

افزایش بازده پوسته ساختمانی مولد الکتریسیته با بهره‌گیری از

سامانه ترکیبی "بازتابنده تخت-پیل خورشیدی" در نمای جنوبی*

Improving the Efficiency of Electricity-Generating Building Envelopes Using a Hybrid System of Flat Concentrator & Photovoltaic Panels (FCPV) in South Facade

علیرضا فرهنگی خانقاه^۱، یوسف گرجی مهلبانی^۲ (نویسنده مسئول)

سید مجید مفیدی شمیرانی^۳، حسین مدی^۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲

چکیده

قابلیت استفاده از نور خورشید در تأمین انرژی مورد نیاز بنا از طریق جذب آن توسط پوسته ساختمان^۱ لزوم توجه به طراحی پوسته را به عنوان عنصری انرژی-کارا^۲ در ساختمان به منظور تولید انرژی الکتریکی موجب گردیده است. میزان تولید انرژی الکتریکی از یک سامانه پوسته ساختمانی یکپارچه با پیل خورشیدی^۳ به عوامل گوناگونی از جمله شرایط تابشی سایت، جهت‌گیری ساختمان نسبت به مسیر حرکت خورشید، ساختار شکلی پوسته بنا و بازده پیل خورشیدی^۴ مورد استفاده در سامانه بستگی دارد. از دسته عوامل فوق، ساختار شکلی پوسته بنا می‌تواند در ترکیب با بازتابنده‌های تخت^۵ موجب تشدید میزان تابش رسیده به سطح پوسته و در نتیجه افزایش بهره‌وری الکتریکی از سطح بنای یکپارچه با پیل خورشیدی گردد. این پژوهش با هدف بررسی اثر بازتابش بر میزان افزایش بازده پیل خورشیدی در پوسته ساختمان طی یک تحقیق آزمایشی میزان افزایش توان خروجی پیل واقع در نمای جنوبی را به میزان ۱۳،۱۹ درصد با اضافه کردن بازتابنده تخت عمود بر سطح پیل در سمت غرب و شرق آن و این مقدار را برای همان پیل با افزودن بازتابنده تخت در سطح افق ۱۱،۱۹ درصد ارزیابی نمود. از طرف دیگر تحلیل زوایای تابشی خورشید در سایت مورد مطالعه بازه‌ای معادل ۲۶ درجه غربی تا ۲۶ درجه شرقی را محدوده‌ای مناسب جهت الحاق پیل خورشیدی در بین دو بازتابنده تخت برای جذب حداکثر بازتابش سالانه توصیه می‌نماید. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بازتابنده تخت مستطیلی با عمقی معادل نصف ارتفاع پیل محصور در بین دو بازتابنده غربی و شرقی بهینه‌ترین پوشش انعکاس را در طول سال خواهد داشت. پژوهش انجام شده از منظر هدف، کاربردی و از جهت روش در دسته پژوهش‌های توصیفی-تجربی قرار دارد و نتیجه‌گیری به روش استدلال منطقی است.

واژه‌های کلیدی:

پوسته ساختمان، انرژی-کارا، پیل خورشیدی، بازتابنده تخت، سامانه ترکیبی، بازده الکتریکی.

۱. دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. Ar.farhangi@gmail.com

۲. دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. gorji@arc.ikiu.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. S_m_mofidi@iust.ac.ir

۴. استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. medi@arc.ikiu.ac.ir

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان "طراحی پوسته‌های بیش بازده خورشیدی با سامانه تلفیقی در اقلیم سرد ایران" در دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) می‌باشد.

سال ۲۰۱۴ میلادی نزدیک به ۱/۵ برابر افزایش داده است به طوری که نرخ رشد میانگین سالانه تا سال ۲۰۲۰ برای این راهبرد خورشیدی نزدیک به ۴۰ درصد در سراسر جهان و تا ۵۰ درصد برای قاره آسیا پیش بینی می شود (Tabakovic, et al., 2017, p. 995).

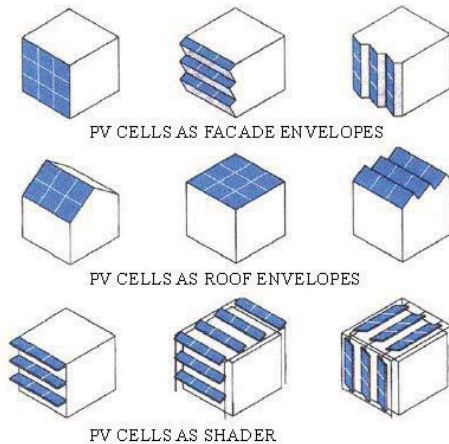


Fig. 1 Different arrangements of Pv cells and electric generator

عناصر تشکیل دهنده پوسته ساختمان که در معرض نور خورشید قرار دارند شامل جداره‌ها و بازشوهای نمای خارجی و بام‌ها هستند (Briggs, 2016, p. 2) لذا سه الگوی کلی برای ترکیب صفحات خورشیدی با پوسته بنا وجود دارد که عبارتند از ترکیب با پوسته نما، استفاده از پیل به عنوان پوشش بام و بهره‌گیری از آن به عنوان سایه‌بان (شکل ۱) (Keller, 2013, p. 32). در ارزیابی اخیر اروپا از ساختمان‌های یکپارچه با پیل خورشیدی در این قاره سهم نمای مولد الکتریسیته ۵۰ درصد و سهم بام‌های مولد ۳۰ درصد از کل ساختمان‌های مورد مطالعه بوده است و مابقی بناها از راهبردهای ترکیبی نما و بام مولد الکتریسیته استفاده کرده‌اند (Delponete, Marchi, Frontini, Polo, Fath, & Batey, 2015, p. 3046). در تحقیق دیگری از مجموع ساختمان‌های مولد الکتریسیته خورشیدی این نسبت برابر ارزیابی گردیده است (Mustafa, et al., 2017, p. 855). دلایل استقبال از نمای مولد الکتریسیته نسبت به بام‌ها، بازه بیشتر نمای یکپارچه با پیل خورشیدی نسبت به بام در زمستان، تغییر کمتر تولید روزانه و فصلی تولید الکتریسیته و نیز جایگزینی مناسب صفحات پیل خورشیدی به عنوان پوشش سطح می‌تواند باشد (Hofer, Groenewolt, Jayathissa, & Nagy, 2016, p. 134). از طرف دیگر نمای ساختمان سطحی گسترده را برای نصب پیل خورشیدی بدون نیاز به اشغال سطح زیربنای اضافی در مناطق پرتراکم

طبق ارزیابی آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۳۵ میلادی نیاز به انرژی تا یک سوم مقدار آن در سال ۲۰۱۱ افزایش خواهد یافت (IEA, World Energy Outlook (Martinez-Rubio, Sanz-Adan, و 2013, 2013, p. 197) (Santamaria, & انتشار گازهای گلخانه‌ای و متعاقب آن افزایش دمای کره زمین تا ۸۵/ درجه سانتیگراد نسبت به دمای آن در دوران قبل از انقلاب صنعتی و نیز محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی موجب توجه روز افزون جهانی به تولید انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر^۷ شده است (Abu-Bakar, et al., 2016, p. 2). بخش ساختمان با سهمی بیش از ۳۳ درصد از کل سرانه مصرف انرژی در جهان بزرگترین مصرف کننده انرژی بوده (IEA, Transition to Sustainable Buildings: strategies and opportunities to 2050, 2013, p. 1) و همچنین به تنهایی تولید کننده نزدیک به ۲۵ درصد از مجموع گازهای گلخانه‌ای است (Dean, Dulac, Petrichenko, & Graham, 2016, p. 4). تراکم نیاز به انرژی در ساختمان‌های شهری که حدود ۷۰ درصد از مصرف نهایی انرژی را در بخش ساختمان به خود اختصاص می‌دهند (IEA, Energy Technology Perspective 2016; Towards Sustainable Urban Energy Systems, 2016, ص. ۶) و نیز هدر رفت نزدیک به ۱۱ درصد از انرژی تولید شده توسط نیروگاه‌های بزرگ ضمن انتقال آن از طریق خطوط شبکه به شهرها (Vickstrom, 2016, p. 4) باعث رشد سریع رویکرد تأمین انرژی از طریق شبکه‌های کوچک توزیع و همچنین علاقه به تولید غیرمتمرکز آن در محل استفاده نهایی- یعنی ساختمان‌ها- در پانزده سال اخیر در جهان شده است (WECouncil, 2016, p. 4). در ایران نیز سهم ۴۰ درصدی مصرف انرژی توسط بخش ساختمان از کل سرانه تولید انرژی در کشور (سایا، ۱۳۹۵) نشان دهنده نیاز به تأمین بخشی از این سهم از منابع تجدیدپذیر انرژی توسط خود ساختمان‌ها به عنوان مصرف کنندگان نهایی انرژی می‌باشد. پوسته ساختمان به عنوان خارجی‌ترین بخش در ارتباط با محیط کنترل نشده بیرون (Hegger, Fuchs, Stark, & Zeumer, 2008, p. 82) ساختگاه مناسبی جهت جذب انرژی تابشی خورشید است به طوری که تولید الکتریسیته از طریق پوسته ساختمان‌های یکپارچه با پیل خورشیدی به عنوان پیشروترین بخش از صنعت خورشیدی^۸ در سراسر جهان معرفی شده است (Delisle & Kummert, 2014, p. 50) رشد فزاینده این صنعت در سال‌های اخیر، تولید برق خورشیدی حاصل از آنرا در جهان در سال ۲۰۱۵ نسبت به

بهینه در طراحی نماهای پربازده^{۱۳} مولد برق خورشیدی است. در گام بعدی تحقیق و پس از تحلیل اثر عوامل مؤثر بر بازده (متغیرهای تحقیق)، به منظور پیشگیری از خطاها و اشتباهات احتمالی آتی، با تکیه بر روش «مطالعه آزمایشی^{۱۴}» تأثیر یکی از متغیرهای مورد نظر تحقیق بر روی متغیر وابسته با استفاده از رویکرد تجربی و تحلیل هندسی ارزیابی می‌گردد.

۲- پیشینه پژوهش

یک تحقیق جامع بین‌المللی بر روی حجم وسیعی از پژوهش‌های انجام شده درباره ساختمان‌های یکپارچه از بنا بازده آنها را در تولید الکتریسیته بین ۸ تا ۱۸ درصد عنوان می‌کند (Mustafa, et al., 2017, p. 855) همین تحقیق بیان می‌دارد که گسترش استفاده از سامانه ساختمان‌های یکپارچه با پیل خورشیدی وابسته به ارتقای (بازده) پیل‌های خورشیدی است (Mustafa, et al., 2017, p. 834). با توجه به فیزیک پیل‌های خورشیدی عوامل اصلی مؤثر بر بازده آنها شامل تغییرات روزانه و فصلی شدت تابش، موقعیت سایت و دمای هوای محیط، زاویه صفحه پیل خورشیدی نسبت به افق^{۱۵}، زاویه جهت‌گیری صفحه پیل خورشیدی نسبت به جنوب^{۱۶}، سایه‌اندازی و میزان همگنی نور تابیده شده، دمای مدول و میزان تهویه آن می‌شود (Thomas & Forham, 2001, p. 10).

شهری فراهم می‌آورد، ضمناً نصب عمودی پیل‌ها، آنها را در برابر نزولات جوی و برف، آلودگی ناشی از فضولات پرندگان، نشست گرد و غبار و ریزش برگ درختان مصون می‌دارد. در عین حال جهت‌گیری غیربهینه نما و نیز بالا رفتن دمای مدول‌های پیل خورشیدی^۹ دو مشکل عمده در ساختار نماهای مولد الکتریسیته است (Soria, Gerritsen, Leffillaster, & Broquin, 2016, p. 52).

میزان تولید انرژی الکتریکی از یک سامانه^{۱۰} پوسته ساختمانی یکپارچه با پیل خورشیدی به شرایط تابشی محل و تعداد روزهای آفتابی، دمای هوا، جهت‌گیری بنا نسبت به مسیر حرکت نور خورشید، ساختار شکلی پوسته بنا و بازده پیل خورشیدی مورد استفاده در سامانه وابسته است. از عوامل فوق، شرایط تابشی محل به عرض جغرافیایی، فصل، روز و ساعت تابش مربوط می‌شود (رئوفی راد، ۱۳۸۵) که در کنترل طراح نیست و جهت‌گیری بنا نیز به جز در معماری‌های پویا^{۱۱} معمولاً ثابت است اما بازده پیل خورشیدی می‌تواند با پیش‌بینی تمهیداتی در ساختار شکلی پوسته دستخوش تغییر شود از این رو این پژوهش با هدف تحلیل چالش‌های موجود در طراحی نماهای ثابت^{۱۲} تولید کننده الکتریسیته و با بررسی عوامل کاهنده و یا افزایش‌دهنده بازده در سامانه‌های پیل خورشیدی به دنبال تعیین میزان اثر هر عامل در خروجی سامانه به منظور یافتن راهکارهای

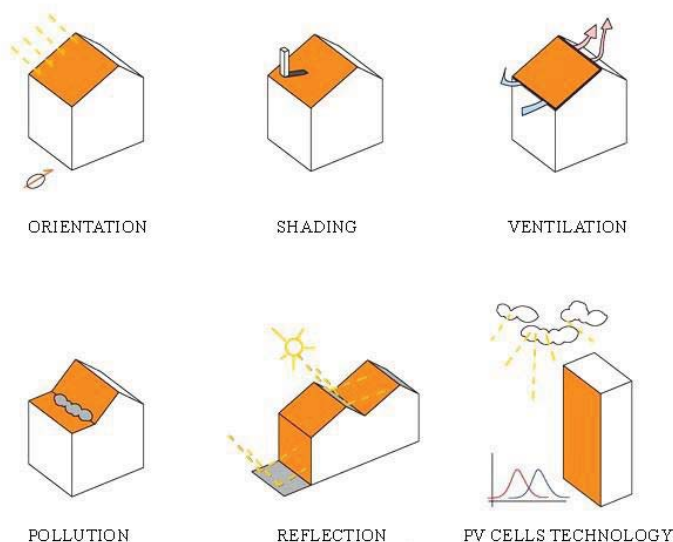


Fig. 2 Effective factors on the PV-cell performance

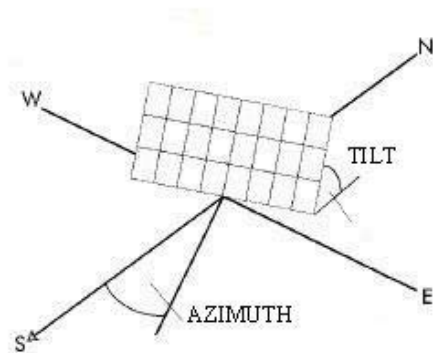


Fig. 3 The Tilt and azimuth of the PV cell (Thomas & Forham, 2001)

در مقابل تأثیر منفی اندکی بر ولتاژ مدار باز و میزان ضریب پوشش دارد (Ahmad & Hussein, 2001, p. 1333). راندل و همکاران (M.Ronneld, Karlsson, Krohn, & Wennerberg, 2000) افزایش بازده ۲۵-۲۰ درصد خروجی سالانه مدول‌ها را در سوئد (اقلیم سرد) با استفاده از بازتابنده تخت تأیید می‌نماید.

ماتسوشیما و همکاران (Matsushima, T. Setaka, & Muroyama, 2003, p. 612) که یک صفحه فوتولتائیک معمولی را تحت یک بازتابنده مسطح با ضریب تمرکز پایین قرار داده است افزایش بازده ۱/۵ برابر سامانه‌های را تأیید می‌نماید. مطالعات طبایی و عامری نشان می‌دهد با الحاق بازتابنده و خنک‌کننده آب بازده به ۵۰/۴ درصد می‌رسد. استیون سیتل (Seitel, 1975, ص. ۲۹۱) به تأثیر الحاق بازتابنده تخت به پیل خورشیدی می‌پردازد. پژوهش نشان می‌دهد که در میانه زمستان (انقلاب زمستانی) و در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه بازده ماکزیم زمانی است که زاویه بازتابنده با سطح گردآور است ۷۷ درجه باشد که در این حالت سامانه‌های ترکیبی بازدهی معادل ۴۰ درصد بیشتر از گردآور بدون بازتابنده دارد. زاویه بهینه برای اعتدال بهاری حدود ۹۵ درجه است که میزان افزایش بازده بیشتر از ۴۵ درصد می‌باشد. توسط راکش کومار (R.Kumar & Rosen, 2011, p. 511) و همکاران تأثیر اضافه کردن ۴ بازتابنده بر یک گردآور حرارتی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است.

کومار زاویه کجی گردآور با افق را صفر درجه لحاظ کرده است. اضافه کردن بازتابنده جنوبی و شمالی باعث افزایش جذب اشعه خورشید به میزان ۴۴ درصد در زمستان و ۱۴ درصد افزایش را در تابستان موجب می‌شود. اضافه کردن بازتابنده‌های شرقی و غربی به دلیل سایه‌اندازی اثر قابل چشم‌پوشی بر میزان جذب دارند. در صورت عدم وجود سایه بازتابنده‌های شرقی و غربی ۲۶-۱۴ درصد افزایش شدت

پژوهش‌های انجام شده درباره ساختمان‌های یکپارچه با پیل خورشیدی عمدتاً به مسایلی همچون، تحلیل اثر سایه‌اندازی بر بازده، تأثیر تهویه طبیعی یا مکانیکی بر خروجی سامانه، افزایش بازده از طریق متمرکز کننده‌های نور خورشید بر پیل‌های خورشیدی^{۱۷}، فن‌آوری ساخت پیل و تحلیل بازده سامانه‌های تلفیقی تولید حرارت و الکتریسیته خورشیدی از طریق ساختمان^{۱۸} پرداخته‌اند. بجز مقوله فناوری ساخت پیل‌ها در این پژوهش با هدف تحلیل عوامل مؤثر بر بازده و بررسی میزان اثر آنها، تحقیقات انجام شده در ۵ زمینه دسته‌بندی شده و به بررسی آنها به شرح زیر پرداخته شد.

۲-۱- افزایش شدت تابش

مطالعات صورت گرفته در این زمینه بیانگر استفاده از روش‌های مختلف جهت افزایش میزان شدت تابش بر روی دهانه گردآور خورشیدی است که شامل استفاده از بازتابنده‌های تخت و متمرکز کننده‌ها، استفاده از سامانه‌های ره‌گیری خورشید^{۱۹} می‌شوند. طبایی و عامری (Tabaei & Ameri, 2015, pp. 51-60) به منظور افزایش بازده سامانه‌های پیل خورشیدی از افزایش شدت تابش بوسیله بازتابنده تخت استفاده کرده و نتایج آنرا بررسی نموده‌اند، جهت جلوگیری از افزایش دمای پیل خورشیدی تحت بازتابش از یک لایه آب نازک که سطح صفحه گردآورنده را می‌پوشاند استفاده شده است این تحقیق تأکید می‌کند که اضافه کردن بازتابنده تخت هزینه سامانه را تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد در حالیکه بازده سالانه تا ۳۰ درصد بالا می‌رود. تحقیق دیگری در قاهره افزایش خروجی سالانه به میزان ۲۲ درصد را با استفاده از آینه تخت تأیید می‌نماید. این تحقیق نشان می‌دهد که بازتابنده تخت تأثیر بالایی بر جریان مدار کوتاه مدول، قدرت خروجی و بازده آن دارد. اما

طوریکه با استفاده از سامانه‌های گردش آب حلقوی^{۲۰} و تحت شرایط تابش 1321 w/m^2 بازده الکتریکی سامانه ۱۲ درصد و بازده کل ۶۵ درصد بوده است.

خلیفه و همکاران (Khelifa, Touafek, Ben Mousa, & Tabet, 2016, p. 175) با تشریح مزایای سامانه‌های ترکیبی به مدل‌سازی آن در نرم‌افزار انسیس ۱۴^{۲۱} برای بررسی جریان مایع و انتقال دما در یک سامانه‌های با خنک‌کننده آبی پرداخته است. نتیجه تحقیق کاهش دمای سلول از ۱۵ تا ۲۰ درصد بوده است. جین و همکاران (Jin, et al., 2010, p. 493) در یک پژوهش به تغییر بازده سامانه‌های ترکیبی تولید گرمایش و الکتریسیته خورشیدی با سیال هوا در صورت تغییر در میزان سرعت جریان هوا می‌پردازد. به طور کلی بازده سامانه‌های با افزایش سرعت عبور هوا در کانال‌های پشت صفحات گردآور خورشیدی افزایش می‌یابد اما در این بین افزایش بازده سامانه‌های ترکیبی که از کانال‌های با مقطع مستطیلی استفاده می‌کند بیشتر است به طوری که در تابش با شدت 117.4 kg/s با جریان هوا معادل 0.282 داخل کانال‌ها و دمای محیط معادل ۲۵ درجه سانتیگراد بازده الکتریکی سامانه‌های با $10/2$ درصد بازده گرمایی به 54.70 درصد و بازده کل به $64/72$ درصد می‌رسد. جون یانگ یون (Yun, Mc Evoy, & Steemers, 2007, p. 393) به تأثیر جداره هوای پشت صفحات فوتوولتائیک متصل به نما بر عملکرد حرارتی بنا و افزایش بازده آنها می‌پردازد این تحقیق تهویه پشت مدول‌ها را به میزان ۱۵ درصد در خنک کردن مدول‌ها مؤثر معرفی کرده و تأثیر آن در بازده را $1/5$ درصد عنوان می‌کند.

۲-۴- استفاده از سامانه ترکیبی تولید برق و حرارت

خورشیدی

بازده صفحات خورشیدی تلفیقی تولید حرارت و الکتریسیته^{۲۲} در اقلیم‌های مختلف ایران توسط جهرمی و همکاران بررسی شده است (Nemati Jahrom, Vadiiee, & Yaghoubi, 2015, p. 444) و پس از اندازه‌گیری بازده این سامانه را در سه شهر تبریز، شیراز و اصفهان نتیجه می‌گیرد که به طور کلی بازده خالص سامانه‌های در تبریز از ۲ شهر دیگر بالاتر است. به طوری که بازده مفید^{۲۳} سامانه در تبریز $9/7$ درصد در شیراز $9/6$ درصد و اصفهان نیز $9/6$ درصد برآورده شده است. این پژوهش بازده سامانه‌های تلفیقی را از ۵۲ درصد برای سامانه‌های بدون پوش تا ۵۸ درصد برای سامانه‌های صفحه - لوله^{۲۴} عنوان می‌کند. تحقیق بیچاو

تابش را در تابستان و ۵۶-۴۴ درصد افزایش را در زمستان ایجاد می‌کند. در تحقیق دیگری ابوبکر و همکاران (Abu-Bakar, et al., 2016, p. 10) با استفاده از سامانه‌های جدیدی از تشدید کننده‌های انرژی تابشی افزایش جریان ماکزیمم به میزان ۳ برابر یک پیل معمولی را اعلام کرده است.

۲-۲- کم کردن و حذف سایه روی مدول‌ها

نتایج پژوهش روبیو مارتینز و همکاران (Martinez-Rubio, Sanz-Adan, & Santamaria, 2015, p. 677) نشان می‌دهد که سایه‌اندازی مدول‌ها بر هم تأثیر بسیار بالایی بر کاهش بازده سامانه‌های آرایه فوتوولتائیک دارد. کوواج و اشمید (Kovach & Schmid, 1996, p. 124) به تحلیل اثر سایه بر بازده پیل‌های خورشیدی الحاقی به نماد می‌پردازد و میزان کاهش بازده تا ۲۰ درصد یک ساختمان در آلمان را عنوان می‌کند که به طور کلی سایه صبحگاهی و عصرگاهی تأثیر کمتری در بازده سالانه نسبت به سایه ظهرگاهی دارد. به طوری که سایه‌انداز واقع در شرق آرایه و سایه صبحگاهی افت بازده سالانه در حدود ۴ درصد اما سایه‌انداز واقع در بالای آرایه (سایه ظهرگاهی) افت بازدهی حدود $16/8$ درصد را در سال ایجاد می‌کند. ژوهانس هوفر و همکاران (Hofer, Groenewolt, Jayathissa, & Nagy, 2016, p. 150) کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای و ساخت نمونه عملی بهترین شکل ترکیب صفحات فوتوولتائیک در نما که قابلیت ره-گیری نور خورشید را داشته باشد را پیشنهاد می‌دهند. هدف این تحقیق کاهش سایه‌اندازی مدول‌ها در هم در یک فرم بهینه ترکیب آنها با یکدیگر است. آنها به این نتیجه رسیدند که: در ترکیب مدول‌ها در نما مهمترین عامل سایه‌اندازی آنها بر هم است که باعث افت الکتریکی ناشی از ناهمگنی شدت تابش و ایجاد اثر داغ شدن نقطه‌ای مدول‌ها می‌شود.

۲-۳- کاهش دمای گردآور خورشیدی

یکی از کارآمدترین روش‌های افزایش بازده گردآورهای خورشیدی و به خصوص پیل خورشیدی کاهش دمای سلول خورشیدی است. مطالعات طبایی و عامری نشان می‌دهد که دمای یک پیل خورشیدی در یک روز خورشیدی به ۶۵ درجه سانتیگراد می‌رسد که این میزان پس از الحاق بازتابنده به ۸۴ درجه سانتیگراد درجه رسیده که پس از عبور آب از روی آن به ۴۲ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد که موجب افزایش بازده تا $10/3$ درصد می‌گردد (Tabaei & Ameri, 2015, p. 53) در تحقیق دیگری عدنان ابراهیم و همکاران (Ibrahim, Mohd Yusef, & Mohd Hafiz, 2011, p. 439) نتایج یک نمونه عملی از سامانه‌های خورشیدی ترکیبی را عنوان می‌کند به

آزوف و همکاران با تأکید به بهینه بودن سامانه‌های ترکیبی گرمایش و تولید الکتریسیته بازده آن را ۱۸ درصد بالاتر از سامانه‌های پیل خورشیدی است چرا که انرژی حرارتی نیز تولید می‌کند؛ این مقاله همچنین تأیید می‌نماید که بازده سامانه‌های ترکیبی با پوشش شیشه از سامانه‌های ترکیبی بدون پوشش بیشتر است (Avezov, Akhatov, & Avezova, 2011, p. 180). ورونیکه دلزل به مقایسه یک سامانه‌های ترکیبی با سامانه‌های دیگری از دو گردآور حرارتی و پیل خورشیدی در کنار هم و با همان سطح اشغال پرداخته است. برای مقایسه از مفهوم تولید انرژی گرمائی سالانه معادل برای ترکیب انرژی التریکی و گرمائی حاصل از هر دو سامانه‌های استفاده شده است. در این تحقیق بازده یک سامانه‌های ترکیبی ۲۹-۵ درصد بیشتر از سامانه‌های حاصل از کنارهم قرارگرفتن گردآور حرارتی و پیل خورشیدی است (Delisle & Kummert, 2014, p. 50). در جدول ۱ خلاصه تحقیقات و نتایج حاصل در افزایش بازده صفحات آورده شده است.

چن (Chen, fazio, Athienitis, & Rao, 2012, p. 208) درباره شبیه‌سازی پوسته‌های بیش بازده ترکیب در اقلیم سرد با عرض جغرافیایی زیاد پس از آزمودن انواع مختلف ترکیب صفحات ورق فلزی پیش گرمایش هوا و صفحات فوتوولتائیک در هندسه و حالات مختلف ترکیب با پوشش شیشه‌ای نتیجه گرفته است که: ترکیب جاذب گرمایی (صفحه فلزی) سوراخدار صفحه فوتوولتائیک با پوشش شیشه‌ای قابل نفوذ در شرایط باد شدید به میزان ۲۰-۱۶ درصد و به میزان ۱۴-۱۰ درصد در باد ملایم از سامانه‌های ترکیبی جاذب گرمایی و صفحه فوتوولتائیک بدون پوشش بازده بالاتری دارد. علی‌الولایی انواع مطالعات انجام شده بر روی سامانه‌های ترکیبی را به طور خلاصه بررسی می‌کند و نهایتاً بازده الکتریکی سامانه‌های ترکیبی را ۱۵-۴/۷ درصد بازده حرارتی آن را ۷۰-۲۸ درصد و بازده کل سامانه‌های را ۳۷-۸۰ درصد عنوان شده است (Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan, 2016, p. 10761).

Table 1: Different strategy for improvement of Pv cells performance in recent studies

Goal	Proposed solution	Country	Impact on performance
Increase of solar intensity	Flat Reflector	Iran	+ 30%
		Sweden	+ 22%
		Japan	+ 20-25%
		Egypt	+ 22%
		Sweden	Increase of performance
		USA	+ 40-45%
Effect of shadow on PV panels	Effect of shadow on performance	India	Adding reflector on south and north causes 44% and 14% increase of performance in summer and winter, in respect. This amount is 44-56% for the west and 14-26% for the east side.
		Iran	+ 50.4%
		England	3 times increase of electron flow
Decrease of PV cell temperature	photovoltaic panels cooled by water or air circulation	Germany	-20%
		Germany	Eastern shaders -4% Vertical shaders -16.8%
		Spain	Decrease of performance
		Malaysia	+10-20%
		Malaysia	+10.2%
Solar Thermo-photovoltaics	Production of solar electricity and heat simultaneous	Malaysia	+12%
		England	+1.5%
		Iran	+52-58%
		Malaysia	(Total Performance) +37-80%
Comparing the heat production with electricity production separately with a hybrid system	Pre-heating systems for PV panels and electricity production with glass cover and without it	Azerbaijan	(Total Performance) +18%
		Canada	+16 – 20%
		-	+5-29%

سامانه ترکیبی تولید برق و حرارت خورشیدی با افزایشی معادل ۲۹-۱۶ درصد در بازده بیشترین تأثیر را در خروجی سامانه خواهند داشت. کاهش دمای پیل‌های خورشیدی با

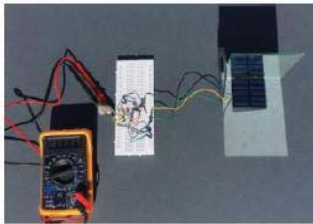
از بین راهکارهای پیشنهادی در پژوهش‌ها استفاده از بازتابنده‌ها و تشدید کننده‌های شدت تابش در بازه‌های معادل ۱۵-۴ درصد برای استفاده از بازتابنده تخت و استفاده از

آزمایشی در شرایط محیط واقعی و در تاریخ پنجم دیماه ۱۳۹۶ بازده یک پیل خورشیدی آموزشی در ۶ وضعیت به صورت، (۱) پیل خورشیدی روی سطح افق، (۲) پیل خورشیدی روی سطح افق تحت بازتابش بازتابنده تخت عمودی، (۳) پیل خورشیدی روی دیوار جنوبی عمودی، (۴) پیل خورشیدی روی دیوار جنوبی تحت بازتابش بازتابنده تخت افقی و عمود بر سطح دیوار، (۵) پیل خورشیدی روی دیوار جنوبی تحت بازتابش بازتابنده تخت عمودی در سمت غربی یا شرقی پیل و (۶) نهایتاً پیل خورشیدی عمود بر اشعه تابشی نور خورشید بررسی شد (شکل ۴).

میزان افزایشی در محدوده ۲۰-۱,۵ درصد در جایگاه دوم اولویت قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که جلوگیری از سایه‌اندازی بر روی پیل‌ها مانع از کاهش ۲۰ درصد بازده خواهد بود. بنابر این در جائیکه که امکان جهت‌گیری بهینه پیل خورشیدی وجود ندارد مثل نمای جنوبی ساختمان استفاده از بازتابنده تخت در افزایش بازده بسیار راهگشاست (Seitel, 1975, 295).

۳- روش تحقیق

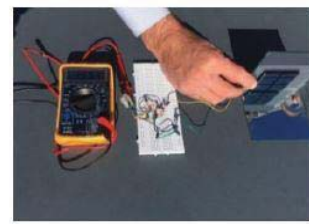
در این پژوهش به منظور بررسی اثر تغییر زاویه بازتابنده تخت بر میزان بازده پیل خورشیدی روی دیواره عمودی و با هدف یافتن زاویه بهینه بازتابنده با استفاده از روش تحقیق



PV cell on the horizontal surface with vertical mirror



PV cell on the southern vertical wall with vertical mirror on eastern side



PV cell on the southern vertical wall with horizontal mirror

Fig. 4 PV cells performance test integrated with reflector

ویژگی‌های سامانه مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

Table 2: Different components of the study to find out the optimum tilt

Components	Properties
PV cells	Educational PV-cell with short Circuit and open-circuit battery (A 60 ma, 5V, Size : 5*5 cm) Made in Iran
Flat Reflector	Flat mirror with 90% reflectivity Size: 10*10 cm (The mirror is 2 times bigger than PV cell to cover all of it) Made in Iran
Digital multi-meter	Measurement range: 2000 mA - 10 A Voltage range: 200 mV - 1000 V Made in China
LED lamp	Max V: 3.3 Max I: 20 mA

عنوان مقدار ولتاژ یا جریان برای آن ساعت ثبت گردید. باتوجه به مسیر حرکت خورشید نسبت به وجه جنوبی شدت تابش در ساعت ۱۲ ظهر بیشینه بوده و مقدار عددی آن برای مابقی ساعات روز نسبت به ساعت ظهر به صورت قرینه کاهش می‌یابد (جدول ۳).

۴- روش انجام آزمایش

ولتاژ خروجی و جریان عبوری از مدار از ساعت ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر در هر ساعت اندازه‌گیری شد و با توجه به اینکه پیل خورشیدی مورد استفاده آموزشی بوده است به منظور حذف خطاهای عملی، اندازه‌گیری‌ها در هر ساعت به دفعات تکرار شد و در پایان اندازه‌گیری برای هر ساعت با حذف عدد حداکثر و حداقل اندازه‌گیری شده میانگین مجموع اعداد به

Table 3: Solar radiation on southern side of the building (w/m²) at 26th Dec in 34.47 latitude (McIntosh, Abbott, & Sudbury, 2011)

Hour	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Solar Intensity	346.4	590.2	749.9	832	862.1	833.6	746.2	595.4	355.3

به توضیح است که در اندازه‌گیری‌های انجام شده جهت جلوگیری از ایجاد سایه بر روی پیل توسط بازتابنده تخت غربی/ شرقی، برای ساعات قبل از ظهر آئینه در قسمت غرب و برای ساعات بعد از ظهر آئینه در قسمت شرق پیل قرار داده شد. نتایج اندازه‌گیری شدت جریان عبوری و توان خروجی در جدول ۴ و ۵ پیاده‌سازی و نمودار توان خروجی برای هر ۶ حالت توسط نرم افزار اکسل^{۳۰} ترسیم شده است.

بنابراین اعداد بدست آمده برای هر ساعت از روز با توجه به ساعت قرینه آن نسبت به ظهر بهینه‌سازی شده است به این صورت که برای مثال مقدار عددی شدت جریان در ساعت ۸ صبح با عدد اندازه‌گیری شده برای همان در ساعت ۴ بعد از ظهر جمع شده و میانگین آن به عنوان شدت جریان پایه در هر دو ساعت ۸ و ۱۴ منظور گردیده است که هدف از این کار کاهش حداکثری خطای اندازه‌گیری بوده است. لازم

Table 4: Electric current measurement

Mean electric current (mA)	Hour									
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	
PV cells on the vertical southern wall	12.36	12.36	13.37	13.60	14.45	13.60	13.37	12.36	12.36	
PV cell making a vertical angle with solar radiation	13.89	13.98	14.57	14.13	14.79	14.13	14.57	13.98	13.89	
PV cells on the vertical southern wall affected by mirror reflection making 90 degrees	12.62	13.96	15.22	15.17	15.95	15.17	15.22	13.96	12.62	
PV cell on horizontal surface	6.66	10.15	10.49	10.64	12.19	10.64	10.49	10.15	6.66	
PV cells on the horizontal surfaces affected by vertical mirror	7.13	11.56	12.38	12.20	14.02	12.20	12.38	11.56	7.13	
PV cells on the vertical southern wall affected by mirror reflection on south-east making 90 degrees	14.50	14.52	15.25	13.90	14.45	13.90	15.25	14.52	14.50	

Table 5: Electric power measurement

Mean electric power (mW)	Hour									
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	
PV cells on the vertical southern wall	34.99	35.63	37.81	39.31	41.91	39.31	37.81	35.63	34.99	
PV cell making a vertical angle with solar radiation	40.55	41.22	41.53	41.07	42.97	41.07	41.53	41.22	40.55	
PV cells on the vertical southern wall affected by mirror reflection making 90 degrees	35.27	40.77	43.87	44.68	47.22	44.68	43.87	40.77	35.27	
PV cell on horizontal surface	16.85	27.68	28.65	29.39	33.78	29.39	28.65	27.68	16.85	
PV cells on the horizontal surfaces affected by vertical mirror	17.97	32.49	34.64	34.42	39.56	34.42	34.64	32.49	17.97	
PV cells on the vertical southern wall affected by mirror reflection on south-east making 90 degrees	42.27	42.98	44.04	39.87	41.91	39.87	44.04	42.98	42.27	

جنوبی تحت اثر بازتابنده افقی تا ۱۶ درصد و بازتابنده تخت غربی و شرقی تا ۲۰٫۶ درصد است (نمودار ۱).
 (۲) بازده پیل تحت اثر انعکاس بیشتر از بازده همان پیل عمود بر جهت تابش است به عبارتی اثر بازتابش توسط بازتابنده تخت بر بازده از اثر تغییر زاویه نسبت به جهت نور تابش تخت بیشتر است که نتایج تحقیقات دیگری نیز این مطلب را تأیید می‌نماید.
 (Bilal, Arbab, Afridi, & Khattak, 2016, p. 100)
 (۳) نمودار ۲ مقدار افزایش بازده پیل روی دیواره قائم جنوبی را به تفکیک برای دو حالت پیل تحت اثر

۵- تحلیل نتایج

(۱) آزمایش نتایج حاصل نشان می‌دهد که حداقل توان خروجی مربوط به پیل خورشیدی افقی و حداکثر آن مربوط به پیل قائم روی دیواره جنوبی تحت بازتابش آئینه غربی / شرقی است. بعلاوه افزایش بازده در تمام حالات تحت اثر بازتابش تخت نسبت به پیل بدون بازتابنده مشهود است که با نتایج مطالعات همخوانی دارد. میزان افزایش بازده پیل افقی تحت اثر بازتابش حاصل از آئینه قائم تا ۲۱ درصد و این میزان برای پیل روی دیوار

محدوده ساعات ۱۰ صبح تا ۲ بعد از ظهر باعث افزایش پیل تا ۱۶ درصد می‌گردد. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از آئینه افقی - غربی و افقی - شرقی می‌تواند روش مطمئنی در افزایش بازده پیل خورشیدی باشد. با توجه به نمودار با بهره‌گیری توأم از بازتابنده افقی و شرقی / غربی میتوان محدوده افزایش بازده را همواره بالاتر از ۱۲ درصد داشت و به طور میانگین در طول روز زمستان تا ۱۸ درصد افزایش بازده سامانه را تضمین نمود.

انعکاس آئینه افقی و همان پیل تحت اثر آئینه قائم غربی / شرقی نشان میدهد. شدت افزایش بازده در ساعات اولیه روز توسط آئینه غربی و در ساعات پایانی روز توسط آئینه شرقی نسبت به آئینه افقی نشان دهنده کارایی بالای بازتابنده در این ساعات است به طوری که مقدار افزایش در ساعات ۸ صبح و ۴ بعد از ظهر تا ۲۱ درصد می‌رسد. با توجه به عمود بودن تصویر قائم نور در ظهر آئینه غربی و شرقی در این ساعت تأثیری در بازده ندارد. در عوض آئینه افقی در

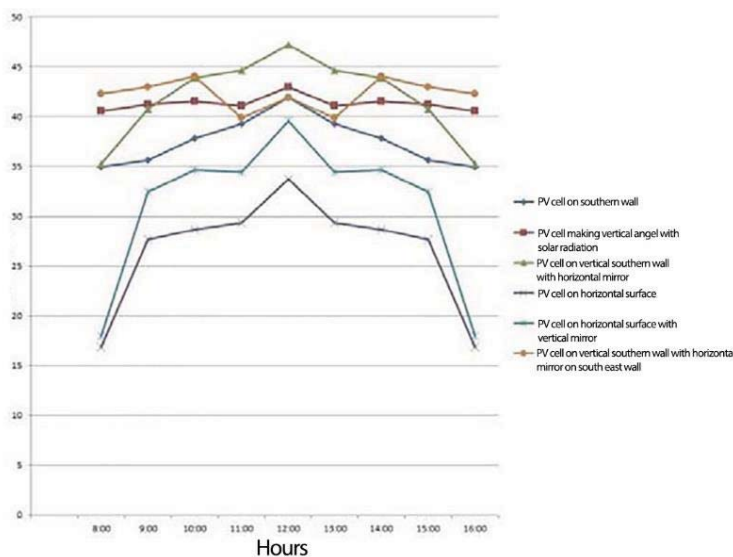


Chart. 1 Comparison of PV cell performance in different positions

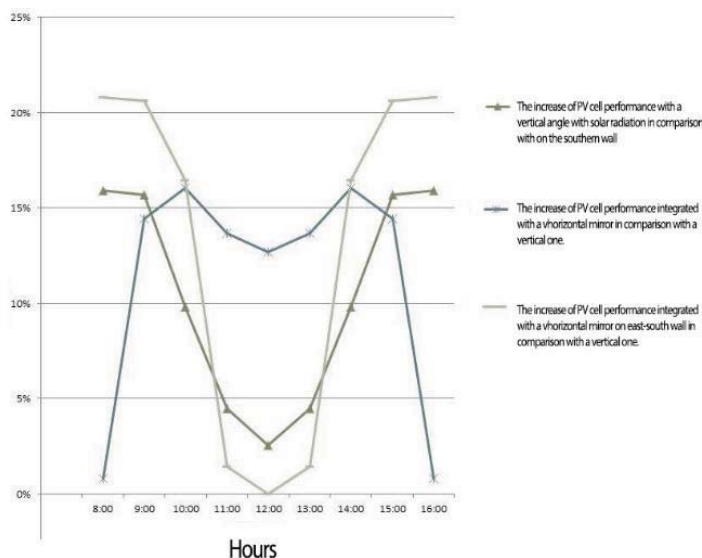


Chart. 2 The increase of PV cell performance on the south wall in percentage

سطح پیل خورشیدی بر روی دیواره عمودی است در شکل ۵ نمونه سایه‌اندازی با افزودن همزمان آئینه غربی / شرقی و افقی دیده می‌شود به عبارتی در این حالت فقط در محدوده

۱-۵- یافتن زاویه و ابعاد بهینه بازتابنده تخت سایه‌اندازی بازتابنده بر سطح پیل مهمترین چالش در افزودن همزمان بازتابنده‌های طرفینی (غربی / شرقی) به

تابش رسیده به پیل و در نتیجه بالا رفتن بازده پوسته نمای جنوبی یکپارچه با پیل خورشیدی است. شکل سایه ایجاد شده در محدوده بین بازتابنده‌های طرفینی وابسته به زاویه تصویر عمودی نور خورشید است بنابر این محاسبه این زاویه برای سه زمان بحرانی انقلاب زمستانی، انقلاب تابستانی و اعتدالین پاییزی و بهاری می‌تواند ملاک خوبی در یافتن زاویه بهینه بازتابنده‌های غربی/شرقی نسبت به افق باشد.

ساعت ۱۲ ظهر سایه نداریم که عملاً مطلوب نیست (شکل ۵) از طرف دیگر با توجه به نتایج بخش ۳-۲، بازتابنده قائم غربی / شرقی در ساعات اولیه و انتهایی و بازتابنده افقی در ساعات میانی روز موجب افزایش بازده می‌شود. اما میزان سایه‌اندازی نیز کاهش می‌یابد بنابر این یافتن زاویه بهینه بازتابنده طرفینی نسبت به افق که کمینه و بیشینه بازتابش را در طول سال ایجاد نماید راه‌حل مطمئنی در افزایش مقدار شدت

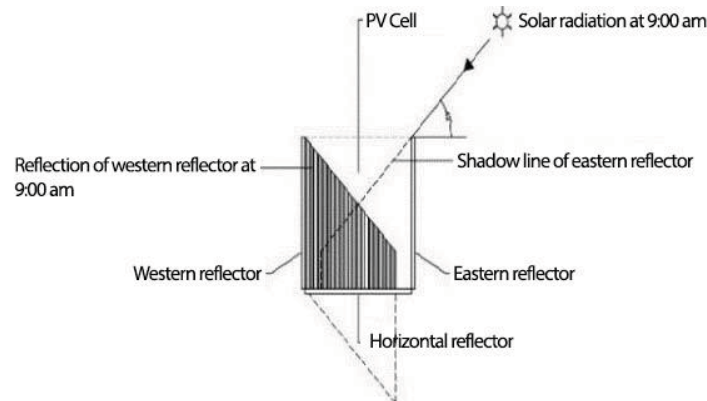


Fig. 5 Shadow of the eastern reflector at the first day of the spring 9:00 am

خورشید در بازه زمانی ۹ صبح تا ۳ بعد از ظهر در نظر گرفته می‌شود (Lechner, 2015, p. 144) لذا زوایای تصویر قائم برای این ساعات در شکل ۸ نمایش داده شده است.

با داشتن زاویه سمت (α) و فراز (β) خورشید و طبق فرمول می‌توان زاویه تصویر قائم نور (γ) را در زمان‌های مذکور با افق دست آورد (شکل ۶). از آنجا که ساعات تابش نور مفید

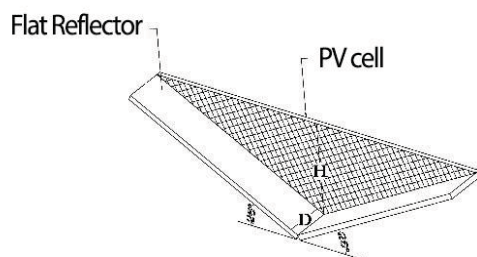


Fig. 7 The optimum combination of PV cell and reflector

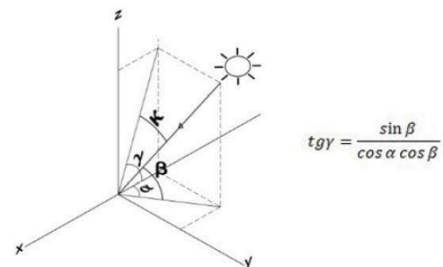


Fig. 6 The diagram of solar radiation and its projection

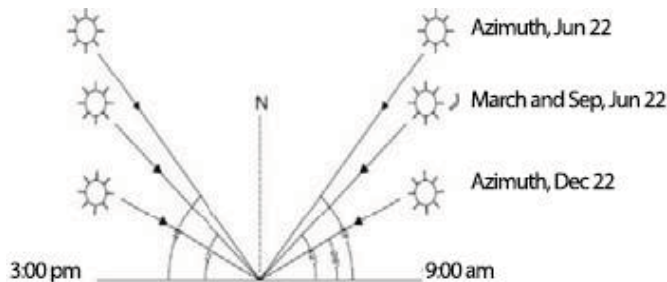


Fig. 8 The Azimuth of solar radiation in different season from 9:00 am to 3:00 pm

درجه شرقی در اعتدالین بهاری و پاییزی و بازه ۴۵ درجه غربی تا ۴۵ درجه شرقی در انقلاب تابستانی بدون سایه خواهد بود. با توجه به آنکه خورشید در زمان انقلاب

با توجه به شکل ۸ محدوده قرار گرفته بین بازتابنده غربی و شرقی با ۲۶ درجه زاویه نسبت افق در انقلاب زمستانی، محدوده بین زاویه ۴۲ درجه غربی تا زاویه ۴۲

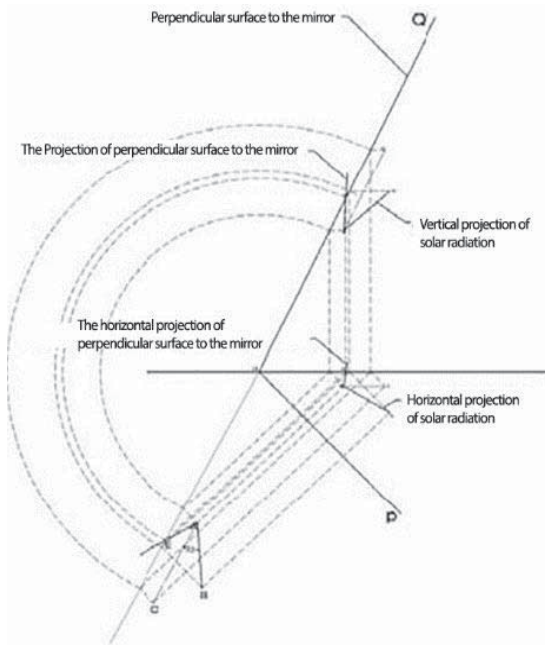


Fig. 9 Calculation method of solar radiation by geometry

زمستانی پایین‌ترین ارتفاع خود را در طول سال داراست بنابراین با انتخاب زاویه ۲۶ درجه نسبت به افق برای بازتابنده‌های طرفینی مطمئناً در هیچ یک از روزهای سال در این محدوده سایه‌ای از طرف بازتابنده‌های تخت وجود نخواهد داشت.

۲-۵- محاسبه ابعاد بهینه بازتابنده تخت

با توجه به مطالعات صورت گرفته در پیشینه تحقیق بیشترین بازده از سطح نمای یکپارچه با پیل خورشیدی زمانی است که پوشش بازتابش حاصل از بازتابنده‌ها بر سطح پیل کامل باشد (Matsushima, T. Setaka, & Muroyama, 2003) با فرض آنکه پیل مورد استفاده سطح بین دو آئینه را به طور کامل بپوشاند با تغییر عمق آئینه‌های تخت مستطیلی شرقی و غربی نسبت به ارتفاع پیل مثلثی شکل ما بین آئینه‌ها و یافتن شکل انعکاس در محدوده ساعت ۹ صبح تا ۱۲ ظهر در سه زمان بحرانی سال می‌توان به نسبت بهینه عمق به ارتفاع پوشش دست یافت. در این پژوهش عمق بازتابنده‌ها به ترتیب با نسبت $D=1.5H$ و $D=H$ ، $D=0.5H$ ، $D=0.25H$ تغییر داده و به کمک قوانین هندسه ترسیمی بازتابش حاصل ترسیم شده است شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰.

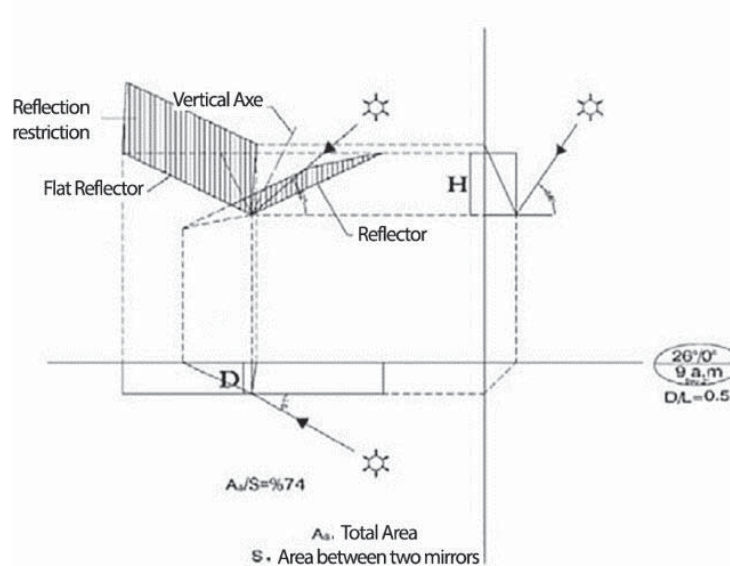


Fig. 10 The calculation method of coverage area of shadow of two eastern and western reflector at 9 am in solstice

نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. نمایش این نتایج بر روی نمودار ۳ نشان می‌دهد که کمترین میانگین سالانه سطح پوشش انعکاس مربوط به نسبت $D=0.25H$ و بیشترین آن با برای نسبت $D=1.5H$ است. سطح پوشش در هر چهار حالت برای ساعت ۹ صبح در انقلابین زمستانی و تابستانی تقریباً یکسان است اما در اعتدالین بهاری و پاییزی پوشش

۳-۵- تحلیل نتایج محاسبه سطح پوشش

پس از ترسیم سطح زیر پوشش انعکاس برای ساعات ۹ صبح و ۱۲ ظهر^{۳۳} در هر سه زمان انقلاب تابستانی (اول تیر)، اعتدال بهاری و پاییزی (اول مهر و اول فروردین) و انقلاب زمستانی (اول تیر)^{۳۴}، نسبت مساحت آن به سطح پیل محاسبه گردید که

انعکاس برای نسبت $D=0.25H$ بسیار کمتر سه حالت دیگر است. از طرفی نمودار نشان می‌دهد که سطح پوشش برای ساعت ۱۲ ظهر از انقلاب زمستانی تا انقلاب تابستانی با افزایش نسبت عمق بازتابنده به ارتفاع پیل افزایش می‌یابد. در این بین اما توجه به تغییرات سطح پوشش انعکاس برای نسبت $D=0.5H$ جالب توجه است به طوری که میانگین سطح پوشش آن برای ساعت ۹ صبح در تاریخ‌های مذکور با ۴ درصد اختلاف معادل با میزان سطح پوشش برای نسبت،

انعکاس برای نسبت $D=0.25H$ بسیار کمتر سه حالت دیگر است. از طرفی نمودار نشان می‌دهد که سطح پوشش برای ساعت ۱۲ ظهر از انقلاب زمستانی تا انقلاب تابستانی با افزایش نسبت عمق بازتابنده به ارتفاع پیل افزایش می‌یابد. در این بین اما توجه به تغییرات سطح پوشش انعکاس برای نسبت $D=0.5H$ جالب توجه است به طوری که میانگین سطح پوشش آن برای ساعت ۹ صبح در تاریخ‌های مذکور با ۴ درصد اختلاف معادل با میزان سطح پوشش برای نسبت،

Table 6: Covering measurement of PV cell by reflectors on eastern and western sides in solstice and equinox

Time		The covering percentage of reflection based on the depth of the proportion of flat rectangular mirror and height of the PV cell on south wall (D/L)			
Hour	Day	D/L=0.25	D/L=0.5	D/L=1.0	D/L=1.5
9:00 am	22 Dec	54%	56%	62%	62%
	21 March and Sep	55%	74%	80%	80%
	21 Jun	95%	95%	95%	95%
	Coverage Percentage	68%	75%	79%	79%
12:00 pm	22 Dec	30%	55%	88%	100%
	21 March and Sep	60%	93%	100%	100%
	21 Jun	100%	100%	100%	100%
	Coverage Percentage	66%	78%	86%	88%

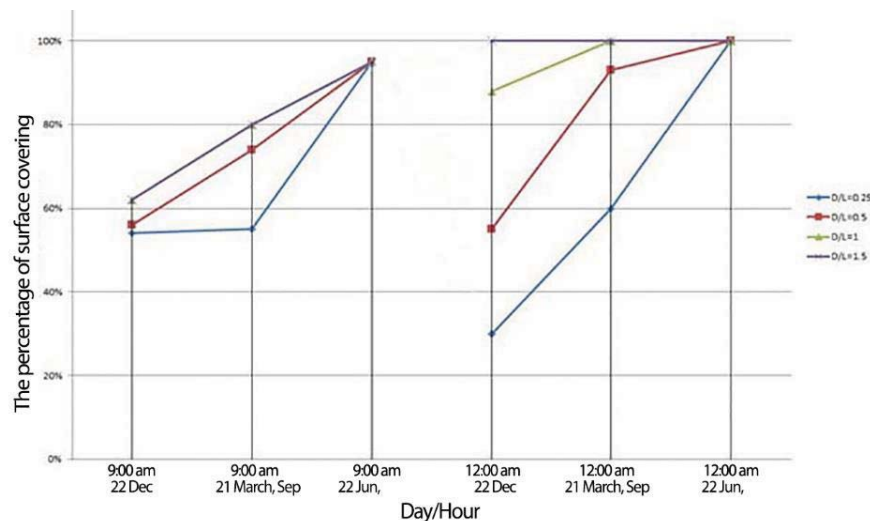


Chart. 3 The comparison of reflection covering for different proportions of L and D in solstice and equinox

وجود دارد که تابش غیربهمینه نور خورشید بر وجوه ساختمان از جمله آنهاست. این پژوهش با هدف تحلیل عوامل مؤثر بر بازده پوسته‌های ساختمانی ثابت مولد الکتریسیته، به بررسی تأثیر افزایش تابش رسیده به سطح نمای جنوبی از طریق الحاق بازتابنده تخت به پوسته ساختمان پرداخته و با تحلیل نتایج حاصل از آزمایش و جمع آن با خروجی‌های حاصل از ترسیم و محاسبه سطح پوشش انعکاس حاصل از بازتابنده بر سطح پوسته، نتایج زیر

۶- نتیجه گیری

تولید غیرمتمرکز الکتریسیته در محل استفاده علاوه بر کمک به کاهش بار در شبکه توزیع برق موجب جلوگیری از هدر رفت انرژی در مسیر انتقال به مصرف کننده نهایی است. طبق آمارهای جهانی بیش از یک سوم از انرژی الکتریسیته تولید شده در نیروگاه‌ها در بخش ساختمان مصرف می‌گردد از اینرو تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان از طریق پوسته بنا در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این بین اما محدودیت‌هایی نیز

۳. بیشینه افزایش بازده حاصل از الحاق بازتابنده غربی/شرقی به نمای جنوبی مربوط به ساعت ابتدایی و انتهای روز و برای بازتابنده افقی مربوط به ساعات میانی روز است.

۴. استفاده از بازتابنده شیدار نسبت به بازتابنده افقی مزایای استفاده از بازتابنده افقی و قائم را تا حدودی تأمین کرده و زاویه بهینه آن برای حذف سایه‌اندازی بر پیل از ۲۶ درجه غربی تا ۲۶ درجه شرقی است.

عمق بهینه آینه تخت مستطیلی عمود بر سطح نمای جنوبی و با زاویه ۲۶ درجه با افق برای تأمین بیشینه پوشش در طول سال $D=0.5H$ یعنی نصف ارتفاع فضای ما بین دو بازتابنده است.

را در خصوص تعیین زاویه و ابعاد بهینه برای بازتابنده تخت مستطیلی بدست آورده است:

۱. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که دو عامل افزایش تابش با استفاده از بازتابنده تخت تا ۵۰ درصد می‌تواند بازده پیل خورشیدی را افزایش داده و بالا بردن میزان تهویه افزایشی به میزان ۲۰-۱۵ درصد در بازده پیل خورشیدی با جهت‌گیری بهینه نسبت به جهت تابش ایجاد می‌کند.

۲. نتایج آزمایش میانگین افزایش بازده حاصل از الحاق بازتابنده تخت را برای پیل روی دیواره نمای جنوبی با بازتابنده افقی تا ۱۱٫۳۹ درصد و برای همان پیل با بازتابنده قائم غربی/شرقی تا ۱۳٫۱۹ درصد نسبت به پیل بدون پوشش انعکاس در انقلاب زمستانی ارزیابی می‌کند.

پی‌نوشت:

1. Building Envelope or Building Shell
2. Energy Efficient
3. Building Integrated Photo Voltaic (BIPV)
4. Photovoltaic Panel (PV)
5. Flat Concentrators or Flat Mirrors (FM)
6. International Energy Agency(IEA)
7. Renewable Energy Sources
8. PV Modules
9. System
10. Dynamic Architecture
11. Static Facades
12. High-performance Facades
13. Pilot Study
14. Tilt
15. Azimuth
16. Concentrating Photo-Voltaic System (CPV)
17. Building Integrated Photovoltaic/Thermal Systems
18. Solar Tracking Systems
19. Spiral
20. ANSYS14
21. Photovoltaic/Thermal Collectors
22. Exergy efficiency
23. Sheet- and-Tube

۲۴. منظور از علامت مثبت در جدول درصد افزایش نسبت به حالتی است که از راهبرد مورد نظر استفاده نشده است

۲۵. منظور میزان کاهش بازده در صورت ایجاد سایه بر روی مدول است.

۲۶. منظور میزان کاهش بازده در صورت ایجاد سایه بر روی مدول است.

27. I_{sc} : Short Circuit Current
28. V_{oc} : Open Circuit Voltage
29. LED(Light Emission Diode)
30. Excel

۳۱. زاویه تصویر افقی نور خورشید بر سطح افق با جهت شمال.

۳۲. زاویه بین شعاع نورانی و تصویر افقی آن بر سطح افق است، زاویه فراز متمم زاویه خط‌الراس خورشیدی است.

۳۳. ساعات ۹ صبح و ۱۲ ظهر به عنوان زمان معادل پایین‌ترین و بالاترین ارتفاع برای خورشید در طول ساعات مفید آفتابی در روز انتخاب کرد.

۳۴. این چهار روز حدود حرکتی مدار خورشید را نسبت به بنا مشخص می‌نمایند.

فهرست منابع:

- سازمان بهره‌وری انرژی ایران (۱۳۹۵). سابا، بازیابی در ۱۱.۲۰.۱۳۹۵، از سازمان بهره‌وری انرژی ایران:

- رئوفی‌راد، م (۱۳۸۵). طراحی سیستمهای خورشیدی ساختمان در ایران، تهران: فدک ایساتیس (به سفارش شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت).
- کلهر، ح (۱۳۸۷). مهندسی روشنایی، تهران، شرکت سهامی انتشار.
- Abu-Bakar S, Muhammad-Suki F, Ramirez-Iniguez R, Freier D, Mallick T, Munir A, et al (2016). Novel optical concentrator technology for building integrated photovoltaic systems, 2016 World Conference on Innovation, Engineering and Technology, Sapporo, Japan: OpenAIR@ RGU.
- Ahmad G, Hussein H (2001). Comparative study of PV modules with and without a tilted plane reflector, Energy Conversion and Management, Vol. 42, pp. 1327-1333.
- Al-Waeli AH, Sopian K, Kazem HK, Chaichan MT (2016). Photovoltaic solar thermal (PV/T) collectors past, present and future: a review, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, No. 22, pp. 10757-10765.
- Avezov RR, Akhatov JS, Avezova R (2011). A review on photovoltaic -thermal (PV-T) air and water collector, Applied Solar Energy, Vol. 47, No. 3, pp. 169-183.
- Barman J (2011). Design and feasibility study of PV systems in Kenya. Master's Thesis within the Sustainable Energy System Programme, Gotenberg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Bilal M, Arbab MN, Afridi M, Khattak A (2016). Increasing the output power and efficiency of solar panel by using concentrator photovoltaics (CPV), International Journal of Engineering Works, Vol. 3, pp. 98-102.
- Briggs D (2016). A glossary of sustainable communities-related terminology, Maryland, Retrieved 2 8, 2018, from Defined Term: <https://definedterm.com/a/definition/244613>.
- Chen Y, Fazio P, Athienitis A, Rao J (2012). Sustainable building design in cold regions: high performance envelop and facade-integrated photovoltaic/solar thermal systems at high latitudes, Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment, pp. 199-209.
- Dean B, Dulac J, Petrichenko K, Graham P (2016). Towards Zero-emission Efficient and Resilient Buildings: Global Status Report 2016. Nairobi: UNEPT.
- Delisle V, Kummert M (2014). A novel approach to compare building-integrated photovoltaics/thermal air collectors to side-by-side PV modules and solar thermal collectors, Solar Energy, Vol. 100, pp. 50-65.
- Delponte E, Marchi F, Frontini F, Polo C, Fath K, Batey M (2015). BIPV in EU28, from Niche to Mass market: an assessment of current projects and the potential for growth through product innovation, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference Exhibition, Munich, pp. 3046-3050.
- Hegger M, Fuchs M, Stark T, Zeumer M (2008). Energy manual; sustainable architecture. basel, Switzerland: Kosel Gmb H & Co. KG, Altusreid-krugzell.
- Hofer J, Groenewolt A, Jayathissa P, Nagy Z. (2016). Parametric analysis and system design of dynamic photovoltaic shading modules, Energy Science and Engineering, pp. 134-152.
- Ibrahim A, Mohd Yusef O, Mohd Hafiz R (2011). Experimental studies on water based photovoltaic thermal collector (PV/T). Selected Topics in System Science and Simulation in Engineering, pp. 439-443.
- IEA (2013). Transition to sustainable buildings: strategies and opportunities to 2050, Paris, International Energy Agency/OECD.
- IEA (2013). World Energy Outlook 2013. OECD/International Energy Agency.
- IEA (2016) Energy Technology Perspective 2016; Towards Sustainable Urban Energy Systems, Paris, International Energy Agency/OECD.
- Jin GL, Ibrahim A, Chean YK, Daghigh R, Ruslan H, Mat S, et al (2010). Evaluation of single-pass photovoltaic-thermal air collector with rectangle tunnel absorber, Recent Advances in Applied Mathematics, pp. 493-498.
- Keller AF (2013). Recharging the facade: designing and constructing novel BIPV assemblies, M.Sc Thesis, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Khelifa A, Touafek K, Ben Mousa H, Tabet I (2016). Modeling and detailed study of ybrid photovoltaic thermal (PV/T) solar collector, Solar Energy, Vol. 135, pp. 169-176.
- Kovach A, Schmid J (1996). Determination of energy output losses due to shading of building-integrated photovoltaic arrays using a raytracing technique, Solar Energy, Vol. 57, pp. 117-124.
- Lechner N (2015). Heating, Cooling, Lighting; Sustainable Methods for Architects (4 ed.). Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons.
- Ronnelid M, Karlsson B, Krohn P, Wennerberg J (2000). Booster reflectors for PV modules in sweden, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 8, pp. 279-291.
- Martinez-Rubio A, Sanz-Adan F, Santamaria J (2015). Optimal design of photovoltaic energy collectors with mutual shading for pre-existing building roofs, Renewable Energy, Vol. 78, pp. 666-678.
- Matsushima T, Setaka T, Muroyama S (2003). Concentrating solar module with horizontal reflectors, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 75, pp. 603-612.
- McIntosh K, Abbott M, Sudbury J (2011). Solar Spectrum Calculator, Retrived in 26.12.2017, PV Lighthouse: <https://www.pvlighthouse.com.au/>
- Mustafa A, Arif H, Shahrestani M, Runming Y, Li S, Emmanuel E, et al (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems, Engineering Science and Technology, An International Journal, Vol. 20, pp. 833-858.

- Nemati Jahrom S, Vadiee A, Yaghoubi M (2015). Energy and economic evaluation of commercially available PV/T collector for different climates in Iran, *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 444-456.
- Kumar R, Rosen M (2011). A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating, *Applied Energy*, Vol. 88.
- Roeleveld D, Kumar R, Naylor D, Fung A (2016). A CFD study of natural convection inside a BIPV/T system, *eSim 2016* (pp. 319-326). Ontario, Canada: McMaster University.
- Seitel SC (1975). Collector Performance Enhancement With Flat Reflector S, *Solar Energy*.
- Soria B, Gerritsen E, Leffillastre P, Broquin JE (2016). A study of the annual performance of bifacial photovoltaic modules in the case of vertical facade integration, *Energy Science and Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 52-68.
- Soria B, Gerritsen E, Leffillaster P, Broquin JE (2016). A Study of Annual Performance of Bifacial Photovoltaic Modules in the Case of Vertical Facade Integration.
- SUPSI (2015). BiPV (SUPSI) Retrieved 3 9, 2015, from <http://www.bipv.ch/index.php/en/>.
- Tabaei H, Ameri M (2015). Improving the effectiveness of photovoltaic water pumping system by using booster reflector and cooling array surface by a film of water, *Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 39, pp. 51-60.
- Tabakovic M, Fechner H, Sark WV, Louwen A, Georghiou G, Makrides G, et al. (2017). Status and outlook for building integrated photovoltaics (BIPV) in relation to educational needs in the BIPV sector, *Energy Procedia*, pp. 993-999.
- Thomas R, Forham M (2001). *Photovoltaics and architecture*. (R. Thomas, M. Fordham, & Partners, Eds.) London: Spon Press.
- Vickstrom E (2016). *Building-integrated photovoltaics (BIPV): Technologies and Global Markets*, Massachusetts: BccResearch.
- WE Council (2016). *World Energy Resources*. London: World Energy Council.
- Yun GY, Mc Evoy M, Steemers K (2007). Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic facade, *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 383-394.