

## پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد

شده (SEPI)، توسعه یافته براساس منطق فازی

حسین انصاری<sup>\*۱</sup> - کامران داوری<sup>۲</sup> - سید حسین ثنائی نژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۲

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۰/۲۲

### چکیده

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی خزنده است که با کمبود رطوبت نسبت به شرایط نرمال به کندی آغاز و به آرامی گسترش می‌یابد. این پدیده به شدت بر همه جوانب فعالیت‌های بشری تأثیر گذاشته، در حالی که نه تعریف جامع و کاملی برای آن ارائه شده است، و نه شاخص مناسب و عمومی برای پایش آن مورد استفاده قرار گرفته است. لذا برای تدوین مدل مناسبی جهت ارزیابی و تحلیل خشکسالی از مدل فازی استفاده شد. بررسی کاربرد منطق فازی در پایش خشکسالی ایستگاه همدیدی مشهد نشان داد که استفاده از این منطق امکان پایش دقیق‌تر و مناسب‌تر خشکسالی را بدست می‌دهد. برای پایش خشکسالی با ترکیب دو تابع عضویت فازی مربوط به شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) و یک شاخص فرضی تبخیر و تعرق استاندارد شده (SEI)، شاخص جدیدی با نام شاخص تبخیر و تعرق و بارندگی استاندارد شده (SEPI) ارائه شده است. در مدل فازی انتخابی نهائی نیز ۸۱ قانون استفاده شد که در هر مرحله اجرا حداقل ۲ و حداکثر ۴ قانون فعال می‌شود. نتایج حاصل از مدل نشان داد که شاخص SEPI، کلیه مزایای شاخص SPI از جمله امکان محاسبه در مقیاس‌های زمانی متفاوت را دارد. به علاوه تأثیر پارامتر درجه حرارت بر وقوع خشکسالی‌ها نیز در آن لحاظ شده است. بررسی نتایج حاصل از پایش خشکسالی با شاخص‌های SEPI با SPI، همبستگی بیش از ۹۰ درصد را بین مقادیر این دو شاخص برای کلیه مقیاس‌های زمانی نشان داد. پایش خشکسالی ایستگاه همدیدی مشهد با شاخص SEPI نشان می‌دهد که در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۳ ماهه، فراوانی وقوع خشکسالی زیاد و تداوم این پدیده کوتاه است، اما با افزایش مقیاس زمانی از فراوانی وقوع خشکسالی کاسته شده ولی تداوم خشکسالی‌ها افزایش یافته است. نتایج پایش با شاخص SEPI همچنین نشان می‌دهد که وقوع خشکسالی‌های با تداوم و شدت بالا در کلیه مقیاس‌های زمانی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ میلادی اتفاق افتاده، البته طولانی‌ترین خشکسالی با بیش از ۳ سال تداوم در کلیه مقیاس‌های زمانی نیز در بازه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ رخ داده است.

**واژه‌های کلیدی:** منطق فازی، شاخص خشکسالی، شاخص بارندگی استاندارد شده، شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد شده

### مقدمه

جهان و از جمله ایران شده است، لذا باید با انجام پژوهش‌های علمی دقیق براین موارد فایق آمد. 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 بر آن داشته تا شاخص‌هایی جهت پایش خشکسالی ارائه دهند. هدف یک شاخص، تعیین ساده و کمی سه مشخصه یعنی شدت، تداوم و گستردگی مکانی آن است. یک شاخص همچنین می‌بایست سابقه تاریخی یک حادثه را بدست دهد تا امکان مقایسه شرایط موجود با گذشته وجود داشته باشد. از طرف دیگر از آنجائی که خشکسالی ممکن است در اثر کمبود باران و کاهش پوشش برف، تقلیل جریان‌های سطحی و رطوبت خاک و دیگر عوامل متأثر از آن و یا حتی براساس ترکیبی از این عوامل بیان شود. لذا توصیف آنها از نظر کمی و کیفی طیف

خشکسالی یک مشخصه اقلیمی خزنده است که وقوع آن در تمام اقلیم‌ها اجتناب‌ناپذیر بوده و وقوع این پدیده تخلیه منابع آبی را به همراه دارد و بدلیل وابستگی حیات موجودات و بوم سامانه به موجودیت آب، اثرات ناشی از خشکسالی بسیار شدید و گسترده بوده و بخش‌های بیشتری را نسبت به دیگر بلایای طبیعی تحت شعاع خود قرار می‌دهد. در حالی که تعیین درجه، شدت، زمان وقوع و خاتمه آن بسیار سخت است. مشکلات فوق و سردرگمی در تعیین و پایش آن باعث فقدان پیشرفت در زمینه مدیریتی در بعضی از قسمت‌های

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب استادیار، دانشیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* - نویسنده مسئول: (Email: Ansari\_hos@yahoo.com)

شده و با وقوع یک بارندگی به مقدار کم، عملاً مقدار آن از منفی به مثبت تغییر کرده و شرایط مرطوب را نشان می‌دهد، در حالی که واقعیت غیر این است. یکی دیگر از معضلات شاخص SPI، این است که در آن طبقات شدت خشکسالی یعنی خشکسالی خیلی شدید، شدید، متوسط و ملایم با آستانه ترد<sup>۳</sup> معرفی شده که یک بازه معینی از مقادیر شاخص را شامل می‌شوند. از آنجائی که در بررسی اثرات خشکسالی از مقایسه این طبقات در بین مناطق مختلف استفاده می‌شود، عملاً این سؤال پیش می‌آید که آیا با تغییر بسیار جزئی مقادیر شاخص در آستانه‌ها، می‌توان خشکسالی‌های مجزا با تأثیرات بسیار متفاوت تعریف کرد و آیا این تعریف می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های صحیح و مدیریتی به مسئولین امر کمک نماید؟ برای رفع معایب فوق در پژوهش حاضر سعی شده تا به کمک منطق فازی، سطح توانمندی شاخص SPI در پایش خشکسالی افزایش یابد.

با توجه به مزایای منطق فازی که راهکار مناسبی را جهت مقابله با عدم قطعیت‌ها ارائه می‌کند و از نظر بسیاری از دانشمندان منطق فازی به عنوان ابزار قابل قبولی در دنیای واقعی علم بوده که در زمینه‌های بسیاری کاربرد دارد (۴۰)، سعی شده تا از این منطق برای تلفیق اجزا، مدل پایش خشکسالی استفاده شود. این روش موجب انتقال ساده‌تر مفاهیم بین انسان و کامپیوتر برای تصمیم‌گیری، و روش بهتری برای محاسبه اطلاعات غیردقیق و نامطمئن شد. بعضی از پژوهشگران معتقدند که استفاده از منطق فازی باعث افزایش کیفیت و کمیت تکنولوژی‌های دیگر می‌شود. مثلاً استفاده از این منطق در یک شبکه عصبی برای بیان پارامترهای مورد استفاده به صورت عبارات فازی باعث افزایش سرعت یادگیری می‌شود. این نوع کاربری باعث شده که از این منطق به عنوان یک تکنیک اصلی در زمینه‌های مختلف از جمله علوم محیطی و اکولوژیکی که دارای مدل‌های بسیار پیچیده می‌باشند، استفاده شود (۷). امروزه مدل‌ها در سطح وسیعی برای کمک به مدیریت منابع طبیعی و به ویژه سیستم‌های مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ مدل‌هایی که در توسعه آنها عدم قطعیت‌ها بسیار مهم هستند (۱۸). در سیستم‌های مدیریت منابع آب، عدم قطعیت‌های زیادی در بهینه‌سازی وجود دارد که عملاً منجر به ارائه روش‌های بهینه‌سازی غیردقیق در این سیستم‌ها شده‌است (۸، ۹، ۲۴، ۲۹ و ۳۵). این عدم قطعیت‌ها در اکثر اجزای سیستم وجود دارند و دارای روابط داخلی نیز می‌باشند (۶)؛ ابهام و یا دقت کم اندازه‌گیری در یک نمونه تصادفی، و تصادفی بودن یا ابهام دار بودن مرزهای بالا و پائین یک فاصله مشخص، عدم قطعیت‌هایی هستند که در سطوح مختلف وجود دارند (۲۰ و ۲۳). برای بهینه‌سازی نسبتاً دقیق در این شرایط و نیز تصمیم‌گیری‌های چندبعدی با موضوعات نادقیق مثل بهره‌برداری چند منظوره از منابع

وسعی از داده‌ها را شامل می‌شود. با ارائه یک شاخص که در واقع تابعی از عوامل مختلف محیطی و عوامل متأثر از خشکسالی است و نهایتاً به صورت یک عدد نمایش داده می‌شود، می‌توان تصویر جامعی از همه این عوامل را فراهم نموده و از آن برای ارزیابی خشکسالی و تصمیم‌گیری درباره آن استفاده نمود که به مراتب مفیدتر و ساده‌تر از ردیف‌های متعددی از داده‌های متنوع مرتبط با خشکسالی است. از طرف دیگر تکرار، تداوم و شدت خشکسالی همگی توابعی هستند که به طور مشخص به مقیاس زمانی وابسته‌اند. بنابراین برای پایش خشکسالی، ارائه شاخصی که در آن مقیاس زمانی مدنظر قرار گرفته باشد، از اهمیت خاصی برخوردار بوده و برای تحلیل و بررسی این پدیده و اثرات آن بر محیط کاربردهای فراوانی دارد. برای پایش خشکسالی و اعلان هشدارهای لازم، هواشناس‌ها و هیدرولوژیست‌ها شاخص‌هایی را ارائه داده‌اند که عمدتاً به پارامترهای آب و هوایی وابسته هستند، یا اینکه بر احتمالات وقوع خشکسالی تکیه دارند (۱۶ و ۳۸)، از جمله این شاخص‌ها، می‌توان به شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI<sup>۱</sup>) اشاره کرد (۲۵ و ۲۶)، که اگرچه در دهه‌های اخیر مطرح شده است، اما به جهت امکان مقایسه نسبتاً ساده و قابل اعتمادش در بین مناطق و اقلیم‌های مختلف به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (۳، ۴، ۱۱، ۱۵، ۲۱، ۲۷، ۳۰، ۳۱، ۳۷ و ۳۹). این شاخص یکی از معدود شاخص‌های پایش خشکسالی و حتی می‌توان گفت تنها شاخصی است که در آن مقیاس زمانی برای پایش این پدیده مدنظر قرار گرفته است و لذا از انعطاف‌پذیری بالایی در تعیین و پایش خشکسالی‌ها و بررسی اثرات این پدیده بر ذخایر آبی کوتاه مدت (بخش کشاورزی) و ذخایر بلند مدت (منابع آب سطحی و آب زیرزمینی)، برخوردار است. بررسی کاربرد شاخص SPI روشن می‌سازد که، اگرچه به جهت امکان پایش خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی - اجتماعی، ساده بودن محاسبات، نیاز به داده‌های حداقلی اولیه، امکان محاسبه شدت، تکرار، تداوم و فراوانی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف و نیز موجود بودن اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آن، می‌توان این شاخص را به عنوان شاخص نسبتاً مناسبی برای پایش شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار داد. اما با تامل بیشتر بر روی نتایج و ارزیابی تئوری حاکم بر این شاخص (۱)، نمی‌توان این شاخص را به عنوان یک شاخص جامع مطرح نمود. در محاسبه فقط از داده‌های بارندگی استفاده شده و پارامترهایی مانند تبخیر و تعرق و درجه حرارت هوا که باعث تشدید شدت خشکسالی می‌شوند، مدنظر قرار نگرفته‌اند. براین اساس پایش خشکسالی با شاخص SPI در مناطق خشک و نیمه خشک که میانگین بارندگی آنها پائین و تبخیر و تعرق بالاست (مانند کشور ایران)، دچار مشکل

1- Hydro-meteorological

2- Standardized Precipitation Index

همدیدی مشهود از شاخص استاندارد شده بارندگی استفاده شد. شاخص SPI در دوره‌های زمانی مختلف (۱ تا ۱۲ ماهه، ۱۸ ماهه و ۲۴ ماهه) با استفاده از فرمول ارائه شده توسط مک کی و همکاران (۲۵)، محاسبه و سپس مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### شاخص فازی پایش خشکسالی

از آنجائی که شاخص SPI بعنوان یک شاخص مناسب برای پایش خشکسالی مطرح است، سعی شده تا حد امکان از تئوری این شاخص، جهت ارائه شاخص جدید استفاده شود. شاخص جدید که از تبخیر و تعرق و بارندگی استفاده می‌کند به نام شاخص تبخیر و تعرق و بارندگی استاندارد شده (SEPI) از تلفیق دو شاخص مجزا به نام‌های SPI برای وارد نمودن تأثیر تغییرات بارندگی در پایش خشکسالی و SEI<sup>۲</sup> برای وارد نمودن تأثیر تغییرات دمائی در پایش خشکسالی، بوجود آمد که شاخص SEI و SEPI دقیقاً مشابه شاخص بارندگی استاندارد شده مک کی (۲۵) در مقیاس‌های زمانی متفاوت قابل محاسبه است. برای محاسبه این شاخص، قبل از هر اقدامی باید تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برای یک دوره آماری ۳۰ ساله برآورد کرد. در این پژوهش برای برآورد تبخیر و تعرق از روش تورنت‌وایت استفاده و شاخص SEI بصورت زیر محاسبه شد:

$$SEI_{jk} = \frac{ET_{jk} - \overline{ET}_j}{\delta_j} \quad (1)$$

که در آن:  $\delta$ : انحراف از معیار داده‌های تبخیر و تعرق،  $ET$ : مقدار تبخیر و تعرق مرجع،  $\overline{ET}$ : متوسط تبخیر و تعرق مرجع،  $j$ : شمارنده مقیاس زمانی (1, 2, 3, ..., 12, 18, 24) =  $j$  ماهه، مقیاس زمانی شاخص‌های SEI و SPI یکسان است)، و  $k$ : نشان دهنده ماه موردنظر در دوره آماری است. انتخاب مقیاس‌های زمانی با توجه به تأثیر افزایش تبخیر و تعرق و کاهش بارندگی بر هر یک از بخش‌های مرتبط (کشاورزی، هیدرولوژی، محیط زیست و منابع آب) تعیین می‌شود. برای محاسبه شاخص استاندارد شده فوق، مناسب‌ترین توزیع احتمال برای مجموعه داده تبخیر و تعرق (در این پژوهش توزیع گاما) تعیین و سپس توزیع مذکور به توزیع نرمال تبدیل شد (۱). با توجه به خصوصیات آماری شاخص SEI که یک شاخص نرمال استاندارد بوده و این خصوصیات آماری مشابه شاخص SPI می‌باشد، لذا طبقه‌بندی شدت خشکسالی براساس شاخص SEI جهت تلفیق با

آبی، می‌توان از مدل‌های فازی استفاده کرد که در آنها از منطق فازی و ارائه متغیرها به صورت زبانی استفاده شده است (۵، ۱۳، ۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۲ و ۲۸).

علاوه بر موارد فوق، پژوهشگران در مطالعات بسیار دیگری در دنیا از توانمندی‌های منطق فازی در مواجهه با عدم قطعیت‌ها استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه، به برخی از این مطالعات با موضوعات متنوع در اینجا اشاره شده است. در مطالعه‌ای در اسپانیا، بارتو یک مدل فازی تخمین رواناب برای حوضه‌های آبریز مناطق گرمسیری را با استفاده از شماره منحنی معرفی کرد (۱۱). در هنگ‌کنگ، پژوهشگران برای توصیف پارامترهای هواشناسی بر روی آلودگی هوای شهرها از منطق فازی استفاده کردند (۳۴). برای پیش‌گویی یخبندان، پژوهشگران از منطق فازی و شبکه‌های عصبی استفاده کردند (۳۶). پژوهشگران ایتالیایی برای بازسازی داده‌های بارندگی مفقود، از منطق فازی استفاده کردند (۲). در مطالعه دیگری، از منطق فازی برای طبقه‌بندی خشکسالی و تعریف شرایط همگن و مشابه هواشناسی استفاده شد (۱۲). در نیومکزیکو آمریکا، از این متدولوژی برای پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی پالمر و الگوهای چرخش اتمسفری در مقیاس بزرگ، استفاده شد (۳۲). در نبراسکا، پژوهشگران به بررسی استفاده از تکنیک مدل سازی فازی جهت پیش‌بینی خشکسالی‌های منطقه‌ای پرداختند. این بررسی‌ها نشان داد که منطق فازی جهت پیشی بینی خشکسالی مناسب است (۳۳).

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در خصوص شاخص SPI و کاربردهای منطق فازی، هدف از انجام این پژوهش این بوده که اولاً یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر شدت، زمان شروع و خاتمه خشکسالی یعنی درجه حرارت و به تبع آن تبخیر و تعرق مرجع در شاخص SPI وارد شود و ثانیاً ترتیبی اتخاذ شد که شاخص اصلاح شده SPI به تغییرات بارندگی به شدت حساس نباشد و با روند ملایم و طبیعی از شرایط خشک به تر و بالعکس و یا از یک طبقه به طبقه دیگر تغییر کند، که این مشخصه با توجه به ماهیت منطق فازی در مدل فازی مورد استفاده نهفته است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

برای انجام پژوهش مورد نظر از داده‌های ایستگاه همدیدی مشهود به عنوان یک ایستگاه با آمار مناسب و کامل هواشناسی استفاده شد. در شروع مطالعات داده‌های ماهانه بارندگی و درجه حرارت در دوره آماری ۲۰۰۱-۱۹۶۸ میلادی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از اطمینان کامل از صحت داده‌ها، برای پایش شرایط خشکسالی و بررسی روند تغییرات طولانی مدت آن در ایستگاه

1 - Standardized Evapotranspiration Index

مخفف‌سازی فوق با توجه به مخفف سازی تبخیر و تعرق و توسط نگارندگان این پژوهش انتخاب شده و تاکنون هم در هیچ منبع دیگری مورد استفاده قرار نگرفته است.

2 - Standardized Evapotranspiration

شاخص SPI به صورت جدول ۱ ارائه شد.

جزئی<sup>۲</sup> می‌باشند.

### تعریف قوانین فازی، ترکیب توابع و خروجی مدل

برای ترکیب توابع عضویت طبقات مختلف خشکسالی و ارائه قوانین فازی مورد استفاده در مدل فازی در ابتدا طبقات مختلف دو شاخص SPI و SEI در مقابل همدیگر قرار گرفتند. از قراردادن طبقات در مقابل همدیگر طبقات جدید مربوط به ترکیب‌های مختلف دو شاخص که به عنوان طبقات شاخص SEPI می‌باشند، مشخص شدند. پس از تعیین قوانین فازی و در پی آن تعیین قیاس و نتیجه، با استفاده از قیاس استثنائی تعمیم یافته (GMP) برای سیستم استنتاج فازی و نیز استفاده از روش مستقیم ممدانی در ترکیب قوانین، خروجی مدل بصورت فازی تعیین شد. سپس با توجه به ترکیبات مختلف توابع فازی و درجه تأثیر هر یک از ترکیبات در نتایج نهایی، خروجی مدل فازی با استفاده از روش نافازی سازی مرکز ثقل به صورت ترد (اعداد ترد همان اعداد ترتیبی معمولی‌اند که در مقابل اعداد فازی قرار می‌گیرند) محاسبه شد.

### نتایج و بحث

#### محاسبه شاخص SPI

برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل تحلیلی پایش خشکسالی، در آغاز نتایج حاصل از شاخص SPI مورد بررسی قرار گرفت. جهت تحلیل نتایج از مقایسه روند تغییرات این شاخص با تغییر مقادیر آنومالی بارندگی و درجه حرارت استفاده شد. از آنجائی که در محاسبه شاخص SPI تنها ورودی، بارندگی است، لذا تغییرات مقادیر شاخص SPI تحت تأثیر پارامتر درجه حرارت و تبخیر و تعرق که از پارامترهای مؤثر در تغییر شدت خشکسالی می‌باشد، نخواهد بود (شکل ۳)، به عنوان مثال در مقیاس زمانی یک ماهه در شکل ۳، به نظر می‌رسد افزایش درجه حرارت در ماه دسامبر سال ۱۹۹۶ و ماه ژانویه سال ۱۹۹۹ می‌تواند تأثیر افزایش بارندگی را خنثی کند، یا در مواردی که آنومالی درجه حرارت (تفاوت درجه حرارت ماهانه و متوسط ماهانه آن، تقسیم بر متوسط ماهانه درجه حرارت) بسیار بالاست و به تبع آن شدت خشکسالی و بروز خسارات بیشتر می‌شود، مقدار شاخص SPI که نشان دهنده شدت خشکسالی است، هیچگونه تغییری نکرده است، بنابراین تحلیل شدت خشکسالی و پایش آن برای مناطق خشک که تغییرات درجه حرارت و تبخیر و تعرق بالاست، با استفاده از این شاخص نتایج مناسبی را بدست نخواهد داد.

پس از محاسبه دو شاخص SPI و SEI، شاخص ترکیبی SEPI از تلفیق دو شاخص مذکور به صورتی مشتق شد که خصوصیات دو شاخص SPI و SEI را بطور کامل دارا باشد. در مرحله تلفیق دو شاخص SPI و SEI با توجه به اینکه مقادیر این دو شاخص بصورت متغیرهای زبانی<sup>۱</sup> طبقه‌بندی شده و با توجه به مزایای منطق فازی در تلفیق و ترکیب متغیرهای زبانی، دو شاخص SPI و SEI به صورت فازی ترکیب شدند تا شاخص SEPI تولید شد. پس از تعیین کلیه مراحل محاسباتی در مدل فازی، برنامه رایانه‌ای مربوط در محیط نرم افزار MATLAB طراحی شد، که با استفاده از این برنامه فایل‌های ورودی یعنی مقادیر شاخص SPI و شاخص SEI خوانده شده و مقادیر شاخص SEPI در فایل خروجی ارائه گردید.

#### معماری مدل فازی ارائه شده جهت پایش خشکسالی

برای ترکیب شاخص‌های SPI و SEI با استفاده از سیستم استنتاج فازی و با توجه به معماری مدل‌های فازی، در ابتدا مدل فازی به صورت شکل ۱ ارائه شد:

با توجه به معماری مدل فازی، ابتدا مجموعه‌های فازی و توابع عضویت دو شاخص SPI و SEI تعریف شد.

#### تعریف مجموعه‌های فازی و توابع عضویت آنها

با بررسی کلی که بر روی طبقات ارائه شده برای دو شاخص SPI و SEI، می‌توان زیر مجموعه‌های فازی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$A = \{ (x, \mu_{A(x)}) ; x \in X, \mu_{A(x)} \in [0, 1] \} \quad (2)$$

که در آن،  $x$ : مقدار شاخص و  $\mu_{A(x)}$ : مقدار تابع عضویت  $x$  در  $A$  است.

با توجه به تعریف فوق و طبقه‌بندی ارائه شده برای شاخص‌ها، نهایتاً توابع عضویت مجموعه‌های فازی خشکسالی خیلی شدید، شدید، متوسط، و ملایم به صورت شکل ۲ تعریف شدند.

هنگامی که از تابع عضویت شکل ۲ برای شاخص SPI و SEI استفاده شود، مقادیر  $X$  با توجه به تغییرات شدت خشکسالی و با دیدگاه فازی به این تغییرات به صورت جدول ۲ انتخاب می‌شوند.

توابع عضویت فازی دارای اشکال متفاوتی است که براساس روند تغییرات تابع عضویت فازی، ویژگی فیزیکی مسئله مورد بررسی و نظرات کارشناسی می‌توان یک یا چند نوع از این توابع با درجات مختلف همپوشانی را در یک مدل فازی استفاده کرد. توابع فازی مورد استفاده در این پژوهش از نوع توابع مثلثی و دوزنقه‌ای با همپوشانی

2- Partially Overlapping Member Function

3- Generalized modus ponens

4- Defuzzification

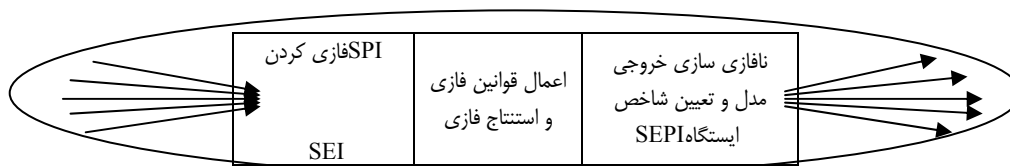
5- Crisp

1- Linguistic Variables

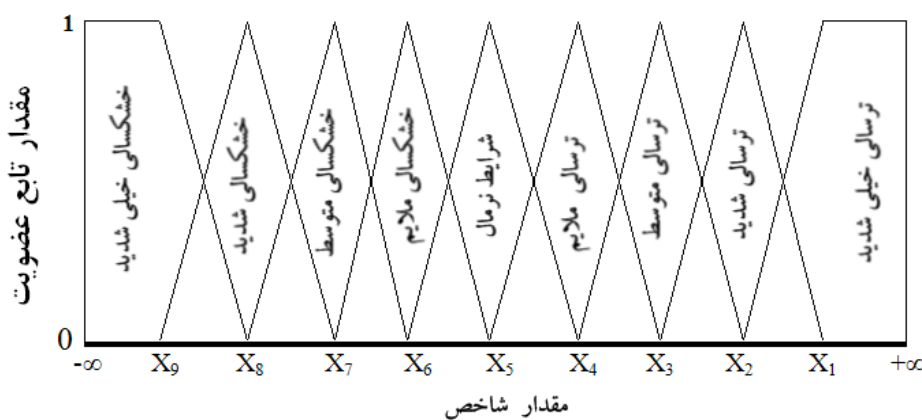
این مسئله برای مقیاس‌های زمانی دیگر و برای زمانی که آنومالی درجه حرارت حتی کمتر از صفر است، نیز به خوبی مشهود بوده، لذا این امر می‌تواند باعث بروز اشتباهات فاحشی در پایش خشکسالی و

(جدول ۱) - طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی براساس شاخص فرضی تبخیر و تعرق استاندارد شده

طبقات خشکسالی	مقادیر شاخص SEI
خشکسالی خیلی شدید	$\geq 2$
خشکسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
خشکسالی متوسط	-۰/۹۹ تا ۱/۴۹
خشکسالی ملایم	۰/۵ تا ۰/۹۹
نرمال	-۰/۴۹ تا ۰/۴۹
ترسالی ملایم	-۰/۹۹ تا -۰/۵
ترسالی متوسط	-۱/۴۹ تا -۱/۰۰
ترسالی شدید	-۱/۹۹ تا -۱/۵۰
ترسالی خیلی شدید	$\leq -2/۰۰$



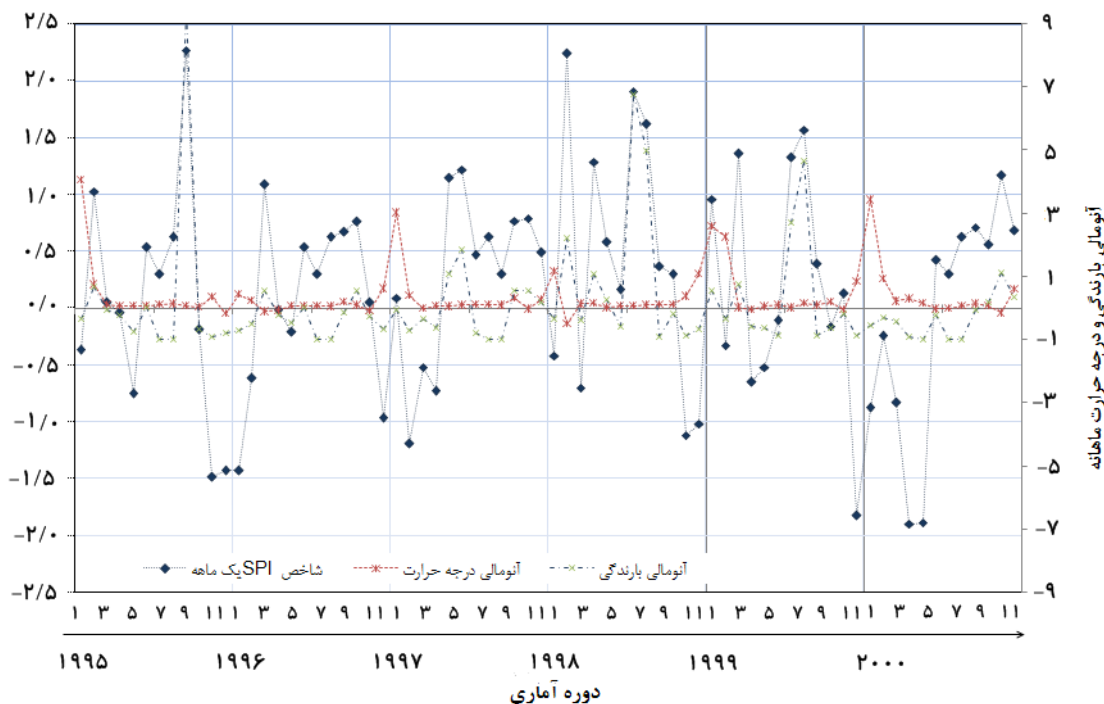
(شکل ۱) - معماری کلی مدل فازی پایش خشکسالی



(شکل ۲) - توابع فازی طبقات شدت خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SEI و SPI

(جدول ۲) - مقادیر شاخص SEI و SPI در مجموعه فازی

مقادیر X	X <sub>9</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>
شاخص SPI	-۲/۰	-۱/۵	-۱/۰	-۰/۵	۰/۰	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰
شاخص SEI	۲/۰	۱/۵	۱/۰	۰/۵	۰/۰	-۰/۵	-۱/۰	-۱/۵	-۲/۰



شکل ۳- تغییرات شاخص SPI در مقابل آنومالی بارندگی و درجه حرارت برای ایستگاه همدیدی مشهد

متغیرهای گفتاری<sup>۱</sup> طبقه‌بندی شدند (شکل ۲). شدت‌های خشکسالی متفاوت حاصل از ترکیب دو شاخص SPI و SEI که به صورت جدول ۳ در مقابل همدیگر قرار گرفته بودند، قوانین فازی نهائی مورد استفاده را بدست دادند. در این روش پس از تعیین توابع عضویت شاخص‌های SEI و SPI، ترکیب دو شاخص با وزن‌های مختلف با توجه به تأثیر پارامتر بارندگی و درجه حرارت بر شدت خشکسالی مدنظر قرار گرفت. اما از آنجائی که هیچ داده واقعی مبنی بر درجه تأثیر هر یک از دو پارامتر بر شدت خشکسالی وجود نداشت، لذا براساس نظرات کارشناسی پژوهشگران این مقاله، وزن بارندگی معادل دو برابر وزن تبخیر و تعرق مدنظر قرار گرفت (جدول ۳). این اعمال وزن به خوبی در جدول ۳ قابل مشاهده است، زیرا در این جدول مشخص شده که با تغییر شدت خشکسالی محاسبه شده با SEI، شدت خشکسالی محاسبه شده با SEPI یک طبقه تغییر می‌کند، اما با تغییر یک طبقه در شدت خشکسالی محاسبه شده با SPI، در شدت خشکسالی محاسبه شده با SEPI دو طبقه تغییر ایجاد خواهد شد.

برای پایش درجه و شدت خشکسالی با استفاده از شاخص SEPI در مدل فازی مورد استفاده، در آغاز شدت‌های خشکسالی بدست آمده از جدول ۳، بصورت توابع عضویت مثلثی فازی تعریف شدند (شکل ۴).

مشکل دیگر این شاخص در پایش خشکسالی‌های با مقیاس زمانی کم یعنی ۱ تا ۳ ماهه می‌باشد. در مناطق خشک یا بطور کلی مناطقی که در بعضی از ماهها بارندگی آنها کم است (برخی ماههای بهار و پاییز)، تغییر بسیار جزئی در میزان بارندگی (افزایش نسبت به شرایط نرمال) که عملاً هیچ گونه تأثیری در کاهش شدت خشکسالی بوقوع پیوسته ندارد (ممکن است به جهت بالا بودن دمای هوا در زمان وقوع بارندگی آب حاصل از بارندگی تبخیر شده و از دسترس خارج گردد)، باعث تغییر سریع مقدار شاخص از منفی به مثبت شده یا بالعکس با کاهش بسیار کم بارندگی، مقدار شاخص از مثبت به منفی تغییر می‌کند، این موضوع در ماههای ۱ تا ۳ سال ۹۶، ۹ سال ۹۶، ۱۱ و ۱۲ سال ۹۹ و ماه ۵ سال ۲۰۰۰ به خوبی مشهود است. حتی در برخی موارد کم بودن بیش از حد مقادیر بارندگی (ماههای تابستان)، باعث خطاهای فاحشی در محاسبات شاخص نیز می‌شود. برای دستیابی به نتایج بیشتر در خصوص پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SPI به مرجع شماره ۱ مراجعه شود.

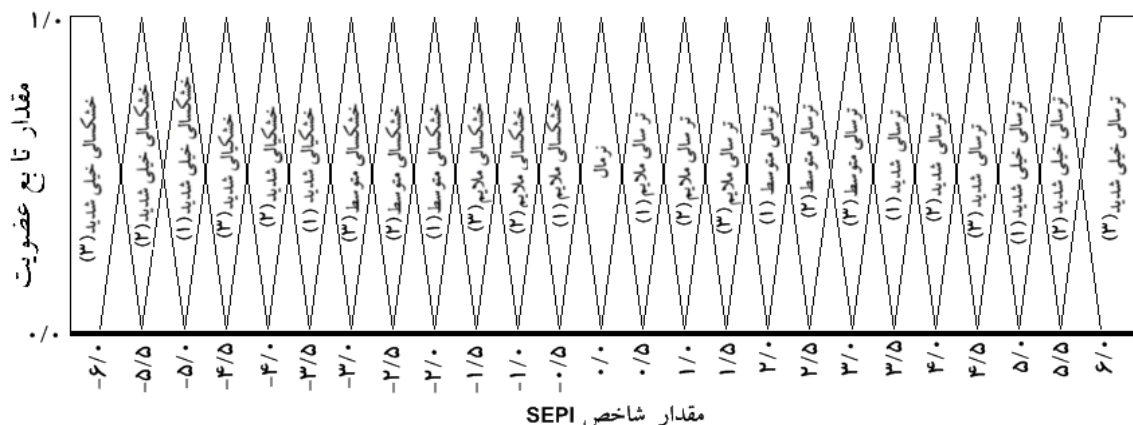
#### محاسبه شاخص فازی پایش خشکسالی

همانطور که قبلاً عنوان شد برای تدوین شاخص تبخیر و تعرق و بارندگی استاندارد شده (SEPI) از تلفیق دو شاخص مجزای SPI و SEI در مقیاس‌های زمانی متفاوت استفاده شد. در آغاز مرحله تلفیق و برای ورود داده‌ها به مدل فازی، مقادیر دو شاخص مذکور، به صورت

1- Linguistic Variables

(جدول ۳) - طبقات شدت خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SPEI

SEI SPI	ترسالی خیلی شدید	ترسالی شدید	ترسالی متوسط	ترسالی ملایم	شرایط نرمال	خشکسالی ملایم	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی خیلی شدید
خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی متوسط (۱)	خشکسالی متوسط (۲)	خشکسالی متوسط (۳)	خشکسالی شدید (۱)	خشکسالی شدید (۲)	خشکسالی شدید (۳)	خشکسالی خیلی شدید (۱)	خشکسالی خیلی شدید (۲)	خشکسالی خیلی شدید (۳)
خشکسالی شدید	خشکسالی ملایم (۲)	خشکسالی ملایم (۳)	خشکسالی متوسط (۱)	خشکسالی متوسط (۲)	خشکسالی متوسط (۳)	خشکسالی شدید (۱)	خشکسالی شدید (۲)	خشکسالی شدید (۳)	خشکسالی خیلی شدید (۱)
خشکسالی متوسط	نرمال	خشکسالی ملایم (۱)	خشکسالی ملایم (۲)	خشکسالی ملایم (۳)	خشکسالی متوسط (۱)	خشکسالی متوسط (۲)	خشکسالی شدید (۱)	خشکسالی شدید (۲)	خشکسالی شدید (۳)
خشکسالی ملایم	ترسالی ملایم (۲)	ترسالی ملایم (۱)	نرمال	خشکسالی ملایم (۱)	خشکسالی ملایم (۲)	خشکسالی ملایم (۳)	خشکسالی متوسط (۱)	خشکسالی متوسط (۲)	خشکسالی متوسط (۳)
شرایط نرمال	ترسالی متوسط (۱)	ترسالی ملایم (۳)	ترسالی ملایم (۲)	ترسالی ملایم (۱)	نرمال	خشکسالی ملایم (۱)	خشکسالی ملایم (۲)	خشکسالی ملایم (۳)	خشکسالی متوسط (۱)
ترسالی ملایم	ترسالی متوسط (۳)	ترسالی متوسط (۲)	ترسالی متوسط (۱)	ترسالی ملایم (۳)	ترسالی ملایم (۲)	ترسالی ملایم (۱)	نرمال	خشکسالی ملایم (۱)	خشکسالی ملایم (۲)
ترسالی متوسط	ترسالی شدید (۲)	ترسالی شدید (۱)	ترسالی متوسط (۳)	ترسالی متوسط (۲)	ترسالی متوسط (۱)	ترسالی ملایم (۳)	ترسالی ملایم (۲)	ترسالی ملایم (۱)	نرمال
ترسالی شدید	ترسالی خیلی شدید (۱)	ترسالی شدید (۳)	ترسالی شدید (۲)	ترسالی شدید (۱)	ترسالی متوسط (۳)	ترسالی متوسط (۲)	ترسالی متوسط (۱)	ترسالی ملایم (۳)	ترسالی ملایم (۲)
ترسالی خیلی شدید	ترسالی خیلی شدید (۳)	ترسالی خیلی شدید (۲)	ترسالی خیلی شدید (۱)	ترسالی شدید (۳)	ترسالی شدید (۲)	ترسالی شدید (۱)	ترسالی متوسط (۳)	ترسالی متوسط (۲)	ترسالی متوسط (۱)



(شکل ۴) - طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SEPI

مدل پایش خشکسالی و نیز مقادیر محاسبه شده برای شاخص SPI و SEI، مجموعه قوانین فازی فعال برای هر ماه، با توجه به مقادیر ماهانه دو شاخص SPI و SEI مشخص و نهایتاً SEPI محاسبه شد. به عنوان مثال قوانین فازی فعال برای ماه دسامبر سال ۲۰۰۰ میلادی در ایستگاه همدیدی مشهد که در آن مقدار شاخص SPI برابر ۰/۶۸ و مقدار شاخص SEI برابر ۰/۹۲ می‌باشد، به صورت جدول ۴ بدست آمد.

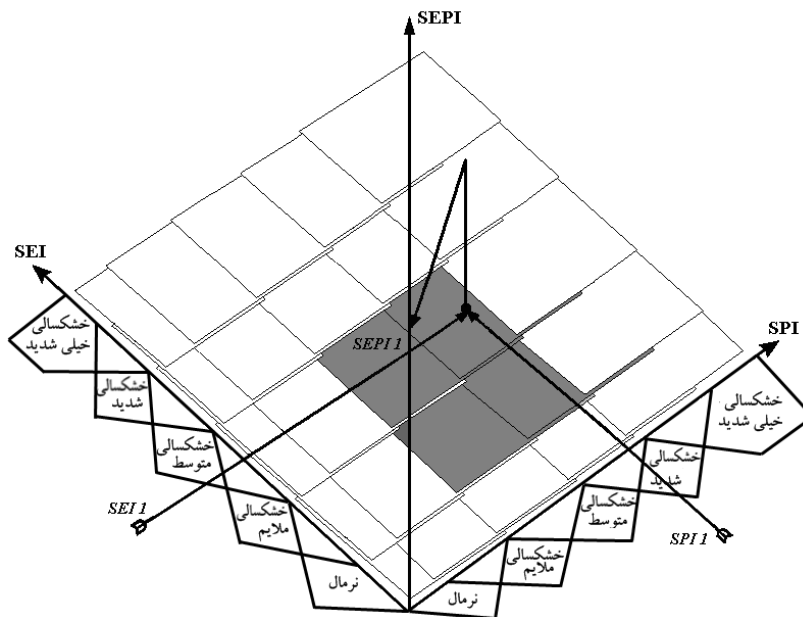
پس از تعیین شاخص SPI و SEI در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه و ۱۸ و ۲۴ ماهه شاخص SEPI نیز در مقیاس‌های مذکور برای دوره آماری محاسبه شد، که به عنوان نمونه نتایج مربوط به مقادیر

پس از تعریف تابع فازی طبقات خشکسالی بر اساس شاخص SEPI، با توجه به نحوه ارتباط بین طبقات خشکسالی و ترسالی حاصل از دو شاخص SPI و SEI با شاخص SEPI، مدل فازی نهایی با ۸۱ (۹۲) قانون تعریف شد، که در هر مرحله حداکثر چهار و حداقل دو قانون فعال می‌شود (شکل ۵). ضمناً از ترکیب دو شاخص SPI و SEI، سطح منحنی مشخص شده در شکل ۵ که سازنده مقادیر شاخص SEPI می‌باشد، بدست می‌آید. منحنی بدست آمده به خوبی نشان می‌دهد که با کاهش (افزایش) SPI و افزایش (کاهش) SEI مقدار SEPI به چه نحوی کاهش (افزایش) می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۳، قوانین فازی تعریف شده در

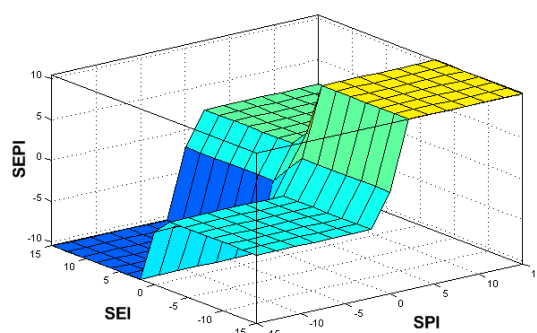
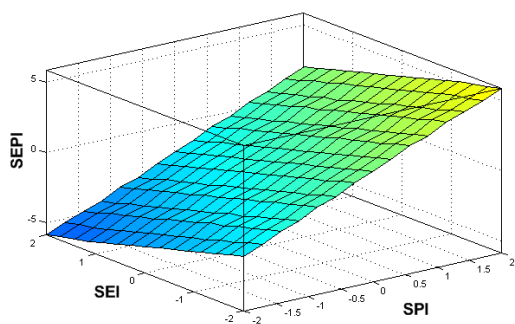
دوره‌های خشک کاسته شده ولی تداوم خشکسالی‌ها افزایش می‌یابد. همچنین این نتایج وقوع خشکسالی‌های با تداوم و شدت بالا را در کلیه مقیاس‌های زمانی برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ میلادی به تصویر می‌کشد، البته بیشترین تداوم خشکسالی در بازه ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ بوده است که خشکسالی در کلیه مقیاس‌های زمانی تداوم بیش از ۳ سال را داشته است. بررسی شرایط ترسالی نیز نشان می‌دهد که در سال‌های ۸۲ و ۸۳ میلادی و نیز ۹۲ و ۹۳ شدیدترین ترسالی‌ها با بیشترین تداوم به وقوع پیوسته است.

شاخص در برخی از مقیاس‌های زمانی برای دوره آماری ۲۰۰۱ - ۱۹۷۰ در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص به خوبی شدت و تداوم خشکسالی و زمان وقوع و خاتمه این پدیده را به تصویر می‌کشد.

بررسی نتایج حاصل از پایش خشکسالی با شاخص SEPI (شکل ۷) نشان می‌دهد که در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۳ ماهه تکرار دوره‌های خشک (SEPI کمتر از صفر) زیاد ولی تداوم این دوره‌ها کوتاه است، اما هر چه مقیاس زمانی شاخص افزایش می‌یابد از تکرار



(شکل ۵) - نحوه قرارگیری قوانین در مقابل هم و چگونگی ترکیب آنها

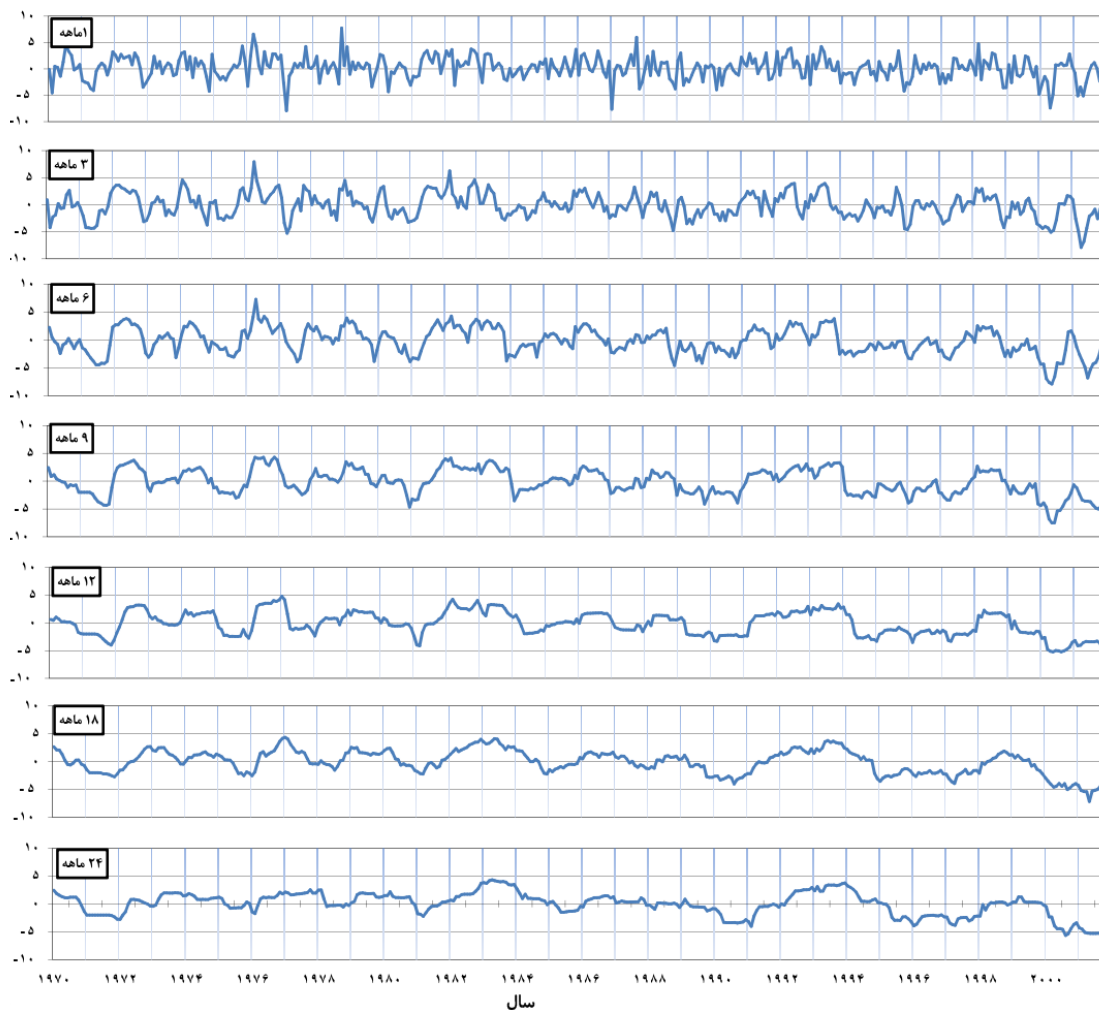


(شکل ۶) - سطح منحنی حاصل از ترکیب دو شاخص SPI و SEI برای محاسبه شاخص SEPI

(جدول ۴) - قوانین فازی فعال برای شاخص SPI و SEI در دسامبر سال ۲۰۰۰ میلادی در ایستگاه همدیدی مشهد

تالی	مقدم
شاخص SEPI هست نرمال	شاخص SPI ترسالی ملایم و
شاخص SEPI هست ترسالی ملایم (۱)	شاخص SPI ترسالی ملایم و
شاخص SEPI هست ترسالی ملایم (۲)	شاخص SPI ترسالی متوسط و
شاخص SEPI هست ترسالی ملایم (۳)	شاخص SPI ترسالی متوسط و



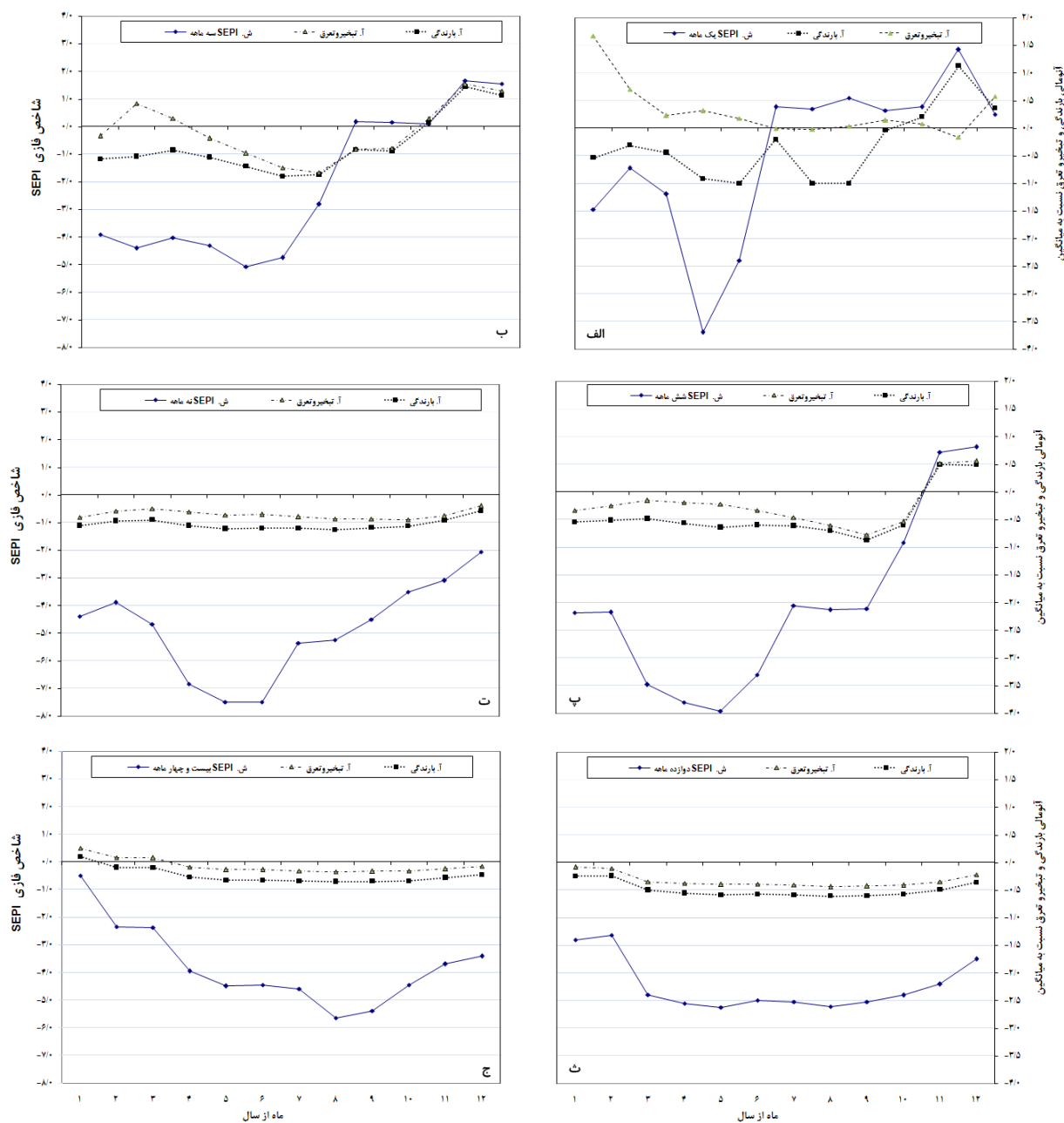


(شکل ۷) - روند تغییرات شاخص SEPI در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ایستگاه همدیدی مشهد

بارندگی، افزایش شدت خشکسالی را بدست داده و کمتر تحت تأثیر تبخیر و تعرق بوده است. این روند همچنین در ماه‌های ۳ تا ۶ در مقیاس زمانی ۶ ماهه و ماه‌های ۳ تا ۴ در مقیاس زمانی ۹ ماهه قابل ردیابی است (شکل ۷).

بررسی مقادیر شاخص SEPI نشان داد که در بعضی از زمان‌ها اگرچه بارندگی نسبت به نرمال افزایش داشته و شرایط ترسالی باید حاکم باشد، اما شاخص وقوع خشکسالی را نشان می‌دهد. دلیل وقوع این خشکسالی را می‌توان به افزایش درجه حرارت و تبخیر و تعرق نسبت داد. در این شرایط افزایش بارندگی به حدی نبوده است که بتواند کمبود رطوبت ناشی از افزایش تبخیر و تعرق را جبران نماید. به عنوان مثال این موضوع در ماه ۱ سال ۲۰۰۰ میلادی در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه قابل مشاهده است (شکل ۸).

مقایسه نتایج حاصل از تغییرات شاخص SEPI با تغییرات بارندگی و درجه حرارت ماهانه (آنومالی بارندگی و درجه حرارت) نشان می‌دهد که در اکثر ماه‌ها و مقیاس‌های زمانی تأثیر توأمان دو عامل بارندگی و درجه حرارت به عنوان عامل اصلی وقوع و تشدید خشکسالی بوده است. البته ذکر این نکته ضروری است که وقوع خشکسالی به شدت تحت تأثیر کمبود بارندگی نسبت به شرایط نرمال بوده، اما افزایش درجه حرارت (یا تبخیر و تعرق گیاه مرجع) نسبت به شرایط نرمال، به عنوان عامل تشدید شدت خشکسالی می‌باشد (شکل ۷). به عنوان مثال مقایسه شدت خشکسالی و مقادیر آنومالی تبخیر و تعرق و بارندگی در ماه‌های ۱ و ۴ سال ۲۰۰۰ میلادی برای مقیاس زمانی یک ماهه نشان می‌دهد که اگرچه آنومالی بارندگی در ماه ۴ با مقدار  $0/92$ - افزایش شدت خشکسالی و آنومالی تبخیر و تعرق با مقدار  $0/31$ ، کاهش شدت خشکسالی را نسبت به ماه ۱ نشان می‌دهد، اما مقدار شاخص SEPI به تبعیت از تغییرات آنومالی



(شکل ۸) - روند تغییرات شدت شاخص SEPI با آنومالی بارندگی و تبخیر و تعرق ماهانه برای سال ۲۰۰۰ میلادی در ایستگاه همدیدی  
 مشاهد در مقیاس‌های زمانی: الف) ۱ ماهه، ب) ۲ ماهه، پ) ۶ ماهه، ت) ۹ ماهه، ث) ۱۲ ماهه و ج) ۲۴ ماهه

تا ۹ در مقیاس زمانی ۳ ماهه نیز قابل رویت می‌باشد. لازم به ذکر است که این اتفاق عموماً در مقیاس‌های زمانی پائین بروز می‌کند و در مقیاس‌های زمانی بالا با توجه به اینکه در هر ماه، متوسط بارندگی چند ماهه برای محاسبه شاخص مدنظر قرار می‌گیرد، این امر بوقوع نمی‌پیوندد (شکل ۸).

بررسی نتایج ارائه شده برای شاخص SEPI نشان می‌دهد که این

تغییرات مقادیر شاخص SEPI در ماه‌های با متوسط بارندگی کم نشان می‌دهد که این شاخص چندان تحت تأثیر تغییرات بارندگی در این ماه‌ها نمی‌باشد. به عنوان مثال برای ماه‌های ۶ و ۷ و ۸ سال ۲۰۰۰ میلادی در مقیاس زمانی یک ماهه، با اینکه آنومالی بارندگی کاهش بارندگی ماهانه نسبت به نرمال را نشان می‌دهد، شاخص SEPI شرایط تقریباً نرمالی را نشان می‌دهد. این حالت در ماه‌های ۸

شدید(۱) در جدول ۳ با عضویت ۰/۸۲ می‌باشد، در صورتی که در طبقه‌بندی ترد همین شاخص، ماه مورد نظر در زیرطبقه ۳ شرایط خشک متوسط (خشکسالی متوسط (۳) در جدول ۳) واقع می‌شود. ضمناً شاخص SPI با توجه به مقدار ۱/۰۸- مرز شرایط خشک متوسط و ملایم را نشان می‌دهد.

با توجه به همبستگی بالای بین دو شاخص SEPI و SPI یعنی همبستگی بالای ۹۰ درصد، با افزایش مقدار شاخص SPI شاخص فازی افزایش و با کاهش مقدار شاخص SPI، شاخص فازی کاهش می‌یابد لذا این شاخص تغییرات شاخص SPI و به تبع آن تغییرات بارندگی را به درستی به تصویر می‌کشد.

در نهایت ارزیابی‌ها نشان دادند که شاخص فازی به طور همزمان نسبت به دو پارامتر بارندگی و درجه حرارت عکس‌العمل نشان می‌دهد. به علاوه باید این موضوع را مدنظر قرار داد که حساسیت شاخص SEPI نسبت به شاخص SPI بیشتر و نسبت به شاخص SEI کمتر است پس این شاخص بیشتر تحت تأثیر بارندگی که کاهش آن نسبت به نرمال، مهمترین عامل بروز خشکسالی است، بوده و کمتر تحت تأثیر تبخیر و تعرق و درجه حرارت که در درجه دوم اهمیت قرار دارد، می‌باشد. بعنوان مثال برای ماه ۲ و ۳ در مقیاس زمانی دوازده ماهه که در آنها تغییرات شاخص SEI بسیار ناچیز می‌باشد، شاخص SPI از ۰/۸۹- به ۱/۹۰- و به تبع آن شاخص SEPI از ۲/۶۳- به ۴/۸- کاهش یافته است لذا به ازای هر واحد کاهش SPI شاخص SEPI ۲/۱۵ واحد کاهش را نشان می‌دهد در صورتی که برای ماه ۴ و ۵ در مقیاس زمانی ۱ ماهه که در آن تغییرات شاخص SPI بسیار ناچیز است، با کاهش شاخص SEI از ۱/۷۵ به ۱/۰۹، شاخص جدید از ۵/۶۶- به ۴/۷۹- افزایش یافته است یعنی به ازای هر واحد کاهش شاخص SEI، شاخص SEPI کاهشی معادل ۱/۳ واحد را نشان می‌دهد.

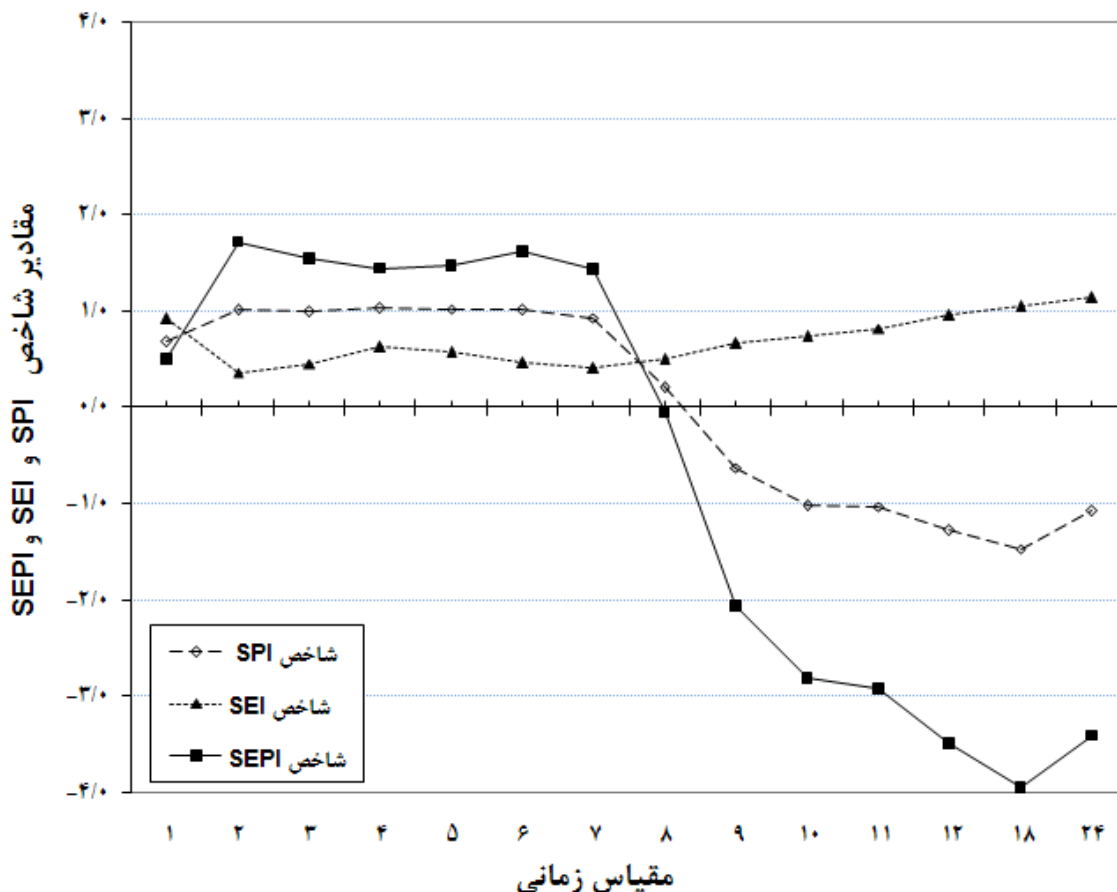
همانطور قبلاً بیان شد یکی از مشکلات اصلی کاربرد شاخص SPI، در ماه‌های با متوسط بارندگی کم است (شکل ۳)، در این شرایط مقادیر شاخص در مقیاس‌های زمانی پائین با تغییر کمی در بارندگی به شدت تغییر می‌کند و حتی در بعضی از موارد ممکن است تغییر یک خشکسالی به ترسالی و بالعکس را نشان دهد، در صورتی که این امر در طبیعت اتفاق نخواهد افتاد. در شاخص SEPI با توجه به استفاده از طبقه‌بندی فازی، نحوه ترکیب و تعریف قوانین فازی و اضافه نمودن تغییرات تبخیر و تعرق به شاخص، تقریباً این مشکل مرتفع شده است.

شاخص وقوع ترسالی‌های با شدت متفاوت را که متاثر از تغییرات بارندگی و درجه حرارت می‌باشد، مشابه خشکسالی به تصویر می‌کشد. این امر در ماه‌های ۱۰ تا ۱۲ مقیاس زمانی ۱ ماهه و مقیاس زمانی ۳ ماهه و همچنین ماه‌های ۱۱ و ۱۲ در مقیاس زمانی ۶ ماهه قابل پیگیری است. این نتایج مجدداً تأثیر توأمان پارامتر بارندگی و درجه حرارت بر تغییر شدت ترسالی‌ها را نیز نشان می‌دهد (شکل ۸). از آنجائیکه برای محاسبه شاخص SEPI از منطق فازی استفاده شده است، مشکلات مربوط به منطق بولین در آستانه طبقات خشکسالی، بروز نخواهد کرد. بنابراین با توجه به توابع عضویت فازی ورودی، خصوصیت منطق فازی در ترکیب این توابع و ارائه تابع فازی خروجی، می‌توان اظهار داشت که با تغییر جزئی بارندگی و درجه حرارت یا اشتباه در اندازه‌گیری دقیق پارامترهای ورودی، تغییرات فاحشی در خروجی مدل و نهایتاً طبقات شدت خشکسالی و ترسالی محاسبه شده، بوقوع نخواهد پیوست.

### مقایسه نتایج حاصل از شاخص SEPI با شاخص SPI

پس از محاسبه و تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از دو شاخص SEPI و SPI، سعی شد تا شرایط و وضعیت هر یک از شاخص‌ها نسبت به همدیگر مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد. از آنجائی که ارائه این نتایج منوط به ارائه شکل‌های مقایسه‌ای بین شاخص‌ها بوده و حجم آنها زیاد می‌باشد، لذا فقط نتایج مربوط به ماه ۱۲ سال ۲۰۰۰ میلادی در مقیاس‌های مختلف زمانی در شکل ۹ ارائه شده است.

علاوه بر بررسی و تحلیل نتایج حاصل از مقایسه مقادیر شاخص‌ها در ماه‌های مختلف، همبستگی بین شاخص SEPI در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه، ۱۸ ماهه و ۲۴ ماهه با شاخص SPI مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های فوق نشان داد که شدت خشکسالی در شاخص فازی در تعدادی از ماه‌ها و مقیاس‌های زمانی، مشابه و برخی ماه‌ها متفاوت از شدت خشکسالی تعیین شده با SPI است، به عنوان مثال برای ماه دسامبر سال ۲۰۰۰ میلادی در مقیاس زمانی یک ماهه، مقدار شاخص SEI و SPI، به ترتیب برابر ۰/۹۲ و ۰/۶۸ و شاخص فازی برابر ۰/۵۰ است. این وضعیت شرایط مرطوب ملایم (ترسالی ملایم (۱) در جدول ۳ با عضویت ۱ برای شاخص فازی و خشکسالی متوسط برای SPI را به تصویر می‌کشد. در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه نیز، مقدار شاخص SEI و SPI به ترتیب برابر ۱/۱۴ و ۱/۰۸- بوده، در حالی که مقدار شاخص فازی SEPI برابر ۳/۴۱- است. این مقدار نشان‌دهنده خشکسالی متوسط در زیرطبقه ۳ خشکسالی متوسط (۳) در جدول ۳ با مقدار عضویت ۰/۱۸ و شرایط خشک شدید در زیرطبقه ۱ (خشکسالی



(شکل ۹) - مقایسه مقادیر شاخص‌های SEPI و SEI، SPI در ماه ۱۲ سال ۲۰۰۰ میلادی برای ایستگاه همدیدی مشهد

### نتیجه گیری

نیاز به پایش خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک که دو عامل کمبود بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق بیشترین تأثیر را بر این پدیده دارند، ارائه یک مدل تحلیلی فازی و نهایتاً یک شاخص جدید پایش خشکسالی به نام شاخص SEPI را باعث شد. ارائه شاخص فازی SEPI نشان داد که این شاخص علی‌رغم سادگی محاسباتش، یک شاخص قابل اعتماد می‌باشد، زیرا علاوه بر بارندگی، تبخیر و تعرق هم به عنوان یک پارامتر موثر بر تغییر شدت خشکسالی در ارائه شاخص مدنظر قرار گرفته است، لذا با طبیعت خشکسالی هماهنگی بیشتری دارد.

با توجه به اینکه داده‌های ورودی مدل فازی پایش خشکسالی یعنی بارندگی و درجه حرارت، برای یک دوره آماری طولانی مدت در اکثر نقاط دنیا وجود دارند و جزء اولین پارامترهای هواشناسی می‌باشند که مورد ثبت قرار گرفته‌اند، لذا این شاخص در اکثر نقاط دنیا قابل محاسبه است. علاوه استفاده از این شاخص در مناطق خشک و نیمه

خشک نیز مزایای خاص خود را دارد، در این مناطق تغییرات ناچیز پارامتر بارندگی در ماه‌های با متوسط بارندگی کم که در مقیاس‌های زمانی کوتاه عملاً نمی‌توانند تغییر زیادی در کاهش شدت خشکسالی و ترسالی داشته باشند، در شاخص SEPI با توجه به خصوصیت منطق فازی در تقابل با شاخص SPI بدرستی مدنظر قرار گرفته است. این امر در مقیاس‌های زمانی ۱ ماهه تا ۳ ماهه نمود بیشتری دارد.

پایش و تجزیه و تحلیل‌های خشکسالی با SEPI (شکل ۶) نشان داد که از این شاخص می‌توان برای تعیین زمان شروع، خاتمه، تداوم و شدت خشکسالی، همچنین مقایسه این پارامترها در بین مقیاس‌های زمانی و ماه‌های مختلف سال استفاده کرد. علاوه بر این، در مدل فازی ارائه شده، با مدنظر قرار دادن شرایط ترسالی و تأثیر بارندگی و تبخیر و تعرق بر وقوع و شدت آن، امکان پایش ترسالی با شاخص SEPI نیز فراهم شده است. با توجه به ورودی‌های مدل فازی و ملحوظ نمودن شرایط منطقه برای تغذیه و تخلیه رطوبت بیش از حد طبیعی در مدل، می‌توان اظهار داشت که این مدل توانایی پایش شرایط سیلابی را هم داراست.

یکی از مزایای شاخص SEPI، توانایی این شاخص محاسبه و

بدلیل استفاده از توزیع نرمال و استاندارد نمودن ورودی‌ها در مدل فازی و شاخص جدید، امکان مقایسه و ارزیابی مقادیر شاخص SEPI و شدت خشکسالی در زمان‌ها و مکان‌های مختلف وجود دارد. همچنین با توجه به اینکه در مدل فازی ارائه شده آستانه‌ها و مرزهای مرتبط با شاخص جدید بر مبنای دیگر شاخص‌ها بوده و بطور نظری ارائه شده است بنابراین تغییر و تعریف مجدد این مرزها و آستانه‌های در زمانهای مختلف و برای کاربردهای متفاوت امکانپذیر می‌باشد. لذا می‌توان اظهار داشت که این شاخص اصولاً یک شاخص بدون مرز است.

پایش انواع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت است. این مسئله توانایی شاخص برای روندیابی در شرایط و کاربردهای مختلف از جمله کاربردهای هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی، اقتصادی - اجتماعی و... را به آن داده است. این تنوع زمانی همچنین امکان پایش بررسی اثرات توسعه و کاهش شدت خشکسالی را در زمانهای مختلف مشابه شاخص SPI اما با دقت بیشتر بدست می‌دهد. از آنجائی که اساس و بنیان شاخص SEPI برپایه شاخص SPI بنا نهاده شده و با توجه به همستگی بسیار بالای نتایج حاصل از این دو شاخص، می‌توان اظهار داشت که خصوصیات شاخص SPI در شاخص فازی مستتر است.

## منابع

- ۱- انصاری ح. ۱۳۸۳. پایش و پهنه‌بندی خشکسالی با استفاده از منطق فازی و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی. پایان نامه دکتری. گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس.
- 2- Abebe A.J., Solomatine D.P. and Venneker R.G. 2000. Application of adaptive fuzzy rule-based models for reconstruction of missing precipitation events. *Hydrological Sciences Journal*, 45: 154-173.
- 3- Agnew C.T. 2000. Using the SPI to identify drought. *Drought Network News*. 12(1): 6-12.
- 4- Akeh L.E., Nnoli N., Gbuyiro S., Ikehua F. and Ogunbo S. 2001. Meteorological early warning systems(EWS) for drought preparedness and drought management in nigeria. *Drought Network News*. 13: 154-168.
- 5- Azaiez M.N. 2002. A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs. *European Journal of Operational Research*. 143: 611-624.
- 6- Babaeyan-Koopaei K., Ervine D.A. and Pender G. 2003. Field measurements and flow modeling of overbank flows in River Severn UK. *Journal of Environmental Informatics*, 1:28-36.
- 7- Bankert R., Hadjimichael M. and Hansen B. 2001. Fuzzy logic in environmental sciences. [http://www.chebucto.ns.ca/Science/AIMET/fuzzy\\_environment/](http://www.chebucto.ns.ca/Science/AIMET/fuzzy_environment/).
- 8- Bardossy A. and Duckstein L. 1995. Fuzzy rule-based modeling with applications to geophysical, biological and engineering systems. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida, USA.
- 9- Bardossy A., Bronstert A. and Merz B. 1995. 1, 2 and 3dimensional modeling of water movement in the unsaturated soil matrix using a fuzzy approach. *Adv. Water Resources*, 18:237-251.
- 10- Barreto-Netoa A.A. and Filhob C.R.S. 2008. Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed. *Environmental Modelling & Software*, 23(2):244-253.
- 11- Bussay A., Hayes M., Szinell Cs. and Svoboda M. 2000. Monitoring drought in hungary with the standardized precipitation index. *Journal of Water International*, 15:339-345.
- 12- Carpa A., Nicosia O.L.D. and Scicolone B. 1994. Application of fuzzy sets to drought assessment". *Adv. In Water Resources. Tech. and Management*, Tsakiris and Santos (eds), Balkema, 15:479-483.
- 13- Edirisinghe N.C.P., Patterson E.I. and Saadoul N. 2000. Capacity planning model for a multipurpose water reservoir with target-priority operation. *Annals of Operations Research*, 100:273-303.
- 14- Fontane D.G., Timothy K.G. and Moncado E. 1997. Planning reservoir operations with imprecise objectives". *Journal of Water Resources. Planning and Management Div. ASCE*. 123: 154-162.
- 15- Hayes M.J., Svoboda M.D., Wilhite D.A. and Vanyarkho O.V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 80:429 - 438.
- 16- Hayes M.J., Svoboda M., Comte D.L., Redmond K.T. and Pasteris P. 2007. Drought monitoring: new tools for the 21st century. In: D.A. Wilhite, Editor, *Drought and Water Crisis. Science, Technology, and Management Issues*, Taylor & Francis, Boca Raton. pp. 53-69.
- 17- Huang G.H. 1998. A hybrid inexact-stochastic water management model. *European Journal of Operational Research*. 107: 137-158.
- 18- Jakeman A.J., Letcher R.A. and Norton J.P. 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*. 21: 602-614.
- 19- Jairaj P.G. and Vedula, S. 2000. "Multi-reservoir system optimization using fuzzy mathematical programming". *Water Resources Management*. 14: 457-472.
- 20- Krätschmer V. 2001. A united approach to fuzzy random variables. *Fuzzy Sets and Systems*. 123:1-9.
- 21- Komuscu A.U. 1999. Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in turkey. *Drought Network*

- News. 11(1): 7–13.
- 22- Lee C.S. and Chang S.P. 2005. Interactive fuzzy optimization for an economic and environmental balance in a river system. *Water Research*, 39:221–231.
- 23- Li Y.P., Huang G.H. and Nie S.L. 2007. Mixed interval-fuzzy tow-stage integer programming and its application to flood-diversion planning. *Engineering Optimization*. 39:163–183.
- 24- Li Y.P., Huang G.H., Huang Y.F. and Zhoue H.D. 2009. A multistage fuzzy-stochastic programming model for supporting sustainable water-resources allocation and management. *Environmental Modeling & Software*, 24 (7): 786-797.
- 25- McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proc. 8<sup>th</sup> Conf. on Applied Climatology, January 17 – 22, 1993. American Meteorological Society, Massachusetts, pp. 179 - 184.
- 26- McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. In: Proc. 9<sup>th</sup> Conf. on Applied Climatology, January 15 – 20, 1995. American Meteorological Society, Massachusetts, pp. 233 - 236.
- 27- Moreira E.E., Coelho C.A., Paulo A.A., Pereira L.S. and Mexia J.T. 2008. "SPI-based drought category prediction using log linear models". *Journal of Hydrology*, 354:116-130.
- 28- Nasiri F., Maqsood I., Huang G. and Fuller N. 2007. Water quality index: a fuzzy river-pollution decision support expert system. *ASCE-Journal of Water Resources Planning and Management* 133(2): 95–105.
- 29- Pallottino S., Sechi G.M., and Zuddas P. 2005. A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. *Environmental Modeling & Software*. 20:1031–1042.
- 30- Paulo A. and Pereira L.S. 2007. "Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resources Management*. doi:10.1007/s11269-006-9129-9.
- 31- Paulo A., Pereira L.S. and Matias P.G. 2003. Analysis of local and regional droughts in southern Portugal using the theory of runs and the Standardized Precipitation Index". In: *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*, Kluwer, Dordrecht, pp. 55–78.
- 32- Pesti G., Shrestha B.P., Duckstein L. and Bogardi I. 1996. A fuzzy rule-based approach to drought assessment. *Water Resources Research*, 32:1741-1747.
- 33- Pongracz R., Bogardi L. and Duckstein L. 1999. Application of fuzzy rule-based modeling to regional drought. *Journal of Hydrology*. 224: 100-114.
- 34- Pokrovsky O.M., Kwok H.F. and Ng C.N. 2001. Fuzzy logic approach for description of meteorological impacts on urban air pollution species: A Hong Kong case study. *Computers & Geosciences*. 28(1):119-127
- 35- Refsgaard J.C., Sluijs J.P., Hojberg A.L. and Vanrolleghem P.A. 2007. Uncertainty in the environmental modeling process – a framework and guidance. *Environmental Modeling & Software*. 22: 1543–1556.
- 36- Robinson C. 2001. A neural network system for the protection of citrus crops from frost damage. *Computers and Electronics in Agriculture*. 16(3): 177-187.
- 37- Szalai S., Szinell Cs., Bussay A. and Szentimrey T. 1998. Drought tendencies in Hungary. *Jorunal of Climatollogy*. 18: 1479-1491.
- 38- Vogt J.V. and Somma F. 2000 .*Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer, Dordrecht.
- 39- Yamoah C., Hayes M.J. and Savoboda M.D. 1997. Application of the standardized precipitation index to estimate crop yield in Nebraska". In: Proc. 10<sup>th</sup> Conf. on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society.
- 40- Zimmermann H.J. 1995. *Fuzzy set theory and its application*. Dordreche: Kluwer Nijhoff Publishing, The Netherlands.

## Drought Monitoring with New Precipitation and Evapotranspiration Index Based on Fuzzy Logic

H. Ansari<sup>\*1</sup> - K. Davary<sup>2</sup> - H. Sanaienejad<sup>3</sup>

### Abstract

Drought is a natural creeping event that starts due to lower moisture compared to normal condition. This phenomenon impacts all aspects of human activities. However there is neither any detailed definition nor a general and proper index for drought monitoring. In this study, fuzzy logic has been applied to deal with inherent uncertainties of the real world data. We presented a fuzzy model to evaluate and analysis the drought. Using the Fuzzy logic for drought monitoring of Mashhad synoptic station showed its higher capability and efficiency compared to Boolean logic. We combined two membership functions related to SPI (Standardized precipitation index) and SEI (a presumable standardized index for evapotranspiration), to provide a new index (SEPI: Standardized Evapotrans-Precipitation Index). The results showed that fuzzy model which employed 81 rules with minimum of 2 and maximum of 4 rules is the most accurate approach. The new index (SEPI) not only covers all advantages of SPI, but also can be calculated using different time scales of available data. Moreover, it considers temperature effects on drought occurrence and severity too. Monitored drought using SPI and SEPI indices demonstrated high correlation (more than 90%) between these two indices across all time scales. Drought monitored by SEPI for Mashhad synoptic station, at 1 to 3 monthly scales showed high drought frequency but low duration. Increasing time scales resulted in low frequency but higher duration. Employing SEPI also showed that high intensity and frequency of drought occurred in years 2000 and 2001 across all time scales. The longest drought duration, by 3 years across all time scales, occurred between 1995 to 1998.

**Keywords:** Fuzzy logic, Drought index, Standardized Precipitation index (SPI), Standardized Evapotransprecipitation Index (SEPI).

---

1,2,3- Assistant Prof. and Associate Prof., of Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad  
(\* - Corresponding author Email: Ansari\_hos@yahoo.com)