



ارزیابی کارایی سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد تابش کل خورشیدی

حکیمه ابراهیمی^۱، زهرا آفاشریعمداری^{۲*}، سمیه حاجابی^۳، آرزو نازی قمشلو^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

چکیده

تابش خورشید نقش مهمی در بیلان انرژی سطح زمین و نیز مطالعات اقلیمی-کشاورزی دارد. در این پژوهش، جهت برآورد مقادیر تابش خورشیدی از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS)^۵ استفاده شد و نتایج با مدل آنگستروم-پرسکات مبتنی بر متغیرهای هواشناسی مؤثر بر مقادیر تابش خورشیدی دریافتی در شش ایستگاه تابش‌سنجی منتخب ایران مورد مقایسه گرفت. به این منظور، از داده‌های هواشناسی یک دوره ۱۱ ساله (۲۰۱۷-۲۰۰۷) شش ایستگاه سینوپتیک به‌عنوان ورودی به مدل ANFIS در نرم‌افزار متلب استفاده شد. ورودی‌های مدل شامل طول ساعت آفتابی، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، فشار بخار آب، حداقل دمای هوا، حداکثر دمای هوا، میانگین دمای هوا، ابرناکی و دمای خاک و تنها خروجی مدل، تابش دریافتی روزانه بود. عملکرد دو مدل توسط آماره t (t-student) ارزیابی شد. مطابق نتایج، تخمین تابش خورشیدی توسط مدل ANFIS، نسبت به مدل آنگستروم تطابق بهتری با نتایج مشاهداتی دارد. در این مطالعه سنج‌های آماری t ، t ، MBE و $RMSE$ به‌منظور برآورد کارایی مدل در برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به کار برده شدند که در مجموع، سنج t حاصل از نتایج تخمین تابش با استفاده از مدل ANFIS، در ایستگاه‌های کرمان، مشهد، شیراز، زنجان، یزد و بندرعباس در مقیاس زمانی روزانه به ترتیب (۴/۷۸، ۷/۵۲، ۳/۲۵، ۲/۳۰، ۳/۹۳ و ۰/۲۶) و ماهانه (۰، ۰/۲۹، ۰/۵۹، ۰/۴۴، ۰/۲۱، ۰/۳۰) بودند. آماره t حاصل از نتایج تخمین تابش با استفاده از مدل آنگستروم در مقیاس زمانی روزانه نیز به ترتیب (۲۰/۱۶، ۳۶/۳۱، ۲۸/۹۰، ۲/۳۹، ۳۴/۹۱ و ۴۹/۹۶) و مقیاس ماهانه (۶/۷۴، ۹/۵۳، ۴/۶۸، ۰/۵۹، ۸/۳۸ و ۹/۷۱) بود. بر اساس یافته‌های این مطالعه، با نظر گرفتن عملکرد فرآیند مدل‌سازی غیرخطی، مدل ANFIS برآورد تابش خورشیدی را نسبت به روش آنگستروم بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: تابش، هوش مصنوعی، مدل‌سازی غیرخطی، مدل آنگستروم-پرسکات

مقدمه

یکی از عوامل اصلی کنترل حیات و آب و هوا در زمین به شمار می‌رود. برآورد تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین کاربردهای وسیعی در زمینه علوم معماری، مهندسی انرژی، کشاورزی و هیدرولوژی دارد. به عنوان مثال برآورد درست مقدار تابش خورشیدی از اصول مهم و اصلی طراحی شبکه‌ها و برنامه‌ریزی آبیاری است. همچنین تابش خورشیدی عامل بسیار مهمی در معادلات برآورد تبخیر-تعرق گیاه می‌باشد و تخمین مناسب آن در توسعه مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان اهمیت زیادی دارد (Almorox and Hontoria, 2004). دسترسی به داده‌های تابش برای ارزیابی پتانسیل بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در هر محل ضروری است. در کنار روش‌های مبتنی بر مقادیر اندازه‌گیری شده تابش،

انرژی تابشی خورشید سرمنشأ انرژی‌های روی کره زمین است که یکی از منابع مهم انرژی پاک به شمار می‌رود و

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج
(*نویسنده مسئول: zagha@ut.ac.ir)

^۳ استادیار، گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۴ استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۵ Adaptive Neuro Fuzzy inference system

نحوه ارجاع مقاله:

ابراهیمی، ح.، آفاشریعمداری، ز.، حاجابی، س.، نازی قمشلو، آ. ۱۳۹۹. ارزیابی کارایی سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد تابش

کل خورشیدی. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۸(۱): ۳-۱۴. DOI: 10.22125/agmj.2020.170508.1056

Ebrahimi, H., Aghashariatmadari, Z., Hejabi, S., Nazi Ghameshlo, A. 2020. Evaluation of Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) performance in global solar radiation estimation. Journal of Agricultural Meteorology, 8(1): 3-14. DOI: 10.22125/agmj.2020.170508.1056

می‌باشند، درحالی‌که روش‌های تجربی، آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی خلاصه و انتزاعی هستند. به علاوه، روش‌های فیزیکی به عنوان ورودی به داده‌هایی احتیاج دارند که دستیابی به آن‌ها بسیار دشوار است که از آن جمله می‌توان به داده‌هایی نظیر نوع پوشش ابری، ارتفاع پایه ابر، ارتفاع قله ابر، محل نسبی ابرناکی، مقدار ابر، میزان گذرایی گازهای مختلف جو اشاره نمود. این داده‌ها در مناطقی بسیار پراکنده و اندک اندازه‌گیری می‌شوند و حتی گاهی از دقت کافی نیز برخوردار نمی‌باشند. به علاوه، استفاده از مدل‌های فیزیکی برای افراد غیرمتخصص دشوار است و این در حالی است که طول مدت تابش خورشیدی و سایر متغیرهای هواشناسی که در روابط تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرند، متغیرهایی هستند که دائماً در ایستگاه‌های سینوپتیک اندازه‌گیری می‌شوند و داده‌های آن‌ها در دسترس می‌باشند (Haykin, 1994). نکته‌ای که در اینجا می‌بایست به آن اشاره نمود این است که در ساختار روش‌های تجربی متغیرهای هواشناسی محدودی وارد می‌شود. به عنوان مثال، در روش آنگستروم تنها متغیر تعداد ساعات آفتابی برای برآورد تابش خورشیدی استفاده می‌شود و این در حالی است که به علت طبیعت متغیر تابش خورشیدی، متغیرهای هواشناسی و عوامل محیطی متعددی می‌توانند بر شدت و مدت تابش آن تأثیر بگذارند که نحوه این تأثیر بسیار پیچیده است. به علاوه، برهم‌کنش بین عوامل مؤثر بر تابش خورشید به خودی خود می‌تواند برآورد انرژی تابشی دریافتی از خورشید را دشوار سازد. استفاده از روش‌های تحلیلی برآورد انرژی خورشیدی بسیار دشوار است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) می‌توانند روابط غیرخطی موجود بین متغیرهای مؤثر بر تابش دریافتی در سطح زمین را آشکار ساخته و برای دستیابی به دقت بالاتر مدل‌ها آن‌ها را با روش‌های خاص که از طریق مدل‌های تجربی امکان‌پذیر نیست به یکدیگر مرتبط سازند (Haykin, 1994). از آنجایی که مقدار تابش خورشیدی دریافتی متأثر از شرایط جغرافیایی و اقلیمی منطقه می‌باشد، در برآورد این پارامتر پیچیده و مهم باید روش‌های محاسباتی با دقت مطلوب را مورد استفاده قرارداد. در ایران بیش‌تر مطالعات صورت گرفته در زمینه برآورد تابش خورشیدی، شامل مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی می‌باشد. حال آن‌که به دلیل محدود بودن تعداد

روش‌های تجربی متعددی نیز بر مبنای مقادیر اندازه‌گیری شده عوامل هواشناسی ارائه شده‌اند. این روش‌ها از اهمیت بالایی برخوردارند چراکه به علت محدودیت‌های فنی، مالی و حتی سازمانی، داده‌های تابش در تعداد اندکی از ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند و حتی در بیش‌تر مناطق امکان دسترسی به این داده‌ها وجود ندارد و این امر به صورت جدی مانع از پیشرفت تحقیقاتی می‌شود که به تابش خورشید به عنوان ورودی نیاز دارند (Muneer et al., 2004; Yorukoglu and Celik, 2006). در سال‌های اخیر تلاش برای دستیابی به روشی فراگیر به منظور برآورد تابش به صورت تابعی از هواشناسی، زمینه‌ساز تحقیقات گسترده در زمینه متغیرهای رایج تابش بوده است. به همین منظور روش‌های مختلف شبیه‌سازی و برآورد تابش خورشیدی ارائه شد و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های موجود جهت محاسبه و پهنه‌بندی تابش خورشیدی را می‌توان در چهار دسته کلی ۱- اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی، ۲- استفاده از مدل‌های فیزیکی و آماری (تجربی و نیمه‌تجربی)، ۳- اندازه‌گیری ماهواره‌ای و ۴- استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی خلاصه کرد. کارایی روش‌های سنجش تابش خورشیدی وابسته به علل مختلفی از جمله تراکم شبکه پایش زمینی، کالیبراسیون دستگاه پیرانومتر، دقت داده‌های هواشناسی، نحوه و میزان تصحیحات آتمسفری می‌باشد. یکی از محدودیت‌های روش‌های موجود برای فراگیر شدن آن است که داده‌های موردنیاز برای هر مدل در برخی موارد به‌سختی به دست می‌آید لذا جهت افزایش دقت نتایج، روش‌های مختلف باهم ترکیب می‌شوند (Hooshangi and Alesheikh, 2015). متأسفانه به علت محدودیت‌های مالی، فنی و یا سازمانی، ایستگاه‌های سنجش تابش خورشیدی در بیش‌تر مناطق جهان وجود ندارند. به عنوان مثال، در ایالات متحده آمریکا و انگلستان تابش خورشیدی در کم‌تر از یک درصد ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود و این نسبت در سراسر جهان به مراتب کوچک‌تر است (Thornton and Running, 1999; Rivington et al., 2002). علاوه بر این، برخی از تابش‌سنج‌های موجود نیز از دقت کافی برخوردار نیستند و داده‌های آن‌ها دارای خطا می‌باشد. مدل‌های فیزیکی از لحاظ مفهومی در برآورد غیرمستقیم تابش خورشید بر سطح زمین بسیار واقع‌گرا

هواشناسی حداکثر و حداقل دمای هوا، ابرناکی، رطوبت نسبی، دمای خاک، دمای نقطه شبنم، بارندگی، ساعت آفتابی، حداقل دید افقی و فشار بخار در ۶ ایستگاه هواشناسی کرمان، شیراز، زنجان، مشهد، یزد و بندرعباس مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. در این راستا تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های اقلیمی شش ایستگاه منتخب توسط دو مدل آنگستروم-پرسکات و روش ANFIS محاسبه و در آخر نتایج به تفکیک روزانه و ماهانه با نتایج حاصل از روش تجربی آنگستروم مورد مقایسه قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

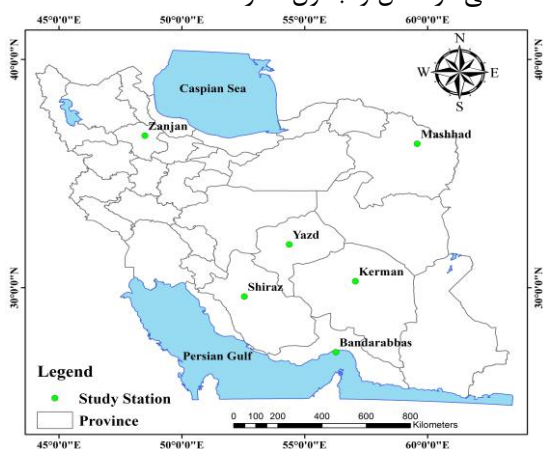
در این مطالعه، به منظور مدل‌سازی تابش خورشیدی از داده‌های هواشناسی حداقل و حداکثر دمای هوا (°C)، ابرناکی (%، میانگین دمای نقطه شبنم (°C)، میانگین دمای خاک (°C)، میانگین فشار بخار (Kpa)، میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح (cal m⁻²) و تعداد ساعت آفتابی شش ایستگاه هواشناسی همدیدی مشهد، شیراز، کرمان، بندرعباس، زنجان و یزد طی دوره ۱۱ ساله از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شدند. قبل از استفاده از داده‌ها در مدل‌های مورد مطالعه جهت برآورد تابش خورشیدی، داده‌های اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی و سایر متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌های مطالعاتی، مورد بررسی قرار گرفتند و خلأهای آماری و داده‌های پرت شناسایی و حذف شدند. این عمل موجب افزایش دقت و کارایی بهتر مدل‌های مذکور می‌شود. فرآیند کنترل کیفیت آمار تابش ایستگاه‌های مورد مطالعه بر مبنای الگوریتم کنترل کیفیت (Moradi 2009) انجام شد. داده‌های مربوط به متغیرهای مورد استفاده در ایستگاه‌های مطالعاتی در دوره آماری ۱۱ ساله از سال (۲۰۰۷-۲۰۱۷) می‌باشد که به صورت تصادفی در فرآیند تخمین تابش در مدل ANFIS به کار برده شدند. مدل بر اساس تأثیر متغیرهای اقلیمی (۸۰ درصد داده‌ها) بر میزان تابش خورشیدی دریافتی زمین، تابش کل خورشیدی را برآورد کرد که در مرحله آموزش نتایج برآورد شده تابش با ۲۰ درصد باقی داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله سنج‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفت. سنج‌های t، r، RMSE و MBE بر اساس نتایج برآورد شده و اندازه‌گیری شده در مرحله آزمایش محاسبه گردید و در نهایت به وسیله سنج

ایستگاه‌های تابش‌سنجی و عدم کیفیت مطلوب برخی داده‌های تابش خورشیدی ثبت شده، پیش‌بینی تابش خورشیدی به عنوان عامل مهم در کاربردهای متفاوت انرژی خورشیدی ضروری به نظر می‌رسد (Sabziparvar and Bayat, 2010). (Varkeshi, 2010). Piri et al., (2013) به کمک مدل (ANFIS) و مدل‌های تجربی آنگستروم و هارگریوز-سامانی تابش خورشیدی را برآورد کردند. در این پژوهش دو روش تجربی که به ترتیب مبتنی بر ساعت آفتابی و دمای هوا هستند، جهت برآورد تابش روزانه خورشید در دو شهر زاهدان و بجنورد واسنجی و ارزیابی شدند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از مدل نروفازی با مدل‌های تجربی مقایسه و مشخص شد که مدل نروفازی برآورد بهتری نسبت به دو مدل تجربی در برآورد تابش خورشیدی دارد. Mohammadi et al., (2015) یک برنامه هوشمند بر پایه ANFIS برای توسعه مدل تخمین تابش کلی روزانه با استفاده از ساعت آفتابی را به کار بردند. در این روش هدف تعیین میزان مناسب بودن روش ANFIS برای برآورد تابش بود. داده‌های اندازه‌گیری شده طولانی‌مدت ایستگاه طبس به منظور آزمون و آموزش مدل ANFIS استفاده شدند. نتایج آماری تطابق قابل‌اطمینانی با مدل ANFIS نشان دادند. مقایسه نتایج با مدل‌های تجربی نشان داد که ANFIS مناسب‌ترین مدل در برآورد تابش است. (Salisu 2017) با استفاده از مدل ANFIS با ورودی‌های دمای هوا و رطوبت نسبی به برآورد تابش پرداختند و عملکرد این مدل را مورد تأیید قرار دادند. (Halabi et al., 2018) به منظور برآورد تابش خورشید از روش ANFIS هیبرید استفاده کردند و برتری این روش را بر روش‌های دیگر نشان دادند. همچنین Quej et al., (2017) تطابق و عملکرد سه روش ANFIS، ANN و SVM جهت پیش‌بینی تابش کلی خورشیدی روزانه با استفاده از متغیرهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در پنیسولا، مکزیکو را ارزیابی کردند. عملکرد مدل با شاخص‌های آماری از قبیل RMSE، MAE و R² مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که SVM با استفاده از بیشینه و کمینه دمای هوا، تابش فراجو و بارندگی دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. بنابراین در این مطالعه کارایی سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد تابش خورشیدی با استفاده از متغیرهای

صورت گرفته است که نتایج خوبی را در تخمین تابش خورشیدی ارائه کرده است. یکی از مراحل مهم و اساسی برای کار با شبکه، انتخاب درست مقادیر اولیه متغیرهای هواشناسی است. در این مطالعه از کل داده‌های موجود ۸۰ درصد به عنوان مجموعه آموزشی و ۲۰ درصد برای آزمون شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. رابطه تجربی آنگستروم پرسکات اولین مدلی است که بر اساس، متغیر ساعات آفتابی، میزان تابش را بر روی سطح افقی برآورد کرده بود که این مدل و مدل‌های اصلاح شده آن در بین مدل‌های ارائه شده بیش‌ترین کاربرد را دارند (Daneshyar, 1978). رابطه آنگستروم-پرسکات توسط (Angstrom, 1924) معرفی و سپس توسط (Prescott, 1940) طبق معادله ۱ اصلاح شد که تا به امروز به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{R_s}{R_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (1)$$

در این معادله R_s تابش رسیده به سطح زمین، R_0 تابش فراوج، a و b ضرایب رابطه آنگستروم، n ساعت آفتابی و N بیشینه ساعت آفتابی می‌باشند. با استفاده از روش رگرسیون در نرم‌افزار Minitab16 بهترین ترکیب از مؤثرترین پارامترها جهت تخمین بهینه تابش در هر ایستگاه هواشناسی که دارای ضریب تأثیر بیش‌تری بودند مشخص و در شبکه ANFIS به عنوان ورودی جهت برآورد تابش به کار گرفته شد. بررسی‌ها در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه انجام گرفته است. در مقیاس زمانی ماهانه، آمار متوسط ماهانه ایستگاه‌های تابش‌سنجی موردنظر با استفاده از میانگین‌گیری محاسبه و بررسی گردید. پراکنش جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی در شکل و جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مطالعاتی در ایران

Figure 1 – Location of the study Stations in Iran

t میزان تطابق نتایج برآورد تابش و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دو مدل آنگستروم و ANFIS بررسی شدند.

روش‌ها

ANFIS سیستم استنتاج هیبریدی می‌باشد که ترکیبی از تکنیک یادگیری قدرتمند شبکه‌های عصبی مصنوعی و قوانین فازی می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تابش دریافتی می‌توانند ارتباط غیرخطی بین متغیرها را آشکار سازند. اگر عملکردهای منطق فازی، در شبکه‌های عصبی و یادگیری شرکت داده شوند و طبقه‌بندی کردن شبکه‌های عصبی در سیستم‌های فازی شریک گردانیده شوند، آنگاه نواقص شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی پوشش داده شده‌اند. نتیجه این کار، یک شبکه عصبی مصنوعی-فازی خواهد بود (Joorabian and Hooshmand, 2005). به‌طورکلی در اجرای سیستم‌های فازی، شبکه‌های عصبی می‌توانند نقش‌های مهمی از جمله محاسبه توابع عضویت، فازی‌سازی ورودی، پیاده‌سازی توابع عضویت، ترکیب توابع عضویت و غیر فازی کردن کمیت‌های فازی برای به دست آوردن خروجی‌های قطعی را ایفا کنند (Joorabian et al., 2005). ساختار ANFIS شامل پنج لایه است، این ساختار متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع عضویت ورودی و خروجی انتخاب می‌گردد. در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. تکنیک ANFIS از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی دارد. همچنین دارای این مزیت است که اجازه استخراج قوانین فازی را از اطلاعات عددی یا دانش متخصص می‌دهد و به طور تطبیقی یک قاعده-بنیاد می‌سازد. علاوه بر این، می‌تواند تبدیل پیچیده هوش بشر به سیستم‌های فازی را تنظیم کند (Jang et al., 1997) و قانون یادگیری آن بر پایه الگوریتم پس‌انتشار خطا بین خروجی شبکه و خروجی واقعی می‌باشد. در این پژوهش با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، مدل‌سازی به روش ANFIS انجام شد. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از این شبکه‌ها به عنوان ابزاری برای مطالعات متغیرهای اقلیمی

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1- Geographical and climatic characteristics of the study stations

Station	The length of the records	Climate classification (De martonne)	Longitude (degree)	Latitude (degree)	Elevation (m)
Kerman	2007-2017	Cold Extra-Arid	57.06	30.29	1753.8
Mashhad	2007-2017	Cold Arid	59.58	36.31	999.2
Shiraz	2007-2017	Cold Arid	52.54	29.62	1484
Zanjan	2007-2017	Cold semi-Arid	48.49	36.66	0.1663
Yazd	2007-2017	Moderate Extra-Arid	54.37	31.9	1273.2
Bandarabbas	2007-2017	Warm Extra-Arid	56.27	27.18	9.8

نتایج و بحث

بررسی کارایی رابطه آنگستروم در برآورد مقادیر

تابش کل دریافتی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه

مقادیر تابش خورشیدی در ایستگاه‌های مطالعاتی با معادله آنگستروم-پرسکات برآورد شدند. ضرایب مورد استفاده در این معادله (Aghashariatmadari et al., 2011) و همچنین مقادیر ضریب تبیین (R^2) مربوط به نمودار پراکنش مقادیر تابش خورشیدی به دست آمده از این معادله و مقادیر اندازه‌گیری شده در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب رابطه آنگستروم ایستگاه‌های مورد مطالعه و

ضریب تبیین داده‌های روزانه و ماهانه

Table 2- the Angstrom coefficient of study stations and the coefficient of determination of daily and monthly data

Station	$R^2_{monthly}$	R^2_{daily}	b	a
Bandarabbas	0.65	0.81	0.37	0.29
Kerman	0.72	0.75	0.40	0.35
Mashhad	0.83	0.75	0.31	0.34
Shiraz	0.64	0.92	0.31	0.39
Yazd	0.89	0.76	0.40	0.37
Zanjan	0.65	0.86	0.28	0.42

داده‌های روزانه و میانگین‌های ماهانه کسر ساعت آفتابی به عنوان ورودی به مدل آنگستروم وارد و نسبت R_s به R_0 محاسبه شد. سنج‌های آماری t ، R^2 ، t ، MBE و MSE به منظور برآورد کارایی مدل در برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه محاسبه شدند و از آنجا که در محاسبه سنجه t ، دو سنجه $RMSE$ و MBE به صورت توأمان به کار می‌روند، این سنجه دارای برآورد بهتری از میزان کارایی مدل مورد نظر می‌باشد که این امر باعث شد در نهایت مقادیر سنجه t به عنوان معیار ارزیابی کارایی مدل مورد بررسی قرار گیرند. در ایستگاه کرمان مقدار سنجه t حاصل از مدل آنگستروم در مقیاس زمانی روزانه برابر $20/16$ و در مقیاس زمانی ماهانه برابر $6/74$ و کم‌تر از مقدار روزانه

است که نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل آنگستروم در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. در ایستگاه مشهد مقدار سنجه t به دست آمده از مدل آنگستروم در مقیاس زمانی روزانه $36/31$ و در مقیاس زمانی ماهانه $9/53$ می‌باشد. مشاهده شد که مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه کم‌تر است و بیان‌گر بهتر بودن برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. در ایستگاه یزد مقدار سنجه t محاسبه شده از نتایج مدل آنگستروم در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب برابر $34/91$ و $8/38$ می‌باشد. با مقایسه مقادیر سنجه t مشاهده شد که مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه کم‌تر از مقدار آن در مقیاس روزانه بوده و این امر نشان‌گر کارایی بهتر مدل آنگستروم در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. در ایستگاه بندرعباس مقدار سنجه t به دست آمده از مدل آنگستروم در ایستگاه بندرعباس در مقیاس زمانی روزانه $49/96$ و در مقیاس زمانی ماهانه $9/71$ می‌باشد. مشاهده می‌شود مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه کم‌تر است که بیان‌گر بهتر بودن برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. در ایستگاه شیراز مقادیر سنجه t حاصل از برآورد تابش خورشیدی توسط مدل آنگستروم در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب برابر $28/90$ و $4/68$ می‌باشد که مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه کم‌تر از مقدار متناظر آن در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد که نشان‌گر عملکرد بهتر مدل در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. در ایستگاه زنجان مقدار سنجه t حاصل از مدل آنگستروم در مقیاس زمانی روزانه $2/39$ و در مقیاس زمانی ماهانه $0/59$ می‌باشد. مشاهده می‌شود مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه کم‌تر است که بیان‌گر بهتر بودن برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. نمودار پراکنش مقادیر ضریب گذرای جو به دست آمده از مدل آنگستروم-پرسکات در برابر ضریب گذرای جو مشاهده شده

مؤثر در برآورد تابش دریافتی است که شبکه بر اساس ارتباط بین ورودی‌ها و داده‌های تابش خورشیدی که به شبکه داده می‌شود قوانینی را ایجاد می‌کند که بر اساس آن‌ها تابش خورشیدی برآورد می‌شود. تعداد ورودی‌های شبکه می‌تواند بر دقت برآورد داده‌های تابش خورشیدی مؤثر باشد. به طوری که با کاهش تعداد ورودی‌های ANFIS از شش ورودی به سه ورودی مقدار سنجه t افزایش و مقدار ضریب تأثیر ترکیب موردنظر از متغیرها در نرم‌افزار Minitab کاهش یافت و با افزایش ورودی‌ها تا شش متغیر و بیش‌تر، مقدار ضریب تأثیر ترکیب متغیرها کاهش یافت؛ بنابراین ترکیب متغیرهایی که تأثیر بیش‌تری روی مقدار تابش دریافتی در سطح زمین داشتند توسط نرم‌افزار Minitab و مقدار سنجه t حاصل از پیش‌بینی تابش دریافتی، شناسایی و مورد استفاده قرار گرفتند. متغیرهای ساعت آفتابی و ابرناکی بیش‌ترین تأثیر را در دقت پیش‌بینی داشتند.

در دوره آماری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ رسم شده است.

بررسی کارایی سیستم استنتاج تطبیقی نروفازی (ANFIS) در برآورد مقادیر تابش کل خورشیدی

در ادامه کارایی سیستم استنتاج نروفازی برای برآورد تابش خورشیدی در شش ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت. ANFIS سیستم استنتاج هیبریدی و ترکیبی از تکنیک یادگیری قدرتمند شبکه‌های عصبی مصنوعی و قوانین فازی می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تابش دریافتی می‌تواند ارتباط غیرخطی بین متغیرها را آشکار سازد که در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از این شبکه‌ها به عنوان ابزاری برای مطالعات متغیرهای اقلیمی صورت گرفته است. انتخاب درست مقادیر اولیه متغیرهای هواشناسی از مراحل مهم و اساسی برای کار با شبکه است. ورودی شبکه ANFIS ترکیبی از چند متغیر هواشناسی

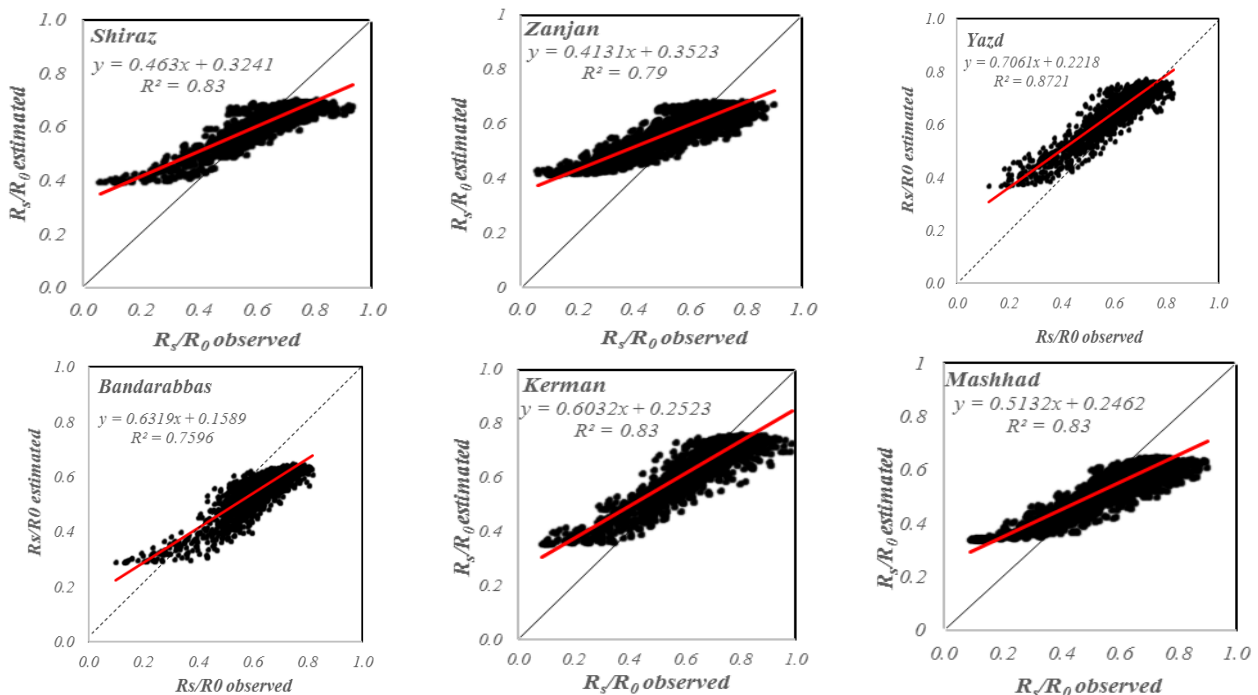


Figure 2- the scatter plot of measured daily values of radiation and estimated values using the Angstrom model in the study stations

شکل ۲- نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده روزانه تابش و مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل آنگستروم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

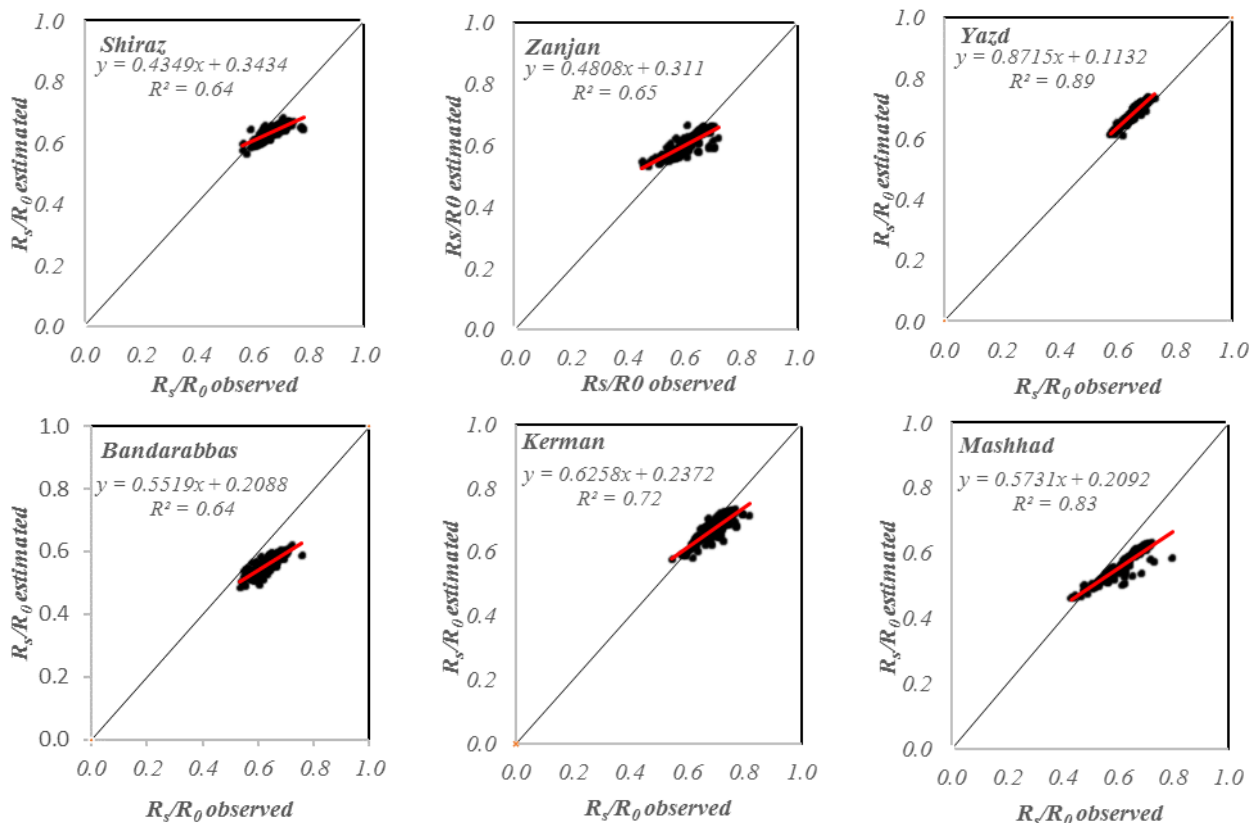


Figure 3- The scatter plot of measured monthly values of radiation and estimated values using the Angstrom model in the study stations

شکل ۳- نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری ماهانه تابش و مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل آنگستروم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

متغیرهای هواشناسی دمای نقطه شبنم، ابرناکی، فشار بخار، دمای خاک، دمای حداکثر و دمای حداقل هوا و کسر ساعت آفتابی می‌باشد که این ترکیب از ورودی‌ها به منظور برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه و روزانه مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۳). مقدار سنجه t حاصل در مقیاس روزانه برابر $7/52$ و مقدار ماهانه آن برابر $0/29$ می‌باشد که پایین بودن مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه نشانگر بهتر بودن نتایج برآورد تابش خورشیدی حاصل از به کار بردن میانگین‌های ماهانه متغیرهای هواشناسی به عنوان ورودی می‌باشد. در بررسی تأثیر متغیرهای هواشناسی بر برآورد تابش خورشیدی در استان فارس بهترین ترکیب از متغیر با ضریب تبیین بالاتر نسبت به سایر ترکیب متغیرهای هواشناسی شامل داده‌های دمای نقطه شبنم، ابرناکی، فشار بخار، دمای خاک، میانگین دمای هوا و کسر ساعت آفتابی انتخاب و به عنوان ورودی شبکه به منظور برآورد تابش در مقیاس زمانی روزانه مورداستفاده قرار گرفت (جدول ۳).

متغیرهای هواشناسی مورد استفاده در سیستم استنتاج نروفازی به منظور برآورد تابش خورشیدی در هر ایستگاه در جدول ۳ ارائه شده است. ورودی‌های به کار برده شده شبکه ANFIS به منظور برآورد مقدار تابش خورشیدی در ایستگاه‌های مختلف شامل متغیرهای هواشناسی دمای نقطه شبنم، ابرناکی، فشار بخار، دمای خاک، میانگین دمای هوا و کسر ساعت آفتابی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه می‌باشد (جدول ۳). این ترکیب از ورودی، توسط نرم‌افزار Minitab با روش best subset از بین سایر متغیرها با بالاترین مقدار ضریب تبیین (R^2) مشخص شد و به منظور برآورد تابش خورشیدی ماهانه و روزانه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از آموزش مدل با داده‌های آموزشی ($0/80$) و مرحله آزمایشی (20% داده‌ها) در جدول ۴ آمده است. در ایستگاه کرمان مقدار سنجه t حاصل از مدل ANFIS در مقیاس زمانی روزانه $4/78$ و در مقیاس زمانی ماهانه برابر صفر می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل ANFIS در برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه در این ایستگاه می‌باشد. همچنین در ایستگاه مشهد ورودی‌های شبکه

جدول ۳- متغیرهای هواشناسی مورد استفاده در مدل ANFIS

Table 3- Meteorological variables that used in ANFIS

Station	Cloudiness	Relative humidity	Steam air pressure	Sunshine duration	Air Temperature				
					Max	Min	Mean	Soil.	Dew point
Kerman	*		*	*			*	*	*
Mashhad	*		*	*	*	*		*	*
Shiraz	*		*	*			*	*	*
Zanjan	*	*	*	*		*		*	*
Yazd	*		*	*			*	*	*
Bandarabbas	*		*	*			*	*	*

جدول ۴- ارزیابی آماری مدل ANFIS

Table 4- Statistical evaluation of ANFIS model

Station	ANFIS							
	Test				Train			
	Daily		Monthly		Daily		Monthly	
	RMSE (MJ m ⁻²)	R (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	R (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	R (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	R (MJ m ⁻²)
Kerman	0.04	0.93	0.015	0.92	0.047	0.93	0.02	0.91
Mashhad	0.05	0.93	0.06	0.95	0.05	0.93	0.03	0.93
Shiraz	0.035	0.93	0.14	0.82	0.04	0.93	0.02	0.90
Zanjan	0.14	0.94	0.044	0.93	0.05	0.93	0.01	0.99
Yazd	0.035	0.95	0.03	0.94	0.03	0.95	0.15	0.91
Bandarabbas	0.1	0.90	0.024	0.89	0.023	0.97	0.02	0.81

دمای حداقل هوا، ابرناکی، رطوبت نسبی و کسر ساعت آفتابی می‌باشد. مقدار سنجه t محاسبه شده از نتایج برآورد تابش خورشیدی توسط مدل ANFIS در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در ایستگاه یزد به ترتیب برابر $۳/۹۳$ و $۰/۲۱$ به دست آمد. کم‌تر بودن مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه نشان‌دهنده بهتر بودن نتایج برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه است (جدول ۵ و ۶). ورودی‌های شبکه به منظور برآورد تابش در مقیاس زمانی روزانه در ایستگاه زنجان شامل داده‌های فشار بخار هوا، دمای نقطه شبنم، دمای حداقل هوا، ابرناکی، رطوبت نسبی و کسر ساعت آفتابی و در مقیاس زمانی ماهانه شامل داده‌های متغیرهای هواشناسی دمای نقطه شبنم، ابرناکی، فشار بخار، دمای خاک، میانگین دمای هوا و کسر ساعت آفتابی می‌باشد (جدول ۳)؛ که دارای ضریب تبیین (R^2) بالاتری نسبت به سایر ترکیب‌های متغیرهای هواشناسی بودند. مقدار سنجه t محاسبه شده از نتایج برآورد تابش خورشیدی توسط مدل ANFIS در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در ایستگاه زنجان به ترتیب برابر $۲/۲۰$ و $۰/۴۴$ به دست آمد.

ورودی‌های شبکه در مقیاس زمانی ماهانه در این ایستگاه شامل داده‌های متوسط دمای هوا، بارش، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، دمای خاک و کسر ساعت آفتابی می‌باشد. مقادیر سنجه t حاصل از برآورد تابش خورشیدی توسط مدل ANFIS در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب برابر $۳/۲۵$ و $۰/۵۹$ می‌باشد که مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه کمتر از مقدار متناظر آن در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. همچنین در ایستگاه یزد از بین ۱۰ متغیر هواشناسی دریافت شده از سازمان هواشناسی، ترکیب شش متغیر هواشناسی شامل داده‌های دمای نقطه شبنم، ابرناکی، فشار بخار، دمای خاک، میانگین دمای هوا و کسر ساعت آفتابی جهت برآورد تابش خورشیدی دارای ضریب تبیین (R^2) بالاتری در مقیاس زمانی روزانه بودند و به عنوان ورودی شبکه جهت برآورد تابش خورشیدی روزانه مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۳). ترکیب ورودی شبکه به منظور برآورد ماهانه تابش خورشیدی شامل داده‌های فشار بخار، دمای نقطه شبنم،

در مقیاس زمانی روزانه ۰/۲۶ و در مقیاس زمانی ماهانه برابر ۰/۲۰ می‌باشد که نشان‌گر کارایی بهتر مدل ANFIS در برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه در این ایستگاه می‌باشد. نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده تابش خورشیدی با روش ANFIS در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

کم‌تر بودن مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه نشان‌گر بهتر بودن نتایج برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. همچنین در ایستگاه بندرعباس ورودی شبکه ANFIS به منظور برآورد مقدار تابش خورشیدی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه متغیرهای هواشناسی دمای نقطه شبنم، ابرناکی، فشار بخار، دمای خاک، میانگین دمای هوا و کسر ساعت آفتابی می‌باشد. مقدار سنجه t حاصل از مدل ANFIS

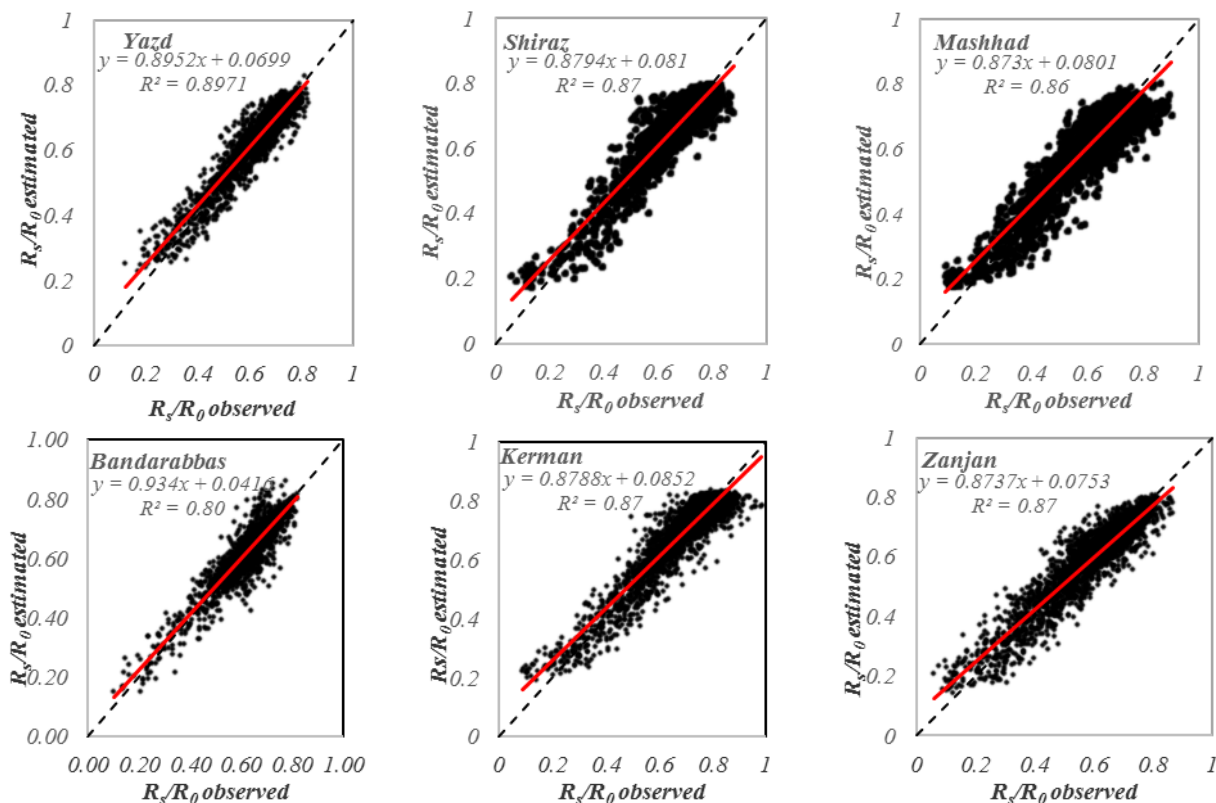


Figure 4- the scatter plot of measured daily values of radiation and estimated values using the ANFIS model of meteorological stations in the study stations

شکل ۴- نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده در مقیاس زمانی روزانه تابش خورشیدی با استفاده از مدل ANFIS ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

ماهانه می‌باشد. این امر به دلیل حذف تأثیر شرایط متغیر هواشناسی روزانه بر مقدار تابش دریافتی در سطح زمین با استفاده از میانگین‌گیری ماهانه می‌باشد؛ بنابراین با میانگین‌گیری داده‌های تابش و سایر متغیرهای هواشناسی میزان تأثیر داده‌های پرت و خطاهای ثبت داده‌ها، روی برآورد تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه بسیار کم‌تر از مقادیر روزانه می‌باشد. به‌گونه‌ای که این خطاها تعدیل می‌شوند. از سنجه t برای مقایسه کارایی دو مدل آنگستروم و ANFIS در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه استفاده شد، مقدار سنجه t با کارایی مدل رابطه عکس دارد. با

مقایسه کارایی رابطه آنگستروم و ANFIS در برآورد مقادیر تابش کل دریافتی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه

با مقایسه نتایج حاصل از مدل ANFIS در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه مقدار سنجه t در مقیاس زمانی ماهانه نسبت به مقدار t در مقیاس زمانی روزانه پایین‌تر می‌باشد. بر اساس سنجه t برآورد تابش خورشیدی ماهانه بهتر از مقیاس زمانی روزانه انجام شده است. مقایسه مقادیر سنجه t در مدل آنگستروم نیز در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه نشان‌گر کارایی بهتر این مدل در مقیاس زمانی

فازی در برآورد تابش خورشیدی نسبت به مدل آنگستروم می‌باشد. نتایج سنجه‌های آماری در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه دو مدل آنگستروم و ANFIS در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

مقایسه نتایج دو مدل آنگستروم و ANFIS مشاهده می‌شود که در هر دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه مدل ANFIS دارای مقدار سنجه t کمتری نسبت به مدل آنگستروم است که بیان‌کننده عملکرد بهتر شبکه عصبی-

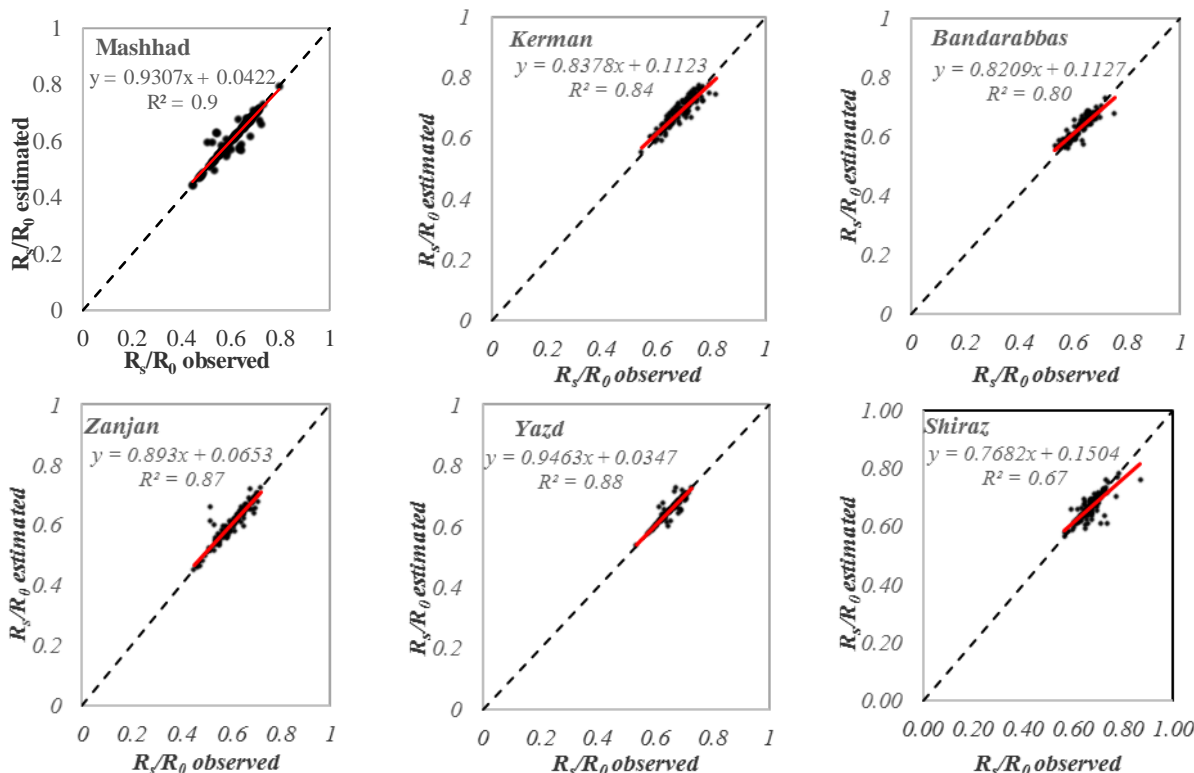


Figure 5- the scatter plot of measured Monthly values of radiation and estimated values using the ANFIS model of meteorological stations in the study stations

شکل ۵- نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده تابش خورشیدی در مقیاس زمانی ماهانه، با استفاده از مدل ANFIS ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

جدول ۵- مقادیر روزانه سنجه‌های آماری مورد بررسی مربوط به دو مدل آنگستروم و ANFIS

Table 5- Daily values of statistical error indices related to Angstrom and ANFIS Models

Station	ANFIS				Angstrom			
	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	r	t	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	r	t
Kerman	0.04	0.01	0.93	4.78	0.07	-0.02	0.91	20.16
Mashhad	0.05	0.01	0.93	7.52	0.09	-0.06	0.91	36.31
Shiraz	0.035	-0.004	0.93	3.25	0.08	-0.04	0.91	28.90
Zanzan	0.14	0.01	0.94	2.20	0.09	-0.004	0.89	02.39
Yazd	0.035	0.005	0.95	3.93	0.05	0.03	0.93	34.91
Bandarabbas	0.1	-0.001	0.90	0.26	0.09	-0.07	0.87	49.96

جدول ۶- مقادیر ماهانه سنجه‌های آماری مورد بررسی مربوط به دو مدل آنگستروم و ANFIS

Table 6- Monthly values of statistical error indices related to Angstrom and ANFIS Models

Station	ANFIS				Angstrom			
	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	r	t	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	r	t
Kerman	0.015	0.004	0.92	0	0.034	-0.02	0.85	6.74
Mashhad	0.06	0.004	0.95	0.29	0.06	-0.05	0.91	9.53
Shiraz	0.14	0.017	0.82	0.59	0.07	0.031	0.80	4.68
Zanzan	0.044	0.004	0.93	0.44	0.046	-0.002	0.81	0.59
Yazd	0.03	0.001	0.94	0.21	0.038	0.028	0.95	8.38
Bandarabbas	0.024	0.001	0.89	0.20	0.088	-0.08	0.80	9.71

نتیجه‌گیری

مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. با مقایسه مقادیر سنجه t حاصل از برآورد تابش خورشیدی توسط دو مدل ANFIS و آنگستروم در هر شش ایستگاه مورد مطالعه، کمتر بودن مقدار سنجه t حاصل از نتایج مدل ANFIS نشان می‌دهد مدل ANFIS جهت برآورد تابش خورشیدی کارایی بهتری نسبت به مدل تجربی آنگستروم دارد. نتایج این بررسی قابل مقایسه با مطالعات (Quej et al., 2017; Zou et al., 2017 and Mohammadi et al., 2015) می‌باشد که تمامی این مطالعات توانایی بالاتر روش ANFIS در برآورد تابش خورشیدی را تأیید می‌کنند. بنابراین به دلیل دقت بالای مدل ANFIS، می‌توان از این مدل برای برآورد تابش خورشیدی در ایستگاه‌هایی که تابش سنج خورشیدی ندارند به ویژه مناطقی با تابش خورشیدی کم مانند استان‌های شمالی کشور که در اکثر روزهای سال ابری هستند به دلیل مدل‌سازی دقیق تأثیر متغیرهای هواشناسی بر میزان تابش دریافتی استفاده کرد.

این مطالعه با هدف بررسی کارایی سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS) در برآورد تابش کل خورشیدی انجام گرفت. به این منظور از خاصیت تأثیر متغیرهای اقلیمی بر مقادیر تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین در شش استان جهت برآورد مقادیر تابش خورشیدی در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه استفاده و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از رابطه تجربی آنگستروم مقایسه شد. مقادیر سنجه آماری t جهت مقایسه نتایج حاصل از دو مدل محاسبه شد. تحلیل آماری سنجه‌های خطا نشان می‌دهد که سنجه t حاصل از هر دو مدل ANFIS و آنگستروم در مقیاس زمانی روزانه در هر شش ایستگاه هواشناسی دارای مقادیر بالاتری نسبت به مقادیر به دست آمده در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد. این امر بیان‌کننده کارایی بهتر دو مدل در مقیاس زمانی ماهانه می‌باشد و این به دلیل حذف تأثیر شرایط متغیر هواشناسی در مقیاس زمانی روزانه بر مقدار تابش دریافتی در سطح زمین با میانگین‌گیری داده‌های متغیرهای هواشناسی در

منابع

- Aghashariatmadari, Z., Khalili, A., Irannejad, P., Liyaghat, A. 2011. Calibration Annual Changes of the Coefficients of the Angstrom-Prescott (A-P) Equation (a and b) in Different Time Scale (Case study: Tehran North Station (Aghdasieh). *Journal of Water and Soil*, 25(4): 5-911. (in Farsi)
- Almorox, J. Y., Hontoria, C. 2004. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10): 1529-1535.
- Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210): 121-126.
- Daneshyar, M. (1978). Solar radiation statistics for Iran. *Solar Energy; (United States)*, 21(4): 345-349.
- Halabi, L., Mekhilef, S., Hossain, M. 2018. Performance evaluation of hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system models for predicting monthly global solar radiation. *Applied energy*, 213: 247-261.
- Haykin, K. 1994. *Neural network, A comprehensive foundation*. MacMillan Press.
- Hooshangi, N., Alesheikh, A. 2015. Evaluation of Scientific Research Journal of Surveying Science and Technology, 4(3):187-200. (in Farsi)
- Jang, J. S. R., Sun. C. T., Mizutani, E. 1997. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Joorabian, M., Hooshmand, R, 2003, *Fuzzy logic and neural networks (concepts and applications)*, Shahid Chamran University of Ahvaz, 300 pages. (In Farsi)
- Joorabian, M., Zare, T., Ostvar, A. 2005. *Artificial neural networks*, Shahid Chamran University of Ahvaz, 716 pages. (In Farsi)
- Mohammadi, K., Shamsirband, S., Tong, C. W., Alam, K. A., Petković, D. 2015. Potential of adaptive neuro-fuzzy system for prediction of daily global solar radiation by day of the year. *Energy Conversion and Management*, 93: 406-413.
- Moradi, I. 2009. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy*, 34(1): 1-6.
- Muneer, T., Gueymard, C., Kambezidis H. 2004. *Solar radiation and day light models*. Burlington. Elsevier. 392 pages.
- Piri, J., Ansari, H; Faridhosseini, A. 2013.

- fuzzy, neural and fuzzy-neural methods in estimating solar radiation in the country. experimental models and ANFIS. (Case study: Zahedan and Bojnoord stations). *Journal of Iran Energy*, 16(3): 37-58. (in Farsi)
- Prescott, J. A. 1940. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 46: 114-118.
- Quej, V. H., Almorox, J., Arnaldo, J. A., Saito, L. 2017. ANFIS, SVM and ANN soft-computing techniques to estimate daily global solar radiation in a warm sub-humid environment. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 155: 62-70.
- Rivington, M., Matthews, K. B., Buchan, K. 2002. A Comparison of Methods for Providing Solar Radiation Data to Crop Models and Decision Support Systems.
- Sabziparvar, A. A., Bayat Varkeshi, M. 2010. Evaluate the accuracy of artificial neural network and neuro fuzzy methods in simulated solar radiation. *Iranian Journal of physics Research*, 10(4): 347-357. (In Farsi)
- Modeling of solar radiation by using
- Salisu, S. 2017. New model for solar radiation estimation from measured air temperature and relative and humidity in Nigeria. *Journal Publishing Practices and Standards (JPPS)*, 36(3): 917-922.
- Thornton, P. E., Running, S. W. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93(4): 211-228.
- Yorukoglu, M., Celik, A. N. 2006. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16): 2441-2450.
- Zou, L., Wang, L., Xia, L; Lin, A., Hu, B., Zhu, H. 2017. Prediction and comparison of solar radiation using improved empirical models and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems. *Renewable Energy*, 106: 343-353.



Evaluation of Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) performance in global solar radiation estimation

H. Ebrahimi¹, Z. Aghashariatmadari^{2*}, S. Hejabi³, A. Nazi Ghameshlou⁴

Received: 15/03/2019

Accepted: 22/07/2020

Abstract

Solar radiation plays an important role in surface energy balance and agroclimatic studies. In order to estimate daily global solar irradiance, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) was used and compared with extended Angstrom Prescott model using 11-years data (2007-2017) climatic data of 6 meteorological stations across Iran namely, Mashhad, Kerman, Shiraz, Yazd, Zanzan and Bandar Abbas. The daily weather data including sunshine duration(n), Relative humidity (RH%), Dew point temperature (T_d), water vapor pressure, maximum/Minimum air temperature, mean air temperature, cloudiness and soil temperature were used as inputs of ANFIS model to estimate the daily solar radiation, as the output. Performance of two models was evaluated using t-student index. According to the results, ANFIS model did a better job in estimation of solar radiation comparing to Angstrom-Prescott model as it showed closer agreement with observed data. For evaluation of each model's skill in estimating solar radiation at daily and monthly time scales, the statistical indices of RMSE, MBE, r, t were used. Finally, the obtained values of t-test statistic of radiation estimation using ANFIS model, in Kerman, Mashhad, Shiraz, Zanzan, Yazd and Bandar Abbas station in daily time scale were 4.78, 7.52, 3.25, 2.20, 93.3, and 0.26, respectively. The corresponding monthly values were 0, 0.29, 0.59, 0.44, 0.21, and 0.20 respectively. Similarly, the t-index of radiation estimations by Angstrom model compared to observations for daily time scale were also 20.16, 36.31, 28.90, 2.39, 34.91 and 49.96, respectively. For monthly series, t values were 6.74, 9.53, 4.68, 0.59, 8.38 and 9.71, respectively. According to the findings of this study, the nonlinear modeling process of ANFIS model improves the estimation of solar radiation compared to the Angstrom-Prescott method.

Keywords: Radiation, ANN, Nonlinear modeling, Angstrom-Prescott model



¹ M. Sc. Student in Agricultural Meteorology, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

² Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran
(*Corresponding Author Email Address: zagha@ut.ac.ir)

³ Assistant Professor, Department of Water, Faculty of Agriculture, Urmia University

⁴ Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

نحوه ارجاع مقاله:

ابراهیمی، ح.، آقاشریعتمداری، ز.، حجایی، س.، نازی قمشلو، آ. ۱۳۹۹. ارزیابی کارایی سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد تابش کل خورشیدی. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۸(۱): ۳-۱۴. DOI: 10.22125/agmj.2020.170508.1056

Ebrahimi, H., Aghashariatmadari, Z., Hejabi, S., Nazi Ghameshlou, A. 2020. Evaluation of Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) performance in global solar radiation estimation. Journal of Agricultural Meteorology, 8(1): 3-14. DOI: 10.22125/agmj.2020.170508.1056