

## تعیین زوایای بهینه آرایه‌های خوشیدی برای دریافت بیشترین انرژی (مطالعه مورد: خراسان رضوی، مشهد)

<sup>۱</sup>معصومه عبداللهپور، <sup>۲</sup> عباس روحانی\*، <sup>۳</sup> محمود رضا گلزاریان، <sup>۴</sup> حسین ابوترابی زارچی

### چکیده

تاریخ دریافت:  
۱۳۹۵/۵/۱۰

تاریخ پذیرش:  
۱۳۹۵/۸/۸

آرایه‌های خورشیدی یکی از نوید بخش ترین فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی ساختمان‌ها می‌باشد. در نصب پنل‌های خورشیدی روی بام ساختمان‌ها، دانستن زاویه شیب بهینه به منظور داشتن بیشترین انرژی سالانه، فصلی، ماهانه و یا روزانه حائز اهمیت می‌باشد. در حقیقت، تعییرات زاویه شیب آرایه در مقدار تابش خورشیدی که به سطح پنل‌ها می‌رسد، موثر است. در این تحقیق از مدل‌های مختلفی برای بدست آوردن زاویه شیب بهینه و زاویه آزمیوت در شهر مشهد استفاده شد. با استفاده از مدل ایزوتروپیک زوایای بهینه‌ای برای ماههای مختلف، فصول و کل سال معرفی شده است. همچنین با استفاده از مدل غیرایزوتروپیک زاویه آزمیوت و زاویه شیب بهینه برای مشهد بدست آمد. در حالت کلی در سیستم تک محوره در کل سال مجموع انرژی بدست آمد نسبت به انرژی دریافتی روی سطح افق ۱۸٪ افزایش می‌یابد و در سیستم دو محوره در کل سال مجموع انرژی بدست آمد نسبت به انرژی دریافتی روی سطح افق ۳۰٪ و نسبت به حالت تک محوره در کل سال ۱۱٪ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی:  
آرایه‌های خورشیدی،  
انرژی خورشیدی،  
حداکثر انرژی،  
زاویه بهینه

- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم دانشگاه فردوسی مشهد  
ma.abdolhpour@yahoo.com
- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم دانشگاه فردوسی مشهد (تویینده مسئول)  
mahmood.golzarian@gmail.com  
hazarchi@gmail.com
- استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱. مقدمه

با توجه به اینکه بیشترین انرژی تابشی از خورشید زمانی حاصل می‌شود که پرتوهای خورشید به طور عمودی به سطح مورد نظر بتابند لذا برای دریافت بیشترین مقدار انرژی باید سطح تقریباً عمود بر جهت تشعشع باشد. برای تحقق این امر می‌توان از ردیاب خورشیدی که به طور لحظه‌ای خورشید را دنبال می‌کند یا تنظیم روزانه زاویه شب سطح استفاده کرد [۱۱، ۸].

گومز و همکارانش [۱۴] در آزمایش‌هایی که در اسپانیا داشتند به این نتیجه رسیدند که میزان دریافت انرژی برای ردیاب دو محوره سیستم‌های فتوولتائیک متغیر کننده  $25/2$  درصد و برای ردیاب تک محوره  $22/3$  درصد نسبت به حالت ثابت به صورت سالانه افزایش می‌یابد. بینقانم [۹] طی آزمایشاتی که در شهر مدینه انجام دادند زاویه‌ی بهینه به منظور افزایش انرژی دریافتی را بدست آورد. وی به این نتیجه رسید که زاویه شب بهینه سالانه تقریباً برابر با عرض جغرافیایی منطقه است و همچنین انرژی بدست آمده با شبیه ماهانه نسبت به شب سالانه  $8/8\%$  افزایش می‌یابد. لهجوجی و درهموی [۱۶] از مدل ریاضی برای محا سبی تابش خورشید در سطح شبیدار در مراکش استفاده کردند. آنها زاویه بهینه ماهانه، فصلی و سالانه را محا سبی کردند. زاویه فصلی را در بهار  $21/5$  درجه، تابستان  $6/0$ ، پاییز  $51/2$  و تابستان  $62/8$  درجه بدست آوردند و مطرح کردند که زاویه سالانه با عرض جغرافیایی برابر است. دمین و همکاران [۱۰] به بررسی مدل‌های مختلف تعیین زاویه شب بهینه برای بلژیک پرداختند. آنها عملکرد نسبی مدل‌های مختلف را در تمام شرایط آب و هوایی مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و به یان نتیجه رسیدند که هیچ کدام از مدل‌ها در تمام شرایط آب و هوایی عملکرد مناسبی ندارد بنابراین مدلی جدید برای بلژیک توسعه دادند که براساس آن زاویه شب بهینه با توجه به عرض جغرافیایی را تعیین می‌کردند. خطیبی و همکارانش [۱۳] به بررسی زاویه شب پنل‌های خورشیدی در پنج نقطه از مالزی به صورت ماهانه و فصلی پرداختند. نتایج نشان دادند که بهینه سازی شب پنل در مالزی به صورت فصلی توصیه کردند؛ در حالی که تغییر زاویه شب بهینه برای شرق مالزی شامل Sabah و Sarawak states را به صورت ماهانه توصیه کردند. تحقیق مقدم و همکارانش [۱۸] که در شهرهای زاهدان و بندرعباس صورت گرفت حاکی از آن است که اگر زاویه شب بهینه تنها دو بار در سال تنظیم شود، نسبت به حالتی که سیستم در طول سال ثابت است،  $8\%$  انرژی بیشتری دریافت

می شود. شبیب بهینه برای شهر امان اردن توسط تمیمی مورد مطالعه قرار گرفت [20] او شبیب بهینه را  $\beta_{opt}=31/3$  پیشنهاد داد که نزدیک به شبیب بهینه ای است که توسط NASA برای شهر امان گزارش شده بود. گویندنس و همکاران [12] با استفاده از یک مدل ریاضی جدید زاویه شبیب و سمت الراس بهینه را برای آفریقای جنوبی ارائه کردند. یلگن [21] با استفاده از یک مدل ریاضی زاویه شبیب بهینه در شهر ازمیر ترکیه را محاسبه کرد و همچنین زوایایی بهینه را برای ماهها و فصول مختلف سال نیز ارائه کرد.

بهرامی و عبا سپور ثانی [2] در مطالعه‌ی خود از یک مدل ریاضی و داده‌های هوا شنا سی برای محاسبه تابش خورشیدی کل روی سطح شبیدار به منظور تعیین زاویه شبیب مناسب برای آرایه‌های خورشیدی در کرج استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییرات زاویه شبیب بهینه بین صفر تا ۶۹ درجه است. در زمستان این زاویه  $65/33$  درجه، در بهار  $22$  درجه، در تابستان صفر درجه و در پاییز  $37/33$  درجه می‌باشد. زاویه شبیب بهینه سالانه به طور متوسط  $31/66$  درجه می‌باشد که زاویه ثابت و مطلوب در سال است. تئفی و همکاران [3] مقدار تابش دریافتی روزانه برای زوایای شبیب صفر تا ۹۰ درجه (با فواصل پنج درجه‌ای) بر حسب مگاژول بر مترمربع در ماههای مختلف سال برای شهر تهران محاسبه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که، زاویه‌ی بهینه‌ای که سبب دریافت بیشترین تابش خورشیدی در کل طول سال می‌شود، حدود ۳۰ درجه است. زاویه بهینه ماههای سرد سال حدود ۵۵ درجه و زاویه بهینه ماههای گرم سال حدود ۱۰ درجه است. عبدالزاده و همکاران [6] در تحقیقی با استفاده از مدل‌های مختلفی زاویه بهینه شبیب پنل‌های خورشیدی جهت دریافت بیشترین میزان تشعشع متوجه ماهیانه خورشیدی در شهر کرمان محا سبه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از روش لیو جوردن حداقل زاویه شبیب بهینه ماهانه برابر با  $88/0$  و حداقل آن برابر با  $71/60$  درجه است و با استفاده از روش لیو جوردن زاویه شبیب بهینه سالانه برابر با  $27/35$  درجه است. طالبی زاده و همکاران [5] زوایای شبیب و سمت الراس کلکتورهای خورشیدی به منظور دریافت بیشترین تشعشع خورشید در شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرونی، شیراز و طبس را محاسبه کردند. آنها از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری برای بهینه سازی و یافتن زوایای بهینه استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که زاویه‌ی سمت الراس برای ریافت بیشترین تشعشع خورشید صفر است و در روزهای مختلف سال زوایای شبیب مختلف است. خراسانی و مسیحی [4] به بررسی زاویه شبیب بهینه‌ی کلکتورهای

خورشیدی تخت در کاشان پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که تنظیم شبیب حداقل هر ماه یک بار لازم است و زاویه‌ی بهینه حداکثر و حداقل به ترتیب ۶۰ درجه برای ماه آذر و صفر درجه برای دو ماه خرداد و تیر می‌باشد. آنها همچنین زاویه‌ی بهینه را به صورت فصلی معرفی کردند و بیان کردند که زاویه شبیب سالانه برابر با ۲۹ درجه می‌باشد که به عرض جغرافیایی منطقه (۳۳/۵۹) نزدیک است.

از آنجا که اغلب مطالعات تاکید بر کلکتورهای تک محوره داشتند و نیز باتوجه به اینکه میزان تابش خورشیدی به مقدار زیادی تابع موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی محل می‌باشد، لازم است چنین مطالعاتی در هر منطقه به طور مجزا صورت گیرد. لذا در این مقاله شبیب بهینه نصب پنل های خورشیدی تک محوره و دو محوره برای شهر مشهد براساس دو مدل ریاضی لیو جوردن و کلین به کمک الگوریتم ژنتیک محاسبه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

داده‌های مربوط به انرژی دریافتی روی سطح افق (H) جهت مدل سازی تابش خورشید از سازمان هواشناسی مشهد از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ دریافت شدند. برای بدست آوردن میانگین روزانه‌ی تابش کل در سطح افق از داده‌های اداره‌ی هواشناسی مشهد در طی سال‌های مورد مطالعه میانگین گیری شد. تا بتوان ضریب صافی هوا را با استفاده از روابط ریاضی به منظور تعیین میزان دریافت انرژی محاسبه کرد.

مدل‌های ریاضی با استفاده از داده‌های انرژی تشعشعی روی سطح افقی انرژی شبیده به سطوح شبیدار را محاسبه می‌کنند. تشعشع کل روی یک سطح شبیدار از رابطه ۱ می‌توان محاسبه کرد:

$$H_T = H_b + H_d + H_r \quad (1)$$

که در آن،  $H_b$  مجموع تابش مستقیم،  $H_d$  تابش پخشی و  $H_r$  تابش انعکاسی می‌باشد.

**روش لیو جوردن:** اولین روش برای بدست آوردن  $H_T$  روش لیو جوردن است که توسط Liu ارائه شده است [۱۷, ۶]. با استفاده از این روش مقدار تشعشع میانگین ماهیانه بر روی سطوح شبیدار به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$H_T = H \left( 1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + H p_g \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (2)$$

که در آن  $\beta$  زاویه شیب،  $R_b$  ضریب انعکاس زمین، و  $H$  میزان تشعشع روی سطح افقی و  $R_b$  بیانگر نسبت مقدار متوسط تابش مستقیم روی سطح شیبدار به مقدار متوسط تابش مستقیم روی سطح صاف است.

$$R_b = \frac{\cos(\varphi \mp \beta) \cos \delta \sin \omega_s' + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s' \sin(\varphi \mp \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (3)$$

$$\omega_s' = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi \mp \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad (4)$$

در رابطه‌های ۳ و ۴ علامت مثبت برای نیم کره جنوبی و علامت منفی برای نیم کره شمالی است. که در آن  $\varphi$  عرض جغرافیایی محل،  $\delta$  زاویه‌ی انحراف محور کره زمین در بازه‌ی زمانی مورد نظر (رابطه‌ی ۵)،  $\omega_s$  زاویه‌ی طلوع خور شید در سطح افق و  $\omega_s'$  زاویه‌ی طلوع خور شید در سطح شیبدار بر حسب درجه (رابطه‌ی ۶) می‌باشد.

$$\delta = 23.45 \sin(360 \frac{n + 284}{365}) \quad (5)$$

$$\omega_s' = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi \mp \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad (6)$$

$n$  جمع روزهای سال از اول ژانویه تا روز مورد نظر. ضریب صافی هوا ( $K_{th}$ ): برابر است با نسبت انرژی تابشی دریافتی تو سط یک صفحه‌ی افقی در دوره‌ی زمانی مشخص ( $H$ ) به مقدار انرژی تابشی دریافتی همین صفحه در همان زمان اگر در خارج از جو زمین قرار گرفته باشد.

$$K_{th} = \frac{H}{H_0} \quad (7)$$

تابش فرا جو ( $H_0$ ): انرژی تابشی در واحد سطح در لبه‌ی خارجی اتمسفر را تابش فرا جو می‌نامند که از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود.

$$H_0 = \frac{24 \times I_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[ \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \sin \varphi \sin \delta \frac{\pi \omega_s}{180} \right] \quad (8)$$

$I_{sc}$  ثابت خورشیدی است که برابر با ۱۳۶۷ وات بر متر مربع است.

در تحقیقی ابراهیم پور و همکاران (۱۳۸۸)، به مقایسه‌ی برخی از مدل‌های پیش‌بینی نسبت تابش پراکنده به تابش کل پرداختند و نهایتاً مدل "Orgill and Hollands" (1997) را برای اقلیم‌های

ایران مناسب‌تر اعلام کردند. در این مدل، نسبت تابش پراکنده به تابش کل با توجه به محدوده  $\beta$  ضریب صافی هوا از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} K_{dh} &= 1.557 - 1.84K_{th} & 0.35 \leq K_{th} \leq 0.75 \\ K_{dh} &= 1 - 0.249K_{th} & K_{th} < 0.35 \\ K_{dh} &= 0.177 & K_{th} > 0.75 \end{aligned} \quad (9)$$

ضریب انعکاس زمین بوده که مقدار آن بسته به نوع پوشش محیط از  $0/0\%$  تا  $0/8\%$  متغیر است. در این مطالعه مقدار این ضریب برابر با  $0/2$  در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در روش لیو جوردن تنها زاویه  $\beta$  متغیر است از این روش برای تعیین زاویه بهینه‌ی سیستم‌های تک محوره استفاده شد. روش کلین: Klein. روشی را ارائه کرده است (مدل KT) که تاثیر زوایای آزمودت را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد و روابط آن به شکل رابطه‌های ۱۰ تا ۱۹ نوشته می‌شود [۱۹، ۱۶، ۱۵]:

$$H_T = HR \quad (10)$$

$$R = D + \frac{H_d}{H} \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (11)$$

مقدار D از رابطه‌ی ۱۲ بدست می‌آید:

$$D = \begin{cases} \max(0, G(\omega_{ss}, \omega_{sr})) & \text{if } \omega_{ss} \geq \omega_{sr} \\ \max(0, [G(\omega_{ss}, -\omega_s) + G(\omega_s, \omega_{sr})]) & \text{if } \omega_{sr} \geq \omega_{ss} \end{cases} \quad (12)$$

مقادیر سه گانه G طبق رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2d} \left[ \left( \frac{bA}{2} - aB \right) (\omega_1 - \omega_2) \frac{\pi}{180} + (aA - bB)(\sin\omega_1 - \sin\omega_2) - aC(\cos\omega_1 - \cos\omega_2) + \left( \frac{bA}{2} \right) (\cos\omega_1 \sin\omega_1 - \cos\omega_2 \sin\omega_2) + \left( \frac{bC}{2} \right) (\sin^2\omega_1 + \sin^2\omega_2) \right] \quad (13)$$

$$a = 0.409 + 0.5016(\omega_s - 60) - \frac{H_d}{H} \quad (\text{الف}) \quad (14)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (\text{ب}) \quad (14)$$

$$d = \sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s \quad (\text{ج}) \quad (14)$$

زوایای طلوع  $\omega_{sr}$  و غروب خورشید  $\omega_{ss}$  براساس روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود:

$$|\omega_{sr}| = \min \left[ \omega_s \cos^{-1} \frac{AB + C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (\text{الف}) \quad (15)$$

$$\omega_{sr} = \begin{cases} -|\omega_{sr}| & \text{if } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ or } (A \geq B) \\ +|\omega_{sr}| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{ب}) \quad (15)$$

$$|\omega_{ss}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (16\text{-الف})$$

$$\omega_{ss} = \begin{cases} +|\omega_{ss}| & \text{if } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ or } (A \geq B) \\ -|\omega_{ss}| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16\text{-ب})$$

$$A = \cos\beta + \tan\varphi \cos\gamma \sin\beta \quad (17\text{-الف})$$

$$B = \cos\omega_s \cos\beta + \tan\delta \cos\gamma \sin\beta \quad (17\text{-ب})$$

$$C = \frac{\sin\beta \sin\gamma}{\cos\varphi} \quad (17\text{-ج})$$

معادلات ۱۰ تا ۱۷ به مدل KT موسوم‌اند. در این مدل برای محاسبه‌ی  $H_d$  از روابط ۱۸ و ۱۹ استفاده

می‌شود:

$$\text{for } \omega_s \leq 81.4^\circ$$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1 - 0.2727 K_T + 2.4495 K_T^2 - 11.9514 K_T^3 + 9.3879 K_T^4 & \text{for } K_T < 0.715 \\ 0.143 & \text{for } K_T \geq 0.715 \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{for } \omega_s > 81.4^\circ$$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1 + 0.2832 K_T + 2.5557 K_T^2 - 0.8448 K_T^3 & \text{for } K_T < 0.715 \\ 0.175 & \text{for } K_T \geq 0.715 \end{cases} \quad (19)$$

کد رایانه‌ای دو روش لیو جوردن و KT در متلب پیاده سازی شد. با استفاده از کدهای نوشته شده برای دو سیستم تک محوره و دو محوره زاویه بهینه به صورت روزانه، فصلی و سالانه محاسبه و مقایسه شدند.

با توجه به اینکه انحراف معیار انرژی دریافتی در روزهای مختلف یک ماه متغیر است و به منظور اطمینان از صحت و تعمیم پذیری زاویه بهینه از مدل رگرسیونی گوسی و دو ضابطه‌ی برای تخمین مقدار تابش کل روزانه حاصل ۶ ساله استفاده شد.

ضابطه مدل گوسی مطابق رابطه ۲۰ ضابطه مدل دو ضابطه‌ی مطابق رابطه ۲۱ می‌باشد:

$$H = a \exp \left( - \left( \frac{n - b}{c} \right)^2 \right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} H &= an^3 + bn^2 + cn + d & n \leq 182 \\ H &= qn^3 + wn^2 + vn + z & n > 182 \end{aligned} \quad (21)$$

که در آن  $a, b, c, \dots$  ضرایب رگرسیونی و  $n$  شماره روز از سال می‌باشد. برای ارزیابی توانایی مدل‌های ۲۰ و ۲۱ جهت تخمین مقدار تابش کل علاوه بر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و مقایسه داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده از لحاظ آماری، از میانگین ریشه مربعات خطأ (RMSE) و متوسط درصد قدرمطلق خطأ (MAPE) استفاده شد.

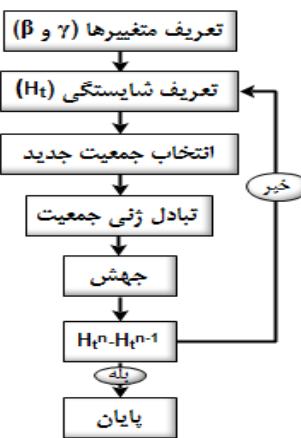
$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{H_{act} - H_{pre}}{H_{act}} \right| \times 100 \quad (22)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (H_{act} - H_{pre})^2}{n}} \quad (23)$$

که در آن  $H_{act}$  مقدار تابش واقعی و  $H_{pre}$  مقدار تابش پیش بینی شده است.

### ۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری برای بهینه سازی در مسائل مختلف کاربرد دارد. در این تحقیق برای یافتن بهترین تشعشع خور شید بر حسب زوایای پنل از الگوریتم ژنتیک تک منظوره استفاده شده است.تابع تشعشع رسیده به سطح شبیدار به عنوان تابع شایستگی و زوایای شبیه و آزمود ( $\beta$  و  $\gamma$ ) به عنوان متغیرهای بهینه سازی در نظر گرفته شدند. مراحل الگوریتم ژنتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. تابع شایستگی به کمک برنامه‌ی کامپیوتر در مطلب به کمک روابط ۱ تا ۱۶ پیاده سازی شد.

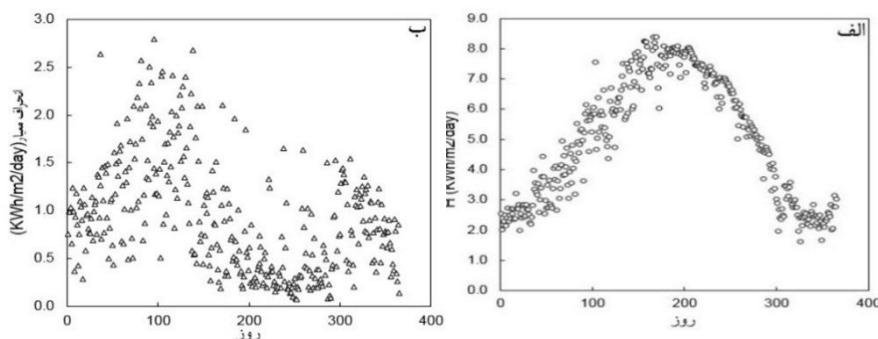


شکل ۱) مراحل الگوریتم ژنتیک

### ۴. نتایج و بحث

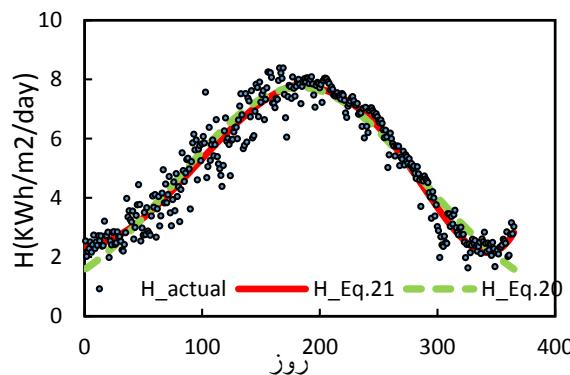
به ترتیب شکل ۲-الف و ب میزان انرژی دریافتی روزانه و انحراف معیار آن طی شش سال را نشان می دهد روز صفر از محور x شکل ۲ معادل با اول ژانویه (۱۱ دی ماه) است. همانطور که ملاحظه می

شود، میزان انحراف معیار انرژی در روزهای مختلف یک ماه متغیر است. در فصل های زمستان، بهار و پاییز به دلیل متغیر بودن آب و هوای روزانه میزان انحراف معیار زیاد است و در فصل تابستان میزان انحراف معیار کمتر است (شکل ۲-ب) بنابراین محا سبه زاویه بهینه به صورت روزانه و یا دوره مدت کوتاهتری ضروری می‌تواند باشد.



شکل ۲) میزان انرژی دریافتی روزانه(الف)، میزان انحراف معیار(ب)

در این مقاله دو مدل گو سی(رابطه ۲۰) و رگرسیونی درجه سوم و چهارم (رابطه ۲۱) برای تخمین مقدار تابش در طول سال پیشنهاد و ارزیابی شد. به دلیل انحراف معیار تابش در طی روزهای سال و عمومیت بخشنیدن به مقادیر زوایا بهینه کلکتور در منطقه مورد مطالعه داشتن مدلی جهت تخمین مقدار تابش ضروری است. شکل ۳ مدل گو سی (eq20) و دو ضابطه‌ی (eq21) برآش شده برای مقادیر تابش در طی روزهای سال را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، شکل تغییرات تابع تابش بر حسب روز از سال میلادی ابتدا با نزدیکتر شدن به فصل تابستان افزایشی است و سپس مقدار تابش روند نزولی پیدا می‌کند. مقادیر تابش در شش ماهه ابتدا سال میلادی تقریباً برابر با شش ماهه دوم سال می‌باشد. مقادیر ضرایب رگرسیونی برآورده شده برای تابع گوسی در رابطه ۲۴ و برای تابع دو ضابطه‌ی در رابطه ۲۵ نشان داده شده است.



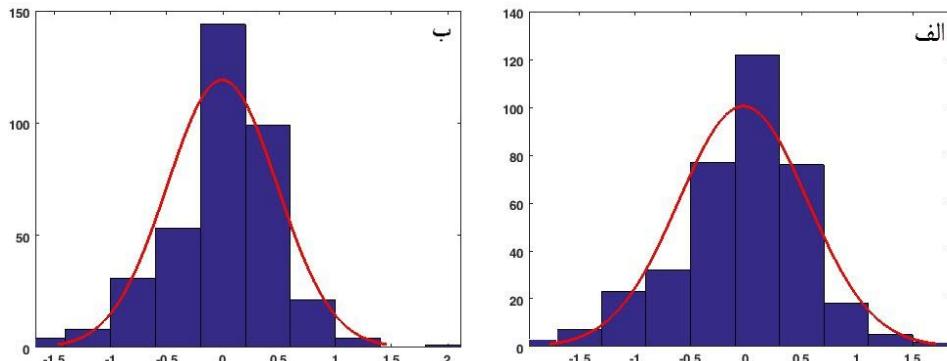
شکل ۳) متوسط میزان انرژی تابشی دریافت شده در سطح افق طی شش سال همراه باتابع گوسی برازش شده.

$$H = 7.73 \exp \left( -\left( \frac{n - 182.8}{144.9} \right)^2 \right) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} H &= -1.543 \times 10^{-6} \times n^3 + 0.0004415 \times n^2 + 0.000761 \times n + \\ H &= -2.338 \times 10^{-3} \times n^4 - 2.219 \times 10^{-5} \times n^3 + 0.007545 \times n \end{aligned} \quad (25)$$

شکل ۴-الف توزیع فراوانی خطاهای مدل گوسی و شکل ۴-ب توزیع فراوانی خطاهای مدل دو ضابطه‌ی را در طول سال نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار دامنه خطای تخمین تابش افقی بیش از ۷۶ درصد از روزها بین ۰/۰- تا ۶/۰ است. همچنین توزیع خطاهای نیز نزدیک به حالت نرمال می‌باشد.

برای ارزیابی اعتبار بیشتر مدل رگرسیونی گوسی و مدل دو ضابطه‌ی برازش شده، مقایسه آماری بین مقادیر پیش‌بینی شده تابش و مقادیر واقعی در سطح احتمال یک درصد انجام شد(جدول ۱).



شکل ۴) توزیع فراوانی خطاهای مدل گوسی(الف) و مدل دو ضابطه  
(ب) برآش شده در طول روزهای سال همراه با نمودار نرمال آن

جدول ۱) عملکرد پیش‌بینی مدل رگرسیونی و دو ضابطه‌ی برآش شده

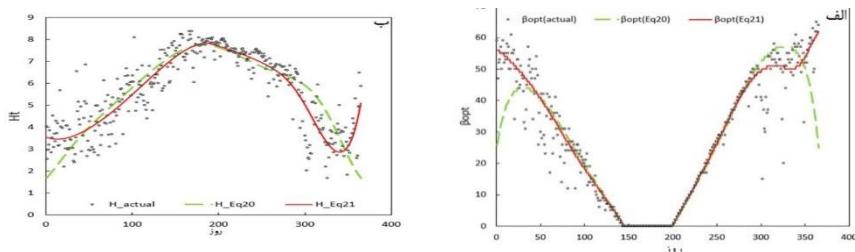
p-vlaue		Criterion of error						مدل مورد استفاده
Mean	Variance	RMSE	MAPE(%)	EF(%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>		
۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۵۷	۱۱/۶۰	۹۱/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۲	مدل رگرسیونی(eq15)	
۰/۹۶	۰/۵۹	۰/۴۹	۸/۷۳	۹۴/۲۵	۰/۹۴	۰/۹۴	مدل دو ضابطه (eq16)	

مقادیر  $p$  نشان می‌دهد که دو پارامتر آماری واریانس و میانگین بین دو مجموعه داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل گوسی و مدل دو ضابطه‌ی در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند. همچنین مقادیر پایین خطا بر حسب دو معیار RMSE و MAPE و نیز مقادیر بالای

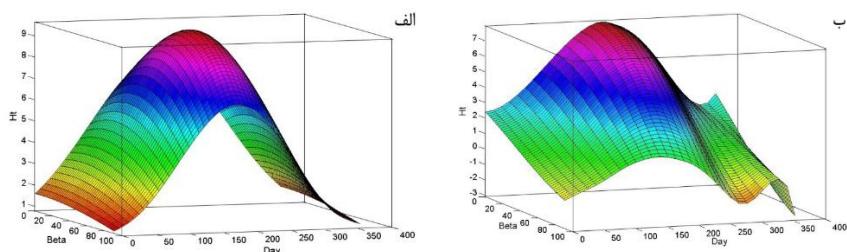
بازده پیش بینی (EF)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب تبیین تصحیح شده ( $R^2_{adj}$ ) نشان دهنده آن است که مدل دو ضابطه‌ی بازش شده را می‌توان با اطمینان برای تخمین تابش افقی استفاده کرد.

## ۵. تعیین شیب بهینه در سیستم تک محوره

پس از آنکه مدل گوسی برای تخمین وزانه تابش در موقعیت جغرافیایی منطقه بر اساس داده‌های تاریخی ۶ ساله بازش و ارزیابی شد. به کمک روش لیو جوردن آمقدار زاویه بهینه صفحه تک محوره که منجر به دریافت بیشترین انرژی وزانه می‌شود محاسبه گردید که در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در شکل ۵-ب می‌توان میزان انرژی بدست آمده به ازای  $\beta_{opt}$  متناظر هر روز را مشاهده کرد. مقادیر زاویه بهینه به صورت سالانه، ماهیانه و هفت‌های محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۶-الف نشان دهنده تغییرات  $Ht$  دریافتی در ازای  $\beta$  مختلف برای تمام روزهای سال است و شکل ۶-ب نشان دهنده میزان  $Ht$  دریافتی در ازای  $\beta_{opt}$  بدست آمده در هر روز از سال است. از شکل می‌توان متوجه شد که در تابستان با کاهش زاویه‌ی شیب میزان انرژی افزایش یافته (رابطه‌ی عکس با یکدیگر دارند) و در زمستان با افزایش زاویه‌ی شیب میزان انرژی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵) زاویه شیب بهینه پنل بر حسب وزانه (ب) میزان  $Ht$  بدست آمده متناظر با  $\beta_{opt}$  برای هر روز



شکل ۶. (الف) تغییرات  $Ht$  به ازای  $\beta$  مختلف (ب) تغییرات  $Ht$  به ازای  $\beta_{opt}$  در روزهای سال

با استفاده از زوایای بهینه بدست آمده میزان انرژی دریافتی در صورت استفاده از زاویه بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه شد . نتایج بدست آمده نشان داد که میزان دریافت انرژی در کل سال نسبت به حالت ثابت به ترتیب ۸۸/۱۵، ۲۷/۱۱، ۴۹/۰۹٪ افزایش می‌یابد. در جدول ۳ مقادیر مجموع کل تابش دریافتی سال را برای هر یک از حالت‌های زاویه بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه شد. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌کنید در صورت استفاده از شب سالانه به جای عرض جغرافیایی منطقه میزان انرژی دریافتی افزایش خواهد یافت.

این میزان افزایش به صورت سالانه است در حالی که در برخی از ماههای سال به ویژه تابستان در صورت استفاده از زاویه بهینه روزانه این میزان نیز بیشتر می‌شود به عنوان نمونه در ماه اول (۱۱ تیر تا ۱۰ مرداد ) این میزان به ۲۳٪ نیز می‌رسد و در کل سال میزان انرژی دریافتی ( $\text{kW.h/m}^2$ ) ۵۶/۱۸/۲۱ خواهد بود. در جدول ۴ درصد افزایش انرژی دریافتی برای هر ماه در صورت استفاده از زاویه بهینه روزانه محاسبه شده است.

جدول (۲) مقادیر زاویه‌ی شبیب بهمنه‌ی ماهیانه، فصلی و سالیانه محاسبه شده براساس روش لیو جوردن

ماه سال	هفته‌ی اول $\beta_{opt}$	هفته‌ی دوم $\beta_{opt}$	هفته‌ی سوم $\beta_{opt}$	ماهیانه $\beta_{opt}$	فصلی $\beta_{opt}$	سالیانه $\beta_{opt}$
زمستان ۴۹/۲۱	۵۵/۷۷	۵۹/۳۳	۵۲/۶۳	۵۴/۸۶	۵۵/۷۱	Dec
	۵۱/۷۱	۴۷/۷۸	۵۱/۳۸	۵۵/۵۷	۵۳/۲۹	Jan
	۴۰/۱۴	۳۲	۳۸/۲۵	۴۵/۵۷	۴۳/۸۶	Feb
	۲۷/۲۹	۲۴/۲۹	۲۴/۵۷	۳۲/۱۴	۳۱	Mar
	۱۶/۴۰	۹/۲۵	۱۵	۱۹/۴۳	۲۳/۱۴	Apr
	۱۵/۷۷	۳/۶۱	۲/۳۸	۵/۸۶	۷/۴۳	May
	۳/۶۱	•	•	•	•	Jun
	۱/۳۵	۴/۲۲	۰/۵۰	•	•	Jul
	۱۴/۳۹	۲۰	۱۵/۸۸	۱۱/۵۷	۸/۲۹	Aug
	۳۱/۲۷	۳۷/۲۵	۳۲	۲۹/۱۴	۲۵/۷۱	Sep
تابستان ۵/۲۵	۴۳/۳۹	۳۹/۸۹	۴۷/۷۵	۴۴	۴۲/۲۹	Oct
	۴۸/۸۳	۵۱/۲۵	۴۶/۱۳	۵۴	۴۳/۱۴	Nov

جدول ۳) مقدادیر مجموع کل تابش دریافتی سال برای زاویه‌ی شب بهینه‌ی ماهیانه، فصلی و سالیانه براساس روش لیو جوردن

عرض جغرافیایی (°۲۷/۳۶)	سالانه (°۸۳/۲۷)	شش ماه	فصلی	ماهانه	هفته‌ای	روزانه	تنظیم زاویه بهینه به صورت
مجموع H دریافتی در سال (kW.h/m <sup>2</sup> )							
۱۲۲۶/۱۶	۱۹۵۲/۰۳	۱۹۵۶/۰۵	۱۹۹۲/۲۰	۲۰۱۷/۵۵	۲۰۵۱/۷۳	۲۱۱۸/۵۶	درصد افزایش انرژی نسبت به حالت ثابت
-	۱۸/۳۷	۳۱/۳۷	۴۵/۳۸	۲۲/۳۹	۲۳/۴۰	۱۲/۴۲	درصد افزایش انرژی نسبت به حالت عرض جغرافیایی
-	۶۱/۴۴	۶۱/۵۲	۶۴/۰۷	۶۶/۷۰	۶۹/۳۳	۷۰/۸۸	درصد افزایش انرژی نسبت به حالت سالانه
-	-	۰/۰۵	۱/۶۳	۳/۲۶	۴/۸۸	۵/۸۵	

جدول ۴) درصد افزایش انرژی دریافتی برای هر ماه در صورت استفاده از زاویه بهینه روزانه براساس روش لیو جوردن

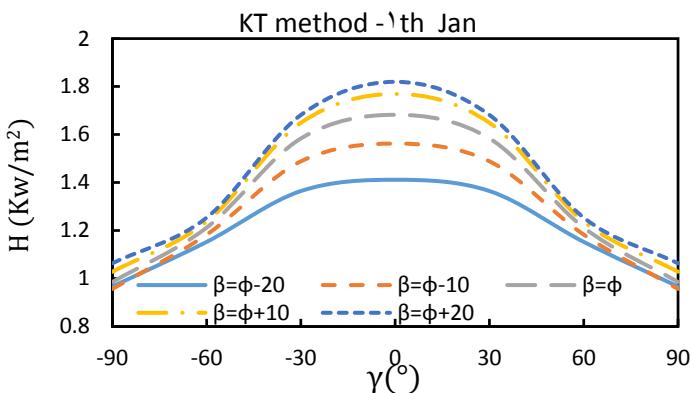
ماه سال	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan
درصد افزایش انرژی	۴/۶۲	۶/۷۱	۱۱/۲۱	۱۷/۷۷	۲۰/۸۱	۲۲/۲۹	۲۱/۱۸	۱۲/۸۶	۱۴/۹۶	۴/۹۸	۵/۲۲	۳/۶۵

گومز در تحقیق خود از سیستم‌های فتوولتائیک متمرکز کننده استفاده کردند به همین دلیل میزان دریافت انرژی افزایش می‌یابد. در تحقیقات مختلف به این دلیل شیب سالانه برابر با عرض جغرافیایی بدست آمده چون آنها برای محاسبه شیب سالانه، زاویه بهینه ماهانه را در نظر گرفته‌اند. در صورتی که اگر زاویه بهینه روزانه در نظر گرفته شود زاویه‌ی بهینه سالانه کمتر از عرض جغرافیایی بدست خواهد آمد. خراسانی و مسیحی در تحقیق خود بیان کردند که در ماه آذر تشعشع ورودی روزانه به کلکتوری با شیب بهینه در مقایسه با تشعشع ورودی به سطح افقی ۷۰٪ بیشتر است و در سایر ماه‌ها میزان افزایش تفاوت می‌کند. آنها نیز زاویه‌ی شیب سالانه را برابر با عرض جغرافیایی معرفی نکردند. خطیبی و همکارانش نیز در نتایج خود بر تنظیم زاویه‌ی بهینه پنل‌های خورشیدی در کوتاه مدت توصیه کرده‌اند. همچنین مقدم و همکارانش بیان کردند که در شهرهای زاهدان و بندرعباس زاویه شیب بهینه تنها دو بار در سال تنظیم شود، نسبت به حالتی که سیستم در طول سال ثابت است، ۸٪ انرژی بیشتری دریافت می‌شود.

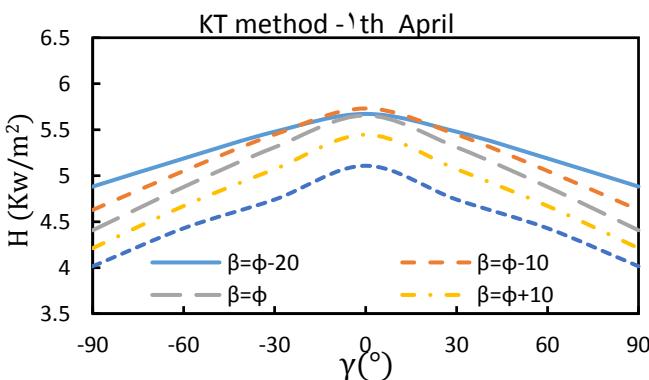
## ۶. تعیین شیب بهینه در سیستم دو محوره

مدل ایزوتربیک در مواردی کاربرد دارد که زاویه آزیموث برابر با صفر قرار داده شود. بنابراین از مدل کلین برای تعیین زوایایی بهینه سیستم دو محوره استفاده شد. در پژوهش‌های گذشته عمدها زاویه آزیموث را بررسی نکرده‌اند و مقدار بهینه را برابر با صفر در نظر گرفته‌اند. در این تحقیق با استفاده از مدل KT که انرژی دریافتی به سطح شیبدار را برا ساس دو زاویه‌ی شیب و آزیموث محاسبه می‌کند، زاویه بهینه آزیموث بدست آورده شده است.

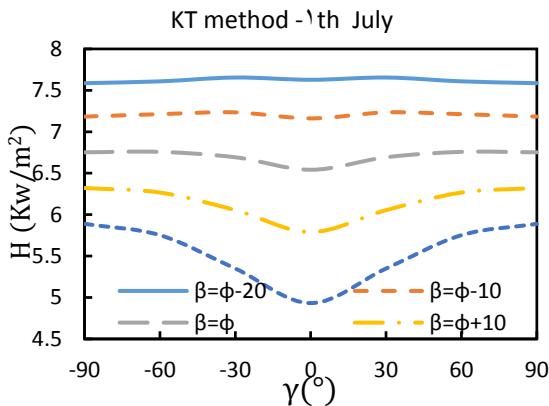
در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مقدار انرژی متوسط رسانیده به سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموث برای پنج زاویه شیب  $\varphi-20^\circ$ ,  $\varphi-10^\circ$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi+10^\circ$ ,  $\varphi+20^\circ$  برخی از روزهای سال نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۰ می‌توان گفت که بیشترین دریافت انرژی مربوط به زاویه آزیموث صفر است. همچنین با افزایش زاویه آزیموث (چه در جهت مثبت و چه در جهت منفی) میزان انرژی دریافتی کاهش می‌یابد.



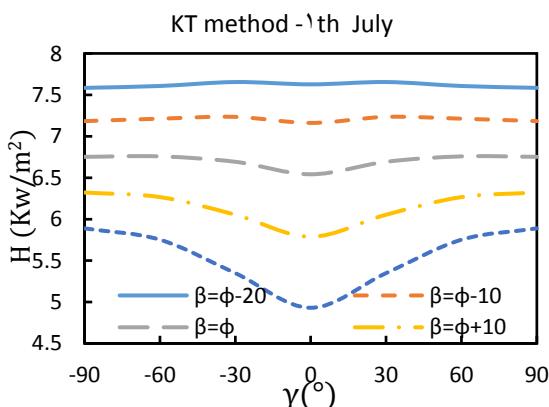
شکل ۷) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموث مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه ژانویه



شکل ۸) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموث مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه آوریل.



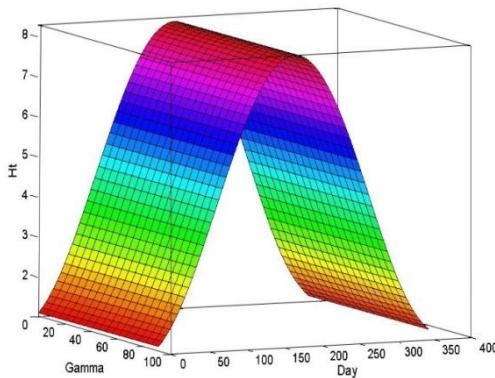
شکل ۹) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموث مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه زوالی.



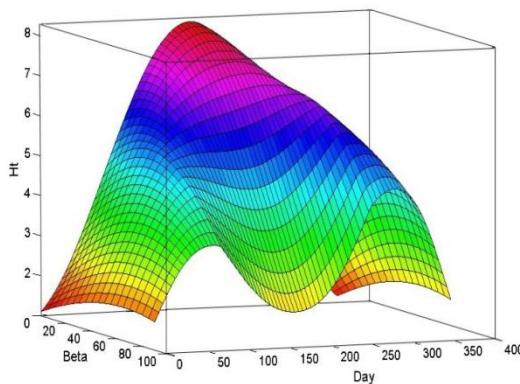
شکل ۱۰) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموث مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه اکتبر.

در شکل ۱۱ روند تاثیر گذاری زاویه آزیموث بر میزان انرژی دریافتی به ازای زاویه شیب برابر با صفر در روزهای مختلف سال نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۲ روند تاثیر گذاری زاویه آزیموث بر میزان انرژی دریافتی به ازای زاویه آزیموث برابر با صفر در روزهای مختلف سال نشان داده شده است. در شکل ۱۳ روند تاثیر گذاری زاویه آزیموث و زاویه شیب بر میزان انرژی دریافتی در روز اول سال

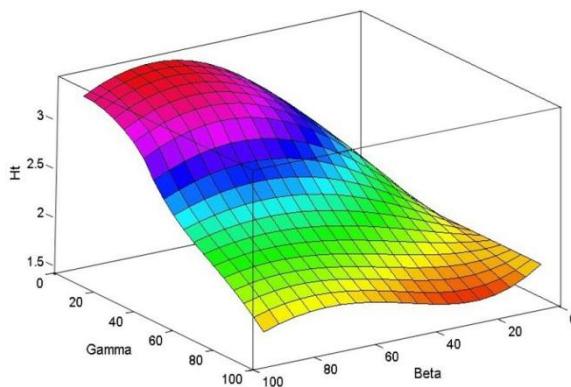
میلادی نشان داده است که تایجی که حاصل می‌شود . با توجه به اینکه روز اول سال میلادی برابر با ۱۱ دی ماه است؛ باید زاویه‌ی شیب به  $90^\circ$  درجه نزدیک و زاویه‌ی آزمون به صفر درجه هرچه نزدیکتر باشد میزان انرژی دریافتی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱) روند تاثیر گذاری زاویه آزمون بر میزان انرژی دریافتی به ازای زاویه شیب ثابت در روزهای مختلف سال



شکل ۱۲) روند تاثیر گذاری زاویه شیب بر میزان انرژی دریافتی به ازای زاویه آزمون ثابت در روزهای مختلف سال.

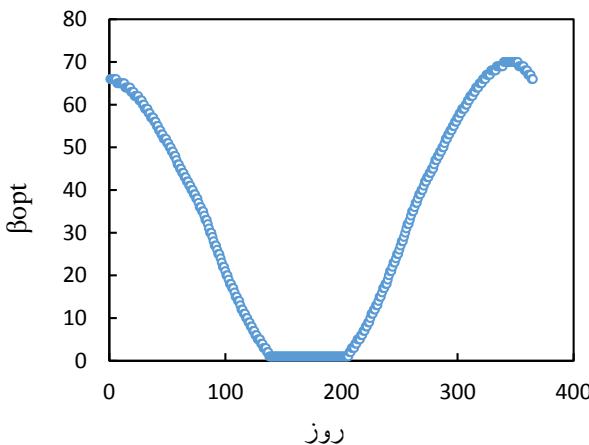


شکل ۱۳) روند تاثیر گذاری زاویه آزیموث و زاویه شیب بر میزان انرژی دریافتی در روز اول سال میلادی

با بررسی نتایج بدست آمده از برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک برای سیستم دو محوره می‌توان دریافت که بیشترین مقدار انرژی در ماه ژانویه در زاویه شیب  $\varphi = 20^\circ$  باشد. همچنین در زوئن حداقل مقدار انرژی برای زاویه شیب  $\varphi = 20^\circ$  می‌باشد و زاویه آزیموث بهینه برای دریافت بیشترین انرژی در تمام سال برابر با صفر است. با استفاده از زوایای بهینه دو محوره میزان انرژی دریافتی در صورت استفاده از زاویه بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان دریافت انرژی در کل سال نسبت به حالت ثابت به ترتیب  $23/48$ ،  $29/32$ ،  $11/11$ ،  $14/24$ ،  $11/62$ ،  $10/31$ ٪ افزایش می‌باید. در جدول ۵ درصد افزایش انرژی هر یک از حالت‌های زاویه بهینه روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه نسبت به حالت ثابت و تک محوره محاسبه شد. در شکل ۱۴ زاویه‌ی شیب بهینه برای هر روز در سیستم دو محوره نشان داده شده است. به منظور مقایسه‌ی زاویه بهینه بدست آمده در سیستم تک محوره و دو محوره طرح آماری به روش مقایسه‌ی زوجی در سطح احتمال یک درصد انجام شد. نتایج مقایسات آماری مقادیر پیش‌بینی شده‌ی  $\beta_{opt}$  دو سیستم به صورت مقادیر  $p$  برای مقایسات آماری میانگین و واریانس در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دو سیستم در سطح یک درصد با یکدیگر اختلاف معنادار دارند.

جدول ۵) درصد افزایش انرژی دریافتی در صورت استفاده از سیستم دو محوره

تنظیم زاویه بهینه به صورت	روزانه	ماهانه	هفته‌ای	فصلی	ماهانه	روزانه	سالانه
درصد افزایش انرژی نسبت به حالت ثابت	۲۹/۳۲	۱۸/۱۱	۱۴/۲۴	۱۱/۶۲	۱۰/۳۱		
درصد افزایش انرژی نسبت به حالت تک محوره	۱۰/۳۶	۸/۸۱	۵/۸۴	۳/۶۷	۲/۱۷		



شکل ۱۴) زاویه شیب بهینه بدست آمده برای هر روز در سیستم دو محوره

## ۷. نتیجه گیری

یکی از مهمترین عواملی که بر کارایی آرایه‌های خورشیدی و مقدار تابش دریافتی شان اثر می‌گذارد، زاویه شیب آنها نسبت به سطح افق است. در نوشتار حاضر، مقدار تابش دریافتی روی سطوح شیبدار با زوایای مختلف در شهر مشهد با مدلسازی ریاضی، محاسبه و پس از بررسی، نتیجه گرفته می‌شود که :

- با توجه به انحراف معیار داده‌های تابشی، هر چه فاصله‌ی بین تنظیم شیب سیستم خورشیدی کمتر باشید انرژی دریافتی افزایش می‌یابد. هر چه فاصله‌ی تنظیم شیب کاهش یابد میزان انرژی دریافتی در کل سال افزایش می‌یابد.

۲. با تنظیم روزانه شب بیشترین انرژی دریافتی را خواهیم داشت.
۳. مقدار بهینه‌ی زاویه آزمود برای دریافت بیشترین میزان انرژی برابر با صفر است.
۴. زاویه بهینه برای تنظیم فصلی در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب  $15^{\circ}$ ،  $15^{\circ} 41^{\circ}$ ،  $15^{\circ} 45^{\circ}$  و  $49^{\circ}$  است. تفاوت زاویه‌ی بهینه به خصوص در بهار و تابستان نسبت به پاییز و زمستان بر اهمیت تنظیم زاویه شب به صورت کوتاه مدت تأکید دارد.
۵. زاویه‌ی بدست آمده برای تنظیم سالانه برابر با  $28^{\circ}$  است که این مقدار حدود ۸ درجه از عرض جغرافیایی منطقه کمتر است.

## منابع

- [۱] ابراهیم پور، ع.، معرفت، م.، نیری، م. ۱۳۸۸. مقایسه روش‌های مختلف پیش‌بینی تابش دیفیوز برای اقلیم‌های ایران. مجله علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی. ۲۱: ۲۷-۱.
- [۲] بهرامی، ا. و عباسپور ثانی، ک. ۱۳۹۱، تعیین زاویه شب بهینه آرایه‌های خوشیدی در شرایط اقلیمی کرج، نشریه انرژی ایران.
- [۳] ثقیل‌مقدم، پوینده، ۱۳۸۹، شب بهینه‌ی گردآوری‌های خورشیدی و مقایسه با حالت نصب شده روی نمای جنوبی در تهران.
- [۴] خراسانی، ح.، مسیحی، م. ۱۳۹۲. تعیین زاویه شب بهینه‌ی ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی. ۴: ۳۹-۴۸.
- [۵] طالبی‌زاده، پ.، مهرابیان، م.، عبدالزاده، م. ۱۳۹۰. تعیین زوایای بهینه سطح و سمت الراس کلکتورهای تخت (سطح) خورشیدی در مطالقی از جنوب شرق ایران، مهندسی مکانیک شریف، ۳-۲۸.
- [۶] عبدالزاده، م.، جعفری، س.، رهنما، م.، عامری، م. ۱۳۸۷. تعیین زاویه بهینه پنل خورشیدی برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان. نشریه بین‌المللی علوم مهندسی. ۱۹: ۹۱-۹۸.
- [۷] نمازیان، ع. ۱۳۸۹. اصول استفاده از تابش خورشید در طراحی معماری تنظیم شرایط محیطی). انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.

- [8] Adrian,W.Y.W., Durairajah,V and Gobee,S. 2014. Autonomous Dual Axis Solar Tracking System Using Optical Sensor and Sun Trajectory. Lecture Notes in Electrical Engineering 291.
- [9] Benghanem, M. Optimization of Tilt Angle for Solar Panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia. 2011. Applied Energy.88:4:1427–1433.
- [10] Demain,C. Journée,M and Bertrand,C. 2013. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined Surfaces. Renewable Energy. 50: 710-721.

- 
- [11] Engin,M and Engin,D. 2013. Optimization Controller for Mechatronic Sun Tracking System to Improve Performance. *Advances in Mechanical Engineering.* 143652:9.
  - [12] Gopinathan KK, Maliehe NB, Mpholo MI, 2007, A study on the intercepted insolation as a function of slope and azimuth of the surface, *Energy*, pp.213-220.
  - [13] Khatib,T. Mohamed,M. Mahmoud,M and SopiaN,K. 2015. Optimization of the Tilt Angle of Solar Panels for Malaysia. *Energy Sources.* 37:606–613.
  - [14] Gomez –Gil Fj, wang X, Barnet A, 2012. Energy production of photovoltaic systems:fixed, tracking, and concentrating. *Renewable and sustainable energy reviews* 16(1):306-13.
  - [15] Klein.S.A, 1977. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, VoL 19, pp. 325-329.
  - [16] Lahjouji.D, Darhmaoui.H, 2013. Tilt Angle Optimization for Maximum Solar Energy Collection - Case Study for Ifrane, Morocco.
  - [17] Liu, B.Y.H., Jordan, R.C. 1979. Daily Insolation on Surfaces Tilted Towards the Equator. *Transactions ASHRAE*, 526- 541, 1979.
  - [18] Moghadam, H., Farshchi Tabrizi, F. and Zolfaghari Sharak, A. 2011. Optimization of solar flat collector inclination. *Desalination.* 265: 107-111
  - [19] Talebizadeh.P ,Mehravian.M.A andAbdolzadeh.M. 2014. Determination of Optimum Slope Angles of Solar Collectors Based on New Correlations", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.*
  - [20] Tamimi A. I., 2011, Modeling of optimum inclination angles of solar systems for Amman, Jordan, *Renewable and Sustainable Energy* 3, 43109.
  - [21] Ulgen K.,2006, Optimum tilt angle for solar collectors *Energy Sources, Part A: Recoveryy, Utilization and Environmental Effects*, v 28, pp. 1171-1180