

# بهینه‌یابی زاویه انحراف پنل‌های آرایه‌های خورشیدی عمود

مورد پژوهش: شهر تهران<sup>۱</sup>

محمد تحصیلدوست<sup>۲</sup>

استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

علی محمدشیرازی<sup>۳</sup>

دریافت: ۹ اردیبهشت ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۷ شهریور ۱۳۹۷

کلیدواژگان: بهینه‌یابی زاویه، آرایه‌های خورشیدی عمود، سایه‌اندازی جزئی، محاسبات پارامتریک (گرسه‌پار)، آنگستروم.

## چکیده

مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی به خسارات جبران‌ناپذیری منجر شده است. بحران انرژی در جهان و کاهش مستمر ذخیره‌های انرژی‌های تجدیدناپذیر، متخصصان را بر آن داشته که به دنبال جانشین مناسب و پاک برای سوخت‌های فسیلی باشند. از طرف دیگر، با پیشرفت تکنولوژی و افزایش بهره‌وری از انرژی‌های تجدیدپذیر، جهان به سمت استفاده از این منابع لایزال سوق داده شده است. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی و پنل‌های فتوولتائیک، به دلیل دسترسی آسان و قابل استفاده بودن در اکثر نقاط کره زمین، اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از این پنل‌ها در صنعت ساختمان‌سازی تا آنجا پیش رفته است که آن‌ها را عناصری برای ساخت ساختمان‌های پایدار دانسته‌اند و کاربرد آن‌ها در جهان و در پروژه‌های مختلف بر روی بام‌ها، نماها، و... دیده شده است. زاویه قرارگیری پنل‌ها در جبهه‌های مختلف ساختمان (اعم از بام و نما) و بررسی سایه‌اندازی آن‌ها بر روی هم در هنگام استفاده، به منزله ابزاری برای ساخت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این مقاله راهکاری پارامتریک در افزونه (پلاگین) گرسه‌پار برای محاسبه زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه‌های خورشیدی در حالت‌های عمود (بر روی نماها)، شیب‌دار (بر روی بام‌های شیب‌دار)، افقی (بر روی زمین‌ها و بام‌های تخت) و در جهت‌گیری‌های مختلف ساختمان برنامه‌نویسی شد و با تعریف شاخص‌هایی عددی در این راهکار، اهمیت و لزوم استفاده از زاویه مذکور در حالت‌های مختلف مشخص گردید و در گام بعدی اعتبارسنجی محاسبات آن به اثبات رسیده است. سپس به واسطه آن، و به صورت موردی برای شهر تهران، زاویه انحراف بهینه پنل‌ها برای آرایه‌ای مشخص و عمود (بر روی نما) در جهت‌گیری‌های مختلف آن به دست آمد و اهمیت استفاده از این زاویه و همچنین مقدار آن در جهت‌گیری‌های مختلف نما به صورت نموداری گزارش داده شد. در این نوشتار اثبات گشت که لزوم استفاده از زاویه انحراف بهینه در جهت‌گیری‌های به سمت شرق و غرب نما به مراتب بیشتر از جهت‌گیری به سمت جنوب آن است.

## مقدمه

رشد روزافزون نیاز به انرژی و پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی از یک سو و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی از سوی دیگر، توجه محققان

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده دوم است با عنوان تدوین الگوی نصب پنل‌های خورشیدی در نمای ساختمان‌ها، که به راهنمایی نگارنده اول و دکتر منصوره طاهباز در تاریخ دی‌ماه سال ۱۳۹۶ در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی دفاع شده است.

۲. نویسنده مسئول

m\_tahsildoost@sbu.ac.ir

۳. کارشناس ارشد رشته فناوری

معماری، دانشگاه شهید بهشتی

a.mohamadshirazi@mail.

sbu.ac.ir



۴. محمدحسین شمس، «مروری بر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی جهان»، ص ۱۶.  
 ۵. مهدی بهادری‌نژاد و بهاره فرهنگ‌پور، «طراحی و بررسی سیستم برق خورشیدی برای یک ساختمان اداری در تهران»، ص ۹۲.  
 6. <http://www.sun.org.ir/ationoffice>  
 7. Ibid; <http://amarista.ir/content/statistics/395/>;  
<https://www.accuweather.com/fa/ir/tehran>

ت ۱. محاسبه حداقل فاصله و زاویه شیب بهینه آرایه‌های خورشیدی روی سطح زمین، مأخذ: Appelbaum & Bany, "Shadow Effect of Adjacent Solar Collectors in Large Scale Systems"; p1.

## پرسش‌های تحقیق

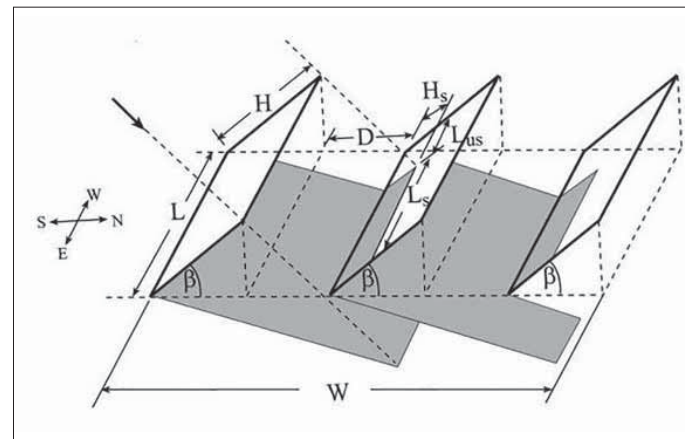
۱. زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه خورشیدی عمودی در شهر تهران چیست؟
۲. آرایش بهینه و نحوه استقرار مطلوب پنل‌های آرایه خورشیدی در سطوح مختلف برای دستیابی به بالاترین بازده چگونه است؟
۳. آیا می‌توان ایزاری جامع برای دستیابی به حالات بهینه و ارزیابی امکان ارتقای شرایط موجود پنل‌های خورشیدی فراهم کرد؟

و سرمایه‌گذاران در بخش انرژی را به سمت تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر جلب کرده است. با توجه به پتانسیل بالای تابش در مناطق وسیعی از دنیا، بخصوص ایران، از میان این منابع، انرژی خورشیدی اهمیت بیشتری یافته است. بهره‌گیری از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر برای تأمین انرژی الکتریکی راهکاری اجتناب‌ناپذیر در مسیر توسعه و پایداری کشورها در جهان امروز است.<sup>۴</sup> تکنولوژی فتولتائیک، مستقیماً و بدون بهره‌گیری از مکانیسم‌های متحرک و شیمیایی، نور خورشید را به برق تبدیل می‌کند.<sup>۵</sup> طبق تحقیقات اخیر مقدار انرژی که زمین در یک ساعت از خورشید دریافت می‌کند بیش از انرژی مصرفی جهان در طول یک سال است.<sup>۶</sup> بنا بر این امروزه سیستم‌های فتولتائیک به صورت وسیعی حتی در سقف و نمای بیرونی ساختمان‌های در نقاط مختلف دنیا به چشم می‌خورد. کشور ایران با عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۵ درجه شمالی در منطقه مناسبی برای دریافت انرژی خورشیدی است. میزان تابش انرژی خورشید در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال تخمین زده شده که این میزان بالاتر از حد متوسط جهانی است. متوسط تابش دریافتی در تهران حدود ۵۳۰۰ وات ساعت در متر مربع در روز، ساعات آفتابی آن ۵٫۵ و طول روز متوسط آن ۱۱٫۵ ساعت است. این شهر، به دلیل قرارگیری در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز، با ظرفیت حدود ۳۲٫۵ گیگاوات توان تولید انرژی خورشیدی در سال در میان شهرهای ایران در مقام هفتم قرار دارد.<sup>۷</sup>

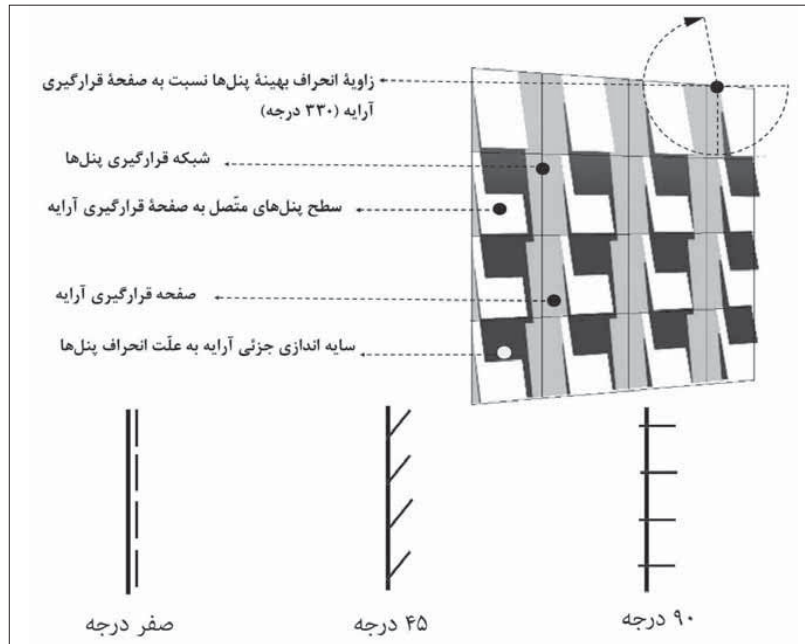
با توجه به رواج استفاده از پنل‌های فتولتائیک در بام و در گام بعد در نماهای ساختمان‌ها، در این تحقیق به بررسی زاویه مناسب نصب آن‌ها در نما پرداخته شده است.

## ۲. مروری بر ادبیات موضوع

در تحقیقات مختلفی زاویه بهینه پنل در آرایه‌های خورشیدی ثابت<sup>۸</sup> برای به حداکثر رسیدن تابش دریافتی و یا توان خروجی در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف و در دوره‌های زمانی مشخص بررسی شده است.<sup>۹</sup> از آنجا که تا به حال مساحت اشغال‌شده زمین توسط آرایه‌های خورشیدی اهمیت کمی داشته، بهترین زاویه قرارگیری پنل‌ها نهایتاً در حداقل فاصله (D) از هم به نحوی که سایه‌اندازی روی یکدیگر نداشته باشند، مد نظر بود. این فاصله در تحقیقات بسیاری بررسی شده است.<sup>۱۰</sup>



ت ۲. معرفی اصطلاحات مربوط به مقاله، نمایش سایه‌اندازی جزئی و مشخص کردن جهت شروع انحراف پنل‌ها نسبت به صفحه اصلی آرایه، شروع چرخش پنل‌ها رو به پایین است، بنا بر این از زاویه ۲۷۰ درجه به بعد پنل‌ها رو به سوی آسمان می‌شوند، طرح: نگارندگان.



بهینه آرایه‌های متصل به صفحات<sup>۳۱</sup> نماها در جهات و زوایای مختلف (ت ۲ و ۶) مطالعه نشده است. اهمیت این زاویه آن است که در صورت زاویه‌دار شدن پنل‌ها نسبت به صفحه، خود موجب افزایش سایه‌اندازی بر روی آرایه خواهد شد (ت ۲). از این رو، این مقاله که مبتنی بر دستاوردهای رساله کارشناسی ارشد نگارنده دوم تهیه شده، مربوط به محاسبه زاویه انحراف بهینه آرایه‌های خورشیدی<sup>۳۲</sup> یاد شده است. در این مقاله این زاویه با هدف به حد اکثر رسیدن انرژی تابشی دریافتی بر کل سطح پنل‌ها در دوره‌ای یک‌ساله، به منظور افزایش بهره‌وری اقتصادی آن، محاسبه گشته است؛ البته سایه‌انداز بودن جزئی پنل‌ها<sup>۳۳</sup> در بسیاری از موارد اجتناب‌ناپذیر است و در این شرایط برای افزایش توان خروجی کل باید از مدارها و یا تکنیک‌های مناسبی در مازول پنل‌ها استفاده گردد که در تحقیقات مختلفی مد نظر بوده است.<sup>۳۴</sup>

زن و همکاران به طور کلی به بررسی تابش پراکنده<sup>۱۱</sup> در پنل‌های زاویه‌دار در نیروگاه‌های مجهز به تعقیب‌کننده‌های خورشیدی پرداخته‌اند و اعلام می‌کنند که با افزایش فاصله آرایه‌ها، چرخش زاویه‌ای تعقیب‌کننده‌ها برای دریافت مستقیم‌تر تابش خورشید افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین پیشنهاد می‌کنند که در نیروگاه‌های ثابت بهتر است فاصله بین دو آرایه با توجه به عرض پنل‌ها طراحی گردد.<sup>۱۲</sup>

حافظ و همکاران در یک مقاله مروری، با بررسی بیش از دوست تحقیق معتبر در مورد مدل‌های محاسباتی تابش و همچنین تکنیک‌های بهینه‌یابی زاویه شیب<sup>۱۳</sup> و جهت‌گیری<sup>۱۴</sup> پنل‌ها، اعلام می‌کنند که استفاده از زاویه بهینه سالانه در صورت رعایت نکردن اصول تعمیر و نگهداری مطلوب نیست.<sup>۱۵</sup> محققان دیگری زاویه بهینه پنل‌ها را در تعدادی از شهرهای عربستان و منجمله مدینه بررسی و اعلام کرده‌اند که برای مدینه با عرض جغرافیایی ۳۹٫۵ و طول ۲۴٫۳۲ زاویه بهینه سالیانه برابر ۲۳٫۵ درجه به سمت جنوب بوده است.<sup>۱۶</sup>

در دهه ۱۹۹۰ متخصصانی از ۱۴ کشور جهان ضمن طرح مفهوم ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتائیک<sup>۱۷</sup> کتابی با نام فتوولتائیک‌ها برای ساختمان، راهنمای طراحی برای معماران و مهندسان<sup>۱۸</sup> را تدوین کردند و نتیجه گرفتند، که علاوه بر بام، پوسته‌های خارجی ساختمان که در جهت‌گیری‌های مختلف و در معرض تابش هستند، می‌توانند به منظور نصب فتوولتائیک‌ها استفاده گردند و قرارگیری فتوولتائیک‌ها بر روی سطوح غیر افقی موضوعیت می‌یابد و مبحثی با عنوان BIPV که همان یکپارچه‌سازی ساختمان با پنل‌های خورشیدی است در جهان آغاز می‌شود.<sup>۱۹</sup>

با توجه به بررسی منابع چند مقاله مروری در این حوزه، زاویه و فاصله بهینه پنل‌های آرایه‌های افقی (ت ۱) با استفاده از تکنیک‌های متنوع و مدل‌های محاسباتی مختلف، برای به حداکثر رسیدن توان خروجی بررسی شده است.<sup>۲۰</sup> لیکن زاویه

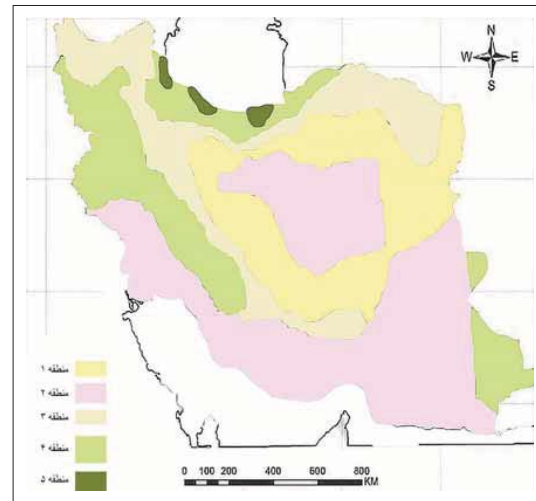
ت ۳ (چپ). منطقه‌بندی ایران از لحاظ دریافت انرژی تابشی، مأخذ: Muzathik, et al, "Estimation of Global Solar Irradiation on Horizontal and Inclined Surfaces Based on the Horizontal Measurements"; P.5.

ت ۴ (راست). فرمول محاسبه تابش در مناطق مختلف ایران که در شکل «ت ۳» نشان داده شده است. H: مقدار انرژی تابشی بر روی سطح افقی زمین در یک روز به صورت میانگین ماهانه H<sub>0</sub>: مقدار انرژی تابشی خارج از جو زمین در یک روز به صورت ماهانه a, b: ضرایب رگرسیونی مخصوص هر منطقه S<sub>0</sub>: متوسط طول روز در یک دوره مشخص S یا n: متوسط ساعات افتابی در یک دوره مشخص، مأخذ: Ibid.

منطقه	محاسبه تابش
۱	$\frac{H}{H_0} = 0.352 + 0.373 \left(\frac{n}{N}\right)$
۲	$\frac{H}{H_0} = 0.352 + 0.373 \left(\frac{n}{N}\right)$
۳	$\frac{H}{H_0} = 0.317 + 0.386 \left(\frac{n}{N}\right)$
۴	$\frac{H}{H_0} = 0.343 + 0.359 \left(\frac{n}{N}\right)$
۵	$\frac{H}{H_0} = 0.404 + 0.204 \left(\frac{n}{N}\right)$

درجه لزوم و اهمیت زاویه مذکور (در صورت صفر نبودن<sup>۳۵</sup>) برای آرایه‌های مختلف با دو شاخص سالانه عددی کیلووات ساعت و میلیون تومان بیان می‌گردد، که معرف انرژی و سود دریافت‌شده بیشتر و در نتیجه بهینه کردن زاویه پنل‌ها بوده، است<sup>۳۶</sup> (ت ۱۲). طبعاً و با توجه به سایه‌اندازی پنل‌ها بر روی هم در جهت‌گیری‌های مختلف صفحه قرارگیری آرایه و تفاوت انرژی تابشی خورشید در نقاط جغرافیایی متنوع این زاویه، به متغیرهای مختلفی بستگی دارد و نمی‌توان حکمی کلی برای زاویه قرارگیری بهینه آن‌ها بر روی همه صفحات بیان کرد. از این رو راهکاری پارامتریک برای محاسبه زاویه انحراف بهینه و شاخص‌های ذکر شده در گرسه‌پایر<sup>۳۷</sup> برنامه‌نویسی شد و بسط یافت که می‌توان با آن علاوه بر محاسبه، اثرات تغییرات متغیرها را بررسی کرد. ابزارهای این راهکار در سایت [www.food4rhino.com](http://www.food4rhino.com) به اشتراک عموم گذاشته شده است.

این راهکار در همه متغیرها از جمله، جهت و زوایای مختلف صفحه قرارگیری آرایه، هر موقعیت جغرافیایی، و هر اندازه<sup>۳۸</sup> و



هر فاصله پنلی، قابل استفاده است و از این حیث عمومیت دارد و می‌توان با آن زاویه بهینه و شاخص‌های گفته‌شده را محاسبه کرد و سپس با این راهکار، مطالعه‌ای موردی در شهر تهران و بر روی زاویه انحراف بهینه آرایه‌ای عمودی در نما و در جهت‌گیری‌های مختلف آن اجرا و نتایج گزارش داده شد. لازم به ذکر است که به دلیل پارامتریک بودن راهکار، این مطالعه قابل گسترش برای دیگر شهرها و با دیگر عوامل متغیر است. نمونه موردی منتخب این مقاله شهر تهران و علت انتخاب آن دارا بودن شرایط تابشی مناسب و رواج نداشتن استفاده از پنل‌های خورشیدی و مسئله BIPV در این شهر است. مطالعات مربوط به تابش خورشید در مناطق مختلف ایران، از جمله تهران، انجام گشته و خلاصه آن در شکل «ت ۳ و ۴» نشان داده شده است.<sup>۳۹</sup>

### ۳. گام‌های تأثیرگذار در برنامه‌نویسی راهکار

راهکار ذکر شده شامل شش گام تأثیرگذار است. بر مبنای این گام‌ها برنامه‌نویسی صورت پذیرفته و این راهکار روش تحقیق پژوهش در نظر گرفته شده است. پس از شرح مختصر گام‌های یادشده، راهکار برنامه‌نویسی شده معرفی و سپس با آن مطالعه برای شهر تهران به منزله یک مصداق انجام می‌شود (ت ۵).

#### ۳.۱. مدل‌سازی آرایه‌های خورشیدی متصل به صفحات به منظور محاسبه انرژی تابشی دریافتی سالیانه و بهینه‌یابی زاویه

با توجه به آنکه اندازه و فاصله و نحوه چینش پنل‌ها در ایجاد الگوهای سایه‌اندازی و همچنین دریافت انرژی تابشی نقش بسزایی دارند، مدل‌سازی این بخش اهمیت ویژه‌ای دارد. به این منظور روش مدل‌سازی پارامتریک لحاظ گردید، که بتوان به کمک آن پنل‌ها را بر روی صفحات<sup>۴۰</sup> مختلف جهت به صورت

pp. 1-6; T.O. Kaddoura, et al, "On the Estimation of the Optimum Tilt Angle of PV Panel in Saudi Arabia", p. 626; M. Hartner, et al, "East to West-The Optimal Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Panels from an Electricity System Perspective", p. 94; M. Kacira, et al, "Determining Optimum Tilt Angles and Orientations of Photovoltaic Panels in Sanliurfa, Turkey", p. 1265; Y.S. Khoo, et al, "Optimal Orientation and Tilt Angle for Maximizing in-plane Solar Irradiation for PV Applications in Singapore", p. 647; A.K. Yadav, et al, "Tilt Angle Calculation for Installation of PV Systems for Mountainous Regions of Himachal Pradesh India", p. 205.

ت ۵ (بالا). گام‌های تأثیرگذار در برنامه‌نویسی راهکار پارامتریک، تدوین: نگارندگان.

ت ۶ (میان). مدل‌سازی انواع آرایه‌های خورشیدی بر روی صفحات در جهت‌گیری و زوایای مختلف اعم از عمودی، شیب‌دار، و افقی، طرح: نگارندگان.

ت ۷ (پایین). اختلاف در سایه‌اندازی جزئی بین آرایه‌های متصل به صفحات صاف و منحنی، طرح: نگارندگان.

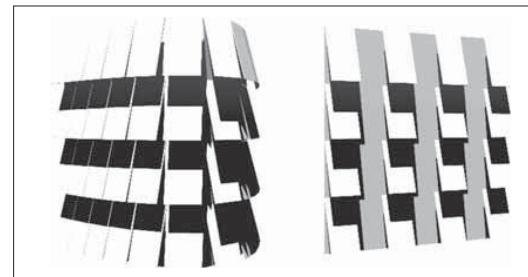
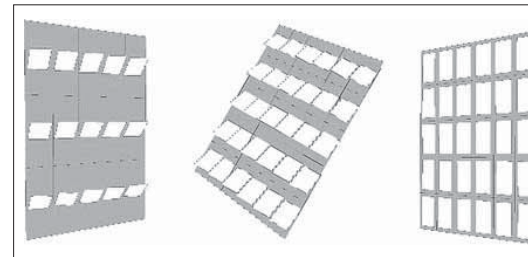
شبکه‌ای و با اندازه و فاصله و زاویه دلخواه جای داد. لازم به ذکر است که چون صفحه قرارگیری پنل‌ها صاف و نحوه قرارگیری آن‌ها شبکه‌ای بوده (ت ۶)، طبعاً الگوی سایه‌اندازی آن‌ها بر روی یکدیگر مشابه و زاویه انحراف بهینه برای همه آن‌ها یکسان است (ت ۷- سمت راست)؛ البته این موضوع در مورد صفحات منحنی متفاوت است و پنل‌های متصل به صفحات منحنی در نقاط مختلف صفحه با الگوهای متفاوت سایه‌اندازی دارند (ت ۷- سمت چپ). پس زاویه انحراف بهینه هر پنل برای به حداکثر رسیدن انرژی دریافتی کل متفاوت بوده است. به همین دلیل در این مقاله پنل‌ها بر روی صفحات صاف شبیه‌سازی شده‌اند.

### ۲.۳. محاسبه انرژی تابشی دریافتی سالیانه بر روی سطح پنل‌ها در هر موقعیت جغرافیایی (به واسطه رابطه آنگستروم)

برای برآورد انرژی تابشی خورشید از مدل آنگستروم<sup>۳۱</sup> استفاده شد. در این مدل با در نظر گرفتن ضرایب تجربی (a, b)، متوسط ساعات آفتابی در دوره‌ای مشخص (S)، متوسط طول روز در همان دوره (S<sub>0</sub>)، ثابت خورشیدی (G<sub>sc</sub>)، و عرض جغرافیایی (f) انرژی تابشی بر واحد سطح زمین محاسبه می‌شود (ت ۸). همچنین نحوه محاسبه تابش بر روی صفحات شیب‌دار در زوایای مختلف با این مدل قابل محاسبه است<sup>۳۲</sup> اعتبار مدل آنگستروم و همچنین روش‌های به دست آوردن ضرایب تجربی a و b در شرایط جوی مختلف متفاوت است و پیش‌تر از سوی محققان در عرض‌های جغرافیایی بسیاری از جمله تهران بررسی شده است (ت ۳، ۳۳).

### ۳.۳. محاسبه انرژی تابشی دریافتی سالیانه با در نظر گرفتن سایه‌اندازی‌های جزئی

به منظور لحاظ سایه‌اندازی‌ها در محاسبات آنگستروم، ابتدا



صفحه همه پنل‌ها به بخش‌های کوچک تقسیم شدند و ساعت آفتابی با توجه به سایه‌اندازی‌ها برای هر بخش محاسبه گردید؛ سپس متوسط انرژی تابشی دریافتی سالیانه همه بخش‌ها با مدل انگسترم محاسبه و با هم جمع شدند. لازم به ذکر است که هرچقدر بخش‌ها کوچک‌تر باشند، دقت محاسبه، به دلیل دقیق‌تر شدن پردازش سایه‌اندازی‌ها، بالاتر می‌رود. در این مطالعه اندازه بخش‌ها معادل ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (ت ۹).

### ۳.۴. اعتبار سنجی محاسبات

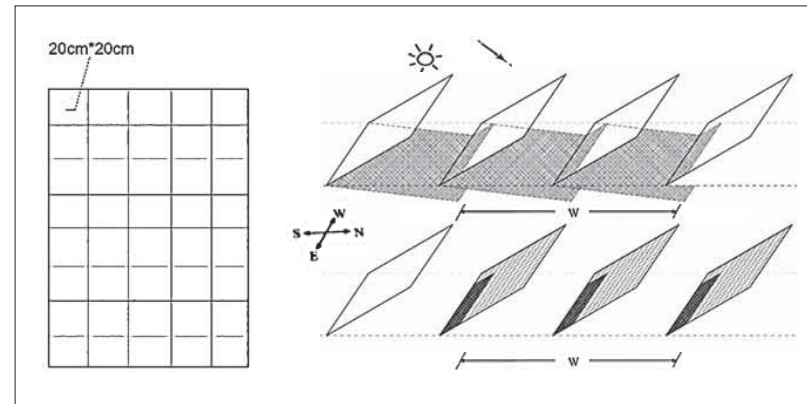
برای اعتبارسنجی گام‌های محاسباتی راهکار، انرژی تابشی دریافتی در یک سال بر سطح آرایه‌ای مشخص<sup>۳۵</sup> همانند شکل «ت ۱۰» به روش استفاده‌شده در مقاله محاسبه شد، سپس این محاسبه بار دیگر با نرم‌افزار معتبر دیزاین بیلدر، که امکان محاسبه انرژی تابشی دریافتی در یک سال را دارد و سایه‌اندازی پنل‌ها را به روی هم در نظر می‌گیرد، محاسبه و نتایج در جدول شکل «ت ۱۰» نمایش داده شد.

اعتبار نرم افزار دیزاین بیلدر در محاسبه متوسط تابش بر روی سطوح شیبدار به صورت تجربی در تحقیقات مختلفی مد نظر قرار گرفته است.<sup>۳۶</sup>

انرژی تابشی دریافتی سالیانه (KWh/Year)	نام نرم‌افزار
۲۵۱۳	محاسبات در مقاله
۲۵۰۰	ladybug
۲۴۵۸	PV*Sol
۲۶۰۲	Design Builder

۱	رابطه انگسترم برای سطوح افقی
فرمول	$\frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right)$
توضیح متغیرها	H: مقدار انرژی تابشی بر روی سطح افقی زمین در یک روز به صورت میانگین ماهانه؛ H <sub>0</sub> : مقدار انرژی تابشی خارج از جو زمین در یک روز به صورت ماهانه؛ a, b: ضرایب رگرسیونی مخصوص هر منطقه؛ S یا n: متوسط ساعات آفتابی در یک دوره مشخص؛ S <sub>0</sub> یا N: متوسط طول روز در یک دوره مشخص
۲	مقدار انرژی تابشی در خارج از جو زمین زمین به صورت میانگین ماهیانه
فرمول	$\bar{H}_s = \frac{24 \times 3600 G_s}{\pi} (1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365}) \times \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right]$
توضیح متغیرها	G <sub>sc</sub> : ثابت خورشیدی که در این مقاله ۱۳۷۳ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده؛ f: عرض جغرافیایی منطقه؛ d: زاویه میل خورشید نسبت به ارتفاع بر حسب درجه که بین عدد مثبت منفی ۲۳/۵ است، w: زاویه ساعتی خورشید بر حسب درجه.
۳	زاویه ساعتی خورشید بر حسب درجه
فرمول	$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$
۴	طول روز
فرمول	$\bar{N} = \frac{2}{15} \omega_s$
۵	زاویه میل خورشید نسبت به استوا بر حسب درجه
فرمول	$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right)$

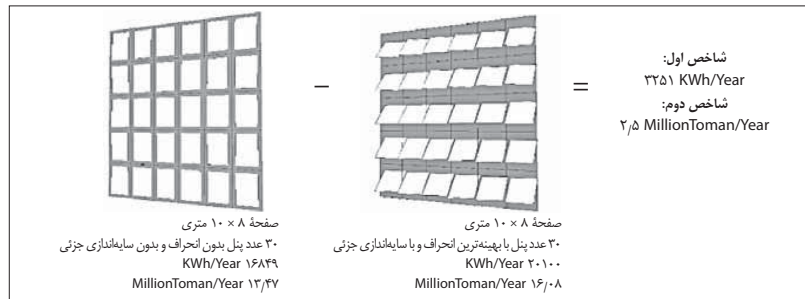
ت ۸ (بالا)، فرمول‌های مورد نیاز در رابطه انگسترم، تدوین: نگارندگان.  
ت ۹ (پایین، راست)، در نظر گرفتن سایه‌اندازی در محاسبات انگسترم با بخش‌بندی کردن ۲۰ سانتی‌متری صفحه پنل‌ها و محاسبه جداگانه هر بخش و سپس جمع محاسبات، طرح: نگارندگان.  
ت ۱۰ (پایین، چپ)، مقایسه محاسبه انرژی تابشی دریافتی توسط راهکار پیشنهادی مقاله با دیگر نرم‌افزارهای معتبر بر روی یک مدل ثابت همانند شکل (صفحه‌ای به ابعاد ۸ در ۱۰ متر، دارای ۳۰ عدد پنل، اندازه پنل‌ها ۹۹ در ۱۶۴ سانتی‌متر و با انحرافی مشخص و ثابت نسبت به صفحه)، به کوشش نگارندگان.



10. D. Weinstock & J. Appelbaum, "Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors", p. 898; D. Weinstock & J. Appelbaum, "Optimization of Economic

ت ۱۱ (راست). محاسبه انرژی تابشی دریافتی سالیانه برای همه حالت‌های چرخش پنل‌ها بر روی صفحه قرارگیری آرایه و انتخاب بهترین زاویه قرارگیری با عنوان زاویه انحراف بهینه آرایه (در شکل) ۶ نمونه آورده شده، ولی در واقعیت ۱۲۰ و یا ۱۴۴۰۰ حالت بسته به بهینه‌یابی در راستای یک و یا دو محور است)، طرح: نگارندگان.

ت ۱۲ (چپ). اهمیت زاویه انحراف بهینه با توجه به دو شاخص تعریف شده در مقاله که همان انرژی و سود بیشتر کسب شده به واسطه استفاده از زاویه انحراف بهینه پنل‌ها نسبت به صفحه قرار گیری آرایه است (KWh/Year-MillionToman/Year)، طرح: نگارندگان.



گام‌های چرخش<sup>۳۷</sup> در این مطالعه سه درجه فرض شده است. در صورت بهینه‌یابی زاویه انحراف در یک محور ۱۲۰ حالت، و دو محور ۱۴۴۰۰ حالت بررسی می‌شود (ت ۱۱).

### ۳.۶. محاسبه شاخص‌های عددی

به منظور بررسی درجه اهمیت و لزوم استفاده از زاویه بهینه یادشده، اختلاف انرژی دریافت شده بین حالت قرارگیری پنل‌ها در صفحه تحت زاویه بهینه و حالت قرارگیری به صورت موازی با صفحه برحسب «کیلووات ساعت بر سال» محاسبه گردید و با عنوان اولین شاخص تصمیم‌گیری انحراف پنل‌ها مد نظر قرار گرفت. سپس به منظور بررسی اقتصادی، ارزش انرژی مزاد کسب شده برحسب «میلیون تومان بر سال» محاسبه گشت (این ارزش با توجه به سیاست‌های کشورها در مورد خرید تضمینی برق و همچنین بازده پنل‌ها است) و با عنوان دومین شاخص معرفی شد (ت ۱۲).

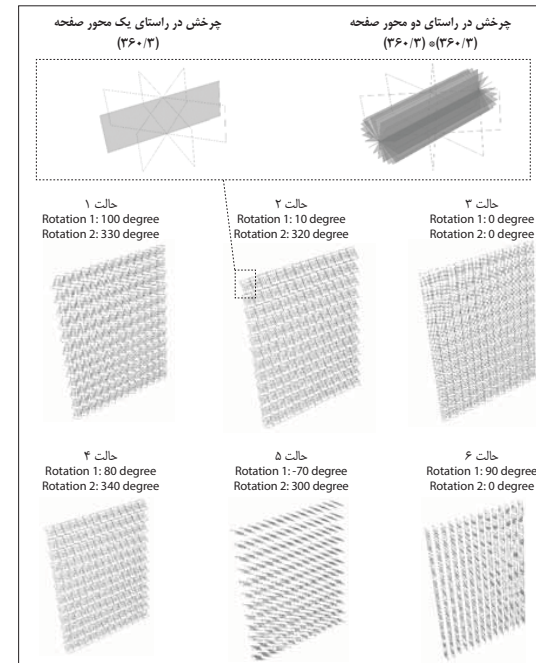
### ۳.۷. جمع‌بندی گام‌های اثرگذار در برنامه‌نویسی

با توجه به گام‌های اول تا ششم و مبتنی بر تحقیقات انجام‌شده، متغیرهای تأثیرگذار در زاویه انحراف بهینه پنل‌ها، شناسایی گشت و در «ت ۱۳» فهرست شد.

با توجه به نتایج تابش سالانه محاسبه‌شده با نرم‌افزارها با اختلافی کمتر از ۰.۵٪ نزدیک به هم هستند و دلیل این اختلاف استفاده از مدل‌های مختلف محاسباتی تابش و اندازه متفاوت بخش‌های (میش‌های) محاسباتی است.

### ۳.۵. روش بهینه‌یابی زاویه انحراف پنل‌ها

برای به دست آوردن زاویه انحراف بهینه، پنل‌های هر آرایه با گامی مشخص در جهت‌گیری‌های مختلف نسبت به صفحه قرار گیری آرایه چرخانده شده و متوسط انرژی تابشی دریافتی کل سطح پنل‌ها محاسبه گردیده است (با توجه به گام ۲ و ۳ در نظر گرفتن سایه‌اندازی‌های جزئی) و بهینه‌ترین زاویه به منظور دریافت حداکثر انرژی از بین حالت‌های محاسبه‌شده به دست آمد و با عنوان زاویه بهینه آن آرایه مدل‌سازی شده معرفی شد.



دسته‌بندی متغیرها	متغیرهای تأثیرگذار	نوع تأثیرگذاری	تعیین متغیر برای مطالعه شهر تهران
متغیرهای مربوط به هندسه آرایه	۱ فاصله بین پنلها (طول و عرض شبکه قرارگیری پنل‌ها)	اثرگذار بر روی سایه‌اندازی جزئی و دریافت انرژی توسط پنل‌ها	$X=100 \text{ cm}$ $Y=167 \text{ cm}$
	۲ ابعاد و شکل پنل‌ها (در این مقاله پنل‌ها به صورت مستطیل شکل و با ابعاد دلخواه مد نظر است)		مستطیل $164 \times 99 \text{ cm}$
	۳ صفحه قرارگیری آرایه (در این مقاله صفحه به صورت مستطیل شکل با ابعاد و جهت دلخواه مد نظر است)		$90+90-$ سطح $20m \times 10m$
متغیرهای مربوط به موقعیت جغرافیایی	۴ متوسط ساعات‌های آفتابی در دوره یکساله	اثرگذار بر روی مقدار انرژی تابشی محل	۵/۵h
	۵ متوسط طول روز در دوره یکساله		۱۱/۵h
	۶ عرض جغرافیایی		۳۵
	۷ ثابت خورشیدی		۱۳۶۷
	۸ ضرایب اقلیمی		$0.373-0.352$
متغیرهای مربوط به کشور و پنل‌های رایج در آن	۹ بازده پنل	اثرگذار بر روی شاخص‌ها	$0.11-0.15$
	۱۰ قیمت فروش هر کیلووات ساعت برق		$8.0 \times 10^{-6}$ million/KWH
متغیرهای مربوط به برنامه‌نویسی	۱۱ گام‌های چرخش	اثرگذار بر روی دقت محاسبات	۳ degree
	۱۲ اندازه بخش‌های محاسباتی		۲۰ cm

و ابزارهای دسته دوم مربوط به بهینه‌یابی زاویه انحراف و محاسبه شاخص‌ها با توجه به گام‌های تأثیرگذار است. در ابتدا باید چپش پنل‌های آرایه بر روی صفحات انجام گردد و سپس زاویه انحراف بهینه، متناسب با حالت‌های مختلف چپش، محاسبه گردد. لازم به ذکر است که چون متغیرهای گفته شده به منزله ورودی برای ابزارها تعریف می‌شوند، این دو دسته ابزار به مثابه راهکار همه‌جانبه و قابل استفاده برای بهینه‌یابی زاویه انحراف آرایه‌ها متصل به صفحه قابل استفاده است.

#### ۴.۱. ابزارهای دسته اول (چپش پنل‌ها در صفحات)

ابزارهای برنامه‌نویسی شده در این قسمت به منظور چیدن شبکه‌ای پنل‌ها بر روی صفحات است و به نحوی برنامه‌نویسی شده‌اند که بتوانند اندازه و فاصله بین پنل‌ها را با توجه به اعداد وارد شده به ابزار کنترل کنند. لازم به ذکر است که صفحه اصلی آرایه باید با ابعاد و جهت دلخواه در محیط راینو ترسیم و به ابزار مورد نظر در محیط گرسه‌پاژ وارد شود تا پنل‌ها بر روی آن چیده

#### ۴. برنامه‌نویسی راهکار و تولید ابزارهای محاسباتی

به منظور ایجاد راهکار مناسبی برای محاسبه زاویه انحراف بهینه آرایه‌های مختلف و با لحاظ همه جوانب فهرست شده در «ت ۱۳»، برنامه‌نویسی در محیط گرسه‌پاژ مد نظر قرار گرفت. شرح برنامه این فرایند، که منجر به تولید دو دسته ابزار<sup>۳۸</sup> در این افزونه<sup>۳۹</sup> شد، خارج از حوصله این مقاله است؛ لیکن نحوه استفاده از ابزارها و ارتباط آن‌ها با هم در این محیط در «ت ۱۴ و ۱۵» مشخص شده و در ادامه مقاله عملکرد هر دسته ابزار و نحوه خروجی آن‌ها بررسی می‌شود.

خروجی نهایی ابزارهای تهیه شده منجر به

(۱) محاسبه زاویه بهینه آرایه‌های مدل‌سازی شده،

(۲) محاسبه شاخص‌های گفته شده،

(۳) نمایش نمودار تغییرات انرژی دریافتی در سطح کل پنل‌های

آرایه، نسبت به تغییر زاویه پنل‌ها،

می‌شود. در «ت ۱۶ و ۱۷» می‌توان نمودارها را مشاهده کرد.

ابزارهای دسته اول مربوط به چپش پنل‌ها بر روی صفحات



۱۹. راحیل وفاقی، سیستم‌های فتوولتائیک در ترکیب با معماری، ص ۶؛

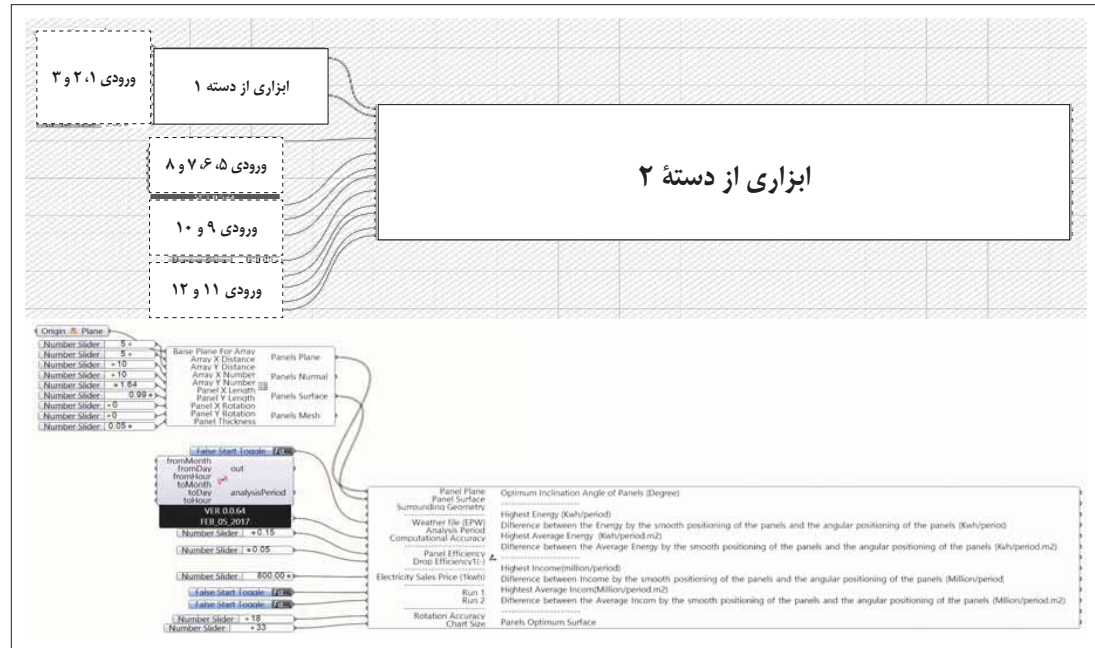
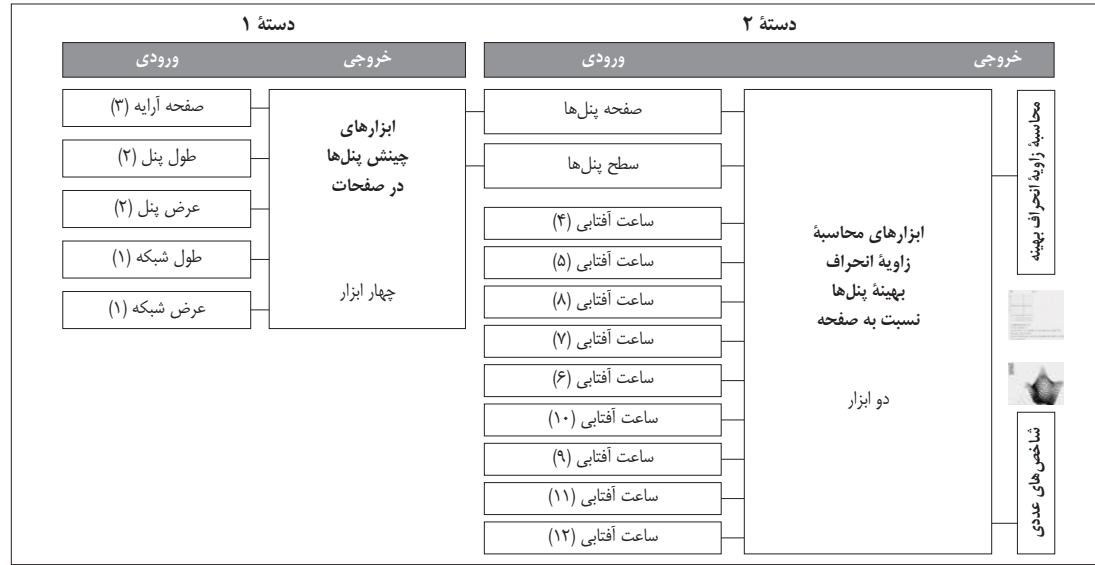
F. Sick & T. Erge, *Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers*, p. 96.

20. A.K. Yadav & S. Chandel, "Tilt Angle Optimization to Maximize Incident Solar Radiation: A Review" p. 503.

۲۱. منظور از صفحه، در این مقاله، صفحه‌ای صاف و مستطیل‌شکل در جهت‌گیری‌های مختلف است (همانند صفحات نما و یا جبهه‌های مختلف ساختمان). علت قرارگیری آرایه در صفحه صاف مشابه بودن الگوهای سایه‌اندازی جزئی بر روی همه پنل‌ها است که در ادامه تبیین می‌شود (ت ۷).

ت ۱۴ (بالا). نحوه ارتباط شماتیک ابزارهای دو دسته و همچنین ارتباط متغیرها و ابزارها برای محاسبه زاویه انحراف بهینه (شماره و رنگ ورودی‌ها یا متغیرهای متناسب با جدول «ت ۱۳» است)، طرح و تدوین: نگارندگان.

ت ۱۵ (پایین). نحوه ارتباط ابزارهای دو دسته و همچنین ارتباط متغیرها و ابزارها برای محاسبه زاویه انحراف بهینه در محیط گرسپا (ارتباط این دو دسته ابزار به همراه تعیین متغیرهای گفته شده (ورودی‌های ابزارها) همان راهکار مورد نظر مقاله است)، طرح و تدوین: نگارندگان.



شوند. نحوه ورود اطلاعات به ابزارهای دسته اول و نوع خروجی آن‌ها در «ت ۱۸» نشان داده شده است.

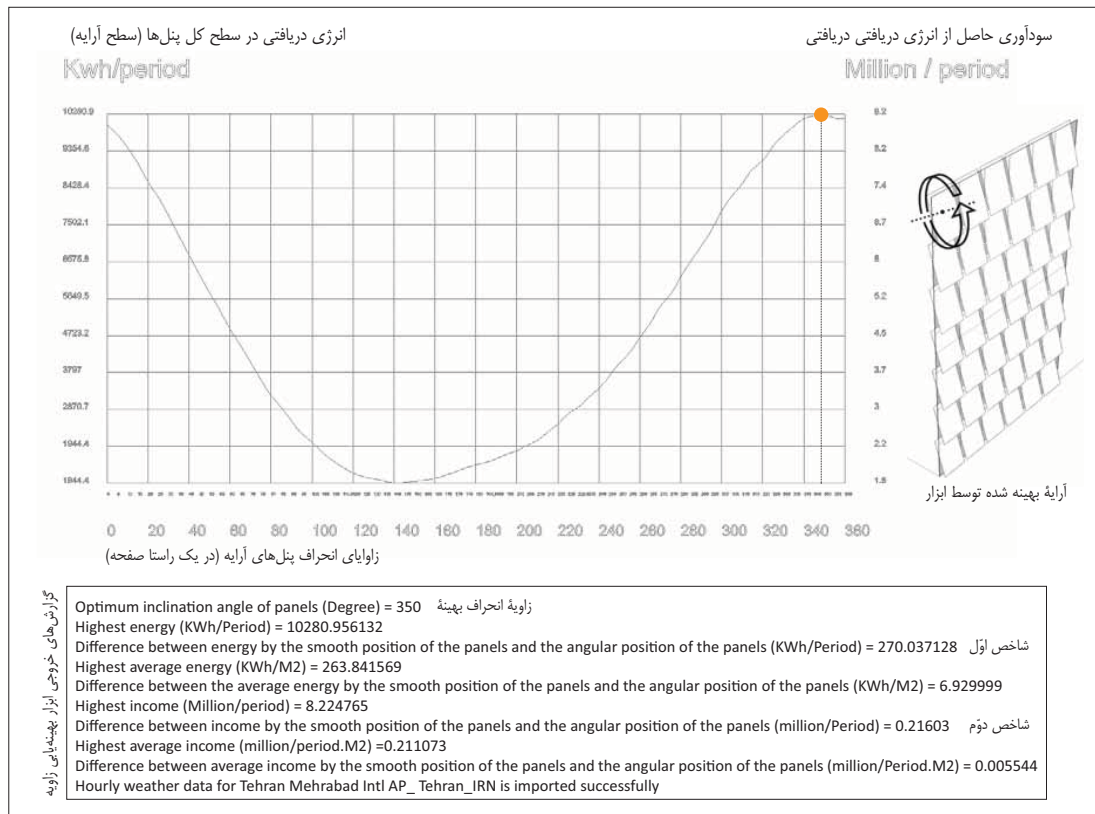
## ۲.۴. ابزارهای دسته دوم (بهینه‌یابی زاویه انحراف پنل‌ها)

با ابزارهای برنامه‌نویسی شده در این قسمت، با چرخش گام به گام پنل‌های ساخته شده توسط دسته اول ابزارها و محاسبه انرژی تابشی دریافتی هر کدام از گام‌ها، بهترین زاویه قرارگیری پنل‌ها و شاخص‌ها را محاسبه و خروجی‌های گفته شده و نمودارهای

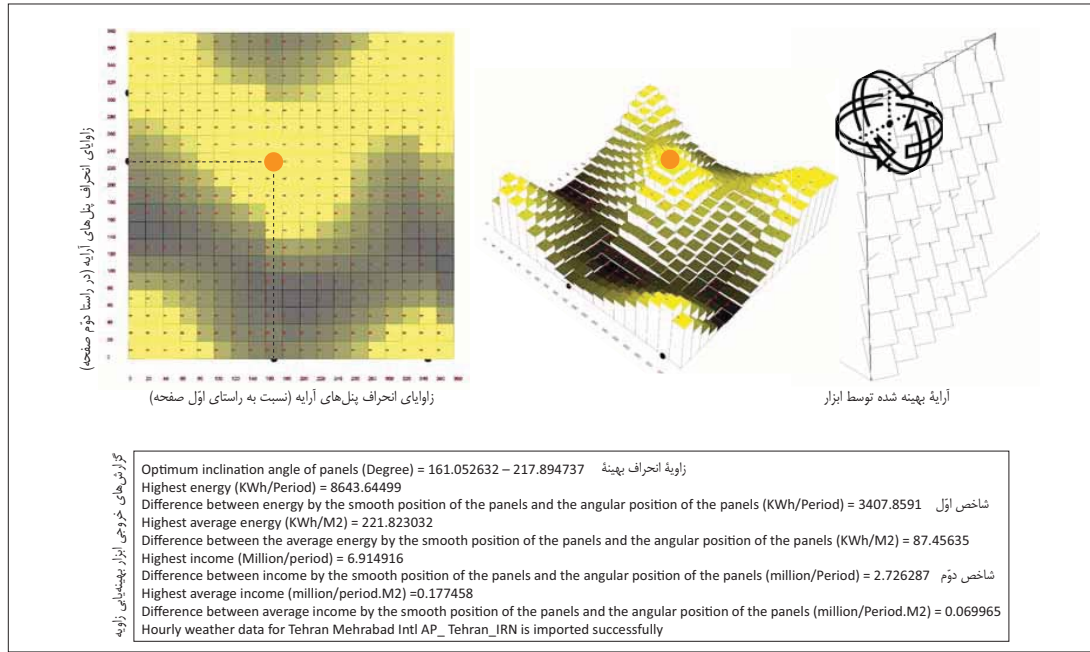
۲۲. منظور از زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه‌های خورشیدی زاویه‌ای است که همه پنل‌های آرایه باید نسبت به صفحه قرارگیری آن منحرف شوند تا بیشترین دریافت انرژی را در طول یک دوره یک‌ساله داشته باشند. این زاویه بنا به جهت‌گیری و زوایای مختلف صفحه قرارگیری آرایه (عمودی، افقی، شیبدار) و چینش فشرده و یا باز پنل‌ها در صفحه می‌تواند متفاوت باشد. در این مقاله زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه خورشیدی به صورت اختصار زاویه انحراف بهینه نوشته شده است.

ت ۱۶. خروجی ابزار بهینه‌یابی در یک راستای صفحه، همان‌طور که در شکل مشخص است، زاویه انحراف بهینه این خروجی ۳۵۰ درجه و شاخص اول ۲۷۰ و شاخص دوم ۰/۲ است. شاخص اول و دوم به ترتیب معرف مقدار انرژی و سود دریافت‌شده بیشتر که نتیجه قرارگیری بهینه پنل‌ها نسبت به حالت قرارگیری بدون انحراف آن‌ها است (قرارگیری اولیه) است. چون چرخش پنل‌ها در جهت رو به زمین شروع می‌شود، نمودار ابتدا نزولی و سپس صعودی خواهد شد (در این تصویر قیمت هر کیلووات برق ۸۰۰ تومان و بازده پنل‌ها ۱۱٪ فرض شده است). طرح: نگارندگان.

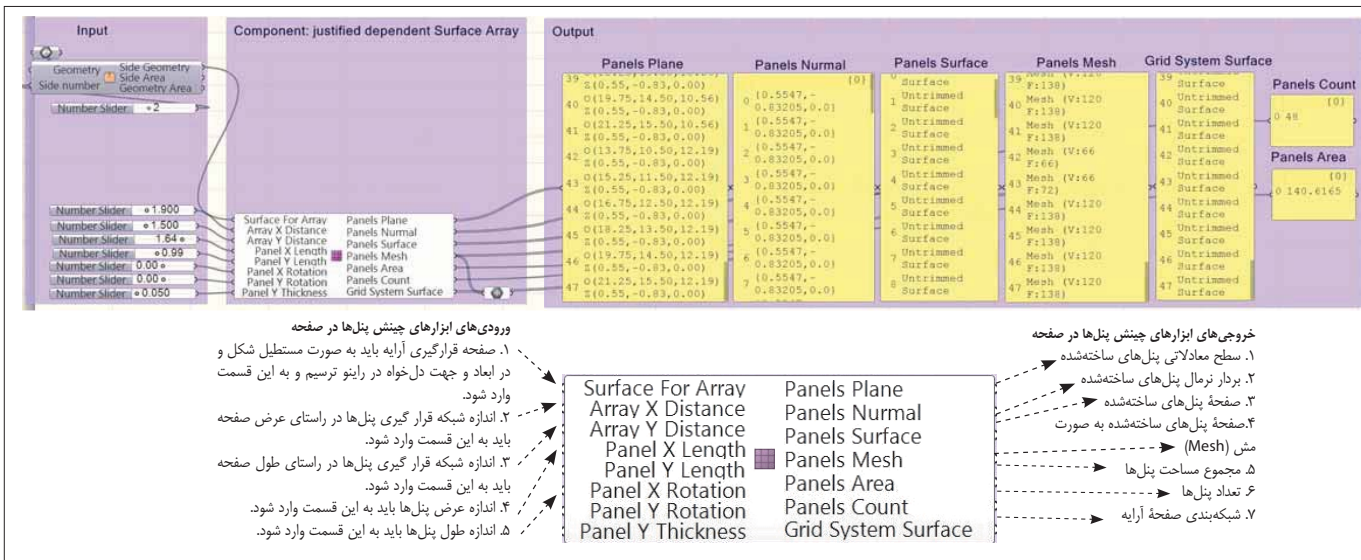
یادشده در «ت ۱۶ و ۱۷» را در محیط ترسیم می‌شود. با توجه به اینکه می‌توان پنل‌های آرایه را نسبت به دو جهت اصلی صفحه و یا نسبت به یک جهت اصلی آن تغییر زاویه داد (ت ۲۱) تا به شرایط بهتری از لحاظ دریافت انرژی تابشی خورشید برسند، برای هر کدام از این شرایط یک ابزار برنامه‌نویسی شده است، که می‌توان آن‌ها را در «ت ۲۲» مشاهده کرد. در صورت استفاده از بهینه‌یابی در یک محور نمودار دوعبده و در صورت استفاده از بهینه‌یابی در راستای دو محور نمودار سه‌بعدی در راینو نمایش داده می‌شود. (ت ۱۶ و ۱۷).



23. Partial Shading  
 24. J. Du, et al, "A Novel Solar Panel Optimizer with Self-compensation for Partial Shadow Condition", p. 92; K. Ishaque & Z. Salam, "A Review of Maximum Power Point Tracking Techniques of PV System for Uniform Insolation and



ت ۱۷ (بالا). خروجی ابزار  
 بهینه‌یابی در دو راستای صفحه،  
 طرح: نگارندگان.  
 ت ۱۸ (پایین). معرفی ورودی و  
 خروجی یکی از ابزارهای دسته  
 اول، طرح: نگارندگان.




خروجی ابزار در راینو	توضیحات ابزار	ورودی ابزار	خروجی ابزار
	تولید آرایه‌های متصل به صفحه و تعدیل شده (پنل‌ها را به نحوی در صفحه جای می‌دهد که همه صفحه پوشانده شود)	Surface For Array Array X Distance Array Y Distance Panel X Length Panel Y Length Panel X Rotation Panel Y Rotation Panel Y Thickness	Panels Plane Panels Normal Panels Surface Panels Mesh Panels Area Panels Count Grid System Surface
	تولید آرایه‌های متصل به صفحه و تعدیل نشده (پنل‌ها را به نحوی در صفحه جای می‌دهد که صفحه از یک نقطه پوشانده شود، معمولاً حاشیه‌ای خالی در دو طرف صفحه باقی می‌ماند)	Surface For Array Array X Distance Array Y Distance Start Point Number Panel X Length Panel Y Length Panel X Rotation Panel Y Rotation Panel Y Thickness	Panels Plane Panels Normal Panels Surface Panels Mesh Panels Area Panels Count Start Point Grid System Surface
	تولید آرایه‌هایی با جای‌گیری بیشترین تعداد پنل در صفحه (فاصله بین پنل‌ها توسط خود ابزار به نحوی تعیین می‌شود که تعداد پنل‌ها به حداکثر برسد)	Surface For Array Panel X Length Panel Y Length Panel X Rotation Panel Y Rotation Panel Y Thickness	Panels Plane Panels Normal Panels Surface Panels Mesh Panels Area Panels Count Grid System Surface

Partial Shading Condition", p. 475; R. Kadri, et al, "New Converter Topology to Improve Performance of Photovoltaic Power Generation System under Shading Conditions", p. 1.

۲۵. ممکن است در بعضی از صفحات شیب‌دار و به سمت جنوب این زاویه صفر گردد.  
۲۶. یعنی مقایسه‌ای بین حالت قرارگیری پنل‌ها تحت زاویه انحراف بهینه آن نسبت به صفحه قرارگیری آرایه و حالت قرارگیری به صورت موازی با آن صفحه در میزان انرژی و سود دریافت شده سالیانه (ت ۱۲).  
27. Grasshopper (GH)

گرسه‌پار محیطی برای برنامه‌نویسی بصری است که نتیجه کار آن در نرم‌افزار راینو قابل مشاهده است. در این محیط مسیره‌های جدید محاسباتی با استفاده از ابزارهای برنامه‌نویسی شده‌ای به نام «کامپوننت» (که هر کدام از آن‌ها ورودی و خروجی‌های مخصوص خود را دارد و یک عمل خاصی را انجام می‌دهد) تعریف می‌شوند و به نحوی عمل می‌کنند که با تغییر متغیرها (داده‌ها) نتایج به‌روزرسانی و در محیط راینو نمایان ←

ت ۱۹ (بالا). همه ابزارهای برنامه‌نویسی شده دسته اول برای چپش پنل‌ها بر روی صفحات آرایه، طرح: نگارندگان.  
ت ۲۰ (پایین). معرفی ورودی و خروجی یکی از ابزارهای دسته دوم، طرح: نگارندگان.



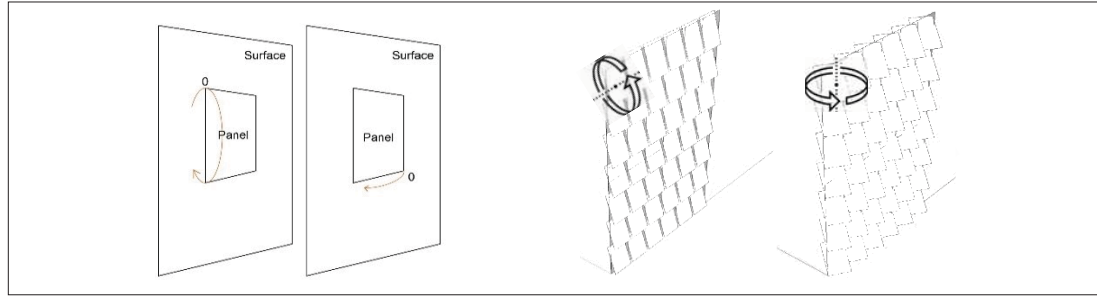
**ورودی‌های ابزارهای بهینه‌یابی زاویه**

۱. سطح معادلاتی پنل‌های ساخته شده در ابزار قبلی باید به این قسمت وارد شود.
۲. صفحه پنل‌های ساخته شده در ابزار قبلی باید به این قسمت وارد شود.
۳. ضرایب اقلیمی a, b, و فایل آب‌هواشناسی باید به این قسمت وارد شود.
۴. طول دوره مطالعاتی باید به این قسمت وارد شود. در این مقاله دوره یکساله مدنظر است.
۵. اندازه بخش‌های محاسباتی باید به این قسمت وارد شود. در این مقاله ۳۰ سانت در نظر گرفته شده است.
۶. بازده پنل‌ها باید به این قسمت وارد شود.
۷. قیمت هر کیلووات ساعت انرژی باید به این قسمت وارد شود.
۸. گام‌های چرخش پنل‌ها باید به این قسمت وارد شود. در این مقاله ۳ درجه فرض شده است.

**خروجی‌های ابزار بهینه‌یابی زاویه**

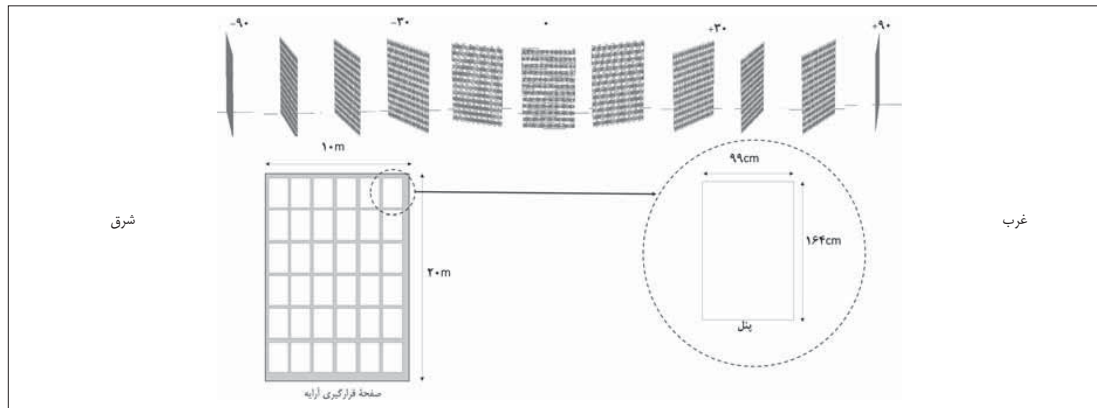
۱. زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه
۲. کل انرژی تابشی دریافتی پنل‌ها در زاویه انحراف بهینه
۳. شاخص اول
۴. سود حاصل از انرژی تابشی دریافتی در زاویه انحراف بهینه
۵. شاخص دوم
۶. نمودارهای خروجی همانند شکل «ت ۱۶ ت ۱۷»

ت ۲۱ (بالا). دو روش چرخیدن پنل‌ها در راستای محورهای صفحه قرارگیری آرایه (در یک راستا و یا در دو راستا)، طرح: نگارندگان.



خروجی ابزار در راینو	توضیحات ابزار	ورودی ابزار	خروجی ابزار
	<p>بهینه‌یابی در راستای یک محور صفحه اصلی آرایه</p>	<p>Panel's Surface Panel's Plane Surrounding Geometry Weather File (EPW) Analysis Period Computational Accuracy Panel's Efficiency % Drop Efficiency (-) Electricity Sales Price (1kwh) Run 1 Run 2 Rotation Accuracy Chart's Size Chart's Start Point</p>	<p>۱</p> <p>Result Array's Optimal Deviation Angle(Degree) Comparative result Highest Energy (Kwh/period) Difference between the Energy by the First Positioning of the Panels and the Angular Positioning of the Panels (Kwh/period) Highest Average Energy (Kwh/period.m2) Difference between the Average Energy by the First Positioning of the Panels and the Angular Positioning of the Panels (Kwh/period.m2) Highest Income(million/period) Difference between Income by the First Positioning of the Panels and the Angular Positioning of the Panels (Million/period) Highest Average Income(Million/period.m2) Difference between the Average Income by the First Positioning of the Panels and the Angular Positioning of the Panels (Million/period.m2) Sorted Result List of Angle(Degree) List of Energy (Kwh/period) List of Average Energy (Kwh/period.m2) List of Income(million/period) List of Average Income(Million/period.m2) 2D Graph Result Chart Curve Model Result Panels Optimum Surface</p>
	<p>بهینه‌یابی در راستای دو محور صفحه اصلی آرایه</p>	<p>Panel Plane Panel Surface Surrounding Geometry Weather file (EPW) Analysis Period Computational Accuracy Panel Efficiency % Drop Efficiency (-) Electricity Sales Price (1kwh) Run 1 Run 2 Rotation Accuracy Chart Size</p>	<p>۲</p> <p>Optimum Inclination Angle of Panels (Degree) Highest Energy (Kwh/period) Difference between the Energy by the smooth positioning of the panels and the angular positioning of the panels (Kwh/period) Highest Average Energy (Kwh/period.m2) Difference between the Average Energy by the smooth positioning of the panels and the angular positioning of the panels (Kwh/period.m2) Highest Income(million/period) Difference between Income by the smooth positioning of the panels and the angular positioning of the panels (Million/period) Highest Average Income(Million/period.m2) Difference between the Average Income by the smooth positioning of the panels and the angular positioning of the panels (Million/period.m2) Panels Optimum Surface</p>

ت ۲۲ (میان). همه ابزارهای برنامه‌نویسی شده دسته دوم برای انواع بهینه‌یابی زاویه بهینه، طرح: نگارندگان.  
ت ۲۳ (پایین). چرخش‌های مختلف صفحه عمود ۱۰×۲۰ متر و ترسیم‌شده در راینو به منظور بهینه‌یابی زاویه انحراف هر یک از جهت‌گیری‌ها، طرح: نگارندگان.



→ می‌شود. مسیرهای برنامه‌نویسی شده با ابزارها خود می‌توانند به ابزارهای دیگر قابل استفاده برای دیگران تبدیل و ابزار جدیدی را تولید کنند (کلمه لاتین کامپوننت در این مقاله ابزار ترجمه شده است).

۲۸. اندازه پنل در مطالعه این مقاله مطابق با یک پنل ساخت اسپانیا به ابعاد ۱۶۴ در ۹۹ سانتی‌متر و بازدهی ۱۵٪ در نظر گرفته شده است (نک: <http://www.gadirsolar.es/en/fv-modules.html>)

۲۹. سام معینی و شهرام جوادی، «برآورد تابش خورشید در ایران با استفاده از یک مدل بهینه»، ص ۱؛ <http://www.gadirsolar.es/en/fv-modules.html>

۳۰. مقصود از صفحه (surface) و سطحی (plane) با مساحت مشخص است.

۳۱. ضرایب تجربی (b, a) در مدل انگستروم به همه پارامترهای اقلیمی وابستگی دارند، که باید از طریق روابط رگرسیونی بین حالت اندازه‌گیری شده تابش توسط ایستگاه‌های پیرانومتري و ضرایب موجود در معادله برای هر منطقه به صورت مجزا محاسبه گردد.

این ضرایب به صورت دقیق برای شهر تهران و بسیاری از شهرهای ایران انجام شده است.

32. <http://www.gadirsolar.es/en/fv-modules.html>; J.E. Hay, "Calculation of Monthly Mean Solar Radiation for Horizontal and Inclined Surfaces", p. 307; A. Muzathik, et al,

## ۵. بهینه‌یابی زاویه انحراف آرایه‌ای عمود و ثابت در شهر تهران

با راهکار دومرحله‌ای تدوین شده در مقاله (ت ۱۵) و همچنین اطلاعات جغرافیایی و آب‌وهوایی استان تهران و با در نظر گرفتن شاخص‌های تعریف شده، اهمیت زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه‌های عمود در جهت‌گیری‌های مختلف در این استان، بررسی می‌گردد.

به علت تأثیرگذاری هندسه آرایه (اندازه و فاصله پنل‌ها) در سایه‌اندازی جزئی پنل‌ها به روی هم، مسئله مقاله بر روی آرایه‌های مشخص و متداول بررسی می‌شود، که مشخصات آن در ستون آخر جدول «ت ۱۳» بیان شده، بنا بر این تعمیم نتایج آن فقط به آرایه‌های مشابه ممکن است و در صورت مشابه نبودن می‌توان آرایه‌های مورد نظر را به واسطه ابزارهای تولیدشده در دسته اول شبیه‌سازی و با ابزارهای دسته دوم نتایج را بر روی آن بررسی کرد.

به منظور انجام مطالعه استان تهران، صفحاتی فرضی و عمود بر زمین به ابعاد ۱۰×۲۰ متر در جهت‌گیری‌های ۹۰+ تا ۹۰- درجه در راینو به منزله نماهای عمود بررسی می‌شود که نتیجه آن در «ت ۲۳» قابل مشاهده است (حرکت از غرب به شرق و به سمت جنوب) و سپس آرایه مشخص شده بر روی آن‌ها شبیه‌سازی می‌گردد. در ادامه زاویه انحراف بهینه و شاخص‌های هرکدام به واسطه راهکار گفته شده به صورت جداگانه محاسبه، و در نمودار «ت ۲۴» گزارش داده می‌شود.

همان‌طور که در «ت ۲۴» معلوم شده است، لزوم بهینه‌یابی زاویه انحراف پنل‌های آرایه‌های عمودی یادشده در زوایای ۵۷- تا ۸۱- و ۶۶+ تا ۲۱+ از همه بیشتر است. در صورت استفاده از این زاویه نسبت به قرارگیری بدون انحراف پنل‌ها می‌توان سالانه از هدر رفتن ۵۰۰۰ تا ۶۵۰۰ کیلووات ساعت انرژی در این آرایه جلوگیری کرد. ارزش این مقدار انرژی در ایران با توجه به سیاست‌های خرید تضمینی برق خورشیدی<sup>۴</sup> به قیمت

هر کیلووات ساعت آن معادل ۸۰۰ تومان، بیش از ۴۸۰۰۰۰۰ تومان به صورت سالانه است.

## ۶. نتیجه‌گیری

زاویه انحراف بهینه پنل‌های آرایه‌های عمودی باعث افزایش متوسط انرژی تابیده شده به آن‌ها نسبت به حالت قرارگیری بدون انحرافشان می‌شود. مقدار این افزایش و ارزش آن که در این مقاله با عنوان شاخص‌های اول و دوم شناخته شده در جهت‌گیری‌های مختلف صفحه عمود متفاوت است. با توجه به بررسی انواع چینش‌های مختلف آرایه‌های عمودی در جهت‌گیری‌های مختلف و توسط راهکار برنامه‌نویسی شده، به طور کلی می‌توان بیان کرد که مقدار شاخص‌ها در صفحات به سمت جنوب کمتر است و این به این معنا است که لزوم استفاده از زاویه انحراف بهینه برای این صفحات کمتر است و هر چقدر صفحه عمود به سمت شرق و یا غرب تغییر جهت یابد، مقدار شاخص‌ها بیشتر و لزوم استفاده از زاویه انحراف بهینه برای پنل‌های آرایه بیشتر می‌شود و می‌توان به کمک آن سالانه بین ۵ تا ۱۵٪ انرژی با آرایه خورشیدی بیشتر دریافت کرد.

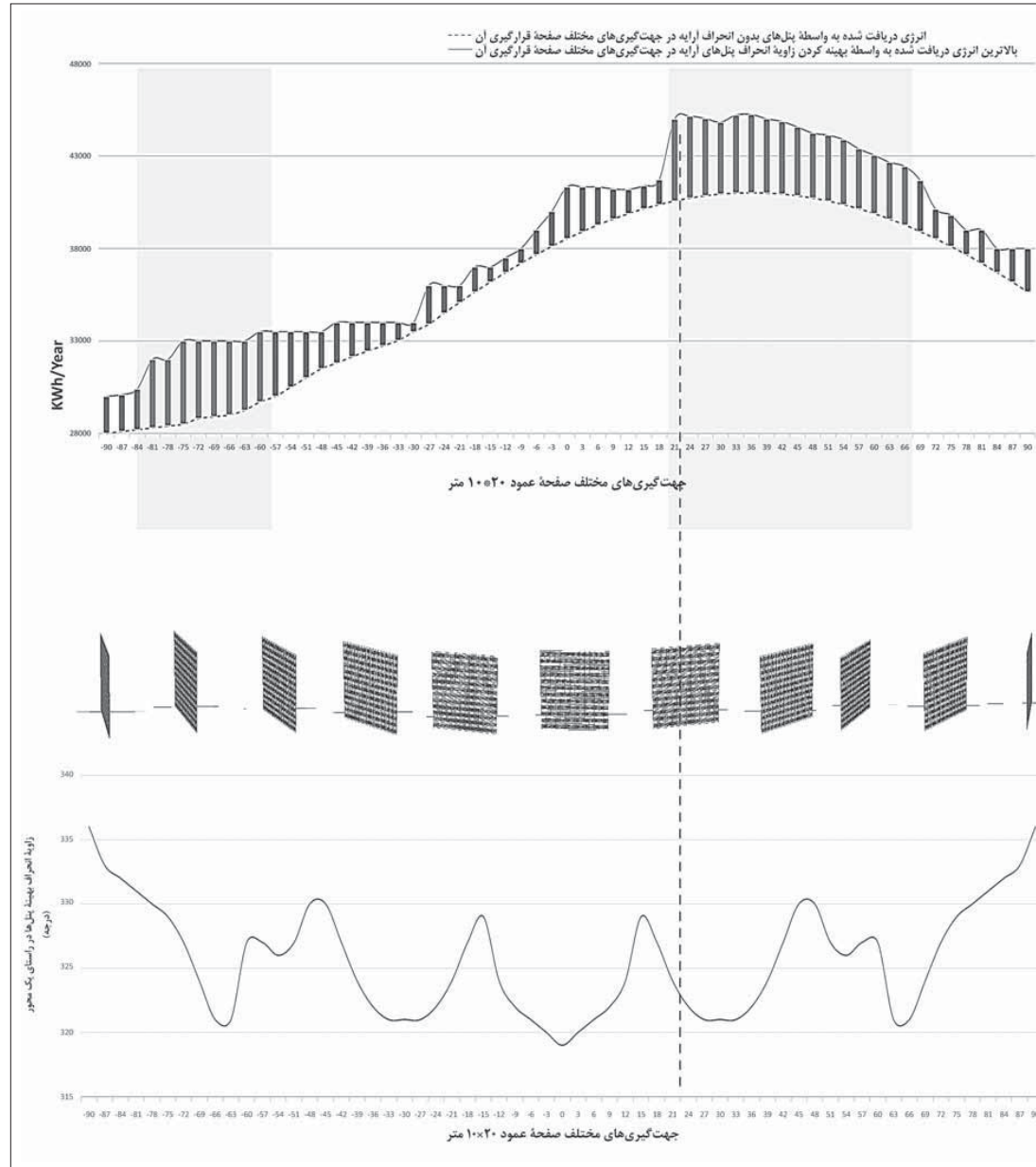
لازم به ذکر است که نمودارهای «ت ۲۴» مربوط به یک چینش مشخص پنل‌ها بر روی صفحه بوده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده بر روی چینش‌های مختلف و متعدد آرایه‌ها بر روی صفحات، به واسطه راهکار تدوین شده، می‌توان بیان کرد که در صورت چینش فشرده پنل‌ها بر روی صفحه، اختلاف بین دو نمودار شکل یادشده (همان شاخص اول مقاله) کمتر و در صورت چینش باز پنل‌ها بر روی صفحه این اختلاف بیشتر می‌شود.

## ۷. جمع‌بندی

بهترین زاویه قرارگیری پنل‌های یک آرایه بر روی جبهه‌های مختلف ساختمان به چندین متغیر بستگی دارد:

“Estimation of Global Solar Irradiation on Horizontal and Inclined Surfaces Based on the Horizontal Measurements”, p. 812; D. Norris, “Solar Radiation on Inclined Surfaces”.  
 33. K. Hinrichsen, “The Ångström Formula with Coefficients Having a Physical Meaning”, p. 491;  
 X. Liu, et al, “Calibration of the Ångström–Prescott Coefficients (a, b) under Different Time Scales and their Impacts in Estimating Global Solar Radiation in the Yellow River Basin”, p. 697;  
 J. Martinez-Lozano, et al, “The Historical Evolution of the Ångström Formula and its Modifications: Review and Bibliography”, p. 109.

ت ۲۴. اختلاف بین دو نمودار بالا با استوانه نمایش داده شده که معرف همان شاخص اول است. به طور مثال در صفحه مفروض و در جهت گیری ۲۱ درجه جنوب شرقی در شهر تهران، در صورت انحراف بهینه پنل‌ها، که به اندازه ۳۲۴ درجه نسبت به صفحه است، سالانه می‌توان حدود ۵۰۰۰ KWh انرژی بیشتر جذب کرد و مقدار آن به عدد ۴۶۰۰۰ KWh در سال می‌رسد، طرح: نگارندگان.



تدوین شده در گرسپایر و با ابزارهای چینش آرایه و بهینه‌یابی زاویهٔ انحراف آن‌ها پیش رفت، این ابزارها، برای هر سطح و با هر آرایهٔ تولیدی بر روی آن، زاویهٔ انحراف بهینه نسبت به صفحه قرارگیری آرایه را در یک جهت و یا در دو جهت آن محاسبه و همچنین با دو شاخص عددی کیلووات‌ساعت بر سال و میلیون تومان بر سال به این تصمیم‌گیری کمک می‌کند.

۱. جهت‌گیری اصلی سطح،
  ۲. اندازهٔ پنل‌ها،
  ۳. فاصلهٔ بین پنل‌ها از هم،
  ۴. موقعیت جغرافیایی، و
  ۵. دورهٔ مورد مطالعه.
- برای تصمیم‌گیری انحراف پنل‌های باید از راهکار

## منابع و مأخذ

معینی، سام و شهرام جوادی. «برآورد تابش خورشید در ایران با استفاده از یک مدل بهینه»، در نشریه انرژی ایران، ش ۳۴ (تابستان ۱۳۸۹)، ص ۱-۱۰. وفایی، راحیل و شهرام پوردیبهیمی. «برآورد تابش خورشید روی سطح فتوولتائیک‌های یکپارچه با ساختمان»، در صفه، ش ۶۹ (تابستان ۹۴)، ص ۱۹-۳۶. وفایی، راحیل. سیستم‌های فتوولتائیک در ترکیب با معماری، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۸. هیئت دولت، مصوبهٔ ابلاغ نرخ خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک، ۹۶/۲/۱۹.

بهداری‌نژاد، مهدی و بهاره فرهمندیور، «طراحی و بررسی سیستم برق خورشیدی برای یک ساختمان اداری در تهران»، در بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۵. شمس، محمدحسین. «مروری بر فناوری‌های تولید برق از انرژی خورشیدی جهان»، در فصلنامهٔ توسعهٔ تکنولوژی صنعتی، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف، ش ۲۱ (تابستان ۱۳۹۲)، ص ۱۶-۱۷. محمدشیرازی، علی. تدوین الگوی نصب پنل‌های خورشیدی در نمای ساختمان‌ها، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد رشته فناوری (بایونیک) معماری، استاد راهنما: محمد تحصیلدوست، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۶.

Appelbaum, J. & J. Bany. "Shadow Effect of Adjacent Solar Collectors in Large Scale Systems", in *Solar Energy*, Vol. 23 (1979), pp. 497-507.

Bany, J. & J. Appelbaum. "The Effect of Shading on the Design of a Field of Solar Collectors", in *Solar Cells*, Vol. 20 (1987), pp. 201-228.

Benghanem, M. "Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case Study for Madinah, Saudi Arabia", in *Applied Energy*, Vol. 88 (2011), pp. 1427-1433.

Blanco, Jesús M., et al. "Energy Assessment and Optimization of Perforated Metal Sheet Double Skin Façades through Design Builder; A Case Study in Spain", in *Energy and Buildings*, 111 (2016), pp. 326-336.

Du, J. & R. Xu & X. Chen & Y. Li & J. Wu, "A Novel Solar Panel Optimizer with Self-compensation for Partial Shadow

Condition", in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE*, 2013, pp. 92-96.

Hafez, A. & A. Soliman & K. El-Metwally & I. Ismail. "Tilt and Azimuth Angles in Solar Energy Applications—A Review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77 (2017), pp. 147-168.

Hartner, M. & A. Ortner & A. Hiesl & R. Haas. "East to West—The Optimal Tilt Angle and Orientation of Photovoltaic Panels from an Electricity System Perspective", in *Applied Energy*, Vol. 160, pp. 94-107, 2015.

Hay, J.E. "Calculation of Monthly Mean Solar Radiation for Horizontal and Inclined Surfaces", in *Solar Energy*, Vol. 23 (1979), pp. 301-307.

Hinrichsen, K. "The Ångström Formula with Coefficients

۳۴. در این راهکار به این بخش‌ها Computation Accuracy گفته شده است.

۳۵. آرایه به نحوی انتخاب شده است که سایه‌اندازی جزئی داشته باشد.

36. P.G. Loutzenhiser, et al.

"Empirical Validation of Models to Compute Solar Irradiance on Inclined Surfaces for Building Energy Simulation", p. 254; J.M. Blanco, et al, "Energy Assessment and Optimization of Perforated Metal Sheet Double Skin Façades through Design Builder; A Case Study in Spain", p. 326.

۳۷. در این راهکار به گام‌های چرخش پنل‌ها برای به دست آوردن زاویهٔ انحراف بهینه Rotation Accuracy گفته شده است.

38. component

39. plugin

۴۰. مصوبهٔ هیئت دولت مبنی بر ابلاغ نرخ خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک، ۹۶/۲/۱۹.





- Having a Physical Meaning", in *Solar Energy*, Vol. 52 (1994), pp. 491-495.
- Ishaque, K. & Z. Salam, "A Review of Maximum Power Point Tracking Techniques of PV System for Uniform Insolation and Partial Shading Condition", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19 (2013), pp. 475-488.
- Kacira, M. & M. Simsek & Y. Babur & S. Demirkol. "Determining Optimum Tilt Angles and Orientations of Photovoltaic Panels in Sanliurfa, Turkey", in *Renewable Energy*, Vol. 29 (2004), pp. 1265-1275.
- Kaddoura, T.O. & M.A. Ramli & Y.A. Al-Turki. "On the Estimation of the Optimum Tilt Angle of PV Panel in Saudi Arabia", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65 (2016), pp. 626-634.
- Kadri, R. & J-P. Gaubert & G. Champenois. "New Converter Topology to Improve Performance of Photovoltaic Power Generation System under Shading Conditions", in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 1-7.
- Kazmi, S.M.R. & H. Goto & O. Ichinokura & H-J. Guo. "An Improved and very Efficient MPPT Controller for PV Systems Subjected to Rapidly Varying Atmospheric Conditions and Partial Shading", in *Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities*, 2009, pp. 1-6.
- Khoo, Y.S. & A. Nobre & R. Malhotra & D. Yang & R. Rütther & T. Reindl, et al. "Optimal Orientation and Tilt Angle for Maximizing in-plane Solar Irradiation for PV Applications in Singapore", in *IEEE Journal of photovoltaics*, Vol. 4 (2014), pp. 647-653.
- Liu, X. & X. Mei & Y. Li & Y. Zhang & Q. Wang & J. R. Jensen, et al. "Calibration of the Ångström–Prescott Coefficients (a, b) under Different Time Scales and their Impacts in Estimating Global Solar Radiation in the Yellow River Basin", in *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 149 (2009), pp. 697-710.
- Loutzenhiser, P.G., et al. "Empirical Validation of Models to Compute Solar Irradiance on Inclined Surfaces for Building Energy Simulation", in *Solar Energy*, 81(2) (2007), pp. 254-267.
- Martinez-Lozano, J. & F. Tena & J. Onrubia & J. De La Rubia. "The Historical Evolution of the Ångström Formula and its Modifications: Review and Bibliography", in *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 33 (1984), pp. 109-128.
- Muzathik, A. & M. Ibrahim & K. Samo & W.W. Nik. "Estimation of Global Solar Irradiation on Horizontal and Inclined Surfaces Based on the Horizontal Measurements", in *Energy*, Vol. 36 (2011), pp. 812-818.
- Norris, D. "Solar Radiation on Inclined Surfaces", in *Solar Energy*, Vol. 10 (1966), pp. 72-76.
- Sick, F. & T. Erge. *Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers*, Earthscan, 1996.
- Sinha, S. & S. Chandel. "Optimum Tilt Angles for Maximum Power Generation by Photovoltaic Systems in Western Himalayan State of Himachal Pradesh, India", in *Power Electronics (IICPE), 2016 7th India International Conference on*, 2016, pp. 1-6.
- Weinstock, D. & J. Appelbaum. "Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors", in *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 126 (2004), pp. 898-905.
- Weinstock, D. & J. Appelbaum. "Optimization of Economic Solar Field Design of Stationary Thermal Collectors", in *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 129 (2007), pp. 363-370.
- Yadav, A.K. & H. Malik & S. Chandel. "Tilt Angle Calculation for Installation of PV Systems for Mountainous Regions of Himachal Pradesh India", in *Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), International Conference on*, 2016, pp. 205-209.
- Yadav, A.K. & S. Chandel. "Tilt Angle Optimization to Maximize Incident Solar Radiation: A Review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23 (2013), pp. 503-513.
- Zhen, Z. & Z. Zengwei & S. Li & W. Jun & P. Wuchun & L. Zhikang, et al. "The Effects of Inclined Angle Modification and Diffuse Radiation on the Sun-Tracking Photovoltaic System", in *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 7 (2017), pp. 1410-1415.
- <http://amarista.ir/content/statistics/395/>
- <http://www.gadirsolar.es/en/fv-modules.html>
- <http://www.sun.org.ir/ationoffice> (سایت انرژی‌های نو ایران)
- <https://www.accuweather.com/fa/ir/tehran>

