# مدل‌سازی تابش خورشید رسیده به زمین با استفاده از ANFIS و مدل‌های تجربی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های زاهدان و بجنورد)

جمشید پیری[۱]، حسین انصاری[۲]، علیرضا فرید حسینی[۳]

**تاریخ دریافت مقاله:**
۱۳۹۲/۰۳/۱۵

**تاریخ پذیرش مقاله:**
۱۳۹۲/۰۵/۱۰

**کلمات کلیدی:**
تـابش خورشـیدی، نروفـازی و مدل‌های تجربی

**چکیده:**

مقدار انرژی خورشیدی که وارد زمین می‌شود، تابش ورودی (solar radidition) نام دارد. تابش ورودی مجموعه ای از طول موج های فرابنفش، قابل رویت و فروسرخ است. تابش خورشید رسیده به زمین یکی از پارامترها ی مورد نیاز برای مطالعات منابع آب، محیطزیست و کشاورزی است. این پارامتر بندرت در ایستگاه های هواشناسی اندازه گیری می‌شود و از این رو، روش های تجربی زیادی برای برآورد آن با استفاده از سایر پارامترهای هواشناسی ارائه شده است. در این تحقیق، به کمک مدل نروفازی(ANFIS) و مدل های تجربی انگستروم و هارگریوز – سامانی تابش خورشید را برآورد می کنند. برای یافتن مدل مناسب برآورد شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح از داده های تابش ایستگاه‌های سینوپتیک استانهای سیستان و بلوچستان و خراسان شمالی در دوره آماری به ترتیب پنج ساله و هفت ساله استفاده گردید که این داده ها شامل آمار ساعات آفتابی، دمای حداکثر ، دمای حداقل و رطوبت نسبی متوسط می باشد. برای آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی مدل‌ها به ترتیب از ۶۰٪، ۲۵٪ و ۱۵٪ داده های فوق استفاده گردید. در این تحقیق، دو روش تجربی که به ترتیب مبتنی بر ساعات آفتابی و دمای هوا هستند، جهت برآورد تابش روزانه خورشید درد و شهر زاهدان و بجنورد واسنجی و ارزیابی شدند. همچنین نتایج بدست آمده از مدل نروفازی با مدل های تجربی مقایسه و مشخص شد که مدل نروفازی براورد بهتری نسبت به دو مدل تجربی در بر آورد تابش دارد.

۱) مربی گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل(نویسنده مسئول) jamshid_eng@yahoo.com
۲) دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۳) استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

**مقدمه**

انرژی تابشی خورشید سرمنشأ انرژی های روی کره زمین است که یکی از منابع مهم انرژی پاک بویژه درکشور ماست. اندازه گیری شدت تابش خورشیدی، اگرچه در ایران دارای سابقه نسبتاً طولانی است ولیکن به دلیل هزینه بالا، اکثر ایستگاه‌های موجود در کشور مجهز به دستگاه اندازه‌گیری نیستند، در عوض، در غالب این ایستگاه ها پارامتر ساعات آفتابی به طور روزانه اندازه گیری می شود.[۲۱] از آنجا که اطلاع از شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح نسبت به زمان ساعات آفتابی اهمیت بیشتری دارد، لذا شناسایی روش‌های تخمین شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح، از آمار موجود (ساعات آفتابی و غیره) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا بتوان رابطه‌ای برای تخمین شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح از روی داده های موجود به دست آورد. تابش خورشید رسیده به زمین، یکی از پارامترها ی مهم درمدل های بیلان انرژی، رشد گیاهان، تولید محصول و تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل است. علیرغم اهمیت این پارامتر، اندازه گیری آن به طور محدودی انجام می شود و این نقیصه نه تنها در کشورهای در حال توسعه بلکه در کشورهای توسعه یافته نیز به چشم می‌خورد. [ ۱۸] دستگاه اندازه گیری این پارامتر گران بوده و غالب ایستگاه های هواشناسی فاقد آن می‌باشند. همچنین این دستگاه به علت حساس بودن، نیاز به مراقبت های زیاد دارد و باید مرتباً واسنجی شود. از این رو، مدل‌های تجربی زیادی برای تخمین این پارامتر با استفاده از پارامترهای ساده هواسنجی ارائه شده است. ساعات آفتابی روزانه، بیشینه دما و کمینه دمای روزانه هوا و رطوبت نسبی پارامترهایی هستند که در اکثر مدل های تجربی از آنها استفاده می شود.[۱۶] دسترسی به پارامترها ی هواشناسی که به عنوان ورودی مدل‌های تابش رسیده به زمین استفاده می شوند، عامل مهمی درانتخاب مدل مناسب برای هر منطقه است. طی دهه های گذشته، محققان زیادی معادلات تجربی مختلفی برای تخمین تابش خورشید با استفاده از سایر پارامترهای هواشناسی ارائه نمودند که می توان آنها را در سه گروه مبتنی بر ابرناکی [۳]، ساعات آفتابی [۲] و دما [ ۱۹و ۱۸] تقسیم بندی نمود. به طور کلی، معادلات مبتنی بر ساعات آفتابی با ضرایب واسنجی شده نسبت به دو گروه دیگر معادلات مبتنی بر ابرناکی و دما برای تخمین تابش خورشید از دقت بالاتری برخوردارند.[۱۹] از میان مدل-های تابش مبتنی بر ساعات آفتابی، مدل انگستروم[۲] معروف‌ترین مدل شناخته شده است که برای تخمین تابش خورشید در بسیاری از مدل های هیدرولوژیکی و کشاورزی استفاده می‌شود. علیزاده و خلیلی با استفاده از داده های هواشناسی شهر مشهد ضرایب معادله انگستروم را a=۰/۲۳ و b=۰/۴۴ با دقت مناسبی تخمین زدند.[۱] برخی تحقیقات نشان داده که چنانچه این مدل برای هر منطقه واسنجی شود، نتایج دقیق تری نسبت به مدل های مبتنی بر دما و ابرناکی ارائه می‌دهد[ ۱۵ و ۶] . نتایج واسنجی مدل انگستروم در مناطق مختلف نشان داد که ضرایب این مدل در مناطق مختلف تغییر می‌کنند. مدل انگستروم و هر مدلی که آثار جذب تابش خورشید توسط ذرات موجود در جو را در نظر نگیرد، باید ضرایب آن واسنجی شود [۲۰] هارگریوز و سامانی[۵] با استفاده از اختلاف دمای بیشینه و کمینه روزانه هوا، مدلی برای برآورد تابش خورشید ارائه دادند. این مدل یکی از کاربردی‌ترین مدل های مبتنی بر دمای هواست.[۱۸] علاوه بر معادلات

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

تجربی، طی سالهای اخیر روش های جدید پردازشی مبتنی بر معادلات غیر خطی و هوش مصنوعی نیز برای تخمین تابش خورشیدی توسط محققان مختلف به کار گرفته شده است. رگرسیون خطی محلی یکی از تکنیک های ناپارامتری است که با تقسیم فضای مدل‌سازی به تعداد زیادی از ناحیه های کوچک، خطی سازی را در این ناحیه ها مورد بررسی قرار می‌دهد. [۱۴] سبزی پرور و علیائی در منطقه همدیدی تبریز با استفاده از مدل‌های مختلف شبکه عصبی و ترکیبات مختلف داده‌های دمای هوا، ساعات آفتابی واقعی و حداکثر را ارائه دادند و نتایج این مدل ها را با مدل انگستروم مقایسه کردند که نتایج نشانگر برتری معنی دار مدل شبکه عصبی نسبت به روش انگسترم است. [۲] رحمان و مهندس[۱۷] برای منطقه‌ای در عربستان، ۳ مدل شبکه عصبی با استفاده از داده های اندازه گیری دمای هوا و رطوبت نسبی و پارامتر روز شمار سال که اثر زمان را روی پارامترهای اقلیمی نشان می‌دهد، تدوین کردند. تحقیق آنها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه قادر است با استفاده از ورودی‌های رطوبت نسبی، میانگین روزانه دمای هوا، تابش خورشیدی این منطقه را با دقت خوبی برآورد نماید و نتایج بهتری نسبت به دو مدل دیگر ارائه دهد. مقدم نیا و همکاران [۹] از تکنیک آزمون گاما برای پیش پردازش پارامترهای ورودی موثر بر تابش خورشیدی در حوضه برو استفاده نمودند. آنها در این تخمین از مدل های غیر خطی، پرسپترون چند لایه ، شبکه عصبی خود همبسته برون زاد و نرو فازی استفاده و گزارش نمودند که این مدل‌ها دقت بالایی در برآورد تابش خورشیدی دارند. امکانات و تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در مناطق مختلف ایران متفاوت است. در برخی مناطق، توزیع مکانی ایستگاههای هواشناسی مناسب بوده و در آنها پارامترهای متعدد هواشناسی اندازه گیری می‌شود ولی در بعضی مناطق علاوه بر تراکم کم ایستگاه‌های هواشناسی، فقط چند پارامتر ساده مثل دما و رطوبت هوا اندازه گیری می شوند. همچنین در بعضی موارد، داده‌های گمشده و پرت در جداول آماری هواشناسی وجود دارند. لذا لازم است مدل ها با ورودی های مختلف بررسی شوند و این امکان فراهم باشد که بسته به نوع داده در دسترس، مدل مناسب انتخاب شود. تحقیقات نشان داده است که مدل‌های هوش مصنوعی برای برآورد تابش خورشید نتایج دقیق تری نسبت به روابط تجربی ارائه می‌دهد، ولی با توجه به اینکه میزان تابش خورشید رسیده به زمین در مناطق مختلف تابعی از مشخصات جوی مثل ضخامت اتمسفر، ترکیبات عناصر موجود در جو و غیره است، ضروری است برای هر منطقه، مدل ارائه شده و دقت آن با روشهای تجربی مرسوم مقایسه شود.[۱۶] تاکنون مدل‌های ارائه شده برای شبیه سازی تابش خورشیدی با استفاده از بسته های نرم افزاری بوده است، در این تحقیق، با استفاده از کد نویسی و معماری شبکه در نرم افزار MATLAB (ورژن ۲۰۱۰ ) تابش خورشیدی برای مناطق نیمه خشک و معتدل بررسی شده است. بنابراین، هدف این تحقیق، ارزیابی روش‌های تجربی و مدل نرو فازی برای برآورد تابش خورشیدی و انتخاب بهترین روش برای این مناطق بوده است. معادلات انگستروم و هارگریوز ـ سامانی که از داده های مختلفی برای تخمین تابش استفاده می کنند و در دو گروه مختلف مدل های مبتنی بر ساعات آفتابی و دمایی هستند، به عنوان روش های تجربی در نظر گرفته شده اند.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

## مواد و روشها

### مناطق مورد مطالعه و منابع داده ها

**جدول ۱) خصوصیات شهرستان‌ها**

| ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | وسعت($km^2$) | ارتفاع از سطح دریا(m) |
|---|---|---|---|---|
| زاهدان | ۶۰,۵۱ | ۳۰,۴۵ | ۳۶۵۸۱ | ۱۳۶۹,۹ |
| بجنورد | ۵۷,۲۰ | ۳۷,۲۸ | ۲۵۰۰ | ۱۰۷۰ |

### شهرستان زاهدان

این شهرستان ازتوابع استان سیستان و بلوچستان و مرکز آن شهر زاهدان است. زاهدان از لحاظ مختصات جغرافیایی در ۶۰ درجه و ۵۱ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۳۰ دقیقه و ۴۵ ثانیه عرض شمالی واقع شده‌است. این شهرستان در جنوب شرقی کشور ایران قرار دارد. مساحت آن ۳۶۵۸۱ کیلومتر مربع در منطقه سرحد بلوچستان در شمال استان سیستان و بلوچستان قرار گرفته و جمعیت این شهرستان ۱ میلیون نفر است. شهرستان زاهدان دارای آب و هوای بیابانی گرم و خشک می‌باشد. میانگین بارش سالانه در این شهرستان ۷۲ میلیمتر و میانگین دمای آن در سال ۸۲ از۵/۴۲ الی ۶/۱۲- درجه سانتیگراد در تغییر است.

**جدول ۲) پارامترهای آماری روزانه داده‌های هواشناسی برای ایستگاه زاهدان**

| Station | Data set | Unit | $X_{mean}$ | $S_x$ | $C_v$ ($S_x/X_{mean}$) | $X_{min}$ | $X_{max}$ | Skewness | Sum | Correlation with Solar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zahedan** | Tmin | ˚C | 11.13 | 8.40 | 0.755 | -10.9 | 29.02 | -0.33 | 16260.43 | 0.93 |
| | Tmax | ˚C | 27.35 | 8.83 | 0.323 | -0.40 | 42.50 | -0.59 | 39955.13 | 0.95 |
| | RH | % | 18.84 | 8.16 | 0.433 | -3.35 | 35.17 | -0.36 | 27516.18 | 0.89 |
| | hs | hour | 9.23 | 2.79 | 0.302 | 0.00 | 13 | -1.40 | 13560.99 | 0.47 |
| | Solar | $Cal/cm^2$ | 423.61 | 97.53 | 0.230 | 205.48 | 679.23 | -0.33 | 618890.89 | 1 |

### شهرستان بجنورد

یکی از شهرستان‌های استان خراسان شمالی است. مساحت این استان ۲۸۴۳۴ کیلومتر مربع است و مرکز این شهرستان شهر بجنورد است. بجنورد از لحاظ مختصات جغرافیایی در ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. جمعیت این شهرستان ۳۳۴ هزار نفر در سال ۸۳ بوده است. متوسط بارندگی سالانه ۲۳۰ میلی متر و میانگین سالانه دمای آن حداقل ۵/۷- و دمای حداکثر ۱۹/۶ درجه سانتیگراد در تغییر است.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

**جدول ۳) پارامترهای آماری روزانه داده‌های هواشناسی برای ایستگاه بجنورد**

| Station | Data set | Unit | $X_{mean}$ | $S_x$ | $C_v$ ($S_x/X_{mean}$) | $X_{min}$ | $X_{max}$ | Skewness | Sum | Correlation with Solar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bojnourd** | Tmin | ˚C | 7.42 | 7.98 | 0.755 | -16 | 22.6 | -0.18 | 16254 | 0.815 |
| | Tmax | ˚C | 20.06 | 10.44 | 0.323 | -4.8 | 39.6 | -0.24 | 43968.7 | 0.908 |
| | RH | % | 60.51 | 19.90 | 0.433 | 14.3 | 99 | -0.18 | 132625.8 | -0.678 |
| | hs | hour | 7.62 | 4.01 | 0.302 | 0.0 | 13.7 | -0.61 | 16692.5 | 0.819 |
| | Solar | $Cal/cm^2$ | 394.66 | 145.92 | 0.230 | 133.45 | 677.82 | -0.10 | 865098.39 | 1 |

پارامترهای جدول‌های (۲)و (۳) به ترتیب $X_{mean}$ (میانگین )، $S_x$ (انحراف معیار)، $C_v$ (ثابت تغییرات)،$X_{min}$ (حداقل)، $X_{max}$ (حداکثر)، Skewness (چولگی)، Sum (مجموع)، Correlation (همبستگی) می‌باشد. در این ایستگاه، میزان تابش خورشیدی بیش از همه پارامترها به دمای حداکثر بستگی دارد. در ایستگاه زاهدان بیش از ۷۰٪ مواقع درجه حرارت بالای ۲۷ درجه سانتیگراد می‌باشد، بعد از پارامتر دمای حداکثر و حداقل، پارامتر ساعات آفتابی بیشترین تاثیر در تابش در ایستگاه بجنورد را دارد که ضریب همبستگی آن با تابش ۰/۸۱۹ می‌باشد. پارامتر رطوبت نسبی در زاهدان بعد از دمای حداکثر و حداقل بیشترین همبستگی را با تابش خورشیدی دارد.

**شکل ۱) نمایی از شهرستان‌های مورد مطالعه**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

اطلاعات دو ایستگاه هواشناسی برای داده های ورودی و خروجی مدل نرو فازی و روابط تجربی استفاده شدند.

## معادلات تجربی

در این تحقیق، دو معادله انگستروم[۲] و هارگریوز ـ سامانی[۵] برای تخمین تابش خورشید واسنجی و نتـایج آنهـا بـا مدل نروفازی مقایسه شدند. معادله انگستروم [ ۲ ]تابش رسیده به زمین را به تابش برون زمینی و ساعات آفتابی به صورت زیر ارتباط می‌دهد:

$$\frac{H}{H_0} = a + b(\frac{n}{N}) \qquad (۱)$$

در رابطه، $H$ و $H_0$ به ترتیب تابش رسیده به زمین و تابش برون زمینی بر حسب کـالری بـر سـانتی متـر مربـع در روز ($Cal/cm^2day$)، n و N به ترتیب ساعات آفتابی اندازه گیری شده واقعی و حداکثر ساعات آفتابی روزانه a و b ضرایب ثابت معادله هستند. ( در معادله انگستروم، a و b به ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۳۳ برآورده شده است).[۲]

هارگریوز و سامانی[۲ ]معادله زیر را برای تخمین تابش خورشید ارائه دادند:

$$\frac{H}{H_0} = (KT) \times (TD)^{0.5} \qquad (۲)$$

$$TD = T_{\max} - T_{\min}$$

در رابطه فوق، $TD$ دامنه تغییرات روزانه دمای هوا ( $^0C$ ) و $KT$ ضریب ثابت معادله است. هارگریوز(۲) مقدار $KT$ را برای مناطق ساحلی و غیر ساحلی به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۱۶ توصیه نمود. $T_{\max}$ و $T_{\min}$ به ترتیب دمای بیشینه و کمینه روزانه هوا تعیین می شود.

## سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS[1])

نظریه مجموعه‌های فازی، اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط پروفسور لطفی عسکرزاده دانشمند ایرانی تبار و استاد دانشگاه برکلی عرضه شد. این نظریه از زمان ارائه تاکنون گسترش زیادی یافته و کاربردهای گوناگونی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده است. در سال ۱۹۹۳ جانگ با مد نظر قرار دادن توانائی‌های نظریه فازی و شبکه عصبی مدل استنتاج

1) Adaptive Neuro-fuzzy Inference system

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

فازی ـ عصبی تطبیقی را ارائه کرد [۱۹].

در سیستم فازی–عصبی روش متداول آموزش، سیستم استنتاج فازی نوع ساجینو می‌باشد که از الگوریتم یادگیری پیوندی برای تعیین پارامترهای سیستم فازی به منظور آموزش مدل استفاده می‌کند. [۷]

مدل ANFIS مدلی با ساختار پنج لایه‌ای است که از ترکیب مدل‌های منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی به وجود آمده است. شکل (۳)

۱– لایه اول یا لایه ورودی‌ها که در آن درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از توابع عضویت مشخص می‌گردد. توابع عضویت انواع متفاوتی دارد که از جمله آن می‌توان به توابع ذوزنقه‌ای، مثلثی، سیگموئید، گوسی و تابع زنگوله‌ای شکل اشاره کرد. دو دسته فازی برای هر ورودی در نظر گرفته شده است. شکل تابع عضویت و میزان هم‌پوشانی آنها دلخواه بوده و توسط کاربر با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c_i}{a_i}\right|^{2b_i}} \qquad (۳)$$

که در اینجا، $x$ ورودی و $a,b,c$ پارامترهای تطبیقی هستند و ضرایب غیر خطی این معادله می باشند که شکل تابع عضویت را مشخص می کنند. مجموعه ضرایب متغیرهای فازی $\{(a_1,b_1,c_1),(a_2,b_2,c_2),....\}$، مجموعه $S_1$ یا مجموعه پارامترهای سمت چپ [1] $(LHS)$ نامیده می شود. مقادیر خروجی لایه اول ( مثلاً $\mu_{A_1}(x)$)، مقادیر عضویت هر ورودی نسبت به توابع عضویت مختلف مربوط به آن ورودی می باشند.

۲– لایه دوم که در آن مقادیر ورودی به هر گره در هم ضرب شده و حاصل که وزن[2] قانون‌ها می‌باشد، به دست می‌آید. مثلاً برای گره اول داریم:

$$w_i = \mu_{A_1}(x_1)\mu_{B_1}(x_2) \qquad (۴)$$

۳– لایه سوم که گره‌های این لایه، وزن قانون‌ها را نرمال‌سازی می‌کنند.

$$\overline{W_1} = \frac{w_1}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad ,i=1,2,...,n \qquad (۵)$$

1) Left Hand Side
2) Firing strength

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

$n$: تعداد گره های این لایه است.

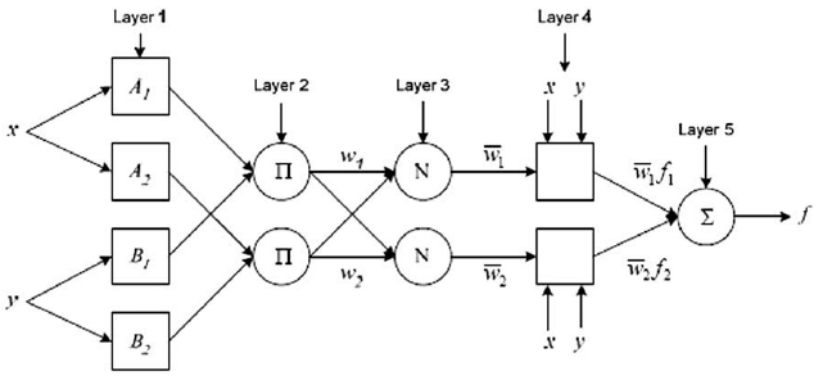
۴- لایه چهارم که لایه قوانین نامیده می‌شود و در این لایه، قانون‌ها به دست می‌آیند. قوانین از عملیات بر روی سیگنال‌های ورودی به این لایه به دست می آیند:

$$Z_1 = \overline{w}_1 f_1 = \overline{w}_1 (p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1) \quad [۷]$$

که $p_1, q_1, r_1$ پارامترهای متعاقب[1] نامیده می‌شوند. مجموعه متشکل از $\{(p_1, q_1, r_1), (p_2, q_2, r_2), ...\}$ را مجموعه $S_2$ می نامیم. به این مجموعه پارامترهای $RHS$[2] گفته می شود.

۵- لایه پنجم که آخرین لایه شبکه می‌باشد، تنها شامل یک تک گره بوده که با جمع کردن همه مقادیر ورودی به آن خروجی کل را محاسبه می‌کند.

$$\sum_{i=1}^{n} \overline{w}_i f_i \quad (۶)$$




**شکل ۲) ساختار یک شبکه ANFIS**

در ساختار مدل ANFIS، مجموعه پارامترهای تطبیقی $S_1$ و مجموعه پارامترهای متعاقب $S_2$ وجود دارند. در واقع، زمانی عمل شبیه سازی بدرستی انجام شده است که هر دو دسته پارامترها طوری تخمین زده شوند که مقدار تابع خطای

1) Consequent parameters
2) ht Hand Side

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

مدل در بخش آموزش ، آزمایش و اعتبارسنجی کمینه شود. برای به دست آوردن این پارامترها معمولاً دو گام صورت می‌گیرد. در گام نخست که گام رو به جلو[1] نامیده می‌شود، مجموعه پارامترهای $S_1$ ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای $S_2$ با استفاده از الگوریتم حداقل مجذور خطاها[2] (LSE) محاسبه می‌شوند و در گام دوم که گام رو به عقب[3] نامیده می‌شود، مجموعه پارامترهای $S_2$ ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای $S_1$ با استفاده از الگوریتم شیب کاهشی[4] به دست می آیند. این مجموعه عملیات ها که در هر مرحله از آموزش اتفاق می افتد، Epock نامیده می شود. با محاسبه پارامترهای مدل، مقدار خروجی مدل به ازای زوج مرتب هایی که تحت عنوان داده های آموزش مدل به مدل داده شده است، به دست می آید. این مقدار پیش بینی شده توسط مدل با مقدار واقعی مقایسه می‌شود تا تابع خطای آموزش مدل ANFIS محاسبه شود. در هر مرحله (Epock) از دوره آموزش، مقادیر پارامترهای مدل تغییر یافته و متعاقب آن میزان خطای آموزش و خطای آزمایش مدل نیز تغییر می کند، مقدار بهینه به صورتی انتخاب می شود که مدل در حالت بیش آموزش قرار نگیرد.[۱۴]

یکی از مشخصه های هر مدل ANFIS ، نوع تابع عضویت در نظر گرفته شده برای ورودی های مدل می باشد. توابع عضویت انتخاب شده در این تحقیق گوشین، کروی و سیگموئید هستند. انتخاب تابع عضویت براساس آزمایش انواع مختلف توابع عضویت صورت می‌گیرد، به این معنی که توابع عضویت هر کدام جداگانه مورد بررسی قرار می گیرند و مدل ANFIS برای هر کدام از این توابع عضویت به صورت جداگانه آموزش می بیند. در پایان، میزان خطای مدل های حاصل با هم مقایسه می شود و تابعی که کمترین میزان خطا را در کمترین زمان آموزش حاصل کند، به عنوان تابع عضویت برگزیده خواهد شد.

در خاتمه، تجزیه و تحلیل‌های بدست آمده از هر یک از مدل‌ها را که با معماری‌ها و الگوریتم‌های مختلف به دست آمده‌اند، با یکدیگر مقایسه و بهترین نتیجه را به دست می‌آوریم.

بررسی اعتبار مدل با مقایسه تابش خورشیدی شبیه سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده برای تعدادی از سال‌های آماری که در آموزش شبکه از آنها استفاده نشده است، صورت گرفت. برای این منظور از ویژگی‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، قدرمطلق خطا (MAE) و میانگین مجذور خطا (MSE) استفاده گردید [۱۴و۱۰و۹].

1) Forward Pass
2) Least Square Error
3) Backward Pass
4) Gradient Descent

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

این روابط عبارتند از :

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N} (F - O)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (۷)$$

$$MAE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N} |F - O|}{N} \right] \quad (۸)$$

$$MSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N} F - O}{N} \right] \quad (۹)$$

در این رابطه‌ها، $F$ = مقادیر شبیه سازی شده، $O$ = مقادیر مشاهده شده و $N$ = تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

حد پایین RMSE صفر بوده و مقدار آن بیانگر این است که مقادیر پیش‌بینی شده چقدر از مقادیر مشاهده شده انحراف دارد. میانگین قدرمطلق خطا بیانگر مقدار متوسط خطا بوده و هرچه کمتر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر است. میانگین مجذور خطا در واقع متوسط میزان خطا را به ازای هر مشاهده به دست می‌آورد و هر چه کمتر باشد، دقت بیشتر را نشان می دهد.

## نتایج و بحث

### واسنجی معادلات تجربی (انگستروم و هارگریوز-سامانی)

ضرایب معادلات انگستروم و هارگریوز- سامانی با استفاده از داده‌های اختصاص یافته برای آموزش شبکه نرو فازی برای دو ایستگاه هواشناسی زاهدان و بجنورد واسنجی شدند. بر این اساس، با کمک نرم افزار آماری Spss ضرایب آنگستروم و هارگریوز - سامانی برای بازه زمانی ( ایستگاه زاهدان ۸۵-۸۹ و بجنورد ۸۰-۸۶) مورد نظر محاسبه شدند. لذا زمانی که اطلاعات تابشی در دسترس نیست، می توان با استفاده از معادلات واسنجی شده تابش خورشید را در آن دو منطقه به دست آورد. با اخذ داده های تابشی، ساعات آفتابی، دمای بیشینه، دمای کمینه روزانه هوا و رطوبت نسبی از سازمان هواشناسی، روابط تجربی انگستروم و هارگریوز- سامانی و مدل چند متغییره مبتنی بر پارامترهای هواشناسی برای

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

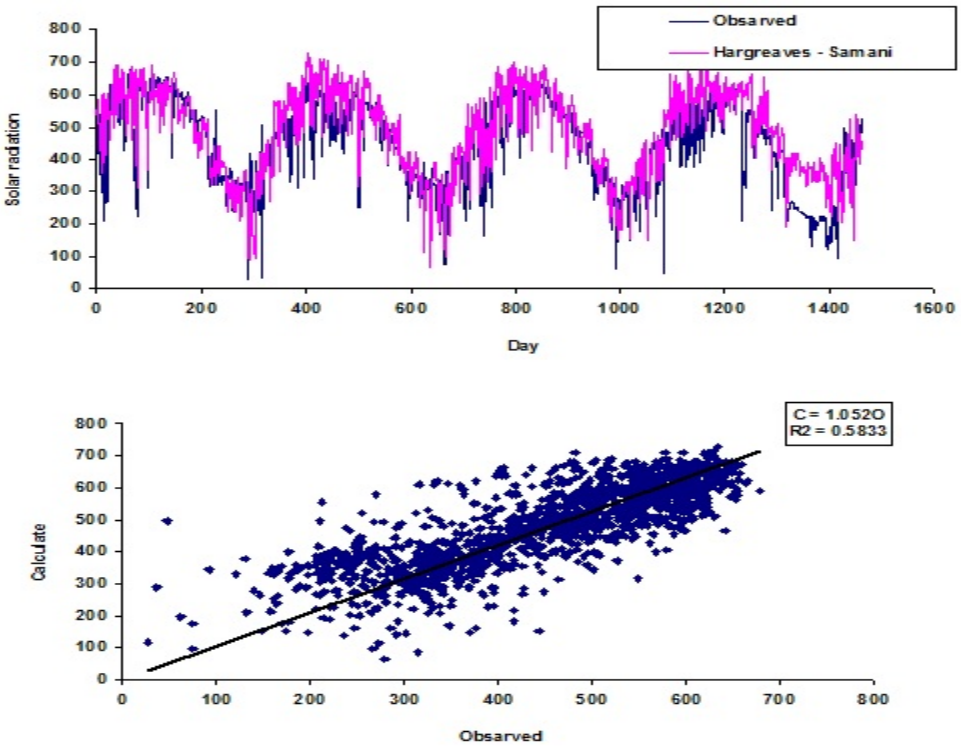
این دو شهر برآورد گردید. روابط پیشنهادی به صورت زیر می باشند.

ایستگاه زاهدان:

$$\frac{H}{H_0} = 0.466 + 0.18(\frac{n}{N}) - 0.14T' \quad (۱۰)$$

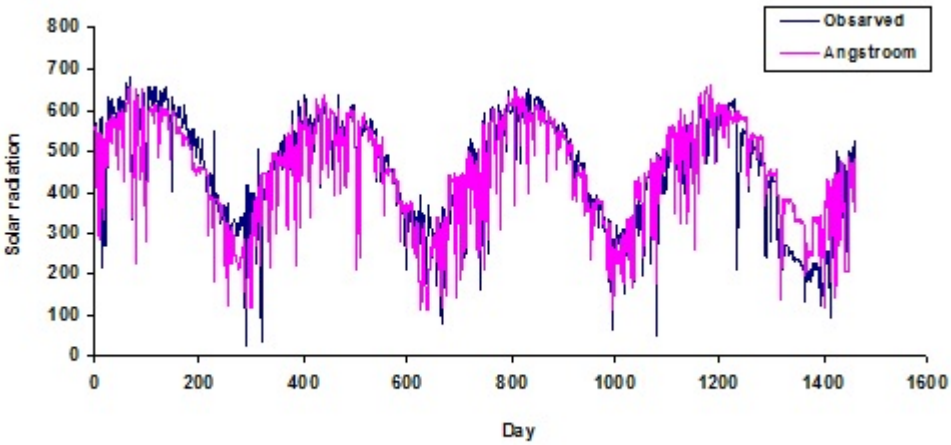
$$T' = \frac{Delta}{Delta\max} \quad , \quad Delta = T_{\max} - T_{\min}$$

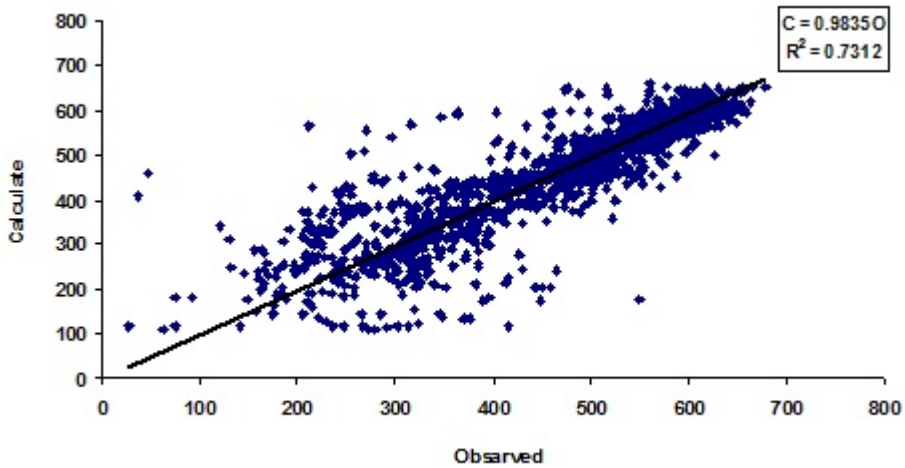
$$\frac{H}{H_0} = 0.149\,(TD)^{0.5} \quad (۱۱)$$




**شکل۳) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله هارگریوز - سامانی با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر زاهدان**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]




**شکل٤) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله انگستروم با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر زاهدان**

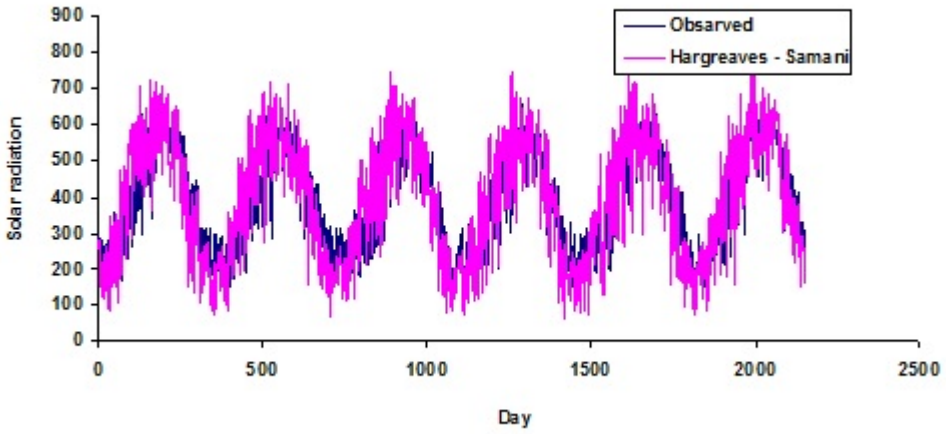
ایستگاه بجنورد:

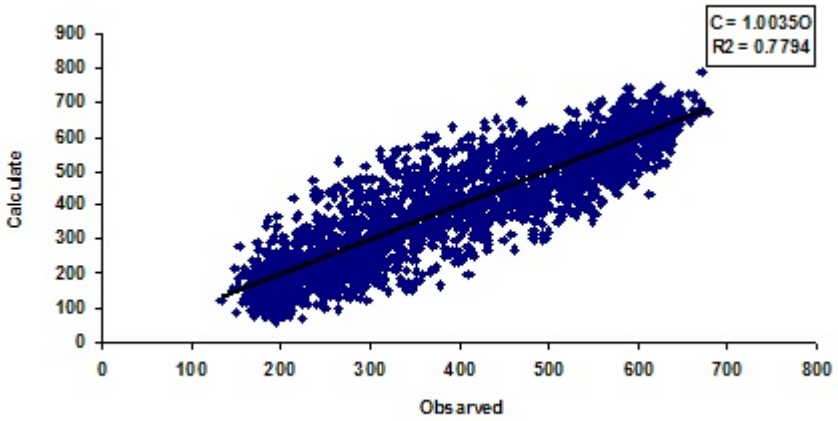
$$\frac{H}{H_0} = 0.529 + 0.174(\frac{n}{N}) - 0.136T' - 0.189R' \qquad (۱۲)$$

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

$$R' = \frac{RH_{mean}}{RH_{\max}}$$

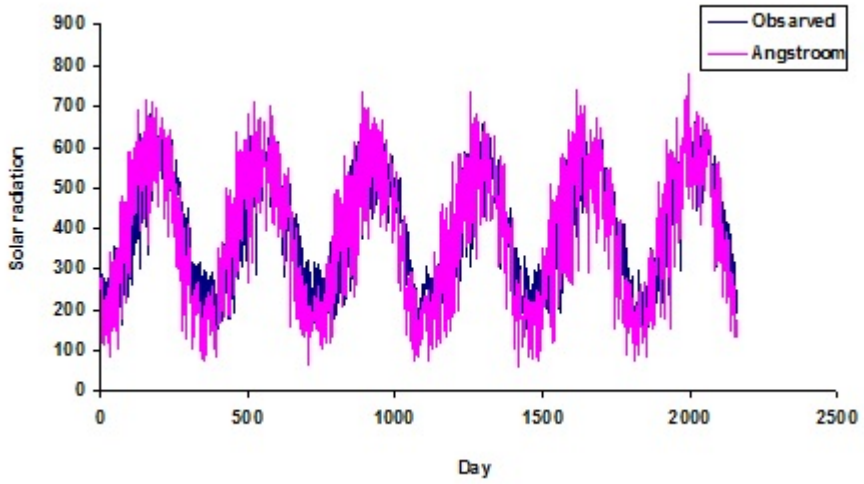
$$\frac{H}{H_0} = 0.157\,(TD)^{0.5} \qquad (۱۳)$$

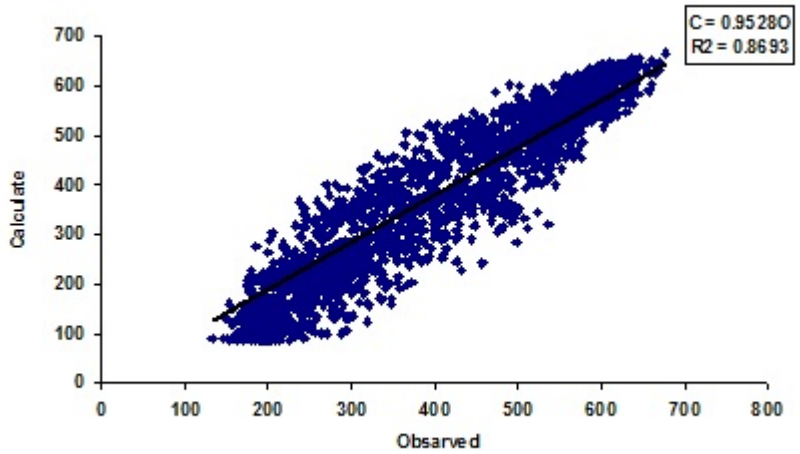



**شکل۵) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله هارگریوز - سامانی با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر بجنورد**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]




**شکل٦) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله انگستروم با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر بجنورد**

مقایسه ضرایب بدست آمده برای مناطق مورد مطالعه(معادلات ۱۰و ۱۲ و شکل‌های ۴ و ۶) با مقادیری که آلن و همکاران [۴] برای مناطق فاقد واسنجی توصیه کردند (a= ۰,۲۵ و b= ۰,۵) نشان می دهد که اختلاف معنی داری بین آنها وجود دارد. از این رو، برای هر منطقه، واسنجی مدل انگستروم قبل از استفاده از آن لازم می باشد. با توجه به ضرایبی که برای معادله هارگریوز ـ سامانی در دو منطقه به دست آمد (معادلات ۱۱و ۱۳) و ضریبی که در مناطق غیر ساحلی به کار می‌رود(۰,۱۶)، این مقادیر خیلی نزدیک به مقداری است که هارگریوز برای مناطق غیر ساحلی توصیه کرده

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

است.

ارزیابی عملکرد نرو فازی با ساختاری که در جداول (۴) و (۵) آمده است، نشان می‌دهد که پارامترهای ورودی مدل به ترتیب دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی و ساعت آفتابی خروجی مدل تابش خورشیدی می باشد. نحوه انتخاب پارامترهای هواشناسی بر اساس درجه اهمیت در تخمین تابش خورشیدی می باشد. مدل نرو فازی با ساختار ورودی مشابه با مدل انگستروم با دقت بیشتری تابش خورشید را شبیه‌سازی می‌کنند و همچنین پارامتر دمای بیشینه تاثیر بیشتری بر دقت تعیین تابش خورشید نسبت به پارامتر ساعت آفتابی برای مناطق مورد مطالعه این تحقیق دارد. با توجه به جداول (۴) و (۵)، می‌توان دریافت که نوع الگوریتم آموزشی و تابع تحریک روی نتایج تاثیر دارد. در این بررسی، روش آموزشی لونبرگ مارکوارت (LM) ، تابع تحریک گویشن و یک لایه مخفی استفاده شد که برای مدل نروفازی نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌های آموزشی ارائه داده است. خلاصه نتایج مدل های مورد بررسی این تحقیق با استفاده از داده های اختصاص یافته برای آزمایش مدل ها، در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. با توجه به جداول، ملاحظه می شود که همه مدل‌ها با همبستگی ضریب تعیین بالاتر از ۰/۸۴شبیه سازی می کنند و نشان از دقت بالای این مدل‌ها می باشد. مطابق این جداول، مدلANFIS با الگوریتم LM و تابع تحریک Gaussmf با ضریب همبستگی ۰٫۸۷ برای زاهدان و ضریب همبستگی ۰٫۹۶ برای بجنورد و مقادیرRMSE، MSEو MAE مطابق جداول دارای بیشترین دقت می باشد. همچنین شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ برای ایستگاه های زاهدان و بجنورد نشان می دهد که مراحل آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی بخوبی برای این دو ایستگاه برای مدل ANFIS انجام شده است. باید توجه داشت که در مقالات قبلی فقط مرحله آموزش و آزمایش بوده و مرحله اعتبار سنجی وجود نداشته است.

**جدول ٤) مشخصات مدل‌های شبکه عصبی و نرو فازی برای تخمین تابش خورشید ایستگاه زاهدان**

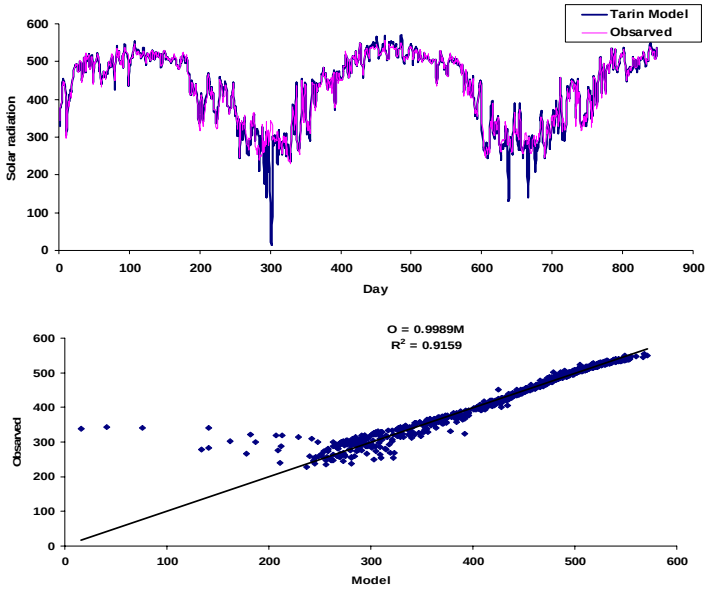
| مدل | الگوریتم آموزشی | تابع تحریک | تعداد نرون لایه میانی | $R^2$ | RMSE ($Cal/cm^2$) | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ANFIS | LM | Gaussmf | 4 | ۰٫۸۷ | 47.1 | 2218.41 | 24.2 |
| ANFIS | LM | Gbellmf | 4 | ۰٫۸۶ | 67.3 | 4529.29 | 33.95 |
| *ANFIS* | LM | Psigmf | 4 | ۰٫۸۴ | 99.8 | 9960.11 | 45.2 |

**جدول ۵) مشخصات مدل‌های شبکه عصبی و نرو فازی برای تخمین تابش خورشید ایستگاه بجنورد**

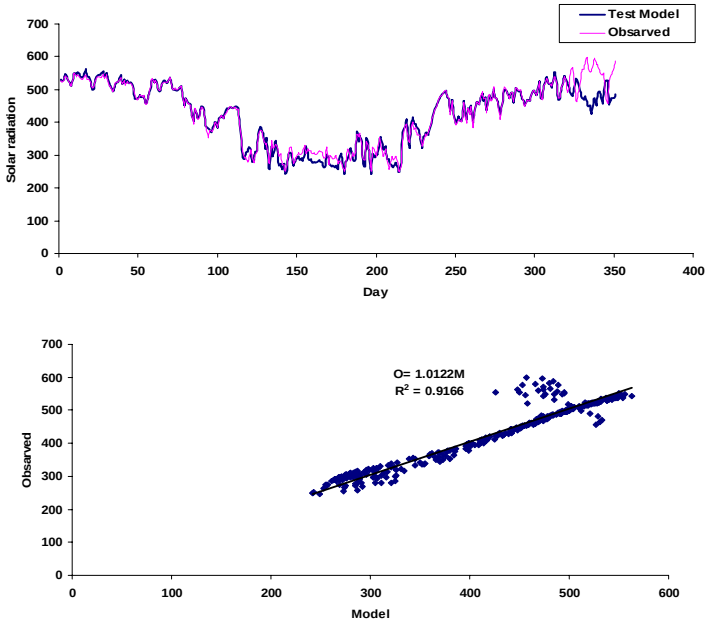
| مدل | الگوریتم آموزشی | تابع تحریک | تعداد نرون لایه میانی | $R^2$ | RMSE ($Cal/cm^2$) | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ANFIS | LM | Gaussmf | 4 | ۰٫۹۶ | 9.67 | 93.63 | 7.11 |
| ANFIS | LM | Gbellmf | 4 | ۰٫۹۵ | 26.9 | 721.9 | 19.65 |
| *ANFIS* | LM | Psigmf | 4 | ۰٫۹۴ | 35.1 | 1232.01 | 24.8 |

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

ایستگاه زاهدان

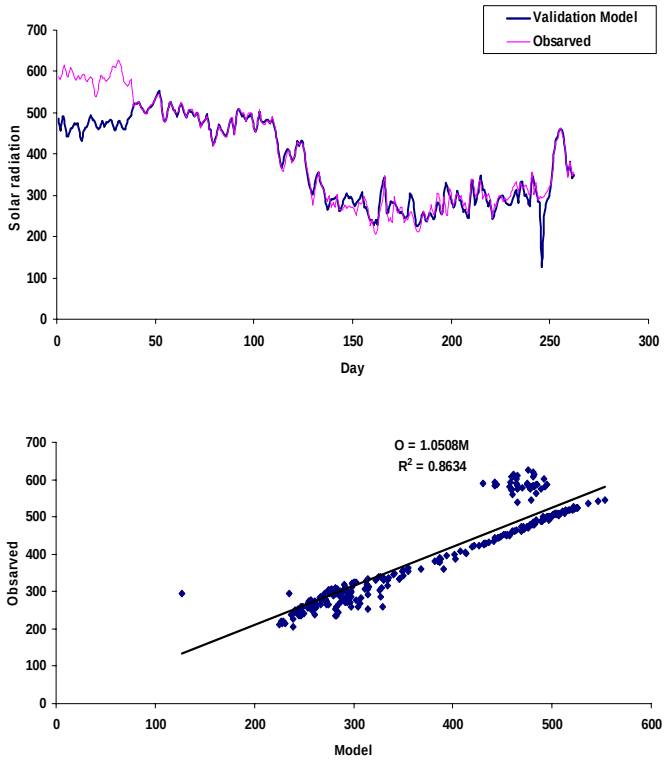



شکل۷) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدلANFIS (Train)



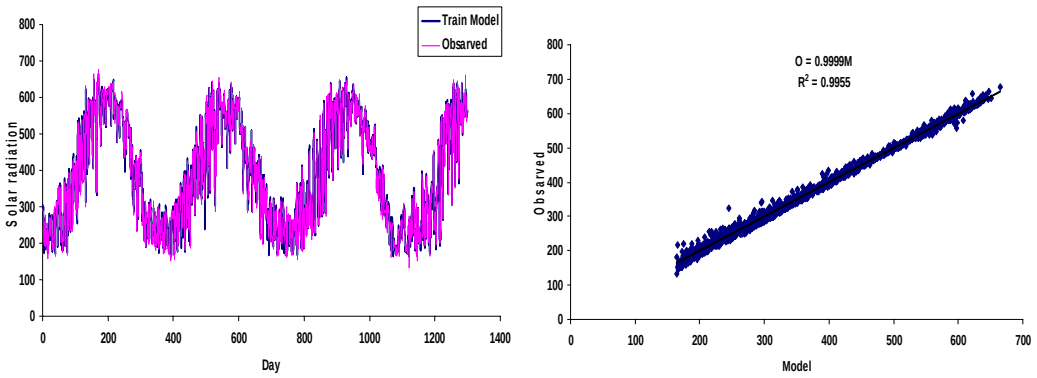

شکل ۸) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدلANFIS (Test)

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]



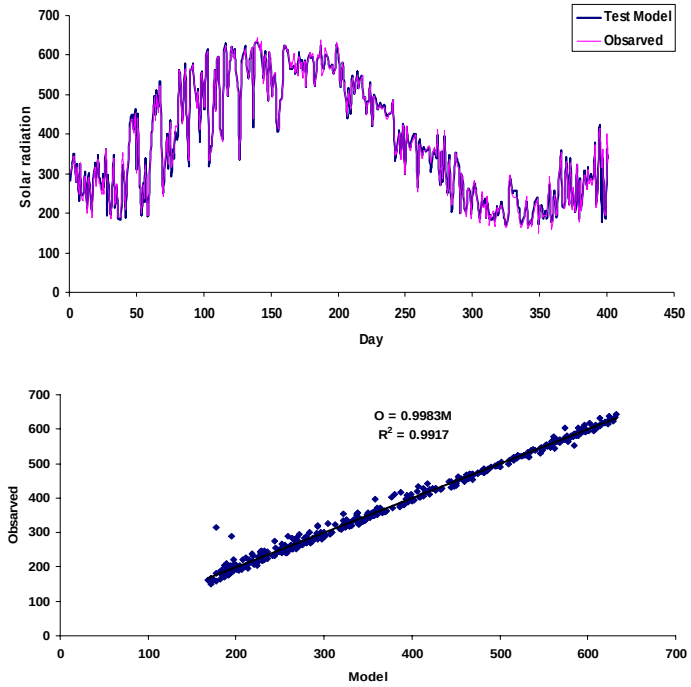

شکل ۹) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدلANFIS (Validation)

ایستگاه بجنورد

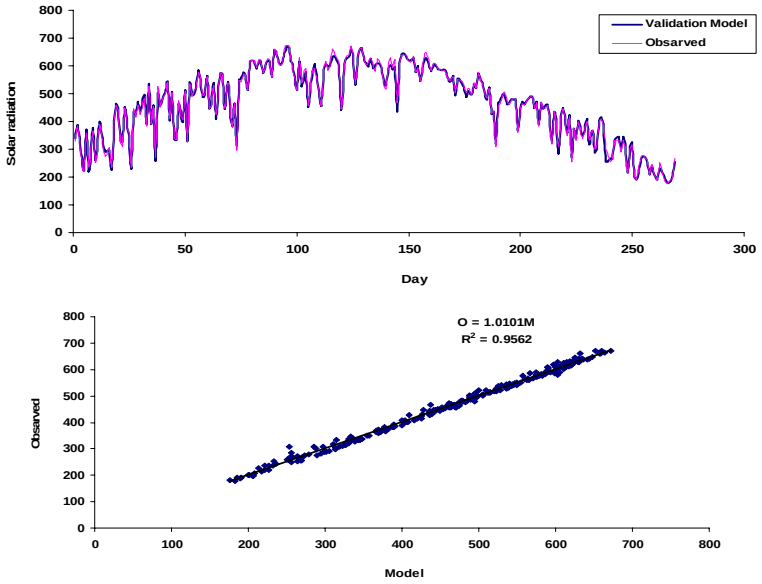



شکل ۱۰) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدل ANFIS (Train)

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]




شکل۱۱) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدلANFIS (Test)




شکل ۱۲) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدلANFIS (Validation)

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

**جدول ٦) مقادیر $R^2$و RMSEوMSEوMAE تابش خورشید برآورده شده از روابط انگستروم، هاگریوز - سامانی و مدل نرو فازی برای ایستگاه زاهدان**

| مدل | پارامترهای ورودی | $R^2$ | RMSE ($Cal/cm^2$) | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|
| انگستروم | $n,N,R_a$ | 0.73 | 49.15 | 2415.75 | 27.15 |
| هاگریوز - سامانی | $T_{min},T_{max}, R_a$ | 0.59 | 58.19 | 3386.12 | 32.83 |
| ANFIS | $T_{min},T_{max},hs$ | 0.89 | 47.1 | 2218.41 | 24.2 |

**جدول ۷) مقادیر $R^2$و RMSEوMSEوMAE تابش خورشید برآورده شده از روابط انگستروم، هاگریوز - سامانی و مدل نرو فازی برای ایستگاه بجنورد**

| مدل | پارامترهای ورودی | $R^2$ | RMSE ($Cal/cm^2$) | MSE | MAE |
|---|---|---|---|---|---|
| انگستروم | $n,N,R_a$ | 0.87 | 27.21 | 740.58 | 25.67 |
| هاگریوز - سامانی | $T_{min},T_{max}, R_a$ | 0.78 | 30.69 | 942.97 | 30.71 |
| ANFIS | $T_{min},T_{max},hs,RH$ | 0.96 | 9.67 | 93.63 | 7.11 |

جداول (۶) و (۷ ) نتایج عملکرد مدل نرو فازی و معادلات تجربی واسنجی شده را نشان می‌دهد. در این جداول، مقادیر میانگین خطای دو مدل برای دو ایستگاه فوق آمده است. مقادیر RMSE،MSEو MAE و ضریب همبستگی نیز گویای عملکرد بهتر نروفازی در برآورد و شبیه سازی پارامتر تابش خورشیدی است.

## نتیجه گیری

امروزه با توسعه روش های هوش مصنوعی در برآورد پارامترهای گوناگون، مدل‌هایی همچون شبکه عصبی و نرو فازی قابلیت خود را در پیش بینی این پارامترها به منزله ابزاری قدرتمند بخوبی نشان داده‌اند. در این تحقیق، مدل

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

نروفازی با داده‌های ورودی مشابه مدلهای تجربی انگستروم و هارگریوز ـ سامانی برای برآورد تابش خورشید ساخته شد. پارامتر های فوق از جمله پارامترهایی هستند که از سوی مراکز هواشناسی مذکور به صورت روزانه اندازه گیری و ثبت می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مدل‌ها این نتایج با نتایج برآمده از یک روش متداول (معادلات انگستروم و هارگریوز ـ سامانی) برای برآورد پارامتر تابش در این ایستگاه ها مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان از برتری مدل نروفازی نسبت به معادلات انگستروم و هارگریوز ـ سامانی داشت، اما با بررسی و ارزیابی این مدل‌ها، نتایج زیر نیز به دست آمد:

۱- از بین مدل های تجربی و مدل نرو فازی با داده‌های ورودی مشابه، مدل نروفازی نتایج بهتری ارائه داد.

۲- نتایج مدل های مبتنی بر دمای بیشینه در مدل نرو فازی دقیقتر بوده و نتایج مدل های مبتنی بر دمای هوا در حد قابل قبولی است و لذا برای ایستگاه های فاقد آفتاب نگار توصیه می‌شود.

۳- نتایج همچنان نشان می‌دهد که مدل‌ها در برآورد تابش خورشیدی در ایستگاه بجنورد نسبت به ایستگاه زاهدان عملکرد بهتری دارند.

## منابع

[1] Alizadeh, A and N. Khalili. 1388. “Angstrom model and develop a regression model to estimate the solar radiation in Mashhad”, Journal of Agricultural industry Soil and Water. Vol. 1, PP. 229- 238. (In farsi).

[2] Angstrom, A. 1924. “Solar and terrestrial radiation”, Q. J. R. Meteorol. Soc.Vol. 50, PP. 121–126.

[3] De Souza, J.L., Nicacio, R.L. and Lima Moura, M.A. 2005. “Global solar radiation measurements in Maceio, Brazil”, Agrcultural water Manage.Vol. 30, PP. 1203-1220.

[4] Gorzalezany, M.B., A. Clusezek, 2000. “Neuro-Fuzzy Systems for Rule Based Modeling of Dynamic Processes”, Proceedings of ESIT, Aachen, Germany.Vol. pp 416-422.

[5] Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. “Estimating potential evapotranspiration”, J. Irrig. Drain. Eng. Vol. 108(3), PP. 225-230.

[6] Iziomon M.G. and H. Mayer. 2001. “Performance of solar radiation models- a case study”, Agric. Forest Meteorol. Vol. 110(1), PP. 1-11.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

[7] Li, H., G.L.P Chen, and H. P. Huang, 2001. “Fuzzy Neural Intelligent Systems”, Mathematical Foundation and the Applications in Engineering. CRC Press, pp. 371-380.

[8] Moeini, S., SH. Javadi., M. D. Manshadi, V. R. Asmaeli. 1389. “Estimate potential solar radiation in Yazd”, Iranian Journal of Energy. Vol. 1, PP.71-78. (In farsi).

[9] Moghaddamnia, A., Ghafari Gousheh, M., Piri, J., Amin, S. and Han, D. 2008. “Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques”, Advances in Water Resources. Vol. 32, PP. 88-97.

[10] Moghaddamnia, A., Remesan, R., Hassanpour Kashani, M., Mohammadi, M., Han, D. and Piri, J. 2009. “Comparison of LLR, MLP, Elman, NNARX and ANFIS Models with a case study in solar radiation estimation”, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Vol. 71, PP. 975–982.

[11] Mohammad T. Dastorani , Alireza Moghadamnia, Jamshid Piri, Miguel RicoRamirezjamalizadeh. 2009. “Application of ANN and ANFIS models for reconstructing missing flow data”, Electronic supplementary material. Vol. 10, PP. 1007-1012.

[12] Noori, R., Karbassi, A. and Sabahi, M.S. 2009. “Evaluation of PCA and gamma test techniques on AAN operation for weekly solid waste prediction” , Journal of Environmental Management. Vol. 91, PP. 767-771.

[13] Oghbaei sogh, M., A. Mosaedi., A. Dahghani. 1390. “Intelligent modeling of solar radiation using gamma test and calibration with empirical equations in Kermanshah”, Journal of Soil and Water Conservation Research. Vol. 4, PP. 185-208. (In farsi).

[14] Piri, J., Amin, S., Moghaddamnia, A., Han, D.and D.Remesun. 2009. “Daily pan evaporation modelling is hot and dry climate” , JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING. Vol. 14, PP. 803-811.

[15] Pohlert, M. 2004. “Use of empirical global radiation models for maize growth simulation”, Agric. Forest. Metorol. Vol. 126, PP. 47-58.

[16] Rahimi khoob, A., S. M. R. Behbahani and M. Jamshidi. 1388. “Evaluation of experimental methods and neural network models for estimating solar radiation reaching the ground in the South East of Tehran case study”, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Soil and Water Science. Vol. 50, PP. 53-62. (In farsi).

[17] Rehman, S. and M. Mohandes. 2008. “Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity”, Energy Policy. Vol. 36, PP. 571- 576.

[18] Samani, Z. 2000. “Estimation solar radiation and evaportranspiration using minimum climatological data”, J. Irrig. Drain. Eng. Vol. 126(4), PP. 65-256.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]

[19] Tang, W., Yang, K., He, J., and Qin, J. 2010. “Quality control and estimation of global solar radiation in China”, Solar Energy. Vol. 84, PP. 466–475.

[20] Yanga, K., T. Koikea and B. Yeb. 2006.” Improving estimation of hourly, daily and monthly solar radiation by importing global data sets”, Agric. For. Meteorol. Vol. 137(1-2), PP. 43-55.

[21] Yazdanpanah, H., R. Mojrayane and H. Barghi. 1388. “Estimated total solar radiation on a horizontal surface of the earth in Esfahan”, Journal of Geography and Environmental Planning. Vol. 375, PP. 95- 104. (In farsi).

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30 ]