

## ارزیابی ارتباط زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و آبشناسی با کاربرد برنامه‌ریزی‌های ژنتیک (GP) و سامانه‌ی استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS) در حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای

سهیلا زارعی<sup>۱\*</sup>، احمد فاخری فرد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۲۴

### چکیده

پیش‌بینی پدیده‌هایی نظیر خشکسالی، که گاهی آثار زیان بار آنها جبران پذیر نیست، یکی از مهمترین مسائل برای محققان بوده است. در این پژوهش با بهره‌وری از داده‌های بارش و جریان‌های ماهانه‌ی ۴۰ ساله (۱۳۴۹-۱۳۸۸) در حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی، دوره‌های خشکی مربوط به هر گروه داده بارش و جریان، با کاربرد روش رژیم بهنجار ماهانه استخراج گردید، سپس ارتباط زمانی بین خشکسالی‌های هواشناسی و آبشناسی با کاربرد روش‌های مصنوعی نظیر GP و ANFIS بررسی شد تا با استفاده از شبیه مناسب‌تر بتوان با داشتن خشکسالی‌های هواشناسی، خشکسالی‌های آبشناسی را از نظر زمان وقوعشان، قبل از رخدادن آنها پیش‌بینی کرد. دو روش مزبور با به‌کارگیری آماره‌های مناسب، مانند ضریب همبستگی ( $r^2$ )، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق انحرافات (MAD) ارزیابی شدند؛ نتایج نشان دادند که بین هر دو خشکسالی، در هر دو شبیه انتخاب شده، همبستگی بالایی با ضریب همبستگی در حدود ۰/۹۹ وجود دارد، که بیانگر نیکویی هر دو شبیه در ایجاد ارتباط زمانی بین خشکسالی‌های هواشناسی و آبشناسی می‌باشد. با توجه به معیارهای خطا می‌توان نتیجه گرفت که می‌توان زمان رخدادن خشکسالی آبشناسی را با کاربرد روش ANFIS، و با آماره‌های  $RMSE=4/98$  و  $MAD=3/83$  نسبت به شبیه GP با  $RMSE=6/437$  و  $MAD=5/201$  با اطمینان بیشتری پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی، خشکسالی آبشناسی، شبیه GP، شبیه ANFIS

<sup>۱</sup> - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> - استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* - نویسنده مسئول مقاله: Soheila\_Zareie@yahoo.com

## مقدمه

پدیده‌ی خشکسالی یکی از مهمترین و خطرناکترین بلایای طبیعی است که جوامع مختلف را تحت تأثیر آثار سوء خود، نظیر کمبود آب و غذا، از بین رفتن حیوانات و جانوران مختلف، مشکلات اقتصادی کشاورزان و ... قرار داده و در انواع مختلف اقلیمها رخ می‌دهد. بنابراین، مطالعه‌ی آن در زمینه‌های مختلف هواشناسی، آبشناسی، کشاورزی و جنبه‌های اجتماعی-اقتصادی حائز اهمیت فراوان می‌باشد. بطور کلی، خشکسالی یعنی کمبود بارش در بلند مدت به نحوی که باعث کمبود رطوبت خاک و کاهش آبهای سطحی و زیرزمینی گردیده و فعالیتهای انسان و گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد (دریاباری، ۱۳۸۵). خشکسالی را که باعث کاهش آبهای سطحی و زیرزمینی شود خشکسالی آبشناسی؛ خشکسالی را که در ارتباط با کاهش نزولات جوی باشد خشکسالی هواشناسی؛ خشکسالی را که ناشی از کمبود رطوبت خاک باشد خشکسالی کشاورزی می‌نامند. خشکسالی صرفاً محدود به مناطق خشک دنیا نشده و احتمال رخدادن در هر نوع اقلیمی را دارد؛ حتی ممکن است در مناطقی که بارندگی سالانه‌ی آنها بیشتر از ۱۵۰۰ میلی‌متر است به کرات اتفاق افتد (امین، ۱۳۷۹). تأثیر خشکسالی به تدریج و در یک دوره‌ی زمانی نسبتاً طولانی بوده و اثرات آن ممکن است با تأخیر و پس از چند سال پس از پایان آن ظاهر شود. بر این اساس، تحلیل خشکی‌ها از دیدگاه جریان مهمتر از تحلیل از دیدگاه بارش می‌باشد، و اگر بتوان خشکسالی آبشناسی را از خشکسالی هواشناسی پیش‌بینی کرد کمک قابل ملاحظه‌ای در جلوگیری از بروز زیانهای ناشی از رخدادن خشکسالی‌های آبشناسی کند؛ زیرا بدون وجود بارش تا مدتی ذخایر مختلف حوزه‌ی بروز خشکسالی را به تعویق می‌اندازد، و نیز پس از دوره‌ی خشکسالی، زمانی که بارش به حالت بهنجار برگشته، و شرایط خشکسالی هواشناسی پایان می‌پذیرد، تا زمان احیای مجدد منابع آبهای سطحی و زیر سطحی پیامدهای سوء این پدیده ادامه می‌یابند. بنابراین، اگر بتوان خشکسالی آبشناسی را قبل از رخدادن، و با استفاده از داده‌های بارش، تخمین زد به حل مسائل مربوط به مدیریت منابع آب کمک فراوانی شده است. با توجه به ویژگی‌های خشکسالی، نظیر این که یک پدیده‌ی خزنده بوده که زمان دقیق شروع و پایان آن مشخص نمی‌باشد، و جبران خسارات آن به آسانی صورت

نمی‌گیرد، لذا پژوهش از جنبه‌های مختلف آن مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. شاهرخ وندی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی خشکسالی آبشناسی و ارتباط آن با خشکسالی هواشناسی در حوضه‌ی رود خرم‌آباد پرداختند. بررسی نمودارها و جدول‌ها نشان داد که خشکسالی‌های اقلیمی حداکثر با تداوم‌های یک تا سه ماهه، و خشکسالی‌های آبشناسی، حتی در تداوم‌های پنج تا دوازده ماهه نیز مشاهده می‌شوند. مفیدی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی ارتباط خشکسالی هواشناسی و آبشناسی با استفاده از شاخص‌های SPI و SDI در سطح حوضه‌ی آبخیز اترک پرداختند. نتایج نشان دادند که رابطه‌ی زمانی رخدادن خشکسالی هواشناسی و آبشناسی با یکدیگر در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بوده، و این همبستگی در بازه‌ی ۳ ماهه حداکثر است. اوزگر و همکاران (۲۰۰۹) رابطه بین شاخص‌های آب و هوایی با تناوب پایین و خشکسالی در ایالت تگزاس را مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که دو مقیاس خاص، یعنی چند ساله و دهه‌ای برای رویدادهای خشکسالی در ارتباط با شاخصهای آب و هوایی بزرگ مقیاس مؤثرند؛ همچنین، تبدیل‌های متقاطع و پیوسته نشان دادند که یک رابطه‌ی قوی بین خشکسالی و نمایه‌های آب و هوایی وجود دارد، و شاخص‌های انسو همبستگی بیش‌تری را نسبت به پی دو با شاخص‌های خشکسالی دارند.

امروزه روش‌های هوش مصنوعی، با توجه به توانایی آنها در حل پدیده‌های غیرخطی و پیچیده، کاربردهای فراوانی را در مسائل مختلف مهندسی آب پیدا کرده‌اند. این روش‌ها به عنوان شبیه مبتنی بر داده قادرند بدون در نظر گرفتن محدودیت فیزیکی محیط، ارتباطی منطقی را بین ورودی و خروجی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای برقرار کنند (نبی‌زاده و همکاران ۱۳۹۱). شبیه‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های عصبی و سامانه‌های فازی، نسبت به شبیه‌های فیزیکی نتایج بسیار خوبی را ارائه می‌دهند. سامانه‌های فازی قادرند مسائلی را که به صورت مبهم و غیرصریح، مانند خشکسالی می‌باشد شبیه‌سازی کنند. شبکه‌های عصبی توانایی بسیار بالایی را در حل مسائل پیچیده دارند، زیرا قادرند از روی یک گروه از اطلاعات آموزش ببینند و رابطه‌ای مناسب را بین اطلاعات برقرار نمایند، و این ویژگی مهمترین کاربرد شبکه‌های عصبی است. جانگ در سال ۱۹۹۳ شبیه ANFIS را ارائه کرد که

قابلیت ترکیب توانایی دو روش سامانه‌ی فازی و شبکه‌ی عصبی را داشت. ANFIS یک شبکه‌ی پیشخور چند لایه می‌باشد که از الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های عصبی و منطق فازی به منظور ترسیم یک فضای ورودی به یک فضای خروجی استفاده می‌کند.

یکی دیگر از این شبیه‌های هوش مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) می‌باشد که جزء الگوریتم‌های فراکاوشی بشمار می‌رود که مبنای تمامی آنها بر اساس نظریه‌ی تکامل داروین استوار است. این الگوریتم‌ها توانایی شبیه‌سازی فرایندهای کاملاً غیرخطی را دارند. در برنامه‌ریزی ژنتیک، ابتدا بلوک‌های موجود، که شامل متغیرهای ورودی، هدف و نیز تابع ارتباط دهنده‌ی آنها می‌باشد، تعریف گردیده، سپس ساختار مناسب شبیه و ضرایب آن تعیین می‌شوند. این روش شامل یک معادله‌ی ارتباط دهنده بین متغیرهای ورودی و خروجی بوده، و لذا قادر به انتخاب خودکار متغیرهای مناسب شبیه و حذف متغیرهای غیر مرتبط است، که این امر خود سبب کاهش ابعاد متغیرهای ورودی شده و بطور وسیعی در مسائل مختلف مهندسی، در شبیه‌سازی مسائل مربوط به تعیین ساختار پدیده‌ها استفاده می‌شود. سلطانی و همکاران (۱۳۸۹) برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) را برای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب روزانه در حوضه‌ی آبخیز ليقوان به کار بردند. از آن جای که GP توان انتخاب بهترین متغیرها را دارد، ابتدا متغیرهای معنی‌دار با ۱۰ بار اجرای GP مشخص، سپس شبیه‌سازی با متغیرهای معنی‌دار و دو مجموعه‌ی عملگر ریاضی انجام شد، که شبیه حاصل از مجموعه‌ی ریاضی دو با ضریب همبستگی ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطا ۰/۰۸ نسبت به مجموعه‌ی عملگر ریاضی یک با ضریب همبستگی ۰/۹۳ و میانگین مربعات خطا ۰/۲، به عنوان شبیه بارش- رواناب حوضه‌ی آبخیز ليقوان پیشنهاد گردید. آنها به این نتیجه رسیدند که برنامه‌ریزی ژنتیک در پیش‌بینی جریان و شبیه‌سازی بارش- رواناب کاربرد دارد. دستورانی و همکاران (۱۳۹۰) کارایی دو شبیه شبکه عصبی و سامانه‌ی استنتاج عصبی- فازی را به منظور برآورد بارش- رواناب مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج آنها کارایی شبیه حاصل از سامانه‌ی استنتاج عصبی- فازی بهتر بود. آیتک و همکاران (۲۰۰۸) روش جدید GEP را برای برقرار کردن رابطه‌ی رسوبها معلق و بده‌ی روزانه‌ی در دو ایستگاه رود تانگو در مونتانا به کار گرفتند.

شبیه‌های به دست آمده با استفاده از GEP با دو روش وایزای خطی و نمودارهای شدت رسوب در تخمین بار رسوبها معلق مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که رابطه‌ی پیشنهادی GEP، در مقایسه با دو روش دیگر، بهتر عمل نموده است. کسکین و همکاران (۲۰۰۹) خشکسالی هواشناسی را با شاخص SPI برای مجموعه داده‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در ترکیه استخراج کردند، سپس خشکسالی‌ها را با ANFIS و منطق فازی شبیه‌سازی کردند. آنها نشان دادند که مقادیر SPI با ANFIS بهتر شبیه‌سازی می‌شوند. دوگان و همکاران (۲۰۱۰) شبیه‌های ANFIS و MLR برای شبیه‌سازی فرایندهای تخییر در ایستگاه سد یواسیک ترکیه، با استفاده از معیارهای ارزیابی مناسب بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که شبیه ANFIS مناسب‌تر است. شیری و کیسی (۲۰۱۰) رواناب رود را با مقایسه‌ی دو شبیه Neuro-Fuzzy و Wavelet Neuro-Fuzzy برای رود فیلیوس واقع در قسمت غربی دریای سیاه در ترکیه بررسی کرده و آمار ۳۱ سال جریان‌های روزانه، ماهانه و سالانه را به کار بردند؛ نتایج نشان دادند که دقت شبیه WFN بیشتر است. در قسمت دوم مطالعه، آنها مؤلفه‌های تناوبی را به ورودی‌های هر دو شبیه اضافه کردند که این مؤلفه‌ها دقت هر دو شبیه را افزایش داد. چن و همکاران (۲۰۱۱) خطر خشکسالی کشاورزی را در استان هونان چین با روش فرایند شبکه‌ی تحلیلی فازی برای دوره‌ی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ بررسی کردند، ایشان نشان دادند که این روش برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی مؤثر است. ازدری مقدم و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از شبیه‌های neuro-fuzzy، شاخص‌های اقلیمی و گروه‌های زمانی بارش خشکسالی‌ها را برای منطقه‌ی زاهدان پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان دادند که تنها استفاده از گروه‌های زمانی مشابه سال قبل، شاخص خشکسالی SPI در پیش‌بینی خشکسالی‌های ۱۲ ماهه مؤثر است، با این حال، از بین شاخص‌های اقلیمی مورد بررسی، شاخص Nino4 مناسبترین نتایج را ارائه داد. ثانی‌خانی و کیسی (۲۰۱۲) با استفاده از دو شبیه مختلف ANFIS، یعنی شبیه‌های ANFIS-GP (ANFIS with grid partition) و ANFIS-SC (ANFIS with sub clustering) جریان رود را برای دو ایستگاه واقع در حوضه‌ی فرات- دیکل ترکیه به کار بردند.

بر اساس بررسی‌های آنها شبیه ANFIS-SC بهتر از شبیه ANFIS-GP بود.

هدف اصلی این پژوهش علاوه بر یافتن ارتباط زمانی بین دو خشکسالی هواشناسی و آبشناسی، مقایسه‌ی دقت و توان دو شبیه GP و ANFIS در شبیه‌سازی خشکسالی‌ها می‌باشد

## مواد و روشها

### محدوده‌ی مورد مطالعه و ایستگاههای باران‌سنجی

#### و آبسنجی موجود

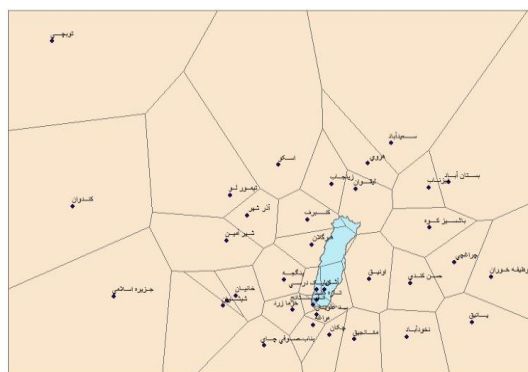
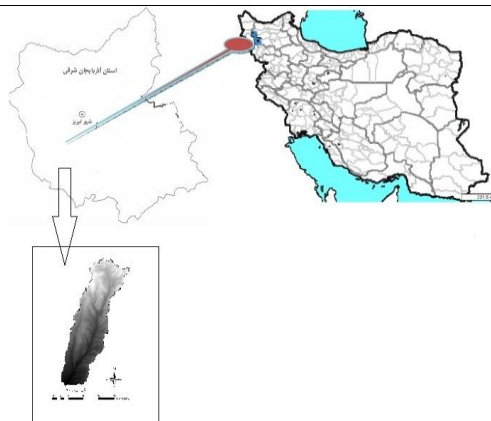
منطقه‌ی مورد مطالعه حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای با مساحت ۲۶۵ کیلومتر مربع واقع در جنوب استان آذربایجان شرقی و شمال شهر مراغه می‌باشد. از شمال به حوضه‌ی آبخیز لیقوان چای و کند چای، از شرق به حوضه‌ی آبخیز مرده‌ای، از غرب به حوضه‌ی آبخیز قلعه عجب‌شیر و دریاچه‌ی ارومیه و از جنوب به محدوده سد علویان و دشت ملک کندی منتهی گردیده، و در محدوده‌ی مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه و ۴۲ ثانیه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۲۶ دقیقه و ۴۲ ثانیه طول شرقی قرار گرفته است. شکل هندسی این حوضه در شکل (۱) نشان داده شده است که بیشترین و کمترین ارتفاع آن به ترتیب ۳۴۶۰ و ۱۵۵۰ متر از سطح دریا می‌باشند. کاربری پوشش گیاهی منطقه در پنج گروه شامل: منطقه‌ی مسکونی، منطقه با پوشش انبوه، منطقه با پوشش متوسط، منطقه با پوشش پراکنده و زمین لم یزرع طبقه‌بندی شده است. سفره‌ی آبهای زیرزمینی منطقه معمولاً نزدیک سطح زمین است و از آبهای سطحی تغذیه می‌شوند؛ بنابراین، در طول سال این سطح در نوسان بوده و هر چه به دریاچه‌ی ارومیه نزدیکتر می‌شویم سطح آبهای زیرزمینی بالا می‌آید. رود صوفی‌چای با طول ۲۰ کیلومتر در داخل حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای قرار داشته که در این محدوده ۳ زیر حوضه‌ی ترفایی، صوفی‌چای بالایی و صوفی‌چای پایینی وجود داشته و از زیر حوضه‌های دریاچه‌ی ارومیه بشمار می‌روند. نظر به متصل بودن حوضه‌ی صوفی‌چای به قله‌ی سهند، و وجود چشمه‌های دائمی در ارتفاعات، آبراهه‌ها از بده‌ی نسبتاً زیاد برخوردار می‌باشند، بطوری‌که بده‌ی اوج حوضه ۱۰۴ متر مکعب بر ثانیه بوده، و وجود سد علویان در پایین دست

آن با مدیریت صحیح و حفاظت مناسب می‌تواند پوشش گیاهی منطقه را حفظ کرده، و به تبع آن در تعدیل دمای منطقه، و همچنین در ممانعت از خشکی دریاچه ارومیه، نقش داشته باشد.

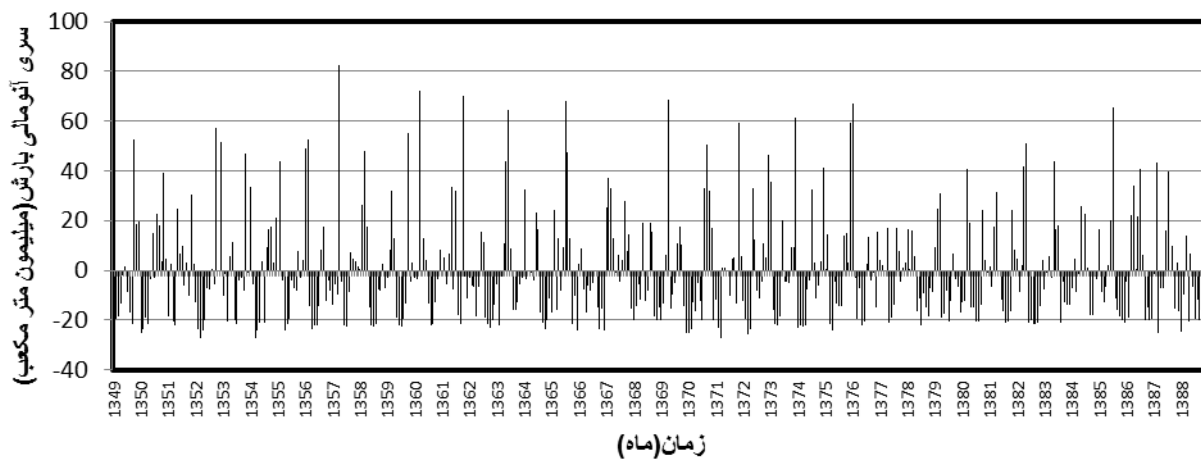
اولین گام جهت بررسی خشکسالی منطقه، جمع‌آوری اطلاعات مربوط به آمار بارش ماهانه و جریانهای ماهانه‌ی ایستگاه‌های هواشناسی و آبسنجی حوضه‌ی صوفی‌چای و اطراف می‌باشد. در حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای ۱۷ ایستگاه بارانسنجی و ۵ ایستگاه آبسنجی واقع شده‌اند که از داده‌های ایستگاههای باران‌سنجی و داده‌های جریان مربوط به ایستگاههای آبسنجی، جهت تحلیل هواشناسی و آبسنجی حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای استفاده گردیده است. به منظور تحلیل خشکسالی، ابتدا لازم است تفاوت بین خشکسالی نقطه‌ای<sup>۱</sup> و منطقه‌ای<sup>۲</sup> روشن شود. خشکسالی نقطه‌ای در واقع به بررسی خشکسالی در ایستگاه معین یا یک ناحیه‌ی کوچک می‌پردازد (یوجوویچ، ۱۹۸۳)، اما در خشکسالی ناحیه‌ای بیش از یک ایستگاه بررسی گردیده و گسترش پدیده در یک سطح مدنظر می‌باشد. در این پژوهش، خشکسالی به صورت ناحیه‌ای بررسی شده است. برای ناحیه‌ای نمودن خشکسالی هواشناسی حوضه لازم بود که داده‌های ماهانه بارش ایستگاه‌های موجود در حوضه و اطراف آن، که به صورت نقطه‌ای (ایستگاهی) می‌باشند، به بارش در سطح یک منطقه تبدیل گردند که به این منظور از روش چند ضلعی تیسن، که به هر ایستگاه وزنی معادل سطح چند ضلعی تحت پوشش آن ایستگاه را اختصاص می‌دهد، استفاده گردید، به این ترتیب که ابتدا حوضه‌ی آبخیز با استفاده از نرم افزار GIS چندضلعی‌بندی و مساحت مربوط به هر چندضلعی استخراج شد. سپس برای هر ماه، مجموع حاصلضرب مقادیر بارش نقطه‌ای هر ایستگاه در مساحت چند ضلعی همان ایستگاه، مقدار بارش در سطح منطقه مطالعاتی را به دست می‌آورد. در داده‌های بده نیز از بده‌های خروجی آخرین ایستگاه حوضه، یعنی داده‌های ایستگاه تازه‌کند استفاده شد. دوره‌ی آماری از سال ۱۳۴۹ تا سال ۱۳۸۸ می‌باشد که موقعیت و طول دوره‌ی آماری ایستگاه‌های هواشناسی داخل حوضه در جدول (۱) ارائه شده است.

<sup>۱</sup>- point drought

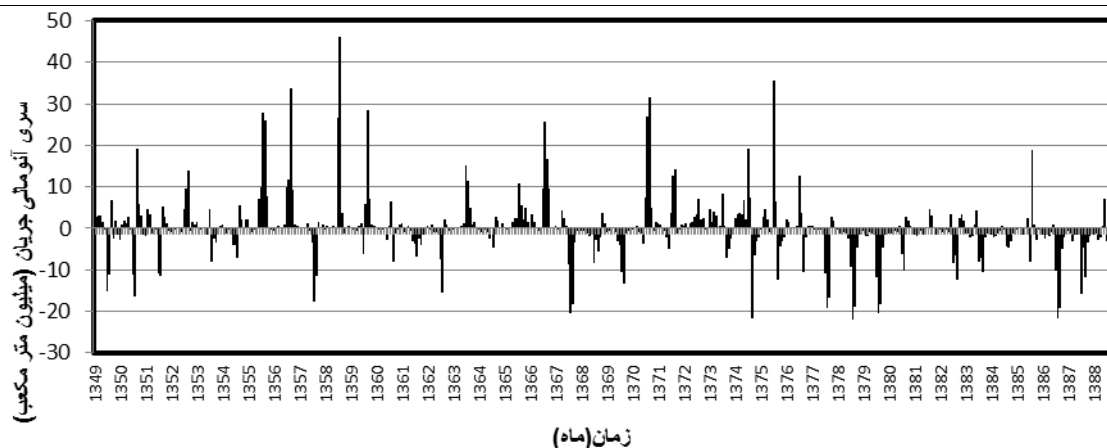
<sup>۲</sup>- regional drought



شکل ۱- شکل حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای.



شکل ۲- دوره‌های خشکسالی و ترسالی هواشناسی حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای در طول دوره‌ی آماری (۱۳۴۹-۱۳۸۸) با کاربرد روش رژیم بهنجار ماهانه.



شکل ۳- دوره‌های خشکسالی و ترسالی آبشناسی حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای در طول دوره‌ی آماری (۱۳۸۸-۱۳۴۹) با کاربرد روش رژیم بهنجار ماهانه.

جدول ۱- ایستگاه‌های هواشناسی حوضه‌ی آبخیز صوفی‌چای.

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول دوره آماری
		درجه	دقیقه	درجه	دقیقه		
۱	آشان	۴۶	۱۸	۳۷	۳۰	۱۸۵۳	۱۳۷۸-۱۳۸۷
۲	اسفستانج	۴۶	۱۵	۳۷	۲۷	۱۵۶۰	۱۳۴۶-۱۳۷۶
۳	تازه کند	۴۶	۱۶	۳۷	۲۸	۱۶۰۰	۱۳۵۳-۱۳۸۷
۴	خرمازرد	۴۶	۱۰	۳۷	۲۶	۱۵۵۰	۱۳۵۷-۱۳۸۷
۵	مراغه	۴۶	۱۵	۳۷	۲۳	۱۴۴۰	۱۳۴۵-۱۳۸۷
۶	چکان	۴۶	۱۹	۳۷	۲۱	۱۵۵۰	۱۳۵۱-۱۳۷۶
۷	بناب	۴۶	۰۳	۳۷	۱۹	۱۲۶۰	۱۳۴۷-۱۳۸۷

## بازسازی آمار

در دوره‌های آماری مزبور، در سال‌هایی که به هر دلیلی آماری ثبت نگردیده بود، با استفاده از روش منحنی جرم مضاعف داده‌ها بازسازی شدند. روش جرم مضاعف برای بررسی آمار یک ایستگاه معین در مقایسه با دیگر ایستگاه‌های باران‌سنجی (یا آب‌سنجی) به کار می‌رود. به این صورت که مقادیر تجمعی بارش (یا جریان) ثبت شده به وسیله‌ی آن ایستگاه را با میانگین مقادیر تجمعی بارندگی (یا جریان) ثبت شده ایستگاه‌های مجاور آن بررسی کنند.

## استخراج دوره‌های خشکسالی<sup>۱</sup> با روش رژیم بهنجار ماهانه (انگاره‌ی ران<sup>۲</sup>)

بنابر انگاره‌ی ران، اگر گروه زمانی به صورت  $x_1, x_2, \dots, x_n$  بوده، و تراز بحرانی ثابت و مقدار آن معادل  $Y$  فرض شود یک ران منفی زمانی اتفاق می‌افتد که  $X$  در

یک یا چند واحد زمانی متوالی کوچکتر از  $Y$  باشد. بنا به عقیده سانتوز (۱۹۸۳) تراز بحرانی می‌تواند یکی از سه گزینه زیر باشد:

- ۱- مقدار تقاضا برای آب در یک ناحیه‌ی معین؛
- ۲- میانگین درازمدت مقادیر "عامل تعیین کننده خشکسالی"؛
- ۳- مقدار عامل تعیین به ازای احتمال معین دوره‌ی خشکسالی در مقیاس حوضه‌ی یک رود بررسی و تعریف می‌شود و نمی‌توان به حوضه‌های دیگر تعمیم داد. دوره‌ی خشکسالی هواشناسی یک فاصله‌ی مشخص زمانی است که در آن مقدار بارش از یک میانگین دراز مدت کمتر باشد و دوره‌ی خشکسالی آبشناسی یک مقدار جریان رود از یک میانگین دراز مدت کمتر باشد. به کمک این تعریف و انگاره‌ی ران، می‌توان دوره‌های کوتاه خشکی<sup>۳</sup> را از روی آمار دراز مدت گروه‌های بارش و جریان استخراج کرد. دوره‌های خشکی در گروه‌های غیرعادی با استفاده از روش رژیم بهنجار ماهانه استخراج می‌گردد.

<sup>۱</sup>- drought spells

<sup>۲</sup>- Run theory

<sup>۳</sup>- spell

### محاسبه‌ی مرکز جرم دوره‌های خشکی

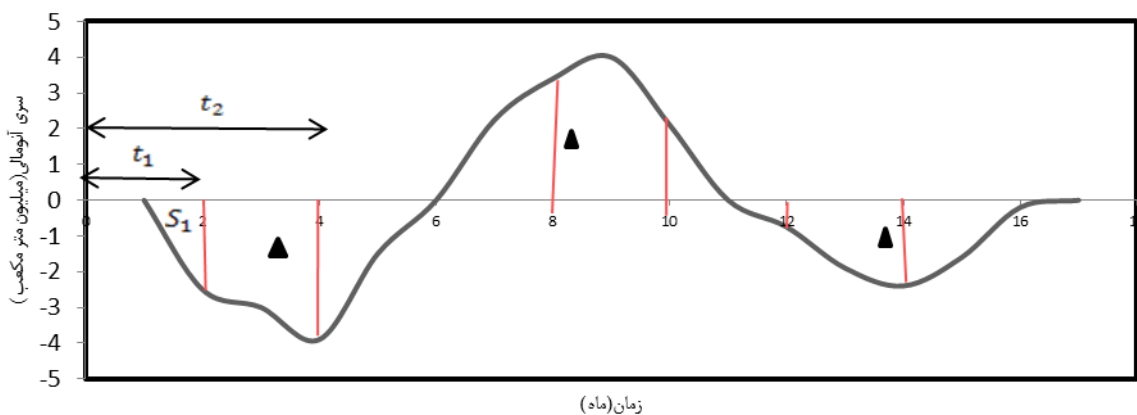
برای ارزیابی رابطه‌ی زمانی بین خشکسالی‌های هواشناسی و آبشناسی، بایستی مقادیر زمان در مرکز جرم هر کدام از این دوره‌های خشکی را به دست آورد. علت به کار بردن این روش ساده‌سازی بررسی، و تحلیل خشکسالی‌ها از نظر تبدیل محدوده‌های زمان (زمان‌های مداوم خشکسالی‌ها) به مقادیر نقطه‌ای متمرکز در مرکز جرم می‌باشد.

برای به دست آوردن مرکز جرم هر کدام از دوره‌های خشکی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Fortran، ابتدا هر یک از دوره‌های خشکی و تر به گام‌های زمانی یک ماهه تقسیم شده و زمان در مرکز جرم هر کدام از این دوره‌های خشکی با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

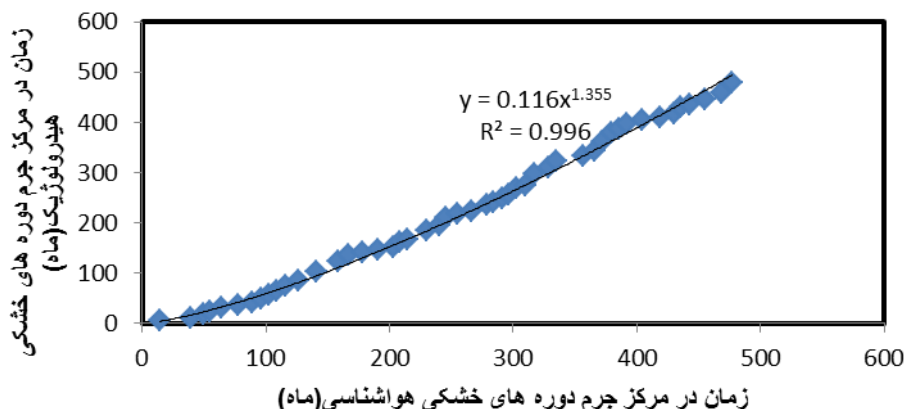
$$(1) \quad t_G = \frac{S_1 t_1 + S_2 t_2 + \dots + S_n t_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

در این رابطه‌ی  $S$  مساحت هر کدام از گام‌های زمانی یک ماهه، و  $t$  زمان از مبدا محور مختصات زمان می‌باشد که این فراسنج‌ها در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل، علامت  $\blacktriangle$ ، نشان‌دهنده‌ی مرکز جرم هر دوره می‌باشد.

گروه بهنجار ماهانه نشان‌دهنده‌ی میانگین دراز مدت هر ماه از سال می‌باشد که رژیم بهنجار ماهانه را برای یک سال بهنجار ارائه می‌دهد. گروه غیرعادی بارش‌های ماهانه و گروه غیرعادی جریان‌های ماهانه از طریق تفاضل مقادیر داده‌های بارش و جریان از گروه بهنجار ماهانه مربوطه ایجاد شد. در واقع گروه بهنجار ماهانه به عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده و هر یک از مقادیر بارش و جریان با این مقدار مبنا مقایسه می‌گردد. مقادیری که بالاتر از خط مبنا قرار گیرند نشان‌دهنده‌ی دوره‌های تر، و مقادیر زیر خط مبنا، نشان‌دهنده‌ی دوره‌های خشکی می‌باشند، که به صورت ارقام منفی ظاهر می‌گردند. به این ترتیب، مقادیر کمی خشکی در هر دو خشکسالی هواشناسی و آبشناسی به همراه زمان رخدادن آنها استخراج می‌گردد. مزیت روش رژیم بهنجار ماهانه این است که تداخل دوره‌های خشکی ذاتی فصول خشک، و همین‌طور دوره‌های تر فصول تر، در هم صورت نمی‌گیرد تا خط مبنای غیر واقعی ترسیم گردیده گروه غیرعادی ایجاد شده دقت زیادی داشته، و اضافه بارش یا کمبود را واقعیت‌تر نشان می‌دهد. از آنجا که در مدیریت منابع آب مقادیر کمبود حجم مدنظر قرار می‌گیرند، تمامی مقادیر کمبود بارش و جریان، که به صورت ماهانه می‌باشند، به مقادیر کمبود حجم بر حسب میلیون متر مکعب تبدیل گشته‌اند.



شکل ۴- تقسیم دوره‌های (دوره‌ی کوتاه) خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به گام‌های زمانی یک ماهه جهت محاسبه‌ی مرکز جرم هر دوره‌ی کوتاه.



شکل ۵- ضریب همبستگی بین داده‌های مربوط به زمان در مرکز جرم دوره‌های خشکی هواشناسی و آبشناسی.

### شبیه برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۱</sup> (GP)

برنامه‌ریزی ژنتیک در سال ۱۹۸۵ به وسیله‌ی کرامر ابداع شد، سپس به همت کوزا (۱۹۹۲) گسترش بیشتری یافت. برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد که بر انگاره‌ی داروین استوار است، به این ترتیب که جمعیتی در جهت تکامل به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها کرده و فرزندان اصلاح شده را ایجاد می‌کنند. برنامه‌ریزی ژنتیک، برخلاف الگوریتم ژنتیک، بر ساختار درختی روابط به جای سلسله ارقام دودویی عمل کرده (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹) و تناوبی از راه حل‌های با طول ثابت را از طریق ابداع ساختارهای غیرخطی (درختی) با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، کشف می‌کند. الفبای مورد استفاده در ایجاد چنین ساختارهایی متنوع تر از ۰ و ۱ افراد الگوریتم ژنتیک است و سامانه‌ی نمایش تطبیق پذیرتر و غنی‌تری را ایجاد می‌کند. این ساختارهای درختی از مجموعه‌ی توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در روابط) و پایانه‌ها (متغیرهای مسأله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند (کوزا، ۱۹۹۲). در شکل (۶) یک نمونه از این ساختار درختی نشان داده شده است. مسائل وایزای نمادین، با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و مجموعه‌ای از پایانه‌ها، شبیه‌سازی می‌شوند. مجموعه‌ی توابع معمولاً شامل توابع اصلی حسابی {+, -, ×, /}, توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر {√, x<sup>2</sup>, exp, log, sin, cos, ...} و یا توابع تعریف شده به وسیله‌ی کاربر است که می‌توانند برای تفسیر شبیه مناسب باشند. مجموعه پایانه‌ها، از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل

مسأله تشکیل شده‌اند. توابع و پایانه‌ها در بخش سرزن وجود دارند، اما در قسمت دنباله، فقط پایانه‌ها موجودند (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴). فرایند گام به گام حل یک مسأله با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک متشکل از ۵ مرحله به شرح زیر می‌باشد:

- ۱) انتخاب مجموعه‌ی پایانه، که همان متغیرهای مستقل مسأله و متغیرهای حالت سامانه می‌باشد،
- ۲) انتخاب مجموعه‌ی توابع، شامل عملگرهای حسابی، توابع آزمون و توابع بولی می‌باشد،
- ۳) شاخص اندازه‌گیری دقت شبیه که بر مبنای آن می‌توان مشخص نمود که توانایی یک شبیه در حل یک مسأله خاصاً چه اندازه می‌باشد،
- ۴) مؤلفه‌های مهار کردن؛ مقادیر مؤلفه‌های عددی و متغیرهای کیفی که برای مهار کردن اجرای برنامه‌ها به کار بسته می‌شوند.
- ۵) شروط توقف اجرای برنامه، که معیاری برای حصول به نتایج و توقف اجرای برنامه می‌باشد (قربانی و همکاران، ۱۳۸۹).

برنامه‌ریزی ژنتیک یک روش برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسأله را با استفاده از برنامه‌نویسی رایانه‌ای ارائه می‌کند. در این پژوهش، برای به دست آوردن شبیه مناسب از نرم افزار GeneXProTools4 بهره‌وری گردیده، که بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک نوشته شده است. فراسنج‌های لازم برای اجرای شبیه GP، که جزء گام‌های اولیه در این شبیه می‌باشند در جدول (۲) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>-genetic programming



(۱۹۹۸). تمام اطلاعات مربوط به یک مجموعه‌ی فازی به‌وسیله‌ی تابع عضویت بیان می‌شود. تابع عضویت به تابعی گفته می‌شود که میزان درجه‌ی عضویت بن‌پاره‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد.

در این پژوهش برای به دست آوردن بهترین شبیه ANFIS، که کمترین خطا را دارا باشد، پس از بررسی شبیه‌های گوناگون با توابع عضویت مختلف و طی مراحل گوناگون شبیه‌سازی با سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، شبیه‌هایی شامل سامانه‌ی سوگنو با تابع عضویت<sup>۳</sup> شبیه gauss با نرخ آموزش ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شد، و با سعی و خطا، تعداد توابع عضویت را برابر با ۴ کمترین خطا برای شبیه نتیجه داد. الگوریتم آموزشی دو‌رگه‌ای برای تعیین فراسنج‌های تابع عضویت انتخاب گردید.

### آماره‌های ارزیابی کارایی شبیه‌ها

هر شبیه‌ی مقداری خطا را دارا می‌باشد؛ در واقع، هر اندازه مقدار واقعی ( $x_{o,i}$ ) به مقدار پیش‌بینی شده به وسیله‌ی شبیه ( $x_{e,i}$ ) نزدیکتر باشد، شبیه دقیقتر بوده و خطای کمتری را دارد. معیارهای گوناگونی برای برآورد خطا و بررسی صحت شبیه وجود دارد که می‌توان به آماره‌های ضریب همبستگی ( $r$ )، MAD و RMSE اشاره کرد (شعبانی و همکاران، ۱۳۸۸)؛ (کماسی و همکاران، ۱۳۹۱). روابط آنها در زیر ارائه شده اند.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{io} - \bar{x}_o)(x_{ie} - \bar{x}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{io} - \bar{x}_o)^2 \sum_{i=1}^N (x_{ie} - \bar{x}_e)^2}} \quad (۴)$$

$$MAD = \frac{\sum_{j=1}^n |x_{o,j} - x_{e,j}|}{n} \quad (۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - x_{e,i})^2}{n}} \quad (۶)$$

در این روابط داریم:

### سامانه‌ی استنتاج فازی-عصبی تطبیقی<sup>۱</sup> (ANFIS)

ترکیب سامانه‌های فازی، که مبتنی بر قواعد منطقی بوده، و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی چند لایه که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، منجر به ارائه‌ی سامانه‌ی استنتاج تطبیقی فازی-عصبی شده است. این شبیه که به‌وسیله‌ی جانگ در سال ۱۹۹۳ بسط یافت، اجازه می‌دهد که سامانه‌های فازی در مباحث آموزش فراسنجه‌ها، از الگوریتم آموزش انتشار خطا به عقب تطبیقی استفاده نمایند (مورگان، ۱۹۹۸). در این روش ترکیبی، بخش فازی، رابطه‌ی بین متغیرهای ورودی و خروجی را ایجاد کرده، و فراسنجه‌های مربوط به توابع عضویت بخش فازی به‌وسیله‌ی شبکه عصبی بهینه می‌شود (کماسی و همکاران، ۱۳۹۱). از یک ساختار ANFIS که از مجموعه‌ای از قواعد IF-THEN فازی نوع تاکاگی-سوگنو<sup>۲</sup> (TSK) (فقط برای یک قانون) تشکیل گردیده است، می‌توان جهت شبیه‌سازی و نگاشت داده‌های ورودی-خروجی استفاده کرد. اگر یک سامانه‌ی استنتاج فازی با دو متغیر ورودی X و Y و یک متغیر خروجی F در نظر گرفته شود، شبیه فازی مرتبه‌ی اول سوگنو، که شامل دو قانون فازی IF-THEN (اگر-آن‌گاه) می‌باشد، که به صورت زیر است:

قانون اول: اگر X برابر  $A_1$  و Y برابر  $B_1$  باشد آنگاه

$$f_1 = p_1 A_1 + q_1 B_1 + r_1 \quad (۲)$$

قانون دوم: اگر X برابر  $A_2$  و Y برابر  $B_2$  باشد آنگاه

$$f_2 = p_2 A_2 + q_2 B_2 + r_2 \quad (۳)$$

در این جا  $f$  متغیر خروجی می‌باشد که از طریق متوسط وزن دار به دست می‌آید. تعریف معمولی از این شبیه شناسایی یک تابع  $\hat{f}$  (بطوری که تقریباً بتواند به جای تابع اصلی  $f$  مورد استفاده قرار گیرد) می‌باشد. شکل سامانه فازی حاصل در شکل (۷) نشان داده شده است. سامانه فازی با مجموعه‌ای شامل N قاعده‌ی فازی، برای پیش‌بینی زمان رخدادن خشکسالی آشناسی با استفاده از خشکی‌های هواشناسی استفاده می‌گردد (مورگان، ۱۹۹۸). شکل (۸) ساختار شبیه ANFIS را نشان می‌دهد (تاناکا،

<sup>۱</sup> -adaptive neuro-fuzzy inference system

<sup>۲</sup> -Takagi-Sugeno fuzzy model

<sup>۳</sup> - membership function

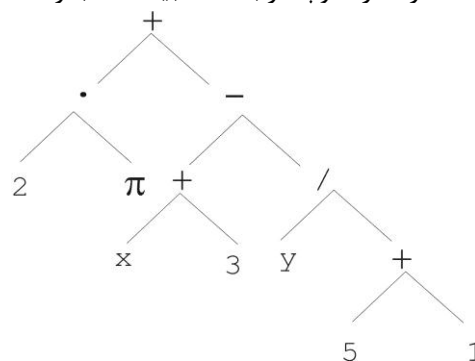
**نتایج و بحث**

نمودار مربوط به دوره‌های خشک و تر استخراج شده به کاربرد روش رژیم بهنجار ماهانه در شکل‌های (۲) و (۳) برای داده‌های بارش و جریان ارائه شده است. داده‌های مربوط به زمان رخدادن مقادیر کمبود بارش و کمبود جریان (خشکی‌ها) واقع در مرکز جرم هر دوره ی خشکی، برای ارزیابی دقت و توانایی شبیه‌های GP و ANFIS در پیش‌بینی زمان رخدادن خشکسالی آبشناسی با استفاده از داده‌های بارش و خشکسالی هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت. همبستگی بین مقادیر زمان‌های رخدادن کمبودهای بارش و جریان در مرکز جرم دوره‌های خشکی بارش و جریان بررسی، و مقدار ضریب همبستگی  $r=0.996$  حاصل گردید که در شکل (۵) نشان داده شده است. این مقدار ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خشکسالی هواشناسی دقیقاً به خشکسالی آبشناسی منتقل می‌شود؛ بنابراین، می‌توان بین زمان در مرکز جرم دوره‌های خشکی هواشناسی و آبشناسی ارتباطی را به دست آورد. مفیدی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) نیز در بررسی ارتباط بین دو خشکسالی هواشناسی و آبشناسی، به این نتیجه رسیدند که بین این دو خشکسالی، رابطه‌ی زمانی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. بابایی و همکاران (۱۳۹۰) نیز در بررسی خود به این نتیجه رسیدند که خشکسالی آبشناسی که در پایین دست منطقه‌ی مطالعاتی حوضه ی آبخیز سد زاینده‌رود رخ می‌دهد، همان خشکسالی هواشناسی است که در بالا دست اتفاق افتاده است و با فاصله زمانی ۳ تا ۱۱ ماه، تأثیر خشکسالی هواشناسی در پایین دست پدیدار شده است.

پس از اطمینان از این‌که بین هر دو خشکسالی، در حوضه ی آبخیز صوفی‌چای از نظر زمان رخداد نشان ارتباطی وجود دارد، میزان توانایی پیش‌بینی در شبیه‌های هوش مصنوعی GP و ANFIS مطالعه گردید. طول داده‌های ورودی و خروجی، ۴۸ داده می‌باشد که ۷۵ درصد از ابتدای داده‌ها، یعنی ۳۶ داده، برای دوره‌ی آموزش شبیه و ۲۵ درصد باقیمانده، که شامل ۱۲ داده می‌شود، برای دوره‌ی آزمون شبیه به کار برده شد.

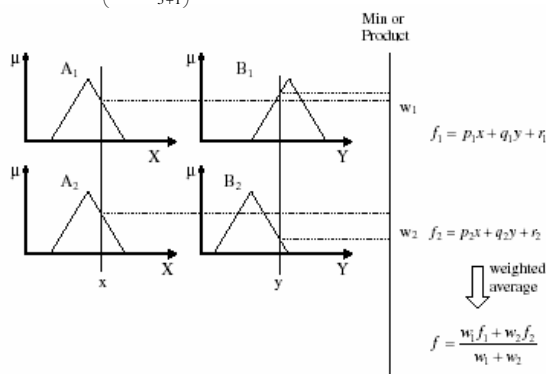
برای شبیه‌سازی زمان رخدادن خشکسالی‌ها با کاربرد روش GP، در ابتدا مجموعه‌ی پایانه (متغیرهای ورودی) به صورت زمان در مرکز جرم دوره‌های خشکی هواشناسی در نظر گرفته شد. مجموعه‌ی توابع نیز به

داده‌های مشاهداتی،  $x_{o,i}$  داده‌های برآورد شده با شبیه و  $\pi$  تعداد داده‌ها، ضریب همبستگی میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد که مقداری بین ۱- تا ۱ را شامل گردد و هر اندازه این ضریب به یک نزدیکتر باشد همبستگی بیشتر را نشان داده و شبیه مناسب‌تر است. آماره ی RMSE و MAD بزرگی خطا، یعنی میزان اختلاف داده‌های واقعی و داده‌های برآورد شده را نشان می‌دهند، ولی جهت خطا را روشن نمی‌کند، هر اندازه کوچکتر باشند شبیه مناسب‌تر است.



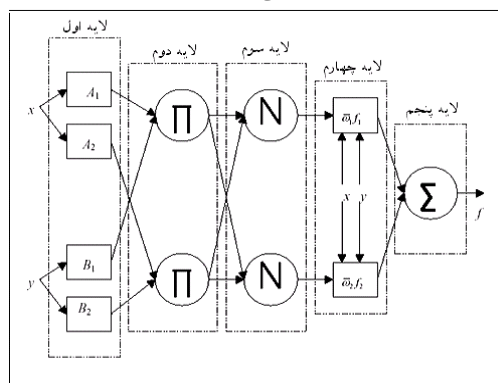
شکل ۶- مثالی از ساختار درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک

برای رابطه‌ی ریاضی  $2 \cdot \pi + \left( (x+3) - \frac{y}{5+1} \right)$



شکل ۷: شبیه فازی مرتبه اول سوگنو با دو متغیر

ورودی (x,y).



شکل ۸- ساختار شبیه ANFIS با دو ورودی

(منبع: Tanaka,1998).

$t_{Ru}$  زمان در مرکز جرم دوره‌های خشکی جریان و  $t_{Ra}$  زمان در مرکز جرم دوره‌های خشکی بارش.

شکل (۹) مقادیر شبیه‌سازی شده را در شبیه‌سازی GP به وسیله‌ی رابطه‌ی (۷) و شکل (۱۰) نیز مقادیر شبیه‌سازی شده در شبیه‌انتخابی ANFIS را برای گروه داده‌های زمان رخدادن خشکی آبشناسی نشان داده‌اند. مقایسه‌ی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هر دو شبیه‌سازی شبیه‌سازی خشکسالی دقت بالایی را دارند. علاوه بر این که ANFIS نمی‌تواند یک شبیه‌سازی صریح را مانند GP ارائه دهد، از نظر خروجی تابع عضویت محدودیت می‌باشد، که تنها دو انتخاب ثابت و خطی دارد و این محدودیت به خاطر این است که ANFIS فقط در مورد سامانه‌های نوع سوگنو عمل می‌کند.

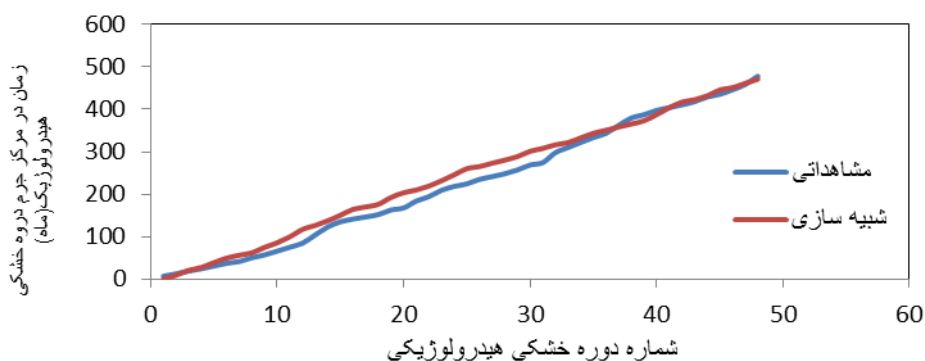
در شبیه‌سازی GP نقصی وجود دارد که آن شرط زمان است، یعنی اگر زمان از مقداری مشخصی کمتر باشد، نمی‌توان رابطه‌ی به دست آمده را برای آن به کار برد، و یا این که رابطه‌ی را به دست آوریم که این شرط را نداشته باشد؛ در این صورت، باید رابطه‌ی با مجموعه‌ای از عملگرهای جدید انتخاب شود که دقت کمتری را نسبت به این شبیه‌انتخاب شده در این پژوهش خواهد داشت.

می‌توان با تغییر ورودی‌ها عملکرد شبیه‌ها را بهبود بخشید. گرچه الزاماً افزایش تعداد مشخصه‌های ورودی موجب افزایش دقت شبیه‌سازی نمی‌شود، اما می‌توان با تغییر و تحلیل ورودی‌های شبیه‌سازی آنها را افزایش داد. سلاجقه و همکاران (۱۳۸۸) نشان دادند که افزایش شمار ورودی‌ها، عملکرد شبیه‌سازی را بدتر کرده و بهترین نتایج مربوط به شبیه‌سازی بوده است که ورودی آن مقادیر بده تا دو تأخیر قبل می‌باشد، در حالی که قربانی و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند که افزایش فراسنج‌های ورودی، مربوط به شبیه‌های مختلف دمای هوا موجب تغییر و بهبود نسبی شبیه‌سازی می‌شود.

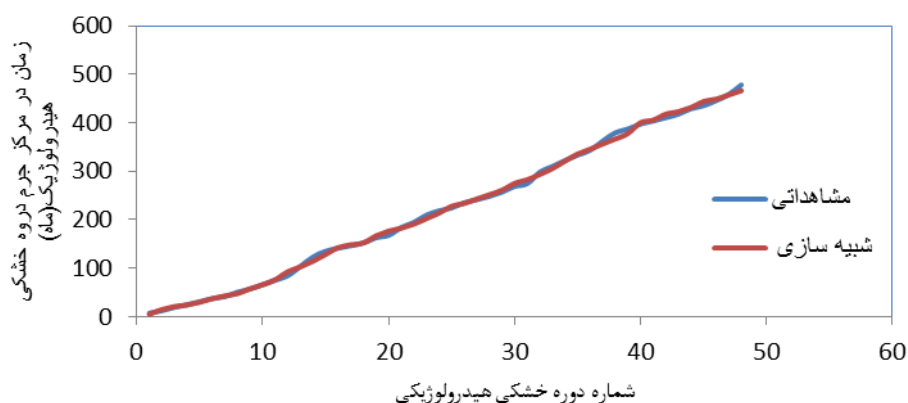
منظور تولید کروموزوم‌ها، به صورت یک حدس اولیه انتخاب می‌شود. در این مطالعه از چهار مجموعه  $\{+, *, -, \div, \sqrt{\quad}\}$  و  $\{x^2, x^3, \text{Ln}, \text{Exp}, \text{Cos}, \text{Sin}, \text{Atan}\}$  استفاده شد. نتیجه با توجه به نتایج جدول (۳)، با مقایسه RMSE و MAD در هر چهار حالت، بهترین شبیه‌سازی، یعنی شبیه‌سازی F4، که کمترین RMSE و MAD را دارد انتخاب شد و این شبیه‌سازی با شبیه‌انتخابی ANFIS مقایسه گردید.

شبیه‌سازی نهایی ANFIS شبیه‌سازی است که پس از بررسی شبیه‌های مختلف با توابع عضویت مختلف و طی مراحل مختلف شبیه‌سازی، شامل یک ورودی و یک خروجی با ۴ تابع عضویت و جداسازی شبکه‌ای است. مقادیر مربوط به آماره‌های  $t_{Ru}$  و MAD در جدول (۴) برای هر دو شبیه‌سازی نشان داده شده‌اند. با مقایسه آماره‌های مذکور ملاحظه می‌گردد که با توجه به مقدار  $t_{Ru}$  هر دو شبیه‌سازی پیش‌بینی عملکرد خوبی دارند، ولی خطای به دست آمده برای شبیه‌سازی ANFIS کمتر است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۸۹) نیز نشان دادند که در بررسی خشکسالی با سامانه استنتاج فازی، و با توجه به عدم قطعیت موجود، دارای توجیه فنی و این روش قادر به تخمین وضعیت خشکسالی منطقه مطالعاتی می‌باشد. اما شبیه‌سازی GP یک مزیت نسبت به شبیه‌سازی دیگر دارد و آن این است که می‌تواند یک رابطه‌ی تقریبی را بین مؤلفه‌های ورودی و خروجی ارائه دهد؛ بنابراین، اگر علاوه بر دقت، وجود یک رابطه بین ورودی‌ها و خروجی مدنظر باشد شبیه‌سازی GP مناسب است و این خاصیت آن را نسبت به شبیه‌سازی ANFIS، که این ویژگی را دارا نمی‌باشد، برتر می‌سازد. شبیه‌سازی ساخته شده با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و با عملگرهای ریاضی  $\{+, *, -, \div, \sqrt{\quad}\}$ ، پس از ساده‌سازی به صورت زیر به دست آمد:

$$t_{Ru} = 1.3367 * t_{Ra} - 7.71 * \sqrt{t_{Ra} - 6.61} + 0.6633 \quad t_{Ra} \geq 6.61 \quad (7)$$



شکل ۹- زمان رخدادن خشکسالی آبشناسی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با کاربرد شبیه‌سازی GP انتخاب شده.



شکل ۱۰- زمان رخدادن خشکسالی آبشناسی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با کاربرد شبیه‌سازی ANFIS انتخاب شده.

جدول ۲ - مقادیر فرانسج‌های به کار گرفته شده در شبیه‌سازی GP.

تعداد کروموزومها	۳۰	نرخ برگشت	۰/۱	نرخ ترکیب یک نقطه‌ای	۰/۳
تعداد ژن‌ها	۳	نرخ تراکنش ژنی	۰/۱	نرخ ترکیب دو نقطه‌ای	۰/۳
طول هر رأس	۷	نرخ ترکیب ژنی	۰/۱	نرخ جهش	۰/۰۴۴

جدول ۳- مقایسه‌ی دقت شبیه‌های مختلف GP.

تابع	F1	F2	F3	F4
مجموعه عملگرهای ریاضی	+, -, *, /	+, -, *, /, Exp, Ln, $x^2$ , $x^3$	+, -, *, /, Exp, Ln, Sin, $x^2$ , $x^3$ , Cos, Atan	+, -, *, /, $\sqrt{\quad}$
RMSE	۷/۰۰۹	۸/۲۳۱	۷/۹۱۹	۶/۴۳۷
MAD	۵/۵۰۹	۶/۹۳۵	۶/۶۴۶	۵/۲۰۱

جدول ۴- مقایسه‌ی شبیه‌ها با آماره‌های ارزیابی.

	R	MAD	RMSE
ANFIS	۰/۹۹۹	۳/۸۳	۴/۹۸
GP	۰/۹۹۸	۵/۲۰۱	۶/۴۳۷

### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بررسی خشکسالی‌ها، و نقش بسزایی که شبیه‌ها در پیش‌بینی مسائل آبشناسی و منابع

آب دارند، باعث گردید که پس از استخراج خشکسالی‌ها، شبیه‌های مناسب برای پیش‌بینی این خشکسالی‌ها بررسی گردند. همچنین، با توجه به تأخیر زمانی در رخدادن خشکسالی‌ها، مطالعه‌ی توأم خشکسالی‌ها می‌تواند کمک

- در حوزه آبخیز زاینده رود. فصلنامه علمی-پژوهشی خشک بوم، جلد ۱، شماره ۳، بهار.
۴. دریاباری ج، ۱۳۸۵. پیش‌بینی خشکسالی بر اساس مدل‌های ماتریس احتمال انتقال تجربی در مناطق مختلف ایران. نشریه علوم جغرافیایی، ج ۵، ش ۶ و ۷.
  ۵. دستورانی م.ت، شریفی دارانی ح، طالبی ع، مقدم نیا ع.ر، ۱۳۹۰. کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در مدل‌سازی بارش-رواناب در حوزه آبخیز سد زاینده رود. مجله آب و فاضلاب. شماره ۴، ص: ۱۱۴-۱۲۵.
  ۶. سلاجقه ع، فتح آبادی، ا، مهدوی م، ۱۳۸۸. بررسی کارایی روش‌های عصبی-فازی و مدل‌های آماری در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب. نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۲، شماره ۱، ص ۶۵-۷۹.
  ۷. سلطانی ع، قربانی م.ع، فاخری فرد ا، دربندی ص، فرسادی زاده د، ۱۳۸۹. برنامه ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل سازی فرآیند بارش-رواناب. مجله دانش آب و خاک، جلد ۱، شماره ۴.
  ۸. شاهرخ وندی م، لشنی زند م، خاکپور م، بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و ارتباط آن با بارش در حوزه رودخانه خرم آباد. فصلنامه جغرافیایی آمایش، شماره ۶.
  ۹. شعبانی م، ۱۳۸۸. ارزیابی کاربرد روش‌های زمین آمار در پهنه‌بندی شدت‌های خشکسالی استان فارس. مجله مهندسی آب، سال دوم.
  ۱۰. قربانی م، شیرینی ج، کاظمی ه، ۱۳۸۹. تخمین بیشینه، متوسط و کمینه دمای هوای شهر تبریز با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی. مجله دانش آب و خاک، جلد ۱، شماره ۲۰.
  ۱۱. کماسی م، اعلمی م ت، نورانی و، ۱۳۹۲. پیش‌بینی خشکسالی با نمایه SPI به روش مدل‌سازی ANFIS بر مبنای خوشه‌بندی C-mean فازی. مجله آب و فاضلاب، شماره ۴.
  ۱۲. مفیدی پور ن، بردی شیخ و، اونق م، سعدالدین، ا، ۱۳۹۱. بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز اترک. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال سوم، شماره ۵، بهار و تابستان.
  ۱۳. نبی‌زاده م، مساعدی ا، دهقانی ا، ۱۳۹۱. تخمین هوشمند دبی روزانه با بهره‌گیری از سامانه استنباط فازی-عصبی تطبیقی. مدیریت آب و آبیاری، دوره ۲، شماره ۱، بهار، ص ۶۹-۸۰.
14. Azhdari Moghadam M, Khosravi M, Hosseinpour Niknam H, Jafari Nodooshan E. 2012. Drought Forecasting Using

شایانی را در کاهش خسارات ناشی از این پدیده و مسائل مربوط به منابع آب و سایر بخش‌های مرتبط با آن، نظیر محیط طبیعی و محیط زیستی انسان و جانوران ارایه کند؛ لذا، جهت مقابله با اثرات سوء خشکسالی، باید نگرشی جامع و دوراندیش را به پدیده‌ی خشکسالی داشت. در این مطالعه، پس از جمع‌آوری داده‌های بارش و جریان ماهانه، نواقص آماری با استفاده از روش جرم مضاعف تکمیل شد. سپس با استفاده از روش رژیم بهنجار ماهانه خشکسالی-های هواشناسی و آبشناسی و زمان رخدادن آنها به دست آمدند. برای هر کدام از دوره‌های خشکی، مقادیر کمی خشکسالی و زمان رخدادن هر کمیت وجود دارد. به منظور ساده‌سازی تجزیه و تحلیل‌ها، با محاسبات ریاضی، زمان در مرکز جرم هر دوره خشکی استخراج شده و کلیه-ی تجزیه و تحلیل‌ها در مورد این داده‌ها صورت گرفت. با استفاده از دو روش هوش مصنوعی برنامه‌ریزی ژنتیک و سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، ارتباط زمانی بین این دو خشکسالی بررسی شد.

همان‌گونه که مشاهده گردید، نتایج هر دو شبیه GP و ANFIS به هم نزدیک بود، و شبیه ANFIS با توجه به نتایج مقادیر عددی آماره‌های ارزیابی، با اختلاف کم دارای دقت بیشتری نسبت به GP است؛ بنابراین، هر دو شبیه، برای پیش‌بینی رخدادهای خشکسالی مناسب می‌باشند. شبیه GP نیز قادر به ارائه‌ی یک رابطه‌ی ریاضی برای شبیه‌سازی می‌باشد که بر اساس آن می‌توان ارتباط بین ورودی‌ها را به خروجی نشان داد. در نهایت، پیشنهاد می‌گردد که این شبیه‌ها با سایر شبیه‌های هوشمند، نظیر شبکه عصبی مصنوعی، و با سایر فراسنج‌های مؤثر به عنوان ورودی‌های این شبیه‌ها بررسی گردند.

## منابع

۱. ابراهیمی ر، زهرایی ب، ناصری م، ۱۳۸۹. پیش‌بینی میان-مدت خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش استنتاج فازی. مجله آب و فاضلاب، شماره ۲، سال ۱۳۹۰.
۲. امین س، ۱۳۷۹. بررسی نمایه‌های خشکسالی (مطالعه موردی باجگاه شیراز). مجموعه مقالات اولین کارگاه آموزشی و تخصصی بررسی مسائل خشکسالی استان فارس. ۲۷-۲۸ مهر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز. ۱-۱۳.
۳. بابایی ح، عراقی‌نژاد ش، هورفر ع، ۱۳۹۰. تعیین فاصله زمانی رخداد خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی

21. Morgan G. C, 1998. Fuzzy logic, Routledge Encyclopedia of Philosophy, 3, first edition, Craig, E. Routledge, London.
22. Ozger M, Mishra A, Singh V. 2009. Low frequency drought variability associated with climate indices. *Journal of Hydrology* 364 : 152-162.
23. Sanikhani H, Kisi O. 2012. River flow estimation and forecasting by using two different adaptive Neuro-Fuzzy approaches. *Water Resour Manage* 26:1715-1729.
24. Santos M, A, 1983. Regional Droughts. A stochastic Characterization. *J. Hydrology*, 66, 183-211.
25. Shiri J, Kisi O. 2010. Short-term and long-term streamflow forecasting using a Wavelet and Neuro-Fuzzy conjunction model. *Journal of Hydrology* 394:486-493.
26. Tanaka K, 1998. An Introduction to fuzzy logic for practical applications. Prantice-Hall International Edition.
27. Yevjevich V, 1983a. Methods for determining statistical properties of drought. In: V. Yevjevich, et al. (eds) coping with droughts. *Water res. Rech.* 22-43.
28. Yevjevich V, 1967. An objective approach to definition and investigations of continental droughts. *Hydrology paper*, 23, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Neuro-Fuzzy Model, Climate Indices and Time Series of Precipitation and Drought Case Study: Zahedan-Iran. *Geography and Development*. 10nd year. 26:17-20.
15. Aytek A, Kisi O. 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. *Journal of Hydrology* 351: 288-298.
16. Chen J, Yang Y. 2011. A fuzzy ANP-based approach to evaluate region agricultural drought risk. *Procedica Engineering* 23: 822-827.
17. Dogan E, Gumrukcuoglu M, Sandalci M, Opan M. 2010. Modeling of evaporation from the reservoir of Yuvacik dam using adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Engineering Applications of Artificial intelligence*. 23: 961-967.
18. Jang J-S.R, 1993. ANFIS: adaptive network based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 23 (3), 665-683.
19. K  
eskin M.E, Terzi O, Taylan E.D, Kucukyaman D. 2009. Meteorological drought analysis using data-driven models for the Lakes District, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*. 54:6, 1114-1124.
20. Koza J.R. 1992. *Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection*. Cambridge, MA: MIT Press.