 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 ازجهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها از اولویت بالاتری برخوردار است؛ و نیروگاه فتوولتاییک نیز از توجیه اقتصادی برخوردار است. همچنین در حالتی که نرخ تنزیل ۱۵درصد درنظر گرفته شود، کماکان نیروگاه حرارتی خورشیدی در مقایسه با نیروگاههای دیگر از مزیت نسبی قابل توجّهی برخوردار است، لیکن هزینهٔ 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 محاسبهٔ هزینه تولید انرژی الکتریکی با روشهای مختلف موجود به ویژه سیستم فتوولتاییک، از روش تحلیل هزینهٔ چرخهٔ 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 هزینهٔ چرخه عمر است. از روش هزینهٔ چرخهٔ 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 هزینهٔ چرخهٔ عمر و با توجّه به ویژگیهای فنی سیستم فتوولتاییک طراحی شده است با احتساب عواملی چون نرخ تنزیل واقعی، طول عمر سیستم، میزان تابش در منطقه و... هزینهٔ واحد انرژی سیستم فتوولتاییک محاسبه می‌شود. این مدل را کلی و نوتون[۱] و همکاران به کار گرفته‌اند.

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

که در آن:

$i$ ، نرخ تنزیل واقعی(٪)

$n$ ، طول عمر سیستم فتوولتاییک (سال)

$\mathrm{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ ، ضریب بازگشت سرمایه[۲]

$INS$ ، هزینهٔ بیمه (دلار در سال)

$ID$ ، ضریب هزینه غیرمستقیم

$MOD$، هزینهٔ سرمایه‌گذاری مدولها (دلار به مترمربع)

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

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

$OM$، هزینهٔ 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 درسال)

$n \bmod$، کارایی مدول فتوولتاییک(٪)

$nbos$، کارایی تجهیزات جانبی(٪)

$nt$، ضریب تصحیح دمای سلول خورشیدی(٪)

$pc$ ، کارایی وضعیت توان(٪)

$C_{pv}$، هزینهٔ 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 طورکلی هزینهٔ تولید برق با سیستمهای فتوولتاییک به چند عامل مهم بستگی دارد:

**الف)** میزان‌تابش‌خورشید درمنطقه؛ این عامل مشخّص‌می‌کند که تاچه میزان امکان‌تولیدبرق 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 هزینهٔ برق خورشیدی دارد.

**ج)** هزینهٔ مدول[۲]؛ هزینهٔ مدول خورشیدی بستگی مستقیم به مواد سازندهٔ آن، روش ساخت و اندازهٔ آن دارد.

**د)** هزینهٔ سیستم[۳]؛ این مورد شامل تجهیزات جانبی سیستم فتوولتاییک(PV) ازقبیل پایهٔ نگهدارنده، مبدّل انرژی از جریان DC به AC، ابزار کنترل و... است. هزینهٔ این تجهیزات به طور میانگین ۴۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم را دربرمی‌گیرد.

**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 وطی سالهای ۲۰۱۰-۲۰۳۰ حدود ۳۰ سال درنظر گرفته شده است. اکثر پژوهشها طول عمرسیستم را ۳۰ سال تخمین زده‌اند.

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

در ارزیابی گزینه های دیگر (مولّد دیزلی وگسترش شبکه) به روش تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر، با توجه به نرخ تنزیل واقعی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی وسایر موارد، هزینهٔ واحد انرژی با استفاده از مدل زیر محاسبه می گردد:

$$c = \frac{ALCC}{E} \qquad (۲)$$

که درآن:

$ALCC = \frac{LCC}{(P/A)}$ ، هزینهٔ چرخهٔ عمر سالانه

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

$LCC = C_{\circ} + PW$ ، هزینهٔ چرخهٔ عمر

$PW = C_1(P/A), i, n_1) + C_2\big((P/F), i, n_2\big)$، ارزش فعلی هزینه‌های جاری

$C_{\circ}$، هزینه‌های سرمایه‌گذاری

$C_1$ ، هزینه‌های جاری

$C_2$ ، هزینهٔ تعمیر اساسی

$(P/A) = \dfrac{(1+i)^{n_1} - 1}{i(1+i)^{n_1}}$، فاکتور ارزش فعلی سری یکنواخت

$(P/F) = \dfrac{1}{(1+i)^{n_2}}$، فاکتور ارزش فعلی

$i = \dfrac{1+r}{1+\dot{p}} - 1$ ، نرخ تنزیل واقعی شبکه

$\dot{p}$ ، 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 سالانهٔ سرمایه است ثابت بوده، و به طول عمر سیستم$(n)$ ونرخ تنزیل$(r)$ بستگی دارد. وقتی $n \longrightarrow \infty$ یعنی طول عمر سیستم زیاد می‌شود، حدّ مجانبی $CRF$ برابر با نرخ تنزیل می‌گردد. بنابراین نرخ تنزیل کمتر، هزینهٔ 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 رابطهٔ زیر به دست می آید:

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

که $\dot{p}$ برابر با نرخ تورم انتظاری است (Lesourd,2001). بنابراین می‌توان نوشت $C_{PV} = f(i)$ یا $C_{PV} = f(\dfrac{1+r}{1+\dot{p}} - 1)$ به طوری‌که $\dfrac{dC_{PV}}{di} = f' < \circ$ است. لذا با توجه به

ارتباط معکوس بین هزینهٔ تولید و نرخ تنزیل واقعی می‌توان نرخ تنزیل اسمی را به طور معکوس و نرخ تورم انتظاری را به طور مستقیم در هزینهٔ تولید مؤثر دانست. بنابراین کلّ سرمایه‌گذاری به دو عامل نرخ تنزیل اسمی ونرخ 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 وتعدیل منطقی نرخ بهره در امر سرمایه‌گذاری اهمیت دارد.

## ۳. نتایج تجربی

### ۱-۳. برآورد مصرف برق در یک روستای دورافتاده

برای برآورد میانگین مصرف برق در روستاهای زیربیست 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 کم‌مصرف 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 درنظر گرفته می‌شود. نکتهٔ دیگر این است که به منظور حدّاقل 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 موردنیاز روزانه هر خانوار در جدول (۲) محاسبه شده است[۱].

طبق نظر کارشناسان فنی، برای جبران اتلاف انرژی در پانل و کابلهای رابط،۱۰درصد میزان مصرف، به مصرف کل هر خانوار اضافه می‌شود. درنتیجه، انرژی موردنیاز برای تأمین برق روزانهٔ یک خانوار،۲/۴ کیلو وات ساعت در روز است. همچنین، میزان انرژی مورد نیاز برای هرواحد 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 ونوع مصرف خانوارهای روستاهای کویر مرکزی،دربرآوردهای انجام شده، از مطالعات مشابه مانند مطالعهٔ بانک جهانی درروستاهای جزایر اقیانوسیه که لیبنتال و همکاران (Liebenthal et al.,1994) انجام داده‌اند و همچنین نظر کارشناسان شرکت توزیع برق یزد استفاده شده است.

**جدول – ۲ . برآورد مصرف روزانهٔ 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 |
| روشنایی‌سرویس‌بهداشتی | 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

### ۲-۳. محاسبهٔ فنی سیستم فتوولتاییک

در حدود نیمی از روستاهای زیربیست خانوار بدون برق کشور در مناطق کویری و خشک با حداقل ۵/۳ $kWh/M^2.d$ تابش بر سطوح شیبدار (با زاویه‌ای برابر عرض جغرافیایی محل) قرار دارند. براساس اطلاعات شرکت سازندهٔ 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)[1] 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 باتریهای‌سرب- اسیدی ساخت داخل کشور استفاده می‌شود (یزدانی راد، ۱۳۷۷)؛ که باتوجه به مقدار انرژی تولیدشدهٔ 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 باتری۱۲ ولت، یک عدد اینورتر (مبدلDC به AC) و یک عدد لامپ کم مصرف تخصیص داده می‌شود.

---

۱. اطلاعات به دست آمده ازنظرات کارشناسان فنی شرکت کابلهای قندی

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

| **برآورد انرژی تولیدی روزانهٔ یک پانل** | | **برآوردآمپر- ساعت‌در روز(Ah/day) برای شارژ باتری** | |
|---|---|---|---|
| ظرفیت پانل ($w_p$ یا وات قله) | ۴۵ w | انرژی خالص موردنیاز برای مصرف هر خانوار | ۲۱۸۵ Wh/d |
| ضریب‌تبدیل($wh/d\ per\ w_p$) | ۳/۴۳ | ولتاژ باتری | ۲۴ V (دو عدد باتری ۱۲ ولت) |
| تولید انرژی (ظرفیت × ضریب تبدیل) | ۱۵۴/۳۵ | آمپرساعت‌موردنیازدر روز (تقریباًبرای۱۲ساعت‌ازروز)[1] | $\frac{2185}{24}=91Ah/d$ |
| **برآوردحداقل‌تعدادپانلهای‌موردنیازبرای هرخانه** | | **برآورد حداقل ظرفیت باتری موردنیاز** | |
| کل انرژی موردنیاز | ۲۴۰۰Wh/d | آمپرساعت موردنیاز در هر روز | ۹۱Ah/d |
| انرژی تولید شده توسط یک پانل | ۱۵۴/۳۵Wh/d | تعداد روزهای ابری متوالی(حداکثر استقلال از پانل) | ۳d |
| پانلهای موردنیاز | $\frac{2400}{154/35}\approx 16$ | اندازه مورد نیاز باتری | ۹۱×۳=۲۷۳ |

### ۳-۳. محاسبهٔ اقتصادی سیستم فتوولتاییک

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

طبق تحقیقات به عمل آمده، هزینهٔ (قیمت تمام شده) پانلهای فتوولتاییک ۴۵ واتی 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 فتوولتاییک به کار می‌رود. طبق نظر کارشناسان، قیمت پانلهای خورشیدی بین ۵۳ تا ۷۰ درصد کلّ سیستم فتوولتاییک است. نظر به اینکه رقم ۵۳ درصد از منابع خارجی و رقم ۷۰درصد از منابع ایرانی سازندهٔ پانلها گرفته شده است، به نظر می‌رسد رقم ۷۰درصد در ایران از اعتبار بیشتری برخورداراباشد (فتوحی، ۱۳۷۹).

بنابراین کلّ هزینهٔ سیستم فتوولتاییک (شامل پانل وپایه، باتری، مبدل، کابلهای رابط، شارژ کنترل، هزینه نصب و...) درحدود ۱۸۶۰۰۰۰ ریال محاسبه می‌شودکه قیمت کلّ سیستم فتوولتاییک به ازای هر وات قله ۴۱۰۰۰ ریال معادل ۵/۱ دلار است وکلّ هزینهٔ لازم جهت تأمین برق هرخانه (شامل۱۶عدد

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) ۳۰میلیون ریال محاسبه می‌شود. همچنین قیمت سیستم فتوولتاییک لازم برای روشنایی اماکن عمومی(شامل دوعدد پانل ۴۵ وات و تجهیزات جانبی لازم) به ازای هر خانوار ۱۸۶۰۰۰۰ ریال است. درنتیجه‌کلّ هزینهٔ تولید برق روستا به روش فتوولتاییک به ازای هرخانوار۳۱۸۶۰۰۰۰ ریال‌خواهد شد.

**جدول – ۴. محاسبهٔ هزینهٔ 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 |
| هزینهٔ بیمه | INS | ۰ | ۰ | ۰ |
| ضریب هزینهٔ غیرمستقیم | ID | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ |
| هزینهٔ سرمایه‌گذاری مدولها(دلار بر مترمربع) | MOD | ۳۰۰ | ۳۰۰ | ۳۰۰ |
| هزینهٔتجهیزات‌جانبی‌مرتبط‌بامنطقه(دلاربرمترمربع) | BOS | ۵۰ | ۵۰ | ۵۰ |
| هزینهٔ تجهیزات جانبی مرتبط باتوان(دلاربرکیلووات) | PC | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| هزینهٔ تعمیرونگهداری‌سالانه(دلار بر مترمربع در سال) | OM | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ |
| حداکثر تابش خورشیدی(کیلو وات برمتر مربع) | SP | ۱ | ۱ | ۱ |
| تابش‌سالانه‌خورشیدبرپانلهای‌مسطح(کیلووات‌ساعت‌بر 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 |
| هزینهٔ تولید برق خورشیدی(دلار برکیلووات‌ساعت) | $C_{pv}$ ($/kWh) | ۰/۲۸ | ۰/۱۶ | ۰/۱۲ |
| هزینه تولید برق خورشیدی(ریال‌برکیلووات‌ساعت)[۱] | $C_{pv}$ (Rls/kWh) | ۲۲۵۰ | ۱۳۲۰ | ۹۶۰ |

منبع: محاسبات نگارندگان

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

به منظور محاسبهٔ هزینهٔ واحد انرژی سیستم فتوولتاییک از روش تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر(مدل ۱) با تعریف سه سناریو و با فرض نرخ تنزیلهای متفاوت برای هر سناریو، نتایج جدول(۴) به دست‌می‌آید.

بنابراین طبق محاسبات به روش تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر، هزینهٔ واحد انرژی سیستم فتوولتاییک در سناریوی سوم با نرخ تنزیل ۵درصد برابر با ۹۶۰ ریال در کیلووات ساعت است. دلیل انتخاب سناریوی سوم از بین سناریوهای مختلف (بانرخ تنزیلهای مختلف)، محاسبهٔ نرخ تنزیل واقعی به وسیلهٔ نرخ تورم ونرخ بهرهٔ اسمی است. زیرا با توجه به اینکه عمدهٔ منابع مورد استفاده در سیستم فتوولتاییک به صورت کالاهای سرمایه‌ای و با ملاحظهٔ نرخ تورم دارای افزایش قیمت هستند، لازم است در محاسبهٔ نرخ بهرهٔ واقعی نرخ تورم نیز لحاظ شود. به این ترتیب با در نظر گرفتن نرخ بهرهٔ ۲۴درصد و نرخ تورمِ ۱۸درصد، نرخ تنزیل واقعی برابر با ۵درصد خواهد شد.

$$i = \frac{1+r}{1+p} - 1 = 0/05 \qquad (۳)$$

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

براساس قیمتهای جهانی، هزینهٔ 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 معادلِ آن به ظرفیت نیروگاههای کشور اضافه گردد. هزینهٔ افزودن ظرفیت موردنیاز به ازای هر خانوار برابر است با:

$$1500(\$/kW) * \frac{500W}{1000} = 750\$ = 6000000Rls \qquad (۴)$$

طبق بررسیهای به عمل آمده، هزینهٔ احداث هر یک کیلومتر شبکهٔ توزیع در مناطق روستایی کشور برابربا ۶۷ میلیون ریال و هزینهٔ نصب هر دستگاه ترانسفورماتور ۲۲ میلیون ریال است، که باتوجّه به تفاوت تقاضای بار و ولتاژ در مناطق مختلف، میانگین هزینهٔ کلّ سرمایه‌گذاری برای نصب شبکه در مناطق روستایی به ازای هر کیلومتر ۷۲ میلیون ریال است. به منظور توسعهٔ شبکهٔ توزیع، مناطق روستایی، دولت به شرکتهای توزیع برق یارانه پرداخت می‌کند که هزینهٔ کلّ سرمایه‌گذاری با احتساب یارانهٔ 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، هزینهٔ 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 شدهٔ تولید برق در کشور در سال ۱۳۸۲ رقمی معادل ۳۳۱/۴ ریال به ازای هر کیلووات ساعت بوده است(وزارت نیرو،۱۳۸۲)که با توجّه به استفادهٔ نیروگاههای داخلی از سوخت یارانه ای،به منظور برآورد هزینه‌های واقعی،قیمت جهانی تولید برق منظور می گرددکه 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 مصرف۲/۵ کیلووات ساعت در روز، سالانه ۵۴۷۵۰۰ ریال هزینه می‌شود:

$$600Rls/kWh * 2/5\ kWh/d * 365d/y = 547500Rls/year \qquad (۵)$$

روشهای گوناگونی برای ارزیابی اثرات زیست محیطیِ 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 ملاحظهٔ هزینهٔ غیرمستقیم آلودگی محیط زیست، ۱۵ درصد به هزینه‌های عملیاتی اضافه می‌گردد (بانک جهانی). پس مجموعِ هزینه‌های جاری تأمین برق هر خانوار روستایی از شبکهٔ سراسری برابر با ۶۳۰۰۰۰ ریال می‌شود.

اگر مدّت زمانِ بهره‌برداری از شبکه۲۰ سال، نرخ بهرهٔ شبکه ۱۶ درصد و نرخ تورم ۳ درصد (تقریباً برابر نرخ افزایش قیمت جهانی سوخت) در نظر گرفته شود، ارزشِ فعلی مجموعِ هزینه‌های جاری هر خانوار در طول ۲۰ سال برابرخواهدشد با :

$$i = \frac{1+r}{1+p} - 1 = 0/12$$ نرخ تنزیل واقعی شبکه (۶)

$$(P/A) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} = 7/18$$ فاکتور ارزش فعلی سری یکنواخت (۷)

ارزش فعلی مجموع هزینه‌های‌جاری (۸)

$$PW = 630000(P/A) = 630000\ 7/18 = 4520000Rls$$

به عنوان مثال، هزینهٔ چرخهٔ عمر و هزینهٔ چرخهٔ عمر سالانه برای روستایی با ۵ خانوار در فاصلهٔ ۵ کیلومتری از شبکهٔ توزیع مطابق با مدل (۲) به صورت زیر خواهد بود:

$$LCC = (5 * 6000000) + 36000000 + (5 * 4520000) = 41260000Rls \qquad (۹)$$

(۶ میلیون ریال از رابطه (۴)،۴/۵۲ میلیون ریال از رابطه (۸) و۳۶۰میلیون ریال از محاسبهٔ هزینهٔ نصب شبکه برای ۵ کیلومتر به دست آمده است.)

$$ALCC = \frac{LCC}{(P/A)} = \frac{41260000}{7/18} = 5746500Rls/year \qquad (۱۰)$$

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

$$c = \frac{ALCC}{E} = \frac{57465000}{5 \times 2/5 \times 365} = \frac{57465000}{4560} = 1260Rls/kWh \qquad (۱۱)$$

نتایج محاسبهٔ هزینهٔ واحد انرژی گسترش شبکهٔ برق در فواصل مختلف برای روستاهایی با تعداد خـانوار مختلف در جدول (۵) درج شده است.

**جدول-۵. هزینهٔ واحدانرژی گسترش شبکه‌برق برای روستاهای ایران(ریال‌برکیلووات 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: محاسبات‌نگارندگان

### ۵-۳. ارزیابی اقتصادی مولّد دیزلی

به منظور محاسبهٔ هزینهٔ واحد انرژی تولید برق با مولّد دیزلی، ابتدا باتوجه به تعداد خانوار و پیـک بـرق مصرفی روستا، مولدهای موردنیاز برآورد گردیدند. در مشورتی که با کارشناسان فنـی انجـام گردیـد، دو عدد مولد دیزلی به ظرفیتهای ۱۰ تا ۱۲ کیلوولت آمپر که با تناوب ۸ یـا ۱۲ سـاعتی بـه طـور پیوسـته فعالیت کنند می‌توانند برق مورد نیاز یک روستا با ۲۰ خانوار (باپیک مصرف ۵۰۰ وات برای هرخانوار) 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 محاسبهٔ هزینه‌های تولید، دو سناریو را در نظر می‌گیریم؛ سناریوی اول، محاسبهٔ نرخ سوخت و روغن به قیمت فعلی (با یارانهٔ دولتی) و سناریوی دوم، محاسبهٔ نـرخ سـوخت وروغـن بـه قیمت واقعی و جهانی. آنچه مسلم است در سناریوی دوم هزینهٔ واحد انـرژی بـه دسـت آمـده تقریـب بیشتری به واقعیت خواهد داشت.

**سناریوی اول)** محاسـبهٔ هزینـهٔ سـالانهٔ مـصرف سـوخت (گازوییـل) و روغـن بـرای مولـد دیزلـی بـه ازای‌هرخانوار؛ در این محاسبه تقاضای انرژی هر خانوار ۹۱۲/۵ کیلووات ساعت در سال، بازدهی مولـدها ۳۰ درصد، تلفات موجود در تجهیزات و شبکهٔ داخلی روستا جمعاً ۲۰ درصد، میانگین مـصرف سـوخت ۰/۳ لیتر برای تولید هر کیلو وات ساعت برق و قیمت گازوییل و هزینـهٔ حمـل آن (قیمـت گازوییـل در محل)، ۲۰۰ ریال فرض شده است.

هزینهٔ سالانهٔ گازوییل:

$$912/5(kWh/y)*\frac{1}{0/30}*\frac{1}{0/80}*0/3(Litre/kWh)*200(Rls/Litre)=228000Rls \quad (۱۲\text{-الف})$$

هزینهٔ روغن مصرفی باتوجّه به زمان کار هر مولد (نیمـی از سـاعات یـک سـال یعنـی ۴۳۸۰ سـاعت)، مصرف روغن (۰/۰۱۵ لیتر در ساعت برای تأمین برق ۲۰ خانوار) و قیمـت آن (هـر لیتـر ۴۰۰۰ ریـال) محاسبه می‌شود:

هزینهٔ سالانهٔ روغن:

$$2*4380(h/y)*0/015(Litre/h)*4000(Rls/L)=525600Rls \quad (۱۳\text{ ب})$$

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

هزینهٔ سالانهٔ گازوییل:

$$912/5(kWh/y)*\frac{1}{0/30}*\frac{1}{0/80}*0/3(Litre/kWh)*6500(Rls/Litre)=7400000Rls \quad (۱۴\text{ الف})$$

هزینهٔ سالانهٔ روغن:

$$2*4380(h/y)*\%15(L/h)*40000(R/L)=5265000R \quad (۱۵\text{ ب})$$

باتوجّه به توصیهٔ بانک جهانی، هزینهٔ غیرمستقیم آلودگیِ 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 می‌شودکه در طول عمر هر مولد دیزلی یک تعمیر اساسی در سال پنجم بهره‌برداری صورت گیرد. مشروح محاسبات هزینهٔ واحد انرژی مولد دیزلی برای دو سناریوی ذکر شده (سوخت یارانه‌ای و غیریارانه‌ای) به روش‌تحلیل‌هزینهٔ چرخهٔعمر و با استفاده از مدل(۲) درجداول (۶) و (۷) بیان شده است.

**جدول-۶. محاسبهٔ اقتصادی هزینهٔ 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 وهزینه 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. محاسبهٔ 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 وهزینه 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 دورهٔ استفاده، هزینهٔ واحد کمتری نسبت به گزینه‌های مولد دیزلی و گسترش شبکهٔ برق دارد. البتّه باید توجه داشت که این محاسبات مربوط به کویر مرکزی با حداقل تابش سالانهٔ 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، هزینهٔ تولید برق افزایش خواهد یافت.

- در گزینهٔ مولد دیزلی با استفاده از سوخت یارانه‌ای، حداقّل هزینهٔ 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 یارانه‌ای، 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، هزینهٔ واحد انرژی کاهش محسوسی پیدا می‌کند.

- در گزینهٔ گسترشِ شبکه، حداقل هزینهٔ 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 گزینهٔ سوم یعنی نیروگاه فتوولتاییک، هزینهٔ واحد انرژی در نرخ تنزیل ۵ درصد، ۹۶۰ ریال بوده که مشاهده می‌شود این میزان، حداقل‌هزینه را در مقایسه با سایرگزینه‌ها در بردارد.

- در صورتی که دولت با دادن یارانه‌های لازم به خانوارهای کم‌درآمد روستایی، به آنها در تأمین سرمایه اوّلیّه 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 شبکهٔ برق به روستاها) ناشی می‌شود، جلوگیری کند.

- حتی اگر از دیدِ سرمایه‌گذاری اوّلیّه 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 وگسترش شبکه برق، در برخی ازموارد سیستم فتوولتاییک هزینهٔ سرمایه‌گذاری اوّلیّهٔ کمتری برای دولت در برخواهد داشت که به طور مسلّم صرفه‌جوییهای حاصل در طول عمر استفاده از سیستم (عدم نیاز به اضافه تولید نیروگاهها به منظور تأمین بار مناطق روستایی، عدم اتلاف انرژی درشبکهٔ 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 سرمایه ای گسترش شبکهٔ برق و مقایسهٔ آن با استفاده از سیستم فتوولتاییک در پیوست ارائه گردیده است.

همان‌گونه که در پیوست (۱) ملاحظه می‌گردد، هزینهٔ کلّ سیستم فتوولتاییک از هزینهٔ کلّ گسترش شبکهٔ برق برای روستاهای نمونه کمتر است. بنابراین، دولت می‌تواند با استفاده از نیروگاه فتوولتاییک در برق‌رسانی به روستاها، ضمن کمک به توسعهٔ اقتصادی- اجتماعی روستاهای کشور و کاهش آمار مهاجرت روستانشینان، اهداف بزرگی چون دستیابی به توسعهٔ 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). *خبرنامهٔ انرژی خورشیدی ایران*. سال هفتم، شماره۲۵.

شبابی، شیوا و سلطانی‌حسینی، مسعود. (۱۳۷۶). ارزیابی فنی و اقتصادی نیروگاههای خورشیدی فتوولتاییک در ایران. *نشریه علمی و پژوهشی برق*، شماره ۲۲، صص ۳۵-۴۳.

شریفی علیمراد، فتوحی ، دارا و تیموری، بهزاد. (۱۳۸۰). مدل هزینهٔ نهایی انرژی الکتریکی در منطقه خور و بیابانک. *مجموعه مقالات سومین همایش ملی انرژی*، تهران.

شرکت سهامی برق منطقه‌ای یزد. (۱۳۸۳). *موافقتنامهٔ طرح توزیع نیروی برق استان یزد*.

فتوحی، دارا. (۱۳۷۹). *بررسی فنی و اقتصادی برق‌رسانی به منطقه خور و بیابانک با استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر*. کمیتهٔ مرکزی تحقیقاتی منطقهٔ 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). *ترازنامهٔ انرژی سال ۱۳۸۱*. معاونت امور انرژی، دفتر برنامه‌ریزیهای انرژی.

وزارت نیرو. (۱۳۸۲). *صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۱*. مرکز اطلاع رسانی 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 شبکهٔ برق و مولّدهای دیزلی برای تأمین برق روستاها در ایران. *نشریهٔ علمی و پژوهشی برق*، شماره۲۲، ص ۱۲۳-۱۳۴.

Colle Sergio, Abrev Samuel Luna and Ruther Ricardo. (2004). Economic Evaluation and Optimization of Hybrid Disel/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.suna.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:**

| پروژهٔ برق رسانی به مناطق روستایی استان یزد[×] | | | | | | پروژه نصب نیروگاه فتوولتاییک برای روستا (پیش‌بینی[××]) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ردیف | نام روستا | تعداد خانوار | طول شبکه(کیلومتر) | | قیمت‌کل(یارانه‌ای) + طراحی و نظارت (میلیون ریال) | تعداد خانوار | هزینه سیستم فتوولتاییک به ازاءهر خانوار (میلیون ریال) | هزینه کل سیستم فتوولتاییک روستا (میلیون ریال) |
| | | | فشار متوسط | فشار ضعیف | | | | |
| ۱ | دلاکوک(طبس) | ۴ | ۴ | ۰/۱ | ۲۴۰ | ۴ | ۳۲ | ۱۲۸ |
| ۲ | بورویبه(خاتم) | ۲۰ | ۱۵ | ۰/۳ | ۸۴۱/۷ | ۲۰ | ۳۲ | ۶۴۰ |
| ۳ | کپو(طبس) | ۴ | ۲ | ۰/۲ | ۱۴۲/۶ | ۴ | ۳۲ | ۱۲۸ |
| [×]منبع: موافقت‌نامهٔ طرح توزیع نیروی برق استان یزد(مصوب۱۳۸۲) | | | | | | [××]منبع:اطلاعات جمع آوری شده از کارخانهٔ کابل شهید قندی و نظرات کارشناسان فنی | | |

## پیوست ۲ (روش استخراج ضریب بازگشت سرمایه)

طبق تعریف، ضریب بازگشت سرمایه (CRF) فاکتوری است که هزینه‌های سرمایه ای (سرمایه‌گذاری) را با توجه به نرخ بهره (i) در طی مدّت زمانی که سرمایه مولد است (n) به صورت جریانی از پرداختهای مساوی توزیع می کند به گونه ای که در طی دورهٔ مذکور تمامی هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه جبران گردد. این ضریب عکس فاکتور ارزش فعلی سری یکنواخت است. ضریب مذکور عامل بسیار مهمی در تبدیل و تقسیط هزینه‌های سرمایه‌گذاری به هزینه‌های عملیاتی در طی دورهٔ عملکرد تجهیزات است و نقش اساسی در محاسبات هزینهٔ 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، هزینهٔ کل سرمایه‌گذاری

c، هزینهٔ سالیانه سرمایه‌گذاری

i ، نرخ تنزیل

n ، عمر تجهیزات سرمایه ای

$\eta$ ، 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 فاصلهٔ زمانی انجام می گیرد. با توجه به اینکه کلّ سرمایه‌گذاری در سال اوّل صورت می گیرد، خواهیم داشت:

$$\eta_0 = C$$
$$\eta_1 = \eta_\circ(1+i) - c$$
$$\vdots$$
$$\eta_k = \eta_{k-1}(1+i) - c$$
$$\vdots$$
$$\eta_n = \eta_{n-1}(1+i) - c = \circ$$

بنابراین خواهیم داشت:

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

با حل رابطهٔ فوق برای $c$ خواهیم داشت:

$$c = \frac{\eta_\circ(1+i)^n}{\sum_{k=1}^{n}(1+i)^{k-1}} \qquad (A)$$

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

$$S = \sum_{k=1}^{n}(1+i)^{k-1}$$
$$S = 1 + (1+i) + (1+i)^2 + \ldots + (1+i)^{n-1} \qquad (B)$$

با ضرب دو طرف در $(1+i)$ داریم:

$$(1+i)S = (1+i) + (1+i)^2 + (1+i)^3 + \ldots + (1+i)^n \qquad (C)$$

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

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

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

با جایگزینی رابطهٔ فوق در A و همچنین ملاحظه $\eta_{\circ} = c$ خواهیم داشت:

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

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

رابطهٔ اخیر، ضریب بازگشت سرمایه (CRF) را نشان می‌دهد. به منظور اطّلاعات 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.