

# مدل سازی تابش خورشید رسیده به زمین با استفاده از ANFIS و مدل های تجربی (مطالعه موردی: ایستگاه های زاهدان و بجنورد)

جمشید پیری<sup>۱</sup>، حسین انصاری<sup>۲</sup>، علیرضا فرید حسینی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۰۳/۱۵

چکیده:

مقدار انرژی خورشیدی که وارد زمین می شود، تابش ورودی (solar radiation) نام دارد. تابش ورودی مجموعه ای از طول موج های فرابنفش، قابل رویت و فروسرخ است. تابش خورشید رسیده به زمین یکی از پارامترهای مورد نیاز برای مطالعات منابع آب، محیط زیست و کشاورزی است. این پارامتر بندرت در ایستگاه های هواشناسی اندازه گیری می شود 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 ایستگاه های 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 مدل ها 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 برآورد بهتری نسبت به دو مدل تجربی در بر آورد تابش دارد.

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۲/۰۵/۱۰

کلمات کلیدی:

تابش خورشیدی، نروفازی و مدل های تجربی

jamshid\_eng@yahoo.com

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

## مقدمه

انرژی تابشی خورشید سرمنشأ انرژی های روی کره زمین است که یکی از منابع مهم انرژی پاک بویژه در کشور 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 ایستگاه‌ها پارامتر ساعات آفتابی به طور روزانه اندازه گیری می‌شود. [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 داده‌های موجود به دست آورد. تابش خورشید رسیده به زمین، یکی از پارامترهای مهم در مدل‌های بیلان انرژی، رشد گیاهان، تولید محصول و تبخیر- تعرق واقعی و پتانسیل است. علیرغم اهمیت این پارامتر، اندازه‌گیری آن به طور محدودی انجام می‌شود و این نقیصه نه تنها در کشورهای در حال توسعه بلکه در کشورهای توسعه یافته نیز به چشم می‌خورد. [۱۸] دستگاه اندازه‌گیری این پارامتر گران بوده و غالب ایستگاه‌های هواشناسی فاقد آن می‌باشند. همچنین این دستگاه به علت حساس بودن، نیاز به مراقبت‌های 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 مدل‌های تجربی از آنها استفاده می‌شود. [۱۶] دسترسی به پارامترهای هواشناسی که به عنوان ورودی مدل‌های تابش رسیده به زمین استفاده می‌شوند، عامل مهمی در انتخاب مدل مناسب برای هر منطقه است. طی دهه‌های گذشته، محققان زیادی معادلات تجربی مختلفی برای تخمین تابش خورشید با استفاده از سایر پارامترهای هواشناسی ارائه نمودند که می‌توان آنها را در سه گروه مبتنی بر ابرناکی [۳]، ساعات آفتابی [۲] و دما [۱۹ و 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 مدل‌های تابش مبتنی بر ساعات آفتابی، مدل انگستروم [۲] معروف‌ترین مدل شناخته شده است که برای تخمین تابش خورشید در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی استفاده می‌شود. علیزاده و خلیلی با استفاده از داده‌های هواشناسی شهر مشهد ضرایب معادله انگستروم را  $a=0/23$  و  $b=0/44$  با دقت مناسبی تخمین زدند. [۱] برخی تحقیقات نشان داده که چنانچه این مدل برای هر منطقه واسنجی شود، نتایج دقیق تری نسبت به مدل‌های 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 مدل‌های مبتنی بر دمای هواست. [۱۸] علاوه بر معادلات

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 مدل سازی به تعداد زیادی از ناحیه های کوچک، خطی سازی را در این ناحیه ها مورد بررسی قرار می دهد. [۱۴] سبزی پرور و علیائی در منطقه همدیدی تبریز با استفاده از مدل های مختلف شبکه عصبی و ترکیبات مختلف داده های 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 انگستروم است. [۲] رحمان و مهندس [۱۷] برای منطقه ای 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 می دهد، تدوین کردند. تحقیق آنها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه قادر است با استفاده از ورودی های 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 مدل ها دقت بالایی در برآورد تابش خورشیدی دارند. امکانات و تجهیزات اندازه گیری 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 می شود 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، داده های 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 مدل های هوش مصنوعی برای برآورد تابش خورشید نتایج دقیق تری نسبت به روابط تجربی ارائه می دهد، 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 مدل های 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 روش های تجربی و مدل نرو فازی برای برآورد تابش خورشیدی و انتخاب بهترین روش برای این مناطق بوده است. معادلات انگستروم و هارگریوز - 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.

## مواد و روشها

## مناطق مورد مطالعه و منابع داده ها

جدول (۱) خصوصیات شهرستانها

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	وسعت (km <sup>2</sup> )	ارتفاع از سطح دریا (m)
زاهدان	۶۰,۵۱	۳۰,۴۵	۳۶۵۸۱	۱۳۶۹,۹
بجنورد	۵۷,۲۰	۳۷,۲۸	۲۵۰۰	۱۰۷۰

## شهرستان زاهدان

این شهرستان از توابع 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 شده است. 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 می باشد. میانگین بارش سالانه در این شهرستان ۷۲ میلیمتر و میانگین دمای آن در سال ۸۲ از ۴۲/۵ الی ۶/۱۲- درجه سانتیگراد در تغییر است.

جدول (۲) پارامترهای آماری روزانه داده های هواشناسی برای ایستگاه زاهدان

Station	Data set	Unit	X <sub>mean</sub>	S <sub>x</sub>	C <sub>v</sub> (S <sub>x</sub> /X <sub>mean</sub> )	X <sub>min</sub>	X <sub>max</sub>	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 <sup>2</sup>	423.61	97.53	0.230	205.48	679.23	-0.33	618890.89	1

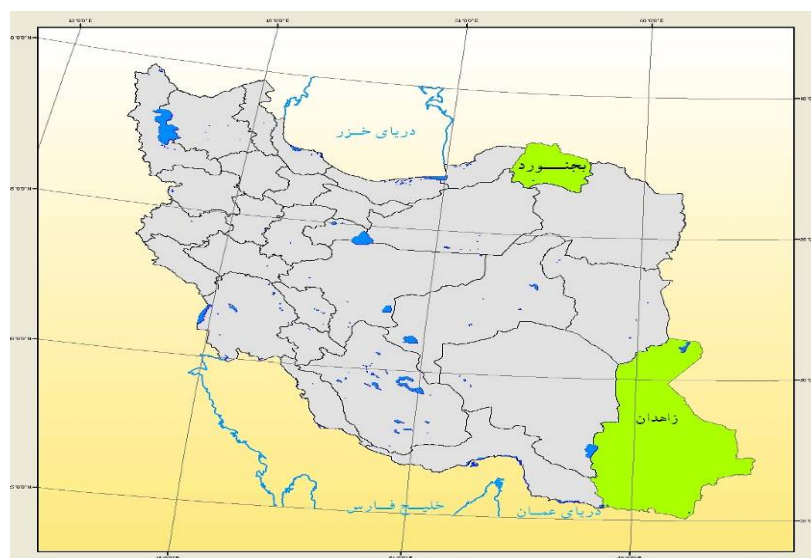
## شهرستان بجنورد

یکی از شهرستان های 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.

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 <sup>2</sup>	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

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 - سامانی [۵] برای تخمین تابش خورشید واسنجی و نتایج آنها با مدل نروفازی مقایسه شدند. معادله انگستروم [ ۲ ] تابش رسیده به زمین را به تابش برون زمینی و ساعات آفتابی به صورت زیر ارتباط می دهد:

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

در رابطه،  $H$  و  $H_0$  به ترتیب تابش رسیده به زمین و تابش برون زمینی بر حسب کالری بر سانتی متر مربع در روز  $(\text{Cal}/\text{cm}^2/\text{day})$ ،  $n$  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:

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

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

در رابطه فوق،  $TD$  دامنه تغییرات روزانه دمای هوا ( $^{\circ}\text{C}$ ) 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<sup>1</sup>)

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

1) Adaptive Neuro-fuzzy Inference system

فازی - 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 دوزنقه‌ای، 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 می‌شود:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (3)$$

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

۲- لایه دوم که در آن مقادیر ورودی به هر گره در هم ضرب شده و حاصل که وزن<sup>۲</sup> قانون‌ها می‌باشد، به دست می‌آید. مثلاً برای گره اول داریم:

$$w_i = \mu_{A_1}(x_1) \mu_{B_1}(x_2) \quad (4)$$

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

$$\bar{w}_1 = \frac{w_1}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

1) Left Hand Side  
2) Firing strength

$n$ : تعداد گره های این لایه است.

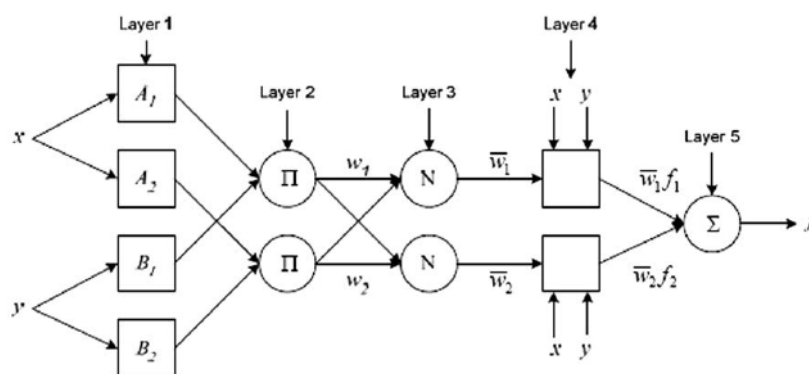
۴- لایه چهارم که لایه قوانین نامیده می شود و در این لایه، قانون ها به دست می آیند. قوانین از عملیات بر روی سیگنال های ورودی به این لایه به دست می آیند:

$$Z_1 = \bar{w}_1 f_1 = \bar{w}_1 (p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1) \quad [7]$$

که  $p_1, q_1, r_1$  پارامترهای متعاقب<sup>۱</sup> نامیده می شوند. مجموعه متشکل از  $\{(p_1, q_1, r_1), (p_2, q_2, r_2), \dots\}$  را مجموعه  $S_2$  می نامیم. به این مجموعه پارامترهای  $RHS$ <sup>۲</sup> گفته می شود.

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

$$\sum_{i=1}^n \bar{w}_i f_i \quad (6)$$



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

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<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، مجموعه پارامترهای  $S_1$  ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای  $S_2$  با استفاده از الگوریتم حداقل مجذور خطاها<sup>۲</sup> (LSE) محاسبه می‌شوند و در گام دوم که گام رو به عقب<sup>۳</sup> نامیده می‌شود، مجموعه پارامترهای  $S_2$  ثابت فرض شده و مجموعه پارامترهای  $S_1$  با استفاده از الگوریتم شیب کاهشی<sup>۴</sup> به دست می‌آیند. این مجموعه عملیات ها که در هر مرحله از آموزش اتفاق می‌افتد، Epoch نامیده می‌شود. با محاسبه پارامترهای مدل، مقدار خروجی مدل به ازای زوج مرتب‌هایی که تحت عنوان داده‌های آموزش مدل به مدل داده شده است، به دست می‌آید. این مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل با مقدار واقعی مقایسه می‌شود تا تابع خطای آموزش مدل ANFIS محاسبه شود. در هر مرحله (Epoch) از دوره آموزش، مقادیر پارامترهای مدل تغییر یافته و متعاقب آن میزان خطای آموزش و خطای آزمایش مدل نیز تغییر می‌کند، مقدار بهینه به صورتی انتخاب می‌شود که مدل در حالت بیش آموزش قرار نگیرد. [۱۴]

یکی از مشخصه‌های هر مدل ANFIS، نوع تابع عضویت در نظر گرفته شده برای ورودی‌های مدل می‌باشد. 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 می‌گیرند و مدل ANFIS برای هر کدام از این توابع عضویت به صورت جداگانه آموزش می‌بیند. در پایان، میزان خطای مدل‌های حاصل با هم مقایسه می‌شود 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 شبیه‌سازی 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 [۹، ۱۰ و ۱۴].

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

این روابط عبارتند از :

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

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

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

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 می‌دهد.

## 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 انگستروم 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، می‌توان با استفاده از معادلات واسنجی شده تابش خورشید را در آن دو منطقه به دست آورد. با اخذ داده‌های 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

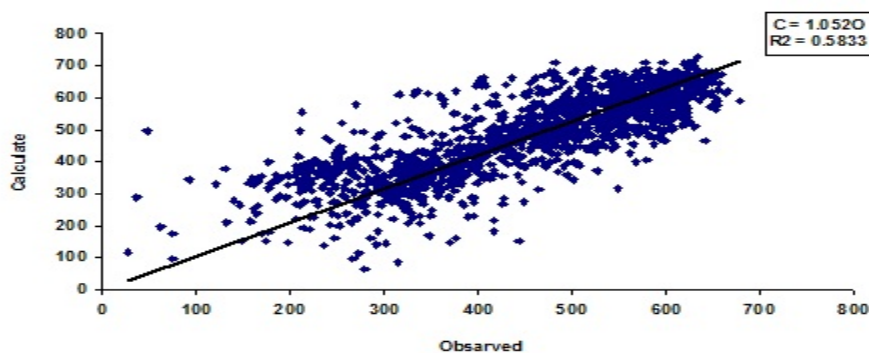
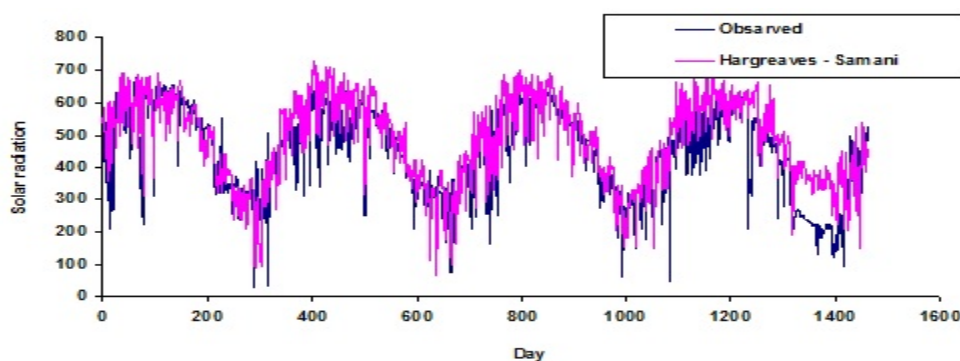
این دو شهر برآورد گردید. روابط پیشنهادی به صورت زیر می باشند.

ایستگاه زاهدان:

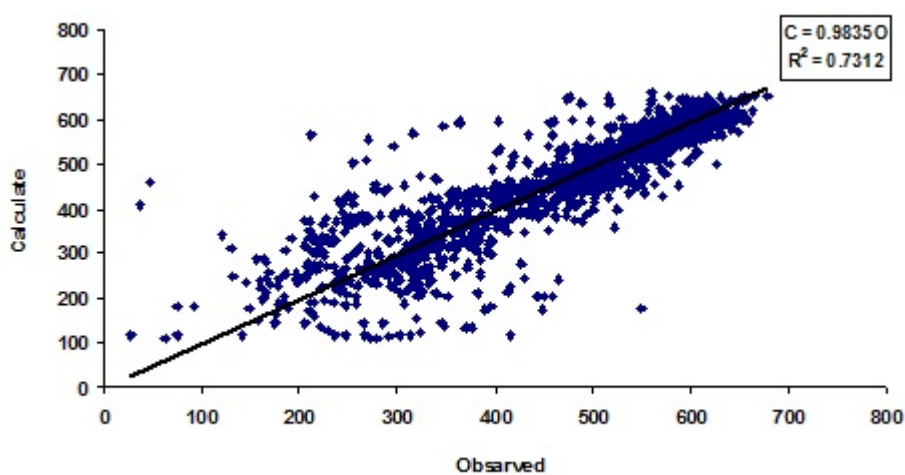
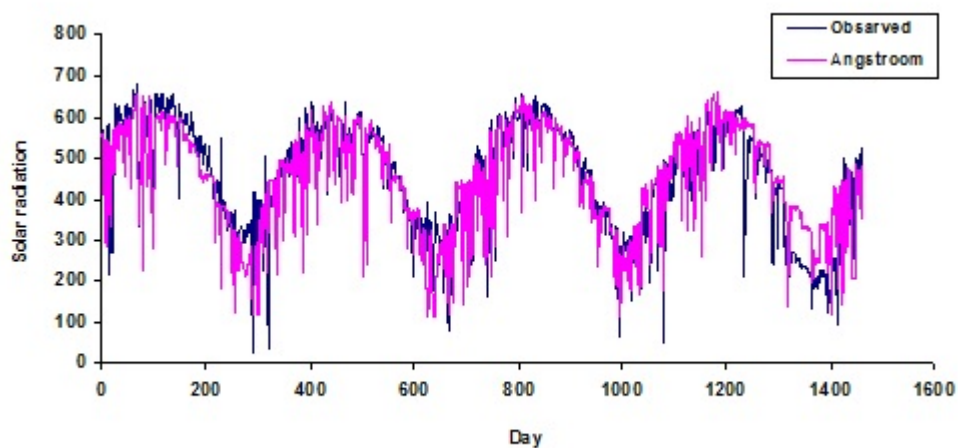
$$\frac{H}{H_0} = 0.466 + 0.18\left(\frac{n}{N}\right) - 0.14T' \quad (10)$$

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

$$\frac{H}{H_0} = 0.149(TD)^{0.5} \quad (11)$$



شکل ۳) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله هارگریوز - سامانی با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر زاهدان



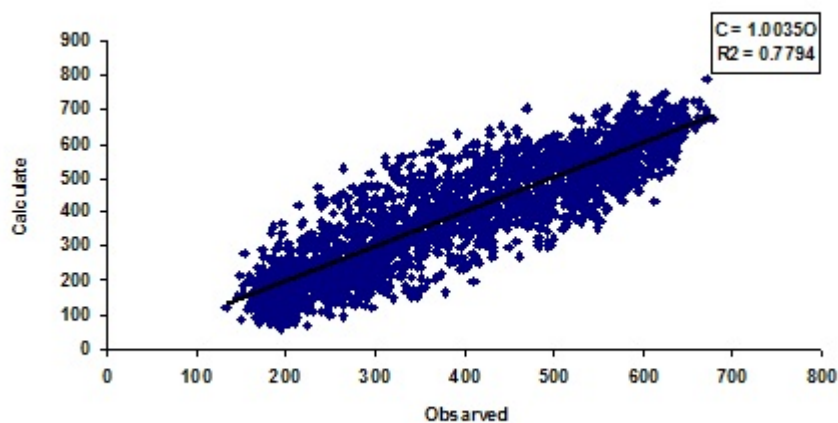
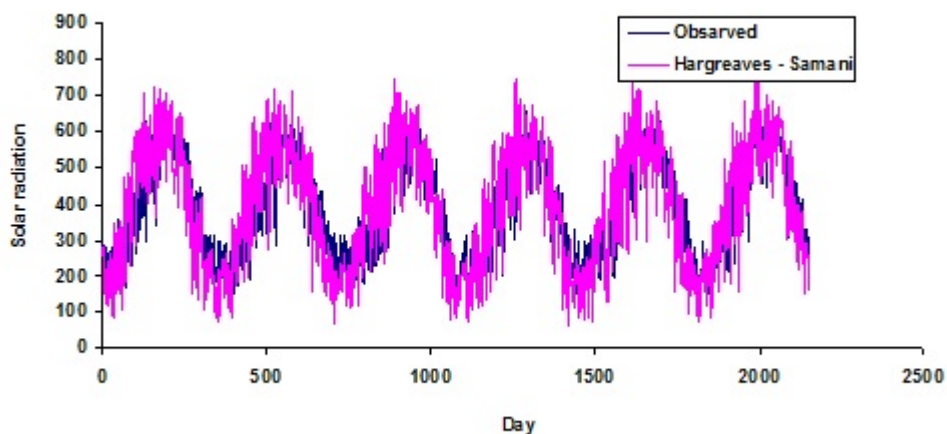
شکل ۴) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله انگستروم با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر زاهدان

ایستگاه بجنورد:

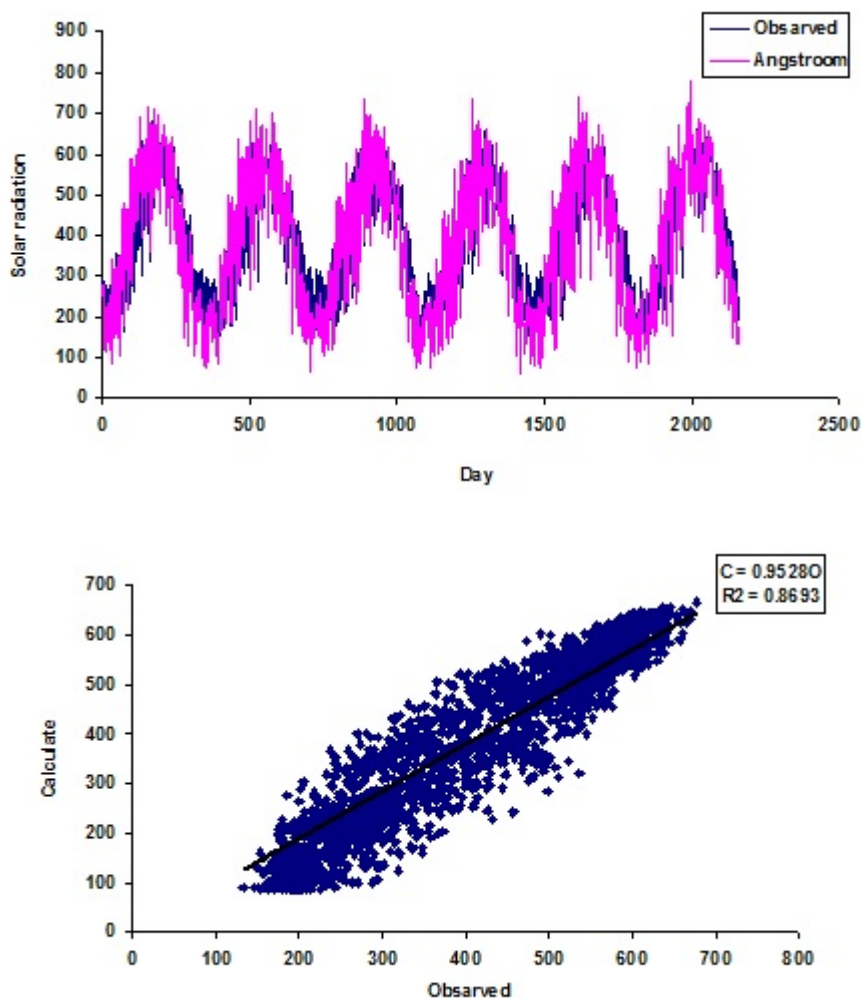
$$\frac{H}{H_0} = 0.529 + 0.174\left(\frac{n}{N}\right) - 0.136T' - 0.189R' \quad (12)$$

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

$$\frac{H}{H_0} = 0.157 (TD)^{0.5} \quad (13)$$



شکل ۵) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده معادله هارگریوز - سامانی با استفاده از پارامترهای هواشناسی برای شهر بجنورد



شکل ۶) 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 ۱۰ و ۱۲ و شکل های ۴ و ۶) با مقادیری که آلن و همکاران [۴] برای مناطق فاقد واسنجی توصیه کردند ( $a = 0.25$  و  $b = 0.5$ ) 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 - سامانی در دو منطقه به دست آمد (معادلات ۱۱ و ۱۳) و ضریبی که در مناطق غیر ساحلی به کار می رود (۰،۱۶)، این مقادیر خیلی نزدیک به مقداری است که هارگریوز برای مناطق غیر ساحلی توصیه کرده

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 می‌باشد. نحوه انتخاب پارامترهای هواشناسی بر اساس درجه اهمیت در تخمین تابش خورشیدی می‌باشد. 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 لونیبرگ 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 مدل‌های مورد بررسی این تحقیق با استفاده از داده‌های اختصاص یافته برای آزمایش مدل‌ها، در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. با توجه به جداول، ملاحظه می‌شود که همه مدل‌ها با همبستگی ضریب تعیین بالاتر از ۰/۸۴ شبیه‌سازی می‌کنند و نشان از دقت بالای این مدل‌ها می‌باشد. مطابق این جداول، مدل ANFIS با الگوریتم LM و تابع تحریک Gaussmf با ضریب همبستگی ۰/۸۷ برای زاهدان و ضریب همبستگی ۰/۹۶، برای بجنورد و مقادیر RMSE، MSE و MAE مطابق جداول دارای بیشترین دقت می‌باشد. همچنین شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ برای ایستگاه‌های زاهدان و بجنورد نشان می‌دهد 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 اعتبارسنجی وجود نداشته است.

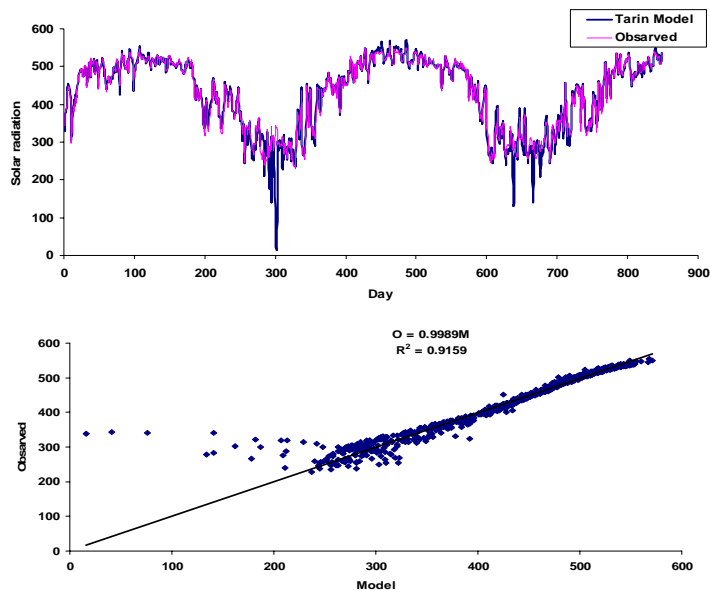
جدول ۴) مشخصات مدل‌های شبکه عصبی و نرو فازی برای تخمین تابش خورشید ایستگاه زاهدان

مدل	الگوریتم آموزشی	تابع تحریک	تعداد نرون لایه میانی	R <sup>2</sup>	RMSE (Cal/cm <sup>2</sup> )	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

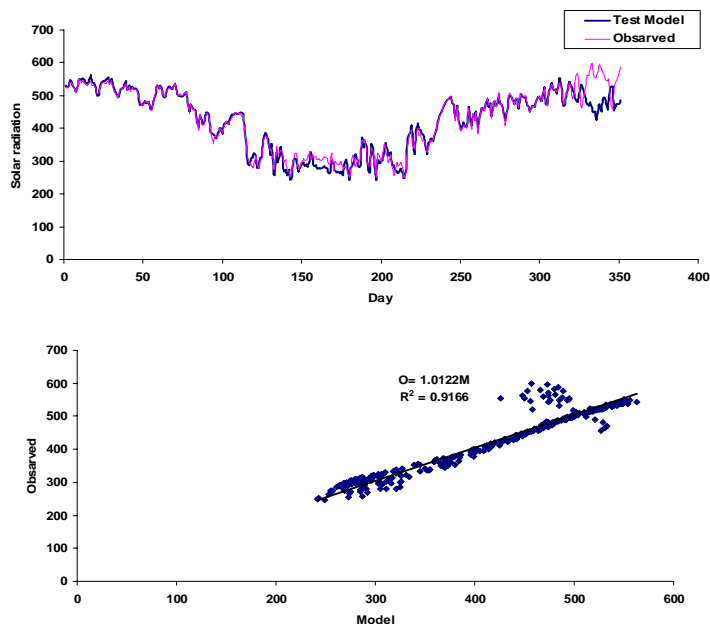
جدول ۵) مشخصات مدل‌های شبکه عصبی و نرو فازی برای تخمین تابش خورشید ایستگاه بجنورد

مدل	الگوریتم آموزشی	تابع تحریک	تعداد نرون لایه میانی	R <sup>2</sup>	RMSE (Cal/cm <sup>2</sup> )	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

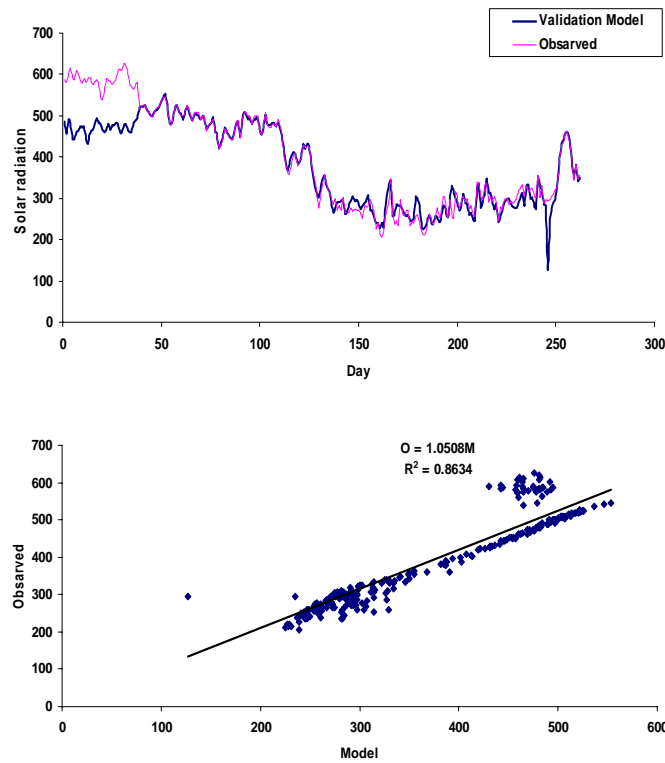
ایستگاه زاهدان



شکل ۷) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدل ANFIS (Train)

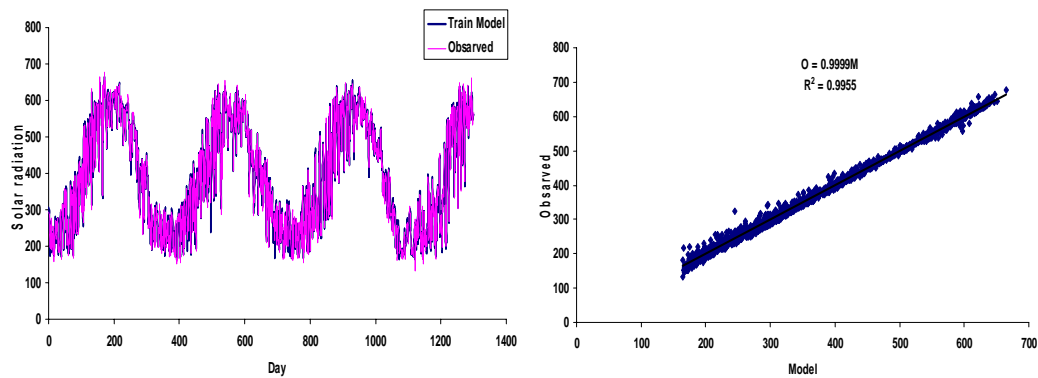


شکل ۸) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدل ANFIS (Test)

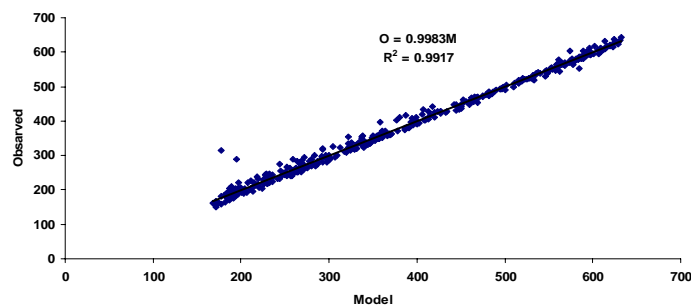
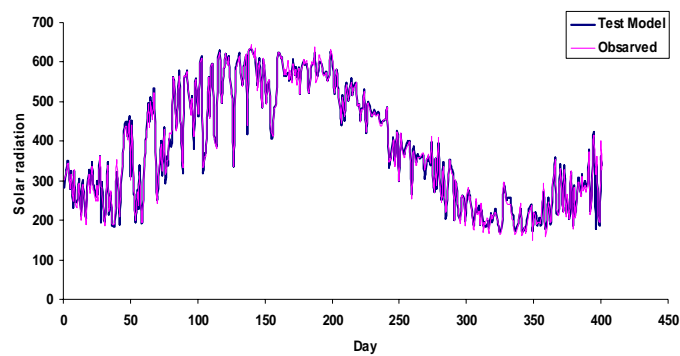


شکل ۹) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدل ANFIS (Validation)

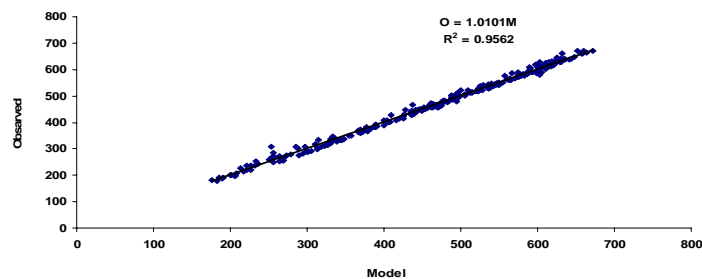
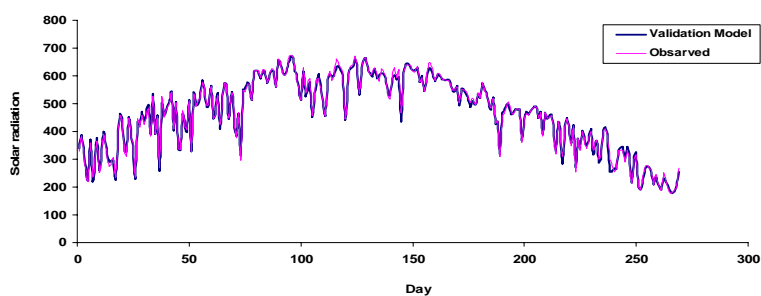
ایستگاه بجنورد



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



شکل (۱۱) مقایسه مقدار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده مدل ANFIS (Test)



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

جدول ۶) مقادیر  $R^2$  و RMSE و MSE و MAE تابش خورشید برآورده شده از روابط انگستروم، هاگریوز - سامانی و مدل نرو فازی برای ایستگاه زاهدان

مدل	پارامترهای ورودی	$R^2$	RMSE (Cal/cm <sup>2</sup> )	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	$T_{min}, T_{max}, h_s$	0.89	47.1	2218.41	24.2

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

مدل	پارامترهای ورودی	$R^2$	RMSE (Cal/cm <sup>2</sup> )	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	$T_{min}, T_{max}, h_s, RH$	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، MSE و 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، مدل هایی همچون شبکه عصبی و نرو فازی قابلیت خود را در پیش بینی این پارامترها به منزله ابزاری قدرتمند بخوبی نشان داده اند. در این تحقیق، مدل

نروفازی با داده‌های ورودی مشابه مدل‌های تجربی انگستروم و هارگریوز - سامانی برای برآورد تابش خورشید ساخته شد. پارامترهای 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 - سامانی) برای برآورد پارامتر تابش در این ایستگاه‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان از برتری مدل نروفازی نسبت به معادلات انگستروم و هارگریوز - سامانی داشت، اما با بررسی و ارزیابی این مدل‌ها، نتایج زیر نیز به دست آمد:

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

۲- نتایج مدل‌های مبتنی بر دمای بیشینه در مدل نروفازی دقیقتر بوده و نتایج مدل‌های مبتنی بر دمای هوا در حد قابل قبولی است و لذا برای ایستگاه‌های 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", Agricultural 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.

- [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. Meteorol. 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 evapotranspiration using minimum climatological data", J. Irrig. Drain. Eng. Vol. 126(4), PP. 65-256.

- [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).