

استخراج مدل کلی تغییرات زاویه بهینه برای دریافت بیشترین تابش در ایران

جواد مدرسسی^۱، اسکندر قلی‌پور^۲، محمد حسین نصیری^۳

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۸/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۴/۱/۳۱

چکیده:

عوامل مختلفی بر روی توان دریافتی دریافت کننده‌های خورشیدی موثر هستند که از بین آنها، تنها زاویه دریافت کننده‌ها می‌تواند توسط کاربران تعیین شود. از این رو، در این مقاله، رابطه‌ای برای زاویه بهینه روزانه برای ماه‌های شمسی پیشنهاد می‌شوند که برای همه شهرهای ایران قابل کاربرد است. رابطه بدست آمده تابعی از عرض جغرافیایی و شماره روز سال شمسی است و با استفاده از آن می‌توان زوایای بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه را تنها با داشتن یک معادله برای هر نقطه از ایران محاسبه نمود. برای آنکه درستی روابط بدست آمده مورد بررسی قرار گیرد، نتایج بدست آمده با مقادیر ارائه شده در مقالات مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی:

انرژی خورشیدی، دریافت کننده‌های خورشیدی، زاویه بهینه

J.modarresi@eng.ui.ac.ir
E.gholipour@eng.ui.ac.ir
Nasri_smh@yahoo.com

(۱) دانشجوی دکتری برق قدرت، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)
(۲) عضو هیئت علمی دانشگاه اصفهان، استادیار گروه برق
(۳) دفتر فنی انتقال، معاونت بهره‌برداری، شرکت برق منطقه‌ای اصفهان

مقدمه

امروزه با گسترش صنعت و نیاز روز افزون به انرژی از یک طرف و محدودیت‌های منابع فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی از طرف دیگر، انرژی‌های تجدید پذیر همانند انرژی خورشیدی، بادی و جزر و مد مورد توجه قرار گرفته‌اند. در دسترس بودن این انرژی‌ها وابسته به شرایط طبیعی بوده و استفاده حداکثری از این انرژی‌ها نیازمند مطالعه دقیق عوامل طبیعی تاثیرگذار است. به عنوان مثال، برای استفاده حداکثری از انرژی‌های خورشیدی، بادی و جزر و مدی به ترتیب باید رفتار خورشید، باد و دریا به دقت مورد مطالعه قرار گیرد.

در میان انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی خورشیدی به دلیل دارا بودن مزایای مختلف از دیر باز مورد توجه انسان بوده و از آن در مصارف مختلف استفاده می‌شده است [۲۲]. مقدار دریافت انرژی از خورشید به عوامل مختلفی از جمله زاویه قرارگیری دریافت کننده‌های خورشیدی، شرایط جوی و موقعیت خورشید بستگی دارد. یکی از راه‌های بیشینه کردن دریافت انرژی از خورشید، تنظیم درست زاویه دریافت کننده‌هاست.

مطالعات زیادی برای تعیین زاویه بهینه دریافت کننده‌های خورشیدی برای دریافت بیشترین انرژی از خورشید انجام شده است و نشان داده شده است که زاویه بهینه به عرض جغرافیایی وابسته است که از جمله آنها می‌توان به [۹ و ۲۱ و ۱۶ و ۸ و ۱۳] اشاره کرد که در آنها زوایای بهینه دریافت کننده‌های خورشید برای کشورهای مختلف و برای ماه‌های میلادی محاسبه شده است. در [۱۰] تغییرات زاویه بهینه در طول یک سال و برای ماه‌های میلادی در کشور ترکیه ترسیم شده و معادلات تغییرات آن نیز به دست آمده است. همچنین در [۱۸] روابطی برای تعیین زوایای بهینه ماهانه در عرض‌های جغرافیایی مختلف ارائه شده است.

در مرجع [۱۲] زاویه بهینه سالانه برابر $S_{opt(y)} = \{-10\}$ محاسبه شده است که عرض جغرافیایی است. در [۱۷] این زاویه برابر $S_{opt(y)} = \{\pm 15\}$ پیشنهاد شده است. در معادلات بالا، علامت مثبت برای نیمکره شمالی و علامت منفی برای نیمکره جنوبی است. در [۱۹] زاویه بهینه سالانه برابر $S_{opt(y)} = 0.6804\{ + 7.203\}$ به دست آمده است. علاوه بر این، ۱۲ معادله برای ماه‌ها و ۴ معادله برای فصل‌ها پیشنهاد شده است که تمامی این معادلات تابعی خطی از عرض جغرافیایی هستند. به عبارت دیگر، برای یک سال، ۱۷ معادله برای تعیین زاویه بهینه وجود دارد (۱۲ تا برای ماه، ۴ تا برای فصل و یکی برای سال).

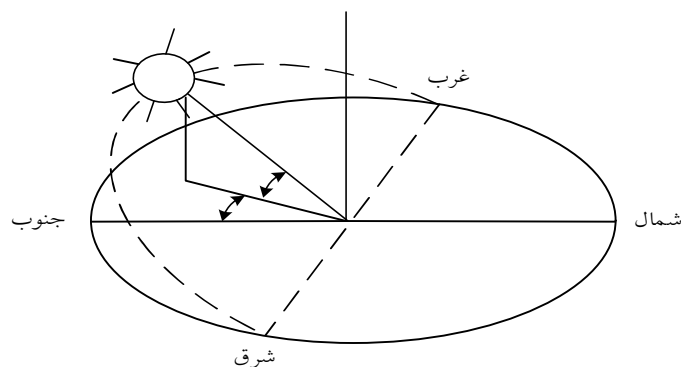
ایران جزو کشورهای مستعد استفاده از انرژی خورشیدی است. از این رو، انرژی خورشیدی می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی پاک مورد استفاده قرار گیرد [۵]. در مراجع [۱۹ و ۲۰ و ۱۴] تغییرات زاویه بهینه برای ایران و بر حسب ماه‌های میلادی مورد بررسی قرار گرفته است که در برخی از آنها روابطی برای تغییرات زاویه بهینه ماهانه و سالانه ارائه شده است.

تعیین روابط تغییرات زوایا بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه بر اساس ماههای شمسی مورد مطالعه قرار نگرفته و تنها در چند مطالعه محدود زوایای بهینه برای ایران و بر اساس ماههای شمسی استخراج شده‌اند که می‌توان به [۳ و ۴] اشاره کرد. در [۳] زاویه بهینه برای شهر کرمان و در [۴] زوایای بهینه ماهانه و سالانه دریافت کننده‌های خورشیدی ثابت برای شهرهای مختلف ایران محاسبه شده است. اما در هیچیک از این مطالعات، رابطه تغییرات زوایای بهینه برای یک سال شمسی به دست نیامده است. همچنین در مقالات بررسی شده هیچ رابطه‌ای برای زاویه بهینه روزانه برای سال شمسی پیشنهاد نشده است.

در این مقاله، یک رابطه کلی برای تعیین زاویه بهینه روزانه برای ماههای شمسی استخراج می‌شود. رابطه استخراج شده تابعی از عرض جغرافیایی و شماره روز سال شمسی است و می‌تواند برای همه شهرهای ایران (بجز شهرهای شمالی) مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر، با داشتن تغییرات زاویه بهینه روزانه و محاسبه میانگین آن برای ماه، فصل و سال می‌توان معادلات مربوط به زاویه بهینه ماهانه، فصلی و سالانه را محاسبه نمود. بنابراین، با معادله پیشنهاد شده در این مقاله که زوایای بهینه روزانه را محاسبه می‌کند، می‌توان تنها با داشتن یک معادله و محاسبه میانگین آن تمام زوایای بهینه ماهانه، فصلی و سالانه را محاسبه نمود و نیازی به داشتن ۱۷ معادله نخواهد بود. برای بررسی درستی رابطه کلی بدست آمده برای زاویه بهینه روزانه، مقدار زوایای بهینه فصلی و سالانه با استفاده از معادله پیشنهاد شده محاسبه می‌شود و نتیجه حاصل با نتایج ارائه شده در [۱۹] مقایسه می‌شود. نتیجه مقایسه نشان می‌دهد که روابط بدست آمده با استفاده از معادله زوایا بهینه روزانه دارای دقت کافی هستند.

بررسی موقعیت خورشید در آسمان

در تعیین زاویه بهینه دریافت کننده‌های خورشیدی، دانستن موقعیت خورشید در زمان‌های مختلف روز می‌تواند مفید باشد. زیرا زاویه تابش خورشید ساعت به ساعت تغییر کرده و موجب تغییر مقدار تابش بر روی یک منطقه می‌شود. موقعیت خورشید در مختصات کروی می‌تواند به صورت شکل (۱) نشان داده شود.



شکل (۱) موقعیت خورشید در آسمان

در شکل (۱)، زاویه ارتفاع خورشید^۱ و زاویه آزیموت^۲ هستند که توسط روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند [۱۱].

$$\sin r = \cos \{ \times \cos u \times \cos \tilde{S} + \sin \{ \times \sin u \} \quad (1)$$

$$\sin \# = \frac{\cos u \times \cos \tilde{S}}{\cos r} \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)، زاویه انحراف خورشید و زاویه ساعت خورشیدی هستند که u و $\#$ به ترتیب توسط معادلات (۳) و (۴) به دست می‌آیند [۷].

$$u = 23/46 \sin \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (3)$$

$$\tilde{S} = 15(t - 12) \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴)، n بیانگر شماره روز (بر اساس سال شمسی و برای اول فروردین برابر یک) بوده و t بیانگر زمان بر حسب ساعت است. برای بیشینه شدن تابش خورشید بر روی دریافت کننده‌های خورشیدی، این دریافت کننده‌ها باید همزمان با خورشید طوری حرکت کنند که خورشید همیشه به صورت عمود بر آنها بتابد [۸].

محاسبه تابش خورشید در خارج از جو زمین

مقدار تابش متوسط روزانه در یک ماه و بر روی یک صفحه خارج از جو زمین با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید [۷].

$$\bar{H} = \frac{24 \times 3600}{f} I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot (n + 1)}{365} \right) \right) \times \left(\cos \{ \cos u \sin \tilde{S}_s + \frac{f \tilde{S}_s}{180} \sin \{ \sin u \} \right) \quad (5)$$

در این رابطه، \bar{H}_0 شدت تابش خورشید بر روی یک صفحه افقی بر حسب $J/(m^2 \cdot day)$ و I_{sc} ثابت خورشیدی است. مقادیر متفاوتی برای I_{sc} در مقالات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۷ و ۱۵ و ۱]. در این مقاله، مقدار I_{sc} برابر $1353 W/m^2$ در نظر گرفته می‌شود. زاویه طلوع و غروب خورشید است که برای طلوع خورشید منفی و برای غروب خورشید مثبت بوده و از رابطه (۶) به دست می‌آید [۷].

$$\tilde{S}_s = \cos^{-1}(-\tan u \times \tan \{ \}) \quad (6)$$

1) Zenith angle
2) Azimuth angle

روابط (۳) و (۵) فقط برای ماههای شمسی برقرار هستند. برای آنکه این روابط برای ماههای میلادی نیز قابل استفاده باشند، باید اختلاف تعداد روزهای بین مبدا تقویم هجری شمسی و هجری میلادی در نظر گرفته شود. برای این منظور، باید n به صورت رابطه (۷) اصلاح شود [۱].

$$n = N - ۸۱ \quad (۷)$$

که در آن، N شماره روز سال با شروع از مبدا تقویم هجری میلادی است.

تابش خورشید در سطح زمین

نور خورشید در عبور از جو زمین مقداری پخش، مقداری جذب و بقیه به سطح زمین می‌رسد. جذب و پخش نور خورشید در جو زمین توسط مولکول‌های ازن، ذرات آب و ذرات معلق انجام می‌شود. از این رو، مقدار دریافت انرژی خورشید در سطح زمین کمتر از خارج اتمسفر است.

برای تعیین تابش خورشید روی سطح زمین با توجه به تابش خورشید در خارج از اتمسفر زمین، ضریبی به نام \bar{k}_t تعریف می‌شود. \bar{k}_t میانگین ماهانه ضریب صافی هواست و به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (۸)$$

که در آن، \bar{H} مقدار میانگین تابش ماهانه رسیده به سطح زمین بر حسب $J/(m^2 \cdot day)$ ، \bar{H}_o میانگین ماهانه تابش رسیده در بالای جو بر حسب $J/(m^2 \cdot day)$ ، \bar{S} میانگین ماهانه ساعات آفتابی، \bar{S}_o میانگین ماهانه طول روز، a و b ضرایب ثابت رگرسیون هستند که باید برای هر منطقه مشخص شوند [۶]. مقدار \bar{k}_t در [۲] برای شهرهای مختلف ایران محاسبه شده است. در [۱۵] نیز ضرایب a و b برای شهرهای مختلف ایران به دست آمده است. در این مقاله، از مقادیر ارائه شده در [۲] برای \bar{k}_t استفاده می‌شود.

تابش کل رسیده به سطح زمین، برابر مجموع تابش مستقیم و تابش پراکنده است. از این رو، مقدار کل تابش روزانه در یک ماه و در سطح زمین (\bar{H}_T) با رابطه (۹) به دست می‌آید [۷].

$$\bar{H}_T = R\bar{H} \quad (۹)$$

در این رابطه، R به صورت نسبت تابش متوسط روزانه بر روی یک سطح شیب‌دار به تابش متوسط روزانه بر روی سطح افقی در یک ماه تعریف می‌شود و با معادله (۱۰) قابل محاسبه است [۷].

$$R = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) R_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos S}{\sqrt{2}\bar{H}}\right) + \dots \left(\frac{1 - \cos S}{2}\right) \quad (10)$$

در اینجا، زاویه دریافت کننده نسبت به افق، R_b نسبت تابش متوسط بر روی یک سطح شیبدار به مقدار تابش متوسط بر روی یک سطح افقی در یک ماه است. ضریب انعکاس زمین بوده و برابر $0/2$ در نظر گرفته می‌شود. \bar{H}_d تابش پراکنده است و با معادله (۱۱) به دست می‌آید [۷].

$$\bar{H}_d = \bar{H} \left(1 - 1/13 \bar{K}_T\right) \quad (11)$$

مقدار R_b برای یک صفحه رو به جنوب به صورت معادله (۱۲) است [۷].

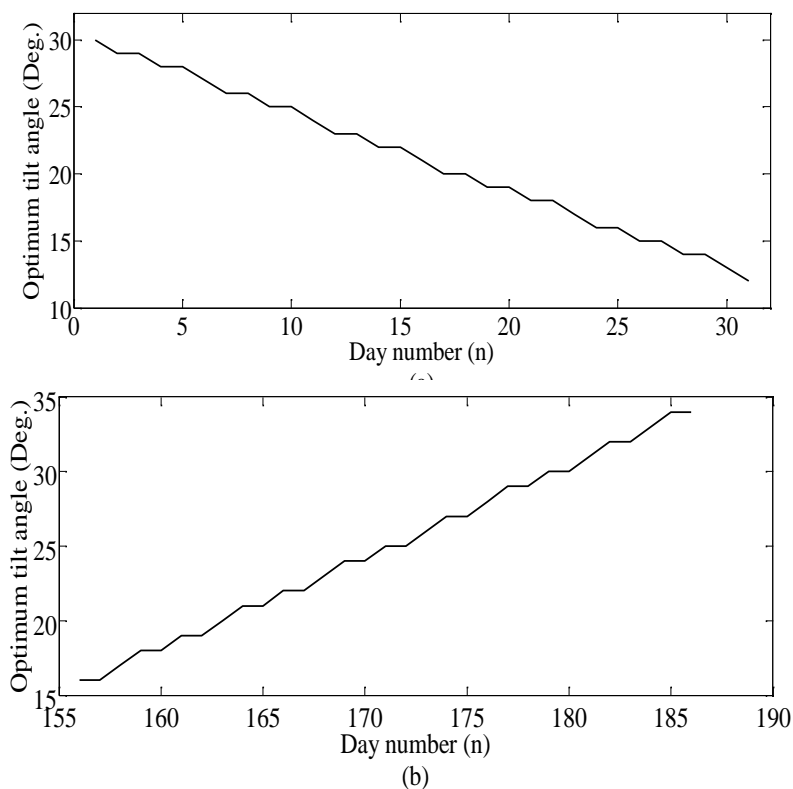
$$R_b = \frac{\cos(\{ - s \}) \cos(u) \cos(\tilde{S}'_s) + \frac{\tilde{S}'_s f}{180} \sin(\{ - s \}) \sin(u)}{\cos(\{ \}) \cos(u) \cos(\tilde{S}_s) + \frac{\tilde{S}_s f}{180} \sin(\{ \}) \sin(u)} \quad (12)$$

که \tilde{S}'_s زاویه غروب خورشید برای یک سطح شیبدار بوده و توسط رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$\tilde{S}'_s = \min \left\{ \tilde{S}_s, \cos^{-1}(-\tan(\{ - s \}) \times \tan u) \right\} \quad (13)$$

تغییرات زاویه بهینه روزانه

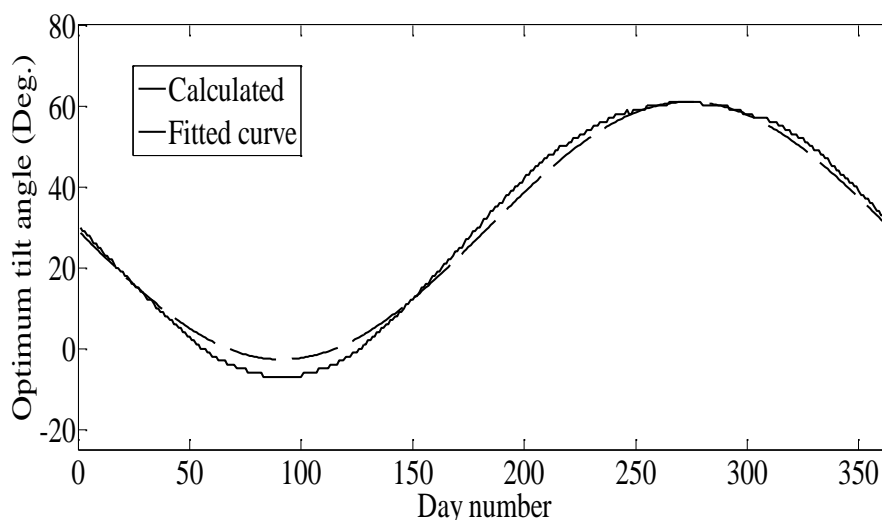
با توجه به رابطه (۹)، تنها مولفه‌ای که در یک مکان مشخص می‌تواند برای حداکثر شدن دریافت انرژی از خورشید توسط کاربر تغییر داده شود، زاویه دریافت کننده خورشیدی است. بنابراین، در این مقاله زاویه دریافت کننده (S) با گام‌های $0/1$ درجه در نرم‌افزار MATLAB تغییر داده می‌شود تا بیشترین مقدار تابش در یک روز به دست آید. سپس زاویه متناظر با این تابش بیشینه به عنوان زاویه بهینه انتخاب می‌گردد. برای بررسی نحوه تغییرات زاویه بهینه روزانه، ابتدا تغییرات زاویه بهینه برای دو ماه فروردین و شهریور در شهر اصفهان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۲) تغییرات زاویه بهینه برای این دو ماه نشان داده شده است.



شکل ۲) تغییرات زاویه بهینه روزانه برای دو ماه در شهر اصفهان: (a) فروردین، (b) شهریور

با توجه به شکل (۲)، تغییرات زاویه بهینه برای هر دو ماه تقریباً به صورت خطی است. اما این تغییرات برای ماه فروردین به صورت کاهشی و برای ماه شهریور به صورت افزایشی است. نحوه تغییرات زاویه بهینه به تغییرات تابش خورشید در ماه‌های فروردین و شهریور وابسته است. در اوایل تابستان، خورشید تقریباً به صورت عمود بر سطح زمین می‌تابد و در اوایل زمستان تابش خورشید به بیشترین انحراف از خط عمود می‌رسد. بنابراین، برای آنکه خورشید بر روی دریافت‌کننده به صورت عمود بتابد، لازم است تا دریافت‌کننده در اوایل تابستان دارای کمترین زاویه نسبت به افق بوده و در اوایل زمستان زاویه آن نسبت به افق حداکثر مقدار خود را داشته باشد. از این‌رو، در ماه فروردین زاویه بهینه روند کاهشی دارد تا به کمترین مقدار خود برسد و در ماه شهریور دارای روند افزایشی است تا زاویه بهینه حداکثر شود.

برای اینکه دید بهتری در مورد نحوه تغییرات زاویه بهینه روزانه در طول سال به دست آید، در شکل (۳) تغییرات زاویه بهینه روزانه در طول یک سال شمسی برای شهر اصفهان رسم شده است (نمودار پر رنگ). در این شکل، محور افقی نشان دهنده شماره روزهای سال شمسی با شروع از اول فروردین است.



شکل ۳) تغییرات زاویه بهینه روزانه برای شهر اصفهان طی یک سال شمسی

نکته قابل توجه در شکل (۳) این است که زاویه بهینه طی یک سال شمسی به صورت سینوسی تغییر می‌کند و دارای یک مقدار DC است. همچنین روند تغییرات زاویه بهینه در فصل‌های بهار و زمستان کاهشی و در فصل‌های تابستان و پاییز افزایشی است. با توجه به شکل (۳)، تغییرات زاویه بهینه برای هر مکان با عرض جغرافیایی مشخص را می‌توان با یک تابع سینوسی و یک مقدار DC مدل کرد که نمایش ریاضی آن به صورت رابطه (۱۴) است.

$$S_{opt(d)} = a - b \times \sin(cn) \quad (14)$$

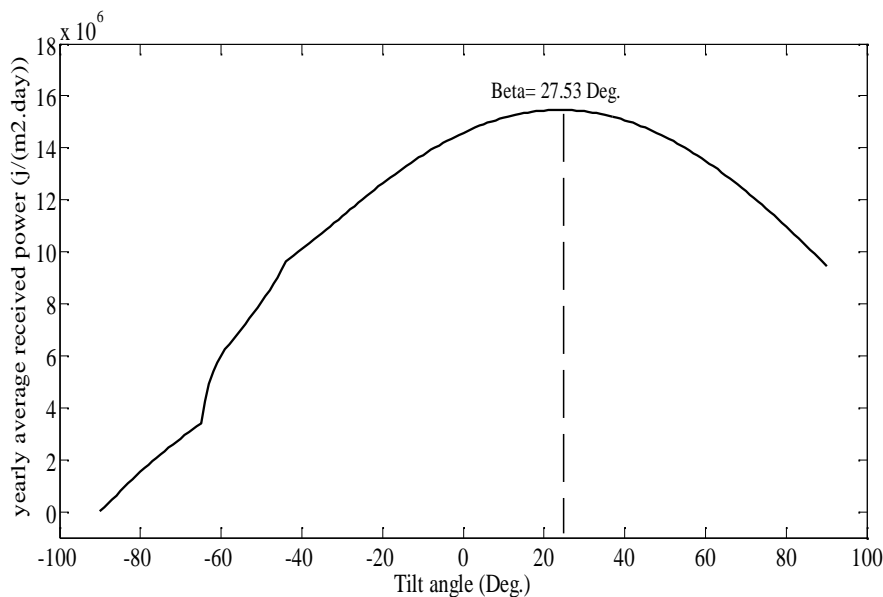
در این معادله، a ، b و c ضرایب ثابت هستند و n شماره روز سال شمسی با شروع از اول فروردین است. با توجه به شکل (۳)، تغییرات زاویه بهینه برای شهر اصفهان به صورت (۱۵) قابل بیان است.

$$S_{opt(d)} = 27/53 - 30/47 \sin(0.17n) \quad (15)$$

معادله (۱۵) به صورت نمودار خط چین در شکل (۳) نشان داده شده است. اگر مقدار متوسط معادله تغییرات زاویه بهینه روزانه در طول یک سال شمسی محاسبه شود، مقدار بدست آمده برابر a خواهد بود. این مقدار برابر زاویه بهینه سالانه است. زاویه بهینه سالانه در شهر اصفهان برابر $27/53$ درجه است.

برای آنکه اهمیت استفاده از زوایای بهینه مشخص گردد، در شکل (۴)، مقدار میانگین تابش سالانه برای شهر اصفهان بر حسب زاویه بهینه سالانه رسم شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، مقدار حداکثر توان دریافتی از خورشید در زاویه بهینه سالانه $27/53$ درجه به دست می‌آید که برابر با زاویه بهینه سالانه‌ای است که برای شهر اصفهان به دست آمد. با توجه به این شکل و با شروع از زوایای منفی، مقدار توان جذب شده افزایش می‌یابد تا به مقدار حداکثر خود

که در زاویه بهینه اتفاق می‌افتد، برسد. سپس با افزایش بیشتر زاویه، توان جذب شده کاهش می‌یابد. در این شکل زوایای منفی به معنی رو به شمال بودن دریافت کننده و زوایای مثبت به معنی رو به جنوب بودن دریافت کننده است.



شکل ۴) تاثیر زاویه‌ی سالانه‌ی دریافت کننده بر توان سالانه‌ی جذب شده در شهر اصفهان

محاسبه زوایای بهینه برای شهرهای مختلف ایران

مهمترین اطلاعاتی که برای محاسبه زاویه بهینه برای یک نقطه مشخص مورد نیاز است، عرض جغرافیایی و ضریب صافی ماهانه هوا می‌باشند. جدول (۱) عرض جغرافیایی شهرهایی را که در این مقاله تغییرات زاویه بهینه برای آنها بررسی شده نشان می‌دهد. همچنین در [۲] ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران محاسبه شده است. با توجه به اینکه هر شهر دارای یک عرض جغرافیایی شروع و پایان است، بنابراین، در این مقاله هر شهر به صورت یک نقطه با عرض جغرافیایی معادل، که برابر میانگین عرض جغرافیایی آن شهر است، مدل می‌شود.

جدول (۱) ضرایب رابطه تغییرات معادله زاویه بهینه روزانه برای شهرهای مختلف

شهر	a	b	c	شهر	a	b	c
اردبیل	۳۸/۱۵	۳۲/۱۴	۳۳/۲۷	قم	۳۴/۴۹	۲۹/۸	۳۳/۳۳
تبریز	۳۸/۰۶	۳۲/۳۹	۳۲/۹۱	کرمانشاه	۳۴/۲۳	۲۹/۴۹	۳۳/۳۲
ارومیه	۳۷/۳۴	۳۱/۶۳	۳۲/۸۹	اراک	۳۴/۰۶	۲۹/۵۱	۳۳/۴۲
بجنورد	۳۷/۲۷	۳۲/۴۶	۳۴/۰۵	ایلام	۳۳/۶	۲۸/۹۵	۳۳/۲۳
رشت	۳۷/۱۸	۲۴/۳۶	۲۹/۳۳	بیرجند	۳۲/۹	۲۹/۵۱	۳۴/۵
گرگان	۳۶/۸	۲۸/۶۴	۳۱/۴۴	اصفهان	۳۲/۷	۲۹/۱۳	۳۴/۲۴
زنجان	۳۶/۷	۳۱/۰۹	۳۳/۰۷	شهرکرد	۳۲/۲	۲۷/۰۶	۳۲/۳۷
همدان	۳۶/۴۶	۳۰/۷۴	۳۲/۹۳	یزد	۳۲	۲۸/۸۸	۳۴/۶
رامسر	۳۶/۴۵	۲۷/۴۶	۳۰/۵۳	اهواز	۳۱/۲۴	۲۶/۶۵	۳۲/۸۱
بابلسر	۳۶/۴۳	۲۷/۹۶	۳۰/۶۲	یاسوج	۳۰/۷	۲۶/۵۷	۳۳/۳۲
مشهد	۳۶/۱۹	۳۱/۷۹	۳۳/۷۹	آبادان	۳۰/۳	۲۶/۱۴	۳۳/۴
قزوین	۳۶/۱۵	۳۱/۴۴	۳۳/۷۲	کرمان	۳۰/۳	۲۶/۹۲	۳۴/۰۷
تهران	۳۵/۷	۳۰/۷۵	۳۳/۲۶	شیراز	۲۹/۶	۲۶/۳۴	۳۴/۱۱
سمنان	۳۵/۶	۳۰/۷۹	۳۳/۲۸	زاهدان	۲۹/۳	۲۶/۱۳	۳۴/۱
کرج	۳۵/۴۸	۳۰/۸۶	۳۳/۷۲	بوشهر	۲۷/۴	۲۲/۷۸	۳۱/۹۲
سنندج	۳۵/۳	۳۰/۸۱	۳۳/۷۳	بندرعباس	۲۷/۱۷	۲۳/۲۹	۳۲/۸۱
خرم آباد	۳۴/۶	۳۰/۸۹	۳۴/۳۱				

با برنامه‌ای مشابه آنچه برای شهر اصفهان استفاده شد، ضرایب (۱۴) برای شهرهای مختلف ایران همانند جدول (۱) به دست می‌آیند. در این جدول، شهرها به ترتیب کاهش عرض جغرافیایی مرتب شده‌اند. با توجه به این جدول، با کاهش

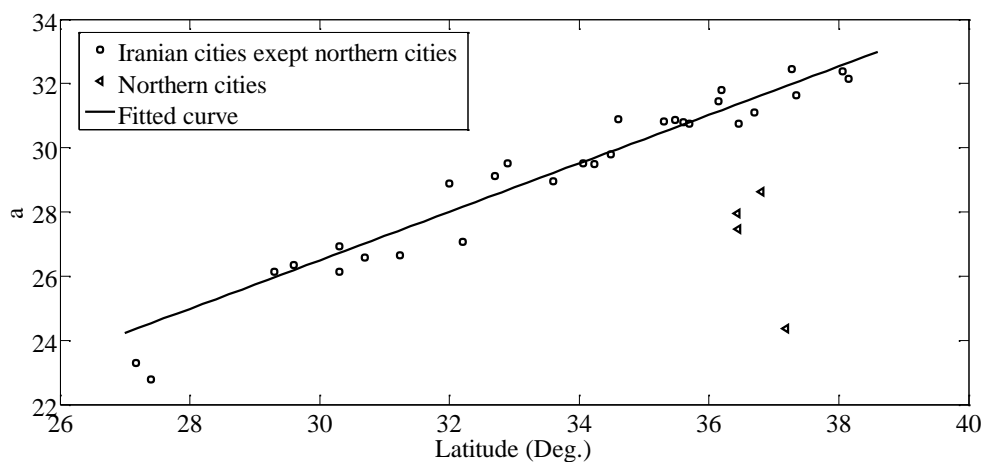
عرض جغرافیایی، زاویه بهینه سالانه (مقدار a) کاهش می‌یابد. زیرا هر اندازه عرض جغرافیایی کاهش یابد، مکان مورد بررسی به خط استوا نزدیک‌تر شده و خورشید به صورت عمودتر بر سطح زمین می‌تابد. از این رو، باید دریافت‌کننده‌ها با زاویه کمتری نسبت به افق قرار گیرند تا خورشید به صورت عمود بر سطح آنها تابیده و بیشترین انرژی را از خورشید دریافت کنند.

تغییرات زاویه بهینه سالانه (a) بر حسب عرض جغرافیایی برای شهرهای مختلف در شکل (۵) رسم شده است. در این شکل، زاویه بهینه هر شهر با یک نقطه نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، دو گروه نقطه در شکل (۵) وجود دارند. گروه اول که با مثلث‌های سیاه رنگ مشخص شده‌اند، مربوط به شهرهای شمالی و گروه دوم که با یک خط تخمین زده شده‌اند مربوط به سایر شهرها هستند. رابطه معادله خطی که نشان‌دهنده زاویه بهینه سالانه است می‌تواند به صورت (۱۶) بیان شود.

$$S_{opt}(y) = 0.7553\{ + 3/834 \} \quad (16)$$

دلیل رفتار متفاوت شهرهای شمالی، آب و هوای بسیار متفاوت این شهرها با دیگر شهرهاست. این آب و هوای متفاوت روی ضریب صافی هوا که کمیته آماری است تاثیر گذاشته و مقدار این پارامتر را برای شهرهای شمالی کاهش می‌دهد. به همین دلیل، در این مقاله شهرهای شمالی در نظر گرفته نمی‌شوند. با توجه به جدول (۱) و معادله (۱۶)، ضرایب ثابت a ، b و c به صورت (۱۷) قابل بیان است.

$$\begin{aligned} a &= 0.7553\{ + 3/834 \\ b &= 33/5463 \\ c &= 0.17 \end{aligned} \quad (17)$$



شکل ۵) تغییرات ضریب a بر حسب عرض جغرافیایی

با توجه به ضرایب ثابت بدست آمده، معادله کلی تغییرات زاویه بهینه روزانه در طول یک سال شمسی و برای ایران به صورت (۱۸) است.

$$S_{opt(d)} = 0.7553\{ + 3/834 - 33/5463 \sin(0.17n) \} \quad (18)$$

رابطه (۱۸) یک رابطه کلی برای محاسبه زاویه بهینه است که با استفاده از آن می‌توان زوایای بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه را به دست آورد. مزیت رابطه (۱۸) در این است که با داشتن این رابطه دیگر نیازی به داشتن ۱۷ معادله (۱۲ معادله برای ماهها، ۴ معادله برای فصلها و ۱ معادله برای کل سال) برای محاسبه زوایای بهینه در طول یک سال نیست. در ادامه برای بررسی درستی رابطه (۱۸)، معادلات مربوط به زوایای بهینه فصلی و سالانه با استفاده از رابطه (۱۸) به دست آمده و نتایج حاصل با مقادیر ارائه شده در [۱۹] مقایسه می‌شود.

زاویه بهینه ماهانه به صورت میانگین زوایای بهینه روزهای هر ماه تعریف می‌شود. اگر زوایای بهینه ماهانه برای شهرهای ایران محاسبه شده و بر حسب عرض جغرافیایی رسم شوند، زاویه بهینه ماهانه به صورت تابعی درجه اول از عرض جغرافیایی خواهد بود. اگر زوایای بهینه ماهانه با یک معادله خطی تخمین زده شوند، معادلات حاصل به صورت معادلات جدول (۲) خواهند بود.

جدول (۲) معادلات زوایای بهینه ماهانه

رابطه	ماه
$S_{opt(m)} = 0.7436\{ - 3/82 \}$	فروردین
$S_{opt(m)} = 0.8296\{ - 22/86 \}$	اردیبهشت
$S_{opt(m)} = 0.7261\{ - 29/24 \}$	خرداد
$S_{opt(m)} = 0.7355\{ - 28/77 \}$	تیر
$S_{opt(m)} = 0.9278\{ - 23/58 \}$	مرداد
$S_{opt(m)} = 0.9661\{ - 7/348 \}$	شهریور
$S_{opt(m)} = 0.8713\{ + 13/02 \}$	مهر
$S_{opt(m)} = 0.8121\{ + 26/61 \}$	آبان
$S_{opt(m)} = 0.6788\{ + 36/52 \}$	آذر
$S_{opt(m)} = 0.7324\{ + 33/83 \}$	دی
$S_{opt(m)} = 0.7068\{ + 27/66 \}$	بهمن
$S_{opt(m)} = 0.7429\{ + 12/76 \}$	اسفند

زوایای بهینه فصلی به صورت میانگین زوایای بهینه روزانه هر فصل تعریف می‌شود. با انجام روندی مشابه آنچه برای زوایای بهینه ماهانه انجام شد، معادلات زوایای بهینه فصلی به صورت جدول (۳) به دست خواهند آمد. این زوایا نیز همانند زوایای بهینه ماهانه تابعی خطی از عرض جغرافیایی هستند.

جدول (۳) زوایای معادلات بهینه‌ی فصلی

رابطه	فصل
$S_{opt(s)} = 0.7665\{\ -18/64$	بهار
$S_{opt(s)} = 0.8765\{\ -19/9$	تابستان
$S_{opt(s)} = 0.7874\{\ +25/38$	پاییز
$S_{opt(s)} = 0.7272\{\ +24/88$	زمستان

مطالعه مقایسه‌ای

برای بررسی درستی نتایج بدست آمده، مقدار زوایای بهینه بدست آمده با نتایج ارائه شده در [۱۹] مقایسه می‌شود. مقادیر ارائه شده در [۱۹] بر حسب ماه‌های میلادی هستند. از این رو، تنها امکان مقایسه نتایج برای زوایای بهینه سالانه و فصلی وجود دارد و تنها مقایسه با استفاده از زوایای بهینه سالانه و فصلی انجام می‌شود. نتیجه مقایسه در جداول (۴) و (۵) برای زوایای بهینه فصلی و سالانه آورده شده است. با توجه به این جداول، تفاوت بسیار کمی بین نتایج ارائه شده در این مقاله و [۱۹] وجود دارد و دلیل این تفاوت نیز در این است که در این مقاله از مدل ایزوتروپیک^۱ و در [۱۹] از مدل K-T برای تخمین مقدار تابش خورشید استفاده شده است. با توجه به مقایسه انجام شده، رابطه بدست آمده برای زاویه بهینه روزانه (رابطه ۱۸) دارای دقت کافی است و می‌توان از آن برای محاسبه زوایای بهینه ماهانه، فصلی و سالانه استفاده نمود.

1) Isotropic

جدول ۴) مقایسه نتایج با نتایج [۱۹]

اصفهان	بوشهر	مشهد	اردبیل	یاسوج		
۶/۴۲	۲/۳۶	۹/۱۰	۱۰/۶۰	۴/۸۹	محاسبه شده	بهار
۵/۷۰	۳/۱۱	۶/۹۸	۸/۳۷	۴/۷۳	محاسبه شده در [۱۹]	
۰/۷۲	-۰/۷۵	۲/۱۲	۲/۲۳	۰/۱۶	مقدار تغییرات	
۸/۷۶	۴/۱۲	۱۱/۸۲	۱۳/۵۴	۷/۰۱	محاسبه شده	تابستان
۱۳/۵۶	۱۲/۱۷	۱۴/۴۸	۱۵/۰	۱۳/۰۴	محاسبه شده در [۱۹]	
-۴/۸	-۸/۰۵	-۲/۶۶	-۱/۴۶	-۶/۰۳	مقدار تغییرات	
۵۱/۱۳	۴۸/۳۸	۵۳/۸۸	۵۵/۴۲	۴۹/۵۵	محاسبه شده	پاییز
۵۳/۱۳	۴۶/۹۵	۵۶/۲۶	۵۸/۰۲	۵۱/۳۴	محاسبه شده در [۱۹]	
-۲	۱/۴۳	-۲/۳۸	-۲/۶	-۱/۷۹	مقدار تغییرات	
۴۸/۶۶	۴۴/۸۱	۵۱/۲۰	۵۲/۶۲	۴۷/۲۱	محاسبه شده	زمستان
۴۵/۳۹	۳۹/۷۰	۴۹/۱۳	۵۱/۲۳	۴۳/۲۴	محاسبه شده در [۱۹]	
۳/۲۷	۵/۱۱	۲/۰۷	۱/۳۹	۳/۹۷	مقدار تغییرات	

جدول ۵) مقایسه نتایج با نتایج مقاله [۱۹]

اصفهان	بوشهر	مشهد	اردبیل	یاسوج	
۲۸/۵۳	۲۴/۵۳	۳۱/۱۷	۳۲/۶۵	۲۷/۰۲	محاسبه شده
۲۹/۴۵	۲۵/۸۵	۳۱/۸۳	۳۳/۱۶	۲۸/۰۹	محاسبه شده در [۱۹]
۲/۶۸	-۱/۳۲	-۰/۶۶	-۰/۵۱	-۱/۰۷	مقدار تغییرات

نتیجه گیری

در این مقاله، تغییرات زاویه بهینه برای دریافت کننده‌های خورشیدی به منظور دریافت بیشترین انرژی از خورشید بررسی شد و نشان داده شد که تغییرات این زاویه برای یک ماه تقریباً به صورت خطی و برای یک سال شمسی به صورت سینوسی است. سپس یک رابطه کلی برای تغییرات زاویه بهینه روزانه بر حسب عرض جغرافیایی و شماره سال شمسی پیشنهاد شد. رابطه پیشنهاد شده برای تمام شهرهای ایران جز شهرهای شمالی قابل استفاده است. یکی از مزیت‌های رابطه پیشنهاد شده این است که تمام روابط زوایای بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه را با استفاده از آن می‌توان براحتی محاسبه نمود. به عبارت دیگر، برای محاسبه روابط بهینه ماهانه، فصلی و سالانه نیازی به داشتن ۱۷ معادله مجزا نبوده و تنها می‌توان با یک معادله، روابط دلخواه را به دست آورد. برای بررسی درستی رابطه بدست آمده، نتایج حاصل از رابطه پیشنهاد شده با نتایج ارائه شده در مقالات مقایسه شد و درستی رابطه پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین، برای محاسبه زوایای بهینه می‌توان از رابطه پیشنهاد شده در این مقاله (رابطه ۱۸) استفاده نمود.

منابع

- [۱] بهادری نژاد، مهدی. فرهمندپور، بهاره. (۱۳۸۵)، طراحی و بررسی اقتصادی سیستم برق خورشیدی برای یک ساختمان اداری در تهران، بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ۲۰۳۷-۲۰۴۷.
- [۲] بهادری نژاد، مهدی. میر حسینی، سید عباس. (۱۳۸۲)، ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران، مجموعه مقالات سومین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، ۶۰۳-۶۱۱.
- [۳] عبدل زاده، مرتضی. جعفری، سعید. رهنما، محمد. عامری، مهران. (۱۳۸۷)، "تعیین زاویه بهینه پانل های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان" نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱۹، شماره ۱۰-۹۸.
- [۴] علی اکبر گلکار، مسعود. مدرسی، جواد. (۱۳۹۰)، تعیین زاویه ی بهینه ی پنلهای خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین تابش در شبکه های توزیع انرژی در شهرهای مختلف ایران، هفدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق، پژوهشگاه نیرو، تهران.
- [5] H. Park, B. Kwon, Y. Shin, Y. Kim, T. Hong, and S. Choi, "Cost and CO2 Emission Optimization of Steel Reinforced Concrete Columns in High-Rise Buildings," *Energies*, vol. 6, no. 11, pp. 5609–5624, Oct. 2013.
- [6] 2007 *Buildings Energy Data Book*, 2007th ed. D&R International, Ltd. under, 2007, pp. 1–128.
- [7] Bakirci, K. 2012. "General Models for Optimum Tilt Angles of Solar Panels: Turkey Case Study" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, PP. 6149-6159.

- [8] Benghanem, M. 2011. "Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case Study for Madinah, Saudi Arabia" *Applie Energy*, Vol. 88, PP.1427–1433.
- [9] Chang, Y.P. 2010. "Optimal the Tilt Angles for Photovoltaic Modules in Taiwan" *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, PP. 956-964.
- [10] Ertekin, C., Fatih E., and Recep Kulcu. 2008. "Modeling Spatio-Temporal Dynamics of Optimum Tilt Angles for Solar Collectors in Turkey", *Sensors Basel*, Vol. 8, PP. 2913-2931.
- [11] Goswami, D.Y., (1999) *Energy Resouces*. CRC Press LLC.
- [12] Heywood, H. 1971. "Operating Experience with Solar Water Heating" *IHVE*, Vol. 39, PP. 63-99.
- [13] Jafarkazemi, F. and Saadabadi, S.A. 2013. "Optimum Tilt Angle and Orientation of Solar Surfaces in Abu Dhabi, UAE" *Renewable Energy*, Vol. 56, PP. 44-49.
- [14] Jafarkazemi, F., Saadabadi, S.A. and Pasdarsahri, H. 2012. "The Optimum Tilt Angle for Flat-Plate Solar Collectors in Iran" *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 4, PP. 1-15.
- [15] Javadi, S., and Sam, M. 2010. "A New Solar Radiation Models for Iran" *Latest Trends On Systems*, Vol. 1, PP. 106-110.
- [16] Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., and Demirkol, S. 2004. "Determining Optimum Tilt Angles and Orientations of Photovoltaic Panels in Sanliurfa, Turkey" *Renewable Energy*, Vol. 29, PP. 1265–1275.
- [17] Lunde, P. J., (1980) *Solar Thermal Engineering*. John Wiley and Sons Inc.
- [18] Nijegorodov, N., Devan, K.R.S., Jain, P.K. and Carlsson, S. 1997. "Atmospheric Transmittance Models and an Analytical Method to Predict the Optimum Slope on an Absorber Plate" *Renewable Energy*, Vol. 4, PP. 525-530.
- [19] Talebizadeh, P., Mehrabian, M.A., and Abdolzadeh, M. 2011. "Determination of Optimum Slope Angles of Solar Collectors Based on New Correlations" *Energy Sources*, Vol. 33, PP. 1567-1580.
- [20] Talebizadeha, P., Mehrabiana, M.A. and Abdolzadehb, M. 2011. "Prediction of the Optimum Slope and Surface Azimuth Angles Using the Genetic Algorithm" *Energy and Buildings*, Vol. 43, PP. 2998–3005.
- [21] Tang ,R., and Wu, T. 2004 "Optimal Tilt-Angles for Solar Collectors Used in China" *Applied Energy*, Vol. 79, PP. 239–248.
- [22] Tiana, Y., and Zhao, C.Y. 2013. "A Review of Solar Collectors and Thermal Energy Storage in Solar Thermal Applications" *Applied Energy*, Vol. 104, PP. 538-553.