

مدل سازی اثر سایه بر تابش دریافتی سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه در نمای ساختمان

چکیده: این پژوهش یک مدل هندسی ساده و در عین حال کاربردی برای ارزیابی اثر سایه بر مقدار تابش دریافتی سامانه های فتوولتائیک حرارتی ارائه می دهد؛ در این روش، اثر سایه با تفکیک تابش مستقیم و پراکنده مدل سازی شده است؛ به طوری که ناحیه سایه به عنوان نقاط فاقد تابش مستقیم تعریف شده و ضریب تابش مستقیم بر اساس نسبت مساحت در معرض تابش به کل سطح سامانه به دست می آید. همچنین ضریب تابش پراکنده با استفاده از ضریب دید سامانه به سایه انداز، سهم تابش آسمان را محاسبه می نماید. سادگی روابط هندسی به کار رفته، امکان برآورد سریع و در عین حال دقیق تابش دریافتی را فراهم می سازد و مدل را برای تحلیل های مهندسی در شرایط مختلف سایه اندازی، بدون محدودیت در ابعاد یا موقعیت سایه انداز، مناسب می کند. برای ارزیابی عملکرد مدل، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با حل یک نمونه عددی با داده های منابع معتبر مقایسه شد. این مقایسه نشان می دهد که میانگین اختلاف مطلق برابر با ۱۱ درصد است. مشخص گردید مدل پیشنهادی دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل تحلیلی مورد قیاس بوده و می تواند به عنوان ابزاری کارآمد جهت برآورد تابش دریافتی سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه در ساختمان مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های راهنما: مدل سازی سایه، ضریب تابش پراکنده، ضریب تابش مستقیم، سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه در ساختمان

محمدامین قدک

دانشجوی دکتری

مهدی معرفت*

استاد،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه تربیت مدرس

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

Mohammad Amin
Ghadak
PhD Student

Mehdi Maerefat*
Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering
Tarbiat Modares University,
Tehran

Modeling the shadow effect on irradiance of building-integrated photovoltaic/thermal facade systems

Abstract: This study introduces a simple geometric model for evaluating the effect of shadow on the solar radiation received by photovoltaic (PV) systems. In this method, the shadow effect is modeled by separating beam and diffuse irradiance, where shadowed regions are defined as areas with no direct beam. The beam radiation coefficient is defined as the ratio of the sun-exposed area to the total system surface, while the diffuse radiation coefficient is determined using the view factor between the system and the obstacle to account for sky radiation. The simplicity of the geometric relations enables rapid and reasonably accurate radiation estimation under different shadow conditions. Comparison with a numerical case using reliable data shows a mean absolute difference of 11%. The proposed model performed better than the analytical model considered. Despite its simplicity, the model provides sufficient accuracy for engineering applications and supports estimating incident radiation on building-integrated photovoltaic thermal systems.

Keywords: Modeling the shadow, Diffuse radiation coefficient, Beam radiation coefficient, Building-integrated photovoltaic-thermal

۱- مقدمه

سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با نمای دوپوسته ساختمان^۱، امکان بهره‌گیری هم‌زمان از انرژی خورشیدی برای تولید برق و حرارت را در پوسته ساختمان فراهم می‌سازند. در این سامانه‌ها، فضای هوایی بین دولایه نما نقش مبدل حرارتی و مسیر جریان هوا را ایفا کرده و موجب بهبود عملکرد حرارتی و کاهش اتلاف انرژی ساختمان می‌شود. در مواردی که سامانه فاقد نمای دوپوسته بوده و یا هدف تأمین بار حرارتی ساختمان نباشد سامانه فتوولتائیک یکپارچه در ساختمان^۲ نامیده می‌شود. عملکرد این سامانه‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط تابشی محیط و نحوه توزیع انرژی خورشیدی بر سطح سامانه قرار دارد. در این میان، سایه به عنوان یکی از عوامل کلیدی و تأثیرگذار بر رفتار حرارتی و الکتریکی سامانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و نیازمند تحلیل دقیق و جامع است.

تأثیر سایه بر عملکرد الکتریکی سامانه‌های خورشیدی به دلیل کاهش مستقیم الکتريسيته تولیدی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. به عنوان نمونه، بینگل [۱] و پندوم [۲] اثر سایه را بر عملکرد الکتریکی پنل‌های خورشیدی بدون معرفی سایه‌انداز، صرفاً با کاهش میزان تابش دریافتی در بخش‌های مختلف پنل نسبت به تابش ورودی بررسی کرده‌اند؛ این تحلیل‌ها توانایی توصیف دقیق رابطه میان موقعیت و ابعاد سایه‌انداز با میزان تابش مستقیم^۳ و پراکنده^۴ از دست‌رفته را ندارند. در نقطه مقابل، برخی از مطالعات تحلیلی از جمله پژوهش یلینیا کسکوپن و همکاران [۳] به طور هدفمند کاهش تابش ناشی از سایه‌اندازها با ابعاد مشخص را کمی کرده و ضرایب هندسی سایه زنی^۵ مربوط به تابش مستقیم و پراکنده را محاسبه کرده‌اند. در این مطالعه، با تعیین مختصات هندسی سایه‌انداز و مسیر تابش مستقیم خورشید، نقاط تصویر سایه بر سطح هدف به دست می‌آید و ضریب سایه زنی تابش مستقیم به وسیله شبیه‌سازی هندسی برآورد می‌شود. ضریب سایه زنی تابش پراکنده نیز بر پایه تعریف زاویه فضایی و گسسته سازی دامنه دید محاسبه می‌گردد. با این حال، بار محاسباتی و پیچیدگی عددی این روش‌ها می‌تواند کارایی آن‌ها را در کاربردهایی که نیازمند سرعت بالای محاسبات هستند، کاهش دهد. در ادامه رویکردهای تحلیلی، پژوهش‌های متعددی توسط سمیل یاداو و همکاران [۴]، [۵]، [۶] و [۷] بر روی اثر سایه برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک

حرارتی یکپارچه در نمای ساختمان انجام شده است. در این مطالعات، ضریب سایه از طریق ترسیم موقعیت خورشید و سایه‌انداز در مختصات افقی و تعیین زمان سایه‌اندازی محاسبه می‌شود. همچنین برای محاسبه ضریب تابش پراکنده، ضریب دید آسمان^۶ به عنوان معیاری برای بخشی از گنبد آسمان^۷ که به دلیل موقعیت سامانه خورشیدی و سایه‌انداز، امکان دریافت تابش پراکنده را دارد تعریف و محاسبه شده است. در این پژوهش‌ها با بهره‌گیری از رویکرد انتگرالی، مساحت‌های مسدود شده آسمان توسط سایه‌انداز و پنل محاسبه و نرمال سازی شده‌اند. سپس با تفاضل این مقادیر از عدد یک، ضریب دید آسمان تعیین شده است. برای ارزیابی بهتر، مدل سازی اثر سایه در پژوهش‌های مورد اشاره با مدل پیشنهادی تحقیق حاضر، مقایسه و تحلیل شده است.

در خصوص بررسی اثر سایه در مزرعه‌های خورشیدی تشوب [۸] مقدار کاهش تابش پراکنده ناشی از ردیف جلویی آرایه پنل‌های خورشیدی را با در نظر گرفتن ۱۰ نقطه در عرض پنل و محاسبه زاویه دید هر نقطه محاسبه کرده است. به طوری که میزان پوشیدگی آسمان و در نتیجه سهم تابش پراکنده قابل دریافت در هر نقطه را تعیین نموده است. در همین زمینه جیانگ [۹] با ارائه یک مدل سه بعدی، سایه ایجاد شده توسط ردیف اول پنل‌های خورشیدی بر ردیف دوم را با تقسیم ناحیه سایه به بخش‌های مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای ساده سازی کرده و سهم تابش مستقیم را بر بخش‌های آفتاب خورده سطح، محاسبه می‌کند. سپس برای محاسبه تابش پراکنده با استفاده از روش هندسی، ضریب دید ردیف دوم پنل فتوولتائیک به آسمان را تعیین نموده است. روش‌های فوق جهت مزرعه‌های خورشیدی توسعه یافته و بومی شده‌اند.

در سال‌های اخیر طیفی از روش‌های نیازمند پردازش‌های سنگین رایانه‌ای برای تحلیل دقیق تر تابش مستقیم و پراکنده جهت مدل سازی تابش رسیده به سامانه هدف در محیط‌های پرتراکم شهری توسعه یافته است. این دسته از پژوهش‌ها که عمدتاً بر پایه شبیه سازی‌های رایانه‌ای شامل پردازش تصویر و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل سازی‌های تابشی سنگین بنا شده‌اند، امکان مدل سازی جزئیات سایه‌اندازی را با دقت بالا فراهم می‌کنند، اما در مقابل مستلزم بار محاسباتی قابل توجهی هستند. در ادامه، نمونه کارهای انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

⁵ Geometric shading coefficients⁶ Sky view factor⁷ Sky dome¹ BIPVT-DSF² BIPV³ Beam radiation⁴ Diffuse radiation

روش هندسی برش چندضلعی محاسبه شده و تابش پراکنده نیز با تقسیم بندی گنبد آسمان به تعداد زیادی ناحیه و بررسی وجود یا عدم وجود مانع در هر ناحیه محاسبه می شود. رویکرد فوق در نرم افزار پی وی سل^۵ [۱۶] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. روش های فوق نیازمند بار محاسباتی بالا می باشند.

تحلیل اثر سایه بر عملکرد حرارتی و الکتریکی سامانه های فتوولتائیک حرارتی مستلزم مدلی است که بتواند تأثیر سایه را بر میزان تابش دریافتی و رفتار حرارتی به طور دقیق تعیین کند. با وجود پژوهش های فراوان درباره مدل سازی اثر سایه بر عملکرد الکتریکی سامانه های فتوولتائیک، مدل سازی جامع و دقیق اثر سایه بر عملکرد حرارتی سامانه های فتوولتائیک حرارتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

نوآوری پژوهش حاضر در تفکیک اثر سایه در تابش مستقیم و پراکنده است به نحوی که تابش مستقیم از روابط ساده هندسی و تابش پراکنده با استفاده از ضریب دید که همان ضریب شکل در انتقال حرارت تابشی است تعیین می شود و کاربرد آن در برآوردهای مهندسی مورد نیاز در تحلیل انرژی سامانه های فتوولتائیک یکپارچه در ساختمان است؛ به ویژه در محیط های شهری که وجود سایه اندازها بخش قابل توجهی از تابش دریافتی را کاهش می دهد. این مدل امکان پیش بینی مقدار افت تابش و در نتیجه ارزیابی واقع بینانه عملکرد انرژی سامانه را فراهم می آورد.

۲- مدل سازی سایه تحت تابش خورشید

تابش خورشید از دو بخش تابش مستقیم و پراکنده تشکیل شده است: تابش مستقیم که به طور مستقیم و بدون تغییر مسیر از خورشید به سطح سامانه فتوولتائیک حرارتی می رسد. تابش پراکنده که در اثر برخورد با مولکول های هوا، ذرات معلق و ابرها در جو پراکنده شده و از تمام جهات به صورت غیرمستقیم به سامانه می تابد.

کل تابش دریافتی I طبق رابطه (۱) از دو بخش G تابش مستقیم و J تابش پراکنده تشکیل شده است.

$$I = G + J \quad (1)$$

در شکل (۱) اثر قرار گرفتن مانع بر کاهش تابش دریافتی سامانه نشان داده شده است.

در زمینه برآورد مؤلفه پراکنده تابش، چن [۱۰] با استفاده از نرم افزار ریدنس^۱ مقدار کاهش میدان تابش پراکنده را در محیط شهری به دست آورده، سپس جهت کاهش بار پردازشی، چن و همکاران با استفاده از مدل های یادگیری ماشین و روابط رگرسیونی، مانع معادل را استخراج کرده اند و به این ترتیب، حجم محاسبات را به شکل قابل توجهی کاهش داده اند. هر چند این تکنیک ها موجب کاهش حجم داده ها می شوند، اما فرآیند آموزش مدل ها و تهیه داده های آموزشی نیز پردازش سنگینی را تحمیل می کنند و کاربری آن ها را در مدل های تحلیلی سریع محدود می سازند.

در زمینه محاسبه تابش مستقیم رسیده به سامانه هدف در محیط های شهری متراکم، روش های هندسی عددی با دقت بالا نیز توسعه یافته اند. به عنوان نمونه، لیو [۱۱] سایه زنی را با اتکا بر ترکیب الگوریتم برش چندضلعی^۲ تبدیل مختصات و شناسایی پویای سطوح مؤثر مدل سازی کرده است. اجرای این الگوریتم ها برای هر گام زمانی نیازمند پردازش های چندمرحله ای شامل تولید چندضلعی های متقاطع، مرتب سازی نقاط و بازسازی سطوح است؛ از سوی دیگر، ونگ [۱۲] با معرفی مجموعه ای از فیلترها و تکنیک های هندسی تلاش کرده است تا پیش از انجام محاسبات سایه زنی در چیدمان های شهری، تنها ساختمان های اثرگذار انتخاب شوند و سایر موانع فیلتر گردند. هر چند این رویکرد بخشی از هزینه پردازشی را کاهش می دهد، اما ترکیب آن با روش های برش چندضلعی در شبیه سازی های سالانه همچنان بار محاسباتی چشمگیری ایجاد می کند.

در رویکردهای تصویر بنیان نیز مشکل نیاز به پردازش سنگین مشهود است. پژوهش های روشا [۱۳] و آراجی [۱۴] به جای تکیه بر مدل سازی هندسی، تشخیص سایه را از طریق تحلیل پیکسل های تصاویر انجام داده اند. روش روشا به رندرینگ مکرر صحنه از دید سطح نیاز دارد که بسته به دقت مورد نظر، می تواند هزینه پردازشی قابل توجهی ایجاد کند. در روش آراجی، استفاده از شبکه های یادگیری عمیق مستلزم اجرای عملیات ماتریسی پرحجم است و در مجموعه داده های زمانی گسترده، زمان اجرای طولانی و مصرف پردازشی بالا اجتناب ناپذیر می شود.

در زمینه نرم افزارهای تجاری مدل سازی انرژی ساختمان، مانند انرژی پلاس^۳ [۱۵] که موتور شبیه ساز نرم افزار دیزاین بیلدر^۴ نیز به شمار می رود. تابش مستقیم تحت تأثیر موانع موجود با

⁴ DesignBuilder

⁵ PVSOL

¹ Radiance

² Polygon clipping method

³ EnergyPlus

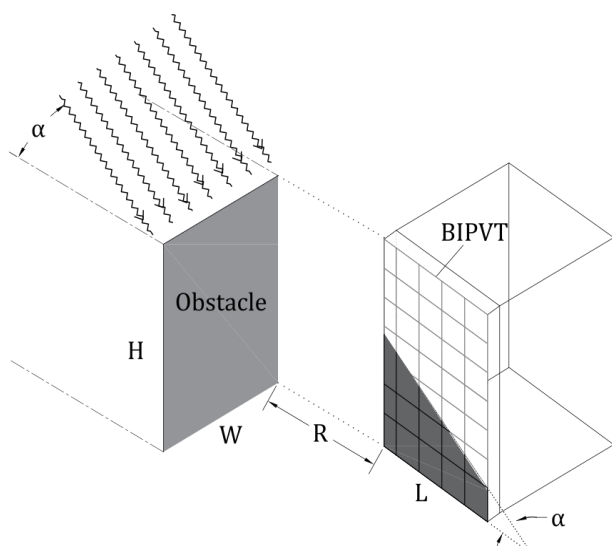
جغرافیایی سامانه و ابعاد هندسی سایه‌اندازها و سامانه دریافت‌کننده بستگی دارد. بر اساس مدل‌سازی انجام شده در این پژوهش طبق رابطه (۳) ضریب تابش مستقیم، برابر تفاضل عدد یک و نسبت سطح سایه به سطح پنل خورشیدی است.

$$B \equiv 1 - \frac{A_{\text{Shadow}}}{A_{\text{BIPVT}}} \quad (3)$$

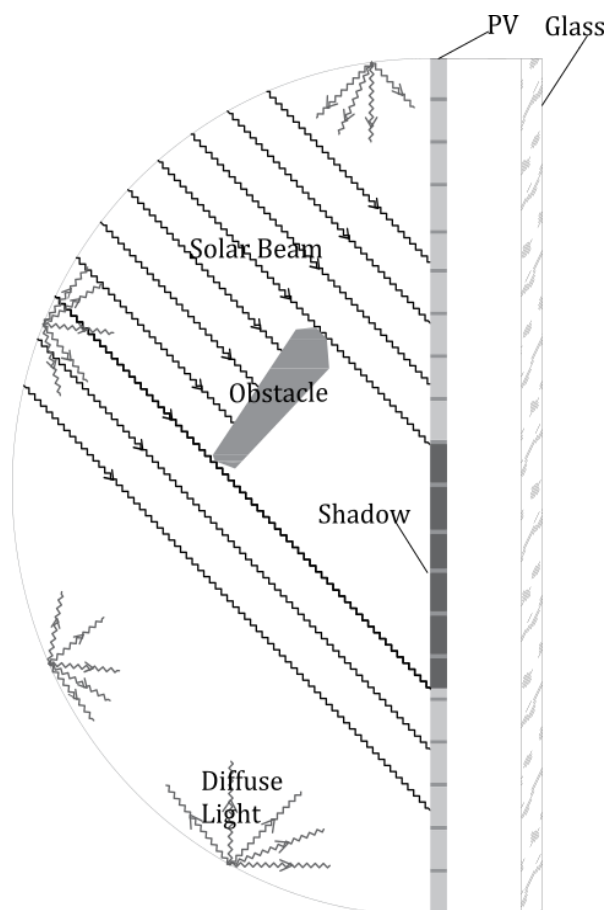
ضریب تابش مستقیم به جهت تابش خورشید که تابع زمان است به ابعاد هندسی مجموعه و زمان تابش بستگی داشته و از روابط ساده هندسی به دست می‌آید. به عنوان نمونه نخست برای محاسبه ضریب تابش مستقیم از پیکربندی هندسی نشان داده شده در شکل (۲) استفاده شده است. در این حالت، سایه‌انداز به صورت عمود و در فاصله مشخصی از سامانه فتوولتائیک حرارتی قرار گرفته و تابش خورشید با زاویه ارتفاع α بر سطح سامانه می‌تابد و الگوی سایه مطابق شکل (۲) تشکیل می‌شود. با تعریف ارائه شده در این بخش ضریب تابش مستقیم برای هندسه شکل (۲) با محاسبه مساحت سایه و سطح سامانه فتوولتائیک حرارتی مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$B \equiv 1 - \frac{A_{\text{Shadow}}}{A_{\text{BIPVT}}} = 1 - \frac{(2H - (L + 2R)\tan\alpha)}{2H} \quad (4)$$

در زاویه تابش $\alpha = 43^\circ$ و با اندازه‌های R, W, L, H به ترتیب ۹، ۳، ۳، ۶ متر، مقدار ضریب تابش مستقیم برای پیکربندی نشان داده شده در شکل (۲) برابر با ۰/۷۷ به دست می‌آید. با کاهش فاصله به $R = 0$ مقدار این ضریب به ۰/۱۶ کاهش می‌یابد.



شکل ۲ یک نمونه از تشکیل سایه بر سامانه ناشی از سایه‌انداز عمود بر آن



شکل ۱ کاهش تابش‌های مستقیم و پراکنده رسیده به سامانه فتوولتائیک حرارتی در نمای دوپوسته ناشی از مانع سایه‌انداز در مقابل سامانه

قرار گرفتن موانع سایه‌انداز در مسیر تابش خورشید موجب کاهش هر دو بخش تابش خورشیدی دریافتی توسط سامانه می‌گردد. در این حالت تابش دریافتی با رابطه (۲) تعریف می‌شود که در آن B ضریب تابش مستقیم و D ضریب تابش پراکنده می‌باشد.

$$I = BG + DJ \quad (2)$$

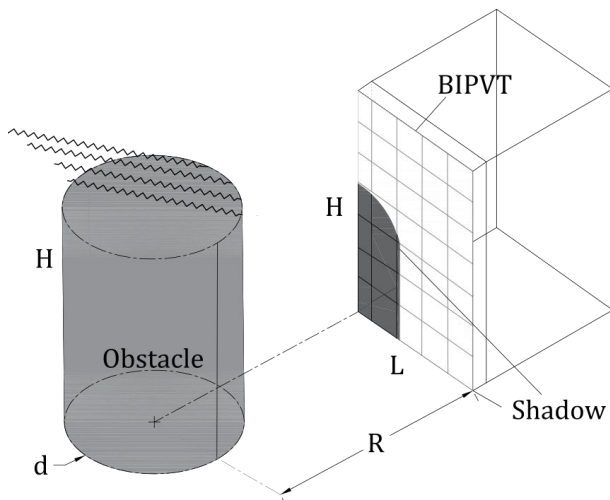
شکل (۱) نمایانگر مدل‌سازی اثر ناشی از سایه‌انداز بر روی یک سامانه فتوولتائیک حرارتی در نمای دوپوسته است. در تحقیق حاضر، ضریب تابش مستقیم B و ضریب تابش پراکنده D مدل‌سازی شده و تعیین می‌گردد.

۲-۱- ضریب تابش مستقیم (B)

نسبت تابش خورشیدی مستقیم دریافتی توسط سامانه فتوولتائیک حرارتی در حضور سایه‌انداز به کل تابش مستقیم قابل دریافت در شرایط مشابه و بدون وجود سایه‌انداز، ضریب تابش مستقیم B نامیده می‌شود و به موقعیت خورشید، مکان

۲-۲- ضریب تابش پراکنده (D)

پیکربندی مورد استفاده در محاسبه ضریب تابش پراکنده بر اساس نمودارهای مرجع [۱۷] تعیین شده است.



شکل ۳ تشکیل سایه بر سامانه ناشی از قرارگیری سایه‌انداز استوانه‌ای شکل

جدول ۱ محاسبه ضریب تابش پراکنده سامانه نشان داده شده در شکل (۳)

ضریب تابش پراکنده	فاصله (R)
	(m)
۰/۴۷	۱/۵
۰/۶۸	۳
۰/۸۹	۷/۵

استفاده از ضریب دید در تعیین ضریب تابش پراکنده این مزیت را دارد که بسیاری از ضرایب شکل برای هندسه‌های متداول به صورت پیش فرض در منابع معتبر ارائه شده‌اند و روش‌های تحلیلی و عددی مختلفی نیز برای محاسبه آن‌ها توسعه یافته است؛ بنابراین، این مدل می‌تواند ابزاری کارآمد و سریع برای محاسبه میزان کاهش تابش پراکنده ناشی از سایه‌اندازی در سناریوهای مختلف باشد.

در نمونه کاربردی اول، محاسبه ضرایب تابش مستقیم و پراکنده برای چیدمان شکل (۲) در شهر تهران (با مختصات: عرض $35/7^\circ$ شمالی و طول $51/3^\circ$ شرقی) با آرایش سامانه در زاویه سمتی 30° درجه جنوب شرقی و در تاریخ سوم جولای ساعت $8:30$ صبح انجام شده است. تابش کل بر اساس مقادیر تابش مستقیم $G = 293 \text{ W/m}^2$ و تابش پراکنده $J = 104 \text{ W/m}^2$ از مرجع [۱۸] به دست می‌آید. با توجه به مقادیر ضرایب تابش به دست آمده برای پیکربندی فوق از بخش (۲) به ازای $R = 6$ ، مقدار تابش 327 W/m^2 و به ازای $R = 0$ 123 W/m^2 خواهد

در مدل سازی سامانه‌های خورشیدی تابش پراکنده به صورت همسانگرد^۱ از کل نیمکره مجازی مطابق شکل (۱) به سامانه فتوولتائیک حرارتی وارد می‌شود. نسبت تابش پراکنده دریافتی توسط سامانه فتوولتائیک حرارتی در حضور سایه‌انداز به کل تابش پراکنده‌ای که در شرایط مشابه و بدون وجود سایه‌انداز قابل دریافت است، ضریب تابش پراکنده D نامیده می‌شود.

شکل (۱) نشان می‌دهد که مانع، دید سامانه را نسبت به نیم کره فضایی مقابل خود کاهش می‌دهد. مقدار این کاهش مساوی ضریب دید سامانه به مانع است که با $F_{\text{BIPVT-Obs}}$ علامت گذاری شده است. در انتقال حرارت تابشی، این ضریب معرفی شده و به عنوانین ضریب دید^۲، ضریب شکل، ضریب هم‌آرایی^۳ نامیده می‌شود و برای آن مقادیر و فرمول‌های آماده در کتاب‌های انتقال حرارت تابشی موجود است؛ بنابراین طبق رابطه (۵) ضریب تابش پراکنده D ، تفاضل عدد یک از ضریب دید سامانه فتوولتائیک حرارتی نسبت به سایه‌انداز است.

$$D = 1 - F_{\text{BIPVT-Obs}} \quad (5)$$

ضریب تابش پراکنده تابعی از ابعاد هندسی بوده و از لحاظ زمانی مقداری ثابت است و برخلاف ضریب تابش مستقیم که تابع موقعیت لحظه‌ای خورشید است، ضریب تابش پراکنده هیچ گونه وابستگی به موقعیت خورشید نداشته و صرفاً یک کمیت هندسی وابسته به شکل، آرایش فضایی و ابعاد هندسی سامانه و سایه‌اندازها محسوب می‌شود. به طور نمونه برای محاسبه ضریب تابش پراکنده در پیکربندی ارائه شده در شکل (۲)، لازم است ضریب دید سامانه به سایه‌انداز تعیین شود. ضریب دید سامانه به سایه‌انداز، با استفاده از قاعده جمع زیرسطوح^۴ و بهره‌گیری از رابطه (الف) ارائه شده در پیوست مقاله محاسبه شده است.

مقدار عددی ضریب تابش پراکنده برای شکل (۲) با ابعاد معرفی شده در بخش قبل، به ازای فاصله‌های $R = 6$ و $R = 0$ برابر با $0/98$ و $0/74$ خواهد بود. در نمونه دوم سایه‌انداز استوانه‌ای به صورت موازی در مقابل سامانه فتوولتائیک حرارتی مطابق شکل (۳) قرار گرفته است و موقعیت سایه‌انداز با مسیر تابش مستقیم خورشید هم‌پوشانی دارد.

نتایج محاسبه ضریب تابش پراکنده برای پیکربندی شکل (۳) با ابعاد d, L, H به ترتیب ۹، ۳، ۳ متر به ازای فاصله‌های مختلف R در جدول (۱) ارائه شده است. ضریب دید این

³ Configuration factor

⁴ Subsurface summation

¹ Isotropic

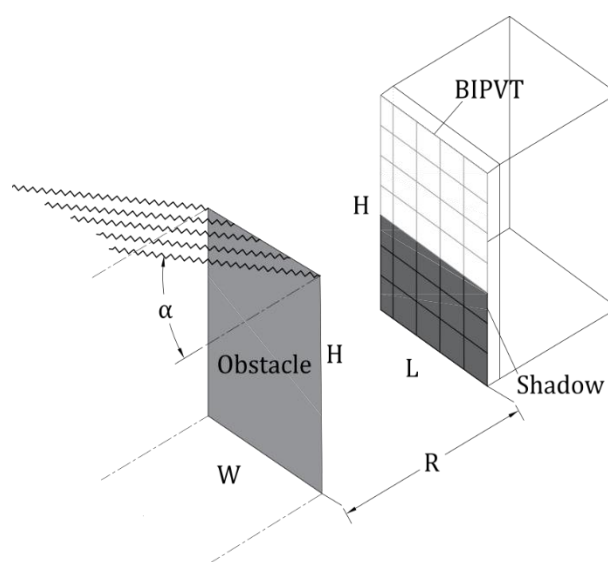
² View factor

نیم فضای بالای افق را شامل می‌شود. از دید سامانه، بخشی از این گنبد ممکن است به دلیل زاویه شیب سامانه و حضور ساختمان‌ها (موانع اطراف) مسدود گردد. در این روش، ابتدا مساحت نواحی مسدود شده گنبد آسمان تعیین و مقادیر هم‌پوشان حذف می‌شوند تا مساحت واقعی مسدود شده آسمان به دست آید. در نهایت، با محاسبه این مساحت، بخش قابل‌دید گنبد آسمان مشخص شده و به‌عنوان مبنای تعیین ضریب دید آسمان (F_{sky}) در ارزیابی تابش پراکنده دریافتی سامانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور مقایسه، ابتدا پیکربندی شکل (۲) و در مرحله بعد نمونه استفاده‌شده در پژوهش Tripathy و همکارانش [۴] مورد بررسی قرار گرفت. ضریب تابش پراکنده برای این پیکربندی، به‌ازای نسبت‌های فاصله‌ای و $R = 6$ و $R = 0$ به ترتیب برابر با 0.98 و 0.74 به‌دست‌آمده است؛ درحالی‌که بر اساس روش ارائه شده در پژوهش Tripathy و همکاران [۴]، مقادیر متناظر 0.91 و 0.71 گزارش شده است. اختلاف مشاهده‌شده ناشی از دقت بالاتر مدل حاضر در تعیین تابش پراکنده رسیده به سامانه است. در پژوهش Tripathy و همکاران [۴] برای تحلیل اثر سایه و ارزیابی هندسی مدل، یک المان از سامانه فتوولتائیک در مرکز یک استوانه در نظر گرفته‌شده است که این نمونه در پژوهش حاضر با قرارگیری یک پنل خورشیدی با طول ۳ متر و ارتفاع ۲ متر و زاویه شیب 30° درجه نسبت به افق در مرکز یک استوانه مطابق شکل (۵) به‌کاربرده شده است. محاسبات ضریب دید بین سطح سامانه و سطح داخلی استوانه با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت^۱ روش ردیابی پرتو^۲ که یک روش عددی در تعیین ضریب دید بوده به‌طوری‌که از هر المان سطح پرتوهایی به سمت سایر سطوح فرستاده می‌شود و با بررسی برخورد یا عدم برخورد آن‌ها، میزان دید متقابل سطوح و سهم هندسی انتقال تابش تعیین می‌گردد، محاسبه شده است.

شکل (۶) نتایج مقایسه ضریب تابش پراکنده مدل پیشنهادی را با داده‌های به‌دست‌آمده در پژوهش Tripathy و همکاران [۴] را نشان می‌دهد. در این تحلیل، نسبت ارتفاع به شعاع H/R در بازه 0.4 تا 4 مورد بررسی قرار گرفته تا روند فیزیکی افزایش ضریب دید و در مقابل، کاهش ضریب تابش پراکنده، مورد تحقیق قرار گیرد. نتایج مرجع [۱۰] نشان می‌دهد که در محاسبه ضریب تابش پراکنده یک پرش غیر فیزیکی رخ می‌دهد. این پرش به دلیل ناتوانی مدل در استفاده از رابطه تک ضابطه‌ای برای بیان ضریب تابش پراکنده است. وجود دو ضابطه متفاوت باعث ایجاد رفتار گسسته شده است، درحالی‌که مدل ارائه‌شده

بود که نشان می‌دهد با کاهش فاصله سایه‌انداز تا تماس کامل با سامانه، تنها حدود 30% درصد از تابش اولیه قابل دریافت خواهد بود

در نمونه دوم سازه‌ای با مقطع مستطیلی مطابق پیکربندی شکل (۴) با ابعاد W, L, H به ترتیب $3, 3, 9$ متر و زاویه سمتی صفر درجه در تاریخ ۲۳ اکتبر ساعت $11:30$ (زاویه تابش $\alpha = 43^\circ$) در مقابل سامانه فتوولتائیک حرارتی در شهر تهران قرار گرفته است. مقادیر تابش مستقیم $G = 510 \text{ W/m}^2$ و پراکنده $J = 129 \text{ W/m}^2$ می‌باشد. ضریب تابش مستقیم بر مبنای تعریف ارائه‌شده در این پژوهش و محاسبات ساده هندسی و ضریب تابش پراکنده با استفاده از رابطه (ب) ارائه‌شده در پیوست این مقاله محاسبه‌شده است. بر این اساس مقدار تابش دریافتی سامانه به‌ازای $R = 9$ و 592 W/m^2 و به‌ازای فاصله $6 \text{ W/m}^2 R = 446$ خواهد بود.



شکل ۴ تشکیل سایه بر سامانه ناشی از قرارگیری سایه‌انداز مقابل آن

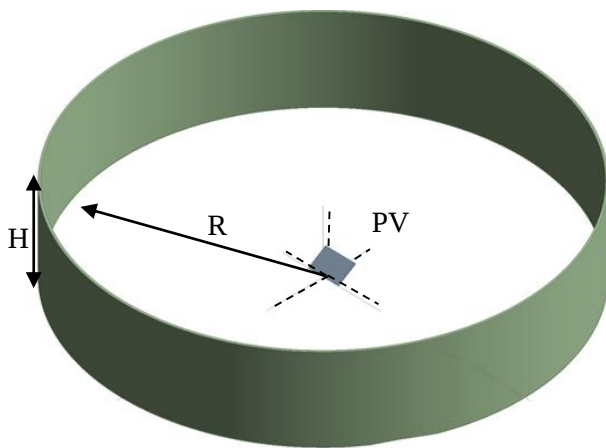
۳- اعتبارسنجی مدل

ضریب تابش مستقیم بر مبنای تعریف بخش (۲-۱) تعیین‌شده که می‌تواند الگوهای گوناگون سایه‌اندازی بر سامانه‌های خورشیدی را با دقت بالا مدل نماید.

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در محاسبه ضریب تابش پراکنده، با توجه به محدود بودن مطالعات تحلیلی در زمینه مدل‌سازی سایه بر سامانه‌های خورشیدی، از نمونه گزارش‌شده در مرجع [۴] استفاده شده است. در این مطالعه، آسمان به‌صورت یک گنبد نیم‌کره‌ای در مختصات افقی مدل‌سازی شده است که

² Ray tracing method

¹ ANSYS fluent



شکل ۵ پنل فتوولتائیک محصور شده توسط ساختمان‌های اطراف بررسی شده در مرجع [۴]

ارائه شد. مدل پیشنهادی قادر است ضرایب تابش مستقیم و پراکنده را در شرایط مختلف با دقت قابل قبولی محاسبه نماید. در این رویکرد، نواحی که تابش مستقیم در آن‌ها به دلیل حضور سایه‌انداز صفر است، به‌عنوان ناحیه سایه تعریف شده و ضریب تابش مستقیم سامانه از نسبت مساحت سایه تشکیل شده بر سطح سامانه به مساحت کل آن و کسر از مقدار واحد حاصل شده است. همچنین، تابش پراکنده با بهره‌گیری از ضریب دید میان سامانه و سایه‌انداز تعیین شده است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل دقیق اثرات کاهش مقدار تابش در طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

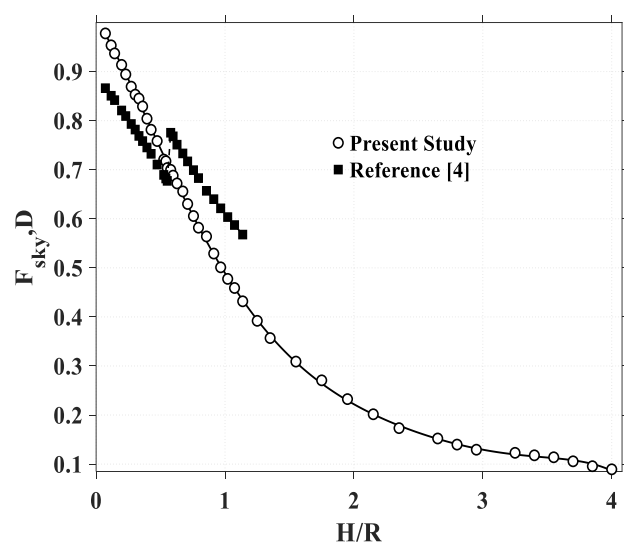
مزیت اصلی این مدل در سادگی محاسبات، برآورد سریع و تطبیق‌پذیری با انواع چیدمان‌های هندسی است؛ به‌گونه‌ای که پیش‌بینی کاهش تابش پراکنده در پیکربندی‌های متنوع سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی و سایه‌اندازها با دقت بالایی امکان‌پذیر است. گستردگی منابع محاسبه ضریب دید، امکان خطا در برآورد ضریب تابش پراکنده را کاهش می‌دهد.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	مساحت (m^2)
B	ضریب تابش مستقیم
D	ضریب تابش پراکنده
d	قطر سایه‌انداز (m)
F	ضریب دید
G	شار تابش مستقیم (W/m^2)
H	ارتفاع (m)
I	تابش کل (W/m^2)

در این پژوهش با تکیه بر یک رابطه واحد، کاهش تابش پراکنده را به‌صورت پیوسته محاسبه می‌نماید. مقایسه نتایج میانگین اختلاف مطلق ۱۱ درصد را نشان می‌دهد. نتایج به‌وضوح بیانگر آن است که ابعاد دقیق هندسی سامانه خورشیدی و سایه‌انداز نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار ضریب تابش پراکنده دارند؛ عاملی که در پژوهش Tripathy و همکاران [۴] نادیده گرفته شده و موجب بروز خطا در برآورد تابش پراکنده گردیده است. به‌عنوان نمونه، در نسبت $H/R=0.3$ ، تنها با افزایش ارتفاع سامانه از ۲ متر به ۳ متر، مقدار ضریب تابش پراکنده از ۰/۸۵ به ۰/۸۸ افزایش می‌یابد. همچنین در بررسی تکمیلی مشخص شد در زاویه شیب نصب ۹۰ درجه برای نسبت $H/R=1$ با مقادیر $H=R=2.5$ مقدار ضریب تابش پراکنده ۰/۳۱ حاصل می‌شود، درحالی‌که با حفظ همان نسبت $H/R=1$ اما با ابعاد متفاوت برای مثال $H=R=20$ ، این مقدار به ۰/۵۴ افزایش می‌یابد. درحالی‌که مدل استفاده شده در در پژوهش Tripathy و همکاران [۴] مقادیر یکسانی را پیش‌بینی می‌نماید.



شکل ۶ تغییرات ضریب تابش پراکنده برحسب نسبت ارتفاع به فاصله ساختمان‌های اطراف

این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، به دلیل لحاظ کردن دقیق ابعاد هندسی سامانه خورشیدی و سایه‌انداز از دقت و قابلیت بالاتری در پیش‌بینی رفتار تابش پراکنده نسبت به مدل استفاده شده در مراجع [۴] و [۱۹] برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل تحلیلی ساده و درعین‌حال کارآمد برای ارزیابی اثر سایه بر تابش دریافتی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی

[9] N. Jiang, F. Li, M. Tan, H. Yu, A. Qu, and H. Feng, "Three-dimensional shading models for estimating global radiation on photovoltaic module," *Renewable Energy*, vol. 242, p. 122333, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122333>.

[10] W. Chen, D. H. Li, S. Li, and S. Lou, "Predicting diffuse solar irradiance on obstructed building façades under irregular skyline patterns for various ISO/CIE standard skies," *Journal of Building Engineering*, vol. 40, p. 102370, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102370>.

[11] Z. Liu, X. Zhou, X. Shen, H. Sun, and D. Yan, "A novel acceleration approach to shadow calculation based on sunlight channel for urban building energy modeling," *Energy and Buildings*, vol. 315, p. 114244, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114244>.

[12] X. Wang *et al.*, "A novel and efficient method for calculating beam shadows on exterior surfaces of buildings in dense urban contexts," *Building and Environment*, vol. 229, p. 109937, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109937>.

[13] A. P. de Almeida Rocha, G. Reynoso-Meza, R. C. Oliveira, and N. Mendes, "A pixel counting based method for designing shading devices in buildings considering energy efficiency, daylight use and fading protection," *Applied Energy*, vol. 262, p. 114497, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114497>.

[14] M. T. Araj and A. Waqas, "Integrated deep learning and image processing method for modeling energy loss due to shadows in solar arrays," *Solar Energy*, vol. 297, p. 113623, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113623>.

[15] U. S. DOE. *EnergyPlus™ Version 24.1.0 Documentation*, Washington, DC, 2024. [Online]. Available: <https://energyplus.net/downloads>.

[16] V. Software. "PV*SOL Help Documentation." Valentin Software GmbH. <https://help.valentin-software.com> accessed.

[17] J. Howell, "A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors," University of Texas at Austin, Austin, TX, 2012. [Online]. Available: <https://www.thermalradiation.net>

[18] J. R. C. European Commission. "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – ERA5 Reanalysis Data." https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en accessed.

[19] M. Tripathy, H. Joshi, and S. Panda, "Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system influenced by adverse effect of shadow," *Applied energy*, vol. 208, pp. 376–389, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.025>.

[20] M. F. Modest and S. Mazumder, *Radiative heat transfer*. Academic press, 2021.

J شار تابش پراکنده (W/m^2)
 L عرض سامانه فتوولتائیک (m)
 R فاصله سامانه از سایه‌انداز (m)
 W عرض سایه‌انداز (m)

علائم یونانی

α زاویه ارتفاع خورشید (deg)

زیر نویس‌ها

BIPVT سامانه فتوولتائیک حرارتی یکپارچه در ساختمان

Obs سایه‌انداز

Shadow سایه

۶- مراجع

[1] O. Bingöl and B. Özkaya, "Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions," *Solar Energy*, vol. 160, pp. 336–343, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.004>.

[2] S. R. Pendem and S. Mikkili, "Modelling and performance assessment of PV array topologies under partial shading conditions to mitigate the mismatching power losses," *Solar Energy*, vol. 160, pp. 303–321, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.010>.

[3] Y. Cascone, V. Corrado, and V. Serra, "Calculation procedure of the shading factor under complex boundary conditions," *Solar Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 2524–2539, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.07.011>.

[4] M. Tripathy, S. Yadav, P. Sadhu, and S. Panda, "Determination of optimum tilt angle and accurate insolation of BIPV panel influenced by adverse effect of shadow," *Renewable Energy*, vol. 104, pp. 211–223, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.034>.

[5] S. Yadav, S. Panda, and M. Tripathy, "Performance of building integrated photovoltaic thermal system with PV module installed at optimum tilt angle and influenced by shadow," *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 11–23, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.030>.

[6] S. Yadav, S. Panda, and C. Hachem-Vermette, "Optimum azimuth and inclination angle of BIPV panel owing to different factors influencing the shadow of adjacent building," *Renewable Energy*, vol. 162, pp. 381–396, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.018>.

[7] S. Yadav, C. Hachem-Vermette, S. K. Panda, G. Tiwari, and S. S. Mohapatra, "Determination of optimum tilt and azimuth angle of BiSPVT system along with its performance due to shadow of adjacent buildings," *Solar Energy*, vol. 215, pp. 206–219, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.033>.

[8] D. Tschopp, A. R. Jensen, J. Dragsted, P. Ohnewein, and S. Furbo, "Measurement and modeling of diffuse irradiance masking on tilted planes for solar engineering applications," *Solar Energy*, vol. 231, pp. 365–378, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.083>.

پیوست‌ها

الف - ضریب دید دو صفحه متقاطع عمود برهم [۲۰]

$$F_{\text{BIPVT-Obs}} = \frac{1}{\pi b} \left(b \tan^{-1} \frac{1}{b} + a \tan^{-1} \frac{1}{a} - \sqrt{a^2 + b^2} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) + \frac{1}{\pi b} \left(\frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1+b^2)(1+a^2)}{1+b^2+a^2} \right] \times \left(\frac{b^2(1+b^2+a^2)}{(1+b^2)(a^2+b^2)} \right)^{b^2} \times \left(\frac{a^2(1+b^2+a^2)}{(1+b^2)(a^2+b^2)} \right)^{a^2} \right) \right]$$

$$a = \frac{L}{H}, b = \frac{W}{H}$$

ب - محاسبه دو صفحه متقابل موازی [۲۰]

$$F_{\text{BIPVT-Obs}} = \frac{2}{\pi ab} \left(\ln \left[\frac{(1+a^2)(1+b^2)}{1+a^2+b^2} \right] \right)^{\frac{1}{2}} + a \sqrt{1+b^2} \tan^{-1} \frac{a}{\sqrt{1+b^2}} + b \sqrt{1+a^2} \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{1+a^2}} - a \tan^{-1} a - b \tan^{-1} b$$

$$a = \frac{L}{R}, b = \frac{H}{R}$$