

برآورد تابش کل خورشید روی سطح فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان

نمونه موردی شهر تهران^۱

راحیل وفائی^۲

شهرام پوردیهیمی^۳

استاد دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

کلیدواژگان: فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان، تابش کل خورشید، جهت و زاویه شیب بهینه.

چکیده

توجه به مبحث انرژی، چه به لحاظ آلودگی و چه از نظر محدودیت منابع، از موضوعات اصلی دهه‌های اخیر به‌شمار می‌رود و باید تا حد امکان از اتلاف انرژی جلوگیری کرد. افزایش تقاضای انرژی در کنار نگرانی‌های زیست‌محیطی، شرایط مثبتی را برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر فراهم کرده است و همراه با پیشرفت مداوم در فناوری این منابع، متخصصان به دنبال چاره‌اندیشی برای تولید انرژی به روش‌های مختلف هستند. تولید برق خورشیدی با فتوولتائیک‌ها یکی از این روش‌های پاک و بدون آلودگی است و انتظار می‌رود که در آینده نزدیک نقش مهمی در تقاضای برق و کاهش گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. ساختمان یکپارچه با فتوولتائیک نیز از راهکارهای مناسب برای نیل به این مقصود است. در این ساختمان‌ها پنل‌های فتوولتائیک بخشی از پوسته خارجی ساختمان در فرایند طراحی معماری در نظر گرفته می‌شوند و هدف از آن‌ها استفاده از فضای نما و بام (با یک ترکیب رضایت‌بخش) برای تولید انرژی در همان جایی است که مصرف می‌شود.

مقدمه

گرم شدن کره زمین، برهم خوردن تعادل محیطی، آلودگی‌های هوا، آب، و زمین از طرفی و از سوی دیگر، محدود بودن انرژی‌های تجدیدناپذیر و افزایش قیمت آن‌ها، که یک مسئله جدی است، سبب شده که کنترل مصرف روزافزون انرژی‌های فسیلی و کاهش آثار

به دلیل وابستگی زیاد عملکرد پنل‌های فتوولتائیک به در دسترس بودن تابش خورشید در محل مورد نیاز، شایسته است که معماران، برای طراحی این ساختمان‌ها، درک درستی از تابش خورشید و میزان کارایی پنل‌های فتوولتائیک داشته باشند. از این رو در این مقاله ضمن بیان مدل‌های محاسبه تابش خورشید، ابتدا مدل انتخابی به طور کامل معرفی و سپس، با استفاده از این مدل برای ترکیب فتوولتائیک‌ها با ساختمان در شهر تهران، میزان تابش دریافتی از خورشید روی سطوح مختلف تعیین شده است. بدین ترتیب برای طراحان قابلیت تحلیل و مقایسه فراهم می‌شود و نتایج حاصل از آن می‌تواند راهگشای طراحی و جهت‌یابی مطابق با خورشید، به منظور دستیابی به بهره‌وری بهتر و بازدهی بیشتر از آن‌ها باشد.

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری نویسنده مسؤل با عنوان امکان‌سنجی استفاده از ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک، مطالعه موردی شهر تهران است که با راهنمایی نویسنده دوم در حال انجام است.

۲. دانشجوی دکتری معماری دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی. نویسنده مسؤل؛

Rahil.vafaei@gmail.com
3_dr_pourdeihimi@yahoo.com

پرسش‌های تحقیق

۱. بهترین جهت و زاویه شیب برای استفاده از فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان در شهر تهران کدام است؟
۲. چه عواملی بر انتخاب جهت و زاویه شیب فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان اثر می‌گذارند؟
۳. به چه روش‌هایی می‌توان فتوولتائیک‌ها را در جهت و زاویه شیب مطلوب با ساختمان ترکیب کرد؟

4. <http://www.iea.org>

۵. فرانسه، آلمان، اتریش، کانادا، فنلاند، ایتالیا، ژاپن، هلند، نروژ، اسپانیا، سوئد، سوئیس، انگلیس و آمریکا.

6. IEA: International Energy Agency

7. Building Integrated Photovoltaic

8. F. Sick & T. Erge. *Task 16: Photovoltaics in Buildings: a Design Handbook for Architects and Engineers*

منفی زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها در اولویت برنامه کشورها قرار گیرد. بیش از یک‌سوم از کل مصرف انرژی به ساختمان‌ها اختصاص دارد، ساختمان‌ها بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده انرژی در جهان و به همان اندازه منبع مهم انتشار دی‌اکسیدکربن هستند. بنا بر این سهم بزرگی را در آلودگی محیط زیست دارند. از این رو لازم است که معماران با ساختن ساختمان‌های کارآمد، که انرژی کمتری برای گرمایش و سرمایش و روشنایی نیاز دارند، انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی را کاهش دهند. طبق گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی این امر، بخصوص در کشورهای در حال توسعه، اهمیت دارد، چرا که اکثریت ساختمان‌هایی که تا سال ۲۰۵۰ موجود خواهند بود هنوز ساخته نشده‌اند و تا آن زمان ساخته می‌شوند.^۴

به منظور مقابله با این معضلات، استفاده از انرژی‌های جانشین مطرح شده و محققان و پژوهشگران را متوجه منابع انرژی تجدیدپذیر و بهره‌گیری از آن‌ها کرده است. جانشینی انرژی‌های تجدیدپذیر با انرژی‌های فسیلی یکی از سیاست‌هایی است که کشورهای توسعه‌یافته آن را دنبال کرده‌اند، زیرا این منابع در درازمدت امکان تأمین نیازهای بشر را به انرژی دارند و راه رسیدن به توسعه پایدار را هموار خواهند ساخت. از این رو انرژی‌های پاک، مانند انرژی خورشیدی، جانشین مناسبی برای تولید برق قلمداد می‌شوند که آلودگی ندارند و در همه نقاط کره زمین به‌آسانی قابل‌دسترس هستند.

امروزه یکی از رایج‌ترین شیوه‌های تبدیل انرژی خورشیدی به برق استفاده از فتوولتائیک‌ها (سلول‌های خورشیدی) است که کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف، از جمله صنعت ساختمان، دارند. در ابتدا فتوولتائیک‌ها با قرارگیری بر روی نما یا بام ساختمان‌های موجود برای تأمین بخشی از برق مورد نیاز آن‌ها به کار می‌رفت و حاصل آن ایجاد ساختمانی با عناصر الحاقی و منظری نامناسب بوده است. با رشد سریع کاربرد فتوولتائیک‌ها در ساختمان، معماران آن را یک زائده مطرح کرده و تلاش کردند که فتوولتائیک‌ها را به گونه‌ای با بنا ترکیب کنند که در عین کارایی به زیبایی محیط نیز لطمه‌ای وارد نکند. در اوایل دهه ۱۹۹۰ متخصصانی از ۱۴ کشور جهان^۵ در آژانس بین‌المللی انرژی^۶ گرد هم آمده و ضمن مطرح کردن و تعریف مفهوم «ساختمان یکپارچه با فتوولتائیک»^۷، تفاهم‌نامه‌ای را امضا کردند که منجر به تدوین کتاب راهنمای طراحی برای معماران و مهندسين شد.^۸ به این ترتیب

شدت تابش در هر مکان است، اما با وجود اهمیت اندازه‌گیری این پارامتر به دلیل بالا بودن هزینه‌ها، وسایل، و ابزار مناسب اندازه‌گیری تابش مانند سایر پارامترهای هواشناسی، از جمله دما و رطوبت، در همه مکان‌ها موجود نیست. از طرفی، دسترسی به اطلاعات سازمان هواشناسی برای هر مکان و زمان امکان‌پذیر نیست و حتی در مواردی به دلیل مشکلات فنی و خرابی دستگاه‌ها، این داده‌ها به صورت کامل در دسترس نیستند. بنا بر این باید به گونه‌ای آن را تخمین زد و از طریق مدل‌های مختلف مطرح از سوی دانشمندان و محققان به داده‌های مورد نیاز دست یافت.

یکی از روابط تجربی که به طور وسیع در همه دنیا در میان کاربران کاربرد و محبوبیت بیشتری دارد، رابطه خطی آنگستروم است که با آن تابش کلی روزانه روی سطح افقی محاسبه می‌شود.^{۱۱} در این مدل، که یک رابطه رگرسیون خطی ساده است، میزان تابش خورشیدی دریافتی روی سطح افقی با استفاده از ساعات آفتابی محاسبه می‌شود، این رابطه را بعدها پرسکات در ۱۹۴۰ اصلاح کرد و به مدل آنگستروم پرسکات مشهور شد.^{۱۲} محققان بسیاری با استفاده از این مدل برای مکان‌های مختلف ضرایب مناسب با شرایط اقلیم و جغرافیایی آن منطقه را ارائه داده‌اند. این رابطه به صورت زیر است:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (1)$$

که در آن:

H : تابش کلی روزانه روی سطح افقی در سطح زمین (MJ/m^2)
 H_0 : تابش کلی روزانه بیرون از جو روی سطح افقی (MJ/m^2)
 a و b : ضرایب رگرسیون

S : تعداد ساعات آفتابی روزانه (h)

S_0 : حداکثر تعداد ساعات آفتابی ممکن روزانه (طول روز) (h)
 مقدار S با اندازه‌گیری مستقیم و مقدار S_0 از روابط مثلثات کروی بر حسب تاریخ و عرض جغرافیایی به دست می‌آید.

پوسته‌های خارجی ساختمان سطوحی در معرض تابش خورشید هستند و می‌توانند در طراحی بنا به منظور نصب فتوولتائیک‌ها استفاده شوند. در حال حاضر رویکرد یکپارچگی فتوولتائیک‌ها با ساختمان^۹ از جمله موضوعات مطرح در علوم ساختمان است و فتوولتائیک‌ها در فرایند طراحی جزئی از پوسته ساختمان هستند که با دیگر اجزا ترکیب و یکپارچه می‌شوند.

به منظور تجزیه و تحلیل فتوولتائیک‌ها و به کارگیری هوشمندانه آن‌ها در ساختمان، چنان‌که زانده و عنصری اضافی در نما یا بام نباشند و به دلیل حساسیت‌هایی که در امر طراحی ساختمان باید از پیش در نظر گرفته شوند، لازم است که معماران و طراحان از میزان انرژی دریافت‌شده از تابش کل خورشید در محل مورد نظر و کارایی پنل‌های فتوولتائیک، به منزله یکی از مصالح ساختمانی، در جهت‌ها و شیب‌های مختلف نسبت به تابش خورشید آگاهی داشته باشند. در این خصوص با به کارگیری روش‌های محاسباتی و استفاده از مجموعه‌ای از معادلات، میزان شدت تابش کل خورشید را در هر زمانی از روز و در هر مکانی از کره زمین پیش‌بینی می‌کنند. از آنجایی که پنل‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان با شیب‌های مختلف در جبهه‌های نما یا روی بام ترکیب می‌شوند، نیاز به معادلاتی است که همه حالت‌ها را پوشش دهد و بتوان با استفاده از آن‌ها تابش دریافتی روی سطوح مختلف فتوولتائیک را برآورد کرد. با این دیدگاه، در این مقاله به محاسبه تابش کل دریافتی از خورشید روی سطح فتوولتائیک پرداخته و با بررسی زوایای شیب مختلف برای رسیدن به حالت بهینه و طراحی صحیح برای استقرار آن‌ها محدوده‌هایی برای ترکیب در نما یا روی بام پیشنهاد داده می‌شود.

۱. پیشینه تحقیق

اندازه‌گیری تابش خورشیدی با استفاده از تجهیزات مرتبط با آن^{۱۰} یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها برای دستیابی به میزان واقعی

9. BIPV (Building Integrated Photovoltaic)

۱۰. پیرانومتر (Pyranometer) ابزاری است که نور خورشید را از میدان دید ۱۸۰ درجه اندازه‌گیری می‌کند، و برای اندازه‌گیری تابش کلی و پراکنده به کار می‌رود. گرماسنج و نیروسنج خورشیدی (Pyrheliometer) وسیله‌ای برای اندازه‌گیری تابش مستقیم خورشید در برخورد عمودی با آن است.
 ۱۱. نک:

A. Angstrom, "Solar and terrestrial radiation".

۱۲. نک:

JA. Prescott, "Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation".

از آنجایی که در همه جای دنیا تابش خورشید به روش‌های مختلفی محاسبه می‌شود، برخی از آن‌ها بر اساس محاسبه مؤلفه‌های تابش مستقیم و پراکنده است. در برآورد مؤلفه‌های تابش مستقیم و پراکنده خورشید، عوامل فیزیکی همچون پدیده‌های جوی و ضریب ابر، به دلیل عبور اشعه خورشید از جو زمین، دخالت دارند که در برخی مدل‌های محاسبه تابش این پارامترها به طور مستقیم لحاظ می‌شوند.^{۱۳}

در مدل‌های دیگری نیز حداکثر دمای روزانه و رطوبت نسبی و بارش را در محاسبات اضافه کرده‌اند.^{۱۴} از معایب این مدل‌ها وابستگی ضرایب تجربی آنگستروم بر پایه پارامترهای جغرافیایی و اقلیمی است که نیاز به عوامل هواشناسی، مانند ساعات آفتابی، دما، و رطوبت دارند و اینکه در اغلب آن‌ها تابش کلی روزانه روی سطح افقی محاسبه می‌شود. همچنین برای یک شهر یا مکان خاص کاربرد دارند، زیرا وابسته به برخی عوامل هواشناسی آن مکان هستند و ضرایب مدل برای همان مکان به دست آمده است.

اگرچه تابش کل اندازه‌گیری شده روی سطح افقی در پایگاه داده‌ها برای برخی مکان‌ها موجود است، اما در بسیاری از موارد نیاز به دانستن میزان تابش روی سطح شیبدار است. از این رو مدل‌های دیگری برای محاسبه تابش تعریف شده‌اند که در آن‌ها با استفاده از اطلاعات تابش خورشید روی سطح افقی، تابش روی سطوح با شیب‌های مختلف نسبت به سطح افق نیز محاسبه می‌شود. محققان بسیاری در سراسر دنیا روی این نوع مدل‌های محاسبه تابش خورشید کار کرده‌اند. مهم‌ترین این مطالعات را روی توزیع تابش کل روزانه لیو و جوردن انجام داده‌اند^{۱۵}، بر این اساس مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های مختلف برای تابش خورشیدی انجام شده و بسیاری از محققان مدل آن‌ها را معرفی و استفاده کرده‌اند.^{۱۶} این مدل‌ها برای برآورد تابش روی سطوح شیبدار، به داده‌های طولانی‌مدت تابش روی سطح افقی نیاز دارند و مقدار تابش به دست آمده با استفاده از این

نک: ۱۳

Paltridge and Proctor, "Monthly Mean Solar Radiation Statistics for Australia".

نک: ۱۴

Javier Almorox, "Estimating Global Solar Radiation from Common Meteorological Data in Aranjuez, Spain"; J. A. Sabbagh, et al, "Estimation of the Total Solar Radiation from Meteorological Data".

نک: ۱۵

Liu and Jordan, "Daily Insolation on Surfaces Tilted towards Equator".

۱۶. برای اطلاعات بیشتر، نک:

Duffie and Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes* (Third ed.); M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*.

مدل‌ها، بر اساس متوسط تابش روزانه در ماه، مورد نظر هستند. در مدل‌های دیگری نیز برای برآورد تابش آسمان را صاف و بدون ابر در نظر می‌گیرند، یکی از این مدل‌ها «مدل روز آفتابی» است که در آن بدون نیاز به داده‌های ثبت شده برای مکان خاص، با محاسبه میزان تابش عبوری از جو زمین، تابش روی سطح افقی و سطوح شیبدار فتوولتائیک، به تفکیک مؤلفه‌های تابش خورشید و به صورت ساعتی پیش‌بینی، می‌شود. اگرچه در مدل‌های برآورد متوسط ماهانه تابش روزانه مسئله ابرناکی را در نظر می‌گیرند و به واقعیت نزدیک‌تر هستند، اما به دلیل نواقص و خطای داده‌های تابش در ایستگاه‌های هواشناسی تهران و نبود دسترسی کامل به آن‌ها، استفاده از این مدل‌ها نتایجی همراه با خطا را در بر خواهد داشت. بنا بر این «مدل روز آفتابی» در این مقاله با در نظر گرفتن شرایط و امکانات موجود انتخاب شده است که برای اقلیم یا عرض جغرافیایی خاصی نیست و در مکان‌های مختلف قابل استفاده است و با استفاده از نتایج آن می‌توان در طراحی ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک جهت‌های مناسب و زوایای شیب بهینه را برای ترکیب پنل‌ها با ساختمان انتخاب کرد.

۲. روش تحقیق (معرفی مدل روز آفتابی برای محاسبه تابش خورشید)

در مقاله حاضر ابتدا معادلات مربوط به تعیین موقعیت خورشید در زمان‌های مشخص نسبت به مکان مورد نظر معرفی و بررسی شده و سپس روش محاسبه مؤلفه‌های تابش خورشید، که هر کدام در موقعیت‌های مختلف به سطح پنل فتوولتائیک برخورد می‌کنند، به ترتیب روی سطح افقی و سطوح شیبدار آمده است. مدل انتخابی این مقاله برای محاسبه تابش خورشید آسمان را صاف و ایزوتروپیک در نظر می‌گیرد.

برای محاسبه موقعیت خورشید در آسمان در مواقع مختلف سال، ماه، و روز نسبت به زمین در مکانی با عرض جغرافیایی

مستقیماً بالای نصف‌النهار محلی (خط طول جغرافیایی) باشد.^{۱۹} در واقع تفاوت بین نصف‌النهار محلی و نصف النهار خورشید زاویه ساعت است که مقادیرهای مثبت آن پیش از ظهر خورشیدی و منفی در بعدازظهر تا غروب است.^{۲۰}

$$(5) \quad H = 15^\circ \times \text{تعداد ساعات قبل (یا بعد) از ظهر خورشیدی}$$

بنا بر این اختلاف ساعات میان زمان مورد نظر با ظهر خورشیدی در ۱۵ ضرب می‌شود و زاویه ساعت خورشید برای آن زمان به دست می‌آید. زاویه ساعت برای طلوع و غروب خورشید بدین صورت محاسبه می‌شود:^{۲۱}

$$(6) \quad H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (\text{برای طلوع خورشید} +)$$

البته در یافتن زاویه آزیموت یک پیچیدگی اندک هست که در طول بهار و تابستان صبح زود و اواخر عصر مقدار این زاویه خورشید بیشتر از ۹۰ درجه از سمت جنوب خواهد بود و از آنجایی که معکوس سینوس (آرک سینوس) یک زاویه مبهم (دوپهلو) است، یعنی دو حالت برای تعیین زاویه هست.^{۲۲} باید آزمونی انجام شود که تعیین کند آزیموت بیشتر از ۹۰ درجه است یا کوچک‌تر.^{۲۳}

$$(7) \quad \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \quad \text{اگر}$$

بنا بر این $|\phi_S| \leq 90^\circ$ در غیر این صورت $|\phi_S| > 90^\circ$

مقداری از تابش خورشید در اثر عبور از جو زمین توسط اجزای مختلف جذب می‌شود که این مقدار بستگی به میزان فاصله‌ای دارد که اشعه تابش باید طی کند تا به سطح زمین برسد نسبت به طول مسیری که خورشید در حالت عمود بر سطح زمین است، که با نسبت توده هوا^{۲۴} بیان می‌شود.^{۲۵}

مشخص، نیاز به محاسبه شماره روز سال، زاویه انحراف خورشید، زاویه ارتفاع خورشید، زاویه ساعت، و زاویه آزیموت (سمت) است و از طرفی، زاویه آزیموت پنل فتوولتائیک، زاویه شیب آن، و زاویه برخورد بین خورشید و سطح پنل فتوولتائیک در محاسبه میزان دریافت تابش خورشید روی آن سطح نقش دارند.

اندازه زاویه انحراف خورشید از رابطه تقریبی کوپر محاسبه می‌شود:^{۱۷}

$$(2) \quad \delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right]$$

δ موقعیت زاویه‌ای خورشید در ظهر خورشیدی نسبت به صفحه استوا است و مقدار آن بین دو حد $-23/45$ و $23/45$ متغیر است، n شماره روز سال (میلادی) است و اعتدال بهاری (روز اول فروردین) را روز ۸۱ام در نظر می‌گیرد.

موقعیت خورشید در هر لحظه از روز با استفاده از زاویه ارتفاع و زاویه آزیموت تعیین می‌شود که زاویه ارتفاع خورشید (زاویه بین اشعه خورشید و سطح افق) و زاویه آزیموت خورشید از روابط زیر به دست می‌آیند:^{۱۸}

$$(3) \quad \sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta$$

$$(4) \quad \sin \phi_S = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta}$$

β زاویه ارتفاع، L عرض جغرافیایی محل، δ زاویه انحراف خورشید، ϕ_S زاویه آزیموت، و H زاویه ساعت است. در این معادلات زاویه آزیموت خورشید برای نیم‌کره شمالی نسبت به جهت جنوب در نظر گرفته می‌شود، به گونه‌ای که زاویه آزیموت خورشید در شرق مثبت و در جنوب صفر و در غرب منفی است. زمان در این معادلات با زاویه ساعت بیان می‌شود و تعداد درجاتی است که زمین باید بچرخد، پیش از اینکه خورشید

17. P. L. Cooper, "The Absorption of Radiation in Solar Stills", p. 336

18. G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, p. 396.

۱۹. اگر چرخش زمین در یک شبانه‌روز را ۳۶۰ درجه در نظر بگیریم، در هر ساعت زمین ۱۵ درجه می‌چرخد.

20. Ibid.

21. Ibid, 405.

22. $\sin x = \sin (180 - x)$

23. Ibid, 397.

24. Air Mass Ratio

25. Ibid, 388.

تولید انرژی برق توسط فتوولتائیک تأثیر خواهند داشت.

در این معادلات ابتدا میزان تابش مستقیم که از جو عبور می‌کند و به سطح زمین می‌رسد محاسبه و سپس تابش پراکنده و انعکاسی به مدل اضافه می‌شود. نقطه شروع برای محاسبه تابش در آسمان صاف برآورد تابش بیرون از جو^{۲۹} است که به فاصله بین زمین و خورشید بستگی دارد و در طول سال تغییر می‌کند.^{۳۰}

تابش بیرون از جو از رابطه ساده زیر به دست می‌آید که اسپنسر تعیین کرده و برای اکثر محاسبات مهندسی دقت کافی دارد:^{۳۱}

$$I_0 = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (9)$$

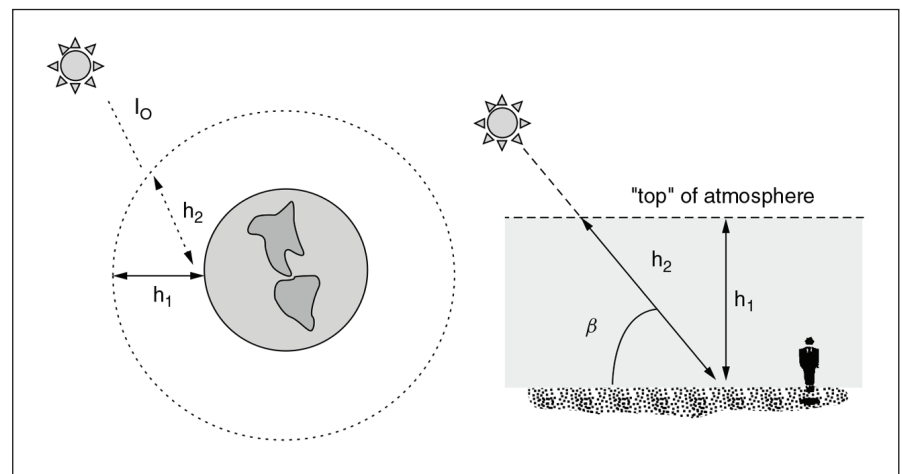
که G_{sc} ثابت خورشیدی و n شماره روز سال است. ثابت خورشیدی^{۳۲} مقدار انرژی خورشیدی است که در واحد زمان در فاصله میانگین زمین از خورشید روی یک سطح عمود بر اشعه خورشید در بیرون از جو دریافت می‌شود و با G_{sc} یا I_{sc} نشان می‌دهند.^{۳۳} بر اساس اندازه‌گیری‌های ناسا ثابت خورشیدی 1353 W/m^2 در نظر گرفته می‌شد (۱۹۷۱) و ثابت خورشیدی که CIBSE^{۳۴} در سال ۱۹۷۸ تعریف کرده معادل 1370 W/m^2 است. مقدار اندازه‌گیری شده ثابت خورشیدی در گذشته چندین بار تجدیدنظر شده است، اگرچه ASTM^{۳۵} مقدار $1366/1 \text{ W/m}^2$ را پیشنهاد کرده^{۳۶}، اما مقادیر بسیاری برای ثابت خورشیدی هستند (مانند 1377 W/m^2) که از سوی محققان پذیرفته شده است. در میان آن‌ها مقدار جدید 1367 W/m^2 ، که WRC^{۳۷} پیشنهاد کرده، معمولاً برای برآورد تابش خورشیدی پذیرفته می‌شود.^{۳۸} هنگامی که اشعه خورشید از جو عبور می‌کند، بخش زیادی از آن با گازهای مختلف در جو جذب می‌شود یا با مولکول‌های هوا و ذرات معلق پراکنده و پخش می‌شوند. درواقع کمتر از نیمی از تابشی که به بالای جو می‌خورد، اشعه مستقیمی است که به سطح زمین می‌رسد.^{۳۹}

$$m = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\sin \beta} \quad (8)$$

که در آن h_1 طول مسیر عبوری اشعه از جو در حالتی است که خورشید مستقیماً بالای سر باشد، h_2 طول مسیری عبوری اشعه خورشید از جو تا به سطح زمین است و β زاویه ارتفاع خورشید است (ت ۱).

بنا بر این برای محاسبه تابش خورشید روی سطح فتوولتائیک با وجود زاویه ارتفاع خورشید (در هر لحظه) در معادلات، مقدار توده هوای عبوری از جو توسط اشعه خورشید در نظر گرفته می‌شود.

تابشی که به سطح پنل فتوولتائیک می‌رسد ترکیبی است از تابش اشعه مستقیم^{۲۶} خورشید و تابش پراکنده^{۲۷} که با مولکول‌های هوا و ذرات معلق در جو زمین پراکنده می‌گردد و تابش انعکاسی^{۲۸} که از زمین یا سطوح دیگر مقابل سطح فتوولتائیک منعکس می‌شود (ت ۲). البته فتوولتائیک‌ها معمولاً فقط با بخش مستقیم تابش خورشید عمل می‌کنند، زیرا تنها این اشعه‌ها از یک جهت ثابت می‌رسند، با این حال اکثر سیستم‌های فتوولتائیک به حالت متمرکز روی اشعه مستقیم کار نمی‌کنند. بنا بر این هر سه نوع تابش (مستقیم، پراکنده، و انعکاسی) در



۲۶. اشعه‌ای که در یک خط مستقیم از جو عبور کند تا روی سطح زمین دریافت شود. Beam (Direct) Radiation

27. Diffuse Radiation
28. Reflected Radiation
29. Extraterrestrial
30. G. M. Masters, *ibid*, p.411.
31. J. Spencer, "Fourier Series Representation of the Position of the Sun", p. 172.
32. Solar Constant
33. Duffie and Beckman, *ibid*, p. 5.

ت ۱. نسبت توده هوا، مأخذ: G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, p. 389.

34. The Chartered Institution of Building Services Engineers
35. American Society for Testing and Material
36. ASTM, "Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables", p. 1.
37. World Radiometric Center

ت ۲. مؤلفه‌های تابش خورشید، مأخذ:

Viorel Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Recent Advances*, p. 4.

اشعه ورودی خورشید است که از رابطه زیر به دست می‌آید:^{۳۳}

$$I_{BP} = I_B \cos \theta \quad (۱۳)$$

روی یک سطح افقی I_B بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$I_{BH} = I_B \cos(90^\circ - \beta) = I_B \sin \beta \quad (۱۴)$$

β زاویه ارتفاع خورشید و θ زاویه ورود خورشید است که تابعی از جهت فتولتائیک و زاویه ارتفاع و زاویه آزیموت خورشید در هر زمان خاص است و با معادله زیر محاسبه می‌شود:^{۳۴}

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_P) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (۱۵)$$

ϕ_S آزیموت خورشید، ϕ_P آزیموت فتولتائیک، و Σ زاویه شیب فتولتائیک نسبت به سطح افق است.

برآورد تابش پراکنده، به دلیل تنوع اجزایی که این تابش را می‌سازند، از تابش مستقیم مشکل‌تر است. تابش ورودی از ذرات

کاهش تابش ورودی تابعی است از فاصله‌ای که اشعه باید از جو عبور کند و به‌سادگی قابل‌محاسبه است. علاوه بر این عوامل دیگری مانند گردوغبار، آلودگی هوا، بخار آب جوی، ابرها، و مه‌آلودگی تأثیر می‌گذارند که محاسبه آن‌ها ساده نیست. برای محاسبه عادی کاهش تابش ورودی روی سطح زمین از مدلی با فرمول شماره «۱۰» استفاده می‌شود که در آن کاهش به صورت تابع نمایی نزولی در نظر گرفته می‌شود:

$$I_B = A e^{-km} \quad (۱۰)$$

که در آن I_B بخشی از اشعه تابشی است که به یک سطح عمود بر اشعه خورشید می‌رسد، A شار بیرون از جو آشکار، K عامل بدون بعد به نام عمق دید، و m نسبت توده هوا (که پیش‌تر بیان شد) است.^{۳۵}

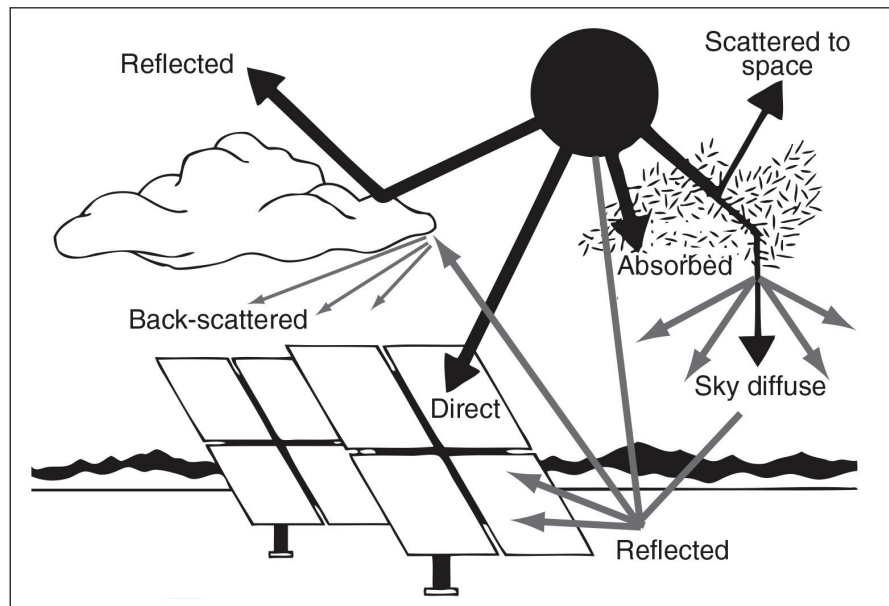
مقدارهای A و K بر اساس مدل شار خورشیدی روز آفتابی ASHRAE^{۳۶} انتخاب می‌شود که این مدل بر پایه داده‌های تجربی است و در سال ۱۹۵۸ برای یک جو نسبتاً گردوفاکی با بخار آب جوی برابر با مقدار ماهیانه در ایالات متحده جمع‌آوری شده است. برای محاسبه A و K از معادله زیر نیز می‌توان استفاده کرد:^{۳۷}

$$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 75) \right] \quad (\text{W/m}^2) \quad (۱۱)$$

$$K = 0.174 + 0.035 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right] \quad (۱۲)$$

n شماره روز سال است.

وقتی یک اشعه مستقیم خورشید به سطح فتولتائیک برخورد می‌کند، دیگر عمود بر اشعه نیست و در معادلات زیر با I_{BP} نشان داده می‌شود که منظور از P ، فتولتائیک است. I_{BP} معادله ساده‌ای از زاویه میان خط عمود بر سطح فتولتائیک و



سطح افقی بزرگ با قابلیت انعکاس ρ مقابل پنل فرض می‌کنند که اشعه‌های تابش مستقیم و پراکنده را با شدت برابر از تمام جهات منعکس می‌کند. مقادیر بازتاب‌های زمین (آلبدو) بین ۰/۱۵۴ و ۰/۲۲۰ متغیر است که محدوده انعکاس در محیط‌های نیمه‌شهری است.^{۴۸} محدوده مقادیر بازتاب زمین از حدود ۰/۸ برای برف تازه تا حدود ۰/۱ برای یک سطح آسفالت و مقدار پیش‌فرض معمول برای زمین یا چمن تا حدود ۰/۲ است.^{۴۹} قسمتی از انرژی تابش انعکاسی که با پنل فتوولتائیک دریافت خواهد شد به شیب پنل بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:^{۵۰}

$$I_{RP} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (۱۹)$$

ρ ضریب انعکاس (آلبدو) است.

هنگام صفر بودن زاویه شیب پنل تابش انعکاسی روی سطح پنل دریافت نمی‌شود و هنگام قائم بودن پنل نیمی از تابش انعکاسی را دریافت می‌کند. با جانشین کردن عبارات از معادله‌های (۱۴) و (۱۵) معادله تابش انعکاسی بدین صورت می‌شود:

$$I_{RP} = \rho I_B (\sin \beta + C) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (۲۰)$$

از مجموع تابش مستقیم و پراکنده و انعکاسی (I_{DP} و I_{BP}) و I_{RP} تابش کل خورشید روی سطح فتوولتائیک به دست می‌آید.

۳. محاسبه میزان تابش کل خورشید^{۵۱} روی سطح فتوولتائیک

به منظور آگاهی از دریافت بیشتر تابش کل خورشید روی سطح فتوولتائیک در شهر تهران و افزایش نیروی برق توسط آن، یک صفحه واحد در نظر گرفته شد که از حالت افقی (۰ درجه) تا قائم (۹۰ درجه)، شیب آن ۱۰ درجه ۱۰ درجه تغییر می‌کند. همچنین این صفحه با آزیموت‌های مختلف از جنوب به سمت شرق و

جوی و رطوبت پخش و توسط ابرها منعکس می‌شود. بخشی از آن به سمت آسمان منعکس و دوباره پراکنده و به زمین برمی‌گردد. در ساده‌ترین مدل‌های برآورد تابش پراکنده فرض می‌کنند که اشعه‌های تابش پراکنده از همه جهات با شدت برابر به سطح می‌رسند. به بیان دیگر، آسمان را ایزوتروپیک در نظر می‌گیرند. مدل توسعه‌یافته توسط ترلکلد و جوردن، که در مدل شار خورشیدی روز آفتابی ASHRAE استفاده می‌شود، تابش پراکنده روی یک سطح افقی را نسبتی از تابش مستقیم حساب می‌کند که از رابطه زیر به دست می‌آید:^{۴۵}

$$I_{DH} = C I_B \quad (۱۶)$$

I_{DH} تابش پراکنده است؛ و C نیز عامل پراکنده آسمان است که بدین صورت محاسبه می‌شود:^{۴۶}

$$C = 0.095 + 0.04 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right] \quad (۱۷)$$

آنچه که در اینجا مد نظر است این است که چه مقدار از تابش پراکنده به سطح پنل فتوولتائیک برخورد می‌کند. هنگامی که زاویه شیب پنل صفر باشد، پنل کل آسمان را می‌بیند، بنا بر این کل تابش پراکنده آسمان را دریافت می‌کند. هنگامی که پنل به صورت قائم (زاویه شیب ۹۰ درجه نسبت به افق) باشد نیمی از آسمان را می‌بیند، بنا بر این نیمی از تابش پراکنده آسمان را دریافت می‌کند. معادله زیر برای تابش پراکنده روی سطح پنل فتوولتائیک استفاده می‌شود:^{۴۷}

$$I_{DP} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C I_B \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (۱۸)$$

مؤلفه دیگر تابش، که از سطوح مقابل پنل فتوولتائیک منعکس می‌شود، تابش انعکاسی است. مقدار این مؤلفه در روزهای روشن و برفی زیاد می‌شود، اما در روزهای دیگر می‌توان از مقدار کم آن صرف نظر کرد. در ساده‌ترین مدل، یک

38. Li, H. & et al, "Solar constant values for estimating solar radiation", p. 1785; Duffie and Beckman, ibid, p. 6.
39. G. M. Masters, ibid, p. 410.
40. Ibid, p. 412.
41. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers انجمن مهندسان گرمایش و سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا
42. Ibid.
43. Ibid, 414.
44. Ibid.
۴۵. نک: Threlkeld and Jordan, "Direct Radiation Available on Clear Days".
46. G. M. Masters, ibid, p. 416.
47. Ibid.
48. Ineichen & et al, "Ground-reflected Radiation and Albedo", p. 208.
49. G. M. Masters, ibid, p. 417.
50. Ibid, 418.
51. Global or Total Radiation

۵۲. به دلیل آنکه در نیم کره شمالی، جبهه‌های شمالی ساختمان در اغلب مواقع سال از تابش مستقیم خورشید محروم هستند، در این تحقیق تابش دریافتی برای این سطوح در محاسبات لحاظ نشده، هدف دریافت هرچه بیشتر تابش خورشید روی سطح فتوولتائیک است.

۵۳. راحیل وفائی، «بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان»، ص ۷۱. ۵۴. همان.

۳. تابش روزانه روی سطوح رو به جنوب و جنوب شرق یا غرب (چرخش ۳۰ درجه از جنوب) با شیب‌های مختلف برای یک روز نمونه در هر ماه، مأخذ: نگارندگان.

بازدهی متفاوتی خواهند داشت. بر همین اساس می‌توان جهت‌ها و زوایای شیب بهینه پنل‌های فتوولتائیک را تعیین کرد.^{۵۳} فتوولتائیک‌ها در بخش‌های مختلف با ساختمان ترکیب می‌شوند. این ترکیب می‌تواند بر انتخاب زاویه شیب بهینه آن‌ها تأثیر بگذارد، چرا که به کاربردن آن‌ها در نمای قائم یا شیبدار، در بام مسطح یا شیبدار، نورگیرها و آتریوم‌ها، و ترکیب با سایبان‌ها و لوورها مستلزم زاویه شیب خاصی خواهد بود.^{۵۴}

۴. تجزیه و تحلیل

به دلیل اینکه پنل‌های فتوولتائیک در ترکیب با ساختمان کاربردهای متفاوتی در نما یا بام دارند، در این تحقیق از تابش انعکاسی صرف نظر شد و تابش کل روزانه از مجموع تابش مستقیم و پراکنده به دست آمده است. «ت ۳» میزان تابش روزانه خورشید روی سطوح رو به جنوب و جنوب شرق یا غرب (چرخش ۳۰ درجه از جنوب) با شیب‌های مختلف را در شهر تهران نشان می‌دهد. برای هر ماه یک روز نمونه (۱۲م ماه

غرب می‌چرخد.^{۵۲} با در نظر گرفتن حالات مختلف برای زاویه آزیموت و شیب این صفحه، پارامترهای لازم برای محاسبه تابش مستقیم، پراکنده، و انعکاسی به کمک مدل انتخابی و معادلات مربوطه در نرم‌افزار اکسل به صورت ساعتی در ۳۶۵ روز سال محاسبه شدند. عرض جغرافیایی که در محاسبات لحاظ شده است ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی برای شهر تهران است. از مجموع هر سه تابش، تابش دریافت شده روی صفحه مورد نظر در یک ساعت مشخص از یک روز به دست آمد که با مجموع تابش‌ها از طلوع تا غروب، تابش کلی دریافت شده در یک روز با واحد کیلووات ساعت بر مترمربع محاسبه شده است. پس از به دست آوردن مؤلفه‌های تابش خورشید، از مجموع آن‌ها در هر روز نمودارهای روزانه، ماهیانه، و سالیانه برای زاویه شیب‌های ۰ تا ۹۰ درجه پنل ترسیم شدند که بیانگر میزان دریافت تابش کل خورشید روی سطوح مختلف است. چنانچه پنل‌های فتوولتائیک متناسب با زاویه هر یک از این شیب‌ها قرار گیرند، بر اساس میزان انرژی‌ای که از خورشید دریافت می‌کنند،

آزیموت		شدت تابش (آسمان صاف) روزانه (kWh/m ²)									عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی								
		جنوب									جنوب شرق / غرب (۳۰°)								
شیب (درجه)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
ژانویه (Jan)	۳/۵۹	۴/۴۸	۵/۲۴	۵/۸۴	۶/۲۸	۶/۵۳	۶/۵۹	۶/۴۵	۶/۱۳	۵/۶۲	۴/۳۵	۴/۹۹	۵/۴۸	۵/۸۱	۵/۹۷	۵/۹۶	۵/۷۷	۵/۴۱	۴/۹۰
فوریه (Feb)	۴/۸۲	۵/۶۳	۶/۲۸	۶/۷۴	۷/۰۱	۷/۰۷	۶/۹۳	۶/۵۹	۶/۰۵	۵/۳۴	۵/۵۱	۶/۰۴	۶/۴۱	۶/۵۹	۶/۵۸	۶/۳۸	۵/۹۹	۵/۴۳	۴/۷۴
مارس (Mar)	۶/۲۰	۶/۸۰	۷/۲۰	۷/۴۰	۷/۳۸	۷/۱۶	۶/۷۲	۶/۰۹	۵/۲۹	۴/۳۴	۶/۷۱	۷/۰۲	۷/۱۴	۷/۰۸	۶/۸۲	۶/۳۷	۵/۷۵	۵/۰۱	۴/۱۳
آوریل (Apr)	۷/۴۵	۷/۷۳	۷/۷۸	۷/۶۲	۷/۲۵	۶/۶۸	۵/۹۲	۵/۰۰	۳/۹۴	۲/۸۰	۷/۶۸	۷/۷۱	۷/۵۲	۷/۱۷	۶/۶۳	۵/۹۳	۵/۱۳	۴/۲۰	۳/۲۵
مه (May)	۸/۱۳	۸/۱۵	۷/۹۵	۷/۵۲	۶/۹۰	۶/۱۲	۵/۱۶	۴/۰۸	۲/۹۷	۱/۸۰	۸/۱۴	۷/۹۳	۷/۵۴	۶/۹۸	۶/۲۶	۵/۴۱	۴/۴۷	۳/۵۱	۲/۵۴
ژوئن (Jun)	۸/۲۹	۸/۲۱	۷/۹۰	۷/۳۷	۶/۶۷	۵/۸۱	۴/۸۰	۳/۷۰	۲/۵۸	۱/۴۹	۸/۲۰	۷/۹۱	۷/۴۳	۶/۷۹	۶/۰۱	۵/۱۳	۴/۱۶	۳/۱۹	۲/۲۳
ژولای (Jul)	۸/۰۴	۸/۰۵	۷/۸۳	۷/۴۰	۶/۷۸	۶/۰۰	۵/۰۶	۳/۹۹	۲/۹۱	۱/۷۷	۸/۰۳	۷/۸۲	۷/۴۲	۶/۸۶	۶/۱۴	۵/۳۲	۴/۳۹	۳/۴۴	۲/۴۹
آگوست (Aug)	۷/۲۸	۷/۵۴	۷/۵۹	۷/۴۳	۷/۰۶	۶/۵۰	۵/۷۷	۴/۸۷	۳/۸۵	۲/۷۵	۷/۵۰	۷/۵۲	۷/۳۳	۶/۹۸	۶/۴۵	۵/۷۶	۴/۹۸	۴/۰۸	۳/۱۶
سپتامبر (Sep)	۶/۰۶	۶/۶۱	۶/۹۸	۷/۱۶	۷/۱۲	۶/۸۹	۶/۴۶	۵/۸۵	۵/۰۷	۴/۱۶	۶/۵۳	۶/۸۱	۶/۹۱	۶/۸۴	۶/۵۷	۶/۱۳	۵/۵۳	۴/۸۱	۳/۹۶
اکتبر (Oct)	۴/۶۴	۵/۴۰	۶/۰۱	۶/۴۵	۶/۷۰	۶/۷۶	۶/۶۲	۶/۳۰	۵/۷۹	۵/۱۲	۵/۲۹	۵/۷۹	۶/۱۳	۶/۳۰	۶/۲۹	۶/۰۹	۵/۷۲	۵/۱۹	۴/۵۳
نوامبر (Nov)	۳/۵۰	۴/۳۶	۵/۰۹	۵/۶۷	۶/۰۹	۶/۳۳	۶/۳۸	۶/۲۵	۵/۹۳	۵/۴۵	۴/۲۴	۴/۸۵	۵/۳۲	۵/۶۴	۵/۷۹	۵/۷۸	۵/۵۹	۵/۲۵	۴/۷۵
دسامبر (Dec)	۳/۱۱	۴/۰۰	۴/۷۷	۵/۴۰	۵/۸۷	۶/۱۸	۶/۲۹	۶/۲۳	۵/۹۸	۵/۵۶	۳/۸۷	۴/۵۲	۵/۰۴	۵/۴۱	۵/۶۳	۵/۶۷	۵/۵۶	۵/۲۷	۴/۸۴

میلادی) انتخاب و میزان تابش روزانه در آن با واحد kWh/m^2 محاسبه شده است.

میزان تابش دریافتی از خورشید روی سطوح رو به جنوب با زوایای شیب مختلف در ۷۲٪ از مواقع سال بیشتر از تابش روی سطوح جنوب شرق یا غرب با زاویه شیب‌های مختلف است. در ۲۵٪ مواقع سال یعنی در ماه‌های مه، ژوئن، و ژولای تابش روی سطوح رو به جنوب کمتر است که برای زاویه شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه نسبت به افق این اتفاق می‌افتد. در ماه‌های گرم مذکور و ماه‌های سرد نوامبر، دسامبر، و ژانویه هرچه زاویه شیب پنل بیشتر باشد، تأثیر آزیموت سطح بر دریافت تابش خورشید بیشتر خواهد شد، به صورتی که سطوح قائم رو به جنوب در فصل تابستان تابش بسیار کمتر و در فصل زمستان تابش بسیار بیشتری نسبت به سطوح قائم رو به جنوب شرق یا غرب دریافت خواهند کرد.

«ت ۴» میزان تابش روزانه خورشید روی سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۶۰ درجه از جنوب) و رو به شرق

یا غرب با شیب‌های مختلف را در شهر تهران نشان می‌دهد. برای هر ماه یک روز نمونه (۲۱م ماه میلادی) انتخاب و میزان تابش روزانه در آن با واحد kWh/m^2 محاسبه شده است.

سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۶۰ درجه از جنوب) با زاویه شیب‌های مختلف در ۹۰٪ از مواقع سال تابش بیشتری را نسبت به سطوح رو به شرق یا غرب دریافت می‌کنند و تنها در ۷٪ مواقع یعنی در ماه‌های مه، ژوئن، و ژولای تابش دریافتی روی سطوح رو به شرق یا غرب بیشتر می‌شود که این حالت نیز برای زاویه شیب‌های بیشتر از ۷۰ درجه نسبت به افق صادق است. تفاوت دریافت تابش خورشید بین سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (۶۰ درجه) با سطوح رو به شرق یا غرب در فصل پاییز و زمستان قابل توجه است و این اختلاف تا $1/72 kWh/m^2$ در روز نیز دیده می‌شود.

با مقایسه نتایج جدول «ت ۳» و «ت ۴» مشخص می‌شود که دریافت تابش روی سطح رو به جنوب نسبت به سطح رو به شرق یا غرب در ۸۰٪ مواقع سال بیشتر است که این اختلاف

ت ۴. تابش روزانه روی سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۶۰ درجه از جنوب) و سطوح رو به شرق یا غرب با شیب‌های مختلف برای یک روز نمونه در هر ماه، مأخذ: نگارندگان.

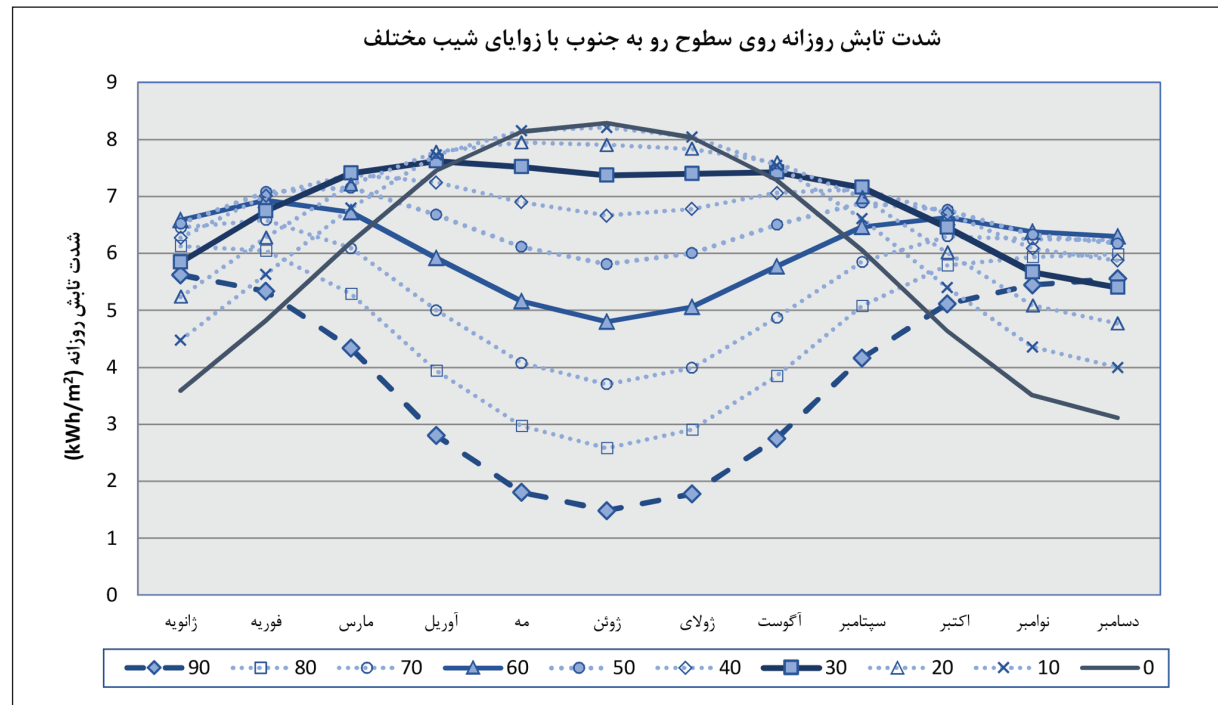
شدت تابش (آسمان صاف) روزانه (kWh/m^2)												عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی							
آزیموت		جنوب شرق / غرب (60°)										شرق / غرب							
شیب (درجه)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
ژانویه (Jan)	۳/۵۹	۴/۰۱	۴/۳۱	۴/۵۲	۴/۶۱	۴/۵۷	۴/۴۳	۴/۱۹	۳/۸۳	۳/۳۸	۳/۵۴	۳/۴۵	۳/۳۱	۳/۱۵	۲/۹۶	۲/۷۴	۲/۴۸	۲/۲۱	۱/۸۷
فوریه (Feb)	۴/۸۲	۵/۲۰	۵/۴۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۴۰	۵/۱۳	۴/۷۶	۴/۲۵	۳/۷۱	۴/۷۷	۴/۶۲	۴/۴۴	۴/۲۱	۳/۹۱	۳/۶۲	۳/۲۴	۲/۸۷	۲/۴۳
مارس (Mar)	۶/۲۰	۶/۴۵	۶/۵۶	۶/۵۲	۶/۳۵	۶/۰۴	۵/۶۱	۵/۰۷	۴/۴۵	۳/۷۶	۶/۱۱	۵/۹۲	۵/۶۵	۵/۲۹	۴/۹۲	۴/۴۸	۳/۹۸	۳/۴۸	۲/۹۱
آوریل (Apr)	۷/۴۵	۷/۵۵	۷/۴۶	۷/۲۴	۶/۸۷	۶/۳۹	۵/۸۰	۵/۱۰	۴/۳۷	۳/۵۸	۷/۳۶	۷/۱۰	۶/۷۴	۶/۳۱	۵/۸۰	۵/۲۲	۴/۶۲	۳/۹۹	۳/۳۱
مه (May)	۸/۱۳	۸/۰۹	۷/۸۷	۷/۵۰	۶/۹۸	۶/۳۹	۵/۶۹	۴/۹۰	۴/۱۲	۳/۳۱	۸/۰۲	۷/۷۳	۷/۳۲	۶/۸۰	۶/۲۰	۵/۵۵	۴/۸۸	۴/۱۷	۳/۴۳
ژوئن (Jun)	۸/۲۹	۸/۱۹	۷/۹۱	۷/۴۸	۶/۹۲	۶/۲۸	۵/۵۵	۴/۷۴	۳/۹۳	۳/۱۳	۸/۱۷	۷/۸۷	۷/۴۳	۶/۸۸	۶/۲۵	۵/۵۹	۴/۸۹	۴/۱۵	۳/۴۰
ژولای (Jul)	۸/۰۴	۷/۹۸	۷/۷۶	۷/۳۹	۶/۸۷	۶/۲۸	۵/۵۹	۴/۸۱	۴/۰۳	۳/۲۴	۷/۹۲	۷/۶۴	۷/۲۳	۶/۷۱	۶/۱۲	۵/۴۷	۴/۸۰	۴/۱۰	۳/۳۷
اگوست (Aug)	۷/۲۸	۷/۳۷	۷/۲۸	۷/۰۶	۶/۶۶	۶/۲۱	۵/۶۲	۴/۹۴	۴/۲۳	۳/۴۶	۷/۱۹	۶/۹۴	۶/۵۸	۶/۱۵	۵/۶۵	۵/۰۷	۴/۴۹	۳/۸۶	۳/۲۰
سپتامبر (Sep)	۶/۰۶	۶/۲۹	۶/۳۸	۶/۳۳	۶/۱۵	۵/۸۳	۵/۴۱	۴/۸۸	۴/۲۷	۳/۶۰	۵/۹۷	۵/۷۸	۵/۵۱	۵/۱۶	۴/۷۸	۴/۳۴	۳/۸۵	۳/۳۶	۲/۸۱
اکتبر (Oct)	۴/۶۴	۴/۹۹	۵/۲۲	۵/۳۱	۵/۳۰	۵/۱۵	۴/۸۹	۴/۵۳	۴/۰۴	۳/۵۲	۴/۵۹	۴/۴۴	۴/۲۵	۴/۰۳	۳/۷۳	۳/۴۴	۳/۰۷	۲/۷۲	۲/۲۹
نوامبر (Nov)	۳/۵۰	۳/۹۰	۴/۲۰	۴/۴۰	۴/۴۸	۴/۴۴	۴/۳۰	۴/۰۷	۳/۷۱	۳/۲۸	۳/۴۵	۳/۳۶	۳/۲۳	۳/۰۷	۲/۸۹	۲/۶۶	۲/۴۱	۲/۱۴	۱/۸۲
دسامبر (Dec)	۳/۱۱	۳/۵۳	۳/۸۵	۴/۰۹	۴/۲۲	۴/۲۲	۴/۱۳	۳/۹۳	۳/۶۳	۳/۲۳	۳/۰۷	۳/۰۰	۲/۹۰	۲/۷۶	۲/۶۲	۲/۴۲	۲/۲۱	۱/۹۸	۱/۶۹

«ت ۵» تابش دریافتی از خورشید را در روز ۲۱ هر ماه میلادی (معادل اول هر ماه شمسی) روی سطوح رو به جنوب با شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. چنانچه سطحی را رو به جنوب به صورت قائم (شیب ۹۰ درجه) قرار دهیم، تابش دریافتی آن در فصل پاییز و زمستان از سطح افقی بیشتر است. در مقابل تابش دریافتی روی سطح افقی در فصل بهار و تابستان چندین برابر سطح قائم می‌شود. بیشترین و کمترین دریافت تابش از خورشید در ۲۱م ژوئن که مطابق با روز اول تیر است به ترتیب بر روی سطح افقی به مقدار $8/29 \text{ kWh/m}^2$ و بر روی سطح قائم به مقدار $1/49 \text{ kWh/m}^2$ است.

هرچه به سمت ماه‌های گرم پیش می‌رویم سطوح با شیب کمتر نسبت به افق از نظر دریافت تابش خورشید وضعیت بهتری خواهند داشت (سطوح ۰ درجه تا ۴۰ درجه نسبت به سطح افق) و اما در ماه‌های سرد سال سطوح با شیب ۳۰ تا ۹۰ درجه تابش

تابش در فصل پاییز و زمستان بسیار قابل توجه و تا 4 kWh/m^2 در روز برای سطوح با زاویه شیب ۷۰ درجه نسبت به افق هست. بنا بر این در فصول سرد هرچه زاویه شیب سطح بیشتر باشد و آزیموت کمتر (گرایش به سمت جنوب) تابش بهتری دریافت خواهد کرد. اما در فصول بهار و تابستان سطوح با زاویه شیب بالاتر نسبت به افق (نزدیک‌تر به قائم)، هرچه به سمت شرق یا غرب گرایش بیشتری داشته باشند، از تابش بهتری برخوردار خواهند شد.

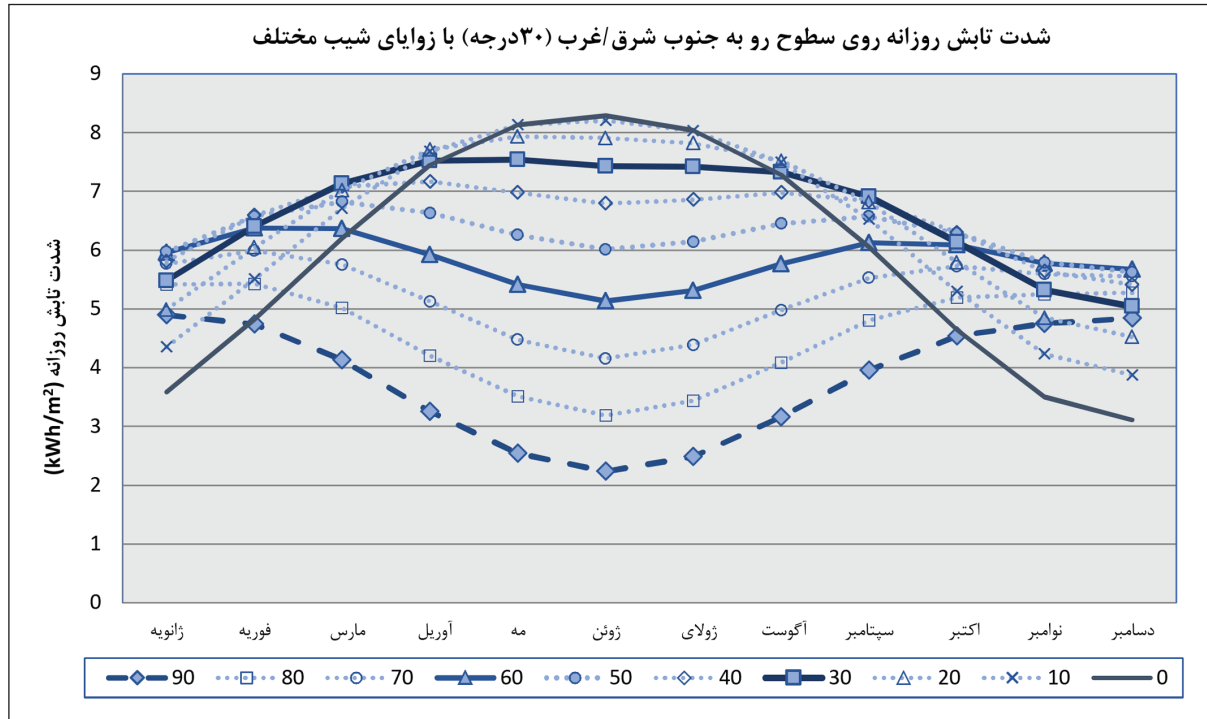
به منظور درک بهتر «ت ۳» و «ت ۴»، داده‌های شدت تابش به تفکیک جهات جغرافیایی بر روی نمودار ترسیم شده‌اند تا بتوان با تجزیه و تحلیل آن‌ها بهترین جهت و زاویه شیب را برای کاربردهای مختلف پنل‌های فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان در شهر تهران تعیین و در موقعیت‌های مختلف تصمیم‌گیری‌های صحیحی اتخاذ کرد.



ت ۵. تابش روزانه در تهران روی سطوح رو به جنوب برای یک روز نمونه در هر ماه، تابعی از زاویه شیب پنل فتوولتائیک، مأخذ: نگارندگان.

میلادی (معادل اول هر ماه شمسی) روی سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۳۰ درجه از جنوب) با شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، تابش روی این سطوح اختلاف کمتری با سطوح رو به جنوب دارد، اما در ماه‌های گرم سطوح با شیب نزدیک به قائم، هنگامی که رو به جنوب شرق یا غرب باشند، از تابش بیشتری (حداکثر تا kWh/m^2 ۰/۲۷ در روز) نسبت به سطوح رو به جنوب برخوردار می‌شوند. «ت ۷» تابش دریافتی از خورشید را در روز ۲۱ هر ماه میلادی (معادل اول هر ماه شمسی) روی سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۶۰ درجه از جنوب) با شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. هرچه سطوح شیب‌دار بیشتر به سمت شرق یا غرب متمایل می‌شود، تابش دریافتی آن‌ها با سطوح رو به جنوب تفاوت بیشتری خواهد داشت. به طوری که روند دریافت

بیشتری دریافت می‌کنند که البته زاویه شیب ۵۰ و ۶۰ درجه بالاترین دریافت را دارند. به طور کلی در ماه‌های گرم زاویه ارتفاع خورشید بالاتر است، در نتیجه زاویه ورود اشعه خورشید به سطوح افقی کمتر خواهد بود بنا بر این بیشترین تابش را از خورشید دریافت می‌کنند. در ماه‌های دیگر سال سطوح با زاویه شیب بیشتر از ۰ تا کمتر از ۷۰ درجه تابش بهتری را نسبت به سطح افقی دریافت می‌کنند. سطوح رو به جنوب با زاویه شیب ۳۰ درجه در اغلب ماه‌ها تابش بیشتری را نسبت به سطوح افقی دریافت می‌کنند و فقط در چند ماه بهار و تابستان (مه، ژوئن، و ژولای) تابش دریافتی سطوح افقی ۷ تا ۱۱٪ بیشتر خواهد بود. دریافت تابش کل روزانه روی سطح ۳۰ درجه رو به جنوب بین kWh/m^2 ۵/۴۰ تا ۷/۶۲ در ماه‌های مختلف متغیر است. «ت ۶» تابش دریافتی از خورشید را در روز ۲۱ هر ماه



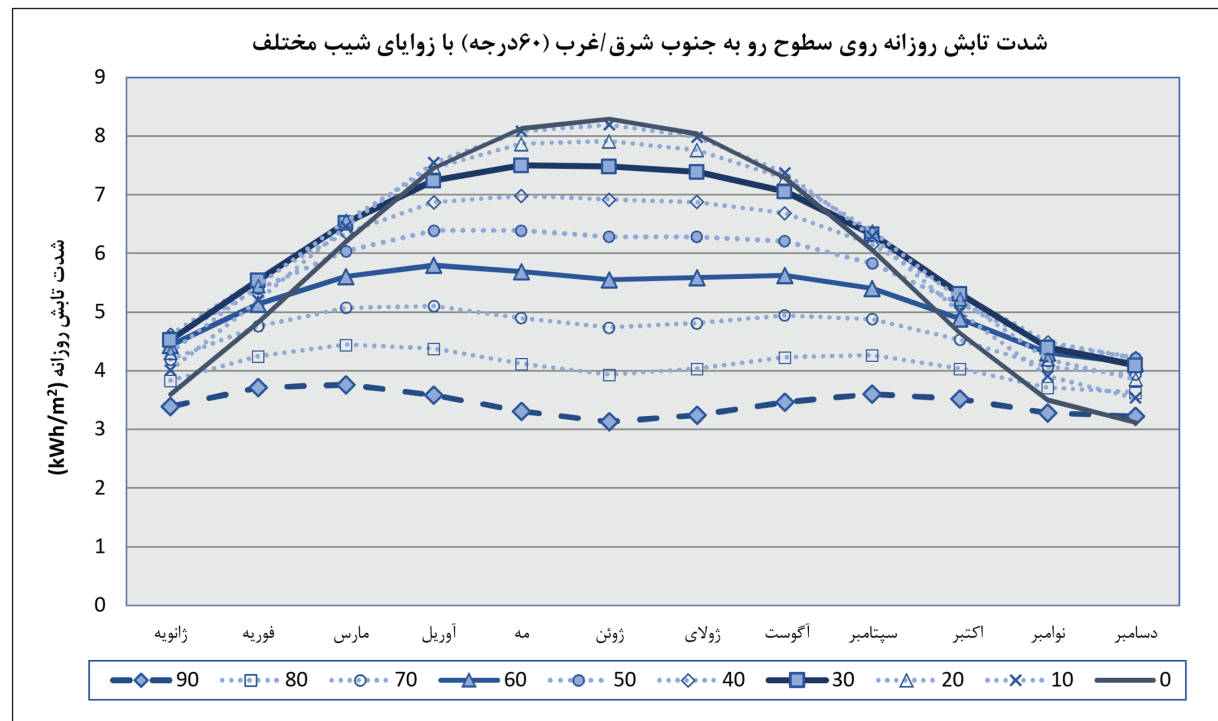
ت ۶. تابش روزانه در تهران روی سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۳۰ درجه از جنوب) برای یک روز نمونه در هر ماه، تابعی از زاویه شیب پنل فتوولتائیک، مأخذ: نگارندگان.

سطوح قائم رو به شرق یا غرب در فصول بهار و تابستان تابش بیشتری را نسبت به سطوح قائم رو به جنوب دریافت می‌کنند که در ماه‌های مختلف بین ۱۴ تا ۵۶٪ بیشتر است.

تحلیل و مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که هرچه زاویه شیب پنل فتوولتائیک نسبت به افق بیشتر باشد، چنانچه آن‌ها را رو به شرق یا غرب متمایل کنیم، در ۵ ماه از سال (بهار و تابستان) وضعیت بهتری خواهند داشت و تابش بیشتری دریافت خواهند کرد. از این رو در ساختمان‌هایی که در فصل گرم به برق بیشتری نیاز دارند، چنانچه امکان ترکیب پنل‌های فتوولتائیک در جبهه‌های مختلف نما باشد، بهتر است که پنل‌ها را رو به جنوب شرق، جنوب غرب، شرق، یا غرب قرار داد. اما هرچه تمایل پنل‌ها به سمت شرق یا غرب بیشتر باشد، در ماه‌های سرد سال تابش کمتری را نسبت به جبهه جنوب دریافت می‌کنند.

تابش در ماه‌های مختلف برای زاویه شیب‌های ۵۰ تا ۹۰ درجه یکنواخت‌تر می‌شود. این سطوح در ماه‌های گرم سال تابش بیشتری را نسبت به سطوح رو به جنوب با همان زاویه شیب دریافت می‌کنند.

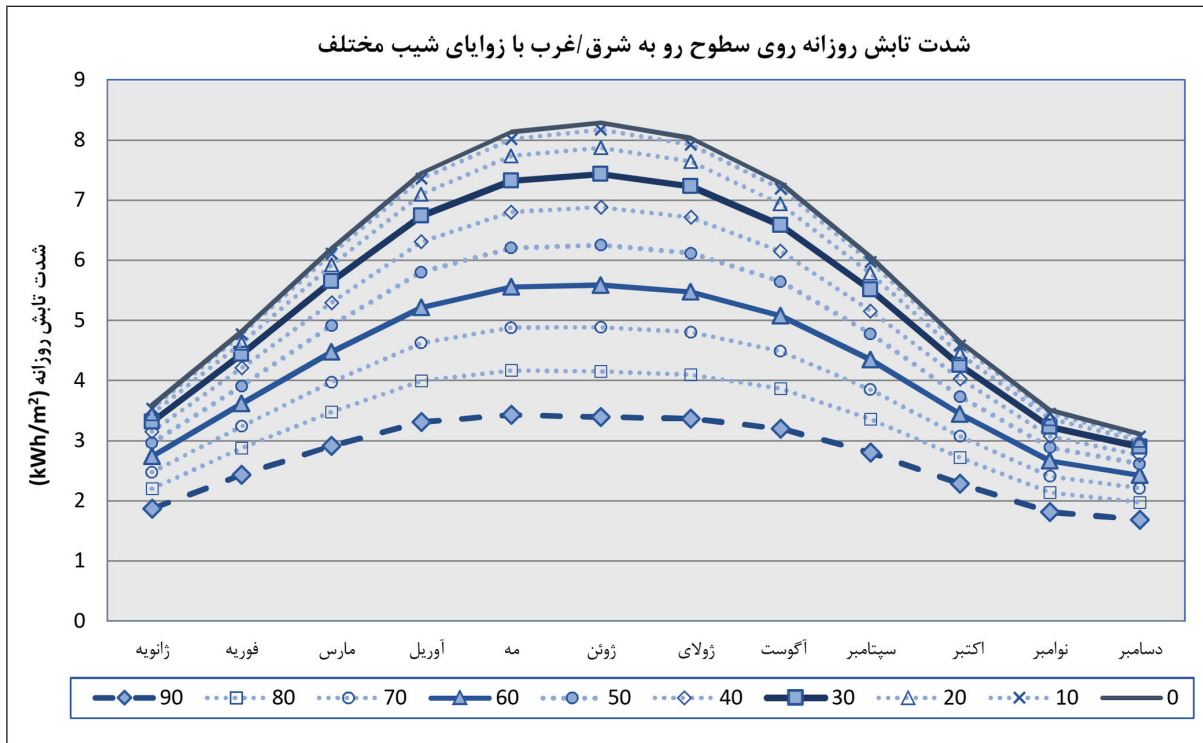
«ت ۸» تابش دریافتی از خورشید را در روز ۲۱ هر ماه میلادی (معادل اول هر ماه شمسی) روی سطوح رو به شرق یا غرب با شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق نمودار هرچه سطوح زاویه شیب کمتری نسبت به افق داشته باشند، تابش بیشتری را در هر ماه از سال دریافت می‌کنند و بنا بر این سطوح با شیب ۱۰ درجه بیشترین تابش و سطوح قائم (۹۰ درجه) رو به شرق یا غرب کمترین تابش را نسبت به دیگر سطوح دریافت خواهند کرد، با اینکه تابش روی سطوح قائم رو به شرق یا غرب در فصول سرد کم خواهد بود، اما جالب توجه است که همین



ت ۷. تابش روزانه در تهران روی سطوح رو به جنوب شرق یا غرب (چرخش ۶۰ درجه از جنوب) برای یک روز نمونه در هر ماه، تابعی از زاویه شیب پنل فتوولتائیک، مأخذ: نگارندگان.

از صفر تا کمتر از ۷۰ درجه قرار دهیم، تابش دریافتی آن‌ها بیشتر از سطح افقی خواهد بود. در نمودار «ت ۱۰» محدوده ۹۶ تا ۱۰٪ جهات و زوایای شیبی را نشان می‌دهد که حداکثر تابش خورشید را در طول سال دریافت می‌کنند، بنا بر این در استفاده از فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان در شهر تهران، به منظور دستیابی به بیشترین بازدهی تولید انرژی، جهت رو به جنوب تا ۳۰ درجه چرخش به سمت شرق یا غرب و زاویه شیب ۲۰ تا ۴۰ درجه، جهت و زاویه شیب بهینه هستند. چنانچه سطح را با زاویه شیب ۳۰ درجه رو به جنوب قرار دهیم، بیشترین تابش دریافتی از خورشید (2494 kWh/m^2) را در بازه یک ساله خواهد داشت، همچنین مطابق نمودارهای قبلی، در طول ماه‌های مختلف نیز میزان دریافت تابش روی آن روند یکنواخت‌تری را نسبت به دیگر زاویه شیب‌ها خواهد داشت،

نمودار «ت ۹» و «ت ۱۰» تابش دریافتی سالیانه از خورشید را بر سطح پنل فتوولتائیک با آزیموت‌ها و زوایای شیب مختلف نشان می‌دهند. سطوح رو به جنوب (آزیموت صفر درجه) نسبت به سطوح رو به شرق یا غرب (آزیموت ۹۰ درجه) و جنوب شرقی یا جنوب غربی (آزیموت ۶۰ درجه) بیشترین تابش را در بازه یک ساله دریافت خواهند کرد. سطوح رو به جنوب با تغییر زاویه ۳۰ درجه به شرق یا غرب نیز از نظر دریافت تابش خورشید در طول سال وضعیت تقریباً مشابهی نسبت به سطوح رو به جنوب با آزیموت صفر درجه را دارند (تابش کمتر با اختلاف بسیار کم). سطوح رو به شرق یا غرب کمترین تابش سالیانه را دریافت می‌کنند. سطوح افقی نسبت به سطوح رو به جنوب، با زوایای شیب بین ۷۰ تا ۹۰ درجه، تابش بیشتری را در طول یکسال دریافت می‌کنند، اما چنانچه این سطوح را با زاویه شیب بیشتر

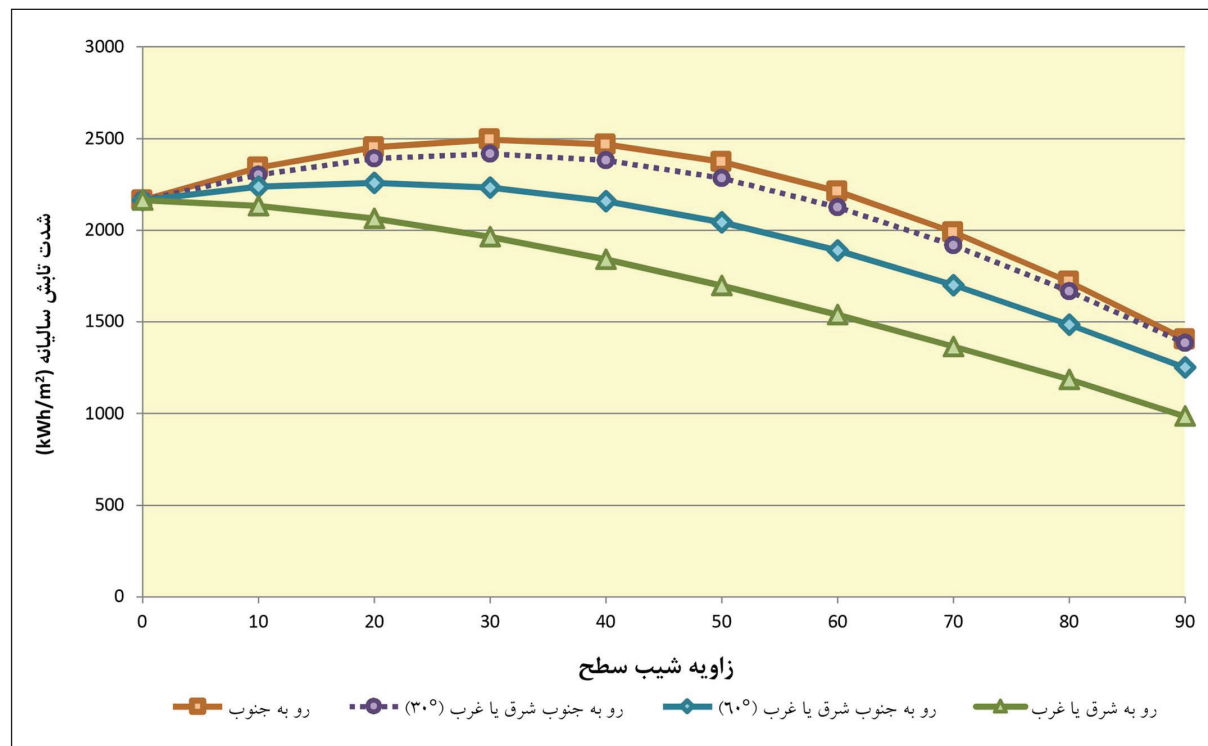


ت ۸. تابش روزانه در تهران روی سطوح رو به شرق یا غرب برای یک روز نمونه در هر ماه، تابعی از زاویه شیب پنل فتوولتائیک، مأخذ: نگارندگان.

فتوولتائیک نیز نیازمند آزادی بیشتری خواهد بود. از این رو چنانچه در یک ساختمان نیاز به انرژی برق در فصل زمستان بیشتر باشد و بسته به عملکرد آن در فصل گرم کمتر استفاده شود، طراح می‌تواند به کمک نمودارهای ماهیانه تابش خورشید، شیب پنل‌های یکپارچه با نما یا بام را به گونه‌ای تعیین کند که مبنای این زاویه بر پایه بیشترین تولید برق در فصل زمستان باشد. عکس این حالت نیز اتفاق می‌افتد و ممکن است تصمیم‌گیری طراحی سیستم فتوولتائیک بر پایه تولید انرژی بیشتر برای فصل گرم باشد. در این صورت این عوامل بر تعیین زاویه شیب پنل‌ها اثر خواهند گذاشت که باید معمار و دیگر مهندسان تیم طراحی از ابتدا در فرایند طراحی این مسئله را در کنار دیگر مسائل در نظر داشته باشند و در خصوص کیفیت پاسخ به این مسئله تصمیم بگیرند.^{۵۶}

در نتیجه بهترین انتخاب برای ترکیب فتوولتائیک‌ها با بام شیبدار و سایبان در نما زاویه شیب ۳۰ درجه روبه جنوب خواهد بود.^{۵۵} طبق نمودار «ت ۱۰» محدوده ۹۰ تا ۹۶٪ نیز تابش خوبی را دریافت می‌کند و گزینه‌های بیشتری برای جهت و زاویه شیب پنل‌ها پیشنهاد می‌دهد. همان‌طور که روی نمودار «ت ۹» نیز مشخص است، سطوح با زاویه شیب ۵۰ و ۶۰ درجه رو به جنوب بیشتر از سطوح افقی در طول یک سال تابش دریافت می‌کنند و از طرفی مشکلات سطح افقی مانند جمع شدن برف، گردوغبار بیشتر، و... را ندارند؛ پس این سطوح نیز گزینه مناسبی برای استفاده در نمای ساختمان خواهند بود (ت ۱۱).

از آنجایی که در فرایند طراحی معماری اغلب پیشنهادهای مختلف (آلترناتیو) مطرح می‌شود و امکان انتخاب گزینه بهتر و مناسب‌تر هست، بنا بر این طراحی ساختمان‌های یکپارچه با



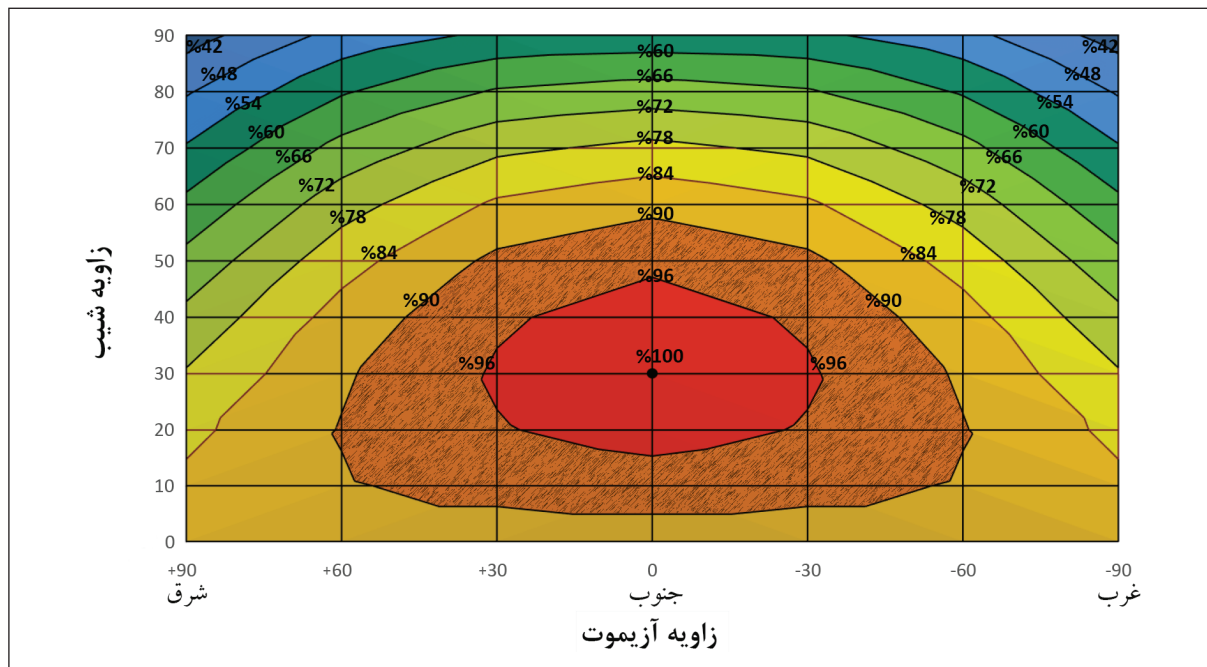
۵۵. البته در این حالت سایبان‌ها در نمای ساختمان بخشی از تابش پراکنده آسمان را دریافت نمی‌کنند.
۵۶. نک: راحیل وفائی، «طراحی ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک در شهر تهران».

ت ۹. تابش کل سالیانه خورشید در تهران روی سطوح مختلف (kWh/m²)، مأخذ: نگارندگان.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

و گلخانه‌ها، نورگیرها و پنجره‌های سقفی، نماهای دوپوسته، سایبان‌های ثابت و متحرک، رف‌های نور^{۱۷}، و... کاربرد دارد، در نتیجه برای ترکیب و یکپارچگی آن‌ها با ساختمان با هر کدام از زاویه شیب‌ها ایده‌های مختلفی مطرح است. از آنجایی که در طراحی ساختمان‌ها ایجاد سایه در تابستان، بخصوص در نمای جنوبی، به منظور کاهش بارهای سرمایشی، مورد توجه است، چنانچه فتوولتائیک‌ها با شیب مناسب با کارکرد سایبان یا لوور در نمای ساختمان ترکیب شوند، در حین تولید برق، در فصل گرم بارهای سرمایشی را کاهش و در فصل سرد اجازه ورود آفتاب به داخل ساختمان را می‌دهند و ورود نور روز را نیز فراهم می‌کنند. در این حالت فتوولتائیک‌ها چند عملکرده خواهند بود، اما باید به گونه‌ای روی نمای ساختمان قرار گیرند که پنل‌های پایینی توسط بالایی‌ها سایه‌دار نشوند. امروزه کاربرد پوسته شفاف در ساختمان‌های اداری افزایش قابل توجهی یافته است و به دلیل اینکه ویژگی عایق حرارتی

محاسبه تابش مستقیم و پراکنده و در نتیجه تابش کل خورشید روی سطوح مختلف و ترسیم آن‌ها بر روی نمودار به طراح کمک می‌کند که فتوولتائیک‌ها را به گونه‌ای با ساختمان ترکیب و یکپارچه کند که بهترین کارایی را داشته باشند. بر اساس محاسبات تابش کل خورشید در شهر تهران محدوده جهت و زاویه شیب بهینه برای ترکیب فتوولتائیک‌ها با ساختمان، زاویه آزیموت از 30° تا $30^{\circ}+$ از سمت جنوب و زاویه شیب 20° تا 40° درجه نسبت به افق است. در همین محدوده آزیموت، سطوح با زاویه شیب‌های 10° ، 50° و 60° درجه نسبت به افق نیز در طول سال تابش بیشتری را نسبت به سطوح افقی دریافت می‌کنند. به طور کلی سطوح قائم در ماه‌های گرم تابش کمی را دریافت می‌کنند و در ماه‌های سرد وضعیت بهتری را خواهند داشت. استفاده از فتوولتائیک‌ها در بخش‌های مختلف ساختمان در نماهای قائم و شیب‌دار، بام‌های مسطح و شیب‌دار، سقف آتریوم‌ها

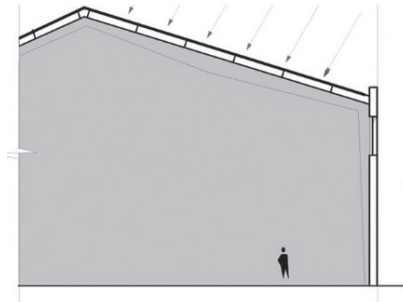


57. Light-Shelves

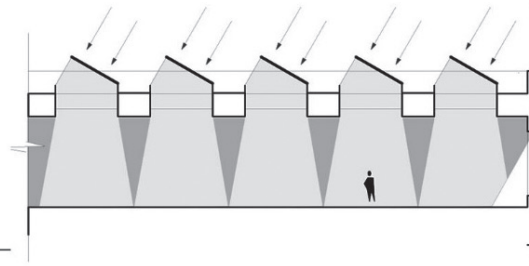
ت ۱۰. تابش کل سالیانه خورشید روی سطوح با جهات و زاویه شیب‌های مختلف در شهر تهران، مأخذ: نگارندگان.

می‌شوند. بنا بر این استفاده از فتوولتائیک‌ها در نمای چنین ساختمان‌هایی، به صورت قائم یا شیبدار، در ترکیب با پوسته دوم با کارکرد سایبان می‌تواند علاوه بر تولید برق به بهبود شرایط داخل کمک کند و با کاهش کسب مستقیم خورشید در دوره گرمای بیش از حد، مصرف انرژی را کاهش دهد. در ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک، یکپارچگی معماری و زیبایی از موضوعات مهم به‌شمار می‌رود، چرا که فتوولتائیک

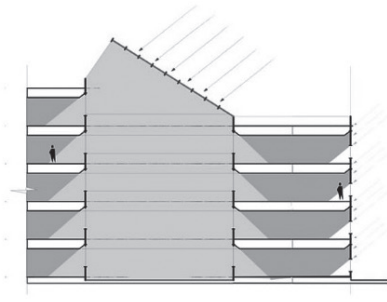
شیشه در مقایسه با مصالح مات کم است، هرچه بخش شفاف پوسته ساختمان بزرگ‌تر باشد، کنترل جریان انرژی خورشیدی، به منظور حفظ شرایط حرارتی و بصری داخل ساختمان، اهمیت بیشتری خواهد یافت. با توجه به اینکه طراحی غیرفعال خورشیدی برای کنترل خورشید و کسب حرارت همیشه کاملاً کارآمد نیست، سیستم‌های فعال خورشیدی برای به تعادل رساندن شرایط آسایش حرارتی و بصری داخلی اضافه



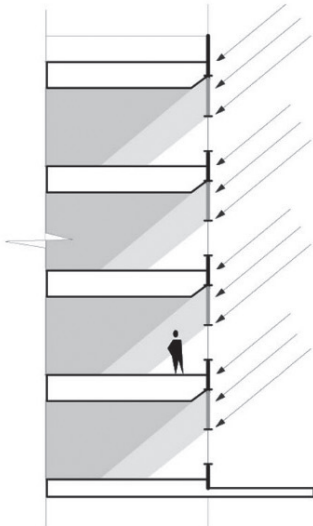
ترکیب فتوولتائیک‌ها با بام شیبدار



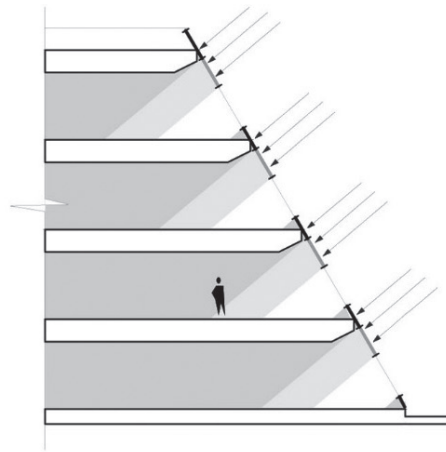
ترکیب فتوولتائیک‌ها با بام دندانه دندانه



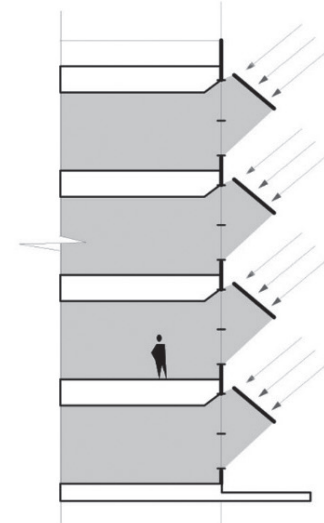
ترکیب فتوولتائیک‌ها با آتریوم و نورگیر



ترکیب فتوولتائیک‌ها با نمای قائم



ترکیب فتوولتائیک‌ها با نمای شیبدار ۶۰ درجه



ترکیب فتوولتائیک‌ها با سایبان شیبدار

نباشد، با این حال استفاده از نمودارهای تابش خورشید و تحلیل آن‌ها در کنار دیگر مسائل مطرح در فرایند طراحی می‌تواند سبب به‌کارگیری هوشمندانه و هنرمندانه فناوری فتوولتائیک در ساختمان شود.

بخشی الحاقی نیست و باید توجه ویژه‌ای به سیمای ساختمان داشت. به طور کلی به دلیل مسائلی همچون زیبایی، هزینه، و محدودیت‌های دیگر در طراحی که باید با آن‌ها سازش کرد، ممکن است انتخاب جهت و زاویه شیب بهینه همیشه امکان‌پذیر

منابع و مأخذ

Photovoltaics. United States: NREL, Department of Energy, 1993.

Li, H. & Lian, Y. & Wang, X. & Ma, W. & Zhao, L. "Solar constant values for estimating solar radiation", in *Journal of Energy* 36, no.3 (2011), pp. 1785-1789.

Liu, B.Y.H. and R.C. Jordan. "Daily Insolation on Surfaces Tilted Towards Equator", in *Trans ASHRAE* 67, (1961), pp. 526-541.

Masters, Gilbert M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

Paltridge, G. W. and D. Proctor. "Monthly Mean Solar Radiation Statistics for Australia", in *Journal of Solar Energy* 18, no. 3 (1976), pp. 235-243.

Prescott, JA. "Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation", in *Transactions of the Royal Society of South Australia* 64, no.1940 (1940), pp. 114-118.

Sabbagh, J. A. & A. A. M. Sayigh & E. M. A. El-Salam. "Estimation of the Total Solar Radiation from Meteorological Data", in *Journal of Solar Energy* 19, no.3 (1977), pp. 307-311.

Sick, F., & T. Erge. *Task 16: Photovoltaics in Buildings: a Design Handbook for Architects and Engineers*, Germany: Earthscan, 1996.

Spencer, JW. "Fourier Series Representation of the Position of the Sun", in *Search* 2, no.5 (1971), p. 172.

Threlkeld, J and R Jordan. "Direct Radiation Available on Clear Days", in *Trans ASHRAE* 64, 1958.

http://www.iea.org/topics/climatechange/Climate_Change_and_Youth/ (2015/07/01) (آژانس بین‌المللی انرژی ۱۰/۴/۱۳۹۴)

وفائی، راحیل. «بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان». در صفحه، ش ۴۹ (پاییز و زمستان ۱۳۸۸)، ص ۶۹-۸۰.

_____ . «طراحی ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک در شهر تهران». در صفحه، ش ۵۶ (بهار ۱۳۹۱)، ص ۵۷-۷۴.

Almorox, Javier. "Estimating Global Solar Radiation from Common Meteorological Data in Aranjuez, Spain", in *Journal of Turk J Phys*, no. 35 (2011), pp. 53-64.

Angstrom, A. "Solar and Terrestrial Radiation. Report to the International Commission for Solar Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation", in *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 50, no.210 (1924), pp. 121-126.

ASTM. "Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. Standard E490-00", in *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 2006.

Badescu, Viorel. *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Recent Advances*. Berlin: Springer, 2008.

Cooper, P.L. "The Absorption of Radiation in Solar Stills", in *Journal of Solar Energy* 12, no.3 (1969), pp. 333-346.

Duffie, John A. and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes* (Third ed.), Hoboken, N.J.: Wiley, 2006.

Ineichen, Pierre & Olivier Guisan & Richard Perez. "Ground-Reflected Radiation and Albedo", in *Journal of Solar Energy* 44, no. 4 (1990), pp. 207-214.

Iqbal, Muhammad. *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic Press, 1983.

Kiss Cathcart Anders Architects, PC. *Building-Integrated*