

## ارزیابی روش‌های فازی، عصبی و فازی - عصبی در تخمین تابش خورشیدی کشور

نوید هوشنگی\*<sup>۱</sup>، علی اصغر آل شیخ<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
navid.hooshangi@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
(عضو قطب علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی)  
alesheikh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۳، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۳)

### چکیده

تابش خورشیدی در تعیین محل بهینه‌ی نیروگاه‌های خورشیدی و در مطالعات زمین‌شناسی و اکولوژیکی عاملی تأثیرگذار بوده و پارامتر اصلی بسیاری از مدل‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌باشد. در ایران ۶۳ ایستگاه تابش‌سنجی موجود است که در قیاس با گستره‌ی کشور تراکم پایینی برای شبکه پایش تابش خورشیدی محسوب می‌شود. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی عملکرد محاسبات نرم در تخمین تابش خورشیدی برای ایستگاه‌های سینوپتیک و ایجاد اطلس تابش خورشیدی بود. تحقیق حاضر در دو مرحله اصلی صورت گرفت؛ ابتدا با استفاده از اطلاعات هواشناسی موجود در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک، تابش خورشیدی برای این ایستگاه‌های محاسبه شد، سپس تابش خورشیدی برآورد شده برای ۳۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشوری با روش کریجینگ عادی پهنه‌بندی گردید. برای محاسبه‌ی تابش خورشیدی در ایستگاه‌های سینوپتیک از روش‌های عمده محاسبات نرم همچون سیستم‌های استنتاج فازی (FIS) با خوشه‌بندی فازی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم‌های استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) بهره گرفته شد. نتایج روش‌های مذکور با معیارهای دقت RMSE، MAE و MBE مقایسه شدند. نتایج محاسبه‌ی تابش خورشیدی با محاسبات نرم نشان داد که روش فازی سوگنو با خوشه‌بندی فازی IRMSE برابر با ۲۸/۰۷ وات بر مترمربع دارد که ۱۸٪ درصد بهتر از روش شبکه عصبی؛ ۳۹٪ بهتر از سیستم استنتاج عصبی-فازی با تقسیم‌بندی گریدی و ۴۲٪ درصد بهتر از خوشه‌بندی کاهشی است. نتایج حاصل از MAE و MBE نیز حاکی از قابلیت بالای روش فازی سوگنو در تخمین تابش خورشیدی برای ایستگاه‌های سینوپتیک بود. این روش برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی انعطاف‌پذیرتر بوده و در پیش‌بینی مکانی تابش خورشیدی راحت‌تر و سریع‌تر قابل اجرا می‌باشد. با درون‌یابی تابش خورشیدی برآورد شده برای ۳۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشوری با روش کریجینگ عادی، اطلس تابش خورشیدی ایجاد شد. این اطلس برای شناسایی نواحی پرتابش ایران به منظور کاربردهای مهندسی مانند مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و برنامه‌ریزی انرژی مناسب می‌باشد. اطلس تابشی حاصل نشان داد که تقریباً ۳۲ درصد از مناطق کشور دارای تابش خورشیدی بالای ۵۰۰ w/m<sup>2</sup> که مقدار تابش معیار برای نیروگاه‌های خورشیدی است، هستند.

**واژگان کلیدی:** تابش خورشیدی، پیش‌بینی مکانی، شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج فازی، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

استفاده از انرژی‌های خورشیدی وابسته به شرایط آب و هوایی منطقه و به‌ویژه تخمین دقیق تابش خورشیدی است [۱]. تابش خورشیدی نقشی اساسی در طراحی، بهره‌برداری، توسعه و برنامه‌ریزی انرژی خورشیدی ایفا می‌کند [۲،۳،۴] و به عنوان مهم‌ترین پارامتر در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره جهت مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد [۵،۶]. تابش خورشیدی در مطالعات زمین‌شناسی، اکولوژیکی و هیدرولوژیکی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد [۷] و ۹۹/۸ درصد از انرژی مورد نیاز برای فرآیندهای طبیعی مانند فتوسنتز را فراهم می‌کند [۸]. این فاکتور مهم هواشناسی، ورودی اصلی بسیاری از مدل‌های اکولوژیکی در مقیاس محلی، مدل‌های رشد گیاهان و مدل‌های کشت محصولات مانند مدل‌های رشد دانه بوده [۹،۱۰] و از اساسی‌ترین اجزای انرژی سطحی و تعادل چرخه‌ی آبی به شمار می‌رود [۱۱].

در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس کشوری عموماً داده‌های پیوسته از تابش خورشیدی مورد نیاز است [۱۲]. برداشت کمیت‌های محیطی پیوسته در سطح گسترده پیچیده و پرهزینه می‌باشد [۱۳]. با وجود این‌که داده‌های تابش خورشیدی مستقیماً در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند [۱۴] اما پراکندگی آن‌ها کم می‌باشد. لذا پیوسته نمودن این اطلاعات یکی از چالش‌های اصلی است. پهنه‌بندی تابش خورشیدی در گستره‌ی کشور ایران نیز به علت گستردگی شمالی-جنوبی کشور، تفاوت زیاد عرض جغرافیایی در این گستره و تراکم پایین شبکه‌ی تابش‌سنجی (۶۳ ایستگاه در کل کشور) با مشکلات بیشتری روبرو است [۷،۱۷]. اهمیت پتانسیل تابشی از یک سو و مشکلات ثابت مقدار انرژی تابشی اخذ شده، پژوهشگران زیادی را بر آن داشته است که به دنبال رابطه‌ای بین المان‌های مختلف جوی و تابش خورشیدی باشند تا این کمیت را با دقت مطلوب برآورد کنند.

روش‌های موجود جهت محاسبه و پهنه‌بندی تابش خورشیدی را می‌توان در چهار دسته‌ی کلی خلاصه کرد:

۱. اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی، ۲. استفاده از مدل‌های فیزیکی و محاسباتی (تجربی و نیمه‌تجربی)، ۳. اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و ۴. استفاده از مدل‌های

شبکه‌ی عصبی [۳،۱۵]. تابش خورشیدی در ایستگاه‌های هواشناسی توسط دستگاه پیرانومتر برداشت می‌شود [۴] که دقیق‌ترین روش‌های اخذ تابش خورشیدی می‌باشد [۳] و برای صحت‌سنجی روش‌های دیگر استفاده می‌گردد [۱۶]. عموماً مقادیر حاصل از این روش مستقیماً وارد مدل‌های درون‌یابی به منظور پهنه‌بندی می‌شوند [۱۷]. مدل‌های فیزیکی و محاسباتی بر اساس المان‌های هواشناسی مانند مدت تابش، ابرناکی و بازه‌ی دمای هوا، مقدار تابش خورشیدی را برآورد می‌کنند [۸]. تابش خورشیدی ماهواره‌ای از داده‌های سنجش از دوری سنجنده‌های NOAA، INSAT، AVHRR، HIMAWARI، Meteosat و GEOS استفاده می‌کنند [۸،۱۰]. این روش برای مناطقی مناسب است که در آن شبکه هواشناسی وجود ندارد. در مدل‌های پیش‌بینی شبکه عصبی، انواع پارامترهای هواشناسی مانند دمای هوا، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی به راحتی ترکیب می‌شوند تا تابش خورشیدی محاسبه گردد [۱۵]. کارایی روش‌های سنجش تابش خورشیدی وابسته به علل مختلفی از جمله تراکم شبکه‌ی پایش زمینی، کالیبراسیون دستگاه پیرانومتر، دقت داده‌های هواشناسی، نحوه و میزان تصحیحات اتمسفری می‌باشد. یکی از محدودیت‌های روش‌های موجود برای فراگیر شدن آن است که داده‌های مورد نیاز برای هر مدل در برخی موارد به‌سختی بدست می‌آید [۱۱]، لذا جهت افزایش دقت نتایج، روش‌های مختلف با هم ترکیب می‌شوند. Bezzi و Vitti تابش خورشیدی مستقیم (DSR)<sup>۱</sup> را برای ۱۰۰ نقطه، از مدل r.sun محاسبه و با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی زمینی کالیبره نمودند. در نهایت نتایج حاصل را با روش‌های مختلف درون‌یابی پهنه‌بندی کردند [۱۸]. Bojanowski و همکاران (۲۰۱۳b) بعد از پیوسته نمودن داده‌های زمانی، با ترکیب داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و ماهواره‌ای نقشه‌های پیوسته‌ی سری-زمانی برای اروپا ایجاد کردند. جهت کالیبراسیون ضرایب مدل‌های محاسباتی نیز از تصاویر ماهواره‌ای برای زمبابوه [۲] و داده‌های ایستگاه‌های زمینی برای اروپا [۱۵] استفاده شده است. Dubayah و Loechel در سال ۱۹۹۷ ابتدا مدلی جهت وارد کردن توپوگرافی بر مبنای شبیه‌سازی حرکت خورشیدی در تخمین تابش خورشیدی

<sup>۱</sup> Direct Solar Radiation

ANFIS<sup>۱</sup> نیز به‌وفور در برآورد دمای خاک [۲۷] و پیش-بینی آلودگی هوا [۲۸] استفاده شده است. اگر چه روش فازی تاکاگی-سوگنو کمتر در پهنه‌بندی پدیده‌های محیطی مد نظر قرار گرفته، Tutmez و Hatipoglu روش فازی تاکاگی-سوگنو با خوشه‌بندی فازی و کریجینگ عادی را در مدل‌سازی نیترات آبخوان مرسین آرسو<sup>۲</sup> مقایسه کردند که نتیجه نمایانگر برتری روش‌های فازی بوده است [۲۹].

انتخاب روش مناسب جهت پهنه‌بندی تابش خورشیدی در سطح کشور به علل متعددی وابسته است. هر کدام از روش‌های محاسبه و پهنه‌بندی تابش خورشیدی مزایا و معایب خود را دارند و روش واحدی برای محاسبه وجود ندارد. لذا هدف، کاربرد، شرایط و داده‌های موجود از یک منطقه، نوع روش محاسبه را مشخص می‌کنند. در این تحقیق هدف ایجاد اطلس تابش خورشیدی برای شناسایی نواحی پرتابش ایران جهت کاربردهای مهندسی مانند مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و برنامه‌ریزی انرژی می‌باشد. لذا استفاده از مدل‌هایی مانند آنگستروم که نیازمند کالیبراسیون (واسنجی) و تخمین دقیق ضرایب مربوطه بوده [۹] و برای مناطق کوچک با شرایط آب و هوایی یکنواخت انجام می‌گیرد [۱۴] برای گستره‌های بزرگ مانند کشور با خطا روبرو می‌شوند. روش‌های هیبرید نیز به داده‌های دمای روزانه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی نیاز دارند [۲۰] و با داده‌های کمتر قابل اجرا نخواهند بود. آنالیز بر روی تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای کم‌دقت و دشوار بوده و داده‌های ماهواره‌ی Meteosat که در سایت Sodra وجود دارد برای اروپا و آفریقا مناسب بوده [۲] و دقت مکانی این داده‌های این ماهواره‌ی زمین مرجع برای ایران کم می‌باشد. با توجه به تراکم پایین شبکه‌ی تابش‌سنجی کشور نیز استفاده‌ی مستقیم از داده‌های زمینی پیرانومتری در روش‌های درون‌یابی مانند کریجینگ با دقت بالایی همراه نمی‌شود، زیرا چیدمان ناصحیح ایستگاه‌های نمونه‌برداری مانع از درک صحیح ویژگی‌های محیطی شده [۳۰] و باعث می‌شوند فرضیات روش‌های درون‌یابی با واقعیت هماهنگ نبوده و لذا نتایج تردید پذیر باشند [۱۳]. بنابراین، در این

اجرا نموده و در نهایت جهت دقیق‌سازی نتایج از مشاهدات زمینی استفاده نمودند.

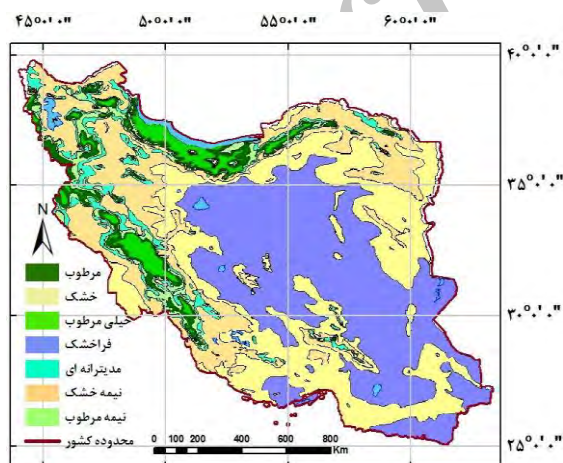
در مناطق مختلف کشور ایران نیز بیشتر مدل‌های تجربی و محاسباتی مانند آنگستروم، رگرسیون و هیبرید برای محاسبه پتانسیل تابشی استفاده شده است. در بررسی مدل‌های مختلف تجربی که توسط موسوی بایگی و اشرف در برآورد تابش خورشیدی کشور ایران به منظور معرفی مناسب‌ترین مدل در یک اقلیم نیمه‌خشک انجام شد مدل آنگستروم-پریسکات به عنوان بهترین برآورد انتخاب گردید [۱۹]. معینی و همکاران (۱۳۸۹) با توجه به وابستگی مدل آنگستروم به پارامترهای اقلیمی، شرایط جغرافیایی و نوع پوشش گیاهی منطقه، ابتدا کشور را بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن دسته‌بندی کردند و سپس از مدل آنگستروم استفاده نمودند. عرفانیان و بابایی حصار به ارزیابی مدل هیبرید در برخی از ایستگاه‌های کشور پرداختند و نتایج حاصل را با مدل اصلاح‌شده صباغ مقایسه نمودند، که در نتایج آنان برتری روش هیبرید محسوس بود [۲۰]. در اکثر تحقیقات داخلی به مقایسه‌ی دقت مدل‌های مختلف بسنده شده است و نقشه‌ی تابش خورشیدی برای منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه نشده است. پهنه‌بندی تابش خورشیدی کلی با ۶۳ ایستگاه تابش-سنجی به روش درون‌یابی توسط Alamdari و همکاران (۲۰۱۳) و موسوی بایگی و اشرف (۱۳۹۰) صورت گرفته که دقت نقشه حاصل از پهنه‌بندی ذکر نگردیده است.

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های هوشمند و فازی در برآورد پدیده‌های محیطی مانند خاک و هیدرولوژی افزایش چشمگیری داشته است [۲۱، ۲۲، ۲۳]. شبکه‌های عصبی مصنوعی در حل مسائل پیچیده که مدل‌های تجربی یا نیمه تجربی در حل آن کارایی مناسب نداشته باشند، بسیار مفید هستند [۷]. Sözen و همکاران در ترکیه [۲۴]، Fadare و همکاران در آفریقا [۲۵] با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به تخمین و پهنه‌بندی پتانسیل تابش پرداختند. زمانی محی‌آبادی در شهر رفسنجان با استفاده از شبکه‌ی عصبی تابش کل خورشیدی را محاسبه نمودند [۲۶]. سبزی‌پرور و بیات‌ورکشی (۱۳۸۹) در ۴ ایستگاه در سطح کشور با ارزیابی دقت روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی در شبیه‌سازی تابش کل خورشیدی، قابلیت شبکه‌ی عصبی را تأیید کردند. روش

<sup>۱</sup> Adaptive neuro fuzzy inference system

<sup>۲</sup> Mersin-Tarsus

بیش از ۱۵٪ از منابع گازی کل جهان را دارا می‌باشد و دومین تأمین‌کننده نفت اپک بوده و دومین منبع بزرگ گاز دنیا را در اختیار دارد [۱۷]. در عین حال کشور ایران جزء ۲۰ کشور آلوده‌ی تولید کننده‌ی گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود و همچنین روزبه‌روز میزان ذخایر نفتی آن کاهش پیدا می‌کند، لذا بیشتر به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر روی آورده‌اند. ارزیابی‌های مختلف جهانی نشان می‌دهد که کشورهای مدیترانه‌ای شامل اروپایی جنوبی، خاورمیانه (مانند ایران)، هند، پاکستان، چین، شمال آمریکا و استرالیا به عنوان مناطق پرتابش خورشیدی محسوب می‌شوند [۳۱]. کشور ایران در کمربند خورشیدی قرار گرفته است و به طور متوسط ۲۸۰۰ ساعت، روز خورشیدی دارد [۳۲]. اگر این کشور مساحتی معادل ۱۰۰×۱۰۰ کیلومتر مربع زمین را به ساخت نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک اختصاص دهد، برق تولیدی آن معادل کل تولید برق کشور در سال ۱۳۸۹ خواهد بود [۳۳]. میزان تولید الکتریسیته‌ی ایران در سال ۱۳۹۱ در حدود ۶۸ هزار و ۹۳۲ مگاوات می‌باشد. میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نو در حدود ۲۱۹ مگاوات است. میزان استفاده از انرژی خورشیدی در قیاس با مقادیر تولید و مصرف کل انرژی در ایران نزدیک به صفر می‌باشد، لذا استفاده‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس از انرژی‌های تجدید پذیر در ایران بخشی از سیاست‌های اصلی کشور است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و اقلیمی ایران

تحقیق جهت پهنه‌بندی از روش‌های ترکیبی استفاده شد. بدین منظور ابتدا جهت پرتراکم نمودن شبکه‌ی پایش، از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک در روش‌های شبکه‌ی عصبی، فازی سوگنو و سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی استفاده شد و سپس نتایج حاصل از بهترین روش به منظور پهنه‌بندی وارد روش درون‌یابی کریجینگ گردید.

در مطالعاتی که تاکنون در زمینه‌ی برآورد تابش خورشیدی در مناطق فاقد داده صورت گرفته بیشتر از مدل‌های تجربی در مقیاس منطقه‌ای استفاده شده [۱۹] و روش‌های درون‌یابی نیز به‌طور مستقیم و بدون دخالت دادن داده‌های کمکی و افزایش تراکم شبکه تابش‌سنجی استفاده شده‌اند [۱۷]. خروجی حاصل از تحقیقات داخل کشور نیز صرفاً ارزیابی دقت روش‌های مختلف بوده و نقشه‌ی پهنه‌بندی GIS ای وجود ندارد. هدف اصلی این تحقیق افزایش تراکم شبکه تابش‌سنجی با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌ها سینوپتیک و در نتیجه پهنه‌بندی دقیق تابش خورشیدی به منظور ایجاد اطلس تابش خورشیدی می‌باشد.

در تحقیق حاضر بعد از بررسی کارایی شبکه‌ی پایش تابش خورشیدی، پهنه‌بندی تابش خورشیدی در سطح کشور در دو مرحله‌ی اصلی انجام گرفت، در ابتدا با استفاده از اطلاعات ۶۳ ایستگاه تابش‌سنجی کشور شبکه‌ی عصبی آموزش داده شد و سیستم استنتاج فازی و ANFIS ایجاد شدند و نتایج روش‌های بررسی شده با هم مقایسه گردید. در مرحله‌ی دوم و در نهایت نتایج بهترین روش جهت پهنه‌بندی با روش کریجینگ عادی در سراسر کشور استفاده شد. نتایج شبکه‌ی ایجاد شده جهت تخمین مقادیر سایر ۳۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشور استفاده گردید. در ادامه مبنای نظری هر کدام از مراحل تشریح می‌شود.

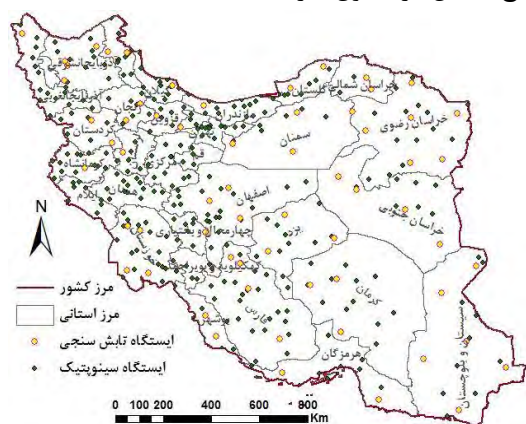
## ۲- مواد و روش بررسی

### ۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری با مساحت ۱,۶۳۵,۰۰۰ km<sup>2</sup> می‌باشد. شکل ۱ برخی از اطلاعات ژئوگرافیکی و تنوع اقلیمی منطقه را نمایش می‌دهد. ایران ۹٪ از کل منابع نفتی و

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

به اقتباس از تحقیق زارع‌ایبانه و همکاران [۳۴] از آنالیز همبستگی پیرسن برای محاسبه‌ی میزان همبستگی بین پارامترهای هواشناسی و تابش خورشیدی استفاده شد که نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- ایستگاه‌های تابش سنجی و سینوپتیک کشور

داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق مجموعه‌ی داده‌های هواشناسی سالنامه‌ی ۲۰۱۱ که شامل دما (بیشینه، کمینه و متوسط)، بارش، تگرگ، مه، دمای مرطوب هوا، دمای DBT<sup>۲</sup>، محدوده‌ی دید، فشار از سطح دریا، فشار از ایستگاه و ساعات آفتابی در ۳۳۳ ایستگاه سینوپتیک و مقادیر متوسط مربوط به تابش خورشیدی کلی سالانه در طول سال ۲۰۱۱ و در ۶۳ ایستگاه کشور بود. شکل ۲ نحوه‌ی پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک و تابش‌سنجی را نشان می‌دهد. در تحقیقات دیگری نیز از داده‌های ساعات آفتابی و دما جهت افزایش تراکم شبکه‌ی پایش استفاده‌شده است [۲، ۹، ۱۰]. در روش‌های عصبی و فازی از داده‌هایی که با پدیده‌ی مجهول همبستگی بالایی دارند برای آموزش شبکه استفاده می‌شود [۲۸]. در این تحقیق

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز همبستگی پیرسن

تابش خورشیدی	دمای بیشینه	دمای کمینه	دمای متوسط	بارش	تگرگ	مه	فشار از ایستگاه	فشار از سطح دریا	درجه DBT	درجه WETBULB	ساعات آفتابی	
۱	۰/۶۴	۰/۴۶	۰/۵۶	-۰/۵۸	-۰/۲۷	۰/۱۶	-۰/۱۰	-۰/۸۲	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۸۳	تابش خورشیدی
۱	۰/۹۰	۰/۹۸	-۰/۵۵	-۰/۳۹	۰/۶۲	۰/۶۰	-۰/۶۲	۰/۹۷	۰/۷۸	۰/۵۳	دمای بیشینه	
۱	۰/۹۷	-۰/۵۱	-۰/۳۴	۰/۸۲	-۰/۷۳	-۰/۵۰	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۲۴	دمای کمینه		
۱	-۰/۵۵	-۰/۳۷	۰/۷۳	۰/۶۸	-۰/۵۸	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۴	دمای متوسط			
۱	-۰/۳۸	-۰/۲۲	-۰/۰۴	۰/۶۰	-۰/۵۷	-۰/۳۶	-۰/۶۲	بارش				
۱	-۰/۳۳	-۰/۱۲	۰/۴۳	-۰/۴۱	-۰/۳۰	-۰/۳۴	تگرگ					
۱	۰/۷۳	-۰/۳۶	۰/۷۳	۰/۹۱	-۰/۰۹	مه						
۱	۰/۱۰	۰/۶۵	۰/۸۴	-۰/۲۹	فشار از ایستگاه							
۱	-۰/۶۰	-۰/۳۳	-۰/۷۵	فشار از دریا								
۱	۰/۸۸	۰/۴۳	درجه DBT									
۱	..	درجه WETBULB										
۱	۱	ساعات آفتابی										

کمکی جهت آموزش شبکه‌ی عصبی، فازی- عصبی و ایجاد سیستم فازی استفاده شد. در این تحقیق برخلاف مطالعه Bojanowski و همکاران (۲۰۱۳b) همبستگی‌ای بین  $T_{max}-T_{min}$  و تابش خورشیدی مشاهده نشد.

## ۳-۲- روش‌های استفاده‌شده

عموماً برای افزایش تراکم شبکه از داده‌های هواشناسی مانند ساعات آفتابی، ابرناکی و دما استفاده می‌شود. در شرایطی که شبکه‌ی پایش از تراکم کافی برخوردار نباشد و داده‌ی ساعات آفتابی موجود باشد از مدل آنگستروم؛

عموماً همبستگی بالای ۰/۶، همبستگی مطلوب بین پدیده‌های طبیعی محسوب می‌شوند [۳۵]. با توجه به همبستگی بالای داده‌های تابش خورشیدی با ساعات آفتابی (۰/۸۳)، دمای بیشینه (۰/۶۳) و همبستگی معکوس بالا با متوسط فشار از سطح آب‌های آزاد (-۰/۸۲) در قیاس با داده‌های دیگر، از این داده‌ها به عنوان داده‌های

- ۱ Haze
- ۲ Wet-bulb temperature
- ۳ Dry-bulb temperature

منظور مشخص کردن ساختار و دسته‌بندی داده‌ها از روش خوشه‌بندی فازی FCM<sup>۱</sup> استفاده می‌شود [۲۹].

با استفاده از خوشه‌بندی فازی و استخراج مجموعه‌ای از قوانینی که رفتار داده‌ها را مدل می‌کند، می‌توان یک سیستم استنتاج فازی (FIS)<sup>۲</sup> ایجاد کرد. این سیستم نیازمند ورود داده‌های اولیه به صورت فازی می‌باشد. در سیستم استنتاج فازی سوگنو بعد از خوشه‌بندی داده‌ها و در قسمت تالی برای هر دسته‌ی فازی تابعی به صورت ثابت یا خطی برازش داده می‌شود. در قسمت قوانین نیز هر دسته‌ی طبقه‌بندی‌شده به تابع برازش داده‌شده در بخش تالی متصل می‌شود. در نهایت با توجه به میزان عضویت هر داده به دسته‌های طبقه‌بندی‌شده و مفاهیم فازی سوگنو مقدار خروجی تخمین زده می‌شود. در این تحقیق سیستم استنتاج فازی سوگنو با روش خوشه‌بندی فازی به اختصار سوگنو با خوشه‌بندی فازی نام برده می‌شود.

### ۲-۳-۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، یکی از روش‌های محاسباتی است که با الگوبرداری از سیستم کارکرد مغز انسان، با پردازش داده‌های تجربی و بدون توجه به فیزیک مسئله به منظور یادگیری و ایجاد دانش، قانون نهفته در ورای اطلاعات را استخراج می‌کنند [۳۷]. شبکه عصبی مصنوعی با شناخت روابط ذاتی و قوانین میان داده‌ها، فضای ورودی را به فضای خروجی تصویر می‌کند. پرسپترون یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین نوع شبکه‌های عصبی می‌باشد که به صورت پرسپترون تک لایه و چندلایه اجرا می‌شود [۷]. پرسپترون تک لایه برای حل مسائل مجزای خطی قابل استفاده است. برای مسائل پیچیده‌تر از شبکه‌ی پرسپترون چندلایه که از تعداد بیشتری لایه‌ی میانی تشکیل شده استفاده می‌شود. شبکه‌ی پرسپترون چندلایه با قانون یادگیری پس-انتشار خطا در خصوص تخمین پارامترهای مجهول مناسب ارزیابی شده است [۲۶]. در شبکه‌ی پرسپترون چندلایه، هر لایه شامل تعدادی نرون با توابع تبدیل متفاوت می‌باشد؛ یعنی مدل نرون‌ها در لایه‌ها می‌توانند متفاوت در نظر گرفته شوند. مشخصه‌های قابل توجه شبکه‌های عصبی، قابلیت یادگیری آن‌ها است، به طوری که قادرند هر بار وزن‌هایشان را با نمونه ورودی اصلاح کنند. در شبکه‌ی پس انتشار

در صورتی که ابرناکی و دمای هوا موجود باشد از مدل سوپیت وان؛ و اگر فقط دما موجود باشد از مدل هارگریوز استفاده می‌شود [۱۸، ۱۵]. این مدل‌ها نیازمند سری زمانی داده‌ها می‌باشند و ضرایب مدل‌ها برای هر ایستگاه و با توجه به اطلاعات همان ایستگاه در طول دوره‌ای ۱۰-۱۵ ساله محاسبه می‌شود. در ادامه ضرایب مدل‌ها در کل سطح گسترش می‌یابد. در این تحقیق با توجه به در اختیار بودن اطلاعات هواشناسی محدود (سالانه)، ماهیت غیرخطی و پیچیده‌ی تابش خورشیدی و تنوع عوامل متعدد مؤثر در آن مانند شیب، جهت زمین، قدرت بازتابش سطح، میزان سایه و جذب آسمان [۱۱] از روش‌های فازی، عصبی و فازی-عصبی برای تخمین تابش خورشیدی استفاده شد.

### ۲-۳-۱- فازی سوگنو با خوشه‌بندی فازی

یکی از دسته‌های اصلی سیستم‌های استنتاج فازی، سیستم فازی تاکاگی-سوگنو می‌باشد [۳۶]. سیستم فازی مبتنی بر قواعد منطقی شرط-نتیجه است که با استفاده از مفهوم متغیرهای زبانی و روند تصمیم‌گیری فازی، فضای متغیرهای ورودی را بر فضای متغیرهای خروجی تصویر می‌کند [۳۷]. از مزایای این روش می‌توان اجرای ساده آن بر روی انواع داده‌های اشاره کرد [۳۸]. توانایی پیاده‌سازی دانش بشری با استفاده از مفاهیم برجسب‌های زبانی و قواعد فازی، غیرخطی بودن، قابلیت سازش‌پذیری این سیستم‌ها و دقت بهتر آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها در شرایط محدودیت داده‌ها، از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این سیستم‌ها است [۲۷]. سیستم استنتاج فازی سوگنو به روش‌های مختلفی مانند تقسیم‌بندی گریدی، خوشه‌بندی کاهشی و خوشه‌بندی فازی انجام می‌گیرد. روش‌های گریدی و خوشه‌بندی کاهشی عموماً جهت بهینه کردن قواعد وارد چرخه‌ی آموزش می‌شوند [۲۸]، لذا در این تحقیق نیز این روش‌ها جهت بهینه‌سازی وارد چرخه‌ی ANFIS می‌شوند. روش سوگنو با خوشه‌بندی فازی روشی نوین می‌باشد که دقت قابل قبولی در پیش‌بینی ارائه می‌دهد. مراحل اجرای فازی سوگنو شامل خوشه‌بندی (معین کردن ساختار)، تعیین قوانین و تخمین پارامتر می‌باشد. در این روش به

<sup>۱</sup> Fuzzy C-Means

<sup>۲</sup> Fuzzy Interface System

در مرحله آموزش، با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر خروجی به مقادیر واقعی نزدیک تر می‌شوند. روش‌های آموزش رایج، روش پس انتشار خطا و هیبرید است. در روش پس انتشار خطا با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش می‌گردد و پارامترها تصحیح می‌شوند. در روش هیبرید از ترکیب روش گرادیان نزولی و کمترین مربعات خطا استفاده می‌شود. انتخاب تصادفی داده‌ها از جمله نکاتی است که در آموزش و تست شبکه ANFIS باید به آن‌ها توجه کرد [۲۸].

### ۲-۳-۴- نحوه ارزیابی

اساس روش‌های ارزیابی این است که تعدادی از نقاط حذف و درون‌یابی با بقیه‌ی نقاط انجام می‌گیرد. این‌که نقاط به صورت دسته‌ای حذف شوند اعتبارسنجی و اگر نقاط یک‌به‌یک حذف شوند اعتبارسنجی متقابل<sup>۱</sup> گویند [۳۹]. فرمول‌های غالب ارزیابی مدل‌های محاسباتی، میانگین مطلق اشتباهات (MAE)<sup>۲</sup>، خطای جزر میانگین مربعات (RMSE)<sup>۳</sup>، میانگین اربیبی اشتباهات (MBE)<sup>۴</sup> می‌باشد [۴۰]. RMSE مهم‌ترین کمیت آماری ارزیابی مدل‌های درون‌یابی است که به داده‌های پرت<sup>۵</sup> حساس می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی خطای غیر سیستماتیک (اشتباهات) است. هر چه مقدار این کمیت نزدیک به صفر باشد، خطا کمتر خواهد بود [۱۳]. MAE در حالت ایده‌آل باید صفر باشد، که مقادیر مثبت و منفی به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بیش برآورد و برآورد نقصانی (کمتر از مقدار واقعی) می‌باشند. این پارامتر معرف دقت روش و مقدار متوسط خطا است [۲۹]. MBE نیز نشان‌گر میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده شده می‌باشد. این کمیت برای تدقیق میزان برآورد استفاده می‌شود و نشان‌دهنده‌ی خطاهای سیستماتیک است [۹]. MAE و MBE هر دو میزان اربیبی یا صحت را نشان می‌دهند.

میزان خطای قابل قبول در تخمین تابش خورشیدی به مقیاس زمانی داده‌ها (روزانه، هفتگی، ماهیانه و سالانه)، منطقه‌ی مطالعاتی و کاربرد وابسته است. دقت حاصل از درون-

<sup>۱</sup> Cross validation, Leave-one-out cross validation

<sup>۲</sup> Mean Absolut Error

<sup>۳</sup> Root Mean Square Error

<sup>۴</sup> Mean Bias Error

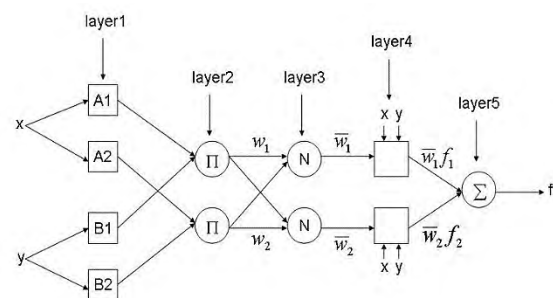
<sup>۵</sup> Outlier

پیش‌خور، ابتدا وزن‌های لایه‌ی خروجی تعدیل می‌شوند، زیرا برای هر یک از نرون‌های لایه‌ی خارجی مقدار مطلوبی وجود دارد که می‌تواند وزن‌ها را تعدیل کند. پس از محاسبه‌ی خطای آموزش شبکه، مقدار آن با مقدار مطلوب مقایسه و در صورت غیر قابل قبول مقدار خطا، الگوریتم یادگیری اقدام به بهینه‌سازی مقدار خطا می‌کند.

### ۲-۳-۳- سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

ترکیب سیستم‌های استنتاج فازی که مبتنی بر قواعد منطقی بوده و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، منجر به ارائه سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی می‌شود [۳۷]. سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS) از الگوریتم‌های شبکه‌ی عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. این سیستم به عنوان ابزاری قدرتمند قابلیت پیش‌بینی نتایج با استفاده از داده‌های عددی موجود را دارد. در سامانه عصبی- فازی متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود. ساختار مدل ANFIS از پنج لایه همانند شکل ۳ و به شرح زیر تشکیل می‌شود:

لایه اول، گره‌های ورودی می‌باشند، در این لایه درجه عضویت گره‌های ورودی (میزان تعلق هر ورودی) به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت توسط کاربر مشخص می‌گردد. عملیات مدل‌سازی در لایه‌های دوم تا چهارم انجام می‌گیرد. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن هر قانون در لایه دوم بدست می‌آید. در لایه سوم وزن نسبی قانون‌ها محاسبه می‌شوند. در لایه‌ی چهارم هر گره دارای تابع گره بوده و به تمام ورودی‌ها و یک گره در لایه سوم متصل است. لایه‌ی آخر، خروجی شبکه می‌باشد که هدف آن جمع‌بندی تمام خروجی قانون‌ها است [۲۷، ۲۸].



شکل ۳- نمایی از ۵ لایه‌ی موجود در ساختار مدل ANFIS

اندازه‌ی متغیرهای ناحیه‌ای می‌باشد. در میان روش‌های مختلف کریجینگ، کریجینگ عادی برای داده‌هایی که دارای روند محلی یا مقطعی هستند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. OK بر این فرض می‌باشد که پارامتر درون‌یابی متغیر ناحیه‌ای بوده و میانگین ثابت، معلوم نیست. یکی از دغدغه‌های اصلی در استفاده از کریجینگ عادی عملی بودن فرض ذکر شده می‌باشد. در این روش وزن‌ها به درجه‌ی همبستگی بین نقاط نمونه و نقاط مجهول بستگی دارند [۳۹].

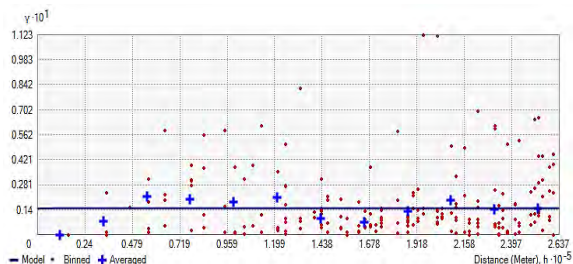
### ۳- نتایج

این تحقیق با محوریت داده‌های ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری تابش خورشیدی بوده و در آن داده‌های پیرانومتري با داده‌های هواشناسی سینوپتیک با هم ترکیب می‌شوند. در ابتدا همگی داده‌ها به دقت از نظر کیفیت کنترل شدند. متوسط نرخ پراکندگی ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران برای ۶۳ ایستگاه موجود تقریباً ۲۵۰۰۰ کیلومتر می‌باشد که از نظر تراکم در قیاس با تراکم ۱۰۴ کیلومتری کشور استرالیا [۴۱] شرایط بسیار نامساعدی دارد. متوسط پراکندگی ایستگاه‌ها با رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{ریشه نرخ پراکندگی} = \sqrt{\frac{\text{مساحت منطقه}}{\text{تعداد ایستگاه‌ها}}} \quad (۱)$$

بررسی واریوگرام داده‌ها که مبین رابطه‌ی بین فاصله و همبستگی مکانی داده‌ها است (شکل ۴)، نشان از عدم کارایی شبکه در درون‌یابی بود، زیرا در فاصله‌های نزدیک نیز همبستگی بین داده‌ها مشاهده نمی‌شود.

با محاسبه‌ی تابش خورشیدی برای ایستگاه‌های سینوپتیک، تراکم شبکه‌ی پایش افزایش و به مقدار ۵۰۰۰ کیلومتر رسید، یعنی تراکم شبکه ۵ برابر بهتر شد، اما همچنان تراکم شبکه پایین می‌باشد.



شکل ۴- میزان همبستگی موجود بین داده‌های تابش خورشیدی ۶۳ ایستگاه تابش‌سنجی

یابی در کاربردهای مهندسی قابل قبول بوده و برای مکان‌یابی جمع‌کننده‌های خورشیدی<sup>۱</sup> مناسب می‌باشد اما این نقشه‌ها برای مدل‌های هیدرولوژیکی کارایی چندانی ندارند [۸]. Xia و همکاران در حالت کلی خطای متوسط نسبی (MRE)<sup>۲</sup> برابر با ۱۰٪ مقدار تابش (۱/۰ Mj/m<sup>2</sup>day) در مناطق جنگلی و خطا-های ۱۴-۳۰٪ در تخمین GSR را قابل قبول دانسته است [۴۱]. مقدار RMSE در تحقیق Perez و همکاران برابر با ۹۰ w/m<sup>2</sup> می‌باشد. خطاهای رایج ۵٪ در آسمان صاف، ۱۵٪ در آسمان ابری مناسب بوده و متوسط خطای روزانه ۱۷-۲۲٪ قابل قبول است. دقت نتایج با توجه به منطقه، مقیاس و کاربرد مقدار متفاوتی معرفی شده است [۴].

### ۲-۳-۵- درون‌یابی

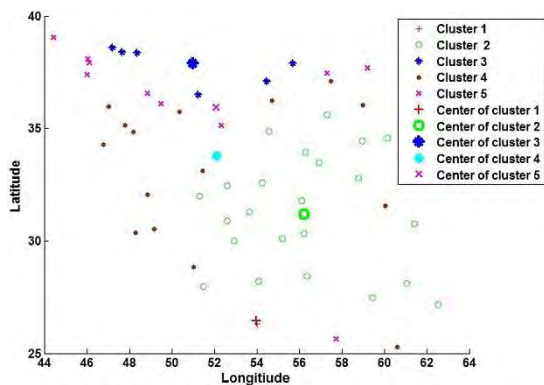
اندازه‌گیری‌های زمینی تابش خورشیدی عموماً جهت تهیه نقشه‌های پیوسته به عنوان ورودی مدل‌های درون‌یابی استفاده می‌شود. به علت تنوع بالای روش‌های درون‌یابی و وجود تفاوت‌های قابل توجه در نتایج حاصل، انتخاب روش درون‌یابی مهم می‌باشد. روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله، کریجینگ عادی و کوکریجینگ عمومی بیشترین روش‌های استفاده‌شده در پهنه‌بندی پدیده‌های طبیعی می‌باشند [۴۰]. روش کریجینگ در تخمین تابش خورشیدی توسط Bezzi و Vitti (۲۰۰۵) و Bojanowski و همکاران (۲۰۱۳b) جهت پهنه‌بندی تابش خورشیدی استفاده شده است. روش صفحه‌ی اسپیلاین نازک (TPS)<sup>۳</sup> نیز در استرالیا [۴۱] و در ایران [۱۹] و WAG<sup>۴</sup> در ایالت‌های نیویورک و ماساچوست [۳] جهت درون‌یابی متوسط مقادیر ماهیانه‌ی تابش خورشیدی استفاده شد. TPS و کریجینگ تقریباً شبیه هم هستند و صرفاً از منظر نحوه‌ی فرمول‌بندی داده‌ها تفاوت دارند [۴۱]، لذا در این تحقیق از روش کریجینگ و باتوجه به وجود روند<sup>۵</sup> مرتبه‌ی اول روش کریجینگ عادی (OK)<sup>۶</sup> استفاده شد.

روش کریجینگ از خودهمبستگی و روابط آماری بین نقاط اندازه‌گیری شده استفاده می‌کند. این روش بر پایه‌ی توزیع نرمال بوده و یک روش خطی غیر اریب برای تخمین

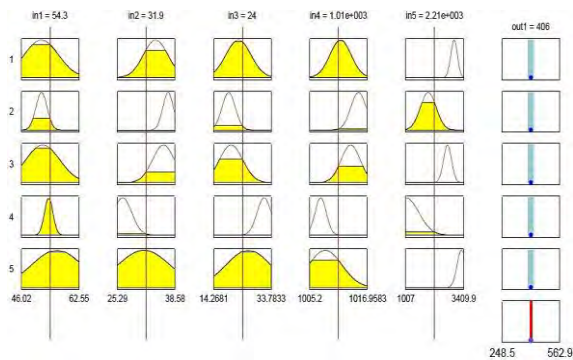
- ۱ Solar Collector
- ۲ Mean Relative Error
- ۳ Thin Plate Spline
- ۴ Weighted Average Gravity
- ۵ Trend
- ۶ Ordinary Kriging



شد و مقدار آن با روش کمترین مربعات بدست آمد (شکل ۶).



شکل ۵- دسته بندی فازی کشور ایران از نظر تابش خورشیدی به ۵ کلاس



شکل ۶- قوانین ایجاد شده در روش دسته بندی فازی

### ۳-۲- شبکه عصبی مصنوعی

در این روش داده‌های ۴۹ ایستگاه تابش‌سنجی از ۶۳ ایستگاه برای آموزش شبکه، ۷ داده برای کنترل و ۷ داده برای آزمون استفاده شد. در اجرای شبکه عصبی مدل‌ها و توابع متفاوت با آرایش نرون‌های مختلفی آزمایش شدند. به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد شبکه‌ها با یکدیگر از داده‌های آزمون و آموزش یکسان استفاده گردید. در نهایت شبکه عصبی مصنوعی با قانون آموزش لومبرگ مارکوات به دلیل خطای کمتر به عنوان الگوریتم بهینه شبکه با توابع محرک و تعداد نرون‌های مختلف در لایه‌ی میانی روش بهینه شد. شکل ۷ نمونه‌ای از خروجی حاصل از اجرای روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی در نرم‌افزار متلب می‌باشد. بهینه‌ترین دقت نتایج حاصل از شبکه‌ی عصبی در جدول ۲ ارائه و با نتایج روش‌های دیگر مقایسه شده است.

جهت تخمین تابش خورشیدی در ایستگاه‌های سینوپتیک از داده‌های مؤثر و مرتبط با تابش خورشیدی استفاده شد. هر چه همبستگی بین داده‌ها افزایش یابد دقت تخمین مقدار پارامتر مجهول افزایش می‌یابد [۱۳]. برای انتخاب داده‌های مؤثر در پیش‌بینی، از میان مجموعه‌ی داده‌های هواشناسی سالنامه‌ی ۲۰۱۱، داده‌هایی که همبستگی بالای ۰/۶ داشتند انتخاب شد. در اکثر مطالعات زیست‌محیطی همبستگی ۰/۶ و بالاتر از آن به عنوان ارتباط قوی بین دو یا چند عنصر یاد می‌شود [۳۵].

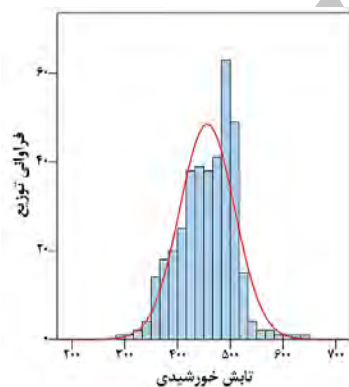
مشکل اصلی در ارزیابی روش‌های عصبی این است که دقت بدست آمده برای روش اجرا شده به داده‌های حذف شده وابسته می‌باشد. برای رفع این مشکل، روشی از تحقیق Bojanowski و همکاران (۲۰۱۳b) اقتباس شد. بجز این شکل که داده‌ها به ۱۰ بخش تصادفی تقسیم شدند. از ۸ دسته‌ی آن برای آموزش شبکه استفاده و از یک بخش برای کنترل و یک بخش برای آزمون استفاده گردید. این کار ۱۰ بار تکرار و در نهایت متوسط مقادیر حاصل برای داده‌های آزمون به عنوان دقت روش استفاده شد. برای حل این مشکل خزاعی و همکاران (۱۳۹۱) از روش K-means استفاده کردند که با توجه به فرض قید شده در ANFIS یعنی اطلاعاتی که برای آزمون و آموزش انتخاب می‌شوند باید به صورت تصادفی انتخاب شوند معقول نمی‌باشد. در این تحقیق، به علت توابع آماده‌ی نرم‌افزار متلب از این نرم‌افزار جهت پیاده‌سازی استفاده شد. در ادامه نتایج حاصل از اجرای روش‌های عصبی، فازی-عصبی و فازی گنجانده شده است.

### ۳-۱- فازی سوگنو با خوشه‌بندی فازی

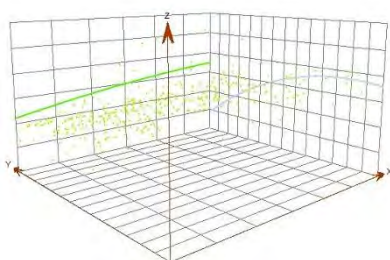
ورودی این روش مختصات (x, y)، ساعات آفتابی، فشار از سطح دریا و دمای بیشینه است. در روش فازی سوگنو، ۹ دسته از ۱۰ دسته‌ی تقسیم‌بندی شده، برای ایجاد سیستم استنتاج و ۱۰ دسته برای آزمون استفاده شد. در این روش ۵۶ داده‌ی انتخاب شده برای ایجاد شبکه، به ۵ دسته تقسیم‌بندی و جهت ایجاد قوانین فازی، از تابع عضویت گوسین استفاده شد. تعداد ۵ دسته، حالت بهینه بدست آمده از اجرای تابع FCM در نرم‌افزار متلب بود. شکل ۵ تقسیم‌بندی منطقه به ۵ دسته‌ی فازی را نشان می‌دهد. تالی سیستم فازی سوگنو خطی در نظر گرفته

نتایج حاصل نشان می‌دهد که روش سوگنو با خوشه-بندی فازی با RMSE  $28/07$  وات بر مترمربع نسبت به روش‌های ANFIS و شبکه عصبی مصنوعی، دقت مناسب-تری دارد. دقت شبکه‌ی عصبی مصنوعی در قیاس با ANFIS تقسیم‌بندی گریدی و خوشه‌بندی کاهشی به ترتیب  $25\%$  و  $29\%$  مناسب‌تر بوده است. اختلاف اندک  $5\%$  درصدی بین نتایج روش‌های ANFIS نشان از نتایج تقریباً مشابه دو روش می‌باشد. تمامی روش‌های بررسی شده در این تحقیق با توجه به مقدار مثبت MAE بیش-برآوردی از تابش خورشیدی داشته‌اند، به عبارت دیگر مقادیری بیش از مقادیر واقعی برآورد نموده‌اند.

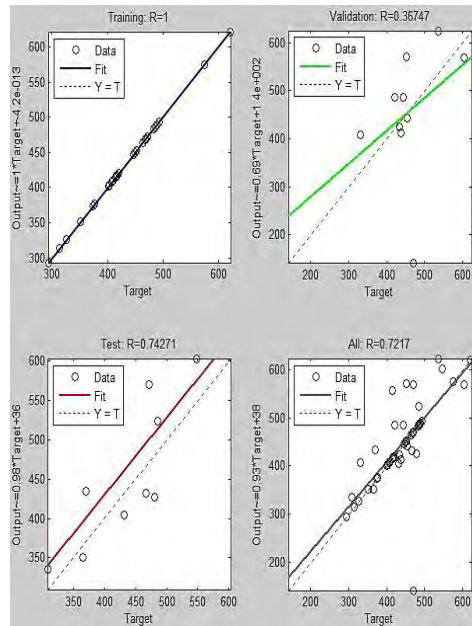
بنابراین، با توجه به بهینه بودن نتایج حاصل از روش فازی سوگنو با خوشه‌بندی فازی، نتایج این روش برای پهنه‌بندی وارد مدل کریجینگ عادی شد. پیش‌فرض اجرای روش‌های کریجینگ، نرمال بودن داده‌ها است [40]. لذا با توجه به خروج جزئی توزیع داده‌ها از حالت نرمال (شکل ۸) از تبدیل لوگ در روش کریجینگ استفاده شد. روند موجود بین داده‌های تابش خورشیدی (شکل ۹)، با روند مرتبه‌ی اول جهت تأمین فرض متغیر ناحیه‌ای از داده‌ها حذف شد. در این تحقیق همانند Bojanowski و همکاران (2014) از اندازه پیکسل  $25$  کیلومتر جهت درونیابی از کریجینگ استفاده شده است.



شکل ۸- نمودار توزیع داده‌ها



شکل ۹- نوع روند (ترند) موجود بین داده‌ها



شکل ۷- نمونه‌ای از خروجی حاصل از اجرای روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی

### ۳-۳- سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی

این روش در محیط نرم‌افزار AnfisEdit نرم‌افزار Matlab با دو روش تقسیم‌بندی گریدی (منقطع‌سازی شبکه‌ای) و خوشه‌بندی کاهشی پیاده‌سازی شد. در این تحقیق به اقتباس از مطالعه سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۹) آموزش شبکه به روش هیبرید انجام شد. در روش تقسیم‌بندی گریدی تعداد توابع عضویت برای داده‌های ورودی  $5$  و نوع آن گوسین انتخاب شد. توابع عضویت برای خروجی‌های نیز خطی انتخاب شدند. در روش خوشه‌بندی کاهشی نیز محدوده‌ی تأثیر  $0/45$ ، نرخ قبول  $0/5$  و نرخ رد  $0/15$  انتخاب گردید. نتایج نهایی حاصل در جدول ۲ بیان شده است. نتایج نهایی حاصل از اجرای روش‌های سوگنو با خوشه‌بندی فازی، ANFIS با تقسیم‌بندی گریدی و خوشه‌بندی کاهشی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی در حالت بهینه در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- نتایج حاصل از اجرای روش‌های عصبی، فازی و ANFIS

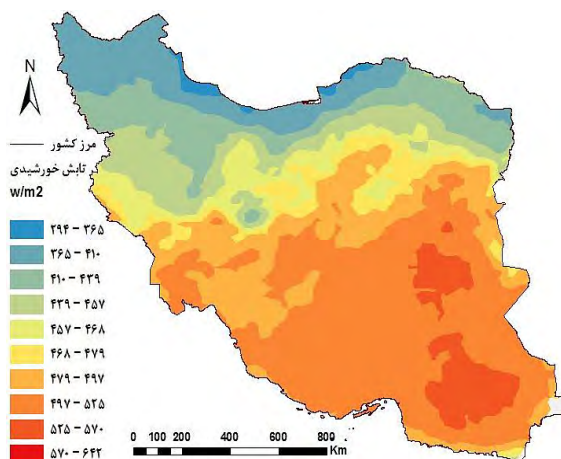
برحسب $w/m^2$			روش
RMSE	MBE	MAE	
$28/07$	$47$	$23/8$	سوگنو با دسته بندی فازی
$45/82$	$57/44$	$36/32$	ANFIS تقسیم‌بندی گریدی
$48/12$	$68/99$	$41/95$	ANFIS خوشه‌بندی کاهشی
$34/3$	$51/58$	$33/47$	شبکه عصبی مصنوعی

نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های مذکور نشان داد که مقدار خطای برآورد شده با روش فازی سوگنو و خوشه بندی فازی برابر با  $28/07$  وات بر متر مربع و کمتر از بقیه‌ی روش‌ها می‌باشد. این مقدار خطا در قیاس با تحقیقات Perez و همکاران (۱۹۹۷) و Muselli و همکاران (۱۹۹۸) که به طور متوسط  $50 \text{ w/m}^2$  را قابل قبول دانسته‌اند، می‌باشد. دقت روش سوگنو و خوشه بندی فازی از نظر مقدار RMSE در قیاس با دقت روش‌های شبکه عصبی و ANFIS با سیستم استنتاج گریدی و خوشه بندی کاهشی به ترتیب  $18\%$ ،  $39\%$  و  $42\%$  بهتر است. نتایج حاصل از MAE و MBE نیز حاکی از قابلیت بالای روش فازی سوگنو بود. روش فازی سوگنو با خوشه بندی فازی روشی مناسب برای مدل سازی سیستم‌های پیچیده و مبهم بوده و انعطاف پذیرند. روش‌های فازی در قیاس با روش‌های شبکه عصبی و ANFIS که نیاز به آموزش شبکه دارند سریعتر قابل اجرا بوده و دقت بالایی در پیش بینی مکانی پدیده‌ها دارند، ولی کاربرد آن‌ها محدود بوده است.

نتایج این تحقیق حاکی از مزیت شبکه‌های عصبی مصنوعی به ANFIS در برآورد تابش خورشیدی می‌باشد. در تحقیقی مشابه که توسط سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۹) در شبیه سازی تابش کل خورشیدی صورت گرفته بود، دقت مناسب تری برای روش شبکه‌ی عصبی در مقایسه با روش ANFIS ارزیابی شده بود. روش‌های ANFIS تقسیم بندی گریدی و خوشه بندی کاهشی که کمترین دقت را داشته‌اند، اختلاف ۵ درصدی در مقدار خطای برآورد با هم دارند. عملکرد تقریباً یکسان دو مدل را می‌توان در یکی بودن داده‌های اولیه و یکسان بودن مدل مبنای روش‌ها بیان کرد. نتایج مدل‌ها برای اندازه گیری‌های سالیانه کنترل شد و نوع عملکرد روش‌های بررسی شده در داده با مقیاس ماهیانه و روزانه که میزان همبستگی مکانی داده‌ها بیشتر به پارامترهایی چون ساعت آفتابی وابستگی دارد نیازمند تحقیق بیشتر می‌باشد.

نقشه‌ی تابش خورشیدی پهنه بندی شده حاکی از آن است که تنوع زمانی و مکانی تابش کلی به عرض جغرافیایی و شرایط اتمسفری محلی وابسته است. تابش کلی کشور ایران به وضوح افزایش را از جنوب به شمال نشان می‌دهد. بخش‌های جنوبی کشور که به خط استوایی و کمربند خورشیدی نزدیک ترند مقدار تابش خورشیدی بیشتری دریافت می‌کنند. افزایش تابش خورشیدی کلی سالیانه از شمال به جنوب بیش از  $45\%$  می‌باشد. در بخش‌های جنوبی مقدار تابش

شکل ۱۰ نقشه حاصل از درون یابی تابش خورشیدی در سراسر کشور را نشان می‌دهد. تقریباً تمام قسمت‌های ایران به جز مناطق شمالی و شمال غربی کشور دارای پتانسیل تابشی مناسبی برای نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. مناطق جنوبی کشور که در عرض‌های جغرافیایی پایینی قرار دارند بیشترین میزان تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند. در این بین استان‌های سیستان و بلوچستان و فارس بیشترین استعداد را جهت استفاده از انرژی خورشیدی نشان داده‌اند.



شکل ۱۰- نقشه‌ی پهنه بندی تابش خورشیدی کشور

#### ۴- بحث

آنالیز اولیه بر روی شبکه‌ی پایش تابش سنجی ۶۳ ایستگاه حاکی از آن بود که این شبکه تراکم پایینی داشته و نمی‌تواند منحصرأ و به تنهایی در درون یابی استفاده شود. بر اساس تحقیق Hubbard شبکه‌ی  $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$  جهت ثبت  $90\%$  از واریانس (تغییرات) تابش خورشیدی کلی لازم است [۴۱]. لذا درون یابی به تنهایی با ایستگاه‌های پیرانومتری با خطا همراه می‌شود. هر چند Alamdari و همکاران (2013) از درون یابی مستقیم برای پهنه بندی مقدار تابش خورشیدی استفاده کرده‌اند. با توجه به همبستگی بالای موجود بین اطلاعات هواشناسی (ساعات آفتابی، دمای بیشینه و همبستگی معکوس بالا با متوسط فشار از سطح آب‌های آزاد) و تابش خورشیدی، این اطلاعات با روش‌های سوگنو با خوشه بندی فازی، ANFIS با تقسیم بندی گریدی و خوشه بندی کاهشی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی جهت محاسبه‌ی تابش خورشیدی در ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده شد. با افزایش تراکم شبکه با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، تراکم شبکه ۵ برابر بهتر شد.

اختلاف بوده و نشان داد که روش‌های فازی روش‌هایی مناسب برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی می‌باشند. مطالعه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی تولیدشده مبین این بود که بیش از ۶۵ درصد از مساحت کشور تابش خورشیدی بالاتر از  $470 \text{ w/m}^2$  دارند. بیش‌ترین پتانسیل تابشی نیز مربوط به بخش‌های جنوبی کشور بوده که در عرض‌های جغرافیایی پایین قرار دارند. ۳۲٪ از مساحت کشور دارای مقدار تابش معیار برای نیروگاه‌ها خورشیدی ( $500 \text{ w/m}^2$ ) بوده و مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند. در این بین سیستان و بلوچستان و استان فارس بیش‌ترین میزان تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند.

با توجه به ضعف شبکه‌ی پایش تابش خورشیدی کشور پیشنهاد می‌شود مکان‌یابی ایستگاه‌های تابش‌سنجی مورد بحث قرار گیرد، همچنین روش‌های عصبی، عصبی-فازی و به ویژه فازی سوگنو با خوشه‌بندی فازی در مقیاس کوچک‌تر و داده‌های کمکی بیشتر مانند داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های همدیدی صورت بگیرد تا دقت نقشه‌های حاصل برای استفاده در کاربردهای هیدرولوژی و مدل‌های کشت محصولات بررسی شود.

## سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس آقاباقری (کارشناس سازمان هواشناسی کشور) و جناب آقای مهندس چگینی (کارشناس سازمان انرژی‌های نو ایران) به خاطر پیشنهادات ارزشمندشان که موجب ارتقاء کیفیت مقاله شده‌است قدردانی می‌شود.

نزدیک به ۵۵۰ وات بر متر مربع و در شمال کشور نزدیک به ۳۰۰ وات بر متر مربع می‌باشد. بیش از ۶۵٪ از کشور تابش خورشیدی بالاتر از  $470 \text{ w/m}^2$  می‌گیرد. با طبقه‌بندی مجدد نقشه پهنه‌بندی حاصل با اندازه‌ی پیکسل یک کیلومتر  $32$ ٪ از مساحت کشور دارای تابش خورشیدی بالای  $500 \text{ w/m}^2$  (مقدار تابش معیار برای نیروگاه‌های خورشیدی [۱۷]) بود، یعنی ۳۲٪ از مساحت کشور دارای پتانسیل بالاتر از حداقل مناسب بوده و مناسب برای نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشند.

## ۵- نتیجه‌گیری

اهمیت مقدار پتانسیل تابشی در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و کاربردهای زمین‌شناسی، اکولوژیکی و هیدرولوژیکی لزوم تعیین راهکاری مناسب برای تخمین مقدار تابش خورشیدی را می‌رساند. آنالیز اولیه بر روی شبکه‌ی پایش تابش خورشیدی کشور حاکی از آن بود که این شبکه تراکم پایینی داشته و توانایی استفاده‌ی مستقیم در درون‌یابی را ندارد. لذا در تحقیق حاضر تلاش شد تا تراکم مشاهدات ایستگاه‌های تابش‌سنجی (پیرانومتر) به کمک داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک افزایش یابد. بدین منظور روش‌های سوگنو با خوشه‌بندی فازی، ANFIS با تقسیم بندی گریدی، ANFIS با خوشه‌بندی کاهشی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی با هدف ایجاد اطلس تابش خورشیدی به منظور ارائه‌ی برنامه‌ریزی‌های انرژی در کشور ایران مقایسه شد. نتایج حاکی از دقت روش سوگنو نسبت به روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی، تقسیم بندی گریدی و خوشه‌بندی کاهشی به ترتیب با ۱۸٪، ۳۹٪ و ۴۲٪

## مراجع

- [1] Lorenz, E. and Heinemann, D. (2012), "Prediction of Solar Irradiance and Photovoltaic Power," In A. Sayigh (ed.) Comprehensive Renewable Energy, Elsevier, Oxford, PP.239-292.
- [2] Hove, T., Manyumbu, E. and Rukweza, G. (2014), "Developing an improved global solar radiation map for Zimbabwe through correlating long-term ground- and satellite-based monthly clearness index values," Renewable Energy, Vol.63, PP. 687-697.
- [3] Perez, R., Seals, R. and Zelenka, A. (1997), "Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data," Solar Energy, Vol.60, No.2, PP. 89-96
- [4] Muselli, M., Notton, G., Canaletti, J.L. and Louche, A. (1998), "Utilization of meteosat satellite-derived radiation data for integration of autonomous photovoltaic solar energy systems in remote areas," Energy Conversion and Management, Vol.39, No.2 , PP. 1-19.
- [5] Sánchez-Lozano, J.M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P.L. and Socorro García-Cascales, M. (2013), "Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.24, PP. 544-556.

- [6] Janke, J.R. (2010), "Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado," *Renewable Energy*, Vol.35, No.10, PP. 2228-2234.
- [۷] سبزی پرور، ع.ا.، بیات ورکشی، م. ۱۳۸۹، ارزیابی دقت روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و عصبی- فازی در شبیه‌سازی تابش کل خورشیدی، *مجله پژوهش فیزیک ایران*، جلد ۱۰، شماره ۴، صص ۳۴۷-۳۵۷.
- [8] Pons, X. and Ninyerola, M. (2008), "Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data," *International Journal of Climatology*, Vol.28, No.13, PP. 1821-18.34.
- [9] Bojanowski, J.S., Vrieling, A. and Skidmore, A.K. (2013b), "Calibration of solar radiation models for Europe using Meteosat Second Generation and weather station data," *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.176, PP. 1-9.
- [10] Bojanowski, J.S., Vrieling, A. and Skidmore, A.K. (2014), "A comparison of data sources for creating a long-term time series of daily gridded solar radiation for Europe," *Solar Energy*, Vol.99, PP. 152-171.
- [11] Dubayah, R. and Loebel, S. (1997), "Modeling topographic solar radiation using GOES data," *Journal of Applied Meteorology*, Vol.36, No.2, PP. 141-154.
- [12] Yun-na, W., Yi-sheng, Y., Tian-tian, F., Li-na, K., Wei, L. and Luo-jie, F. (2013), "Macro-site selection of wind/solar hybrid power station based on Ideal Matter-Element Model," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.50, PP. 76-84.
- [13] Li, J. and Heap, A.D. (2014), "Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review," *Environmental Modelling & Software*, Vol.53, PP. 173-189.
- [۱۴] معینی، س.، جوادی، ش.، کوبکی، م.، دهقان منشادی، م. ۱۳۸۹، برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه، *نشریه انرژی ایران*، جلد ۱۳، ۱-۱۰.
- [15] Bojanowski, J.S., Donatelli, M., Skidmore, A.K. and Vrieling, A. (2013a), "An auto-calibration procedure for empirical solar radiation models," *Environmental Modelling & Software*, Vol.49, PP. 118-128.
- [16] Pillot, B., Muselli, M., Poggi, P., Haurant, P. and Hared, I. (2013), "The first disaggregated solar atlas of Djibouti: A decision-making tool for solar systems integration in the energy scheme," *Renewable Energy*, Vol.57, PP. 57-69.
- [17] Alamdari, P., Nematollahi, O. and Alemrajabi, A.A. (2013), "Solar energy potentials in Iran: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.21, PP. 778-788.
- [18] Bezzi, M. and Vitti, A. (2005), "A comparison of some kriging interpolation methods for the production of solar radiation maps," *Geomatics Workbooks*.
- [۱۹] موسوی بایگی، م.، اشرف، ب. ۱۳۹۰، شناسایی مناطق با کمترین میزان ابرناکی به منظور پهنه بندی نواحی پرتابش کشور، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۵، صص ۶۶۵-۶۷۵.
- [۲۰] عرفانیان، م.، بابایی حصار، س. ۱۳۹۲، ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های تابش- سنجی ایران، *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۷، شماره ۶، صص ۱-۱۵.
- [21] Nadiri, A., Chitsazan, N., Tsai, F. and Moghaddam, A. (2013), "Bayesian Artificial Intelligence Model Averaging for Hydraulic Conductivity Estimation," *J. Hydrol. Eng.*
- [22] Amini, M., Afyuni, M., Fathianpour, N., Khademi, H. and Flühler, H. (2005), "Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation," *Geoderma*, Vol.124, No.3, PP. 223-233.
- [23] Asadi, S., Hassan, M., Nadiri, A. and Dylla, H. (2014), "Artificial intelligence modeling to evaluate field performance of photocatalytic asphalt pavement for ambient air purification," *Environmental Science and Pollution Research*, PP. 1-11.
- [24] Sözen, A., Arcaklioglu, E., Özalp, M. and Kanit, E.G. (2004), "Use of artificial neural networks for mapping of solar potential in Turkey," *Applied Energy*, Vol.77, No.3, PP. 273-286.

- [25] Fadare, D., Irimisose, I., Oni, A. and Falana, A. (2010), "Modeling of solar energy potential in Africa using an artificial neural network," *American Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol.1, No.2, PP. 144-157.
- [26] زمانی‌مچی آبادی، م. ۱۳۹۲، پیش‌بینی لحظه‌ای تابش کل خورشید در شهر رفسنجان توسط شبکه عصبی، نشریه انرژی ایران، جلد ۱۶، شماره ۴، صص ۱۵-۳۲.
- [27] سبزی پرور، ع.ا.، زارع ابیانه، ح.، بیات ورکشی، م. ۱۳۸۹، مقایسه یافته‌های مدل شبکه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی با مدل‌های رگرسیونی به منظور برآورد دمای خاک در سه اقلیم متفاوت، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره ۲، صص ۲۷۴-۲۸۵.
- [28] خزاعی، ا.، آل شیخ، ع.ا.، کریمی، م.، حسن وحیدنیا، م. ۱۳۹۱، مقایسه دو روش مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی-فازی در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ی مونوکسید کربن، محیط‌شناسی، جلد ۳۸، شماره ۴، صص ۲۹-۴۴.
- [29] Tutmez, B. and Hatipoglu, Z. (2010), "Comparing two data driven interpolation methods for modeling nitrate distribution in aquifer," *Ecological Informatics*, Vol.5, No.4, PP. 311-315.
- [30] کریمی گوهری، ش.، خلیفه، س. ۱۳۹۲، ارزیابی کارایی شبکه‌های آب‌سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته‌های (مطالعه موردی: حوزه بختگان-مه‌ارلو)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، جلد ۳، صص ۵۰-۳۴.
- [31] Solangi, K.H., Islam, M.R., Saidur, R., Rahim, N.A. and Fayaz, H. (2011), "A review on global solar energy policy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, No.4, PP. 2149-2163.
- [32] Zohoori, M. (2012), "Exploiting Renewable Energy Sources in Iran," *Interdisciplinary J. of Contemporary Research in Business* 4.
- [33] سازمان انرژی‌های نو ایران، ۱۳۹۳، نقشه‌های پتانسیل تابشی در ایران، تهران، وب: [www.suna.org.ir](http://www.suna.org.ir).
- [34] زارع ابیانه، ح.، بیات ورکشی، م.، معروفی، ص.، امیری پایجان، ر. ۱۳۸۹، ارزیابی سیستم‌های هوشمند عصبی در کاهش پارامترهای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره ۲، صص ۲۹۷-۳۰۵.
- [35] ابراهیم زاده، س.، شاکری، ع.، بوستانی، ف. ۱۳۸۹، بررسی آلودگی ناشی از فلزات سنگین در آب زیر زمینی دشت زرقان واقع در شمال شرق شیراز، چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران.
- [36] Ma, S.-q., Chen, F.-c., Wang, Q. and Zhao, Z.-q. (2012), "Sugeno Type Fuzzy Complex-Value Integral and Its Application in Classification," *Procedia Engineering*, Vol.29, No.1, PP. 4140-415.
- [37] احمدزاده قره‌گویز، ک.، میرلطیفی، س.م.، محمدی، ک. ۱۳۸۹، مقایسه سیستم‌های هوش مصنوعی (ANN و ANFIS) در تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مناطق بسیار خشک ایران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره ۴، صص ۶۷۹-۶۸۹.
- [38] Kalhor, A., Araabi, B.N. and Lucas, C. (2013), "Evolving Takagi-Sugeno fuzzy model based on switching to neighboring models," *Applied Soft Computing*, Vol.13, No.2, Pp. 939-946.
- [39] Esri, (2014), "Understanding interpolation analysis," Esri.
- [40] Li, J. and Heap, A.D. (2008), "A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists, Department of Resources," *Energy and Tourism*.
- [41] Xia, Y., Winterhalter, M. and Fabian, P. (2000), "Interpolation of Daily Global Solar Radiation with Thin Plate Smoothing Splines," *Theor Appl Climatol*, Vol.66, No.2, PP. 109-115.