



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## مدلسازی تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران

زهرا فرجی مهبیاری<sup>۱</sup>، خدیجه فرجی مهبیاری<sup>۲</sup>، مجید خانعلی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران- پردیس کشاورزی و منابع طبیعی

۲- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد شهرری

۳- استادیار، دانشگاه تهران- پردیس کشاورزی و منابع طبیعی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [khanali@ut.ac.ir](mailto:khanali@ut.ac.ir)

### چکیده

تابش خورشیدی روزانه یکی از پارامترهای مهم در زمینه کاربرد انرژی خورشیدی است. با توجه به اینکه، اندازه‌گیری تابش خورشیدی نیازمند ابزار و تجهیزات پیشرفته است، داده‌های اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی در کل ایام سال و برای بازه طولانی در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی کشور موجود نیست. یک روش معمول برای تخمین میزان تابش روزانه خورشید استفاده از مدل‌های تجربی و بر اساس داده‌های هواشناسی در دسترس مانند ساعات آفتابی و یا دمای هوا است. هدف از این مطالعه مدلسازی تابش خورشیدی روزانه بر اساس تفاوت بین دمای حداکثر و حداقل است. با استفاده از آزمون آماری خطا، عملکرد مدل‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ۱۲ ایستگاه هواشناسی ایران واقع در چهار منطقه آب و هوایی مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه خشک و خشک با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد این مدل‌ها دارای دقت بیشتری در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب می‌باشند. بنابراین استفاده از این مدل‌ها برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در مناطق خشک ایران که تنها داده‌های دمای هوا در دسترس است، توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** ایران، تابش خورشیدی روزانه، دمای هوا، مدل تجربی، مناطق آب و هوایی.

### مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری است که علاوه بر تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز، دارای آلودگی کمتر و دسترسی آسان هستند. تلاش‌های فراوان در اکثر کشورها برای دسترسی هر چه سریع‌تر و بهتر به این منابع و استفاده از آن‌ها به یکی از شاخصه‌های پیشرفت و توسعه پایدار تبدیل شده است. در میان انرژی‌های

## نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی



(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی یکی از منابع در دسترس، پایان‌ناپذیر و بدون آلودگی است که می‌تواند در زمینه‌های مختلف مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

استفاده صحیح و با صرفه از انرژی خورشیدی در هر منطقه، نیازمند داشتن اطلاعاتی در مورد میزان تابش خورشید در ایام مختلف سال است. این اطلاعات که به عنوان پتانسیل انرژی خورشیدی مطرح می‌گردد از روش‌های گوناگونی بدست می‌آید و دقیق‌ترین آن با استفاده از اندازه‌گیری است. از آنجا که اطلاعات اندازه‌گیری شده در بسیاری از نقاط از جمله در بسیاری از مناطق ایران در دسترس نیست، پژوهشگران سعی بر آن داشته‌اند تا از روابط و مدل‌های ریاضی برای تخمین تابش خورشید استفاده کنند. این مدل‌ها بر مبنای عوامل آب و هوایی از قبیل ساعت آفتابی، رطوبت نسبی و یا دمای حداقل و حداکثر هوا پایه‌گذاری شده‌اند که اندازه‌گیری آن‌ها آسان‌تر است. این معادلات، از داده‌های هواشناسی از نوع مکانی نقطه‌ای استفاده می‌کنند؛ بنابراین مقدار تابش تخمینی به وسیله آن‌ها نیز نقطه‌ای خواهد بود. به عبارتی، مقدار تابش تخمینی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه دارای اعتبار است. اکثر معادلاتی که برای برآورد تابش خورشیدی به کار می‌روند بر اساس مدت تابش آفتاب و دمای هوا هستند. به طور کلی مدل‌های مبتنی بر مدت تابش آفتاب در مقایسه با مدل‌هایی که از سایر داده‌های هواشناسی استفاده می‌کنند دقیق‌ترند (Chen et al., 2004; Iziomon and Mayer, 2002). اما از آنجایی که در ایستگاه‌های هواشناسی استاندارد، داده‌های دمای هوا قابل دسترس‌ترند، مدل‌های مبتنی بر دما جایگزین مناسبی برای برآورد تابش خورشیدی هستند (Abraha and Savage, 2008; Rahimikhoob, 2010).

معمولاً از دو روش هارگریوز و بریستو-کمپیل برای برآورد تابش خورشیدی به کمک دمای هوا استفاده می‌شود (Hargreaves et al., 1985; Bristow and Campbell, 1984). از زمان ایجاد این دو مدل، تحقیقات بسیاری برای افزایش دقت آن‌ها انجام شده است که توسط لیو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) به تفصیل شرح داده شده است. به طور کلی از مدل هارگریوز برای محاسبه تابش خورشیدی ماهانه استفاده می‌شود (Allen, 1997). اگر چه در برخی از مطالعات عملکرد مدل بریستو-کمپیل در محاسبه تابش خورشیدی روزانه بهتر ارزیابی شده است (Liu et al., 2009). اما مدل بریستو-کمپیل در برآورد متوسط ماهانه تابش خورشیدی به خوبی مدل هارگریوز عمل نمی‌کند (Bandyopadhyay et al., 2008; Meza and Varas, 2000). با این حال، عملکرد مدل هارگریوز و مدل‌های اصلاح شده آن در نواحی مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است (Li et al., 2014). بنابراین استفاده از این مدل در کشورهای بزرگی که دارای تنوع آب و هوایی و جغرافیایی هستند با محدودیت مواجه است. لی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های ۶۵ ایستگاه هواشناسی چین، یک مدل جدید برای برآورد متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل جدید لی در همه مناطق آب و هوایی به خصوص در مناطق خشک عملکرد دقیقی دارد.

<sup>۱</sup> Liu et al.

## نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی



(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



در ایران، جعفرپور و کارشناس (۱۳۸۰) با تقسیم‌بندی اقلیمی-تابشی مناطق مختلف ایران، روابطی برای محاسبه تابش در شهرهای مختلف ایران ارائه دادند. معینی و همکاران (۱۳۸۹) بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن و با در نظر گرفتن ساعات آفتابی، ایران را به پنج منطقه اقلیمی تقسیم نموده و ضرایب مدل تجربی آنگستروم را برای هریک از این مناطق بدست آوردند. انجوی و همکاران (۱۳۹۳) نیز در مناطقی شامل نواحی مرکزی و جنوبی ایران از شبکه عصبی برای مدل سازی تابش خورشیدی بهره گرفته‌اند. صفایی و همکاران (۱۳۸۳) از داده‌های تابش‌سنجی ۹ ایستگاه هواشناسی برای انتخاب مدل مناسب استفاده کرده‌اند. آن‌ها در تحقیقات خود سه مدل آنگستروم-پریسکات، روش حداکثر احتمال و مدل هیبرید را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از روابط آماری هر یک از مدل‌ها و داده‌های پردازش شده ۹ ایستگاه و حل معادلات همبستگی مربوطه، ضرایب هر یک از مدل‌ها را برای شرایط آب و هوایی ایران بدست آوردند و در نهایت مدل هیبرید را به دلیل دارا بودن بهترین برازش انتخاب کردند. قهرمان و بختیاری<sup>۱</sup> (۲۰۰۹) از هشت مدل تجربی مبتنی بر دمای هوا و بارش روزانه برای برآورد تابش خورشیدی روزانه در شش ایستگاه هواشناسی ایران شامل مشهد، تبریز، اصفهان، کرمان، همدان و زنجان استفاده کردند. ایستگاه‌های مورد نظر از مناطق خشک و نیمه خشک کشور انتخاب شدند؛ در این میان، مدل ریچاردسون برای کرمان و زنجان، مدل بریستو و کمپبل برای همدان، مدل دجونگ و استوارت برای تبریز و مدل مک‌کسکیل (آرکانزاس) برای مشهد معتبر ارزیابی شدند؛ با این حال هیچ یک از مدل‌ها برای اصفهان مناسب نبودند.

هدف پژوهش حاضر، ارائه یک مدل تجربی مناسب است که بتواند متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه را بر اساس دمای هوا و برای همه مناطق آب و هوایی به خوبی برآورد کند. در این مطالعه، پنج مدل مبتنی بر دمای هوا برای برآورد تابش خورشیدی روزانه (مدل‌های بریستو-کمپبل، هارگریوز، سامانی، لی و چن) در ۱۲ ایستگاه هواشناسی ایران با یکدیگر مقایسه می‌شوند. ایستگاه‌های مورد نظر از چهار منطقه آب و هوایی مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه خشک و خشک انتخاب می‌شوند. در نهایت با توجه به آزمون آماری خطا، مناسب‌ترین مدل را برای برآورد تابش خورشیدی روزانه هر منطقه آب و هوایی مشخص می‌گردد.

### مواد و روش‌ها

#### اطلاعات هواشناسی

تقسیم‌بندی‌های اقلیمی متفاوتی برای ایران بر اساس پارامترهای مختلف انجام شده است. اولین مطالعه در مورد طبقه‌بندی آب و هوایی در ایران به وسیله گنجی در سال ۱۳۷۳ بر اساس تقسیم‌بندی کوپن صورت گرفته است. مطالعات بعدی توسط عدل در سال ۱۳۳۹، جوادی در سال ۱۳۴۴ و ثابتی در سال ۱۳۴۸ انجام شده است که هر یک

<sup>۱</sup> Ghahreman and Bakhtiari

## نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی



(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



برای انجام مطالعات خاصی کاربرد دارند (انجوی و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهش حاضر از اقلیم‌بندی مکانی و زمانی ارائه شده توسط طبری و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) استفاده شده است که ایران را به کمک شاخص خشکی دومارتن و شاخص ترکیبی پینا به ۸ اقلیم آب و هوایی تقسیم کرده‌اند. در این پژوهش با توجه به داده‌های بدست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی کشور، اقلیم‌های مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه خشک و خشک که بخش عمده‌ای از ایران را در بر می‌گیرند به عنوان نمونه بررسی شده‌اند و مقدار تابش کل آن‌ها به کمک معادلات تجربی پیش‌بینی شده است.

داده‌های مورد استفاده در این مقاله، شامل داده‌های تابش کل خورشیدی روزانه ( $H, MJ/m^2$ )، حداکثر دمای روزانه ( $T_{max}, ^\circ C$ ) و حداقل دمای روزانه ( $T_{min}, ^\circ C$ ) بدست آمده از ۱۲ ایستگاه هواشناسی (سال ۲۰۰۷ میلادی) است که از سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) تهیه شده است (بی‌نام، ۱۳۹۳). این ایستگاه‌ها، چهار منطقه آب و هوایی مذکور و طیف وسیعی از طول و عرض جغرافیایی با اختلاف دمای سالانه بین  $6.08^\circ C$  و  $29.86^\circ C$  را پوشش می‌دهند. اطلاعات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است، دامنه تغییرات دمای معرفی شده در جدول ۱، با توجه به رابطه (۴) ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های مورد استفاده در این مقاله.

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	استان	عرض جغرافیایی ( $^\circ N$ )	طول جغرافیایی ( $^\circ E$ )	میانگین دامنه تغییرات دما ( $^\circ C$ )	منطقه آب و هوایی
۱	ایلخچی	اردبیل	۳۷/۶۳	۴۸/۵۸	۱۱/۵۹	مرطوب
۲	لنگرود	گیلان	۳۷/۲۵	۵۰/۲۳	۶/۰۸	مرطوب
۳	سنار	مازندران	۳۶/۵۰	۵۱/۲۵	۶/۷۲	مرطوب
۴	شورجه	قزوین	۳۵/۹۶	۴۹/۳۳	۱۰/۶۱	نیمه مرطوب
۵	جرندق	قزوین	۳۶/۱۱	۴۹/۴۸	۱۰/۶۳	نیمه مرطوب
۶	سلطانیه	زنجان	۳۶/۵۶	۴۸/۸۵	۱۳/۵۹	نیمه مرطوب
۷	مرودشت	فارس	۲۹/۹۸	۵۲/۹۲	۱۳/۷۱	نیمه خشک
۸	بجنورد	خراسان شمالی	۳۷/۴۷	۵۷/۳۲	۸/۱۵	نیمه خشک
۹	کبودراهنگ	همدان	۳۵/۱۹	۴۸/۷۳	۱۳/۱۳	نیمه خشک
۱۰	ورزنه	اصفهان	۳۲/۴۶	۵۲/۶۱	۱۴/۲۵	خشک
۱۱	رفسنجان	کرمان	۳۰/۳۲	۵۶/۲۲	۱۳/۹۶	خشک
۱۲	دهک	سیستان و بلوچستان	۲۷/۱۷	۶۲/۵۵	۲۹/۸۶	خشک

<sup>۱</sup> Tabari et al.



### مدل‌سازی و واسنجی مدل

در جدول ۲ تعداد پنج مدل تجربی مورد مطالعه ارائه شده است. در این مدل‌ها، میزان تابش خورشیدی ( $H$ ) بر اساس تابش خورشیدی فرازمینی ( $H_0$ ) و دامنه تغییرات روزانه دما ( $\Delta T$ ) و میانگین دمای روزانه ( $T_{ave}$ ) تخمین زده می‌شود. در این مقاله،  $H_0$  بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Duffie & Beckman, 2006).

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

که در آن  $n$ ، شماره ژولیوسی است. ثابت خورشیدی،  $I_{sc}$ ، معادل ۱۳۶۷ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است.  $\varphi$ ، عرض جغرافیایی محل مورد نظر و  $\delta$  زاویه میل خورشیدی نسبت به استوا است که مقدار آن را می‌توان از رابطه (۲) بر حسب درجه محاسبه نمود.

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360(284 + n)}{365} \right] \quad (2)$$

زاویه ساعتی خورشید در هنگام غروب،  $\omega_s$ ، نیز با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3)$$

ضرایب تجربی مدل‌های مورد استفاده به ترتیب، با داده‌های اندازه‌گیری شده  $H$ ،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  (در روابط (۴) و (۵)) و  $H_0$  محاسبه و واسنجی شدند.

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (4)$$

$$T_{ave} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} \quad (5)$$

مدل (۱) توسط بریستو و کمپبل (۱۹۸۴) ارائه شد که یک رابطه غیر خطی برای برآورد تابش خورشیدی بر اساس تابش خورشیدی فرازمینی و دامنه تغییرات روزانه دما است. چن و همکاران<sup>۱</sup> نیز (۲۰۰۴) مدل (۲) را پیشنهاد نمودند. هارگریوز و همکاران (۱۹۸۵) مدل ساده (۳) را جهت تخمین تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین در شرایط عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده ساعات آفتابی ارائه دادند. این مدل نیز مقدار تابش خورشیدی را با استفاده از مقادیر تابش خورشیدی فرازمینی و دامنه تغییرات روزانه دما محاسبه می‌کند. سامانی<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) مدل هارگریوز را با کمی تغییرات به صورت مدل (۴) ارائه نمود. لی و همکاران (۲۰۱۴) نیز، روش هارگریوز و سامانی در برآورد تابش کل خورشیدی را اصلاح و مدل (۵) را ارائه کردند. به منظور تجزیه و تحلیل رگرسیون از جعبه ابزار Curve Fitting در نرم افزار Matlab R2014a برای تعیین ضرایب مدل (۱-۵) استفاده شده است.

<sup>۱</sup> Chen et al.

<sup>۲</sup> Samani

## نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی



(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



جدول ۲- مدل‌های تجربی مبتنی بر دمای هوای مورد استفاده در این پژوهش.

شماره مدل	نام مدل	ضرایب	مدل تجربی
(۱)	برستو و کمپبل (۱۹۸۴)	a1 و b1 و c1	$H/H_0 = a1 [1 - \exp(-b1 \Delta T^{c1})]$
(۲)	چن و همکاران (۲۰۰۴)	a2 و b2	$H/H_0 = a2 + b2 \ln \Delta T$
(۳)	هارگریوز و همکاران (۱۹۸۵)	a3 و b3	$H/H_0 = a3 + b3 \Delta T^{0.5}$
(۴)	سامانی (۲۰۰۰)	a4 و b4 و c4	$H/H_0 = (a4 + b4 \Delta T + c4 \Delta T^2) \Delta T^{0.5}$
(۵)	لی و همکاران (۲۰۱۴)	a5 و b5 و c5	$H/H_0 = a5 + (b5 + c5 T_{ave}) \Delta T^{0.5}$

### مقایسه

عملکرد مدل‌ها توسط چهار شاخص آماری ریشه میانگین مربع خطا ( $RMSE, MJ/m^2$ )، خطای اریبی ( $MBE, MJ/m^2$ )، درصد میانگین خطا ( $MPE, \%$ )، و ضریب تعیین ( $R^2$ ) بر اساس مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده  $H$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شاخص‌ها اغلب برای مقایسه مدل‌های برآورد تابش خورشیدی به کار می‌روند (Li et al., 2011; Robaa, 2009) و به شرح زیر هستند:

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(H_{i,p} - H_{i,m})}{H_{i,m}} \times 100 \quad (6)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^N (H_{i,p} - H_{i,m}) / N \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{i,p} - H_{i,m})^2 / N} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_{i,m} - H_{i,p})^2}{\sum_{i=1}^N (H_{i,m} - H_{m,avg})^2} \quad (9)$$

در روابط فوق،  $N$ ، تعداد کل مشاهدات، اندیس  $i$ ، امین مقدار تابش خورشیدی کل و اندیس  $p$  و  $m$  به ترتیب به مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی کل اشاره دارند.  $H_{m,avg}$  مقدار میانگین تابش خورشیدی کل اندازه‌گیری شده است.

### نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای پنج مدل تجربی برستو-کمپبل، هارگریوز، سامانی، لی و چن در چهار منطقه آب و هوایی مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه خشک و خشک و با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش کل خورشیدی روزانه انجام شد. ضرایب تجربی مدل‌ها برای هر ایستگاه محاسبه شد که در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به اینکه از داده‌های محلی استفاده نمودیم انتظار می‌رود ضرایب مدل‌ها تابعی از محل ایستگاه هواشناسی باشند؛ جدول ۳ بیانگر همین موضوع است. لازم به ذکر است که با وجود وابستگی مدل‌ها به ایستگاه هواشناسی، لازم است که از

# نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی



(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج

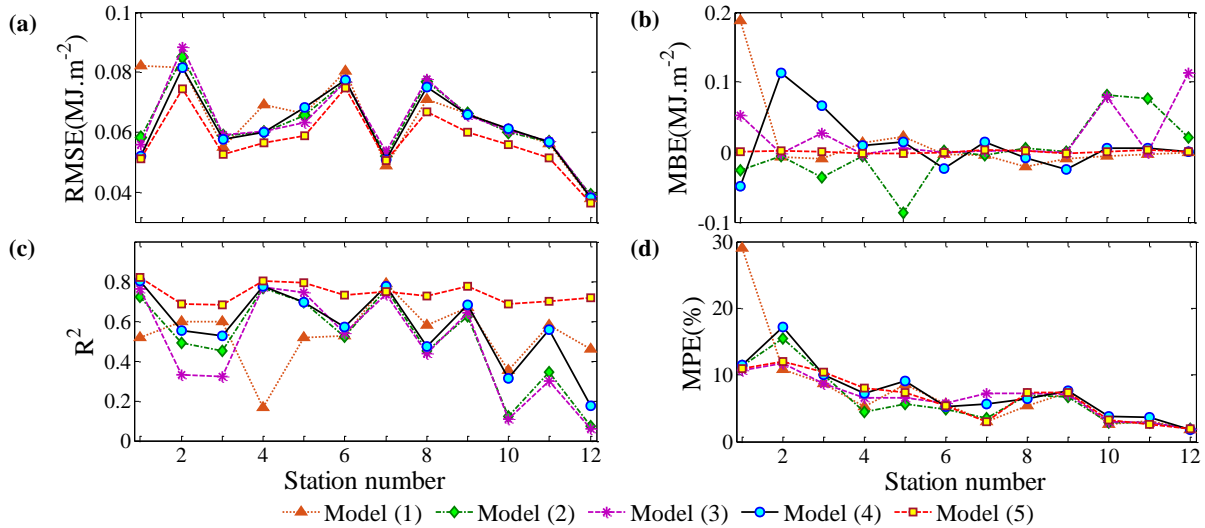


داده‌های اندازه‌گیری شده  $H$  برای تعیین ضرایب استفاده کنیم؛ چون این کار باعث ساده‌تر شدن محاسبات و دقیق‌تر شدن پیش‌بینی‌ها می‌شود (Ball et al., 2004).

جدول ۳- ضرایب تجربی بدست آمده برای پنج مدل مورد استفاده در ۱۲ ایستگاه هواشناسی ایران.

شماره ایستگاه	مدل												
	مدل ۱			مدل ۲			مدل ۳			مدل ۴			مدل ۵
نام ایستگاه	a1	b1	c1	a2	b2	a3	b3	a4	b4	c4	a5	b5	c5
۱ ایلخچی	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۰/۴۶۲۸	۰/۲۲۹۵	۰/۱۹۴۹	۰/۲۳۳۲	۰/۱۳۹۷	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۰۲	۰/۱۵۸۹	۰/۰۸۱۱	۰/۰۰۲۱
۲ لنگرود	۰/۰۷۰۷	۰/۱۲۰۰	۰/۴۱۰	۰/۱۴۸۳	۰/۰۲۵۵	۰/۱۱۱۰	۰/۰۸۱۴	۰/۰۱۵۳	۰/۰۱۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۹۵	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱
۳ سنار	۰/۰۷۵۹	۲/۱۷۳۷	۰/۰۷۰۷	۰/۰۹۱۶	۰/۰۷۷۷	۰/۰۶۲۰	۰/۰۸۰۳	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۶۵۷	۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۶
۴ شوره	۰/۰۵۲۱	۰/۱۹۹۸	۰/۲۹۳۸	۰/۳۶۹۸	۰/۲۸۲۳	۰/۱۹۰۳	۰/۰۲۵	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۹۰۰	۰/۰۹۲۲	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۵
۵ جزدنق	۰/۰۳۰۲	۰/۵۱۵۶	۰/۲۲۱۷	۰/۳۳۸۲	۰/۲۴۲۳	۰/۱۷۷۴	۰/۰۵۰۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳۱۸	۰/۰۶۹۲	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۸
۶ سلطانیه	۰/۰۹۵۹	۰/۹۵۴۶	۰/۰۹۲۰	۰/۱۹۳۸	۰/۰۴۲۳	۰/۱۲۲۱	۰/۰۵۶۱	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۹۸۶	۰/۰۵۲۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰
۷ مرودشت	۰/۰۰۱۰	۳/۲۰۱۶	۰/۲۹۵۵	۰/۲۴۹۶	۰/۲۲۰۵	۰/۱۵۴۳	۰/۰۴۸۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱۰۶	۰/۰۶۶۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۷
۸ بجنورد	۰/۰۰۹۳	۲/۸۵۰۷	۰/۰۲۵۸	۰/۱۷۵۱	۰/۰۵۵۲	۰/۱۳۶۹	۰/۰۵۴۴	۰/۰۱۴۸	۰/۰۰۰۸	۰/۱۴۴۹	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۴۱
۹ کبودراهنگ	۰/۰۱۸۰	۱/۶۶۵۰	۰/۲۱۶۵	۰/۲۰۸۶	۰/۱۷۷۱	۰/۱۳۶۰	۰/۰۰۶۱	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۶۸۰	۰/۰۸۳۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۹
۱۰ ورزنه	۰/۰۰۰۸	۳/۴۴۹۹	۰/۱۱۲۳	۰/۰۹۲۹	۰/۱۶۷۶	۰/۰۵۰۲	۰/۰۴۱۶	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۱۵۴۵	۰/۰۱۶۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱
۱۱ رفسنجان	۰/۰۰۰۱	۴/۲۸۵۵	۰/۱۱۷۲	۰/۱۸۱۰	۰/۰۱۵	۰/۰۹۵۵	۰/۰۷۹۳	۰/۰۲۶۷	۰/۰۰۱۰	۰/۰۷۲۲	۰/۰۳۶۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۲۲
۱۲ دهک	۰/۰۰۳۲	۳/۳۷۷۸	۰/۱۸۹۲	۰/۰۳۸۰	۰/۲۱۴۴	۰/۰۱۹۷	۰/۰۹۸۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۲۲۵۷	۰/۰۳۳۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱

شکل ۱، مقایسه این پنج مدل را بر اساس مقادیر  $RMSE$ ،  $MBE$ ،  $MPE$  و  $R^2$  نشان می‌دهد. به طور کلی هر چه مقدار شاخص‌های خط‌اسنجی، پایین‌تر بوده و میزان شاخص  $R^2$  بالاتر باشد، مدل مربوطه دقیق‌تر و مناسب‌تر است. مدل لی (مدل ۵) در مقایسه با چهار مدل دیگر،  $MBE$ ،  $MPE$  و  $RMSE$  کمتر و  $R^2$  بیشتری دارد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که نسبت به سایر مدل‌ها برآورد دقیق‌تری ارائه می‌دهد. میانگین  $RMSE$ ،  $MBE$ ،  $MPE$  و  $R^2$  برای مدل لی به ترتیب  $۰/۶/۶۵۱۰$ ،  $۰/۰۰۰۵ MJ/m^2$ ،  $۰/۰۵۷۵$  و  $۰/۷۳۹۸$  بدست آمد (جدول ۴). علاوه بر این، مقدار مینیمم  $R^2$  برای مدل لی نیز  $۰/۷۰۲۲$  بدست آمده، این موضوع نیز برتری مدل لی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، از مقایسه مدل‌ها می‌توان به عملکرد مختلف مدل‌های بریستو و کمپیل، چن، هارگریوز و سامانی در مناطق مختلف آب و هوایی پی برد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات  $RMSE$ ،  $MBE$ ،  $MPE$  و  $R^2$  برای مدل لی از سایر مدل‌ها محدودتر است.



شکل ۱- عملکرد آماری پنج مدل در ۱۲ ایستگاه (ایستگاه‌های واقع در منطقه مرطوب: شماره ۱-۳، ایستگاه‌های واقع در منطقه نیمه مرطوب: شماره ۴-۶، ایستگاه‌های واقع در منطقه خشک: شماره ۷-۹ و ایستگاه‌های واقع در منطقه خشک: شماره ۱۰-۱۲)

جدول ۴- مقادیر میانگین شاخص‌های آماری برای پنج مدل در چهار منطقه آب و هوایی.

شاخص آماری	شماره مدل	مرطوب	نیمه مرطوب	نیمه خشک	خشک	کل
RMSE (MJ/m <sup>2</sup> )	۱	۰/۰۷۲۸	۰/۰۷۱۹	۰/۰۶۱۹	۰/۰۵۱۷	۰/۰۶۴۶
	۲	۰/۰۶۷۵	۰/۰۶۷۵	۰/۰۶۵۱	۰/۰۵۱۸	۰/۰۶۳۰
	۳	۰/۰۶۷۸	۰/۰۶۶۸	۰/۰۶۵۶	۰/۰۵۲۰	۰/۰۶۳۰
	۴	۰/۰۶۳۷	۰/۰۶۸۶	۰/۰۶۴۰	۰/۰۵۲۰	۰/۰۶۲۱
	۵	۰/۰۵۹۴	۰/۰۶۳۴	۰/۰۵۹۲	۰/۰۴۷۹	۰/۰۵۷۵
MBE (MJ/m <sup>2</sup> )	۱	۰/۰۵۶۹	۰/۰۱۰۷	-۰/۰۱۱۵	-۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۳۲
	۲	۰/۰۲۲۵	-۰/۰۳۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۵۹۷	۰/۰۰۱۸
	۳	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۶۴۱	۰/۰۲۳۱
	۴	۰/۰۴۳۳	۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۴۳	۰/۰۱۰۴
	۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۵
MPE (%)	۱	۱۶/۱۷۸۰	۶/۴۶۷۳	۵/۲۷۰۷	۲/۵۰۱۰	۷/۶۰۴۲
	۲	۱۲/۲۵۴۰	۴/۹۶۷۳	۵/۷۴۱۱	۲/۵۳۴۷	۶/۳۷۴۳
	۳	۱۰/۳۲۰۰	۶/۳۲۲۳	۷/۱۷۹۴	۲/۵۴۰۰	۶/۵۹۰۴
	۴	۱۲/۸۹۰۶	۷/۲۰۲۰	۶/۵۷۴۰	۳/۰۸۵۵	۷/۴۳۸۸
	۵	۱۱/۱۲۱۱	۷/۹۳۲۳	۵/۹۱۳۰	۲/۶۳۷۷	۶/۶۵۱۰

اگر مقدار *MBE* مثبت باشد، یعنی مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل از مقدار واقعی بیشتر است و اگر مقدار *MBE* منفی باشد، یعنی مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل از مقدار واقعی کمتر است. از مقایسه مقادیر میانگین *MBE* در



## نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی



(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



شکل ۱ (b) در می‌یابیم که مدل‌های (۳) و (۵) بالاتر از حد برآورد داشته‌اند. همچنین، مدل (۲) مقدار تابش خورشیدی کل را برای مناطق مرطوب و نیمه مرطوب کمتر و برای منطق خشک و نیمه خشک بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

مقایسه نتایج این پنج مدل در چهار منطقه آب و هوایی از ایران نشان می‌دهد هر چه از مناطق مرطوب به سمت مناطق خشک حرکت کنیم مدل‌های تجربی بر پایه دما نتایج با درصد خطای کمتری ارائه می‌دهند. همچنین با توجه به مقدار میانگین  $RMSE$ ،  $MBE$ ،  $MPE$  و  $R^2$  در جدول ۴، مدل ۵ نسبت به سایر مدل‌ها، عملکرد دقیق‌تر و قوی‌تری دارد.

### نتیجه‌گیری

داده‌های ۱۲ ایستگاه هواشناسی ایران جمع‌آوری شد. با توجه به اینکه دمای هوا در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود، مدل‌سازی تابش کل خورشیدی مبتنی بر دما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عملکرد مدل‌های بریستو-کمپیل، هارگریوز و تغییر یافته آن به طور قابل توجهی در نقاط مختلف متفاوت است. اما مدل لی در مقایسه با سایر مدل‌ها معتبر ارزیابی شد. مدل لی قادر است برآورد دقیق‌تری از متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه در تمام مناطق آب و هوایی به خصوص در مناطق خشک ایجاد کند. بنابراین، می‌توان از آن برای تخمین متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه بهره گرفت. یکی از محدودیت‌های این مطالعه، این است که مدل‌های مورد استفاده تابعی از محل ایستگاه هواشناسی است. این مسئله ایجاب می‌کند که ضرایب تجربی را نسبت به داده‌های محلی اولیه واسنجی نماییم.

### مراجع

۱. انجوی ارسنجانی، م.، یعقوبی، م. و جعفرپور، خ. ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در چند اقلیم آب و هوایی ایران با استفاده از روش شبکه عصبی"، اولین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی، ۲۹-۳۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۳، تهران.
۲. بی نام، ۱۳۹۳. سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، [www.suna.org.ir](http://www.suna.org.ir)
۳. جعفرپور، خ. و کارشناس، م. ۱۳۸۰. ضریب ابر و کاربرد آن در برآورد تابش انرژی خورشیدی در اقلیم‌های مختلف آب و هوایی ایران. نشریه انرژی ایران، سال ششم، شماره ۱۱، صفحه ۴۵-۵۶.
۴. صفایی، ب.، خلجی اسدی، م.، تقی‌زاده، ح.، جیلای، ا.، طالقانی، گ. و دانش، م. ۱۳۸۳. برآورد انرژی پتانسیل خورشیدی در ایران و تهیه اطلس تابشی آن. نوزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۴-۲ آذرماه ۱۳۸۳، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.



۵. معینی، س.، جوادی، ش.، کوكبی، م. و دهقان منشادی، م. ۱۳۸۹. برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه. نشریه انرژی ایران، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه ۱-۱۰.
6. Abraha, M. G. and Savage, M. J. 2008. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology* 148(3): 401-416.
7. Allen, R.G. 1997. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering* 2(2): 56-67.
8. Ball, R. A., Purcell, L. C., and Carey, S. K. 2004. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. *Agronomy Journal* 96(2): 391-397.
9. Bandyopadhyay, A., Bhadra, A., Raghuwanshi, N.S. and Singh, R. 2008. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. *Agricultural and Forest Meteorology* 148(11): 1707-1718.
10. Bristow, K.L. and Campbell, G.S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 31: 159-166.
11. Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., and Zhao, W. 2004. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management* 45(11-12): 1759-1769.
12. Duffie, J.A. and Beckman, W.A. 2006. *Solar engineering of thermal processes*. 3rd ed., John Wiley & Son, New York.
13. Ghahreman, N. and Bakhtiari, B. 2009. Solar Radiation Estimation from Rainfall and Temperature Data in Arid and Semi-arid Climates of Iran. *DESERT* 14: 141-150.
14. Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., and Riley, J.P. 1985. Irrigation water requirements for Senegal River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 111(3): 265-275.
15. Iziomon, M. G. and Mayer, H. 2002. Assessment of some global solar radiation parameterizations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64(15): 1631-1643.
16. Li, H., Ma, W., Lian, Y., Wang, X., and Zhao, L. 2011. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. *Renewable Energy* 36(11): 3141-3145.
17. Li, H., Cao, F., Wang, X. and Ma, W. 2014. A Temperature-Based Model for Estimating Monthly Average Daily Global Solar Radiation in China. *The Scientific World Journal*, 9 pages.
18. Liu, X., Mei, X., Li, Y., Wang, Q., Jensen, J., Zhang, Y. and Roy Porter, J. 2009. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(9): 1433-1446.
19. Meza, F. and Varas, E. 2000. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 100(2-3): 231-241.
20. Rahimikhoob, A. 2010. Estimating global solar radiation using artificial neural network and air temperature data in a semi-arid environment. *Renewable Energy* 35(9): 2131-2135.
21. Robaa, S. M. 2009. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. *Energy Conversion and Management* 50(1): 184-193.
22. Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126(4): 265-275.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



23. Tabari, H. Hosseinzadeh Talae, P., Mousavi Nadoushani, S.S., Willems, P. and Marchetto, A., 2014. A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. *Quaternary International* 2014: 1-9.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Modeling Daily Solar Radiation Temperature-Based in Four Climate Regions of Iran

### Abstract

Daily solar radiation is an important element in the application of solar energy. Measuring solar radiation requires advanced tools and equipment. Hence, solar radiation measured data are not always available in the all the meteorological stations. Generally it needs to be estimated by empirical models based on frequently available meteorological records such as hours of sunshine or temperature. This paper models daily solar radiation based on the difference between maximum and minimum temperatures. With statistical error tests, the performance of the models is validated by comparing together against the measured data at 12 meteorological stations in Iran located in four region climate humid, semi-humid, semi-arid and arid. Results show that the models are more accurate in the arid regions as compared to humid regions. Hence, these models can be recommended for estimating daily solar radiation in arid regions where only air temperature data are available in Iran.

**Keywords:** air temperature, climate region, daily solar radiation, empirical models, Iran.