تعیین سطح بهینه مورد نیاز برای نصب سیستم مولد برق خورشیدی برای یک واحد مسکونی با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA)

محمدحسین شمس[۱]، محسن کیا[۲]، حبیب‌اله رواقی اردبیلی[۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۲/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۲/۰۶/۰۱

چکیده:

سیستم‌های فتوولتاییک یکی از پر مصرف‌ترین و کاربردی‌ترین موارد استفاده از انرژی خورشید محسوب می‌گردند. یکی از کاربردهای اینگونه سیستم‌ها کاربرد خانگی آنهاست. با توجه به مزایای این انرژی پاک در سال‌های اخیر، احداث سیستم‌های فتوولتاییک بر پشت‌بام و شیروانی منازل در کشورهای مختلف از استقبال خوبی برخوردار شده است. از طرفی، گسترش زندگی شهری باعث کاهش فضای کافی برای احداث این قبیل مولد ها شده است. در این شرایط، لزوم استحصال انرژی لازم برای واحدهای مسکونی در فضایی محدود بیش از پیش احساس می‌گردد. در این مقاله، ضمن طراحی ابعاد و چیدمان بهینه پنل‌های خورشیدی (شامل تعداد ردیف، طول و عرض پنل‌ها، فاصله بین پنل‌ها و شیب بهینه پنل‌ها نسبت به افق) برای یک واحد مسکونی با میزان انرژی مورد نیازِ مشخص، کمترین مساحت لازم برای تأمین این انرژی به دست آمده است. اثر سایه متقابل پنل‌ها بر روی یکدیگر نیز در این مقاله در نظر گرفته شده است. با توجه به ماهیت غیرخطی تابع هدف و قیود این مسأله، تکنیک‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌توانند با دقت و سرعت بالایی پاسخگو به این مسئله باشند. بنابراین، برای این بهینه‌سازی از الگوریتم تبرید شبیه سازی شده به عنوان یکی از الگوریتم‌های مناسب استفاده شده است. برای ارزیابی این روش محاسبات به طور نمونه برای تأمین انرژی یک واحد مسکونی واقع در تهران با عرض جغرافیایی ۳۵/۷ درجه شمالی پیاده‌سازی شده است. نتایج حاکی از ابعاد ۲۲ متر مربع برای تأمین انرژی سالانه یک واحد مسکونی با مصرف ۴ مگاوات ساعت در سال خواهد بود. بنابراین، امکان احداث سیستم خورشیدی برای مجتمع‌های مسکونی با توجه به تعداد زیاد واحدها و محدودیت مساحت پشت‌بام وجود نخواهد داشت.

کلمات کلیدی:
نیروگاه فتوولتایی، تابش خورشیدی
الگوریتم SA

۱) کارشناس جهاد دانشگاهی صنعتی شریف
۲) دانشجوی مقطع دکترا دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
۳) کارشناس دفتر استانداردهای برق و انرژی وزارت نیرو

mhshams@alum.sharif.edu
mohsenkia@stud.pwut.ac.ir
h.ravaghi@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

مقدمه

انرژی خورشیدی عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان است. این انرژی پاک، ارزان و بی‌پایان بوده و در بیشتر مناطق کره زمین قابل استحصال می‌باشد. محدودیت منابع فسیلی و پیامدهای حاصل از تغییرات زیست محیطی و آب و هوای جهانی، فرصت‌های مناسبی را برای رقابت انرژی خورشیدی با انرژی‌های فسیلی خصوصاً در کشورهایی با پتانسیل بالای تابش ایجاد نموده است. ایران با توجه به اینکه ۸ تا ۹ ماه از سال از بارش باران بی‌بهره است و در واقع آسمانی صاف دارد، می‌تواند بخش عظیمی از انرژی مورد نیاز خود را از تابش نور خورشید تأمین کند.

در [۱] به استفاده از برق خورشیدی در ساختمان‌های اداری با توجه به سیاست‌های انرژی دولت پرداخته شده است. مراجع [۲] و [۸] به بررسی تغییرات پارامتری طراحی مزرعه خورشیدی پرداخته است اما به حل مسأله بهینه سازی ریاضی اشاره نکرده است. مرجع[۸] مدلی برای نیروگاه خورشیدی با در نظر گرفتن اثر سایه پیشنهاد کرده است. مرجع[۱۴] به تخمین ظرفیت تولید توان خورشیدی به روش شبکه عصبی پرداخته است. مرجع[۱۷] استفاده از نیروگاه خورشیدی در یک منطقه راه دور را مورد بررسی قرار داده است. مراجع[۱۶] و[۱۵] به مروری بر تکنیک‌های هوشمند و کاربردشان برای به دست آوردن ابعاد بهینه سیستم‌های فتوولتاییک پرداخته شده است. [۱۹] به شبیه سازی بهینه مزرعه خورشیدی با استفاده از جعبه ابزار بهینه سازی در نرم‌افزار MATLAB پرداخته است. مرجع [۲] روشی برای به دست آوردن زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی ثابت در شهرهای مختلف ایران ارائه کرده است. [۳] و[۱۲] به طراحی بهینه ابعاد بهینه پنل-خورشیدی در یک زمین با ابعاد مشخص با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) پرداخته‌اند.

در این مقاله، اندازه بهینه پنل‌های خورشیدی و آرایش بهینه پنل‌ها در مزرعه خورشیدی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی سرد شدن تدریجی فلزات (SA) با فرمولاسیون ساعتی و در نظر گرفتن اثر سایه متقابلِ پنل‌ها بر روی یکدیگر، ضمن به دست آوردن مساحت بهینه مورد نیاز برای احداث سیستم خورشیدی برای یک واحد مسکونی با توان معلوم انجام شده است. در ذیل به سازماندهی مقاله اشاره می‌گردد.

در بخش۲ به برآورد انرژی کمینه یک واحد مسکونی پرداخته می‌شود. در بخش ۳ به بررسی مدل نیروگاه خورشیدی- فتوولتاییک با در نظر گرفتن اثر سایه پرداخته شده است. در بخش ۴ تابع هدف مورد نظر معرفی شده و الگوریتم بهینه‌سازی سرد شدن تدریجی فلزات شناخته می‌شود. در ادامه، تابع هدف بیان شده با استفاده از الگوریتم مذکور برای یک واحد مسکونی در شهر تهران در بخش۵ پیاده‌سازی و نتایج اعلام شده است. همچنین تجزیه و تحلیل حساسیت نسبت به زاویه شیب پنل و فاصله پنل‌ها نسبت به هم در بخش ۶ انجام شده و در بخش ۰۷ نیز نتایج مقاله ارائه شده است.

برآورد انرژی یک واحد مسکونی

فرض کنید که یک واحد مسکونی مصارفی طبق جدول ۱(۱) به صورت روزانه داشته باشد. این واحد روزانه مصرفی

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

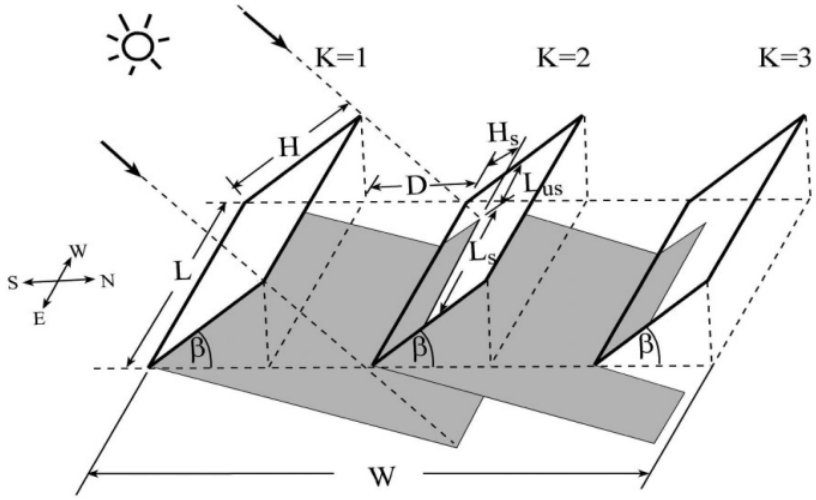
معادل ۱۰/۶ کیلووات ساعت خواهد داشت. مصرف سالانه این واحد برابر ۳۶۵×۱۰/۶ کیلووات ساعت در سال خواهد بود. بنابراین، حداقل انرژی سالانه تولیدی توسط پنل‌های فتوولتاییک می‌بایست تقریباً معادل۴ مگاوات ساعت باشد. (E_{min}=4 MWh). لازم به توضیح است که این سیستم باید به صورت مستقل از شبکه (با ذخیره‌ساز) طراحی گردد. چرا که در شرایط ابری و یا کاهش پتانسیل تابش، امکان ذخیره سازی و تأمین پیوسته انرژی واحد موجود می‌باشد.

جدول ۱) مصرف انرژی تقریبی روزانه یک واحد مسکونی

۱	لامپ روشنایی	۴۰	۵	۷	۱۴۰۰
۲	تلویزیون LCD	۲۰۰	۵	۱	۱۰۰۰
۳	یخچال	۱۰۰	۱۰	۱	۱۰۰۰
۴	رایانه	۴۰۰	۸	۱	۳۲۰۰
۵	سایر مصارف	۴۰۰	۱۰	۱	۴۰۰۰
مجموع مصرف روزانه واحد(Wh)					۱۰۶۰۰

مدل نیروگاه فتوولتاییک

برای حل این بهینه‌سازی از قسمت کد نویسی در نرم افزار MATLAB استفاده شده و متغیرهای زاویه شیب، عرض، تعداد ردیف پنل الکتریکی و فاصله بین پنل‌های الکتریکی که در شکل ۱(۱) نشان داده شده، به دست آمده است.



شکل ۱) نمایی از پنل های خورشیدی و متغیرهای مربوط

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

در ابتدا، الگوریتم مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی تشریح می‌شود. این الگوریتم در سه مرحله به ترتیب بیان خواهد شد:

- مبانی انرژی خورشیدی
- محاسبه تابش خورشید بر روی سطح افقی
- محاسبه میزان تابش روی سطح شیب‌دار

مبانی انرژی خورشیدی

مقدار متوسط تابش خورشید در واحد زمان به ازای واحد سطحی عمود بر راستای تابش در سطح خارجی جو زمین را ثابت خورشیدی می‌نامند و با G_{SC} نشان می‌دهند. مقدار اندازه‌گیری شده آن که مورد قبول اکثریت مجامع علمی جهان می‌باشد، معادل W/m^2 ۱۳۶۷ است. میزان تابش در سطح خارجی جو بر روی صفحه‌ای عمود بر راستای تابش را در هر روز سال می‌توان از رابطه (۱) محاسبه نمود[۱۰].

$$G_{on} = G_{sc}(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}) \qquad (۱)$$

که در آن G_{on} میزان تابش در سطح خارجی جو را بر روی صفحه‌ای عمود بر جهت تابش در روز nام سال نشان می‌دهد. n=۱ روز اول ژانویه و n=۳۶۵ ، روز سی‌و یکم دسامبر می‌باشد.

δ موقعیت زاویه خورشید در ظهر خورشیدی نسبت به صفحه استوا می‌باشد که از رابطه (۲) به دست می‌آید. زاویه انحراف خورشید در طول سال از ۲۳/۴۵+ درجه تا ۲۳/۴۵- درجه تغییر می‌کند.

$$\delta = 23.45\sin(360\frac{284+n}{365}) \qquad (۲)$$

زاویه بین راستای تابش مستقیم خورشیدی و راستای عمود بر صفحه افق زاویه زنیت (θ_z) می‌باشد. زاویه بین راستای تابش مستقیم خورشیدی و راستای افق زاویه ارتفاع خورشید (α_s) است که متمم زاویه زنیت است. زاویه شیب عبارت از زاویه بین سطح صفحه مورد نظر و سطح افق زاویه شیب صفحه (β) می‌باشد. زاویه سمت صفحه یا آزیموث(γ) عبارت از انحراف تصویر عمود بر صفحه در یک سطح افقی با نصف‌النهار محلی می‌باشد. فاصله زاویه‌ای تصویر تابش مستقیم بر روی یک صفحه افقی نسبت به امتداد جنوب در آن صفحه زاویه سمت خورشید(γ_s) می‌باشد. در شکل ۲) زوایای مختلف بخوبی نشان داده شده است.

زاویه برخورد تابش مستقیم را برای هر صفحه تخت با هر زاویه شیب و زاویه سمت در هر نقطه از کره زمین، در هر روز و زمانی می‌توان از رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$\cos\theta_Z = \sin\delta\sin(\phi-\beta) + \cos\delta\cos(\phi-\beta)\cos\omega \qquad (۳)$$

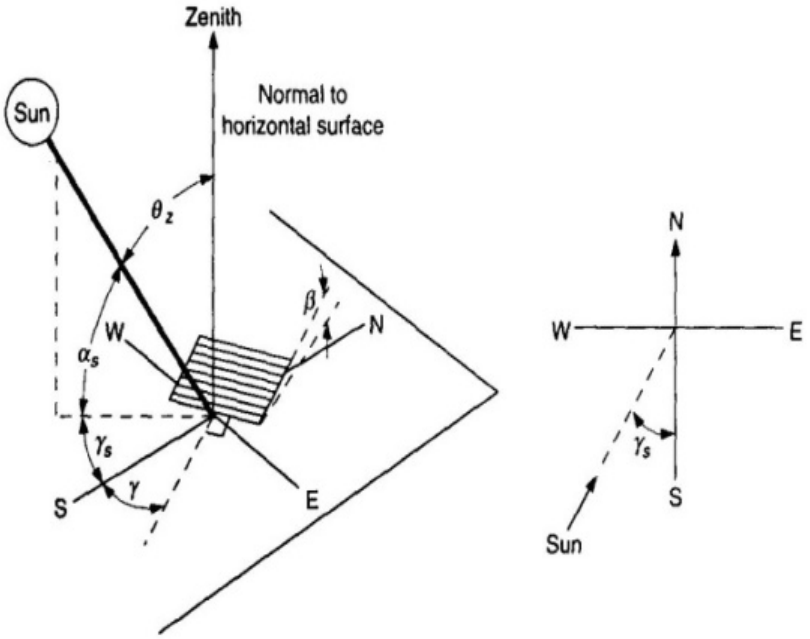
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

که در آن ω از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد که t زمان خورشیدی می‌باشد و ϕ عرض جغرافیایی می‌باشد.

$$\omega=15(t-12) \quad (۴)$$

هنگام طلوع و غروب، خورشید نسبت به افقِ یک نقطه یا نسبت به یک صفحه افقی در سطح زمین $\alpha=0$ یا $\theta_z=90^o$ می‌باشد. با توجه به این نکته و با استفاده از رابطه (۳)، زوایای ساعت طلوع و غروب خورشید ω_s را برای صفحات با شیب β که کاملاً به سمت جنوب می‌باشند می‌توان مطابق رابطه (۵) محاسبه نمود:

$$\omega_s = \pm\frac{1}{15}A\ \mathrm{rccos}(-\tan\delta\tan(\phi-\beta)) \quad (۵)$$



شکل ۲) نمایش زوایای مختلف

محاسبه تابش خورشید بر روی سطح افقی

میزان تابش در سطح خارجی جو به مقدار بسیار ناچیزی در طول سال تغیر می‌کند، در حالی که میزان تابش در روی زمین بستگی به عوامل متعدد جوی دارد. با استفاده از رابطه (۶) می‌توان میزان تابش انرژی خورشیدی بر روی یک

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

صفحه در سطح خارجی جو(G_o) را در هر لحظه به دست آورد:

$$G_O = G_{sc}[1+0.033\cos(\frac{360n}{365})]\cos\theta \qquad (۶)$$

برای محاسبه و تخمین مقدار تابش خورشیدی در طول روز در روی زمین مقدار انتگرال‌گیری شده تابش خورشیدی بر روی یک صفحه افقی در صورت فقدان جو یعنی H_0 مورد نیاز می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه (۶) و با استفاده از رابطه (۳) اگر G_{sc} بر حسب W/m^2 باشد، می‌توان H_o را به صورت رابطه (۷) بر حسب MJ/m^2 به دست آورد [۱۰]:

$$H_O = \frac{86400}{\pi} G_{sc}\left[1+0.033\cos(\frac{360n}{365})\right]\times\left[\cos\phi\cos\delta\sin\omega_S + \frac{2\pi\omega_S}{360}\sin\phi\sin\delta\right] \qquad (۷)$$

چنانچه مقدار تابش سطح خارجی جو برروی یک صفحه افقی به مدت یک ساعت محاسبه شود، باید از رابطه (۷) در یک فاصله زمانی یک ساعته که به وسیله زوایای ساعتی ω_1 وω_2 مشخص می‌گردد ($\omega_1 < \omega_2$) انتگرال‌گیری نمود که در نتیجه، رابطه (۸) به دست می‌آید [۱۰]:

$$I_0 = \frac{12\times3600}{\pi} G_{sc}\left[1+0.033\cos(\frac{360n}{365})\right]\times\left[\cos\phi\cos\delta(\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2-\omega_1)}{360}\sin\phi\sin\delta\right] \qquad (۸)$$

به نسبت تابش خورشید بر روی سطح زمین به تابش بیرون جو، شاخص وضوح یا ضریب صافی هوا می‌گویند که از رابطه(۹) محاسبه می‌شود.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \qquad (۹)$$

که H تابش روزانه روی سطح افق برای یک روز خاص و H_0 تابش روزانه خارج اتمسفر روی سطح افق برای همان روز می‌باشد. همچنین ضریب صافی(شاخص وضوح) ساعتی هوا k_T به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌گردد:

$$k_T = \frac{I}{I_0} \qquad (۱۰)$$

که I تابش ساعتی روی سطح افق برای یک روز خاص و I_0 تابش ساعتی خارج اتمسفر روی سطح افق برای همان روز می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

محاسبه میزان تابش روی سطح شیب‌دار

در این قسمت، روش‌هایی برای تقریب میزان تابش مستقیم و پراکنده از کل تابش افق بیـان مـی‌شـود. روش معمـول همبسته کردن I_d/I (نسبتی از تابش ساعتی روی سطح افق که پراکنده شده است) بـه k_T (شـاخص وضـوح یـا ضـریب صافی هوا) می‌باشد. در رابطه (۱۱) همبستگی" اربز" آمده است [۱۰].

$$\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}} = \begin{cases} 1.391 - 3.650\bar{K}_t + 4.189\bar{K}_t^{\,2} - 2.173\bar{K}_t^{\,3} & if \quad \omega_S < 81.4 \\ 1.311 - 3.022\bar{K}_t + 3.427\bar{K}_t^{\,2} - 1.821\bar{K}_t^{\,3} & if \quad \omega_S > 81.4 \end{cases} \tag{۱۱}$$

در این محدوده، استفاده از ضریب پراکندگی ۰/۱۶۵ پیشنهاد می‌گردد.

مطالعات آماری بر روی توزیع زمانی تابش کلی بر روی سطح افق، با استفاده از داده‌های ماهانه در سایت‌های مختلف، منجر به نمودارهایی برای r_t،نسبت تابش کلی ساعتی به تابش کلی روزانه، به صورت تـابعی از طـول روز و سـاعت مـورد مطالعه به صورت رابطه (۱۲) شده است:

$$r_t = \frac{I}{H} \tag{۱۲}$$

نمودارهای بدست آمده برای r_t توسط سولارس [۱۴] ، به صورت رابطه (۱۳) بیان گردید:

$$\begin{aligned} r_t &= \frac{\pi}{24}(a + b\cos\omega)\frac{\cos\omega - \cos\omega_S}{\sin\omega_S - \frac{\pi\omega_S}{180}\cos\omega_S} \\ a &= 0.4090 + 0.5016\sin(\omega_S - 60) \\ b &= 0.6609 - 0.4767\sin(\omega_S - 60) \end{aligned} \tag{۱۳}$$

همانند r_t نمودارهایr_d (نسبت تابش پراکنده ساعتی به تابش پراکنده روزانه) به صورت تابعی از زمان و طول روز به دست می‌آیند. [۱۴]

$$r_d = \frac{\pi}{24}\frac{\cos\omega - \cos\omega_S}{\sin\omega_S - \frac{\pi\omega_S}{180}\cos\omega_S} \tag{۱۴}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

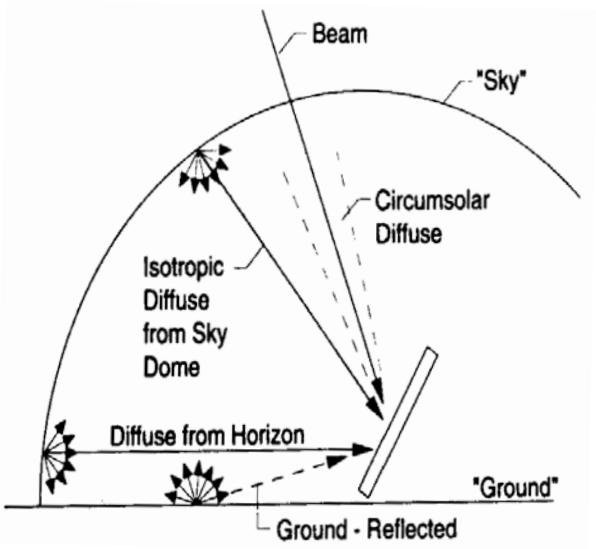
در این قسمت، در ابتدا به بررسی جهت هندسی تابش پراکنده، که خود تابعی از شرایط جـوی و ابـری بـودن هواسـت، پرداخته می‌شود. شکل بخوبی این تابش‌ها را نشان داده است. سپس جهت تابش مستقیم با استفاده از رابطه (۱۵) به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} I_b &= I - I_d \\ I &= r_t \bar{I} \\ I_d &= r_d \bar{I} \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

با مشخص شدن k_T و با استفاده از رابطه (۱۱)، مقدار I_b به دست خواهد آمد. تابش کلی روی سطح از مجمـوع تـابش مستقیم، سه قسمت تابش پراکنده از آسمان(ایزوتروپیک ، دورخورشید گردنده، درخـشش افقـی) وتـابش انعکـاس یافتـه از سطوح مختلف که بر روی سطح شیبدار دیده می‌شود، به دست می‌آید. تابش کلی در رابطه (۱۶) تعریف می‌گردد:

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl} \qquad (۱۶)$$

که در آن، اندیس‌های T، b، d، iso، cs، hz و refl به ترتیب مربوط به تابش‌های کلی، مستقیم، پراکنـده، ایزوتروپیـک، دور خورشید گردنده، درخشش افقی و انعکاسی هستند.



شکل ۳) تابش مستقیم و تابش‌های پراکنده

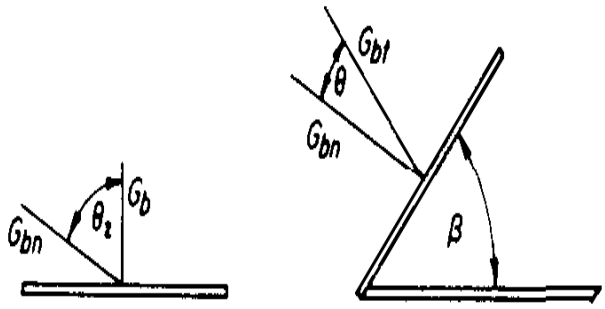
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

حال برای به دست آوردن تابش کل طبق رابطه (۱۶) باید از مدل‌های مطرح شده ایزوتروپیک، HDKR و مدل پرز انتخاب شود. از مدل پرز به علت پیچیدگی استفاده از آن صرف نظر می‌شود. مدل HDKR تقریباً همانند مدل ایزوتروپیک است و برای سطوح شیبدار مقابل استوا این روش پیشنهاد شده است. در این مقاله، از مدل ایزوتروپیک استفاده شده است که به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود:[۱۰]

$$I_T = I_b R_b + I_d\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + I\rho g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad (۱۷)$$

که برحسب Mj/m^2 می‌باشد. ضریب هندسی R_b ، نسبت تابش مستقیم روی سطح شیبدار به تابش مستقیم روی سطح افق می‌باشد که به طور دقیق به صورت (۱۸) بیان می‌شود. در شکل (۴) زاویه تابش مستقیم روی سطح افق و شیب دار بوضوح نشان داده شده است:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n}\cos\theta}{G_{b,n}\cos\theta_Z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_Z} \qquad (۱۸)$$



شکل ٤) زاویه تابش مستقیم روی سطح افق و شیبدار

از طرفی، زاویه بهینه آزیموث برای کلکتورهای با سطح صاف صفر درجه در نیمکره شمالی و ۱۸۰ درجه در نیمکره جنوبی است. بنابراین، با جایگزینی روابط [۱۳] ، ضریب هندسی Rb به صورت رابطه (۱۹) به دست می‌آید:

$$R_b = \frac{\cos\delta\cos(\phi-\beta)\sin\omega_S' + (\pi/180)\omega_S'\sin(\phi-\beta)\sin\delta}{\cos\delta\cos\phi\sin\omega_S + (\pi/180)\omega_S\sin\phi\sin\delta} \qquad (۱۹)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

که در آن، ω'_S به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود:

$$\omega'_S = \min\begin{bmatrix} arc\cos(-\tan\phi\tan\delta) \\ arc\cos(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta) \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

بنابراین، مقدار انرژی تابیده شده بر روی سطح کلکتور طی یک سال به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌گردد:

$$I_{T1}=\sum_{i=1}^{8760}\left(I_{bi}R_{bi}+I_{di}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)+I_i\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)\right) \quad (۲۱)$$

ρ_g نیز ضریب انعکاس زمین، β زاویه شیب پانل می‌باشند. همچنین اندیس i مربوط به ساعت iام محاسبه می‌باشد.

محاسبه میزان اثر سایه روی سطح شیب‌دار

در این بخش، قسمتی از آرایه فتوولتاییک که سایه افکنده شده، اثر آن سایه در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل ۱) مشخص است، روی ردیف اول سایه وجود ندارد. بنابراین، مقدار انرژی بدست آمده روی ردیف اول از رابطه (۲۱) به دست خواهد آمد. اما برای سایر ردیف‌ها به علت وجود سایه از رابطه (۲۲) استفاده می‌کنیم [۷].

$$I_{Tk} = \sum_{i=1}^{8760}[(1-l_{si}.h_{si})I_{bi}R_{bi} + I_{di}R_d^{sh}] \quad (۲۲)$$

که در آن، R_d^{sh} ضریب اصلاح برای تابش پراکنده روی کلکتورهایی است که سایه روی آنها وجود دارد و به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود [۲۲]:

$$R_d^{sh} = \cos^2\beta/2 - 1/2[(d^2+1)^{1/2} - d]\sin\beta \quad (۲۳)$$

همچنین h_{si} و l_{si} به ترتیب طول و عرض سایه روی سطح کلکتور هستند که به صورت روابط (۲۴) و (۲۵) تعریف می‌شوند:

$$l_{si} = 1 - \frac{d\sin\beta+\cos\beta}{l} \times \frac{|\sin\gamma_i|}{\cos\beta\tan\alpha_i + \sin\beta\cos\gamma_i} \quad (۲۴)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

$$h_{si} = 1 - \frac{d \sin\beta + \cos\beta}{\cos\beta + [\sin\beta \cos\gamma_i / \tan\alpha_i]} \quad (۲۵)$$

که در آن، d و l به ترتیب مقادیر نرمالیزه شده فاصله دو ردیف از هم و طول کلکتورها هستند که به صورت روابط (۲۶) و (۲۷) تعریف می‌شوند:

$$d = D / H \sin\beta \quad (۲۶)$$

$$l = L / H \sin\beta \quad (۲۷)$$

و α_i زاویه ارتفاع خورشید است که به صورت رابطه (۲۸) تعریف می‌شود:

$$\alpha_i = \arcsin(\cos\phi \cos\delta_i \cos\omega_i + \sin\phi \sin\delta_i) \quad (۲۸)$$

مقدار کل انرژی تابیده شده روی آرایه‌های فتوولتاییک در یک مزرعه از مجموع انرژی تابیده شده روی ردیف اول و سایر ردیف‌ها به صورت رابطه (۲۹) تعریف می‌شود.

$$I_t = I_{T1} + I_{Tk} \quad (۲۹)$$

مدل آرایه فتوولتاییک

مدل آرایه فتوولتاییک براساس فعالیت‌های «اوانز» است[۱۱] و برای بیشتر آرایه‌های فتوولتاییک رایج می‌باشد. یک آرایه به وسیله بازده میانگین (η_p) مشخص می‌گردد که از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود و تابعی از دمای ماژول (Tc) می‌باشد:

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_c - T_r)] \quad (۳۰)$$

که در آن η_r ، بازده ماژول فتوولتاییک در دمای مرجع ($T_r=25^0c$) و β_p، ضریب دما برای بازده ماژول می‌باشد. T_c به وسیله فرمول اوانز به متوسط دمای ماهانه محیط مربوط می‌شود و از رابطه (۳۱) به دست می‌آید:

$$T_c - T_a = (219 + 832\bar{K}_T) \frac{NOCT - 20}{800} \quad (۳۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

که NOCT ، دمای نامی عملیاتی سلول و $\overline{K}_T$، شاخص وضوح ماهانه هستند. همچنین NOCT و β_p و η_r، بسته به نوع پنل فتوولتاییک در نظر گرفته می‌شوند. این مقادیر توسط کاربر وارد می‌شوند و برای فناوری‌های استاندارد، به صورت مقادیر تقریبی داده شده در جدول ۲) هستند. [۱۹]

جدول ۲) مشخصات پنل فتوولتاییک برای فناوری استاندارد

PV module type	η_r (%)	NOCT(^{0}c)	P(%/ ^{0}c)β
Mono-Si	14	45	0.4
Poly-Si	14	45	0.4
a-Si	7	50	0.11
CdTe	9	46	0.24
CIS	9.5	47	0.46

رابطه فوق برای حالت بهینه زاویه شیب آرایه (برابر است با عرض جغرافیایی منهای زاویه انحراف خورشیدی) صادق است. اگر این زاویه از حالت بهینه خود جابجا شود، طرف راست رابطه (۳۱) باید در ضریب اصلاح C_f که به صورت (۳۲) تعریف می‌شود، ضرب گردد:

$$C_f = 1 - 1.17\times10^{-4}\left(S_M - \beta\right)^2 \qquad (۳۲)$$

که در آن، S_M زاویه شیب بهینه و β زاویه شیب واقعی می‌باشد و هر دو بر حسب زاویه هستند. انرژی تحویلی توسط آرایه فتوولتاییک از رابطه (۳۳) به دست می‌آید:

$$E_p = S\eta_p I_t \qquad (۳۳)$$

که در آن، S مساحت آرایه بر حسب متر مربع می‌باشد.

مدل متصل به شبکه ساده‌ترین مدل می‌باشد. در حالت خاص بدون بار سیستم مدل می‌گردد. اندازه اینورتر نیز بسادگی برابر با توان نامی آرایه پیشنهاد می‌گردد. انرژی در دسترس برای شبکه میزانی است که آرایه تولید کرده و باید تلفات اینورتر از آن کاسته شود که در رابطه (۳۴) نشان داده شده است:

$$E_{grid} = E_p \eta_{inv} \qquad (۳۴)$$

که در آن، η_{inv} بازده اینورتر است. بنابراین، انرژی کل الکتریکی تحویلی به شبکه توسط پانل‌های PV طی یک روز

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

از رابطه (۳۵) قابل محاسبه است:

$$E_{grid} = S\eta_{inv} I_t \eta_p \tag{۳۵}$$

I_t میزان کل تابش بر سطح در زمان t برحسب MJ/m^2h می‌باشد. انرژی بدست آمده نیز برحسب مگـاژول(MJ) خواهـد بود.

بهینه‌سازی تابع هدف

در این بررسی، سعی بر این است که تابع هدف پیشنهادی بهینه شود. تابع هدف مورد نظـر مـساحت زمـین اسـت کـه متغیرهای مسأله بهینه‌سازی را برای به دست آوردن مساحت کمینه به دست خواهد آورد.

تابع هدف مساحت زمین

در این بخش، تابع هدف مورد استفاده برای تعیین حداقل مساحت زمین برای به دست آوردن انرژی داده شده از مزرعه با استفاده از فرمولاسیون ساعتی و در نظر گرفتن اثر سایه پنل های خورشیدی به دست می آید. در این بهینه سازی از نرم افزار MATLAB استفاده شده و متغیر های ارتفاع کلکتور (H)، تعداد ردیف پنل‌ها (K) ، فاصله بین پنل ها (D)، طول زمین (L)، عرض زمین (W)، زاویه شیب پنل (β) و بازده سلول‌های فتوولتاییک (η) کـه در شـکل ۱) نـشان داده شـده، بهینه خواهند شد. تابع هدف مورد استفاده در این مقاله در رابطه (۳۶) آورده شـده کـه بیـانگر بـه دسـت آوردن متغیرهـای مذکور در ازای کمینه کردن مساحت می باشد.

$$\text{Minimize } L \times W$$

مشروط به قیود زیر:

$$\text{Subject to:}\quad \begin{cases} (K-1)\times D + K \times H \cos\beta \le W \\ D \ge D_{min} \\ H \le H_{max} \\ 2 \le k \in /N \\ 0^o \le \beta \le 90^o \\ 5\% \le \eta_r \le 14\% \\ E \ge E_{min} \\ L \le L_{max} \\ W \le W_{max} \\ a_1 \le W/L \le a_2 \end{cases} \tag{۳۶}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

در رابطه (۳۶)، D فاصله پنل‌های الکتریکی بر حسب متر، K تعداد ردیف پنل های الکتریکی، β زاویه شیب پنل الکتریکی بر حسب درجه و H عرض پنل‌های الکتریکی بر حسب متر می باشد.

البته این بهینه‌سازی می‌بایست مشروط به قیودی انجام شود. اولین قید مربوط به این است که چیدمان و ابعاد و زاویه پنل‌ها طوری انتخاب شوند که از پهنای زمین (W) بیشتر نشوند. دومین قید روی D مربوط به تعیین حداقل فاصله بین ردیف‌هاست که نباید از یک مقداری که مربوط به امور نگهداری است، کمتر گردد. قید مربوط به تعداد ردیف‌ها (K) نیز به این منظور است که تعداد ردیف ها بیشتر از ۱ شود. چون روند بهینه‌سازی به این ترتیب خواهد بود که برای حذف اثر سایه ردیف‌های جلویی تنها یک ردیف را به عنوان تعداد ردیف بهینه انتخاب خواهد کرد. . قید مربوط به زاویه شیب پنل‌ها (β) به این منظور است که شیب پنل در صورتی که بیش از ۹۰ درجه شود، سلول‌های پنل به سمت زمین خواهند شد. سایر قیود مربوط به ابعاد و بازده کلکتورهای موجود خواهند بود.

قید E مربوط به حداقل انرژی سالانه مورد نیاز برای واحد مسکونی می‌باشد که در بخش ۲ به دست آمد. دو قید L و W مربوط به حداکثر زمین موجود می‌باشد. در نهایت، قید آخر مربوط به ایجاد یک زمین با طول و عرض استاندارد خواهد بود، یعنی نسبت عرض به طول زمین درون بازه مشخصی بین a_1 و a_2 قرار داشته باشد.

الگوریتم بهینه سازی SA

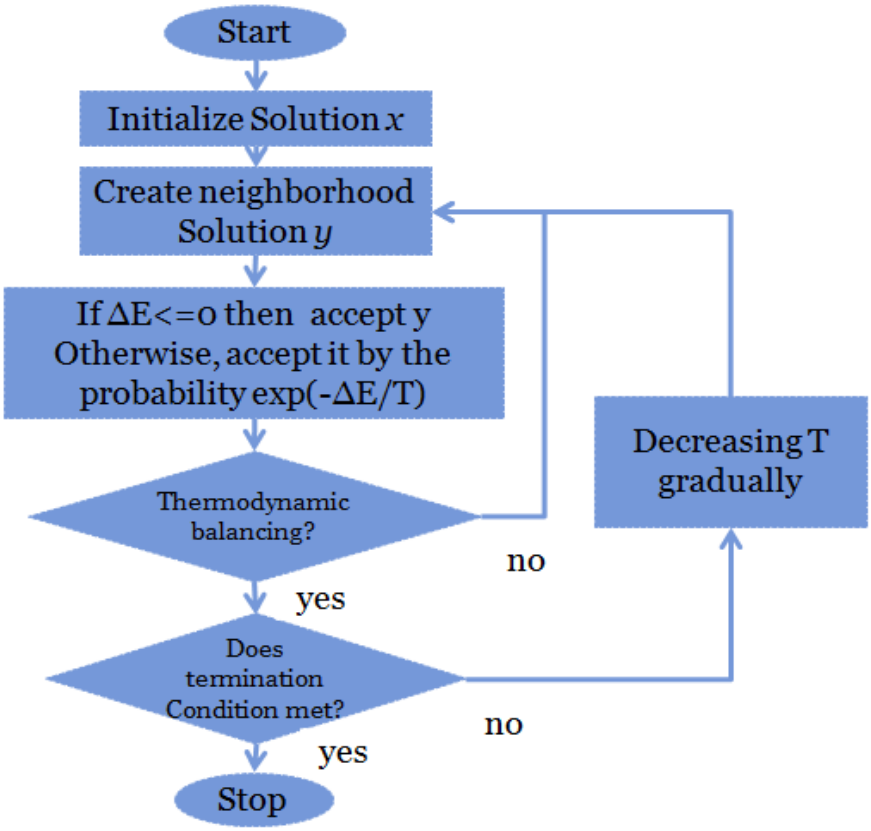
الگوریتم تبرید شبیه سازی شده یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی است. منشأ این الگوریتم (آبکاری فولاد و یا تبرید شبیه‌سازی شده)، کارهای کریک پاتریک و کرنی و همکارانشان در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ است. کریک پاتریک و همکارانش، متخصصانی در زمینه فیزیک آماری بودند که برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی پیشنهاد نمودند . در این قسمت الگوریتم سرد شدن تدیجی فلزات مورد استفاده در این مقاله برای طراحی بهینه مزرعه خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی ارائه می‌شود.[۵]

مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی به این صورت می‌باشد که در ابتدا دریافت اطلاعات مربوط به پارامترهای سیستم میزان حداقل و حداکثر هر متغیر بهینه‌سازی که در رابطه (۳۶) مشخص است، صورت می‌گیرد. در گام بعد، اطلاعات و پارامترهای کنترلی مربوط به پیاده سازی الگوریتم بهینه‌سازی از قبیل حالت اولیه متغیرها، تعداد تولید حالت جدید در هر دما، دمای ذوب اولیه و برنامه زمانی کاهش دما (ضریب تدریجی دمای ذوب مذاب) مشخص می‌شود. دمای اولیه فلز مذاب برابر ۸۰۰ درجه، تعداد تولید حالت جدید در هر مرحله از برنامه زمانی دما ۴۰۰ دفعه و ضریب کاهش تدریجی دمای فلز مذاب برابر ۰/۹ تنظیم می‌شود. در این مرحله، یک حالت اولیه تصادفی تولید می‌شود.

در مرحله بعد، تولید یک حالت تصادفی جدید از متغیرهای بهینه‌سازی در همسایگی حالت قبلی صورت می‌گیرد. پس

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

از تعداد مشخصی تکرار در هر دما و حرکت تدریجی به سمت مقدار بهینه، دما با ضریب بیان شده کاهش یافته و مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل الگوریتم تکرار شده است.



شکل ۵) الگوریتم بهینه سازی سرد شدن فلزات (SA)

برای حل یک مسأله بهینه‌سازی، الگوریتم SA ابتدا از یک جواب اولیه شروع می‌کند و سپس در یک حلقه تکرار به جواب‌های همسایه حرکت می‌کند. اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، الگوریتم آن را به عنوان جواب فعلی قرار می‌دهد (به آن حرکت می‌کند)، در غیر این صورت، الگوریتم آن جواب را با احتمال $\exp(-\Delta E/T)$ به عنوان جواب فعلی می‌پذیرد. در این رابطه، ΔE تفاوت بین تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه‌است و T یک پارامتر به نام دماست. در هر دما، چندین تکرار اجرا می‌شود و سپس دما به آرامی کاهش داده می‌شود. در گام‌های اولیه، دما خیلی بالا قرار داده می‌شود تا احتمال بیشتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود داشته باشد. با کاهش تدریجی دما، در گام‌های پایانی، احتمال کمتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود خواهد داشت و بنابراین، الگوریتم به سمت یک جواب خوب همگرا می‌شود. [۵]

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

بهینه سازی تابع مورد مطالعه

در این قسمت، تابع هدف معرفی شده (رابطه ۳۶) برای شهر تهران با موقعیت جغرافیای ۳۲/۵'N و ۵۱,۷'E و ارتفاع ۱۵۵۰ متر از سطح دریا انجام داده می شود [6] . زمین مورد نظر در این بهینه‌سازی ابعاد بیشینه برابر با Wmax=۱۰m و Lmax=۲۰m دارد. در ضمن، حداقل انرژی موردنیاز سالانه (E_{min}) برابر ۴ مگاوات ساعت می‌باشد. مقادیر H_{max}=1m و d_{min}=1m در نظر گرفته شده است. دمای هوا و شاخص وضوح از[۶] و [۲] به دست خواهند آمد. همچنین a_1, a_2 نیز به ترتیب ۱ و ۰/۳ هستند. جدول (۳) مشخصات ماژول و اینورتر استفاده شده در مسأله را نشان می‌دهد.

جدول ۳) مشخصات ماژول و اینورتر

شرح	وضعیت	واحد
نوع سلول فتولتاییک	پلی کریستالین سیلیکون	-
سازنده	SUNTECH	-
مدل	poly-Si - STP240 -	-
بازده سلول	۱۴	٪
NOCT	۴۵	^{O}C
β_P	۰/۴	$\%/^{O}C$
آزیموث	۰	درجه
نوع پایه	ثابت	-
بازده اینورتر	۹۵	٪

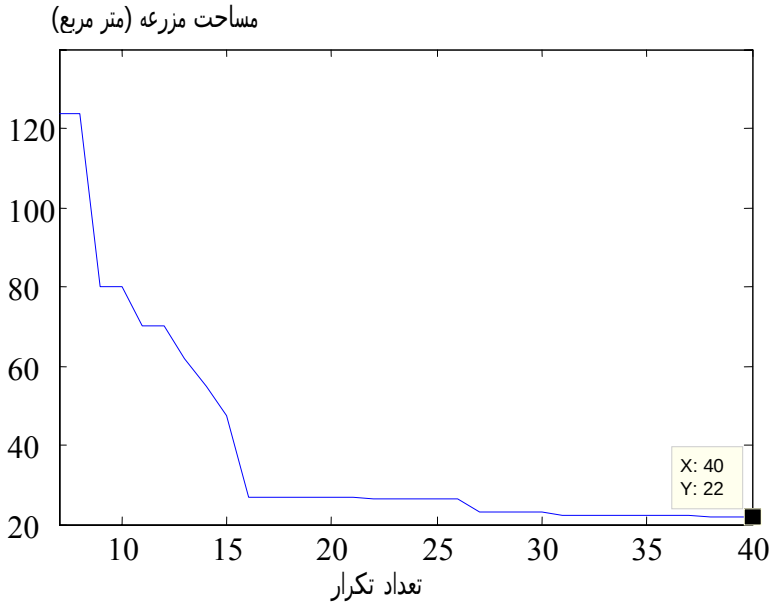
جدول (۴) نتایج اجرای برنامه بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، به ازای بازده ۱۴٪ پنل‌های خورشیدی و بیشترین ارتفاع پنل‌ها، مقدار انرژی بهینه و متغیرهای طراحی پنل به دست آمده است. در ضمن، کمترین فاصله بین ردیف‌ها به منظور قرار دادن تعداد ردیف بیشتر در مزرعه انتخاب گردید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

جدول ٤) نتایج حاصل از اجرای برنامه بهینه‌سازی

D(m)	K	β (degrees)	H(m)	η_r (%)	L(m)	W(m)	E_{min} (MWh)	Solar Field Area (m^2)
1	3	31.1	1	14	4.8	4.6	4	22

در شکل (۶) سرعت همگرایی الگوریتم سرد شدن تدریجی فلزات به بهینه‌ترین جواب برای این تابع هـدف نـشان داده شده است.



شکل ٦) روند بهینه سازی تابع هدف مساحت با استفاده از الگوریتم SA

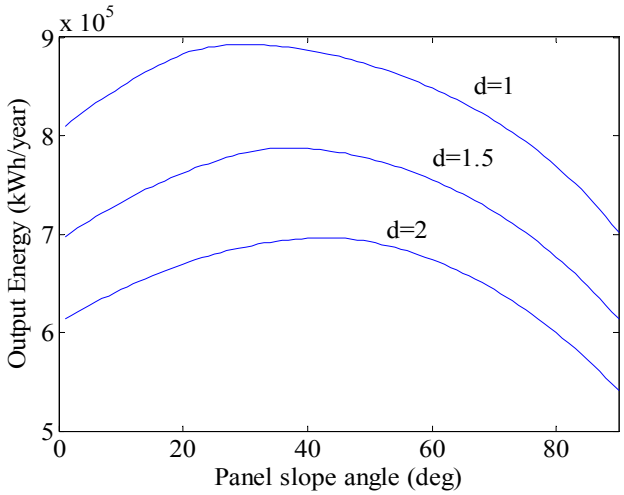
تجزیه و تحلیل حساسیت نسبت به آرایش پنل‌های خورشیدی

در این قسمت، میزان حساسیت انرژی خروجی نیروگاه خورشیدی به ازای زاویه شیب پنل‌های خورشیدی β و فاصـله بین ردیف‌ها d در دو شکل (۷) و (۸) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شـود، بـه ازای β=۳۱ و d =۱ میـزان انـرژی خروجـی نیروگـاه خورشـیدی بهینـه می‌باشد. لازم به ذکر است که در این مسأله $d_{min} = 1$ m در نظر گرفته شده که این فاصله برای انجام امـور تعمیـرات و

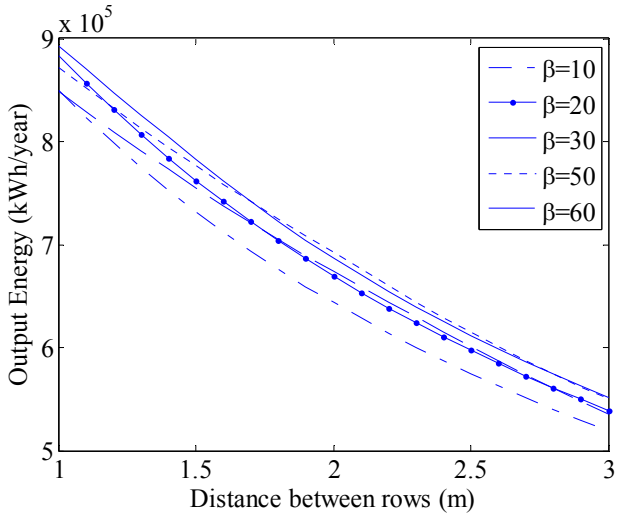
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

نگهداری پنل‌های الکتریکی معمولاً در نظر گرفته می‌شود. به همین علت، نمودارها برای فواصل کمتر از ۱ متر آورده نشده است.



شکل ۷) حساسیت انرژی خروجی نیروگاه خورشیدی به شیب پنل

در این نقطه، انرژی بهینه‌ترین مقدار را داشته که همان خروجی بهینه‌سازی مورد استفاده می‌باشد. با توجه به حداقل فاصله در نظر گرفته شده برای این مسأله، طبیعی است که فاصله بین پنل‌ها را به کمترین حد ممکن کاهش داده و در ازای آن تعداد پنل‌های الکتریکی را افزایش داد.



شکل ۸) حساسیت انرژی خروجی نیروگاه خورشیدی به فاصله بین پنل

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

در شکل (۸) مشاهده می‌شود که به ازای دامنه تغییرات d ، مقدار انرژی خروجی نیروگاه خورشیدی به چه صورت تغییر می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، در برخی نقاط به ازای فاصله بین پنل‌های الکتریکی در زاویه شیب‌های مختلف میزان سطح انرژی خروجی به صورت نامنظم تغییر می‌کند که به دلیل تغییر تعداد ردیف پنل‌های الکتریکی (K) می‌باشد.

نتیجه گیری

در این بررسی، کمترین مساحت لازم برای تأمین انرژی الکتریکی یک واحد مسکونی با توان مصرفی مشخص در شهر تهران از طریق پنل‌های فتوولتائیک و همچنین انرژی سالانه با استفاده از مجموع تابش ساعتی خورشید و در نظر گرفتن اثر سایه متقابل پنل‌ها روی یکدیگر به دست آمد. با توجه به ماهیت غیرخطی تابع هدف و قیود آن و همچنین حجم بالای محاسبات، نتایج حاکی از سرعت بالای همگرایی پاسخ در الگوریتم بهینه سازی SA بود. در نهایت، حالت بهینه چیدمان به صورت ۳ ردیف با زاویه شیب بهینه ۳۱ درجه استخراج شد. در این شرایط، مساحت لازم برای احداث سیستم فتوولتاییک بدون در نظر گرفتن اتاق باتری‌خانه و اینورتر برابر ۲۲ متر مربع به دست آمد. لذا برای یک ساختمان با ۸ واحد مسکونی، مساحتی در حدود ۱۸۰ متر مربع پشت بام به صورت خالص لازم می‌باشد. با توجه به معدود بودن ساختمان‌هایی با چنین فضایی، امکان نصب این سیستم در بافت متراکم شهری با فناوری کنونی امری بعید به نظر می‌رسد. با توجه به بررسی بعمل آمده، سیستم‌های برق خورشیدی صرفاً برای منازل مسکونی ویلایی یا به عبارتی تک واحدی قابل نصب و راه‌اندازی خواهد بود.

منابع

[۱] بهادری نژاد م. ، فرهمند ب. ، " طراحی و بررسی اقتصادی سیستم برق خورشیدی برای یک ساختمان اداری در تهران"، بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق ، تهران۱۳۸۵.

[۲] بهادری نژاد مهدی ، و میر حسینی عباس ، "ضریب صافی هوا برای شهر های مختلف ایران " ، سومین کنفرانس مصرف سوخت در ساختمان ، تهران ، صفحه ۶۰۳ تا ۶۱۹ . بهمن ۱۳۸۲.

[۳] شمس م. ح. ، کیا م. و همکاران، "بهینه سازیِ تولید در نیروگاه فتوولتاییک متصل به شبکه با کلکتورهای ثابت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)"، بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۹۰.

[۴] گلکار م. ، مدرسی ج. ، "تعیین زاویه‌ی بهینه‌ی پنل‌های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین تابش در شبکه‌های توزیع انرژی در شهرهای مختلف ایران"، هفدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع، تهران، ۱۳۹۱.

[۵] یقینی مسعود ، اخوان کاظم زاده محمد رحیم الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری/تالیف .جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]

[6] Available on http://eosweb.larc.nasa.gov/.

[7] Bany, J., and Appelbaum, J., 1987, ‘‘The Effect of Shading on the Design of aField of Solar Collectors,’’ Sol. Cells, 20, pp. 201–228.

[8] Barra, O., Conti, M., Santamata, E., Scarmozzino, O., and Visentin, R., 1977, ‘‘Shadow Effect in Large Solar Collectors in Large Scale Solar Power Plants,’’ Sol. Energy, 19, pp. 759–762.

[9] Collares-Pereira, M. and A. Rabl, “the average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insulation values”, solar energy, 22,page 155, 1979.

[10] Duffie J.A, and W.A, Beckman, "Solar engineering of thermal processes", John Wiley &Sons, Inc., New York, second edition, 1991.

[11] Evans, D.L., ‘simplified method for predicting photovoltaic array output’, solar energy 27, pages 555-560, 1981.

[12] Kornelakis A., Y. Marinakis, “Contribution for optimal sizing of grid-connected PV-systems using PSO”, Renewable Energy, Vol. 35, pp. 1333–1341, 2010.

[13] Gopinathan, K., 1991, ‘‘Optimization of the Angle of Solar Collectors for Maximum Irradiation on Sloping Surfaces,’’ Int. J. Sol. Energy, 10, pp. 51–61.

[14] Liu, R. Jordan, “ the interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, solar energy, 4,page 1 ,1960.

[15] Mellit A., A. Kalogirou, ’ artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review’ progress in energy and combustion science 34 pages 574–632, 2008.

[16] Mellit A., A. Kalogirou, L. Hontoria, S. Shaari, ’ Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems: A review’ Rrenewable and sustainable energy reviews 13 , pages 406–419, 2009.

[17] Mnassri M., A. St. Leger, ’ Stand Alone photovoltaic solar power generation system: A case study for a remote location in tunisia’ power and energy society general meeting, 2010 IEEE, pages 1 - 4, 2010.

[18] Phyo Naing L. , D. Srinivasan.’ estimation of solar power generating capacity’ probabilistic methods applied to power systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th international conference on, pages 95 - 100, 2010.

[19] pvsyst user guide available at http://www.pvsyst.com/.

[20] RETScreen user guide available at http://www.retscreen.com/.

[21] Shi Y. and R.C. Eberhart, ’Empirical study of particle swarm optimization’, in proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation (CEC), pages 1945-1950, 1999.

[22] Weinstock, D., and Appelbaum, J., 2004, “Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors,” ASME J. Sol. Energy Eng., 126, pp. 898–905.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-10-25]