نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۹۶ – ۸۳

۰۴ تعیین مدل بهینه در محاسبه برآورد تابش کلی خورشیدی دریافتی توسط زمین در شهرستان بجنورد

[۱] یاسر نوری*، [۲] علیرضا تیمورتاش، [۳] بهروز ظفرمند

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵ / ۰۹ / ۰۷

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸ / ۰۱ / ۱۴

کلمات کلیدی:
تابش کل خورشیدی، معادلات رگرسیونی، مدل آنگستروم، ساعات آفتابی، میانگین خطای بایاس، جذر میانگین مربعات خطا

چکیده

یکی از مهمترین پارامترها در برنامه‌ریزی‌های مختلف هواشناسی، کشاورزی، آب‌شناسی، معماری، انرژی و... برآورد مقدار تابش خورشیدی است. در این تحقیق به دنبال یافتن مدل مناسبی برای برآورد شدت تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین هستیم که به کمک آن بتوان در مناطقی که داده‌های مقدار کل تابش خورشیدی موجود نیست، مقدار میانگین کل تابش روزانه خورشیدی را تعیین نمود. اغلب مطالعات قبلی برای برآورد تابش خورشیدی از معادلات رگرسیونی و یا مدل آنگستروم استفاده نموده‌اند. در این تحقیق برای برآورد میزان تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین از یک مدل بهینه با استفاده از پارامتر ساعات آفتابی استفاده شده است. مدل بهینه به دست آمده تلفیقی از رابطه آنگستروم و روش رگرسیون خطی بوده و اطلاعات مربوط به پارامتر ساعات آفتابی و همچنین مقدار میانگین ماهیانه تابش دریافتی سطح زمین از داده‌های پانزده ساله (۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ میلادی) ایستگاه هواشناسی بجنورد به دست آمده‌اند. نتایج به دست آمده با مدل‌های دیگر و به کمک شاخص‌های میانگین خطای بایاس (MBE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل تحقیق اخیر در مقایسه با دیگر مدل‌های موجود از دقت بالا و خطای کمتری برخوردار می‌باشد.

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی مشهد، (نویسنده مسئول) noori.yaser@gmail.com
۲. استاد گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد teymourtash@um.ac.ir
۳. استادیار مجتمع آموزشی پژوهشی صنعت آب و برق خراسان، مشهد br.zafarmand@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

۱. مقدمه

تابش خورشیدی یکی از عناصر هواشناسی است که از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده و بر فرآیندهای گوناگونی همانند کشاورزی، معماری، انرژی و همچنین فرآیندهای آب و خاک مانند تبخیر و تعرق، ذوب برف و رشد گیاهان اثر می‌گذارد. تابش خورشیدی یکی از پاک‌ترین و از لحاظ اقتصادی یکی از باصرفه‌ترین منابع انرژی است. برآورد صحیح مقدار تابش خورشیدی در طراحی و محاسبه اصول برنامه‌ریزی انرژی، کشاورزی، معماری و... بسیار حائز اهمیت است. همچنین به منظور ایجاد سایت‌های خورشیدی، تعیین مقدار دقیق شدت تابش خورشیدی بسیار حیاتی و ضروری است. کشور ایران دارای پتانسیل بالایی از نظر ساعات آفتابی به عنوان مهمترین عامل تعیین‌کننده مقدار تابش خورشیدی دارد.

یکی از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی استفاده از پیرانومتر (تشعشع‌سنج) خورشیدی است که استفاده از آن در بسیاری از نقاط به علت فقدان امکانات و همچنین هزینه بالا امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین محققان مختلفی برای برآورد مقدار تابش خورشیدی در نقاطی که پیرانومتر وجود ندارد، مطالعات و تلاش‌های فراوانی نموده‌اند. بدیهی است که تخمین غیرصحیح مقدار تابش خورشیدی منجر به بروز خطا و مشکلات فراوانی در پروژه‌های مختلف وابسته به تابش خورشیدی از جمله سایت‌های خورشیدی می‌گردد. در نتیجه بار دیگر اهمیت تعیین مقدار صحیح تابش اثبات می‌گردد. بسیاری از محققان مدل‌های تجربی خود را با استفاده از پارامترهای مختلفی همچون ساعات آفتابی، عرض جغرافیایی، رطوبت نسبی، دما، ارتفاع و... ارائه نموده‌اند. نخستین بار آنگستروم [۱۰] با به کارگیری پارامترهای هواشناسی مانند ساعات آفتابی، مدل ساده‌ای برای تخمین مقدار تابش خورشیدی به سطح زمین ارائه نمود. محققان دیگری پس از آنگستروم مطالعات و اقدامات فراوانی در بهبود و تصحیح مدل آنگستروم انجام دادند. مدل آنگستروم توسط پرسکات [۱۷] و بعدها توسط پیج [۱۶] اصلاح گردید. لاف و همکارانش [۱۵] توزیع تابش خورشیدی در سطح جهان را ارائه نمودند.

در ایران مطالعات فراوانی در زمینه برآورد تابش خورشیدی صورت گرفته است. دانشیار [۱۲] با استفاده از مدل پالتریج میزان تابش خورشیدی را برای تهران و نقاط مختلف ایران تخمین زد. جعفرپور و یعقوبی [۱۴] از چهار مدل مختلف برای تخمین میزان تابش ماهانه و سالانه در شیراز استفاده

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

نمودند. اشجایی [۱۱] با استفاده از دو مدل دانشیار و برد هولستروم توانست میزان انرژی خورشیدی را برای چند منطقه خاص ایران پیش‌بینی کند. صمیمی [۱۹] مدلی برای پیش‌بینی تابش خورشیدی در شهرهای ایران بر حسب ارتفاع ارائه داد. وی بیشترین وابستگی تابش را به ارتفاع می‌داند. سبزی‌پرور [۱۸] از ساعات آفتابی، ضریب ابر، رطوبت نسبی و میانگین ماکزیمم دما استفاده و با قرار دادن این پارامترها در مدل‌های تجربی مختلف توانست میزان میانگین روزانه انرژی خورشیدی را برای شهرهای مختلف ایران محاسبه نماید. صفاری پور و مهرابیان [۳] با توجه به داده‌های تجربی، بعضی مدل‌های محققان را برای شرایط آب و هوایی ایران کالیبره نمودند. آنها همچنین با به کارگیری روش رگرسیون مرکب، تأثیر همزمان عوامل هندسی، جغرافیایی، نجومی و هواشناسی را بر میزان تابش خورشیدی در شهر یزد مورد بررسی قرار دادند و با ارائه یک مدل هفت پارامتری، شدت تابش کلی روزانه را پیش‌بینی نمودند [۴]. آنها در پژوهشی دیگر به بررسی اثر عوامل نجومی، هندسی، جغرافیایی و هواشناسی بر میزان تابش کل خورشیدی روزانه دریافتی در یک سطح افقی در شهر کرمان پرداختند [۵]. معینی و همکارانش [۸] با استفاده از داده‌های تابشی ثبت شده توسط ایستگاه‌های پیرانومتری و میزان ساعات آفتابی که از سازمان هواشناسی دریافت شده است، همچنین محاسبه طول روز و تابش فراجو، رابطه رگرسیونی تابش کل بر حسب ساعات آفتابی برای مناطق اقلیمی ایران را ارائه نمودند. مجرد و همکارانش [۷] با استفاده از مدل بهینه شده برد و هولستروم با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه، تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین را برآورد نمودند. یزدان‌پناه و همکارانش [۹] به برآورد تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین در اصفهان پرداخته و نتایج خود را با دیگر مدل‌ها مقایسه نمودند. زمانی محی‌آبادی [۲] به کمک روش شبکه عصبی به پیش‌بینی لحظه‌ای تابش کل خورشید در شهر رفسنجان پرداخت. فرجی مهیاری و همکارانش [۶] مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران را ارزیابی نمودند. جهانگیر و سلطانی [۱] الگوهای محاسباتی انرژی تابشی خورشید را با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه نمودند.

۲. روش تحقیق، استخراج داده‌ها و معادلات حاکم

میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو زمین ($\overline{H}_0$) تابع پارامترهای مختلفی همچون عرض جغرافیایی، روز سال و زاویه میل خورشید می‌باشد. با عبور تابش خورشید از جو، به دلیل

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

پدیده‌های پخش و جذب اتمسفری، بخار آب و سایر گازهـای موجـود در هـوا، ذرات کوچـک و معلـق موجود در هوا، ابرها و...، بخشی از تابش خورشید مستهلک می‌شود. پارامترهای مختلفی برای مدلسازی مقدار تابش خورشیدی وجود دارد. طبق رابطه آنگسترام [۱۰]، مهمترین این پارامترها ساعات آفتـابی و طول روز می‌باشند. رابطه آنگسترام به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق $\bar{H}$ مقدار میانگین ماهیانه شـدت تشعشـع خورشـیدی دریـافتی سـطح زمـین و $\bar{H}_0$ میانگین ماهیانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو و $\frac{n}{N}$ نسبت ساعات آفتابی به طول روز است.

میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو را می‌توان به کمک رابطه زیر تعیین نمود [۱۳]:

$$\bar{H}_0 = \frac{24\times3600\, G_{SC}}{\pi}\left(1 + 0.033\, Cos\, \frac{360\, n}{365}\right).\left(Cos\emptyset\, Cos\delta\, Sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180}\, Sin\emptyset\, Sin\delta\right) \qquad (۲)$$

در رابطه فوق $\bar{H}_0$ میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو بر روی یک سطح افقـی بـر حسب $\frac{Mj}{m^2-day}$، $\emptyset$ عرض جغرافیایی منطقه، $G_{SC} = 1353\,\frac{W}{m^2}$ ثابت خورشید، n شماره روز سـال، δ زاویه میل خورشید و ω_s زاویه ساعت طلوع و غروب خورشید است. زاویه میل خورشید را مـی‌تـوان از رابطه زیر محاسبه نمود [۱۳]:

$$\delta = 23.45\, Sin\left(360\,\frac{284+n}{365}\right) \qquad (۳)$$

در رابطه فوق δ زاویه میل خورشید و n شماره روز سال می‌باشد که طبق جدول زیر تعیین می‌گردد.

جدول ۱. شماره روزهای سال

Month	n for ith Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	n	δ
January	i	17	17	−20.9
February	$31+i$	16	47	−13.0
March	$59+i$	16	75	−2.4
April	$90+i$	15	105	9.4
May	$120+i$	15	135	18.8
June	$151+i$	11	162	23.1
July	$181+i$	17	198	21.2
August	$212+i$	16	228	13.5
September	$243+i$	15	258	2.2
October	$273+i$	15	288	−9.6
November	$304+i$	14	318	−18.9
December	$334+i$	10	344	−23.0

[a]From Klein (1977). Do not use for $|\phi| > 66.5°$.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

برای محاسبه ω_s از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۱۳]:

$$\omega_s = Cos^{-1}\left(-tan\emptyset\, tan\delta\right) \quad (۴)$$

در رابطه فوق $\emptyset$ عرض جغرافیایی منطقه و δ زاویه میل خورشید است.

برای محاسبه طول روز از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۱۳] :

$$N = \frac{2}{15}\omega_s = \frac{2}{15}Cos^{-1}\left(-tan\emptyset\, tan\delta\right) \quad (۵)$$

داده‌های مربوط به پارامتر ساعات آفتابی و مقدار میانگین ماهیانه تابش دریافتی سطح زمین از اطلاعات پانزده ساله (۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ میلادی) ایستگاه هواشناسی شهرستان بجنورد با مشخصات جغرافیایی زیر استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۲. مشخصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی بجنورد

طول جغرافیایی (درجه- دقیقه- ثانیه)	عرض جغرافیایی (درجه- دقیقه- ثانیه)	ارتفاع (متر)
57°18'10.95"E	37°29'16.21"N	1068

مأخذ: نتایج تحقیق

۳. روش رگرسیون خطی

اگر بخواهیم واژه رگرسیون[1] را از لحاظ لغوی تعریف نماییم، این واژه در فرهنگ لغت به معنی پسروی، برگشت و بازگشت است. اما اگر آن را از دید آمار و ریاضیات تعریف کنیم اغلب جهت رساندن مفهوم "بازگشت به یک مقدار متوسط یا میانگین" به کار می‌رود. بدین معنی که برخی پدیده‌ها به مرور زمان از نظر کمی به طرف یک مقدار متوسط میل می‌کنند. در حقیقت تحلیل رگرسیونی فن و تکنیکی آماری برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیرها است. رگرسیون تقریباً در هر زمینه‌ای از جمله مهندسی، فیزیک، اقتصاد، مدیریت، علوم زیستی، بیولوژی و علوم اجتماعی برای برآورد و پیش‌بینی مورد نیاز است. می‌توان گفت تحلیل رگرسیونی، پرکاربردترین روش در بین تکنیک‌های آماری است. شمایی کلی و خلاصه شده از یک تحلیل رگرسیونی ساده به صورت زیر می‌باشد:

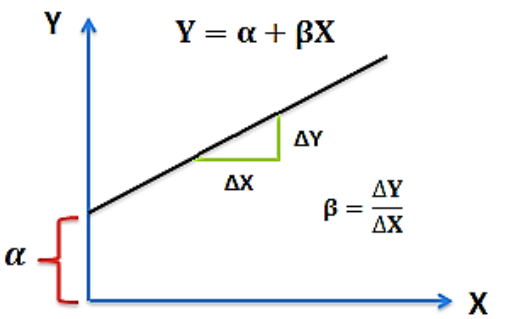
1. Regression

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

در ابتدا تحلیل‌گر حدس می‌زند که بین دو متغیر نوعی ارتباط وجود دارد، در حقیقت حدس می‌زند که یک رابطه به شکل یک خط بین دو متغیر وجود دارد و سپس به جمع‌آوری اطلاعات کمی از دو متغیر می‌پردازد و این داده‌ها را به صورت نقاطی در یک نمودار دو بعدی رسم می‌کند. در صورتی که نمودار نشان‌دهنده این باشد که داده‌ها تقریباً (نه لزوماً دقیق) در امتداد یک خط مستقیم پراکنده شده‌اند، حدس تحلیل‌گر تأیید شده و این ارتباط خطی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$y = \alpha + \beta x \qquad (۶)$$

که در آن α عرض از مبدأ و β شیب این خط است.



نمودار ۱. خط رگرسیونی

بین برخی از نقاط و تصویر آنها بر روی خط رگرسیونی (خط Y) کمی تفاوت به چشم می‌خورد که از آن به عنوان خطای برآورد یاد می‌کنیم. این خطا ممکن است از خطا در اندازه‌گیری، شرایط محیط، تفاوت‌های طبیعی و... ناشی شده باشد. بنابراین معادله اولیه را به صورت زیر اصلاح می‌کنیم:

$$y = \alpha + \beta x + \epsilon \qquad (۷)$$

معادله بالا یک مدل رگرسیون خطی نامیده می‌شود. معمولاً به x متغیر مستقل (رگرسیونی) و به y متغیر وابسته (پاسخ) گفته می‌شود. در رابطه فوق ϵ خطای تصادفی است که برای کامل شدن مدل و نشان دادن این که خطا نیز تا حدی وجود دارد در نظر گرفته می‌شود.

معمولاً فرض می‌شود که:

۱. خطاها یکدیگر را خنثی می‌کنند، به عبارت دیگر مجموع خطاها برابر صفر است.

۲. خطای موجود در یک مشاهده، رابطه‌ای با خطاهای دیگر ندارد.

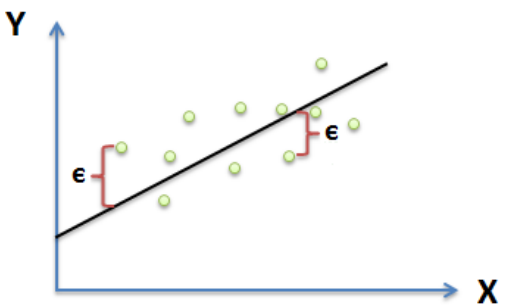
۳. تغییرات بین خطاها ثابت در نظر گرفته می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

این سه فرض برای ساختن یک مدل ضروری است و روش‌های بسیاری برای پی بردن به وجود (یا عدم برقراری) این فرض‌ها وجود دارد. یکی از دلایل استفاده‌های نادرست از رگرسیون معمولاً نادیده گرفتن این فرض‌ها است که موجب استدلال‌های غلط خواهد شد. در صورتی که در مدل رگرسیونی فقط یک متغیر مستقل وجود داشته باشد، مدل را مدل رگرسیونی خطی ساده می‌نامند.

تا این مرحله مدل رگرسیونی معرفی شده و کافی است پارامترهای مجهول مدل (در اینجا α و β) برآورد شوند. برآورد پارامترها در مدل‌سازی با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله روش کمترین مربع خطا انجام می‌شود.

روش کمترین مربع خطا که یکی از روش‌های مورد استفاده در تحلیل رگرسیونی است اولین بار توسط لژندر[1] ریاضیدان فرانسوی در سال ۱۸۰۵ و گوس[2] ریاضیدان مشهور آلمانی در سال ۱۸۰۹ معرفی و در مطالعات نجومی به کار برده شد. خطا عبارت است از فاصله عمودی بین مقدار واقعی برازش شده و مقداری که برای آن از خط برازش داده شده به دست می‌آید.



نمودار ۲. خطا در رگرسیون خطی

برای هر مجموعه‌ای از مشاهدات آماری، خطوط مختلف دارای مجموع مربعات خطای متفاوتی ($\sum \epsilon_i^2$) خواهند بود. بهترین خط برازش داده شده آنچنان خطی است که در آن مجموع مربعات خطا ($\sum \epsilon_i^2$) دارای کمترین مقدار باشد. این خط به نام خط کمترین مربعات نامیده می‌شود. برای محاسبه پارامترهای مجهول α و β مربوط به خط کمترین مربعات نمادهای زیر را معرفی می‌کنیم:

1. Legendre
2. Gauss

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2 \quad (۸)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^{n} y_i)^2 \quad (۹)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^{n} x_i)(\sum_{i=1}^{n} y_i) \quad (۱۰)$$

با مفروض بودن داده‌های نمونه‌ای، ضرایب خط کمترین مربعات $\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x$ عبارتند از:

$$\hat{\beta} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (۱۱)$$

و

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}.\bar{x} \quad (۱۲)$$

در روابط فوق $\bar{x}$ و $\bar{y}$ میانگین مقادیر خود هستند و داریم:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad (۱۳)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \quad (۱۴)$$

پس تا این قسمت تحلیل‌گر مدلی مشخص را به عنوان الگویی برای داده‌ها معرفی کرده است. مرحله بعدی" کنترل مناسب بودن مدل" می‌باشد که مدل از نظر قابل استفاده بودن و این که تا چه حد می‌تواند داده‌ها را به درستی بیان کند بررسی می‌شود و در مورد بکارگیری مدل تصمیم گرفته می‌شود. در نتیجه مدل یا قابل استفاده تشخیص داده می‌شود و یا اینکه باید اصلاح شود. بنابراین تحلیل رگرسیونی فرآیندی همراه با تکرار و بازنگری است، یعنی در ابتدا مدلی معرفی می‌شود، کیفیت مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد، مدل قبول و یا اینکه مجدداً اصلاح می‌شود. رابطه قد و وزن، رابطه عرضه و تقاضا در علم اقتصاد، تعیین رابطه بین سن افراد و فشارخون آنها، رابطه بین میزان مطالعه دانش‌آموزان و سطح نمرات آنها، رابطه بین نمرات و میزان قبولی در کنکور سراسری مثال‌هایی ساده در کاربرد رگرسیون هستند.

مقادیر پیش‌بینی شده در هر رابطه رگرسیون از طریق ضریب همبستگی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شوند. ضریب همبستگی طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^{n} H_r H_e - \sum_{i=1}^{n} H_r \sum_{i=1}^{n} H_e}{\sqrt{n \sum_{i=1}^{n} H_r^2 - (\sum_{i=1}^{n} H_r)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^{n} H_e^2 - (\sum_{i=1}^{n} H_e)^2}} \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق H_r مقدار واقعی تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده و H_e مقدار برآورد شده تابش خورشیدی هستند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

به منظور مقایسه و صحت اعتبار مدل، نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان با مدل‌های رایج دیگر و به کمک شاخص‌های میانگین خطای بایاس (MBE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مقایسه نمود. درصد خطای نسبی را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود:

$$e = \frac{H_e - H_r}{H_r} \times 100 \quad (۱۶)$$

میانگین خطای بایاس (MBE) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (H_r - H_e) \quad (۱۷)$$

و در نهایت جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (H_r - H_e)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۸)$$

۴. نتایج

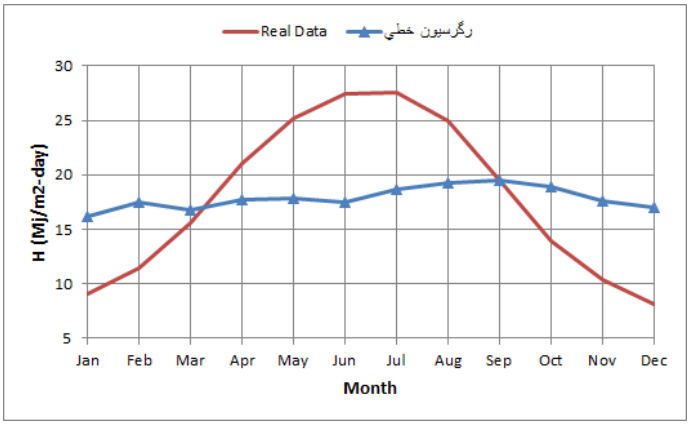
به کمک روش رگرسیون خطی و با استفاده از اطلاعات پانزده ساله ایستگاه هواشناسی شهرستان بجنورد، رابطه زیر به منظور برآورد میانگین روزانه شدت تابش خورشیدی بر حسب پارامتر نسبت ساعات آفتابی به طول روز $\frac{n}{N}$ به دست می‌آید.

$$H = 11.3479 + 9.5264 \left(\frac{n}{N}\right) \quad (۱۹)$$

$$(R = 0.4835)$$

با استفاده از رابطه ۱۹، مقادیر میانگین روزانه شدت تابش خورشیدی به دست می‌آید. می‌توان این مقادیر را به صورت میانگین ماهیانه نیز ارائه داد. در نمودار ۳ می‌توان مقایسه مقادیر شدت تابش خورشیدی به دست آمده از رابطه ۱۹ و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده توسط سنسور تشعشع‌سنج ایستگاه هواشناسی را مشاهده نمود. در این نمودار محور عمودی میانگین ماهیانه شدت تابش روزانه کل خورشیدی بر حسب $\frac{Mj}{m^2-day}$ و محور افقی ماه میلادی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]



نمودار ۳. مقایسه مقادیر تجربی و برآورد شده تابش خورشیدی با استفاده از روش رگرسیون خطی (رابطه ۱۸)

با مشاهده نمودار ۳ می‌توان نتیجه گرفت مقادیر به دست آمده شدت تابش خورشیدی به کمک روش رگرسیون خطی از دقت قابل قبولی برخوردار نبوده و این مقادیر در مقایسه با مقادیر واقعی به دست آمده از داده‌های ایستگاه هواشناسی انطباق خوبی ندارند، بنابراین به کمک روش رگرسیون خطی نمی‌توان شدت تابش خورشیدی را بر حسب ساعات آفتابی به خوبی تخمین زد.

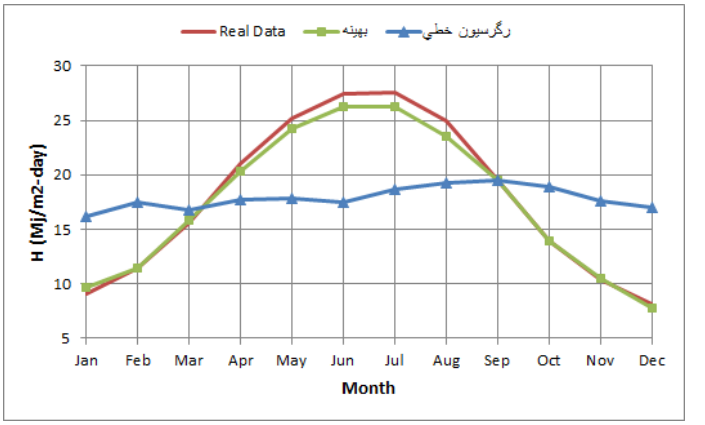
حال به کمک رابطه آنگستراوم (رابطه ۱) و روش رگرسیون خطی و با استفاده از اطلاعات پانزده ساله ایستگاه هواشناسی شهرستان بجنورد، رابطه بهینه‌ای برای برآورد میانگین روزانه شدت تابش خورشیدی بر حسب پارامتر نسبت ساعات آفتابی به طول روز $\frac{n}{N}$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = 0.416475406 + 0.278189235\left(\frac{n}{N}\right) \qquad (۲۰)$$

$$(R = 0.901763542)$$

در رابطه فوق $\bar{H}$ مقدار میانگین شدت تشعشع خورشیدی دریافتی سطح زمین و $\bar{H}_0$ میانگین شدت تشعشع خورشیدی بالای جو است. با استفاده از رابطه ۲۰، مقادیر میانگین روزانه شدت تابش خورشیدی به دست می‌آید. می‌توان این مقادیر را به صورت میانگین ماهیانه نیز ارائه داد. در نمودار۵ می‌توان مقایسه مقادیر شدت تابش خورشیدی به دست آمده از رابطه ۲۰ و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده توسط سنسور تشعشع‌سنج ایستگاه هواشناسی را مشاهده نمود. در این نمودار محور عمودی میانگین ماهیانه شدت تابش روزانه کل خورشیدی بر حسب $\frac{Mj}{m^2-day}$ و محور افقی ماه میلادی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]



نمودار ۴. مقایسه مقادیر تجربی و برآورد شده تابش خورشیدی با استفاده از رابطه بهینه تحقیق حاضر

همان‌طور که در نمودار ۴ می‌توان مشاهده نمود، مقادیر به دست آمده شدت تابش خورشیدی به کمک مدل بهینه حاضر از دقت بسیار بالا و قابل قبولی برخوردار بوده و این مقادیر در مقایسه با مقادیر واقعی به دست آمده از داده‌های ایستگاه هواشناسی انطباق خوبی دارند.

در این مقاله مدل به دست آمده با مدل‌های فرر و مک کولوچ مقایسه شده‌اند که می‌توان در جدول ۳ مشاهده نمود. این مدل‌ها عبارتند از:

۱. مدل فرر[1]

در این مدل که از رابطه آنگسترام استفاده می‌شود، روابط به صورت زیر هستند:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \qquad (۲۱)$$

$$a = -0.27 + 1.75\left(\frac{n}{N}\right) - 1.34\left(\frac{n}{N}\right)^2$$

$$b = 1.32 - 2.9\left(\frac{n}{N}\right) + 2.3\left(\frac{n}{N}\right)^2$$

۲. مدل مک کولوچ[2]

در این مدل نیز از رابطه آنگسترام استفاده می‌شود، روابط به صورت زیر هستند:

1. Frere
2. McCulloch

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad (۲۲)$$
$$a = 0.29\ Cos\emptyset$$
$$b = 0.52$$

در رابطه فوق $\emptyset$ عرض جغرافیایی منطقه است.

جدول ۳. مقایسه مدل بهینه حاضر با مدل‌های دیگر

مدل	میانگین خطای بایاس % (MBE)	جذر میانگین مربعات خطا % (RMSE)	ضریب همبستگی (R)
فرر	-۷۱/۰۳	۹۴/۷۱	۰/۶۴
مک کولوچ	۶/۰۸	۶/۸۸	۰/۷۲
مدل بهینه حاضر	۰/۲۹	۳/۵۶	۰/۹۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

برنامه‌ریزی‌های مختلف هواشناسی، کشاورزی، آب‌شناسی، معماری و انرژی تا حد زیادی وابسته به برآورد صحیح مقدار تابش خورشیدی است. تابش خورشیدی مهمترین عنصر هواشناسی است که به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر تمام فرآیندهای آب و هوایی اثر می‌گذارد. علیرغم اهمیت این عنصر، اندازه‌گیری مستقیم آن به طور محدود انجام می‌شود. به دلیل هزینه بالای دستگاه‌های تابش‌سنجی، امکان نصب این دستگاه‌ها و درنتیجه تعیین مقدار دقیق تابش خورشیدی در مناطق مورد نظر وجود ندارد. اما می‌توان با هزینه بسیار اندک مقدار ساعات آفتابی را به طور روزانه در مناطق مورد نظر اندازه‌گیری نمود. بنابراین می‌توان با در دست داشتن پارامتر ساعات آفتابی، رابطه‌ای برای تخمین شدت تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین بر مبنای نسبت ساعات آفتابی به طول روز به دست آورد.

روش‌های مختلفی برای تخمین شدت تابش خورشیدی بر مبنای ساعات آفتابی وجود دارد. همان‌طور که مشاهده گردید به کمک روش رگرسیون خطی مدل قابل قبولی برای تخمین دقیق شدت تابش خورشیدی به دست نمی‌آید. به همین منظور به دنبال مدل بهینه آن هستیم. مدل بهینه به دست آمده در این تحقیق تلفیقی از رابطه آنگستروم و روش رگرسیون خطی بوده و اطلاعات مربوط به پارامتر ساعات آفتابی و همچنین مقدار میانگین ماهیانه تابش دریافتی سطح زمین از داده‌های پانزده ساله

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

(۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ میلادی) ایستگاه هواشناسی شهرستان بجنورد به دست آمده‌اند. در این مدل می‌توان با در دست داشتن پارامتر نسبت ساعات آفتابی به طول روز، مقدار میانگین شدت تابش خورشیدی روزانه را تخمین زد.

با توجه به نمودار ۴ انطباق بسیار خوب و قابل قبولی بین مقادیر دقیق تابش به دست آمده از دستگاه تابش‌سنجی نصب شده در ایستگاه و مقادیر به دست آمده از مدل بهینه تحقیق اخیر وجود دارد. بنابراین می‌توان با داشتن پارامتر نسبت ساعات آفتابی به طول روز و قرار دادن این پارامتر در مدل بهینه، مقدار تابش خورشیدی را با دقت بسیار بالایی اندازه‌گیری نمود.

نتایج به دست آمده از این تحقیق با مدل‌های رایج دیگر و به کمک شاخص‌های میانگین خطای بایاس (MBE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) مقایسه شده‌اند (جدول ۳). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل تحقیق اخیر در مقایسه با دیگر مدل‌های موجود از دقت بسیار بالا و خطای کمتری برخوردار می‌باشد و این گواه دیگری بر صحت نسبی نتایج مطالعه اخیر است.

منابع

[۱] جهانگیر محمد حسین و کیوان سلطانی (۱۳۹۶)، "مقایسه الگوهای محاسباتی انرژی تابشی خورشید با استفاده از شاخص‌های آماری (مطالعه موردی: شهر بم)"، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۲۰ شماره ۱، صص۱۷۸-۱۶۱.

[۲] زمانی محی آبادی (۱۳۹۲)، "پیش‌بینی لحظه‌ای تابش کل خورشید در شهر رفسنجان توسط شبکه عصبی"، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۶، شماره ۴، صص۳۲-۱۵.

[۳] صفاری پور، محمدحسن و مظفرعلی مهرابیان (۱۳۸۷)، "کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های تجربی"، *شانزدهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک*، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[۴] صفاری‌پور، محمدحسن و مظفر علی مهرابیان (۱۳۸۷)، "مدلسازی تابش خورشیدی و مقایسه با داده‌های تجربی"، *شانزدهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک*، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[۵] صفاری‌پور، محمدحسن و مظفر علی مهرابیان (۱۳۸۸)، "بررسی اثر عوامل نجومی، هندسی، جغرافیایی و هواشناسی بر میزان تابش کل خورشیدی روزانه دریافتی در یک سطح افقی در شهر کرمان"، *اولین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع*، تهران.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]

[۶] فرجی مهیاری خدیجه، خانعلی مجید و زهرا فرجی مهیاری (۱۳۹۴)، "ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران"، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۸، شماره ۴، صص۲۶-۱۷.

[۷] مجرد، فیروز؛ فتح نیا، امان الله و سعید رجایی (۱۳۹۴)، "برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان کرمانشاه"، *نشریه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، سال پنجم، شماره نوزدهم، صص۶۹-۵۵.

[۸] معینی، سام؛ جوادی، شهرام؛ کوکبی، محسن و محسن دهقان منشادی (۱۳۸۹)، "برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه"، *نشریه انرژی ایران*، دوره ۱۳، شماره ۲.

[۹] یزدان‌پناه، حجت الله؛ میرمجریان، راضیه و حمید برقی (۱۳۸۹)، "برآورد تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین در اصفهان"، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، سال ۲۱، شماره پیاپی ۳۷، شماره ۱، صص ۱۰۴-۹۵.

[10] Angstrom A. (1924). *Solar and Terrestrial Radiation*. Q. J. R. Meteorol. Soc, pp. 50-121.

[11] Ashjaee M., Roomina M.R. and A. Ghafouri (1993). "Estimating Direct, Diffuse and Global Solar Radiation for Various Cities in Iran by two Methods and their Comparison eith the Measured data". *Sol Energy*, 50(5), pp. 441-446.

[12] Daneshyar M. (1978). "Solar Radiation Statistics for Iran". *Sol Energy*, Vol.21, pp. 345-349.

[13] Duffie J.A. and W.A. Beckman (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th , Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN-978-0-470-87366-3.

[14] Jafarpour K. and M.A. Yaghoubi (1989). "Solar Radiation for Shiraz, Iran". *Sol Wind Technology*, 6(2), pp. 177-189.

[15] Lof G.G., Duffie J.A. and C.O. Smith (1966). "World Distribution of Solar Radiation". *Sol Energy*, Vol. 10, pp. 27-37.

[16] Page J.K. (1964). "The Estimation of Monthly mean Values of Daily total short Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitude 40oN-40oS". *Proceedings of UN conference on new sources of energy*, pp. 706-721.

[17] Prescott J.A. (1940). *Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation*. Trans Roy Soc South Austr, pp. 64-114.

[18] Sabziparvar A. and H. Shetaee (2007). *Estimation of Global solar Radiation in arid and semi-arid Climates of East and West Iran*. Sol Energy, Vol. 32, pp.649-655.

[19] Samimi J. (1994). *Estimation of height-dependent Solar Irradiation and Application to the Solar Climate of Iran*. Sol Energy, Vol. 52, pp. 5401-5409.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-12-25]