

تعیین زاویه شیب بهینه ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان

حسین خراسانی زاده^{1*}، سید مرتضی مسچی²

¹ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

khorasan@kashanu.ac.ir

² کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

morteza.meschi1989@yahoo.com

چکیده: نحوه قرارگیری کلکتورهای تخت خورشیدی، اعم از حرارتی یا فتوولتائیک، بر مقدار تشعشع ورودی به آنها و میزان جذب آن تأثیر دارد. در این مطالعه، زاویه بهینه شیب کلکتورهای خورشیدی تخت واقع در کاشان، برای تنظیم ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه تعیین شده است. محاسبات خورشیدی در صورتی که مبتنی بر داده‌های تجربی باشند، نتایج بهتری در اختیار می‌گذارند؛ ولی بسیاری از مناطق ایران از جمله کاشان، فاقد اطلاعات تجربی خورشیدی هستند. در این تحقیق، به دلیل تشابه اقلیمی اصفهان با کاشان، از متوسط ماهیانه تشعشع روزانه اندازه‌گیری شده درازمدت در ایستگاه اصفهان، برای محاسبه زوایای شیب بهینه استفاده شده است. همچنین به منظور مقایسه، از مقادیر تخمینی چند منبع دیگر نیز برای محاسبه این زوایا استفاده شده و نتایج حاصل از روابط عمومی پیشنهادی سایر محققان نیز به دست آمده‌اند. انجام مقایسه، ضعف چند رابطه موجود و اعتبار نتایج به دست آمده در این مطالعه را مشخص کرده است. بر مبنای نتایج برای بهترین بهره‌برداری، تنظیم شیب حداقل هر ماه یک بار لازم است و زاویه بهینه حداکثر و حداقل به ترتیب 60° برای ماه آذر و صفر درجه برای دو ماه خرداد و تیر می‌باشد. این زاویه برای تنظیم ثابت فصلی در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب 3° ، 14° ، 53° و 48° ، برای تنظیم ثابت در شش ماه اول و دوم سال به ترتیب 9° و 51° و برای تنظیم ثابت سالانه 29° می‌باشد، که به عرض جغرافیایی کاشان ($33/59^\circ$) نزدیک است.

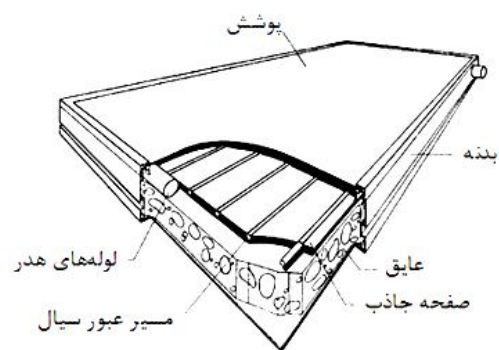
واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، تخمین تشعشع، زاویه بهینه شیب، کلکتور خورشیدی صفحه تخت، کاشان.

1. مقدمه

پیوسته هم‌زمان حول چند محور می‌چرخد تا زاویه بین عمود بر سطح آن و راستای ورود تشعشع خورشیدی مستقیم همیشه کمترین مقدار باشد. روش دیگری که برای کلکتورهای واقع در نیمکره شمالی توصیه می‌شود، تنظیم زاویه کلکتور با چرخاندن آن فقط حول محور شرقی-غربی برای قراردادن آن به سمت جنوب است. این زاویه که به زاویه شیب کلکتور معروف است، برای یک بازه زمانی که می‌تواند بین یک دقیقه تا یک سال باشد، ثابت می‌ماند و تنظیم می‌تواند دستی یا اتوماتیک باشد.

تاکنون مطالعات زیادی درخصوص زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی تخت، برای نقاط مختلف جهان انجام شده است. الکسای [1] به مطالعه زاویه بهینه کلکتور خورشیدی، برای تنظیم روزانه و ماهیانه در عرض‌های جغرافیایی بین صفر تا 60° در نیمکره شمالی پرداخت. وی با استفاده از روش حداقل مربعات، چهار رابطه تجربی را برای محاسبه زاویه بهینه در هر ماه به دست آورد. سلیمان [2] همین مطالعه را با استفاده از یک روش تئوری ساده انجام داد. نیجگورودو و همکاران [3] تعدادی رابطه تجربی برای تنظیم ماهیانه و بهینه زاویه شیب کلکتور در محدوده عرض جغرافیایی بین 60° تا 60° ارائه نمودند. مورکوس [4] با استفاده از یک مدل ریاضی برای محاسبه تشعشع کل روی سطح شیب‌دار، به تعیین زاویه بهینه شیب برای کلکتور تخت و زوایای بهینه شیب و سمت برای کلکتور از نوع متمرکزکننده، در منطقه آسیوت¹ مصر پرداخت. یکوپ و مالیک [5] از یک مدل ریاضی، مبتنی بر تشعشع خارج جو، برای تخمین تشعشع کل روی سطح شیب‌دار استفاده کردند و زوایای بهینه شیب و سمت کلکتورهای خورشیدی را در برونی دارالسلام² را به دست آوردند. آن‌ها دریافتند که تنظیم ماهیانه کلکتور مقدار تشعشع ورودی کل را نزدیک به مقدار حداکثر برای شرایط تنظیم روزانه با زاویه بهینه روزانه می‌نماید. باری [6] عوامل مؤثر بر عملکرد کلکتورهای خورشیدی در کشورهای با عرض جغرافیایی پایین را مورد بررسی قرار داد. او همچنین به مقایسه اثر متغیرهایی مانند زاویه شیب سطح، زاویه سمت آن یا هر دو در کشورهای با عرض جغرافیایی پایین و کشورهای با عرض جغرافیایی بالاتر پرداخت. گونرهان و هپاسلی [7] زاویه بهینه شیب کلکتور را در از میر³ ترکیه به دست آوردند و توصیه نمودند که برای افزایش بهره‌وری، کافی است که کلکتور به صورت ماهیانه تنظیم

انرژی خورشیدی به‌عنوان پاک‌ترین، ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین انرژی خدادادی شناخته شده است؛ بنابراین استفاده از علم و تکنولوژی برای بهره‌برداری هرچه بهتر از این موهبت الهی، قابل اهمیت است. کلکتورهای صفحه تخت حرارتی، ساده‌ترین و پرکاربردترین وسیله برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تأمین انرژی گرمایی هستند. این کلکتورها یک مبدل حرارتی‌اند و تبادل حرارت به‌صورت تشعشع بین خورشید با سیال جاری در لوله‌های کلکتور صورت می‌گیرد. در شکل (1)، شماتیک یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت به‌همراه اجزای آن ارائه شده است.



شکل (1): شماتیک کلکتور خورشیدی صفحه تخت

مزیت اصلی کلکتورهای تخت، اعم از حرارتی یا الکتریکی، دریافت انرژی با هزینه‌ای کم است. با وجود این، متأسفانه تمامی انرژی تشعشعی برخوردی به کلکتورها جذب نمی‌شود. این موضوع و بهینه‌سازی سیستم‌های خورشیدی، هدف تحقیق بسیاری از محققان انرژی خورشیدی از گذشته تاکنون بوده است. برای افزایش تشعشع دریافتی از خورشید روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها افزایش سطح کلکتور است. برای این کار لازم است از کلکتورهای با مساحت بیشتر استفاده شود که باعث افزایش هزینه می‌شود. یک راهکار دیگر، تغییر زاویه شیب کلکتور به دلیل تغییر موقعیت خورشید در آسمان و شرایط تابش خورشید در روزها، ماه‌ها و فصل‌های مختلف است. همچنین از آنجا که ضریب جذب کلکتورها وابسته به جهت تشعشع ورودی است، هرچه قرارگیری کلکتور از این لحاظ مناسب‌تر باشد، علاوه بر اینکه تشعشع خورشیدی ورودی به کلکتور بیشتر می‌شود، سهم بیشتری نیز جذب می‌شود. در یکی از روش‌ها تنظیم زوایای قرارگیری کلکتور با استفاده از سیستم‌های تعقیب‌کننده خورشید انجام می‌شود. در این روش، کلکتور با تنظیم

1. Assiut
2. Brunei Darussalam
3. Izmir

شود. جمیل احمد و تایواری [8] زاویه بهینه کلکتور را برای ده مکان مختلف در جهان، از جمله بعضی از شهرهای هند برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آوردند. اسکیکر [9] نیز با مدل سازی ریاضی مبتنی بر تشعشع خارج از جو، به مطالعه زاویه بهینه قرارگیری کلکتور خورشیدی در مناطق مختلف سوریه پرداخت. بن قانم [10] زاویه بهینه شیب کلکتور را در مدینه عربستان سعودی برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آورد. نتایج او نشان داد که با تنظیم ماهیانه، می توان حداکثر انرژی خورشیدی را برای منطقه مذکور به دست آورد و زاویه شیب بهینه برای تنظیم سالانه، تقریباً با عرض جغرافیایی مدینه برابر است.

در ایران نیز مطالعاتی درباره زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی تخت برای چند محل انجام شده است. کیانی فر و همکاران [11] با استفاده از داده های اندازه گیری شده و مدل تخمین تشعشع آنگستروم¹، زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را در مشهد به دست آوردند. عبدالزاده و همکاران [12 و 13] با استفاده از مدل های ریاضی مختلف، زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه در کرمان به دست آوردند. تقفی و همکاران [14] تابش دریافتی ماهیانه کلکتور خورشیدی تخت واقع در تهران را به ازای زوایای شیب گوناگون محاسبه کردند و نتایج را برای انتخاب زاویه بهینه شیب، مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در مطالعه دیگری، جعفر کاظمی و سعدآبادی [15] زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه در تهران به دست آوردند. مقدم و همکاران [16] با استفاده از مدل سازی ریاضی تخمین تشعشع و مقایسه آن با اطلاعات اندازه گیری شده، به مطالعه زاویه بهینه شیب کلکتور در زاهدان برای تنظیم روزانه، ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه پرداختند. عبدالزاده و مهربیان [17 و 18] برای شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند و طبس که همه در ناحیه گرم و خشک ایران واقع هستند، زاویه بهینه شیب کلکتور را به دست آوردند. طالبی زاده و همکاران [19 و 20] به مطالعه زوایای بهینه شیب و سمت سطح با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در ناحیه ای از ایران با عرض جغرافیایی $32/5^\circ$ پرداختند. آن ها در مطالعات دیگری [21 و 22] زاویه بهینه شیب کلکتور را در شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند، شیراز و طبس، با استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده در چند محل خاص، به دست آورده و نمودار زاویه بهینه شیب کلکتور بر حسب

عرض جغرافیایی را برای ماه های مختلف، فصول مختلف و سال رسم نمودند. بر همین اساس، آن ها چند رابطه عمومی را برای محاسبه زاویه بهینه شیب برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه برای نواحی با عرض جغرافیایی بین 20° تا 40° در نیمکره شمالی ارائه نمودند. صلوتی پور و همکاران [23] با استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده متوسط ماهیانه تشعشع روزانه، زاویه بهینه شیب کلکتور را برای شهر اصفهان برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آوردند. جعفر کاظمی و همکاران [24] به مطالعه زاویه بهینه شیب کلکتور خورشیدی تخت در چند شهر ایران با استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده و تخمینی پرداختند. بهرامی و عباسپور [25] زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه در کرج به دست آوردند. خراسانی زاده و همکاران [26] زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم روزانه، ماهیانه، فصلی و سالانه در ارومیه به دست آوردند. کشاورز و همکاران [27 و 28] ماکزیمم انرژی دریافتی کلکتور خورشیدی را بر اساس زوایای بهینه برای بعضی از شهرهای ایران محاسبه نمودند. کشوری و همکاران [29] زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه در خرم آباد به دست آوردند.

شهرستان کاشان که مرکز آن در طول جغرافیایی $51/27^\circ$ و عرض جغرافیایی $33/59^\circ$ قرار دارد، با مجموع سالانه 2918 ساعت آفتابی از پتانسیل بسیار خوبی برای بهره برداری از انرژی خورشیدی برخوردار است [30]. به همین دلیل، استفاده از سیستم های خورشیدی در این شهر، از لحاظ محاسبات برگشت سرمایه مقرون به صرفه و در حال توسعه است. در این خصوص، می توان به نصب نیروگاه خورشیدی 10 کیلووات ساعتی با پانل های فتوولتائیک² تخت قابل تنظیم در پردیس اصلی دانشگاه کاشان و همچنین نصب نیروگاه 5 کیلووات ساعتی مشابهی در پردیس قمصر این دانشگاه اشاره کرد.

زوایای شیب بهینه کلکتورها در هر مکانی به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی وابسته است. از آنجاکه تاکنون مطالعه ای برای شیب کلکتورها در کاشان انجام نشده است، در این تحقیق، تعیین زوایای شیب بهینه برای تنظیم ثابت ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه مورد نظر قرار گرفته است. برای انجام محاسبات، و به دلیل فقدان داده های اندازه گیری شده خورشیدی محلی، از داده های اندازه گیری شده شهری با شرایط اقلیمی مشابه، در نزدیکی کاشان استفاده شده است. همچنین از داده های تخمینی نیز برای محاسبه زاویه شیب بهینه استفاده شده و

شود. جمیل احمد و تایواری [8] زاویه بهینه کلکتور را برای ده مکان مختلف در جهان، از جمله بعضی از شهرهای هند برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آوردند. اسکیکر [9] نیز با مدل سازی ریاضی مبتنی بر تشعشع خارج از جو، به مطالعه زاویه بهینه قرارگیری کلکتور خورشیدی در مناطق مختلف سوریه پرداخت. بن قانم [10] زاویه بهینه شیب کلکتور را در مدینه عربستان سعودی برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه به دست آورد. نتایج او نشان داد که با تنظیم ماهیانه، می توان حداکثر انرژی خورشیدی را برای منطقه مذکور به دست آورد و زاویه شیب بهینه برای تنظیم سالانه، تقریباً با عرض جغرافیایی مدینه برابر است.

در ایران نیز مطالعاتی درباره زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی تخت برای چند محل انجام شده است. کیانی فر و همکاران [11] با استفاده از داده های اندازه گیری شده و مدل تخمین تشعشع آنگستروم¹، زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را در مشهد به دست آوردند. عبدالزاده و همکاران [12 و 13] با استفاده از مدل های ریاضی مختلف، زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه در کرمان به دست آوردند. تقفی و همکاران [14] تابش دریافتی ماهیانه کلکتور خورشیدی تخت واقع در تهران را به ازای زوایای شیب گوناگون محاسبه کردند و نتایج را برای انتخاب زاویه بهینه شیب، مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در مطالعه دیگری، جعفر کاظمی و سعدآبادی [15] زاویه شیب بهینه کلکتور خورشیدی تخت را برای تنظیم ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه در تهران به دست آوردند. مقدم و همکاران [16] با استفاده از مدل سازی ریاضی تخمین تشعشع و مقایسه آن با اطلاعات اندازه گیری شده، به مطالعه زاویه بهینه شیب کلکتور در زاهدان برای تنظیم روزانه، ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه پرداختند. عبدالزاده و مهربیان [17 و 18] برای شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند و طبس که همه در ناحیه گرم و خشک ایران واقع هستند، زاویه بهینه شیب کلکتور را به دست آوردند. طالبی زاده و همکاران [19 و 20] به مطالعه زوایای بهینه شیب و سمت سطح با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در ناحیه ای از ایران با عرض جغرافیایی $32/5^\circ$ پرداختند. آن ها در مطالعات دیگری [21 و 22] زاویه بهینه شیب کلکتور را در شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند، شیراز و طبس، با استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده در چند محل خاص، به دست آورده و نمودار زاویه بهینه شیب کلکتور بر حسب

مثبت و در نیمکره جنوبی منفی است. β زاویه شیب بین هر سطح دریافت‌کننده تشعشع، از جمله سطح کلکتور تخت یا پانل فتوولتائیک، با افق است که بین 180° تا 180° تغییر می‌کند. γ اختلاف بین مؤلفه افقی عمود بر سطح و طول جغرافیایی محل قرارگیری سطح بوده و به زاویه سمت سطح معروف است. زمانی که یک سطح با چرخش حول محور شرقی-غربی فقط نسبت به راستای شمال-جنوب زاویه‌دار شود، زاویه سمت آن برابر صفر خواهد بود.

نسبت متوسط ماهیانه تشعشع مستقیم روزانه روی سطح شیب‌دار به همین تشعشع روی سطح افقی در نیمکره شمالی عبارت است از [31]:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \sin\omega'_s + \left(\frac{\pi\omega'_s}{180}\right) \sin(\varphi - \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi\omega_s}{180}\right) \sin\varphi \sin\delta} \quad (3)$$

ω'_s زاویه ساعت غروب خورشید برای سطح شیب‌دار در روز متوسط ماه است و برای کلکتورهایی که فقط به سمت جنوب شیب‌دار شوند، عبارت است از [31]:

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan\delta) \right] \quad (4)$$

\bar{H}_o متوسط ماهیانه تشعشع روزانه دریافتی از خورشید روی سطح افقی در بیرون از جو می‌باشد و برابر است با [31]:

$$\bar{H}_o = \frac{24 \times 3600 \times 1367}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \left[\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \sin\varphi \sin\delta \right] \quad (5)$$

2.2. تشعشع ورودی به سطوح افقی و شیب‌دار

به دلیل تضعیف تشعشع ناشی از پخش توسط گازهای موجود در هوا و گرد و غبار و همچنین جذب توسط ازن، بخار آب و دی‌اکسید کربن، انرژی خورشیدی که به صورت تشعشع به خارج از جو زمین می‌رسد، بیشتر از مقداری است که داخل جو زمین و روی آن دریافت می‌شود. به همین دلیل، تشعشع برخوردی به یک سطح افقی در روی زمین، دارای دو مؤلفه مستقیم و پخش شده است و همچنین تشعشع برخوردی به یک سطح شیب‌دار، دارای سه مؤلفه مستقیم، پخش شده و انعکاسی از زمین است. در محاسبات خورشیدی برای کلکتورهای شیب‌دار در یک محل خاص لازم است ابتدا سهم تشعشع مستقیم و پخش شده رسیده به سطح افقی معلوم باشد.

پیش‌بینی‌های چند رابطه عمومی ارائه شده توسط محققان دیگر نیز به دست آمده و مقایسه و بحث انجام شده است.

2. مدل‌سازی ریاضی

در این بخش ابتدا برخی زوایا و متغیرهای خورشیدی معرفی می‌شوند و سپس راجع به تشعشع ورودی به سطوح افقی و نحوه محاسبه تشعشع ورودی به سطوح زاویه‌دار، مطالبی ارائه می‌شوند.

1.2. معرفی چند زاویه و متغیر خورشیدی

δ که به زاویه انحراف یا میل خورشیدی معروف است، زاویه بین راستای تشعشع مستقیم خورشیدی و صفحه استوا در ظهر خورشیدی بوده و برابر است با [31]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (1)$$

n شماره روز سال از ابتدای سال میلادی است. در این مطالعه، متوسط ماهیانه تشعشع روزانه مورد نظر است؛ بنابراین، محاسبات فقط برای روز متوسط ماه انجام می‌شود. روز متوسط ماه روزی است که مقدار زاویه میل آن با متوسط ماهیانه این زاویه برابر باشد. شماره روز متوسط برای تمام ماه‌های میلادی در جدول (1) ارائه شده است.

جدول (1): شماره روز متوسط هر ماه از ابتدای سال میلادی [31]

ماه	شماره روز متوسط
ژانویه	17
فوریه	47
مارس	75
آوریل	105
می	135
ژوئن	162
ژولای	198
آگوست	228
سپتامبر	258
اکتبر	288
نوامبر	318
دسامبر	344

ω_s زاویه ساعت مربوط به غروب خورشید و عبارت است از [31]:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (2)$$

φ عرض جغرافیایی محل قرارگیری کلکتور خورشیدی است که موقعیت زاویه‌ای در شمال و جنوب خط استوا را نشان می‌دهد. مقدار عرض جغرافیایی بین 90° تا 90° تغییر می‌کند و در نیمکره شمالی،

سال نیاز است. برای مناطق دارای ایستگاه اندازه‌گیری، از داده‌های اندازه‌گیری شده خورشیدی استفاده می‌شود. متأسفانه به دلیل محدودیت در تهیه، نگهداری و کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری تشعشع خورشیدی، این کمیت نسبت به سایر کمیت‌های هواشناسی به صورت گسترده اندازه‌گیری نمی‌شود. برای برآورد تشعشع در مناطقی که اطلاعات اندازه‌گیری شده ندارند، از روابط تخمینی که تابش خورشیدی را به سایر متغیرهای هواشناسی ربط می‌دهند، استفاده می‌شود؛ ولی به دلیل وابستگی زیاد تشعشع خورشیدی و مؤلفه‌های آن به شرایط اقلیمی، این روابط تخمینی دقت بالایی ندارند و همیشه اعتبار اطلاعات اندازه‌گیری شده از اطلاعات تخمینی بیشتر است. رثوفی‌راد [32] و سبزی‌پرور [33] مقادیر متوسط ماهیانه تشعشع روزانه کاشان و چند شهر دیگر را به صورت تخمینی و با استفاده از آنالیز آماری مشخص کرده‌اند. با توجه به فقدان داده‌های تجربی برای کاشان، این امکان وجود داشت که فقط با استفاده از این مقادیر، زاویه بهینه شیب تعیین شود. با وجود این، استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده شهرهای اصفهان و خور و بیابانک که با کاشان تشابه اقلیمی دارند و از نظر طول و عرض جغرافیایی نیز به آن نزدیک هستند، از مقادیر تخمینی مناسب‌تر به نظر رسید.

متوسط ماهیانه ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و دمای روزانه برای ایستگاه‌های واقع در شهرهای کاشان، اصفهان و خور و بیابانک که توسط سازمان هواشناسی کشور [30] اندازه‌گیری و اعلام شده است، در جدول (2) ارائه شده‌اند. همان‌طور که از جدول (2) دیده می‌شود، در بیشتر ماه‌های سال متوسط ماهیانه ساعات آفتابی در سه شهر کاشان، اصفهان و خور و بیابانک، به هم نزدیک هستند و با وجود اینکه در برخی ماه‌ها نسبت به هم، حتی تا 20 درصد هم اختلاف دارند، مجموع سالیانه آن‌ها حداکثر 10 درصد فرق دارد؛ البته از آنجاکه تأثیر رطوبت نسبی بر روی تشعشع، بااهمیت‌تر از سایر متغیرها است [31] و مقادیر متوسط ماهیانه رطوبت نسبی کاشان و اصفهان بسیار به هم نزدیک هستند، در این مطالعه، استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده ایستگاه اصفهان مربوط به یک دوره هشت‌ساله از 2000 تا 2008 میلادی [23] مناسب تشخیص داده شد. هم‌چنین از داده‌های تخمینی رثوفی‌راد [32] و سبزی‌پرور [33] نیز به منظور مقایسه استفاده شد. در نتیجه، محاسبات خورشیدی برای به دست آوردن زاویه بهینه شیب کلکتور با سه نوع داده انجام شده‌اند. این داده‌ها که متوسط ماهیانه تشعشع روزانه ورودی به سطح افقی هستند، در جدول (3) ارائه شده‌اند.

برای تعیین سهم تشعشع پخش شده در هر محل، نیاز است ابتدا شاخص صافی هوا شناخته شود. متوسط ماهیانه شاخص صافی هوای روزانه عبارت است از [31]:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (6)$$

به شرط معلوم بودن تشعشع کل برخوردی به سطح افقی، نسبت تشعشع پخش شده به تشعشع کل وابسته به شاخص صافی هوا و عبارت است از [31]:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560 \bar{K}_T + 4.189 \bar{K}_T^2 - 2.137 \bar{K}_T^3 \quad (\omega_s \leq 81.4^\circ, 0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8) \quad (7)$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022 \bar{K}_T + 3.427 \bar{K}_T^2 - 1.821 \bar{K}_T^3 \quad (\omega_s > 81.4^\circ, 0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8) \quad (8)$$

به فرض اینکه تشعشع پخش شده برخوردی به یک سطح افقی از تمام جهات آسمان باشد، تشعشع کل برخوردی به یک سطح شیب‌دار عبارت است از [31]:

$$\bar{H}_T = (\bar{H}_b \bar{R}_b) + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \bar{H} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

ρ_g ضریب انعکاس زمین، \bar{H}_b تشعشع مستقیم برخوردی به سطح افقی، \bar{H}_d تشعشع پخش شده برخوردی به سطح افقی و \bar{H}_T تشعشع کل برخوردی به کلکتور شیب‌دار هستند.

3. داده‌ها، نحوه محاسبات زاویه بهینه، نتایج و بحث

در این بخش، پس از بررسی انواع داده‌های تشعشع خورشیدی در دسترس و تدوین راهبردهای لازم برای انتخاب مناسب‌ترین داده خورشیدی برای متوسط ماهیانه تشعشع روزانه دریافتی از خورشید در کاشان، نحوه انجام محاسبات برای زوایای شیب بهینه توضیح داده می‌شود. سپس نتایج به دست آمده برای تنظیم شیب در بازه‌های زمانی مختلف اعم از ماهیانه، فصلی، شش‌ماهه و سالانه ارائه شده و با نتایج به دست آمده از داده‌های تخمینی و نتایج حاصل از روابط عمومی ارائه شده سایر محققان مقایسه و بحث می‌شود.

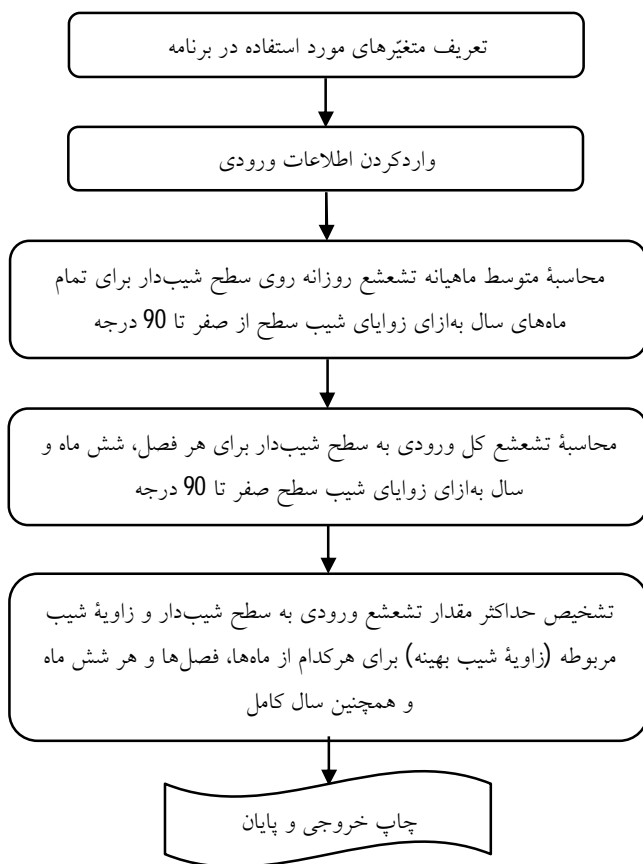
1.3. تدوین داده‌های خورشیدی لازم برای کاشان

برای انجام محاسبات زاویه بهینه برای تنظیم ثابت ماهیانه، فصلی، شش‌ماهه و سالانه در قدم اول، به مقادیر متوسط ماهیانه تشعشع روزانه دریافتی از خورشید روی سطح افقی (\bar{H}) در تمامی ماه‌های

جدول (2): متوسط ماهیانه ساعات آفتابی (ساعت)، رطوبت نسبی (%) و دمای روزانه (°C) برای سه شهر مورد نظر [30]

ماه	کاشان	اصفهان	خور و بیابانک
فروردین	ساعات آفتابی: 226/7 رطوبت نسبی: 39 دمای روزانه: 19/2	ساعات آفتابی: 250/0 رطوبت نسبی: 40 دمای روزانه: 16	ساعات آفتابی: 265/5 رطوبت نسبی: 30 دمای روزانه: 21
اردیبهشت	ساعات آفتابی: 280/4 رطوبت نسبی: 35 دمای روزانه: 24/3	ساعات آفتابی: 308/7 رطوبت نسبی: 34 دمای روزانه: 21	ساعات آفتابی: 325/4 رطوبت نسبی: 25 دمای روزانه: 26/1
خرداد	ساعات آفتابی: 319/8 رطوبت نسبی: 26 دمای روزانه: 30	ساعات آفتابی: 348/3 رطوبت نسبی: 25 دمای روزانه: 26/4	ساعات آفتابی: 351/7 رطوبت نسبی: 20 دمای روزانه: 31
تیر	ساعات آفتابی: 327/8 رطوبت نسبی: 24 دمای روزانه: 32/8	ساعات آفتابی: 349/4 رطوبت نسبی: 25 دمای روزانه: 28/9	ساعات آفتابی: 363/4 رطوبت نسبی: 22 دمای روزانه: 33/1
مرداد	ساعات آفتابی: 324/7 رطوبت نسبی: 24 دمای روزانه: 31/6	ساعات آفتابی: 339/7 رطوبت نسبی: 26 دمای روزانه: 27/4	ساعات آفتابی: 360/6 رطوبت نسبی: 21 دمای روزانه: 31/5
شهریور	ساعات آفتابی: 288/2 رطوبت نسبی: 27 دمای روزانه: 26/8	ساعات آفتابی: 311/3 رطوبت نسبی: 28 دمای روزانه: 23/3	ساعات آفتابی: 320/4 رطوبت نسبی: 22 دمای روزانه: 27/4
مهر	ساعات آفتابی: 248/7 رطوبت نسبی: 37 دمای روزانه: 20	ساعات آفتابی: 281/5 رطوبت نسبی: 38 دمای روزانه: 16/9	ساعات آفتابی: 294/3 رطوبت نسبی: 29 دمای روزانه: 21/1
آبان	ساعات آفتابی: 188/3 رطوبت نسبی: 50 دمای روزانه: 12/5	ساعات آفتابی: 224/2 رطوبت نسبی: 50 دمای روزانه: 10/1	ساعات آفتابی: 229/3 رطوبت نسبی: 38 دمای روزانه: 14/1
آذر	ساعات آفتابی: 163/3 رطوبت نسبی: 61 دمای روزانه: 6/8	ساعات آفتابی: 197/0 رطوبت نسبی: 60 دمای روزانه: 5	ساعات آفتابی: 205/7 رطوبت نسبی: 52 دمای روزانه: 8/5
دی	ساعات آفتابی: 165/3 رطوبت نسبی: 62 دمای روزانه: 4/9	ساعات آفتابی: 203/6 رطوبت نسبی: 60 دمای روزانه: 3/4	ساعات آفتابی: 204/4 رطوبت نسبی: 55 دمای روزانه: 6/6
بهمن	ساعات آفتابی: 182/2 رطوبت نسبی: 54 دمای روزانه: 7/4	ساعات آفتابی: 216/8 رطوبت نسبی: 50 دمای روزانه: 6	ساعات آفتابی: 220/4 رطوبت نسبی: 45 دمای روزانه: 9/1
اسفند	ساعات آفتابی: 202/3 رطوبت نسبی: 47 دمای روزانه: 12/6	ساعات آفتابی: 243/7 رطوبت نسبی: 43 دمای روزانه: 10/5	ساعات آفتابی: 240/8 رطوبت نسبی: 38 دمای روزانه: 14

زاویه‌ای که به‌ازای آن، مجموع تشعشع کل ورودی به سطح شیب‌دار در آن بازه حداکثر باشد، به‌عنوان زاویه بهینه برای آن نوع تنظیم انتخاب و اعلام می‌شود. فلوجارت برنامه کامپوتری در شکل (2) ارائه شده است.



شکل (2): فلوجارت برنامه کامپیوتری

جدول (3): متوسط ماهیانه تشعشع روزانه روی سطح افقی در کاشان (MJ.m⁻².day⁻¹)

ماه	رئوفی‌راد [32]	سبزی‌پرور [33]	اندازه‌گیری شده اصفهان [23]
فروردین	18/22	21/91	19/90
اردیبهشت	21/44	27/28	26/07
خرداد	22/95	32/14	28/87
تیر	23/32	35/47	27/02
مرداد	22/99	33/80	26/60
شهریور	19/69	32/53	23/65
مهر	14/17	22/09	17/95
آبان	10/16	16/16	10/93
آذر	8/40	13/81	8/94
دی	8/61	14/57	10/88
بهمن	11/83	15/37	16/36
اسفند	14/55	18/88	18/13

2.3. روال انجام محاسبات

برای انجام محاسبات، یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شده است که توسط آن و با استفاده از مقادیر متوسط ماهیانه تشعشع روزانه و به‌کاربردن روابط (1 تا 9)، مقدار تشعشع کل ورودی روزانه به سطح شیب‌دار در هر ماه، برای زوایای شیب سطح از صفر تا 90° به‌ازای هر یک درجه محاسبه می‌شود. سپس زاویه‌ای که به‌ازای آن، تشعشع کل ورودی روزانه به سطح شیب‌دار در هر ماه حداکثر باشد، به‌عنوان زاویه بهینه شیب برای آن ماه انتخاب می‌شود. همچنین مجموع تشعشع کل ورودی به سطح شیب‌دار برای تمام روزهای هر فصل، هر شش‌ماه و تمام سال در شیب‌های از صفر تا 90° محاسبه شده و

این نزدیکی می‌تواند سهم نسبی یکسان تشعشع پخش شده از تشعشع کل بدون توجه به مقدار تشعشع کل باشد. با وجود این و با توجه به توضیحات ذکر شده در مورد تشابه اقلیمی کاشان با اصفهان، داده‌های اندازه‌گیری شده اصفهان معتبرتر از داده‌های تخمینی و زوایای بهینه به دست آمده براساس این داده‌ها نیز دقیق‌تر هستند.

جدول (4): زاویه شیب بهینه ماهیانه کلکتور (درجه) و متوسط ماهیانه تشعشع ورودی روزانه ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$) در این زاویه در کاشان

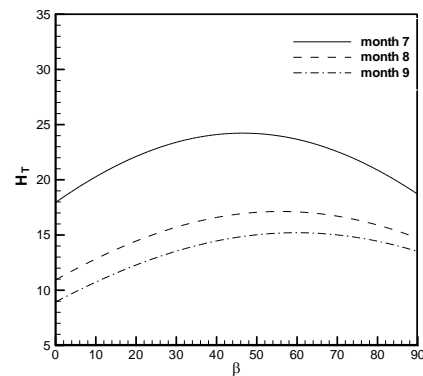
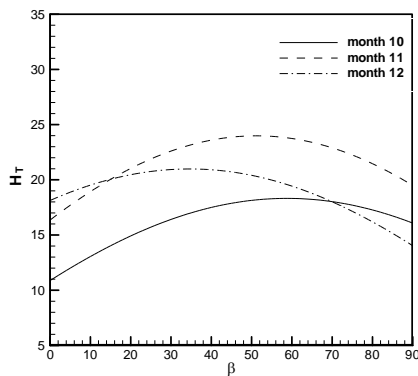
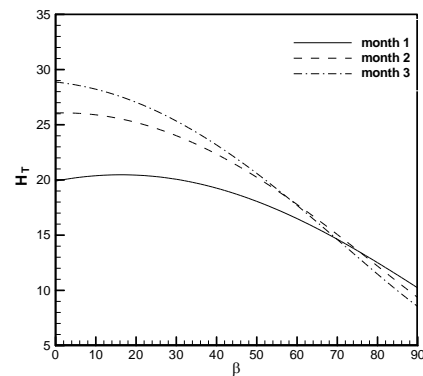
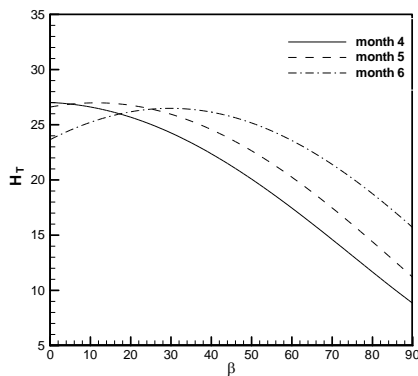
ماه/داده	رتوفی‌راد [32]	سبزی‌پرور [33]	اندازه‌گیری شده اصفهان [23]
فروردین	β_{opt} 16	β_{opt} 17	β_{opt} 16
اردیبهشت	β_{opt} 1	β_{opt} 2	β_{opt} 2
خرداد	β_{opt} 0	β_{opt} 0	β_{opt} 0
تیر	β_{opt} 0	β_{opt} 0	β_{opt} 0
مرداد	β_{opt} 11	β_{opt} 13	β_{opt} 11
شهریور	β_{opt} 28	β_{opt} 34	β_{opt} 30
مهر	β_{opt} 44	β_{opt} 49	β_{opt} 46
آبان	β_{opt} 55	β_{opt} 60	β_{opt} 56
آذر	β_{opt} 59	β_{opt} 64	β_{opt} 60
دی	β_{opt} 56	β_{opt} 62	β_{opt} 59
بهمن	β_{opt} 47	β_{opt} 51	β_{opt} 51
اسفند	β_{opt} 32	β_{opt} 35	β_{opt} 35

شایان ذکر است که در این مطالعه، زاویه سمت سطح برابر صفر درجه و ضریب انعکاس زمین، با فرض زمین معمولی و بدون پوشش برف، برابر 0/2 در نظر گرفته شده است.

3.3. زاویه بهینه برای تنظیم ماهیانه

برای تنظیم کلکتور خورشیدی تخت با زاویه شیب ثابت ماهیانه، نتایج مربوط به متوسط ماهیانه تشعشع روزانه ورودی به سطح شیب‌دار، برای زوایای شیب از صفر تا 90° ، در نمودارهای شکل (3) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از نمودارها دیده می‌شود، مقدار تشعشع ورودی به‌طور قابل ملاحظه‌ای به شیب وابسته است. همچنین در هر ماه، یک زاویه شیبی وجود دارد که به‌زای آن، مقدار تشعشع کل ورودی حداکثر است. این زاویه، همان زاویه بهینه شیب کلکتور تخت برای آن ماه است که با زاویه بهینه در ماه‌های دیگر متفاوت است.

مقادیر محاسبه شده زوایای بهینه برای تنظیم ثابت ماهیانه و متوسط ماهیانه تشعشع روزانه به دست آمده براساس این زوایا بر مبنای سه نوع داده خورشیدی در جدول (4) ارائه شده است. با مقایسه زوایای بهینه به دست آمده از سه نوع داده خورشیدی، مشاهده می‌شود که برای ماه‌های فروردین تا مرداد، نتایج با حداکثر اختلاف 2 درجه به یکدیگر نزدیک هستند و این اختلاف برای سایر ماه‌ها اندکی بیشتر است. دلیل



شکل (3): تشعشع ورودی به کلکتور شیب‌دار برحسب زاویه شیب آن در ماه‌های سال شمسی

[21]، برای کاشان در ماه خرداد درست نیست و عمومی بودن روابط ایشان مورد تردید است.

جدول (5): رابطه و زاویه شیب بهینه ماهیانه از [21] و زاویه به‌دست‌آمده در این مطالعه برای کاشان (درجه)

ماه	رابطه شیب بهینه [21]	β_{opt} از [21]	β_{opt} این مطالعه
فروردین	$\beta_{opt} = 0.89\varphi - 11.878$	0/18	16
اردیبهشت	$\beta_{opt} = 0.381\varphi - 9.3689$	4/3	2
خرداد	$\beta_{opt} = 0.0235\varphi - 2.9196$	-1/2	0
تیر	$\beta_{opt} = 0.138\varphi - 4.2233$	4/0	0
مرداد	$\beta_{opt} = 0.3931\varphi - 0.4064$	8/12	11
شهریور	$\beta_{opt} = 0.1767\varphi + 23.08$	0/29	30
مهر	$\beta_{opt} = 0.6592\varphi + 23.08$	2/45	46
آبان	$\beta_{opt} = 0.9975\varphi + 23.192$	7/56	56
آذر	$\beta_{opt} = 0.9236\varphi + 29.184$	2/60	60
دی	$\beta_{opt} = 0.9901\varphi + 24.631$	57/9	59
بهمن	$\beta_{opt} = 0.6613\varphi + 26.283$	5/48	51
اسفند	$\beta_{opt} = 1.2657\varphi - 8.6368$	9/33	35

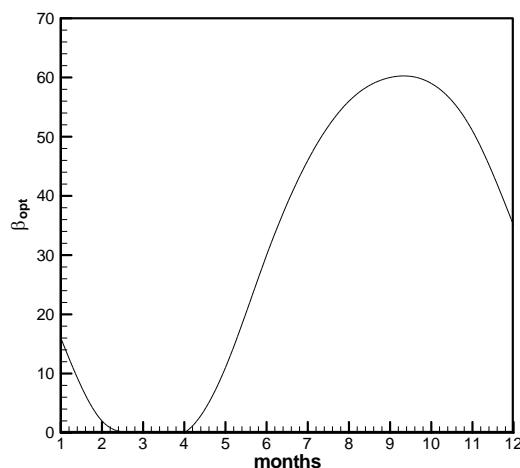
برای مقایسه‌ای دیگر، زاویه بهینه شیب کلکتور برای هر ماه با استفاده از روابط تجربی نیجگورودو و همکاران [3] که برای محدوده عرض جغرافیایی بین 60° - تا 60° ارائه شده‌اند، نیز به‌دست آمد. این روابط تجربی به‌همراه مقادیر محاسبه‌شده شیب بهینه مبتنی بر آن‌ها و شیب بهینه به‌دست‌آمده در این مطالعه، در جدول (6) ارائه شده است.

جدول (6): رابطه و زاویه شیب بهینه ماهیانه از [3] و زاویه به‌دست‌آمده در این مطالعه برای کاشان (درجه)

ماه	رابطه شیب بهینه [3]	β_{opt} از [3]	β_{opt} این مطالعه
فروردین	$\beta_{opt} = \varphi - 10$	6/23	16
اردیبهشت	$\beta_{opt} = 0.93\varphi - 24$	2/7	2
خرداد	$\beta_{opt} = 0.87\varphi - 34$	-8/4	0
تیر	$\beta_{opt} = 0.89\varphi - 30$	-1/0	0
مرداد	$\beta_{opt} = 0.97\varphi - 17$	6/15	11
شهریور	$\beta_{opt} = \varphi - 2$	6/31	30
مهر	$\beta_{opt} = \varphi + 12$	6/45	46
آبان	$\beta_{opt} = 0.93\varphi + 25$	2/56	56
آذر	$\beta_{opt} = 0.87\varphi + 34$	2/63	60
دی	$\beta_{opt} = 0.89\varphi + 29$	58/9	59
بهمن	$\beta_{opt} = 0.97\varphi + 17$	6/49	51
اسفند	$\beta_{opt} = \varphi + 4$	6/37	35

با مقایسه زوایای بهینه به‌دست‌آمده از داده‌های خورشیدی ایستگاه اصفهان و مقادیر به‌دست‌آمده از روابط نیجگورودو و همکاران مشاهده می‌شود که در بیشتر ماه‌ها آن‌ها به‌هم نزدیک هستند؛ البته زاویه بهینه منفی به‌دست‌آمده از روابط نیجگورودو و همکاران، برای

مقایسه مقدار تشعشع ورودی به سطحی با شیب بهینه از جدول (4) با مقدار تشعشع ورودی به سطح افقی از جدول (3)، اثر و اهمیت تنظیم مناسب شیب از نظر افزایش تشعشع ورودی، به‌خصوص در ماه‌های شهریور تا اسفند را نشان می‌دهد؛ برای نمونه، در ماه آذر میزان تشعشع ورودی روزانه به سطح شیب‌دار با زاویه بهینه 60° نسبت به تشعشع ورودی به سطح افقی 70% بیشتر شده است. نمودار زاویه شیب بهینه کلکتور در ماه‌های مختلف، براساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده اصفهان در شکل (4) ارائه شده است.



شکل (4): نمودار زاویه شیب بهینه کلکتور در ماه‌های سال شمسی در کاشان براساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده ایستگاه اصفهان

برای مقایسه از روابط طالبی‌زاده و همکاران [21] که برای محدوده عرض جغرافیایی بین 20° تا 40° ارائه شده‌اند، نیز زاویه بهینه شیب کلکتور برای تنظیم ماهیانه در کاشان به‌دست آمد. در جدول (5) روابط [21] برای شیب ماهیانه بر حسب عرض جغرافیایی و زوایای شیب بهینه کلکتور در کاشان (عرض جغرافیایی $33/59^\circ$) مبتنی بر این روابط و همچنین زوایای بهینه به‌دست‌آمده در این مطالعه، در ماه‌های مختلف ارائه شده است. از مقادیر جدول (5) دیده می‌شود که در بیشتر ماه‌ها، زاویه محاسبه‌شده توسط روابط طالبی‌زاده و همکاران [21] به زاویه بهینه محاسبه‌شده این مطالعه نزدیک است؛ ولی در ماه خرداد، زاویه بهینه به‌دست‌آمده از رابطه ایشان منفی است؛ یعنی کلکتور باید رو به شمال زاویه‌دار شود. این در صورتی است که زاویه بین راستای برخورد تشعشع خورشیدی به یک سطح افقی و امتداد شمال-جنوب در تمام روزهای سال، به‌جز در دو ظهر خورشیدی که برابر 90° است، همیشه کمتر از 90° است؛ لذا در نیمکره شمالی، به‌جز در مواقعی که کلکتور افقی قرار می‌گیرد (مانند ماه‌های خرداد و تیر)، در تمام ایام دیگر باید رو به جنوب زاویه داشته باشد؛ بنابراین، زاویه بهینه به‌دست‌آمده از روابط طالبی‌زاده و همکاران

5.3. زاویه بهینه برای تنظیم شش ماهه

زوایای بهینه شیب کلکتور برای تنظیم شش ماهه و متوسط شش ماهه تشعشع روزانه ورودی به کلکتور در این زاویه که بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه اصفهان و همچنین داده‌های تخمینی رثوفی‌راد [32] و سبزی‌پرور [33] به دست آمده‌اند، در جدول (9) ارائه شده‌اند. با وجود اینکه زوایای تنظیم شش ماهه به دست آمده از سه نوع داده مختلف چندان با هم تفاوتی ندارند، مقادیر متوسط تشعشع روزانه تفاوت‌های قابل ملاحظه دارند. این تفاوت‌ها به تخمینی بودن داده‌های رثوفی‌راد [32] و سبزی‌پرور [33] مربوط است.

جدول (9): زاویه شیب بهینه شش ماهه کلکتور (درجه) و متوسط

شش ماهه تشعشع ورودی روزانه ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$) در این زاویه در کاشان					
اندازه‌گیری شده اصفهان [23]		سبزی‌پرور [33]		رثوفی‌راد [32]	
β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$	β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$	β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$
9	25/56	12	31/01	8	21/58
51	19/80	55	26/66	49	15/31

6.3. زاویه بهینه برای تنظیم سالانه

مقادیر بهینه زوایای شیب برای تنظیم سالانه و متوسط سالانه تشعشع ورودی روزانه به کلکتور براساس این زوایا، که با استفاده از داده‌های خورشیدی ایستگاه اصفهان و داده‌های تخمینی رثوفی‌راد [32] و سبزی‌پرور [33] به دست آمده‌اند، در جدول (10) ارائه شده‌اند.

جدول (10): زاویه شیب بهینه سالانه (درجه) و متوسط سالانه تشعشع ورودی روزانه ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$) در این زاویه در کاشان

اندازه‌گیری شده اصفهان [23]		سبزی‌پرور [33]		رثوفی‌راد [32]	
β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$	β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$	β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$
29	21/56	33	27/19	27	17/66

از نتایج ارائه شده در جدول (10) مشخص است که هر چند زوایای به دست آمده از سه نوع داده مختلف با هم تفاوت چندانی ندارند، متوسط تشعشع روزانه مربوط به آن‌ها تفاوت‌های چشمگیری با هم دارند. این تفاوت هم ناشی از تفاوت تشعشع کل ورودی به سطح افقی به دلیل عدم دقت داده‌های تخمینی است و هم به تأثیر طولانی مدت تنظیم شیب مربوط است.

رابطه تجربی طالبی‌زاده و همکاران [21] برای تنظیم سالانه عبارت

است از:

$$\beta_{opt} = 0.6804\varphi + 7.203 \quad (10)$$

ماه‌های خرداد و تیر، به دلایلی که قبلاً ذکر شد، درست نیست. همچنین برای ماه‌های فروردین و اردیبهشت نیز، اختلاف مقادیر به دست آمده زیاد است. نادرستی برخی مقادیر و اختلاف‌ها بیانگر این است که روابط نیجگورودو و همکاران [3] نیز به طور عمومی قابل استفاده نیستند و مشخص می‌کند که تنها عرض جغرافیایی تعیین‌کننده نیست و شرایط اقلیمی بسیار بااهمیت است.

4.3. زاویه بهینه برای تنظیم فصلی

بر مبنای داده‌های ایستگاه اصفهان و همچنین مقادیر تخمینی رثوفی‌راد [32] و سبزی‌پرور [33] تشعشع ورودی به سطح شیب‌دار در هر فصل برای زاویه شیب بین صفر تا 90° محاسبه شد. برای هر نوع داده، زاویه‌ای که به ازای آن، مقدار تشعشع کل ورودی به سطح شیب‌دار حداکثر شد، به عنوان زاویه بهینه برای آن فصل انتخاب و در جدول (7) در کنار متوسط فصلی تشعشع روزانه آن فصل ارائه شده است.

جدول (7): زاویه شیب بهینه فصلی کلکتور (درجه) و متوسط فصلی تشعشع ورودی روزانه ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$) در این زاویه در کاشان

اندازه‌گیری شده اصفهان [23]		سبزی‌پرور [33]		رثوفی‌راد [32]	
β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$	β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$	β_{opt}	$\bar{H}_{T,opt}$
3	24/96	3	27/13	3	20/89
14	26/32	17	35/23	13	22/37
53	18/78	57	29/84	52	15/72
48	20/85	51	23/56	45	14/94

در جدول (8)، روابط تجربی طالبی‌زاده و همکاران [21] برای تنظیم فصلی، به همراه زوایای بهینه فصلی کلکتور در کاشان مبتنی بر این روابط و زوایای بهینه به دست آمده در این مطالعه ارائه شده است.

جدول (8): رابطه و زاویه شیب بهینه فصلی از [21] و زاویه به دست آمده در این مطالعه برای کاشان (درجه)

فصل	رابطه شیب بهینه [21]	β_{opt} از [21]	β_{opt} این مطالعه
بهار	$\beta_{opt} = 0.4885\varphi - 10.27$	1/6	3
تابستان	$\beta_{opt} = 0.2631\varphi + 4.961$	8/13	14
پاییز	$\beta_{opt} = 0.8966\varphi + 23.81$	9/53	53
زمستان	$\beta_{opt} = 1.073\varphi + 10.3$	46/3	48

همان‌طور که در جدول (8) دیده می‌شود، زوایای بهینه فصلی به دست آمده از روابط تجربی طالبی‌زاده و همکاران [21] به زوایای بهینه این مطالعه، که براساس داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه اصفهان به دست آمده‌اند، نزدیک هستند.

- زاویه بهینه برای تنظیم فصلی در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب 3° ، 14° ، 53° و 48° است. تفاوت زاویه بهینه، به خصوص در بهار و تابستان نسبت به پاییز و زمستان، بر اهمیت تنظیم فصلی، ولی در درجه دوم اهمیت نسبت به تنظیم ماهیانه، تأکید دارد.

- زاویه بهینه برای تنظیم شش‌ماهه برای شش ماه اول سال (فصول بهار و تابستان) و شش ماه دوم سال (فصول پاییز و زمستان) به ترتیب 9° و 51° است. تفاوت چشمگیر این دو زاویه بیانگر اهمیت تنظیم زاویه شیب به صورت حداقل هر شش ماه یک بار است.

- زاویه بهینه به دست آمده برای تنظیم سالانه برابر 29° است که به عرض جغرافیایی شهر کاشان ($33/59^\circ$) نزدیک است.

5. تشکر و قدردانی

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به دلیل حمایت مالی از انجام این تحقیق در قالب یک طرح پژوهشی مصوب تقدیر و تشکر می‌کنند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

\bar{H}	متوسط ماهیانه تشعشع دریافتی روزانه از خورشید
\bar{K}_T	متوسط ماهیانه شاخص صافی هوای روزانه
n	شماره روز متوسط هر ماه از ابتدای سال میلادی
\bar{R}_b	نسبت متوسط ماهیانه تشعشع مستقیم روزانه

علائم یونانی

β	زاویه شیب سطح کلکتور
γ	زاویه سمت سطح
δ	زاویه انحراف یا میل خورشیدی
ρ_g	ضریب انعکاس زمین
φ	عرض جغرافیایی
ω_s	زاویه ساعت غروب خورشید برای سطح افقی
ω'_s	زاویه ساعت غروب خورشید برای سطح شیب‌دار

زیرنویس‌ها

b	تشعشع مستقیم
d	تشعشع پخش شده
o	سطح افقی
opt	بهینه
T	سطح شیب‌دار

با جای‌گذاری عرض جغرافیایی کاشان در رابطه (12) زاویه 30° برای تنظیم سالانه به دست می‌آید. این زاویه به مقدار به دست آمده مبتنی بر داده‌های خورشیدی ایستگاه اصفهان بسیار نزدیک است. بسیاری از مطالعات انجام گرفته از جمله [10] نشان داده‌اند که زاویه بهینه برای تنظیم سالانه، به عرض جغرافیایی محل قرارگیری کلکتور نزدیک است. زاویه بهینه 29° به دست آمده در مطالعه حاضر نیز بسیار نزدیک به عرض جغرافیایی مرکز شهرستان کاشان ($33/59^\circ$) است.

4. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شیب بهینه کلکتورهای خورشیدی در شهرستان کاشان برای تنظیم ماهیانه، فصلی، شش‌ماهه و سالانه به دست آمد. به دلیل فقدان داده‌های اندازه‌گیری شده خورشیدی، برای انجام محاسبات از داده‌های ایستگاه اصفهان و برای انجام مقایسه از داده‌های تخمینی نیز استفاده شد. از آنجا که اطلاعات متوسط ماهیانه تشعشع روزانه در دسترس بود، محاسبات برای تنظیم ماهیانه، فصلی، شش‌ماهه و سالانه انجام گرفت. همچنین زوایای بهینه به دست آمده از این داده‌ها با نتایج روابط عمومی ارائه شده توسط طالبی‌زاده و همکاران [21] (برای تنظیم ماهیانه، فصلی و سالانه) و نیجگوردو و همکاران [3] (فقط برای تنظیم ماهیانه) مقایسه شد. نتایج این مقایسه در مواردی ضعف این روابط را از نظر عمومی بودن مشخص کرد و نشان داد که از آنجا که تشعشع خورشیدی به طوری قابل ملاحظه به وضعیت اقلیمی وابسته است، برای پیش‌بینی شیب بهینه ارائه روابطی که فقط به عرض جغرافیایی وابسته باشند، مناسب نیست؛ در نتیجه، یافته‌های این تحقیق که مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه اصفهان هستند، به دلیل تشابه اقلیمی و نزدیکی عرض جغرافیایی آن با کاشان، بیشتر از سایر نتایج اعتبار دارند. خلاصه نتایج به دست آمده برای زاویه بهینه کلکتور واقع در شهر کاشان به شرح زیر هستند:

- حداکثر و حداقل زاویه بهینه برای تنظیم ماهیانه، به ترتیب 60° برای ماه آذر و صفر درجه برای ماه‌های خرداد و تیر می‌باشد. در ماه آذر تشعشع ورودی روزانه به کلکتوری با شیب بهینه در مقایسه با تشعشع ورودی به سطح افقی 70% بیشتر است و در سایر ماه‌ها میزان افزایش تفاوت می‌کند. با توجه به نتایج مطالعه یکوپ و مالیک [5]، کل تشعشع ورودی به کلکتور در تنظیم ماهیانه نزدیک به مقدار حداکثر ممکن تشعشع ورودی برای شرایطی است که زاویه شیب کلکتور به صورت روزانه تنظیم شود؛ بنابراین، برای بهترین بهره‌برداری از انرژی خورشیدی و جذب بیشترین مقدار از تشعشع، تنظیم زاویه شیب حتی المقدور به صورت هر ماه یک بار توصیه می‌شود.

- [1] El-Kassaby, M.M., "Monthly and Daily Optimum Tilt Angle for South Facing Solar Collectors; Theoretical Model, Experimental and Empirical Correlations", Solar and Wind Technology, Vol. 5, No. 6, pp. 589-596, 1988.
- [2] Soulayman, S.S.H., "On the Optimization Tilt of Solar Absorber Plates", Renewable Energy, Vol. 1, No. 3/4, pp. 551-554, 1991.
- [3] Nijegorodov, N., Devan, K.R.S., Jain, P.K., Carlsson S. "Atmospheric Transmittance Models and Analytical Method to Predict the Optimum Slope of an Absorber Plate, Variously Oriented at any Latitude", Renewable Energy, Vol. 4, No. 5, pp. 529-543, 1994.
- [4] Morcos, V.H., "Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Collectors in Assiut, Egypt", Renewable Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 291-298, 1994.
- [5] Yakup, M., Malik, A.Q., "Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Collector in Brunei Darussalam", Renewable Energy, Vol. 24, No. 2, pp. 223-234, 2001.
- [6] Bari, S., "Optimization Orientation of Domestic Solar Water Heaters for the Low Latitude Countries", Energy Conversion and Management, Vol. 42, pp. 1205-1214, 2001.
- [7] Gunerhan, H., Hepbasli, A., "Determination of the Optimum Tilt Angle of Solar Collectors for Building Applications", Building and Environment, Vol. 42, No. 2, pp. 779-783, 2007.
- [8] Jamil Ahmad, M., Tiwari, G.N., "Optimization of Tilt Angle for Solar Collector to Receive Maximum Radiation", The Open Renewable Energy Journal, Vol. 2, pp. 19-24, 2009.
- [9] Skeiker, K., "Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Collectors in Syria", Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 4, pp. 2439-2448, 2009.
- [10] Benganem, M., "Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia", Applied Energy, Vol. 88, No. 4, pp. 1427-1433, 2011.
- [11] کیانی فر، علیرضا، موسوی، سید مسعود، حق پرست، پیام، «برآورد تابش کل و تعیین مقدار بهینه زاویه سطح شیب‌دار برای کلکتور خورشیدی در منطقه مشهد»، همایش ملی انرژی، دوره ششم، خرداد 1386.
- [12] عبدالزاده، مرتضی، جعفری، سعید، رهنما، محمد، عامری، مهران، «تعیین زاویه بهینه پانل‌های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان»، نشریه بین المللی علوم مهندسی، جلد 19، شماره 10، صفحه 91-98، دانشگاه علم و صنعت ایران، 1387.
- [13] عبدالزاده، مرتضی، رهنما، محمد، فدایی‌نژاد، روح‌الله، «تعیین زاویه بهینه شیب و سمت سطح کلکتورهای خورشیدی در شهر کرمان»، کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، دوره اول، دانشگاه بیرجند، 2010.
- [14] ثقفی، محمدجواد، اسدی خلجی، مرتضی، پوینده، راضیه، «شیب بهینه گردآورهای خورشیدی و مقایسه با حالت نصب شده روی نمای جنوبی در تهران»، نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی، شماره 44، صفحه 57-63، دانشگاه تهران، 1389.
- [15] جعفرکاظمی، فرزاد، سعدآبادی، سید علی، «تعیین زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت در تهران»، نشریه مهندسی مکانیک، شماره 79، صفحه 59-66، 1390.
- [16] Moghadam, H., Farshchi Tabrizi, F., Zolfaghari Sharak, A., "Optimization of Solar Flat Collector Inclination", Desalination, Vol. 265, Nos. 1-3, pp. 107-111, 2011.
- [17] Abdolzadeh, M., Mehrabian, M.A., "Obtaining Maximum Input Heat Gain on a Solar Collector under Optimum Slope Angle", International Journal of Sustainable Energy, Vol. 30, No. 6, pp. 353-366, 2011.
- [18] Abdolzadeh, M., Mehrabian, M.A., "The Optimal Slope Angle for Solar Collectors in Hot and Dry Parts of Iran", Energy Sources, Vol. 34, No. 6, pp. 519-530, 2012.
- [19] Talebizadeh, P., Mehrabian, M.A., Abdolzadeh, M., "Prediction of the Optimum Slope and Surface Azimuth Angles Using the Genetic Algorithm", Energy and Buildings, Vol. 43, No. 11, pp. 2998-3005, 2011.
- [20] Talebizadeh, P., Mehrabian, M.A., Abdolzadeh, M., "A Study on the Different Components of Solar Radiation in Order to Calculate the Optimum Solar Angles and the Gain of Solar Energy Using the Genetic Algorithm", 5th International Conference on Energy Sustainability, USA, 2011.
- [21] Talebizadeh, P., Mehrabian, M.A., Abdolzadeh, M., "Determination of Optimum Slope Angles of Solar Collectors Based on New Correlations", Energy Sources, Vol. 33, No. 17, pp. 1567-1580, 2011.
- [22] Talebizadeh, P., Mehrabian, M.A., Abdolzadeh, M., "Effect of Solar Angles on Incident Energy of the Flat Collectors", Journal of Energy Engineering Management, Vol. 2, No. 4, pp. 12-23, 1391.
- [23] Salvatipour, H.S., Abdolzadeh, M., Beheshti, H.K., Rahnema, M. "Solar Energy Enhancement of a Solar Collector by an Optimum Slope Angle in Isfahan, Central Region of Iran", Energy Sources, Vol. 33, No. 17, pp. 1625-1635, 2011.
- [24] Jafarkazemi, F., Saadabadi, S.A., Pasharshahi, H., "The Optimum Tilt Angle for Flat-Plate Solar Collectors in Iran", Journal of Renewable and Sustainable Energy 4, 013118, pp. 1-15, 2012.
- [25] بهرامی، الهه، عباسپور ثانی، کمال، «تعیین زاویه شیب بهینه آرایه‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی کرج»، نشریه انرژی ایران، دوره 15، شماره 2، صفحه 37-44، تهران، 1391.
- [26] خراسانی‌زاده، حسین، آقایی، علیرضا، احترام، حمیدرضا، «پتانسیل سنجی انرژی خورشیدی و تعیین زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی در شهر ارومیه»، همایش ملی انرژی باد و خورشید، دوره دوم، تهران، اسفند 1391.
- [27] Keshavarz, S.A., Talebizadeh, P., Adalatia, S., Mehrabian, M.A., Abdolzadeh, M., "Optimal Slope-Angles to Determine Maximum Solar Energy Gain for Solar Collectors Used in Iran", International Journal of Renewable Energy Research, Vol. 2, No. 4, pp. 665-673, 2012.

- [28] کشاورز، سید علی، طالبی زاده، پویان، عدالتی، سعید، مهربان، مظفرعلی، عبدل زاده، مرتضی، صفاری پور، محمدحسن، جنتی فر، رضا، «طلس ماکزیمم انرژی دریافتی خورشیدی در بهینه زوایای کلکتورهای خورشیدی برای ایران»، کنفرانس سالانه انرژی پاک، دوره دوم، کرمان، تیر 1391.
- [29] کشوری، علی، فتاح نظری، رضایی، سجاد، مرزبان صفری، «تعیین زاویه بهینه سطح شیب دار و تابش کل برای کلکتورهای خورشیدی در خرم آباد»، همایش ملی انرژی های نو و پاک، دوره اول، اردیبهشت 1392.
- [30] <http://www.chaharmahalmet.ir/iranarchive.asp>
- [31] Duffie, J.A., Beckman, W.A., "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Son, New York, 2006.
- [32] رئوفی راد، مجید، طراحی سیستم های خورشیدی ساختمان در ایران، انتشارات شرکت بهینه سازی مصرف سوخت، 1385.
- [33] Sabziparvar, A.A. "A Simple Formula for Estimating Global Solar Radiation in Central Arid Deserts of Iran", Renewable Energy, Vol. 33, No. 5, pp. 1002–1010, 2008.