

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

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

### چکیده

آرایه‌های خورشیدی یکی از نوید بخش‌ترین فناوری‌های تجدیدپذیر در تامین 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، تغییرات 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 آزیموث 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 آزیموث و زاویه شیب بهینه برای مشهد بدست آمد. در حالت کلی در سیستم تک محوره در کل سال مجموع انرژی بدست آمده نسبت به انرژی دریافتی روی سطح افق ۱۸٪ افزایش می‌یابد و در سیستم دو محوره در کل سال مجموع انرژی بدست آمده نسبت به انرژی دریافتی روی سطح افق ۳۰٪ و نسبت به حالت تک محوره در کل سال ۱۱٪ افزایش می‌یابد.

### تاریخ دریافت:

۱۳۹۵/۵/۱۰

### تاریخ پذیرش:

۱۳۹۵/۸/۸

### کلمات کلیدی:

آرایه‌های خورشیدی،  
انرژی خورشیدی،  
حداکثر انرژی،  
زاویه بهینه

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم دانشگاه فردوسی مشهد

ma.abdolahpour@yahoo.com

۲. استادیار گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول)

mahmood.golzarian@gmail.com

hazarchi@gmail.com

۳. استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱. مقدمه

با توجه به اینکه بیشترین انرژی تابشی از خورشید زمانی حاصل می شود 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 می توان از ردیاب خورشیدی که به طور لحظه‌ای خورشید را دنبال می کند یا تنظیم روزانه زاویه شیب سطح استفاده کرد [۱۱،۸].

گومز و همکارانش [14] در آزمایش هایی که در اسپانیا داشتند به این نتیجه رسیدند که میزان دریافت انرژی برای ردیاب دو محوره سیستم های فتوولتائیک متمرکز کننده ۲۵/۲ درصد و برای ردیاب تک محوره ۲۲/۳ درصد نسبت به حالت ثابت به صورت سالانه افزایش می یابد. بینقلم [9] طی آزمایشاتی که در شهر مدینه انجام دادند زاویه ی بهینه به منظور افزایش انرژی دریافتی را بدست آورد. وی به این نتیجه رسید که زاویه شیب بهینه سالانه تقریباً برابر با عرض جغرافیایی منطقه است و همچنین انرژی بدست آمده با شیب ماهانه نسبت به شیب سالانه ۰.۸٪ افزایش می یابد. لهجوچی و درهمویی [16] از مدل ریاضی برای محاسبه ی تابش خورشید در سطح شیبدار در مراکش استفاده کردند. آنها زاویه بهینه ماهانه، فصلی و سالانه را محاسبه کردند. زاویه فصلی را در بهار ۲۱/۵ درجه، تابستان ۰/۶، پاییز ۵۱/۲ و تابستان ۶۲/۸ درجه بدست آوردند و مطرح کردند که زاویه سالانه با عرض جغرافیایی برابر است. دمین و همکاران [10] به بررسی مدل های مختلف تعیین زاویه ی شیب بهینه برای بلژیک پرداختند. آنها عملکرد نسبی مدل های مختلف را در شرایط آب و هوایی مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که هیچ کدام از مدل ها در تمام شرایط آب و هوایی عملکرد مناسبی ندارد بنابراین مدلی جدید برای بلژیک توسعه دادند که براساس آن زاویه ی شیب بهینه با توجه به عرض جغرافیایی را تعیین می کردند. خطیبی و همکارانش [13] به بررسی زاویه ی شیب پنل های خورشیدی در پنج نقطه از مالزی به صورت ماهانه و فصلی پرداختند. نتایج نشان دادند که بهینه سازی شیب پنل در مالزی به صورت فصلی توصیه کردند؛ در حالی که تغییر زاویه ی بهینه برای شرق مالزی شامل Sabah و Sarawak states را به صورت ماهانه توصیه کردند. تحقیق مقدم و همکارانش [18] که در شهرهای زاهدان و بندرعباس صورت گرفت حاکی از آن است که اگر 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. شیب بهینه برای شهر امان اردن توسط تمیمی مورد مطالعه قرار گرفت [20] او شیب بهینه را  $\text{opt}=31/3$  پیشنهاد داد که نزدیک به شیب بهینه ای است که توسط NASA برای شهر امان گزارش شده بود. گوپینسن و همکاران [12] با استفاده از یک مدل ریاضی جدید زاویه شیب و سمت الراس بهینه را برای آفریقای جنوبی ارائه کردند. یلگن [21] با استفاده از یک مدل ریاضی زاویه شیب بهینه در شهر ازبیر ترکیه را محاسبه کرد و همچنین زوایای 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 شناسی برای محاسبه تابش خورشیدی کل روی سطوح شیبدار به منظور تعیین زاویه شیب مناسب برای آرایه‌های خورشیدی در کرج استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییرات زاویه شیب بهینه بین صفر تا 69 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 شیب بهینه سالانه به طور متوسط  $31/66$  درجه می‌باشد که زاویه ثابت و مطلوب در سال است. ثقفی و همکاران [3] مقدار تابش دریافتی روزانه برای زوایای شیب صفر تا 90 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 30 درجه است. زاویه بهینه ماه‌های سرد سال حدود 55 درجه و زاویه بهینه ماه‌های گرم سال حدود 10 درجه است. عبدالزاده و همکاران [6] در تحقیقی با استفاده از مدل‌های مختلفی زاویه بهینه شیب پنل‌های خورشیدی جهت دریافت بیشترین میزان تشعشع متوسط ماهیانه خورشیدی در شهر کرمان محاسبه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از روش لیو جوردن حداقل زاویه شیب بهینه ماهانه برابر با  $0/88$  و حداکثر آن برابر با  $60/71$  درجه است و با استفاده از روش لیو جوردن زاویه شیب بهینه سالانه برابر با  $27/35$  درجه است. طالبی زاده و همکاران [5] زوایای شیب و سمت الراس کلکتورهای خورشیدی به منظور دریافت بیشترین تشعشع خورشید در شهرهای کرمان، یزد، زاهدان، بیرجند، 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 دریافت بیشترین تشعشع خورشید صفر است و در روزهای مختلف سال زوایای شیب مختلف است. خراسانی و مسیحی [4] به بررسی زاویه شیب بهینه‌ی کلکتورهای

خور شیدی تخت در کاشان پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که تنظیم شیب حداقل هر ماه یک بار لازم است و زاویه بهینه حداکثر و حداقل به ترتیب ۶۰ درجه برای ماه آذر و صفر درجه برای دو ماه خرداد و تیر می‌باشد. آنها همچنین زاویه بهینه را به صورت فصلی معرفی کردند و بیان کردند که زاویه شیب 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 خور شیدی 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 شیب بهینه نصب پنل های خورشیدی تک محوره و دو محوره برای شهر مشهد براساس دو مدل ریاضی ليو 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 خور شید از سازمان هواشناسی مشهد از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ دریافت شدند. برای بدست آوردن میانگین روزانه تابش کل در سطح افق از داده‌های اداره‌ی هواشناسی مشهد در طی سال‌های مورد مطالعه میانگین‌گیری 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 رسیده به سطوح شیبدار را محاسبه می‌کنند. تشعشع کل روی یک سطح شیبدار 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 ليو جوردن:** اولین روش برای بدست آوردن  $H_T$ ، روش ليو جوردن است که توسط Liu ارائه شده است [۱۷، ۶]. با استفاده از این روش مقدار تشعشع میانگین ماهیانه بر روی سطوح شیبدار به شرح زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن  $\beta$  زاویه شیب،  $\rho$  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.

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

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

در رابطه‌های ۳ و ۴ علامت مثبت برای نیم کره جنوبی و علامت منفی برای نیم کره شمالی است. که در آن عرض جغرافیایی محل، زاویه‌ی انحراف محور کره زمین در بازه‌ی زمانی مورد نظر (رابطه‌ی ۵)،  $s$ ، زاویه‌ی طلوع خورشید در سطح افق و  $s$  و زاویه‌ی طلوع خورشید در سطح شیبدار بر حسب درجه (رابطه‌ی ۶) می‌باشند.

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

$$\omega'_s = \min \left[ \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi \mp \beta) \tan \delta) \right] \quad (6)$$

$n$  جمع روزهای سال از اول ژانویه تا روز مورد نظر. ضریب صافی هوا ( $K_{th}$ ): برابر است با نسبت انرژی تابشی دریافتی توسط 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 ی ضریب صافی هوا از رابطه ی ۹ به دست می آید :

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

$\rho$  ضریب انعکاس زمین بوده که مقدار آن بسته به نوع پوشش محیط از  $0/2$  تا  $0/8$  متغییر 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 متغییر است از این روش برای تعیین زاویه بهینه ی سیستم های تک محوره استفاده شد.

روش کلین: Klein روشی را ارائه کرده است (مدل KT) که تاثیر زوایای آزیموث را نیز مورد ارزیابی قرار می دهد و روابط آن به شکل رابطه های ۱۰ تا ۱۹ نوشته می شود [۱۹، ۱۶، ۱۵]:

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

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

مقدار D از رابطه ی ۱۲ بدست می آید:

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

مقادیر سه گانه G طبق رابطه ی ۱۳ به دست می آید:

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

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

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

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

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

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

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

$$|\omega_{ss}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (۱۶-الف)$$

$$\omega_{ss} = \begin{cases} +|\omega_{ss}| & \text{if } (A > 0 \text{ and } B > 0) \text{ or } (A \geq B) \\ -|\omega_{ss}| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۱۶-ب)$$

$$A = \cos\beta + \tan\varphi \cos\gamma \sin\beta \quad (۱۷-الف)$$

$$B = \cos\omega_s \cos\beta + \tan\delta \cos\gamma \sin\beta \quad (۱۷-ب)$$

$$C = \frac{\sin\beta \sin\gamma}{\cos\varphi} \quad (۱۷-ج)$$

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

$$\text{for } \omega_s \leq 81.4^\circ \quad (۱۸)$$

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

$$\text{for } \omega_s > 81.4^\circ \quad (۱۹)$$

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

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 رگرسیون 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 می باشند:

$$H = a \exp\left(-\left(\frac{n-b}{c}\right)^2\right) \quad (۲۰)$$

$$\begin{aligned} H &= an^3 + bn^2 + cn + d & n &\leq 182 \\ H &= qn^3 + wn^2 + vn + z & n &> 182 \end{aligned} \quad (۲۱)$$

که در آن  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و ... ضرایب رگرسیونی و  $n$  شماره روز از سال می باشد.

برای ارزیابی توانایی مدل های ۲۰ و ۲۱ جهت تخمین مقدار تابش کل علاوه بر ضریب تبیین ( $R^2$ ) و مقایسه داده های واقعی و پیش بینی شده از لحاظ آماری، از میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و متوسط درصد قدرمطلق خطا (MAPE) استفاده شد.

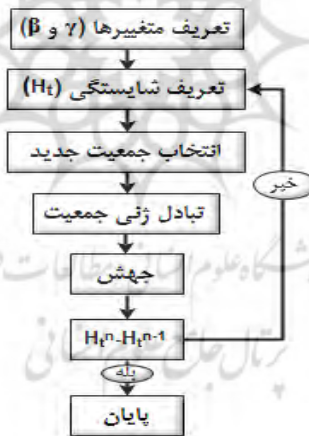
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{H_{act} - H_{pre}}{H_{act}} \right| \times 100 \quad (22)$$

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

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 بیشترین تشعشع خورشید بر حسب زوایای پنل از الگوریتم ژنتیک تک منظوره استفاده شده است. تابع تشعشع رسیده به سطح شیبدار به عنوان تابع شایستگی و زوایای شیب و آزیموت ( و ) 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 متلب به کمک روابط ۱ تا ۱۶ پیاده سازی شد.



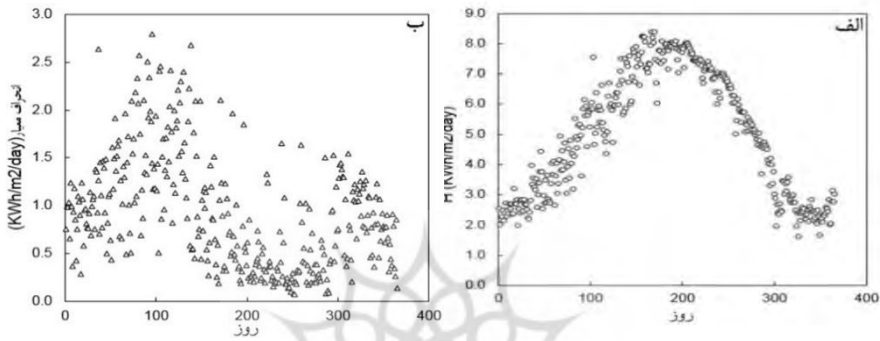
شکل ۱) مراحل الگوریتم ژنتیک

### 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

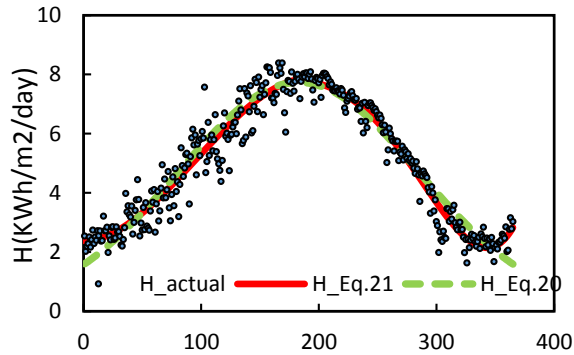


شود، میزان انحراف معیار انرژی دریافتی در روزهای مختلف یک ماه متغیر است. در فصل‌های زمستان، بهار و پاییز به دلیل متغیر بودن آب و هوای روزانه میزان انحراف معیار زیاد است و در فصل تابستان میزان انحراف معیار کمتر است (شکل ۲-ب) بنابراین محاسبه زاویه بهینه به صورت روزانه و با دوره مدت کوتاه‌تری ضروری می‌تواند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



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

در این مقاله دو مدل گو سی (رابطه ۲۰) و رگرسیون 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 بخشیدن به مقادیر زوایای بهینه کلکتور در منطقه مورد مطالعه داشتن مدلی جهت تخمین مقدار تابش ضروری است. شکل ۳ مدل گو سی (eq20) و دو ضابطه‌ی (eq21) برازش 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 برآورد شده برای تابع گو سی در رابطه ۲۴ و برای تابع دو ضابطه‌ی در رابطه‌ی ۲۵ نشان داده شده است.



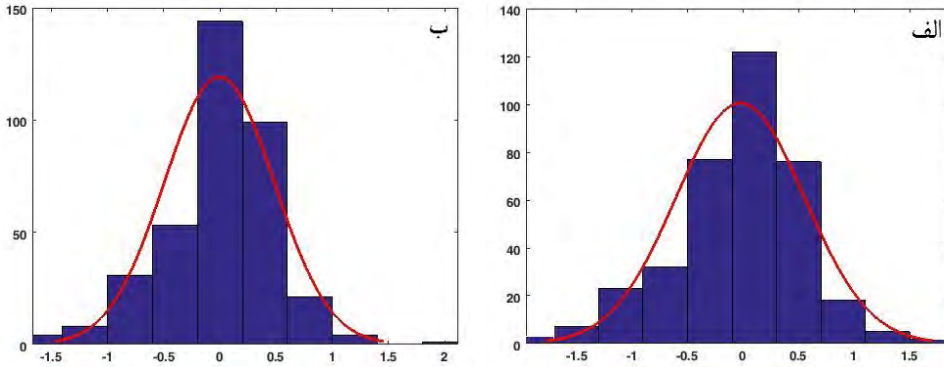
شکل ۳) متوسط میزان انرژی تابشی دریافت شده در سطح افق طی شش سال همراه با تابع گوسی برازش شده.

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

$$\begin{aligned} H &= -1.543 \times 10^{-8} \times n^5 + 0.0004415 \times n^4 + 0.000761 \times n^3 + \\ H &= -2.338 \times 10^{-8} \times n^4 - 2.219 \times 10^{-8} \times n^3 + 0.007545 \times n^2 \end{aligned} \quad (25)$$

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  $-0.6$  تا  $0.6$  است. همچنین توزیع خطاها نیز نزدیک به حالت نرمال می‌باشد.

برای ارزیابی اعتبار بیشتر مدل رگرسیونی گوسی و مدل دو ضابطه‌ی برازش شده، مقایسه آماری بین مقادیر پیش بینی 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 ضابطه‌ی (ب) برازش شده در طول روزهای سال همراه با نمودار نرمال آن

جدول ۱) عملکرد پیش بینی مدل رگرسیونی و دو ضابطه‌ی برازش شده

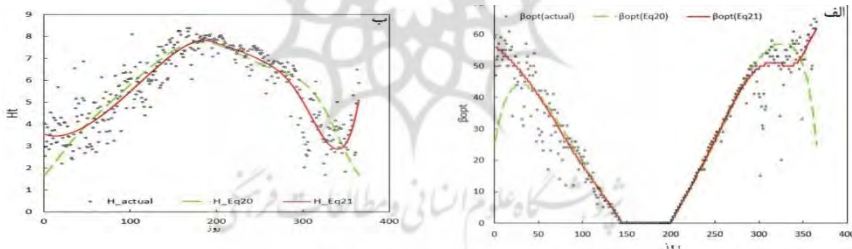
p-value		Criterion of error					مدل مورد استفاده
Mean	Variance	RMSE	MAPE(%)	EF(%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	
۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۵۷	۱۱/۶۰	۹۱/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۲	مدل رگرسیونی (eq15)
۰/۹۶	۰/۵۹	۰/۴۹	۸/۷۳	۹۴/۲۵	۰/۹۴	۰/۹۴	مدل دو ضابطه (eq16)

مقادیر p نشان می دهد که دو پارامتر آماری واریانس و میانگین بین دو مجموعه داده های واقعی و پیش بینی 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

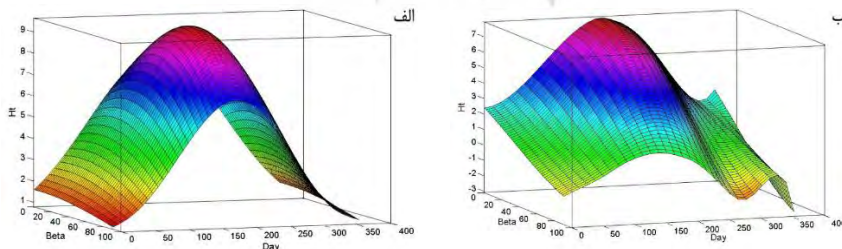
بازده پیش بینی (EF)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب تبیین تصحیح شده ( $R^2_{adj}$ ) نشان دهنده آن است که مدل دو ضابطه‌ی برازش شده را می‌توان با اطمینان برای تخمین تابش افقی استفاده کرد.

### ۵. تعیین شیب بهینه در سیستم تک محوره

پس از آنکه مدل گوسی برای تخمین روزانه تابش در موقعیت جغرافیایی منطقه بر اساس داده‌های تاریخی ۶ ساله برازش و ارزیابی شد. به کمک روش لیو جوردن مقدار زاویه بهینه صفحه تک محوره که منجر به دریافت بیشترین انرژی روزانه 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  $H_t$  دریافتی در ازای  $\beta$  مختلف برای تمام روزهای سال است و شکل ۶-ب نشان دهنده میزان  $H_t$  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) الف) زاویه شیب بهینه پنل بر حسب روزانه (ب) میزان  $H_t$  بدست آمده متناظر با  $\beta_{opt}$  برای هر روز



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

با استفاده از زوایای بهینه‌ی 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  $۱۳/۰۵$ ،  $۱۱/۲۷$ ،  $۹/۴۹\%$  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 شیب 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 Jul (۱۱ تیر تا ۱۰ مرداد) این میزان به  $۲۳\%$  نیز می‌رسد و در کل سال میزان انرژی دریافتی ( $\text{kW.h/m}^2$ )  $۲۱۱۸/۵۶$  خواهد بود. در جدول ۴ درصد افزایش انرژی دریافتی برای هر ماه در صورت استفاده از زاویه بهینه روزانه محاسبه شده است.

جدول ( مقادیر زاویه‌ی شیب بهینه‌ی ماهیانه، فصلی و سالیانه محاسبه شده براساس روش لیو جوردن

ماه سال	$\beta_{opt}$ هفته‌ی اول	$\beta_{opt}$ هفته‌ی دوم	$\beta_{opt}$ هفته‌ی سوم	$\beta_{opt}$ هفته‌ی چهارم	$\beta_{opt}$ ماهیانه	$\beta_{opt}$ فصلی	$\beta_{opt}$ سالیانه
Dec	۵۵/۷۱	۵۴/۸۶	۵۲/۶۳	۵۹/۳۳	۵۵/۷۷	زمستان	
Jan	۵۳/۲۹	۵۵/۵۷	۵۱/۳۸	۴۷/۷۸	۵۱/۷۱	زمستان	۴۹/۲۱
Feb	۴۳/۸۶	۴۵/۵۷	۳۸/۲۵	۳۲	۴۰/۱۴	بهار	
Mar	۳۱	۳۲/۱۴	۲۴/۵۷	۲۴/۲۹	۲۷/۲۹	بهار	
Apr	۲۳/۱۴	۱۹/۴۳	۱۵	۹/۲۵	۱۶/۴۰	بهار	۱۵/۷۷
May	۷/۴۳	۵/۸۶	۲/۳۸	.	۳/۶۱	تابستان	۲۷/۸۳
Jun	.	.	.	.	.	تابستان	
Jul	.	.	۰/۵۰	۴/۲۲	۱/۳۵	تابستان	۵/۲۵
Aug	۸/۲۹	۱۱/۵۷	۱۵/۸۸	۱۴/۳۹	۱۴/۳۹	پاییز	
Sep	۲۵/۷۱	۲۹/۱۴	۳۲	۳۷/۲۵	۳۱/۲۷	پاییز	
Oct	۴۲/۲۹	۴۴	۴۷/۷۵	۳۹/۸۹	۴۳/۳۹	پاییز	۴۱/۱۰
Nov	۴۳/۱۴	۵۴	۴۶/۱۳	۵۱/۲۵	۴۸/۶۳	پاییز	



جدول ۳) مقادیر مجموع کل تابش دریافتی سال برای زاویه‌ی شیب بهینه‌ی ماهیانه، فصلی و سالیانه براساس روش لیو چوردن

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

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

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

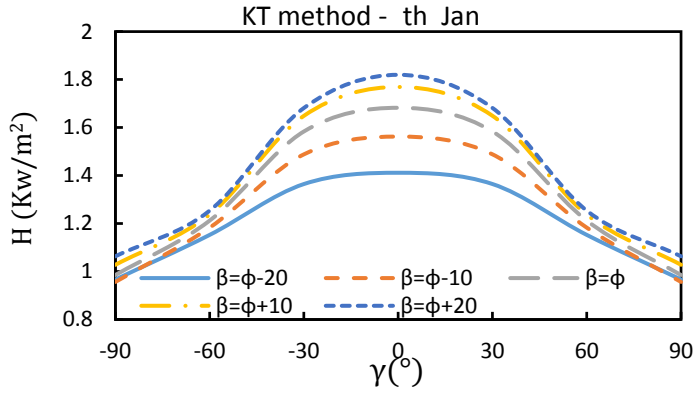
گومز در تحقیق خود از سیستم‌های فتوولتائیک متمرکز کننده استفاده کردند به همین دلیل میزان دریافت انرژی افزایش می‌یابد. در تحقیقات مختلف به این دلیل شیب سالانه برابر با عرض جغرافیایی بدست آمده چون آنها برای محاسبه شیب سالانه، زاویه بهینه ماهانه را در نظر گرفته اند. در صورتی که اگر زاویه بهینه روزانه در نظر گرفته شود زاویه 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 زاویه شیب سالانه را برابر با عرض جغرافیایی معرفی نکردند. خطیبی و همکارانش نیز در نتایج خود بر تنظیم زاویه 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

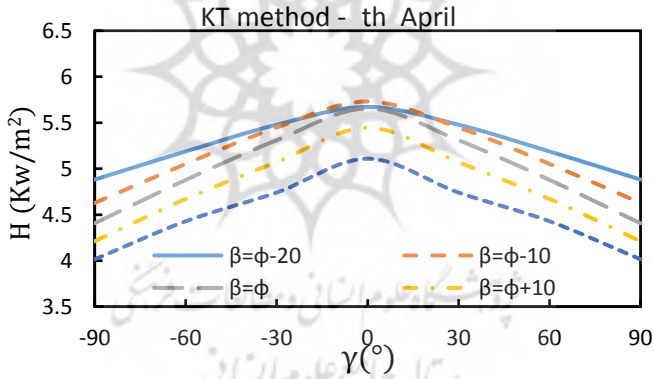
مدل ایزوتریپیک در مواردی کاربرد دارد که زاویه آزیموث برابر با صفر قرار داده شود. بنابراین از مدل کلین برای تعیین زوایای بهینه سیستم دو محوره استفاده شد. در پژوهش‌های گذشته عمدتاً زاویه آزیموث را بررسی نکردند و مقدار بهینه را برابر با صفر در نظر گرفته‌اند. در این تحقیق با استفاده از مدل KT که انرژی دریافتی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

در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مقدار انرژی متوسط رسیده به سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموث برای پنج زاویه شیب ۲۰-، ۱۰-، ۰، +۱۰، +۲۰ برای 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.

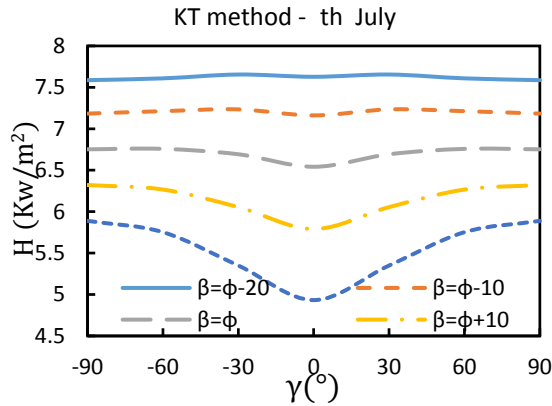




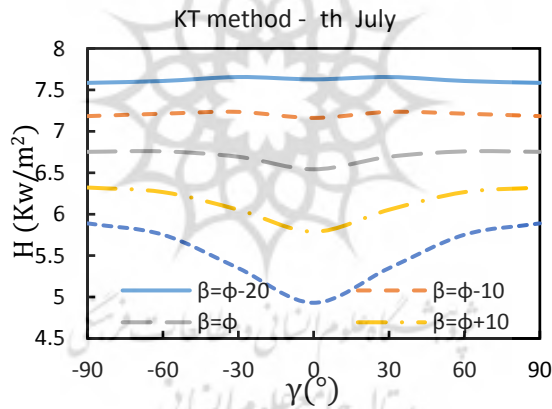
شکل ۷) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموت مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه ژانویه



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



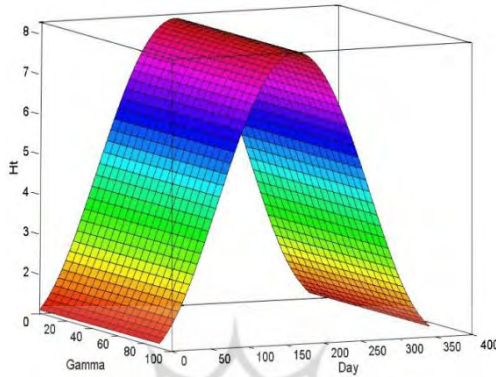
شکل ۹) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموت مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه ژولای.



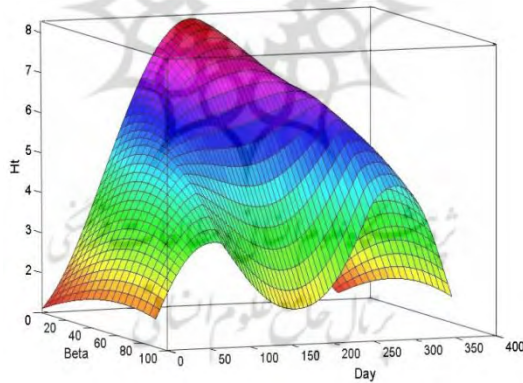
شکل ۱۰) مقادیر متوسط روزانه انرژی تشعشعی کل رسیده به یک سطح شیبدار بر حسب زاویه آزیموت مختلف برای زوایای مختلف شیبدار در اولین روز ماه اکتبر.

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

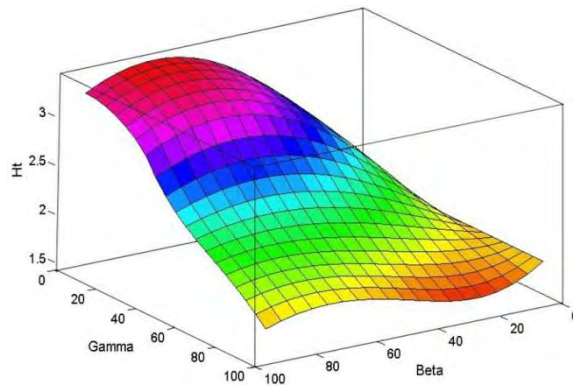
میلادی نشان داده شده است که نتایجی که حاصل می‌شود. با توجه به اینکه روز اول سال میلادی برابر با ۱۱ دی ماه است؛ باید زاویه‌ی شیب به ۹۰ درجه نزدیک و زاویه‌ی آزیموت به صفر درجه هرچه نزدیکتر باشد میزان انرژی دریافتی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱) روند تاثیر گذاری زاویه آزیموت 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 آزیموت ثابت در روزهای مختلف سال.

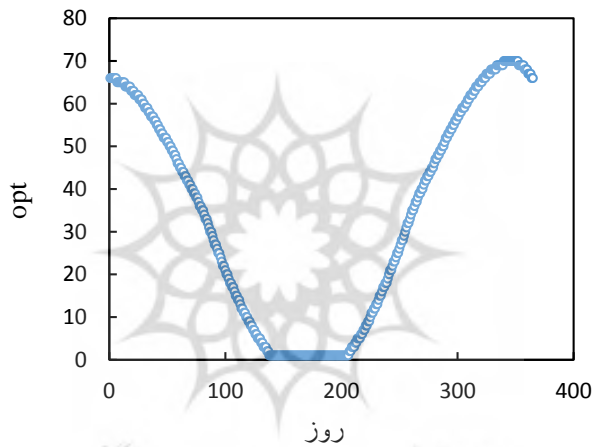


شکل ۱۳) روند تاثیر گذاری زاویه آزیموت و زاویه شیب بر میزان انرژی دریافتی در روز اول سال میلادی

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  $40^\circ$  می‌باشد. همچنین در ژوئن حداکثر مقدار انرژی برای زاویه شیب  $20^\circ$  می‌باشد و زاویه آزیموت بهینه برای دریافت بیشترین انرژی در تمام سال برابر با صفر است. با استفاده از زوایای بهینه‌ی بدست آمده در سیستم 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  $29/32$ ،  $23/48$ ،  $18/11$ ،  $14/24$ ،  $11/62$ ،  $10/31$ ٪ افزایش می‌یابد. 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 پیش بینی شده‌ی Opt دو سیستم به صورت مقادیر p برای مقایسات آماری میانگین و واریانس در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که Opt 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	هفته ای	ماهانه	فصلی	شش ماه سالانه
درصد افزایش انرژی نسبت به حالت ثابت	۲۹/۳۲	۲۳/۴۸	۱۸/۱۱	۱۴/۲۴	۱۱/۶۲
درصد افزایش انرژی نسبت به حالت تک محوره	۱۰/۳۶	۸/۸۱	۵/۸۴	۳/۶۷	۳/۱۷



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:

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

۲. با تنظیم روزانه شیب بیشترین انرژی دریافتی را خواهیم داشت.
۳. مقدار بهینه‌ی زاویه آزیموث برای دریافت بیشترین میزان انرژی برابر با صفر است.
۴. زاویه بهینه برای تنظیم فصلی در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱۵، ۵، ۴۱ و ۴۹ است. تفاوت زاویه‌ی بهینه به خصوص در بهار و تابستان نسبت به پاییز و زمستان بر اهمیت تنظیم زاویه شیب به صورت کوتاه مدت تاکید دارد.
۵. زاویه‌ی بدست آمده برای تنظیم سالانه برابر با ۲۸ است که این مقدار حدود ۸ درجه از عرض جغرافیایی منطقه کمتر است.

## منابع

- [۱] ابراهیم پور، ع.، معرفت، م.، نیری، ه. ۱۳۸۸. مقایسه روش های مختلف پیش بینی تابش دیفیوز برای اقلیم های ایران. مجله علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی. ۲۱: ۱-۲۷.
- [۲] بهرامی، ا. و عباسپور ثانی، ک. ۱۳۹۱، تعیین زاویه شیب بهینه آرایه های خورشیدی در شرایط اقلیمی کرج، نشریه انرژی ایران.
- [۳] ثقفی، م.ج، اسدی خاجی، م.، پوینده، ر.، ۱۳۸۹، شیب بهینه‌ی گردآوری‌های خورشیدی و مقایسه با حالت نصب شده روی نمای جنوبی در تهران.
- [۴] خراسانی، ح.، مسیحی، م. ۱۳۹۲. تعیین زاویه‌ی شیب بهینه‌ی ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی. ۴: ۳۹-۴۸.
- [۵] طالبی زاده، پ.، مهرابیان، م.ع، عبدالزاده، م. ۱۳۹۰. تعیین زاویای بهینه سطح و سمت الراس کلکتورهای تخت (مسطح) خورشیدی در مناطقی از جنوب شرق ایران، مهندسی مکانیک شریف، ۲۸-۳.
- [۶] عبدالزاده، م.، جعفری، س.، رهنما، م.، عامری، م. ۱۳۸۷. تعیین زاویه بهینه پنل خورشیدی برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان. نشریه بین المللی علوم مهندسی. ۱۹: ۹۸-۹۱.
- [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] Benganem, 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 Sopia N, 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., Mehrabian, M.A and Abdolzadeh, 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: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v 28, pp. 1171-1180