نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال چهارم، شماره ۱، بهار۱۳۹٦

صفحات ۹٦- ۷۳

پایش خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص SEPI و مدل ANFIS

بتول زینالی، استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

صیاد اصغری سراسکانرود[1]، دانشیار ژئومرفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

وحید صفریان زنگیر، دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۳ **پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۱۱/۲۰**

چکیده

آنالیز و پایش خشکسالی یکی از اصول مهم در مدیریت خشکسالی و ریسک، بویژه در مناطق در معرض خطر خشکسالی است. سیستم‌های پایش در تدوین طرح‌های مقابله با خشکسالی و مدیریت آن از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند. با این حال، مطالعات انجام شده در رابطه با این پدیده بر اساس روش‌های مناسب بسیار کم است، بررسی ویژگی‌های خشکسالی و پیش‌بینی آن می‌تواند در کاهش خسارات حاصل از آن موثر باشد بدین منظور، در این پژوهش به بررسی خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن برای ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه پرداخته شد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، مقدار بارندگی به صورت ماهانه در دوره آماری ۲۹ ساله از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ می‌باشد. شاخص SEPI در مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه برای بررسی ویژگی خشکسالی و مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برای پیش‌بینی خشکسالی استفاده می‌شود با توجه به یافته‌های حاصل در این پژوهش، درصد فراوانی وقوع خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه در ایستگاه‌های ارومیه و سقز و مراغه در مقیاس ۶ ماهه بیش‌تر از مقیاس ۱۲ ماهه است اما در ایستگاه‌های تبریز و مهاباد شرایط بر عکس می‌باشد. و روند خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه افزایشی است و روند دما با شدت بیش‌تری روند افزایشی دارد. بیش‌ترین درصد وقوع خشکسالی در ایستگاه ارومیه و کم‌ترین آن در مهاباد مشاهده شد. نتایج حاصل از پیش‌بینی شاخص با مدل ANFIS نشان داد در رابطه کد نویسی بیش‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۵۱ درصد در ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه و کم‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۳۶ درصد در ایستگاه مراغه در مقیاس ۱۲ ماهه می‌باشد. در مدل‌سازی داده‌های اعتبارسنجی، میانگین خطای مدل‌سازی طبیعتاً بیش‌تر از میانگین خطای آموزشی می‌باشد.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی خشکسالی، شاخص SEPI، مدل ANFIS، دریاچه ارومیه، مقیاس ۶ و۱۲ ماهه

[1]- **نویسنده مسئول:** Email: s.asghari@uma.ac.ir

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

مقدمه

مساله اصلی اقلیمی مناطق خشک، خود خشکسالی نیست؛ بلکه عدم شناخت کافی از آن به‌عنوان یکی از پدیده‌های عادی طبیعی و عدم تنظیم برنامه‌ها و مصارف مختلف آب براساس آن شناخت است. موقعیت جغرافیایی ایران دو ویژگی اساسی دارد؛ نخستین ویژگی مهم جغرافیایی، کوهستانی بودن آن است و خصیصهٔ دیگر آن قرارگرفتن در کمربند خشک نیم‌کره شمالی است (رهنمایی،۱۳۷۰: ۱۰). خشکسالی یکی از مزمن‌ترین و زیان بارترین بلاهای طبیعی است که جمعیت‌های انسانی را تحت تاثیر قرار داده و باعث بروز بسیاری از مشکلات می‌گردد (محسنی‌ساروی و همکاران، ۱۳۸۳). خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی است که در همه اقلیم‌ها و مناطق جغرافیایی رخ می‌دهد، اما اثرات آن در مناطق خشک و نیمه خشک بیش‌تر ظاهر می‌شود (چناری، ۱۳۸۴). در مراتع استپی رود شور نیز در طول نه سال (به خصوص در دوره‌های خشک) با کاهش بارندگی، تراکم و سطح پوشش گیاهی به شدت کاهش یافته است (اکبرزاده و همکاران، ۱۳۸۵). نوسان بارندگی یکی از مهم‌ترین آب و هوای ایران است که آثار زیان‌بار آن در تمام عرصه‌های اجتماعی، اقتصادی و حتی سیاسی–امنیتی به نحوی منعکس می‌شود. در میان مسائل ناشی از بارندگی، خشکسالی هم از نظر شدت و فراوانی وقوع و هم از نظر وسعت فضایی و میزان خساراتی که به بار می‌آورد، اهمیت بیش‌تری دارد (زاهدی و قویدل‌رحیمی، ۱۳۸۶). از سویی واقع شدن ایران بر روی کمربند خشک جهانی موجب شده تا نوسانات بارندگی در کشور ما شدید باشد. به همین دلیل در برخی سال‌ها، در اثر طغیان آبی رودخانه‌ها، سیلاب رخ می‌دهند در حالی که مواقعی دیگر وقوع خشکسالی موجب آسیب‌های شدید می‌گردد. در عین حال زمانی که خشکسالی به موقع پیوسته، وقوع یک بارندگی نیز می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به بار آورد که نمونه این مورد در سال ۱۳۸۰ در استان گلستان به وقوع پیوست (مساعدی و مرعشی، ۱۳۸۸). طبق تعریف، خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی است که در نتیجه بارش کم‌تر از حد نرمال رخ می‌دهد. به تعبیر «اشنیدر» خشکسالی در یک منطقه عبارت است از میانگین بارندگی یک سال یا یک فصل که کم‌تر از میانگین بارندگی چند ساله آن منطقه باشد (حجازی‌زاده و جوی‌زاده، ۱۳۸۹: ۲۸). می‌تواند کوتاه و کم‌تر زیان بخش یا طولانی مدت، شدید و کشنده باشد و بلاخره این که، این شرایط چندسالی است، در کشورمان رخداد خشکسالی را شدت داده و اثرات زیان‌باری بر جای گذاشته است. ویژگی‌های خشکسالی در ایران نشان می‌دهد که بطور کلی هیچ منطقه‌ای از کشور، از این پدیده در امان نبوده و به نسبت موقعیت خود، از اثرات این پدیده مخرب تجربه می‌کند. نیاز به پایش و تعیین درجه شدت، تداوم، زمان وقوع و خاتمه خشکسالی، توزیع مکانی و زمانی آن از یک طرف و اظهار این عقیده که تعیین شرایط خشکسالی به عنوان یک ابزار مدیریتی و برنامه‌ریزی می‌باشد، پژوهشگران را به آن داشته تا شاخص‌هایی جهت پایش خشکسالی ارائه دهند و بر اساس این شاخص‌ها به بررسی این پدیده اقلیمی بپردازند. یکی از شاخص‌های جدید در بحث بررسی شایط خشکسالی، شاخص SEPI می‌باشد. این شاخص برای رفع قسمتی از معایب شاخص SPI ارائه شده است (انصاری و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۹). (شکری‌کوچک و بهنیا، ۱۳۹۲) در پژوهشی به پایش و پیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص خشکسالی SPI و زنجیره مارکوف پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیداند که در تمامی ایستگاه‌ها وضعیت تقریباً نرمال بر اساس شاخص SPI با مقیاس زمانی شش‌ماهه، بیش‌ترین فراوانی رادارا می‌باشد و میانگین تداوم دوره خشکسالی پیش‌بینی شده در مقیاس زمانی شش ماهه از حداقل سه ماه در ایستگاه پای‌پل تا حداکثر ۴/۶ ماه در ایستگاه سد شهدای بهبهان در نوسان بود. پیش‌بینی می‌شود به طور متوسط کل استان در ۱۰سال آینده ۳۵/۵ ماه درگیر خشکسالی خواهد شد. (حدادی و حیدری، ۱۳۹۴)، در تحقیقی برای شناسایی نوسانات بارش و دوره‌های خشکسالی از مدل SPI و از آزمون همبستگی اسپیرمن استفاده کرده‌اند. و به نتیجه رسیداند که با کاهش میزان بارش، از

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

میانگین دبی و انحراف معیار ایستگاه کاسته و معادله خط رگرسیونی دبی، روندی کاهشی را در پیش گرفته و تا به امروز این سیر نزولی ادامه یافته است. (منتصری و امیرعطایی، ۱۳۹۴)، در تحقیقی برای پیش بینی احتمالاتی خصوصیات مختلف خشکسالی در شمال غرب ایران با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تئوری ران وشاخص بارش استاندارد (SPI)، و روش استوکستیکی استفاده کرده‌اند. و به این نتیجه رسیداندکـه انتظـار خشکسالی‌هایی با تداوم پنج سال یا بیش‌تر در منطقه مطالعاتی تقریباً نزدیک به صفر بوده است. هم‌چنین نتایج مطالعه مؤید محدودیت اساسی داده‌های تاریخی درمطالعات پایش خشکسالی و ضرورت به کارگیری روش مونت‌کارلو برای استنتاج‌های دقیق و واقعی از پدیده خشکسالی هستند. خشکسالی یکی از وقایع محیطی و بخش جدایی‌ناپذیر نوسانات اقلیمی است. این پدیده از ویژگی‌های اصلی و تکرار شونده‌ی اقلیم‌های مختلف به شمار می‌رود. خشکسالی پدیده‌ای است که هر چند سال یک‌بار و در نتیجه کاهش میزان بارندگی در نقاط مختلف جهان به وقوع می‌پیوند و چنان‌چه کشاورزی پایدار نتواند در برابر این پدیده مقاومت کند قحطی بوجود خواهد آمد کران (kran,۱۹۹۰). خشکسالی یک رویداد یا واقعه اقلیمی است که خصوصیات آن بستگی به مدت، استمرار، شدت و وسعت منطقه تحت تاثیر و تسلط آن دارد کتا (keta, ۲۳ :۱۹۹۳). نیرآنجا و همکاران (Niranjana and et al, ۴۲ :۲۰۱۳) در مطالعه‌ی به تنوع مشاهده خشکسالی‌های موسمی در سراسر هند با استفاده از شاخص پایش خشکسالی، یعنی شاخص Evapo تعرق بارش، استاندارد شده (SPEI) پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیداند که تجزیه و تحلیل همبستگی کانونی (CCA) نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از تنوع خشکسالی که توسط ال نینو/نوسان جنوبی (ENSO) و تنوع خشکسالی‌های موسمی در سراسر هند به طور قابل توجه‌ی، توسط ناهنجاری دمای سطح دریا استوایی تحت تاثیر قرار دارد. جان‌درمیان و همکاران (Jain and et ۲۰۱۵ al,)، در پژوهشی به بررسی وضعیت خشکسالی دشت سراب و ارتباط آن با تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۱۰ پرداخته‌اند. بدین منظور از شاخص بارندگی استاندارد (SPI)، هیدروگراف واحد و کموگراف دشت استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد با این‌که در بیش‌تر سال‌ها خشکسالی در حد نرمال بوده است، اما افت سطح ایستابی و روند افزایشی شوری آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. لذا اعمال برنامه‌های مدیریت منابع آب در دشت سراب ضروری است. اسپینونی و همکاران، (Spinoni and et al, ۵۰۹ :۲۰۱۵). در پژوهشی به بررسی بزرگ‌ترین رویدادهای خشکسالی در اروپا از جمله روسیه، به استثنای گرینلند، جزایر قناری، آزور، و مادیر در سال‌های ۱۹۵۰-۲۰۱۲ با استفاده از شاخص‌های خشکسالی، شاخص بارش استاندارد، شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده بارش پرداخته‌اند، و به این نتیجه رسیداندکه محاسبه سری‌های زمانی از شاخص‌های ترکیبی برای هر منطقه و کشور بزرگ‌ترین رویدادهای خشکسالی در۱۹۵۰-۲۰۱۲ شمال اروپا و روسیه را نشان می‌دهد و بیش‌ترین فراوانی خشکسالی از اوایل ۱۹۹۰ به بعد در اروپا و جنوب غربی (به ویژه منطقه مدیترانه) می‌باشد. به طور کلی، یک افزایش کوچک اما مداوم از خشکسالی از اوایل ۱۹۸۰ به اوایل ۲۰۱۰ مناطق اروپا دچار شده است. هوانگ و همکاران(Huanga and et al, ۲۰۱۵)، در پژوهشی به ساختار خشکسالی بر اساس شاخص خشکسالی استاندارد ناپارامتری چند متغیره (NMSDI)، و روش موجک در سراسر حوضه رودخانه زرد، چین پرداخته‌اند، نتایج نشان می‌دهد که شاخص خشکسالی چند متغیره ناپارامتری قابل اعتماد و در توصیف خشکسالی موثر واقع شده، شروع خشکسالی در فصل، بهار تابستان و زمستان ترجیح بهبود خشکسالی در منطقه مورد مطالعه بوده است. مدت زمان متوسط، درازمدت خشکسالی در کل حوضه حدود ۵.۸ ماه، بوده است. به طور کلی، ساختار خشکی از لحاظ مدت زمان دوره خشکسالی، زمان شروع و پایان در منطقه مورد مطالعه پایدار باقی مانده، و حوادث ENSO به نمایان ارتباط آماری منفی با تغییرات NMSDI، نشان می‌دهد که آن‌ها اثرات قوی در تحولات خشکسالی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. (خشتکاری‌ثانی، ۲۰۱۵: ۱۸)، در تحقیقی به واکاری خشکسالی‌های استان آذربایجان غربی با شاخص SPI و GIS پرداخته و به این نتیجه رسیده است که بین سال‌های ۱۹۹۰ تا

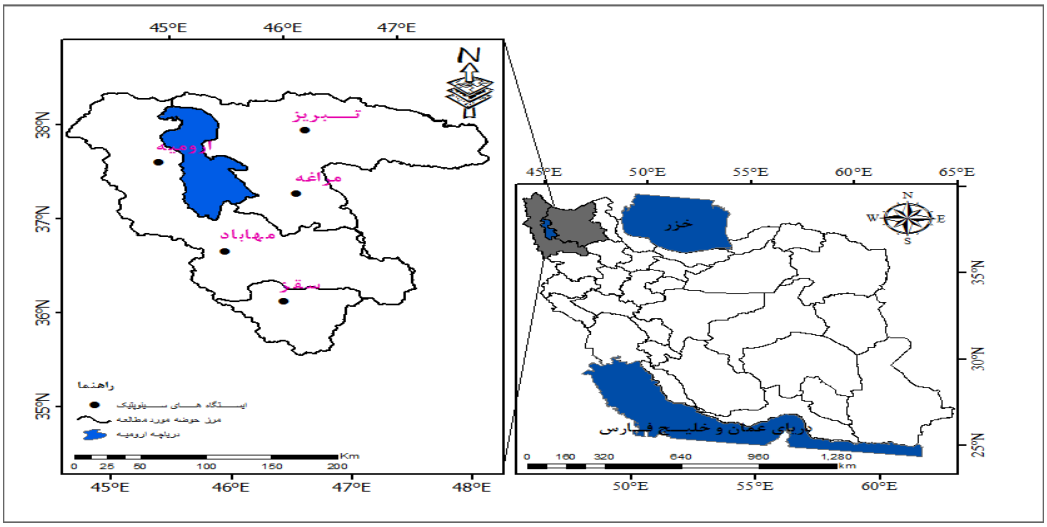
[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

۲۰۰۹ شدیدترین خشکسالی آذربایجان غربی در تکاب در طی این ۲۰ سال رخ داده است. هم‌چنین طولانی‌ترین تداوم خشکسالی نیز در جنوب استان و در ایستگاه تکاب با مدت تداوم ۷ سال به وقوع پیوسته است. تیوما و همکاران (Touma and et al, ۲۰۱۵)، درتحقیقی به بررسی ارتباط بین خشکسالی و تغییرات دما، بارش و رطوبت خاک با استفاده از چهار شاخص ارزیابی: (SPI)[۱]، (ERI)[۲]، (SEPI)[۳] و (SMDI)[۴]، مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. و به این نتیجه رسیده‌اند که احتمال افزایش خشکسالی‌های استثنایی مشخص شده است و افزایش خطر ابتلا به تنش ناشی از خشکسالی برای سیستم‌های طبیعی و انسانی ناشی از غلظت گازهای گلخانه‌ای به وجود خواهد آمد. مطالعه سوابق تحقیق نشان می‌دهد که پدیده خشکسالی در مناطق مختلف جهان با شرایط متفاوتی رخ می‌دهد.

در زمان‌های مختلف خشکسالی در ایران یکی از مسائلی بوده که باعث بروز خسارات و مشکلات شده است. این پدیده در ایران به طور کامل شناسایی نشده و هنوز نواحی مختلف کشور؛ از جمله حوضه دریاچه ارومیه نیازمند مطالعه و بررسی است. شناخت و پیش‌بینی موفق این رخداد می‌تواند کمک زیادی به بهبود زندگی این مناطق نماید و در مقابله با این پدیده و کاهش خسارات حاصل از آن کارساز باشد. با توجه به تعبانی که وقوع خشکسالی می‌تواند داشته باشد و لزوم شناخت و پیش‌بینی این پدیده برای آن، در این پژوهش سعی شده ویژگی خشکسالی در حوضه‌ی دریاچه ارومیه از ابعاد مختلف بررسی و امکان پیش‌بینی آن ارزیابی شود.

داده‌ها و روش‌کار

روش به کار رفته در این پژوهش، ترکیبی از مطالعات کتابخانه‌ای و تجربه و تحلیل‌های آماری است. داده‌های مورد استفاده مقدار بارندگی به صورت ماهانه در ایستگاه‌هایی حوضه دریاچه ارومیه است که از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. در شکل (۱) موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده ذکر شده است.



شکل ۱: موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

[۱]. (SPI: Standardized Percipitation Index) شاخص بارش استاندارد

[۲]. (ERI: Effective Rain Fall Index) شاخص بارش مؤثر

[۳]. (SEPI) ترکیب شاخص‌های SPI (شاخص بارش استاندارد) و SEI (شاخص تبخیر و تعرق استاندارد) براساس قواعد در سیستم استنتاج فازی

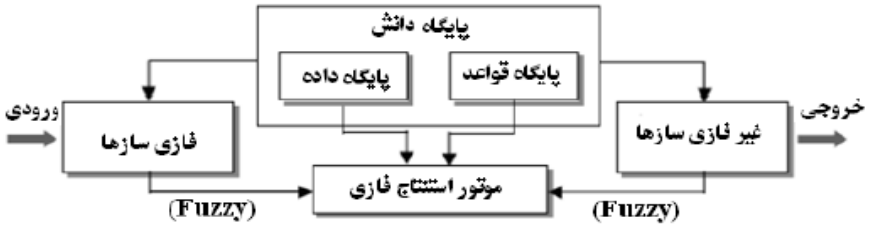
[۴]. (SMDI: Soil Moisture Drouyht Index) شاخص خشکسالی رطوبت خاک

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

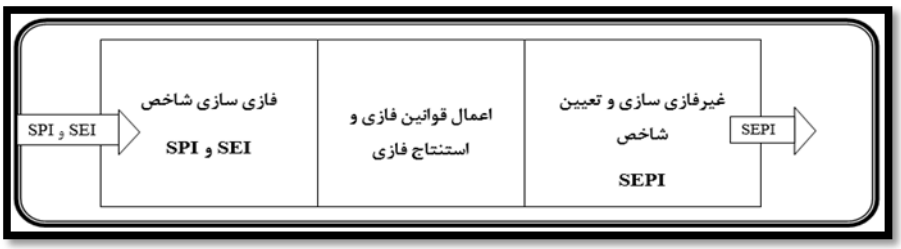
در این پژوهش از داده‌های ماهانه دما و بارش ایستگاه‌های ارومیه، تبریز، سقز، مراغه و مهاباد در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۱۴ استفاده شده است، برای بررسی همگنی داده‌ها از روش آزمون ران استفاده شد و تصادفی بودن و همگنی داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد تایید قرار گرفت.

شاخص فازی SEPI [۵]: شاخص تبخیر و تعرق و بارندگی استاندارد شده (SEPI) برای رفع قسمتی از معایب شاخص SPI ارائه شده است (انصاری و همکاران، ۱۳۸۹، ۴۰). شاخص تبخیر و تعرق و بارندگی استاندارد شده از تلفیق شاخص SPI و SEI حاصل می‌شود. این شاخص نتیجه معماری مدل فازی پایش خشکسالی است که با استفاده از منطق فازی در یک سیستم استنتاج فازی طراحی می‌شود. نحوه طراحی این مدل و تعیین شاخص SEPI در ادامه شرح داده شده است.

معماری فازی پایش خشکسالی: برای مشتق‌سازی شاخص‌های SPI و SEI با استفاده از سیستم استنتاج فازی، با توجه به ساختار مدل‌های فازی شکل (۲)، ساختار مدل فازی پایش خشکسالی به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شد.



شکل ۲: سیستم استنتاج فازی (سلاجقه و فتح آبادی، ۱۳۸۸،)



شکل ۳: مدل فازی پایش خشکسالی در تحقیق حاضر (ماخذ: نگارندگان)

بعد از تعیین ساختار مدل فازی، برنامه رایانه‌ای مربوط به محیط نرم‌افزار MATLAB طراحی می‌شود و با استفاده از این برنامه فایل‌های ورودی یعنی مقادیر شاخص SPI و شاخص SEI خوانده شده و مقادیر SEPI در فایل خروجی ارائه می‌گردد. طراحی مدل فازی پایش خشسالی در تحقیق حاضر بر محورهای زیر استوار است:

[۵]. (SEPI) ترکیب شاخص‌های SPI (شاخص بارش استاندارد) و SEI (شاخص تبخیر و تعرق استاندارد) براساس قواعد در سیستم استنتاج فازی

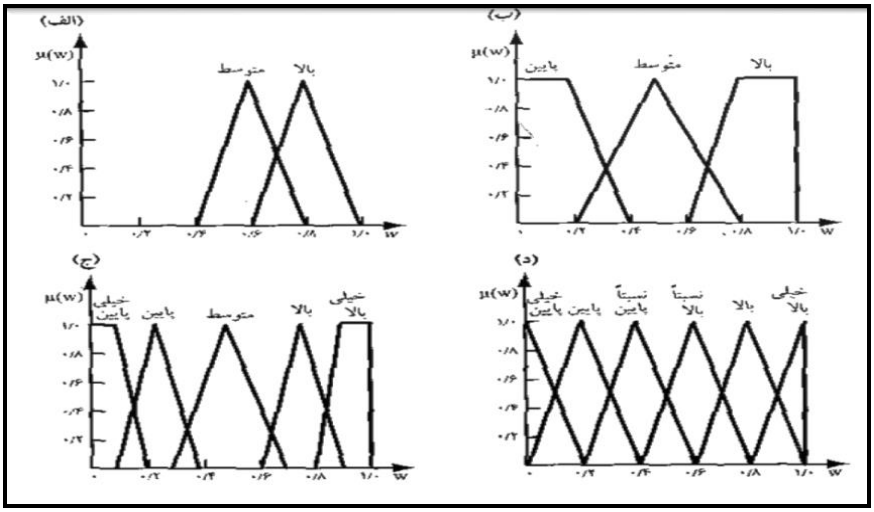
[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

متغیرهای زبانی و ارزش‌های زبانی: منظور از متغیر زبانی، متغیرهایی هستند که تصاویرشان عددی نیستند، بلکه کلمات یا جملاتی هستند که به زبان عادی بیان می‌شوند. ارزش‌ها هم شامل حالت‌هایی هستند که با مفاهیم زبانی نظیر خیلی کوتاه، کوتاه، متوسط، دراز، خیلی دراز، تند، خیلی تند، کوچک، متوسط، بزرگ و نظایر آن هستند که به متغیرهای زبانی نسبت داده می‌شود. در واقع این مفاهیم در عطف به یک متغیر پایه[۱] که ارزش‌ها و حالت‌های آن در طول یک دامنه خاص، تغییر می‌یابد، تعریف می‌شوند. در همین راستا، اگر تغییرات شرایط خشکسالی را به عنوان متغیر زبانی تلقی کنیم، شرایط ترسالی خیلی شدید، ترسالی شدید، ترسالی متوسط، ترسالی ملایم، شرایط نرمال، خشکسالی ملایم و ... معرف آن دسته از ارزش‌های زبانی هستند که حالت‌های مختلف خشکسالی را نشان داده و در عین حال هر یک نشان‌گر یک مجموعه فازی هستند در مثال خشکسالی با توجه به تعداد طبقات شاخص SPI، واژه زبانی نه گانه به کار گرفته می‌شود که از طیفی از تغییرات در قالب واژه‌های زبانی ترسالی خیلی شدید (WVH)، ترسالی شدید (WH)، ترسالی متوسط (WA)، ترسالی ملایم (WS)، شرایط نرمال (N)، خشکسالی ملایم (DS)، خشکسالی متوسط (DA)، خشکسالی شدید (DH) و خشکسالی خیلی شدید (DVH) در قالب مقیاس زبانی نه گانه نام برد. در پژوهش حاضر از این مقیاس در سنجش صورت وضعیت شرایط خشکسالی استفاده شده است انصاری و همکاران،(۱۳۸۹). اعداد فازی حامل بار عددی ارزش‌های زبانی و واژه‌های زبانی در طول یک دامنه مشخص از اعداد است. در واقع، هر عدد فازی در عطف به یک واژه زبانی و یک مجموعه فازی مطرح می‌شود. با تبدیل ارزش‌های زبانی به اعداد فازی، انجام عملیات‌های حسابی و منطقی بر روی آن‌ها، روال مشخصی به خود می‌گیرد.

فرض بر این است که اعداد فازی هر دو ویژگی نرمال بودن و تحدب را دارا می‌باشند. آن‌ها باید نرمال باشند زیرا عضویت حداکثر در مجموعه فازی برابر با عدد یک می‌باشد. هر عدد فازی یک مجموعه فازی محدب است. محدب بودن ایجاب می‌کند که تابع عضویت به صورت قطعه قطعه پیوسته[۲] بوده و نوک آن در مجاورت مرتفع‌ترین نقطه یا فاصله، آشکار باشد. علاوه بر بحث درجه عضویت، طول دامنه‌ای را نیز که بر روی آن موقعیت اعداد فازی تعریف می‌شود، معمولاً به شکل استاندارد شده و در قالب بازه بسته ۰ تا ۱ و یا ۰ تا ۱۰۰، در نظر می‌گیرند. (محورهای افقی در نمودارهای شکل زیر). به عنوان مثال اعداد فازی مربوط به شیب‌های پایین، متوسط و بالا در طول یک دامنه استاندارد شده مطابق با شکل زیر عبارتند از: (۰/۴، ۰/۲، ۰، ۰)= پایین، (۰/۸، ۰/۵، ۰/۲، ۰/۲) = متوسط و (۱ ،۱، ۰/۸، ۰/۶) = بالا. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود. تعداد اعداد فازی و بار عددی هر کدام بر روی یک دامنه استاندارد می‌توان به تناسب واژه‌های زبانی سه تایی، چهارتایی، هشت تایی و نظایر آن تعیین شود (شکل ۴) و جدول (۱)، (مالچسفکی، ۱۳۸۵، ۲۳۳).

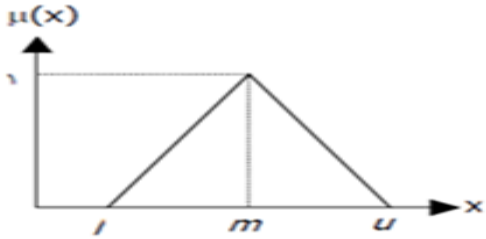
[۱]. base variable
[۲]-piecewise continuous

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]



شکل ۴: نمونه هایی از تبدیل واژه های زبانی به اعداد فازی (مأخذ: مالچسفکی، ۱۳۸۵)

انجام محاسبات با اعداد فازی به دلیل ساختار خاص آن‌ها بسیار زمان بر و پیچیده می‌باشد. برای تسهیل و کاربردی نمودن اعداد فازی، اعداد فازی خاصی در محاسبات به کار گرفته می‌شوند. این اعداد به صورت زنگوله‌ای، مثلثی، ذوذنقه‌ای، ذوذنقه ای L-R و مثلثی R-L و هم‌چنین آن رده از اعداد فازی‌اند که بر پایه توابع S, Z و II قرار دارند (مالچسفکی، ۲۳۴: ۲۴۳). برخی مواقع از این نوع طبقات مربوط به اعداد فازی تحت عنوان توابع عضویت استاندارد[۱] (یا اعداد فازی استاندارد) یاد می‌شود. در این نوع اعداد نیز تعیین تابع عضویت از یک قاعده خاصی پیروی می‌کند. در این راستا به عنوان مثال می‌توان به یک عدد فازی مثلثی اشاره کرد که سه تایی مرتب $(l,m^{-}\ u)$ قابل نمایش است (شکل ۵) که l و u حدود پایینی و بالایی هستند و m مقدار میانه می‌باشد و x عنصری بین l و u که در رابطه ۱ نمایان‌گر است.



شکل ۵: نمایش اعداد مثلثی (وجهه اول)

تابع عضویت اعداد فازی به صورت رابطه ($\mu_A(x)$) است.

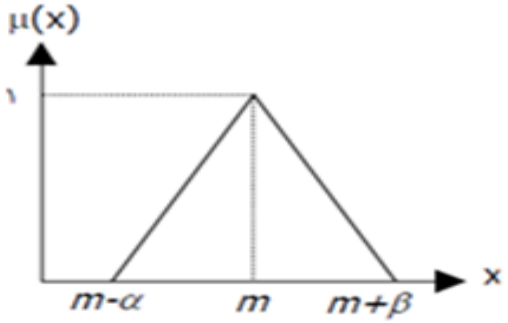
[۱]- standard membership functions

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-۱}{m-۱} & ۱ < x < m \\ ۱ & x = m \\ \frac{u-x}{u-m} & m < x < u \\ ۰ & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

رابطه(۱): تابع عضویت فازی

در بعضی از مراجع عدد فازی مثلثی A را با سه تایی مرتب (α, m, β) نمایش می‌دهند. شکل (۶) که m را مقدار میانه و α و β را به ترتیب پهنای چپ و پهنای راست عدد A می‌نامند. در این صورت تابع عضویت عدد فازی A به صورت رابطه (۲) است.



شکل ۶: نمایش اعداد مثلثی (وجهه دوم)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-(m-\alpha)}{\alpha}; & m-\alpha \le x \le m \\ \frac{(m+\beta)-x}{\beta}; & m \le x \le m+\beta \end{cases}$$

رابطه(۲): تابع عضویت

یکی از راه‌هایی که می‌توان واژه‌های زبانی را در یک اسلوب منظم، به اعداد فازی متناظر با آن‌ها تبدیل کرد استفاده از جدول تبدیل ارایه شده است. در این راستا، مطابق با جدول (۲) به تناسب ارزش‌های دو گانه تا ۱۱ گانه می‌توان یکی از مقیاس‌های تبدیل واژه‌های زبانی به اعداد فازی را انتخاب کرد (صفری و همکاران، ۱۳۸۲: ۱۵۶).

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

جدول ۱: تبدیل واژه‌های زبانی به اعداد فازی(مأخذ: مالچسفکی، ۱۳۸۵: ۲۳۸)

تبدیل واژه های زبانی به اعداد فازی					
واژه زبانی	دو	سه	پنج	هفت	نه
خیلی پایین			۰/۲، ۰/۱، ۰، ۰	۰/۲، ۰/۱، ۰، ۰	۰/۱، ۰، ۰، ۰
پایین تا خیلی پایین					۰/۲، ۰/۱، ۰/۱، ۰
پایین		۰/۴، ۰/۲، ۰، ۰	۱، ۰/۲۵، ۰/۲۵، ۰/۴	۰/۳، ۰/۲، ۰/۲، ۱	۰/۴، ۰/۲، ۰/۲،۰
پایین تا متوسط				۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲	۰/۵، ۰/۳۵، ۰/۳۵، ۰/۲
متوسط	۰/۸، ۰/۶، ۰/۶، ۰/۴	۰/۸، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۲	۰/۷، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۳	۰/۶، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۴	۰/۷، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۳
متوسط تا بالا				۰/۸، ۰/۷، ۰/۶، ۰/۵	۰/۸، ۰/۶۵، ۰/۶۵، ۰/۵
بالا	۱، ۰/۸، ۰/۸، ۰/۶	۱، ۱، ۰/۸، ۰/۶	۰/۹، ۰/۷۵، ۰/۷۵، ۰/۶	۰/۹، ۰/۸، ۰/۸، ۰/۷	۱، ۰/۸، ۰/۸، ۰/۶
بالا تا خیلی بالا					۱، ۰/۹، ۰/۹، ۰/۸
خیلی بالا			۱، ۱، ۰/۹، ۰/۸	۱، ۱، ۰/۹، ۰/۸	۱، ۱، ۱، ۰/۹

جدول ۲: تعداد واژگان زبانی به کار رفته در منطق فازی (مأخذ: صفری و همکاران،۱۳۸۲)

مقیاس	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
تعداد واژگان استفاده شده	دو	سه	پنج	پنج	شش	هفت	نه	یازده
هیچ								√
خیلی کم			√		√	√	√	√
کم تا خیلی کم							√	
کم		√	√	√	√	√	√	√
نسبتاً کم				√	√		√	√
کم و بیش کم						√		√
متوسط	√	√	√	√		√	√	√
کم و بیش زیاد						√		√
نسبتاً زیاد				√	√		√	√
زیاد	√	√	√	√	√	√	√	√
زیاد تا خیلی زیاد							√	
خیلی زیاد			√		√	√	√	√
عالی								√

با توجه به آن که در تحقیق حاضر شاخص های خشکسالی SPI و SEI که صورت وضعیت های خشکسالی را در نه طبقه نشان می دهند، با استفاده از مقیاس تبدیل ارایه شده از سوی چن و هوانگ، این واژه‌های زبانی نه گانه به عدد فازی

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

متناظر تبدیل شد. دامنه مقادیر طبقات در شاخص های SPI و SEI در حد فاصل ۲- و ۲+ قرار دارد و این شاخص‌ها از نظر دامنه تغییرات در مقدار طبقات برعکس هم می‌باشند. به این صورت که در شاخص SPI با تغییرات دامنه اعداد از منفی به مثبت شرایط از خشکسالی به ترسالی و در شاخص SEI از ترسالی به خشکسالی تغییر می‌کند. برای تلفیق این شاخص‌ها باید دامنه تغییرات در شاخص‌ها یکسان شود و اعداد به صورت استاندارد در آید. بنابراین مقادیر طبقات و شاخص‌ها به معادل ۰ تا ۱ تبدیل می‌شوند. در این صورت تغییرات مقدار شاخص‌ها از ۰ به طرف ۱، تغییرات شرایط از ترسالی به خشکسالی را نشان خواهد دارد. همان‌طوری که بیان شد نحوه تغییرات مقدار اعداد شاخص های SPI و SEI برعکس هم می‌باشد. بنابراین برای این‌که مقدار هر دو شاخص در یک شرایط بین ۰ تا ۱ باشد، از فرمول متفاوتی برای هر یک استفاده می‌شود. پس برای استاندارد سازی شاخص SPI از رابطه (۳) و شاخص SEI از رابطه (۴) استفاده می‌شود. به این صورت رنج تغییرات هر دو شاخص یکسان خواهد شد.

رابطه (۳)

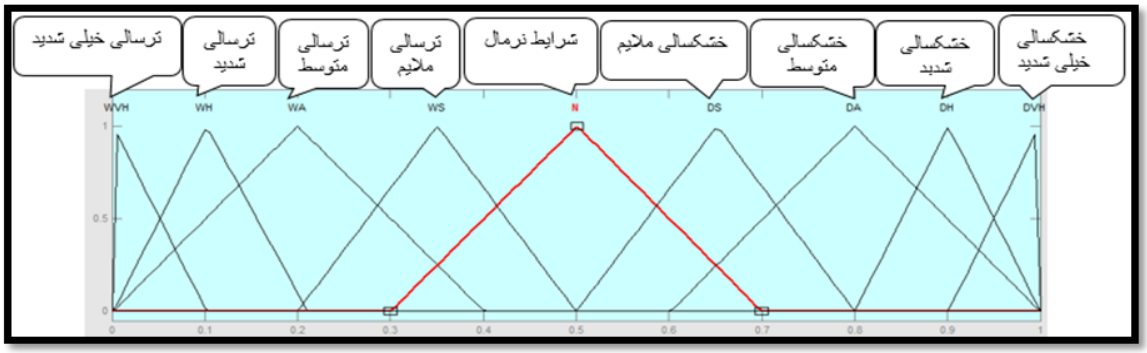
$$X_{ij} = \frac{x_j max - x_j}{x_j max - x_j min}$$

رابطه (۴)

$$X_{ij} = \frac{x_j - x_j min}{x_j max - x_j min}$$

در این روابط X_{ij} معرف مقدار استاندارد شده، x_j مقدار شاخص مورد نظر، $x_j max$ بیش‌ترین مقدار موجود در سری اعداد و $x_j min$ معرف کم‌ترین مقدار در سری اعداد می‌باشد (مالچسفکی، ۱۳۸۵: ۲۱۳).

یکی از راه‌هایی که می‌توان واژه‌های زبانی را در قالب منظم، به اعداد فازی متناظر با آن‌ها تبدیل کرد استفاده از جدول تبدیل ارائه شده توسط هوانگ است (صفری و همکاران، ۱۳۸۲: ۱۵۶). باتوجه به آن که در تحقیق حاضر شاخص‌های خشکسالی SPI و SEI که به صورت وضعیت‌های خشکسالی را در نه طبقه نشان می‌دهند، با استفاده از جدول تبدیل ارائه شده از سوی (هوانگ و چن، ۲۰۱۵) این واژه‌های زبانی نه گانه به عدد فازی متناظر تبدیل شد(شکل۷).



شکل ۷: نمایش اعداد فازی مورد استفاده در عطف به متغیرهای زبانی نه گانه

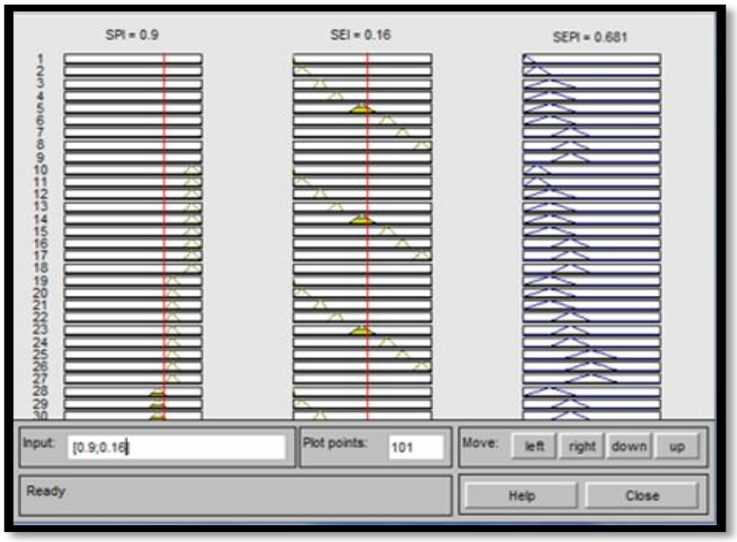
[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

تعیین قواعد جهت تلفیق شاخص های SPI و SEI: طبقات مختلف شاخص SPI و SEI بر پایه قواعد یا همان ترکیبی از گزاره‌های شرطی در قالب اگر، که به یک طبقه از شاخص SEPI در قالب آن‌گاه منتهی شود، تعریف می‌شود. این قاعده فقط یک ترکیب از حالت‌های مختلف شاخص‌های SPI و SEI را که به شاخص SEPI منتهی می‌شوند، نشان می‌دهد. در همین راستا، به تناسب صورت مختلف ترکیبی می‌توان قواعد متوالی را نوشته و در پایگاه دانش ذخیره کرد. با توجه به این‌که در خروجی حاصل از برآیند ترکیب، شاخص‌های SPI و SEI در تعیین وضعیت SEPI دخالت داده شود، وزن هر کدام از شاخص‌ها با توجه به تأثیر پارامتر بارندگی و درجه حرارت بر شدت خشکسالی مد نظر قرار گرفت در نتیجه شاخص‌های SPI و SEI به ترتیب با وزن‌های ۰/۶۶۷ و ۰/۳۳۳ در محاسبات دخالت داده شدند. برای نوشتن قاعده در محیط MATLAB از به عنوان الگوی راهنما و رابطه (۵) در عطف به داده‌های این جدول استفاده شد (افروز و همکاران، ۱۳۹۰). جدول مذکور حامل عناصری است که به کمک آن می‌توان قاعده‌ای را که منعکس کننده شرایط خشکسالی است، تعریف کرد.

$$IFF \quad SPI.is.WH.AND.SEI.is.WS. \quad THEN.SEPI.is.WA$$

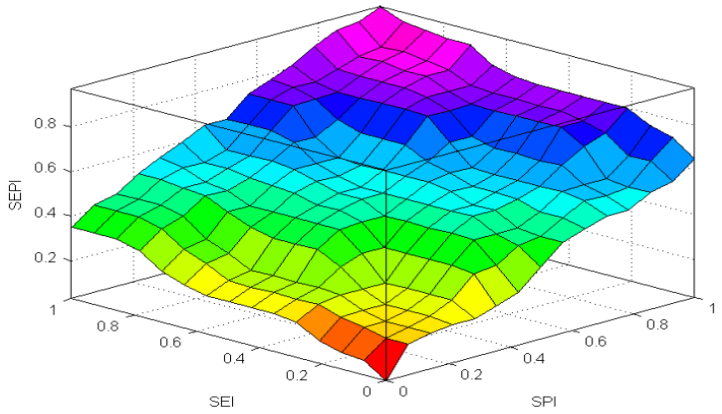
رابطه(۵) نمونه قاعد وارد شده در جدول قوانین

وارد کردن قواعد فازی در محیط متلب (MATLAB): بعد از تدوین قواعد مورد نظر برای واردکردن این قواعد در محیط MATLAB در قالب پایگاه دانش فازی و سیستم استنتاج فازی از جعبه ابزار Fuzzy logic استفاده می‌کنیم. در مرحله بعد می‌توان با استفاده از ابزارهای نمایشگر قاعده (Rule Viewer) با وارد کردن مقدار شاخص های SPI و SEI مقدار شاخص SEPI را به دست آورد. به عنوان مثال در شکل (۸) در قسمت INPUT با وارد کردن مقدار شاخص های SPI و SEI که به ترتیب ۰/۹ و ۰/۱۶ می‌باشد، شاخص SEPI به مقدار ۰/۶۸ به دست آمده است در نمایش‌گر (Surface Viewer) نیز به تناسب تغییرات مقادیر شاخص‌های ورودی SPI و SEI می‌توان فراز و فرودهای سطوح شاخص SEPI را در یک نمای گرافیکی دنبال کرد (شکل ۹).



[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

شکل ۸: نمایی از Rule Viewer **در محیط** MATLAB



شکل ۹: نمایی از Surface Viewer **در محیط** MATLAB

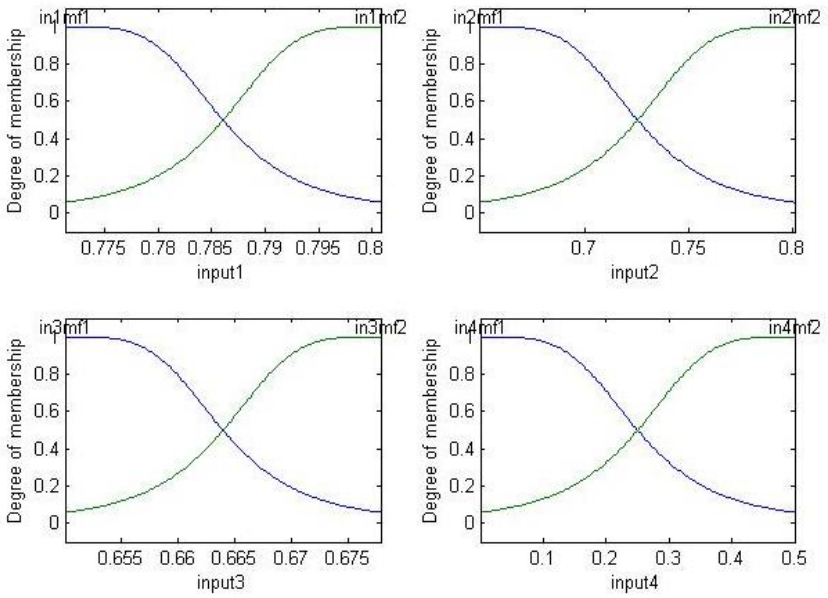
پس از این‌که شاخص فازی SEPI به طریق بیان شده به دست آمد، نحوه تاثیر دما و بارندگی در خشکسالی ایستگاه‌های مورد مطالعه، بررسی شد. سپس به پایش خشکسالی پرداخته می‌شود. در پایش خشکسالی بر اساس شاخص SEPI، روند، شدت تداوم و درصد فراوانی وقوع خشکسالی را مورد بررسی قرار می‌گیرد. روند شاخص‌های مورد بررسی با روش روند خطی تعیین می‌شود. برای به دست آوردن درصد فراوانی وقوع خشکسالی در طبقات مختلف، از رابطه Frequency استفاده شد.

بخش دوم روش‌یابی پیش‌بینی در انفیس با استفاده از کد نویسی در محیط متلب: در این روش نیز از SEPI ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه استفاه شده است که برای بدست آوردن توابع عضویت تولید شده توسط Genfis۱، کل فضای ورودی را پوشش می‌دهند. می‌توان با استفاده از دستورات زیر، توابع عضویت ورودی را رسم کرد:

```
Figure(۲)
Subplot (۲, ۲, ۱)
Plotmf (fismat,'input', ۱)
Subplot (۲, ۲, ۲)
Plotmf (fismat,'input', ۲)
Subplot (۲, ۲, ۳)
Plotmf (fismat,'input', ۳)
Subplot (۲, ۲, ۴)
Plotmf (fismat,'input', ۴)
```

پس از اجرای دستورات بالا، نمودارهای شکل‌های، شکل (۱۰) نمایش داده می‌شود.

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]



شکل ۱۰:توابع عضویت ورودی ایستگاه تبریز در دوره ۱۲ ماهه

برای شروع روال آموزش دستور زیر را اجرا می‌کنیم:

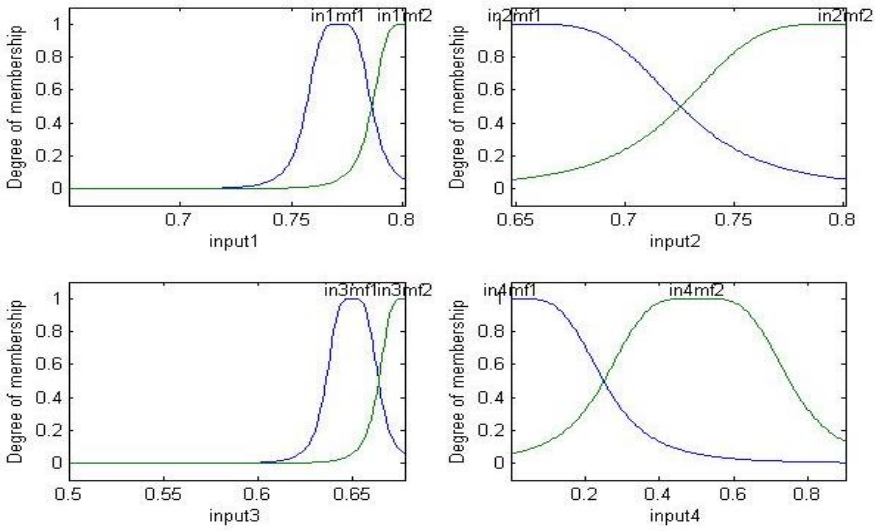
[fismat۱, error۱, ss, fismat۲, error۲]=anfis (trnData, fismat, [], [], chkData);

از آن‌جا که داده‌های وارسی به این تابع ارسال شده‌اند، Fis نهایی متناظر با کم‌ترین خطای روی مجموعه وارسی خواهد بود. نتیجه در Fismat۲ دخیره می‌شود. با اجرای دستورات زیر می‌توان تابع عضویت جدید به دست آمده را رسم می‌کنیم:

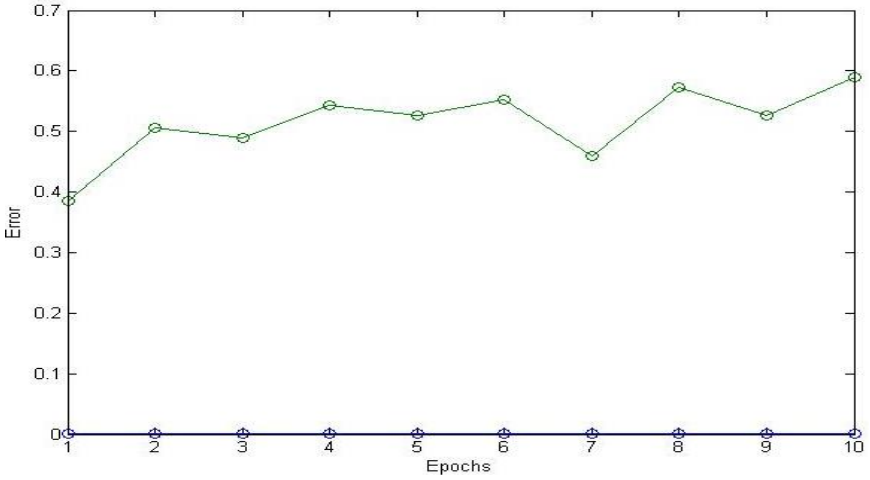
```
Figure (۳)
Subplot (۲, ۲, ۱)
Plotmf (fismat۲,'input', ۱)
Subplot (۲, ۲, ۲)
Plotmf (fismat۲,'input', ۲)
Subplot (۲, ۲, ۳)
Plotmf (fismat۲,'input', ۳)
Subplot (۲, ۲, ۴)
Plotmf (fismat۲,'input', ۴)
```

نمودارهای حاصل به صورت شکل(۱۱) خواهد بود.

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]



شکل ۱۱:توابع عضویت جدید پس از آموزش در دوره ۱۲ ماهه



شکل ۱۲: نمودار خطا ایستگاه تبریز در دوره ۱۲ ماهه

هم‌چنین برای رسم نمودارهای خطا از دستورهای زیر استفاده می‌کنیم:

```
Figure (۵)
Plot ([error۱ error۲])
Hold on
Plot ([error۱ error۲],'o')
```

در نمودار شکل (۱۲) جذر میانگین مربعات خطاها رسم شده است. منحنی بالایی شکل بالا مربوط به خطاهای آموزشی(Error۱) و منحنی پایین مربوط به خطای داده‌های وارسی (Error۲) و جدول (۳) میانگین خطای آموزش و میانگین خطای اعتبارسنجی مدل‌سازی به درصد ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه نشان می‌دهد. و برای به‌دست آوردن و درست کردن سری‌های زمانی و پیش‌بینی و هم‌چنین میانگین‌های خطاها از دستورهای زیر به دست می‌آید:

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

```
anfis_output=evalfis ([trnData (: ۱:۴); chkData (: ۱:۴)], fismat۲)
Figure (۴)
Plot ([sepi; anfis_output]);
avg۱=sum (error۱)/numel (error۱);
avg۱=vpa (avg۱)
avg۲=sum (error۲)/numel (error۲)
```

جدول ۳:میانگین خطای آموزش و میانگین خطای اعتبارسنجی مدل‌سازی به درصد ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه (مأخذ: نگارندگان)

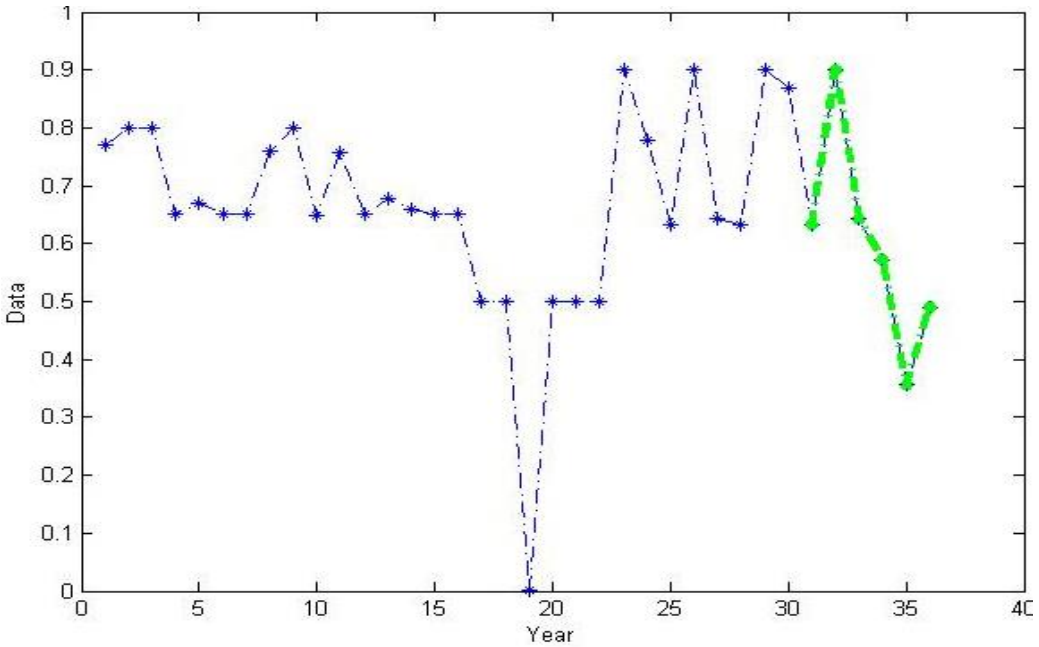
میانگین خطای آموزشی	میانگین خطای اعتبارسنجی، داده وارسی
۰/۵۱۴۹	۱/۵۷۶۲

در شکل (۱۳) مقدار پیش‌بینی شده برای ۶ سال آینده، با رنگ سبز و مقدار مشاهده شده شده با رنگ خط ستاره گونه آبی رنگ قابل مشاهده و مقدار پیش‌بینی شده برای سال‌های آینده در جدول (۴) برای ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه به‌دست آمده است.

جدول ۴: مقدار پیش‌بینی به‌دست آمده از مدل‌سازی Sepi به درصد، ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه برای ۶ سال آینده

سال‌های آینده	مقدار پیش‌بینی شده
۲۰۱۵	۰/۶۳۳۳
۲۰۱۶	۰/۹۰۰۲
۲۰۱۷	۰/۶۴۳۱
۲۰۱۸	۰/۵۷۲۴
۲۰۱۹	۰/۳۵۵۷
۲۰۲۰	۰/۴۹۰۴

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]



شکل ۱۳: سال‌های مشاهده شده و سال‌های پیش‌بینی برای ۶ سال آینده ایستگاه تبریز در دوره ۱۲ ماهه

به این ترتیب می‌توان شاخص خشکسالی SEPI را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه پیش‌بینی نموده و توان مدل شبکه عصبی-فازی Anfis را در مدل‌سازی و پیش‌بینی روند تغییرات سری‌زمانی شاخص ذکر شده مورد ارزیابی قرار داد.

شرح و تفسیر نتایج

پایش خشکسالی به تفکیک ایستگاه‌ها: براساس شاخص SPI (که شدت طبقات در حد فواصل ۲- تا ۲+ قرار دارد) خشکسالی برای مقیاس ماهانه به این صورت تعریف می‌شود: دوره‌ای که SPI دائماً منفی باشد و به مقدار ۱- و کم‌تر برسد و زمانی پایان می‌پذیرد که SPI مثبت شود. با توجه به این که طبقات خشکسالی شاخص SEPI تقریباً مشابه شاخص SPI می‌باشد اما طبقات آن بین ۰ و ۱ قرار دارد بعد این که مقادیر طبقات خشکسالی شاخص SPI در حد فاصل ۰ تا ۱ قرار بگیرد، مقادیر منفی اعداد بین ۰/۵ تا ۱ خواهد بود و ۱- هم معادل ۰/۷۳ خواهد شد(در نمودار ۱ تا ۱۰ خط فلش قرمز رنگ مقطع مرز خشکسالی با مقدار ۰/۷۳ و بیش‌تر را نشان می‌دهد). بنابراین در شاخص SEPI می‌توان خشکسالی برای مقیاس ماهانه را به این صورت تعریف کرد: دوره‌ای که SEPI دائماً بیش‌تر از۰/۵ و به مقدار ۰/۷۳ و به بیش‌تر برسد و زمانی پایان می‌پذیرد که SEPI کم‌تر از ۰/۵ شود. بر اساس اعداد فازی مورد استفاده در عطف به متغیرهای زبانی، طبقات خشکسالی و ترسالی در شاخص SEPI و مقادیر آن‌ها در جدول (۵) مشخص شده است. شدت خشکسالی براساس مقادیر طبقات مشخص شده در این جدول بررسی می‌شوند.

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

جدول ۵: طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص فازی SEPI

طبقات خشکسالی	مقادیر شاخصSEPI
خشکسالی خیلی شدید	۰/۹۵ – ۱
خشکسالی شدید	۰/۸۶ – ۰/۹۵
خشکسالی متوسط	۰/۷۳ – ۰/۸۶
خشکسالی ملایم	۰/۵۸ – ۰/۷۳
نرمال	۰/۴۳ – ۰/۵۸
ترسالی ملایم	۰/۲۸ – ۰/۴۳
ترسالی متوسط	۰/۱۴ – ۰/۲۸
ترسالی شدید	۰/۰۵ – ۰/۱۴
ترسالی خیلی شدید	۰ - ۰/۰۵

برای پایش وضعیت خشکسالی، شدت، تداوم زمانی، روند و درصد فراوانی وقوع خشکسالی در شاخص SEPI براساس نمودارهای ۱ تا ۱۰ بررسی می‌شود. بررسی شدت خشکسالی‌های رخ داده نشان می‌دهند در ایستگاه ارومیه در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی در ماه‌های سپتامبر، آگوست سال ۲۰۰۰ هر دو ماه با مقدار ۰/۹۰ و در ماه ژولای سال ۲۰۰۳ با مقدار ۰/۹۱ رخ داده است. در مقیاس ۱۲ ماهه نیز ماه سپتامبر ۲۰۰۸ با مقدار ۰/۸۵ رخ داده است. که شدت خشکسالی در مقیاس ۱۲ ماهه نسبت به مقیاس ۶ ماهه این ایستگاه ضعیف‌تر است. اما در ایستگاه تبریز در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی در ماه‌های ژوئن ۲۰۰۶، سپتامبر سال ۲۰۰۷ هر دو ماه با مقدار ۰/۸۹ و در ماه آگوست سال ۲۰۱۳ با مقدار ۰/۹۱ رخ داده است. در مقیاس ۱۲ ماهه نیز ماه ژوئن ۲۰۱۳ با مقدار ۰/۹۰ رخ داده است. در ایستگاه سقز در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی در ماه‌های اکتبر ۱۹۸۵، با مقدار ۰/۹۰ و ماه ژولای سال ۱۹۸۷ با مقدار ۰/۸۶ رخ داده است. در مقیاس ۱۲ ماهه نیز ماه ژوئن ۲۰۱۳ و ماه آگوست هر دو با مقدار ۰/۹۰ رخ داده است. اما در ایستگاه مراغه در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی در ماه مه ۲۰۰۴، با مقدار ۰/۹۰ و در مقیاس ۱۲ ماهه نیز ماه اکتبر ۲۰۱۰ با مقدار ۰/۹۰ رخ داده است. ایستگاه مهاباد در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی در ماه ژولای ۲۰۰۲، با مقدار ۰/۸۹ رخ داده است. و در مقیاس ۱۲ ماهه نیز ماه آگوست ۲۰۰۶ با مقدار ۰/۹۱ رخ داده است. از نظر مقدار شدت خشکسالی ایستگاه ارومیه شدیدتر از بقیه ایستگاه‌ها است. از نظر شدت خشکسالی که مورد بررسی قرار گرفت هر ۵ ایستگاه مورد مطالعه دارای خشکسالی می‌باشند به عبارتی شاخص SEPI بالای ۰/۷۳ را می‌توان مشاهده کرد. مقایسه خشکسالی در دو مقیاس زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد که در مقیاس ۶ ماهه شدت و تکرار خشکسالی بیش‌تر بوده است ولی در مقیاس ۱۲ ماهه از شدت خشکسالی به نسبت کاسته شده ولی بر تداوم اضافه شده است. به عبارتی خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی کوتاه مدت از تداوم زیادی برخوردار نبوده و شدیداً تحت تاثیر بارندگی ماهانه می‌باشند. در حالی که خشکسالی در دوره‌های زمانی بلند مدت واکنش بسیار کندتری نسبت به تغییرات بارش نشان می‌دهند، بنابراین تداوم خشکسالی طی دوره‌های بلندت مدت بیش‌تر از دوره‌های کوتاه مدت است. بررسی انجام شده در رابطه با روند شاخص‌ها (با توجه به نمودارهای ۱ تا ۱۰) نشان داد، شاخص SEPI در هر ۵ ایستگاه روند افزایشی داشته است. بنابراین با توجه به این که ویژگی نهایی خشکسالی با استفاده از شاخص SEPI بررسی شده است می‌توان گفت خشکسالی در حوضه

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

دریاچه ارومیه روند افزایشی دارد. روند شاخص SPI، روند مقدار بارندگی در طول دوره آماری را نشان می‌دهد. در زمانی که این شاخص روند افزایش داشته و رو به خشکسالی می‌رود، و روند بارندگی کاهشی بوده و برعکس. روند شاخص SPI (ایستگاه مهاباد در هردو مقیاس ۱۲ و ۶ ماهه، و ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه و ارومیه در مقیاس ۱۲ ماهه) نیز مشابه شاخص SEPI افزایشی می‌باشد. شاخص SEI نیز در همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه (سقز روند کاهشی)، روند افزایشی می‌باشند. اما شدت افزایش در هر شاخص SEI شدیدتر از شاخص SPI و SEPI می‌باشد و نشان می‌دهد که دمای هوای در حوضه دریاچه ارومیه با شدت بیش‌تری رو به افزایش دارد. فراوانی خشکسالی اهم ویژگی‌ها در بررسی خشکسالی یک منطقه به شمار می‌آید. محاسبه درصد توزیع فراوانی در شدت‌های مختلف می‌تواند در ارزیابی قابلیت منطقه مورد مطالعه نسبت به شدت‌های مختلف خشکسالی کاربرد داشته باشد (فرجزاده، ۱۳۸۴، ۱۷). درصد فراوانی وقوع خشکسالی در طبقات مختلف در مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول(۶) بیان شده است.

جدول ۶: درصد فراوانی وقوع خشکسالی در طبقات مختلف در مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه

	درصد فراوانی وقوع خشکسالی در مقیاس زمانی ۶ ماهه					درصد فراوانی وقوع خشکسالی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه				
طبقات خشکسالی	ارومیه	تبریز	مهاباد	سقز	مراغه	ارومیه	تبریز	مهاباد	سقز	مراغه
خشکسالی خیلی شدید	۰/۷۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
خشکسالی شدید	۱۱/۶۸	۲/۷	۳/۶	۱/۷۶	۰/۹۰	۰	۳/۵۶	۲/۷	۱/۸	۰/۹۰
خشکسالی متوسط	۰/۷۴	۳/۱۵	۱/۵	۹/۱۳	۳/۹۲	۶/۱۱	۵/۴۴	۰/۷۴	۵/۴۶	۴/۶
خشکسالی ملایم	۵/۸۵	۱۱/۰۳	۱۰/۲۸	۷/۸۹	۱۱/۷۷	۱۰/۶۶	۸/۴۲	۱۲/۸۵	۹/۹۷	۱۱/۸۴
نرمال	۳/۵	۳	۴	۲	۲	۳/۵	۲/۵	۲	۰/۵۰	۲/۵
ترسالی ملایم	۰/۳۸	۰/۲۸	۰/۴۰	۰	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۳۸	۰	۰/۴۰
ترسالی متوسط	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترسالی شدید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ترسالی خیلی شدید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۱۳/۱۴	۵/۸۵	۵/۱	۱۰/۸۹	۴/۸۲	۶/۱۱	۹	۳/۴۴	۷/۲۶	۵/۵

با توجه به تعریفی که از خشکسالی بر اساس شاخص SEPI ارائه شد، مقادیر ۰/۷۳ و بالاتر یا از طبقه خشکسالی ملایم به بالاتر به عنوان شرایط خشک مطرح می‌شود بر این اساس در مقیاس زمانی ۶ ماهه در ایستگاه ارومیه با ۱۳/۱۴ درصد، ایستگاه سقز با ۱۰/۸۹ درصد، ایستگاه تبریز با ۵/۵۸ درصد، ایستگاه مهاباد با مقدار ۵/۱ درصد و ایستگاه مراغه با مقدار

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

۴/۸۲ درصد، موارد خشکسالی رخ داده است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه تبریز با ۹ درصد، ایستگاه سقز با ۷/۲۶ درصد، ایستگاه ارومیه با ۶/۱۱ درصد، ایستگاه مراغه با مقدار ۵/۵ درصد و ایستگاه مهاباد با مقدار ۳/۴۴ درصد، از ماه‌های مورد مطالعه در سری زمانی، خشکسالی اتفاق افتاده است.

پیش‌بینی خشکسالی: میانگین خطای آموزش و میانگین خطای اعتبار سنجی مدل‌سازی در جدول (۷)، مقیاس ۶ ماهه در جدول (۸)، مقیاس ۱۲ ماهه و مقدار پیش‌بینی شده SEPI در مقیاس ۱۲ ماهه، در جدول (۹) و مقیاس ۱۲ ماهه در جدول (۱۰) برای ۵ ایستگاه مورد مطالعه برای ۶ سال آینده با استفاده از کدهای که به صورت دستی حاصل شده به تفکیک ایستگاه‌ها در سری زمانی جداگانه ارائه شده است.

جدول ۷: میانگین خطای آموزشی و میانگین خطای اعتبار سنجی مدل‌سازی به درصد

	خطایابی در مقیاس ۶ ماهه	
ایستگاه-ها	میانگین خطای اعتبارسنجی، داده وارسی	میانگین خطای آموزشی
ارومیه	۴/۱	۰/۶۳
تبریز	۳/۲	۰/۳۲
سقز	۳/۶	۰/۶۵
مراغه	۴/۲	۰/۳۶
مهاباد	۳/۴	۰/۴۰

جدول ۸: مقدار پیش‌بینی شده SEPI در مقیاس ۶ ماهه، ۵ ایستگاه مورد مطالعه برای ۶ سال آینده

ایستگاه‌ها	مهاباد	مراغه	سقز	تبریز	ارومیه
سال‌های پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی	مقدار پیش-بینی	مقدار پیش-بینی	مقدار پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی
۲۰۱۵	۰/۵	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۹۰
۲۰۱۶	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۶۳	۰/۹۰
۲۰۱۷	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۸۰	۰/۶۳	۰/۹۰
۲۰۱۸	۰/۷۳	۰/۴۴	۰/۱۶	۰/۵۴	۰/۰۹
۲۰۱۹	۰/۱۰	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۶۰	۰/۶۶
۲۰۲۰	۰/۶۶	۰/۴۴	۰/۰۹	۰/۵۱	۰/۴۱

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

جدول ۹: میانگین خطای آموزشی و میانگین خطای اعتبار سنجی مدل‌سازی به درصد

	خطایابی در مقیاس ۱۲ماهه	
ایستگاه‌ها	میانگین خطای اعتبارسنجی، داده وارسی	میانگین خطای آموزشی
ارومیه	۳/۴	۰/۵۰
تبریز	۱/۵	۰/۵۱
سقز	۲/۵	۰/۳۷
مراغه	۴/۲	۰/۳۶
مهاباد	۳/۸	۰/۴۲

جدول ۱۰: مقدار پیش‌بینی شده SEPI در مقیاس ۱۲ ماهه، ۵ ایستگاه مورد مطالعه برای ۶ سال آینده

ایستگاه‌ها	مهاباد	مراغه	سقز	تبریز	ارومیه
سال‌های پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی	مقدار پیش‌بینی
۲۰۱۵	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۷۷
۲۰۱۶	۰/۶۳	۰/۹۰	۰/۶۷	۰/۹۰	۰/۷۳
۲۰۱۷	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۶۷
۲۰۱۸	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۶۷	۰/۵۷	۰/۰۳
۲۰۱۹	۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۳۵	۰/۳۹
۲۰۲۰	۰/۱۰	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۴۹	۰/۷۹

با توجه به نتایج به‌دست آمده طبق روش این پژوهش و جداول ۵ تا ۸، آموزش مدل Anfis با ۷۵ درصد داده‌های سری SEPI به خوبی انجام شده است و مقدار اطمینان آموزش صورت گرفته نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌باشد. به طوری که در رابطه گرافیگی بیش‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۲۶ درصد در ایستگاه سقز در مقیاس ۶ ماهه و کم‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۱۰ درصد در ایستگاه ارومیه در مقیاس ۶ ماهه می‌باشد. در مدل‌سازی داده‌های اعتبارسنجی، میانگین خطای مدل‌سازی طبیعتاً بیش‌تر از میانگین خطای آموزشی می‌باشد. بیش‌ترین میانگین خطای پیش‌بینی ۰/۳۴ درصد در ایستگاه سقز در مقیاس ۶ ماهه و کم‌ترین آن ۰/۱۰ درصد در ایستگاه ارومیه در مقیاس ۶ ماهه می‌باشد. ولی در رابطه کد نویسی بیش‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۶۵ درصد در ایستگاه سقز در مقیاس ۶ ماهه و کم‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۳۲ درصد در ایستگاه تبریز در مقیاس ۶ ماهه می‌باشد. در مدل‌سازی داده‌های اعتبارسنجی، میانگین خطای مدل‌سازی طبیعتاً بیش‌تر از میانگین خطای آموزشی می‌باشد. بیش‌ترین میانگین خطای پیش‌بینی ۴/۲۴ درصد در ایستگاه مراغه در مقیاس ۶ ماهه و کم‌ترین آن ۳/۲۲ درصد در ایستگاه تبریز در مقیاس ۶ ماهه می‌باشد. در رابطه گرافیگی بیش‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۲۵ درصد در ایستگاه سقز در مقیاس ۱۲ ماهه و کم‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۰۶ درصد در ایستگاه ارومیه در مقیاس ۱۲ ماهه می‌باشد. در مدل‌سازی داده‌های اعتبارسنجی، میانگین خطای مدل‌سازی طبیعتاً بیش‌تر از میانگین خطای آموزشی می‌باشد. بیش‌ترین میانگین خطای پیش‌بینی ۰/۲۲ درصد در

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

ایستگاه سقز در مقیاس ۱۲ ماهه و کم‌ترین آن ۰/۰۶ درصد در ایستگاه مراغه در مقیاس ۱۲ ماهه می‌باشد. ولی در رابطه کد نویسی بیش‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۵۱ درصد در ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه و کم‌ترین میانگین خطای آموزشی ۰/۳۶ درصد در ایستگاه مراغه در مقیاس ۱۲ ماهه می‌باشد. در مدل‌سازی داده‌های اعتبارسنجی، میانگین خطای مدل‌سازی طبیعتاً بیش‌تر از میانگین خطای آموزشی می‌باشد. بیش‌ترین میانگین خطای پیش‌بینی ۴/۲۸ درصد در ایستگاه مراغه در مقیاس ۱۲ ماهه و کم‌ترین آن ۱/۵۷ درصد در ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه می‌باشد.

سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی کارایی قابل قبولی در پیش‌بینی شاخص SEPI در حوضه دریاچه ارومیه در این پژوهش انجام شده دارد، این روش در اکثر مطالعات که صورت گرفته، روش مناسبی در امر پیش‌بینی عنوان شده است. از جمله (علیاری و همکاران، ۱۳۸۷: ۱)، در پیش‌بینی کوتاه مدت آلودگی هوا در شهر اراک، (فلاح قاهری و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۲۱)، در پیش‌بینی بارش بهاره خراسان رضوی بر پایه الگوهای سینوپتیکی پیوند از دور، در پژوهشی (سبحانی و گلدوست، ۱۳۹۴: ۱۱۶) در تحقیقی پایش خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی در استان اردبیل با Anfis و شاخص SPI کارایی قابل قبول نداشت و هم‌چنین، (هنر و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۶۹) در پیش‌بینی دبی سرریز جانبی، دقت قابل قبول مدل را تایید نمودند. با این حال با همه مقایسه صورت گرفته این مدل در پژوهش حاضر در پیش‌بینی SEPI کارایی قابل قبولی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه بر اساس شاخص SEPI پرداخته شد. شاخص SEPI توسعه یافته شاخص SPI بر اساس منطق فازی است. از شاخص SEPI در دو مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه استفاده شده و ویژگی خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت. در یک جمع‌بندی مربوط به پایش و بررسی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه مهم‌ترین نتایج به دست آمده را می‌توان به صورتی که در ادامه می‌آید فهرست کرد:

- در ایستگاه‌های مورد مطالعه، در مقیاس زمانی ۶ ماهه شدت و تعداد تکرار خشکسالی‌ها بیش‌تر از مقیاس ۱۲ ماهه است اما در مقیاس ۱۲ ماهه تداوم خشکسالی‌ها بیش‌تر می‌باشد. خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی کوتاه مدت تداوم کم‌تری دارند و شدیدتر تحت تاثیر بارندگی ماهانه می‌باشند. در حالی که خشکسالی در دوره‌های زمانی بلند مدت واکنش بسیار کندتری نسبت به تغییرات بارش نشان می‌دهند.
- روند خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه افزایشی است. روند دما با شدت بیش‌تری روند افزایشی دارد.
- بیش‌ترین درصد وقوع خشکسالی در ایستگاه ارومیه و کم‌ترین آن در مهاباد مشاهده می‌شود.
- درصد فراوانی وقوع خشکسالی در ایستگاه ارومیه، سقز و مراغه در مقیاس ۶ ماه بیش‌تر از مقیاس ۱۲ ماهه است اما در ایستگاه‌های تبریز و مهاباد شرایط بر عکس می‌باشد.

مهم‌ترین نتیجه مربوط به پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل شبکه عصبی–فازی تطبیقی Anfis به این شرح است: خطای مدل‌سازی داده‌های شاخص Sepi نشان داد توانایی مدل Anfis برای پیش‌بینی در طول داده‌های اعتبارسنجی ثابت نمی‌باشد و هر چه از زمان نزدیک به داده‌های آموزشی دورتر می‌شود، خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد. خطای پیش‌بینی تقریباً تا ۵۰ درصد داده‌های اعتبار سنجی کم بوده و در ۵۰ درصد بعدی بیش‌تر می‌شود. در منطقه مورد مطالعه هر چه

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

سال‌های آینده پیش‌بینی بر اساس مدل Anfis کوتاه‌تر در نظر گرفته شود، اطمینان پیش‌بینی بیش‌تر خواهد بود. با توجه به مقدار خطاهای به دست آمده در اعتبارسنجی مدل، می‌تواند پیش‌بینی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه را با استفاده از مدل Anfis با اطمینان حدود ۹۴ درصد انجام داد.

منابع

اکبرزاده، مرتضی و سیدتقی میرحاجی. ۱۳۸۵. تغییرات پوشش گیاهی تحت تأثیر بارندگی در مراتع استپی رود شور، *فصل-نامه تحقیقات مرتع و بیابان*، سال ۱۳.۳: ۲۲۲-۲۳۵.

انصاری، حسین؛ داوری، کامران و سیدحسین ثنائی نژاد. ۱۳۸۹. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی وتبخیر و تعرق استاندارد شده SEPI، توسعه یافته بر اساس منطق فازی. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۴. **۱**: ۳۸-۵۲.

افروز، بهرام. ۱۳۹۰. *ارایه الگوی مناسب درسطح‌بندی عملکرد مدیریت شهری در بسترسازی برای توسعه کارآفرینی (مطالعه موردی: شهر اردبیل)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد: استاد راهنما: عطا غفاری. دانشگاه محقق اردبیلی.

جان‌درمیان، یونس؛ علیرضا شکیبا و حمیدرضا ناصری. ۲۰۱۵. بررسی وضعیت خشکسالی و ارتباط آن با تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت سراب، *کنفرانس بین المللی توسعه با محوریت کشاورزی، محیط زیست و گردشگری*، ایران. تبریز. : ۱۶-۱۷.

جوی‌زاده، سعید و زهرا حجازی‌زاده. ۱۳۸۹. *مقدمه‌ای بر خشکسالی و شاخص‌های آن*. چاپ اول. انتشارات سمت. تهران.

جعفرنژاد، علی و سید مصطفی کیا. ۱۳۸۹. *منطق فازی در* MATLAB، انتشارات کیان رایانه سبز. تهران.

حدادی، حسین و حسن حیدری. ۱۳۹۴. آشکارسازی اثر نوسانات بارش بر روان آب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *مجله‌ی علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، **۵۸**: ۲۴۷-۲۶۲.

خشتکاری‌ثانی، صیاد. ۲۰۱۵. واکاوی خشکسالی‌های استان آذربایجان غربی با شاخص Spi و Gis. *کنفرانس بین المللی با محوریت کشاورزی، محیط زیست و گردشگری*، ایران. تبریز. ۱۶-۱۷.

خلیقی‌سیگارودی، شهرام؛ صادق سنگدهی، ع؛ اوسطی، خ؛ قویدل رحیمی، ی. ۱۳۸۸. بررسی نمایه‌های ارزیابی پدیده‌های ترسالی و خشکسالی: (SPI,PNPI,Nitzche) مطالعه موردی: استان مازندران. *فصلنامه علمی پژوهش تحقیقات مرتع و بیابان* ایران، **۱۶**: ۴۴-۵۴.

رهنمایی، محمدتقی. ۱۳۷۰. *توان‌های محیطی ایران*، انتشارات مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری وزارت مسکن و شهرسازی. تهران.

زاهدی، مجید و یوسف قویدل‌رحیمی. ۱۳۸۶. تعیین آستانه خشکسالی و مقایسه بارش قابل اعتماد ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه. *پژوهش‌های جغرافیایی*، **۵۹**: ۲۱-۳۴.

سبحانی، بهروز، عطا غفاری‌گیلانده و اکبر گلدوست. ۱۳۹۴. پایش خشکسالی در استان اردبیل با استفاده از شاخص SEPI توسعه یافته براساس منطق فازی. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیای*، سال ۱۵. **۳۶**: ۵۱-۷۲.

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

سبحانی، بهروز و اکبر گل‌دوست. ۱۳۹۴. پایش خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن در استان اردبیل با شاخص SPI و مدل Anfis. *فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی*، سال ۳۰. **۱**: ۱۵۲-۱۳۵.

شکری‌کوچک، سعید و عبدالکریم بهنیا. ۱۳۹۲. پایش و بیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص SPI زنجیره مارکوف. *کنفرانس بین اللملی بامحوریت کشاورزی محیط زیست*. ۲۴-۱۶.

صفری، علی؛ سلیمان جاهی، حسین فلاحی و حسین ریاحی. ۱۳۸۲. استفاده ازسیستم جدید هوشمند استنتاج فازی–عصبی تطابقی(ANFIS) برای پیش‌بینی قدرت سرطان‌زایی ویروس پاپیلوهای انسانی. *مجله علمی پژوهش دانشگاه علوم پژشکی اراک*، سال۱۳. **۴**: ۹۵-۱۰۵.

طالبی، محمد صادق و مهناز موسوی بفرویی. ۱۳۸۹. ارزیابی، پهنه‌بندی و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های معتبرمطالعه موردی :استان کرمان. *اولین کنفرانس بین المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا*، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی دانشگاه شهید باهنر کرمان، آبان. ۵۶-۴۰.

علیزاده، امین. ۱۳۹۲. *هیدرولوژی کاربردی*، چاپ **۳۶**، دانشگاه فردوسی مشهد.

علیزاده، امین و شادی آشگرطوسی. ۱۳۸۷. توسعه یک مدل برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی(مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). *مجله علوم، صنایع کشاورزی، ویژه آب و خاک*، **۲۲**: ۲۳۵-۲۲۳.

علیاری، مهدی، محمد تشنه‌لب، و علی خاکی‌صدق. ۱۳۸۷. پیش‌بینی کوتاه مدت آلودگی هوا با کمک با روش‌های ترکیبی شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه، خط حافظه‌دار تأخیر، گاما و ANFIS با روش‌های ترکیبی آموزشی مبتنی بر PSO. *مجله کنترل*، **۱**: ۱-۱۹.

فلاح‌قاهری، غلام‌عباس؛ محمد موسوی‌بایگی، و مجید مهدی‌نوخندان. ۱۳۸۷. پیش‌بینی بارش فصلی بر اساس الگوهای سینوپتیکی با استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی ANFIS. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، **۶۶**: ۱۲۱-۱۳۹.

محسنی‌ساروی، مهدی؛ علی‌اکبر صفدری و بهروز ثقفیان. ۱۳۸۳. تحلیل شدت، مدت، فراوانی، و گستره خشکسالی‌های حوضه‌ی کارون به کمک شاخص بارش استاندارد. *مجله منابع طبیعی ایران*، جلد**۵۷**. **۴**: ۳۱-۴۷.

منتصری، مجید و بابک امیرعطایی.۱۳۹۴. پیش‌بینی استوکستیکی احتمالات وقوع خشکسالی (مطالعه موردی: شمال غرب کشور). *نشریه مهندس عمران و محیط زیست*، جلد ۴۵. **۱**: ۹-۱۲.

مالچسفکی. یاردان. ۱۳۸۵. *سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری*. اکبر پرهیزگار. عطا غفاری گیلانده. تهران. *انتشارات سمت*، تهران.

هنر، تورج؛ محمدحسین طرازکار، و محمدرضا طرازکار. ۱۳۸۹. برآورد ضریب دبی سریزهای جانبی با استفاده از سیستم استنتاج فازی–عصبی. *مجله پژوهشی‌های حفاظت آب و خاک*، **۲**: ۱۶۹-۱۷۷.

Arms, K.; ۱۹۹۰. Environmental Sciences. Staunders Collage Pub Florida.

Gholam Ali, M.; Younes, KH.; Ismail, A.Fatemeh, T. ۲۰۱۱. Assessment of Geostatistical.

Huanga, S.; j. Huanga, J. Changa, Y. Zhua, and G. Lengb. ۲۰۱۵. Drought structure based on a nonparametric multivariate standardized drought index across the Yellow River basin, China. Journal of Hydrology, **۵۳۰**: ۱۲۷–۱۳۶.

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]

Jain, v., R. Pandey, M. Jain and H-R. Byun. ۲۰۱۵. Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. Weather and Climate Extremes, ۸: ۱-۱۱.

keta T.B and N.J Doesken. ۱۹۹۳. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim. CA. American Meteorological Society. ۱۷۹:۱۲-۱٤

Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices. World Applied Sciences Journal ۱۵ (٤): ٤۷٤-٤۸۲.

Morid, S., V. Smakhtinb, and K. Bagherzadehc. ۲۰۰۷. Drought forecastingusing artificial neural networks and time series of drought indices. Int. J. Climatol, ۲۷: ۲۱۰۳–۲۱۱۱.

Moreira, E., A. Coelho, A. Paulo, S. Pereira and T. Mexia. ۲۰۰۸. SPI-based drought category prediction using loglinear models. Journal of Hydrology, ۳۵٤: ۱۱٦-۱۳۰.

Mo, K.C. ۲۰۰۸. Model-based drought indices over the United States. J. Hydrometeorol, ۹: ۱۲۱۲–۱۲۳۰. http://dx.doi.org/۱۰.۱۱۷۵/۲۰۰۸JHM۱۰۰۲.۱.

Niranjana .Kumar; k. N. Rajeevan, M. Pai, D. S. Sivastava, A.K., and B. Preethi. ۲۰۱۳. On the observed variability of monsoon droughts over india. weather and climate extremes, ۱: ٤۲-۵۰.

Peters, E; G. Bier, H. A. Lanen, and P, Torfs. ۲۰۰٦. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. Journal of Hydrology, ۳۲۱: ۲۵۷-۲۷۵.

Palmer,W.C. ۱۹٦۵. Research Iranian Journal of Irrigation and DrainageNo. Meteorological drought, ٤, Vol. ۸, Winter. ۲۰, p. ۸٤۵-۸۵٦.

Spinoni, j; G. Naumann, j. vogt and P. Barbosa. ۲۰۱۵. The biggest drought events in Europe from ۱۹۵۰-۲۰۱۲. journal of hydrology: Regional, ۳: ۵۰۹-۵۲٤.

Stairs, G. and H. Vangelis. ۲۰۰٤. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. Journal of Water Resources Management, ۱۸: ۱-۱۲.

Wang, L and W. Chen. ۲۰۱٤. A CMIP۵ multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. Int. J. Climatol, ۳٤: ۲۰۵۹–۲۰۷۸. http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۰۲/joc.۳۸۲۲.

Wilhite, D.A. ۲۰۰۰. Drought: A Global Assessment, Rout ledge Press. London and NewYork. Volume I.

Touma, D; M. Ashfaq, M. Nayak, S-C. Kao and N. Diffenbaugh. ۲۰۱۵. A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the ۲۱st century. Journal of Hydrology, ۵۲٦: ۱۹٦-۲۰۷.

Zhao, M and S.W, Running. ۲۰۱۰. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from ۲۰۰۰ through ۲۰۰۹. Environmental Science, ۳۲۹: ۹٤۰–۹٤۳.

[Downloaded from jsaeh.khu.ac.ir on 2025-11-13]