

پایش و تخمین خشکسالی ایستگاه‌های باران‌سنجی شرق دریاچه ارومیه با استفاده از مدل عصبی-فازی تطبیقی

فرخ اسدزاده^{۱*}، مطلب بایزیدی^۲، مهری کاکی^۳

۱. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج

۳. کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۵/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۶/۲۷)

چکیده

خشکسالی به‌عنوان پدیده‌ای اقلیمی تحت تأثیر عوامل گوناگونی است؛ یکی از نمادهای مهم وقوع خشکسالی کاهش میزان بارندگی است. ارزیابی و پایش خشکسالی اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب دارد. با توجه به شرایط اخیر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و روند خشک‌شدن بی‌سابقه آن، ارزیابی خشکسالی در این منطقه در حال حاضر ضرورتی انکارناپذیر به حساب می‌آید. بدین منظور در تحقیق حاضر با جمع‌آوری داده‌های ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی در دشت‌های مراغه و تبریز در شرق حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد بارش SPI در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه اقدام شد. سپس، خشکسالی‌ها با مدل عصبی-فازی تطبیقی تخمین زده شد. نتایج این پژوهش نشان داد شدیدترین خشکسالی با شدت ۴/۰۷- در ایستگاه بناب در مقیاس زمانی ۹ ماهه و در مهرماه ۱۳۶۳ رخ داده است. طولانی‌ترین دوره خشکسالی در ایستگاه‌های هروی، سعیدآباد و مراغه و کوتاه‌ترین دوره خشکسالی در ایستگاه‌های زینجباب، تبریز و ليقوان با کمترین شدت‌ها رخ دادند. نتایج تخمین خشکسالی‌ها با مدل عصبی-فازی تطبیقی نشان داد مدل ANFIS توانایی مطلوبی در برآورد شاخص خشکسالی در منطقه دارد و بیشترین ضریب تبیین در ایستگاه مراغه ($r^2 = 0/829$) برای مقیاس زمانی ۲۴ ماهه و کمترین ضریب تبیین در ایستگاه سعیدآباد ($r^2 = 0/480$) برای مقیاس زمانی ۹ ماهه با استفاده از مدل ANFIS به دست آمد. نتایج پژوهش نشان داد مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در تخمین خشکسالی در مقیاس زمانی طولانی مدت دقت زیادی داشته است.

کلیدواژگان: خشکسالی، دشت تبریز، دشت مراغه، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، شاخص SPI.

مقدمه

خشکسالی یکی از خطرهای طبیعی بسیارمهم و نگران کننده در مقیاس جهانی محسوب می شود. پدیده خشکسالی در بین خطرهای مختلف طبیعی کمتر شناخته شده است و در مقایسه با دیگر مخاطرات طبیعی و زیست محیطی پیچیدگی های بیشتری دارد [۱۴]. پدیده خشکسالی آثار سوء اقتصادی و زیست محیطی بر فعالیت های بشری به ویژه در زمینه کشاورزی دارد. خشکسالی سبب کاهش تولید محصولات کشاورزی و از این طریق موجب بروز آسیب های اقتصادی می شود [۱۹]. از نظر زیست محیطی نیز پدیده خشکسالی که عموماً با کاهش نزولات جوی و افزایش دما همراه است، سبب شورشیدن اراضی می شود [۱۶]. به طور کلی، پدیده خشکسالی نشان دهنده گونه ای ناهنجاری اقلیمی است که سبب کمبود منابع آب می شود؛ این کمبود می تواند ناشی از کاهش بارش، توزیع نامنظم بارش، افزایش نیاز آبی یا ترکیبی از این عوامل باشد [۲۰].

دوره خشکسالی از دیدگاه هیدرولوژیکی عبارت است از دوره ای که در آن مقادیر جریان از مقدار تثبیت شده ای که طی یک سیستم مدیریتی دربرگیرنده مصارف آشامیدنی، کشاورزی و صنعت است، به طور شایان توجهی کمتر باشد [۵]. پایش مؤثر و به موقع خشکسالی گام نخستین در کاهش آسیب های خشکسالی محسوب می شود و می تواند سبب توسعه سیستم های هشدار قبلی شود [۱۹]. از این رو، ارزیابی کمی و دقیق شرایط خشکسالی در یک منطقه قدم اول در مدیریت منابع آب محسوب می شود.

ارزیابی و پیش بینی شرایط خشکسالی با استفاده از شاخص های کمی خشکسالی امکان پذیر است که در بین این شاخص ها، شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI) کاربرد بیشتری دارد [۸، ۱۶ و ۲۱]. این شاخص بر مبنای احتمالات بارندگی در مقیاس های زمانی مختلف ارائه شده است و بسیاری از پژوهشگران به توانایی آن در پایش جنبه های مختلف خشکسالی اشاره کرده اند [۱۱]. نصیری و همکارانش [۱۷] نیز با استفاده از شاخص SPI به پایش خشکسالی در منطقه مرودشت پرداختند. نتایج این پژوهشگران نشان داد منطقه یادشده در بیشتر سال ها دچار خشکسالی های کوتاه مدت بوده اند و با دیرپایی

خشکسالی، شدت آن در سال های اخیر به مراتب بیشتر از سال های گذشته است.

با وجود اینکه در پژوهش های مختص به پدیده های هیدرولوژیکی مدل های احتمالاتی و تصادفی به طور سنتی استفاده می شوند، بسیاری از این مدل ها روابط بین متغیرها را خطی فرض می کنند و در نتیجه در پیش بینی پدیده های غیرخطی مانند سری های زمانی هیدرولوژیکی سبب بروز خطاهای زیادی می شوند [۶ و ۱۹]. از این رو، در سال های اخیر استفاده از تکنیک هایی مانند شبکه های عصبی مصنوعی و فازی به منظور مدل کردن پدیده های هیدرولوژیکی غیرخطی گسترش یافته است به ویژه زمانی که فیزیک این پدیده ها به خوبی درک نشده باشد [۹، ۱۲ و ۱۸]. باکانلی و همکارانش [۷] از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی^۲ (ANFIS) به منظور پیش بینی خشکسالی در کشور ترکیه استفاده کردند. در پژوهش آنها مدل های پیش بینی مختلفی برای SPI با مقیاس های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه بررسی و نشان داده شد که ترکیب مقادیر پیشین بارندگی و شاخص SPI، بهبود عملکرد مدل ها را به همراه دارد. اژدری مقدم و همکارانش [۶] نیز به کارایی مدل فازی-عصبی در پیش بینی خشکسالی در منطقه زاهدان اشاره کرده اند. در مقابل، گل دوست و سبحانی [۱۳] گزارش کرده اند که مدل عصبی-فازی کارایی کمی در پیش بینی شاخص خشکسالی در استان اردبیل دارد. نتایج این پژوهشگران نشان داد شدیدترین خشکسالی در استان اردبیل مختص به ایستگاه شهرستان اردبیل در مقیاس زمانی ۶ ماهه، در دسامبر ۲۰۱۰ و با شدت ۲/۴۷- رخ داده است. نتایج همچنین بیانگر وجود روند افزایشی خشکسالی در مقیاس های زمانی ۳ و ۶ ماهه برای ایستگاه پارس آباد بود. نگوین و همکارانش [۱۹] نیز شاخص SPI را برای دوره های زمانی کوتاه مدت مناسب دانسته و گزارش کرده اند که روش عصبی-فازی می تواند به طور موفقیت آمیزی در توسعه مدل های مختص به پیش بینی خشکسالی استفاده شود.

از دیدگاه اقلیمی، ایران آب و هوای گرم و خشک با بارشی کمتر از یک سوم متوسط بارش دنیا دارد و وقوع دوره های خشکی با تواتر زیاد اغلب استان های کشور را با

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

برای انجام این مطالعه ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی از دشت‌های تبریز و مراغه- بناب واقع در شرق دریاچه ارومیه انتخاب شد. دشت تبریز در شرق دریاچه ارومیه واقع شده است. محدوده غربی آن به باتلاق‌های نمکی حاشیه دریاچه ارومیه، حد شمالی آن به کوه‌های میشو، حد جنوبی آن به توده کوهستانی سهند و حد شرقی آن به کوه‌های عون‌بن علی محدود می‌شود. رود اصلی دشت آجی‌چای است که به طرف دریاچه ارومیه جریان دارد. دشت مراغه- بناب نیز در جنوب استان آذربایجان شرقی و شرق دریاچه ارومیه واقع شده است. این دشت از شمال به ارتفاعات سهند، از غرب به محدوده مطالعاتی عجب‌شیر و دریاچه ارومیه و از شرق و جنوب به محدوده مطالعاتی ملکان محدود می‌شود. ارتفاع متوسط دشت برابر با ۱۷۸۵ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی سالانه آن در مناطق مسطح تقریباً برابر با ۲۸۲ میلی‌متر است [۴]. در جدول ۱ موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های انتخاب‌شده برای انجام این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده‌شده در این پژوهش

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)	میانگین بارش (mm)
بناب	۴۶°-۰۴'-۶۰"	۳۷°-۲۰'-۶۰"	۱۲۹۰	۲۷۵/۲
خرمازرد	۴۶°-۰۸'-۶۰"	۳۷°-۲۴'-۶۰"	۱۴۹۵	۲۹۹/۵
مراغه	۴۶°-۱۰'-۶۰"	۳۷°-۰۱'-۶۰"	۱۴۷۷	۳۱۲/۷
قشلاق امیر	۴۶°-۱۶'-۶۰"	۳۷°-۱۸'-۶۰"	۱۶۰۶	۳۱۱/۸
مغانجیق	۴۶°-۲۴'-۶۰"	۳۷°-۱۹'-۶۰"	۱۶۷۰	۳۲۱/۹
سعیدآباد	۴۶°-۳۵'-۲۹"	۳۷°-۵۹'-۲۳"	۱۷۶۵	۳۷۱/۳
سپهان	۴۶°-۷'-۲۹"	۳۸°-۱۱'-۲۲"	۱۴۴۲	۲۶۰/۹
هروی	۴۶°-۲۹'-۲۹"	۳۷°-۵۵'-۲۳"	۱۹۸۱	۲۵۳/۴
لیقوان	۴۶°-۲۶'-۲۹"	۳۷°-۵۰'-۲۲"	۲۳۱۰	۳۴۱/۴
تبریز	۴۶°-۲۲'-۲۹"	۳۸°-۰۴'-۲۳"	۱۳۶۴	۲۳۸/۸
زینجاب	۴۶°-۱۹'-۲۹"	۳۷°-۵۱'-۲۲"	۲۲۱۱	۲۹۷/۱

شاخص بارش استاندارد (SPI)

آماره مناسب برای آمار بلندمدت بارندگی‌ها برآزش داده و سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌شود، به طوری که استانداردشده و متوسط آن برای هر منطقه و دوره مد نظر صفر شود [۱۰]. مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده بارش بیش از میزان متوسط و مقادیر منفی آن معنای عکس دارد. طبق این روش دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر

مشکل کم‌آبی بزرگی مواجه کرده است [۱]. از این‌رو، محدودیت آب از مهم‌ترین موانع توسعه کشاورزی است و در عین حال می‌تواند سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی متعددی شود. در این بین پایش منابع آب در حوضه‌های منتهی به دریاچه ارومیه اهمیت بیشتری دارد چرا که این دریاچه در سال‌های اخیر بر اثر تلفیق عوامل متعددی نظیر کاهش بارش و افزایش تقاضای آب در بخش‌های صنعتی و کشاورزی روند تسریعی خشک‌شدن را تجربه کرده است که می‌تواند در آینده‌ای نه‌چندان دور سبب بروز بحران‌های زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی شود. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف محاسبه مدت و شدت خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI در تعدادی از ایستگاه‌های باران‌سنجی شرق دریاچه ارومیه در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه در طول دوره آماری ۱۳۶۲-۱۳۹۲ انجام گرفته است و طی آن تلاش شده است کارایی مدل ANFIS در پیش‌بینی شاخص خشکسالی برای مقیاس‌های زمانی اشاره‌شده در طول دوره آماری ۱۳۶۲-۱۳۹۲ بررسی شود.

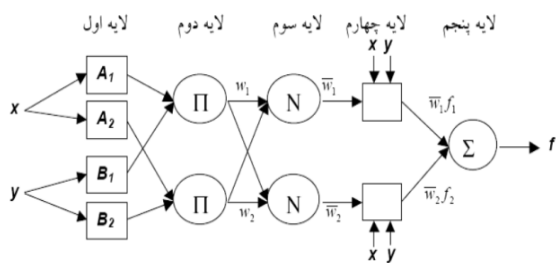
برای تعیین سال‌های شاخص خشکسالی و ترسالی در دوره آماری ۱۳۶۲-۱۳۹۲، از شاخص بارش استانداردشده (SPI) استفاده شد. بسیاری از محققان انعطاف‌پذیری شاخص SPI و قابلیت آن برای مقیاس‌های مختلف زمانی را قبول داشته‌اند [۱۰]. این شاخص برای هر منطقه براساس ثبت بارش‌های طولانی‌مدت آن محاسبه می‌شود. ابتدا توزیع

فازی شفافیت ویژه‌ای (جعبه خاکستری) در تعبیر و تحلیل پاسخ‌های برگشت داده‌شده خود دارند و نسبت به مدل‌های کاملاً بسته مانند شبکه‌های عصبی، راه‌حل‌های قانع‌کننده‌تری را به کاربران ارائه می‌دهند. در واقع، روش‌های عصبی-فازی در مقایسه با روش‌های فازی یا عصبی محض، از فواید هر دوی آنها بهره می‌برند. توان یادگیری و پردازشی کم‌هزینه شبکه‌های عصبی نسبت به سیستم‌های فازی و تصمیم‌گیری بشرگونه سیستم‌های فازی نسبت به شبکه‌های عصبی از مزیت‌های دو روش است. مدل‌های تطبیقی عصبی-فازی به‌تازگی محبوبیت زیادی برای واسنجی روابط غیرخطی به‌دست آورده‌اند، زیرا این مدل‌ها مزایای بیشتری نسبت به مدل‌های رایج دارند. ازجمله، این مدل‌ها قادرند شمار زیادی از داده‌های شلوغ و درهم را از سیستم‌های دینامیکی و غیرخطی به‌کار برند و مدل کنند. این ویژگی به‌ویژه زمانی که درک کاملی از روابط فیزیکی و اساسی سیستم مد نظر وجود ندارد، بسیار حائز اهمیت خواهد بود. به‌منظور ساده‌سازی، فرض خواهد شد که سیستم استنتاجی مد نظر دو ورودی x و y و یک خروجی z دارد. برای یک مدل فازی تاکاگی-سوگونو درجه اول، می‌توان یک مجموعه قانون نمونه را با دو قانون اگر-آنگاه فازی به صورت زیر بیان کرد:

قانون اول: اگر x برابر A_1 و y برابر B_1 باشد،

$$z_1 = p_1x + q_1y + r_1$$
 قانون دوم: اگر x برابر A_2 و y برابر B_2 باشد،

$$z_2 = p_2x + q_2y + r_2$$
 که در این قوانین p_i ، q_i و r_i ($i=1, 2$) پارامترهای خطی تالی مدل فازی تاکاگی-سوگونو درجه اول هستند. یک نمونه طراحی‌شده از مدل تطبیقی عصبی-فازی در شکل ۱ آورده شده است [۲۲].



شکل ۱. معماری کلی مدل تطبیقی عصبی-فازی

برای تخمین خشکسالی با مدل ANFIS، ابتدا داده‌های SPI برای ورود به مدل در هر ایستگاه به‌صورت سری‌های به

منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و زمانی پایان می‌یابد که SPI مثبت شود (جدول ۲). شاخص SPI با استفاده از رابطه ۱ قابل محاسبه خواهد بود.

$$SPI_n = \left[P_n + \sum (P - i) - \mu_n \right] / \delta_n \quad (1)$$

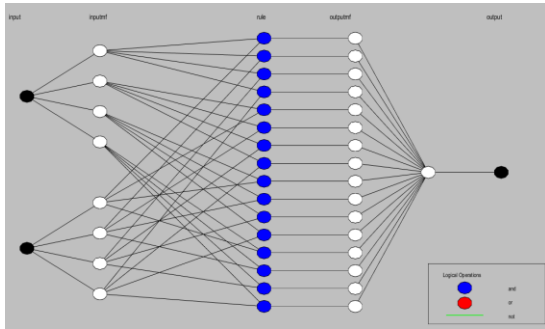
که در آن N ، تعداد ماه‌هایی که بارش تجمعی برایشان حساب شده است؛ P_0 مقدار نرمال‌شده بارش ماه فعلی؛ $P-i$ مقدار نرمال‌شده بارش ماه قبل؛ μ_n میانگین تعداد بارش تجمعی برای n ماه و δ_n انحراف معیار برای ماه‌هاست.

جدول ۲. طبقه‌بندی مقادیر شاخص SPI

مقادیر	طبقات
> 2	ترسالی بسیار شدید
$1/5$ تا $1/99$	ترسالی شدید
1 تا $1/49$	ترسالی
$-0/99$ تا $0/99$	نرمال
-1 تا $-1/49$	خشکسالی
$-1/5$ تا $-1/99$	خشکسالی شدید
< -2	خشکسالی بسیار شدید

سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی

در این پژوهش به‌منظور تخمین خشکسالی، از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) استفاده شد. شبکه‌های عصبی-فازی مدل‌هایی فازی هستند که فقط توسط دانش خیره طراحی نمی‌شوند، بلکه تا اندازه‌ای از داده‌ها نیز آموزش می‌بینند. پیوندهای نزدیک میان مدل‌های فازی و شبکه‌های عصبی، خاستگاه نخستین روش‌های مدل‌سازی فازی به کمک داده‌ها بودند. معمولاً مدل فازی به‌صورت ساختار یک شبکه عصبی طرح‌ریزی شده و روش‌های آموزش که تا کنون در متن شبکه‌های عصبی به‌خوبی کار کرده‌اند، برای این شبکه‌های عصبی-فازی نیز به‌کار می‌روند. مدل‌سازی عصبی-فازی ابزاری توانمند است که به‌آسانی شرایط گسترش یک سیستم کارا را فراهم می‌آورد. این مدل‌ها یک سیستم مد نظر را با استفاده از قوانین اگر-آنگاه فازی، در قالب ساختاری شبکه‌ای تقریب می‌زنند. سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی هر یک مزیت‌هایی نظیر تعبیرپذیری و یادگیری دارند. ایده ترکیب این دو روش سبب پیدایش سیستم‌های ساده و تعبیرپذیر عصبی-فازی شد. به‌دلیل چنین ساختاری، مدل‌های عصبی-



شکل ۲. ساختار ورودی و خروجی از مدل عصبی-فازی در این پژوهش

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های ANFIS، از نمایه‌های ضریب تبیین بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی (r^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب توافق (d)، ضریب نش‌ساکلیف (NS) و همچنین ضریب تبیین وزن‌دار (wr^2) استفاده شد که معادلات مختص به محاسبه این ضرایب کارایی به ترتیب زیر است.

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{mean}})(P_i - P_{\text{mean}}) \right]^2}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{mean}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{\text{mean}})^2} \right]} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right] \times n^{-1}} \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (|P_i - O_{\text{mean}}| + |O_i - O_{\text{mean}}|)^2 \right]} \quad (4)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{mean}})^2 \right]} \quad (5)$$

$$wr^2 = \begin{cases} |b| \times r^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \times r^2 & \text{for } b > 1 \end{cases} \quad (6)$$

تبیین معادله خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای) به یک نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌شده خواهد بود. با این حال، باید در نظر داشت که این ضریب قادر به ارائه بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی سیستماتیک مدل نیست و در نتیجه به منظور تحلیل دقیق‌تر مدل باید علاوه بر ضریب تبیین معادله خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای، شیب (b) و

طول ۳۷۲ ماه در هر مقیاس زمانی تنظیم شدند. سری‌های زمانی در سه ستون ایجاد شد؛ ستون اول سال‌های مختص به سری زمانی، ستون دوم ماه‌هایی که سری زمانی در آن مشاهده شده و ستون سوم مختص به مقادیر سری‌ها بود. از آنجا که پیش‌بینی شاخص در مدل براساس ویژگی داده‌ها در گذشته انجام خواهد شد، بخشی از داده‌ها (۷۰ درصد) به‌عنوان داده‌های آموزش و باقی (۳۰ درصد) نیز به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. قبل از شروع آموزش مدل سیستم استنتاج فازی، باید ساختار اولیه آن تعیین شود با آزمون ترکیبات مختلفی از معماری مدل، حالت بهینه با توجه به معیارهای کارایی به‌دست می‌آید. برای آموزش سیستم عصبی-فازی دو روش گسسته‌سازی شبکه‌ای^۱ و خوشه‌بندی جزئی^۲ وجود دارد. تفاوت عمده این دو روش در چگونگی تعیین تابع عضویت فازی است. در این تحقیق با کاربرد روش گسسته‌سازی شبکه‌ای، نوع و تعداد توابع عضویت ورودی و خروجی مشخص شده است و پس از آزمون حالت‌های مختلف ساختار، چهار تابع عضویت^۳ (شکل ۲) به شکل گوسی^۴ انتخاب شدند.

در روابط یادشده، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل، O_{mean} و P_{mean} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل و n تعداد داده‌هاست. در روابط یادشده هرچه مقدار r^2 (ضریب

1. Grid Partitioning
2. Sub-Clustering
3. Number of MFs
4. Gauss

طولانی مدت خشکسالی نیز بیشتر شده است. به بیانی، خشکسالی در مقیاس های زمانی کوتاه مدت تداوم زیادی ندارد و تحت تأثیر بارش های ماهانه نیست، در حالی که دوره های زمانی بلند مدت واکنش بسیار سریع تری نسبت به تغییرات بارش نشان می دهند.

همان گونه که گفته شد در بین ایستگاه های مطالعه شده ایستگاه های هروی، مراغه و سعیدآباد طولانی ترین خشکسالی در دوره آماری مطالعه شده را داشتند که در ادامه تغییرات شاخص SPI در این ایستگاه ها برای طول دوره مطالعه به تفکیک ارائه شده است. مقادیر SPI برای ایستگاه هروی در شکل ۳ نشان می دهد در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، ۲۸ ماه از ۳۷۲ ماه مطالعه شده در شرایط خشکسالی طولانی ترین دوره است. در طبقه بندی این ماه های خشک در طبقه خشکسالی متوسط، شدید و بسیار شدید قرار دارند و شدیدترین خشکسالی در مهر ۱۳۶۳ رخ داده است. متوسط بارندگی این ماه در دوره آماری این پژوهش برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، ۲۱/۱۳ میلی متر است که در مهر ۱۳۶۳ به ۱۵ میلی متر رسیده است. در مقیاس زمانی ۹ ماهه، ۵۸ ماه خشکسالی رخ داده است (حدود ۱۴ دوره خشکسالی) و بادوام ترین آن در سال های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰، به مدت ۲۵ ماه طول کشیده است. شدیدترین خشکسالی در شهریور ۱۳۶۳ با مقدار ۳/۲۴- اتفاق افتاده است.

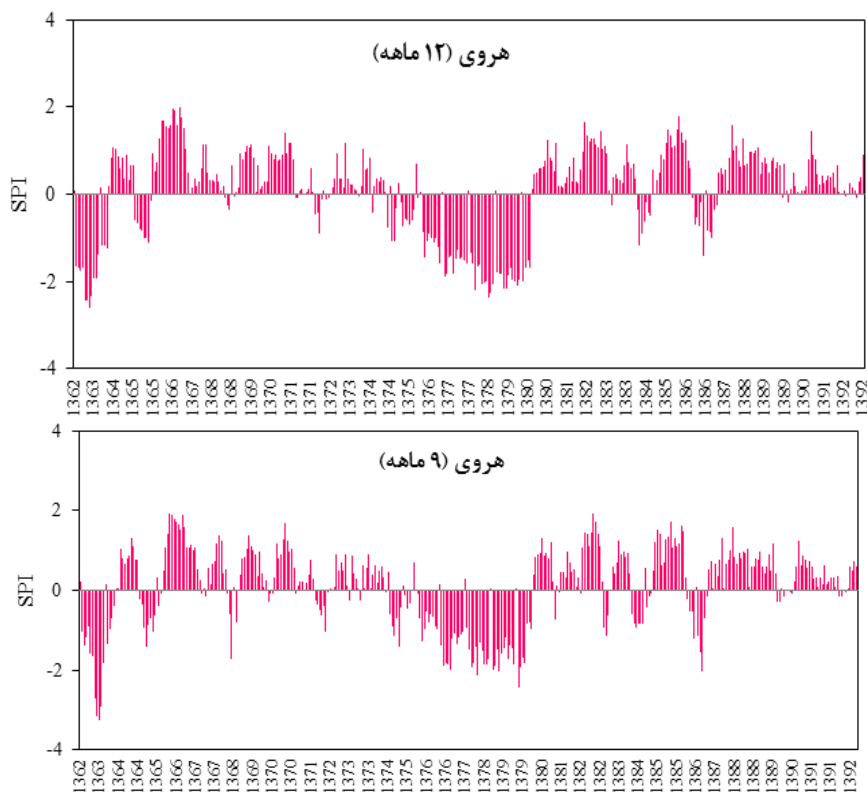
عرض از مبدأ معادله نیز در نظر گرفته شوند. بنابراین، در یک مدل ایده آل علاوه بر اینکه r^2 این خط باید نزدیک به یک باشد باید شیب خط به یک و عرض از مبدأ نیز به صفر میل کنند. کراوس و همکارانش [۱۵] به منظور حل این مشکل، شیب خط مد نظر و ضریب تبیین آن را تلفیق کردند و در قالب یک ضریب کارایی جدید با عنوان «ضریب تبیین وزن دار (wr^2)» به شکل رابطه ۵ ارائه دادند. بدیهی است که نزدیکی مقادیر wr^2 به یک نشان دهنده توانایی بیشتر مدل خواهد بود. مقادیر ایده آل برای ضرایب d ، NSE نیز برابر یک و برای ضریب $RMSE$ نیز مقادیر حداقل به عنوان شرایط بهینه مدل خواهند بود.

یافته ها

همان گونه که گفته شد به منظور ارزیابی خشکسالی در دو دشت تبریز و مراغه با تأخیرهای ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه از روش شاخص استاندارد SPI استفاده شد. با توجه به جدول ۳ ایستگاه های هروی، مراغه و سعیدآباد در بین ایستگاه های پژوهش شده، طولانی ترین خشکسالی برای طول دوره آماری مطالعه شده را داشتند و شدیدترین خشکسالی نیز در کل دوره مختص به ایستگاه ليقوان و در مقیاس زمانی ۹ ماهه بوده است که شدت آن برابر با ۴/۰۷- بوده و در مهرماه ۱۳۶۳ رخ داده است. همچنین از مقایسه خشکسالی در سه مقیاس زمانی مشخص شد که در مقیاس های زمانی کوتاه مدت شدت خشکسالی ها کمتر و در مقیاس زمانی بلند مدت شدت خشکسالی ها افزایش و تداوم رخدادهای

جدول ۳. طولانی ترین دوره وقوع خشکسالی و شدت در طول دوره در ایستگاه های مختلف

ایستگاه	تاریخ رخداد طولانی ترین خشکسالی			شدت خشکسالی در طولانی ترین دوره		
	۹ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه	۹ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه
تبریز	۶۳/۷-۶۲/۱۰	۶۸/۱-۶۸/۱۰	۷۸/۳-۷۸/۴	-۱۸/۸	-۱۴/۲۶	-۴۰/۸۵
لیقوان	۶۸/۸-۶۷/۱۰	۷۹/۱-۷۹/۱۱	۷۸/۲-۷۸/۵	-۱۶/۶۶	-۲۲/۶۵	-۷۰/۸۱
هروی	۷۹/۸-۷۸/۱۰	۸۰/۴-۷۸/۱	۷۶/۶-۷۵/۵	-۱۸/۰۱	-۴۹/۲۴	-۸۹/۸۹
سهلان	۷۸/۸-۷۷/۱۱	۷۸/۱-۷۸/۱۱	۷۸/۱-۷۸/۵	-۱۷/۷۱	-۲۱/۷۶	-۵۳/۳
زینجاب	۷۸/۸-۷۸/۱	۶۸/۱-۶۸/۱۰	۶۸/۲-۷۰/۲	-۱۱/۷	-۲۲/۰۸	-۳۶/۹۴
سعیدآباد	۷۹/۱۱-۷۷/۱۱	۷۸/۱-۷۹/۱۱	۷۸/۷-۷۸/۱۰	-۴۳/۸۲	-۴۴/۲۴	-۵۹/۱۱
مغانجیق	۷۹/۸-۷۸/۱۲	۷۹/۱-۷۹/۱۱	۷۸/۷-۷۸/۸	-۱۲/۶۱	-۱۵/۷۵	-۴۲/۷۶
مراغه	۸۰/۱-۷۸/۱	۷۸/۱-۸۰/۳	۷۷/۸-۷۵/۵	-۳۲/۴۲	-۳۸/۵۹	-۵۶/۷۳
قشلاق امیر	۷۹/۱۲-۷۷/۱۲	۸۶/۷-۸۷/۷	۷۷/۹-۷۷/۴	-۴۳/۳۸	-۲۱/۰۱	-۵۴/۴۶
خرمازد	۷۹/۸-۷۸/۱	۷۸/۱-۷۹/۹	۷۷/۹-۷۵/۵	-۳۲/۶۸	-۳۶/۴۶	-۵۹/۹۸
بناب	۶۴/۳-۶۳/۲	۷۸/۸-۷۹/۱۰	۶۴/۱-۶۴/۱۱	-۳۲/۱۲	-۲۱/۱۴	-۲۱/۵۹

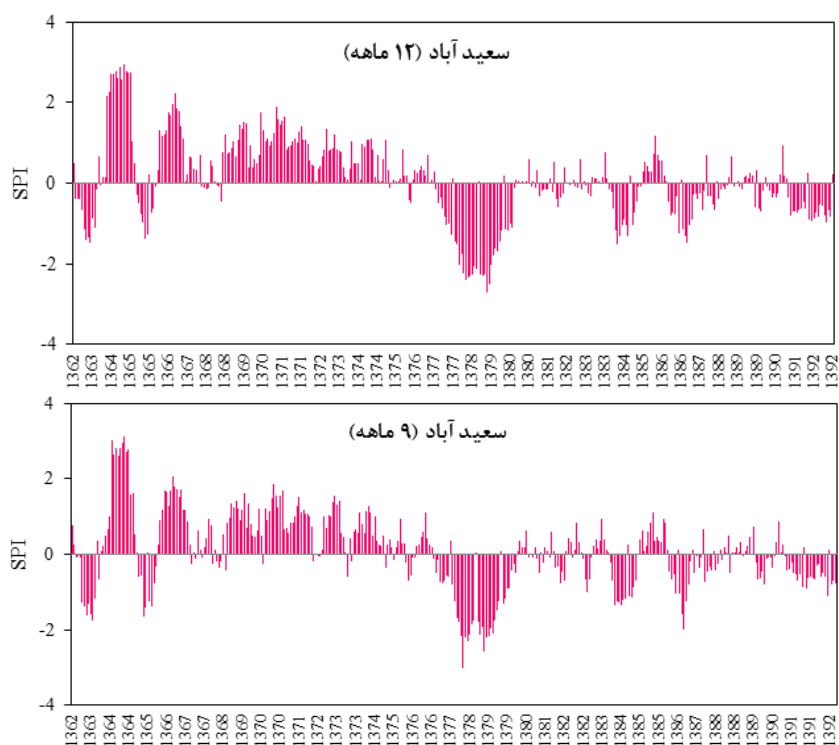


شکل ۳. شدت خشکسالی SPI در مقیاس‌های ۹ و ۱۲ ماهه برای ایستگاه هروی

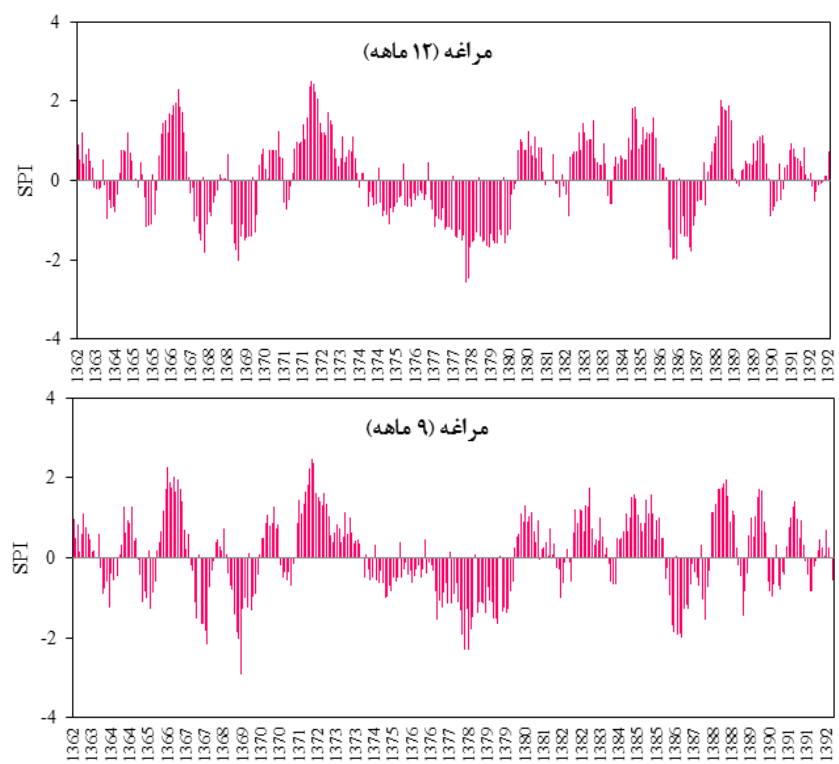
خشکسالی با شدت ۶۷/۷۵- برای کل ماه‌های خشک مشاهده شد.

در ایستگاه مراغه در مقیاس زمانی ۹ ماهه، ۵۶ ماه خشکسالی رخ داده است که مداوم‌ترین آن از فروردین ۱۳۷۸ تا فروردین ۱۳۸۰ طول کشیده که شایان توجه است (شکل ۵). شدیدترین خشکسالی‌ها در این مقیاس زمانی در ماه‌های تیر و شهریور ۱۳۷۸ با مقادیر ۲/۲۹- و ۲/۳- مشاهده می‌شود. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه حدود ۱۴ دوره خشکسالی رخ داده است که یک دوره ۲۷ ماهه که از فروردین ۱۳۷۸ تا خرداد ۱۳۸۰ به طول انجامیده، شایان توجه است. در این دوره مقدار شاخص خشکسالی در محدوده ۱/۱- تا ۲/۵۴- بوده و نوسان زیادی نداشته است. در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه مقدار شاخص بین ۲/۲۱ تا ۲/۵۵- در نوسان است. بنابراین، خشک‌ترین شرایط با مقدار ۲/۵۵- است که در مهر ۱۳۷۹ رخ داده است. در این مقیاس زمانی حدود ۵۳ ماه خشکسالی طی حدود ۱۴ دوره خشک مشاهده می‌شود.

بررسی مقادیر SPI در ایستگاه سعیدآباد نشان داد در این ایستگاه در مقیاس زمانی ۹ ماهه ۵۴ ماه خشکسالی در ۱۹ دوره خشک رخ داده که شدیدترین مورد آن در خرداد ۱۳۷۸ با مقدار ۳/۰۱- بوده است. در این مقیاس زمانی مقدار شاخص، بین ۳/۱۳ تا ۳/۰۱- نوسان دارد. طولانی‌ترین دوره خشکسالی در این مقیاس زمانی از بهمن ۱۳۷۷ تا بهمن ۱۳۷۹ به مدت ۲۴ ماه و بیشترین مقدار شاخص در این دوره ۳/۰۱- با طبقه خشکسالی بسیار شدید است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه ۴۸ ماه خشکسالی رخ داده است و در مجموع شدت آن در این دوره ۷۲/۸۲- بوده است و شدیدترین مورد خشکسالی در تیرماه ۱۳۷۹ با مقدار شاخص ۲/۷۱- و طبقه خشکسالی بسیار شدید است. در این مقیاس زمانی بادوام‌ترین خشکسالی فروردین ۱۳۷۸ تا بهمن ۱۳۷۹ به مدت ۲۳ ماه در ایستگاه سعیدآباد رخ داده است (شکل ۴). در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه مقدار شاخص بین ۲/۱۹ تا ۲/۹۶- در نوسان است. بنابراین، خشک‌ترین شرایط با مقدار ۲/۹۶- است که در مهر ۱۳۷۹ رخ داده است. در این مقیاس زمانی حدود ۳۷ ماه



شکل ۴. شدت خشکسالی SPI در مقیاس‌های ۹ و ۱۲ ماهه برای ایستگاه سعیدآباد

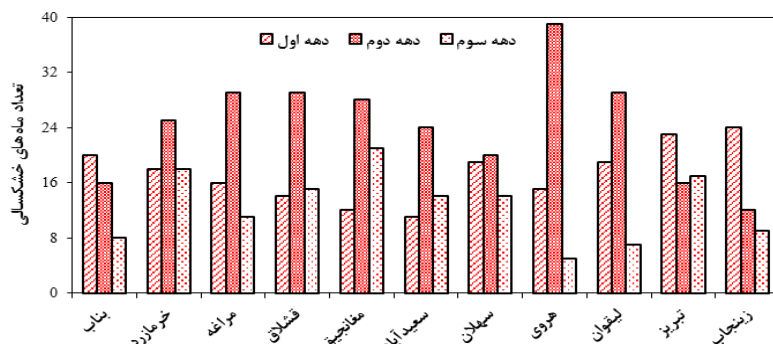


شکل ۵. شدت خشکسالی SPI در مقیاس‌های ۹ و ۱۲ ماهه برای ایستگاه مراغه

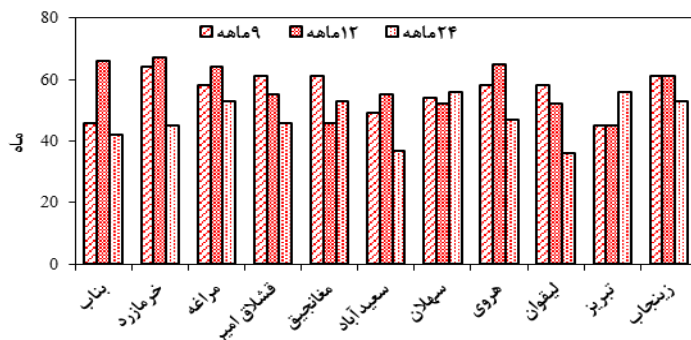
بیشترین فراوانی خشکسالی رخ داده است. اسدی و همکارانش [۳] در ارزیابی و مطالعه خشکسالی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان آذربایجان شرقی دریافتند که خشکسالی همواره با شدت‌های مختلف در منطقه به‌وقوع پیوسته است، ولی در نواحی جنوبی استان در ایستگاه‌های مراغه، ملکان، بناب، کوهسار، میانه و سعیدآباد که متوسط بارندگی نسبتاً زیادی دارند، تداوم، شدت و فراوانی دوره‌های خشکی نسبت به دیگر نقاط استان معمولاً بیشتر بوده است. اکبرزاده و همکارانش [۲] در بررسی تحلیل مکانی شاخص خشکسالی SPI در استان آذربایجان شرقی طی دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۰۶) نشان دادند شدیدترین مقدار مشاهده‌شده خشکسالی استان آذربایجان شرقی با توجه به محاسبات شاخص SPI در شرق استان به‌ویژه ایستگاه سراب رخ داده است، در حالی که بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی در شمال غرب استان به‌ویژه در ایستگاه جلفا رخ داده است که به‌طرف جنوب و جنوب شرقی از فراوانی وقوع کاسته می‌شود. همچنین طولانی‌ترین تداوم خشکسالی در شرق و مرکز استان (ایستگاه سراب و تبریز) رخ داده است.

در شکل ۶ تعداد ماه‌های خشکسالی برای تأخیر زمانی ۹ ماهه در همه ایستگاه‌های مطالعه‌شده به تفکیک و برای سه دهه دوره آماری ارائه شده است. نتایج این شکل به‌روشنی نشان می‌دهد در دهه دوم دوره آماری (اول مهر ۱۳۷۲ تا اسفند ۱۳۸۲) بیشترین تعداد ماه‌های خشکسالی در همه ایستگاه‌ها به‌وقوع پیوسته است که این امر نشان می‌دهد منطقه مد نظر در طول این دهه بیشترین شدت خشکسالی را تجربه کرده است. ایستگاه هروی نیز در این دهه بیشترین تعداد ماه‌های خشکسالی را داشته است. برای دهه اول مطالعه نیز ایستگاه‌های زینجان و بناب بیشترین تعداد ماه‌های خشکسالی را داشته و ایستگاه‌های مغانجیق و تبریز نیز در دهه سوم دوره، بیشترین تعداد ماه‌های خشک را به خود اختصاص داده‌اند.

در شکل ۷ نیز تعداد ماه‌های خشکسالی برای کل دوره آماری مطالعه‌شده با تأخیرهای زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه ارائه شده است. با توجه به شکل ۷ در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه ایستگاه‌های هروی، خرمازرد، مراغه و بناب بیشترین ماه‌های خشکسالی و برای مقیاس زمانی ۹ ماهه ایستگاه‌های خرمازرد، قشلاق امیر، زینجان و مغانجیق بیشترین ماه‌های خشکسالی را داشته‌اند.



شکل ۶. مقایسه تعداد ماه‌های خشکسالی دهه‌های اول، دوم و سوم دوره مطالعه در مقیاس زمانی ۹ ماهه



شکل ۷. مقایسه تعداد ماه‌های خشکی برای ایستگاه‌های مختلف در سه مقیاس زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه

یافته است، به طوری که در دوره بازگشت ۲۰۰ ماهه خشکسالی ۲۵ تا ۸۰ ماه و در دوره بازگشت ۲ ماهه (۵۰ درصد احتمال) خشکسالی‌ها در بین ۲ تا ۶ ماه رخ خواهد داد.

تخمین خشکسالی با مدل ANFIS

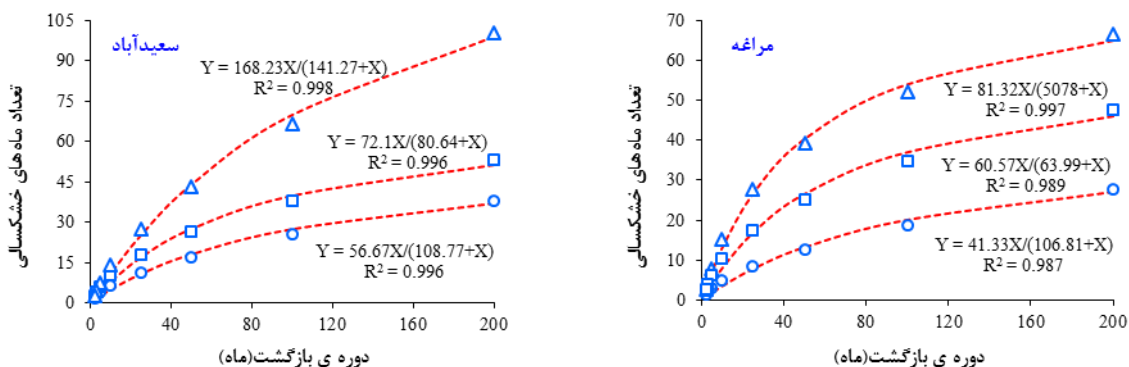
در بحث مختص به ارزیابی توان مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی در تخمین خشکسالی، پس از اجرای مدل، معیارهای ارزیابی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی تعیین شد که مقادیر آنها در جدول ۴ ارائه شده است و همچنین برای ایستگاه خرم‌ازرد که بیشترین مقدار همبستگی در هر سه تأخیر زمانی را داشت نمودار مقایسه‌ای مختص به داده‌های پیش‌بینی‌شده و داده‌های مشاهده‌شده ترسیم شد (شکل ۱۰).

با توجه به شکل ۸ کمترین شدت خشکسالی در کل دوره آماری برای مقیاس زمانی ۹ و ۱۲ ماهه به ترتیب مختص به ایستگاه‌های سعیدآباد، زینجاب و برای مقیاس زمانی ۲۴ ماهه در ایستگاه سعیدآباد مشاهده شد. در ایستگاه‌های تبریز، سهلان و مراغه شدت در هر مقیاس زمانی یکسان و بیشترین شدت خشکسالی در هر مقیاس مختص به ایستگاه‌های هروی، زینجاب است.

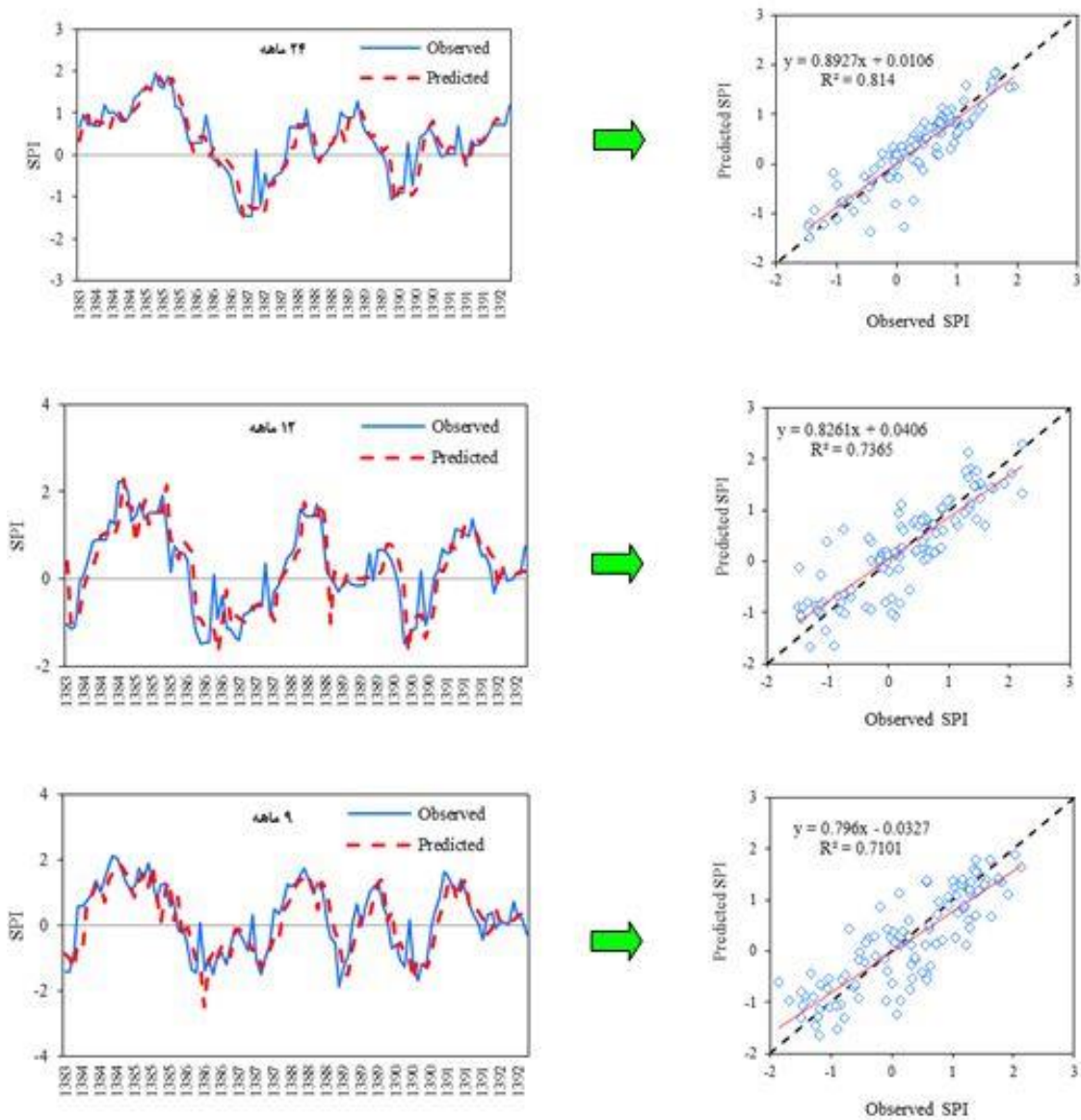
از بررسی دوره‌های بازگشت خشکسالی با استفاده از توزیع ویبل در محیط ^۱SMADA برای دوره‌های بازگشت ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، و ۲۰۰ ماهه در ایستگاه‌های با طولانی‌ترین دوره خشکسالی (شکل ۹) مشخص شد که با افزایش دوره بازگشت تعداد ماه‌های خشکسالی‌ها در ایستگاه‌های سعیدآباد و مراغه در هر سه مقیاس زمانی افزایش



شکل ۸. مقایسه شدت خشکی برای ایستگاه‌های مختلف در سه مقیاس زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه



شکل ۹. تعداد ماه‌های خشکسالی برای دوره‌های بازگشت مختلف در دو ایستگاه مراغه و سعیدآباد (نمادهای دایره، مربع و مثلث به ترتیب نشان‌دهنده مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه هستند)



شکل ۱۰. مقایسه SPI مشاهده‌ای و برآورد شده در ایستگاه خرم‌زرد برای مقیاس‌های زمانی مختلف

قشلاق امیر مدل عملکرد بهتری داشته و با ضریب تعیین ۰/۸۲۹ و ۰/۷۲۰ کمترین خطا را داشته است. در تحقیق اژدری مقدم و همکارانش [۶] نیز کارایی مدل ANFIS در پیش‌بینی خشکسالی، شاخص‌های اقلیمی، بارندگی و شاخص خشکسالی در منطقه زاهدان نشان داده شده است. همچنین این روش در پیش‌بینی خشکسالی‌ها با شاخص SPI در استان اردبیل توسط گل‌دوست و سبحانی [۱۳] در ۴ مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه روش مناسبی تشخیص داده شده است.

طول دوره داده‌های اعتبارسنجی در این بخش ۱۱۰ ماه، از دی‌ماه ۱۳۸۳ تا اسفند ۱۳۹۲ است. براساس نتایج جدول ۴ مشخص شد که براساس مجموع معیارهای کارایی، مدل برای ایستگاه مراغه در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه بیشترین کارایی و برای ایستگاه سعیدآباد در مقیاس زمانی ۹ ماهه کمترین کارایی را دارد. مدل ANFIS در تخمین خشکسالی‌ها در همه ایستگاه‌ها جز ایستگاه سعیدآباد در مقیاس زمانی ۹ ماهه از نظر معیار نش قابل قبول بوده و عملکرد مناسبی را نشان داده است. در مقیاس زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه در ایستگاه‌های مراغه و

جدول ۴. ضرایب کارایی مدل پیش‌بینی SPI در ایستگاه‌های مختلف و برای مقیاس‌های زمانی متفاوت

مقیاس زمانی	ضریب کارایی	بناب	خرمازرد	مراغه	قشلاق امیر	مغانجیق	سعیدآباد	سهلان	هروی	لیقوان	تبریز	زینجاب
۹ ماهه	r^2	۰/۶۸۰	۰/۸۱۴	۰/۸۲۹	۰/۷۲۰	۰/۶۹۱	۰/۴۸۲	۰/۵۷۷	۰/۴۸۴	۰/۶۰۰	۰/۷۶۶	۰/۶۱۴
	wr^2	۰/۴۸۶	۰/۸۰۰	۰/۷۴۹	۰/۶۳۶	۰/۵۷۰	۰/۴۱۹	۰/۴۴۷	۰/۲۹۸	۰/۴۰۱	۰/۶۳۶	۰/۵۰۲
	NSE	۰/۶۷۵	۰/۸۰۵	۰/۸۲۲	۰/۶۸۱	۰/۶۶۱	۰/۴۷۱	۰/۵۰۸	۰/۴۴۱	۰/۵۶۰	۰/۷۶۰	۰/۵۳۵
	d	۰/۹۰۳	۰/۹۴۹	۰/۹۵۵	۰/۹۱۹	۰/۹۰۹	۰/۸۱۵	۰/۸۷۰	۰/۸۲۹	۰/۸۶۸	۰/۹۳۶	۰/۸۸۱
	RMSE	۰/۳۲۱	۰/۳۳۷	۰/۳۳۹	۰/۴۷۷	۰/۵۲۵	۰/۳۶۰	۰/۵۶۲	۰/۲۸۸	۰/۳۴۲	۰/۴۴۱	۰/۴۵۵
۱۲ ماهه	r^2	۰/۶۴۰	۰/۷۳۶	۰/۷۴۸	۰/۷۳۹	۰/۷۴۶	۰/۵۲۵	۰/۶۲۵	۰/۶۶۴	۰/۶۲۹	۰/۶۷۷	۰/۶۲۲
	wr^2	۰/۴۹۱	۰/۶۰۸	۰/۶۶۹	۰/۶۰۰	۰/۶۰۶	۰/۳۵۶	۰/۴۹۸	۰/۵۳۴	۰/۴۵۸	۰/۵۰۷	۰/۴۰۶
	NSE	۰/۶۱۰	۰/۷۲۶	۰/۷۱۹	۰/۷۳۲	۰/۷۴۰	۰/۴۶۴	۰/۵۶۶	۰/۶۳۰	۰/۶۰۳	۰/۶۶۸	۰/۶۱۶
	d	۰/۸۹۳	۰/۹۲۴	۰/۹۲۸	۰/۹۲۷	۰/۹۲۸	۰/۸۴۷	۰/۸۸۵	۰/۹۰۰	۰/۸۸۵	۰/۹۰۴	۰/۸۷۵
	RMSE	۰/۳۸۲	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰	۰/۵۱۲	۰/۵۱۰	۰/۴۰۶	۰/۶۰۶	۰/۳۸۳	۰/۵۰۸	۰/۵۴۰	۰/۴۷۱
۹ ماهه	r^2	۰/۶۲۹	۰/۷۱۰	۰/۷۱۱	۰/۷۲۱	۰/۵۹۷	۰/۴۸۰	۰/۵۸۳	۰/۶۱۵	۰/۶۱۴	۰/۵۷۹	۰/۵۴۸
	wr^2	۰/۴۷۶	۰/۵۶۵	۰/۶۱۰	۰/۶۵۱	۰/۴۳۲	۰/۳۱۶	۰/۴۱۶	۰/۴۲۳	۰/۴۹۴	۰/۳۹۴	۰/۴۰۲
	NSE	۰/۶۰۲	۰/۶۹۳	۰/۶۷۵	۰/۶۶۸	۰/۵۶۳	۰/۴۰۶	۰/۵۴۰	۰/۶۰۵	۰/۵۳۱	۰/۵۶۰	۰/۴۸۵
	d	۰/۸۹۰	۰/۹۱۴	۰/۹۱۶	۰/۹۱۷	۰/۸۷۵	۰/۸۳۳	۰/۸۶۹	۰/۸۷۹	۰/۸۷۷	۰/۸۶۸	۰/۸۵۶
	RMSE	۰/۳۹۱	۰/۵۶۰	۰/۵۶۲	۰/۵۹۹	۰/۶۸۳	۰/۴۶۰	۰/۶۶۲	۰/۴۳۹	۰/۵۸۸	۰/۶۱۰	۰/۵۹۴

بحث و نتیجه‌گیری

شناخت ویژگی‌های خشکسالی لازمه مدیریت منابع آب است. استخراج و تحلیل منحنی‌های شدت-تداوم و پایش خشکسالی از نیازهای اساسی برنامه‌ریزی‌های مدیریتی کشاورزی و منابع آبی محسوب می‌شود. بدین منظور باید از شاخص‌های خشکسالی استفاده شود. شاخص استاندارد شده بارش (SPI) یکی از شاخص‌های مهمی است که هدف آن اختصاص ارزش عددی به مهم‌ترین فاکتور اقلیمی (بارندگی) است. این شاخص برای تعیین کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف به کار می‌رود. مقیاس‌های زمانی، تأثیرات خشکسالی را در توانایی منابع آب نشان می‌دهند. در راستای پژوهش انجام شده، شدت‌های خشکسالی در یک دوره آماری ۳۰ ساله برای ۱۱ ایستگاه دشت‌های مراغه و تبریز، در سه مقیاس زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه تعیین شد. سپس براساس شدت‌های خشکسالی به‌دست‌آمده در ماه‌های مختلف با در نظر گرفتن مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت، خشکسالی از دیدگاه‌های مختلف بررسی و رخداد شدیدترین خشکسالی‌ها و دوره تناوب آنها مقایسه و تحلیل شد. همچنین به تخمین خشکسالی‌ها با مدل ANFIS و ارزیابی این مدل با معیارهای مختلف پرداخته شد. نتایج شاخص استاندارد بارش نشان داد ایستگاه‌های مراغه، قشلاق

امیر، سعیدآباد و لیقوان با وجود میانگین بارندگی نسبتاً بالا طی ۳۰ سال دوره آماری فراوانی، شدت و مدت دوره‌های خشکی به نسبت سایر ایستگاه‌های بیشتر به‌وقوع پیوسته‌اند. در مقیاس ۹ و ۱۲ ماهه ایستگاه خرمازرد در دشت مراغه بیشترین ماه‌های خشکی و در تأخیری ۲۴ ماهه ایستگاه‌های سهلان و تبریز بیشترین تعداد ماه‌های خشک را تجربه کردند. ایستگاه‌های خرمازرد، مراغه، بناب، مغانجیق و قشلاق امیر در دشت مراغه از نظر شدت و تعداد ماه‌های خشکی در هر سه مقیاس زمانی (۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه) نسبت به ایستگاه‌های دشت تبریز شرایط بحرانی‌تری داشته‌اند. همچنین از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در دهه دوم بررسی یعنی از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۲ بیشترین تعداد ماه‌های خشکی در همه ایستگاه‌ها به‌وقوع پیوسته است. دیگر نتایج نشان داد خشکسالی‌های کوتاه‌مدت نوسانات و تغییرات زیاد و حساسیت بیشتری به تغییرات شرایط رطوبت دارند؛ اما در مقیاس‌های زمانی بلندمدت، خشکسالی‌های شدید دوره‌های تداوم طولانی دارند و خشکسالی را بهتر منعکس می‌کنند. بنابراین، با توجه به اینکه شدت خشکسالی و تکرار آن همگی توابعی هستند که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به مقیاس زمانی وابسته‌اند و می‌توانند هشدار اولیه‌ای برای خشکسالی و کمک به ارزیابی شدت آن در سال‌های آتی باشند. از برآزش

- Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2009; 23(8):1143-54.
- [8]. Bonaccorso B, Bordi I, Cancelliere A, Rossi G, Sutera A. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water resources management*. 2003; 17(4):273-96.
- [9]. Chang FJ, Chang YT. Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Advances in Water Resources*. 2006; 29(1):1-0.
- [10]. Edwards DC. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report Number 97-2*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado; 1997
- [11]. Farrokhnia A, Morid S, Ghaemi H. Data mining on large scale climatic signals for predicting long time drought. *Third Congress on Water Resources Management*. Tabriz; 2008 [Persian]
- [12]. Firat M, Güngör M. Hydrological time-series modelling using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Hydrological Processes*. 2008; 22(13):2122-32.
- [13]. Goldust A, Sobhani B. Studying drought and evaluating its prediction possibility in Ardabil province by using SPI index and ANFIS model. *Geographical Research*. 2015; 30(1):135-152 [Persian]
- [14]. He B, Lü A, Wu J, Zhao L, Liu M. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China. *Journal of Geographical Sciences*. 2011; 21(2):235-49.
- [15]. Krause P, Boyle DP, Bäse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 2005; 5:89-97.
- [16]. Mishra AK, Singh VP. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. 2010; 391(1):202-16.
- [17]. Nasiri M, Jabbari S, Boostani F, Shamsnia S. Analysis and monitoring of the drought by SPI. *National Congress on water disaster*. Marvdasht; 2009 [Persian]
- [18]. Nayak PC, Sudheer KP, Rangan DM, Ramasastri KS. A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. *Journal of Hydrology*. 2004; 291(1):52-66.
- [19]. Nguyen LB, Li QF, Ngoc TA, Hiramatsu K. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Drought Forecasting in the Cai River Basin in Vietnam. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*. 2015; 60(2): 405-415.
- توزیع ویبل بر ماه‌های خشکسالی ایستگاه‌های سعیدآباد و مراغه در دوره‌های بازگشت ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ماهه و ترسیم نمودارهای مدت-فرکانس مشخص شد که با افزایش دوره بازگشت تعداد ماه‌های خشکسالی‌ها در هر سه مقیاس زمانی افزایش خواهد یافت. مدل‌سازی تخمین مقادیر شاخص استاندارد بارش نشان داد در بازه زمانی ۲۴ ماهه و ۱۲ ماهه خشکسالی مدل ANFIS پیش‌بینی بهتری از شرایط خشکسالی ارائه می‌دهد. همچنین در مجموع مدل ANFIS در پیش‌بینی شاخص SPI برای هر سه مقیاس زمانی عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است و می‌تواند برای پیش‌بینی خشکسالی در منطقه مناسب باشد.
- ### تشکر و قدردانی
- نویسندگان مقاله از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات مختص به ایستگاه‌های باران‌سنجی کمال تشکر و قدردانی را دارند.
- ### منابع
- [1]. Alizadeh A. *Fundamentals of the Applied Hydrology*. Ferdowsi University of Mashhad Press; 2010 [Persian]
- [2]. Akbarzadeh Y, Sadeghi F, Hossein-Babaie M. Spatial analysis of the SPI in east Azarbaijan province during the 1987-2006 period. *Regional Congress of the Water and drought*; 2009 [Persian].
- [3]. Asadi E, Majnonihris A, Fakherifard A, Sadredini AA. Evaluation of drought in East Azarbaijan province using SPI index. *2th National Conference on the drought management strategies*; 2009 [Persian]
- [4]. Asghari-Moghaddam A, Fijani E, Nadiri A. Optimization of DRASTIC model by artificial intelligence for groundwater vulnerability assessment in Maragheh-Bonab plain. *Journal of Geosciences*. 2015; 94:169-176 [Persian]
- [5]. Araghinejad SH, Karamooz M. *Advanced Hydrology*. Amir-Kabir University Press; 2010 [Persian].
- [6]. Azhdari-Moghadam M, Khosravi M, Pourniknam H, Jafari E. Drought prediction by Neuro-Fuzzy model, climatic indices, precipitation, and drought index (Case study: Zahedan). *Iranian Journal of Geography and Development*. 2012; 10(1), 61-72 [Persian]
- [7]. Bacanlı UG, Firat M, Dikbas F. Adaptive neuro-fuzzy inference system for drought forecasting.

- [20]. Pirmoradian N, Shamsnia SA, Shahrokhnia MA. Monitoring and Spatial Analysis of Drought Severity 2000-2001 Crop Year in Fars Province Using Standardized Precipitation Index in The Geographic Information Systems (GIS). *Water Resources Engineering*. 2009; 1(2): 65-74.
- [21]. Tsakiris G, Vangelis H. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. *Water Resources Management*. 2004; 18(1): 1-12.
- [22]. Zargar A, Sadiq R, Naser B, Khan FI. A review of drought indices. *Environmental Reviews*. 2011; 19: 333-349.