نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۷، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۲۲-۴۰

تحلیل عملکرد فنی یک سامانه فتوولتائیک ۱۵۰ کیلوواتی در کاربری تجاری: مطالعه موردی مجموعه اطلس در تبریز

نگین غفوریان[۱] _ فرهاد احمدنژاد[۲]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته معماری و انرژی دانشگاه هنر اسلامی تبریز
ne.ghafourian@tabriziau.ac.ir
۲. استادیار دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۶/۳۰

کلید واژه ها:
فتوولتائیک، سامانه خورشیدی، شبیه‌سازی، PV*Sol Premium، مجتمع تجاری اطلس

چکیده

این پژوهش به طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد یک سامانه فتوولتائیک (PV) متصل به شبکه به ظرفیت ۱۵۰ کیلووات، نصب‌شده بر روی بام مجتمع تجاری اطلس در تبریز، ایران می‌پردازد. با بهره‌گیری از نرم‌افزار PV*Sol Premium، یک مدل سه‌بعدی جامع از ساختمان تهیه شده تا چیدمان بهینه پنل‌ها، زاویه شیب و فاصله ردیف‌ها بر اساس داده‌های اقلیمی و تابش خورشیدی محلی تعیین گردد. این سامانه شامل ۲۲۷ ماژول پربازده LONGi و اینورترهای SMA بوده که در جهات مختلف بام توزیع شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تولید سالانه برق این سامانه حدود ۲۸۷ هزار کیلووات‌ساعت با بازده ویژه ۱۹۰۳/۴۳ کیلووات‌ساعت به ازای هر کیلووات پیک و نسبت عملکرد (PR) برابر با ۸۵٪ خواهد بود. تلفات ناشی از سایه‌اندازی تنها ۴٫۶٪ برآورد شد که بیانگر کارایی بالای طراحی فضایی سامانه است. این نیروگاه قادر است حدود ۲۳ تا ۲۶ درصد از مصرف سالانه برق ساختمان را تأمین کرده و وابستگی به شبکه برق را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. علاوه بر این، این سامانه سالانه بیش از ۱۳۵ هزار کیلوگرم دی‌اکسیدکربن را از ورود به جو جلوگیری می‌کند و تأثیر مثبت آن بر کاهش اثرات زیست‌محیطی را برجسته می‌سازد. این مطالعه بر قابلیت فنی و زیست‌محیطی به‌کارگیری سامانه‌های فتوولتائیک بامی در ساختمان‌های تجاری، به‌ویژه در مناطق شهری با پتانسیل بالای انرژی خورشیدی، تأکید دارد و همچنین نقش حیاتی طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی و بهینه‌سازی متناسب با شرایط محل را در بیشینه‌سازی بازده انرژی و دستیابی به اهداف پایداری برجسته می‌سازد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

۱ .مقدمه

در چند دهه اخیر رشد سریع تقاضای جهانی انرژی همراه با نگرانی‌های مربوط به تخریب محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی، فشار قابل‌توجهی بر سامانه‌های سنتی تولید انرژی وارد کرده است. با حرکت جهان به سمت کربن‌زدایی و پایداری، گذار به منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر یک انتخاب نیست بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر، به دلیل مقیاس‌پذیری بالا، مزایای زیست‌محیطی و سازگاری با اهداف توسعه پایدار، توجه فزاینده‌ای در سطح جهانی به خود جلب کرده است. تأمین امنیت انرژی یکی از ارکان اصلی امنیت ملی به‌شمار می‌رود، چرا که انرژی ستون فقرات تمدن بشری است. با پیش‌بینی اتمام منابع فسیلی تجدیدناپذیر جوامع بیش از پیش به سمت گزینه‌های پاک و پایدار برای مقابله با بحران انرژی حرکت کرده‌اند.

انرژی تابشی خورشید قادر است به‌طور نامحدود نیاز روزانه بشر را تأمین کند و جایگزینی مطمئن و پایدار برای سوخت‌های فسیلی ارائه دهد [۱]. برخلاف منابع فسیلی، انرژی خورشیدی انتشار آلاینده‌های مضر یا تخریب زیست‌محیطی ندارد و به همین دلیل عنصر کلیدی در گذار جهانی به سمت توسعه پایدار به‌شمار می‌رود [۲]. در دهه گذشته نقش انرژی خورشیدی در تولید برق به‌طور پیوسته افزایش یافته و اهمیت آن در سیاست‌های انرژی جهانی بیش از پیش مشهود است[۳].

مصرف انرژی در ساختمان‌ها بخش قابل‌توجهی از کل مصرف انرژی در جوامع مدرن را تشکیل می‌دهد. در ایران شاخص شدت مصرف انرژی (EUI) ساختمان‌های تجاری از ۱۷ کیلوگرم معادل نفت خام بر متر مربع در سال ۱۳۸۰ به ۲۴,۷ کیلوگرم بر متر مربع در سال ۱۳۹۹ رسیده است؛ رشد سریع شهرنشینی (به‌ویژه پروژه‌های بزرگ‌مقیاس) و افزایش تقاضا برای خدمات ساختمانی، از عوامل مستقیم این روند بوده‌اند. همچنین رفتار کاربران ساختمان شامل استفاده از روشنایی، تجهیزات برقی، سیستم‌های حمل‌ونقل عمودی و سامانه‌های سرمایش و گرمایش(HVAC) تأثیر بسزایی بر الگوهای مصرف انرژی دارد [۴].

سامانه‌های فتوولتائیک (PV) به دلیل مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، به‌عنوان یک منبع مهم انرژی تجدیدپذیر مطرح شده‌اند. این سامانه‌ها راهکاری پاک و پایدار برای تأمین انرژی به‌ویژه در مناطق شهری فراهم می‌کنند و به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ارتقای امنیت انرژی کمک می‌کنند. سوخت‌های فسیلی که تاریخی طولانی در تأمین انرژی جهان دارند، مسئول بخش بزرگی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی‌اند و این امر ضرورت گذار به انرژی‌های تجدیدپذیر همچون PV را آشکار می‌کند[۵].

فناوری‌های PV دامنه وسیعی از کاربردها، از دستگاه‌های کوچک تا نیروگاه‌های بزرگ خورشیدی را پوشش می‌دهند. پیشرفت فناوری و گسترش بازار موجب کاهش چشمگیر هزینه تجهیزات PV شده است، به‌طوری که این سامانه‌ها از نظر اقتصادی برای پروژه‌های متنوع قابل توجیه‌اند [۶]. راهبردهای طراحی هوشمندانه (مانند بهینه‌سازی زاویه شیب پنل، انتخاب سلول‌های خورشیدی کارآمد و کاهش تلفات سایه‌اندازی) نقش مهمی در بیشینه‌سازی عملکرد سامانه و تحقق اهداف پایداری دارند [۷].

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

سامانه‌های PV عمدتاً در سه دسته اصلی قرار می‌گیرند: متصل به شبکه(On-grid) ، غیرمتصل به شبکه (Off-grid) و سامانه‌های پمپاژ آب خورشیدی [۸] اجزای اصلی این سامانه‌ها شامل پنل‌های خورشیدی، اینورترها، واحدهای MPPT (رهگیری حداکثر توان) و اتصالات به شبکه یا ذخیره‌ساز است. با بهبود مستمر راندمان و کاهش هزینه‌ها، این سامانه‌ها به راهکاری مقرون‌به‌صرفه بدل شده‌اند که عملکرد آن‌ها معمولاً با بازده سالانه و فناوری اجزا ارزیابی می‌شود [۹].

با وجود مزایای فراوان نصب PV در محیط‌های شهری با چالش‌هایی مانند محدودیت فضا، قیمت بالای زمین و محدودیت‌های فنی مربوط به ایمنی و تجهیزات برقی روبه‌رو است. برای رفع مشکل کمبود فضا معمولاً چیدمان متراکم پنل‌ها به‌کار می‌رود که ممکن است موجب افزایش تلفات سایه و کاهش بازده کل شود. بنابراین بهینه‌سازی دقیق چیدمان پنل‌ها و زاویه شیب برای کاهش سایه‌اندازی و افزایش تولید انرژی ضروری است [۷].

این مطالعه به طراحی و تحلیل یک سامانه PV متصل به شبکه برای یک ساختمان تجاری در تبریز می‌پردازد. شرایط اقلیمی محلی، ویژگی‌های سایت، الگوهای مصرف انرژی و پارامترهای فنی مانند زاویه شیب، زاویه آزیموت و فاصله بین ردیف‌ها در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چیدمان سامانه با استفاده از نرم‌افزار PV*Sol انجام شده تا بیشینه بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در بستر شهری حاصل شود.

۱,۱ .میانگین مصرف برق در ساختمان‌های تجاری

شاخص‌های استانداردشده ابزار کلیدی برای ارزیابی بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها هستند. شاخص انرژی ساختمان (BEI) که بر حسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال بیان می‌شود یکی از پرکاربردترین معیارها برای این منظور است.

در مالزی، استفاده از BEI در بخش‌های تجاری و صنعتی با مصرف انرژی بالا رو به افزایش است. دستورالعمل MS1525:2007، حد مجاز BEI را برای ساختمان‌های اداری، دولتی، آموزشی، بیمارستان‌ها و سایر ساختمان‌های عمومی با ساعات کاری مشخص، ۱۳۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال تعیین کرده است. با این حال این حد آستانه برای همه کاربری‌ها قابل‌اعمال نیست؛ به‌عنوان مثال، رستوران‌هایی که به‌صورت شبانه‌روزی فعالیت می‌کنند و تجهیزات پرمصرف دارند، BEI بین ۶۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال را گزارش می‌دهند که نشان‌دهنده ضرورت تعریف مقادیر اختصاصی BEI بر اساس نوع کاربری است [۱۰].

در ایران مطالعات الگوهای مصرف متنوعی را نشان می‌دهند. قنبران و همکاران (۲۰۱۷) دو مرکز خرید در ایلام را که تنها با برق تغذیه می‌شوند (به دلیل نبود زیرساخت گاز طبیعی) بررسی کردند و مصرف سالانه آن‌ها را به‌ترتیب حدود ۶۹ هزار و ۲۷۰ هزار کیلووات‌ساعت گزارش کردند [۱۱]. امانی و سروش (۲۰۲۱) نیز ساختمان تجاری‌ای در اقلیم گرم و مرطوب را تحلیل کردند که مصرف سالانه انرژی آن ۲۶،۶۰۴ کیلووات‌ساعت بود، در حالی که پنل‌های PV با زاویه شیب ۳۱ درجه قادر به تولید ۲۶،۹۷۸ کیلووات‌ساعت در سال بودند؛ این مقدار برای رسیدن به وضعیت ساختمان با انرژی خالص صفر (NZEB) کافی بود [۱۲].

امامی، روان‌شدنیا و رحیمی (۲۰۱۹) با استفاده از نرم‌افزار LEAP، مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی و خدماتی ایران بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ را ارزیابی کردند. آن‌ها پیش‌بینی کردند که مصرف برق بخش خدمات تا سال ۲۰۳۵ از ۲۸۰ گیگاوات‌ساعت فراتر

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

خواهد رفت. سناریوهای بهینه‌سازی آن‌ها شامل ارتقای عایق‌کاری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، پتانسیل بالایی در کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها نشان داد [۱۳].

اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده (EIA, 2018) میانگین مصرف برق ساختمان‌های تجاری در آمریکا را حدود ۲۲٫۵ کیلووات‌ساعت بر فوت‌مربع در سال (معادل حدود ۲۴۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال) گزارش کرده است. این داده‌ها بر اساس نوع ساختمان، اقلیم و مشخصات تجهیزات دسته‌بندی شده و به‌عنوان یک مرجع جهانی قابل‌استفاده هستند [۱۴]. در نهایت، گو، شو و جی (۲۰۲۳) نشان دادند که رفتار کاربران می‌تواند باعث تغییرپذیری مصرف انرژی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد شود [۴]، که اهمیت مدیریت کاربران را در راهبردهای بهره‌وری انرژی نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای مرتبط چاندل و چاندل (۲۰۲۱)، عملکرد یک نیروگاه خورشیدی تجاری ۱۹ مگاواتی را در سه پیکربندی زاویه ثابت، زاویه قابل‌تنظیم فصلی و رهگیری تک‌محوره بررسی کردند. نتایج نشان داد که هرچند سیستم‌های زاویه ثابت هزینه کمتر و نگهداری ساده‌تری دارند، اما سیستم‌های قابل‌تنظیم و رهگیری می‌توانند بازده سالانه را بین ۷ تا ۱۹ درصد بسته به شرایط اقلیمی افزایش دهند [۱۵].

زارع‌زاده (۲۰۲۳)، امکان‌سنجی یک نیروگاه PV متصل به شبکه به ظرفیت ۴ مگاوات در شهرک صنعتی بندرعباس را با استفاده از نرم‌افزار HOMER ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که این سامانه قادر است حدود ۶٫۶ گیگاوات‌ساعت برق در سال تولید کرده و وابستگی به شبکه و انتشار CO_2 را به‌طور چشمگیری کاهش دهد [۱۶].

کراوچاک (۲۰۲۳)، نیز داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده نیروگاه‌های PV بامی در لهستان را با استفاده از نرم‌افزار PV*Sol مقایسه کرد و دریافت که خروجی شبیه‌سازی معمولاً بین ۳ تا ۸ درصد بیشتر از داده‌های واقعی، به‌ویژه در زمستان برآورد می‌شود. این موضوع اهمیت کالیبراسیون اقلیم‌محور در مدل‌سازی انرژی را نشان می‌دهد [۱۷].

این یافته‌ها بر ضرورت بهینه‌سازی زاویه شیب و زاویه آزیموت پنل‌ها به‌ویژه در مناطقی مانند تبریز که دارای نوسانات فصلی زیاد در تابش خورشیدی هستند تأکید می‌کنند. انتخاب دقیق این پارامترها بر اساس داده‌های اقلیمی محلی و محدودیت‌های سایت، می‌تواند کارایی و بازده انرژی سامانه‌های PV بامی را به‌ویژه در محیط‌های تجاری به‌طور چشمگیری بهبود دهد.

با وجود رشد جهانی استفاده از سامانه‌هایPV ، ادغام آن‌ها در ساختمان‌های تجاری مناطق متراکم شهری مانند تبریز هنوز محدود و کمتر پژوهش‌شده است. بیشتر مطالعات پیشین بر کاربردهای مسکونی یا نیروگاه‌های بزرگ متمرکز بوده و توجه کمتری به بهینه‌سازی سامانه‌های بامی برای ساختمان‌های تجاری متوسط در اقلیم‌های با تغییرات فصلی قابل‌توجه شده است. این خلأ نیاز به تحلیل و بهینه‌سازی اختصاصی سایت را برای اطمینان از امکان‌سنجی فنی و بیشینه‌سازی کارایی در شرایط واقعی برجسته می‌کند.

برای پر کردن این شکاف پژوهشی مطالعه حاضر رویکردی مبتنی بر شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PV*Sol Premium اتخاذ کرده و عملکرد یک سامانه PV متصل به شبکه به ظرفیت ۱۵۰ کیلووات، نصب‌شده بر روی بام مجتمع تجاری اطلس در تبریز را

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

ارزیابی می‌کند. این تحلیل شامل پارامترهای فنی کلیدی مانند زاویه شیب، آزیموت و فاصله ردیف‌ها، همراه با داده‌های مصرف انرژی ساختمان و پروفایل تابش خورشیدی محلی است.

اهداف اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- تحلیل الگوهای مصرف انرژی ساختمان‌های تجاری و ارزیابی سازگاری آن‌ها با سامانه‌های PV بامی.
- تعیین زاویه شیب و آزیموت بهینه و فاصله بین ماژول‌ها بر اساس شرایط اقلیمی و تابش خورشیدی تبریز.
- شبیه‌سازی عملکرد سامانه با نرم‌افزار PV*Sol Premium و تحلیل دقیق سایه‌اندازی و تولید سالانه انرژی.
- ارزیابی اثرات زیست‌محیطی با محاسبه میزان جلوگیری از انتشار CO_2 .
- اثبات امکان‌سنجی فنی و عملی ادغام PV بامی در ساختمان‌های تجاری شهری از طریق مطالعه موردی واقعی.

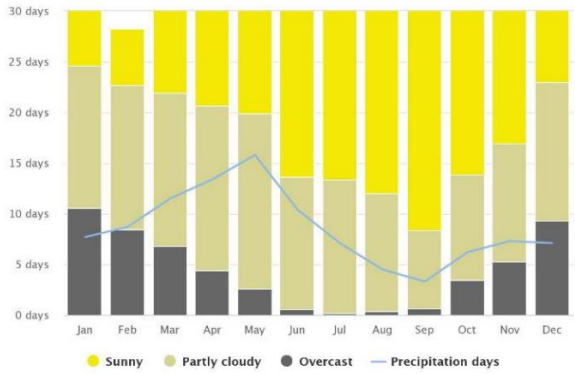
۲ .مواد و روش‌ها

۱،۲ .ویژگی‌های اقلیمی تبریز

شهر تبریز با مختصات جغرافیایی ′۳۸°۵ عرض شمالی و ′۴۶°۱۶ طول شرقی و ارتفاع تقریبی ۱۳۶۱ متر از سطح دریا، یکی از شهرهای بزرگ شمال‌غرب ایران و واقع در منطقه کوهستانی است. این شهر دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk بر اساس طبقه‌بندی کوپن–گایگر) می‌باشد. زمستان‌های تبریز طولانی، سرد و سخت بوده و معمولاً از اوایل دسامبر تا اواخر آوریل ادامه دارند؛ در این دوره، میزان تابش خورشیدی به‌شدت محدود است [۱۸]. در مقابل تابستان‌ها گرم و خشک بوده و تابش خورشیدی شدید، شرایط مناسبی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی فراهم می‌کند. رطوبت نسبی در طول سال پایین بوده که شدت گرما در تابستان و سرمای زمستان را افزایش می‌دهد [۱۹].

بر اساس داده‌های پایگاه EnergyPlus Weather میانگین بارندگی سالانه تبریز حدود ۳۲۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۱،۶ درجه سلسیوس است. اختلاف دمای میان گرم‌ترین و سردترین ماه سال می‌تواند به ۴۱ درجه برسد و در دست‌کم چهار ماه از سال، دما به کمتر از ۳ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. چنین شرایطی لزوم طراحی اقلیم‌پاسخگو و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع طبیعی انرژی را برای دستیابی به آسایش حرارتی و کارایی انرژی برجسته می‌سازد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]



شکل ۱. توزیع روزهای آفتابی و ابری در تبریز را نشان می‌دهد [۲۰].

۲,۲ .ویژگی‌های سایت پروژه

محل اجرای پروژه، مجتمع تجاری اطلس در شهر تبریز است. طبق گزارش سازمان ملی استاندارد این پروژه موفق به دریافت برچسب عملکرد انرژی شده که نشان‌دهنده ٪۴۲ بهره‌وری بالاتر نسبت به طراحی پایه است. این نخستین گواهی استاندارد در ایران برای یک ساختمان تجاری- اداری است که بیانگر آن است که با به‌کارگیری اصول طراحی هوشمند و فناوری‌های مناسب، می‌توان به بهره‌وری بالای انرژی دست یافت بدون آنکه کیفیت آسایش حرارتی یا روشنایی کاربران کاهش یابد.

این مجموعه مجهز به سیستم روشنایی هوشمند، سامانه مدیریت ساختمان(BMS) ، زیرساخت برق اضطراری، سیستم اعلام حریق مرکزی و دوربین‌های مدار بسته است. همچنین در راستای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در طراحی لحاظ شده تا اهداف توسعه پایدار و ساختمان کم‌انرژی محقق شود [۲۱].

۳,۲ .تعیین زاویه شیب و آزیموت بهینه برای بیشینه بازدهی

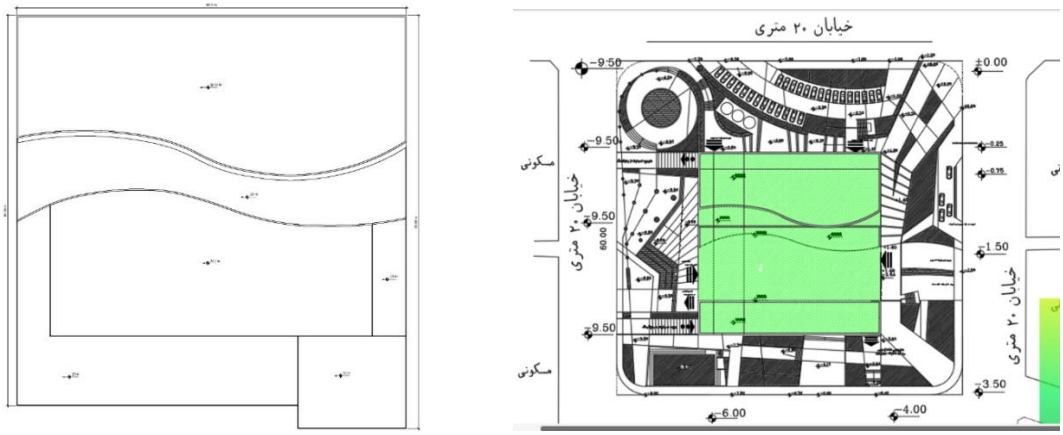
برای دستیابی به حداکثر بازدهی از سامانه‌های فتوولتائیک در یک منطقه خاص، تحلیل دقیق پارامترهای کلیدی مانند زاویه شیب، زاویه آزیموت و فاصله میان ردیف‌های پنل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این بخش این عوامل با هدف بهینه‌سازی تولید انرژی و استفاده مؤثر از فضای نصب مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

زاویه آزیموت (Azimuth) به زاویه میان صفحه پنل خورشیدی و جهت جنوب جغرافیایی اطلاق می‌شود و جهت‌گیری افقی پنل‌ها را مشخص می‌کند. در اکثر نقاط نیم‌کره شمالی تنظیم پنل‌ها به سمت جنوب (زاویه آزیموت صفر درجه) بیشترین میزان تولید انرژی سالانه را به همراه دارد. با این حال در شرایط خاص نظیر وجود موانع فیزیکی یا سایه‌اندازی ناشی از سازه‌های مجاور تغییر در زاویه آزیموت می‌تواند منجر به بهبود عملکرد سیستم شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

زاویه شیب (Tilt Angle) نیز زاویه بین صفحه افقی و سطح پنل را نشان می‌دهد و نقش کلیدی در میزان دریافت تابش خورشیدی ایفا می‌کند. انتخاب زاویه شیب مناسب علاوه بر افزایش دریافت انرژی خورشیدی موجب کاهش سایه‌اندازی متقابل پنل‌ها و بهبود کارایی کل مجموعه می‌شود.

با توجه به اینکه پروژه مورد مطالعه مجتمع تجاری اطلس در شهر تبریز است، فرآیند تحلیل و تعیین زاویه‌های بهینه نصب پنل‌های خورشیدی با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، تابش خورشیدی و مختصات جغرافیایی منطقه در محیط نرم‌افزار تخصصی PV*Sol انجام شده است. این شبیه‌سازی امکان بررسی عملکرد سالانه سیستم فتوولتائیک، محاسبه زاویه نصب بهینه و ارزیابی دقیق میزان انرژی تولیدی را فراهم آورده است.



شکل ۲. نقشه موقعیت سایت و پلان بام مجتمع تجاری اطلس

در این پروژه، شبیه‌سازی زاویه‌ها با استفاده از نرم‌افزار PV*Sol انجام شده است. برای برآورد زاویه شیب بهینه ثابت، از رابطه تجربی زیر استفاده شد:

زاویه بهینه= عرض جغرافیایی×۰,۹

که برای تبریز برابر است با:

۰,۹×۳۸,۰۶ =۳۴,۲۵°

این زاویه، تعادل مناسبی بین تابش فصلی ایجاد کرده و بیشترین تولید سالانه انرژی را تضمین می‌کند. زاویه شیب بهینه نه تنها بر میزان دریافت تابش تأثیر مستقیم دارد، بلکه یکی از عوامل کلیدی در تعیین بازده ویژه سامانه است. تغییرات جزئی در زاویه شیب می‌تواند منجر به اختلاف قابل توجهی در Specific Production شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

برای تعیین فاصله مناسب بین دو ردیف پنل، لازم است به این نکته توجه شود که به دلیل تغییر شرایط اقلیمی، موقعیت‌های نصب و وجود موانع مختلف، بهترین زاویه نصب پنل برای همه پروژه‌ها یکسان نیست و لازم است بهینه‌سازی زاویه شیب و آزیموت با مدل‌سازی دقیق در نرم‌افزار انجام شود. در این پروژه، زاویه ارتفاع خورشید در روز اول دی‌ماه (همزمان با انقلاب زمستانی) به‌عنوان مبنای طراحی انتخاب شده است؛ چرا که این روز کمترین زاویه ارتفاع خورشید در طول سال را دارد. با استفاده از داده‌های نجومی و فرمول‌های محاسبات خورشیدی زاویه ارتفاع خورشید در ساعات ۹ صبح و ۱۵ بعدازظهر حدود ۱۶ درجه محاسبه شده است. این مقدار ملاک اصلی برای تعیین فاصله‌ای است که مانع از سایه‌اندازی ردیف‌های جلویی بر پنل‌های ردیف‌های پشتی در کم‌نورترین شرایط سال می‌شود [۲۲].

$$H \div \tan(\alpha) = d$$

$$W \times \sin(\beta) = H$$

- d': فاصله بین ردیف‌ها
- H: ارتفاع مؤثر ماژول نسبت به سطح پایه (براساس ابعاد پنل و زاویه نصب)
- α: زاویه ارتفاع خورشید (در اینجا ۱۶ درجه)
- W: طول مؤثر پنل خورشیدی در راستای افق، این طول معمولاً *طول ضلع عمود بر شیب نصب* پنل است (عرض پنل هنگام نصب شیب‌دار).
- β: زاویه شیب نصب پنل نسبت به افق، زاویه‌ای که سطح پنل با سطح افق می‌سازد.

$$W \times \sin(\beta) = H$$

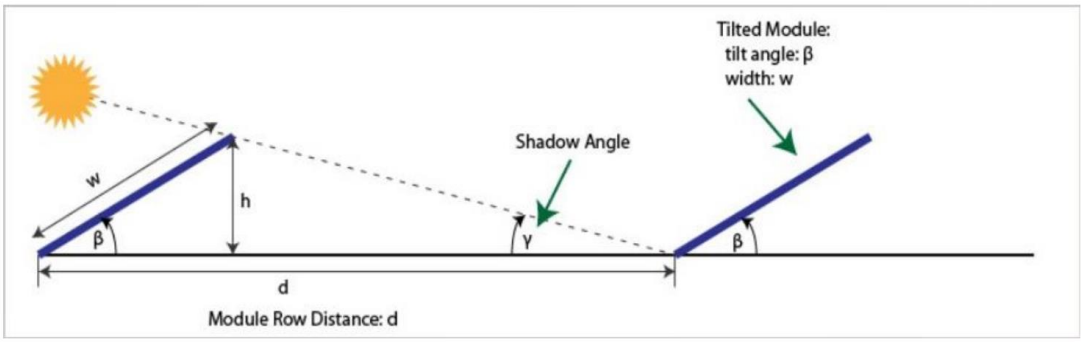
$$2382 \times \sin(34.25) = 721.01$$

$$H \div \tan(\alpha) = d'$$

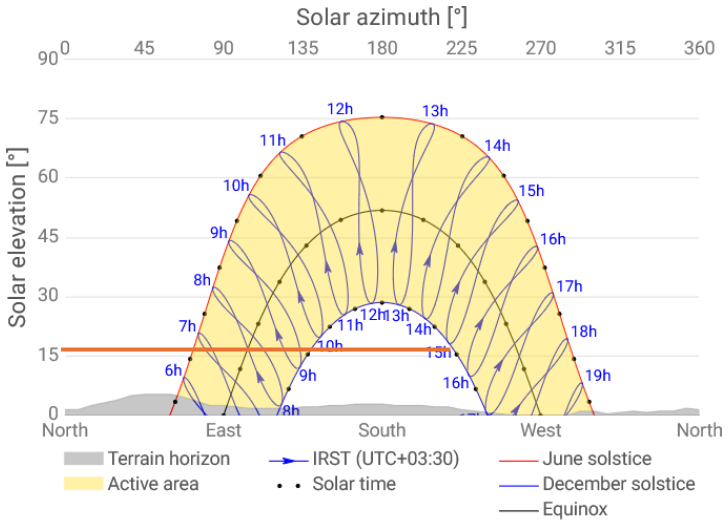
$$721.01 \div \tan(16) = 2398mm$$ فاصله بین دو پنل در حالت عمودی

با جای‌گذاری مقادیر مربوطه فاصله بهینه بین دو ردیف پنل خورشیدی در حالت نصب عمودی برابر با ۲۳۹۸ میلی‌متر به‌دست آمده است. این فاصله ضمن جلوگیری از بروز سایه‌اندازی در کم‌ارتفاع‌ترین موقعیت خورشید طی فصل زمستان شرایط مناسبی برای تهویه طبیعی بین ردیف‌ها و سهولت در انجام عملیات نگهداری و نظافت دوره‌ای فراهم می‌سازد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]



شکل ۳. نمودار تعیین فاصله بهینه بین ردیف‌های پنل‌های خورشیدی بر اساس موقعیت خورشید و تحلیل سایه‌اندازی [۲۳].



شکل ۴. نمودار مسیر خورشیدی شهر تبریز(Sun path diagram) [۲۴].

۴،۲ .انتخاب ماژول‌های فتوولتائیک و اینورترها

برای این پروژه، ماژول‌های LONGi Solar LR7-72HVD-665M به دلیل راندمان بالا (۲۴،۶۳٪) و دوام زیاد انتخاب شدند. هر ماژول توان نامی ۶۶۵ وات داشته و ابعاد آن ۲۳۸۲ × ۱۱۳۴ میلی‌متر است. مشخصات فیزیکی و الکتریکی این پنل‌ها به‌ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

پارامتر مکانیکی	مشخصات
Cell Orientation	144 (6×24)

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

Junction Box	IP68 ، سه دیود
Glass	شیشه دوجداره، ۲,۰ +۲,۰ میلی‌متر نیمه‌مقاوم
Frame	فریم آلومینیوم آندایز شده
Weight(وزن)	33.5 کیلوگرم
Dimension(ابعاد)	۲۳۸۲ × ۱۱۳۴ × ۳۰ میلی‌متر
Packaging(بسته‌بندی)	۳۶ عدد در پالت / ۱۴۴ عدد در کانتینر ۲۰ فوت / ۷۲۰ عدد در کانتینر ۴۰ فوت

جدول۱. مشخصات فیزیکی پنل خورشیدی مورد استفاده در پروژه

پارامتر	مقدار	واحد
MPP Voltage(ولتاژ در نقطه توان بیشینه)	45.17	ولت(V)
MPP Current(جریان در نقطه توان بیشینه)	14.73	آمپر(A)
Open Circuit Voltage(ولتاژ مدار باز)	54.52	ولت(V)
Short-Circuit Current(جریان اتصال کوتاه)	15.38	آمپر(A)
Increase Open Circuit Voltage before Stabilisation(افزایش ولتاژ مدار باز قبل از پایدارسازی)	0	درصد(%)
Nominal Output(توان نامی)	665	وات(W)
Fill Factor(ضریب پرشدگی)	79.35	درصد(%)
Efficiency(راندمان)	24.63	درصد(%)

جدول۲. مشخصات I/V پنل فتوولتائیک در شرایط استاندارد آزمون(STC)

برای اینورترها، محصولات شرکت SMA Solar Technology AG به دلیل راندمان بالا (~۹۸٪)، قابلیت اطمینان و ویژگی‌های پیشرفته نظیر پایش از راه دور و سازگاری با شبکه هوشمند انتخاب شدند. در مجموع، ۷ دستگاه اینورتر با مدل‌ها و ظرفیت‌های متفاوت به‌کار رفته است تا عملکرد بهینه و حداقل‌سازی تلفات ناشی از عدم تطابق حاصل شود (جدول ۳).

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

ردیف	نوع	تولیدکننده	نام محصول	تعداد	واحد
1	PV ماژول	LONGi Solar	LR7-72 HVD 665 M	227	عدد
2	اینورتر	SMA Solar Technology AG	Sunny Tripower CORE1	1	عدد
3	اینورتر	SMA Solar Technology AG	Sunny Tripower Storage X 30	1	عدد
4	اینورتر	SMA Solar Technology AG	Sunny Tripower X 20	3	عدد
5	اینورتر	SMA Solar Technology AG	Sunny Boy 7.0-1SP-US40 (240V)	1	عدد
6	اینورتر	SMA Solar Technology AG	Sunny Boy 3.8-1SP-US-41 (208V)	1	عدد

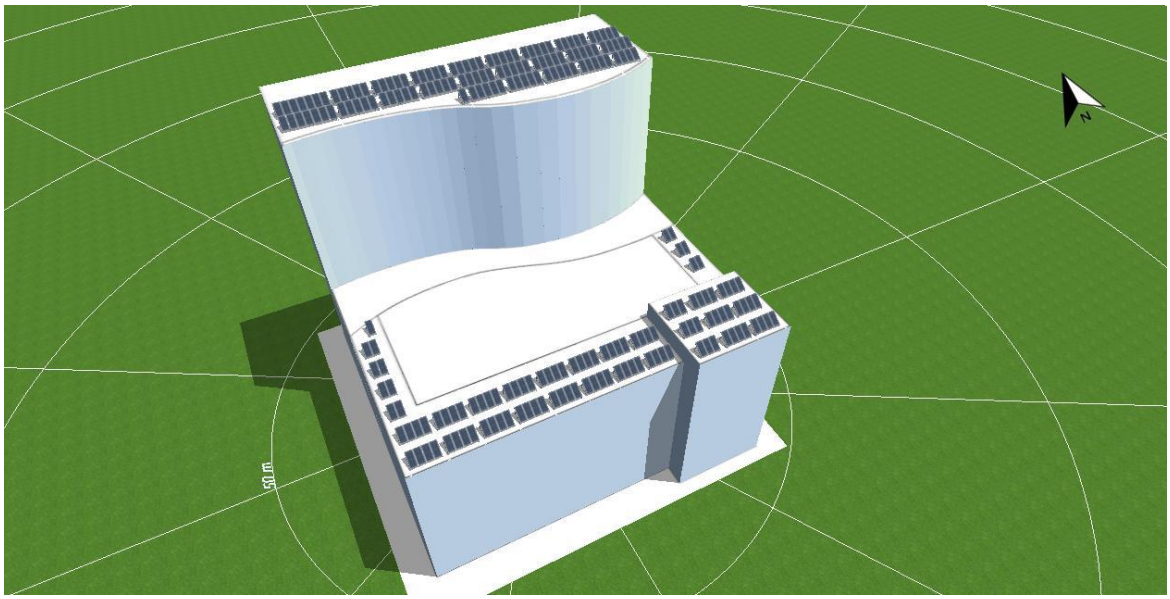
جدول ۳. لیست ماژول‌ها و اینورترهای مورد استفاده در پروژه

۵،۲ .نرم‌افزار و تنظیمات شبیه‌سازی

طراحی و بهینه‌سازی سامانه با استفاده از نرم‌افزار PV*Sol Premium انجام شد. داده‌های هواشناسی تبریز از نسخه Meteonorm v8.1 استخراج شد. مدل سه‌بعدی ساختمان و چیدمان پنل‌ها در نرم‌افزار وارد شد تا تحلیل دقیق سایه و عملکرد صورت گیرد.

پارامترهای نصب به‌گونه‌ای تنظیم شدند که ایمنی و کارایی تضمین شود، از جمله:

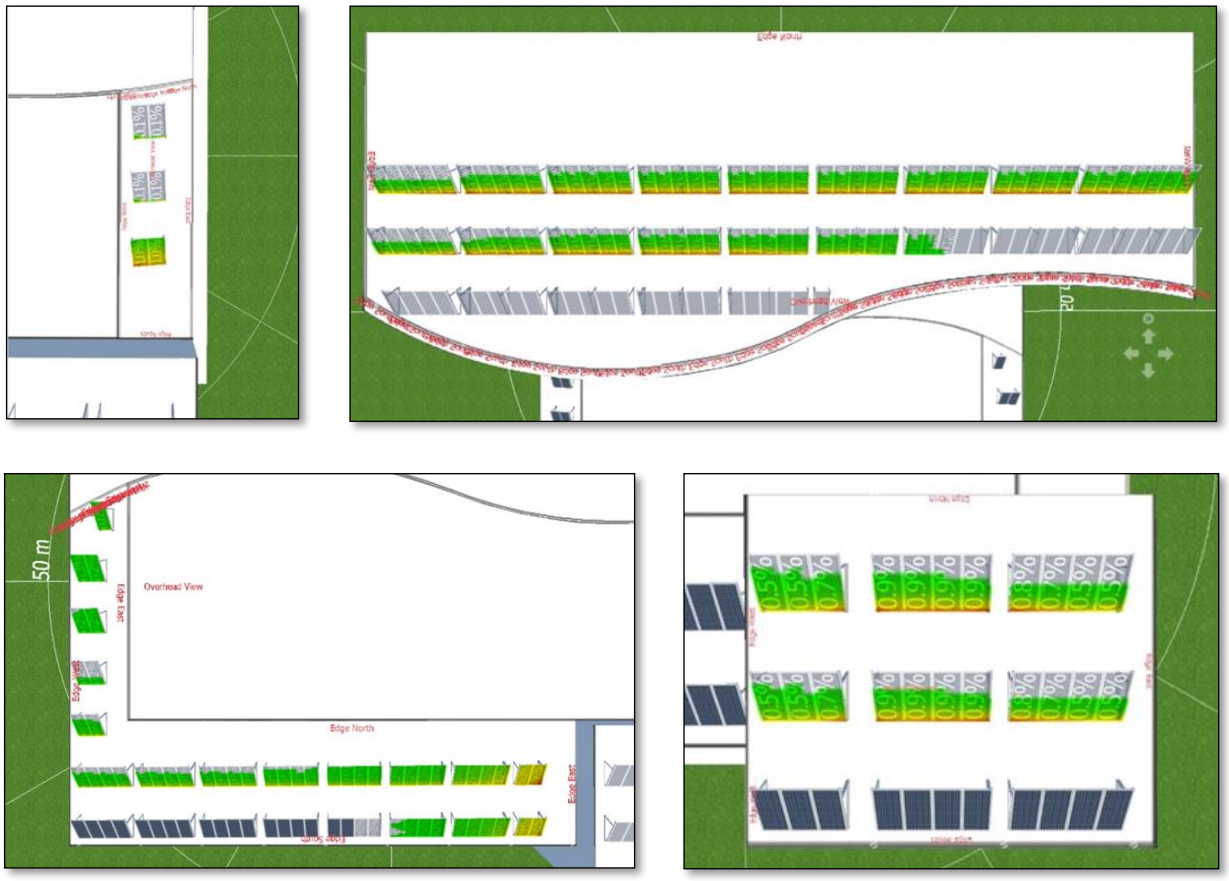
- فاصله ۸۰ سانتی‌متر از لبه جان‌پناه ساختمان
- فاصله ۳۰ سانتی‌متر بین ردیف پنل‌ها
- فاصله ۵ سانتی‌متر بین پنل‌های مجاور برای امکان نگهداری



[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

شکل ۵. مدل سه‌بعدی ساختمان و جانمایی پنل‌ها بر روی بام

با توجه به شرایط مطرح شده در مجموع ۲۲۷ ماژول خورشیدی به‌صورت فرضی بر روی سطح بام جانمایی شده‌اند که توان تولیدی سامانه را در شرایط استاندارد به حدود ۱۵۰,۹۶ کیلووات پیک می‌رساند. این ظرفیت قادر است بخش قابل‌توجهی از نیاز برق مجموعه را تأمین کرده و در کاهش وابستگی به شبکه برق شهری و کاهش آلایندگی‌های کربنی نقش مؤثری ایفا نماید.



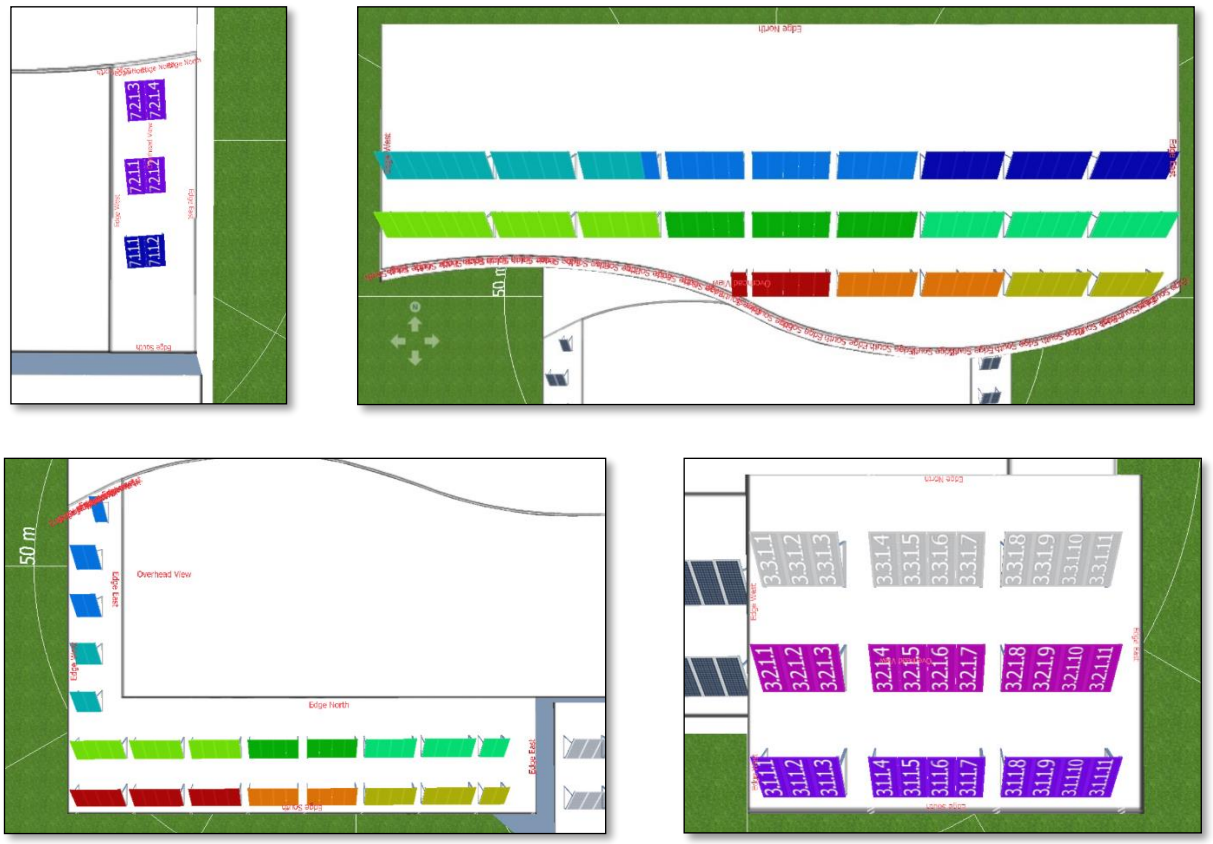
شکل ۶. درصد سایه‌اندازی بر پنل‌ها در بخش‌های مختلف بام

تصاویر ارائه‌شده درصد سایه‌اندازی روی هر پنل خورشیدی را با استفاده از یک طیف رنگی از سبز تا قرمز نمایش می‌دهند. در این طیف، رنگ سبز نشان‌دهنده کمترین میزان سایه و رنگ قرمز نمایانگر بیشترین میزان سایه (تا ٪۱۰۰) است. این تحلیل با در نظر گرفتن آرایش پنل‌ها، زاویه نصب و شرایط محیطی انجام شده و امکان ارزیابی دقیق تأثیر سایه بر عملکرد سامانه را فراهم می‌کند. نتایج حاصل می‌توانند در بهینه‌سازی چیدمان پنل‌ها و کاهش تلفات ناشی از سایه مؤثر باشند و همچنین شکل‌های زیر نحوه اتصال پنل‌های خورشیدی را به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهند. در این تصاویر پنل‌های با رنگ مشابه نمایانگر ماژول‌هایی هستند که

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

به‌صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. سپس مجموعه‌های سری در انتها به‌صورت موازی با یکدیگر ترکیب شده‌اند تا به اینورترها متصل شوند.

در مجموع هفت اینورتر در این سامانه به‌کار رفته است و هر بخش از آرایه‌ها با توجه به موقعیت مکانی و زاویه نصب به یکی از این اینورترها اختصاص یافته است. این روش اتصال موجب بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کاهش تلفات ناشی از عدم تطابق ولتاژ و جریان در ماژول‌ها می‌شود.



شکل ۷. اتصالات الکتریکی و آرایش استرینگ‌ها به اینورترها

۳ .نتایج و بحث

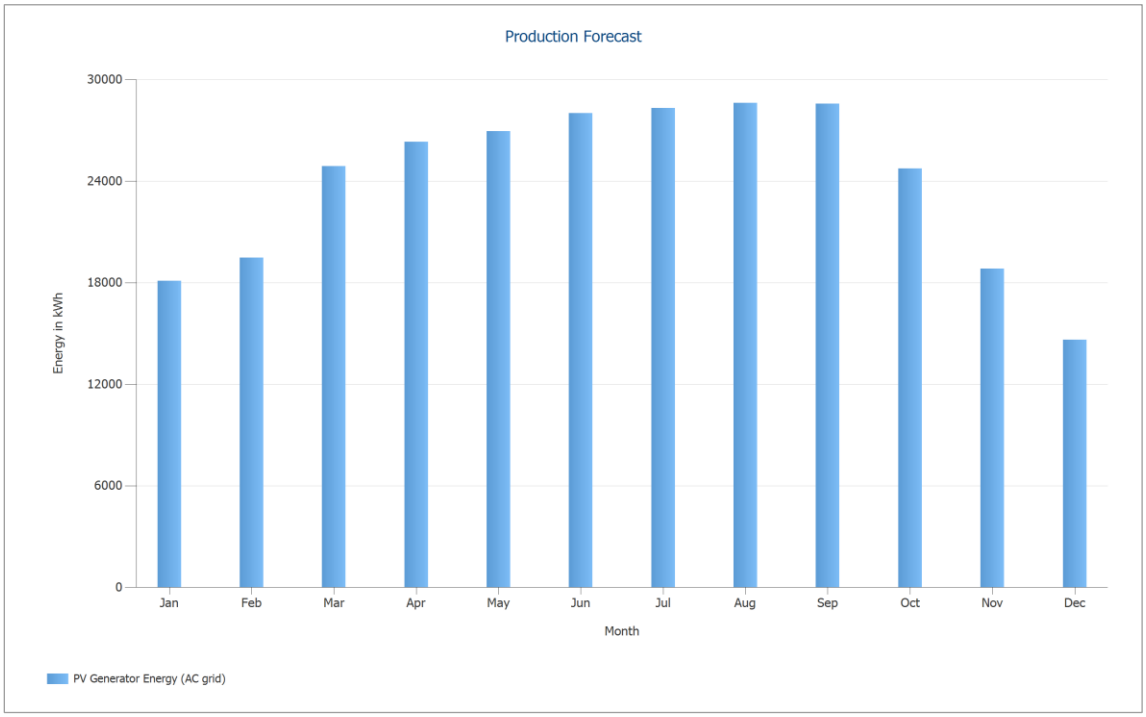
۱,۳ .خروجی نرم‌افزار

بر اساس شبیه‌سازی با نرم‌افزارPVSol Premium ، سامانه فتوولتائیک طراحی‌شده دارای توان نامی ۱۵۰,۹۶ کیلووات پیک (kWp)است. بازده ویژه سالانه این سامانه برابر با ۱۹۰۳,۴۳ کیلووات‌ساعت به ازای هر کیلووات پیک برآورد شد که نشان‌دهنده کارایی بالای سامانه در طول سال است. برای مقایسه، داده‌های اطلس جهانی خورشیدی (Solar Atlas) مقدار تقریبی ۱۷۱۷

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

kWh/kWp را برای مختصات تبریز نشان می‌دهند. این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت پایگاه داده تابش Meteonorm در PVSolدر مقایسه با داده‌های NASA/PVGIS/NSRDB است.

نسبت عملکرد (Performance Ratio - PR) سیستم برابر با ٪۸۵ محاسبه شده است که عددی مطلوب محسوب می‌شود و نشان‌دهنده کارایی بالای سامانه در تبدیل تابش خورشیدی به انرژی الکتریکی است. همچنین کاهش تولید انرژی به‌دلیل سایه‌اندازی تنها ٪۴,۶ برآورد شده که نشان‌دهنده طراحی بهینه چیدمان پنل‌هاست. در نهایت با بهره‌برداری از این سیستم فتوولتائیک سالانه حدود ۱۳۵,۰۴۶ کیلوگرم دی‌اکسید کربن از انتشار در جو جلوگیری می‌شود که این موضوع سهم قابل‌توجهی در کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار ایفا می‌کند.



شکل ۸. نمودار پیش‌بینی تولید ماهانه انرژی سامانه فتوولتائیک

۲,۳ .الگوهای مصرف برق در ساختمان‌های تجاری و خرده‌فروشی

مطالعات مختلف نشان می‌دهند که ساختمان‌های تجاری و فروشگاهی از پرمصرف‌ترین فضاها از نظر برق هستند. یک پژوهش جامع توسط ملو، دا گراسا و پاناو (۲۰۲۳)، با تحلیل داده‌های مربوط به ۳۰۶۰ ساختمان تمام‌برقی در ۳۱ کشور، متوسط شدت مصرف برق(EUIe) در ساختمان‌های خرده‌فروشی، شامل مراکز خرید، فروشگاه‌ها و عمده‌فروشی‌ها را ۳۰۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

سال گزارش کرده است. دامنه بین چارک‌های اول و سوم این شاخص بین ۱۵۶ تا ۴۶۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال متغیر است که ناشی از عوامل اقلیمی، طراحی ساختمان، بارهای الکتریکی و رفتار کاربران است [۲۵].

از نظر الگوی زمانی مصرف انرژی در این ساختمان‌ها در طول روز متغیر بوده و ساعات اوج مصرف معمولاً بین ۹ صبح تا ۶ عصر و کمترین مصرف بین ۱۰ شب تا ۶ صبح است. ضریب تغییرات روزانه (DVF) بین ۱٫۵ تا ۱٫۷ گزارش شده که بر ضرورت بهینه‌سازی سیستم‌های HVAC و روشنایی متناسب با ساعات کاری تأکید دارد. در مطالعه‌ای دیگر توسط زارکو-سوتو و همکاران (۲۰۲۵)، با بررسی ۲۱۱ مطالعه علمی، متوسط شدت مصرف برق ساختمان‌های تجاری را ۳۴۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال برآورد کرده که نشان‌دهنده نیاز بالای انرژی این ساختمان‌ها است [۲۶].

به‌طور خلاصه ساختمان‌های تجاری و خرده‌فروشی علاوه بر مصرف سالانه زیاد، دارای الگوهای مصرف روزانه مشخصی هستند که طراحی معماری و راهکارهای مدیریت انرژی در آن‌ها باید شامل سیستم‌های هوشمند، بهره‌گیری از نور روز، جابه‌جایی بار مصرف و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر باشد.

۳,۳ .تجزیه تلفات انرژی

علاوه بر بررسی بازده کلی و نسبت عملکرد، تحلیل جزئی تلفات انرژی سامانه بر اساس داده‌های خروجی نرم‌افزار PV*Sol Premium، دید روشنی از منابع اصلی کاهش انرژی فراهم می‌کند. جدول ۴ سهم هر بخش از تلفات را به‌صورت کمی نشان می‌دهد.

مؤلفه تلفات	مقدار(%)	توضیح
تلفات ناشی از راندمان ماژول تحت شرایطSTC	٪۷۵,۳۷	ذاتی در راندمان ٪۲۴٫۶۳ ماژول‌ها – طبیعی برایPV
تلفات بازتاب (زاویه تابش و انعکاس شیشه)	٪۳,۷۴	قابل کاهش با پوشش ضدانعکاس یا شیشه بافت‌دار
تلفات سایه‌اندازی جزئی	٪۴,۰۷	بسیار کم برای محیط شهری، حاصل طراحی بهینه فاصله و زاویه
تلفات دمایی	٪۳,۹۱	ناشی از گرم‌شدن سلول‌ها در تابستان – قابل کاهش با تهویه بهتر
تلفات عدم‌تطابق ماژول‌ها	٪۲,۳۲	به‌دلیل تفاوت‌های جزئی عملکرد پنل‌ها یا پیکربندی استرینگ‌ها
تلفات محدودسازی توان اینورتر(Clipping)	٪۱,۲۶	زمانی که توان DC بیش از ظرفیت اینورتر است
تلفات رهگیری نقطه حداکثر توان (MPPT Mismatch)	٪۱,۰۱	ناشی از انحراف جزئی عملکرد MPPT از نقطه ایده‌آل

جدول ۴. سهم کمی اجزای مختلف در تلفات انرژی سامانه

در کنار تلفات بازتاب (IAM) که در جدول گزارش شده است، تلفات اهمی کابل‌ها (Ohmic losses) و تلفات ناشی از آلودگی سطح ماژول‌ها (Soiling losses) نیز از عوامل مؤثر بر کاهش عملکرد واقعی سامانه هستند. در شرایط عملی این مقادیر معمولاً

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

بین ۱ تا ۳ درصد در نظر گرفته می‌شوند و می‌توانند باعث کاهش بازده ویژه (Specific Production) نسبت به خروجی خام نرم‌افزار گردند.

۴ .نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی تحلیلی سامانه فتوولتائیک پیشنهادی نشان می‌دهد که این سیستم، یک راهکار بسیار کارآمد و سازگار با محیط‌زیست برای ساختمان‌های تجاری است. با توان نامی ۱۵۰,۹۶ کیلووات پیک و تولید سالانه تقریبی ۲۸۷ هزار کیلووات‌ساعت، سامانه به بازده ویژه ۱۹۰۳,۴۳کیلووات‌ساعت بر کیلووات پیک دست یافته و نسبت عملکرد ٪۸۵ را با تنها ٪۴,۶ تلفات سایه‌اندازی حفظ کرده است. داده‌های تولید ماهانه نشان می‌دهد که بیشترین خروجی انرژی در ماه‌های تابستان (ژوئن تا سپتامبر) اتفاق می‌افتد که همزمان با اوج تقاضای برق در ساختمان‌های تجاری به دلیل نیاز سرمایش و روشنایی است. این هم‌زمانی امکان‌پذیری عملی استفاده از سامانه‌های BIPV را در چنین ساختمان‌هایی افزایش می‌دهد.

با توجه به برآورد شدت مصرف برق سالانه ساختمان‌های تجاری (۳۰۳ تا ۳۴۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال)، یک ساختمان با زیربنای ناخالص ۳۶۲۷,۷ مترمربع معمولاً بین ۱،۰۹۹،۶۰۰ تا ۱،۲۴۴،۰۰۰ کیلووات‌ساعت برق در سال مصرف می‌کند. بنابراین سامانه فتوولتائیک حاضر قادر است حدود ۲۳ تا ۲۶ درصد از کل تقاضای انرژی ساختمان را تأمین کند. علاوه بر جنبه انرژی، کاهش سالانه بیش از ۱۳۵ هزار کیلوگرم دی‌اکسیدکربن نشان‌دهنده تأثیر مثبت این پروژه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی است. این مطالعه نمونه‌ای است از اینکه چگونه ادغام فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در طراحی معماری ساختمان‌های تجاری می‌تواند ارزش‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی چندگانه ایجاد کند.

در نهایت هم‌راستایی ظرفیت تولید برق خورشیدی با الگوی مصرف انرژی در ساختمان‌های تجاری، اهمیت استراتژیک سامانه‌های PV را در تلاش‌های پایداری شهری تقویت می‌کند. این مطالعه موردی، از این فناوری به‌عنوان ابزاری مؤثر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ترویج گذار به انرژی پاک در محیط ساخته‌شده حمایت می‌کند.

پیشنهادها

بر اساس عملکرد مطلوب این پروژه چند راهکار برای بهبود کارایی، قابلیت توسعه و دوام بلندمدت سامانه‌های مشابه در محیط‌های تجاری شهری پیشنهاد می‌شود:

۱. ادغام سامانه ذخیره‌ساز انرژی باتری(BESS) :

به‌کارگیری فناوری ذخیره‌سازی می‌تواند اختلاف فصلی میان تولید و تقاضای انرژی را جبران کرده و به تعادل بار و افزایش پایداری سامانه کمک کند، به‌ویژه در دوره‌های زمستانی با تابش محدود.

۲. استفاده از فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان(BIPV) :

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

توسعه نصب پنل‌ها روی نماهای عمودی می‌تواند علاوه بر افزایش تولید سالانه، به‌خصوص در ماه‌هایی با زاویه پایین تابش خورشید به بهبود طراحی معماری و ایجاد سایه‌بان غیرفعال کمک کند.

۳. سیاست‌های حمایتی:

مشوق‌های دولتی مانند تعرفه‌های خرید تضمینی(Feed-in Tariff) ، طرح‌های خالص‌سنجی (Net Metering) و یارانه‌های سرمایه‌گذاری می‌توانند فرآیند پذیرش این فناوری را تسریع کرده و دوره بازگشت سرمایه را کاهش دهند.

۴. راهبردهای مدیریت انرژی متمرکز بر کاربران:

با توجه به نقش رفتار کاربران در مصرف انرژی، اجرای برنامه‌های آگاهی‌بخشی، کنترل‌های هوشمند ساختمان و سیستم‌های بازخورد رفتاری می‌تواند بهره‌وری کلی انرژی را بهبود دهد.

۵. پایش مستمر و بهینه‌سازی داده‌محور:

رصد بلندمدت عملکرد سامانه همراه با داده‌های عملیاتی لحظه‌ای، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر، تنظیم سامانه و مدیریت تطبیقی را فراهم می‌آورد. این امر برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در شرایط واقعی ضروری است.

۶. استفاده از نرم‌افزار PVSyst برای مدل‌سازی

پیشنهاد می‌شود برای مطالعات آینده، شبیه‌سازی با نرم‌افزار PVSyst نیز انجام گیرد. این نرم‌افزار علاوه بر قابلیت اعمال دقیق انواع تلفات(IAM، Soiling، Ohmicو ...) از اعتبار گسترده در میان مشاوران و طراحان نیروگاه‌های خورشیدی برخوردار است.

منابع

[۱]Simmler, H. and Binder, B. (2008). Experimental and numerical determination of the total solar energy transmittance of glazing with venetian blind shading. Building and Environment, 43(2), 197–204.

[۲]Kuhn, T.E., Bühler, C. and Platzer, W.J. (2001). Evaluation of overheating protection with sun-shading systems. Solar Energy, 69, 59–74.

[۳]Singh, T.S.D., Shimray, B.A. and Meitei, S.N. (2025). Performance Analysis of a Rooftop Grid-Connected Photovoltaic System in North-Eastern India, Manipur. Energies, 18(8), 1921.

[۴]Gu, J., Xu, P. and Ji, Y. (2023). A fast method for calculating the impact of occupancy on commercial building energy consumption. Buildings, 13(2), 567.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

[۵]Firozjaei, H.K., Safari, A., Shahsavari, A., Gharabaghi, M. and Yousefi, H. (2020). On the effect of geographical, topographic and climatic conditions on feed-in tariff optimization for solar photovoltaic electricity generation: A case study in Iran. Renewable Energy, 153, 430–439.

[۶]Abbood Al-Khazzar, A.A. (2018). A Theoretical Detailed Analysis for a Proposed 5kW PV Grid-Connected System Installed in Iraq Using PVsyst Tool. Iranica Journal of Energy & Environment, 9(2), 105–113.

[۷]Rahimi, A., Gorgani Firouzjah, K. and Ghasemi, J. (2025). A PVsyst Analysis of Shading and Arrangement Optimization for a Solar Power Plant in Babolsar. Iranica Journal of Energy & Environment, 16(4), 580–593.

[۸]Molavi, H.D.S.H. (2023). Design of Photovoltaic (Solar) Systems. Tehran: Perkas Publications.

[۹]Cantoni, R. and Rignall, K. (2019). Kingdom of the Sun: a critical, multiscalar analysis of Morocco's solar energy strategy. Energy Research & Social Science, 51, 20–31.

[۱۰]Gunasegaran, M.K., Balaji, V., Kumar, R., Suresh, A. and Karthikeyan, R. (2023). Energy Consumption, Energy Analysis, and Solar Energy Integration for Commercial Building Restaurants. Energies, 16(20), 7145.

[۱۱] قنبران، ع.، شیخی، ح.، مرادی، م. و رضایی، س. (۱۳۹۶). عوامل مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان‌های تجاری در شهر ایلام. در: سومین همایش ملی مهندسی عمران، معماری، شهرسازی و مدیریت انرژی.

[۱۲]Amani, N. and A. Rezasoroush, *Energy consumption management of commercial buildings by optimizing the angle of solar panels.* 2021.

[۱۳]Emami, S.M., Ravanshadnia, M. and Rahimi, M. (2019). Analysis and Modeling of Energy Demand System in Iran's Buildings and the Industry. Journal of Applied Engineering Sciences, 9.(۱)

[۱۴]U.S. Department of Energy. (2018). Commercial Buildings Energy Consumption Survey. Washington, DC, USA.

[۱۵]Chandel, R. and Chandel, S.S. (2022). Performance analysis outcome of a 19-MWp commercial solar photovoltaic plant with fixed-tilt, adjustable-tilt, and solar tracking configurations. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(1), 27–48.

[۱۶]Zarezadeh, M. (2023). Feasibility construction of a 4 MW PV power plant to provide sustainable electricity to Bandar Abbas Industrial Estate. Journal of Solar Energy Research, 8(1), 1250–1263.

[۱۷]Krawczak, E. (2023). A comparative analysis of measured and simulated data of PV rooftop installations located in Poland. Energies, 16(16), 5975.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]

[۱۸]Ouria, M. (2019). Solar energy potential according to climatic and geometrical parameters of cities and buildings: A case-study from Tabriz City–Iran. Urban Climate, 28, 100469.

[۱۹] Neghabi, M., *Climatic Design of Iranian Traditional Buildings – Case Study: Tabriz.* IJRDO – Journal of Applied Science, 2016. **2**(7).

[۲۰] احمدنژاد، ف.، کی‌نژاد، ز. و جعفری، س. (۱۴۰۱). بررسی تأثیر زاویه نصب عمودی و جهت‌گیری بر عملکرد بهینه پنل‌های فتوولتائیک در تبریز. در: دومین کنفرانس بین‌المللی معماری، مهندسی عمران، شهرسازی، محیط‌زیست و هنر اسلامی.

[۲۱] مولایی، ع. و نیک‌پور، م. (۱۳۹۴). عوامل مؤثر بر صرفه‌جویی انرژی در مجتمع‌های اداری-تجاری. در: سومین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری.

[۲۲]Tonita, E.M., Hassan, A.A., Alghamdi, A.S., Alshahrani, S.A. and Rehman, S. (2023). Optimal ground coverage ratios for tracked, fixed-tilt, and vertical photovoltaic systems for latitudes up to 75° N. Solar Energy, 258, 8–15.

[۲۳]Friday, S.C.K. and Umoette, A. (2024). Sun Chart-Based Computation Of Photovoltaic Array Row Spacing For Internal Shading Mitigation At Optimal Fixed Tilt Angle. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, 11, 2458–9403.

[۲۴]The World Bank – Global Solar Atlas. (2025). Available from: https://globalsolaratlas.info

[۲۵]Melo, F.C., da Graça, G.C. and Panão, M.J.O. (2023). A review of annual, monthly, and hourly electricity use in buildings. *Energy and Buildings*, 293, 113201.

[۲۶]Zarco-Soto, F.J., Mahdavi, A., Mustafaraj, G., Péan, T.Q., and Madsen, H. (2025). Energy consumption in buildings: A compilation of current studies. *Energy Reports*, 13, 1293–1307.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-09-22]