

مدل‌سازی و پایش پدیده خشک‌سالی در جنوب غرب ایران با استفاده از شاخص جدید فازی

وحید صفریان زنگیر- دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
بهروز سبحانی* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، اقلیم‌شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
صیاد اصغری- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۱

چکیده

خشک‌سالی یکی از مخاطرات طبیعی و تأثیرگذار در همه فعالیت‌های موجودات زنده است. هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی و تحلیل خشک‌سالی در جنوب غرب ایران است. برای این کار، نخست از پارامترهای اقلیمی-بارش، دما، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی، و سرعت باد- در بازه زمانی ۳۲ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۸) در ۱۵ ایستگاه جنوب غرب ایران استفاده شد. برای مدل‌سازی شاخص فازی T.I.B.I، نخست چهار شاخص (SET, SPI, SEB, MCZI) با استفاده از منطق فازی در نرم‌افزار Matlab فازی‌سازی شدند. سپس، شاخص‌ها با هم مقایسه شدند و در نهایت از مدل تصمیم‌گیری چندمتغیره SAW برای اولویت‌سنجی مناطق درگیر با خشک‌سالی استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان داد بیشترین درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه اسلام‌آباد غرب و کمترین آن در مقیاس شش‌ماهه در همدان فرودگاه و در مقیاس دوازده‌ماهه در ایستگاه خرم‌آباد رخ داده است. مدل T.I.B.I طبقات خشک‌سالی چهار شاخص یادشده را با سطح اطمینان بالا در خود منعکس کرد. براساس مدل‌سازی انجام‌گرفته، شاخص فازی T.I.B.I نسبت به شاخص فازی SPEI برتری نسبی نشان داد. در نهایت، براساس مدل تصمیم‌گیری چندمتغیره SAW، ایستگاه اسلام‌آباد غرب با مقدار امتیاز ۱ در اولویت بیشتر در معرض درگیری خشک‌سالی قرار گرفت.

واژگان کلیدی: شاخص T.I.B.I، مدل SAW، مدل‌سازی، منطق فازی، MatLab

مقدمه

مشکلات ناشی از کمبود آب، که در اثر عوامل طبیعی و انسانی به‌وجود می‌آید، می‌تواند اثرهای جبران‌ناپذیری در زندگی انسان‌ها، سایر موجودات زنده، و محیط زیست در سطوح منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای بر جای بگذارد. ایجاد و تشدید بحران‌های ناشی از کمبود آب می‌تواند اثرهای سوء بر اقتصاد، اجتماع، و کشاورزی داشته باشد. بحران کمبود آب خود را به‌صورت تدریجی نخست به‌صورت خشک‌سالی نشان می‌دهد که خطرهای آن به نسبت خشکی بیشتر است. کنترل مسائل و مشکلات ناشی از خشک‌سالی بسیار دشوار است. خشک‌سالی، با توجه به فراوانی، شدت، و میزان اثرگذاری خود، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. اینکه خشک‌سالی در منطقه تحت سیطره خود چقدر خسارات به‌بار می‌آورد نیازمند مطالعه دقیق همه‌جانبه است. با توجه مسائل و مشکلات بیان‌شده در مورد خشک‌سالی، پایش و پیش‌بینی آن برای پیش‌گیری و برنامه‌ریزی دقیق به‌منظور کنترل مخاطرات خشک‌سالی در آینده در منطقه احتمال رخداد آن با مدل و روش دقیق ضروری

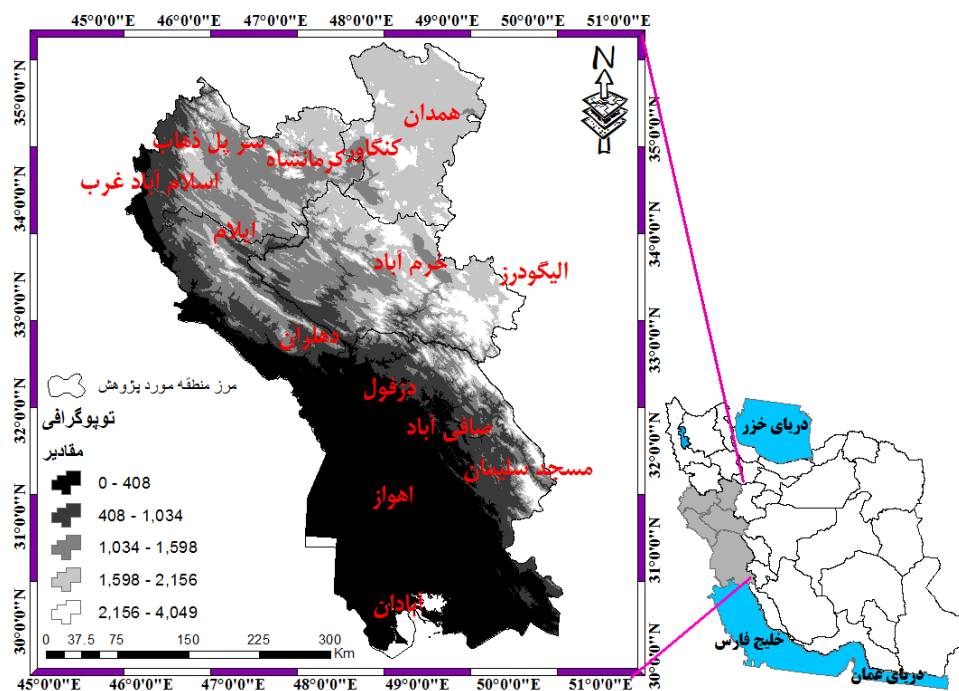
و مهم است. جنوب غرب و غرب ایران یکی از مناطقی است که در سال‌های اخیر از این پدیده مخاطره‌آمیز در امان نبوده است. مطالعه این پدیده مخاطره‌آمیز در منطقه مذکور دارای اهمیت فراوانی است. خشک‌سالی یکی از مخاطرات طبیعی است که نقاط مختلف درگیر خود را به‌چالش می‌کشد. در سال‌های اخیر مناطق مختلف جهان شاهد خشک‌سالی‌هایی با شدت بیشتری بوده‌اند. همچنین، خشک‌سالی یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی تأثیرگذار در بخش کشاورزی و منابع آب است که فراوانی آن به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور بسیار زیاد است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۴: ۹۸؛ شمس‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۶۵؛ زینالی و صفریان زنگیر، ۱۳۹۶: ۱۳۹۶؛ صمدیان فرد و اسدی، ۱۳۹۶: ۱۳۹۶؛ جعفری و همکاران، ۱۳۹۶). زینالی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی خشک‌سالی و امکان پیش‌بینی آن در ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه پرداختند؛ نتایج پژوهش آنان بیانگر روند افزایشی شدیدتر دما در این حوضه بوده است. بیشترین درصد وقوع خشک‌سالی در ایستگاه ارومیه و کمترین آن در مهاباد مشاهده شده است. بازدید (۱۳۹۷) به ارزیابی خشک‌سالی ایستگاه‌های سینوپتیک غرب کشور با استفاده از روش هربست و مدل عصبی-فازی تطبیقی پرداخت و به این نتیجه رسید که ضریب تعیین و میزان خطا به‌جز در ایستگاه‌های کرمانشاه، میانه، و پیرانشهر عملکرد بهتری نداشته است. ترابی‌پوده و همکاران (۱۳۹۷) به تخمین خشک‌سالی با استفاده از شبکه‌های هوشمند پرداختند و نشان دادند که استفاده از مدل شبکه عصبی موجک می‌تواند در زمینه تخمین خشک‌سالی مؤثر باشد. مرادی و همکاران (۱۳۸۷) به شبیه‌سازی و تحلیل ارتباط خشک‌سالی‌های آب‌شناختی و اقلیمی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی جلگه بابل پرداختند. وقوع خشک‌سالی و ترسالی‌های رودخانه بابل رود بیشتر تحت تأثیر خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های ایستگاه قائم‌شهر است. اختیاری‌خواجه و دین‌پژوه (۱۳۹۷) به کاربرد شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI) برای بررسی دوره‌های خشکی اقدام کردند و به این نتیجه رسیدند که طبق نتایج به‌دست‌آمده معلوم شد که سال‌های آبی ۸۷-۱۳۸۶، ۸۷-۱۳۸۶ و ۸۱-۱۳۸۰ به‌ترتیب برای ایستگاه‌های تبریز، بندرانزلی، و زاهدان خشک‌ترین سال آبی در طول دوره آماری ۶۰ساله بوده است. هوانگ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی ارتباط بین خشک‌سالی هیدرولوژیکی، شاخص‌های آب و هوایی، و فعالیت انسانی در حوضه رودخانه کلمبیا پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از حداکثر و حداقل سالانه راه مناسب برای بررسی ویژگی‌های حجم و مدت زمان سیل و خشک‌سالی نیست و برای ارزیابی خشک‌سالی باید دیگر روش‌ها مانند شاخص استاندارد به‌صورت گسترده استفاده شود. کوسادا و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تغییرات هیدرولوژیک در جهت رویکردی سازگار برای ارزیابی تغییرات در سیل و خشک‌سالی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که اغلب روش‌های مورد استفاده در تشخیص روندهای افراطی هیدرولوژیکی برای تشخیص روند مناسب نیست و نمی‌توان از آن‌ها در تصمیم‌گیری استفاده کرد. بنابراین، آنان یک روش مبتنی بر نظریه اجرا و سطح آستانه پیشنهاد دادند. مدرسی‌راد و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی غرب ایران پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که شاخص SPI قادر به نشان‌دادن دو ویژگی اصلی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و نیز ارائه برآورد دقیق در دوره بازگشت مجدد خشک‌سالی شدید است. زلکی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص خشک‌سالی پالم (PDSI) و داده‌های ماهواره‌ای به بررسی خشک‌سالی در اتیوپی پرداختند. یافته‌های پژوهش آن‌ها نشان داد که دوره‌های خشکی و رطوبت مشاهده‌شده در شمال محدوده مورد مطالعه به‌طور عمده به تغییر انسو در فصل‌های بهار و تابستان بستگی دارد؛ درحالی‌که روند خشک‌شدن در جنوب و جنوب غربی با گرمایش اطلس و دمای سطح آب در غرب اقیانوس آرام در ارتباط است. دیگر پژوهشگران داخلی و خارجی با استفاده از مدل‌های مختلف در زمینه خشک‌سالی تحقیق کرده‌اند؛ از جمله شکری‌کوچک و بهنیا (۱۳۹۲)، یاراحمدی (۱۳۹۳)، ظهیری و همکاران (۱۳۹۳)، حدادی و حیدری (۱۳۹۴)، منتصری و امیرعطایی (۱۳۹۴)، سبحانی و همکاران (۱۳۹۴)، صلاحی و مجتبی‌پور (۱۳۹۵)،

ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۵)، دماوندی و همکاران (۱۳۹۵)، فنی و همکاران (۱۳۹۵)، غلام‌علی و همکاران (۲۰۱۱)، هوانگ و همکاران (۲۰۱۶)، جان‌درمیان و همکاران (۱۳۹۴)، خشتکاری ثانی (۱۳۹۴)، تیوما و همکاران (۲۰۱۵)، اسپینونی و همکاران (۲۰۱۵)، صفریان‌زنگیر و همکاران (۲۰۱۹)، سبحانی و همکاران (۲۰۱۹)، سبحانی و صفریان‌زنگیر (۲۰۱۹) و سبحانی و همکاران (۲۰۱۹). با توجه به مطالعات انجام‌گرفته در داخل و خارج کشور در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی و پایش پدیده خشک‌سالی در جنوب غرب ایران اقدام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر به مدل‌سازی خشک‌سالی در جنوب غرب ایران با استفاده از داده‌های اقلیمی بارش، دما، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی، و سرعت باد به صورت ماهانه (در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه) برای بازه زمانی ۳۲ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۸) در پنج استان خوزستان، لرستان، ایلام، کرمانشاه، و همدان در ۱۵ ایستگاه با استفاده از مدل‌سازی شاخص جدید به نام شاخص T.I.B.I^۱ معماری، فازی‌سازی شده از چهار شاخص (SEB^۲، SPI^۳، و SET^۵) معتبر در سازمان هواشناسی جهانی اقدام شد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش در سطح کشور

۱. شاخص ترکیب‌یافته براساس چهار شاخص: شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده تورنت وایت، شاخص بارش استاندارد شده، شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده بلانی کریدل فائو، و شاخص اصلاح شده CZI

2. Modified CZI Index (شاخص اصلاح شده CZI)
3. Standardized Evapotranspiration Blanney Creedale FAO Index (شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده بلانی کریدل فائو)
4. Standardized Precipitation Index (شاخص بارش استاندارد شده)
5. Standardized EvapotranspirationTorrent White Index (شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده تورنت وایت)

روش تحقیق

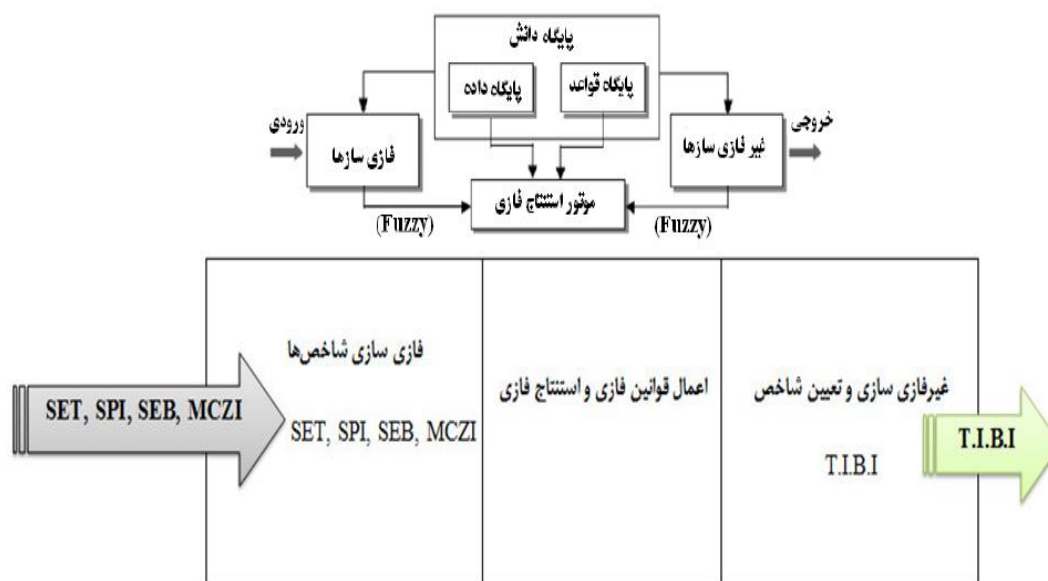
برای مدل‌سازی شاخص جدید T.I.B.I، نخست داده‌های اقلیمی نرمال‌سازی شدند. سپس، چهار شاخص (MCZI، SEB، SPI و SET) جداگانه محاسبه شدند و مدل‌سازی فازی چهار شاخص مذکور در محیط نرم‌افزار Matlab انجام شد و در نهایت برای اولویت‌سنجی مناطق درگیر با خشک‌سالی از مدل تصمیم‌گیری چندمتغیره^۱ SAW استفاده شد.

شاخص فازی T.I.B.I

شاخص فازی (T.I.B.I) برای رفع بخشی از معایب شاخص SPEI ارائه شده است. شاخص T.I.B.I از تلفیق شاخص‌های MCZI، SEB، SPI و SET حاصل شد. این شاخص نتیجه معماری مدل‌سازی فازی پایش خشک‌سالی است که با استفاده از منطق فازی در یک سیستم استنتاج فازی طراحی شد. نحوه طراحی این مدل و تعیین شاخص T.I.B.I در ادامه شرح داده شده است.

معماری فازی پایش خشک‌سالی

برای مشتق‌سازی شاخص‌های MCZI، SEB، SPI و SET با استفاده از سیستم استنتاج فازی، با توجه به ساختار مدل‌های فازی، ساختار مدل‌سازی فازی پایش خشک‌سالی به صورت شکل ۲ در نظر گرفته شد.



شکل ۲. سیستم استنتاج فازی، مدل‌سازی شاخص فازی T.I.B.I برای پایش خشک‌سالی (سلاجقه و فتح‌آبادی، ۱۳۸۸: ۲۷۳)

پس از تعیین ساختار مدل فازی، برنامه رایانه‌ای مربوط به محیط نرم‌افزار Matlab طراحی شد و با استفاده از این برنامه فایل‌های ورودی یعنی مقادیر شاخص‌های MCZI، SEB، SPI و SET خوانده می‌شود و مقادیر T.I.B.I در فایل خروجی ارائه می‌گردد. معماری مدل‌سازی فازی پایش خشک‌سالی در پژوهش حاضر بر محورهای زیر استوار است:

1. Simple Additive Weighting

متغیرهای نوشتاری و ارزش‌های زبانی

برای فازی‌سازی و تعیین توابع عضویت در محیط نرم‌افزار Matlab از واژه زبانی نه‌گانه استفاده شد که گستردگی و تغییرات مقیاس آن‌ها از تغییرات در قالب واژه‌های زبانی ترسالی خیلی شدید (WVH^1)، ترسالی شدید (WH^2)، ترسالی متوسط (WA^3)، ترسالی خفیف (WS^4)، شرایط نرمال (N^5)، خشکسالی خفیف (DS^6)، خشکسالی متوسط (DA^7)، خشکسالی شدید (DH^8)، و خشکسالی خیلی شدید (DVH^9) در قالب مقیاس زبانی نه‌گانه نام برد. در پژوهش حاضر از این مقیاس در ارزیابی صورت وضعیت شرایط خشکسالی استفاده شد.

تعریف عملیاتی اعداد فازی

اعداد فازی حامل بار عددی ارزش‌های زبانی و واژه‌های زبانی در طول یک دامنه مشخص از اعداد است (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۴). در واقع، هر عدد فازی در عطف به یک واژه زبانی و یک مجموعه فازی مطرح می‌شود. با تبدیل ارزش‌های زبانی با اعداد فازی، اجرای عملیات‌های حسابی و منطقی بر روی آن‌ها روال مشخصی به خود می‌گیرد (انصاری و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۸)؛ معمولاً، به شکل استاندارد شده و در قالب بازه بسته ۰ تا ۱ یا ۰ تا ۱۰۰ در نظر گرفته شد (محور افقی در شکل ۴). به عنوان مثال، اعداد فازی مربوط به شیب‌های پایین، متوسط، و بالا در طول یک دامنه استاندارد شده عبارت‌اند از: $(0, 0, 0, 2, 0, 4)$ = پایین؛ $(0, 2, 0, 5, 0, 8)$ = متوسط؛ و $(0, 6, 0, 8, 1, 1)$ = بالا. همان‌گونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است، تعداد اعداد فازی و بار عددی هر کدام بر روی یک دامنه استاندارد به تناسب واژه‌های زبانی سه‌تایی، چهارتایی، هشت‌تایی، و نظایر آن تعیین شدند. سپس، برای استانداردسازی شاخص‌های SET و SPI از رابطه ۱ و برای شاخص‌های SEB و MCZI از رابطه ۲ استفاده شد.

$$x_{ij} = \frac{x_j \max - x_j}{x_j \max - x_j \min} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \frac{x_j - x_j \min}{x_j \max - x_j \min} \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، 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 است (مالچسفسکی، ۱۳۸۵: ۲۱۳). یکی از راه‌هایی که می‌توان واژه‌های زبانی را در قالب منظم به اعداد فازی متناظر با آن‌ها تبدیل کرد استفاده از توابع عضویت در محیط نرم‌افزار Matlab است که دامنه چهار شاخص ورودی بین ± 2 است (جدول ۱) و دامنه شاخص خروجی بین صفر و یک است (جدول ۲).

1. Wet Very hard
2. Wet hard
3. Wet Average
4. Wet small
5. Normal conditions
6. Drought small
7. Drought Average
8. Drought hard
9. Drought Very hard

جدول ۱. متغیرهای نوشتاری و مقادیر فازی چهار شاخص ورودی (SET و SPI, SEB, MCZI)

مقدار فازی	متغیر نوشتاری
≥ 2	WVH
۱٫۵ تا ۱٫۹۹	WH
۰٫۹۹ تا ۱٫۳۹	WA
۰٫۵ تا ۰٫۹۹	WS
-۰٫۳۹ تا ۰٫۳۹	N
-۰٫۹۹ تا -۰٫۵	DS
-۱٫۳۹ تا -۱٫۰۰	DA
-۱٫۹۹ تا -۱٫۵۰	DH
≤ -2	DVH

جدول ۲. متغیرهای نوشتاری و مقادیر فازی، شاخص جدید حاصل از مدل‌سازی T.I.B.I

مقدار فازی	متغیر نوشتاری
۰٫۰۰، ۰٫۰۱	WVH
۰٫۰۱، ۰٫۱، ۰٫۲	WH
۰٫۰۲، ۰٫۲، ۰٫۴	WA
۰٫۲، ۰٫۳۵، ۰٫۳۵، ۰٫۵	WS
۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۵، ۰٫۷	N
۰٫۵، ۰٫۶۵، ۰٫۶۵، ۰٫۸	DS
۰٫۶، ۰٫۸، ۰٫۸، ۱	DA
۰٫۸، ۰٫۹، ۰٫۹، ۱	DH
۰٫۹، ۱، ۱، ۱	DVH

توابع فازی شاخص خروجی T.I.B.I طبقات شدت خشک‌سالی در منطق فازی با توجه به مقادیر فازی آن‌ها به صورت شکل ۳ است. در ادامه اعداد فازی حاصله به اعداد غیرفازی تبدیل یافت و از اعداد غیرفازی در نوشتن قواعد استفاده شد.

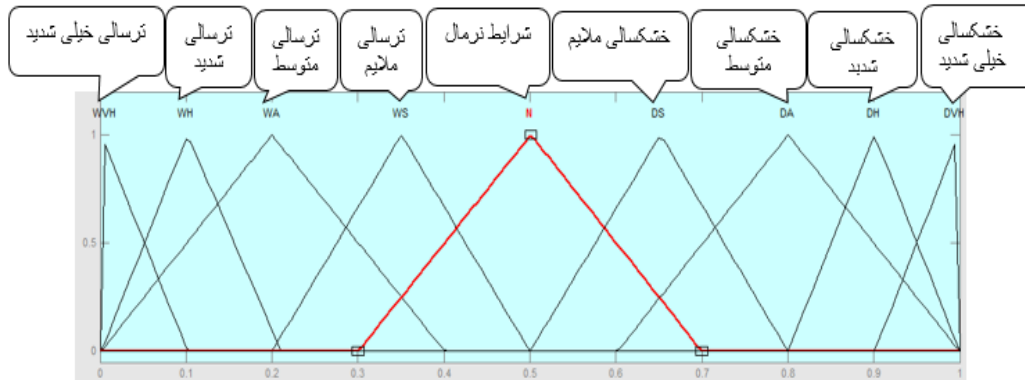
غیرفازی کردن اعداد فازی

برای تبدیل یک عدد فازی به یک مقدار دقیق، روش‌های مختلفی از جمله روش مرکز ثقل، روش بیشترین تابع عضویت، روش امتیازدهی به چپ و راست عدد فازی وجود دارد که در این پژوهش برای غیرفازی کردن اعداد فازی از روش امتیازدهی به چپ و راست استفاده شده است. در روش امتیازدهی به چپ و راست عدد فازی امتیاز کل دقیق یک عدد فازی A از مقدار امتیازات چپ و راست A به دست می‌آید و این امتیازات چپ و راست از دو مجموعه ویژه حداقل (Min) و حداکثر (Max) و درجه عضویت عدد فازی به دست می‌آید. این دو مجموعه Min و Max با فرض اینکه دامنه اعداد فازی [۱،۰] باشند تعریف شد. در محاسبات عملی برای راحتی کار در عدد فازی مثلثی امتیازات سمت چپ و راست را از روی رابطه‌های ۳، ۴، و ۵ محاسبه می‌کنند (جعفرنژاد و کیا، ۱۳۸۹: ۱۹۱).

$$\mu_L(A) = 1 - \frac{m}{1 + \alpha} \quad (3)$$

$$u_r(A) = \frac{m + \beta}{1 + \beta} \quad (4)$$

$$\mu_r(A) = \frac{\mu_r(A) + 1 - \mu_l(A)}{2} \quad (5)$$



شکل ۳. نمایش اعداد فازی مورد استفاده در عطف به متغیرهای زبانی نه گانه

تعیین قواعد برای تلفیق شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET

طبقات مختلف شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET بر پایه قواعد یا همان ترکیبی از گزاره‌های شرطی در قالب اگر، که به یک طبقه از شاخص T.I.B.I در قالب آن گاه منتهی می‌شود، تعریف شد. این قاعده فقط یک ترکیب از حالت‌های مختلف شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET را، که به شاخص T.I.B.I منتهی می‌شوند، نشان می‌دهد. در همین راستا، به تناسب صورت ترکیبی می‌توان قواعد متوالی را نوشت و در پایگاه دانش ذخیره کرد. با توجه به اینکه در خروجی حاصل از برآیند ترکیب، شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET در تعیین وضعیت T.I.B.I دخالت داده می‌شود، وزن هر یک از شاخص‌ها با توجه به تأثیر پارامتر بارش، دما، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی، و سرعت باد بر شدت خشکسالی مدنظر قرار گرفت. برای نوشتن قاعده در محیط Matlab از رابطه ۶ در عطف به داده‌ها استفاده شد.

$$c_i = \frac{\sum_{i=1}^n s_i w_i}{\sum_{i=1}^n v_i w_i} \quad (6)$$

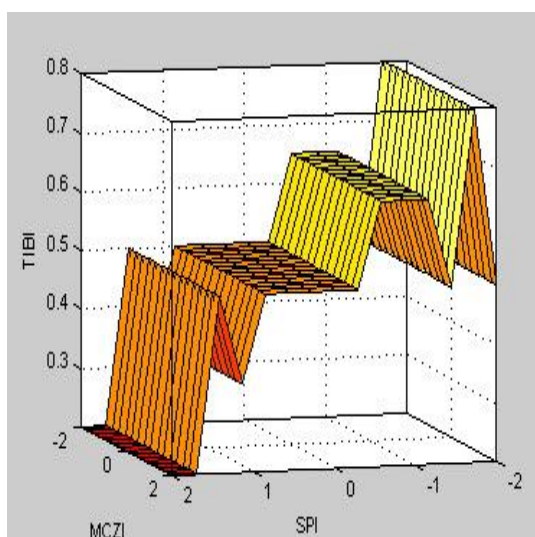
در این رابطه c_i معرف مقدار تابع فازی T.I.B.I در حالت i از ترکیب شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET است، s_i نمره غیرفازی وضع موجود شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET در حالت i را نشان می‌دهد، w_i بیانگر وزن شاخص‌ها در حالت i معرف نمره وزنی حالت i در وضع موجود، v_i معرف نمره غیرفازی حالت i در وضعیت DVH، و $v_i w_i$ معرف نمره وزنی حالت i در وضعیت DVH است. به‌عنوان مثال، از محتوای نمونه ارائه شده در جدول ۶ قاعده معین از سری قواعد تعیین شده در جهت تعیین وضعیت شاخص T.I.B.I استخراج شده است. این قاعده بیان می‌کند که اگر SPI در طبقه ترسالی شدید و SET در طبقه ترسالی ملایم باشد، SEB در مرتبه ترسالی شدید و MCZI در ترسالی ملایم T.I.B.I در طبقه ترسالی متوسط قرار می‌گیرد. با توجه به آنکه قواعد بر مبنای چهار شاخص SPI، SEB، MCZI و SET، که هریک در نه حالت مطرح شده شکل می‌گیرد، تعداد قواعدی که منعکس کننده نتایج حاصل از ترکیب‌های ممکن از صورت وضعیت‌های مختلف چهار شاخص است بالغ بر ۸۱ قاعده تعیین شد که نمونه قاعده بیان شده در ادامه ارائه می‌شود:

نمونه قاعده وارد شده از ۸۱ قواعد تعیین شده در جدول قوانین

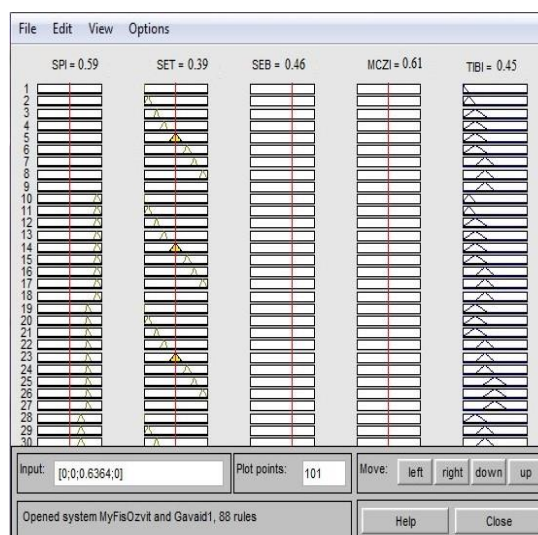
IFF (SPI is WH) and (SET is WS) and (SEB is WH) and (MCZI is WS) then (TIBI is WA)

وارد کردن قواعد فازی در محیط Matlab

پس از تدوین قواعد مورد نظر برای وارد کردن این قواعد در محیط Matlab در قالب پایگاه دانش فازی و سیستم استنتاج فازی از جعبه ابزار Fuzzy logic استفاده شد. در مرحله بعد، می‌توان با استفاده از ابزارهای نمایشگر قاعده^۱ با وارد کردن مقدار شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET مقدار شاخص T.I.B.I را به دست آورد. به عنوان مثال، در شکل ۴ در بخش INPUT با وارد کردن مقدار شاخص‌های SPI، SEB، MCZI و SET که به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۵۹، ۰/۳۹ و ۰/۴۵ است، شاخص T.I.B.I به مقدار ۰/۴۵ به دست آمده است. در نمایشگر Surface Viewer نیز به تناسب تغییرات مقادیر شاخص‌های ورودی (SPI، SEB، MCZI و SET) می‌توان فراز و فرودهای سطوح شاخص T.I.B.I را در یک نمای گرافیکی دنبال کرد (شکل ۵).



شکل ۵. سطح منحنی حاصل از ترکیب چهار شاخص (SPI، SEB، MCZI و SET) برای محاسبه شاخص T.I.B.I (نمایی از Surface Viewer در محیط Matlab)



شکل ۴. نمای از Rule Viewer در محیط MATLAB

پس از اینکه مدل‌سازی شاخص فازی T.I.B.I به طریق بیان شده به دست آمد، نحوه تأثیر پارامترهای اقلیمی در خشک‌سالی ایستگاه‌های مورد مطالعه بررسی شد. سپس، به پایش خشک‌سالی پرداخته شد. در پایش خشک‌سالی، براساس شاخص T.I.B.I، روند، شدت تداوم، و درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی بررسی شد و روند شاخص‌های مورد بررسی با روش روند خطی تعیین شد. برای به دست آوردن درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی در طبقات مختلف، از رابطه Frequency استفاده شد.

روش وزن‌دهی ساده (SAW)

اگر در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره n معیار و m گزینه وجود داشته باشد، به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده

از روش وزن‌دهی ساده است. ۲. تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم این روش شامل جدول است که ستون‌های آن را معیارها یا زیرمعیارها و سطرهای آن را گزینه‌ها (ایستگاه‌ها) تشکیل می‌دهند. ۳. بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم: برای بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم در روش ساو اجرا شد. اگر معیار مثبت باشد، طبق رابطه ۷، تک‌تک اعداد آن ستون را بر بزرگ‌ترین عدد تقسیم می‌کنیم و اگر معیار منفی باشد، طبق رابطه ۸، مینیمم آن ستون تقسیم بر تک‌تک اعداد می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j,max}} \quad (7)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{j,min}}{x_{ij}} \quad (8)$$

۴. تشکیل ماتریس وزن‌دار: در این گام با توجه به وزن‌های محاسبه‌شده از روش‌های دیگر، ماتریس وزن‌دار براساس رابطه ۹ به‌دست می‌آید.

$$W_i = \sum_{j=1}^n w_j \times r_{ij} \quad (9)$$

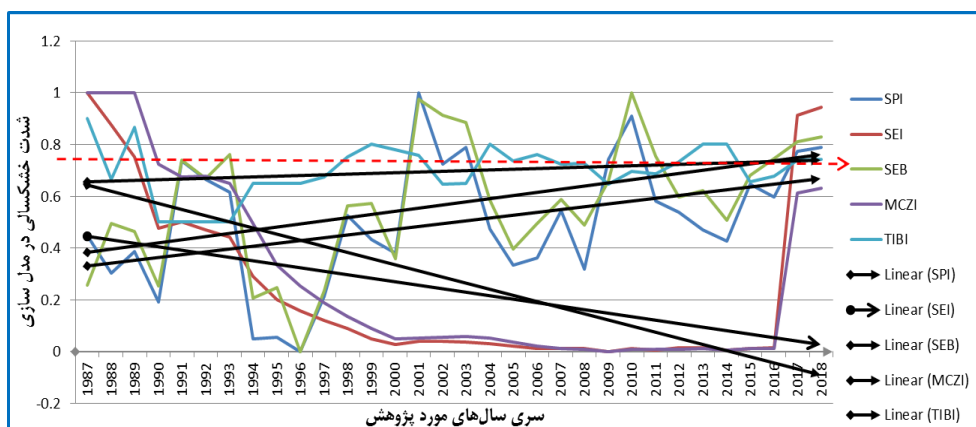
۵. انتخاب گزینه برتر: با جمع سطری ماتریس وزن‌ها امتیاز هر گزینه محاسبه و براساس معادله ۱۰ رتبه‌بندی شد.

$$A^* = \left\{ A_i \mid \max \frac{\sum_{j=1}^n w_j r_{ij}}{\sum w_j} \right\} \quad (10)$$

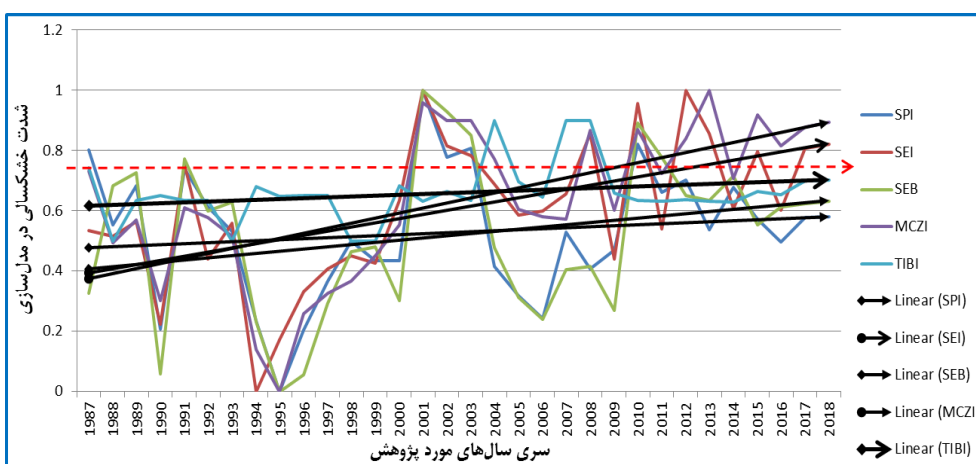
یافته‌های پژوهش

پایش نوسانات خشک‌سالی براساس چهار شاخص تلفیق‌شده در مدل T.I.B.I

برای بررسی نحوه تأثیر نوسانات خشک‌سالی شاخص‌ها در شرایط خشک‌سالی ایستگاه‌ها، می‌توان میزان تغییراتی را که در شاخص‌های MCZI، SEB، SPI، و SET حاصل شده و در شاخص T.I.B.I نمود پیدا کرده بررسی کرد. با توجه به اینکه تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه زیاد بودند، برای تفهیم بهتر، فقط نمودار سری خشک‌سالی ایستگاه اسلام‌آباد غرب در دو مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شدند (در شکل‌های مذکور خط فلش قرمز رنگ مقطع مرز خشک‌سالی در مقیاس ۶ ماهه با مقدار ۰/۷۴ و بیشتر را نشان می‌دهد و در مقیاس ۱۲ ماهه با مقدار ۰/۷۴ و بیشتر را نشان می‌دهد). بررسی این اشکال نشان می‌دهد که در ایستگاه اسلام‌آباد غرب در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه مقدار دما متفاوت در خشک‌سالی محیط بوده؛ یعنی مقدار آن در مقیاس ۶ ماهه از ماه آوریل سال ۱۹۹۴ تا اگوست سال ۱۹۹۷ سیر نزولی داشته است و بعد از این ماه شکل افزایشی به خود گرفته است؛ یعنی از ماه جولای سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۰۳ سیر افزایشی است. در صورتی که تأثیر بارندگی در مقیاس ۱۲ ماهه ضعیف‌تر از مقیاس ۶ ماهه است. یعنی از ماه می سال ۱۹۹۴ تا نوامبر سال ۱۹۹۷ روند نزولی به خود گرفته و شدت خشک‌سالی در مقیاس ۱۲ ماهه بعد از آن از ماه ژوئن ۱۹۹۷ تا دسامبر ۲۰۰۲ شکل افزایشی به خود گرفته است و بعد از آن شکلی یکسان را پیموده است و شاخص‌های MCZI، SEB، SPI، و SET بر روی شاخص T.I.B.I تأثیر گذاشته و تا حدودی یک روند را نشان می‌دهند و بیانگر این است که شاخص فازی جدید T.I.B.I چهار شاخص مذکور را به‌خوبی در خود منعکس کرده است؛ مقیاس طبقات خشک‌سالی آن در جدول ۳ ارائه شد. شاخص T.I.B.I در مقیاس ۱۲ ماهه شکل تندتری را نسبت به مقیاس ۶ نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمودار نوسان شاخص‌ها در ایستگاه اسلام‌آباد غرب در مقیاس ۶ ماهه در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)



شکل ۷. نمودار نوسان شاخص‌ها در ایستگاه اسلام‌آباد غرب در مقیاس ۱۲ ماهه در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)

جدول ۳. طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی و ترسالی براساس مدل‌سازی فازی شاخص T.I.B.I

مقادیر شاخص T.I.B.I	طبقات خشک‌سالی
۰.۹۶ - ۱	خشک‌سالی خیلی شدید
۰.۸۷ - ۰.۹۶	خشک‌سالی شدید
۰.۷۴ - ۰.۸۷	خشک‌سالی متوسط
۰.۵۹ - ۰.۷۴	خشک‌سالی ملایم
۰.۴۴ - ۰.۵۹	نرمال
۰.۲۹ - ۰.۴۴	ترسالی ملایم
۰.۱۵ - ۰.۲۹	ترسالی متوسط
۰.۰۶ - ۰.۱۵	ترسالی شدید
۰ - ۰.۰۶	ترسالی خیلی شدید

با توجه به یافته‌های به‌دست‌آمده از درصد فراوانی خشک‌سالی‌ها در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه، مجموع درصد فراوانی خشک‌سالی‌ها در مقیاس ۶ ماهه ایستگاه‌های شمال غربی و شرقی منطقه مورد مطالعه بیشتر در معرض خشک‌سالی قرار گرفته‌اند. ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، و الیگودرز به ترتیب با درصد فراوانی خشک‌سالی (۹۶.۶۶، ۷۳.۳۴، و ۸۱.۴۹) بیشترین درصدها را به خود اختصاص دادند. ایستگاه‌هایی با درصد فراوانی خشک‌سالی کمتر، بیشتر در بخش

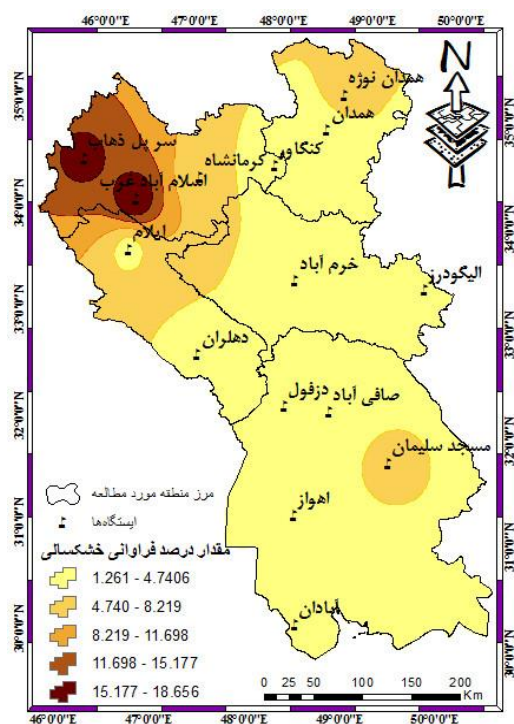
شمال شرق و جنوب شرقی منطقه مطالعه شدند که ایستگاه‌های همدان نوژه، کنگاور، و مسجدسلیمان به ترتیب با مقدار درصد فراوانی (۲/۲۷، ۲/۵۲، و ۲/۵۹) را شامل شد (جدول ۴ و شکل ۸). در مقیاس ۱۲ ماهه شمال غرب منطقه مورد مطالعه بیشتر در معرض خشک‌سالی قرار گرفتند که ایستگاه‌های بیشتر درگیر با خشک‌سالی همدان نوژه، اسلام‌آباد غرب، و سرپل‌ذهاب با درصد فراوانی خشک‌سالی به‌دست‌آمده از چهار شاخص تلفیقی (MCZI، SEB، SPI، و SET) در مدل فازی جدید T.I.B.I به‌ترتیب ۵/۸۸، ۱۸/۶۸، و ۱۶/۵۱ را به خود اختصاص دادند. و ایستگاه‌های نیمه شرقی و جنوبی منطقه مورد مطالعه کمتر در معرض خشک‌سالی قرار گرفتند؛ از جمله کنگاور، خرم‌آباد، و صافی‌آباد به‌ترتیب با مقدار درصد فراوانی خشک‌سالی (۱/۷۷، ۱/۲۶، و ۲/۱۹) در معرض خشک‌سالی قرار دارند (جدول ۵ و شکل ۹).

جدول ۴. درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی در طبقات مختلف در مقیاس زمانی ۶ ماهه

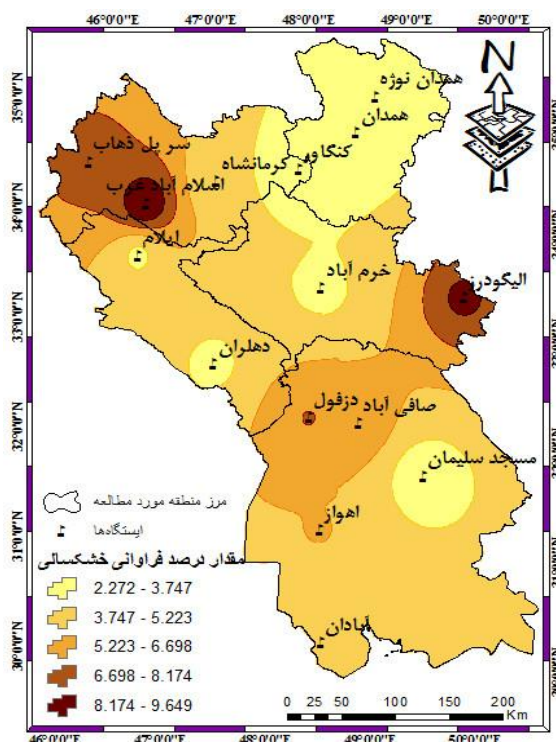
نام ایستگاه‌ها	خشک‌سالی خیلی شدید	خشک‌سالی شدید	خشک‌سالی متوسط	خشک‌سالی ملایم	نرمال	ترسالی ملایم	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی خیلی شدید	مجموع
همدان فرودگاه	۰/۱۰	۰/۲۶	۱/۹۱	۲	۳	۰/۰۶	۰/۰۳		۲/۲۷	
همدان نوژه	۰/۰۹	۱/۰۷	۲/۰۳	۱/۰۶	۴/۱	۰/۰۸	۰/۰۲		۳/۱۹	
کرمانشاه	۰/۰۵	۲/۳۷	۱/۳۹	۲	۱/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۸		۳/۸۱	
اسلام‌آباد غرب	۰/۳۴	۳/۲۵	۶/۰۷	۹/۱۷	۱/۰۸	.	.		۹/۶۶	
کنگاور	.	۰/۴۳	۲/۰۹	۱۴/۱۲	۲/۳۶	۰/۱۵	۰/۲۳		۲/۵۲	
سرپل‌ذهاب	۰/۲۶	۲/۰۸	۵	۱۰/۶۸	۱۲/۰۲	.	۰/۱۸		۷/۳۴	
ایلام	.	۲/۴۷	۱	۴/۰۵	۱/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۹		۳/۴۷	
دهلران	۰/۱۹	۱/۰۶	۲/۱۸	۳/۱۳	۴	۰/۲۳	.		۳/۴۳	
خرم‌آباد	۰/۱۲	۰/۶۵	۲/۵۹	۲/۳۸	۴/۰۶	۰/۰۸	.		۳/۳۶	
الیگودرز	۰/۰۸	۴/۴۱	۴	۱/۰۸	۲/۱۴	۰/۰۷	۰/۱۵		۸/۴۹	
صافی‌آباد	۰/۰۴	۲/۱۸	۳/۹۶	۴	۱/۹۶	۰/۰۶	.		۶/۱۸	
آبادان	.	۱/۲۷	۲/۷۹	۳/۸۹	۰/۶۳	۰/۰۴	.		۴/۰۶	
دزفول	۰/۰۳	۲/۱۶	۴/۵۶	۶	۳	.	۰/۱۴		۶/۷۵	
مسجدسلیمان	.	۰/۷۱	۱/۸۸	۵	۱	.	.		۲/۵۹	
اهواز	۰/۱۴	۲/۱۵	۲/۹۶	۲	۳/۶۸	.	۰/۱۶		۵/۲۵	

جدول ۵. درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی در طبقات مختلف در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه

نام ایستگاه‌ها	خشک‌سالی خیلی شدید	خشک‌سالی شدید	خشک‌سالی متوسط	خشک‌سالی ملایم	نرمال	ترسالی ملایم	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی خیلی شدید	مجموع
همدان فرودگاه	۰/۱۹	۰/۴۱	۲/۱۲	۱/۰۲	۴/۱۲	.	.		۲/۷۲	
همدان نوژه	۰/۲۱	۲/۵۳	۳/۱۴	۱/۰۶	۳/۲۵	۰/۰۹	۰/۰۳		۵/۸۸	
کرمانشاه	۰/۱۱	۳/۵۶	۲/۱۲	۲	۵/۶۲	.	.		۵/۷۹	
اسلام‌آباد غرب	۰/۲۵	۴/۳۶	۱۴/۰۷	۱۳/۳۵	۱۴/۱۳	.	.		۱۸/۶۸	
کنگاور	۰/۰۱	۰/۶۴	۱/۱۲	۰/۲۱	۶	۰/۴۲	۰/۰۶		۱/۷۷	
سرپل‌ذهاب	۰/۲۹	۳/۰۸	۱۳/۱۴	۱۲/۶۸	۲/۰۸	.	.		۱۶/۵۱	
ایلام	.	۱/۳۲	۲/۱	۳/۰۳	۲/۰۳	۰/۱۲	۰/۰۷		۳/۳۳	
دهلران	.	۲/۰۸	۱/۰۳	۲/۰۷	۱/۰۴	.	.		۳/۱۱	
خرم‌آباد	.	۰/۱۴	۱/۱۲	۱/۱۵	۲/۰۸	۰/۱۴	۰/۱۰		۱/۲۶	
الیگودرز	.	۱/۳۹	۳	۲/۱۳	۱/۰۹	.	.		۴/۳۹	
صافی‌آباد	.	۱/۱۲	۱/۰۷	۳	۳/۰۱	.	.		۲/۱۹	
آبادان	.	۲/۴۱	۱/۵۴	۲/۱۴	۱/۷۸	۰/۰۳	۰/۱۱		۳/۹۵	
دزفول	۰/۰۹	۱/۱۰	۲/۳۳	۱/۳۳	۶	.	.		۳/۵۲	
مسجدسلیمان	۰/۱۱	۲/۴۱	۳/۲۱	۴	۰/۱۷	.	.		۵/۷۳	
اهواز	۰/۰۸	۱/۰۸	۱/۲۵	۱	۴/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۳		۲/۴۱	



شکل ۹. پهنه‌بندی درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس ۱۲ ماهه در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)



شکل ۸. پهنه‌بندی درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس ۶ ماهه در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)

با توجه به تعریفی که از خشک‌سالی براساس شاخص T.I.B.I ارائه شد، مقادیر ۰/۷۴ و بالاتر یا از طبقه خشک‌سالی ملایم به بالاتر به‌عنوان شرایط خشک مطرح می‌شود. بر این اساس، در مدل‌سازی شاخص جدید فازی T.I.B.I، شدت خشک‌سالی در مقیاس ۶ ماهه بیشتر از مقیاس ۱۲ ماهه بود. براساس یافته‌های پژوهش حاضر، شدت خشک‌سالی سالانه در مقیاس ۶ ماهه از سال ۱۹۹۷ شروع شده و تا سال ۲۰۰۲ ادامه داشته و بعد از این بازه زمانی یعنی از سال ۲۰۰۳ به بعد وضعیت تغییر حالات نوسان خفیف ادامه یافته است. درحالی‌که در مقیاس ۱۲ ماهه شدت خشک‌سالی از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۰۴ سیر صعودی داشته و از سال ۲۰۰۵ به بعد تغییرات خشک‌سالی به‌صورت صعودی افزایش یافته است.

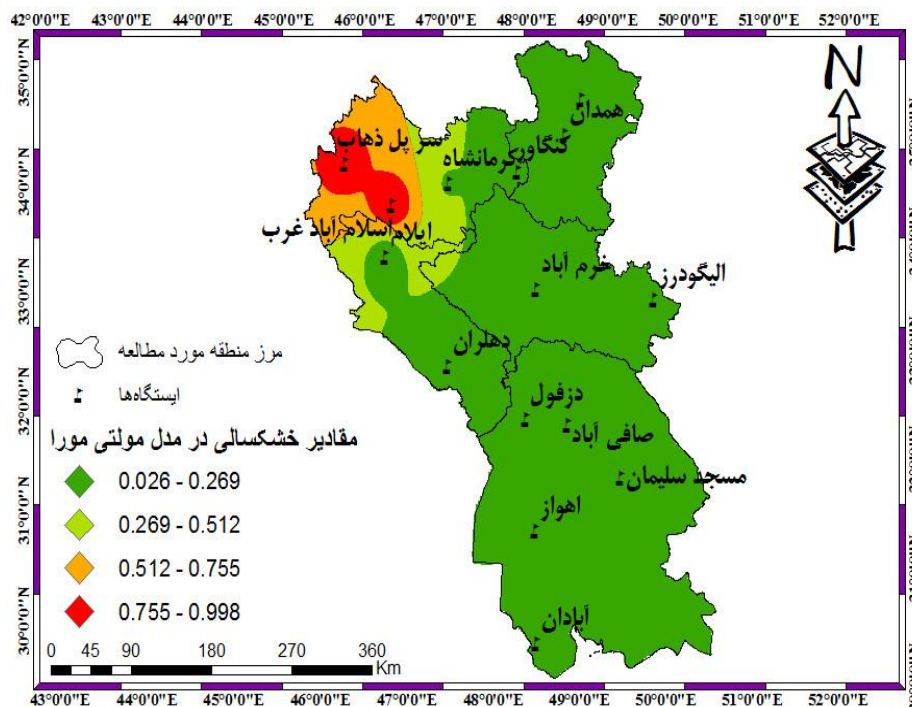
ارزیابی مناطق درگیر با خشک‌سالی براساس مدل SAW

با توجه به مدل‌سازی انجام‌گرفته، مناطق مورد مطالعه از لحاظ اولویت درگیر با خشک‌سالی با استفاده از مدل ساو بررسی شد. نخست برای محاسبات و تجزیه و تحلیل داده‌های آماری، وزنی برای هر یک از پارامترهای مورد استفاده در نظر گرفته شد. سپس، میزان مطلوبیت و عدم مطلوبیت هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر درصد فراوانی خشک‌سالی بررسی و در نهایت گزینه مناسب از راه نزدیکی نسبی به میزان ایده‌آل انتخاب شد. نتایج اجرای مدل ساو با استفاده از درجه ارجعیت معیارهای حاصل از روش آنتروپی حاکی از آن است که از نظر خشک‌سالی مکان‌های بیشتر و کمتر درگیر با خشک‌سالی مشخص شدند. براساس مدل تصمیم‌گیری چندمتغیره ساو، شمال غرب منطقه مورد مطالعه به‌ویژه سه ایستگاه بیشتر درگیر با خشک‌سالی به‌ترتیب عبارت‌اند از: اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، و همدان نوژه با مقادیر اولویت به‌ترتیب ۱، ۰/۸۶، و ۰/۲۶ قرار گرفتند. نیمه جنوبی و شرقی منطقه مورد مطالعه به‌ویژه سه ایستگاه خرم‌آباد، کنگاور، و

همدان فرودگاه به ترتیب امتیاز (۰٫۰۱، ۰٫۰۲، و ۰٫۰۸) اولویت‌های کمتری را برای مواجهه با خشک‌سالی به خود اختصاص دادند (جدول ۶ و شکل ۱۰).

جدول ۶. اولویت‌بندی ایستگاه‌های درگیر با خشک‌سالی براساس مدل SAW در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)

نام ایستگاه‌ها	مقادیر ساو	امتیاز رتبه‌بندی ساو
همدان فرودگاه	۰٫۰۸	۱۳
همدان نوژه	۰٫۲۶	۳
کرماتشاه	۰٫۲۵	۴
اسلام‌آباد غرب	۱	۱
گنکاور	۰٫۰۲	۱۴
سرپل‌ذهاب	۰٫۸۶	۲
ایلام	۰٫۱۲	۹
دهلران	۰٫۱۱	۱۰
خرم‌آباد	۰٫۰۱	۱۵
الیگودرز	۰٫۲۲	۶
صافی‌آباد	۰٫۱۰	۱۱
آبادان	۰٫۱۵	۸
دزفول	۰٫۱۶	۷
مسجد سلیمان	۰٫۲۵	۵
اهواز	۰٫۰۹	۱۲



شکل ۱۰. نقشه نهایی مناطق درگیر با خشک‌سالی در شمال غرب ایران براساس مدل SAW در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)

بحث و نتیجه گیری

یکی از چالش‌های مخاطره طبیعی، که در سال‌های اخیر کشور را تحت تأثیر قرار داده، رخداد مخاطره‌ای حاصل از خشک‌سالی است. یکی از این مناطقی که تحت تأثیر خشک‌سالی بوده بخش جنوب غربی و غرب ایران است. نتایج پژوهش نشان داد در هر دو مقیاس ۶ماهه و ۱۲ماهه، مناطق شمال غربی به‌ویژه ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب و اسلام‌آباد غرب و منطقه شرقی مورد مطالعه ایستگاه الیگودز بیشتر درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق هم در داده‌های مشاهده‌شده هم در داده‌های خروجی از فازی‌سازی مدل T.I.B.I شدت خشک‌سالی بسیار زیادی را به خود اختصاص دادند. این مطلب بیانگر توانایی و سطح اطمینان زیاد مدل جدید در تبیین و نشان‌دادن شدت خشک‌سالی است. با توجه به نتایج این پژوهش نیازمند آن است این مدل در نقاط دیگر کشور ارزیابی شود. در مقیاس ۱۲ماهه شدت و تعداد تکرار خشک‌سالی بیشتر از ۶ماهه است. تداوم خشک‌سالی در مقیاس ۱۲ماهه بیشتر است. خشک‌سالی در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت تداوم کمتری داشت و تحت تأثیر پارامتر بارش و دما بود. درحالی‌که شدت خشک‌سالی در دوره‌های زمانی طولانی‌مدت عکس‌العمل کندتری نسبت به تغییرات دما و بارش داشت. روند خشک‌سالی در جنوب غرب ایران افزایشی نشان داد و روند دما به‌صورت تندتری روندی صعودی و افزایشی داشت. بیشترین درصد فراوانی وقوع خشک‌سالی در مقیاس ۶ و ۱۲ماهه در ایستگاه اسلام‌آباد غرب و کمترین آن در مقیاس ۶ماهه در همدان فرودگاه و در مقیاس ۱۲ماهه در ایستگاه خرم‌آباد رخ داده است. درصد فراوانی خشک‌سالی در ایستگاه‌های همدان نوژه، اسلام‌آباد غرب، و سرپل‌ذهاب در مقیاس ۱۲ماهه بیشتر از مقیاس ۶ماهه بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌سازی در سطح اطمینان بالا بود و شاخص فازی جدید T.I.B.I نسبت به شاخص فازی SPEI برتری داشت. همچنین، طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی شاخص جدید T.I.B.I، در مقیاس ۱۲ماهه شدت بیشتری نسبت به مقیاس ۶ماهه داشت. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی در مقیاس ۶ماهه بیشترین درصد فراوانی خشک‌سالی در شمال غرب و نیمه شرقی منطقه مورد مطالعه در ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب، و ایستگاه الیگودرز رخ داده است و در مقیاس ۱۲ماهه شمال غرب منطقه مورد مطالعه (ایستگاه‌های همدان، اسلام‌آباد غرب، و سرپل‌ذهاب) خشک‌سالی را نشان می‌دهد. در نهایت، براساس مدل تصمیم‌گیری چندمتغیره ساو، ایستگاه اسلام‌آباد غرب با مقدار امتیاز ۱ در اولویت بیشتر در معرض درگیری خشک‌سالی قرار گرفت و ایستگاه خرم‌آباد با مقدار امتیاز ۰/۰۱ درصد در اولویت آخر درگیری با خشک‌سالی قرار گرفت. با بهره‌گیری از این نتایج می‌توان برای ایستگاه‌هایی که در بخش خشک‌سالی با شدت کم قرار گرفته‌اند، با کمک سازمان‌های مرتبط، برنامه‌ریزی‌های اتخاذ کرد تا در آینده این ایستگاه‌ها به بخش خشک‌سالی با شدت بیشتر انتقال نیابند، زیرا، اگر انتقال یابند، در آینده، علاوه بر افزایش مشکلات کم‌آبی، اثرهای منفی آن در بخش‌های مختلف کشاورزی، اقتصاد، آب‌خیز، و غیره بیشتر خواهد شد.

مدل‌سازی و پایش پدیده خشک‌سالی در جنوب غرب ایران با استفاده از شاخص جدید فازی در این پژوهش انجام شد؛ این روش در بیشتر مطالعات انجام‌گرفته روش مناسبی در امر پایش، آنالیز، و مقایسه شناخته شده است؛ از جمله: شمس‌نیا و همکاران (۱۳۸۷): در تحقیق مدل‌سازی خشک‌سالی در استان فارس با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی؛ میرزایی و همکاران (۱۳۹۴): در پژوهش توسعه مدل یکپارچه منابع آب WEAP برای مدل‌سازی شرایط خشک‌سالی؛ پیروی و همکاران (۱۳۹۴): در مطالعه خود با عنوان مدل‌سازی اثر خشک‌سالی بر سختی کل و جامدات محلول آب زیرزمینی دشت مشهد؛ ادیب و گرجی‌زاده (۱۳۹۵): در بررسی و پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی؛ ذوالفقاری و نوری (۱۳۹۵): در تحقیق کاربرد شاخص خشک‌سالی (CPEL) در تعیین متغیرهای مناسب برای تحلیل

خشک‌سالی‌های ایران؛ پارسامهر و خسروانی (۱۳۹۶): در پژوهش تعیین خشک‌سالی با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره بر مبنای TOPSIS؛ علیزاده و همکاران (۱۳۹۶): در تحقیق خود با عنوان مدل‌سازی پراکندگی خشک‌سالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به‌کارگیری سیستم دینامیک. در تحقیق زینالی و صفریان زنگیر (۱۳۹۶) پایش خشک‌سالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص فازی کارایی قابل قبولی داشت. و در نهایت فتحی‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای به بررسی روابط بین خشک‌سالی هواشناسی و متغیرهای خورشیدی در برخی از ایستگاه‌های هم‌مدیدی ایران اقدام و کارایی مدل‌های استفاده‌شده را تأیید کردند. باین‌حال، با مقایسه‌های انجام‌گرفته، مدل‌سازی صورت‌گرفته در پژوهش حاضر در مدل‌سازی و پایش پدیده خشک‌سالی در جنوب غرب ایران با استفاده از شاخص جدید فازی کارایی قابل قبولی داشت.

منابع

- اختیاری‌خواجه، ش. و دین‌پژوه، ی. (۱۳۹۷). کاربرد شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI) برای بررسی دوره‌های خشکی (ایستگاه‌های تبریز، بندرانزلی، و زاهدان)، علوم و مهندسی آبیاری، ۴۱(۱): ۱۳۳-۱۴۵.
- ادیب، آ. و گرجی‌زاده، ع. (۱۳۹۵). بررسی و پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی، مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۶): ۱۷۳-۱۸۵.
- انصاری، ح.؛ داوری، ک. و ثنایی‌نژاد، ح. (۱۳۸۹). پایش خشک‌سالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد شده SEPI، توسعه یافته براساس منطق فازی، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۱): ۳۸-۵۲.
- بایزیدی، م. (۱۳۹۷). ارزیابی خشک‌سالی ایستگاه‌های سینوپتیک غرب کشور با استفاده از روش هرست و مدل عصبی- فازی تطبیقی، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۱): ۲۷۸-۲۸۴.
- پارسامهر، ا. و خسروانی، ز. (۱۳۹۶). بررسی تعیین خشک‌سالی با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره بر مبنای TOPSIS، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۴(۳): ۱۶-۲۹.
- پیروی، ر.؛ علی‌دادی، ح.؛ جاوید، ا. و نجف‌پور، ع. (۱۳۹۴). مدل‌سازی اثر خشک‌سالی بر سختی کل و جامدات محلول آب زیرزمینی دشت مشهد، فصل‌نامه پژوهش در بهداشت محیط، ۱۱(۲): ۸۵-۹۴.
- ترابی‌پوده، ح.؛ شاهی‌نژاد، ب. و دهقانی، ر. (۱۳۹۷). تخمین خشک‌سالی با استفاده از شبکه‌های هوشمند، هیدروژئومورفولوژی، ۱۴(۱): ۱۷۹-۱۹۷.
- جان‌درمیان، ی.؛ شکیبا، ع. و ناصری، ح. (۱۳۹۴). بررسی وضعیت خشک‌سالی و ارتباط آن با تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت سراب، کنفرانس بین‌المللی توسعه با محوریت کشاورزی، محیط زیست، و گردشگری، ایران، تبریز، ص ۱۶-۱۷.
- جعفرنژاد، ع. و کیا، م. (۱۳۸۹). منطق فازی در MATLAB، انتشارات کیان رایانه سبز.
- جعفری، غ.؛ بختیاری، ف. و دوستکامیان، م. (۱۳۹۶). بررسی و تحلیل ارتباط فضایی خشک‌سالی‌ها با دبی حوضه آبی قزل اوزن، جغرافیا و توسعه، ۴(۱۵): ۷۹-۹۴.
- حدادی، ح. و حیدری، ح. (۱۳۹۴). آشکارسازی اثر نوسانات بارش بر رواناب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۵۸(۶): ۲۴۷-۲۶۲.
- خشتکاری ثانی، ص. (۱۳۹۴). واکاوای خشک‌سالی‌های استان آذربایجان غربی با شاخص spi و Gis، کنفرانس بین‌المللی با محوریت کشاورزی، محیط زیست، و گردشگری، ایران، تبریز، ص ۱۶-۱۷.
- داموندی، ع.؛ رحیمی، م.؛ یزدانی، م. و نوروزی، ع. (۱۳۹۵). پایش مکانی خشک‌سالی کشاورزی از طریق سری‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST داده‌های MODIS (مطالعه موردی: استان کرمان مرکزی)، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۳(۳): ۱۱۵-۱۲۶.
- ذوالفقاری، ح. و نوری‌سامله، ز. (۱۳۹۵). کاربرد شاخص خشک‌سالی (CPEL) در تعیین متغیرهای مناسب برای تحلیل خشک‌سالی‌های ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۹(۳): ۹۹-۱۱۴.
- زینالی، ب. و صفریان‌زنگیر، و. (۱۳۹۶). پایش خشک‌سالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص فازی، مخاطرات محیط طبیعی، ۷(۱۲): ۳۷-۶۲.

- زینالی، ب؛ اصغری، ص. و صفریان زنگیر، و. (۱۳۹۶). پایش خشک‌سالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص SEPT و مدل ANFIS، *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۳(۱): ۷۳-۹۶.
- سبحانی، ب؛ غفاری گیلانده؛ ع. و گلدوست، ا. (۱۳۹۴). پایش خشک‌سالی در استان اردبیل با استفاده از شاخص SEPI توسعه‌یافته براساس منطق فازی، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۵(۳۶): ۵۱-۷۲.
- سلاجقه، ع. و فتح‌آبادی، ا. (۱۳۸۸). بررسی امکان برآورد بار معلق رودخانه کرج با بهره‌گیری از منطق فازی و شبکه عصبی، *مرتع و آبخیزداری، منابع طبیعی ایران*، ۴(۲): ۲۷۱-۲۸۲.
- شکری کوچک؛ س. و بهنیا، ع. (۱۳۹۲). پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی استان خوزستان با استفاده از شاخص SPI زنجیره مارکوف، *فصل‌نامه علوم و محیط زیست*، ۵(۱۳): ۴۱-۵۲.
- شمس‌نیا، ا؛ پیرمردیان، ن. و امیری، ن. (۱۳۸۷). مدل‌سازی خشک‌سالی در استان فارس با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۴(۲۸): ۱۶۵-۱۸۹.
- صلاحی، ب. و مجتبی‌پور، ف. (۱۳۹۵). تحلیل فضایی خشک‌سالی اقلیمی شمال غرب ایران با استفاده از آماره خودهمبستگی فضایی، *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶(۳): ۱-۲۰.
- صمدیان‌فرد، س. و اسدی، ا. (۱۳۹۶). پیش‌بینی نمایه خشک‌سالی SPI به روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و خطی چندگانه، *حفاظت منابع آب و خاک*، ۸(۶): ۱-۱۶.
- ظهیری، ع.؛ شریفان، ح.؛ ابارشی، ف. و رحیمیان، م. (۱۳۹۳). ارزیابی پدیده‌های ترسالی و خشک‌سالی در استان خراسان با استفاده از نمایه‌های (PNPI، SPI، NITZCHE)، *آبیاری و زهکشی ایران*، ۲۱(۸): ۸۴۵-۸۶۵.
- علیزاده، ش.؛ محمدی، ح. و کردوانی، پ. (۱۳۹۶). مدل‌سازی پراکندگی خشک‌سالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به‌کارگیری سیستم دینامیک، *آمایش سرزمین*، ۹(۱): ۱۶۹-۱۸۸.
- فتحی‌زاده، ح.؛ غلامی‌نیا، ا.؛ مبین، م. و سودایی‌زاده، ح. (۱۳۹۶). بررسی روابط بین خشک‌سالی هواشناسی و متغیرهای خورشیدی در برخی از ایستگاه‌های همدیدی ایران، *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۷(۶): ۶۳-۸۷.
- فنی، ز.؛ خلیل‌اللهی، ح.؛ سجادی، ژ. و فال‌سلیمان، م. (۱۳۹۵). تحلیل دلایل و پیامدهای خشک‌سالی در استان خراسان جنوبی و شهر بیرجند، *فصل‌نامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۲(۲۰): ۱۷۵-۲۰۰.
- مالچفسکی، ی. (۱۳۸۵). سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم‌چندمعیاری، ترجمه اکبر پرهیزگار و عطا غفاری گیلانده، تهران: سمت.
- مرادی، ح.؛ طائی، م.؛ قاسمیان، د.؛ چزگی، ج. و بهاری، ر. (۱۳۸۷). شبیه‌سازی و تحلیل ارتباط خشک‌سالی‌های آب‌شناختی و اقلیمی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی جلگه بابل، *انجمن آبخیزداری ایران*، ۲(۵): ۷۱-۷۴.
- منتصری، م. و امیرعطایی، ب. (۱۳۹۴). پیش‌بینی استوکستیک احتمالات وقوع خشک‌سالی (مطالعه موردی: شمال غرب کشور)، *نشریه مهندس عمران و محیط زیست*، ۸(۴۵): ۱۲-۲۶.
- میرزایی، ف.؛ عراقی‌نژاد، ش. و بزرگ‌حداد، ا. (۱۳۹۴). توسعه مدل یک‌پارچه منابع آب WEAP برای مدل‌سازی شرایط خشک‌سالی، *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۷(۱): ۸۵-۹۷.

- یاراحمدی، د. (۱۳۹۳). تحلیل هیدروکلیماتولوژیکی نوسان‌های سطح آب دریاچه ارومیه، *جغرافیای طبیعی*، ۴۶(۲): ۷۷-۹۲.
- Adib, A. and Georgian, Az. (2016). Drought monitoring and monitoring using drought indices, *Iran Irrigation and Water Engineering*, 8(6): 173-185. [In Persian].
- Aktiarkajhe, SH. and Denpoxi, Y. (2018). Application of Effective Drought Index (EDI) for studying dry periods (Tabriz, Bandar Anzali and Zahedan stations), *Irrigation Science and Engineering*, 41(1): 133-145.
- Alizadeh, SH.; Mohammadi, H. and Kordvani, P. (2017). Modeling the Dispersion of Drought Caused by Climate Change in Iran Using Dynamic System, *Land Expansion*, 9(1): 169-188. [In Persian].
- Ansari, H.; Davari, K. and Sanaei Nejad, H. (2010). Drought monitoring using SEPI standardized rainfall and sediment index, developed on the basis of fuzzy logic, *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Technology)*, 24(1): 38-52. [In Persian].
- Bayazidi, M. (2018). Drought Evaluation of Synoptic Stations in the West of Iran Using the Hirbst Method and Adaptive Neuro-Fuzzy Model, *Iranian Water Resources Research*, 14(1): 278-284. [In Persian].
- Damourandi, A.; Rahimi, M.; Yazdani, M. and Noroozi, A. (2016). Field monitoring of agricultural drought through time series of NDVI and LST indicators, MODIS data (case study: Central Kerman province), *Journal of Environmental Spatial Analysis*, 2(3): 115-126. [In Persian].
- Fathi-Zadeh, H.; Gholami-nia, A.; Mobin, M. and Soodyzizadeh, H. (2017). Investigating the Relationship between Meteorological Drought and Solar Variables in Some Iranian Standards, *Environmental hazards*, 17(6): 63-87. [In Persian].
- GholamAli, M.; Younes, K.; Esmaeil, H. and Fatemeh, T. (2011). Assessment of Geostatistical Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices, *World Applied Sciences Journal*, 15: 474-482.
- Haddadi, H. and Heidari, H. (2015). Detection of the effect of precipitation fluctuations on surface water flow in the catchment area of Lake Urmia, *Journal of Geography and Environmental Programming*, 58(6): 247-262. [In Persian].
- Hao, Z.; Hao, F.; Singh, V.; Xia, Y. and Xinyishen, O. (2016). A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices. *Advances in water resources*, 14: 240-247.
- Huanga, S.; Huanga, Q.; Changa, J.; Zhua, Y. and Lengb, G. (2016). Drought structure based on a nonparametric multivariate standardized drought index across the Yellow River basin China, *Journal of Hydrology*, 530: 127-136.
- Jafar Nejad, A. and Kia, M. (2010). Fuzzy Logic in MATLAB, *Kian Fine Green Edition*, 157-180. [In Persian].
- Jafari, GH.; Bakhtiari, F. and Doshkamyani, M. (2017). Investigating and analyzing spatial association of droughts with Ghezel Ozan watershed discharge, *Geography and Development*, 4(15): 79-94.
- Jandarmian, I.; Shakiba, A. and Nasser, H. (2015). Study of Drought Status and Its Relationship with Quantitative and Qualitative Changes in Groundwater in Sarab Plain, *International Conference on Development, Focusing on Agriculture, Environment and Tourism, Iran, Tabriz*, pp. 16-17. [In Persian].
- KashtarSani, S. (2015). Drought Analysis in West Azarbaijan Province with Spi and Gis Index, *International Conference on Agricultural, Environment and Tourism, Iran, Tabriz*, pp. 16-17. [In Persian]
- Mirza'i, F.; IraqiNezhad, SH. and Big-Haddad, A. (2015). Development of WEAP Integrated Water Model Model for Drought Condition Modeling, *Journal of Engineering and Watershed Management*, 7(1): 85-97. [In Persian].

- Modaresirad, A.; Ghahramani, B.; Khalili, D.; Ghahramani, Z. and Ahmadiardakani, S. (2017). Integrated meteorological and hydrological drought model: A management tool for proactive water resources planning of semi-arid regions. *Advances in water resources*, 54: 336-353.
- Montazeri, M. and Amir Ataee, B. (2015). Stochastic Estimation of Drought Prevalence (Case Study: Northwest of the country), *Civil Engineering and Environmental Engineer*, 8(45): 12-26. [In Persian].
- Moradi, H.; Tayyi, M.; Ghasemian, D.; Chesghi, J. and Bahari, R. (2008). Simulation and analysis of the relationship between water and climate droughts using probabilistic models of Babol plain, *Iran Watershed Association*, 2(5): 71-74. [In Persian].
- Mulchsfaki, Y. (2006). *Geographic Information System and Multi-criteria Decision Analysis, Translated by Akbar Parizgar, Ata Ghafari* Flooded. Tehran, Publishing Side [In Persian].
- Parsa-Mehr, A. and Khosravani, Z. (2017). Drought evaluation using multi-criteria decision making based on TOPSIS, *Research on the Range and Desert of Iran*, 24(3): 16-29. [In Persian].
- Perovi, R.; Alidadi, H.; Javid, A. and NajafPour, AS. (2015). Modeling the effect of drought on total hardness and solids of groundwater in Mashhad plain, *Journal of Environmental Health Research*, 1(2): 85-94. [In Persian].
- Quesada, B.; Giuliano, M.; Asarre, D.; Rangecoft, S. and Vanloon, A. (2018). Hydrological change: Toward a consistent approach to assess changes on both floods and droughts, *Advances in water resources*, 5: 31-35.
- Safarianzengir, V., Sobhani, B., Asghari, S. (2019). Modeling and Monitoring of Drought for forecasting it, to Reduce Natural hazards Atmosphere in western and north western part of Iran, Iran. *Air Qual Atmos Health* (2019) doi:10.1007/s11869-019-00776-8.
- Salahi, B. and Mojtaba Pour, F. (2016). Spatial Analysis of Drought in Northwest of Iran using spatial correlation statistics. *Magazine of Spatial Analysis of Environmental Perils*, 6(3): 1-20. [In Persian].
- Salajeghe, A. and Fathabadi, A. (2009). Investigating the possibility of estimating the suspended load of Karaj River using fuzzy logic and neural network, *Journal of Rangeland and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources*, 4(2): 271-282. [In Persian].
- Samedian-Fard, S. and Assadi, A. (2017). Projection of SPI drought profile by multiple regression and multiple vector regression methods, *Water and Soil Conservation*, 8(6): 1-16. [In Persian].
- Shamsenya, A.; Pirmoradian, N. and Amiri, N. (2008). Drought Modeling in Fars Province Using Time Series Analysis, *Geography and Planning*, 14(28): 165-189. [In Persian].
- Shokri-mazuk, S. and Behnia, AS. (2013). Monitoring and drought stress in Khuzestan province using Markov chain SPI index, *Journal of Science and Environmental Sciences*, 5(13): 41-52. [In Persian].
- Sobhani, B., Safarianzengir, V. (2019). Modeling, monitoring and forecasting of drought in south and southwestern Iran, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment* 5: <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00655-2>.
- Sobhani, B., Safarianzengir, V., Kianian, M.K. (2019a). Drought monitoring in the Lake Urmia basin in Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 12:448. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4571-1>.
- Sobhani, B., Safarianzengir, V., Kianian, M.K. (2019b). Modeling, Monitoring and Prediction of Drought in Iran. *Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment* 10: 216 - 224. doi: 10.5829/ijee.2019.10.03.09.
- Sobhani, B.; Ghafari Gilandeh, A. and Goldost, A. (2015). Drought monitoring in Ardebil province using the developed SEPI index based on fuzzy logic, *Journal of Applied Geosciences Research*, 15(36): 51-72. [In Persian].

- Spinoni, J.; Naumann, G.; Vogt, J. and Barbosa, P. (2015). The biggest drought events in Europe from 1950-2012, *Journal of hydrology: Regional*, 3: 509-524.
- Technical, Z.; Khalilalahi, H.; Sajjadi, J. and Falsleman, M. (2016). Analysis of the causes and consequences of drought in South Khorasan Province and Birjand, *Seasonal planning and space planning*, 12(20): 175-200. [In Persian].
- Torabiyat, H.; Shahi Nejad, B. and Peasant, R. (2018). Drought Estimation Using Smart Grids, *Hydrogeomorphology*, 7(14): 179-197. [In Persian].
- Touma, D.; Ashfaq, M.; Nayak, M.; Kao, S-C. and Diffenbaugh, N. (2015). A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century, *Journal of Hydrology*, 526: 196-207.
- Yarahmadi, D. (2014). Hydroclimatic analysis of water level fluctuations in Lake Urmia, *Journal of Natural Geography*, 46(2): 77-92. [In Persian].
- Zahiri, AS.; Sharifan, H.; Arakashi, F. and Rahimian, M. (2014). Evaluation of drought and drought phenomena in Khorasan province using profiles (PNPI, SPI, NITZCHE), *Irrigation and drainage journal of Iran*, 21(8): 865-845. [In Persian].
- Zainali, B. and SafarianZingir, V. (2017). Drought Monitoring in Urmia Lake Basin Using Fuzzy Index, *Journal of Environmental Risks*, 7(12): 37-62. [In Persian].
- Zeinali, B.; Asghari, S. and Safarian Zengir, V. (2017). Drought monitoring and assessment of its prediction in Lake Urmia Basin using SEPT and ANFIS model, *Environmental Impact Spatial Analysis Journal*, 3(1): 73-96. [In Persian].
- Zelege, T.; Giorgi, T.; Diro, F. and Zaitchik, B. (2017). Trend and periodicity of drought over Ethiopia, *International journal of climatology*, 65: 4733-4748
- Zolfaghari, H. and Nouri-Samal, Z. (2016). Application of Drought Index (CPEL) in Determining Variables for Analysis of Drought in Iran, *Journal of Environmental Spatial Analysis*, 9(3): 99-114. [In Persian].