

طراحی و ارزیابی اقتصادی طولانی مدت سیستم های خورشیدی و باتری کاربران مسکونی در کانادا

میلاد بابایی^۱، حسن منصف^۲

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران milad.babaie@ut.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران hmonsef@ut.ac.ir

چکیده

توسعه روزافزون فناوری سیستم های فتوولتائیک و باتری در جهان منجر به تغییر سیستم قدرت سنتی برای تامین نیازهای انرژی کاربران مسکونی می شود. این سیستم امکان تبادل انرژی بین کاربران مصرف کننده و خرده فروشان را فراهم می کند. همچنین تلفات ناشی از خطوط انتقال و آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی جهت تامین بارهای مصرفی کاربران کاهش می یابد و قطعی کلی برق در هر منطقه از بین می رود. این مقاله به طراحی و ارزیابی مزایای اقتصادی سیستم های خورشیدی و باتری کاربران مسکونی ایالات مختلف کانادا به عنوان مطالعات موردی در نرم افزار PVSyst می پردازد. این مطالعه شرایط محیطی همانند شدت تابش، دما و سرعت باد را در نظر می گیرد. همچنین عوامل اقتصادی موثر بر ارزیابی همانند هزینه سرمایه گذاری اولیه، تعمیر و نگهداری، مشوق های دولت، نرخ تورم، تنزیل و ... در نظر گرفته می شود. نتایج حاکی از این می باشد که سیستم های فتوولتائیک در مناطقی که شدت تابش خورشیدی بالا، هزینه سرمایه گذاری اولیه پایین و قیمت برق بالایی دارند مزایای اقتصادی بهتری نسبت به سایر مناطق خواهند داشت. همچنین افزودن باتری به سیستم خورشیدی باعث افزایش خودمصرفی و خودکفایی کاربران می شود اما هزینه اولیه بالایی دارد که دوره بازگشت سرمایه را افزایش می دهد. در نهایت با گذشت زمان با کاهش هزینه ساخت سیستم خورشیدی و باتری، مزایای اقتصادی سرمایه گذاران افزایش می یابد که این امر منجر به کاهش استفاده از سوخت های فسیلی می شود.

واژه های کلیدی: نرخ بازده داخلی (IRR)، هزینه یکنواخت سازی انرژی (LCOE)، ارزش فعلی خالص (NPV)، دوره بازگشت سرمایه (PBP)، نسبت عملکرد (PR)، بازده بازگشت سرمایه (ROI)

۱. مقدمه

تامین تقاضای فزاینده برق در بین کاربران مسکونی کشورهای در حال توسعه یک چالش اساسی به شمار می‌رود. که با توجه به کاهش منابع سوخت فسیلی و افزایش هزینه‌های مرتبط، منابع انرژی تجدید پذیر همانند انرژی خورشیدی، باد، آبی و زمین گرمایی می‌تواند جایگزین مناسبی برای منابع فسیلی باشد. این منابع فراوان سازگار با محیط زیست هستند و تولید انرژی پاک را در اولویت اصلی قرار می‌دهند. این منابع می‌توانند نقش مهمی در تأمین نیازهای انرژی کاربران مسکونی به ویژه در کشورهای در حال توسعه داشته باشند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نیاز ما به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد و به تقویت انرژی پاک و پایدار برای کمک به آینده بپردازد [۱].

کانادا در بین کشورهای با بالاترین ظرفیت انرژی خورشیدی (MW) در رتبه ۲۳ قرار دارد. در ادامه ده کشور با بیشترین ظرفیت انرژی خورشیدی (MW) معرفی می‌شوند [۱].

۱. چین - ۳۰۶،۹۷۳

۲. ایالات متحده - ۹۵،۲۰۹

۳. ژاپن - ۷۴،۱۹۱

۴. آلمان - ۵۸،۴۶۱

۵. هند - ۴۹،۶۸۴

۶. ایتالیا - ۲۲،۶۹۸

۷. استرالیا - ۱۹،۰۷۶

۸. کره جنوبی - ۱۸،۱۶۱

۹. ویتنام - ۱۶،۶۶۰

۱۰. اسپانیا - ۱۵،۹۵۲

فناوری فتوولتائیک روشی بسیار کارآمد برای تبدیل تابش خورشید به برق می‌باشد. سلول‌های خورشیدی فتوولتائیک با استفاده از نیمه هادی‌ها مانند سیلیکون ساخته می‌شوند. همچنین فناوری فتوولتائیک یکی از بهترین منابع انرژی برای پاسخگویی به تقاضای مصرفی کاربران مسکونی می‌باشد. مقدار نیروگاه فتوولتائیک براساس میزان مصرف خانگی تعیین می‌شود پس بایستی طراح اطمینان حاصل کند که انرژی کافی برای تأمین تقاضا تولید می‌شود. علاوه بر این انرژی اضافی تولید شده را می‌توان در یک باتری ذخیره نمود و یا از طریق اندازه گیری خالص به شبکه برق فروخت. این بدان معناست که کاربران مسکونی علاوه بر تأمین نیازهای انرژی خود، بلکه می‌توانند به تأمین انرژی کلی جامعه نیز کمک کنند و از انرژی اضافی تولید شده کسب درآمد کنند. این مطالعه با هدف تجزیه و تحلیل طراحی و عملکرد یک سیستم پشت بام PV خورشیدی با استفاده از نرم افزار PvSyst انجام شده است. این نرم افزار با استفاده از داده‌های هواشناسی موجود در سایت، تولید انرژی سالیانه سیستم، تابش خورشیدی و نسبت عملکرد را محاسبه می‌کند. طراحی سیستم پیشنهادی، از جمله اجزای خورشیدی و باتری، و توضیحات آن‌ها در نرم افزار PvSyst نیز مورد بحث قرار خواهد گرفت. این مطالعه نتایج ارزیابی اقتصادی طولانی مدت سیستم‌های خورشیدی کاربران را تجزیه و تحلیل می‌کند. درک مزایا و معایب بالقوه سیستم منجر به تحقق بهتر تأثیر آن و پتانسیل استفاده گسترده‌تر در تأمین نیازهای انرژی می‌شود.

۲. مروری بر ادبیات گذشته

السدی و همکاران [۲] مروری بر رویه‌های اندازه‌گیری سیستم‌های متصل به شبکه و مستقل از شبکه ارایه کردند که شامل مدل‌سازی اجزای سیستم، نرم‌افزار بهینه‌سازی موجود، معیارهای بهینه‌سازی، روش بهینه‌سازی و محدودیت اندازه بوده است. مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک باتری در بهینه‌سازی اندازه سیستم به منظور پیش‌بینی عملکرد سیستم مهم بوده اما برای توسعه سیستمی با قابلیت اطمینان بالا با هزینه کم، روش‌هایی همانند روش‌های هوش مصنوعی و فراابتکاری در هر دو

سیستم برای بهبود فرآیند اندازه گیری و نتایج بهینه سازی پیشنهاد شده است. لالوانی و همکاران [۳] مروری بر ابزارهای نرم افزاری فتوولتائیک خورشیدی انجام دادند سپس دسترسی نرم افزار، قیمت ها، بسترکاری، ظرفیت ها، محدودیت ها، نتایج و قابلیت به روزرسانی را مورد بحث قرار دادند. سین ها و همکاران [۴] ۱۹ ابزار نرم افزاری را برای تجزیه و تحلیل سیستم هیبریدی، با ارزیابی بیش تر بر روی نرم افزار Homer و RetScreen بررسی کردند. حسین و همکاران [۵] اندازه بهینه شرایط امکان سنجی فنی و اقتصادی یک سیستم فتوولتائیک مسکونی را برای ارزیابی مزایای کاربرانی که از پنل خورشیدی استفاده کردند را تعیین کردند از نرم افزار Homer جهت تعیین اندازه بهینه تجهیزات با در نظر گرفتن داده های جغرافیایی و هواشناسی مکان مورد مطالعه (بنگلادش) استفاده کردند.

کاپنر و همکاران [۶] روش هزینه کل مالکیت مبتنی بر خریدار برای تجزیه و تحلیل امکانات مالی برای خریداران تحت شرایط بازار آلمان استفاده کردند سپس راه حل بهینه اقتصادی برای اندازه های مختلف خانوار خانگی تعیین کردند به منظور به دست آوردن نتایج واقعی، داده های واقعی که شامل آب و هوا، الگوهای مصرف، هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری، قیمت ها و درآمدها بود اعمال کردند. و به این نتیجه رسیدند که سیستم فتوولتائیک باتری صرفه اقتصادی ندارد با این که خود مصرفی و خودکفایی را افزایش داده است ولی سیستم فتوولتائیک صرفه بهتری دارد. ژانگ و همکاران [۷] مدل ریاضی یک سیستم فتوولتائیک باتری را برای بررسی عملکرد سیستم براساس شاخص های مختلف اقتصادی و فنی توسعه دادند. آن ها نشان دادند که ادغام ذخیره ساز باتری می تواند مقدار خود مصرفی و نرخ های خودکفایی را افزایش دهد ولی در عین حال دوره بازپرداخت را طولانی تر کند. جریان انرژی در بین فتوولتائیک، بانک باتری و شبکه و کاربران خانگی مورد بحث قرار گرفته است در نهایت به این نتیجه رسیدند که سیستم هایی با نرخ خودکفایی بالا منجر به تولید فتوولتائیک برنامه ریزی شده تر، فروش برق و نرخ مصرف باتری پایین تر نسبت به سیستم هایی با نرخ خود مصرفی بالا شده اند. تحلیل اقتصادی طول عمر نشان داده که نرخ خودکفایی بالاتر به سرمایه گذاری اولیه بالاتر و اما دوره بازگشت کوتاه تر و سود بیش تر اشاره دارد. تروو و همکاران [۸] عملکرد اقتصادی و طول عمر فتوولتائیک های مسکونی را با باتری های لیتیوم یون در ۵۰ ایالت ایالات متحده بررسی کردند از نظر عملکرد، استفاده از فناوری ذخیره سازی به بهینه سازی اندازه پنل و باتری نیاز دارد تا میزان استفاده از باتری، خودکفایی و خود مصرفی را متعادل کند از نظر اقتصادی، به دلیل بالا بودن نرخ قیمت برق در برخی ایالات، سیستم فتوولتائیک باتری ارزان تر از سیستم فتوولتائیک شده و در برخی ایالات سیستم فتوولتائیک به صرفه تر از سیستم فتوولتائیک باتری شده است

رن و همکاران [۹] یک چهارچوب مدل سازی جامع و قابل تعمیم برای به تصویر کشیدن عملکردهای اقتصادی و زیست محیطی طول عمر دینامیکی سیستم های پنل خورشیدی ارائه کردند یک مدل سیستم دینامیکی^۱ SDM از سیستم های پنل خورشیدی مسکونی توزیع شده توسعه داده شده است و با LCA^۲ و LCCA^۳ ترکیب شده اند تا مبادلات زیست محیطی و اقتصادی سیستم های پنل خورشیدی در حالت متصل به شبکه و مستقل از شبکه را تحت سناریوهای مختلف اندازه گیری باتری و پنل خورشیدی با استفاده از نرم افزار Homer ارزیابی کنند. سو و همکاران [۱۰] ارزش فعلی خالص (NPV)، دوره

^۱ System Dynamic Model

^۲ Life Cycle Assessment

^۳ Life Cycle Costing Assessment

بازپرداخت (PBP) و نرخ بازده داخلی (IRR) را با استفاده از روش جریان نقدی تنزیل شده براساس منابع خورشیدی، میانگین نرخ برق و سیاست‌های حمایتی (FIT^4 ، مشوق‌ها، یارانه‌ها و ...) ارزیابی کردند همچنین دو تجزیه و تحلیل حساسیت برای تعیین شرایط دوام پروژه‌ها انجام شده است. پالاولیچینو و همکاران [۱۱] روشی را برای تجزیه و تحلیل اقتصادی یک سیستم پنل خورشیدی تنها، پنل خورشیدی همراه با ذخیره‌ساز باتری برای واحدهای مسکونی پیشنهاد کردند این روش شامل صرفه-جویی در قبوض برق، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تعمیر و نگهداری است. همچنین ارزش فعلی خالص (NPV) و دوره بازپرداخت (PBP) به عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی اقتصادی جریان نقدینگی توسط نرم‌افزار System Model Advisor استخراج شدند. اسلام و همکاران [۱۲] یک سیستم هیبریدی PV/Wind/Hydro/PHS مستقل از شبکه برای تامین برق قابل اعتماد برای یک جامعه ساحلی دورافتاده در نیوفاندلند بررسی کردند. سیستم هیبریدی PV/Wind/PHS با استفاده از نرم افزار Homer مقرون به صرفه‌تر از سایر سیستم‌ها شده است. علاوه بر این مقرون به صرفه بودن و مزایای زیست محیطی سیستم بهینه شده با سیستم دیزل مقایسه شده است در نهایت پارامترهای عملکردی مانند انرژی اضافی، کمبود انرژی، تلفات انرژی و قابلیت اطمینان تحلیل شدند. اما هیچ عدم قطعیتی در نظر گرفته نشده است (تولید و مصرف برابر فرض شده است). شوهر و همکاران [۱۳] یک الگوریتم یادگیری ماشین با ساختار بهینه، سودآوری، خودکفایی و نسبت‌های خودکفایی برای سیستم خورشیدی پیشنهاد کردند. در تمام سناریوهای هزینه، سودآوری سیستم به دلیل وجود ناهمگونی در پروفیل بار زمان واقعی بین کاربران مسکونی (کاربران دارای پنل خورشیدی و باتری) متفاوت بوده است. اهرم‌های حیاتی برای افزایش سرمایه-گذاری خصوصی در سیستم‌های خورشیدی باتری در هر منطقه سوییچ مشخص شده است همچنین چگونگی پیشرفت‌های آتی مانند هزینه‌های اولیه و تعمیر و نگهداری قطعات خورشیدی باتری بر انتشار آینده این سیستم‌ها پیش‌بینی شدند.

زاگری و همکاران [۱۴] سه سیاست برای ترویج سیستم خورشیدی با ذخیره‌ساز باتری را در انگلستان از جمله پاداش تعرفه خودمصرفی، سیاست‌های ذخیره انرژی و مکانیسم‌های قیمت‌گذاری دینامیکی خرده فروشی پیشنهاد می‌کنند. مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که خودمصرفی سیستم‌های خانگی خورشیدی-باتری نسبت به سیستم خورشیدی بهتر می‌باشد همچنین از نظر اقتصادی نیز مناسب‌تر می‌باشد. علاوه بر این، سیاست‌های پیشنهادی ذخیره انرژی در ترکیب با سیستم خورشیدی بدون هماهنگی متمرکز، بازده مثبت سرمایه‌گذاری را ارائه می‌دهند. این مطالعه اهمیت بهینه‌سازی اندازه ذخیره‌سازی و تعرفه‌های برق را برای به حداکثر رساندن سودآوری برجسته می‌کند. به طور کلی، این مقاله بینشی در مورد سیاست‌ها و استراتژی‌های بهینه‌سازی برای ترویج سیستم خورشیدی با ذخیره‌ساز باتری در انگلستان ارائه می‌دهد. امرانی و همکاران [۱۵] طول عمر مجدد باتری های لیتیوم یون از وسایل نقلیه برقی برای سطوح بار در نیروگاه‌های مسکونی، صنعتی و فتوولتائیک را ارزیابی می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که باتری‌ها می‌توانند صورت حساب برق مصرف کنندگان مسکونی و هزینه‌های سوخت و ساخت و ساز نیروگاه های فسیلی در بخش صنعت را کاهش دهند. در این مقاله همچنین در مورد مزایای زیست محیطی باتری‌ها برای توسعه پایدار شبکه بحث می‌شود. منصوری و همکاران [۱۶] پتانسیل برق فتوولتائیک پشت بام ساختمان‌ها در لتبریج کانادا را تخمین می‌زنند و یک ارزیابی اقتصادی برای شناسایی سیستم‌های فتوولتائیک پشت بام انجام می‌دهند. آن‌ها دریافتند که لتبریج دارای پتانسیل تولید برق فتوولتائیک پشت بام 29 ± 29 (انحراف استاندارد (SD^5)) GWH سالانه است،

⁴ Feed in Tariff

⁵ Standard Deviation

تقریباً ۳۸ درصد از مصرف برق سالانه در سال ۲۰۱۶، با حدود ۹۶ درصد سیستم‌های بالقوه فتوولتائیک پشت بام، اقتصادی به نظر می‌رسد. این مطالعه از داده‌های سنجش از راه دور و یک رویکرد چند معیار مبتنی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۶ و تشخیص نور و اعم از (LIDAR^۷) استفاده می‌کند. نتایج آن می‌تواند تصمیمات سیاسی را در مورد سرمایه‌گذاری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر راهنمایی کند.

کلوتانی و همکاران [۱۷] استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (HRES^۸) را به عنوان جایگزینی برای انرژی دیزل برای سیستم‌های انرژی مستقل از شبکه در شمال کانادا پیشنهاد می‌کنند. با استفاده از نرم افزار Homer، این مطالعه نتیجه می‌گیرد که توپولوژی PV-Diesel-battery مؤثرترین گزینه می‌باشد، که موجب صرفه جویی در سوخت تا ۲۲ درصد و کاهش هزینه یکنواخت‌سازی برق می‌شود. HRES آسیب‌های زیست محیطی را کاهش می‌دهد و قابلیت اطمینان، در دسترس بودن و امنیت را تضمین می‌کند. مطالعه توسط پیرس و همکاران [۱۸] امکان سنجی اقتصادی استفاده از فناوری و پمپ‌های حرارتی فتوولتائی (HP^۹) را برای دکرینیزه کردن شبکه و گرمایش تجدیدپذیر ارزیابی می‌کند. ساکنان آمریکای شمالی می‌توانند با سودآوری نصب سیستم‌های PV+HP مسکونی، نیازهای برقی و گرمایشی خود را تامین کنند و بازدهی تا ۱۰۹ درصد در ایالات متحده و ۲۰۷٪ در کانادا بهبود یابد. این روش یک رویکرد واضح و ساده برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. آل‌گارنی و همکاران [۱۹] طراحی بهینه سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی متصل به شبکه را با استفاده از سیستم‌های ردیابی مختلف برای افزایش تولید برق در مکه عربستان سعودی ارزیابی می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که ردیاب دو محور می‌تواند ۳۴ درصد توان بیشتری نسبت به سیستم ثابت تولید کند، در حالی که ردیاب محور عمودی با تنظیم مداوم می‌تواند تا ۲۰ درصد توان بیشتری نسبت به سیستم ثابت ایجاد کند. ردیاب محور عمودی با تنظیم مداوم بهترین گزینه است، با هزینه‌های پایین انرژی (LCOE)، هزینه فعلی خالص (NPC^{۱۰}) و بازده مثبت سرمایه‌گذاری (ROI). مطالعه توسط دومان و همکاران [۲۰] امکان سنجی سیستم‌های فتوولتائیک پشت بام مسکونی متصل به شبکه را در ترکیه تحت طرح تعرفه فعلی (FIT) با استفاده از نرم افزار Homer ارزیابی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های فتوولتائیک فعلی فقط در یک استان جنوبی ترکیه از نظر اقتصادی قابل دوام هستند و نه در بخش شمالی. این مطالعه افزایش مشوق‌های PV مسکونی و ایجاد مکانیسم پشتیبانی منطقه‌ای برای بهبود امکان سنجی سیستم‌ها را توصیه می‌کند. رکاشری و همکاران [۲۱] از یک روش مبتنی بر مدل برای سیستم‌های پنل خورشیدی متصل به شبکه برای ترویج تولید انرژی سازگار با محیط زیست با منابع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند. یک نیروگاه پشت بام خورشیدی ۱ کیلو وات در کارناتاکا ۵ کیلووات ساعت در روز تولید می‌کند و ۳۱ تن انتشار CO2 را کاهش می‌دهد و معادل کاشت ۴۹ درخت می‌باشد. یک مطالعه موردی سیستم فتوولتائیک ۲۰۵ کیلو

^۶ Geographic Information System

^۷ Light Detection And Ranging

^۸ Hybrid Renewable Energy Systems

^۹ Heat Pumps

^{۱۰} Net Present Cost

وات برای تامین بار مصرفی خانه با استفاده از نرم افزار PVSyst برای قطعی برق و ذخیره انرژی پشتیبان مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. این سیستم انرژی پاک را برای توسعه پایدار و حفظ انرژی تضمین می کند.

سرانجام، نرم افزار PVSyst به عنوان یکی از کامل ترین نرم افزارهای موجود برای تجزیه و تحلیل اقتصادی پروژه های خورشیدی نام برده می شود. این نرم افزار در شبیه سازی سه بعدی، تجزیه و تحلیل سایه و محاسبه طراحی و تلفات سیستم بسیار دقیق می باشد و می تواند از نظر اقتصادی پروژه ها را تجزیه و تحلیل نماید. نسخه نرم افزار جدید می تواند نرخ بازده داخلی را نیز محاسبه کند که ورژن های قبلی این قابلیت را نداشتند، به دلیل کامل بودن این نرم افزار دیگر نیازی به نرم افزار Homer و RetScreen نمی باشد. در این مقاله نرم افزار PVSyst برای طراحی فتوولتائیک خورشیدی همراه با سیستم ذخیره ساز باتری برای واحدهای مسکونی پشت بام در ایالت های مختلف کانادا به عنوان مطالعات موردی ارائه می شود.

۳. طراحی سیستم پیشنهادی

الله و همکاران [۲۲] امکان سنجی انتقال توان DC در شبکه ۲۳۰ ولت AC موجود را بررسی می کنند و سپس افت ولتاژ خط، تلفات توان و بازدهی ریزشکبه DC را نسبت به ریزشکبه AC مقایسه می کنند. اوپیو و همکاران [۲۳] مقایسه ای بین مزایا و معایب ریزشکبه های DC و AC از نظر هزینه ها، بازدهی و عملکرد کلی انجام می دهند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش بارهای DC و منابع تجدیدپذیر DC (فتوولتائیک و باتری) می توان عملکرد کلی سیستم را بهبود بخشید.



شکل ۱. ساختار ریزشکبه های DC و AC [۲۲].

به مرور زمان با ظهور فناوری سیستم فتوولتائیک و ذخیره ساز باتری بستر جدیدی (ریزشکبه DC) برای جایگزینی ریزشکبه AC ارایه می شود که منجر به مزایای زیادی برای جامعه و کاربران می شود از جمله این مزایا می توان به کاهش هزینه های ساخت، افزایش بازدهی، افت ولتاژ کمتر، تلفات کمتر، انعطاف پذیری بیشتر و کنترل ساده تر ریزشکبه های DC نسبت به ریزشکبه های AC اشاره نمود. همچنین شرایط استفاده از بارهای مصرفی DC کم توان تر نسبت به بارهای مصرفی AC فراهم می شود. که منجر به کاهش بار مصرفی کاربران می شود. شکل ۱ ساختار هر ریزشکبه AC / DC را با توجه به پنل خورشیدی، ذخیره ساز باتری، بارهای AC / DC و شبکه توزیع نشان می دهد.

۱.۳ قطعات مورد نیاز

عناصر اصلی لازم برای ایجاد یک سیستم فتوولتائیک پشت بام متصل به شبکه (PV) شامل ماژول های خورشیدی PV، یک اینورتر متصل به شبکه، شارژ کنترلر، باتری، قابلیت اندازه گیری خالص، شبکه برق و بارهای DC و AC می باشد.

PV خورشیدی پشت بام: یک سیستم فتوولتائیک خورشیدی (PV) تابش خورشید را از طریق نیمه هادی‌ها به برق DC تبدیل می‌کند. این فناوری به طور گسترده در کانادا در دسترس می‌باشد و با موفقیت در ساختمان‌ها و سایت‌های مختلف نصب می‌شود و به طور قابل توجهی در تأمین نیازهای برق کمک می‌کند. ماژول‌های خورشیدی در انواع مختلفی از جمله سلول‌های مونوکریستالی، سلول‌های پلی کریستالی، سلول‌های خورشیدی روبان رشته‌ای، سلول‌های خورشیدی فیلم نازک، سلول‌های خورشیدی سیلیکون آمورف، سلول‌های خورشیدی فیلم نازک کادمیوم، سلول‌های خورشیدی سلنید گالیم ایندیم مس و ساخت پانل‌های فتوولتائیک یکپارچه ساختمان قرار دارند. سلول‌های مونوکریستالی به دلیل راندمان بالای آن‌ها برای سیستم‌های PV خورشیدی مورد حمایت قرار می‌گیرند، اگرچه نسبتاً گران‌تر هستند. پانل‌های خورشیدی موجود در سیستم پیشنهادی از مواد مونوکریستالی ساخته شده است. یکی از مزیت‌های این سیستم‌های خورشیدی جهت‌گیری و زاویه قابل تنظیم آن‌ها می‌باشد که امکان تولید بهینه انرژی خورشیدی را در دوره‌های مصرف زیاد فراهم می‌کند و از این طریق سطح خودکفایی و خودمصرفی کاربران را افزایش می‌دهد.

ذخیره ساز باتری: باتری الکتریکی وسیله‌ای است که از یک یا چند سلول الکتروشیمیایی تشکیل شده است که به دستگاه‌های برق متصل می‌شود و انرژی ذخیره می‌کند. درحالی‌که برخی از کاربران فقط به پانل‌های خورشیدی متکی هستند، اما برخی از کاربران باتری را در سیستم‌های خود قرار می‌دهند. در این موارد، یک شارژ کنترلر جهت تنظیم شارژ و تخلیه باتری برای جلوگیری از شارژ یا دشارژ بیش از حد لازم می‌باشد. باتری‌ها به اسید سرب، لیتیوم یون، نیکل آهن، هیدرید متال نیکل، نیکل روی و سدیم یون تقسیم می‌شوند. باتری‌های لیتیوم یون معمولاً به دلیل طول عمر (۱۵ سال) در سیستم‌های PV خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما هزینه اولیه آن‌ها نسبت به سایر باتری‌ها بیشتر می‌باشد. مدل بانک باتری انتخابی برای کاربران از شرکت Simpliphi Power می‌باشد.

اندازه‌گیری خالص (نت مترینگ): اندازه‌گیری خالص این اجازه را به کاربران مسکونی و تجاری می‌دهد تا از فروش انرژی اضافی تولید شده خود به شبکه، درآمد کسب کنند.

شبکه برق: نقطه اتصال منبع کاربران به شبکه نقطه اتصال مشترک (PCC) نامیده می‌شود. سیستم شبکه برق شامل یک نت مترینگ برای اندازه‌گیری انرژی تغذیه شده به شبکه می‌باشد. اپراتور شبکه به طور معمول از نت مترینگ برای تعیین میزان انرژی تبادلی با شبکه استفاده می‌کنند. مازاد انرژی تولید شده توسط سیستم و یا کمبود انرژی از طریق اندازه‌گیری خالص با شبکه سه فاز، ۴۴۰ ولت، ۶۰ هرتز تبادل می‌شود. سیستم اندازه‌گیری خالص، واردات و صادرات انرژی برای بارهای مصرفی خانگی را محاسبه می‌کند.

۲.۳ مطالعه موردی

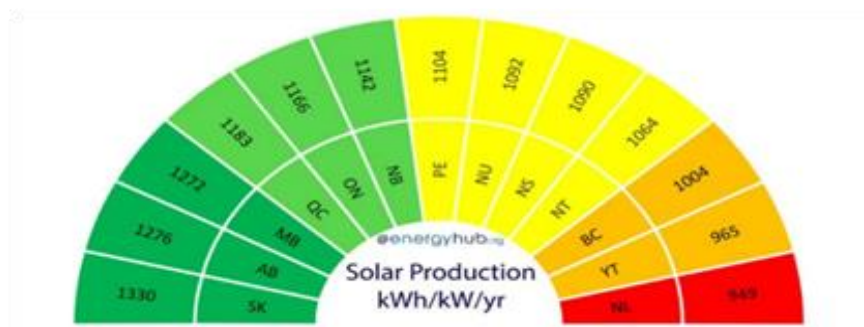
طراحی سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه برای کاربران مسکونی با میزان مصرف انرژی کم، متوسط و زیاد در ۱۴ ایالت کانادا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در مجموع ۶ کاربر در هر ایالت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، از جمله کاربران کم، متوسط و مصرف بالا متصل به سیستم خورشیدی و کاربران کم، متوسط و مصرف بالا متصل به سیستم خورشیدی و باتری.

۳.۳ محاسبه طراحی خورشیدی و باتری

معادلات ۱ و ۲ ظرفیت فتوولتائیک نصب شده مورد نیاز و تعداد باتری‌ها را برای هر حالت تعیین می‌کند.

طراحی ظرفیت فتوولتائیک

$$\text{Capacity (kW)} = \frac{\text{Average Annual Electricity Consumption (kWh)}}{\text{Average Annual Irradiation hours} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kW}} \right)} \quad (1)$$



شکل ۲. متوسط تولید انرژی خورشیدی در هر سال و در هر ایالت

طراحی ظرفیت باتری

$$\text{Number of Battery} = \frac{\text{Average Daily Electricity Consumption} * \text{Number of Cloudy Days}}{\text{Depth Of Discharge} * \text{Rated voltage of battery} * \text{Rated Ampere Hour}} \quad (2)$$

پس از تعیین تعداد باتری‌ها، آن‌ها بر اساس ولتاژ خروجی مورد نظر ۱۲، ۲۴ یا ۴۸ ولت به صورت سری متصل می‌شوند.

۴.۳ پارامترهای طراحی و ارزیابی اقتصادی

کل هزینه‌های نصب فتوولتائیک، مشوق‌های مالی، انواع مالیات‌ها، متوسط قیمت خرید و فروش برق برای سه سطح کاربران در هر ایالت در جدول ۱ بیان شده است. اطلاعات قیمت برق به عنوان یک فایل CSV در مایکروسافت اکسل ایجاد شده است، که این اطلاعات از وب سایت "EnergyHub.org" استخراج شده است.

جدول ۱ مشخصات پارامترهای طراحی و ارزیابی اقتصادی پنل خورشیدی در ایالات کانادا

شهر	زاویه نصب پنل خورشیدی و آزیموت	محدوده دمای کاری پنل خورشیدی	هزینه‌های نصب پنل خورشیدی (دلار/وات)	مشوق‌های مالی دولت (دلار/وات)	مالیات بر درآمد و سایر مالیات (%)	هزینه خرید برق (دلار/وات) کم، متوسط و پر مصرف
ادمونتون	۴۸ / ۰	-۳۰ / ۶۵	۲.۷۷ - ۲.۵۱	۰.۴	۵ - ۰	۰.۱۷ - ۰.۱۸۳ - ۰.۲۰۵
اتاوا	۴۲ / ۰	-۱۴ / ۸۰	۲.۵۹ - ۲.۳۴	-	۸ - ۵	۰.۱۳۳ - ۰.۱۴۲ - ۰.۱۵۸
تورنتو	۳۸ / ۰	-۷ / ۵۳	۲.۵۹ - ۲.۳۴	-	۸ - ۵	۰.۱۳۳ - ۰.۱۴۲ - ۰.۱۵۸
رجینا	۴۵ / ۰	-۳۱ / ۷۲	۳.۲۲ - ۲.۶۴	-	۱۰ - ۵	۰.۱۸۵ - ۰.۱۹۳ - ۰.۲۰۸
سنت جان	۴۰ / ۰	-۱۰ / ۵۵	۴.۳۱ - ۳.۵۳	-	۱۰ - ۵	۰.۱۴۱ - ۰.۱۴۶ - ۰.۱۵۷
شارلوت تاون	۴۰ / ۰	-۱۰ / ۵۸	۳.۳۳ - ۲.۷۳	۱	۱۰ - ۵	۰.۱۷۸ - ۰.۱۸۶ - ۰.۲۰۳
کلگری	۴۵ / ۰	-۲۲ / ۷۰	۲.۷۷ - ۲.۵۱	۰.۴	۵ - ۰	۰.۱۷ - ۰.۱۸۳ - ۰.۲۰۵
مونترال	۴۰ / ۰	-۲۷ / ۶۹	۲.۸۳ - ۲.۵۶	-	۵ - ۹.۹۷	۰.۰۷۵ - ۰.۰۷۹ - ۰.۰۸۶
مونکتون	۴۲ / ۰	-۷ / ۶۳	۳.۲۴ - ۲.۶۵	۰.۲۵	۱۰ - ۵	۰.۱۳ - ۰.۱۳۷ - ۰.۱۴۷

نورث وست	۵۰ / ۰	-۳۰ / ۶۰	۳.۳۵ - ۲.۷۴	۵۰ %	۱۰ - ۵	۰.۳۹۱ - ۰.۳۸ - ۰.۳۹۱
ونکوور	۴۲ / ۰	-۱۰ / ۷۰	۲.۶۹ - ۲.۵۴	۷ %	۵ - ۱	۰.۱۲۹ - ۰.۱۲۵ - ۰.۱۳
وینیپگ	۴۵ / ۰	-۳۷ / ۶۴	۲.۹ - ۲.۶۳	-	۷ - ۹.۴	۰.۱۰۱ - ۰.۱۰۴ - ۰.۱۰۹
هالیفاکس	۴۱ / ۰	-۸ / ۶۱	۲.۶۸ - ۲.۴۳	۰.۶	۵ - ۰	۰.۱۷۵ - ۰.۱۷۹ - ۰.۱۸۴
یوکان	۴۸ / ۰	-۲۵ / ۶۰	۲.۸۱ - ۲.۲۹	۰.۸	۱۰ - ۵	۰.۱۹۱ - ۰.۱۹۶ - ۰.۲۱

آزیموت کاربران کم، متوسط مصرف در تمامی نقاط کانادا مطابق با جدول ۱ برابر صفر در نظر گرفته شده است. درحالی که آزیموت کاربران پر مصرف برای ایجاد تنوع بیشتر ۳۰- درجه در نظر گرفته شده است. بعضی پارامترهای مفروض ثابت پروژه (مطابق با مراجع)، مطابق جدول ۲ تعیین شده است. همچنین سایر پارامترهای مطرح نشده در جدول، به صورت پیش فرض لحاظ شده‌اند.

جدول ۲ مشخصات طراحی و ارزیابی اقتصادی پارامترهای سیستم باتری کاربران در ایالات کانادا

مشخصات کاربران R, N	کم مصرف	متوسط مصرف	پر مصرف
مشخصات سیستم باتری	۲۴ V, ۱۳۸ Ah ۲*۱, ۶.۶ kWh	۲۴ V, ۱۳۸ Ah ۴*۱, ۱۳.۲ kWh	۲۴ V, ۱۳۸ Ah ۳*۲, ۱۹.۸ kWh
ظرفیت باتری در عمق تخلیه دشارژ ۸۰ درصد	۵.۷	۱۱.۴	۱۷
میانگین مصرف برق سالیانه (مگاوات ساعت/ سال)	۶	۹	۱۲
هزینه اولیه باتری (دلار)	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰
هزینه تعویض باتری (دلار/ سال)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰

همچنین، هزینه‌های تعمیر و نگهداری سیستم‌های خورشیدی ۰.۵ درصد از کل هزینه نصب شده در نظر گرفته می‌شود. مشخصات و اطلاعات هزینه باتری انتخاب شده برای کاربران مسکونی همه ایالت‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، این اطلاعات از سایت "canbat.com" استخراج می‌شود. سرانجام، سایر فرضیات مسئله در جدول ۳ ارائه می‌شود.

جدول ۳ مشخصات فرضیات ثابت مسأله

نرخ تورم (درصد/ سال)	۲.۳	تغییرات آب و هوایی (درصد)	۵
نرخ تنزیل (درصد/ سال)	۳	تغییرپذیری سالیانه (درصد)	۴.۴
طول عمر پروژه (سال)	۳۰	هزینه تعمیر و نگهداری (درصد)	۰.۵ درصد هزینه نصب
تغییرات در تولید (درصد/ سال)	- ۰.۳۵	ضریب البدو	۰.۲

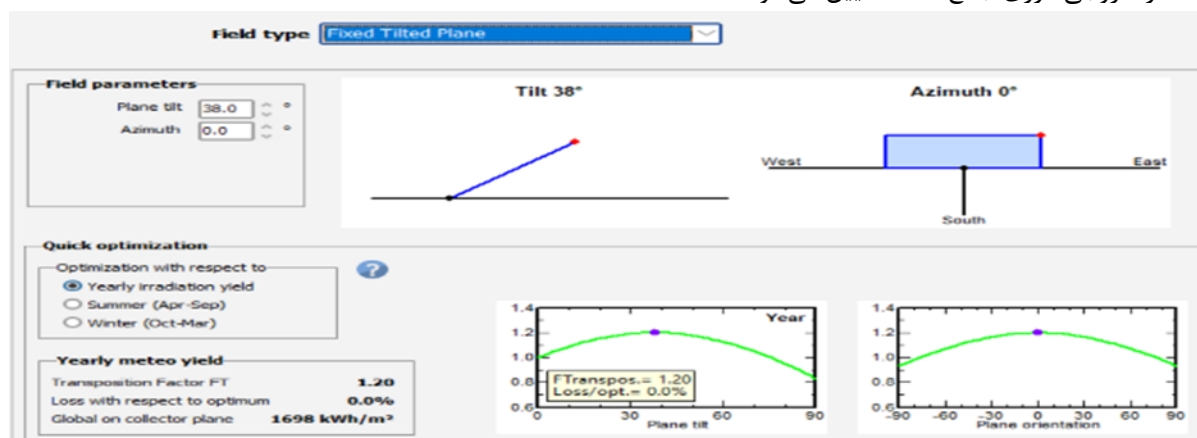
تغییرات نرخ قیمت برق (درصد/سال)	۲.۳	ضریب تلفات سالیانه ناشی از گرد و غبار، برف و ... (درصد)	۰.۳
---------------------------------	-----	---	-----

۴. نیازمندی های نرم افزار

PvSyst V7.3.1 یک نرم افزار رایانه ای می باشد که برای تجزیه و تحلیل، اندازه و ارزیابی داده های سیستم های کامل فتوولتائیک (PV) طراحی می شود. این سیستم انواع مختلفی از سیستم های PV، از جمله سیستم های متصل به شبکه، مستقل، پمپاژ و DC-Grid را در بر می گیرد. این سیستم دارای پایگاه داده های گسترده ای از اجزای سیستم هواشناسی و فتوولتائیک و همچنین انواع ابزارهای انرژی خورشیدی موجود می باشد. نسخه نرم افزاری PvSyst V7.3.1 است که با سیستم عامل Windows 10 Pro سازگار می باشد.

۱.۴ مراحل شبیه سازی نرم افزار سیستم اتصال به شبکه

این نرم افزار برای پاسخگویی به نیازهای معماران، مهندسان و محققان مناسب می باشد و همچنین می تواند برای آموزش تحصیلی مفید باشد. اطلاعات هواشناسی از سال ۱۹۹۸-۲۰۲۱ برای هر ایالت از وب سایت "National Solar Radiation Database" استخراج شده و در نرم افزار PvSyst گنجانیده شده است. طراحی سیستم متصل به شبکه شامل جزئیاتی از قبیل جهت گیری، شیب و زاویه آزمون می باشد. در طول عمر پروژه، همه مناطق از پانل های فتوولتائیک با زاویه ثابت استفاده کرده اند. بهترین مورد برای یک سیستم فتوولتائیک با زاویه ثابت، زاویه صفر آزمون می باشد. مقدار زاویه ثابت بهینه بر اساس حداکثر خروجی انرژی جمع کننده تعیین می شود.



شکل ۳. نمونه ای از طراحی جهت گیری پانل خورشیدی در تورنتو

علاوه بر این، مشخصات سیستم تولید و مصرف انرژی ساعتی در طول سال ۲۰۲۲ به روز می شود. اندازه بهینه ساز مورد استفاده برای هر کاربر به اندازه سیستم بستگی دارد، یا بهینه ساز ۴۵۰ W یا ۶۰۰ W استفاده می شود. اندازه اینورتر براساس این که تلفات اضافه تولید به حداقل برسد طراحی می شود تا تمام توان فتوولتائیک را از طریق اینورتر به شبکه یا بار منتقل کند. محدوده مقدار پانل فتوولتائیک انتخاب شده بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ وات می باشد و ظرفیت اینورتر برای هر کاربر از ۴ تا ۱۲ کیلووات متغیر است.

The screenshot displays the PVsyst software interface for configuring a sub-array. The 'Sub-array' section includes fields for 'Sub-array name and Orientation' (Name: PV Array, Orient: Fixed Tilted Plane, Tilt: 38°, Azimuth: 0°), 'Pre-sizing Help' (No sizing, Enter planned power: 5.3 kWp, or available area/modules: 26 m²), and 'Select the PV module' (Available Now, Filter: All PV modules, Bifacial module, Bifacial system, CS1 Solar, 525 Wp 34V, Si-mono, CS6W-525MB-AG 1500V, Since 2020, Manuf. April 21, TU, Use optimizer: Huawei SUN2000-600W-P, 600 W, Since 2022, Sizing voltages: Vmp (33°C) 36.2 V, Voc (-7°C) 52.9 V, Huawei Optimizer). The 'Select the inverter' section shows 'Available Now', Output voltage 220 V Tn 50Hz, Huawei Technologies, 5.0 kW, 140 - 980 V, TL, 50/60 Hz, SUN2000-5KTL-M1 220Vdc, Since 2021, No of MPPT inputs: 2, Operating voltage: 140-980 V, Inverter power used: 5.0 kWac, Use multi-MPPT feature, Input maximum voltage: 1100 V, Inverter with 2 MPPT, No Power sharing between MPPTs. The 'Array Design for Huawei optimizers' section includes 'Optimizer input' (Nb. optimizers in series: 5, 4 to 26, > 1 string = 5 modules, Prom = 2625 Wp, i.e. Part of the inverter capacity: 84 %, Nb. strings in parallel: 2, Nominal 2, Prom ratio: 1.05, Overload loss: 0.0 %, nb. modules: 10, Area: 26 m²) and 'Inverter input' (Huawei voltages at Pnom: Vmp (33°C) 38.1 V, Voc (-7°C) 265 V, Plane irradiance: 1000 W/m², Max. in data, Max. operating power (at 1000 W/m² and 50°C): 4.8 kW, Array nom. Power (STC): 5.3 kWp). The 'List of subarrays' table shows:

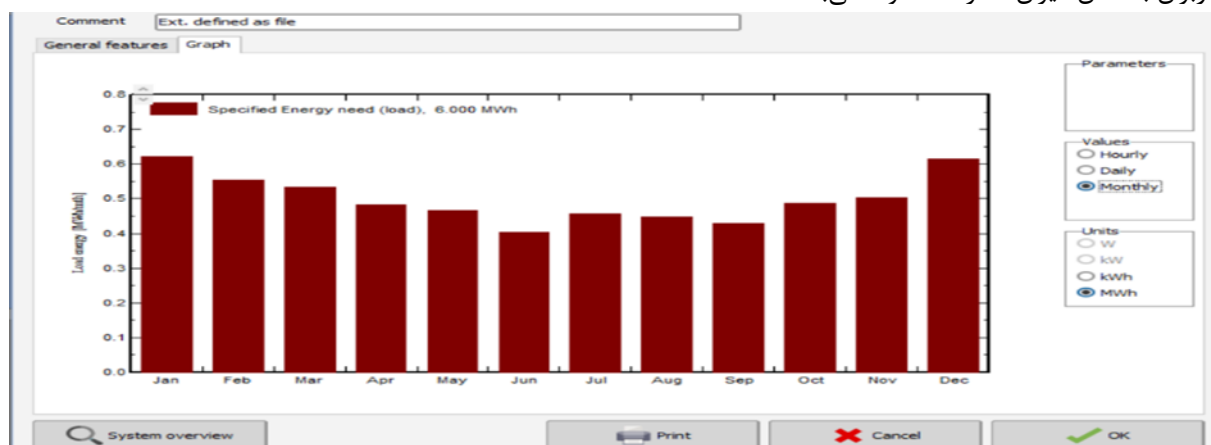
Name	#Mod #inv.	#String #MPPT
PV Array		
CS1 Solar - CS6W-525MB-AG 1...	5	2
Huawei Technologies - SUN200...	1	2

The 'Global system summary' table shows:

Nb. of modules	10
Module area	26 m²
Nb. of inverters	1
Nominal PV Power	5.3 kWp
Maximum PV Power	5.1 kWDC
Nominal AC Power	5.0 kWAC
Prom ratio	1.050

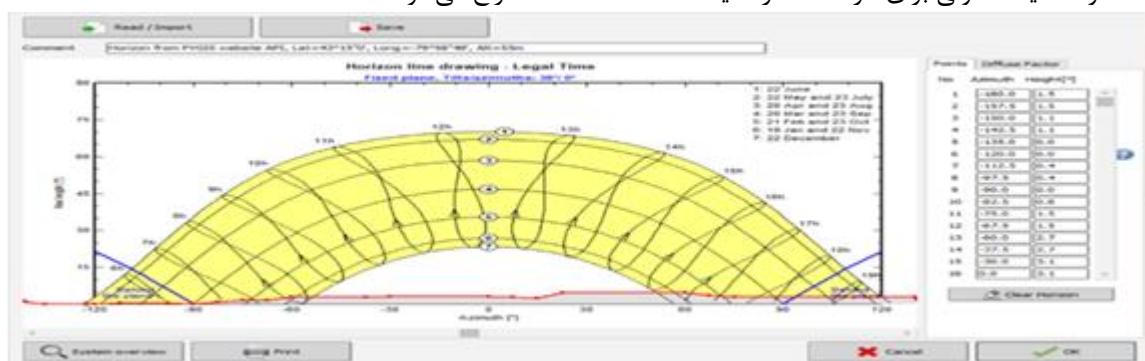
Buttons at the bottom include 'System overview', 'Single-line diagram', 'Cancel', and 'OK'.

شکل ۴. نمونه‌ای از مشخصات طراحی برای سیستم خورشیدی و اینورتر کاربران متوسط مصرف در تورنتو در هر ایالت، مصرف انرژی کاربران به سه دسته تقسیم می‌شود: (۱) مصرف کم (۶ مگاوات ساعت در سال)، (۲) مصرف متوسط (۹ مگاوات ساعت در سال) و (۳) مصرف زیاد (۱۲ مگاوات ساعت در سال). با این حال، الگوی مصرف انرژی حتی در بین کاربران با همان میزان مصرف متفاوت می‌باشد.



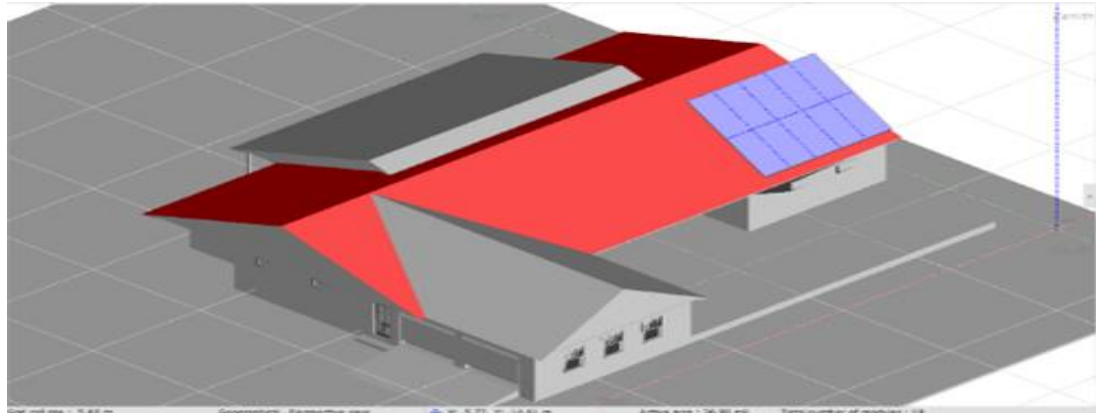
شکل ۵. میانگین مصرف انرژی ماهانه کاربران کم مصرف در تورنتو.

یک نمونه سایه معمولی برای هر منطقه از سایت PVGIS 5.2 استخراج می‌شود.



شکل ۶. نمونه سایه نماینده گرفته شده از سایت PVGIS در تورنتو.

سرانجام، سه ساختمان از پیش طراحی شده از Google Sketchup انتخاب می‌شوند، به قالب صحنه سه بعدی تبدیل می‌شوند و به نرم افزار PVSyst داده می‌شوند. سرانجام، تجزیه و تحلیل سایه در بدترین شرایط خورشید (۲۱ دسامبر) برای تعیین حداکثر میزان سایه و تلفات الکتریکی در طول سال انجام می‌شود.



شکل ۲. نمونه‌ای از پانل نصب شده در پشت بام کاربران کم مصرف در تورنتو

۲.۴ ارزیابی اقتصادی

پس از طراحی سیستم‌های خورشیدی یا خورشیدی/باتری در نرم افزار PVSyst، ارزیابی اقتصادی کاربران مسکونی در سه سطح کم، متوسط، پرمصرف صورت گرفته است. تحلیل اقتصادی با استفاده از روش جریان نقدی تنزیل شده و با محاسبه ارزش فعلی خالص (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازپرداخت (PBP) انجام شده است. جریان نقدی اساساً به نرخ برق محلی، منابع خورشیدی، هزینه اولیه پروژه، تعرفه‌های ورودی یا درآمد خالص اندازه‌گیری و مالیات‌های فدرال و استانی بستگی دارد. جریان نقدی با معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$C_t'' = F \cdot E_t + C_{kWh,t} \cdot E_t - C_0 \cdot T_{Fed} - C_0 \cdot T_{Province} - u \cdot C_0 \quad (3)$$

که در آن F مقدار تعرفه تغذیه (دلار)، E_t انرژی تولید شده در سال t (کیلووات ساعت)، $C_{kWh,t}$ نرخ برق در هر کیلووات ساعت در سال t (دلار / کیلووات ساعت)، C_0 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (دلار)، T_{Fed} اعتبار مالیاتی فدرال، $T_{Province}$ اعتبار مالیاتی استانی و u ضریب هزینه تعمیر و نگهداری (۰.۵ درصد از هزینه اولیه).

برای یافتن ارزش فعلی برای هر سال، از یک عبارت کلاسیک برای سالانه کردن جریان‌های نقدی استفاده شده است:

$$C_t = \frac{C_t''}{(1+i)^t} \quad (4)$$

که در آن i نرخ تنزیل و N طول عمر پروژه است. NPV، IRR، PBP، ROI، LCOE شاخص‌های مهم ارزیابی اقتصادی می‌باشند که در ادامه توضیح داده شده‌اند:

ارزش فعلی خالص: ارزش فعلی یک سیستم نسبت به ارزشی است که در آینده خواهد داشت. روش‌های مختلفی برای محاسبه NPV بسته به مدل مالی مورد استفاده وجود دارد. NPV برای تعیین میزان سودآوری یک پروژه استفاده می‌شود. اگر NPV مثبت باشد، پروژه سودآور تلقی می‌شود. در صورت منفی بودن، پروژه منجر به ضرر می‌شود.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{C_t''}{(1+i)^t} - C_0 \quad (5)$$

نرخ بازده داخلی (IRR) نرخ تنزیلی است که باعث می شود ارزش فعلی خالص (NPV) یک پروژه صفر باشد. به عبارت دیگر، این نرخ بازده سالانه مرکب مورد انتظار است که در یک پروژه یا سرمایه گذاری به دست می آید.

$$\sum_{t=1}^N \frac{C_t''}{(1+IRR)^t} - C_0 = 0 \quad (6)$$

دوره بازپرداخت عبارت است از مدت زمان لازم برای بازیابی هزینه سرمایه گذاری اولیه یک سیستم. در مورد یک سیستم خورشیدی یا خورشیدی - باتری، دوره بازپرداخت کمتر از ۳۰ سال با توجه به طول عمر سیستم ضروری است. محاسبه PBP، تنها جریان های نقدی را در طول عمر پروژه در نظر می گیرد که هزینه سرمایه گذاری اولیه را بازیابی می کند. بنابراین، برای داشتن یک PBP سودآور، بایستی سیستم خورشیدی یا خورشیدی - باتری دارای جریان نقدی مثبت باشد.

$$\sum_{t=1}^{PBP} \frac{C_t''}{(1+i)^t} - C_0 = 0 \quad (7)$$

درصد بازگشت سرمایه، نسبت ارزش فعلی خالص به کل هزینه سرمایه گذاری (C'') در طول عمر ۳۰ سال است.

$$ROI = \frac{NPV}{C''} \quad (8)$$

یکنواخت سازی هزینه برق حداقل هزینه ای است که برق باید با آن فروخته شود تا در طول عمر سیستم ضرری نداشته باشد. $LCOE$ نشان دهنده هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی است. که با نسبت مجموع هزینه های سیستم بر مجموع انرژی تولید شده در طول عمر ۳۰ سال محاسبه می شود.

$$LCOE = \left(\sum_{t=1}^N \frac{I_t + M_t}{(1+i)^t} \right) / \left(\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+i)^t} \right) \quad (9)$$

I_t : هزینه سرمایه گذاری در سال t ، M_t : هزینه تعمیر و نگهداری در سال t ، E_t : انرژی تولید شده در سال t

i : نرخ تنزیل، N : طول عمر پروژه

رابطه نسبت عملکرد (PR) در سیستم های خورشیدی و باتری متصل به شبکه:

$$PR = (I_G * P_{Nom}) / (E_{PV \rightarrow G} + E_{PV \rightarrow B} + E_{Loss}) \quad (10)$$

$E_{PV \rightarrow B}$: انرژی اضافی حاصل از تولید پنل خورشیدی برای شارژ باتری، E_{Loss} : تلفات تبدیل انرژی، شارژ و دشارژ باتری

$E_{PV \rightarrow G}$: انرژی فروخته شده به شبکه، E_{Loss} : تلفات تبدیل انرژی و ...، I_G : شدت تابش خورشید

P_{Nom} : توان نامی پنل خورشیدی در حالت اتصال کوتاه

رابطه نسبت عملکرد تصحیح آب و هوا در سیستم های خورشیدی و خورشیدی-باتری متصل به شبکه:

تفاوت رابطه ۱۱ با ۱۰ در این می باشد که تاثیر دمای سلول در رابطه ۱۰ در نظر گرفته نشده است. دمای سلول با نسبت عملکرد رابطه عکس دارد.

$$PR = (E_{PV \rightarrow G} + E_{PV \rightarrow B} + E_{Loss}) P_{Nom} * \sum_{hours}^T \left(\frac{I_G}{I_{ref} * (1 + \mu_P * (T_{Cell} - T_{Cell, Avg}))} \right) \quad (11)$$

$$T_{Cell, Avg} = (\sum_{hours}^T I_G * T_{Cell}) / (\sum_{hours}^T I_G) \quad (12)$$

I_{ref} : شدت تابش مرجع = ۱۰۰۰ (وات/مترمربع)، μ_P : ضریب دمایی توان MPPT سلول خورشیدی

خود مصرفی جامعه: منظور از خود مصرفی نسبت استفاده از انرژی پنل خورشیدی برای تامین بار و شارژ باتری خود می باشد که برای کاربران سیستم خورشیدی و خورشیدی-باتری تعریف می شود.

$$SCR(i) = \frac{\sum_t^T (E_{PV \rightarrow L}(i, \Delta t)) + \sum_t^T (E_{PV \rightarrow B}(i, \Delta t))}{\sum_t^T (E_{PV}(i, \Delta t))} \quad (13)$$

خود کفایی جامعه: منظور از خود کفایی نسبت تامین بار مصرفی توسط انرژی پنل خورشیدی و باتری خود می باشد که برای کاربران سیستم خورشیدی و خورشیدی-باتری تعریف می شود.

$$SSR(i) = \frac{\sum_t^T (E_{PV \rightarrow L}(i, \Delta t)) + \sum_t^T (E_{B \rightarrow L}(i, \Delta t))}{\sum_t^T (E_L(i, \Delta t))} \quad (14)$$

نسبت تولید به تقاضا: از $PDR = 1$ اغلب به عنوان ساختمان انرژی صفر خالص نامیده می شود، به این معنی که در طول سال، خانواده به همان اندازه انرژی تولید می کند که مصرف می کند، صرف نظر از همزمانی تولید و تقاضا.

$$PDR(i) = \frac{\sum_t^T (E_{PV}(i, \Delta t))}{\sum_t^T (E_L(i, \Delta t))} = \frac{SSR(i)}{SDR(i)} \quad (15)$$

میزان کاهش CO_2 حاصل از تولید پنل خورشیدی:

$$Co_2(Emission) = \left(\frac{E_{PV} * \omega * N}{1000} \right) (t / MWh) \quad (16)$$

E_{PV} : مقدار تولید انرژی خورشیدی در هر سال، ω : میانگین ضریب وزنی انتشار دی اکسید کربن شبکه (ناشی از سوخت فسیلی)

۵. نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج طراحی و سرمایه‌گذاری در سیستم‌های خورشیدی و باتری مسکونی در ایالات مختلف کانادا مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا، نتایج طراحی سیستم‌های خورشیدی و خورشیدی-باتری کاربران مسکونی در ایالات مختلف کانادا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پارامترهای طراحی کلیدی مانند تولید انرژی خورشیدی، انرژی فروخته شده به شبکه، انرژی تأمین شده برای تأمین نیازهای مصرف، انرژی خریداری شده از شبکه در هر سال و همچنین نسبت عملکرد سیستم، نسبت خودکفایی (SSR)، نسبت خود مصرفی (SCR)، نسبت ذخیره به تقاضا (SDR) مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش بعد، نتایج ارزیابی اقتصادی سیستم خورشیدی و خورشیدی-باتری کاربران مسکونی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پارامترهای مهم ارزیابی اقتصادی کاربران، مانند هزینه اولیه سرمایه‌گذاری، دوره بازپرداخت سرمایه‌گذاری، هزینه تسویه حساب برق، ارزش فعلی خالص، درصد بازده سرمایه‌گذاری، نرخ بازده داخلی و میزان کاهش دی اکسید کربن ناشی از تولید انرژی خورشیدی بررسی شده است.

۵-۱ نتایج طراحی سیستم‌های خورشیدی و خورشیدی-باتری کاربران کانادا

سه کاربر مختلف (کم، متوسط، پر مصرف) در هر ایالت که قصد سرمایه‌گذاری در سیستم‌های خورشیدی و خورشیدی-باتری را دارند ابتدا مقادیر پارامتر طراحی آن‌ها در نرم افزار پیاده‌سازی شده و سپس پارامترهای مربوط به ارزیابی اقتصادی تکمیل شده است، در نهایت نتایج مهم حاصل از طراحی کاربران در سه سطح کم، متوسط و پرمصرف به ترتیب مطابق جداول ۴، ۵ و ۶ می‌باشد. که این جداول متوسط انرژی خورشیدی تولید شده، انرژی فروخته شده به شبکه، تأمین مصرف انرژی توسط پنل خورشیدی، انرژی خریداری شده از شبکه و نسبت عملکرد، خودکفایی، خودمصرفی و میزان کاهش کربن دی اکسید حاصل از انرژی خورشیدی را نشان می‌دهند. ردیف اول هر ستون برای کاربران دارای فتوولتائیک و سطر دوم برای کاربران دارای فتوولتائیک و باتری می‌باشند.

جدول ۴ نتایج حاصل از طراحی سیستم خورشیدی و باتری کاربران کم مصرف

شهر	انرژی تولید شده	انرژی فروخته شده به شبکه	تأمین مصرف انرژی توسط پنل خورشیدی	خرید انرژی از شبکه	نسبت عملکرد	نسبت خودمصرفی	نسبت خودکفایی	کاهش CO2
ادمونتون	۷۰۳۴	۵۱۳۵	۱۸۹۹	۴۱۰۱	۰.۸۳۲	۰.۲۷	۰.۳۱۷	۳۲
	۶۸۲۰	۳۱۹۰	۳۶۳۰	۲۳۷۰	۰.۸۰۸	۰.۵۳۲	۰.۶۰۵	۳۱.۹
اتاوا	۷۵۳۲	۵۵۸۰	۱۹۵۲	۴۰۴۸	۰.۸۳۵	۰.۲۵۹	۰.۳۲۵	۳۴.۲
	۷۳۱۹	۳۶۹۲	۳۶۲۷	۲۳۷۳	۰.۸۱۲	۰.۴۹۶	۰.۶۰۵	۳۴.۱
تورنتو	۷۲۲۱	۵۳۰۴	۱۹۱۷	۴۰۸۳	۰.۸۰۷	۰.۲۶۵	۰.۳۲	۳۲.۷
	۷۰۰۹	۳۴۲۹	۳۵۸۰	۲۴۲۰	۰.۷۸۳	۰.۵۱۱	۰.۵۹۷	۳۲.۶
رجینا	۷۰۲۲	۴۹۹۸	۲۰۲۴	۳۹۷۶	۰.۸۳۲	۰.۲۸۸	۰.۳۳۷	۳۱.۵
	۶۸۰۸	۳۰۴۵	۳۷۶۲	۲۲۳۸	۰.۸۰۷	۰.۵۵۳	۰.۶۲۷	۳۱.۴

۳۳.۸	۰.۳۱	۰.۲۴۳	۰.۸۳۷	۴۱۴۱	۱۸۵۹	۵۸۰۲	۷۶۶۱	سنت جان
۳۳.۷	۰.۵۷۹	۰.۴۶۷	۰.۸۱۴	۲۵۲۴	۳۴۷۶	۳۹۷۱	۷۴۴۸	
۳۱.۴	۰.۳۱۴	۰.۲۶۶	۰.۸۴۳	۴۱۱۶	۱۸۸۴	۵۲۰۹	۷۰۹۳	شارلوت تاون
۳۱.۳	۰.۵۷۵	۰.۵۰۱	۰.۸۱۸	۲۵۴۹	۳۴۵۱	۳۴۳۸	۶۸۸۹	
۳۵	۰.۳۳۵	۰.۲۶۳	۰.۸۳۸	۳۹۹۱	۲۰۱۰	۵۶۴۳	۷۶۵۳	کلگری
۳۴.۹	۰.۶۲۹	۰.۵۰۷	۰.۸۱۴	۲۲۲۸	۳۷۷۲	۳۶۶۴	۷۴۳۶	
۲۸.۸	۰.۳۱	۰.۲۸۳	۰.۸۳۸	۴۱۶۶	۱۸۳۵	۴۶۵۹	۶۴۹۴	مونترال
۲۸.۷	۰.۵۶۶	۰.۵۳۹	۰.۸۱۳	۲۶۰۶	۳۳۹۴	۲۹۰۱	۶۲۹۵	
۳۱.۵	۰.۳۷	۰.۳۱۵	۰.۸۱۹	۳۷۷۶	۲۲۲۴	۴۸۴۳	۷۰۶۷	مونکتون
۳۱.۴	۰.۶۳۲	۰.۵۵۴	۰.۷۹۴	۲۲۰۷	۳۷۹۳	۳۰۶۱	۶۸۵۴	
۲۶	۰.۲۷۴	۰.۲۷۷	۰.۸۶۴	۴۳۵۵	۱۶۴۶	۴۲۸۷	۵۹۳۳	نورث وست
۲۵.۹	۰.۴۸۴	۰.۵۰۳	۰.۸۴	۳۰۹۹	۲۹۰۱	۲۸۶۹	۵۷۶۹	
۲۹	۰.۳۳۴	۰.۳۰۷	۰.۸۰۳	۳۹۹۶	۲۰۰۴	۴۵۲۱	۶۵۲۵	ونکوور
۲۸.۹	۰.۵۶۱	۰.۵۳	۰.۷۸۱	۲۶۳۳	۳۳۶۷	۲۹۷۹	۶۳۴۷	
۳۲.۱	۰.۳۲۹	۰.۲۷۴	۰.۸۴۳	۴۰۲۹	۱۹۷۱	۵۲۱۶	۷۱۸۷	وینیپگ
۳۲	۰.۶۱۸	۰.۵۳۲	۰.۸۱۷	۲۲۹۴	۳۷۰۶	۳۲۶۳	۶۹۶۹	
۳۲.۵	۰.۳۱۴	۰.۲۵۸	۰.۸۲۵	۴۱۱۹	۱۸۸۱	۵۴۲۲	۷۳۰۳	هالیفاکس
۳۲.۴	۰.۵۷۷	۰.۴۸۸	۰.۸۰۲	۲۵۳۶	۳۴۶۴	۳۶۳۳	۷۰۹۶	
۳۴	۰.۳۷۱	۰.۲۹	۰.۸۷۳	۳۷۷۳	۲۲۲۷	۵۴۵۶	۷۶۸۳	یوکان
۳۳.۹	۰.۶۳۲	۰.۵۰۷	۰.۸۵۱	۲۲۰۷	۳۷۹۳	۳۶۹۵	۷۴۸۸	

جدول ۵ نتایج حاصل از طراحی سیستم خورشیدی و باتری کاربران متوسط مصرف

شهر	انرژی تولید شده	انرژی فروخته شده به شبکه	تامین انرژی توسط پنل خورشیدی	خرید انرژی از شبکه	نسبت عملکرد	نسبت خودمصرفی	نسبت خودکفایی	کاهش CO2
ادمونتون	۹۸۴۸	۶۸۴۶	۳۰۰۲	۵۹۹۸	۰.۸۳۲	۰.۳۰۵	۰.۳۳۴	۴۴.۸

۴۴.۷	۰.۶۸۸	۰.۶۵۶	۰.۷۹۷	۲۸.۰۹	۶۱۹۱	۳۲۴۳	۹۴۳۳	
۵۵.۶	۰.۳۵۶	۰.۲۶۴	۰.۸۴۲	۵۷۹۳	۳۲۰.۷	۸۹۳۸	۱۲۱۴۵	اتاوا
۵۵.۵	۰.۷۱۷	۰.۵۴۸	۰.۸۱۶	۲۵۵۱	۶۴۴۹	۵۳۲۶	۱۱۷۷۵	
۵۳.۴	۰.۳۴۷	۰.۲۶۷	۰.۸۱۵	۵۸۸۱	۳۱۱۹	۸۵۵۷	۱۱۶۷۶	تورنتو
۵۳.۳	۰.۷۰۵	۰.۵۶۳	۰.۷۸۷	۲۶۵۵	۶۳۴۵	۴۹۲۳	۱۱۲۶۸	
۴۶.۴	۰.۳۵۸	۰.۳۱۲	۰.۸۳۴	۵۷۷۵	۳۲۲۵	۷۰۹۸	۱۰۳۲۲	رجینا
۴۶.۳	۰.۷۲	۰.۶۵۲	۰.۸۰۲	۲۵۲۴	۶۴۷۶	۳۴۵۶	۹۹۳۲	
۴۷.۷	۰.۲۲	۰.۱۸۳	۰.۸۴۴	۴۰.۲۳	۱۹۷۷	۸۸۱۹	۱۰۷۹۷	سنت جان
۴۸.۳	۰.۳۳۶	۰.۲۷۷	۰.۸۴۷	۵۹۷۹	۳۰۲۱	۷۸۶۷	۱۰۸۸۸	شارلوت تاون
۴۸.۲	۰.۷۲۷	۰.۶۲۶	۰.۸۱۳	۲۴۶۰	۶۵۴۰	۳۹۱۱	۱۰۴۵۱	
۴۹.۳	۰.۳۵۳	۰.۲۹۷	۰.۸۳۹	۵۸۱۹	۳۱۸۱	۷۵۴۲	۱۰۷۲۲	کلگری
۴۹.۲	۰.۷۱۸	۰.۶۲۹	۰.۸۰۵	۲۵۳۴	۶۴۶۶	۳۸۲۱	۱۰۲۸۷	
۴۰.۱	۰.۳۱۹	۰.۳۱۸	۰.۸۳۴	۶۱۳۰	۲۸۷۰	۶۱۵۵	۹۰۲۵	مونترال
۴۰	۰.۶۳۴	۰.۶۵۸	۰.۸۰۱	۳۲۹۱	۵۷۰.۹	۲۹۶۳	۸۶۷۲	
۵۱.۴	۰.۳۷۳	۰.۲۹۱	۰.۸۳۵	۵۶۴۷	۳۳۵۳	۸۱۷۹	۱۱۳۵۲	مونکتون
۵۱.۳	۰.۶۹۵	۰.۵۶۶	۰.۸	۲۷۴۶	۶۲۵۴	۴۷۹۸	۱۱۰۵۲	
۳۰	۰.۲۹۶	۰.۲۸۴	۰.۸۸۶	۶۳۳۹	۲۶۶۱	۶۷۲۰	۹۳۸۲	نورث وست
۲۹.۹	۰.۵۳۵	۰.۵۳	۰.۸۵۸	۴۱۸۴	۴۸۱۶	۴۲۶۸	۹۰۸۴	
۴۷.۲	۰.۳۶۴	۰.۳۰۷	۰.۸۲۱	۵۷۲۰	۳۲۸۰	۷۳۹۴	۱۰۶۷۴	ونکوور
۴۷.۱	۰.۶۵۵	۰.۵۷	۰.۷۹۴	۳۱۰.۹	۵۸۹۱	۴۴۳۷	۱۰۳۲۸	
۴۶.۵	۰.۳۴۹	۰.۳۰۲	۰.۸۴۴	۵۸۵۹	۳۱۴۱	۷۲۵۴	۱۰۳۹۶	وینیپگ
۴۶.۴	۰.۷۰۹	۰.۶۳۸	۰.۸۱۲	۲۶۲۰	۶۳۸۰	۳۶۲۰	۱۰۰۰۰	
۵۰.۶	۰.۳۴	۰.۲۶۹	۰.۸۴	۵۹۳۸	۳۰۶۲	۸۳۰۱	۱۱۳۶۲	هالیفاکس
۵۰.۵	۰.۶۷۴	۰.۵۵۲	۰.۸۱۲	۲۹۳۸	۶۰۶۲	۴۹۱۲	۱۰۹۷۴	
۵۱.۶	۰.۴۰۱	۰.۳۰۹	۰.۸۸۳	۵۳۹۲	۳۶۰.۸	۸۰۵۵	۱۱۶۶۳	یوکان
۵۱.۵	۰.۷۰۵	۰.۵۶۲	۰.۸۵۵	۲۶۵۵	۶۳۴۵	۴۹۴۶	۱۱۲۹۰	

جدول ۶ نتایج حاصل از طراحی سیستم خورشیدی و باتری کاربران پرمصرف

شهر	انرژی تولید شده	انرژی فروخته شده به شبکه	تامین انرژی توسط پنل خورشیدی	خرید انرژی از شبکه	نسبت عملکرد	نسبت خودمصرفی	نسبت خودکفایی	کاهش CO2
ادمونتون	۱۳۱۹۶	۹۳۰۲	۳۸۹۳	۸۱۰۷	۰.۸۳۹	۰.۲۹۵	۰.۳۲۴	۶۰.۲
	۱۲۶۵۴	۴۱۶۴	۸۴۹۰	۳۵۱۰	۰.۷۹۷	۰.۶۵۶	۰.۶۸۸	۶۰.۱
اتاوا	۱۵۱۰۳	۱۰۸۵۶	۴۲۴۷	۷۷۵۳	۰.۸۵۸	۰.۲۸۱	۰.۳۵۴	۶۹.۳
	۱۴۵۴۳	۵۶۹۶	۸۸۴۷	۳۱۵۴	۰.۸۱۶	۰.۵۴۸	۰.۷۱۷	۶۹.۲
تورنتو	۱۴۴۷۵	۱۰۳۰۶	۴۱۶۹	۷۸۳۱	۰.۸۲۵	۰.۲۸۸	۰.۳۴۷	۶۶.۳
	۱۳۹۱۴	۵۱۵۷	۸۷۵۷	۳۲۴۳	۰.۷۸۷	۰.۵۶۳	۰.۷۰۵	۶۶.۲
رجینا	۱۳۳۳۷	۹۱۵۶	۴۱۸۱	۷۸۱۹	۰.۸۴	۰.۳۱۳	۰.۳۴۸	۵۹.۸
	۱۲۷۵۳	۳۸۷۹	۸۸۷۳	۳۱۲۷	۰.۸۰۲	۰.۶۵۲	۰.۷۲	۵۹.۷
سنت جان	۱۵۲۲۰	۱۲۱۴۲	۳۰۷۸	۵۹۲۲	۰.۸۵۴	۰.۲۰۲	۰.۲۵۷	۶۷.۲
شارلوت تاون	۱۴۰۶۵	۱۰۰۶۶	۳۹۹۸	۸۰۰۲	۰.۸۵۷	۰.۲۸۴	۰.۳۳۳	۶۲.۴
	۱۳۵۲۳	۵۴۱۴	۸۱۰۹	۳۸۹۱	۰.۸۱۳	۰.۶۲۶	۰.۷۲۷	۶۲.۳
کلگری	۱۴۳۴۹	۱۰۲۵۵	۴۰۹۴	۷۹۰۶	۰.۸۴۸	۰.۲۸۵	۰.۳۴۱	۶۶.۱
	۱۳۷۸۵	۴۹۴۲	۸۸۴۴	۳۱۵۶	۰.۸۰۵	۰.۶۲۹	۰.۷۱۸	۶۶
مونترال	۱۳۷۳۸	۹۸۱۶	۳۹۲۲	۸۰۷۸	۰.۸۴۷	۰.۲۸۵	۰.۳۲۷	۶۱
مونکتون	۱۴۱۸۹	۹۴۵۳	۴۷۳۶	۷۲۶۴	۰.۸۴۶	۰.۳۳۴	۰.۳۹۵	۶۳.۲
	۱۳۶۱۲	۴۸۲۴	۸۷۸۸	۳۲۱۲	۰.۸	۰.۵۶۶	۰.۶۹۵	۶۳.۱
نورث وست	۱۱۸۰۵	۸۲۱۹	۳۵۸۶	۸۴۱۴	۰.۸۹	۰.۳۰۴	۰.۲۹۹	۳۷.۱
	۱۱۳۸۶	۴۸۳۳	۶۵۵۲	۵۴۴۸	۰.۸۵۸	۰.۵۳	۰.۵۳۵	۳۷
ونکوور	۱۳۶۹۴	۹۴۱۲	۴۲۸۳	۷۷۱۷	۰.۸۱۷	۰.۳۱۳	۰.۳۵۷	۶۰.۳
وینپیک	۱۲۸۸۸	۸۱۷۰	۴۷۱۸	۷۲۸۲	۰.۸۵	۰.۳۶۶	۰.۳۹۳	۵۷.۷
هالیفاکس	۱۴۶۱۸	۱۰۴۷۷	۴۱۴۲	۷۸۵۸	۰.۸۴۷	۰.۲۸۳	۰.۳۴۵	۶۴.۹

۶۴.۸	۰.۶۷۴	۰.۵۵۲	۰.۸۱۲	۳۵۶۹	۸۴۳۱	۵۶۳۷	۱۴۰۶۸	
۶۷.۳	۰.۳۸۹	۰.۳۰۶	۰.۸۹	۷۳۳۳	۴۶۶۷	۱۰۵۷۳	۱۵۲۴۰	یوکان
۶۷.۲	۰.۷۰۵	۰.۵۶۲	۰.۸۵۵	۳۵۳۹	۸۴۶۱	۶۲۷۱	۱۴۷۳۲	

همانطور که مشاهده می‌شود، انرژی تولیدی سیستم خورشیدی از سیستم خورشیدی و باتری بالاتر می‌باشد زیرا مقداری از انرژی پنل خورشیدی تولید شده صرف شارژ و تخلیه باتری‌ها (تلفات باتری) می‌شود. همچنین، اضافه کردن باتری به سیستم باعث کاهش تبادل انرژی بین کاربران و شبکه می‌شود و باتری باعث افزایش میزان استفاده خود از انرژی خورشیدی تولید شده (تقریباً دو برابر) می‌شود. همچنین ادغام یک سیستم ذخیره‌ساز باتری با یک پنل خورشیدی باعث افزایش خودکفایی و خودمصرفی کاربران می‌شود. با این حال، نسبت عملکرد سیستم و میزان تبادل انرژی کاربران با شبکه کاهش می‌یابد.

۵-۲ نتایج ارزیابی اقتصادی سیستم‌های خورشیدی و خورشیدی-باتری کاربران کانادا

سه کاربر مختلف دیگر (کم، متوسط، پر مصرف) در هر ایالت کانادا که قصد سرمایه‌گذاری در سیستم‌های خورشیدی را دارند ابتدا مقادیر طراحی در نرم افزار پیاده‌سازی شده و سپس پارامترهای مربوط به ارزیابی اقتصادی تکمیل شده است، در نهایت نتایج حاصل از طراحی و ارزیابی اقتصادی سیستم‌های خورشیدی کاربران کم، متوسط و پرمصرف به ترتیب در جداول ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است. این جداول میزان سرمایه‌گذاری اولیه، دوره بازگشت سرمایه، هزینه یکنواخت‌سازی انرژی خورشیدی، ارزش فعلی خالص، بازده سرمایه‌گذاری و نرخ بازده داخلی را نشان می‌دهند. نتیجه مطلوب برای سرمایه‌گذاری کاربران، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۱۵ سال می‌باشد. مقدار سمت چپ هر بخش بهینه‌ترین حالت را نشان می‌دهد، درحالی‌که مقدار سمت راست بدترین سناریو را برای آن پارامتر نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی، سه پارامتر به صورت متغیر فرض شده است و بقیه پارامترها ثابت لحاظ شده است. این سه پارامتر عبارتند از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تعمیر و نگهداری و قیمت فروش برق با توجه به احتمالات متفاوت، بدترین سناریو زمانی اتفاق می‌افتد که قیمت فروش برق در هر ایالت در کم‌ترین محدوده (برابر با قیمت خرید برق) و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کاربران در بیشترین محدوده خود باشد. در مقابل بهترین سناریو زمانی رخ می‌دهد که قیمت فروش برق در هر ایالت در بالاترین محدوده (قیمت فروش برق ۵ سنت بیشتر از قیمت خرید برق) و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در کمترین محدوده خود باشد. ردیف اول هر ستون برای کاربران دارای فتوولتائیک و سطر دوم برای کاربران دارای فتوولتائیک و باتری می‌باشند.

جدول ۷ نتایج حاصل از طراحی و ارزیابی اقتصادی سیستم‌های خورشیدی کاربران کم‌مصرف در ایالات کانادا

موقعیت جغرافیایی (شهر)	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (دلار)	دوره بازگشت سرمایه (سال)	هزینه یکنواخت‌سازی انرژی پنل خورشیدی (دلار / کیلووات ساعت)	ارزش فعلی خالص (دلار)	بازده سرمایه‌گذاری (%)	نرخ بازده داخلی (%)
------------------------	---------------------------------	--------------------------	--	-----------------------	------------------------	---------------------

۱۶.۳۷-۱۲.۲۸	۲۶۹.۲- ۱۷۴.۶	۲۷۸۳۶- ۲۰۲۷۶	۰.۰۹۰۵-۰.۱۰۱۵	۷.۲-۹.۸	۱۰۳۳۹-۱۱۶۱۳	ادمونتون
۱۰.۴۲- ۸.۳۶	۱۳۳.۹- ۹۱.۹	۲۰۵۴۴- ۱۵۲۷۳	۰.۱۵۳۲-۰.۱۶۴۴	۱۱.۶-۱۴.۴	۱۵۳۳۹-۱۶۶۱۳	
۱۳.۶۷-۱۰.۲۷	۲۰۵.۶- ۱۳۰.۶	۲۵۲۵۳- ۱۷۷۵۳	۰.۰۹۸۲-۰.۱۰۸۸	۸.۸-۱۱.۸	۱۲۲۸۵-۱۳۵۹۸	اتاوا
۸.۱۲-۶.۲	۸۶.۷- ۵۱.۱	۱۴۹۸۵- ۹۵۱۱	۰.۱۵۶۷-۰.۱۶۷۶	۱۴.۸-۱۸.۶	۱۷۲۸۵-۱۸۵۹۸	
۱۳.۳۱-۱۰.۰۲	۱۹۷.۳- ۱۲۵.۳	۲۴۲۴۱- ۱۷۰۴۳	۰.۱۰۲۴-۰.۱۱۳۵	۹-۱۲.۱	۱۲۲۸۵-۱۳۵۹۸	تورنتو
۷.۷۹-۵.۹۴	۸۰.۳- ۴۶.۵	۱۳۸۷۹- ۸۶۵۴	۰.۱۶۳۶-۰.۱۷۵	۱۵.۳-۱۹.۳	۱۷۲۸۵-۱۸۵۹۸	
۱۵.۴۳-۱۱.۰۳	۲۴۶.۳- ۱۴۶.۷	۲۹۲۶۲- ۲۱۲۵۸	۰.۱۰۱۹-۰.۱۲۴۳	۷.۷-۱۱	۱۱۸۸۰-۱۴۴۹۰	رجینا
۹.۹۸-۷.۵۹	۱۲۴.۱- ۷۶.۸	۲۰۹۵۲- ۱۴۹۶۴	۰.۱۶۴۹-۰.۱۸۸	۱۲.۱-۱۵.۷	۱۶۸۸۰-۱۹۴۹۰	
۶.۳۹-۳.۲۲	۵۴.۴- ۳.۱	۱۲۱۰۴- ۸۴۶	۰.۱۷۵-۰.۲۱۳۷	۱۸.۲-۲۸.۹	۲۲۲۳۹-۲۷۱۵۳	سنت جان
۳.۹۲-۰	۱۳.۵- -۲۱.۲	۳۶۷۴- -۶۸۳۲	۰.۲۳۴۶-۰.۲۷۴۵	۲۵.۸-۳۰.۷	۲۷۲۳۹-۳۲۱۵۳	
۱۹.۰۶-۱۲.۶	۳۳۲.۱- ۱۸۰.۶	۳۱۵۹۷- ۲۲۸۴۹	۰.۰۸۶۳-۰.۱۱۲۸	۶.۱-۹.۵	۹۵۱۵-۱۲۶۵۰	شارلوت تاون
۱۱.۶۱-۸.۲۹	۱۵۸.۵- ۹۰.۴	۲۳۰۱۳- ۱۵۹۵۳	۰.۱۴۷۹-۰.۱۷۵۲	۱۰.۴-۱۴.۵	۱۴۵۱۵-۱۷۶۵۰	
۱۷.۸۶-۱۳.۴۵	۳۰۴.۹- ۲۰۱.۲	۳۱۵۲۸- ۲۳۳۶۱	۰.۰۸۳۲-۰.۰۹۳۳	۶.۶-۸.۹	۱۰۳۳۹-۱۱۶۱۳	کلگری
۱۱.۵۶-۹.۳۴	۱۵۸.۶- ۱۱۱.۵	۲۴۳۲۵- ۱۸۵۱۹	۰.۱۴۰۳-۰.۱۵۰۷	۱۰.۵-۱۳	۱۵۳۳۹-۱۶۶۱۳	
۵.۹۸-۰	۴۷.۲- -۱۷.۲	۵۹۱۶- -۲۷۳۴	۰.۱۱۶۳-۰.۱۴۷۵	۱۹.۲-۳۰.۷	۱۲۵۴۴-۱۵۸۷۶	مونترال
۱۱.۹-۷.۸۶	۱۶۵.۶- ۸۱.۷	۲۰۸۶۶- ۱۲۶۹۱	۰.۱۰۸۹-۰.۱۳۳۸	۱۰.۱-۱۵.۲	۱۲۶۰۰-۱۵۵۴۰	مونکتون
۷.۱۹-۴.۶۵	۶۹.۲- ۲۵	۱۲۱۸۱- ۵۱۴۰	۰.۱۷۱۶-۰.۱۹۷۴	۱۶.۵-۲۳.۲	۱۷۶۰۰-۲۰۵۴۰	
۳۲.۰۱-۲۴.۴۸	۶۵۲.۴- ۴۶۵.۵	۴۹۱۵۹- ۴۲۷۹۰	۰.۰۸۵۴-۰.۱۰۴۷	۳.۵-۴.۶	۷۵۳۵-۹۲۱۳	نورث وست
۱۸.۹۸-۱۵.۹۴	۳۲۹.۷- ۲۵۶.۸	۴۱۳۲۹- ۳۶۵۰۶	۰.۱۵۸۴-۰.۱۷۸۳	۶.۱-۷.۴	۱۲۵۳۵-۱۴۲۱۳	
۸.۸۴-۶.۱۶	۱۰۱.۳- ۵۰.۵	۱۳۱۶۳- ۶۹۵۰	۰.۱۲۱۱-۰.۱۲۸۲	۱۳.۷-۱۸.۸	۱۲۹۹۲-۱۳۷۵۹	ونکوور
۴.۸۷-۳.۲	۲۸.۶- ۲.۸	۵۱۴۲- ۵۱۹	۰.۱۸۸۶-۰.۱۹۶	۲۲.۴-۲۹	۱۷۹۹۲-۱۸۷۵۹	
۸.۵۹-۵.۴۳	۹۶- ۳۷.۸	۱۱۹۹۸- ۵۲۰۰	۰.۱۰۴۷-۰.۱۱۵۶	۱۴-۲۰.۶	۱۲۴۹۳-۱۳۷۷۵	وینیپگ
۴.۳۱-۰	۱۹.۵- -۱۱.۴	۳۴۱۲- -۲۱۴۳	۰.۱۶۶۴-۰.۱۷۷۶	۲۴.۳-۳۰.۷	۱۷۴۹۳-۱۸۷۷۵	
۱۸.۳۱-۱۳.۷۴	۳۱۵.۶- ۲۰۷.۵	۳۱۷۶۲- ۲۳۷۴۳	۰.۰۸۶۳-۰.۰۹۷۷	۶.۴-۸.۷	۱۰۰۶۵-۱۱۴۴۰	هالیفاکس
۱۰.۸-۸.۴۹	۱۴۲- ۹۴.۴	۲۱۳۹۰- ۱۵۵۲۱	۰.۱۴۶۲-۰.۱۵۷۹	۱۱.۲-۱۴.۲	۱۵۰۶۵-۱۶۴۴۰	
۱۹.۷۲-۱۲.۸۱	۳۴۸.۲- ۱۸۵.۴	۳۲۶۸۳- ۲۳۴۸۰	۰.۰۷۸۲-۰.۱۰۴۱	۵.۹-۹.۴	۹۳۸۷-۱۲۶۶۳	یوکان

۱۴۳۸۷-۱۷۶۶۳	۱۰-۱۴.۱	۰.۱۳۴۶-۰.۱۶۱۱	۲۴۳۴۲- ۱۶۸۸۱	۱۶۹.۲- ۹۵.۶	۱۲.۰۹-۸.۵۶
-------------	---------	---------------	--------------	-------------	------------

جدول ۸ نتایج حاصل از طراحی و ارزیابی اقتصادی سیستم های خورشیدی کاربران متوسط مصرف در ایالات کانادا

موقعیت جغرافیایی (شهر)	هزینه سرمایه گذاری اولیه (دلار)	دوره بازگشت سرمایه (سال)	هزینه یکنواخت سازی انرژی پنل خورشیدی (دلار/ کیلووات ساعت)	ارزش فعلی خالص (دلار)	بازده سرمایه گذاری (%)	نرخ بازده داخلی (%)
ادمونتون	۱۴۵۵۹-۱۶۳۵۳	۸.۱-۱۱.۳	۰.۰۹۱۱-۰.۱۰۲۱	۳۳۳۰۷- ۲۳۱۲۹	۲۲۸.۸- ۱۴۱.۴	۱۴.۶۵- ۱۰.۷۶
	۲۴۵۵۹-۲۶۳۵۳	۱۶.۴-۱۹.۹	۰.۱۸۱۴-۰.۱۹۲۹	۱۷۳۸۰- ۱۱۲۶۶	۷۰.۸- ۴۲.۷	۷.۲۶- ۵.۷۱
اتاوا	۱۹۶۵۶-۲۱۷۵۶	۹.۴-۱۲.۹	۰.۰۹۷۵-۰.۱۰۷۹	۳۶۳۲۳- ۲۴۳۵۷	۱۸۴.۸- ۱۱۲	۱۲.۷۵-۹.۳۷
	۲۹۶۵۶-۳۱۷۵۶	۱۸.۳-۲۳.۷	۰.۱۶۹۷-۰.۱۸۰۴	۱۵۸۷۰- ۷۱۵۰	۵۳.۵- ۲۲.۵	۶.۳۴-۴.۴۹
تورنتو	۱۹۶۵۶-۲۱۷۵۶	۹.۷-۱۳.۲	۰.۱۰۱۴-۰.۱۱۲۲	۳۵۰۴۹- ۲۳۴۹۹	۱۷۸.۳- ۱۰۸	۱۲.۴۶-۹.۱۸
	۲۹۶۵۶-۳۱۷۵۶	۱۹.۱-۲۴.۷	۰.۱۷۷۴-۰.۱۸۸۵	۱۴۱۴۳- ۵۸۱۰	۴۷.۷- ۱۸.۳	۶-۴.۲۳
رجینا	۱۷۴۲۴-۲۱۲۵۲	۸-۱۱.۴	۰.۱۰۱۷-۰.۱۲۴۱	۴۰۷۲۷- ۲۹۲۲۶	۲۳۳.۷- ۱۳۷.۵	۱۴.۹-۱۰.۶
	۲۷۴۲۴-۳۱۲۵۲	۱۵-۱۹.۴	۰.۱۸۷۷-۰.۲۱۰۹	۲۳۰۹۶- ۱۴۵۰۸	۸۴.۲- ۴۶.۴	۷.۹۷-۵.۹۲
سنت جان	۳۱۰۶۴-۳۷۹۲۸	بالا ۳۰-۱۸.۹	۰.۱۷۳۵-۰.۲۱۱۸	۱۳۳۴۷- -۳۵۱۹	۴۳- -۹.۳	۵.۸۵-۰
شارلوت تاون	۱۴۵۳۲-۱۹۵۷۲	۶.۵-۱۰.۴	۰.۰۸۵۹-۰.۱۱۳۸	۴۴۴۴۱- ۳۰۸۸۹	۳۰۵.۸- ۱۵۷.۸	۱۷.۹۸-۱۱.۵۷
	۲۴۵۳۲-۲۹۵۷۲	۱۳.۷-۱۹.۲	۰.۱۶۷۴-۰.۱۹۶۴	۲۴۷۳۴- ۱۴۱۱۴	۱۰۰.۸- ۴۷.۷	۸.۸۱-۶
کلگری	۱۴۵۵۹-۱۶۳۵۳	۷.۴-۱۰.۲	۰.۰۸۳۷-۰.۰۹۳۸	۳۸۰۳۶- ۲۷۰۲۷	۲۶۱.۳- ۱۶۵.۳	۱۶.۰۴-۱۱.۸۶
	۲۴۵۵۹-۲۶۳۵۳	۱۴.۵-۱۷.۸	۰.۱۶۶۴-۰.۱۷۶۹	۲۲۲۱۸- ۱۵۳۷۷	۹۰.۵- ۵۸.۳	۸.۲۹-۶.۵۹
مونترال	۱۷۶۶۴-۱۹۵۲۷	بالا ۳۰-۲۱.۵	۰.۱۱۷۹-۰.۱۳۰۵	۴۹۳۲- -۴۰۵۱	۲۷.۹- -۲۰.۷	۴.۹۳-۰
مونکتون	۲۰۱۶۰-۲۵۱۱۶	۱۰.۵-۱۶.۲	۰.۱۰۶۵-۰.۱۳۲۶	۳۱۷۵۸- ۱۷۹۲۶	۱۵۷.۵- ۷۱.۴	۱۱.۵۴-۷.۳۲
	۳۰۱۶۰-۳۵۱۱۶	۲۰.۱-۲۹.۱	۰.۱۸۴۸-۰.۲۱۲	۱۲۵۴۶- ۹۲۵	۴۱.۶- ۲.۶	۵.۶۵-۳.۱۹
نورث وست	۱۱۶۴۵-۱۴۲۳۸	۳.۵-۴.۷	۰.۰۸۳۵-۰.۱۰۲۱	۷۵۵۷۱- ۶۵۶۸۳	۶۴۹- ۴۶۱.۳	۳۱۸۷-۲۴.۳۶
	۲۱۶۴۵-۲۴۲۳۸	۷-۸.۴	۰.۱۷۵۸-۰.۱۹۵۱	۶۰۰۴۰- ۵۲۸۰۵	۲۷۷.۴- ۲۱۷.۹	۱۶.۸-۱۴.۲۶
ونکوور	۲۰۷۸۷-۲۲۰۱۵	۱۳.۸-۱۹.۱	۰.۱۱۸۵-۰.۱۲۵۴	۲۰۶۹۸- ۱۰۵۹۴	۹۹.۶- ۴۸.۱	۸.۷۵-۶.۰۲
	۳۰۷۸۷-۳۲۰۱۵	بالا ۳۰-۲۶.۵	۰.۲۰۱۲-۰.۲۰۸۴	۳۴۶۸- -۳۵۰۴	۱۱.۳- -۱۰.۹	۳.۷۷-۰

۸.۲۵-۵.۱۵	۸۹.۲- ۳۳.۱	۱۶۰۹۲- ۶۵۷۹	۰.۱۰۴۶-۰.۱۱۵۳	۱۴.۶-۲۱.۵	۱۸۰۴۲-۱۹۸۹۴	وینپینگ
۱۸.۲۱-۱۳.۶۴	۳۱۳.۲- ۲۰۵.۴	۴۸۱۵۲- ۳۵۸۸۹	۰.۰۸۴۷-۰.۰۹۵۹	۶.۴-۸.۸	۱۵۳۷۲-۱۷۴۷۲	هالیفاکس
۹.۱۳-۷.۱۳	۱۰۷- ۶۸.۲	۲۷۱۵۵- ۱۸۷۴۰	۰.۱۶۱۸-۰.۱۷۳۴	۱۳.۲-۱۶.۶	۲۵۳۷۲-۲۷۴۷۲	
۱۸.۹۱-۱۲.۱۹	۳۲۸.۶- ۱۷۱.۶	۴۶۰۱۷- ۳۲۴۲۳	۰.۰۷۷-۰.۱۰۲۲	۶.۲-۹.۹	۱۴۰۰۶-۱۸۸۹۴	یوکان
۹.۹۲-۶.۸۳	۱۲۲.۸-۶۲.۷	۲۹۴۸۰-۱۸۱۰۵	۰.۱۵۱۶-۰.۱۷۷۷	۱۲.۲-۱۷.۲	۲۴۰۰۶-۲۸۸۹۴	

جدول ۹ نتایج حاصل از طراحی و ارزیابی اقتصادی سیستم های خورشیدی کاربران پرمصرف در ایالات کانادا

موقعیت جغرافیایی (شهر)	هزینه سرمایه گذاری اولیه (دلار)	دوره بازگشت سرمایه (سال)	هزینه یکنواخت سازی انرژی پنل خورشیدی (دلار / کیلووات ساعت)	ارزش فعلی خالص (دلار)	بازده سرمایه گذاری (%)	نرخ بازده داخلی (%)
ادمونتون	۱۹۸۳۴-۲۲۲۷۸	۹.۲-۱۳.۱	۰.۰۹۲۶-۰.۱۰۳۸	۳۸۴۱۹- ۲۴۴۷۱	۱۹۳.۷- ۱۰۹.۸	۱۳.۱۳- ۹.۲۶
	۳۴۸۳۴-۳۷۲۷۸	۱۹.۹-۲۴.۵	۰.۱۹۳۱-۰.۲۰۴۷	۱۵۰۱۴- ۷۰۱۲	۴۳.۱- ۱۸.۸	۵.۷۳- ۴.۲۶
اتاوا	۲۴۵۷۰-۲۷۱۹۵	۱۰-۱۳.۸	۰.۰۹۸۱-۰.۱۰۸۵	۴۱۴۱۶- ۲۶۷۹۹	۱۶۸.۶- ۹۸.۵	۱۲.۰۳-۸.۷۱
	۳۹۵۷۰-۴۲۱۹۵	۲۲.۷-۲۹.۵	۰.۱۸۵۸-۰.۱۹۶۷	۱۰۷۰۵- ۵۶۶	۲۷.۱- ۱.۳	۴.۷۸-۳.۱
تورنتو	۲۴۵۷۰-۲۷۱۹۵	۱۰.۳-۱۴.۱	۰.۱۰۲۳-۰.۱۱۳۳	۳۹۷۲۷- ۲۵۷۱۲	۱۶۱.۷- ۹۴.۵	۱۱.۷۱-۸.۵۱
	۳۹۵۷۰-۴۲۱۹۵	۲۴- ۳۰	۰.۱۹۴۲-۰.۲۰۵۶	۸۳۴۰- -۱۱۲۱	۲۱.۱- -۲.۷	۴.۴-۰
رجینا	۲۳۲۳۲-۲۸۵۱۲	۸.۴-۱۲.۱	۰.۱۰۵-۰.۱۲۸۸	۵۰۵۴۳- ۳۵۳۷۳	۲۱۷.۶- ۱۲۴.۱	۱۴.۲-۹.۹۶
	۳۸۲۳۲-۴۳۵۱۲	۱۷.۲-۲۲.۱	۰.۲۰۵۵-۰.۲۳۰۵	۲۳۹۷۴- ۱۳۱۲۴	۶۲.۷- ۳۰.۲	۶.۸۳-۴.۹۷
سنت جان	۴۴۴۷۸-۵۴۳۰۶	۲۱.۱-۳۰	۰.۱۷۶۱-۰.۲۱۵۱	۱۴۷۹۹- -۸۴۱۴	۳۳.۳- -۱۵.۵	۵.۲۱-۰
شارلوت تاون	۱۹۰۳۰-۲۵۶۳۰	۶.۹-۱۱.۱	۰.۰۸۷-۰.۱۱۵۳	۵۴۲۵۲- ۳۶۷۶۰	۲۸۵.۱- ۱۴۳.۴	۱۷.۱۱-۱۰.۹
	۳۴۰۳۰-۴۰۶۳۰	۱۵.۴-۲۱.۸	۰.۱۸۰۸-۰.۲۱۰۲	۲۷۲۸۳- ۱۲۹۹۶	۸۰.۲- ۳۲	۷.۷۶-۵.۰۸
کلگری	۱۹۸۳۴-۲۲۲۷۸	۸.۳-۱۱.۹	۰.۰۸۵۲-۰.۰۹۵۴	۳۱۵۲۸- ۲۸۹۲۸	۲۲۱.۳- ۱۲۹.۸	۱۴.۳۳-۱۰.۲۲
	۳۴۸۳۴-۳۷۲۷۸	۱۷.۶-۲۱.۸	۰.۱۷۷۲-۰.۱۸۷۹	۲۰۷۸۲- ۱۱۸۰۰	۵۹.۷- ۳۱.۷	۶.۶۶-۵.۰۶
مونترال	۲۶۸۸۰-۲۹۷۱۵	۲۲.۲-۳۰	۰.۱۱۷۹-۰.۱۳۰۳	۶۷۵۲- -۷۳۹۲	۲۵.۱- -۲۴.۹	۴.۷۴-۰

مونکتون	۲۵۲۰۰-۳۱۳۹۵	۱۱.۶-۱۸	۰.۱۰۸۴-۰.۱۳۴۷	۳۳۹۶۵-۱۷۵۴۰	۱۳۴.۸-۵۵.۹	۱۰.۴۸-۶.۴۷
	۴۰۲۰۰-۴۶۳۹۵	۲۴.۵-۳۰.۵	۰.۲۰۲۷-۰.۲۳۰۱	۷۵۹۰-۵۴۷۱	۱۸.۹-۱۱.۸	۴.۲۷-۰
نورث وست	۱۵۰۷۰-۱۸۴۲۵	۳.۵-۴.۶	۰.۰۸۵۸-۰.۱۰۵	۹۷۶۲۱-۸۵۳۳۷	۶۴۷.۸-۴۶۳.۲	۳۱۸۳-۲۴.۴۳
	۳۰۰۷۰-۳۳۴۲۵	۷.۶-۹	۰.۱۹۶۳-۰.۲۱۶۱	۷۴۵۴۵-۶۵۶۳۷	۲۴۷.۹-۱۹۶.۴	۱۵.۵۵-۱۳.۲۸
ونکوور	۲۷۷۷۹-۲۹۴۲۰	۱۴.۷-۲۰.۴	۰.۱۲۳۳-۰.۱۳۰۶	۲۴۶۱۰-۱۱۶۴۸	۸۸.۶-۳۹.۶	۸.۱۹-۵.۵۳
وینیپگ	۲۳۱۴۴-۲۵۵۲۰	۱۵.۹-۲۳.۲	۰.۱۰۸۳-۰.۱۱۹۴	۱۷۳۰۶-۶۲۳۰	۷۴.۸-۲۴.۴	۷.۵-۴.۶۲
هالیفاکس	۲۰۱۳۰-۲۲۸۸۰	۶.۷-۹.۲	۰.۰۸۶۲-۰.۰۹۷۷	۵۹۶۱۴-۴۳۹۱۱	۲۹۶.۱-۱۹۱.۹	۱۷.۵-۱۳.۰۵
	۳۵۱۳۰-۳۷۸۸۰	۱۵.۳-۱۹	۰.۱۷۶۴-۰.۱۸۸۱	۲۸۷۰۱-۱۸۵۲۷	۸۱.۷-۴۸.۹	۷.۸۴-۶.۰۷
یوکان	۱۸۷۷۴-۲۵۳۲۶	۶.۵-۱۰.۴	۰.۰۷۸۹-۰.۱۰۴۶	۵۷۹۲۳-۳۹۹۹۹	۳۰۸.۵-۱۵۷.۹	۱۸.۰۸-۱۱.۵۷
	۳۳۷۷۴-۴۰۳۲۶	۱۳.۹-۱۹.۶	۰.۱۶۴۵-۰.۱۹۱	۳۳۱۵۶-۱۸۰۴۷	۹۸.۲-۴۴.۸	۸.۶۹-۵.۸۳

با توجه به پارامترهای طراحی و فرضیات در هر ایالت، می توان نتیجه گرفت که اقتصادی ترین مکان برای نصب پنل خورشیدی در مناطق نورث وست، یوکان، شارلوت تاون، هالیفاکس، کلگری، ادمونتون، رجینا، اتاوا، تورنتو و مونکتون است. از طرف دیگر، مکان هایی مانند ونکوور، وینیپگ، سنت جان و مونترال از نظر اقتصادی برای سرمایه گذاری از مطلوبیت کمتری برخوردار هستند.

$$LCOE(\text{System}) = LCOE(\text{PV})$$

(۱۷)

ایالات با کمترین هزینه یکنواخت سازی انرژی پنل خورشیدی به ترتیب یوکان، کلگری، هالیفاکس، نورث وست، ادمونتون، شارلوت تاون، اتاوا، تورنتو، وینیپگ، رجینا، مونکتون، ونکوور و سنت جان می باشد. نتایج به دست آمده برای کاربران کمی متفاوت می باشد دلیل تفاوت مقادیر پارامترهای کاربران با یکدیگر در این می باشد که قیمت خرید برق برای هر کاربر بسته به نوع مصرف آن تغییر می کند همانطور که انتظار می رود بایستی با افزایش سطح تولید و تقاضای کاربر، مقدار هزینه یکنواخت سازی انرژی خورشیدی کاهش یابد اما این اتفاق برای کاربران پرمصرف نمی افتد دلیل افزایش آن ناشی از آزمون ۳۰- می باشد. همچنین تولید و سودآوری پروژه را کاهش می دهد.

با افزایش بارهای DC کم توان تر نسبت به بارهای AC پرتوان تر، انتظار می رود در آینده سطح مصرف کاربران کاهش یابد که باعث فروش انرژی بیشتری به شبکه و کاربران دیگر می شود که می تواند سودآوری پروژه را بهبود بخشد. در مجموع کاربران کم مصرف، سود کم و هزینه یکنواخت سازی بیشتری نسبت به سایر کاربران دارند اما دوره بازگشت سرمایه، درصد بازگشت سرمایه و نرخ بازده داخلی بهتری دارند. بر اساس پارامترهای طراحی و فرضیات در هر ایالت، بهینه ترین مکان برای نصب پنل خورشیدی و سیستم باتری عبارتند از: نورث وست، یوکان، شارلوت تاون، هالیفاکس، کلگری، ادمونتون و رجینا. درحالی که سایر ایالات باقیمانده نظیر اتاوا، تورنتو، مونکتون، ونکوور، وینیپگ، سنت جان و مونترال برای سرمایه گذاری در سیستم خورشیدی-باتری اقتصادی نمی باشند.

$$LCOE(\text{System}) = LCOE(\text{PV}) + LCOE(\text{BESS})$$

(۱۸)

افزودن باتری به سیستم خورشیدی، باعث افزایش دوره بازگشت سرمایه و هزینه یکنواخت سازی برق می شود، همچنین درصد بازگشت سرمایه، نرخ بازده داخلی و ارزش فعلی خالص را کاهش می دهد. همچنین بخاطر تلفات شارژ و دشارژ باتری از مقدار تولیدی پنل کاسته شده است. علاوه بر این مقادیر انرژی فروخته شده به شبکه کاهش یافته است و مقدار انرژی استفاده نشده افزایش یافته است. هزینه یکنواخت سازی کل سیستم از مجموع هزینه یکنواخت سازی سلول خورشیدی و باتری به دست می آید. در مجموع افزودن باتری سودآوری سیستم را کاهش می دهد ولی می توان با گذشت زمان و با کاهش قیمت پنل خورشیدی و باتری، به افزودن باتری به سیستم خورشیدی برای سودآوری بیشتر کاربران امیدوار بود. از دیگر مزایای وجود باتری افزایش خودکفایی و خودمصرفی کاربران می باشد. همچنین اگر نرخ تعرفه فروش بیشتر از ۵ سنت از نرخ تعرفه خرید برق باشد سودآوری کاربران افزایش می یابد که این بستگی به قوانین بازار جدید دارد. در نهایت افزودن باتری در مناطقی با قیمت برق و شدت تابش بالا توصیه می شود. به خصوص در مناطقی که اختلاف قیمت بالایی در قیمت پیک و آف پیک وجود دارد. هنگامی که قیمت برق کم است، کاربران می توانند باتری خود را برای استفاده در زمان اوج بار شارژ کنند.

۶. نتیجه گیری

از نظر فنی، یوکان بیشترین تولید انرژی را در بین ایالات دارد، درحالی که نورث وست کمترین تولید انرژی را دارد. کاربران در سنت جان بیشترین انرژی را به شبکه می فروشند، درحالی که کاربران در نورث وست کمترین فروش را دارند. میزان تأمین بارمصرفی کاربران یوکان از انرژی خورشیدی در بالاترین محدوده قرار دارد، اما کاربران نورث وست کمترین میزان استفاده از انرژی خورشیدی را دارند. علاوه براین، کاربران یوکان کمترین مقدار انرژی را در مقایسه با سایر ایالات از شبکه خریداری می کنند، درحالی که کاربران نورث وست بیشترین میزان برق را در مقایسه با سایر ایالات خریداری می کنند.

از نظر اقتصادی، بهینه ترین مکان برای نصب پنل خورشیدی و باتری، نورث وست می باشد. دولت ۵۰ درصد هزینه های نصب را به عنوان مشوق مالی برای کاربران در نظر می گیرد و از طرف دیگر نسبت به سایر ایالات نرخ بالاتری برای خرید و فروش برق دارد. همچنین، مونترال به دلیل پایین بودن قیمت برق و عدم مشوق های مالی برای هزینه نصب، اقتصادی نمی باشد.

از نظر محیط زیست، کلگری بالاترین کاهش در انتشار دی اکسید کربن از تولید انرژی خورشیدی را در مقایسه با سایر ایالات دارد، درحالی که نورث وست کمترین میزان کاهش را در بین ایالات دارد.

در آینده با جایگزینی بارهای DC با موارد AC، راندمان سیستم کاربر افزایش می یابد و تلفات آن کاهش می یابد. همچنین، قیمت برق با نرخ ثابت افزایش نمی یابد، حتی اگر ممکن است تورم در بعضی از سال ها بیشتر باشد. این عوامل در افزایش سودآوری کاربران تأثیر دارد که می تواند دوره بازپرداخت را کاهش دهد.

۷. مراجع

1. World Population Review, "Solar Power by Country 2022," [Online]. Available: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/solar-power-by-country>. [Accessed: Feb. 15, 2023].
2. S. Alsadi and T. Khatib, "Photovoltaic power systems optimization research status: A review of criteria, constraints, models, techniques, and software tools," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 10, p. 1761, Sep. 2018.
3. M. Lalwani, D. P. Kothari, and M. Singh, "Investigation of solar photovoltaic simulation software," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 1, no. 3, pp. 585-601, Jul. 2010.
4. S. Sinha and S. S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 192-205, Apr. 2014.
5. C. A. Hossain, N. Chowdhury, M. Longo, and W. Yaïci, "System and cost analysis of stand-alone solar home system applied to a developing country," *Sustainability*, vol. 11, no. 5, p. 1403, Mar. 2019.
6. K. Kappner, P. Letmathe, and P. Weidinger, "Optimisation of photovoltaic and battery systems from the prosumer-oriented total cost of ownership perspective," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 9, no. 1, pp. 1-24, Dec. 2019.
7. Y. Zhang, T. Ma, P. E. Campana, Y. Yamaguchi, and Y. Dai, "A techno-economic sizing method for grid-connected household photovoltaic battery systems," *Applied Energy*, vol. 269, p. 115106, Jul. 2020.
8. E. Tervo, K. Agbim, F. DeAngelis, J. Hernandez, H. K. Kim, and A. Odukomaiya, "An economic analysis of residential photovoltaic systems with lithium-ion battery storage in the United States," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1057-1066, Oct. 2018.
9. M. Ren, C. R. Mitchell, and W. Mo, "Dynamic life cycle economic and environmental assessment of residential solar photovoltaic systems," *Science of the Total Environment*, vol. 722, p. 137932, Jun. 2020.
10. A. Sow, M. Mehrtash, D. R. Rousse, and D. Haillot, "Economic analysis of residential solar photovoltaic electricity production in Canada," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 33, pp. 83-94, Jun. 2019.
11. P. C. Palavicino, Y. Wu, M. Smuda, W. Choi, W. Lee, and B. Sarlioglu, "Methodology for evaluating potential benefits and economic value of residential photovoltaic and battery energy storage system," in *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 725-730, Jun. 2018.
12. M. S. Islam, B. K. Das, P. Das, and M. H. Rahaman, "Techno-economic optimization of a zero-emission energy system for a coastal community in Newfoundland, Canada," *Energy*, vol. 220, p. 119709, Apr. 2021.
13. S. Schopfer, V. Tiefenbeck, T. Staake, "Economic assessment of photovoltaic battery systems based on household load profiles," *Applied energy*. 2018 Aug 1;223:229-48.
14. B. Zakeri, S. Cross, P. E. Dodds, and G. C. Gissey, "Policy options for enhancing economic profitability of residential solar photovoltaic with battery energy storage," *Applied Energy*, vol. 290, p. 116697, May 2021.
15. M. M. Omrani and H. Jannesari, "Economic and environmental assessment of reusing electric vehicle lithium-ion batteries for load leveling in the residential, industrial, and photovoltaic power plants sectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, pp. 109413, 2019.
16. F. Mansouri Kouhestani, J. Byrne, D. Johnson, L. Spencer, P. Hazendonk, and B. Brown, "Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 10, pp. 13-32, 2019.
17. R. Kaluthanthrige, A. D. Rajapakse, C. Lamothe, and F. Mosallat, "Optimal sizing and performance evaluation of a hybrid renewable energy system for an off-grid power system in northern Canada," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 1-6, Dec. 2019.
18. J. M. Pearce and N. Sommerfeldt, "Economics of grid-tied solar photovoltaic systems coupled to heat pumps: The case of northern climates of the US and Canada," *Energies*, vol. 14, p. 834, Feb. 2021.
19. H. Z. Al Garni, A. Awasthi, and M. A. Ramli, "Optimal design and analysis of grid-connected photovoltaic under different tracking systems using HOMER," *Energy Conversion and Management*, vol. 155, pp. 42-57, 2018.
20. A. C. Duman and Ö. Güler, "Economic analysis of grid-connected residential rooftop PV systems in Turkey," *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 697-711, Apr. 2020.

21. R. DJ and H. Naganagouda, "Study on design and performance analysis of solar PV rooftop standalone and on-grid system using PVSYST," Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET), vol. 5, no. 7, pp. 41-48, Jul. 2018.
22. S. Ullah, A. Haidar, and H. Zen, "Assessment of technical and financial benefits of AC and DC microgrids based on solar photovoltaic," Electrical Engineering, vol. 102, no. 3, pp. 1297-1310, Sep. 2020.
23. N.N. Opiyo, "A comparison of DC-versus AC-based mini grids for cost-effective electrification of rural developing communities," Energy Reports, vol. 5, pp. 398-408, Nov. 2019.

Economic Analysis of Solar Photovoltaic Equipped with Battery Energy Storage System Design for Rooftop Applications in Canada

Milad Babaie, Hassan Monsef*

School of ECE, University College of Engineering, University of Tehran

Abstract-- The improvement of photovoltaic and battery technology has led to restructuring of the traditional power system to meet residential energy needs through photovoltaic and battery systems. This system allows for energy exchange between consumers and retailers, reducing transmission line losses and environmental pollution caused by fossil fuels. With the widespread distribution of solar systems, power outages in each area are significantly reduced. This study focuses on designing, analyzing, and evaluating the economic benefits of photovoltaic and battery systems for residential consumers in different Canadian states as case studies. The study considers environmental conditions such as radiation intensity, temperature, and wind speed. Moreover, it includes economic factors such as initial investment cost, maintenance cost, and government incentives. PVSyst software analyzes the project's long-term benefits over 30 years. The results indicate that photovoltaic and battery systems provide better economic benefits in areas with high electricity prices, high solar radiation intensity, and lower investment costs. However, installing battery storage only sometimes yields better economic outcomes in all states. As the cost of photovoltaic including battery system decreases, more lithium-ion batteries can be installed at the community level, promoting maximum self-sufficiency and reducing the need for grid-supplied electricity consumption.

Keywords: Internal Rate of Return (IRR), Levelized Cost Of Energy (LCOE), Net Present Value (NPV), Pay Back Period (PBP), Performance Ratio (PR), Return On Investment (ROI)