



شبیه سازی و امکان سنجی فنی اقتصادی تولید برق در سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان

حسین بیکی^{*}

۱- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

hbeiki@qiet.ac.ir *

چکیده

انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی بی پایان و ارزان قیمت در جهان است. تولید الکتریسیته به کمک سیستم فتوولتائیک، یکی از عمده ترین موارد استفاده از انرژی خورشیدی است. تلفیق سیستم فتوولتائیک با ساختمان یکی از طرح‌های مورد توجه مهندسان و معماران است. در این پژوهش سه طرح متفاوت از سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان و یک طرح سیستم فتوولتائیک نصب بر پشت بام در یک شهرک مسکونی جهت تولید برق شبیه سازی شده است. پنل‌های مورد استفاده در شبیه سازی‌ها از جنس مونوکریستال، کادمیوم تلراید و فیلم نازک می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های متفاوت پنل‌ها، برق متفاوتی توسط آنها تولید می‌شود. نتایج شبیه سازی‌ها نشان دادند که سیستم یکپارچه با پنل مونوکریستال بیشترین میزان برق تزریقی (۸۷۱/۲ MWh/year) به شبکه را داراست. سیستم یکپارچه با پنل فیلم نازک کمترین میزان برق تزرفی به شبکه و همچنین کمترین ضریب عملکرد را دارد. محاسبات اقتصادی نشان دادند که با استفاده از تلفیق سیستم‌های یکپارچه و نصب بر پشت بام می‌توان در مدت زمان ۳/۶۵ سال بازگشت سرمایه داشت. نرخ تورم و قیمت خرید برق تولیدی در نیروگاه، نقش مهمی را در سرمایه گذاری در این حوزه ایفا می‌کنند.

کلیدواژگان: پنل فتوولتائیک، سیستم یکپارچه با ساختمان، انرژی خورشیدی، تولید برق.

Simulation and tech-economics feasibility of power generation using building integrated with photovoltaic systems

Hossein Beiki^{*}

1- Chemical Engineering Department, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

* P.O.B. 9477167335 Quchan, Iran, hbeiki@qiet.ac.ir

Received: 18 May 2019

Accepted: 26 August 2019

Abstract

Solar energy is one of the sustainable and inexpensive energy sources in the world. One of the most important uses of solar energy is generated electricity by using photovoltaic systems. Integrating photovoltaic systems with buildings is one of the favorite plans for engineers and architects. In this study, simulation of electricity generation from three different plans of photovoltaic systems integrated with the building and a photovoltaic installation system on the roof in a residential complex was investigated. The panels used in the simulations are monocrystalline, cadmium telluride and thin film. Due to the different characteristics of the panels, different amounts of electricity is produced by them. The simulation results showed that the plan including monocrystalline solar panel has the highest electricity injection rate (871.2 MWh / year) into the grid. The integrated system including thin-film modules has the lowest amounts of electricity generation into the network and also the lowest performance factor. Economic calculations showed that using a combination of integrated system and installation on the top roof, it could be possible to return the investment in 3.65 years. The inflation rate and the purchase price of electricity produced at the power plant play an important role in investing in this area.

Keywords: Photovoltaic panel, Building integrated with photovoltaic system, Solar energy, Electricity generation.



۱- مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در کشورهای در حال توسعه و صنعتی استفاده نامناسب و مصرف بی رویه از منابع انرژی و سوخت‌های فسیلی برای وسایل نقلیه، گرمایش منازل و تولید الکتریسیته است. این مصرف بی رویه علاوه بر مشکلات زیست محیطی مانند آلودگی هوا و به تبع آن به خطر افتادن سلامت و زندگی انسان‌ها، باعث افزایش هزینه های زندگی و مواد تولیدی در صنعت شده است. به همین دلیل یکی از بهترین جایگزین‌ها برای سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع عظیم انرژی‌های تجدید پذیر است [۴-۱].

بحران انرژی که آینده زمین را نگران کرده است، با اصلاح الگوی مصرف و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر قابل حل است. یکی از منابع ارزان انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی خورشیدی است. جهت جمع آوری، ذخیره سازی و استفاده از انرژی خورشیدی، تکنولوژی‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۹-۴]. یکی از راه‌هایی که بتوان از انرژی خورشید بیشترین بهره را گرفت، استفاده از سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان است. در این مقاله، به اختصار این ساختمان‌ها، به صورت BIPV مشخص شده است. نمونه‌های مختلفی از ساختمان‌های BIPV وجود دارد که از آنها می‌توان به استفاده از سلول‌های فتوولتائیک به عنوان پنجره، ترکیب سلول‌ها بر روی نمای ساختمان، سایبان پنجره، به صورت یکپارچه با بام ساختمان و یا هرگونه ترکیب سلول‌های با ساختمان در نظر گرفتن زیبایی ساختمان و همچنین تامین انرژی بیشتر اشاره کرد [۱۰].

فاکتورهای مختلفی بر راندمان سیستم‌های فتوولتائیک تاثیرگذار است. در طراحی ساختمان BIPV باید سایه اندازی ساختمان‌های مجاور، پنل‌های اطراف و یا هر گونه اشیای اطراف ساختمان، شیب پنل‌های فتوولتائیک و نوع پنل‌ها را در طراحی در نظر گرفت [۱۱]. وفائی و پوردیهیمی زاویه بهینه سیستم فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان، را برای ساختمانی در تهران را بدست آوردند. آنها نشان دادند که زاویه پنل یکی از فاکتورهای اصلی در میزان دریافت انرژی بیشتر در طراحی ساختمان BIPV است [۱۲]. از دیگر مشخصه های طراحی ساختمان BIPV میزان تابش خورشید است [۱۳، ۱۴]. یکی از مشخصه های تاثیر گذار دیگر در راندمان ساختمان‌های BIPV، شرایط آب و هوایی منطقه مورد بررسی است [۱۵]. دمای محیط یکی از فاکتورهای مهم در عملکرد سلول‌های خورشیدی است [۱۶-۱۸]. اثر چهار نوع مختلف از ساختمان BIPV شامل: سیستم یکپارچه تک سطحی، سیستم یکپارچه بدون تهویه دو سطحی، سیستم یکپارچه دو سطحی همراه با تهویه طبیعی و سیستم یکپارچه دو سطحی همراه با تهویه اجباری، در سه منطقه آب و هوایی در کشور استرالیا، بر روی دمای آسایش داخل ساختمان مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. نتایج شبیه سازی‌ها نشان داد که سیستم یکپارچه دو سطحی با تهویه طبیعی در مناطق گرم و سیستم یکپارچه دو سطحی بدون تهویه در مناطق آب و هوایی سرد بیشترین کارایی را دارند [۱۵]. آل سراف و همکاران عملکرد یک ساختمان BIPV را با استفاده از شبکه عصبی پیش بینی کردند [۱۹]. نویسندگان

پارامترهای ورودی به مدل عصبی را شامل شدت جریان جرمی هوا، طول، عمق و عرض پنل در نظر گرفتند. در حالی که پارامتر خروجی مدل آنها عملکرد انرژی سیستم BIPV بود. آنها نشان دادند که مدل عصبی پیشنهادی با دقت بالایی $R^2=0/999$ و $RMSE=0/05927$ برای داده های تست) سیستم BIPV را شبیه سازی می‌کند [۱۹]. فیئا و همکاران نشان دادند که یک سیستم BIPV بر روی پشت بام و سطوح جانبی یک ساختمان می‌تواند یک سرمایه گذاری امیدوار کننده‌ای باشد [۱۴].

با توجه به اهمیت استفاده از انرژی خورشیدی در تامین انرژی بویژه برق، در این پژوهش سه سیستم BIPV و یک سیستم نصب بر پشت بام (که در این مقاله به اختصار با Top Roof مشخص می‌شود) در یک شهرک مسکونی طراحی و به کمک نرم افزار PVSYS شبیه سازی شده است. شهرک مسکونی مورد نظر جز ساختمان‌های مسکن مهر واقع در تهران می‌باشد، که دارای عرض جغرافیایی $51/63^\circ$ و طول جغرافیایی $35/78^\circ$ است. اطلاعات جغرافیایی و آب و هوایی نقطه مورد نظر را می‌توان با استفاده از نرم افزار meteonorm بدست آورد و در نرم افزار شبیه ساز PVSYS بکار برد. در هندسه مورد بررسی پنل‌ها بصورت نما بروی ساختمان نصب شده‌اند. همچنین کارایی فناوری جدید با حالت قدیمی نصب پنل‌ها بر روی بام مقایسه شده است. علاوه بر بررسی نحوه نصب پنل‌ها، مدل پنل‌های نصب شده در طرح BIPV مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از سه پنل مونو کریستال، کادمیوم تلراید و پنل فیلم نازک استفاده شده است. میزان راندمان و توان تولیدی هر یک از پنل‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در طراحی فرض شده است که در هر دو حالت نصب پنل‌ها برق یک میکرو گرید در همان شهرک مسکونی را تامین می‌کنند. همچنین هر چهار طرح از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدلسازی

با وارد کردن اطلاعات جغرافیایی و آب و هوایی منطقه مورد بررسی به نرم افزار میزان تابشی که به سطح پنل‌ها می‌تابد و همچنین دمای هوا و طریقه حرکت خورشید محاسبه می‌شود. می‌توان اطلاعات فنی پنل‌ها را که نرم افزار برای محاسبه میزان انرژی الکتریکی تولیدی نیاز دارد را وارد کرد. اطلاعات فنی شامل ویژگی پنل‌ها، ویژگی اینورتر ابعاد و نوع پنل و میزان مساحت دسترس است. در این پژوهش سه پنل متداول در طراحی نیروگاهی ساختمان BIPV مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان راندمان هر یک از پنل‌ها در جدول (۱) آمده است. پنل‌های در نظر گرفته شده در طراحی، از پر استفاده ترین پنل‌ها برای ساخت نیروگاه های خورشیدی هستند. در شبیه سازی‌ها پنل‌های واقع بر روی نما، به صورت 90° درجه جنوبی با مساحت کل 5050 متر مربع در نظر گرفته شده اند. در حالی که پنل‌های نصب شده بر روی بام به صورت 30° درجه جنوبی با مساحت کل 2278 متر مربع در نظر گرفته شده اند.

طرح‌های BIPV مورد بررسی از نوع یکپارچه با نمای ساختمان می‌باشند که در آنها سطح بیرونی نمای ساختمان از پنل پوشیده شده است. انرژی الکتریکی تولیدی پنل‌ها به کمک نرم افزار PVSYS تعیین می‌شود. برای این

*Building Integrated Photovoltaic (BIPV)



نوری استفاده کند. پنل‌های فیلم نازک نوظهوراند و دارای قیمت بسیار پایینی هستند. اما این پنل‌ها دارای توان خروجی پایینی هستند.

۴- شبیه سازی به صورت نصب بر بام (طرح D)

نتایج این طرح در متن مقاله با حرف D نشان داده شده است. در این حالت اکثراً پنل‌های تک یا چند کریستالی استفاده می‌شوند. لذا استفاده از حالت‌های دیگر منطقی نیست. پنل‌های مورد استفاده پنل ۳۰۰ وات مونو کریستال است. در این حالت سایه کمتری بروی پنل‌ها قرار می‌گیرد و بازدهی آنها افزایش می‌یابد.

۳- نتایج و بحث

پس از وارد کردن ویژگی‌های هر طرح در نرم افزار، شبیه سازی انجام می‌شود و گزارشات و خروجی نرم افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۲ مشخصات فنی مورد نیاز برای شبیه سازی و همچنین میزان تزریق برق به شبکه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، بیشینه میزان برق تولید شده توسط شهرک در سال حدود ۸۷۱ MW می‌باشد، که در طرح A رخ داده است. در طرح B به دلیل قیمت پایین تر پنل‌های مورد استفاده، هزینه‌ها نسبت به طرح A پایین تر آمده است. هزینه راه اندازی طرح B، پنج میلیارد و ششصد میلیون می‌باشد که شامل ۷۰۲۰ پنل کادمیم تلراید است. همچنین زاویه پنل‌ها در طرح‌های A، B و C، ۹۰ درجه است که بروی نمای ساختمان قرار دارد. مساحت مورد استفاده پنل‌ها برای در این سه طرح، ۵۰۵۰ متر مربع است. با توجه به جدول ۲، تولید برق در طرح C، بسیار پایین آمده است و به حدود ۳۰۰ MW در سال رسیده است. این میزان برق تولیدی بدلیل عملکرد ضعیف سلول‌های فیلم نازک است، اگر چه پنل‌های موجود این طرح هزینه راه اندازی پایینی دارند. در طرح D، زاویه پنل‌ها ۳۰ درجه با سطح افقی می‌باشد و تعداد پنل‌های استفاده شده، ۱۳۶۴ عدد است، که این تعداد در مساحت ۲۲۷۸ متر مربع روی بام قرار گرفته است. هزینه ایجاد این طرح به ۲/۶ میلیارد می‌رسد. اطلاعاتی شامل تابش موثر نور خورشید بر روی پنل‌ها پس از کسر هدر رفت نور (GlobEff)، تابش رسیده به سطح پنل‌ها (GlobInc)، دمای محیط (T) و تابش نور خورشید به سطح افق با وجود گرد و غبار در جو (DiffHor) و تابش نور خورشید به سطح افق (GlobHor) در جدول ۳ با عنوان اطلاعات هواشناسی در طول یک سال، ارائه شده است.

شکل ۲ الف، میزان انرژی تولید شده در ماه‌های مختلف سال توسط پنل‌ها را نشان می‌دهد. همچنین میزان برق تزریقی به شبکه در شکل ۲ ب ارائه شده است.

منظور، در ابتدا نمای سه بعدی ساختمان در نرم افزار، نوع و ابعاد پنل و ساختمان طراحی می‌شود. سپس ویژگی هر یک از پنل‌ها به نرم افزار معرفی می‌شود.

شهرک مورد بررسی متشکل از چهار ردیف ساختمان می‌باشد که در هر ردیف هشت بلوک وجود دارد. این ساختمان‌ها بصورت دوتایی در کنار یکدیگر قرار گرفتند. ارتفاع ساختمان‌های زوج ۲۴ و ارتفاع ساختمان‌های فرد ۱۶ متر می‌باشد. فاصله بین هر ردیف طبق استانداردهای ملی ساختمان، حداقل ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. بین ردیف‌ها مسیر کشی و درختکاری انجام شده است. در محیط سه بعدی نرم افزار می‌توان شهرک مسکونی را همراه با پنل‌های مورد استفاده رسم کرد و شرایط ایجاد سایه را بصورت دقیق بررسی کرد. شکل ۱، نمای سه بعدی رسم شده از شهرک مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ راندمان پنل‌های استفاده شده در طراحی [۲۰]

نوع پنل	راندمان (درصد)
مونوکریستال	۱۸/۵
کادمیم تلراید	۱۴
فیلم نازک	۹

پنل‌ها به صورت عمود قسمتی از نمای ساختمان را تشکیل می‌دهند. پنل‌ها می‌توانند صد درصد جایگزین نما شوند و یا بر روی نما تعبیه شوند. میزان برق تولید شده این دو حالت یکسان است اما هزینه نصب و راه اندازی حالت دوم بیشتر است. چرا که علاوه بر متریکال نمای ساختمان، باید گیره‌هایی برای نگهداری پنل‌ها به صورت عمود تعبیه شود. همچنین در بعضی از طراحی‌ها برای زیباتر شدن نما، پنل‌ها را پشت شیشه‌ها و در لایه درونی قرار می‌دهند. به هر حال میزان برق تولید شده تفاوت چندانی نمی‌کند. اگر چه هزینه تمیز کردن پنل در این حالت کمتر می‌شود. اینورتر مورد استفاده در شبیه سازی sunny tripower 60 می‌باشد که دارای توان ۶۰ کیلو وات است.

چهار طرح مورد بررسی قرار گرفته در این پژوهش عبارتند از:

۱- پنل مونو کریستال (طرح A)

نتایج این طرح در متن مقاله با حرف A نشان داده شده است. سلول‌های مورد استفاده در طرح A، سلول مونو کریستال است که دارای ۳۰۰ وات توان خروجی می‌باشند. پنل‌های مونو کریستال دارای چینشی بسیار منظم می‌باشند که از این رو بهترین گزینه جهت نصب در مناطق با تابش خورشید بالا است.

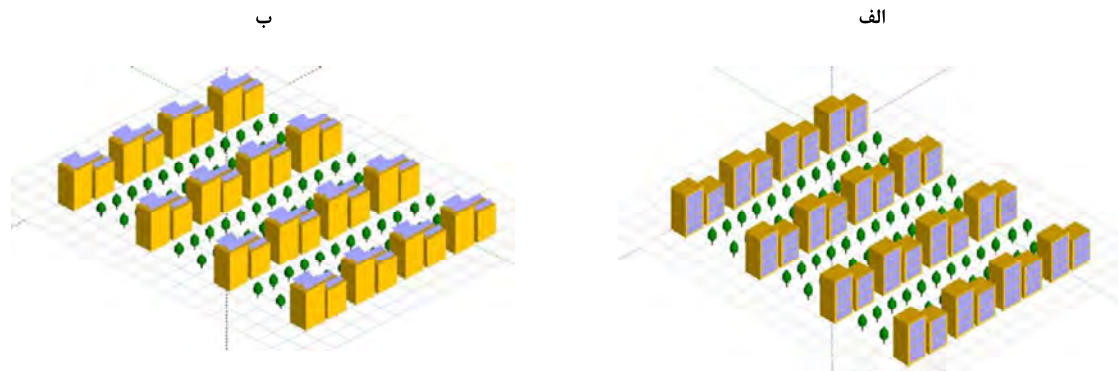
۲- پنل کادمیم تلراید (طرح B)

نتایج این طرح در متن مقاله با حرف B نشان داده شده است. نسبت به پنل‌های مونو کریستال، پنل‌های کادمیم تلراید مقاومت بیشتری در مقابل هوای گرم دارند. اما راندمان آنها کمتر است و این بدان معناست که مساحت بیشتری اشغال می‌کنند.

۳- پنل لایه نازک (طرح C)

نتایج این طرح در متن مقاله با حرف C نشان داده شده است. این نوع از پنل‌ها دارای انعطاف پذیری بالایی هستند و معمار می‌تواند آنها را به صورت





شکل ۱ نمای سه بعدی شهرک مورد بررسی الف) نصب پنل‌ها بر روی نمای ساختمان. ب) نصب پنل‌ها بر روی بام

جدول ۲ مشخصات فنی مورد نیاز جهت شبیه سازی عملکرد پنل‌ها و میزان برق تولیدی

طرح	A	B	C	D
نوع پنل	مونوکریستال ۳۰۰ W	کادمیم تلراید ۱۲۰ W	فیلم نازک ۳۰۰ W	مونوکریستال ۳۰۰ W
زاویه پنل‌ها	۹۰ درجه	۹۰ درجه	۹۰ درجه	۳۰ درجه
جهت پنل‌ها	جنوبی	جنوبی	جنوبی	جنوبی
مساحت کل پنل‌ها (m ²)	۵۰۵۰	۵۰۵۰	۵۰۵۰	۲۲۷۸
توان نامی کل مجموعه	۹۰۷/۲ kW	۸۴۲ kW	۳۲۴ kW	۴۰۹ kW
برق تولیدی در سال	۸۷۱ MW	۷۹۶ MW	۲۹۸ MW	۶۸۰ MW

جدول ۳- اطلاعات هواشناسی

ماه	GlobHor kWh/m2	DiffHor kWh/m2	T Amb oC	GlobInc kWh/m2	GlobEff kWh/m2
January	۸۱/۳	۳۵/۸	۲/۳۵	۱۲۱/۴	۱۰۴/۷
February	۹۷/۷	۳۷/۸	۵/۵۲	۱۱۳/۶	۹۸/۹
March	۱۴۱/۳	۵۹/۷	۱۱/۳۱	۱۱۸/۸	۹۸/۸
April	۱۷۳/۲	۶۰/۳	۱۵/۹۱	۹۵	۷۳/۵
May	۲۰۸/۲	۶۹/۹	۲۱/۵۴	۷۸/۲	۵۵/۹
June	۲۲۲/۸	۶۴/۶	۲۵/۵۹	۶۵/۶	۴۴/۷
July	۲۲۱/۳	۷۰/۹	۲۹/۵۱	۷۳/۸	۵۱/۳
August	۲۰۸/۷	۶۰/۱	۲۸/۹۹	۹۷/۴	۷۳/۳
September	۱۷۳/۳	۴۹/۴	۲۴/۳۲	۱۲۴	۱۰۱/۶
October	۱۳۰/۶	۴۲/۲	۱۸/۵۶	۱۴۲/۵	۱۲۴/۶
November	۹۱/۸	۳۳/۲	۹/۹۴	۱۳۰/۴	۱۱۴/۲
December	۷۴/۵	۳۰/۲	۴/۳۴	۱۲۰/۶	۱۰۴/۱
سال	۱۸۲۴/۷	۶۱۴/۱	۱۶/۶۴	۱۲۸۱/۳	۱۰۴۵/۶

موضوع مرتبط با شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر است. از آنجا که تولید انرژی با دما رابطه عکس دارد در ماه گرم سال (ژوئن، ژولای و آگوست) پنل‌ها تولید انرژی کمی دارند. زیرا در هوای گرم و بیشتر از ۲۵ °C زمانی که یک درجه به گرمای محیط اضافه شود از راندمان تولیدی یک درصد کم می شود

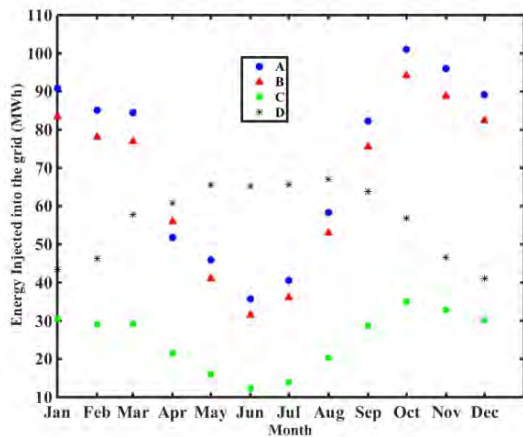
با توجه به شکل ۲، بیشترین و کمترین انرژی تولیدی (یا تزریقی به شبکه) به ترتیب در ماه اکتبر (October) و ژوئن (June) اتفاق می‌افتد. این درحالی است که طبق جدول ۳ بیشترین میزان تابش به میزان ۲۲۲/۸ kWh/m² در ماه ژوئن رخ می‌دهد اما در این ماه بیشینه انرژی به شبکه منتقل نمی‌شود. این



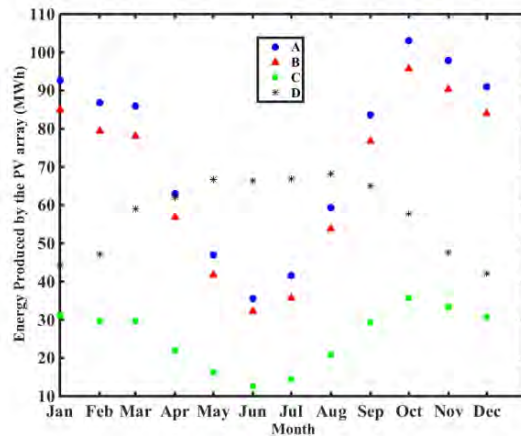
به ماه آگوست و پس از آن مربوط به ماه‌های می، ژوئن و ژولای می‌باشد. قبل و بعد از این ماه‌ها بدلیل کاهش تابش خورشید (مطابق جدول ۳)، میزان برق تولیدی نیز با شیب تندی کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۲، کل برق تولید شده (تزریقی به شبکه) برای طرح B، ۷۹۷ MW در سال است. این پنل‌ها نسبت به پنل مونوکریستال انرژی کمتری تولید می‌کنند و کارایی ضعیفتری نسبت به پنل‌های مونوکریستال دارند. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تولید برق برای همه طرح‌های BIPV، در ماه اکتبر است که دمای هوا به $18/6^{\circ}\text{C}$ و شدت تابش خورشید به kWh/m^2 $130/6$ می‌رسد. در حالی که در طرح Top Roof بیشترین برق تولیدی مربوط

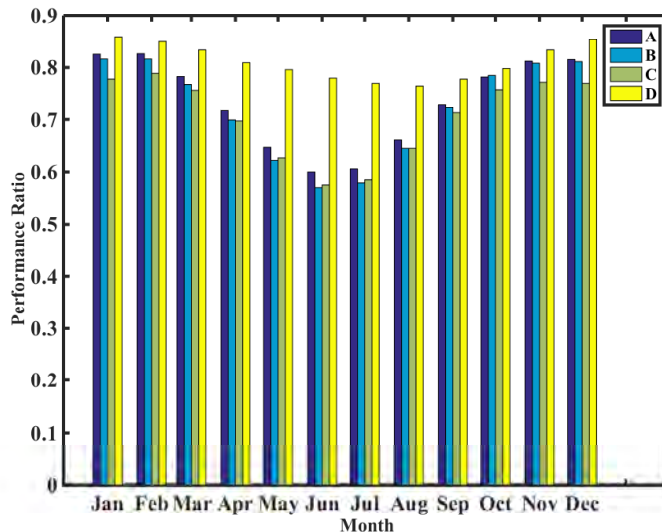
(ب)



(الف)



شکل ۲ الف) انرژی تولید شده توسط پنل‌ها، ب) برق تزریق شده به شبکه



شکل ۳ ضریب عملکرد پنل‌ها در ماه‌های مختلف سال

با توجه به شکل ۲ و جدول ۳، بیشترین دمای محیط به حدود 29°C می‌رسد. در این دما انرژی تابشی بسیار بالا است اما میزان کمی انرژی تولید می‌شود. این امر ساخت سلول‌های که به گرما حساس نباشد را بسیار با اهمیت نشان می‌دهد.

از شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان برق تزریقی به شبکه به ترتیب متناسب به طرح‌های A ($871/2 \text{ MWh/year}$)، B (797 MWh/year)، C ($796/6 \text{ MWh/year}$) و D (680 MWh/year) می‌باشد.



بنابراین نتیجه می‌شود که بهترین راه برای سود دهی سریعتر و تامین برق مناسب، تلفیق حالت‌های BIPV و Top Roof با یکدیگر است. همچنین قیمت خرید برق تولیدی از نیروگاه خورشیدی یک عامل حمایتی مناسب جهت سرمایه‌گذاری و راه اندازی سیستم‌های BIPV است. از طرف دیگر نرخ تورم و نوسانات بازار اثرات منفی شدیدی بر روی بازگشت سرمایه خواهد گذاشت. طرح شماره سه نیز تنها برای حالتی مناسب است که معماری بر تولید برق الویت داشته باشد.

جدول ۴ پارامترهای رابطه ۱

پارامتر	مقدار	واحد
عمر تجهیزات n	۱۰	سال
نرخ بهره	۲۵	%
هزینه ثابت FC	طبق جدول ۵	میلیون تومان
هزینه عملیاتی OC	طبق جدول ۵	میلیون تومان /MWh
ارزش اسقاط SV	۵٪ هزینه اولیه تجهیزات	میلیون تومان
قیمت فروش برق تولیدی PC	۰/۳۲	میلیون تومان /MWh

جدول ۵ وضعیت اقتصادی شبیه سازی

طرح	هزینه اولیه (میلیون تومان)	هزینه نگهداری (میلیون/MWh)	نرخ بازگشت سرمایه (سال)
A	۵۷۰۰	۴۲	۶/۷۱
B	۵۶۰۰	۴۰	۷/۲۶
C	۲۶۰۰	۴۰	۱۳/۰۱
D	۲۶۰۰	۳۵	۳/۹۷

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از ۴ طرح مختلف به صورت BIPV و Top Roof بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در یک مجتمع مسکونی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در طراحی نیروگاه از ۳ نوع مختلف پنل استفاده شد. با توجه به اینکه راندمان و ویژگی هر کدام از پنل‌ها متفاوت است، انرژی الکتریکی متفاوتی توسط آنها تولید شده است. نتایج شبیه سازی‌ها نشان دادند که طرح A، میزان برق بیشتری را به شبکه تزریق می‌کند (حدود ۸۷۱/۲ MWh/year). با این وجود مدت زمان برگشت سرمایه برای طرح D معادل با ۳/۹۷ سال است، که این مقدار کمترین میزان در بین طرح‌های پیشنهاد شده است. با تلفیق طرح A و D با یکدیگر میزان برگشت سرمایه به ۳/۶۵ سال کاهش می‌یابد. بنابراین ترکیب دو طرح A و D از نظر اقتصادی نسبت به حالت‌های A به تنهایی یا D به تنهایی مطلوبتر است و در دراز مدت می‌تواند سود دهی بالایی داشته باشد. فاکتورهایی چون قیمت خرید برق از نیروگاه، تورم و عدم ثبات بازار می‌توانند

ضریب عملکرد یکی از متغیرهای مهم در ارزیابی پنل‌های خورشیدی است که به صورت نسبت انرژی خروجی واقعی به انرژی خروجی تئوری تعریف می‌شود. ضریب عملکرد به طور عمده مستقل از چینش پنل‌ها و انرژی خورشیدی رسیده به سطح پنل‌ها است. به همین علت ضریب عملکرد یک پارامتر مهم برای مقایسه برق تزریقی به شبکه در موقعیت‌های مختلف جهان می‌باشد. شکل ۳ ضریب عملکرد ۴ طرح تعریف شده را بصورت ماهانه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بهترین ضریب عملکرد مربوط به ماه اول سال است. سایه اندازی بلوک‌ها بر یکدیگر در برخی از ماه‌ها راندمان نیروگاه را به زیر ۶۰ درصد می‌آورد. دلیل این امر زاویه خورشید با زمین در ماه‌های مذکور است. پنل‌های کادمیم تلراید به علت نوظهور بودن راندمان پایینی دارند و فضای زیادی اشغال می‌کنند، اما تلفات گرمایی پایینی دارند. با توجه به شکل ۳، ضریب عملکرد این پنل‌ها در بعضی ماه‌های سال خیلی کم است که علت آن می‌تواند به دلیل راندمان پایین این پنل‌ها باشد. پنل‌های فیلم نازک نیز راندمان پایینی دارند و انرژی زیادی را تلف می‌کنند اما چون قیمت پایینی دارند و همچنین به دلیل انعطاف بالا در ساختمان‌های BIPV استفاده می‌شوند. انرژی تولیدی این پنل‌ها در سال به مقدار MWh ۲۹۹ است که در مقایسه با سه طرح دیگر، کمترین میزان تولید برق است. این موضوع نشان دهنده ضعیف بودن این پنل در مقایسه با دیگر پنل‌ها است. از شکل ۳ نتیجه می‌شود که مقدار تلفات در طرح D بسیار کم شده است. درصد تلفات سایه به ۶ درصد رسیده است. اما مساحت قابل استفاده از پنل کمتر شده است. قرار دادن پنل‌ها بروی بام باعث می‌شود تابش بیشتری به سطح پنل‌ها برسد و باعث افزایش راندمان طرح می‌شود.

جهت مشخص کردن طرح مناسب، می‌بایست ملاحظات اقتصادی را در نظر گرفت. مقدار هدف در این کار سریعترین مدت زمان بازگشت سرمایه است. جهت محاسبه مدت زمان بازگشت سرمایه از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$\sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{FC}{(1+i)^k} \right) + OC \times y \times NC_k \right) \quad (1)$$

$$-SV \times \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right]_k - PC \times NC_{power} \times y = 0$$

پارامترهای رابطه ۱ در جدول ۴ تشریح شده‌اند. در رابطه ۱، زمان برگشت سرمایه با y نشان داده شده است. با توجه به مینیمم زمان برگشت سرمایه می‌توان طرح مناسب را مشخص کرد. در محاسبات برگشت سرمایه، عمر تجهیزات ۱۰ سال و ارزش اسقاط تجهیزات ۵٪ درصد هزینه اولیه تجهیزات، در نظر گرفته شده است.

مطابق جدول ۵ طرح چهارم بهترین ارزش اقتصادی را داراست و این طرح دارای بهترین بازدهی اقتصادی است یعنی در مدت کوتاهی پول سرمایه گذاری شده را به ما برمی‌گرداند. با توجه به اطلاعات جداول ۴ و ۵ و استفاده از رابطه ۱، سریعترین زمان برگشت سرمایه معادل ۳/۹۷ سال خواهد شد. ترکیب طرح A و D با احتساب ۳۰٪ کاهش در هزینه‌های اولیه و نگهداری در این طرح ترکیبی، منجر به بازگشت سرمایه ۳/۶۵ سال می‌شود.



hybrid particle swarm optimization models. *Energy Conversion and Management*, Vol. 183, 2019.

- [19] J., Alsarraf, H., Moayedi, A., Rashid, M., Muazu, A., Shahsavari, Application of PSO-ANN modelling for predicting the exergetic performance of a building integrated photovoltaic/thermal system. *Engineering with Computers*, 2019.
- [20] Irvine, S., *Solar Cells and Photovoltaics, in Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, S. Kasap and P. Capper, Editors, Springer International Publishing: Cham., 2017.

سرعت برگشت سرمایه و همچنین سرمایه گذاری در این حوزه را تحت الشعاع قرار دهند.

منابع و مآخذ

- [1] M. Keramati, H. Beiki, The effect of pH adjustment together with different substrate to inoculum ratios on biogas production from sugar beet wastes in an anaerobic digester. *Journal of Energy Management and Technology*, Vol. 1, No. 2: pp. 6-11, 2017.
- [۲] ص. ایوب زاده، ح. بیکی، امکان سنجی توان انرژی باد در مناطق مختلف ایران بر مبنای داده های سینوپتیک هواشناسی جهت تولید الکتریسیته. *انرژی های نو و تجدیدپذیر*، سال شش، شماره یک، ۱۳۹۸.
- [3] H., Beiki, M. Dadvar, R. Halladj, Pore network model for catalytic dehydration of methanol at particle level. *AIChE Journal*, Vol. 55, No. 2, p p. 442-449, 2009.
- [۴] ا. سوختانلو، ح. بیکی، مدل سازی اثر نانوذرات سیلیکا در لایه میانی یک استخر خورشیدی با گرادیان شوری، *مدل سازی در مهندسی*، سال پانزده، شماره پنجم، ۱۳۹۷.
- [5] T., Arunkumar, D., Murugesan, R., Kaiwalya, D., Denkenberger, C., Viswanathan, D., Rufuss, D., Winfred, R., Velraj, Effect of nano-coated CuO absorbers with PVA sponges in solar water desalting system. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 148, No. 5, ۲۰۱۸.
- [6] W., Chen, C., Zou, X., Li, L., Lu, Experimental investigation of SiC nanofluids for solar distillation system: Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water-based fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, 2017.
- [7] E., Khodabandeh, M. R., Safaei, S., Akbari, O. A., Akbari, A., Alrashed, Application of nanofluid to improve the thermal performance of horizontal spiral coil utilized in solar ponds : Geometric study, *Renewable Energy*, Vol.122, 2018.
- [8] H., Awad, M., Gül, E., Salim, H., Yu, Predicting the energy production by solar photovoltaic systems in cold-climate regions. *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 37, No. 10, ۲۰۱۸.
- [9] H., Beiki, E. Soukhtanlou, Improvement of salt gradient solar ponds' performance using nanoparticles inside the storage layer. *Applied Nanoscience*, Vol. 9, No. 2, 2019.
- [۱۰] ر. وفایی، بررسی شیوه های طراحی سیستم های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان. *صفه*، سال نوزده، شماره چهل و نه، ۱۳۸۸.
- [11] M., Piratheepan, T.N. Anderson, Performance of a building integrated photovoltaic/thermal concentrator for facade applications. *Solar Energy*, Vol. 153, 2017.
- [۱۲] ر. وفایی، ش. پوردیهیمی، برآورد تابش کل خورشید روی سطح فتوولتائیک های یکپارچه با ساختمان نمونه موردی شهر تهران. *صفه*، سال بیست و پنج، شماره دو، ۱۳۹۱.
- [13] Sánchez-Palencia, P., N. Martín-Chivelet, and F. Chenlo, Modeling temperature and thermal transmittance of building integrated photovoltaic modules., *Solar Energy*, Vol. 184, 2019.
- [14] B., Fina, H., Auer, W., Friedl, Profitability of active retrofitting of multi-apartment buildings: Building-attached/integrated photovoltaics with special consideration of different heating systems. *Energy and Buildings*, Vol. 190, No. 1, 2019.
- [15] S., Yang, A., Cannavale, D., Prasad, A., Sproul, F., Fiorito, Numerical simulation study of BIPV/T double-skin facade for various climate zones in Australia: Effects on indoor thermal comfort. *Building Simulation*, Vol. 12, No. 1, 2019.
- [16] M. M., Fouad, L.A., Shihata, A.H., Mohamed, Modeling and analysis of Building Attached Photovoltaic Integrated Shading Systems (BAPVIS) aiming for zero energy buildings in hot regions. *Journal of Building Engineering*, Vol. 21, 2019.
- [17] Y. B., Assoa, L., Gaillard, Ch., Ménézo, N., Negri, F., Sauzedde, Dynamic prediction of a building integrated photovoltaic system thermal behaviour. *Applied Energy*, Vol. 214, 2018.
- [18] A., Alnaqi, H., Moayedi, A., Shahsavari, T., Nguyen, Prediction of energetic performance of a building integrated photovoltaic/thermal system thorough artificial neural network and

