



تعیین زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت برای خشک‌کن‌ها خورشیدی در منطقه شهرکرد

علی ملکی<sup>۱\*</sup>، روح انگیز رحیمی<sup>۲</sup>، شاهین بشارتی<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد ([drmaleki@iran.ir](mailto:drmaleki@iran.ir))
- ۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد
- ۳- مربی و عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد

### چکیده:

استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی روز به روز افزایش می‌یابد. طراحی مناسب اجزای خشک‌کن عملکرد خشک‌کن را بالا می‌برد و زمان خشک شدن را کاهش می‌دهد. یکی از قطعات اصلی خشک‌کن‌های خورشیدی، کلکتور خورشیدی است. از پارامترهای مهم در طراحی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت، زاویه شیب کلکتور نسبت به افق است چون تغییر در زاویه شیب، میزان تابش خورشیدی دریافتی توسط سطح کلکتور را تغییر می‌دهد. بنابراین به منظور دریافت ماکزیمم تشعشع خورشیدی توسط سطح کلکتور باید زاویه‌ی شیب بهینه کلکتور برای زمان‌های مختلف در سال تعیین گردد. در این تحقیق از مدل ایزوتروپیک Liu-Jordan و مدل غیر ایزوتروپیک Hay-Davies برای تعیین زاویه بهینه کلکتورهای صفحه تخت در شهرکرد استفاده شد. تغییرات زاویه شیب از صفر درجه برای ماه می تا ۶۲ درجه برای ماه دسامبر بدست آمد و زاویه بهینه سالانه ۲۹ درجه نسبت به افق محاسبه شد. کمترین و بیشترین شدت تابش روی سطح کلکتور براساس زاویه بهینه ماهانه به ترتیب مربوط به ماه نوامبر و ژوئن است. همچنین نتایج نشان داد که تابش کل سالانه دریافتی برای کلکتورهایی که براساس زاویه بهینه ماهانه نسبت شده‌اند ۲۰ درصد بیشتر از کلکتورهای افقی است.

**واژه‌های کلیدی:** خشک‌کن خورشیدی، زاویه بهینه، کلکتور صفحه تخت،

### مقدمه

خشک کردن محصولات کشاورزی با خشک‌کن‌های صنعتی بسیار گران قیمت بوده و برای بیشتر کشاورزان امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین آلودگی‌های زیست محیطی، روبه اتمام بودن سوخت‌های فسیلی و هزینه رو به افزایش سوخت‌های فسیلی بشر را به سمت استفاده از انرژی‌های جایگزین سوق داده است. انرژی خورشید یک منبع انرژی تجدیدپذیر است که به عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از قسمت‌های اصلی خشک‌کن‌های خورشیدی، کلکتور خورشیدی است که با جذب انرژی خورشید باعث گرم شدن هوای مورد نیاز برای خشک کردن محصول می‌شود.



به منظور جذب حداکثر تابش خورشیدی توسط کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت، کلکتورها را به صورت شیب‌دار نصب می‌کنند. عملکرد کلکتور خورشیدی صفحه تخت به شدت تحت تاثیر موقعیت و زاویه نصب کلکتور نسبت به افق می‌باشد. در نیمکره شمالی کلکتورها را رو به جنوب نصب می‌کنند. زاویه شیب کلکتور نسبت به سطح افق میزان تابش دریافتی توسط سطح کلکتور و در نتیجه مدت زمان خشک کردن محصول را تغییر می‌دهد بنابراین باید زاویه شیبی که منجر به دریافت حداکثر تابش خورشید توسط سطح کلکتور می‌شود تعیین گردد که این زاویه به عنوان زاویه شیب بهینه کلکتور در نظر گرفته می‌شود. بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین شیب بهینه کلکتورهای خورشیدی نشان داد که زاویه شیب بهینه به عرض جغرافیایی منطقه و شماره روز در سال بستگی دارد از این رو برای مناطق مختلف جهان و ماه‌های مختلف سال روابط و زوایای مختلفی ارائه شده است.

در تحقیقات متعددی زاویه شیب بهینه برای کلکتورهای طراحی شده در نیمکره شمالی به صورت رابطه  $\beta_{opt} = \phi \pm 15$  بیان شده است (Heywood, 1971; Lunde, 1980; Garg, 1982). این در حالیست که رابطه  $\beta_{opt} = (\phi + 15) \pm 15$  نیز گزارش شده است (Duffie and Beckman, 1991). در این روابط  $\phi$  عرض جغرافیایی منطقه است. علاوه بر روابط ذکر شده، تابع  $\beta_{opt} = \phi + 10$  نیز برای تعیین شیب بهینه سالانه کلکتورهای خورشیدی نصب شده به طرف استوا برای مناطق مختلف موجود است (Chiou and EL-Naggar, 1986).

یک معادله تحلیلی نیز بر حسب عرض جغرافیایی برای تعیین زاویه بهینه ارائه شد و نتایج نشان داد که حداکثر اختلاف بین زاویه بهینه محاسبه شده از طریق معادله و زاویه بهینه براساس آزمایشات کمتر از ۳٪ می‌باشد (Kassaby and Hassb, 1994). با استفاده از چندین مدل ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک شیب بهینه ماهانه در نقاط مختلف جهان که در عرض‌های جغرافیایی بین ۶۰- تا ۶۰+ می‌باشند تعیین گردید و ۱۲ رابطه خطی برای شیب بهینه بر حسب عرض جغرافیایی ارائه شد (Nijegorodov et al., 1994). همچنین با تعیین زوایای بهینه فصلی برای کشور مالزی بیان شد که با استفاده از این زوایا کل انرژی دریافتی سالانه توسط سطح کلکتور ۴۰٪ افزایش می‌یابد (Bari, 2000).

زاویه شیب بهینه کلکتورهای خورشیدی برای منطقه دارالسلام با استفاده از مدل ایزوتروپیک Liu-Jordan محاسبه شد. کمترین و بیشترین زاویه بهینه ماهانه به ترتیب ۱/۶ درجه برای سپتامبر و ۳۲/۳ درجه برای دسامبر گزارش شد. همچنین بیان شد که استفاده از زاویه بهینه سالانه کل انرژی دریافتی توسط سطح کلکتور را ۵٪ نسبت به حالت افق افزایش می‌دهد (Yakup and Malik, 2001).

زاویه شیب بهینه برای شهر ازمیر ترکیه با استفاده از مدل ایزوتروپیک Liu-Jordan محاسبه شد. زاویه بهینه ماهانه محاسبه شده برای ازمیر از صفر درجه در ژوئن تا ۶۱ درجه در دسامبر متغیر بود (Ulgen, 2006). در تحقیقی دیگر زاویه شیب بهینه ماهانه کلکتورهای خورشیدی برای شهر ازمیر ترکیه تعیین گردید و پیشنهاد شد که برای افزایش عملکرد کلکتورها بهتر است کلکتورها را با زاویه شیب بهینه ماهانه نصب نمود (Gunerhan and Hepbasli, 2007).



زاویه شیب بهینه‌ی ماهانه، فصلی و سالانه کلکتورهای خورشیدی که رو به استوا قرار گرفته‌اند در ۱۰ ایستگاه مختلف جهان محاسبه گردید. زاویه بهینه سالانه این ۱۰ ایستگاه برابر با عرض جغرافیایی منطقه گزارش شد و بررسی نتایج نشان داد که مقدار انرژی دریافتی کلکتور از خورشید در یک سال با استفاده از زاویه بهینه ماهانه و فصلی در مقایسه با زاویه بهینه سالانه به ترتیب ۱۵٪ و ۱٪ بیشتر است (Jamil Ahmad and Tiwari, 2009).

همچنین زاویه شیب بهینه فصلی، شش ماهه و سالانه برای تهران تعیین و زاویه شیب بهینه سالانه ۴۱ درجه گزارش شد (جعفر کاظمی و سعدآبادی، ۱۳۹۰). در پژوهشی دیگر زاویه بهینه سالانه برای شهر ارومیه حدود ۱۷ درجه کمتر از عرض جغرافیایی ارومیه محاسبه شد (خراسانی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱).

با توجه به اینکه زاویه شیب بهینه تحت تاثیر عرض جغرافیایی است بنابراین ضرورت دارد که برای تمام مناطق ایران زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت تعیین گردد. در تحقیق حاضر از دو مدل ریاضی متفاوت برای تعیین زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت که در خشک‌کن‌های خورشیدی در منطقه شهرکرد به کار برده می‌شوند استفاده شد و زوایای بهینه به دست آمده با روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران دیگر نیز مقایسه شد.

### مواد و روش‌ها:

اطلاعات میزان تشعشع خورشید در اکثر نقاط جهان به صورت تشعشع کل روی سطح افق در دسترس می‌باشد. مدل‌های ریاضی متفاوتی برای محاسبه تشعشع کل روی سطوح شیب‌دار از طریق اطلاعات موجود برای سطح افق ارائه شده است. به طور کلی مدل‌های ریاضی محاسبه تابش کل روزانه روی سطوح شیب‌دار به دو دسته ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک تقسیم می‌شوند. تفاوت این دو مدل در ارزیابی مولفه دیفیوز تابش است. در مدل ایزوتروپیک شدت تابش دیفیوز آسمان یکنواخت فرض می‌شود.

تابش کل روزانه ( $H_T$ ) برای هر ماه روی سطح شیب‌دار از طریق سه مؤلفه زیر به دست می‌آید (Duffie and Beckman, 1991):

- تابش مستقیم  $H_{dir}$ : قسمتی از تابش خورشید که بدون پخش یا جذب به وسیله اتمسفر و به صورت مستقیم از خورشید به سطح زمین می‌رسد.

- تابش دیفیوز  $H_{dif}$ : قسمتی از تابش خورشید که توسط اجزاء جو پخش یا جذب می‌شود. تابش پراکنده در تمام جهات از آسمان به زمین می‌رسد.

- تابش انعکاسی  $H_{ref}$ : قسمتی از تابش خورشید که توسط سطح زمین منعکس می‌شود.

$$H_T = H_{dir} + H_{dif} + H_{ref} \quad (1)$$

شدت تابش کل روزانه ( $H_0$ ) بر حسب  $wm^{-2}$  روی سطح افق در خارج از اتمسفر زمین از رابطه ۲ محاسبه شد (Duffie and Beckman, 1991).



$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta) \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $G_{sc}$  ثابت خورشید است و مقدار آن  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ،  $\phi$  عرض جغرافیایی که برای منطقه شهر کرد  $32/17$  درجه و  $n$  شمار روز در سال است. در این رابطه باید از یک  $n$  میانگین برای هر ماه استفاده نمود که در این پژوهش از  $n$  میانگین پیشنهادی توسط Klein ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردید (Klein, 1977).  $\delta$  زاویه میل یا انحراف، زاویه بین خط واصل زمین-خورشید و صفحه استوایی می‌باشد که از  $23/45$  درجه در تابستان تا  $-23/45$  در زمستان تغییر می‌کند و از طریق رابطه ۳ قابل محاسبه است:

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \times \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3)$$

$\omega_s$  زاویه ساعت غروب است و طبق رابطه ۴ محاسبه شد:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4)$$

جدول ۱-  $n$  میانگین پیشنهادی توسط Klein (Klein, 1977)

ماه میلادی	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
روز	۱۷	۱۶	۱۶	۱۵	۱۵	۱۱	۱۷	۱۶	۱۵	۱۵	۱۴	۱۰
روز در سال	۱۷	۴۷	۷۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۶۲	۱۹۸	۲۲۸	۲۵۸	۲۸۸	۳۱۸	۳۴۴

برای شدت تابش کل روزانه روی سطح افق ( $H$ ) منطقه شهر کرد از داده‌های سازمان هواشناسی در ایستگاه واقع در فرودگاه شهر کرد که در عرض جغرافیایی  $32/17$  درجه و طول جغرافیایی  $50/51$  درجه قرار دارد، استفاده شد. از اطلاعات شدت تابش کل روزانه برای یک دوره ده ساله بین سال‌های  $2002$  تا  $2011$  استفاده شد. با استفاده از شدت تابش کل روزانه روی سطح افق، شدت تابش دیفیوز روی سطح افق از طریق روابط زیر محاسبه شد (Duffie and Beckman, 1991).

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (5)$$

برای زوایای غروب کمتر از  $81/4$  درجه رابطه ۶ وجود دارد.

$$\frac{H_{dif}}{H} = \begin{cases} 1 - 0.2727K_T + 2.4495K_T^2 - 11.9514K_T^3 + 9.3879K_T^4 & : K_T < 0.715 \\ 0.143 & : K_T \geq 0.715 \end{cases} \quad (6)$$

و برای زوایای غروب بیشتر از  $81/4$  درجه رابطه ۷ وجود دارد.

$$\frac{H_{dif}}{H} = \begin{cases} 1 + 0.2832K_T - 2.5557K_T^2 + 0.8448K_T^3 & : K_T < 0.722 \\ 0.175 & : K_T \geq 0.722 \end{cases} \quad (7)$$

از بین مدل‌های ایزوتروپیک ارائه شده از مدل ایزوتروپیک Liu-Jordan استفاده شد (Liu and Jordan, 1963).

$$H_T = (H - H_{dif})R_b + H_{dif} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (8)$$



در معادله اخیر  $H$  و  $H_T$  به ترتیب تابش کل روزانه برای هر ماه روی سطح افق و سطح کلکتور،  $\beta$  زاویه شیب کلکتور نسبت به افق و  $\rho_g$  ضریب انعکاس زمین می‌باشد. ضریب انعکاس زمین  $0.2$  در نظر گرفته شد (Markvart, 2000).  $R_b$  نسبت تابش مستقیم روزانه برای هر ماه روی سطح شیبدار به تابش مستقیم روزانه برای هر ماه روی سطح افق می‌باشد.  $R_b$  برای کلکتورهای قرار گرفته در نیمکره شمالی و رو به استوا از طریق رابطه محاسبه می‌شود (Duffie and Beckman, 1991).

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (9)$$

$\omega'_s$  در رابطه اخیر از طریق فرمول زیر به دست آمد:

$$\omega'_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \\ \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right\} \quad (10)$$

از بین مدل‌های غیر ایزوتروپیک ارائه شده از مدل Hay-Davies استفاده شد (Hay and Davies, 1980).

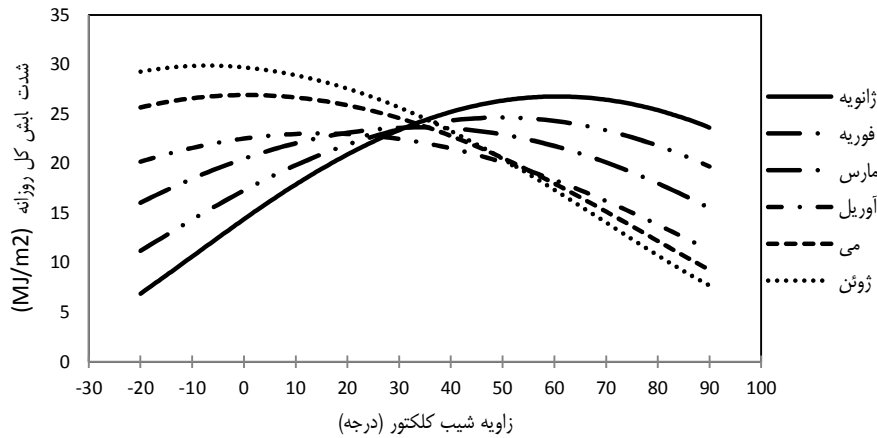
$$H_T = H_{dir} R_b + H_{dif} \left[ \frac{H_{dir}}{H_0} R_b + \left(1 - \frac{H_{dif}}{H_0}\right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \right] + H \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (11)$$

برای محاسبه شیب بهینه کلکتور، شیب کلکتور بین  $20^\circ$  تا  $90^\circ$  درجه (درجه رو به شمال تا  $90^\circ$  درجه رو به جنوب) با گام  $1^\circ$  درجه متغیر در نظر گرفته شد و شبیهی که منجر به دریافت ماکزیمم تابش روی سطح کلکتور شد، به عنوان شیب بهینه در نظر گرفته شد.

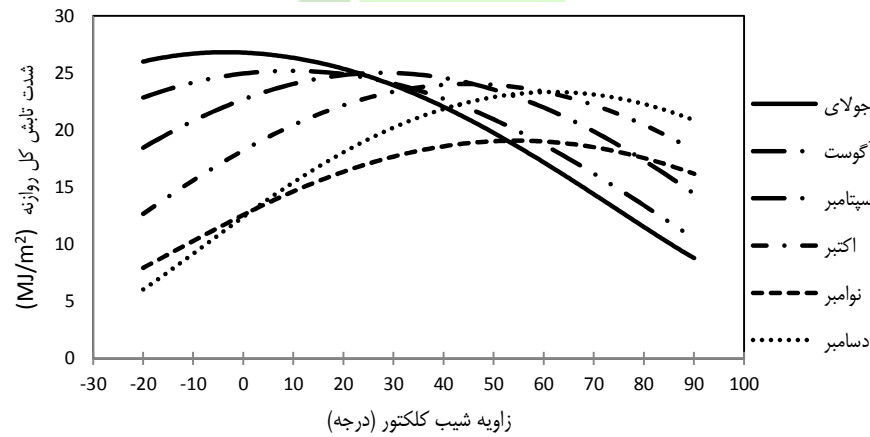
## نتایج و بحث:

برای محاسبه تابش کل روزانه برای هر ماه روی سطح کلکتور، از داده‌های تابش کل روزانه روی سطح افق سازمان هواشناسی برای یک دوره‌ی ده ساله در ایستگاه واقع در فرودگاه شهرکرد که در عرض جغرافیای  $32/17^\circ$  درجه قرار دارد، استفاده شد. برای به دست آوردن تابش کل روزانه برای هر ماه از سال روی سطح کلکتور از مدل ایزوتروپیک Liu-Jordan و مدل غیر ایزوتروپیک Hay-Davies استفاده شد. در شکل‌های ۱ و ۲ تغییرات شدت تابش کل روزانه ماه‌های مختلف سال روی سطح کلکتور صفحه تخت برای شیب بین  $20^\circ$  تا  $90^\circ$  درجه نسبت به افق از طریق مدل ایزوتروپیک Liu-Jordan نشان داده شده است. بررسی شکل‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد که تغییر زاویه شیب برای هر ماه تاثیر بسیار زیادی را بر شدت تابش کل روزانه به همراه خواهد داشت. به این دلیل که با تغییر زاویه شیب مقدار مولفه‌های تابش مستقیم، دیفیوز و انعکاسی دریافتی توسط سطح کلکتور تغییر می‌کند.

زاویه شیب بهینه محاسبه شده از دو مدل و همچنین روابط به دست آمده توسط Nijegorodov et al برای ماه‌های مختلف سال در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی نتایج جدول نشان داد که شیب بهینه‌ی ماهانه به دست آمده از طریق مدل Liu-Jordan و مدل Hay-Davies تفاوت چندانی با هم ندارند و تفاوت اندک آن‌ها به دلیل متفاوت بودن مولفه دیفیوز دو مدل می‌باشد.



شکل ۱- شدت تابش کل روزانه روی سطح کلکتور قرار گرفته در شهرکرد برای ماه‌های ژانویه تا ژوئن



شکل ۲- شدت تابش کل روزانه روی سطح کلکتور قرار گرفته در شهرکرد برای ماه‌های جولای تا دسامبر

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که زوایای بهینه به دست آمده از طریق دو مدل نزدیک به زوایای بهینه مدل Nijgorodov *et al* می‌باشد و تفاوت ناچیز آن‌ها به خاطر استفاده از اطلاعات تابش کل روزانه منطقه شهرکرد در مدلی است که طبق اطلاعات مناطق دیگر به دست آمده است.

با بررسی نتایج دو مدل مشاهده می‌شود که کمترین زاویه بهینه مربوط به ماه می و بیشترین زاویه مربوط به ماه دسامبر می‌باشد. منفی بودن زوایای بهینه برای ماه‌های ژوئن و جولای بدین معنی است که برای دریافت حداکثر تابش، کلکتور باید در حد کوچکی رو به شمال قرار گیرد. زوایای بهینه فصلی از میانگین زوایای بهینه ماهانه مربوط به ماه‌های هر فصل به دست می‌آید. با توجه به مدل ایزوتروپیک زاویه بهینه برای فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۲/۶۶، ۱۱/۳۳، ۵۳/۶۶ و ۴۸/۳۳ می‌باشد. و زاویه بهینه سالانه برابر با ۲۹ درجه می‌باشد که تقریباً نزدیک به عرض جغرافیایی شهرکرد با اختلافی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد.



جدول ۲- شیب بهینه کلکتور خورشیدی صفحه تخت در ماه‌های مختلف براساس دو مدل Liu-Jordan و Hay-Davies

ماه میلادی	روابط پیشنهادی Nijegorodov et al	$\beta_{opt}(m)$ (درجه) برای $\phi = ۳۲/۱۷$	$\beta_{opt}(m)$ (درجه) مدل Liu- Jordan	$\beta_{opt}(m)$ (درجه) مدل Hay-Davies
ژانویه	$\beta_{opt} = ۰/۸۹\phi + ۲۹^{\circ}C$	۵۷/۶۳	۶۱	۶۲
فوریه	$\beta_{opt} = ۰/۹۷\phi + ۱۷^{\circ}C$	۴۸/۲	۵۰	۵۲
مارس	$\beta_{opt} = \phi + ۴^{\circ}C$	۳۶/۱۷	۳۴	۳۷
آوریل	$\beta_{opt} = \phi - ۱۰^{\circ}C$	۲۲/۱۷	۱۵	۱۷
می	$\beta_{opt} = ۰/۹۳\phi - ۲۴^{\circ}C$	۵/۹۲	۰	۰
ژوئن	$\beta_{opt} = ۰/۸۷\phi - ۳۴^{\circ}C$	-۶/۰۱	-۷	-۷
جولای	$\beta_{opt} = ۰/۸۹\phi - ۳۰^{\circ}C$	-۱/۳۷	-۴	-۴
آگوست	$\beta_{opt} = ۰/۹۷\phi - ۱۷^{\circ}C$	۱۴/۲	۱۰	۱۱
سپتامبر	$\beta_{opt} = \phi - ۲^{\circ}C$	۳۰/۱۷	۲۸	۳۰
اکتبر	$\beta_{opt} = \phi + ۱۲^{\circ}C$	۴۴/۱۷	۴۵	۴۷
نوامبر	$\beta_{opt} = ۰/۹۳\phi + ۲۵^{\circ}C$	۵۴/۹۲	۵۴	۵۷
دسامبر	$\beta_{opt} = ۰/۸۷\phi + ۳۴^{\circ}C$	۶۳/۹۹	۶۲	۶۳

در جدول ۳ شدت تابش کل روی سطح کلکتور با شیب بهینه ماهانه، فصلی و سالانه براساس مدل Liu-Jordan ارائه شده است و نتایج نشان می‌دهد که بیشترین شدت تابش براساس زاویه بهینه ماهانه برای ماه ژوئن و برابر با  $۲۹/۸۸ \text{ MJ/m}^2$  و کمترین شدت تابش برای ماه نوامبر و برابر با  $۱۹/۰۷ \text{ MJ/m}^2$  می‌باشد. با استفاده از زاویه بهینه فصلی و سالانه نیز دو ماه ژوئن و نوامبر به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر تابش خورشید را دریافت می‌کنند.

مقادیر تابش کل سالانه روی سطح کلکتور با توجه به زوایای بهینه مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تنظیم زاویه کلکتور به صورت ماهانه شدت تابش دریافتی  $۱/۳$  درصد بیشتر از زاویه بهینه فصلی،  $۷/۵$  درصد بیشتر از کلکتور با زاویه بهینه سالانه و  $۲۰$  درصد بیشتر از حالت افقی می‌باشد. همچنین تغییر زاویه کلکتور به صورت فصلی نیز باعث دریافت  $۶/۲$  انرژی تابشی بیشتر نسبت به زاویه بهینه سالانه می‌باشد.

### نتیجه گیری کلی

۱- با تنظیم زاویه کلکتور به صورت روزانه می‌توان حداکثر تابش خورشید را دریافت نمود ولی با توجه به عملی نبودن تغییر زاویه کلکتور به صورت روزانه، با تغییر زاویه کلکتور به صورت ماهانه می‌توان از حداکثر تابش خورشید بهره برد و زمان خشک کردن محصولات کشاورزی را کاهش داد.



۲- زاویه بهینه ماهانه در منطقه شهرکرد با عرض جغرافیایی ۳۲/۱۷ درجه از صفر درجه برای ماه می تا ۶۲ درجه برای ماه دسامبر تغییر می‌کند.

۳- بیشترین شدت تابش با توجه به تمام زوایای بهینه مربوط به ماه ژوئن و کمترین شدت تابش مربوط به ماه نوامبر می‌باشد.

جدول ۳- شیب بهینه ماهانه، فصلی، سالانه و تابش کل روزانه متناظر با این شیب‌های بهینه براساس مدل Liu-Jordan

ماه میلادی	$H_T (\beta_{opt(m)})$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\beta_{opt(m)}$ (درجه)	$H_T (\beta_{opt(s)})$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\beta_{opt(s)}$ (درجه)	$H_T (\beta_{opt(y)})$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\beta_{opt(y)}$ (درجه)
ژانویه	۲۶/۷۹	۶۱	۲۶/۲۳		۲۳/۰۴	
فوریه	۲۴/۶۷	۵۰	۲۴/۶۶	۴۸/۳۳	۲۳/۲۴	۲۹
مارس	۲۳/۶۷	۳۴	۲۳/۰۹		۲۳/۵۸	
آوریل	۲۳/۰۶	۱۵	۲۲/۷۱		۲۲/۶۱	
می	۲۶/۹۲	۰	۲۶/۹	۲/۶۶	۲۴/۸۲	۲۹
ژوئن	۲۹/۸۸	-۷	۲۹/۵۵		۲۶/۰۱	
جولای	۲۶/۸	-۴	۲۶/۲۱		۲۴/۱۷	
آگوست	۲۵/۲	۱۰	۲۵/۱۹	۱۱/۳۳	۲۴/۲۴	۲۹
سپتامبر	۲۵	۲۸	۲۴/۱۷		۲۴/۹۹	
اکتبر	۲۴/۰۵	۴۵	۲۳/۸۲		۲۳/۲۸	
نوامبر	۱۹/۰۷	۵۴	۱۹/۰۷	۵۳/۶۶	۱۷/۵۷	۲۹
دسامبر	۲۳/۳۲	۶۲	۲۳/۱۲		۲۰/۰۳	

جدول ۴- مقادیر سالانه انرژی دریافتی از خورشید روی سطح کلکتور صفحه تخت تحت زاویه بهینه ماهانه، فصلی، سالانه و

زاویه صفر در شهرکرد

زاویه شیب بهینه	$\beta_{opt(m)}$	$\beta_{opt(s)}$	$\beta_{opt(y)}$	$\theta = \beta$
انرژی دریافتی سالانه (MJ/m <sup>2</sup> )	۹۰۸۰/۳	۸۹۶۶/۸	۸۴۴۴/۱	۷۵۸۰

## منابع

- جعفرکاظمی، ف.، و ع. سعدآبادی. ۱۳۹۰. تعیین زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت در تهران. نشریه مهندسی مکانیک. شماره ۷۹.





۲. خراسانی‌زاده، ح.، ع. آقایی و ح. احترام. ۱۳۹۱. پتانسیل سنجی انرژی خورشیدی و تعیین زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی در شهر ارومیه. دومین همایش ملی انرژی باد و خورشید.
3. Bari, S. 2000 optimum slope angle and orientation of solar collectors for different periods of possible utilization. *Energy Conversion and Management* 41: 855-860.
  4. Chiou, J.P., and M.M. EL-Naggar. 1986. Optimum slope for solar insolation on flat surface tilted toward the equator in heating season. *Journal Solar Energy* 36: 471-478.
  5. Duffie, J.A., and W.A. Beckman. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons. New York.
  6. Garg, H.P. 1982. *Treatise on solar Energy. Fundamentals of Solar Energy Research*. John Wiley & Sons. New York.
  7. Gunerhan, H., and A. Hepbasli. 2007. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Journal Building and Environment* 42:779-783.
  8. Hay, J.E., and J.A. Davies. 1980. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. in *Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop*.
  9. Heywood, H. 1971. Operational experience with solar water heating. *Journal Heat Vent Energy* 39: 63-69.
  10. Jamil Ahmad M., and G.N. Tiwari. 2009. Optimization of Tilt Angle for Solar Collector to Receive Maximum Radiation. *Journal The Open Renewable Energy* Vol: 19-24.
  11. Kassaby, M.M., and M.H. Hassb. 1994. Investigation of a variable tilt angle Australian type solar collector. *Renewable Energy* 4: 327-332.
  12. Klein, S.A. 1977. Calculation of monthly average insolation on tilted surface. *Solar Energy* 19:325-329.
  13. Liu, B.Y.H., and R.C. Jordan. 1963. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors. *Solar Energy* 7: 53-74.
  14. Lunde, P.J. 1980. *Solar Thermal Engineering*. John Wiley & Sons. New York.
  15. Markvart, T. 2000. *Solar Electricity*. John Wily & Sons. USA.
  16. Nijgorodov, N., K.R.S. Devan., P.K. Jain., and S. Carlsson. 1994. Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude. *Journal Renewable Energy* 4: 529-543.
  17. Ulgen, K. 2006. Optimum tilt angle for solar collectors. *Journal Energy Sources* 28: 1171-1180.
  18. Yakup, M.A., and A.Q. Malik. 2001. Optimum titl angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. *Renewable Energy* 24: 223-234.



## Optimum Angle Determination of Flat-Plate Solar Collector for Solar Dryers in Shahrekord

Ali Maleki<sup>1\*</sup>, Rohangiz Rahimi<sup>2</sup>, Shahin Besharati<sup>3</sup>

1. Assistant professor of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University ([drmaleki@iran.ir](mailto:drmaleki@iran.ir))
2. MSc. Student of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University
3. Scholar professor of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University

### Abstract

Nowadays, using of solar dryers for drying process of agricultural products is increased. Appropriate design of dryer parts will increases dryer performance and decreases drying time. Solar collector is the main part of a solar dryer. One of the important parameters that affect the design of a flat-plate solar collector is its tilt angle to the horizon, because; tilt angle variation change amounts of solar radiation reaching the collector surface. Therefore in order to research maximum solar radiation by collector surface, optimum tilt angle of solar collector should be determined in different times of year. In this research isotropic Lio and Jordan model and non-isotropic Hay and Davies model were used to determine optimum flat- plate collector angle in Shahrekord. Optimum tilt angle varied between 0°c in May and 62°c in December and the yearly optimum tilt angle found 29°c to the horizon. Minimum and maximum amount of solar radiation on collector surface due to optimum angle occurred in November and June respectively. Also a solar collector is installed at monthly optimum tilt angle receives solar radiation 20% more than the case of a solar collector installed on a horizontal surface.

**Keywords:** Solar Dryer, Optimum Angle, Flat-Plate Solar Collector