

مدل‌سازی و پایش پدیده خشکسالی در شمال غرب ایران

وحید صفریان زنگیر - دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

بهروز سبحانی^۱ - استاد آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مجید رضائی بنفشه - استاد آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۱۲

چکیده

خشکسالی مختص مکان خاص نبوده و مناطق مختلف جهان از آن متأثر می‌باشد، یکی از این مناطق، شمال غرب ایران است که در چند سال اخیر از این پدیده رنج می‌برد. هدف پژوهش حاضر مدل‌سازی و تحلیل خشکسالی در شمال غرب ایران می‌باشد. برای این کار پارامترهای اقلیمی: بارش، دما، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد در بازه زمانی ۳۲ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۷) در ۲۱ ایستگاه شمال غرب ایران مورد استفاده قرار گرفت. برای مدل‌سازی، شاخص فازی T.I.B.I ابتدا چهار شاخص (SET, SPI, SEB, MCZI) با استفاده از منطق فازی در نرم‌افزار Matlab فازی‌سازی شدند، سپس شاخص‌ها با هم مقایسه شده و در نهایت از مدل تصمیم‌گیری چند متغیره Topsis، برای اولویت‌سنجی مناطق درگیر با خشکسالی استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان داد مدل T.I.B.I طبقات خشکسالی، چهار شاخص مذکور را به صورت دقیق در خود منعکس می‌کند. از بین ۵ پارامتر اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش، پارامتر دما در نوسان شدت خشکسالی بیش‌ترین تأثیر را داشت. شدت خشکسالی براساس مدل‌سازی صورت گرفته در مقیاس ۱۲ ماهه بیش‌تر از ۶ ماهه بود، طولانی‌ترین تداوم خشکسالی در منطقه مورد مطالعه مربوط به ایستگاه ارومیه در بازه ۱۲ ماهه از ماه جولای سال ۲۰۰۳ تا ماه دسامبر سال ۲۰۰۴ به مدت ۱۸ ماه رخ داده است. بیش‌ترین درصد رخداد خشکسالی در ایستگاه ارومیه در مقیاس ۱۲ ماهه و کم‌ترین آن در ایستگاه سنندج در مقیاس ۶ ماهه اتفاق افتاده است. براساس مدل‌سازی صورت گرفته، شاخص فازی T.I.B.I نسبت به شاخص فازی SPEI برتری نسبی را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: منطق فازی، پایش خشکسالی، مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه، T.I.B.I، شمال‌غرب.

۱- مقدمه

کمبود آب و افزایش دما در سال‌های اخیر بر اثر عوامل طبیعی و انسانی خود را به صورت تدریجی به شکل خشکسالی نشان می‌دهد. اثرات خشکسالی نسبت به خشکی خطرات بیش‌تری را در پی دارد که کنترل این اثرات بسیار دشوار می‌باشد. این که میزان تأثیرات خشکسالی در منطقه تحت سیطره خود چقدر می‌باشد نیازمند مطالعه دقیق و همه‌جانبه می‌باشد. هیچ نقطه‌ای از کره زمین در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری در امان نبوده است یکی از این مناطق شمال غرب ایران در جنوب غرب آسیا می‌باشد که پرداختند به این مسئله با روش و مدل دقیق مهم و ضروری می‌باشد. خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی می‌باشد که در دوره رخداد خود خسارات و اثرات جبران ناپذیری را در بخش‌های مختلف کشاورزی، اقتصاد و غیره به دنبال دارد. در سال‌های اخیر مناطق مختلف جهان نسبت به گذشته، شاهد خشکسالی‌هایی با شدت بیش‌تری بوده‌اند. هم‌چنین خشکسالی یکی از مهم‌ترین بلاهای طبیعی تأثیرگذار در بخش کشاورزی و منابع آب می‌باشد که فراوانی آن به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور بسیار زیاد می‌باشد. آنالیز و پایش خشکسالی یکی از مهم‌ترین اصول در مدیریت خشکسالی و ریسک به‌ویژه در مناطق پرخطر رخداد خشکسالی می‌باشد. خشکسالی پدیده‌ای طبیعی است که به علت برهم‌کنش عوامل مختلف هواشناسی، دارای فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد و در همه شرایط اقلیمی و در تمام مناطق کره زمین به وقوع می‌پیوندد. هم‌چنین خشکسالی نشانه روشنی از نوسان‌های اقلیمی است و تأثیر زیادی بر جوامع بشری می‌گذارد. مطالعه وضعیت خشکسالی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار است (شمس‌نیا و همکاران، ۱۳۸۷؛ میرزایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ پیروی و همکاران، ۱۳۹۴؛ ادیب و گرجی، ۱۳۹۵؛ علیزاده، ۱۳۹۶؛ زینالی و صفریان زنگیر، ۱۳۹۶؛ زینالی و همکاران، ۱۳۹۶؛ صمدیان فرد و اسدی، ۱۳۹۶؛ فتحی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ جعفری و همکاران، ۱۳۹۶؛ پارسامهر و خسروانی، ۱۳۹۶ و منتصری و همکاران، ۱۳۹۷). مرادی و همکاران (۱۳۸۷) به شبیه‌سازی و تحلیل ارتباط خشکسالی‌های آب‌شناختی و اقلیمی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی جلگه بابل پرداختند و نتیجه گرفتند که وقوع خشکسالی و ترسالی‌های رودخانه بابل رود، بیش‌تر تحت تأثیر خشکسالی‌ها و ترسالی‌های ایستگاه قائم‌شهر می‌باشد. علیزاده و همکاران (۱۳۹۶) به مدل‌سازی پراکندگی خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به کارگیری سیستم دینامیک اقدام نمودند و به نتیجه رسیدند که در همه ایستگاه‌ها، مقادیر (تبخیر و تعرق گیاه مرجع) از ماه ژانویه تا جولای افزایش، سپس، تا ماه دسامبر کاهش یافت است و همه ایستگاه‌ها در ماه جولای به حداکثر مقدار خود رسیده‌اند. کماسی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی خشکسالی با نمایه‌های SPI و EDI به روش مدل‌سازی ANFIS در استان کهگیلویه و بویراحمد اقدام کردند و به این نتیجه رسیدند که خوشه‌بندی باعث افزایش دقت مدل‌سازی در مرحله صحت‌سنجی و واسنجی شده است. زینالی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی خشکسالی و امکان پیش‌بینی آن در ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه پرداخته‌اند، نتایج پژوهش آنان نشان‌گر روند

افزایشی شدیدتر دما در این حوضه بوده است. بیشترین درصد وقوع خشکسالی در ایستگاه ارومیه و کمترین آن در مهاباد مشاهده شده است. بایزیدی (۱۳۹۷) به ارزیابی خشکسالی ایستگاه‌های سینوپتیک غرب کشور با استفاده از روش هریست و مدل عصبی-فازی تطبیقی پرداختند و به این نتیجه رسیدند ضریب تعیین و میزان خطا جز در ایستگاه‌های کرمانشاه، میانه و پیرانشهر مدل، عملکرد بهتری را 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. اختیاری‌خواجه و دین‌پژوه (۱۳۹۷) به کاربرد شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) برای بررسی دوره‌های خشکی اقدام نمودند و به این نتیجه رسیدند که سال‌های آبی ۸۷ - ۱۳۸۶، ۸۸ - ۱۳۸۷ و ۸۱ - ۱۳۸۰ به ترتیب برای ایستگاه‌های تبریز، بندر انزلی و زاهدان خشک‌ترین سال آبی در طول دوره آماری ۶۰ ساله می‌باشد. Liu et al, (2017) تغییرات خشکسالی را در جنوب غرب چین بررسی کردند و نشان دادند که خطرات و شدت خشکسالی در دهه‌های گذشته به‌طور چشم‌گیری در سراسر منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است. Hao et al, (2016) یک روش تئوری خشکسالی برای شاخص خشکسالی چند متغیره، براساس یک شاخص ترکیبی خطی ارائه داده‌اند. براساس ویژگی شاخص استاندارد خشکسالی، توزیع نظری شاخص ترکیبی خطی (LDI) مشتق شده است که می‌تواند برای طبقه‌بندی خشکسالی با استفاده از روش درصد، بهره‌گیری شود. نتایج حاصل از مقایسه این روش با روش‌های تجربی، عملکرد رضایت بخش آن را جهت طبقه‌بندی خشکسالی نشان داده است. Huang et al, (2016) به بررسی ارتباط بین خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص‌های آب و هوایی و فعالیت انسانی در حوضه رودخانه کلمبیا پرداخته‌اند و نتایج حاصل نشان داده‌اند 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 شوند. Quesada et al, (2018) در مطالعات خود به بررسی تغییرات هیدرولوژیک در جهت رویکردی سازگار برای ارزیابی تغییرات در سیل و خشکسالی پرداخته و به این نتیجه دست یافته‌اند که اغلب روش‌های مورد استفاده در تشخیص روندهای افراطی هیدرولوژیکی برای تشخیص روند مناسب نیست و نمی‌تواند در تصمیم‌گیری مورد استفاده قرارگیرد. بنابراین آنان یک روش مبتنی بر نظریه اجرا و سطح آستانه پیشنهاد دادند. Modaresirad et al, (2017) به بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی غرب ایران پرداخته و نتایج به دست آمده نشان داد شاخص SPI قادر به نشان دادن دو ویژگی اصلی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و نیز ارائه برآورد دقیق در دوره عود مجدد خشکسالی شدید است. Zelki et al, (2017) با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص خشکسالی پالمر (PDSI) و داده‌های ماهواره‌ای به بررسی خشکسالی در اتیوپی پرداخته‌اند. یافته‌های پژوهش آن‌ها نشان داد که دوره‌های خشکی و رطوبت مشاهده شده در شمال محدوده مورد مطالعه به‌طور عمده به تغییر انسو در فصل‌های بهار و تابستان بستگی دارد در حالی که روند خشک

شدن در جنوب و جنوب غربی با گرمایش اطلس و دمای سطح آب در غرب اقیانوس آرام در ارتباط است. Kisi et al, (2017) در پژوهش خود با استفاده از RCM شرایط خشک و مرطوب را تحلیل نموده و به این نتیجه رسیده‌اند که عدم اطمینان در پیش‌بینی‌های آب و هوایی وجود دارد با این حال طبق نتایج بررسی‌های آن‌ها احتمالاً در آینده، تابستان‌های خشک‌تر در بخش‌های جنوبی و وقوع بارش‌های شدیدتر در زمستان و پاییز را در مناطق شمالی محدوده مورد مطالعه رخ خواهد داد. Jinum et al, (2017) با هدف بررسی چگونگی مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای (RCMS) ویژگی‌های مشاهده شده خشکسالی را براساس شاخص تبخیر و تعرق استاندارد (SPEL) در آسیای میانه بررسی کردند و نتایج نشان داد که RCMها در مناطق مرطوب دقیق ولی در مناطق خشک نادرست هستند و این مدل نمی‌تواند رویدادهای خشکسالی را برای مقیاس‌های فضایی بزرگ به دست آورند. پژوهشگرانی دیگر داخلی و خارجی با استفاده از مدل‌های مختلف در زمینه خشکسالی تحقیق کرده‌اند از جمله: (شکری کوچک 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؛ ذولفقاری و همکاران، ۱۳۹۵؛ دماوندی و همکاران، ۱۳۹۵؛ جان‌درمیان و همکاران، ۲۰۱۵)؛ فنی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Gholamali et al (2011)؛ Huang et al (2016)؛ Touma et al (2015)؛ Jaun et al (2015)؛ Spinoni et al (2015)؛ Safarianzengir et al (2019)؛ Sobhani & Safarianzengir (2019)؛ Sobhani et al (2019a) and (2019b). با توجه به مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج کشور در پژوهش حاضر سعی بر آن شد، با استفاده از یک شاخص جدید به مدل‌سازی و پایش پدیده خشکسالی در شمال غرب ایران اقدام شود.

۲- مواد و روش‌ها

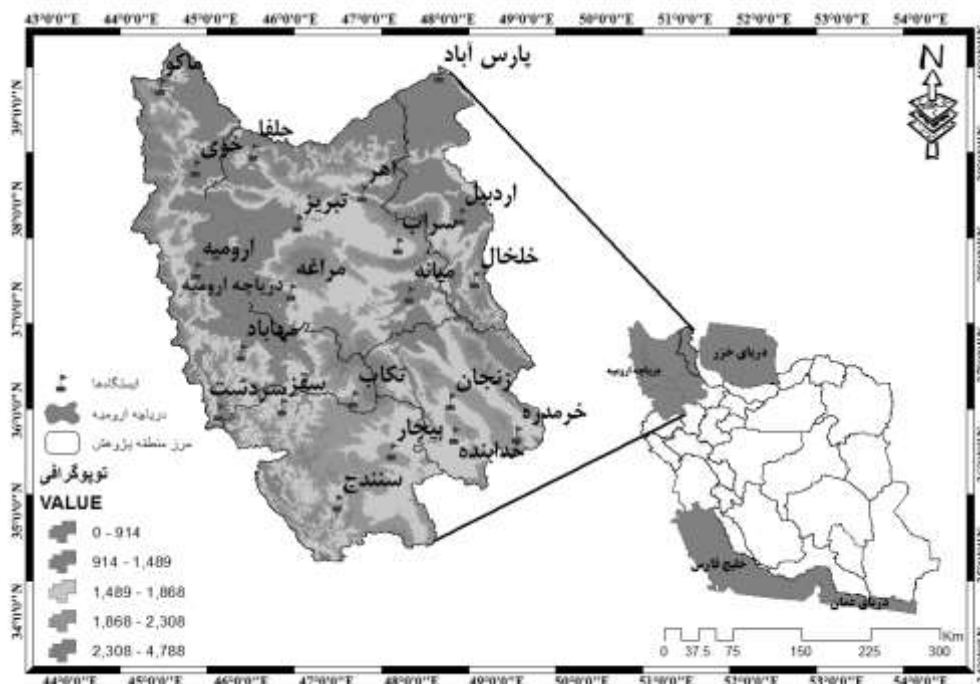
در پژوهش حاضر به مدل‌سازی خشکسالی در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های اقلیمی بارش، دما، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد به صورت ماهانه در (مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه) برای بازه زمانی ۳۲ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۷) در ۵ پنج استان اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، زنجان و کردستان در ۲۱ ایستگاه با استفاده از مدل‌سازی شاخص جدید به نام شاخص T.I.B.I^۲ معماری، فازی‌سازی شده از چهار شاخص (SET^۳، SPI^۴، SEB^۵، MCZI^۶) معتبر در سازمان هواشناسی جهانی استفاده شد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شد.

۲ شاخص ترکیب یافته 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

3 Standardized EvapotranspirationTorrent White Index (شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده تورنت وایت)

4 Standardized Precipitation Index (شاخص بارش استاندارد شده)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در سطح کشور

برای مدل سازی شاخص جدید T.I.B.I، ابتدا داده های اقلیمی نرمال سازی شدند، سپس چهار شاخص (SET, SPI, SEB, MCZI) جداگانه محاسبه و اقدام به مدل سازی فازی چهار شاخص مذکور در محیط نرم افزار Matlab انجام شد و در نهایت برای اولویت سنجی مناطق درگیر با خشکسالی از مدل تصمیم گیری چند متغیره، تاپسیس استفاده شد.

۲-۱- شاخص فازی T.I.B.I

شاخص فازی (T.I.B.I) برای رفع قسمتی از معایب شاخص SPEI ارائه شده است. شاخص T.I.B.I از تلفیق شاخص های (SET, SPI, SEB, MCZI) حاصل شد، این شاخص نتیجه معماری مدل سازی 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.

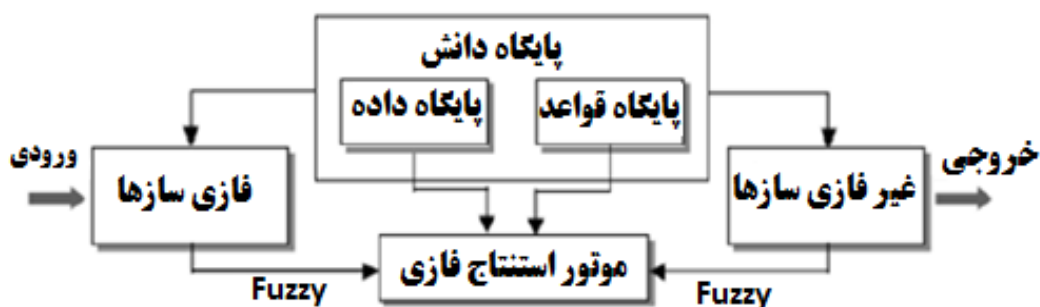
5 Standardized Evapotranspiration Blanney Creedale FAO Index (شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده بلانی کریدل فائو)

6 Modified CZI Index

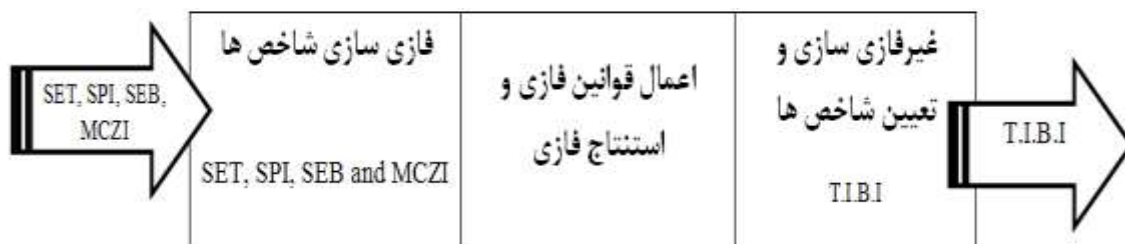
شاخص اصلاح شده CZI

۲-۲- معماری فازی پایش خشکسالی

برای مشتق‌سازی و ترکیب چهار شاخص ورودی (SET, SPI, SEB, MCZI) با استفاده از سیستم استنتاج فازی، قوانین و توابع عضویت‌ها تعیین شدند. با توجه به ساختار مدل‌های فازی شکل (۲)، ساختار مدل‌سازی فازی پایش خشکسالی به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شد.



شکل ۲- سیستم استنتاج فازی (سلاجقه و فتح‌آبادی، ۱۳۸۸، ۲۷۳)



شکل ۳- مدل‌سازی شاخص فازی T.I.B.I برای پایش خشکسالی

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

۲-۳- متغیرهای زبانی و ارزش‌های زبانی

واژه زبانی نه گانه به کار گرفته شده که گستردگی 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 ارزیابی صورت وضعیت شرایط خشکسالی استفاده شد.

۲-۴- 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، انجام 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 عبارتند از: (۰/۴، ۰/۲، ۰، ۰) = پایین، (۰/۸، ۰/۵، ۰/۲، ۰) = متوسط و (۱، ۱، ۰/۸، ۰/۶) = بالا. همان‌گونه که در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. 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 شدند، پس برای استانداردسازی شاخص‌های SET, SPI از رابطه ۱ و شاخص‌های SEB, MCZI از رابطه ۲ استفاده شد.

$$x_{ij} = \frac{x_jmax - x_j}{x_jmax - x_jmin} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \frac{x_j - x_jmin}{x_jmax - x_jmin} \quad (2)$$

در این روابط x_{ij} معرف مقدار استاندارد شده، x_j مقدار شاخص مورد نظر، x_jmax بیش‌ترین مقدار موجود در سری اعداد و x_jmin معرف کم‌ترین مقدار در سری اعداد می‌باشد (مالچسوفسکی؛ Malchovsky، ۲۰۰۶: 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 می‌باشد که دامنه چهار شاخص ورودی بین ± 2 می‌باشد جدول ۱، و دامنه شاخص خروجی بین صفر و یک جدول ۲، است.

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

مقدار فازی	متغیر زبانی
≥ 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

ادامه جدول ۱

مقدار فازی	متغیر زبانی
-۱/۳۹ تا -۱/۰۰	DA
-۱/۹۹ تا -۱/۵۰	DH
≤ -۲	DVH

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

مقدار فازی	متغیر زبانی
۰، ۰، ۰/۱	WVH
۰، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۲	WH
۰، ۰/۲، 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 (۴) می‌باشد. در ادامه اعداد فازی حاصله به اعداد غیر فازی تبدیل یافته و از اعداد غیر فازی در نوشتن قواعد استفاده شد.

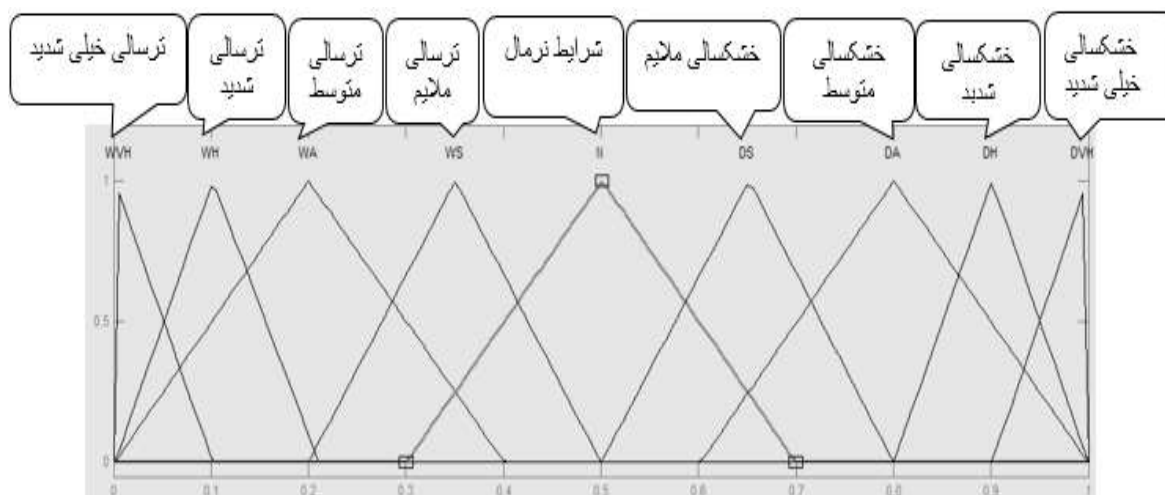
۲-۵- غیر فازی کردن اعداد فازی

جهت تبدیل یک عدد فازی به یک مقدار دقیق، روش‌های مختلفی از جمله روش مرکز ثقل، روش بیشترین تابع عضویت، روش امتیاز دهی به چپ و راست عدد فازی وجود دارد که در این پژوهش، جهت غیر فازی کردن اعداد فازی از روش امتیاز دهی 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 بدست آمده 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، Max با فرض اینکه دامنه اعداد فازی [۰، ۱] باشند، تعریف شد. در محاسبات عملی برای راحتی کار در عدد فازی مثلثی، امتیازات سمت چپ و راست را از روی روابط (۳، ۴، ۵) محاسبه می‌کنیم (جعفرنژاد و کیا، ۱۳۸۹: ۱۹۱).

$$\mu_L(A) = 1 - \frac{m}{1+\alpha} \quad (۳)$$

$$u_R(A) = \frac{m+\beta}{1+\beta} \quad (۴)$$

$$\mu_T(A) = \frac{\mu_R(A)+1-\mu_L(A)}{2} \quad (۵)$$



شکل ۴- نمایش اعداد فازی مورد استفاده در عطف به متغیرهای زبانی نه گانه

۲-۶- تعیین قواعد جهت تلفیق شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI)

طبقات مختلف شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) بر پایه قواعد یا همان ترکیبی از گزاره‌های شرطی در قالب اگر، که به یک طبقه از شاخص T.I.B.I در قالب آنگاه منتهی می‌شود، تعریف شد. این قاعده فقط یک ترکیب از حالت‌های مختلف شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) را که به شاخص T.I.B.I منتهی می‌شوند، نشان داده شد. در همین راستا، به تناسب صورت ترکیبی می‌توان قواعد متوالی را نوشته و در پایگاه دانش ذخیره کرد. با توجه به اینکه در خروجی حاصل از برآیند ترکیب، شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) در تعیین وضعیت T.I.B.I دخالت داده شود، وزن هر کدام 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.

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_i W_i}{\sum_{i=1}^n V_i W_i} \quad (۶)$$

در این رابطه C_i معرف مقدار تابع فازی T.I.B.I در حالت i از ترکیب شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) است، S_i نمره غیر فازی وضع موجود شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) در حالت i را نشان می‌دهد، W_i نشان‌گر وزن شاخص‌ها در حالت i ، $S_i W_i$ معرف نمره وزنی حالت i در وضع موجود، V_i معرف نمره غیر

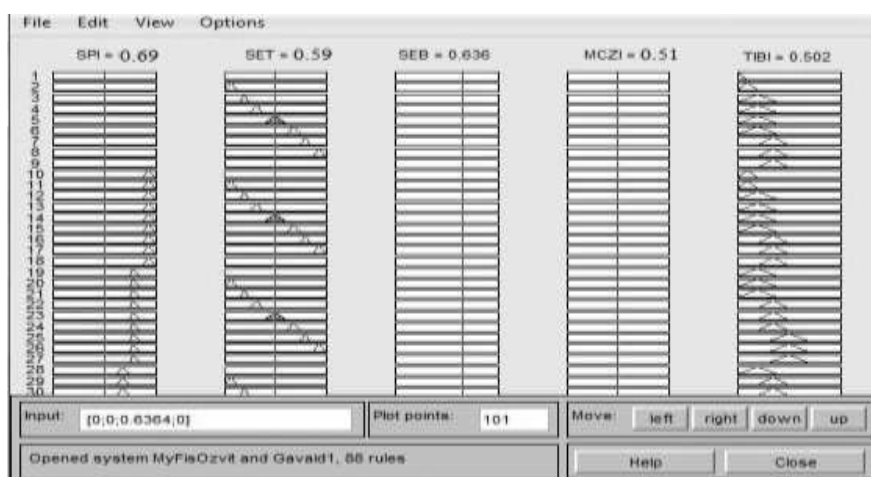
فازی حالت i در وضعیت DVH، و $v_i w_i$ معرف نمره وزنی حالت i در وضعیت DVH است. به عنوان مثال از محتوای نمونه ارائه شده در جدول (۴) قاعده معین از سری قواعد تعیین شده در جهت تعیین وضعیت شاخص T.I.B.I استخراج شده است. این قاعده بیان می‌کند که اگر SPI در طبقه ترسالی شدید، SET در طبقه ترسالی ملایم باشد، SEB در مرتبه ترسالی شدید و MCZI در ترسالی ملایم T.I.B.I در طبقه ترسالی متوسط قرار می‌گیرد. باتوجه به آن که قواعد بر مبنای چهار شاخص (SET, SPI, SEB, MCZI)، که هر یک در ۹ حالت مطرح شده است شکل می‌گیرد، بنابراین تعداد قواعدی که منعکس کننده نتایج حاصل از ترکیب‌های ممکن از صورت وضعیت‌های مختلف چهار شاخص می‌باشد، بالغ بر ۸۱ قاعده تعیین شد که نمونه قاعده بیان شده در ادامه ارائه شد.

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

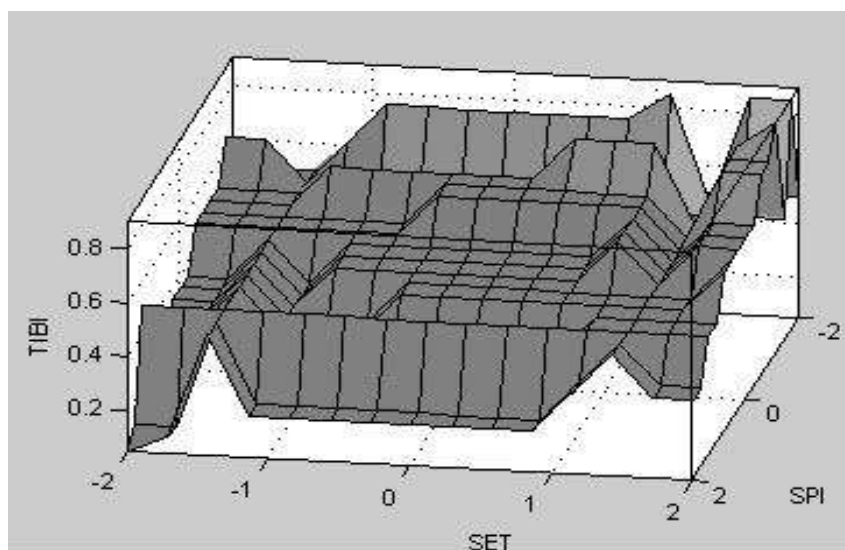
IFF (SPI is WH) and (SET is WS) and (SEB is WH) and (MCZI is WS) then (TIBI is WA)

۲-۷- وارد کردن قواعد فازی در محیط Matlab

بعد 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 نمایش گر قاعده (Rule Viewer) با وارد کردن مقدار شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) مقدار شاخص T.I.B.I را به دست آورد. به عنوان مثال در شکل (۵) در قسمت INPUT با وارد کردن مقدار شاخص‌های (SET, SPI, SEB, MCZI) که به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۶۹، ۰/۵۹ می‌باشد، شاخص T.I.B.I به مقدار ۰/۵۰ به دست آمده است در نمایشگر (Surface Viewer) نیز به تناسب تغییرات مقادیر شاخص‌های ورودی (SET, SPI, SEB, MCZI) می‌توان فراز و فرودهای سطوح شاخص T.I.B.I را در یک نمای گرافیکی دنبال کرد (شکل ۶).



شکل ۵- نمایشی از Rule Viewer در محیط MATLAB



شکل ۶- سطح منحنی حاصل از ترکیب چهار شاخص (SET, SPI, SEB, MCZI) برای محاسبه شاخص TIBI

پس از این که مدل سازی شاخص فازی T.I.B.I به طریق بیان شده به دست آمد، نحوه تأثیر پارامترهای اقلیمی در خشکسالی ایستگاه های مورد مطالعه، بررسی شد. سپس به پایش خشکسالی پرداخته شد. در پایش خشکسالی بر اساس شاخص T.I.B.I، روند، شدت تداوم و درصد فراوانی وقوع خشکسالی را مورد بررسی قرار گرفت و روند شاخص های مورد بررسی با روش روند خطی تعیین شد. برای به دست آوردن درصد فراوانی وقوع خشکسالی در طبقات مختلف، از رابطه Frequency استفاده شد.

۲-۸- مدل Topsis

هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ روش Topsis^v را پیشنهاد کردند. در این روش m گزینه (A_1, A_2, \dots, A_m) با n شاخص (C_1, C_2, \dots, C_n) ارزیابی شدند. حل این مسئله با این روش، مستلزم طی گام های زیر است (مکوندی و همکاران، ۱۳۹۱؛ نظم فر و علی بخشی، ۱۳۹۳):

بی مقیاس سازی ماتریس تصمیم با استفاده از بی مقیاس سازی نورم، رابطه ۷:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}} \quad j = 1, \dots, J \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

۲- تشکیل ماتریس بی مقیاس موزون (V_{ij}) با ضرب ماتریس بی مقیاس شده (r_{ij}) در ماتریس قطری وزن ها (W_i)

رابطه ۸:

$$v_{ij} = w_i \times r_{ij} \quad j = 1, \dots, J \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

Wi وزن شاخص i ام است، جمع اوزان شاخص ها برابر ۱ است.

۳- تعیین راه حل ایده آل مثبت (A^*) و منفی (A^-) به صورت روابط ۹ و ۱۰.

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\} \quad (9)$$

$$= \left\{ \left(\max_j v_{ij} | i \in I' \right), \left(\min_j v_{ij} | i \in I'' \right) \right\}$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \quad (10)$$

$$= \left\{ \left(\min_j v_{ij} | i \in I' \right), \left(\max_j v_{ij} | i \in I'' \right) \right\}$$

۴- میزان فاصله هر گزینه تا ایده آل های مثبت و منفی تعیین می شود.

فاصله هر گزینه تا ایده آل مثبت (D_j^*) به صورت رابطه ۱۱:

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad , \quad j = 1, \dots, J \quad (11)$$

فاصله هر گزینه تا ایده آل منفی (D_j^-) به صورت رابطه ۱۲:

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad , \quad j = 1, \dots, J \quad (12)$$

۵- تعیین نزدیکی نسبی (C_j^*) یک گزینه به راه حل ایده آل رابطه ۱۳:

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^* + D_j^-} \quad , \quad j = 1, \dots, J \quad (13)$$

۶- رتبه بندی گزینه ها بر اساس نزدیکی نسبی (C_j^*)، گزینه ای که (C_j^*) آن بزرگتر باشد، بهتر است.

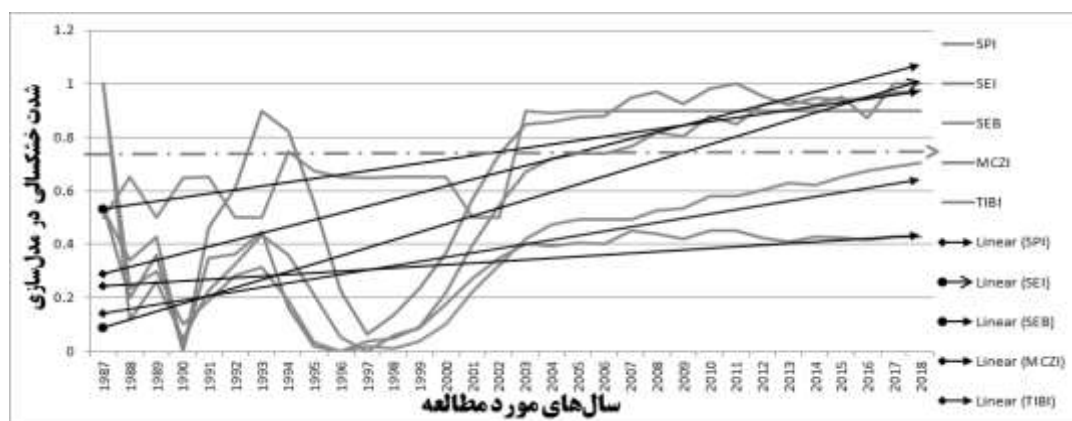
با توجه به مدل سازی صورت گرفته مناطق مورد مطالعه، از لحاظ اولویت درگیر با خشکسالی با استفاده از مدل تاپسیس بررسی شد، ابتدا برای انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل داده های آماری، وزنی برای هر یک از پارامترهای مورد استفاده در نظر گرفته شد و سپس میزان مطلوبیت و عدم مطلوبیت هر یک از ایستگاه های مورد مطالعه از نظر درصد فراوانی خشکسالی بررسی و در نهایت گزینه مناسب از راه نزدیکی نسبی به میزان ایده آل انتخاب گردید.

۳- نتایج و بحث

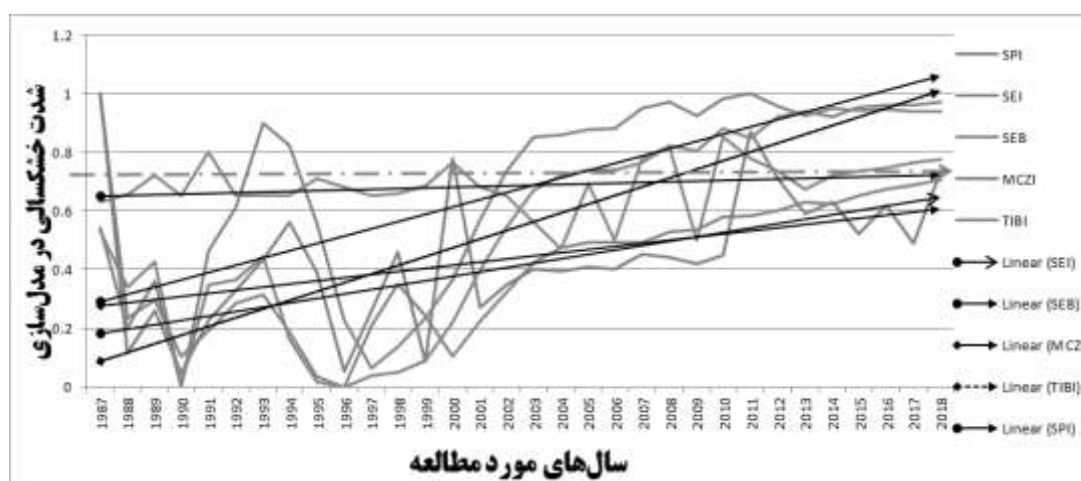
۳-۱- پایش نوسانات خشکسالی بر اساس چهار شاخص تلفیق شده در مدل T.I.B.I

برای بررسی و تحلیل نحوه تأثیرات نوسانات خشکسالی شاخص ها در شرایط خشکسالی ایستگاه ها، می توان میزان تغییراتی را که در چهار شاخص (SET, SPI, SEB, MCZI) حاصل شده و در شاخص T.I.B.I به عنوان شاخص خروجی نمود پیدا می کند، مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده شد. با توجه به این که تعداد ایستگاه ها مورد مطالعه زیاد بودند، برای تفهیم بهتر، فقط نمودار سری خشکسالی، ایستگاه تبریز در دو مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه در شکل های ۷ و ۸ ارائه شدند، (در شکل های مذکور خط فلش قرمز رنگ مقطع مرز خشکسالی در مقیاس ۶ ماهه با مقدار

۰/۷۴ و بیشتر را نشان می دهد و در مقیاس ۱۲ ماهه با مقدار ۰/۷۴ و بیشتر را نشان می دهد). بررسی این اشکال نشان می دهد که در ایستگاه تبریز در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه مقدار تبخیر و تعرق مشابه هم در خشکسالی محیط بوده یعنی مقدار آن از ماه مارس سال ۱۹۹۳ تا جولای سال ۱۹۹۸ سیر نزولی داشته است و بعد از این ماه شکل افزایشی را به خود گرفته است، در صورتی که تأثیر بارندگی در مقیاس ۶ ماهه ضعیف تر از مقیاس ۱۲ ماهه می باشد. یعنی از ماه آوریل سال ۱۹۹۶ تا دسامبر سال ۲۰۰۴ روند افزایشی به خود گرفته و بعد از آن شکل یکسانی را می پیماید. و شاخص های (SET, SPI, SEB, MCZI) بر روی شاخص T.I.B.I تأثیر گذاشته و تا حدودی یک روند را نشان می دهند و نشان گر این است شاخص فازی جدید T.I.B.I چهار شاخص مذکور را به خوبی در خود منعکس کرده است و 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 می دهد.



شکل ۷- نمودار نوسان شاخص ها در ایستگاه تبریز در مقیاس ۶ ماهه، در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)



شکل ۸- نمودار نوسان شاخص ها در ایستگاه تبریز در مقیاس ۱۲ ماهه، در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی بر اساس مدل‌سازی فازی شاخص T.I.B.I

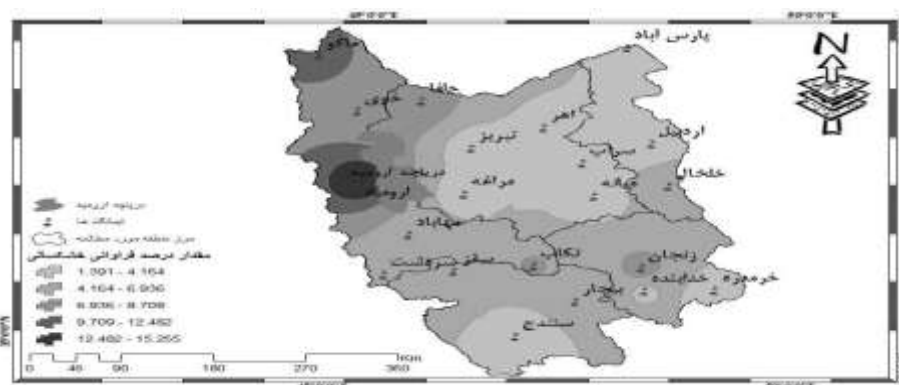
طبقات خشکسالی	T.I.B.I مقادیر شاخص
خشکسالی خیلی شدید	۰/۹۶ - ۱
خشکسالی شدید	۰/۸۷ - ۰/۹۶
خشکسالی متوسط	۰/۷۴ - ۰/۸۷
خشکسالی ملایم	۰/۵۹ - ۰/۷۴
نرمال	۰/۴۴ - ۰/۵۹
ترسالی ملایم	۰/۲۹ - ۰/۴۴
ترسالی متوسط	۰/۱۵ - ۰/۲۹
ترسالی شدید	۰/۰۶ - ۰/۱۵
ترسالی خیلی شدید	۰ - ۰/۰۶

با توجه به یافته‌های به دست آمده از درصد فراوانی خشکسالی‌ها در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه، مجموع درصد فراوانی خشکسالی‌ها در مقیاس ۶ ماهه ایستگاه‌های شمال غربی و غرب، منطقه مورد مطالعه بیش‌تر در معرض خشکسالی قرار گرفتند. ایستگاه‌های ارومیه، جلفا و ماکو به ترتیب با درصد فراوانی خشکسالی (۱۵/۲۶، ۹/۱۰ و ۱۰/۷۰) بیش‌ترین درصدها را به خود اختصاص دادند. ایستگاه‌های با درصد فراوانی خشکسالی کم‌تر، بیش‌تر در بخش شرق منطقه مورد مطالعه قرار گرفتند که ایستگاه‌های سنندج، مراغه و تبریز به ترتیب با مقدار درصد فراوانی (۱/۳۹، ۲/۰۱ و ۲/۲۰) را شامل شد، جدول ۴ (شایان ذکر است در بیان و نوشتن شدت خشکسالی در جداول و ترسیم شکل‌ها از شدت سه مقیاس خشکسالی خیلی شدید، شدید و متوسط استفاده شد) و شکل ۹. در مقیاس ۱۲ ماهه غرب منطقه مورد مطالعه بیش‌تر در معرض خشکسالی قرار گرفتند که ایستگاه‌های بیش‌تر درگیر با خشکسالی ارومیه، جلفا و ماکو با درصد فراوانی خشکسالی به دست آمده از چهار شاخص تلفیقی (SET, SPI, SEB, MCZI) در مدل فازی جدید T.I.B.I به ترتیب (۱۳/۹۰، ۱۱/۸۲ و ۱۲/۱۸) را به خود اختصاص دادند. ایستگاه‌های مرکزی و جنوبی منطقه مورد مطالعه کم‌تر در معرض خشکسالی قرار گرفتند از جمله خرمدره، تبریز و مراغه به ترتیب با مقدار درصد فراوانی خشکسالی (۴/۱۵، ۴/۳۴ و ۴/۱۹) در معرض خشکسالی قرار دارند، جدول ۵ و شکل ۱۰.

جدول ۴- درصد فراوانی وقوع خشکسالی در طبقات مختلف در مقیاس زمانی ۶ ماهه، در دوره آماری (۲۰۱۸-)

(۱۹۸۷)

نام ایستگاه‌ها	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ملایم	نرمال	ترسالی ملایم	ترسالی متوسط	مجموع
اردبیل	۰/۶۳	۰/۹۲	۰/۹۹	۴	۱/۲	۰/۴۶	۰/۱۱	۲/۵۴
خلخال	۰	۲/۱۲	۴/۱۵	۶	۵/۳	۰/۳۶	۰	۶/۲۷
پارس آباد	۰	۱/۳۰	۲/۴۰	۸	۴/۴	۱/۶۸	۰	۳/۷۰
تبریز	۰/۵۲	۰/۲۱	۱/۴۷	۹/۱	۲/۹	۰/۶۳	۰	۲/۲۰
اهر	۰	۰/۱۱	۳/۵	۱۴/۱۲	۲/۳۶	۰/۷۲	۰	۳/۶۱
جلقا	۰	۴/۱۰	۵	۱۳	۱/۹۶	۰/۹۶	۰	۹/۱۰
سراب	۰	۱/۴۱	۲	۷/۷۴	۴/۸۵	۰/۸۵	۰	۳/۴۱
مراغه	۰/۱۲	۰/۶۹	۱/۲۰	۹/۳۶	۶	۰/۷۳	۰/۱۵	۲/۰۱
میانه	۰	۰/۹۶	۱/۶۰	۶/۱۱	۳	۰/۷۸	۰/۱۶	۲/۵۶
ارومیه	۰/۷۹	۶/۴۷	۸	۷/۱	۵	۰/۱۱	۰/۱۵	۱۵/۲۶
خوی	۰	۳/۳۲	۵/۵	۱۰	۴	۰/۳۸	۰/۲۱	۸/۸۲
مهاباد	۰	۲/۷۸	۳/۵	۱۰/۵۲	۲	۰/۴۱	۰	۶/۲۸
ماکو	۰	۴/۲	۶/۵	۱۱/۱۰	۱/۲۵	۰/۹۲	۰	۱۰/۷۰
سردشت	۰	۰/۹۶	۴/۳	۱۲/۱۴	۶/۸۹	۰/۸۷	۰	۵/۲۶
تکاب	۰	۴/۱	۳/۲	۴/۴	۴/۶۳	۰/۳۹	۰/۱۶	۷/۳۰
سنندج	۰/۱۴	۰/۲۵	۱	۶/۹	۳	۱/۳۹	۰/۱۰	۱/۳۹
بیجار	۰	۱/۸۷	۳/۱۰	۱۶/۱۸	۱	۰/۴۵	۰	۴/۹۷
سقز	۰	۳/۸۶	۲/۱۸	۱۴/۱۵	۲/۲۹	۰/۷۴	۰/۱۹	۶/۰۴
زنجان	۰	۴/۴۷	۴	۱۲/۹۵	۳	۰/۳۹	۰/۱۸	۸/۴۷
خرمدره	۰	۰/۸۸	۲	۱۳/۲۵	۲	۱۲/۱۴	۰/۱۲	۲/۸۸
خدابنده	۰	۱/۷۹	۱/۸۵	۱۴/۶۹	۱/۵	۰/۳۸	۰/۱۷	۳/۶۴



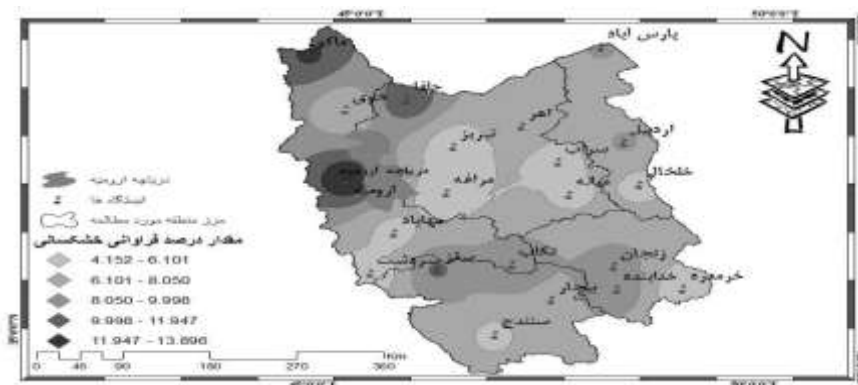
شکل ۹- پهنه‌بندی درصد فراوانی وقوع خشکسالی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس ۶ ماهه، در دوره آماری

(۱۹۸۷-۲۰۱۸)

جدول ۵- درصد فراوانی وقوع خشکسالی در طبقات مختلف در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، در دوره آماری (۲۰۱۸-۱۹۸۷)

(۱۹۸۷)

نام ایستگاه‌ها	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ملایم	نرمال	ترسالی ملایم	ترسالی متوسط	مجموع
اردبیل	۱/۱۲	۱/۱۰	۶/۰۹	۶/۳۹	۲/۴۷	۰/۴۶	۰/۴۷	۸/۳۱
خلخال	۰/۳۲	۳/۱۹	۲/۱۲	۹/۰۵	۴/۵۲	۰/۳۶	۰	۵/۶۳
پارس آباد	۰	۲/۱۲	۶/۰۲	۱۰	۳/۸۵	۱/۶۸	۰/۱۸	۸/۱۴
تبریز	۰/۸۹	۱/۰۹	۲/۳۶	۸/۰۳	۳/۲۹	۰/۶۳	۰/۱۷	۴/۳۴
اهر	۰	۲/۲۱	۴/۸۵	۱۳/۷۴	۱/۸۷	۰/۷۲	۰	۷/۰۶
جلفا	۰/۸۱	۵/۱۱	۶	۱۲	۲/۷۴	۰/۹۶	۰/۲۵	۱۱/۸۲
سراب	۰	۲/۲۶	۳	۵/۳۶	۳/۳۲	۰/۸۵	۰	۵/۲۶
مراغه	۰/۳۶	۱/۱۵	۲/۶۸	۴/۱۲	۵	۰/۸۳	۰	۴/۱۹
میانه	۰	۲/۰۹	۳/۶۰	۵/۰۶	۴	۰/۷۸	۰	۵/۶۹
ارومیه	۰/۹۴	۵/۹۶	۷	۴/۸۳	۴	۰/۱۱	۰/۱۰	۱۳/۹
خوی	۰	۱/۳۰	۴/۷۵	۱۴	۳	۰/۳۸	۰	۶/۰۵
مهاباد	۰/۶۵	۳/۳۶	۱/۳۲	۱۲/۱۱	۳	۰/۴۱	۰	۵/۳۳
ماکو	۰	۵/۶	۷/۱۲	۱۳/۴۵	۰/۸۷	۰/۹۲	۰	۱۲/۱۸
سردشت	۰/۸۳	۰/۹۸	۳/۰۸	۱۴/۶۳	۴/۸۹	۰/۸۷	۰	۴/۸۹
تکاب	۰	۳/۰۹	۶/۸۷	۷/۵۶	۳/۰۸	۰/۳۹	۰	۹/۹۶
سنندج	۰/۸۶	۰/۹۲	۴	۹/۸۶	۲	۱/۳۹	۰/۳۹	۵/۶۸
بیجار	۰/۹۸	۲/۴۹	۴/۱۸	۱۵/۱۰	۳	۰/۴۵	۰	۷/۶۵
سقز	۰/۱۶	۴/۲۸	۵/۸۶	۱۳/۸۷	۱/۰۸	۰/۷۴	۰	۱۰/۳۰
زنجان	۰	۱/۸۹	۷	۸/۶۵	۴	۰/۳۹	۰	۸/۸۹
خرمدره	۰/۲۹	۰/۸۶	۳	۹/۶۸	۶	۱۲/۱۴	۰	۴/۱۵
خدابنده	۰	۲/۹۸	۶/۱۲	۱۳/۵۵	۲/۸	۰/۳۸	۰/۸۲	۹/۱۰



شکل ۱۰- پهنه‌بندی درصد فراوانی وقوع خشکسالی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس ۱۲ ماهه، در دوره

آماري (۲۰۱۸-۱۹۸۷)

با توجه به تعریفی که از خشکسالی بر اساس شاخص T.I.B.I ارائه شد، مقادیر ۰/۷۴ و بالاتر یا از طبقه خشکسالی ملایم به بالاتر به عنوان شرایط خشک مطرح می‌شود. بر این اساس، در مدل‌سازی شاخص جدید فازی T.I.B.I، شدت خشکسالی در مقیاس ۱۲ ماهه بیش‌تر از مقیاس ۶ ماهه بود. بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر سالانه شدت خشکسالی در مقیاس ۶ ماهه از سال ۱۹۹۸ شروع شده و در مقیاس ۱۲ ماهه از سال ۱۹۹۶ به صورت خفیف آغاز شده و به صورت صعودی ادامه پیدا کرده است.

۳-۲- ارزیابی مناطق درگیر با خشکسالی بر اساس مدل تاپسیس

نتایج اجرای مدل تاپسیس با استفاده از درجه ارجعیت معیارهای حاصل از روش آنتروپی حاکی از آن، از نظر خشکسالی مکان‌های بیش‌تر و کم‌تر درگیر با خشکسالی مشخص شدند، سه ایستگاه بیش‌تر درگیر با خشکسالی به ترتیب عبارتند از: ارومیه، ماکو و جلفا با مقادیر اولویت به ترتیب (۱، ۰/۶۷ و ۰/۵۶) قرار گرفتند و سه ایستگاه سنندج، مراغه و تبریز به ترتیب امتیاز (۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵) اولویت‌های کم‌تری را برای مواجهه با خشکسالی به خود اختصاص دادند، جدول ۶ و شکل ۱۱.

جدول ۶- اولویت‌بندی ایستگاه‌های درگیر با خشکسالی بر اساس مدل تاپسیس در دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۸)

نام ایستگاه‌ها	مقادیر تاپسیس	امتیاز رتبه‌بندی تاپسیس	نام ایستگاه‌ها	مقادیر تاپسیس	امتیاز رتبه‌بندی تاپسیس
اردبیل	۰/۱۱	۱۶	مهاباد	۰/۳۴	۹
خلخال	۰/۳۴	۸	ماکو	۰/۶۷	۲
پارس آباد	۰/۱۸	۱۳	سردشت	۰/۲۷	۱۰
تبریز	۰/۰۵	۱۹	تکاب	۰/۴۳	۶
اهر	۰/۱۶	۱۴	سنندج	۰/۰۳	۲۱
جلفا	۰/۵۶	۳	بیجار	۰/۲۶	۱۱
سراب	۰/۱۴	۱۵	سقز	۰/۳۵	۷
مراغه	۰/۰۴	۲۰	زنجان	۰/۵۰	۵
میانه	۰/۰۸	۱۸	خرمدره	۰/۱۰	۱۷
ارومیه	۱	۱	خدابنده	۰/۱۸	۱۲
خوی	۰/۵۱	۴			

ارومیه، ایستگاه ارومیه رخداده داده است و در مقیاس ۱۲ ماهه نیمه غربی منطقه مورد مطالعه (غرب دریاچه ارومیه و بخش جنوب دریاچه ارومیه) خشکسالی را نشان داد. و در نهایت براساس مدل تصمیم‌گیری چند متغیره تاپسیس، ایستگاه ارومیه با مقدار امتیاز ۱ در اولویت بیش‌تر در معرض درگیری خشکسالی قرار گرفت و ایستگاه سنندج با مقدار امتیاز ۰/۰۳ درصد در اولویت آخر درگیری با خشکسالی قرار گرفت. مدل‌سازی و پایش پدیده خشکسالی در شمال غرب ایران، در این پژوهش انجام شد، این مدل نوین فازی در اکثر مطالعات که صورت گرفته، روش مناسبی در امر پایش، آنالیز و مقایسه عنوان 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 زیر زمینی 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 چند معیاره بر مبنای TOPSIS؛ علیزاده و همکاران، ۱۳۹۶: در تحقیق خود با عنوان مدل‌سازی پراکندگی خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به کارگیری سیستم دینامیک؛ زینالی و صفربان‌زنگیر، ۱۳۹۶: در تحقیقی 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 همدیدی ایران اقدام نمودند و کارایی مدل‌های استفاده شده را تأیید کردند. تفاوت مدل استفاده شده در پژوهش حاضر با سایر مدل‌ها به دلیل فازی‌سازی و ترکیب چهار شاخص ورودی با تعیین قواعد و توابع عضویت‌ها و ضریب خطاهای پایین از دقت و کارایی بالای برخوردار می‌باشد با این حال با همه مقایسه صورت گرفته، مدل‌سازی صورت گرفته در پژوهش حاضر در مدل‌سازی و پایش پدیده خشکسالی در شمال غرب ایران کارایی قابل قبولی داشت.

کتابنامه

- اختیاری‌خواجه، شیوا؛ دین‌پژوه، یعقوب؛ ۱۳۹۷. کاربرد شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) برای بررسی دوره‌های خشکی (ایستگاه‌های تبریز، بندر انزلی و زاهدان). علوم و مهندسی آبیاری. شماره ۱. ۱۴۵-۱۳۳.
- ادیب، آرش؛ گرجی‌زاده، علی؛ ۱۳۹۵. بررسی و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی. مهندسی آبیاری و آب ایران. شماره ۶. ۱۸۵-۱۷۳.

- انصاری، حسین؛ داوری، کامران؛ ثنائی نژاد، سیدحسین؛ ۱۳۸۹. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد شده SEPI، توسعه یافته بر اساس منطق فازی. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. شماره ۱. ۳۸-۵۲.
- بایزیدی، مطلب؛ ۱۳۹۷. ارزیابی خشکسالی ایستگاه‌های سینوپتیک غرب کشور با استفاده از روش هربست و مدل عصبی-فازی تطبیقی. *تحقیقات منابع آب ایران*. شماره ۱. ۲۷۸-۲۸۴.
- پارسامهر، امیرحسین؛ خسروانی، زهرا؛ ۱۳۹۶. بررسی تعیین خشکسالی با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره بر مبنای TOPSIS. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*. شماره ۲۴. ۱۶-۲۹.
- پیروی، رؤیا؛ علیدادی، حسین؛ جاوید، الله‌بخش؛ نجف‌پور، علی‌اصغر؛ ۱۳۹۴. مدل‌سازی اثر خشکسالی بر سختی کل و جامدات محلول آب زیر زمینی دشت مشهد. *فصل‌نامه پژوهش در بهداشت محیط*. شماره ۲. ۸۵-۹۴.
- ترابی‌پوده، حسن؛ شاهی‌نژاد، بابک؛ دهقانی، رضا؛ ۱۳۹۷. تخمین خشکسالی با استفاده از شبکه‌های هوشمند. *هیدروژئومورفولوژی*. شماره ۱۴. ۱۷۹-۱۹۷.
- جان‌درمیان، یونس؛ شکیبا، علیرضا؛ ناصری، حمیدرضا؛ ۲۰۱۵. 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. صص ۱۷-۱۶.
- جعفرنژاد، علی؛ کیا، سیدمصطفی؛ ۱۳۸۹. منطق فازی در MATLAB. انتشارات کیان رایانه سبز. ۱۵۷-۱۸۰.
- جعفری، غلامحسین؛ بختیاری، فاطمه؛ دوستکامیان، مهدی؛ ۱۳۹۶. بررسی و تحلیل ارتباط فضایی خشکسالی‌ها با دبی حوضه آبی قزل اوزن. *جغرافیا و توسعه*. شماره ۱۵. ۷۹-۹۴.
- حدادی، حسین؛ حیدری، حسن؛ ۱۳۹۴. آشکارسازی اثر نوسانات بارش بر روان آب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *مجله علمی پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. شماره ۵۸. ۲۴۷-۲۶۲.
- دماوندی، علی‌اکبر؛ رحیمی، محمد؛ یزدانی، محمدرضا؛ نوروزی، علی‌اکبر؛ ۱۳۹۵. پایش مکانی خشکسالی کشاورزی از طریق سری‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST داده‌های MODIS (مطالعه موردی: استان کرمان مرکزی). *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. شماره ۳. ۱۱۵-۱۲۶.
- ذوالفقاری، حسن؛ نوری‌سامله، زهرا؛ ۱۳۹۵. کاربرد شاخص خشکسالی (CPEL) در تعیین متغیرهای مناسب برای تحلیل خشکسالی‌های ایران. *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. شماره ۳. ۹۹-۱۱۴.
- زینالی، بتول؛ اصغری، صیاد؛ صفریان‌زنگیر، وحید؛ ۱۳۹۶. پایش خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص SEPT و مدل ANFIS. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. شماره ۱. ۷۳-۹۶.
- زینالی، بتول؛ صفریان‌زنگیر، وحید؛ ۱۳۹۶. پایش خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص فازی. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*. شماره ۱۲. ۳۷-۶۲.

- سبحانی، بهروز؛ غفاری گیلانده، عطا؛ گلدوست، اکبر؛ ۱۳۹۴. پایش خشکسالی در استان اردبیل با استفاده از شاخص SEPI توسعه یافته براساس منطق فازی. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیای*. شماره ۳۶. ۷۲-۵۱.
- سلاجیه، علی، فتح آبادی، ابوالحسن؛ ۱۳۸۸. بررسی امکان برآورد بار معلق رودخانه کرج با بهره‌گیری از منطق فازی و شبکه عصبی. *نشریه مرتع و آبخیزداری*. *مجله منابع طبیعی ایران*. شماره ۲. ۲۸۲-۲۷۱.
- شکری کوچک، سعید؛ بهنیا، عبدالکریم؛ ۱۳۹۲. پایش و بیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص SPI زنجیره مارکوف. *فصل‌نامه علوم و محیط‌زیست*. شماره ۱۳. ۵۲-۴۱.
- شمس‌نیا، امیر؛ پیرمردیان، نادر؛ امیری، ناصر؛ ۱۳۸۷. مدل‌سازی خشکسالی در استان فارس با استفاده از تحلیل سری-های زمانی. *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*. شماره ۲۸. ۱۸۹-۱۶۵.
- صلاحی، برومند؛ مجتبی‌پور، فریده؛ ۱۳۹۵. تحلیل فضایی خشکسالی اقلیمی شمال غرب ایران با استفاده از آماره خود همبستگی فضایی. *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. شماره ۳. ۲۰-۱.
- صمدیان‌فرد، سعید؛ اسدی، اسماعیل؛ ۱۳۹۶. پیش‌بینی نمایه خشکسالی SPI به روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و خطی چندگانه. *حفاظت منابع آب و خاک*. شماره ۶. ۱۶-۱.
- ظهیری، عبدالرضا؛ شریفان، حسین؛ ابارشی، فرزانه؛ رحیمیان، محمد؛ ۱۳۹۳. ارزیابی پدیده‌های ترسالی و خشکسالی در استان خراسان با استفاده از نمایه‌های (PNPI, SPI, NITZCHE). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. شماره ۸. ۸۴۵-۸۶۵.
- علیزاده، شهراد؛ حسین، محمدی؛ پرویز، کردوانی؛ ۱۳۹۶. مدل‌سازی پراکنندگی خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم در ایران با به کارگیری سیستم دینامیک. *آمایش سرزمین*. شماره ۱. ۱۸۸-۱۶۹.
- فتحی‌زاده، حسن؛ غلامی‌نیا، اعظم؛ مبین، محمدحسین؛ سودایی‌زاده، حمید؛ ۱۳۹۶. بررسی روابط بین خشکسالی هواشناسی و متغیرهای خورشیدی در برخی از ایستگاه‌های همدیدی ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*. شماره ۶. ۸۷-۶۳.
- فنی، زهره؛ خلیل‌الهی، حسین‌علی؛ سجادی، ژیلما؛ فال‌سلیمان، محمود؛ ۱۳۹۵. تحلیل دلایل و پیامدهای خشکسالی در استان خراسان جنوبی و شهر بیرجند. *فصل‌نامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. شماره ۲۰. ۱۷۵-۲۰۰.
- کماسی، مهدی؛ ملک‌محمودی، مهدی؛ منتصری، حسین؛ ۱۳۹۶. پیش‌بینی خشکسالی با نمایه‌های SPI و EDI به روش مدل‌سازی ANFIS در استان کهگیلویه و بویراحمد. *نشریه هواشناسی کشاورزی*. شماره ۱. ۴۷-۳۶.
- مالچفسکی، یانک؛ ۲۰۰۶. *سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری*. ترجمه اکبر پرهیزگار. عطا غفاری گیلانده. تهران. انتشارات سمت.
- مرادی، حمیدرضا؛ طائی، مجید؛ قاسمیان، داود؛ جزگی، جواد؛ بهاری، رضا؛ ۱۳۸۷. شبیه‌سازی و تحلیل ارتباط خشکسالی‌های آبشناختی و اقلیمی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی جلگه بابل. *انجمن آبخیزداری ایران*. شماره ۵. ۷۴-۷۱.

- مکوندی، رقیه؛ مقصودلوکمالی، بیژن؛ محمدفام، ایرج؛ ۱۳۹۱. بهره‌مندی از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS در ارزیابی پیامدهای محیط زیستی پالایشگاه‌های نفت (مطالعه موردی: پالایشگاه نفت فوق سنگین خوزستان). *پژوهش‌های محیط زیست*. شماره ۵. ۸۶-۷۷.
- منتصری، مجید؛ امیرعطایی، بابک؛ ۱۳۹۴. پیش‌بینی استوکستیک احتمالات وقوع خشکسالی (مطالعه موردی: شمال غرب کشور). *نشریه مهندس عمران و محیط زیست*. شماره ۴۵. ۲۶-۱۲.
- منتصری، مجید؛ نورجو، امیر؛ بهمنش، جواد؛ اکبری، مهدی؛ ۱۳۹۷. بررسی ترسالی و خشکسالی هواشناسی در حوضه‌های جنوبی دریاچه ارومیه. *اکوهیدرولوژی*. شماره ۱. ۲۰۲-۱۸۹.
- میرزایی، فاطمه؛ عراقی‌نژاد، شهاب؛ بزرگ‌حداد، امید؛ ۱۳۹۴. توسعه مدل یکپارچه منابع آب WEAP برای مدل‌سازی شرایط خشکسالی. *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*. شماره ۱. ۹۷-۸۵.
- نظم‌فر، حسین؛ علی‌بخشی، آمنه؛ ۱۳۹۳. سنجش نابرابری فضایی در برخورداری از شاخص‌های آموزشی با استفاده از روش تاپسیس (مطالعه موردی: استان خوزستان). *دو فصل‌نامه مطالعات برنامه‌ریزی آموزشی*. شماره ۶. ۱۳۴-۱۱۵.
- یاراحمدی، داریوش؛ ۱۳۹۳. تحلیل هیدروکلیماتولوژیکی نوسان‌های سطح آب دریاچه ارومیه. *مجله پژوهشی جغرافیای طبیعی*. شماره ۴۶، ۹۲-۷۷.

- Gholamali, M., Younes, K., Esmail, H., Fatemeh, T., 2011. Assessment of Geostatistical Methods for Spatial Analysis of SPI and EDI Drought Indices. *World Applied Sciences Journal*, 15: 474-482.
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V., Xia, Y., 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., 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.
- Jinum, M.K., Jeonbin. K., 2017. Evaluatin historical drought characteristics simulated in Cordexast Asia against observations. *International journal of climatology*, 25: 32-43.
- Kisi, A., Rita, P., Judit. B., 2017. Multi- model analysis of regional dry and wet condition for the Carpatian Region. *International journal of climatology*, 17: 4543-4560.
- Liu, M., Xianli, X., sun, Y., lexander, A., kelin. W., 2017. Decreasing spatial variability of drought in south west china during 1959-2013. *International journal of climatology*, 21: 4610-4619.
- Modaresirad, A., Ghahramani, B., Khalili, D., Ghahramani, Z., 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.
- Quesada, B., Giuliano, M., Asarre, D., Rangecoft, S., 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.
- 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.
- Spinoni, j., Naumann, G., vogt, j., Barbosa. P., 2015. The biggest drought events in Europe from 1950-2012. *Journal of hydrology: Regional*, 3: 509-524.
- Touma, D., Ashfaq, M., Nayak, M., Kao, S.C., Diffenbaugh, N., 2015. A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century. *Journal of Hydrology*, 526: 196-207.
- Zelege, T., Giorgi, T., Diro, F., Zaitchik, B., 2017. Trend and periodicity of drought over Ethiopia. *International journal of climatology*, 65: 4733-4748.