

# DETERMINATION OF OPTIMUM ANGLE OF FIXED SOLAR PANELS TO RECEIVE MAXIMUM SOLAR RADIATION ENERGY IN KERMAN- IRAN

M. Abdolzadeh

Department of Mechanical  
Engineering, College of  
Engineering, Shahid Bahonar  
University of Kerman

S. Jafari

Department of Mechanical  
Engineering, Faculty of  
Engineering, IslamicAzad  
University-Kerman Branch

M. Rahnema

Department of Mechanical  
Engineering, College of Engineering,  
Shahid Bahonar University of  
Kerman

M. Ameri

**Abstract:** In the present research, optimum Slope angle of solar panels to receive maximum monthly solar radiation is obtained using different sky models in Kerman - Iran. Effect of reflective solar radiation of ground is considered in all models. Three models are used to find optimum slope and azimuth angles. The optimum monthly, seasonally and yearly slope angles are found using isotropic model. The optimum slope and azimuth angles also are obtained using non-isotropic models. The results show that the monthly optimum slope angles for maximizing monthly solar radiation are different throughout a year and are not close to the latitude angle. Nevertheless, the yearly optimum angle is close to latitude of Kerman when receiving yearly maximum solar radiation is aimed.

## تعیین زاویه بهینه پانل های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان

مرتضی عبدالزاده، سعید جعفری، محمد رهنما و مهران عامری

**چکیده:** در این تحقیق با استفاده از مدل های مختلف آسمان زاویه بهینه شیب پانل های خورشیدی جهت دریافت بیشترین میزان تشعشع متوسط ماهیانه خورشیدی در شهر کرمان بدست آمده است. در کلیه مدل های استفاده شده تاثیرات تشعشع انعکاسی زمین نیز در نظر گرفته شده است. در کار حاضر سه مدل متفاوت برای به دست آوردن زاویه شیب بهینه و زاویه سمت الراس بهینه در شهر کرمان استفاده شده است. با استفاده از مدل ایزوتروپیک زوایای بهینه ای برای ماه های مختلف سال، فصول سال و کل سال معرفی شده است. همچنین با استفاده از دو مدل غیر ایزوتروپیک زاویه سمت الراس و زاویه شیب بهینه برای شهر کرمان حاصل شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که دریافت ماکزیمم انرژی تشعشعی از خورشید در ماه های مختلف سال در زوایای مختلفی صورت می گیرد که با زاویه عرض جغرافیایی برابر نمی باشد اما چنانچه هدف دریافت ماکزیمم انرژی تشعشعی سالانه باشد زاویه بهینه شیب پانل به عرض جغرافیایی محل نزدیک می باشد.

**واژه های کلیدی:** انرژی خورشیدی، زاویه بهینه، پانل خورشیدی

تاریخ وصول: ۸۷/۲/۱۲

تاریخ تصویب: ۸۸/۷/۴

دکتر مرتضی عبدالزاده، عضو هیات علمی - گروه مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد کرمان [mabdolzadh@yahoo.com](mailto:mabdolzadh@yahoo.com)

سعید جعفری، دانشجوی دکتری، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان [jafari@alumni.iut.ir](mailto:jafari@alumni.iut.ir)

دکتر محمد رهنما، استاد، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان [rahnema@mail.uk.ac.ir](mailto:rahnema@mail.uk.ac.ir)

دکتر مهران عامری، دانشیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان [ameri\\_mm@mail.uk.ac.ir](mailto:ameri_mm@mail.uk.ac.ir)

## ۱. مقدمه

اطلاعات میزان تشعشع خورشیدی در نقاط مختلف بصورت تشعشع کل روی یک سطح افقی در دسترس می‌باشند. این اطلاعات در سازمان هواشناسی کشور در نقاطی که ایستگاههای اندازه‌گیری نصب شده است موجود می‌باشد. معمولاً این اطلاعات بصورت مقدار تشعشع کل روزانه در طول سال می‌باشند. با توجه به اینکه بیشترین میزان تشعشع خورشیدی مستقیم روی سطح عمود بر جهت تابش خورشید می‌باشد لذا برای دریافت بیشترین مقدار انرژی باید سطح صاف تقریباً عمود بر جهت تشعشع باشد. این امر با استفاده از دنبال کننده‌های خورشید که بطور لحظه‌ای خورشید را دنبال می‌کنند امکانپذیر است اما مشکل اصلی هزینه بالای ساخت این وسایل می‌باشد. در کلکتورهای خورشیدی تخت و سلولهای فتوولتائیک میتوان از تنظیم روزانه زاویه شیب سطح استفاده کرد. با توجه به اینکه اطلاعات تشعشعی خورشیدی موجود مربوط به سطح افقی میباشد لذا تعیین میزان انرژی ورودی به سطح تحت زاویه با توجه به اطلاعات تشعشع مربوط به یک سطح افقی می‌بایست محاسبه گردد.

اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه، بیانگر این مطلب هستند که زاویه سمت الراس و زاویه شیب بهینه در نیم کره شمالی برای پانلهای خورشیدی رو به جنوب وابسته به عرض جغرافیایی است. برای مثال Lunde [۲] زاویه بهینه را برابر با  $\beta_{opt} = \phi \pm 15^\circ$  و Duffie و Beckman [۳] زاویه بهینه را برابر با  $\beta_{opt} = (\phi + 15) \pm 15^\circ$  گزارش کردند.

در روابط فوق الذکر  $\phi$  عرض جغرافیایی است. Alonge و Qje یک مدل ریاضی برای زاویه شیب و زاویه سمت الراس بهینه برای چند شهر در کشور نیجریه ارائه کردند [۴]. QIU و RIFFATS زاویه بهینه را برای چندین شهر دنیا با یک مدل ریاضی بررسی کردند [۵]. در کار آنها زاویه بهینه برابر با  $\beta_{opt} = \phi \pm 10^\circ$  گزارش شد. IBRAHIM نشان داد که با تنظیم زاویه پانل خورشیدی به صورت ماهیانه، بیشترین انرژی تشعشعی قابل دسترس می‌باشد [۶]. Mujahid با استفاده از یک الگوریتم محاسباتی زاویه بهینه را برای عرضهای جغرافیایی متفاوت از ۱۰ تا ۵۰ درجه به دست آورد و دریافت که اگر پانل ها در ماههای فصول مختلف سال بر اساس زاویه دریافت ماکزیمم انرژی خورشید در فصل مورد نظر تنظیم شوند تقریباً ۱۰٪ انرژی تشعشعی از دست می‌رود [۷].

Uigen با استفاده از یک مدل ریاضی زاویه بهینه در شهر زمیر ترکیه را محاسبه کرد و همچنین زاویای بهینه را برای ماهها و فصول مختلف سال نیز ارائه کرد [۸]. Bari زاویای بهینه را برای نقاط مختلف مالزی [۹] و Elminir و همکاران برای نقاط مختلف مصر به دست آوردند [۱۰]. Gopinathan و همکاران با استفاده از یک مدل ریاضی جدید زاویه شیب و سمت الراس بهینه را برای آفریقای جنوبی ارائه کردند [۱۱]. Yakup و Malik با استفاده از یک مدل

ریاضی زاویه بهینه در شهر دارالسلام را به دست آوردند و زاویه شیب بهینه را به صورت ساعتی، روزانه، ماهیانه، فصلی و سالانه بیان کردند [۱۲]. علاوه بر کارهای تجربی و استفاده از مدل‌های ریاضی Shariah و همکاران با استفاده از نرم افزار زاویه بهینه را برای مناطقی از اردن به دست آوردند [۱۳].

در تحقیق حاضر مدل‌های ریاضی مختلف برای شهر کرمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش دوم مدل‌های ریاضی استفاده شده در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش سوم به بررسی نتایج حاصله برای شهر کرمان پرداخته شده است و در بخش چهارم نتیجه گیری ارائه شده است.

## ۲. مدل‌های ریاضی

اطلاعات میزان تشعشع خورشیدی در نقاط مختلف بصورت تشعشع کل روی یک سطح افقی در دسترس می‌باشند. مدل‌های ریاضی ارائه شده با استفاده از داده‌های انرژی تشعشعی روی سطوح افقی انرژی رسیده به سطوح شیب دار را محاسبه می‌کنند. تشعشع کل روزانه میانگین ماهیانه روی یک سطح شیب دار، برابر با مجموع تابش مستقیم  $H_B$ ، تابش پخشی  $H_D$  و تابش انعکاسی  $H_R$  است. لذا می‌توان نوشت:

$$H_T = H_B + H_S + H_R \quad (1)$$

اولین روشی که در کار حاضر برای به دست آوردن  $H_T$  مورد استفاده قرار گرفت، روشی ایزتروپیک است. که توسط Liu ارائه شده است [۱۴]. با استفاده از این روش مقدار تشعشع میانگین ماهیانه بر روی سطح شیب دار به شکل زیر حاصل می‌شود:

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

در رابطه اخیر  $\beta$  زاویه شیب،  $\rho_g$  ضریب انعکاس زمین،  $H_T$  تشعشع کل تابیده شده به سطح پانل شیب دار و  $H$  میزان تشعشع روی سطح افقی است. در رابطه اخیر  $R_b$  بیانگر نسبت مقدار متوسط تابش مستقیم روی سطح شیب دار به مقدار متوسط تابش مستقیم روی سطح صاف است ( $R_b = H_{BT} / H_B$ ). برای یک سطح با زاویه سمت الراس  $\gamma$ ، برابر با صفر داریم:

$$R_b = \frac{\cos(\phi \mp \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\phi \mp \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin \phi \sin \delta} \quad (3)$$

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

در رابطه اخیر علامت مثبت برای نیم کره شمالی و علامت منفی برای نیم کره جنوبی است.

مدلی ارائه شده تنها برای پانلهای با زاویه سمت الراس صفر قابل استفاده است. Klein روشی را ارائه کرده است که تاثیرات زوایای سمت الراس را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد [۱۵] و روابط آن به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$H_T = HD + H_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (۵)$$

$$D = \begin{cases} \max\{0, G(\omega_{ss}, \omega_{sr})\} & \text{if } \omega_{ss} \geq \omega_{sr} \\ \max\{0, [G(\omega_{ss}, -\omega_s) + G(\omega_s, \omega_{sr})]\} & \text{if } \omega_{sr} > \omega_{ss} \end{cases} \quad (۱-۶)$$

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2d} \left[ \left( \frac{bA}{2} - a'B \right) (\omega_1 - \omega_2) \frac{\pi}{180} + (a'A - bB) (\sin \omega_1 - \sin \omega_2) - a'C (\cos \omega_1 - \cos \omega_2) \right. \\ \left. + \left( \frac{bA}{2} \right) (\cos \omega_1 \sin \omega_1 - \cos \omega_2 \sin \omega_2) + \left( \frac{bC}{2} \right) (\sin^2 \omega_1 - \sin^2 \omega_2) \right] \quad (۲-۶)$$

به صورت زیر تعریف میشوند:  $a', a, b$  ثابت های

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

$$a' = a - \frac{H_d}{H} \quad (۳-۶)$$

$$A = \cos \beta + \tan \phi \cos \gamma \sin \beta$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (۴-۶)$$

$$B = \cos \omega_s \cos \beta + \tan \delta \cos \gamma \sin \beta \quad (۹)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (۵-۶)$$

$$C = \frac{\sin \beta \sin \gamma}{\cos \phi}$$

زوایای طلوع  $\omega_{sr}$  و غروب  $\omega_{ss}$  خورشید به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$|\omega_{sr}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (۷)$$

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

$$|\omega_{ss}| = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right] \quad (۸)$$

این معادلات برای نیمکره شمالی و جنوبی قابل استفاده می‌باشند. Hay روش دیگری را برای تعیین تشعشع کل رسیده روی سطح شیب دار ارایه کرد.

در روش وی  $R_b$  برای نیم کره شمالی و جنوبی یکسان است فقط مقادیر به دست آمده برای ژانویه در نیم کره شمالی برای جولای در نیم کره جنوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶].

$$R_b = \{ \cos \beta \sin \delta \sin \phi (\omega_{ss} - \omega_{sr}) (\pi / 180) - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma (\omega_{ss} - \omega_{sr}) (\pi / 180) + \\ \cos \phi \cos \delta \cos \beta (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) + \cos \delta \cos \gamma \sin \phi \sin \beta (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) - \\ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}) \} / \{ 2[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi / 180) \omega_s \sin \phi \sin \delta] \} \quad (۱۰)$$

$$\text{if } \gamma > 0 \left\{ \begin{array}{l} \omega_{sr} = -\min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \\ \omega_{ss} = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \end{array} \right. \quad (۱۲)$$

$$\text{if } \gamma < 0 \left\{ \begin{array}{l} \omega_{sr} = -\min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \\ \omega_{ss} = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right] \end{array} \right. \quad (۱۱)$$

با استفاده از این روش تشعشع کل متوسط ماهیانه در یک روز به شکل زیر نوشته می شود

$$A = \frac{\cos \phi}{\sin \gamma \tan \beta} + \frac{\sin \phi}{\tan \gamma} \quad (13)$$

$$B = \tan \delta \left( \frac{\cos \phi}{\tan \gamma} - \frac{\sin \phi}{\sin \gamma \tan \beta} \right)$$

$$H_T = (H - H_d)R_b + H\rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + H_d \left\{ \frac{H - H_d}{H_o} R_b + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left( 1 - \frac{H - H_o}{H_o} \right) \right\} \quad (14)$$

جدول ۱. ضرایب انعکاس زمین برای چند پوشش مختلف

Ground Cover	Reflectivity
Dry bare ground	0.2
Dry grassland	0.3
Desert sand	0.4
Snow	0.5-0.8

جدول ۲. مقادیر انرژی تشعشعی کل متوسط روزانه در هر ماه روی یک سطح افقی در شهر کرمان

Month	$H (MJ/m^2)$
January	12.11
February	15.77
March	17.17
April	22.22
May	25.72
June	28.05
July	27.64
August	25.05
September	24.30
October	18.73
November	14.55
December	14.05

در بخش اول به بررسی نتایج مدل ایزوتروپیک پرداخته شده است. همان طور که در بخش قبل اشاره شد، با استفاده از انرژی تشعشعی دریافتی روی سطح افقی و روابط (۲) تا (۴) می توان مقدار انرژی تشعشعی رسیده به سطح شیب دار را محاسبه کرد. شایان ذکر است که علامت منفی برای زاویه شیب به این معنی است که جهت کلکتور رو به شمال است. در سایر موارد که علامت زاویه شیب مثبت است کلکتور رو به جنوب قرار می گیرد.

در جدول (۳) مقادیر زاویه شیب بهینه برای پانل های خورشیدی با استفاده از روش کار حاضر و همچنین با استفاده از یک روش بهینه سازی ریاضی که برای مناطق مختلف جهان انجام شده است آورده

در رابطه اخیر  $H_o$  تشعشع خارج از جو بر روی یک سطح افقی است.

### ۳. بررسی نتایج

مقادیر لازم برای استفاده در سه مدلی که در بخش قبل توضیح داده شدند، با استفاده از داده های سازمان هواشناسی برای یک دوره دوازده ساله در شهر کرمان به دست آمده اند. شهر کرمان در منطقه ای نسبتاً کویری در ارتفاع ۱۸۴۵ متری از سطح دریا با طول جغرافیایی  $57^{\circ}05'$  و عرض جغرافیایی  $30^{\circ}15'$  قرار گرفته است. با توجه به آب و هوای خشک منطقه در یازده ماه از سال تابش مناسب خورشید وجود دارد. لذا با دانستن زوایای بهینه پانل های خورشیدی برای سیستم هایی که با استفاده از انرژی خورشید کار می کنند می توان بخش عمده ای از انرژی مورد نیاز شهر را تامین کرد. در کار حاضر داده های میانگین ماهیانه در روز روی سطح افقی، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده اند. شایان ذکر است ضریب انعکاس زمین  $\rho_g = 0.2$  در نظر گرفته شده است [۱۸]، (جدول ۱). کلیه مقادیر تشعشع روی یک سطح افقی از داده های تشعشع سنجی موجود در اداره هواشناسی کرمان که برای یک دوره ده ساله از سال ۱۹۸۶ تا سال ۱۹۹۷ موجود بوده، استفاده شده است. شایان ذکر است این مقادیر پیرانومتر Kip&Zone مدل CB7 [۱] اندازه گیری شده اند، شکل (۱). در جدول (۲) مقادیر مربوط به انرژی تشعشعی دریافتی از خورشید روی سطح افقی برای ماه های مختلف سال در شهر کرمان ارائه شده است. مشاهده می شود که بیشترین مقدار انرژی دریافتی از خورشید در ماه ژوئن بوده و برابر با  $28.05 MJ/m^2$  است و کمترین مقدار انرژی برای ماه زانویه بوده و برابر با  $12.11 MJ/m^2$  است.



شکل ۱. دستگاه پیرانومتر به منظور اندازه گیری انرژی تشعشعی

## جدول ۳. مقایسه مقادیر ماهیانه زاویه شیب بهینه کار حاضر با

## نتایج Nijegorodov [۱۷]

Month	$\beta_{opt(m)}(N)[16]$	(°) $\beta_{opt(m)}$
Jan: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.89\phi + 29$	56.23	56.21
Feb: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.97\phi + 17$	46.68	46.44
March: $\beta_{opt(m)}(N) = \phi + 4$	33.68	30.67
April: $\beta_{opt(m)}(N) = \phi - 10$	20.6	14.14
May: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.93\phi - 24$	4.45	-0.88
June: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.87\phi - 34$	-10.38	-7.89
July: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.89\phi - 30$	-2.77	-4.88
Aug: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.97\phi - 17$	12.68	8.14
Sep: $\beta_{opt(m)}(N) = \phi - 2$	28.6	26.91
Oct: $\beta_{opt(m)}(N) = \phi + 12$	42.6	43.43
Nov: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.93\phi + 25$	53.46	55.21
Dec: $\beta_{opt(m)}(N) = 0.87\phi + 34$	60.62	60.71

شده است. این بهینه سازی انرژی به منظور دریافت ماکزیمم انرژی تشعشی توسط Nijegorodov و همکاران انجام شده است [۱۷]. وی ۱۲ رابطه را برای زاویه شیب بهینه در ماههای مختلف سال بر حسب عرض جغرافیایی ارائه کرده است و این روابط برای عرض های جغرافیایی بین ۶۰ تا ۶۰- صادق هستند. در ستون اول جدول (۳) این روابط ارائه شده اند. در ستون دوم این مقادیر با استفاده از روابط فوق الذکر برای ماههای مختلف سال برای شهر کرمان محاسبه شده اند. در ستون سوم مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش ایزوتروپیک برای شهر کرمان آورده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از دو روش می توان به اختلاف کم بین نتایج اشاره کرد که این اختلاف از آنجا ناشی می شود که این روابط با توجه به بهینه سازی ریاضی حاصل شده اند و این در حالی است که مقادیر انرژی تشعشی رسیده به سطح شیب دار صرفاً تابعی از موقعیت جغرافیایی محل هستند.

در جدول (۴) مقادیر زاویه بهینه و مقادیر مربوط به انرژی تشعشی رسیده به سطح شیبدار برای ماه، فصل و سال آورده شده است. مقادیر مربوط به زاویه بهینه برای فصل با میانگین گیری از زوایای بهینه مربوط به ماههای همان فصل حاصل شده است. با مشاهده نتایج گزارش شده در جدول (۴) می توان دریافت که زوایای بهینه مربوط به ماههای می، ژوئن و جولای منفی می باشند و بقیه ماههای سال زوایای بهینه مثبت می باشند.

## جدول ۴. مقادیر زاویه شیب بهینه و انرژی متوسط روزانه ماهیانه رسیده به سطح پانل خورشیدی بر اساس زاویه بهینه ماهیانه،

## فصلی و سالیانه

Month	$\beta_{opt(m)}$ (°)	$H_{opt(m)}$ (MJ / m <sup>2</sup> )	$\beta_{opt(s)}$ (°)	$H_{opt(s)}$ (MJ / m <sup>2</sup> )	$\beta_{opt(y)}$ (°)	$H_{opt(y)}$ (MJ / m <sup>2</sup> )
January	56.21	19.25	44.44	18.91	27.35	17.25
February	46.44	21.04		21.03		20.11
March	30.67	19.16	1.79	18.75		19.13
April	14.14	22.72		22.34		22.29
May	-0.88	25.73		25.71		23.68
June	-7.89	28.26	10.06	27.95		24.73
July	-4.88	27.73		27.07		24.82
August	8.14	25.24		25.23		24.24
September	26.91	26.61		25.69		26.61
October	43.43	24.18	53.12	23.89		23.39
November	55.21	23.08		23.07		20.78
December	60.71	25.72		25.52		21.97

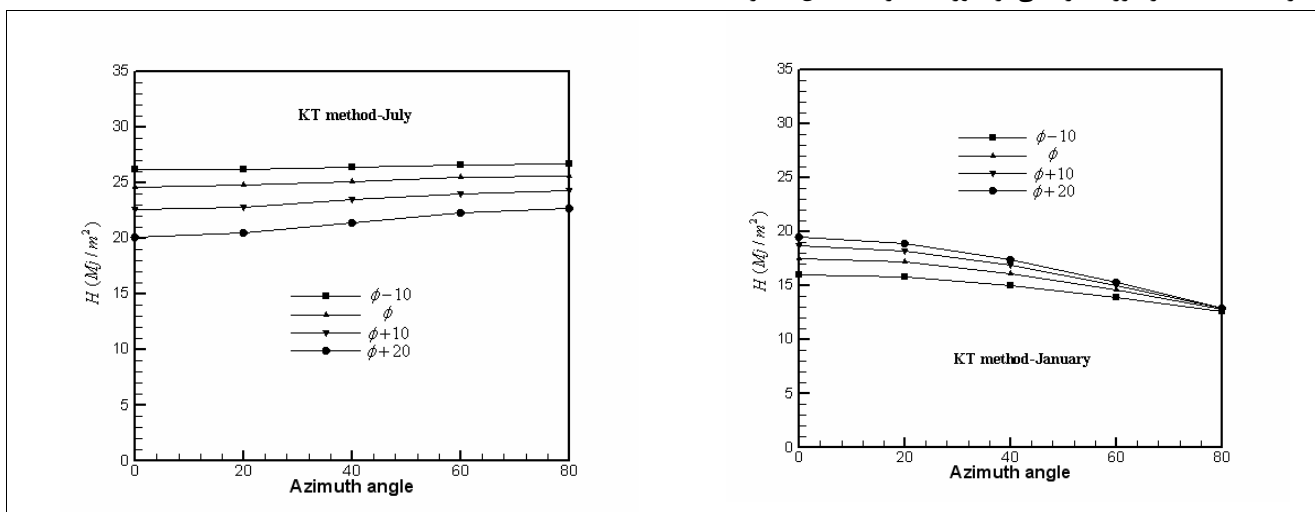
## جدول ۵. مقادیر سالیانه انرژی دریافتی از خورشید روی یک سطح تحت زاویه بهینه ماهیانه، فصلی، سالیانه و زاویه صفر در شهر

## کرمان

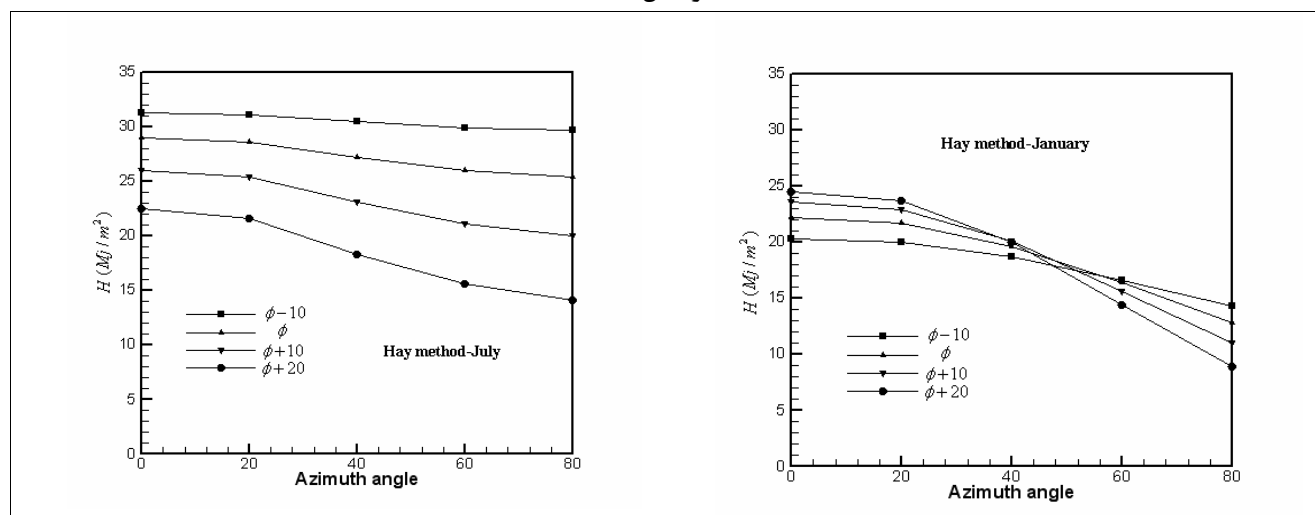
زاویه بهینه	$\beta_{opt(m)}$	$\beta_{opt(s)}$	$\beta_{opt(y)}$	$\beta = 0$
$H_{total} (MJ / m^2)$	8707	8602	8114	7419

استفاده از زوایای بهینه مربوط به ماه، فصل و سال در مقایسه با مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال روی سطح افق ۱۷٪، ۱۵/۹٪ و ۹/۳۶٪ افزایش یافته است. همان طور که اشاره شد مدل ایزوتروپیک فقط برای  $\gamma = 0$  صادق است. برای در نظر گرفتن تاثیر  $\gamma$  در ادامه نتایج برای دو مدل غیر ایزوتروپیک آورده شده است. در شکل (۲) مقادیر انرژی تشعشعی متوسط رسیده به سطح شیب دار برای پنج زاویه سمت الراس،  $\gamma$ ، مختلف صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ با استفاده از مدل Klein [۱۵] برای چهار زاویه شیب  $\phi - 10^\circ$ ،  $\phi$ ،  $\phi + 10^\circ$  و  $\phi + 20^\circ$  برای ماههای ژانویه و جولای مشخص شده است. در شکل (۳) مقادیر انرژی خورشیدی متوسط رسیده به سطح شیب دار برای پنج زاویه سمت مختلف صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ با استفاده از مدل Hay [۱۶] برای چهار زاویه شیب  $\phi - 10^\circ$ ،  $\phi$ ،  $\phi + 10^\circ$  و  $\phi + 20^\circ$  برای ماههای ژانویه و جولای مشخص شده است.

همچنین با استفاده از زوایای بهینه ماهیانه، بیشترین مقدار انرژی دریافتی از خورشید در ماه ژوئن بوده و برابر با  $28/26 MJ/m^2$  است و کمترین مقدار انرژی برای ماه مارس بوده و برابر با  $19/16 MJ/m^2$  است. شایان ذکر است با استفاده از روش بهینه‌سازی فصلی هم این دو ماه، ماههای حداکثر و حداقل انرژی تشعشعی دریافتی هستند و مقادیر آنها برابر با  $27/95 MJ/m^2$  و  $18/75 MJ/m^2$  است. در صورتی که مد نظر باشد سیستم سالیانه ماکزیمم انرژی تشعشعی را دریافت کند ماههای حداکثر و حداقل انرژی سپتامبر و ژانویه می‌باشند و مقدار دریافت انرژی آنها به ترتیب  $26/61 MJ/m^2$  و  $17/25 MJ/m^2$  است. با استفاده از مقادیر موجود در جدول های (۲) و (۴) می‌توان انرژی کل دریافتی در سال را با استفاده از روشهای بهینه‌سازی مختلف و همچنین روی سطح افق به دست آورد که نتایج مربوطه در جدول (۵) مشاهده می‌شود. با بررسی داده‌های موجود در جدول (۵) می‌توان دریافت که مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال به ترتیب با



شکل ۲. مقادیر انرژی تشعشعی کل متوسط روزانه رسیده به سطح شیب دار برای زوایای سمت مختلف در ماههای ژانویه و ژولای با استفاده از مدل Klein [۱۵]



شکل ۳. مقادیر انرژی تشعشعی کل متوسط روزانه رسیده به سطح شیب دار برای زوایای سمت مختلف در ماههای ژانویه و ژولای با استفاده از مدل Hay [۱۶]

با بررسی نتایج می‌توان دریافت که با استفاده از این دو روش زاویه شیب بهینه برابر با  $10^\circ - \phi$  و زاویه سمت الراس مناسب برابر با صفر است. در شکل (۴) برای یک زاویه شیب ثابت با افزایش زاویه سمت الراس انرژی دریافتی از خورشید کاهش پیدا می‌کند این روند در شکل (۵) هم مشاهده می‌شود. همچنین در هر دو شکل با زیاد شدن زاویه شیب در یک زاویه سمت الراس ثابت انرژی دریافتی از خورشید کاهش پیدا می‌کند.

#### ۴. منابع خطا

از منابع خطایی که می‌تواند بر روی نتایج تاثیر گذارد اطلاعات تشعشی اندازه‌گیری شده روی یک سطح افقی است. در صورتی که دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری تشعشع در محدوده مجاز نباشد این خطا در معادلات تشدید می‌شود و منجر به تولید نتایج غیر واقعی می‌گردد. دقیق نبودن طول و عرض جغرافیایی محل هم می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای ایجاد نماید. همچنین عدم انتخاب صحیح ضریب انعکاس زمین منطقه مورد نظر در ایجاد خطا تاثیر بسزایی دارد.

#### ۵. نتیجه گیری

۱- با استفاده از روش ایزوتروپیک حداقل زاویه شیب بهینه برای میانگین ماهانه در شهر کرمان برابر با  $0/88$  و حداکثر آن برابر با  $60/71$  درجه است.

۲- با استفاده از روش ایزوتروپیک زاویه شیب بهینه برای میانگین سالانه در شهر کرمان برابر با  $27/35$  است. شایان ذکر است که این زاویه به زاویه عرض جغرافیایی شهر کرمان نزدیک است.

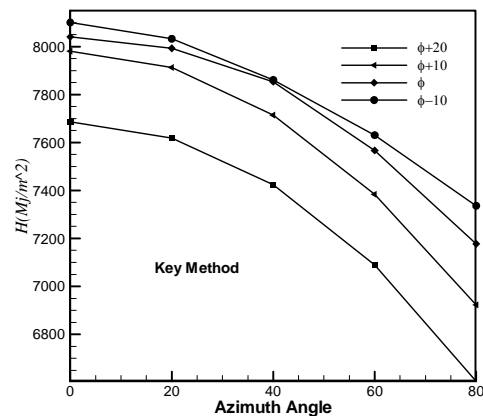
۳- با بررسی نتایج حاضر می‌توان دریافت که مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال به ترتیب با استفاده از زوایای بهینه مربوط به ماه، فصل و سال در مقایسه با مقادیر انرژی دریافتی از خورشید در یک سال روی سطح افقی  $17\%$ ،  $9/15\%$  و  $9/36\%$  افزایش یافته است. لذا می‌توان دریافت که انتخاب زاویه شیب بهینه تاثیر زیادی بر دریافت انرژی ماکزیمم از خورشید دارد.

۴- با استفاده از مدل‌های غیر ایزوتروپیک برای پانل خورشیدی می‌توان تاثیر زاویه سمت الراس را بر انرژی دریافتی از خورشید بررسی کرد.

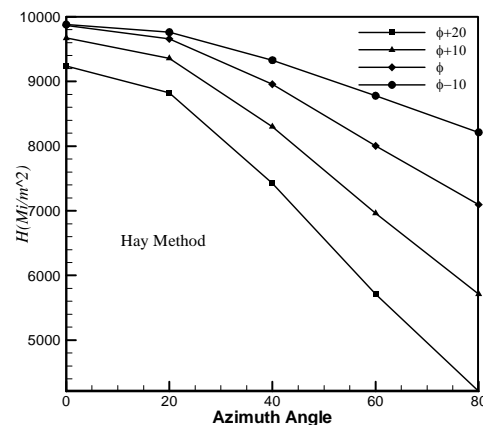
۵- با استفاده از مدل Klein در ماه ژانویه با زیاد شدن  $\gamma$  در یک زاویه شیب ثابت، انرژی دریافتی از خورشید کاهش پیدا می‌کند در حالی که در ماه جولای عکس این حالت اتفاق می‌افتد و با زیاد شدن  $\gamma$  انرژی دریافتی افزایش پیدا می‌کند.

۶- نتایج حاصل از مدل Hay نشان می‌دهند که در ماه ژانویه برای  $\gamma < 50$  بیشترین انرژی دریافتی در زاویه شیب  $20^\circ + \phi$  است،

با بررسی نتایج می‌توان دریافت که با استفاده از مدل Klein [۱۴] بیشترین مقدار انرژی برای ماه ژانویه در زاویه شیب  $20^\circ + \phi$  و زاویه سمت الراس صفر می‌باشد. همچنین در جولای حداکثر مقدار انرژی برای زاویه شیب  $10^\circ - \phi$  و زاویه سمت الراس حداکثر می‌باشد. در ماه ژانویه با افزایش  $\gamma$  در یک زاویه شیب ثابت انرژی دریافتی از خورشید کاهش پیدا می‌کند در حالی که در جولای عکس این حالت اتفاق می‌افتد و با افزایش  $\gamma$  انرژی دریافتی افزایش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از مدل Hay [۱۵] نشان می‌دهد که در ژانویه برای  $\gamma < 50$  بیشترین انرژی دریافتی در زاویه شیب  $20^\circ + \phi$  است، در حالی که برای  $\gamma > 50$  زاویه شیب بهینه برابر با  $10^\circ - \phi$  است. اما برای ماه جولای مشاهده می‌شود که بیشترین انرژی دریافتی در زاویه شیب  $10^\circ - \phi$  و زاویه سمت الراس صفر می‌باشد. در هر دو شکل با افزایش زاویه سمت الراس انرژی دریافتی کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر متوسط سالیانه انرژی دریافتی از خورشید برای دو روش Klein [۱۴] و Hay [۱۵] ارائه شده است.



شکل ۴. مقادیر متوسط سالیانه انرژی دریافتی از خورشید برای روش Klein [۱۴]



شکل ۵. مقادیر متوسط سالیانه انرژی دریافتی از خورشید برای روش Hay [۱۵]

- [14] Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., *Daily Insolation on Surfaces Tilted Towards the Equator*, Transactions ASHRAE, 526-541, 1979.
- [15] Klein, S.A., *Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces*, Solar Energy, V 10, 72-77, 1981.
- [16] Hay, J.E., *Study of Shortwave Radiation on Non-Horizontal Surfaces*. Report No. 79-12, Canadian climate centre, Ontario, 1979.
- [17] Nijegorodov, N., Devan, K.R.S., Jain, P.K., *Atmospheric Transmittance Models and an Analytical Method to Predict the Optimum Slope on an Absorber Plate*, Renewable Energy, V4, 525-530, 1997.
- [18] Tomas Markvart, 2000, *Solar Electricity*, John Wily & Sons Inc, Printed in USA

در حالی که برای  $\gamma > 50^\circ$  زاویه شیب بهینه برابر با  $10^\circ - \phi$  است. اما برای ماه جولای مشاهده می‌شود که بیشترین انرژی دریافتی در زاویه شیب  $10^\circ - \phi$  و زاویه سمت الراس صفر است.

۷- مقادیر متوسط سالیانه انرژی دریافتی از خورشید برای دو روش Klein و Hay مشخص می‌کند که با استفاده از این دو روش زاویه شیب بهینه برابر با  $10^\circ - \phi$  و زاویه سمت الراس مناسب برابر با صفر است.

## مراجع

[۱] عبدالزاده، مرتضی، تاثیر پاشش آب بر روی پانلهای فتوولتائیک بر عملکرد سیستم پمپ آب فتوولتائیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، سال ۱۳۸۵.

## فهرست علائم و اختصارات

$H$	تشعشع کل روی سطح افقی $MJ/m^2$
$H_d$	تشعشع پخشی روی سطح افقی $MJ/m^2$
$H_R$	تشعشع انعکاسی از زمین به سطح شیب دار $MJ/m^2$
$H_S$	تشعشع پخشی روی سطح شیب دار $MJ/m^2$
$H_O$	تشعشع خارج از جو $MJ/m^2$
$H_T$	تشعشع کل روی سطح شیب دار $MJ/m^2$
$\beta$	زاویه شیب پانل ( $^\circ$ )
$\delta$	زاویه میل ( $^\circ$ )
$\omega_S$	زاویه ساعت طلوع افتاب ( $^\circ$ )
$\omega'_S$	زاویه ساعت طلوع افتاب بر روی یک سطح شیب دار ( $^\circ$ )
$\phi$	عرض جغرافیایی ( $^\circ$ )
$\rho_g$	ضریب انعکاس زمین
$\gamma$	زاویه سمت الراس خورشید ( $^\circ$ )

- [2] Lunde, P.J., *Solar Thermal Engineering*. New York: Wiley, 1980.
- [3] Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: Wiley, 1982.
- [4] Alonge, A.F., Oje, K., *Computer Modeling Of Optimum Angle Of Slope For Flat Solar Collectors In Nigeria Major Town*, Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, 2006.
- [5] QIU G., RIFFAT S. B., *Optimum Tilt Angle of Solar Collectors and Its Impact on Performance*, International journal of ambient energy, Vol. 24, 2003, pp. 13-20.
- [6] IBRAHIM, D., *Optimum Tilt Angle for Solar Collectors Used in Cyprus*, Renewable energy, Vol. 6, 1995, pp. 813-819.
- [7] Mujahid, Abdulaziz, M., *Optimum Tilt Angle for Solar Collection Systems*, International Journal of Solar Energy, v 14, pp. 191-202, 1994.
- [8] Ulgen, K., *Optimum Tilt Angle for Solar Collectors Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, Vol. 28, 2006, pp. 1171-1180.
- [9] Bari, S., *Optimum Slope Angle and Orientation of Solar Collectors for Different Periods of Possible Utilization*, Energy Conversion and Management, Vol. 41, 2000, pp. 855-860.
- [10] Elminir, H.K., El-Hussainy, F., Hamid, R., Beheary, M.M., *Optimum Solar Flat-Plate Collector Slope: Case Study for Helwan, Egypt*, Energy Conversion and Management, Vol. 47, 2006, pp. 624-637.
- [11] Gopinathan, K.K., Maliehe, N.B., Mpholo, M.I., *A Study on the Intercepted Insolation as a Function of Slope and Azimuth of th Surface*, Energy, 2007, pp. 213-220.
- [12] Yakup, M., Malik, A.Q., *Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Collector in Brunei Darussalam*, Renewable Energy, V 24, pp. 223-234, 2001.
- [13] Shariah, A., Al-Akhras, M.A., Al-Omari, I.A., *Optimizing the Tilt Angle of Solar Collectors*, Renewable Energy, 2002, pp. 587-598.