ارزیابی توانایی پارامترهای هواشناسی در پیش‌بینی میانگین تابش خورشیدی در یک شهر ساحلی ایران

زهرا فرجی مهیاری[۱]
کارشناسی ارشد

خدیجه فرجی مهیاری[۲]
دانشجوی دکترا

مجید خانعلی[۳]
استادیار

داده‌های تابش خورشیدی نقش مهمی در طراحی سامانه‌های خورشیدی دارند که اندازه‌گیری آن‌ها در برخی مناطق به آسانی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین بایستی به دقت و با استفاده از مدل‌های تخمین تابش خورشیدی برآورد شوند. در این مقاله تأثیر سه پارامتر هواشناسی ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی بر تابش خورشیدی بر اساس تحلیل رگرسیونی چند متغیره گام‌به‌گام و با توجه به مطالعات تجربی مورد بررسی قرار گرفت و از داده‌های هواشناسی ایستگاه بندرعباس در دوره آماری ۱۹ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۷ میلادی) استفاده شد. دقت مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری R^2، RMSE، MPE و MBE ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای ساعت آفتابی (درجه دو) و دما با ضریب تعیین ۰/۷۵۶۶ (سطح اطمینان ۹۹٪) ارتباط معناداری با تابش خورشیدی دارند. نتایج حاصل از این پژوهش الزاماً قابل تعمیم به سایر ایستگاه‌ها نیست و بنابر ویژگی‌های خاص هر منطقه می‌توان متغیرهای دیگری را مؤثر بر تابش خورشیدی و تغییرات آن یافت.

واژه‌های راهنما: بندرعباس، تابش خورشیدی، داده‌های هواشناسی، رگرسیون گام‌به‌گام، مدل تجربی

۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر از دیدگاه اقتصادی، اجتماعی و مسائل زیست محیطی به عنوان منابع انرژی پایدار شناخته می‌شوند. امروزه به علت آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین افزایش هزینه سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشید در سراسر جهان روند رو به رشدی را طی می‌کند. استفاده از انرژی خورشیدی در ایران که بر روی کمربند خورشیدی نسبتاً قوی قرار دارد از اهمیت بسزایی برخوردار است.

[۱] کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس‌کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران z_farajimahyari@ut.ac.ir

[۲] دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس‌کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران farajimahyari@ut.ac.ir

[۳] نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس‌کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران khanali@ut.ac.ir

داده‌های تابش خورشیدی و مؤلفه‌های مربوط به آن به عنوان ورودی‌های اولیه و اساسی طراحی سامانه‌های خورشیدی شناخته می‌شوند. بنابراین به منظور استفاده و بکارگیری انرژی خورشیدی در یک مکان مشخص لازم است که اطلاعات تابشی آن به سهولت و قابل اعتماد در دسترس باشند. بهترین روش برای این امر، نصب ابزار اندازه‌گیری تابش خورشیدی از قبیل آذرسنج (اندازه‌گیری تابش مستقیم) و شیدسنج (اندازه‌گیری تابش کل) و ثبت اطلاعات مورد نظر به صورت روزانه است؛ البته این روش بسیار سخت و پر هزینه است.

علیرغم اهمیت استفاده از ابزار اندازه‌گیری تابش خورشیدی، دست‌یابی به اطلاعات تابش در بسیاری از کشورهای در حال توسعه به دلیل عدم دسترسی به ابزار و روش‌های مناسب اندازه‌گیری به آسانی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین مدل‌های تجربی متعددی ارائه شده است که تابش کل روزانه و یا ماهانه خورشید را بر اساس سایر داده‌های هواشناسی که با سهولت بیشتری در ایستگاه‌های هواشناسی قابل اندازه‌گیری هستند برآورد می‌نمایند. مدل‌های مذکور به طور معمول بر اساس پارامترهای زیر تعریف می‌شوند [۱ و ۲]:

- پارامترهای نجومی مانند ثابت خورشیدی، فاصله زمین تا خورشید، زاویه میل خورشیدی و زاویه ساعتی خورشید.
- پارامترهای جغرافیایی مانند عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع منطقه مورد نظر.
- پارامترهای هندسی مانند زاویه‌های سرسو[1]ی سطح، شیب سطح، ارتفاع خورشید و سرسوی خورشید.
- پارامترهای فیزیکی مانند پخش مولکول‌های هوا، محتوای بخار آب، پخش ذرات غبار و سایر ترکیبات هوا از قبیل O_2، CO_2 و N_2.
- داده‌های هواشناسی از قبیل تابش خورشیدی در خارج از جو (فرازمینی)، مدت تابش، دما، بارندگی، رطوبت نسبی، میزان ابری بودن (ابرناکی)، دمای خاک، تبخیر و بازتابش محیطی.

با توجه به تعداد نسبتاً زیاد روابط بسط داده شده به منظور محاسبه تابش کل خورشیدی، انتخاب مناسب‌ترین رابطه برای یک منطقه خاص مشکل است. با این وجود انتخاب یک مدل مناسب از میان مدل‌های متعدد بر اساس موجود بودن اطلاعات مورد نیاز اولیه مدل در ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین میزان دقت مدل انجام می‌شود. تاکنون مطالعات مختلفی برای برآورد متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی در ایران انجام شده است. آقاشریعتمداری و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی تأثیر پارامترهای هواشناسی (ساعت آفتابی، دمای ماکزیمم، نقطه شبنم، رطوبت نسبی، فشار بخار آب، بارندگی و ابرناکی) بر مقادیر روزانه تابش کل دریافتی از خورشید با استفاده از اطلاعات ایستگاه تهران شمال (اقدسیه) پرداختند [۳].

در این مطالعه رابطه انگستروم و سپس رابطه دو متغیره با متغیرهای رطوبت نسبی و کسر ساعات آفتابی به عنوان مناسب‌ترین رابطه انتخاب شدند. مجنونی هریس و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه برای سال‌های(۱۳۸۲) و(۱۳۸۳) در منطقه باجگاه استان فارس بر اساس نسبت ساعات آفتابی، دما و میزان ابری بودن آسمان ضرایب مدل آنگستروم را واسنجی نمودند [۴]. نتایج به دست آمده نشان داد که اضافه نمودن دمای هوا و ساعات آفتابی در معادله آنگستروم باعث بالا رفتن دقت تخمین شدت تابش می‌گردد. گرجیان و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، تابش خورشیدی ایران را با دقت ۹۹/۸۵٪ تخمین زدند [۵].

---

[1] Azimuth Angle

در این مطالعه از داده‌های جغرافیایی و هواشناسی ۳۱ ایستگاه در سراسر ایران برای یادگیری شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه با متغیرهای ورودی مختلف استفاده و به کمک روش گام‌به‌گام رگرسیون چندگانه خطی، مناسب‌ترین متغیرهای مستقل (ورودی‌ها) تعیین شد. خراسانی‌زاده و محمدی (۲۰۱۳)، به کمک داده‌های تابش کل خورشیدی در بلند مدت و دیگر مشخصات هواشناسی و بر اساس ۱۱ مدل تجربی به دست آمده در سایر تحقیقات، متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه در شش شهر بزرگ ایران را محاسبه کردند [۶]. مدل‌های مورد استفاده در سه دسته قرار داشتند؛ مدل‌های صرفا بر اساس ساعت آفتابی، مدل‌های شامل سه پارامتر ساعت آفتابی، رطوبت نسبی و میانگین دمای محیط، و مدل‌های بر اساس پارامترهای ساعت آفتابی، رطوبت نسبی و میانگین، بیشینه و کمینه دمای محیط.

بهرنگ و همکاران (۲۰۱۱) از تکنیک‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای پیش‌بینی شاخص وضوح در شهرهای مختلف ایران بهره گرفتند [۷]. برای این منظور یازده مدل، شامل پنج مدل جدید و شش مدل به دست آمده در سایر تحقیقات، انتخاب شد. ضرایب تجربی مدل‌ها با استفاده از روش‌های PSO و رگرسیون آماری برای تمام شهرها محاسبه شد. نتایج نشان داد که ضرایب تجربی به دست آمده به روش PSO نسبت به روش رگرسیون آماری دقیق‌تر است.

رحیمی خوب (۲۰۱۰) از روش‌های شبکه عصبی برای برآورد تابش خورشیدی کل در شهر اهواز به کمک پارامترهای بیشینه و کمینه دما و میزان تابش خارج از جو بهره گرفت [۸]. قهرمان و بختیاری (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 [۹].

ایستگاه‌های مورد نظر از مناطق خشک و نیمه خشک کشور انتخاب شدند.

سبزی‌پرور (۲۰۰۸) از مشخصات مختلف هواشناسی برای پیش‌بینی متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی در برخی مناطق خشک مرکزی ایران استفاده کرد [۱۰]. همچنین در مطالعه دیگری، سبزی‌پرور و شتایی (۲۰۰۷) پس از بررسی شش مدل رایج برای برآورد تابش در مناطق خشک و نیمه خشک شرق و غرب ایران، یک مدل جدید برای این مناطق ارائه دادند [۱۱]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که مدل‌های مبتنی بر ابرناکی برآورد دقیق‌تری از تابش را در ایران ارائه می‌دهند.

هدف این مقاله، ارائه یک مدل نظری بر اساس تحلیل رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام از میان سه متغیر ساعت آفتابی، رطوبت نسبی و دما برای تخمین متوسط ماهیانه تابش کلی روزانه خورشیدی در شهرستان بندرعباس و مقایسه آن با مدل‌های تجربی برای یافتن دقیق‌ترین مدل است. از این رو، یک پژوهش توصیفی، تحلیلی و اکتشافی به شمار می‌آید؛ زیرا ترکیبی از مرور مطالعات مرتبط با موضوع، تحلیل ارتباط متغیرهای یاد شده بر تابش خورشیدی و نیز استخراج رابطه میان تابش خورشیدی و آن‌ها است.

۲- مواد و روش‌ها

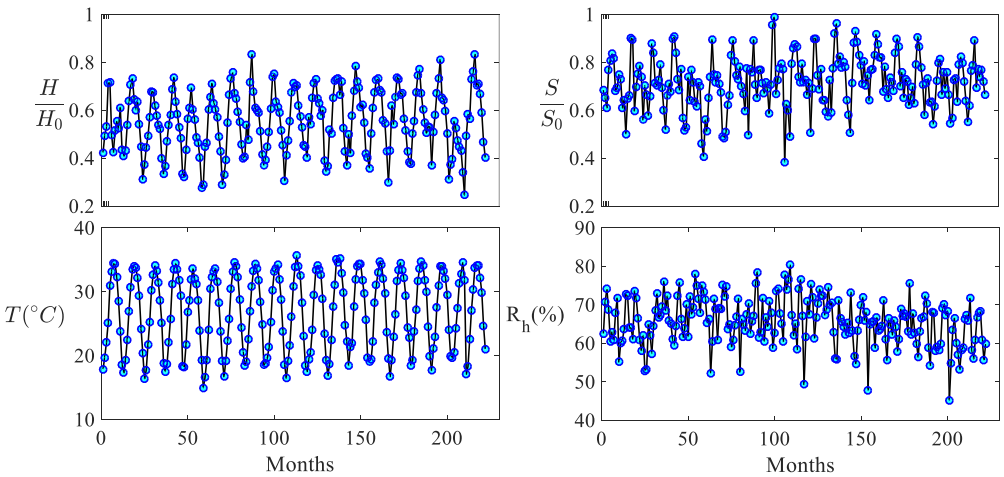
۲-۱- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این مقاله از داده‌های ایستگاه هواشناسی بندرعباس با عرض جغرافیایی '۱۳°۲۷ شمالی، طول جغرافیایی '۲۲°۵۶ شرقی و ارتفاع ۹/۸ متر از سطح دریا استفاده شده است.

داده‌های مورد استفاده شامل تابش خورشیدی، ساعت آفتابی، میانگین دمای هوا و میانگین درصد رطوبت نسبی به صورت روزانه برای سال‌های (۲۰۰۵-۱۹۸۷میلادی) از سازمان هواشناسی جمهوری اسلامی ایران تهیه گردید. پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها، به منظور افزایش دقت محاسبات، مقادیر پرت را حذف و فقط از داده‌های قابل قبول در ادامه مسیر استفاده می‌کنیم. در مرحله اول مقادیر تابش خورشیدی فرازمینی با مقادیر تابش کل رسیده به سطح افقی در دو شرایط کاملاً آفتابی و کاملاً ابری مقایسه شدند. بدین منظور، از شاخص وضوح (ضریب صافی) روزانه، K_t، استفاده شد؛ بدین معنی که داده‌هایی که به ازای آن‌ها $0.015 \leq K_t \leq 1$ باشد قابل قبول بوده؛ در غیر این صورت داده پرت محسوب می‌شوند. همچنین، ماه‌هایی که فاقد اطلاعات بیش از ۵ روز هستند به طور کامل حذف شدند. میزان داده‌های مفقود و نامعتبر به اندازه کافی کوچک بود (درحدود ۲/۶۳٪ کل داده‌ها). پس از فرآیند کنترل کیفیت داده‌ها، متوسط ماهانه داده‌های اندازه‌گیری شده به دست آمد. توزیع متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی، ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی روزانه اندازه‌گیری شده برای شهر بندرعباس در سال‌های (۲۰۰۵-۱۹۸۷) در شکل (۱) نشان داده شده است؛ که در آن، H و H_o به ترتیب میانگین ماهانه تابش خورشیدی روزانه و تابش خورشیدی فرازمینی (برحسب $J.m^{-2}$)، S و S_o به ترتیب میانگین ماهانه ساعت آفتابی و بیشینه ساعت آفتابی روزانه (برحسب ساعت)، T میانگین ماهانه دما (برحسب °C) و R_h میانگین ماهانه رطوبت نسبی (برحسب درصد) در دوره آماری ۱۹ ساله (۲۲۸ ماهه) هستند. نمودارهای ارائه شده در شکل (۱) گویای ارتباط بین تابش خورشیدی (متغیر وابسته) و ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی (متغیرهای مستقل) هستند.

۲-۲- انتخاب پارامترهای مدل

انتخاب پارامترهای مدل برای پیش‌بینی شدت کل تابش خورشیدی کار مهمی است که مستلزم تجربه فراوان و اطلاع کافی از نحوه تأثیر این پارامترها بر شدت کل تابش خورشیدی است. پارامترهای به کار رفته برای این منظور بر مبنای سادگی اندازه‌گیری آن‌ها در خارج از ایستگاه‌های هواشناسی و بدون نیاز به تجهیزات گران‌قیمت انتخاب شده‌اند [۱].



شکل۱- توزیع متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی، ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی روزانه اندازه‌گیری شده برای شهر بندرعباس در سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۸۷

در ادامه به شرح مختصری از این پارامترها پرداخته می‌شود.

تابش خورشیدی فرازمینی (H_o) از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۲].

$$H_o = \frac{24\times 3600}{\pi} I_{sc}\left(1+0/033\cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right)\left(\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s + \frac{\pi}{180}\omega_s\sin\varphi\sin\delta\right) \qquad (۱)$$

که در آن n، شماره ژولیوسی (شماره روزهای سال از اول ژانویه)، I_{sc}، ثابت خورشیدی (معادل ۱۳۶۷ وات بر متر مربع) و φ، عرض جغرافیایی محل مورد نظر است. δ، زاویه میل خورشیدی نسبت به استوا است که مقدار آن بر حسب درجه از رابطه تقریبی (۲) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$\delta = 23/45\sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \qquad (۲)$$

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

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

علاوه بر این، بیشینه ساعات آفتابی در روز، S_o، طبق رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$S_o = \frac{2}{15}\omega_s \qquad (۴)$$

۲-۳- مدل‌های برآورد تابش خورشیدی

اولین رابطه پیشنهاد شده برای تخمین تابش خورشیدی، رابطه مشهور آنگستروم است. آنگستروم در سال (۱۹۲۴) رابطه خطی بین نسبت تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین به تابش خورشیدی آسمان صاف و نسبت ساعت آفتابی روزانه به ماکزیمم طول روز را به دست آورد [۱۴]. بعدها رابطه آنگستروم توسط سایر محققین اصلاح گردید. در سال (۱۹۴۰)، پرسکات رابطه آنگستروم را با افزودن تابش خورشیدی فرازمینی به جای تابش خورشیدی آسمان صاف به صورت رابطه (۵) در آورد [۱۵]:

$$H/H_o = a + b(S/S_o) \qquad (۵)$$

که در آن H، متوسط ماهانه تابش خورشیدی روزانه و S، متوسط ماهانه ساعت آفتابی روزانه است.

در سال (۱۹۸۴)، اگلمن و همکاران یک تابع چند جمله‌ای درجه دو بین نسبت تابش خورشیدی و نسبت ساعت آفتابی ارائه کردند که به صورت رابطه (۶) است [۱۶]:

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + e(S/S_o)^2 \qquad (۶)$$

الصبایی و همکاران در سال(۲۰۰۹) روابط متعددی بین نسبت تابش خورشیدی و پارامترهای هواشناسی مختلف ارائه نمودند که رابطه (۷) بر پایه متوسط ماهانه دما (T) و ساعت آفتابی و رابطه (۸) بر پایه رطوبت نسبی (R_h) از آن جمله است [۱۷].

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + cT \qquad (۷)$$

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + dR_h \qquad (۸)$$

در سال (۱۹۹۴) عبدالله، ترکیب درجه یک سه پارامتر ساعت آفتابی، متوسط ماهانه دما و رطوبت نسبی را به صورت رابطه (۹) به کار برد [۱۸].

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + cT + dR_h \qquad (۹)$$

کاراکتی و همکاران نیز در سال (۲۰۱۲) با افزودن توان دوم نسبت ساعت آفتابی روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) را ارائه نمود [۱۹]:

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + e(S/S_o)^2 + cT \quad (۱۰)$$

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + e(S/S_o)^2 + dR_h \quad (۱۱)$$

$$H/H_o = a + b(S/S_o) + e(S/S_o)^2 + cT + dR_h \quad (۱۲)$$

اما در این پژوهش سعی می‌شود با استفاده از روش تحلیل رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام، مدل دیگری برای تخمین متوسط ماهیانه تابش کلی روزانه خورشیدی ارائه گردد که می‌تواند ترکیبی از هر یک از سه پارامتر مذکور را در برگیرد.

۲-۴- مدل‌سازی تابش خورشیدی به روش تحلیل رگرسیونی گام‌به‌گام

تحلیل رگرسیون چند متغیره از جمله تکنیک‌های آماری است که برای آزمون تجربی روابط نظری در میان مجموعه‌ای از متغیرها، انجام آزمون فرضیه و رتبه‌بندی سهم نسبی عوامل مفید است. همچنین این روش تحلیلی از جمله روش‌هایی است که قابلیت پیش‌بینی روابط میان متغیرها را داراست. روش‌های رگرسیون گام به‌گام از جمله روش‌های تحلیل رگرسیونی هستند که در مواقع کم بودن تعداد عوامل ورودی جهت بررسی رابطه متغیرها و همچنین مشخص کردن اینکه کدام یک از متغیرهای مستقل به صورت معنی‌داری با تابش خورشیدی ارتباط دارند استفاده می‌شوند و عبارتند از سه روش انتخاب پیشرو، حذف پسرو و انتخاب گام به‌گام [۲۰]. روش انتخاب پیشرو با این فرض شروع می‌شود که هیچ متغیر مستقلی در مدل حضور ندارد و فقط عرض از مبدأ وجود دارد. در این روش به ترتیب، تک‌تک متغیرهای مستقل وارد مدل رگرسیونی می‌شوند و در هر مرحله، متغیر رگرسیونی که دارای بیشترین همبستگی با متغیر وابسته است وارد مدل می‌شود (یعنی مقدار آماره F آن بزرگ‌تر از مقدار F بحرانی ورودی ($F_{\alpha,(1,n-2)}$) در آزمون معنی‌داری الگوی رگرسیون باشد). این فرایند هنگامی به پایان می‌رسد که مقدار آماره F از مقدار F بحرانی ورودی کمتر شود یا اینکه آخرین متغیر رگرسیونی نامزد به مدل اضافه شده باشد.

روش حذف پسرو با این فرض شروع می‌شود که تمام متغیرهای رگرسیونی نامزد در مدل اولیه وجود دارند. بدین معنی که فرایند با مدلی شامل K متغیر رگرسیونی نامزد آغاز می‌شود. سپس آماره F برای هر یک از آن‌ها محاسبه می‌شود. کوچک‌ترین آماره با مقدار F بحرانی حذفی مقایسه می‌شود و اگر کمتر از آن باشد، متغیر رگرسیونی مربوطه از مدل حذف می‌شود. حال این مرحله برای مدل جدید با K-1 متغیر رگرسیونی تکرار می‌شود. الگوریتم حذف پسرو وقتی پایان می‌پذیرد که کوچک‌ترین مقدار آماره F از مقدار F بحرانی حذفی بزرگ‌تر باشد.

انتخاب گام به گام، تعدیل روش انتخاب پیشرو است که در آن در هر مرحله همه متغیرهای رگرسیونی از قبل وارد شده به مدل با آماره F خودشان مجدداً ارزیابی می‌شوند. یک متغیر رگرسیونی اضافه شده در قدم قبل ممکن است به لحاظ ارتباط با متغیرهای رگرسیونی که اکنون در معادله هستند زائد باشد. اگر آماره F برای یک متغیر کمتر از F بحرانی باشد، آن متغیر از مدل حذف می‌شود.

به عبارت بهتر، در این روش مانند انتخاب پیشرو متغیرها تک‌تک اضافه می‌شوند با این تفاوت که بعد از اضافه شدن، تک‌تک متغیرها بر اساس معیار روش حذف پسرو بررسی می‌شوند. بنابراین روش انتخاب گام‌به‌گام ترکیبی از روش‌های انتخاب پیشرو و حذف پسرو است.

همانطور که مشخص است انتخاب گام‌به‌گام به مقدار F بحرانی نیاز دارد. معمولاً F بحرانی ورودی بزرگ‌تر از F بحرانی حذفی انتخاب می شود اما بعضی از تحلیل‌گران ترجیح می‌دهند آن‌ها را مساوی در نظر بگیرند. علاوه بر آماره F از P-Value نیز برای پایان دادن به هر یک از این روش‌ها استفاده می‌شود [۲۰ و ۲۱].
در این مقاله، از تحلیل رگرسیونی گام‌به‌گام بر پایه روش انتخاب گام‌به‌گام استفاده می‌شود.

۲-۵- 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 [۲۲ و ۲۳] و به شرح زیر می‌باشند:

$$MPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(H_{i,p}-H_{i,m}\right)}{H_{i,m}}\times 100 \qquad (۱۳)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,p}-H_{i,m}\right)/N \qquad (۱۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,p}-H_{i,m}\right)^2/N} \qquad (۱۵)$$

$$R^2 = 1-\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,m}-H_{i,p}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(H_{i,m}-H_{m,ave}\right)^2} \qquad (۱۶)$$

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. لازم به ذکر است که فرآیند تجزیه و تحلیل رگرسیونی مدل‌های مذکور و تعیین شاخص‌های آماری آن‌ها و همچنین تحلیل رگرسیونی گام‌به‌گام در نرم‌افزار متلب R2016a انجام شده است.

۳- نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای هشت مدل تجربی ارائه شده با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش کل خورشیدی روزانه برای شهر بندرعباس انجام شد. ضرایب مدل‌های تجربی محاسبه و در جدول (۱) گزارش شده است. طبق نتایج ارائه شده در جدول (۱)، ارتباط توان دوم ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی با تابش خورشیدی به دلیل مثبت بودن مقدار عددی ضرایب، ارتباط مستقیمی است؛ یعنی با افزایش ساعت آفتابی،

دما و رطوبت نسبی، تابش خورشیدی افزایش می‌یابد. همچنین آشکار است که رطوبت نسبی در مقایسه با ساعت آفتابی و دما تأثیر اندکی در تخمین تابش خورشیدی در شهرستان بندرعباس دارد. در تحلیل رگرسیونی که به روش گام‌به‌گام و از طریق نرم‌افزار متلب انجام شد، تابش خورشیدی، متغیر وابسته است و ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی به عنوان متغیرهای مستقل این مطالعه تعریف شدند. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی در جدول (۲) ارائه شده است که میزان ارتباط متغیر وابسته با مجموعه و تک‌تک متغیرهای مستقل را توسط مقدار P-Value مشخص می‌کند.

مقدار P-Value برای هر یک از مدل‌های مورد استفاده در جدول (۲) میزان معنی‌داری مدل مربوطه را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه برای تمامی مدل‌ها مقدار ۰/۰۰۰۰ برای P-Value به دست آمده و در این مقاله α = ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است می‌توان نتیجه گرفت که تعدادی از جملات موجود در مدل‌های ارائه شده به ازای داده‌های شهرستان بندرعباس به صورت معنی‌داری متفاوت از صفر هستند؛ به عبارت بهتر، با اطمینان ۹۹٪ می‌توان گفت حداقل یکی از ضرایب متغیرهای مستقل مخالف صفر است و مدل‌های ارائه شده به خوبی قادر به بیان تغییرات متغیر وابسته هستند. پس مدل‌های مذکور برای شهرستان بندرعباس، دارای اعتبار هستند.

همچنین، مقدار P-Value برای هر یک از ضرایب (مربوط به متغیرهای مستقل) مدل‌های مورد استفاده محاسبه شد که نتایج آن نیز در جدول (۲) ارائه شده است. هر قدر مقدار P-Value کمتر باشد، رد فرضیه صفر راحت‌تر می‌شود؛ به عبارت دیگر، متغیر مستقلی که ضریب آن کمترین مقدار P-Value را داراست بیشترین تأثیر را بر تابش خورشیدی می‌گذارد. با توجه به اینکه در این مقاله، سطح معنی‌داری (α) برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است اگر P-Value $\leq$ ۰/۰۱ باشد فرضیه صفر رد می‌شود (یعنی متغیر مستقل مربوطه بر تغییرات تابش خورشیدی تأثیر دارد) و اگر P-Value $>$ ۰/۰۱ فرضیه صفر قبول می‌شود (یعنی متغیر مستقل مربوطه تأثیری بر تغییرات تابش خورشیدی ندارد. بنابراین ضرورتی برای وجود آن متغیر در مدل نیست و احتمالاً می توان آن را از مدل حذف کرد).

مدل ارائه شده در رابطه (۱۷) از تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام به دست آمد. ساختار این مدل از پارامترهای ساعت آفتابی (درجه دو) و دما به عنوان متغیرهای مستقل تشکیل شده است.

$$H/H_o = e(S/S_o)^2 + cT \qquad (۱۷)$$

در جدول (۳) مقادیر شاخص‌های آماری R^2، RMSE، MPE و MBE ارائه شده است که در نتیجه مقایسه مقادیر برآورد شده تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین با استفاده از نه مدل مختلف معرفی شده در این پژوهش و نیز مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی به دست آمده‌اند.

به طور کلی هر چه مقدار شاخص‌های خطاسنجی، پایین‌تر بوده و میزان شاخص R^2 بالاتر باشد، مدل مربوطه دقیق‌تر و مناسب‌تر است. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، بالاترین مقادیر R^2 به ترتیب مربوط به رابطه‌های (۱۷) (مدل استخراجی در این پژوهش)، (۷) و (۱۰) است که با استفاده از دو متغیر ساعت آفتابی و دما تعریف شده‌اند. رابطه‌های (۱۲) و (۹) (مدل‌های مبتنی بر ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی) نیز به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

جدول۱- ضرایب ثابت به دست آمده برای ۹ مدل مورد استفاده در شهر بندرعباس

شماره رابطه	a	b	c	d	e
۵	-۰/۰۴۲۶	۰/۸۳۵۵	–	–	–
۶	۰/۱۹۹۲	۰/۱۵۳۱	–	–	۰/۴۷۱۹
۷	-۰/۰۶۲۶	۰/۴۷۷۰	۰/۰۱۰۴	–	–
۸	-۰/۳۸۸۵	۰/۹۱۹۰	–	۰/۰۰۴۴	–
۹	-۰/۱۳۳۰	۰/۵۱۲۲	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۰۸	–
۱۰	۰/۲۴۰۳	-۰/۴۰۱۰	۰/۰۱۰۴	–	۰/۶۱۶۵
۱۱	-۰/۱۴۱۶	۰/۲۰۴۵	–	۰/۰۰۴۳	۰/۵۰۵۹
۱۲	۰/۱۸۴۵	-۰/۳۹۸۱	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۰۸	۰/۶۳۸۸
۱۷	–	–	۰/۰۱۳۲	–	۰/۳۸۰۴

جدول۲- ارتباط تابش خورشیدی با متغیرهای مستقل در ۹ مدل مورد استفاده در شهر بندرعباس بر اساس مقدار P-Value

شماره رابطه	a	b	c	d	e	کل
۵	۰/۲۵۴۱	۰/۰۰۰۰	–	–	–	۰/۰۰۰۰
۶	۰/۲۲۲۹	۰/۷۴۱۶	–	–	۰/۱۵۰۱	۰/۰۰۰۰
۷	۰/۰۴۷۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	–	–	۰/۰۰۰۰
۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	–	۰/۰۰۰۰	–	۰/۰۰۰۰
۹	۰/۱۲۶۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۸۴۶	–	۰/۰۰۰۰
۱۰	۰/۰۸۳۹	۰/۳۱۴۳	۰/۰۰۰۰	–	۰/۰۲۷۲	۰/۰۰۰۰
۱۱	۰/۴۳۲۳	۰/۶۵۲۰	–	۰/۰۰۰۰	۰/۱۱۳۴	۰/۰۰۰۰
۱۲	۰/۲۶۱۹	۰/۳۲۹۰	۰/۰۰۰۰	۰/۴۲۸۹	۰/۰۲۴۱	۰/۰۰۰۰
۱۷	–	–	۰/۰۰۰۰	–	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰

جدول۳- شاخص‌های آماری محاسبه شده برای ۹ مدل مورد استفاده در شهر بندرعباس

شماره رابطه	MPE (%)	MBE (MJ/m^2)	RMSE (MJ/m^2)	R^2
۵	۴/۱۱۸۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۸۲۳	۰/۵۵۷۶
۶	۴/۳۶۸۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۸۲۹	۰/۵۵۱۲
۷	۳/۷۵۹۴	۰/۰۰۵۶	۰/۰۶۹۸	۰/۶۹۲۲
۸	۳/۸۶۸۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰۸۱۱	۰/۵۷۱۹
۹	۳/۳۵۸۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۷۱۹	۰/۶۷۸۵
۱۰	۳/۶۲۴۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۷۰۲	۰/۶۸۹۷
۱۱	۳/۹۰۱۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۸۰۸	۰/۵۷۷۰
۱۲	۳/۴۰۵۱	۰/۰۰۳۶	۰/۰۷۱۲	۰/۶۸۶۲
۱۷	۲/۰۵۲۶	۰/۰۰۰۹	۰/۰۷۱۰	۰/۷۵۶۶

ضریب تعیین ۰/۷۵۶۶ به دست آمده برای مدل استخراجی در این پژوهش نشان می‌دهد که ۷۵/۶۶٪ از تغییرات تابش خورشیدی (متغیر وابسته مطالعه) تحت تأثیر دو متغیر ساعت آفتابی و دما قرار می‌گیرد. همچنین نتایج تحلیل رگرسیونی گویای این است که مدل مذکور در سطح ۹۹ درصد (P-Value = ۰/۰۰۰۰) معنی‌دار است. 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 MBE مدل‌ها در جدول (۳) درمی‌یابیم که همه مدل‌ها اندکی بالاتر از حد برآورد داشته است. در این بین، مدل استخراجی در این پژوهش کمترین مقدار MBE را به خود اختصاص داده است و برآورد دقیق‌تری از تابش خورشیدی شهرستان بندرعباس ارائه داده است.

علاوه براین، مقایسه مقادیر MPE مدل‌ها در جدول (۳) حاکی از آن است که کمترین مقدار MPE برای مدل‌ها ۲/۰۵۲۶ درصد و متعلق به رابطه (۱۷) است. از نظر شاخص RMSE نیز به ترتیب رابطه‌های (۷)، (۱۰) و (۱۷) کمترین مقادیر را دارا هستند. اما با توجه به مقادیر کم‌تر شاخص‌های R^2، MPE و MBE (به ترتیب برابر ۰/۷۵۶۶، ۲/۰۵۲۶ و ۰/۰۰۰۹) در رابطه (۱۷) می‌توان این مدل را به عنوان مناسب‌ترین مدل برآورد تابش خورشیدی در شهر بندرعباس معرفی نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله که با هدف بررسی و تحلیل رابطه متقابل میان تابش خورشیدی و متغیرهای ساعت آفتابی، دما و رطوبت نسبی در سطح معناداری ۰/۰۱ صورت پذیرفت از روش تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد. همچنین هشت مدل تجربی، با ساختارهای متفاوتی از متغیرهای هواشناسی مذکور، برای مقایسه و یافتن دقیق‌ترین مدل انتخاب شد که عبارتند از مدل‌های آنگستروم- پرسکات، اگلمن و همکاران، الصبایی و همکاران، کاراکتی و همکاران و عبدالله. نتایج تحقیق نشان داد که براساس تحلیل رگرسیون چند متغیره با روش گام‌به‌گام از میان سه متغیر مذکور تنها دو متغیر ساعت آفتابی (درجه دو) و دما در سطح اطمینان ۹۹٪ با متغیر وابسته (تابش خورشیدی) ارتباط معناداری دارند. این مدل مناسب‌ترین مدل حاصل از تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام است و از آن جهت اعتبار دارد که نمایشی از الگوی مناسب ترکیب متغیرهای مستقل این مطالعه برای تبیین عوامل مؤثر بر تغییرات تابش خورشیدی در شهرستان بندرعباس است. به بیان دیگر، از یک سو، عوامل مؤثر بر تابش خورشیدی در این منطقه را مشخص می‌کند و از سوی دیگر، امکان پیش‌بینی تغییرات تابش خورشیدی منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌آورد. البته یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر، این است که ممکن است مدل پیشنهادی قابل تعمیم به سایر ایستگاه‌ها نباشد و بنا بر ویژگی‌های خاص هر منطقه می‌توان متغیرهای دیگری را مؤثر بر تابش خورشیدی و تغییرات آن یافت.

مراجع

[۱] صفاری‌پور م. ح.، مهرابیان م. ع.، "پیش‌بینی مقدار کل تابش خورشیدی در کرمان با استفاده از مشخصات هندسی، نجومی، جغرافیایی و هواشناسی"، مجله علمی و پژوهشی شریف، شماره پنجاه و یکم، صفحه ۱۳-۳، (۱۳۸۸).

[2] Ertekin C., and Yaldiz, O., “Estimation of Monthly Average Daily Global Radiation on Horizontal Surface for Antalya, Turkey”, Renewable Energy, Vol. 17, pp. 95–102, (1999).

[۳] آقا شریعتمداری ز.، خلیلی ع. و ایران‌نژاد پ.، "مقایسه کارایی مدل‌های یک متغیره و روابط چند متغیره خطی در برآورد تابش دریافتی بر سطح افقی در سطح زمین با استفاده از متغیرهای هواشناسی، مطالعه موردی ایستگاه تهران شمال (اقدسیه)"، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۳ و ۲۴ اردیبهشت‌ماه، تهران، انجمن ژئوپلتیک ایران، (۱۳۸۹).

[۴] مجنونی هریس ا.، زند پارسا ش.، سپاسخواه ع. و ناظم‌السادات ج.، "توسعه و ارزیابی مدل‌های تخمین تابش خورشیدی براساس ساعات آفتابی و اطلاعات هواشناسی"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شماره چهل و ششم (ب)، صفحه ۴۹۹-۴۹۱، (۱۳۸۷).

[5] Gorjian, Sh., Ghobadian B., and Tavakkoli Hashjin, T., “Modeling of Solar Radiation Potential in Iran using Artificial Neural Networks”, Journal of Agricultural Science and Technology (JAST), Vol. 17, pp. 1707–1723, (2015).

[6] Khorasanizadeh, H., and Mohammadi, K., “Introducing the Best Model for Predicting the Monthly Mean Global Solar Radiation Over Six Major Cities of Iran”, Energy, Vol. 51, pp. 257–266, (2013).

[7] Behrang, M.A., Assareh, E., Noghrehabadi, A.R., and Ghanbarzadeh, A., “New Sunshine-based Models for Predicting Global Solar Radiation using PSO (Particle Swarm Optimization) Technique”, Energy, Vol. 36, pp. 3036–3049, (2011).

[8] Rahimikhoob, A., “Estimating Global Solar Radiation using Artificial Neural Network and Air Temperature Data in a Semi-arid Environment”, Enewable Energy, Vol. 35, pp. 2131–2135, (2010).

[9] Ghahreman, N., and Bakhtiari, B., “Solar Radiation Estimation from Rainfall and Temperature Data in Arid and Semi-arid Climates of Iran”, DESERT, Vol. 14, pp. 141–150, (2009).

[10] Sabziparvar, A.A., “A Simple Formula for Estimating Global Solar Radiation in Central Arid Deserts of Iran”, Renew Energy, Vol. 33, No. 5, pp. 1002–1010, (2008).

[11] Sabziparvar, A.A., and Shetaee, H., “Estimation of Global Solar Radiation in Arid and Semi-arid Climates of East and West Iran”, Energy, Vol. 32, No. 5, pp. 649–655, (2007).

[12] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, 3th Edn., John Wiley & Sons, New York, (2006).

[13] Cooper, P.I., “The Absorption of Radiation in Solar Stills”, Solar Energy, Vol. 12, No. 3, pp. 333–346, (1969).

[14] Angström, A., “Solar and Terrestrial Radiation”, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 50, pp. 121−125, (1924).

[15] Prescott, J.A., "Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation", Transactions of the Royal Society of South Australia, Vol. 64, pp. 114−118, (1940).

[16] Ogelman, H., Ecevit, A., and Tasdemiroglu, E., "A New Method for Estimating Solar Radiation from Bright Sunshine Data", Solar Energy, Vol. 33, pp. 619–625, (1984).

[17] El-Sebaii, A.A., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hazmi, F.S., and Faidah, A.S., "Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surfaces in Jeddah, Saudi Arabia", Energy Policy, Vol. 37, pp. 3645−3649, (2009).

[18] Abdalla, YAG., "New Correlation of Global Solar Radiation with Meteorological Parameters for Bahrain", International Journal of Solar Energy, Vol. 16, pp. 111–120, (1994).

[19] Karakoti, I., Das, P.K., and Singh, S.K., "Predicting Monthly Mean Daily Diffuse Radiation for India", Applied Energy, Vol. 91, pp. 412–425, (2012).

[20] Rawlings, J. O., Pantula, S. G., and Dickey, D. A., "Applied Regression Analysis: A Research Tool", 2th Edn., Springer Science & Business Media, pp. 206–228, (2001).

[21] Montgomery, D. C., Peck, E. A., and Vining, G. G., "*Introduction to Linear Regression Analysis*", 4th Edn., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Chapter 10, (2015).

[22] Li, H., Ma, W., Lian, Y., Wang, X., and Zhao, L., "Global Solar Radiation Estimation with Sunshine Duration in Tibet, China", Renewable Energy, Vol. 36, No. 11, pp. 3141–3145, (2011).

[23] Robaa, S. M., "Validation of the Existing Models for Estimating Global Solar Radiation Over Egypt", Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 1, pp. 184–193, (2009).

فهرست نمادهای انگلیسی

F: آماره

H: میانگین ماهانه تابش کل خورشیدی روزانه بر سطح افقی (MJ/m^2)

H_o: میانگین ماهانه تابش فرازمینی روزانه (MJ/m^2)

$H_{i,m}$: مقدار اندازه‌گیری شده (مقدار واقعی) (MJ/m^2)

$H_{i,p}$: مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل (MJ/m^2)

$H_{m.avg}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده (مقادیر واقعی) (MJ/m^2)

$H_{p,avg}$: میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (MJ/m^2)

I_{sc}: ثابت خورشیدی (MJ/m^2)

K: تعداد متغیرهای شرکت‌کننده در فرآیند رگرسیون

K_t: شاخص وضوح

MPE: درصد میانگین خطا (٪)

MBE: خطای اریبی (MJ/m^2)

n: تعداد روزهای سال (از اول ژانویه)

P-Value: آماره

R^2: ضریب تعیین

RMSE: ریشه میانگین مربع خطا (MJ/m^2)

R_h: رطوبت نسبی (٪)

S_o: میانگین ماهانه بشینه ساعات آفتابی در روز (h)

S: میانگین ماهانه ساعات آفتابی (h)

T: دما (°C)

نمادهای یونانی

δ: زاویه میل خورشیدی (deg)

φ: عرض جغرافیایی (deg)

ω_s: زاویه ساعتی خورشید در هنگام غروب (deg)

α: سطح اطمینان (٪)

Abstract

Solar radiation data play an important role in designing solar systems. These data measured are not easy for some locations; Therefore, solar radiation data have to be predicted by using solar radiation estimation models. In this paper was to investigate the effect of meteorological parameters sunshine, temperature and relative humidity on solar radiation based on Stepwise Multidimensional regression analysis according to the research literature and empirical studies (eight models including models suggested by Angström and Prescott, Ogelman, El-Sebaii, Karakoti and Abdalla) and we used daily solar radiation data of Bandar Abbas station during 19-year statistical period (1987-2005). The accuracy of the models was evaluated using the statistical indicators of Coefficient of Determination (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Percentage Error (MPE) and Mean Bias Error (MBE). The results of this analysis show that the variables of "sunshine duration (square)" and "temperature" are significantly associated with solar radiation with a coefficient of determination of 0.7566 (%99 confidence level). The results of this research necessarily cannot be generalized to other stations and in each Region, according to the specific characteristics of that Regions ،we can find other variables effects on the solar radiation and its changes.