ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران

خدیجه فرجی مهیاری [۱]، مجید خانعلی [۲]، زهرا فرجی مهیاری [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۹/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۲/۱۴

چکیده:

تابش خورشیدی روزانه یکی از پارامترهای مهم در زمینه کاربرد انرژی خورشیدی می‌باشد. اندازه‌گیری تابش خورشیدی نیازمند ابزار و تجهیزات پیشرفته است. همچنین داده‌های اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی در کل ایام سال و برای بازه طولانی در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی کشور موجود نمی‌باشد. یک روش معمول برای تخمین میزان تابش روزانه خورشید، استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی‌بر ساعات آفتابی می‌باشد. داده‌های هواشناسی مانند دمای هوا همیشه در دسترس هستند. از این‌رو، در این مطالعه، عملکرد پنج مدل تجربی تخمین میزان تابش خورشیدی روزانه مبتنی‌بر تفاوت بین حداکثر و حداقل دمای روزانه (مدل‌های بریستو- کمپبل، هارگریوز، سامانی، لی و چن) ارزیابی شد. 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 و 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 می‌باشد، توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی:

ایران، تابش خورشیدی روزانه، دمای هوا، مدل تجربی، مناطق آب و هوایی

۱) مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یادگار امام

۲) استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس‌کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) khanali@ut.ac.ir

۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس‌کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری است که علاوه بر تامین بخشی از انرژی مورد نیاز، دارای آلودگی کمتر و دسترسی آسان می‌باشند. 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 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 به دست می‌آید که دقیق‌ترین آن با استفاده از اندازه‌گیری می‌باشد. از آنجا که اطلاعات اندازه‌گیری شده در بسیاری از نقاط از جمله در بسیاری از مناطق ایران در دسترس نمی‌باشد، 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 ازقبیل ساعت آفتابی، رطوبت نسبی و یا دمای حداقل و حداکثر هوا پایه گذاری 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 می‌باشند. به طور کلی، مدل‌های مبتنی بر مدت تابش آفتاب در مقایسه با مدل‌هایی که از سایر داده‌های هواشناسی استفاده می‌کنند، دقیق‌تر هستند [۱۵،۱۱]. اما از آنجایی که در ایستگاه‌های هواشناسی استاندارد، داده‌های دمای هوا قابل دسترس‌ترند، مدل‌های مبتنی بر دما جایگزین مناسبی برای برآورد تابش خورشیدی هستند [۶،۲۰].

معمولا از دو روش هارگریوز (Hargreaves) [۱۴] و بریستو- کمپبل (Bristow-Campbell) [۱۰] برای برآورد تابش خورشیدی به کمک دمای هوا استفاده می‌شود. از زمان ایجاد این دو مدل، تحقیقات بسیاری برای افزایش دقت آنها انجام شده است که توسط لیو (Liu) و همکاران به تفصیل شرح داده شده است [۱۸]. به طور کلی، از مدل هارگریوز برای محاسبه تابش خورشیدی ماهانه استفاده می‌شود [۷]. اگر چه در برخی از مطالعات، عملکرد مدل بریستو- کمپبل در محاسبه تابش خورشیدی روزانه بهتر ارزیابی شده است [۱۸]، اما مدل بریستو- کمپبل در برآورد متوسط ماهانه تابش خورشیدی به خوبی مدل هارگریوز عمل نمی‌کند [۱۹،۹]. با این حال، عملکرد مدل هارگریوز و مدل‌های اصلاح شده آن در نواحی مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است [۱۶]. بنابراین، استفاده از این مدل در کشورهای بزرگی که دارای تنوع آب و هوایی و جغرافیایی هستند با محدودیت مواجه است. لی و همکاران با استفاده از داده‌های ۶۵ ایستگاه هواشناسی چین، یک مدل جدید که اصلاح‌شده مدل هارگریوز و سامانی می‌باشد، برای برآورد متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی

روزانه ارائه دادند [۱۶]. نتایج نشان داد مدل جدید لی در مقایسه با مدل هارگریوز و سامانی در همه مناطق آب و هوایی به خصوص در مناطق خشک عملکرد دقیق‌تری دارد.

در ایران، جعفرپور و کارشناس با تقسیم‌بندی اقلیمی-تابشی مناطق مختلف ایران، روابطی برای محاسبه تابش در شهرهای مختلف ایران ارائه دادند [۳]. معینی و همکاران 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 به دست آوردند [۵]. انجوی و همکاران نیز در مناطقی شامل نواحی مرکزی و جنوبی ایران از شبکه عصبی برای مدلسازی تابش خورشیدی بهره گرفته‌اند [۱]. صفایی و همکاران از داده‌های تابش‌سنجی ۹ ایستگاه هواشناسی برای انتخاب مدل مناسب استفاده کرده‌اند [۴]. 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 به دست آوردند و در نهایت مدل هیبرید را به دلیل دارا بودن بهترین برازش انتخاب کردند. قهرمان و بختیاری از هشت مدل تجربی مبتنی بر دمای هوا و بارش روزانه برای برآورد تابش خورشیدی روزانه در ۶ ایستگاه هواشناسی ایران شامل مشهد، تبریز، اصفهان، کرمان، همدان و زنجان استفاده کردند[۱۳]. 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 بخوبی برآورد کند. در این مطالعه، عملکرد پنج مدل مبتنی بر دمای هوا برای برآورد تابش خورشیدی روزانه (مدل‌های بریستو- کمپبل، هارگریوز، سامانی، لی و چن) در ۱۲ ایستگاه هواشناسی ایران ارزیابی می‌شود. ایستگاه‌های مورد نظر از چهار منطقه آب و هوایی مرطوب، نیمه مرطوب، نیمه خشک وخشک انتخاب می‌شوند. در نهایت، با توجه به آزمون آماری خطا، مناسب‌ترین مدل 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 را عدل در سال ۱۳۳۹، جوادی در سال ۱۳۴۴ و ثابتی در سال ۱۳۴۸ انجام داده‌اند که هر یک برای انجام مطالعات

خاصی کاربرد دارند [۱]. در پژوهش حاضر از اقلیم‌بندی مکانی و زمانی ارائه شده توسط طبری و همکاران استفاده شده است که ایران را به کمک شاخص خشکی دومارتن و شاخص ترکیبی پینا به ۸ اقلیم آب و هوایی تقسیم کرده‌اند[۲۳]. 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},°C) و حداقل دمای روزانه (T_{min},°C) بدست آمده از ۱۲ ایستگاه هواشناسی (سال ۲۰۰۷ میلادی) می‌باشد که از سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) تهیه شده است [۲]. این ایستگاه‌ها، چهار منطقه آب و هوایی مذکور و طیف وسیعی از طول وعرض جغرافیایی با اختلاف دمای سالانه بین °C ۶/۰۸ و °C ۲۹/۸۶ 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 (°N)	طول جغرافیایی (°E)	میانگین دامنه تغییرات دما (°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

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 (ΔT) و میانگین دمای روزانه (T_{ave}) تخمین زده می‌شود. در این مقاله، H_0 بر اساس روش دفیو و بکمن محاسبه می‌شود [۱۲].

$$H_0 = \frac{24\times 3600}{\pi} I_{sc}\left(1+0.033\cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right)\left(\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s + \frac{\pi}{180}\omega_s\sin\varphi\sin\delta\right) \quad (۱)$$

ثابت خورشیدی، I_{sc}، معادل ۱۳۶۷ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. φ عرض جغرافیایی محل مورد نظر، δ زاویه میل خورشیدی نسبت به استوا می‌باشد که مقدار آن را می‌توان از رابطه (۲) بر حسب درجه محاسبه نمود.

$$\delta = 23.45\sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (۲)$$

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

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (۳)$$

ضرایب تجربی مدل‌های مورد استفاده به ترتیب با داده‌های اندازه‌گیری شده H، T_{max}، و T_{min} (در عبارات ΔT و T_{ave}) و H_0 محاسبه و واسنجی شدند.

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (۴)$$

$$T_{ave} = \frac{(T_{max}+T_{min})}{2} \quad (۵)$$

مدل (۱) را بریستو و کمپبل در سال ۱۹۸۴ ارائه کردند که یک رابطه غیر خطی برای برآورد تابش خورشیدی بر اساس تابش خورشیدی فرازمینی و دامنه تغییرات روزانه دما می‌باشد [۱۰]. چن و همکاران نیز در سال ۲۰۰۴ مدل (۲) را پیشنهاد نمودند[۱۱]. هارگریوز و همکاران در سال 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 [۱۴]. این مدل نیز مقدار تابش خورشیدی را با استفاده از مقادیر تابش خورشیدی فرازمینی و دامنه تغییرات روزانه دما محاسبه می‌کند. سامانی در سال۲۰۰۰ مدل هارگریوز را با کمی تغییرات به صورت مدل (۴) ارئه نمود [۲۲]. لی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۴، روش هارگریوز و سامانی در برآورد تابش کل خورشیدی را اصلاح و مدل (۵) را ارائه کردند [۱۶]. 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.

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

شماره مدل	نام مدل	ضرایب	مدل تجربی
(۱)	بریستو و کمپبل (۱۹۸۴)	a1 و b1 و c1	$H/H_0 = a1\left(1-\exp\left(-b1\Delta T^{c1}\right)\right)$
(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	$H/H_0 = \left(a4 + b4\Delta T + c4\Delta T^2\right)\Delta T^{0.5}$
(۵)	لی و همکاران (۲۰۱۴)	a5 و b5 و c5	$H/H_0 = a5 + \left(b5 + c5T_{ave}\right)\Delta T^{0.5}$

شاخص‌های خطاسنجی

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 [۱۷ و ۲۱] و به شرح زیر می‌باشند:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,p} - H_{i,m}\right)^2 / N} \quad (۶)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,p} - H_{i,m}\right) / N \quad (۷)$$

$$MPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(H_{i,p} - H_{i,m}\right)}{H_{i,m}} \times 100 \quad (۸)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,m} - H_{i,p}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,m} - H_{m,ave}\right)^2} \quad (۹)$$

در روابط فوق، N، تعداد کل مشاهدات، اندیس i، i امین مقدار تابش خورشیدی کل و اندیس p و m، به ترتیب به مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی کل اشاره دارند. $H_{m,ave}$ مقدار میانگین تابش خورشیدی کل اندازه‌گیری شده است. فرایند تعیین شاخص‌های آماری مدل‌های مذکور در نرم‌افزار Matlab R2014a انجام شده است.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای پنج مدل تجربی بریستو- 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. در ضمن با وجود وابستگی مدل‌ها به ایستگاه هواشناسی، لازم است از داده‌های اندازه‌گیری شده H برای تعیین ضرایب استفاده کنیم، زیرا این کار باعث ساده‌تر شدن محاسبات و دقیق‌تر شدن پیش‌بینی‌ها می‌شود [۸]. شکل (۱) مقایسه این پنج مدل را بر اساس مقادیر MPE، MBE، RMSE، و R^2 نشان می‌دهد.

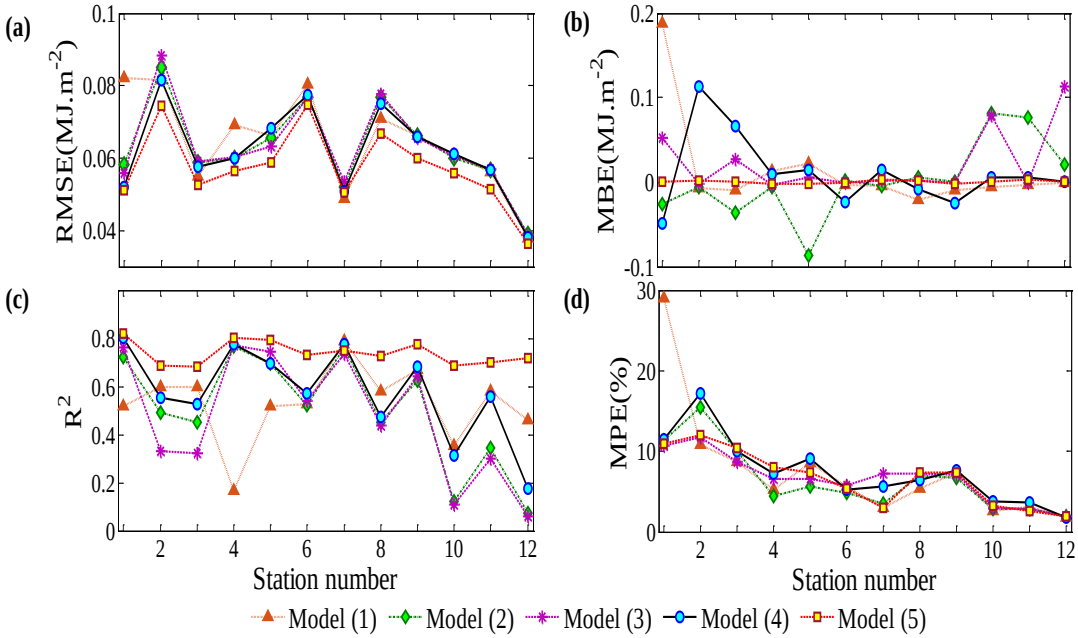
به طور کلی، هر چه مقدار شاخص‌های خطاسنجی، پایین‌تر و میزان شاخص R^2 بالاتر باشد، مدل مربوطه دقیق‌تر و مناسب‌تر است. مدل لی (مدل ۵) در مقایسه با چهار مدل دیگر، MPE، MBE و RMSE کمتر و R^2 بیشتری دارد و می‌توان نتیجه گرفت که نسبت به سایر مدل‌ها برآورد دقیق‌تری ارائه می‌دهد. میانگین MPE، MBE، RMSE، و R^2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

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

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	مدل ۱			مدل ۲		مدل ۳		مدل ۴			مدل ۵		
		a1	b1	c1	a2	b2	a3	b3	a4	b4	c4	a5	b5	c5
۱	ایلخچی	۹۲/۳۶۴۶	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	۰/۳۶۲۲	۰/۰۷۰۷	۰/۱۲۰۰	۰/۰۴۱۰	۰/۱۴۸۳	۰/۰۲۵۵	۰/۱۱۱۰	۰/۰۸۱۴	۰/۰۱۵۳	-۰/۰۰۱۱	۰/۱۰۴۸	-۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۵۱
۳	سنار	۰/۲۷۶۰	۰/۰۷۵۹	۲/۱۷۳۷	۰/۰۷۰۷	۰/۰۹۱۶	۰/۰۷۷۷	۰/۰۶۲۰	۰/۰۸۰۳	۰/۰۰۷۳	-۰/۰۰۰۶	۰/۰۶۵۷	۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۳۶
۴	شورجه	۴/۰۷۰۹	۰/۰۵۲۱	۰/۱۹۹۸	-۰/۲۹۳۸	۰/۲۶۹۸	-۰/۲۸۲۳	۰/۱۹۰۳	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۳۶	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۹۰۰	۰/۰۹۲۲	۰/۰۰۲۵
۵	جرندق	۳/۴۲۶۹	۰/۰۳۰۲	۰/۵۱۵۶	-۰/۲۲۱۷	۰/۲۳۸۲	-۰/۲۴۲۳	۰/۱۷۷۴	۰/۰۵۰۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۳۱۸	۰/۰۶۹۲	۰/۰۰۲۸
۶	سلطانیه	۰/۶۰۴۸	۰/۰۹۵۶	۰/۹۵۴۶	-۰/۰۹۲۰	۰/۱۹۳۸	-۰/۰۴۲۳	۰/۱۲۲۱	۰/۰۵۶۱	۰/۰۰۸۱	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۹۸۶	۰/۰۵۲۰	۰/۰۰۳۰
۷	مرودشت	۰/۳۷۸۹	۰/۰۰۱۰	۳/۲۰۱۶	-۰/۲۹۵۵	۰/۲۴۹۶	-۰/۲۲۰۵	۰/۱۵۴۳	-۰/۰۴۸۲	۰/۰۲۱۱	-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۱۰۶	۰/۰۶۶۶	۰/۰۰۱۷
۸	بجنورد	۰/۳۷۹۴	۰/۰۰۹۳	۲/۸۵۰۷	-۰/۰۲۵۸	۰/۱۷۵۱	-۰/۰۵۵۲	۰/۱۳۶۹	۰/۰۵۴۴	۰/۰۱۴۸	-۰/۰۰۰۸	۰/۱۴۴۹	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۴۱
۹	کبودراهنگ	۰/۴۴۵۱	۰/۰۱۸۰	۱/۶۶۵۰	-۰/۲۱۶۵	۰/۲۰۸۶	-۰/۱۷۷۱	۰/۱۳۶۰	-۰/۰۰۶۱	۰/۰۱۲۵	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۶۸۰	۰/۰۸۳۶	۰/۰۰۱۹
۱۰	ورزنه	۰/۳۶۸۷	۰/۰۰۰۸	۳/۴۴۹۹	۰/۱۱۲۳	۰/۰۹۲۹	۰/۱۶۷۶	۰/۰۵۰۲	۰/۰۴۱۶	۰/۰۱۰۲	-۰/۰۰۰۴	۰/۱۵۴۵	۰/۰۱۶۳	۰/۰۰۲۱
۱۱	رفسنجان	۰/۳۷۸۵	۰/۰۰۰۱	۴/۲۸۵۵	-۰/۱۱۷۲	۰/۱۸۱۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۹۵۵	-۰/۰۷۹۳	۰/۰۲۶۷	-۰/۰۰۱۰	۰/۰۷۲۲	۰/۰۳۶۳	۰/۰۰۲۲
۱۲	دهک	۰/۲۸۹۶	۰/۰۰۳۲	۳/۳۷۷۸	۰/۱۸۹۲	۰/۰۳۸۰	۰/۲۱۴۴	۰/۰۱۹۷	۰/۰۹۸۶	۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۱	۰/۲۲۵۷	-۰/۰۳۳۳	۰/۰۰۲۱

اگر مقدار MBE مثبت باشد، یعنی مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل از مقدار واقعی بیشتر است و اگر مقـدار MBE منفی باشد، یعنی مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل از مقدار واقعی کمتر است. از مقایسه مقادیر میـانگین MBE در شـکل (۱) (b) در می‌یابیم که مدل‌های (۳) و (۵) بالاتر از حد برآورد داشته‌اند. همچنین مدل (۲) مقدار تـابش خورشـیدی کـل را برای مناطق مرطوب و نیمه مرطوب کمتر و برای منطق خشک و نیمه خشک بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

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



شکل ۱) عملکرد آماری پنج مدل در ۱۲ ایستگاه (ایستگاه‌های واقع در منطقه مرطوب: شماره ۳-۱، ایستگاه‌های واقع در منطقه نیمه مرطوب: شماره ٦-٤، ایستگاه‌های واقع در منطقه نیمه خشک: شماره ۹-۷ و ایستگاه‌های واقع در منطقه خشک: شماره ۱۲-۱۰)

جدول ٤) 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^2)	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	۰/۶۶۸	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^2)	۱	۰/۰۵۶۹	۰/۰۱۰۷	−۰/۰۱۱۵	−۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۳۲
	۲	۰/۰۲۲۵	−۰/۰۳۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۵۹۷	۰/۰۰۱۸
	۳	۰/۰۲۶۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۶۴۱	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

نتیجه‌گیری

داده‌های مربوط به چهار منطقه اقلیمی ایران شامل ۱۲ ایستگاه هواشناسی جمع‌آوری شد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری دمای هوا نسبت به سایر داده‌های هواشناسی آسان‌تر است و در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی ایران نیز اندازه‌گیری می‌شود، مدل‌سازی تابش کل خورشیدی مبتنی بر دما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عملکرد مدل‌های بریستو- کمپبل، چن، هارگریوز و تغییر یافته آن به طور قابل توجهی در نقاط مختلف متفاوت است. اما در این بین، با توجه به شاخص‌های خطاسنجی آماری، 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 بخصوص در مناطق خشک ایجاد کند. بنابراین، می‌توان از آن برای تخمین متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه بهره گرفت. البته یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر، این

است که مدل‌های مورد استفاده تابعی از محل ایستگاه هواشناسی است. این مساله ایجاب می‌کند ضرایب تجربی را نسبت به داده‌های محلی اولیه واسنجی نماییم.

منابع

[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، ۳۰-۲۹ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۳، تهران.

[۲] بی نام، ۱۳۹۳. "سازمان انرژی های نو ایران (سانا)" ، 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 هوائی ایران"، نشریه انرژی ایران، سال ششم، شماره ۱۱، صفحه ۴۵-۵۶.

[۴] صفایی، ب.، خلجی اسدی، م.، تقی‌زاده، ح.، جیلاوی، 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.، کوکبی، 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, vol.148, no.3, pp. 401–416.

[7] Allen, R.G., 1997, "*Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature*", Journal of Hydrologic Engineering, vol.2, no.2, pp. 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, vol.96, no.2, pp. 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, vol.148, no.11, pp. 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, vol.31, pp. 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, vol.45, no.11-12, pp. 1759–1769.

[12] M. J. Lighthill,1953. Theoretical considerations on free convection in tubes,Quarterly Journal of Applied Mathematics. 398-439.

[13] Runsheng Tang , Wenfeng Gao, Yamei Yu, Hua Chen. 2009. Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors. Energy 34 (2009) 1387–1395.

[14] Shah, L.J., Furbo, S., 2004. Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions. Applied Energy 78, 371–395.

[15] Shah, L.J., Furbo, S., 2007. Theoretical flow investigations of an all glass evacuated tubular collector. Solar Energy 81, 822–828.

[16] Zhiyong Li , Chao Chen, Hailiang Luo, Ye Zhang, Yaning Xue,2010. All-glass vacuum tube collector heat transfer model used in forced-circulation solar water heating system. Solar Energy 84 ,1413.1421.