تعیین زاویه شیب بهینه آرایه‌های خوشیدی در شرایط اقلیمی کرج

الهه بهرامی*[۱] ، کمال عباسپور ثانی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۱/۲/۲
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۱/۴/۲۵

چکیده:

آرایه‌های خورشیدی یکی از نوید بخش‌ترین فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر در تامین انرژی ساختمان‌های آینده می‌باشد.در نصب پنل‌های خورشیدی روی بام ساختمان‌ها، دانستن زاویه شیب بهینه به منظور داشتن بیشترین انرژی سالانه یا فصلی حائز اهمیت می‌باشد. در حقیقت، تغییرات زاویه شیب در مقدار تابش خورشیدی که به سطح پنل‌ها می‌رسد، موثراست. در این مطالعه از یک مدل ریاضی و سال نمونه هواشناسی(داده‌های تابش به مدت ۱۲ سال(۲۰۰۵-۱۹۹۴) روی سطوح افقی در کرج)برای محاسبه تابش خورشیدی کل روی سطوح شیبدار به منظور تعیین زاویه شیب مناسب برای آرایه های خورشیدی استفاده شده‌است. بهترین جهت برای آرایه‌های خورشیدی در کرج، به سمت جنوب می‌باشد. تغییرات زاویه شیب بهینه بین صفردرجه(می،ژوئن،جولای و آگوست) تا ۶۹ درجه (ژانویه) است. در زمستان این زاویه(دسامبر،ژانویه،فوریه) ۶۵,۳۳ درجه، در بهار(مارس،آوریل،می) ۲۲ درجه، در تابستان (ژوئن، جولای، آگوست) صفر درجه و در پائیز(سپتامبر،اکتبر،نوامبر)۳۷,۳۳ درجه می‌باشد. زاویه شیب بهینه سالانه وابسته به عوامل متعددی از جمله عرض جغرافیایی منطقه و شرایط آب و هوایی است. به طور متوسط، این مقدار در سال ۳۱,۶۶ درجه می باشد که زاویه ثابت و مطلوب در سال است.

کلمات کلیدی:
انرژی تابشی، آرایه خورشیدی، زاویه شیب بهینه، سال مبنای هواشناسی، کرج(ایران)

*۱) کارشناس ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی کرج elahe.bahrami89@gmail.com
۲) عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان ـ استادیار گروه مکانیک

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

مقدمه

بیابان‌های بسیار خشک با پوشش ابری کم(ضریب شفافیت بالا)، بیشترین میزان تابش خورشید را دریافت می کنند. تابش در این مناطق در اکثر مواقع در روز بیش از ۶ $kwh/m^2.day$ می‌باشد. این رقم در مناطق شمالی‌تر نزدیک به ۶/۳ می‌باشد. در کشور ما بیشینه مقدار این عدد ۵,۵ و در سطح کره زمین حدود ۷ می‌باشد. ایران از نظر میزان دریافت تابش خورشیدی در شمار بهترین کشورها قرار دارد. در اکثر نقاط کشور به خاطر شرایط اقلیمی خشک و هوای صاف و بدون آب، میزان دریافت تابش نسبتاً بالاست. از جمله سامانه‌هایی که می‌توان برای این منظور استفاده‌کرد، پنل‌های فتوولتائیک و کلکتورهای خورشیدی می‌باشد. آنچه در طراحی این سامانه‌ها اهمیت دارد، جذب هرچه بهتر تابش خورشیدی است. با توجه به اینکه بیشترین میزان تابش خورشیدی مستقیم روی سطح عمود بر جهت تابش خورشیدی می‌باشد، لذا برای دریافت بیشترین مقدار انرژی باید سطح صاف تقریباً عمود بر جهت تابش قرار گیرد. این امر با استفاده از ردیاب‌های مسیر خورشیدی میسر می‌باشد ولی به علت هزینه‌های بالای ساخت این تجهیزات می توان از تنظیم روزانه و ماهانه پنل‌های خورشیدی استفاده‌کرد. برخی از محققان الگوهای تجربی متفاوتی از زاویه پنل‌ها نسبت به سطح افق را بیان کرده‌اند. برای مثال Hottle [4] زاویه‌ی $\beta = \Phi+20$ را بیان‌کرد که Φ عرض جغرافیایی محل می‌باشد. Heywood [5] زاویه را به صورت $\beta=\Phi-10$ بیان کرد. Yellot [6] محدوده $\beta \pm \Phi+20$ را با علامت منفی در تابستان و علامت مثبت در زمستان بیان کرد. Lunde [8] زاویه بهینه پنل ها را $\beta \pm \Phi+15$ و Duffie-Beckman این زاویه را به صورت $\beta = (\Phi \pm 15) \pm 15$ تخمین زدند. EL- Kassaby و hassab [3] یک الگوی نظری برای به دست‌آوردن زاویه شیب بهینه روزانه در هر عرض جغرافیایی را بیان‌کردند. Nijegorodor و همکارانش با استفاده از روش بهینه‌سازی ریاضی برای مناطق مختلف جهان و به منظور دریافت بیشینه انرژی تابشی پیشنهادی را ارائه دادند [9]. در پژوهش حاضر، الگوی ریاضی به منظور تعیین زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی نسبت به سطح افق در کرج مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به این نکته که پنل‌ها در نیمکره شمالی رو به جنوب قرار می‌گیرند و با در نظر گرفتن زاویه قرارگیری آنها از صفر تا ۹۰ درجه، تابش را در هر ماه و برای ۹۰ زاویه با گام ۱ درجه تخمین زده و در هر ماه زاویه‌ای که در آن بیشترین تابش دریافتی رخ می دهد به عنوان زاویه بهینه انتخاب می‌شود. در بخش دوم، الگوی ریاضی مورد استفاده Theilacker و Klein می‌باشد که به اختصار KT Method [8] بیان می‌شود.

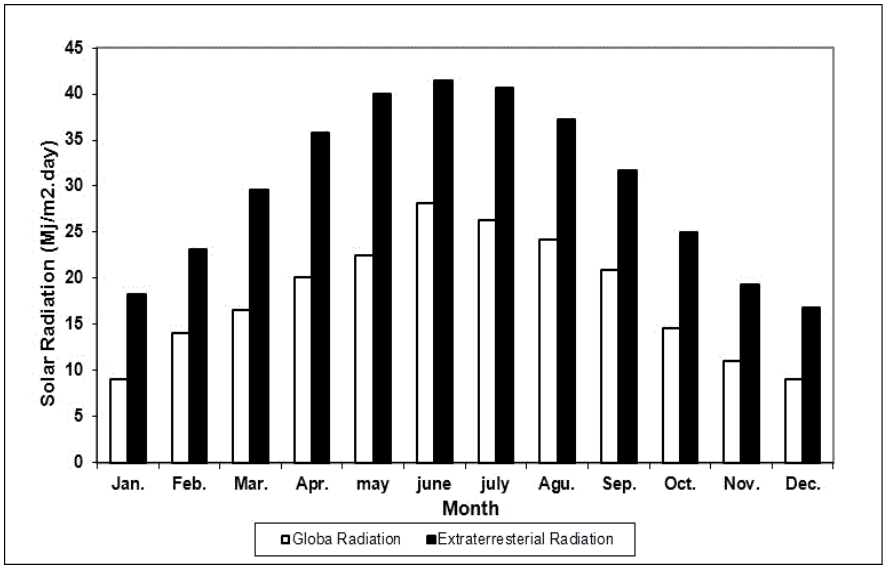
اندازه‌گیری داده های تابش

موقعیت قرار گیری شهر کرج در عرض جغرافیایی۳۵,۵۵ درجه شمالی و طول ۵۰,۵۴ درجه شرقی می‌باشد. شدت تابش خورشیدی متوسط روزانه بر روی سطوح افقی بالغ بر ۴/۳۶ $kwh/m^2.day$ است. طول ساعات آفتابی در آن از ۴,۷

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

ساعت در ماه‌های آذر و دی به ۱۲ ساعت در ماه‌های مرداد و شهریور می‌رسد. متوسط شدت تابش خورشیدی در سردترین ماه‌های سال(دی و بهمن) $kwh/m^2.day$ ۱,۴۵ تا $kwh/m^2.day$ ۷/۳در ماه‌های تیر و مرداد می‌رسد. متوسط سالانه شدت تابش کلی خورشید در کرج بالغ بر $1۶\ kwh/m^2.year$ می‌باشد. به منظور تخمین تابش کل بر روی پنل‌های خورشیدی به اطلاعات تابش محل نیاز است. برای این منظور از اطلاعات تابش شهرکرج که در سایت پژوهشگاه مواد و انرژی برای تمام مدت سال در یک دوره طولانی مدت، مابین سال‌های (۲۰۰۵-۱۹۹۴) اندازه‌گیری و ثبت شده‌است، استفاده می‌شود. در این سال‌ها تعیین انحراف از معیار استاندارد و توزیع فراوانی اطلاعات در دوره مورد مطالعه، شاخصی برای انتخاب ماه‌های تقویمی در سال نمونه هواشناسی(TMY)[1] است[1] . در حقیقت، این سال مبنا با توجه به تغییرات شرایط جوی در ایام مختلف سال به عنوان سال میانگین در دوره مورد مطالعه محسوب می‌شود.

TMY ۱۲ ماه دارد که از میان سال‌های مختلف مورد مطالعه به صورت انتخابی گزینش می‌شود و تشکیل یک سال کامل را می‌دهد. بعبارتی، می‌توان بیان کرد که TMY به صورت بانک اطلاعاتی شرایط اقلیمی در طی یکسال تعریف می‌شود. سالی که تقریباً تمام تغییرات جوی را در بر می‌گیرد به عنوان سال نمونه انتخاب می‌شود. با استفاده از اطلاعات سال مبنای هواشناسی در کرج، میانگین تابش مافوق زمینی روی سطوح افقی($\bar{H}_o$) و میانگین تابش کل روی سطوح افقی($\bar{H}$) به صورت ماهانه به دست می‌آید(نمودار ۱).



شکل ۱): میانگین تابش مافوق زمینی و تابش کل روی سطوح افقی کرج

1) Typical Meteorology Year

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

در شکل ۱ با استفاده از اطلاعات TMY برای شهر کرج، مشاهده می‌شود که بیشترین تابش کل روی سطوح افق مربوط به ماه ژوئن با مقدار $Mj/m^2.year$ ۲۸,۱۴۳ می‌باشد.

تحلیل تجربی

اطلاعات میزان تابش خورشید در نقاط مختلف به صورت تابش کل روی یک سطح افقی معمولاً در دسترس می‌باشد و از الگوهای ریاضی ارائه شده و استفاده از داده‌های انرژی تابشی روی سطح افقی این انرژی برای سطوح شیب دار محاسبه می‌شود. تابش کل میانگین ماهانه روی سطوح شیبدار، برابر با مجموع مولفه‌های تابش مستقیم، تابش پراکنده و مولفه بازتابش زمینی است.

$$H_T = H_B + H_D + H_R \qquad (۱)$$

روش مورد استفاده در این پژوهش KT Method (۱۹۸۱) است. این روش به دو صورت ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک وجود دارد. در حالت ایزوتروپیک برای موقعیت قرار گیری پنل‌ها یک زاویه سمت ثابت در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، اگر محل انتخاب شده در عرض جغرافیایی شمالی کره زمین قرار داشته باشد، پنل‌ها رو به جنوب با زاویه سمت صفر (γ=۰) و اگر در عرض جغرافیایی جنوبی کره زمین واقع باشد، پنل‌ها به سمت شمال با زاویه سمت ۱۸۰ درجه (γ=۱۸۰) قرار می‌گیرند. حالت غیر ایزوتروپیک مدلی دیگر از KT Method می‌باشد که به ازای زوایای شیب مختلف پنل‌ها، زوایای سمت ممکن است تغییر کند. مقدار تابش میانگین ماهانه بر روی سطح شیبدار به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\overline{H_t} = \overline{R}.\overline{H} \qquad (۲)$$

$\overline{H_t}$ میانگین تابش کل تابیده شده به سطوح شیبدار ، $\overline{H}$ میانگین تابش کل تابیده شده به سطوح افقی (قابل حصول از TMY) و $\overline{R}$. نسبت مقدار متوسط تابش مستقیم روی سطوح شیبدار به مقدار متوسط تابش مستقیم روی سطوح افقی است که برای یک سطح با حالت ایزوتروپیک(γ=۰) با استفاده از KT Method به صورت زیر بیان می شود:

$$\overline{R} = \frac{\cos(\phi-\beta)}{d\cos\phi}\left[\begin{matrix}\left(a-\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}\right)\left(\sin\acute{\omega}_s - \frac{\pi\acute{\omega}_s}{180}\cos\omega''_s\right)+ \\ \frac{b}{2}\left(\frac{\pi\acute{\omega}_s}{180}+\sin\acute{\omega}_s\left(\cos\acute{\omega}_s - 2\cos\omega''_s\right)\right)\end{matrix}\right] + \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)+\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \qquad (۳)$$

در رابطه اخیر β زاویه شیب پنل‌ها، ρ_g ضریب انعکاس زمین(در ماه‌های ژانویه و فوریه ۰/۷ ، در ماه‌های مارس و دسامبر ۰/۴ و در بقیه ماه‌ها ۰/۲ در نظر گرفته شده‌است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

در رابطه (۳) ω_s زاویه ساعت در لحظه غروب آفتاب و متغیرهای a،b و d به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi)\tan(\delta)) \quad (۴)$$

$$\omega''_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi-\beta)\tan(\delta)) \quad (۵)$$

$$\acute{\omega}_s = min\begin{bmatrix}\omega_s \\ \omega''_s\end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$a = 0.409 + 0.5016\sin(\omega_s - 60) \quad (۷)$$

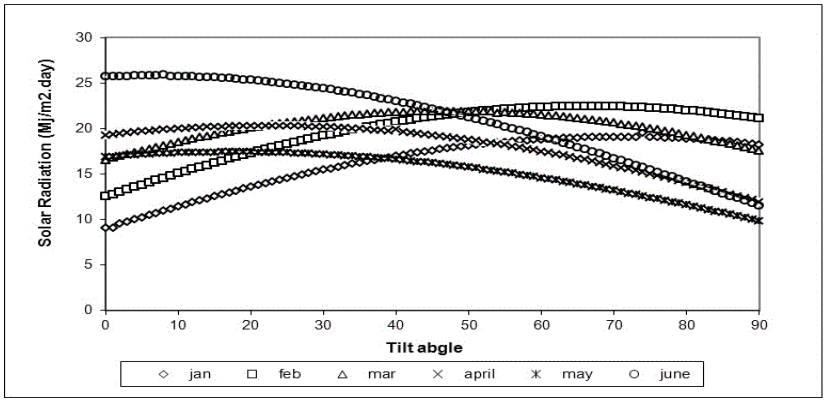
$$b = 0.6609 - 0.4767\sin(\omega_s - 60) \quad (۸)$$

$$d = \sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180}\cos\omega_s \quad (۹)$$

بررسی نتایج

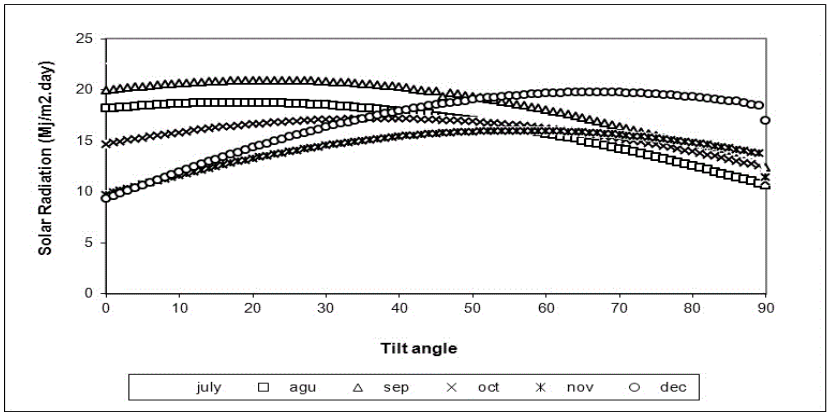
عملاً در طراحی پنل‌ها امکان تغییر زاویه روزانه میسرنیست، اما این امکان وجود دارد که زاویه پنل‌ها را هر ماه یکبار تغییر داد. از آنجا که در نیمکره شمالی پنل‌های خورشیدی برای دریافت تابش بیشتر رو به جنوب(γ=۰) قرار می‌گیرند ، این زاویه از صفر(حالت افق) تا ۹۰ درجه با حفظ جهت جنوب قادر به تغییر است. با این فرض، تابش خورشیدی در هر ماه با در نظر گرفتن زوایای صفر تا ۹۰ درجه با گام ۱ درجه را به دست آورده و بیشترین تابش مربوط به زاویه بهینه ماهانه خواهد بود و با توجه به این زاویه می‌توان پنل در طول ماه به منظور جذب تابش بیشتر تنظیم کرد.

نتایج حاصل از این فرضیات برای موقعیت شهر کرج در ماه‌های مختلف سال در نمودارهای ۲(a) و ۲(b) آورده شده‌است.



ژانویه – ژوئن(a)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]



جولای – دسامبر(b)

شکل ۲): میانگین تابش خورشیدی قابل دسترس روی سطوح شیب دار واقع شده در شهر کرج

زاویه میانگین فصلی با میانگین گرفتن از زوایای بهینه ماهانه در هر فصل به دست می‌آید. زاویه میانگین ثابت سالانه نیز از میانگین زوایای بهینه در تمام ماه‌ها به دست می‌آید و این زاویه معمولاً به عرض جغرافیایی محل نزدیک می‌باشد.

جدول۱): زوایای شیب بهینه ماهانه بر حسب درجه و انرژی تابشی جذب شده توسط پنل‌ها در این زوایا در شهر کرج

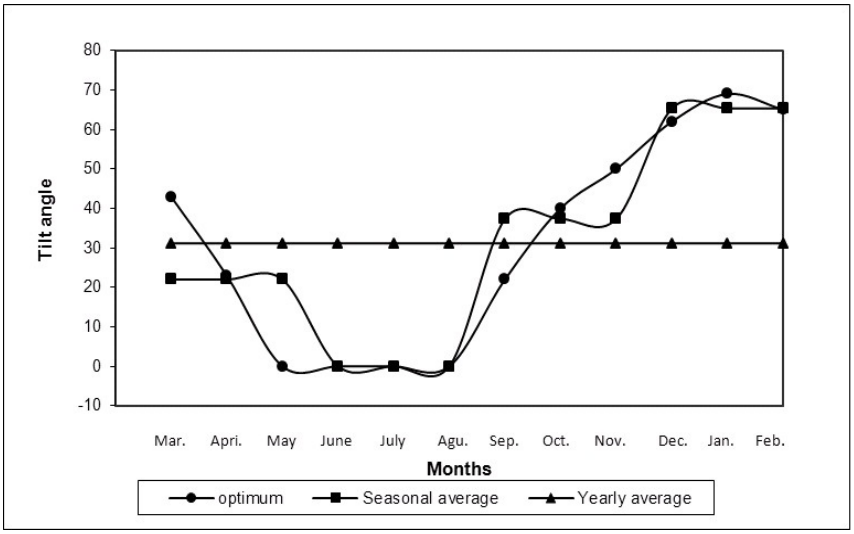
Months	β_{opt} (°)	H_{opt} $(Mj/m^2.day)$	Months	β_{opt} (°)	H_{opt} $(Mj/m^2.day)$
Jan.	69	16.33	July	0	22.18
Feb.	65	20.37	Aug.	0	18
Mar.	43	19.9	Sep.	22	20.19
Apr.	23	21.18	Oct.	40	18.13
May	0	17.21	Nov.	50	14.04
June	0	25.69	Dec.	62	16.8

جدول۲): زاویه شیب میانگین فصلی ، سالانه بر حسب درجه و انرژی جذب شده توسط پنل‌ها در این زوایا در شهر کرج

Seasonal average				Yearly average	
Months	Seasons	β_{opt} (°)	H_{opt} $(Mj/m^2.day)$	β_{opt} (°)	H_{opt} $(Mj/m^2.day)$
Dec.			17.5		17.44
Jan.	Winter	65.33	16.8		13.93
Feb.			20.03		17.33
Mar.			19.09		19.54
Apr.	Spring	22	21.17		21.02
May			16.3	31.16	15.42
June			26.22		22.73
July	Summer	0	22.18		18.8
Aug.			18		15.95
Sep.			19.66		20
Oct.	Autumn	37.33	18.53		18.13
Nov.			13.71		13.35

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

جدول ۲ بیانگر زوایای شیب بهینه برای پنل‌های خورشیدی با استفاده از روش کـار حاضـر و جـدول ۳ مقـادیر انـرژی تابشی رسیده به سطوح شیبدار برای فصل و سال در اقلیم شهر کرج می‌باشند. با استفاده از زاویـه بهینـه ماهانـه بیـشترین مقدار انرژی دریافتی از خورشید در ماه ژوئن بوده و برابر با ۲۵/۶۹$Mj/m^2.day$ و کمترین مقدار انرژی برای ماه ژانویـه بوده و و برابر با ۱۶/۳۳ $Mj/m^2.day$می‌باشد. شایان ذکر است با استفاده از روش بهینه سازی فصلی و سالانه هم ایـن دو ماه، ماه‌های حداکثر و حداقل انرژی تابشی دریافتی هستند. در صورتی که مدنظر باشد سیستم سـالانه بیـشترین انـرژی تابشی را جذب کند، ماه‌های حداکثر و حداقل انرژی سپتامبر و ژانویه در نظر گرفته مـی‌شـود و مقـدار انـرژی دریـافتی بـه ترتیب ۲۰/۱۹$Mj/m^2.day$ و ۱۶/۳۳$Mj/m^2.day$ است.



شکل ۳): زاویه بهینه ماهانه، فصلی و سالانه برای هر ماه بر حسب درجه

با استفاده از مقادیر موجود در جداول ۲ و ۳ می‌توان انرژی کل دریافتی در سال را با استفاده از روش‌های بهینـه‌سـازی مختلف به دست آورد که این نتایج در جدول ۴ مشاهده می‌شود. با بررسی داده‌های موجود در جدول ۴ می‌توان دریافت که مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال در زاویه بهینه فصلی نسبت به زاویه بهینه ماهانه کمتر از ۱٪ کاهش یافتـه و در زاویه بهینه سالانه نسبت به زاویه بهینه ماهانه این کاهش در انرژی دریافتی ۶/۹٪ می‌باشد.

جدول٤): مقادیر سالانه انرژی دریافتی از خورشید روی پنل‌های خورشیدی با استفاده زوایای بهینه ماهانه، فصلی و سالانه انتخاب شده در شهر کرج

Optimum tilt angle	$\beta_{opt(m)}$	$\beta_{opt(s)}$	$\beta_{opt(y)}$
$H_{total}(Mj/m^2)$	6990	6942	6507

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]

نتیجه گیری

۱- نتایج نشان می‌دهد که میانگین زاویه بهینه فصلی در ماه‌های تابستان صفر درجه (۳۵/۵ ـ Φ) و در ماه‌های فصل زمستان ۶۵/۳۳ درجه (۳۰ + Φ) می‌باشد که با مدل ارائه شده [5] تقریباً همخوانی دارد.

۲- کمترین زاویه شیب بهیمه ماهانه صفر درجه است که کمترین تابش دریافتی در این زاویه مربوط به ماه می با مقدار تابش $Mj/m^2.day$ ۱۷/۲۱می‌باشد. این زاویه در ماه‌های زمستانی افزایش یافته تا به مقدار ۶۹ درجه در ماه ژانویه با تابش دریافتی $Mj/m^2.day$ ۱۶/۳۳ می‌رسد.

۳- نتایج مقایسه انرژی کل دریافتی سالانه با استفاده از زوایای مختلف ماهانه، فصلی و سالانه نشان می‌دهد که چنانچه تغییرات ماهانه در زاویه پنل‌ها امکان پذیر نباشد، می‌توان از زاویه بهینه فصلی استفاده شود که کاهش در تابش دریافتی در این حالت نسبت به حالت ماهانه ناچیز می‌باشد.

۴- زاویه شیب بهینه سالانه که به عنوان یک زاویه ثابت در تمام فصول در نظر گرفته می‌شود، ۳۱/۶۶ درجه می‌باشد که به عرض جغرافیایی شهر کرج نزدیک می‌باشد.

منابع

[۱] عباسپورثانی،ک. فرهمندپور،ب. حجازی،گ.(۱۳۸۶) " تعیین سال مبنای تابش خورشیدی با بکارگیری ۱۲ سال اطلاعات آماری تابش کلی خورشیدی کرج"پژوهشکده انرژی، پروژه تحقیقاتی مصوب در پژوهشگاه مواد و انرژی.

[2] Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. New York:Wiley:1991.

[3] El-Kassaby MM, Hassb MH. Investigation of a variable tilt angle Australian type solar collector. Renewable Energy 1994;4(3):327–32.

[4] H.C.Hottel,Performance of flat-plate solar energy collectors.IN:Space Heating with Solar. Energy,Proc.Course Solar-Symposium.MIT Press,Cambrigde(1954).

[5] Heywood H. Operational experience with solar water heating. J Inst Heat Vent Energy 1971:39:63-9.

[6] H.J.Yellott,Utilization of Sun and Sky Radiation for Heating and Cooling of Buldings.ASHRAE15,31-42(1973).

[7] Klein,S,A.and J.C.Theilacker,An Algorithm for Calculating Monthly Average Radiation on Inclined SUurfaces,Trans ASME 103,29(1981).

[8] Lunde PJ. Solar thermal engineering. New York: Wiley; 1980.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-07]