

❖ ارزیابی ترکیب مدل ANFIS با الگوریتم‌های فراکاوشی بهینه‌سازی در

پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار استان خوزستان

- ❖ محمد انصاری قوجقار*؛ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ❖ مسعود پورغلام آمیجی؛ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ❖ شهاب عراقی‌نژاد؛ دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ❖ بنفشه زهرایی؛ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
- ❖ سامان رضوی؛ دانشیار گروه مهندسی عمران، زمین‌شناسی و محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست و پایداری، دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا.
- ❖ علی سلاجقه؛ استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

چکیده

به منظور کنترل و مدیریت صحیح طوفان‌های گرد و غبار، آگاهی از تغییرات زمانی- مکانی این پدیده و لزوم پیش‌بینی و مدل‌سازی آن با هدف شناخت دقیق‌تر رفتار طوفان‌های گرد و غبار نسبت به محرک‌های طبیعی و انسانی، امری ضروری است. با توجه به توسعه روز افزون فرامدل‌ها و ترکیب آن‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی، در این پژوهش چهار الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی ازدحام ذرات (PSO)، ژنتیک (GA)، کلونی مورچگان در محیط‌های پیوسته (ACOR) و تکاملی تفاضلی (DE) با مدل سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی (ANFIS) ترکیب شد. عملکرد چهار مدل ترکیبی توسعه داده شده با مدل ANFIS برای پیش‌بینی متغیرهای فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار (FSD) در مقیاس فصلی در استان خوزستان در جنوب غربی ایران ارزیابی شد. بدین منظور از داده‌های ساعتی گرد و غبار و کدهای سازمان جهانی هواشناسی در مقیاس فصلی با طول دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۰) در هفت ایستگاه سینوپتیک استان خوزستان استفاده شد. نتایج شاخص‌های نیکویی برازش در مرحله آموزش و آزمایش نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین روش ANFIS و سایر مدل‌های ترکیبی مورد استفاده وجود ندارد. مقادیر R و RMSE برترین مدل ترکیبی (ANFIS-PSO) به ترتیب از ۰/۸۸ تا ۰/۹۷ و ۰/۱۰ تا ۰/۱۹ و در مدل ANFIS به ترتیب از ۰/۸۳ تا ۰/۹۴ و ۰/۱۱ تا ۰/۲۱ متغیر بودند. همچنین نتایج نشان داد که ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده‌شده با مدل ANFIS نتایج مدل را نسبت به مدل انفرادی ANFIS به صورت معنی‌داری بهبود نمی‌بخشد.

کلید واژگان: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم‌های تکاملی، مدل‌سازی، هوش مصنوعی، ANFIS.

۱. مقدمه

مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۸ بود. برای پیش‌بینی ۴۸ ماهه خشکسالی (شاخص SPI) بود [۱۲]. همچنین [۲۶] و [۱۹]. نیز به چنین نتایجی دست یافتند.

در تحقیقی [۲۳] نیز برای آموزش شبکه‌های عصبی تأخیری از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم لونیگ-مارگارت استفاده شد. این پژوهش که برای شبیه‌سازی جریان رودخانه انجام شد، نشان داد که الگوریتم‌های رایجی که برای آموزش شبکه به کار می‌روند، نمی‌توانند از دقت بالایی در شبیه‌سازی و کاهش خطا برخوردار باشند و لازم است برای این مطالعه از روش ترکیبی اشاره‌شده، استفاده شود. همچنین در مطالعه‌ای با ترکیب مدل ANFIS و PSO با استفاده از ۱۸۸ داده آزمایشگاهی برای مدل‌سازی، عمق آب‌شستگی را پیش‌بینی کردند. بعد از آنالیز ابعادی، پارامترهای ورودی را تعیین کرده و دقت مدل‌سازی با $RMSE=1.435$ را به ثبت رساندند [۲]. در تحقیقی دیگری ماکزیمم آب‌شستگی را با استفاده از مدل‌های SVM-PSO و ANFIS پیش‌بینی کردند و نتیجه گرفتند که مدل SVM-PSO دارای دقت بیشتری است [۳۰].

در تحقیقی با استفاده از روش هوش مصنوعی (ترکیب شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و الگوریتم ژنتیک) دبی حداکثر رودخانه یلفان در محل ایستگاه هیدرومتری و رسوب سنجی یلفان را برآورد کردند. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک با R^2 برابر با ۰/۸۷ و $RMSE$ برابر با ۱۰/۱۲ عملکرد خوبی در برآورد دبی سیلاب در حوزه یلفان دارد [۲۵]. در پژوهش دیگری با استفاده از دو مدل ANFIS-GA و ANFIS-PSO پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت کرمان را تخمین زدند. نتایج نشان داد که مدل‌های مورد استفاده از عملکرد مناسبی برای مدل‌سازی کیفیت آب زیرزمینی برخوردار بودند [۱۳]. در مطالعه ای به منظور بهبود عملکرد مدل

هوای پاک و عاری از آلودگی یکی از حیاتی‌ترین نیازهای انسان است و گرد و غبار یکی از منابع آلوده‌کننده آن به شمار می‌رود. ذرات ریز گرد و غبار تحت تأثیر عوامل گوناگونی از جمله شرایط جوی مانند باد، بارش و دما، مشخصات سطح زمین نظیر توپوگرافی، رطوبت سطح، طول زبری و پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک همانند بافت، تراکم، ترکیب و کاربری اراضی وارد جو می‌شوند [۲۸]. پدیده گرد و غبار یکی از مخاطره‌های طبیعی است و سالانه خسارت‌های زیادی در غرب و جنوب غرب کشور ایجاد می‌کند. گرد و غبار یکی از منابع آلوده‌کننده هوای پاک بوده و علت افزایش طوفان‌های گرد و غباری در ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی کشور با توجه به قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان می‌باشد. از سوی دیگر نزدیک‌بودن با کشورهای هم‌چون عربستان، عراق و سوریه که دارای سطح وسیعی از بیابان به دلیل عوامل مختلفی مانند کمبود پوشش گیاهی، بارش اندک و دمای بالا هستند، بی‌تأثیر نیست [۱ و ۱۵].

طیف وسیعی از مدل‌ها شامل مدل‌های عددی مبتنی بر فیزیک مسئله و فرامدل‌های هوشمند (جعبه سیاه) و ترکیب آن‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی (به ویژه نوع فراکاوشی) کاربرد زیادی در علوم هیدرولوژی و هیدروژئولوژی دارند. به همین دلیل در سال‌های اخیر بهره‌گیری از ترکیب فرامدل‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی به منظور پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی افزایش یافته است که در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود.

در پژوهشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مدل ترکیبی شبکه عصبی-موجکی به پیش‌بینی خشکسالی پرداخته شد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری روش تلفیقی مذکور در مقایسه با تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد. بالاترین ضریب راندمان در

پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگهام یک سیلاب در کارون استفاده کرده و این دو روش را با یکدیگر مقایسه نمودند. نتایج روندیابی سیل رودخانه کارون با الگوریتم جستجوی مستقیم نیز نشان داد که مجموع مربعات خطا، مجموع قدرمطلق خطا و تفاوت بین دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده به ترتیب ۴۲۰، ۷۸۴۲/۱۰ و ۹/۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد [۱۸].

پژوهشی با هدف بررسی کارایی روش‌های هیبریدی ژنتیک-تبرید (GA-SA) و الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب متغیرهای ورودی بهینه در پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار استان خوزستان انجام شد. نتایج نشان داد که روش هیبریدی ژنتیک-تبرید (GA-SA) در بین تمام حالت‌های انتخاب متغیرهای ورودی، بهترین عملکرد را داشت؛ به طوری که در این حالت معیارهای ارزیابی R، MAE و RMSE به ترتیب از ۰/۹۱، ۰/۲۹ و ۰/۴۴ تا ۰/۹۹، ۰/۱۳ و ۰/۱۷ در ایستگاه‌های مورد مطالعه متغیر بود. همچنین با افزایش شاخص فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار در ایستگاه‌های مورد مطالعه، دقت پیش‌بینی تمام حالت‌ها افزایش داشت [۳].

با توجه به اهمیت طوفان‌های گرد و غبار در غرب و جنوب غرب کشور، نیاز به تحقیقات جامع در این زمینه بسیار محسوس است. از طرفی بیشتر مطالعات داخلی مربوط به روندیابی پدیده‌های گرد و غبار در محدوده‌های کوچک، مطالعات سینوپتیکی و ماهواره‌ای آن می‌باشند. لذا با توجه به اینکه این پدیده اثرات نامطلوب و پیامدهای منفی در زمینه‌های اجتماعی، اقتصادی و سلامت مردم داشته است، مطالعه و پیش‌بینی آن ضروری است. بر اساس تحقیقات قبل، قابلیت فرامدل‌ها و نوع ترکیبی آن‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی در پیش‌بینی زمانی-مکانی متغیرهای هیدرولوژی و هیدرولوژیکی روشن شده و به اثبات رسیده است. این در حالی است که هیچ بررسی مرتبطی به منظور پیش‌بینی شاخص FDSI با استفاده از

ANFIS، الگوریتم‌های تکامل تفاضلی را برای پیش‌بینی پارامترهای کیفیت آب رودخانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم استفاده‌شده، توانایی خوبی برای تخمین پارامترهای کیفیت آب رودخانه دارد [۶]. همچنین در پژوهشی از مدل‌های هوش مصنوعی شامل شبکه‌های عصبی پیشرو (FNN)، شبکه‌های عصبی برگشتی (RNN) و برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) به منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت بستان آباد استفاده شد. ایشان جهت دستیابی به نتایج بهتر از روش ترکیبی مدل‌های هوش مصنوعی با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی به عنوان ترکیب‌کننده غیرخطی بهره گرفتند. نتایج نشان داد که مقادیر RMSE به مقدار متوسط ۱۷ درصد در مدل هوش مصنوعی مرکب نسبت به مدل‌های منفرد کاهش داشته است [۲۱].

در پژوهشی به ارزیابی مدل‌های تلفیقی با کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌سازی PSO و GA در مدل ANFIS برای پیش‌بینی ضریب انتشار آلاینده در رودخانه-ها پرداخته شد. نتایج نشان داد که با توجه به پیش‌بینی-های انجام‌شده، روش ANFIS-PSO با دقت $MSE=0.0037$ و $RMSE=0.061$ و $R=0.9622$ و روش ANFIS-GA با دقت $MSE=0.012$ و $RMSE=0.11$ و با $R=0.739$ دارای دقت بیشتری نسبت به مدل ANFIS با دقت $MSE=0.040$ و $RMSE=0.200$ با $R=0.698$ بودند. از طرف دیگر با مقایسه دو روش ANFIS-PSO و ANFIS-GA مشاهده شد که الگوریتم بهینه‌سازی PSO نسبت به روش GA دارای عملکرد بهتری در بهبود ساختار ANFIS بوده است [۱۷]. در مطالعه دیگری نیز از سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی برای پیش‌بینی دبی روزانه برای جریان رودخانه ليقوان استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از این مدل با دقت $RMSE=0.0078$ و $R=0.9025$ دبی روزانه را پیش‌بینی کردند [۲۰]. در مطالعه دیگر از الگوریتم ژنتیک و جستجوی مستقیم در بهینه‌سازی

^۴Genetic-Annealing Algorithm
^۵Frequency of Dust Stormy Days

^۱Feed Forward Neural Networks
^۲Recurrent Neural Network
^۳Gene Expression Programming

بلندمدت ۴۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۰) پرداخته شد. بدین منظور از داده‌های ساعتی قدرت دید افقی و کدهای سازمان جهانی هواشناسی (WMO) در مقیاس فصلی استفاده شد. مشاهدات پدیده‌های هواشناسی به فاصله سه ساعت یک‌بار و در مجموع هشت بار در شبانه‌روز ثبت می‌شود. در این مشاهدات، پدیده‌های بصری آب و هوا بر اساس دستورالعمل سازمان جهانی هواشناسی در ۱۰۰ کد (۹۹-۰۰) تعریف شده که از این ۱۰۰ کد به‌طور کلی به‌منظور ثبت و گزارش پدیده گرد و غبار در ایستگاه‌های مختلف هواشناسی از ۱۱ کد استفاده می‌شود [۲۲]. کدهای مربوط به طوفان‌های گرد و غبار در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به اینکه داده‌های گرد و غبار به‌صورت تفکیک نشده از سایر پدیده‌های اقلیمی از سازمان هواشناسی در اختیار قرار می‌گیرد، بنابراین در وهله اول کدهای مربوط به گرد و غبار از سایر پدیده‌های اقلیمی در ساعات مختلف همدیدی جدا شد. بر اساس تعریف سازمان جهانی هواشناسی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار به روزی گفته می‌شود که حداقل در یکی از هشت سینوپ (گزارش‌های سه ساعته دیده‌بانی)، یکی از کدهای مربوط به گرد و غبار (۰۶، ۰۷، ۰۸، ۰۹، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸) در بخش هوای حاضر گزارش شده باشد. البته به شرط اینکه داده‌های قدرت دید افقی متناظر با آن کد گرد و غبار کمتر از ۱۰۰۰ متر به ثبت رسیده باشد [۱۱]. در این مطالعه برای تشخیص طوفان‌های گرد و غباری از فاکتور قدرت دید افقی ≤ 1000 متر برای همه کدهای هواشناسی گرد و غبار استفاده شده است. شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه و پهنه‌بندی مقدار شاخص FSD در استان خوزستان را نشان می‌دهد.

ترکیب فرامدل هوشمند ANFIS با الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌سازی همچون PSO، GA، ACO_R و DE انجام نشده است. حال سوال اساسی در این است که با توجه به ساختار هریک از این دسته مدل‌ها و الزامات و شرایط مورد نیاز از داده‌های اولیه، ترکیب فرامدل ANFIS با الگوریتم‌های بهینه‌سازی که توسعه هر روزه آن‌ها را شاهد هستیم، تا چه اندازه می‌توانند کارایی این فرامدل را بهبود دهند؟ برای پاسخ به این سوال، در این پژوهش فرامدل ANFIS و نوع ترکیبی آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاشی ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (PSO)، کلونی مورچگان برای محیط‌های پیوسته (ACO_R) و تکامل تفاضلی (DE) به منظور پیش‌بینی فصلی شاخص FSD در هفت ایستگاه سینوپتیک استان خوزستان مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. لازم به ذکر است که تاکنون چنین مطالعه‌ای برای مباحث هواشناسی و گرد و غبار به انجام نرسیده و لذا این پژوهش می‌تواند راهنما و الگوی جدیدی به منظور پیش‌بینی پدیده طوفان‌های گرد و غبار در منطقه مورد مطالعه باشد.

۲. روش‌شناسی

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به بررسی ترکیب چهار الگوریتم بهینه‌سازی PSO، GA، ACO_R و DE با مدل ANFIS (سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی) به منظور پیش‌بینی فصلی فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار (شاخص FSD) در هفت ایستگاه هواشناسی استان خوزستان (آبادان، اهواز، بستان، بندر ماهشهر، مسجد سلیمان، صفی‌آباد و دزفول) با جامعه آماری

^۱Differential Evolutionary

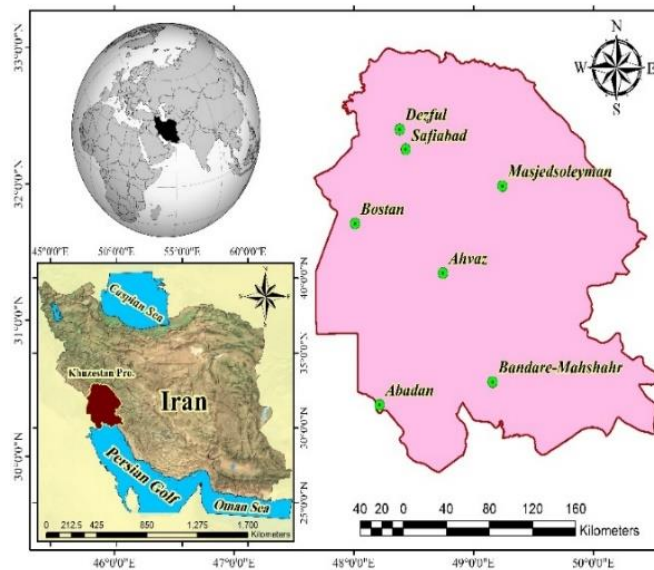
^۲World Meteorological Organization

^۳Genetics Algorithms

^۴Ant Colony Optimization for Continuous Domains

جدول ۱. کدهای سازمان جهانی هواشناسی مرتبط با پدیده‌های گردوغبار [۲۹]

کد	توضیحات
۰۶	رخداد طوفان گردوخاک گسترده در خارج از ایستگاه هواشناسی
۰۷	خاک یا شن برخاسته از زمین در محدوده ایستگاه هواشناسی
۰۸	مشاهده گردباد در محدوده ایستگاه هواشناسی یا خارج از آن در زمان دیدبانی یا طی ساعت گذشته
۰۹	طوفان شن یا خاک در زمان دیدبانی در خارج از ایستگاه یا طی ساعت گذشته در محدوده ایستگاه هواشناسی
۳۰	طوفان خفیف یا متوسط شن یا خاک با روند کاهشی طی ساعت گذشته و با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه یا بیشتر، همراه با کاهش میدان دید به کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر
۳۱	طوفان خفیف یا متوسط شن یا خاک بی تغییر شدت طی ساعت گذشته و با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه یا بیشتر و کاهش میدان دید به کمتر از ۱۰۰۰ ولی بیش از ۲۰۰ متر
۳۲	طوفان خفیف یا متوسط شن یا خاک با افزایش شدت طی ساعت گذشته و با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه یا بیشتر همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر
۳۳	طوفان شدید شن یا خاک همراه با روند کاهشی طی ساعت گذشته و با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه یا بیشتر و کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر
۳۴	طوفان شدید شن یا خاک بی تغییر شدت طی ساعت گذشته و با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه یا بیشتر همراه با کاهش دید به کمتر از ۲۰۰ متر
۳۵	طوفان شدید شن یا خاک با افزایش شدت طی ساعت گذشته و با سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه یا بیشتر و کاهش دید به کمتر از ۲۰۰ متر
۹۸	رعدوبرق بدون بارش همراه با طوفان شن یا خاک (هبوب)



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

است؛ این پنج لایه به ترتیب عبارتند از: لایه ورود اطلاعات، لایه محاسبه وزن قوانین فازی، لایه نرمال‌سازی وزن‌های قوانین به‌دست‌آمده، لایه محاسبه قوانین، لایه جمع‌بندی و خروجی شبکه. ویژگی متمایزکننده ANFIS، فراهم کردن الگوریتم یادگیری پیوندی روش شیب پس انتشار و روش حداقل مربعات به منظور اصلاح پارامترها می‌باشد. در این تحقیق تابع عضویت در نظر گرفته شده،

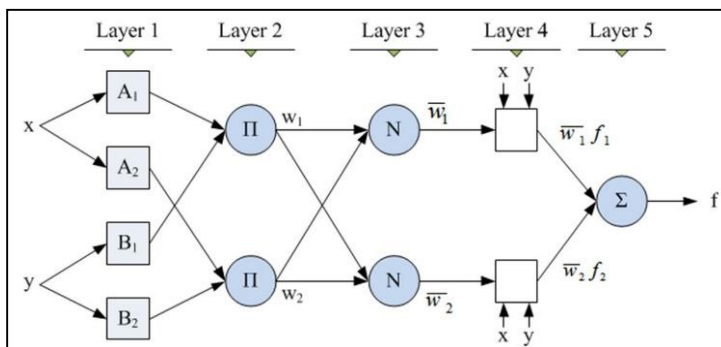
۲.۲. سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی

(ANFIS)

سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی (ANFIS) توسط Jang معرفی شد [۱۴]. مدل ANFIS شبیه به یک شبکه عصبی چندلایه است با این تفاوت که علاوه بر الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی از منطق فازی نیز بهره می‌گیرد. یک مدل ANFIS از پنج لایه تشکیل شده

ANFIS را نشان می‌دهد.

تابع عضویت دوزنقه‌های و الگوریتم آموزش شبکه، روش هیبریدی در نظر گرفته شد. شکل (۲) شماتیکی از



شکل ۲. شماتیک ANFIS [۱۴]

$$f_k = \sum_{i=1}^{NumRule} \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad \text{معادله ۵}$$

$$RMSE_{Test} = \sqrt{\frac{1}{N_{Test}} \sum_{k=1}^{N_{chek}} (O^k - f^k)^2} \quad \text{معادله ۶}$$

$$RMSE_{Train} = \sqrt{\frac{1}{N_{Train}} \sum_{k=1}^{N_{chek}} (O^k - f^k)^2} \quad \text{معادله ۷}$$

در روابط بالا x و y ورودی‌های غیرفازی به گره i و A_i و B_2 برچسب‌های زمانی هستند که به ترتیب با توابع عضویت مناسب μ_{A_i} و μ_{B_i} مشخص می‌شوند. \bar{w}_i خروجی i امین گره از لایه قبلی است. p_i و q_i و r_i ضرایب این ترکیب خطی بوده، همچنین مجموعه پارامترهای بخش تالی مدل فازی تاکاگی-سوگنو نیز می‌باشند. N تعداد داده‌ها، O مقدار مشاهداتی شاخص FDS و f مقدار پیش‌بینی شده شاخص FDS می‌باشند و اندیس k و k' به ترتیب نشان‌دهنده مرحله آموزش و آزمایش هستند.

۳.۲. الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات (PSO) یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی الهام گرفته شده از طبیعت می‌باشد. چارچوب این الگوریتم که تعدادی ذره را شامل می‌شود که در فضای جستجوی تابع هدف مسئله باید کمینه

۳.۲. الگوریتم‌های فراکاوشی بهینه‌سازی

در مرحله آموزش، با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر حقیقی نزدیک‌تر می‌شوند. روش آموزش اصلی در این سامانه، روش پس انتشار خطا است. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش شده و پارامترها تصحیح می‌شوند. در این پژوهش برای دستیابی به پارامترهای بهینه توابع عضویت، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، ژنتیک (GA)، کلونی مورچگان در محیط‌های پیوسته (ACO_R) و تکامل تفاضلی (DE) استفاده شده است. مطابق با روندنمای ارائه‌شده در شکل (۳)، روند تعیین پارامترهای بهینه توابع عضویت با تابع هدف حداقل کردن مقدار خطا با استفاده از چهار الگوریتم بهینه‌سازی PSO، ACO_R، GA و DE به منظور ترکیب با مدل ANFIS در مدل‌سازی سری زمانی شاخص FDS مورد استفاده قرار گرفته است. روابط تابع هدف به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$OF = \text{Minimum} (RMSE) \quad \text{معادله ۱}$$

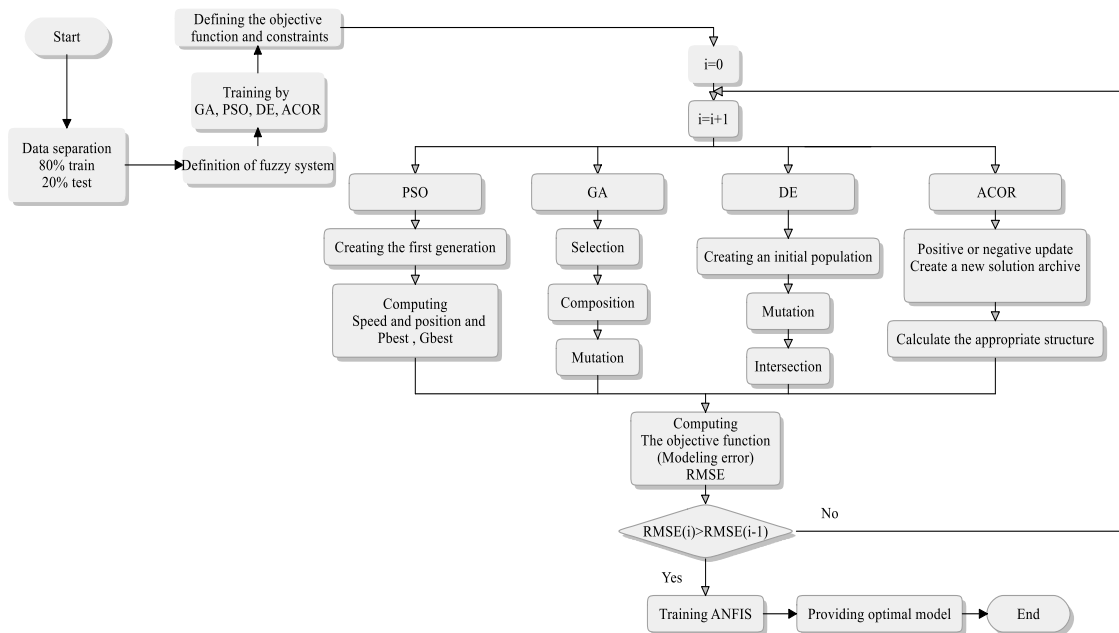
$$w_i = \Pi \mu_{A_i}(X_i) \quad \text{معادله ۲}$$

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{NumRule} w_i} \quad \text{معادله ۳}$$

$$f_k = \sum_{i=1}^{NumRule} \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad \text{معادله ۴}$$

حرکت انتخاب می‌شود. هر ذره جهت را برای حرکت انتخاب می‌کند و بعد از حرکت، یک مرحله از الگوریتم تمام می‌شود که تکرار این مراحل تا کسب پاسخ مطلوب ادامه خواهد یافت [۲۷].

شوند، این ذرات را به طور تصادفی منتشر می‌کنند. مقدار تابع هدف توسط هر ذره در موقعیت فعلی خود محاسبه می‌شود، سپس بهترین موقعیت قبلی و اطلاعات یک یا چند عدد از بهترین ذرات با استفاده از ترکیب اطلاعاتی که در اختیار قرار گرفته، مشخص شده و در نهایت جهت برای



شکل ۳. روند نمای مدل ANFIS و مدل‌های ترکیبی ANFIS-DE و ANFIS-ACOR, ANFIS-PSO, ANFIS-GA

۶.۲. الگوریتم کلونی مورچگان (ACOR)

بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای دامنه‌های پیوسته (ACOR) از طریق مطالعه کلونی مورچه‌ها اختراع شد. این الگوریتم برای نخستین بار توسط Dorigo به عنوان ابزاری برای حل مشکل بهینه‌یابی ارائه شد [۹]. این الگوریتم از رفتارهای جستجوی مواد غذایی برخی از گونه‌های مورچه‌ها در طبیعت الهام گرفته شده است [۲۹]. روش کلونی مورچگان پیوسته با استفاده از یک تابع توزیع احتمال پیوسته توسط یک تابع چگالی احتمال، به جای استفاده از یک توزیع احتمال گسسته عمل می‌کند و الگوریتم تابع گوسی را به کار می‌گیرد.

۵.۲. الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم وراثتی یک مدل محاسباتی بر مبنای تکامل طبیعی است. سیستمی که باید بهینه شود، به صورت رشته دودویی که پارامترهای سیستم را رمزگذاری کرده، نشان داده می‌شود. جمعیتی از رشته‌ها با پارامترهای تصادفی اولیه، مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعدادی از نسل‌ها با عملگرهایی که نشان‌دهنده اجزا مهم تکامل مانند رقابت، انتخاب بر مبنای برآزش، ترکیب و جهش هستند، شبیه‌سازی می‌شوند. با این وجود، روند تکاملی به فیلتر شدن عناصر جمعیت که به تابع هدف مسئله بهینه‌سازی نزدیک‌ترند، منجر می‌شود. اگر نقطه بهینه یکتا باشد، روند از طریق بهبود مدام برآزش به آن نزدیک شده و اگر این نقطه بهینه یکتا نباشد، روش مورد نظر به یکی از جواب‌های بهینه مسئله نزدیک می‌شود [۸].

۷.۲. الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)

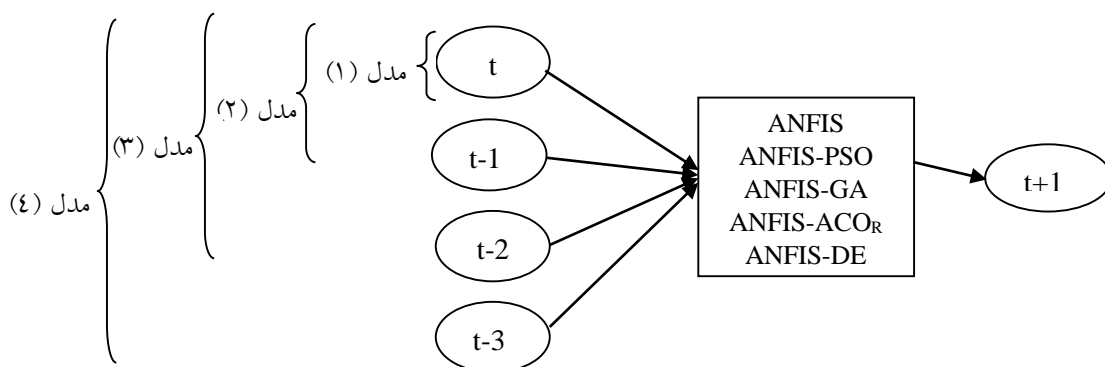
الگوریتم تکامل تفاضلی روشی در بخش محاسبات تکاملی است که در مسائل بهینه‌سازی کاربرد دارد. این الگوریتم برای غلبه بر مشکل الگوریتم‌های ژنتیکی که قادر به جستجوی محلی نیستند، توسط Storn & Price ارائه شده است [۳۱]. این الگوریتم با استفاده از تعدادی پاسخ اولیه، فرایند را آغاز کرده و با یک سری تکرارهای پشت سر هم، بهترین پاسخ را برای مسئله بهینه‌سازی پیدا می‌کند. مهمترین ویژگی الگوریتم تکامل تفاضلی، قدرت زیاد، سادگی و توانایی بالای آن است و با تنظیم سه پارامتر اندازه جمعیت، وزن جهش و احتمال بازترکیبی، فرایند بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. این الگوریتم دارای چهار عملگر اساسی ارزش‌دهی، جهش، تقاطع و انتخاب گزینه بهینه می‌باشد.

۸.۲. مدل‌های پیش‌بینی

به منظور پیش‌بینی کمی فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار (FDS) چهار مدل مختلف مورد استفاده قرار گرفت. سپس بر اساس معیارهای ارزیابی بهترین مدل در هر پیش‌بینی انتخاب شد. متغیر تعداد فصل (های) گذشته برای پیش‌بینی فصل آتی به کار گرفته شد که می‌تواند شامل یک، دو، سه و چهار فصل قبل از

متغیر فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار باشد. در مدل ۱، برای پیش‌بینی متغیر فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار در فصل بعد، از سری زمانی FDS با یک گام تأخیر استفاده شد. بدین صورت که برای پیش‌بینی در زمان $t+1$ ، از مقدار آن در زمان t استفاده شد. در مدل ۲، پیش‌بینی در فصل بعد بر اساس مقادیر فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار تا دو فصل قبل استفاده شد و به طور مشابه در مدل ۳ و ۴، پیش‌بینی‌ها بر اساس مقادیر متغیر مورد نظر تا سه و چهار فصل قبل صورت پذیرفت. روابط زیر در تکمیل توضیحات بیان شده ارائه می‌شود؛ شکل (۴)، مدل‌های مورد استفاده در انتخاب فصل (های) گذشته برای پیش‌بینی در فصل آتی را نشان می‌دهد. روش‌های پیش‌بینی به کار رفته در این پژوهش شامل ANFIS، ANFIS-PSO، ANFIS-GA، ANFIS-ACO_R و ANFIS-DE می‌باشد.

$FDS_{(t+1)} = f(FDS_{(t)})$	مدل ۱	معادله ۸
$FDS_{(t+1)} = f(FDS_{(t)}, FDS_{(t-1)})$	مدل ۲	معادله ۹
$FDS_{(t+1)} = f(FDS_{(t)}, FDS_{(t-1)}, FDS_{(t-2)})$	مدل ۳	معادله ۱۰
$FDS_{(t+1)} = f(FDS_{(t)}, FDS_{(t-1)}, FDS_{(t-2)}, FDS_{(t-3)})$	مدل ۴	معادله ۱۱



شکل ۴. ساختارهای مورد استفاده در پیش‌بینی گردوغبار

پس از بررسی و کنترل کیفی آمار ایستگاه‌ها و رفع

۹.۲. آماده‌سازی داده‌ها

میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. این معیارها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}} \quad \text{معادله ۱۲}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - f_i)^2} \quad \text{معادله ۱۳}$$

در این روابط، O_i مقادیر مشاهداتی در گام زمانی i ام، f_i مقادیر پیش‌بینی شده در گام زمانی i ام، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{f} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها می‌باشند. هر مدل که دارای R بیشتر و $RMSE$ کمتر باشد، از مطلوبیت بیشتری برخوردار می‌باشد [۴].

یکی از کاربردی‌ترین روش‌های آماری در تجزیه و تحلیل داده‌ها، تکنیک تحلیل واریانس یا آنالیز واریانس (Analysis of Variance) است که به طور خلاصه آنوا (ANOVA) نامیده می‌شود. برای انجام آزمون مقایسه میانگین بین دو یا چند جامعه آماری مستقل، می‌توان از این روش استفاده کرد.

۳. نتایج

بعد از انتخاب ایستگاه‌ها و بررسی داده‌ها در بازه زمانی ۴۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۰)، تعداد روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار (FDSD) برای هفت ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه در استان خوزستان با استفاده از داده‌های دید افقی و کدهای سازمان جهانی هواشناسی محاسبه و در جدول (۲) نشان داده شده است. ضمن اینکه ایستگاه‌های هواشناسی، طول و عرض جغرافیایی، طبقه‌بندی اقلیمی به روش دومارتن، متوسط شاخص FDSD در مقیاس فصلی و تعداد روزهای گرد و غباری به ترتیب نزولی قابل مشاهده است. همان طور که مشخص

نواقص آماری، همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون Run Test ارزیابی و تصادفی بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد پذیرفته شد. در ادامه با توجه به وجود سری زمانی متغیر فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار، اقدام به پیش‌بینی آن با استفاده از فرامدل ANFIS و ترکیب آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA، PSO، DE و ACOR شد. ۸۰ درصد داده‌ها برای مرحله آموزش و ۲۰ درصد آن برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای مناسب روش‌های مختلف از طریق آزمون و خطا تعیین شد. همچنین به منظور جلوگیری از بیش‌برازش از صحت سنجی متقاطع استفاده شد. در روش صحت سنجی متقاطع در هر بار اجرای مدل برای پیش‌بینی با یک پارامتر مشخص، یک یا تعدادی از داده‌های مجموعه آموزش کنار گذاشته می‌شوند (به عنوان داده‌های صحت سنجی) و مدل بر اساس داده‌های باقیمانده آموزش می‌بیند. سپس داده‌های کنار گذاشته شده به مجموعه آموزش برگردانده شده و داده یا مجموعه دیگری از داده‌های آموزش به عنوان داده صحت سنجی از این مسیر جدا می‌شوند و بار دیگر شبکه آموزش داده می‌شود. این فرایند تا زمانی که تمام داده‌های آموزش در قسمت صحت سنجی استفاده شوند، ادامه می‌یابد. پس از آن بر اساس میانگین خطای مدل در تخمین داده‌های صحت سنجی، پارامتر (های) مناسب شبکه عصبی تعیین می‌شوند. برای پیش‌بینی از چهار مدل معرفی شده فوق‌الذکر استفاده شد. مدل مناسب بر اساس معیارهای ارزیابی R و $RMSE$ برای هر روش در مقیاس فصلی استخراج شد. پس از آن، تحلیل نتایج بر پایه بهترین مدل برای هر یک از روش‌ها صورت پذیرفت.

۱۰،۲. معیارهای نیکویی برازش مدل‌ها

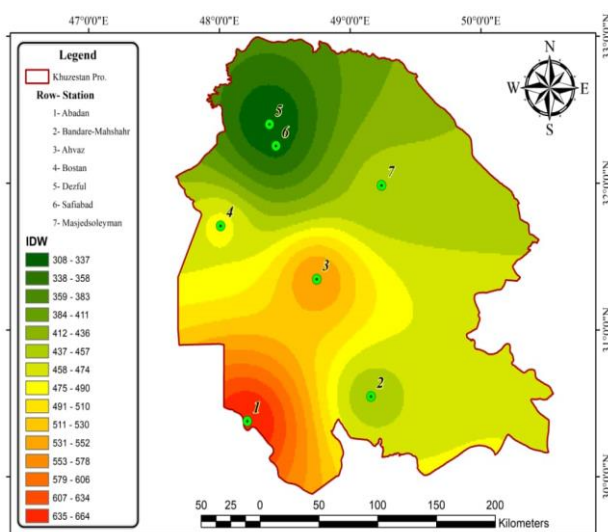
برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه نتایج روش‌های مختلف، از دو معیار ارزیابی یعنی ضریب همبستگی (R) و جذر

شرقی استان فاصله بیشتری از این دو کشور دارند. بنابراین می‌توان گفت طوفان‌های گرد و غبار از مناطق غربی به سمت مرکز و شرق استان منشأ محلی پیدا می‌کنند. همچنین با توجه به طبقه‌بندی اقلیمی دوما رتن، هرچه از مناطق نیمه‌خشک به سمت مناطق خشک استان حرکت شود، بر مقدار شاخص FDSO افزوده می‌شود که علت خشکی منطقه را می‌توان در بیان‌زایی، خشک‌شدن تالاب‌های منطقه، تغییر اقلیم، عدم مدیریت صحیح منابع آب، جنگ‌ها و آشفته‌گی‌های کشورهای منطقه و عدم رسیدگی به آن جستجو کرد. پهنه‌بندی شاخص FDSO در استان خوزستان با روش معکوس فاصله وزنی (IDW) انجام شد که نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. واحد اعداد بر حسب روز می‌باشد.

است، ایستگاه آبادان در جنوب غرب استان خوزستان با ۶۶۴ روز در بازه زمانی ۴۰ ساله (۱۹۸۰-۲۰۱۹) به عنوان رکورد دار بیشترین روزهای همراه با طوفان گرد و غباری در این استان ثبت شده است. بر همین اساس ایستگاه‌های صفی‌آباد و دزفول به ترتیب با ۳۳۵ و ۳۰۸ روز کمترین فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار را به خود اختصاص داده‌اند. بر این اساس، به صورت جغرافیایی می‌توان بیان کرد که هرچه از مناطق مرزی جنوب غرب به سمت مرکز و شرق استان حرکت شود، از تراکم تعداد روزهای همراه با طوفان گرد و غباری کاسته می‌شود زیرا ایستگاه‌هایی که در نقاط غربی و جنوب غربی استان خوزستان واقع شده‌اند در مسیر ورودی طوفان‌هایی با منشأ عراق و عربستان هستند؛ در حالی که ایستگاه‌های

جدول ۲. فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گردوغبار استان خوزستان (۱۹۸۰-۲۰۱۹)

ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	طبقه‌بندی اقلیمی به روش دوما رتن	میانگین فصلی FDSO (روز)	FDSO (روز)
آبادان	۳۰/۳۸	۴۸/۲۱	خشک	۴/۱۵	۶۶۴
اهواز	۳۱/۳۴	۴۸/۷۴	خشک	۳/۴۳	۵۵۰
بستان	۳۱/۷۱	۴۸/۰۱	خشک	۲/۹۸	۴۷۸
بندر ماهشهر	۳۰/۵۵	۴۹/۱۶	خشک	۲/۷۹	۴۴۷
مسجد سلیمان	۳۱/۹۸	۴۹/۲۴	نیمه خشک	۲/۷۷	۴۴۴
صفی‌آباد	۳۲/۲۵	۴۸/۴۳	نیمه خشک	۲/۲۱	۳۳۵
دزفول	۳۲/۴۰	۴۸/۳۸	نیمه خشک	۱/۹۲	۳۰۸

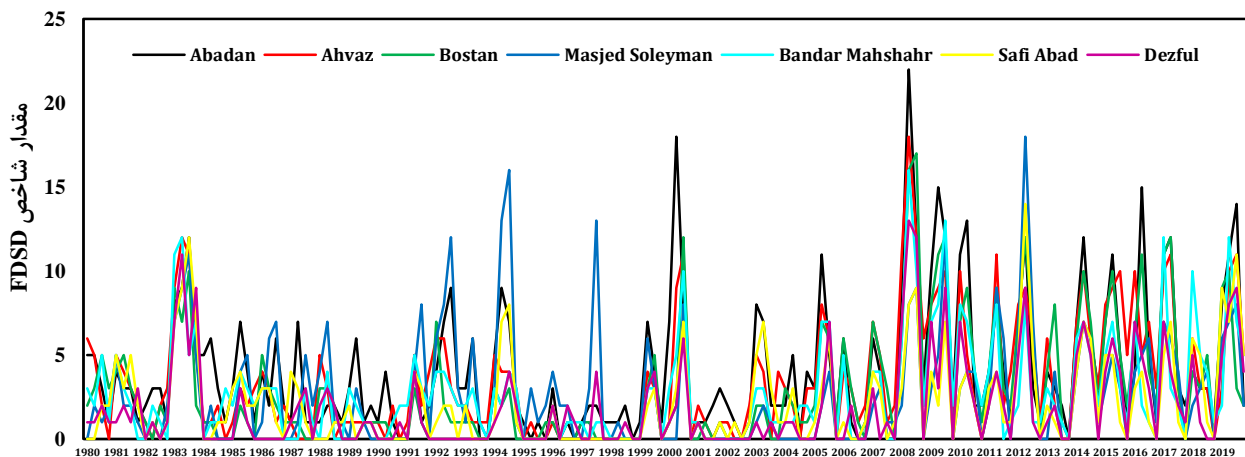


Inverse Distance Weight

شکل ۵. پهنه‌بندی شاخص FDSDD (روز) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

انقطاع و داشتن یک سری زمانی منفصل و به تبع آن تشکیل طوفان‌هایی با فاصله زمانی بیشتر نسبت به ایستگاه‌های آبادان و اهواز در سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۳ در ایستگاه‌های دزفول، صفی‌آباد، مسجد سلیمان، بندر ماهشهر و بستان مشهود است. با توجه به شکل (۶) می‌توان دو دوره طولانی مدت اوج طوفان‌های گرد و غبار مربوط به سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۲ و ۲۰۱۹-۲۰۰۷ را در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه تشخیص داد.

شکل (۶) تغییرات شاخص FDSDD را در مقیاس فصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، شاخص FDSDD در ایستگاه‌های آبادان و اهواز دارای نوسانات زیادی است و مقادیر اوج گرد و غبار به صورت متمرکز در کنار یکدیگر مشاهده می‌شود که حکایت از وقوع طوفان‌های گرد و غبار پی‌درپی در این دو ایستگاه از سال ۲۰۰۰ به بعد دارد. با توجه به شکل (۶)، وجود فصول متوالی عاری از طوفان‌های گرد و غبار،



گام زمانی (سالانه)

شکل ۶. سری زمانی شاخص FDSDD در مقیاس زمانی فصلی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه

طوفان گرد و غبار را نشان می‌دهد. بر این مبنای، در ایستگاه‌های دزفول، بندر ماهشهر، اهواز و آبادان مدل ترکیبی ANFIS-PSO و در ایستگاه‌های صفی‌آباد، مسجد سلیمان و بستان مدل ANFIS بیشترین تعداد رتبه اول (بهترین پیش‌بینی) را داشته‌اند. با ترکیب تعداد معیارهای ارزیابی و تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه برای پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار، ۱۴ رتبه (۷*۲) برای هر روش وجود دارد. بدین ترتیب مدل‌های ANFIS-GA، ANFIS-ACO_R و ANFIS-DF ا صلاح رتبه نخستی به خود اختصاص ندادند؛ در حالی که روش‌های ANFIS-PSO و ANFIS به ترتیب ۸ و ۶ بار

جدول (۳) مقادیر معیارهای ارزیابی مربوط به مرحله آزمایش پنج مدل ANFIS-DE، ANFIS-ACO_R، ANFIS-PSO، ANFIS-GA، ANFIS-PSO و ANFIS-DE به منظور پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار در استان خوزستان را نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی شاخص FDSDD حاکی از عملکرد مناسب تمام روش‌های استفاده شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه (آبادان، اهواز، بستان، بندر ماهشهر، مسجد سلیمان، صفی‌آباد و دزفول) می‌باشد. در جدول (۳)، اعداد داخل پرانتز روبروی مقادیر معیارهای ارزیابی، رتبه‌بندی هر روش بر اساس معیارهای ارزیابی مورد نظر در پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با

این است که مقادیر معیارهای ارزیابی نتایج مدل‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه بسیار نزدیک به هم بوده و با قاطعیت نمی‌توان گفت که کدام مدل جهت پیش‌بینی شاخص FDSO بهتر است و یا اینکه نمی‌توان مدل‌ها را با دقت بالا و اختلاف زیاد نسبت به هم اولویت‌بندی کرد.

در رتبه نخست قرار گرفتند. در مجموع و با این حساب، عملکرد روش ANFIS-PSO با اختلاف بسیار جزئی بهتر از سایر روش‌ها بوده و در غیاب این روش، مدل ANFIS با ۶ بار قرارگیری در رتبه اول و ۸ بار قرارگیری در رتبه دوم بهترین عملکرد را داشته است. اما نکته قابل توجه

جدول ۳. معیارهای ارزیابی محاسبه‌شده حالت‌های مختلف در پیش‌بینی شاخص FDSO

روش	معیارهای ارزیابی	دزفول	صفی آباد	مسجد سلیمان	بندر ماهشهر	بستان	اهواز	آبادان
ANFIS	مدل بهینه	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱
	R	۰/۸۳ (۲)	۰/۸۹ (۱)	۰/۹۰ (۱)	۰/۸۹ (۲)	۰/۹۳ (۱)	۰/۹۳ (۲)	۰/۹۴ (۲)
	RMSE	۰/۲۱ (۲)	۰/۱۸ (۱)	۰/۱۴ (۱)	۰/۱۶ (۲)	۰/۱۳ (۱)	۰/۱۳ (۲)	۰/۱۱ (۲)
ANFIS-PSO	مدل بهینه	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱
	R	۰/۸۸ (۱)	۰/۸۸ (۲)	۰/۸۹ (۲)	۰/۹۰ (۱)	۰/۹۲ (۲)	۰/۹۵ (۱)	۰/۹۷ (۱)
	RMSE	۰/۱۹ (۱)	۰/۱۹ (۲)	۰/۱۷ (۲)	۰/۱۴ (۱)	۰/۱۵ (۲)	۰/۱۱ (۱)	۰/۱۰ (۱)
ANFIS-GA	مدل بهینه	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱
	R	۰/۸۱ (۳)	۰/۸۵ (۳)	۰/۸۵ (۳)	۰/۸۷ (۳)	۰/۸۲ (۵)	۰/۸۳ (۵)	۰/۸۹ (۳)
	RMSE	۰/۲۷ (۴)	۰/۲۴ (۵)	۰/۲۳ (۴)	۰/۲۳ (۵)	۰/۱۹ (۵)	۰/۱۸ (۵)	۰/۱۶ (۵)
ANFIS-ACOR	مدل بهینه	۲	۲	۲	۱	۲	۱	۱
	R	۰/۷۸ (۵)	۰/۷۹ (۵)	۰/۸۱ (۵)	۰/۸۴ (۴)	۰/۸۴ (۴)	۰/۸۵ (۳)	۰/۸۶ (۵)
	RMSE	۰/۲۵ (۳)	۰/۲۳ (۴)	۰/۲۴ (۵)	۰/۱۹ (۴)	۰/۱۷ (۴)	۰/۱۴ (۳)	۰/۱۳ (۳)
ANFIS-DE	مدل بهینه	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۱
	R	۰/۷۹ (۴)	۰/۸۱ (۴)	۰/۸۲ (۴)	۰/۸۳ (۵)	۰/۸۵ (۳)	۰/۸۴ (۴)	۰/۸۷ (۴)
	RMSE	۰/۲۹ (۵)	۰/۲۱ (۳)	۰/۲۲ (۳)	۰/۱۸ (۳)	۰/۱۶ (۳)	۰/۱۷ (۴)	۰/۱۵ (۴)
میانگین فصلی FDSO (روز)		۱/۹۲	۲/۲۱	۲/۲۷	۲/۷۹	۲/۹۸	۳/۴۳	۴/۱۵

واریانس مشخص شد که بین فرامدل ANFIS و مدل‌های ترکیبی ANFIS-PSO، ANFIS-GA، ANFIS-ACOR و ANFIS-DE به منظور پیش‌بینی شاخص FDSO اختلاف معنی‌داری وجود ندارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت اولاً استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی در نتایج فرامدل ANFIS بهبود چشمگیری ایجاد نکرده است و دوماً فرامدل ANFIS دارای ساختار قدرتمند برای مدل‌سازی است و لزومی به استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی که منجر به افزایش حجم و هزینه مطالعه می‌شوند، جهت پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار در استان خوزستان نمی‌باشد.

در همین راستا از روش تجزیه واریانس دو طرفه (ANOVA) برای مشخص شدن اختلاف معنی‌دار بین عملکرد مدل‌ها استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده از جدول (۴) مشخص شد که بین ۵ مدل به کاررفته در این پژوهش به منظور پیش‌بینی شاخص FDSO در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقدار P-Value بزرگتر از ۰/۰۵ بوده و در نتیجه، اختلاف معنی‌داری بین دقت و عملکرد مدل‌ها در این مطالعه وجود ندارد. با توجه به اینکه استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی، فرایند انجام کار را سخت کرده و هزینه محاسبات و مدت زمان اجرای مدل را افزایش می‌دهند؛ از طرفی طبق نتایج تجزیه

جدول ۴. آنالیز واریانس نتایج مدل‌های ANFIS-DE, ANFIS-ACOR, ANFIS-GA, ANFIS-PSO, ANFIS

ایستگاه	Creator	میانگین مربعات	F	P-Value
آبادان	Between group	۰/۵۲۱	۱/۷۱۱	۰/۰۹۳
	Within group	۰/۲۳۵		
اهواز	Between group	۰/۵۳۳	۱/۷۴۲	۰/۰۹۷
	Within group	۰/۲۱۱		
بستان	Between group	۰/۵۰۷	۱/۶۱۴	۰/۰۸۷
	Within group	۰/۲۰۹		
بندر ماهشهر	Between group	۰/۵۳۳	۱/۶۸۲	۰/۰۹۲
	Within group	۰/۳۱۲		
مسجد سلیمان	Between group	۰/۶۱۵	۱/۸۱۱	۰/۰۹۷
	Within group	۰/۲۹۳		
صفی آباد	Between group	۰/۵۸۱	۱/۵۹۵	۰/۰۶۷
	Within group	۰/۳۱۳		
دزفول	Between group	۰/۷۲۲	۱/۵۴۳	۰/۰۶۴
	Within group	۰/۴۱۶		

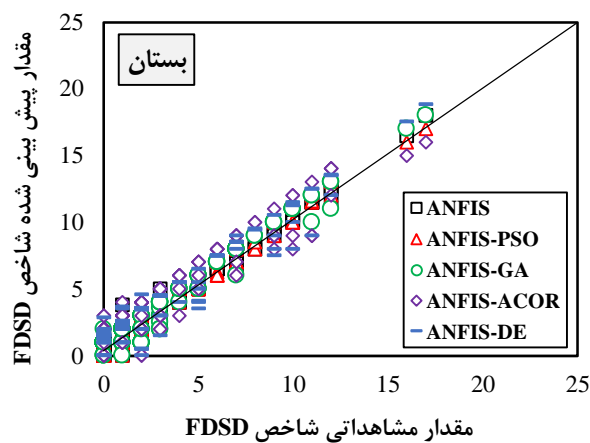
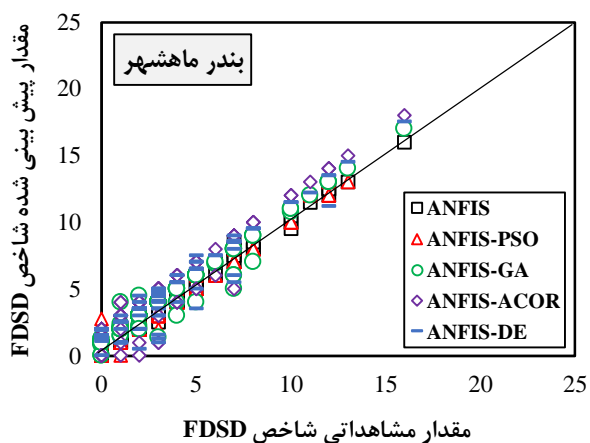
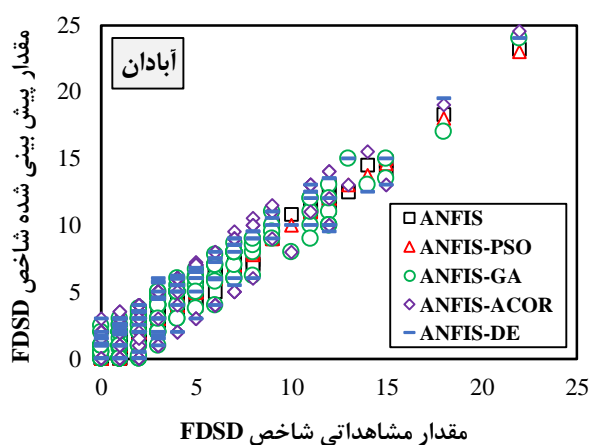
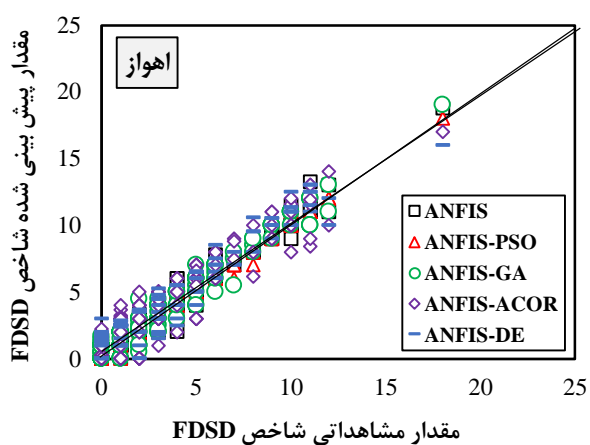
ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد؛ به نحوی که برای پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار در تمامی ایستگاه‌ها از مدل ۱ و ۲ (با یک و دو گام تأخیر) استفاده شد. از این رو، در ایستگاه‌های بستان و آبادان که در نزدیکی مرز کشور عراق قرار دارند، استفاده از یک گام تأخیر به منظور پیش‌بینی شاخص FDSO دقت بیشتری داشته است. این در حالی است که با حرکت از مناطق مرزی به سمت مرکز و شرق استان خوزستان، استفاده از گام‌های زمانی بیشتر برای پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار، دقت مدل را افزایش می‌دهد که دلیل آن را می‌توان در تأثیر ذرات به جامانده از طوفان‌های قبلی و فصل گذشته بر شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غبار فصل آینده با بومی شدن منشأ طوفان‌های گرد و غبار (پیشروی از مناطق مرزی به مرکز کشور) جستجو کرد.

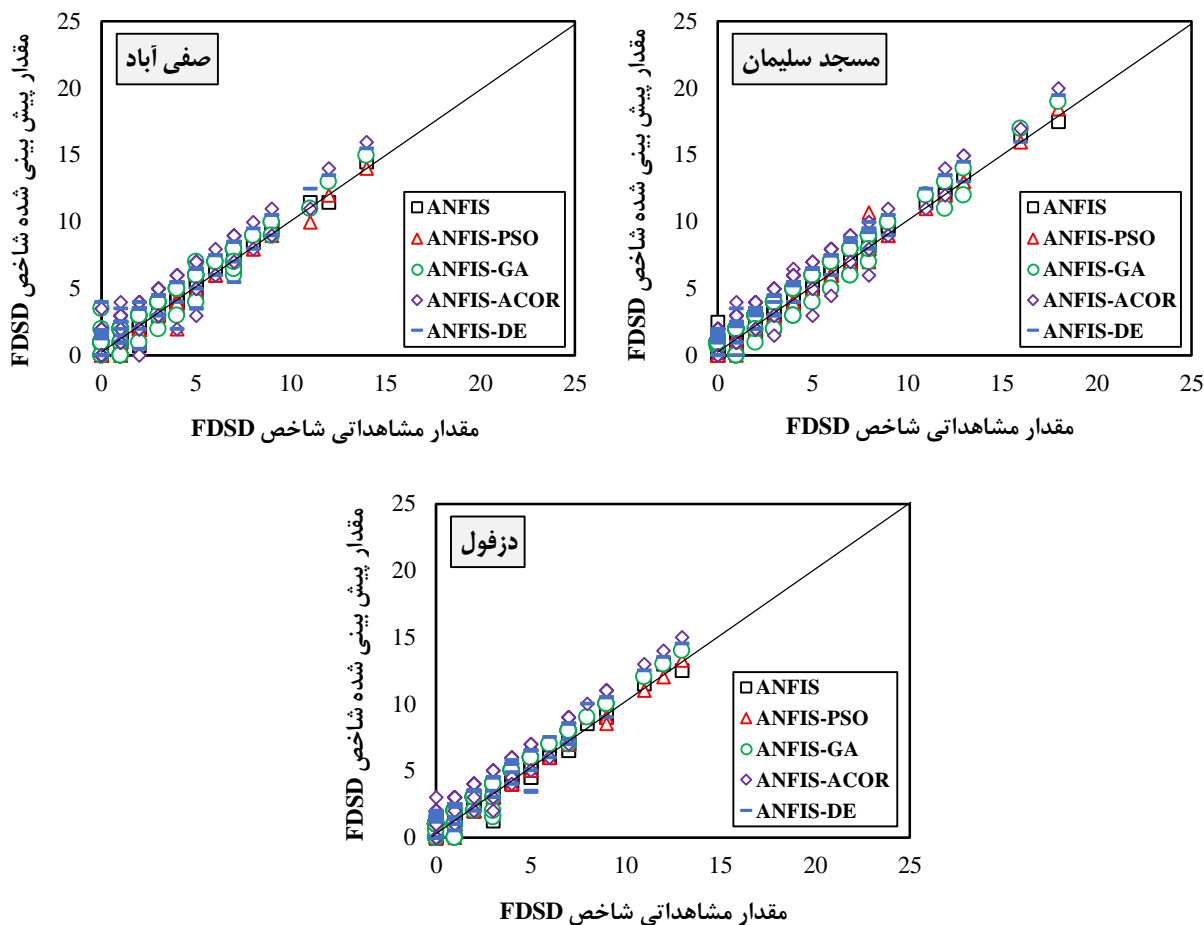
شکل (۷) مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FDSO را برای داده‌های آزمایش نشان می‌دهد. این شکل بهبود عملکرد روش‌های مورد استفاده با افزایش فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار را به خوبی بیان می‌کند؛ به طوری که ایستگاه آبادان به عنوان فراوان‌ترین

با توجه به اینکه در جدول (۳) ترتیب ایستگاه‌ها به لحاظ شاخص FDSO از ایستگاه دزفول تا آبادان به صورت صعودی بوده و متوسط فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار در مقیاس فصلی از ۱/۹۲ تا ۴/۱۵ متغیر است، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد تمام روش‌ها به منظور پیش‌بینی شاخص FDSO با افزایش تعداد روزهای همراه با طوفان گرد و غبار رابطه مستقیمی دارد. به این معنی که با افزایش فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گرد و غبار، مقادیر معیارهای مورد ارزیابی همگی بهبود می‌یابند؛ به نحوی که در روش ANFIS، ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار و مقادیر پیش‌بینی شده آن از ۰/۸۳ به ۰/۹۴ افزایش پیدا می‌کند. همچنین برای مدل‌های ANFIS-PSO، ANFIS-DE، ANFIS-ACOR، ANFIS-GA نیز مقدار ضریب همبستگی به ترتیب از ۰/۸۸ تا ۰/۹۷، ۰/۸۱ تا ۰/۸۹، ۰/۷۸ تا ۰/۸۶ و ۰/۷۹ تا ۰/۸۷ به منظور پیش‌بینی شاخص FDSO در ایستگاه‌های مورد مطالعه متغیر است. نتیجه دیگری که از جدول (۳) قابل استنتاج است، انتخاب مدل‌های ساده‌تر به عنوان مدل بهینه پیش‌بینی‌کننده در

ایستگاه‌های منطقه در سطح خطای یک درصد رد نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تمامی مدل‌های استفاده شده جهت پیش‌بینی شاخص FDSI، میانگین سری زمانی را حفظ کرده‌اند (جدول ۵) که این ویژگی نیز می‌تواند تأکیدی بر کارایی فرامدل سیستم استنتاج تطبیقی فازی عصبی (ANFIS) نسبت به ترکیب آن‌ها با الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی به منظور پیش‌بینی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار باشد.

ایستگاه موجود در منطقه مورد مطالعه، بهترین مطابقت را بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FDSI دارا می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، ارتباط بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه خطی با شیب تقریباً ۴۵ درجه می‌باشد. مقایسه میانگین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FDSI بر اساس آزمون Z نشان داد که فرض صفر مبتنی بر برابر بودن میانگین سری مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده در هیچ کدام از





شکل ۷. نتایج مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FSDS در ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۵. آزمون مقایسه میانگین سری زمانی مشاهداتی و پیش‌بینی شده شاخص FSDS

میانگین										ایستگاه	
آماره Z				ANFIS	ANFIS-DE	ANFIS-ACOR	ANFIS-GA	ANFIS-PSO	ANFIS		مشاهداتی
ANFIS-DE	ANFIS-ACOR	ANFIS-GA	ANFIS-PSO	ANFIS	ANFIS-DE	ANFIS-ACOR	ANFIS-GA	ANFIS-PSO	ANFIS	مشاهداتی	آبادان
۰/۸۴۶	۰/۸۹۶	۰/۸۸۴	۰/۸۹۳	۰/۸۹۷	۰/۹۲۱	۰/۹۰۶	۰/۹۱۷	۰/۹۲۱	۰/۹۱۱	۰/۹۴۱	آبادان
۰/۸۴۶	۰/۸۵۷	۰/۸۸۱	۰/۸۷۸	۰/۸۸۳	۰/۹۱۴	۰/۹۰۷	۰/۹۱۹	۰/۹۳۱	۰/۹۲۵	۰/۹۳۴	اهواز
۰/۸۴۱	۰/۸۴۸	۰/۸۶۶	۰/۸۷۳	۰/۸۹۷	۰/۹۱۱	۰/۹۰۳	۰/۹۱۶	۰/۹۳۴	۰/۹۲۳	۰/۹۳۷	بستان
۰/۸۴۱	۰/۸۳۷	۰/۸۲۵	۰/۸۷۴	۰/۸۸۶	۰/۹۰۵	۰/۹۰۱	۰/۹۰۶	۰/۹۲۱	۰/۹۱۱	۰/۹۲۴	بندر ماهشهر
۰/۸۴۳	۰/۸۲۴	۰/۸۳۲	۰/۸۶۵	۰/۸۷۰	۰/۹۰۵	۰/۹۰۲	۰/۹۰۴	۰/۹۱۳	۰/۹۰۳	۰/۹۱۷	مسجد سلیمان
۰/۸۰۹	۰/۸۱۷	۰/۸۳۶	۰/۸۲۹	۰/۸۳۸	۰/۸۶۹	۰/۸۷۸	۰/۸۸۴	۰/۸۹۲	۰/۸۹۳	۰/۹۰۳	صفی آباد
۰/۸۰۲	۰/۸۱۱	۰/۸۱۷	۰/۸۲۳	۰/۸۳۴	۰/۸۵۳	۰/۸۶۹	۰/۸۷۴	۰/۸۸۱	۰/۸۸۲	۰/۸۹۴	دزفول

ایستگاه سینوپتیک استان خوزستان بود. ورودی مدل‌ها، مقادیر فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار در تاخیرهای قبل (حداکثر تا ۴ فصل) و خروجی شامل مقادیر فصلی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار بود. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که استفاده از

۴. بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل ANFIS در مقایسه با ترکیب آن با الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی PSO، GA، ACO_R و DE در مدل‌سازی شاخص فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار (FSDS) در هفت

معرض طوفان‌هایی با منشأ خارجی (عراق، سوریه و عربستان) هستند در صورتی که در ایستگاه‌های مرکزی و شرقی استان، مواردی همچون بیابان‌زایی، خشک شدن تالاب‌های منطقه، عدم مدیریت صحیح منابع آب و برخاستن ذرات به‌جامانده و ته‌نشین شده از طوفان‌های قبلی به عوامل تشکیل طوفان‌های گرد و غبار افزوده می‌شود. نتایج این قسمت با مطالعات [۱]، [۱۰]، [۲۴] و [۳۲] مطابقت دارد. اهداف این مطالعه می‌تواند محققین را در انتخاب آگاهانه مدل مناسب در پیش‌بینی زمانی فراوانی روزهای همراه با طوفان گرد و غبار با توجه به کارایی مورد انتظار، زمان و هزینه محاسبات و شرایط لازم برای آماده‌سازی داده‌ها کمک نماید. بدون شک به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از این پژوهش، تحقیقات بیشتری برای کاربرد فرامدل‌های ترکیبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی زمانی-مکانی طوفان‌های گرد و غبار در مناطق تحت تاثیر این پدیده، می‌بایست انجام شود.

۵. سپاس‌گزاری

بدین و سیله از دانشگاه تهران به دلیل تأمین امکانات لازم برای انجام این پژوهش و تهیه مقالات مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکوشی PSO، GA، ACO_R و DE و ترکیب آن‌ها با مدل ANFIS، نتایج را به طور معنی‌داری نسبت به مدل انفرادی ANFIS بهبود نمی‌بخشد و گویای این موضوع است که مدل ANFIS خود به تنهایی ابزار قدرتمندی جهت مدل‌سازی در این پژوهش به منظور پیش‌بینی شاخص FDSM می‌باشد. قابل ذکر است که الگوریتم‌های ترکیبی در جستجوی کامل فضای مسئله بهینه‌سازی، عدم نیاز به پیش‌پردازش و فرضیات آماری بررسی داده‌ها و همچنین یافتن ساختار بهینه ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی به ویژه در فرایندهای غیرخطی توانایی زیادی دارند اما از جمله معایب آن‌ها می‌توان به حجم بالای عملیات و هزینه محاسبات اشاره کرد. نتایج این قسمت با مطالعات [۵]، [۷]، [۱۶]، [۳۳]، [۳] و [۲۸] همخوانی دارد. با این توضیح، در تمامی روش‌های مورد استفاده جهت پیش‌بینی شاخص FDSM، مدلی که از یک یا دو گام تأخیر در پیش‌بینی استفاده کرد، بهترین مدل پیش‌بینی کننده بوده است. با این توضیح که با حرکت از ایستگاه‌های مرزی به سمت مناطق مرکزی و شرقی استان خوزستان، استفاده از دو گام تأخیر در پیش‌بینی، نتایج بهتری را حاصل کرد که علت آن را می‌توان در تغییر وضعیت منشأ طوفان‌های گرد و غبار به سمت مناطق داخلی و شرق استان جستجو کرد؛ به طوری که ایستگاه‌های مستقر در مناطق مرزی غرب کشور، در

References

- [1] Abdolshahnejad, M., Khosravi, H., Nazari Samani, A. A., Zehtabian, G. R., & Alambaigi, M. (2020). Determining the Conceptual Framework of Dust Risk Based on Evaluating Resilience (Case Study: Southwest of Iran). *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 5(1), 33-44. (In Persian)
- [2] Annaty, M., Eghbalzadeh, A., & Hosseini, S. (2015). Hybrid ANFIS model for predicting scour depth using particle swarm optimization. *Indian journal of science and technology*, 8(22), 642-649.
- [3] Ansari Ghojghar, M., Pourgholam-Amiji, M., Bazrafshan, J., Hosseini-Moghari, S. M., Liaghat, A., & Araghinejad, Sh. (2020). Performance Evaluation of Genetic Algorithm and GA-SA Hybrid Method in Forecasting Dust Storms (Case Study: Khuzestan Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2623-2639. (In Persian)
- [4] Araghinejad, S. (2013). *Data-driven modeling: using MATLAB® in water resources and environmental engineering* (Vol. 67). Springer Science & Business Media.
- [5] Araghinejad, Sh., Ansari Ghojghar, M., Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., & Bazrafshan, J. (2019). The Effect of Climate Fluctuation on Frequency of Dust Storms in Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(21), 13-32. (In Persian)

Persian)

- [6] Azad, A., Karami, H., Farzin, S., Saedian, A., Kashi, H., & Sayyahi, F. (2018). Prediction of water quality parameters using ANFIS optimized by intelligence algorithms (case study: Gorganrood River). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(7), 2206-2213.
- [7] Cao, R., Jiang, W., Yuan, L., Wang, W., Lv, Z., & Chen, Z. (2014). Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 24(6), 963-979.
- [8] Davis, L. (1991). *Handbook of genetic algorithms*.
- [9] Dorigo, M. (1992). *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD Thesis, Politecnico di Milano.
- [10] Farajzadeh Asl, M., & Alizadeh, Kh. (2011). Spatial Analysis of Dust storm in Iran. *The Journal of Spatial Planning*, 15(1), 65-84. (In Persian)
- [11] Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Science & Business Media.
- [12] Hassanzadeh, Y., Abdi Kordani, A., & Fakheri Fard, A. (2012). Drought Forecasting Using Genetic Algorithm and Conjoined Model of Neural Network-Wavelet. *Journal of Water and Wastewater*, 23(3), 48-59. (In Persian)
- [13] Jalalkamali, A. (2015). Using of hybrid fuzzy models to predict spatiotemporal groundwater quality parameters. *Earth Science Informatics*, 8(4), 885-894.
- [14] Jang, J. S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685.
- [15] Mahmoodimahpash, N., & Souri, B. (2020). Detecting origin of dust-fall using ions ratio and morphology of the particles in western Iran. *Journal of Natural Environment*, 73(2), 355-367. (In Persian)
- [16] Mehrabi, Sh., Soltani, S., & Jafari, R. (2015). Investigating the Relationship between Climatic Parameters and the Exposure of Greenhouses (Case Study: Khuzestan Province). *Journal of Water and Soil Science*, 19(71), 69-80. (In Persian)
- [17] Mehri, Y., Mehri, M., & Soltani, J. (2020). Evaluation of combined Models with Optimization Approach of PSO and GA in ANFIS for Predicting of Dispersion Coefficient in Rivers. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 45-59. (In Persian)
- [18] Mohammadi Ghalehi, M., & Ebrahimi, K. (2013). Evaluation of direct search and genetic algorithms in optimization of muskingum nonlinear model parameters - a flooding of Karoun river, Iran. *Water and Irrigation Management*, 2(2), 1-12. (In Persian)
- [19] Mozafari, Gh. A., Shafie, Sh., & Hemati, H. R. (2016). Predicting monthly precipitation of Kermanshah synoptic station using the hybrid model of neural network and wavelet. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(6), 135-152. (In Persian)
- [20] Nabizadeh, M., Mosaedi, A., & Dehghani, A. (2012). Intelligent estimation of stream flow by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Water and Irrigation Management*, 2(1), 69-80. (In Persian)
- [21] Nadiri, A. A., Taherkhani, Z., & Sadeghi Aghdam, F. (2017). Prediction of ground water level of Bostan Abad using combining artificial intelligence models. *Iran Water Resources Research*, 13(3), 43-55. (In Persian)
- [22] O'Loingsigh, T., McTainsh, G. H., Tews, E. K., Strong, C. L., Leys, J. F., Shinkfield, P., & Tapper, N. J. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research*, 12, 29-40.
- [23] Prudêncio, R. B., & Ludermir, T. B. (2003). Neural network hybrid learning: genetic algorithms & Levenberg-Marquardt. In *Between Data Science and Applied Data Analysis* (pp. 464-472). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [24] Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Goudie, A. S., & Kahn, R. A. (2013). Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of the total environment*, 463, 552-564.
- [25] Sepehri, M., Ildoromi, A. R., Hosseini, S. Z., Nori, H., Mohammadzade, F., & Artimani, M. M. (2018). The combination of neural networks and genetic algorithms is a way to estimate the Peak flood. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(39), 23-28. (In Persian)

- [26] Shafaei, M., Fakhri Fard, A., Darbandi, S., Ghorbani, M. (2014). Prediction Daily Flow of Vanyar Station Using ANN and Wavelet Hybrid Procedure. *Irrigation and Water Engineering*, 4(2), 113-128. (In Persian)
- [27] Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*, 1, 81-86.
- [28] Sobhani, B., Safarian Zengir, V., & faizollahzadeh, S. (2020). Modeling and prediction of dust in western Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 52(1), 17-35. (In Persian)
- [29] Socha, K., & Dorigo, M. (2008). Ant colony optimization for continuous domains. *European journal of operational research*, 185(3), 1155-1173.
- [30] Sreedhara, B. M., Rao, M., & Mandal, S. (2019). Application of an evolutionary technique (PSO-SVM) and ANFIS in clear-water scour depth prediction around bridge piers. *Neural Computing and Applications*, 31(11), 7335-7349.
- [31] Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- [32] Yarmoradi, Z., Nasiri, B., Mohammadi, Gh. H., & Karampour, M. (2018). Trend analysis of dusty day's frequency in Eastern parts of Iran associated with Climate Fluctuations. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(18), 1-14. (In Persian)
- [33] Zeinali, B. (2016). Investigation of frequency changes trend of days with dust storms in western half of Iran. *Journal of Natural Environment hazards*, 5(7), 100-87. (In Persian)