

پایش خشکسالی هیدرولوژیک بر مبنای محاسبه صحیح شاخص استاندارد جریان در حوضه کرخه

سحر قلی زاده طهرانی^{۱*}، سعید سلطانی^۱، رضا مدرس^۱ و وحید چیت ساز^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۰)

چکیده

خشکسالی یکی از مخرب‌ترین و مهم‌ترین پدیده‌های اقلیمی است که تأثیر آن معمولاً در مقیاس منطقه‌ای از اهمیت بیشتری برخوردار است. اهمیت این پدیده در حوضه کرخه به دلیل وسعت و نقش مهم آن در تأمین منابع آب کشور بارزتر است. در این پژوهش هدف پایش خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از محاسبه صحیح شاخص استاندارد جریان (SSI) در مقیاس زمانی یک ماهه براساس برازش توزیع آماری به داده‌های ماهانه و آزمون نکویی برازش برای هر ایستگاه هیدرومتری در حوضه کرخه در دوره آماری مشترک ۳۰ سال (۱۳۶۵-۱۳۹۵) است. یافته‌های پژوهش بیانگر این است که برخلاف پژوهش‌های پیشین که فقط توزیع گاما را بر داده‌ها برازش داده و استفاده می‌کردند، توزیع پارتو تعمیم‌یافته در بیشتر ماه‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع انتخاب شده است. سری‌های زمانی شاخص استاندارد جریان نشان‌دهنده وقوع ابرخشکسالی در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ است. همچنین در برخی ایستگاه‌ها شاهد تأثیر چشمگیر احداث سازه‌های هیدرولیکی در بالادست حوضه بر دبی متوسط جریان بودیم. از طرفی نتایج پایش وضعیت خشکسالی به‌صورت ایستگاهی و سالانه نشان داد حوضه کرخه در سال‌های اخیر دچار خشکسالی هیدرولوژیک شده و روند خشکسالی رو به افزایش است.

واژه‌های کلیدی: توزیع‌های آماری، آزمون‌های نکویی برازش، سری‌های زمانی، احتمال وقوع ابرخشکسالی

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. کارشناس پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Sahartehrani827@gmail.com

مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی در کشور ما است که به علت شرایط جغرافیایی در همه نقاط کشور احتمال وقوع آن وجود دارد و ممکن است منجر به خسارات شود. تأثیر خشکسالی به صورت تدریجی بوده و در دوره زمانی به نسبت طولانی رخ می‌دهد. اگرچه به نظر بعضی از پژوهشگران پیش‌گیری و ممانعت از وقوع کمبود آب به طور کامل امکان‌پذیر نیست اما با برآزش توزیع احتمال مناسب بر داده‌ها می‌توان پیشامد متناظر با احتمال وقوع یا دوره بازگشت خاصی را معین کرد و با تدابیر مدیریتی و اجرایی برنامه‌هایی برای مقابله با تأثیرات خشکسالی و پیامدهای آن اندیشید.

خشکسالی حالتی نرمال و مستمر از اقلیم است که در تمام مناطق اقلیمی رخ می‌دهد و انواع مختلفی دارد شامل: هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی (۱۴). با توجه به اینکه تنها کاهش بارندگی نمی‌تواند نشان‌دهنده خشکسالی هیدرولوژیک در یک منطقه باشد، همچنین بخش کشاورزی تحت تأثیر خشکسالی هیدرولوژیک قرار می‌گیرد و خسارات جبران‌ناپذیری به این بخش وارد می‌شود، اهمیت مطالعه خشکسالی هیدرولوژیک نسبت به دیگر خشکسالی‌ها مشخص می‌شود. از دیدگاه هیدروژئولوژیست‌ها خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که سطح تراز ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی از حد معمول خود کمتر شود (۴).

شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک شامل: جریان کم (Low Flow) و شاخص خشکسالی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI) هستند. در این پژوهش شاخص استاندارد جریان (Standardized Streamflow Index) که استاندارد شده، بر اساس تحلیل فراوانی است، حالت سری زمانی دارد و می‌تواند تغییرات فصلی را به خوبی بیان کند، استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر محاسبه و بررسی شاخص استاندارد جریان به عنوان یکی از راه‌های پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۹). گفتنی است در مطالعات پیشین این شاخص با نام

SDI معرفی شده و شبیه به SPI صرفاً بر اساس یک تابع توزیع محاسبه شده است (۴، ۶ و ۷).

خطر خشکسالی جاری را می‌توان به روش‌های مختلف از جمله استفاده از شاخص‌های مختلف مشخص کرد. به طور سنتی، شاخص‌های مبتنی بر صدک، مانند (Q95)، توسط جامعه هیدرولوژیک استفاده می‌شود. به تازگی، استفاده از شاخص‌های ناهنجاری مانند شاخص استاندارد جریان (SSI)، رویکرد مبتنی بر شاخص احتمال که از جامعه آب و هوایی اتخاذ شده، محبوبیت خود را افزایش داده است. SSI را می‌توان به روش‌های مختلف پارامتریک و غیرپارامتریک محاسبه کرد. تاکنون، هیچ اجماعی وجود ندارد که از کدام روش استفاده شود (۱۲).

در پژوهشی در مورد شاخص استاندارد جریان در اسپانیا انجام شد، برای به دست آوردن این شاخص شش تابع توزیع و دو روش مختلف برای تعیین بهترین تابع توزیع تعیین شد. در این پژوهش از داده‌های دبی رودخانه ابرو استفاده شد و نتایج حاصل از آزمون Kolmogorov-Smirnov و نمودار L-moment نشان داد که هر ایستگاه از تابع توزیع متفاوتی پیروی می‌کند (۱۰).

در پژوهشی که در حوضه رودخانه لوهان چین انجام شد برای ایجاد شاخص خشکسالی و ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیک در ابتدا توزیع بهینه انتخاب شد و سپس جریان بهینه استاندارد شده (OSSSI) بر اساس توزیع بهینه و در آخر تغییر مکانی-زمانی محاسبه شد. نتایج نشان داد هرچقدر درجه خشکسالی کمتر باشد سطح پوشش آن گسترده‌تر است و کل حوضه مورد مطالعه دچار خشکسالی خفیف خواهد شد در حالی که خشکسالی‌های شدید فقط برای برخی مناطق وجود دارد (۱). در مطالعه‌ای دیگر، سه شاخص خشکسالی، یعنی شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص استاندارد جریان (SSI) و شاخص تبخیر و تعرق استاندارد بارندگی (SPEI)، با استفاده از (SVR)، (GEP) و (MT) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که SPI

مواد و روش ها

انتخاب منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز رودخانه کرخه است (شکل ۱). حوضه آبریز رودخانه کرخه با نام اختصاری کرخه بزرگ یکی از حوضه‌های باز ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران، حوضه فرعی به‌شمار می‌رود و زیرمجموعه حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان است. مساحت این حوضه، ۵۱۶۴۳ کیلومتر مربع و رود اصلی آن، کرخه است و شامل بیش از نیمی از استان‌های لرستان و کرمانشاه و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان است.

انتخاب ایستگاه‌ها و داده‌ها

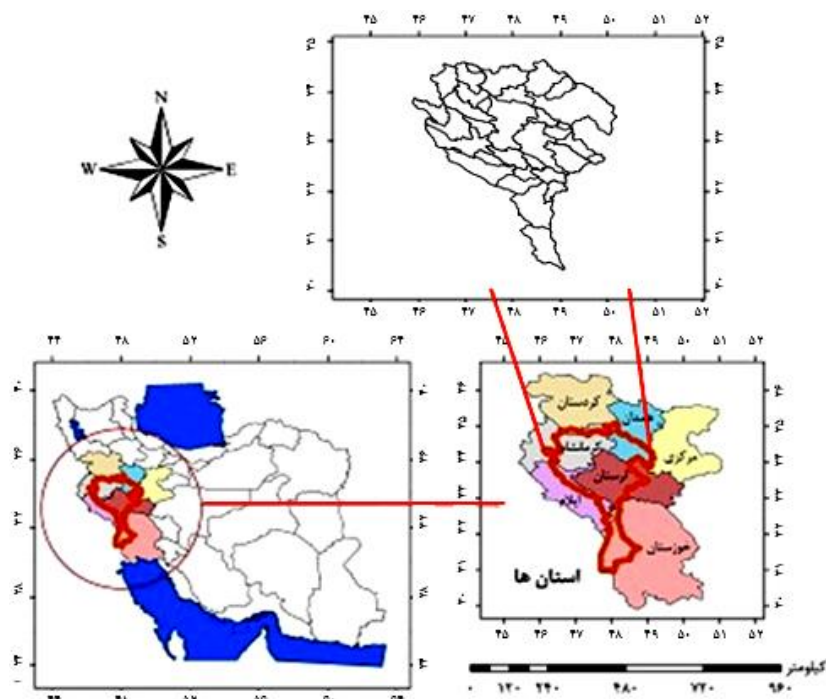
بعد از انتخاب منطقه مورد مطالعه، انتخاب ایستگاه‌های مناسب و گردآوری داده‌های مورد نیاز لازم است. برای دستیابی به نتایج مورد اعتماد و قابل قبول در راستای تجزیه و تحلیل درست در ابتدا می‌بایست ایستگاه‌های مناسب که دارای بیشترین سال آماری و کمترین نواقص آماری باشند انتخاب شوند زیرا هرچه دوره آماری ثبت شده برای ایستگاه‌ها بیشتر باشد دقت نتایج نیز بیشتر خواهد بود. باتوجه به این نکات در این پژوهش از داده‌های دبی متوسط ماهانه ۳۲ ایستگاه هیدرومتری در حوضه کرخه در دوره آماری ۳۰ ساله از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵ گرفته شده از سامانه وزارت نیرو استفاده شده است.

برای بازسازی کمبودهای آماری از روش همبستگی بین ایستگاه‌ها استفاده شده که بدین منظور ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SPSS ماتریس همبستگی در دوره آماری مشترک بین ایستگاه‌های با آمار کامل و ایستگاه‌های با آمار ناقص گرفته شد و مناسب‌ترین ایستگاه برای بازسازی آمار باتوجه به ضریب همبستگی زیاد و سطوح معنی‌دار ۱ درصد و یا ۵ درصد انتخاب و استفاده شد.

دقت بالاتری را ارائه می‌دهد. علاوه‌بر این، مدل MT در پیش‌بینی SSI بهتر عمل می‌کند (۱۱).

در حوضه کرخه مطالعه‌ای با هدف تحلیل فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از تحلیل آماری دو متغیره انجام شد که همانند پژوهش حاضر با استفاده از آزمون‌های نکویی برازش، گامبل به‌عنوان بهترین تابع کوپلا شناخته شد (۳). همچنین در مطالعه دیگری که در حوضه کرخه به بررسی تحلیل فراوانی منطقه‌ای خشکسالی به‌صورت چند متغیره با استفاده از شاخص‌های SSI، SEI و SRI پرداخت؛ خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیک را هم‌زمان مدنظر قرار گرفت و توزیع پیرسون نوع ۳، پارتو، نرمال و لجستیک عمومی برای سه شاخص خشکسالی نام‌برده شده مناسب تشخیص داده شدند (۸).

کم بودن میزان بارندگی، پراکنش نامناسب آن و خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته در سال‌های اخیر مشکلات زیادی را در زمینه آب برای بسیاری از نقاط کشور ایجاد کرده است. از جمله نقاطی که تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته حوضه کرخه است (۱۳) که باتوجه به قرارگیری این حوضه در چندین استان، نقش عمده آن در تأمین آب بخش وسیعی از کشور و همچنین وابستگی معیشتی ساکنان حوضه (مصارف کشاورزی)، خشکسالی‌های اتفاق افتاده می‌تواند باعث چالش‌های اقتصادی و اجتماعی شود. از این‌رو مطالعه و پایش خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته به‌خصوص خشکسالی هیدرولوژیک که یکی از انواع خشکسالی‌ها است و امروزه در بخش‌های زیادی از جهان به‌صورت مسئله پیچیده‌ای درآمده، در این حوضه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش با استفاده از روش صحیح محاسبه شاخص استاندارد جریان به پایش خشکسالی هیدرولوژیک در حوضه کرخه می‌پردازیم، وضعیت خشکسالی و روند آن را بررسی می‌کنیم.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حداقل مجموع مربعات باقی مانده (Residual sum of squares) می‌گیرد نسبت به توزیع‌های دیگر کمتر باشد، انتخاب می‌شود. گرچه در اغلب مطالعات تنها از یک آزمون برای نکویی برازش استفاده می‌شود، در اینجا به منظور دقت بیشتر و انتخاب بهترین تابع برای دبی ماهانه، نتایج هر سه آزمون (Kolomogorov Smirnov, Anderson Darling, Chi-Squared) در نظر گرفته شد و با توجه به مجموع رتبه‌هایی که در هر آزمون نکویی برازش برای هر توزیع محاسبه شده نسبت به انتخاب بهترین تابع توزیع در نظر گرفته شد. عنوان مثال در ایستگاه ۲۱۱۰۹ مجموع رتبه در ماه فروردین در دوره آماری ۳۰ سال برابر ۶ شده است یعنی از نظر آزمون Darling Anderson توزیع GPA دارای رتبه ۲، از نظر آزمون Chi-Squared دارای رتبه ۱ و از نظر آزمون Kolomogorov Smirnov دارای رتبه ۳ شده که مجموع آنها ۶ و نسبت به سایر توزیع‌های مدنظر مجموع رتبه کمتری داشته است در نتیجه به عنوان بهترین توزیع برای این ماه انتخاب شده است. سپس مقادیر دبی به احتمال تجمعی (C.D.F) آن تبدیل شد.

محاسبه شاخص استاندارد جریان (SSI)

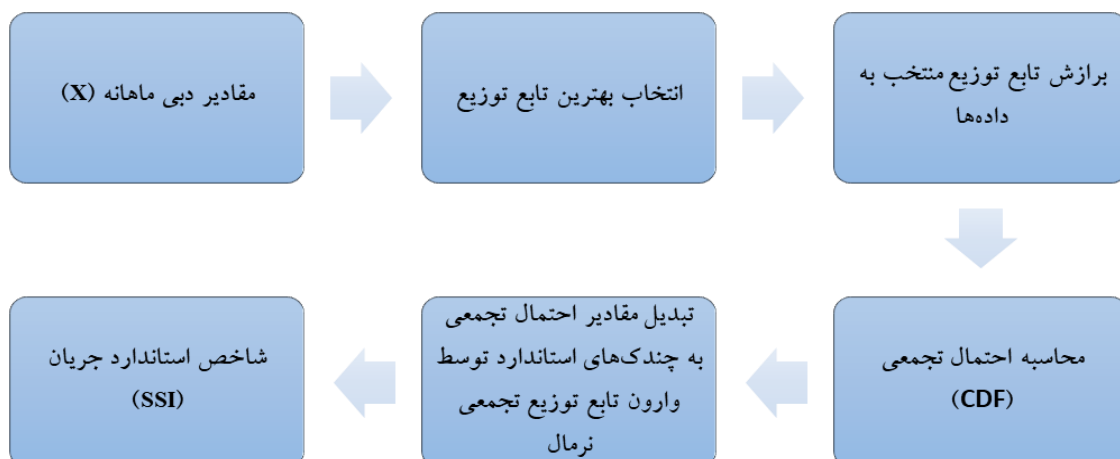
شاخص استاندارد جریان شاخصی برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیک است. شاخص استاندارد جریان را می‌توان بر اساس روش‌های مختلف پارامتریک و غیرپارامتریک محاسبه کرد. روش محاسبه این شاخص همانند روش محاسبه شاخص بارش استاندارد (SPI) و دیگر شاخص‌های استاندارد احتمال محور است با این تفاوت که به جای اینکه بارش متغیر ورودی قرار گیرد از دبی متوسط ماهانه استفاده می‌شود. این شاخص در مقیاس ماهانه بررسی می‌شود و محاسبه آن در مقیاس‌های ۳ ماهه، ۶ ماهه و بالاتر در تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک رایج نیست. از طرفی برخلاف پژوهش‌های پیشین که از توزیع گاما استفاده می‌شد در این پژوهش از روش اصلاح شده پیشنهادی استفاده شد (۱۰). در این روش توابع توزیع پرکاربرد در هیدرولوژی (جدول ۱) بر داده‌ها برازش داده می‌شوند و بهترین آنها، بر این اساس که مجموع رتبه‌ای که آن توزیع از هر سه آزمون نکویی برازش کلموگروف اسمیرونوف (Kolomogrov-Smirnov)، کای اسکوتر (Chi square)، روش

جدول ۱. توزیع‌های آماری پر کاربرد در هیدرولوژی و پارامترهای مرتبط

توزیع	F(x)
پارتو تعمیم یافته	$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{k}{a}(x - \varepsilon) \right]^{1/k}$
لوگ لجستیک	$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{-1} \right]$
لوگ نرمال	$F(x) = \Phi \left(\frac{\ln(x - \alpha) - \mu}{\sigma} \right)$
پیرسون نوع ۳	$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_{\gamma}^x \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)}$
مقادیر حدی تعمیم یافته	$F(x) = e^{-\left[1 - k \left(\frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right]^{1/k}}$
ویبول	$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x - m}{\alpha} \right)^b}$

جدول ۱. طبقه‌بندی خشکسالی هیدرولوژیک بر اساس شاخص استاندارد جریان

شاخص استاندارد جریان	وضعیت
$1/46 \leq$	ترسالی شدید
$1/46 - 0/52$	ترسالی ملایم
$0/52 - (-0/52)$	نرمال
$(-0/52) - (-1/46)$	خشکسالی ملایم
$(-1/46) \geq$	خشکسالی شدید



شکل ۲ روش اصلاح شده پیشنهادی محاسبه شاخص استاندارد جریان

(دهنو- هرود) از سال ۱۳۸۹ به بعد تحت تأثیر سد ایشوان بوده و یا ایستگاه ۲۱۱۹۱ (پای پل) از سال ۱۳۷۷ به بعد تحت تأثیر سد کرخه بوده است (۲) و این کاهش دبی در شکل چشمگیر است.

سپس بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک براساس طبقه‌بندی شاخص SSI انجام گرفت. باتوجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که مشاهدات حاکی از وجود وضعیت نرمال در منطقه با ۳۸ درصد، پس از آن خشکسالی ملایم با ۲۶ درصد و ترسالی ملایم با ۲۳ درصد است. ترسالی شدید با ۸ درصد و خشکسالی شدید با ۵ درصد سهم کمتری را به خود اختصاص داده‌اند اما نکته قابل توجه این است که در چند سال اخیر بیشتر مشاهدات در تمام ایستگاه‌ها وضعیت خشکسالی را نشان می‌دهد به خصوص از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ بیشترین سهم مربوط به خشکسالی ملایم بوده است که حاکی از آن است در این سال‌ها حوضه کرخه نیز با پدیده خشکسالی هیدرولوژیک مواجه بوده و باید به طور جد و صحیح برای جلوگیری از این روند و خسارات بیشتر این پدیده مدیریت شود.

همچنین باتوجه به شکل ۶ می‌توان برداشت کرد شدیدترین ترسالی‌ها در ایستگاه آفرینه- چولهول (۲۱۱۷۹) با ۳۷ بار وقوع و کمترین آن در ایستگاه‌های هلیلان- سیمره (۲۱۱۴۷) و دارتوت (۲۱۱۵۷) با ۲۲ بار وقوع اتفاق افتاده است. بیشترین وضعیت ترسالی ملایم در ایستگاه هلیلان- سیمره (۲۱۱۴۷) با ۱۰۰ بار وقوع و کمترین آن در ایستگاه پل علی‌آباد- گزندر (۲۱۳۷۷) با ۷۱ بار وقوع اتفاق افتاده است. بیشترین وضعیت نرمال در ایستگاه پل علی‌آباد- گزندر (۲۱۳۷۷) با ۱۷۰ بار وقوع و کمترین آن در ایستگاه‌های بیار (۲۱۱۳۷) و سراب صیدعلی (۲۱۱۷۱) با ۱۳۰ بار وقوع اتفاق افتاده است. بیشترین وضعیت خشکسالی شدید در ایستگاه پل علی‌آباد- گزندر (۲۱۳۷۷) با ۲۹ بار وقوع و کمترین آن در ایستگاه دوآب‌مرک (۲۱۱۳۳) با ۸ بار وقوع اتفاق افتاده و در ایستگاه‌های کارخانه (۲۱۱۰۹) و خرس‌آباد (۲۱۱۳۱) این وضعیت دیده نشد. بیشترین وضعیت

در نهایت مقادیر احتمال تجمع در وارون تابع توزیع تجمعی نرمال قرار می‌گیرد و مقادیر چندک‌های استاندارد محاسبه خواهد شد که همان مقادیر شاخص استاندارد جریان هستند (مشابه شکل ۲).

در ادامه طبق طبقه‌بندی شاخص استاندارد جریان (جدول ۱) وضعیت خشکسالی‌ها مشخص شد (۵) و برای پایش بهتر وضعیت خشکسالی در منطقه با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۵- سری‌های زمانی ایستگاه‌ها ترسیم شدند.

نتایج

محاسبه شاخص SSI

باتوجه به نتایج به دست آمده از برازش توزیع‌های آماری، در اکثر ماه‌ها توزیع پارتو تعمیم‌یافته به عنوان توزیع مناسب انتخاب شده است و تابع توزیع نمایی کمترین استفاده را داشته است. در جدول ۳ نتایج انتخاب مناسب‌ترین توزیع آماری به روش آزمون‌های نکویی برازش آورده شده و شکل ۳ به خوبی میزان استفاده از هر تابع آماری را نمایش می‌دهد.

در ادامه نمودارهای سری زمانی شاخص SSI با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۵- ترسیم شدند (شکل ۴). تمام آنها نشان‌دهنده وقوع ابر خشکسالی از سال ۱۳۸۴ تا سال ۱۳۹۳ در منطقه مورد مطالعه هستند که می‌تواند حاکی از تغییر اقلیم و دخالت‌های انسانی همچون تغییر کاربری اراضی، برداشت بی‌رویه آب و احداث سدها باشد. همان‌طور که مشخص است هرچقدر مقادیر بیشتر از حد آستانه باشد شاهد ترسالی و هرچقدر کمتر از حد آستانه باشد شاهد خشکسالی هستیم و این موضوع در نمودارها با رنگ‌های استفاده شده به خوبی مورد پایش قرار گرفته است. ترسالی‌ها با طیف رنگ آبی و خشکسالی‌ها با طیف رنگ نارنجی نمایش داده شده‌اند. در یک سری از موارد شاهد پرش شدیدی در نمودارها هستیم که می‌تواند حاکی از کاهش شدید دبی متوسط ماهانه در آن سال به دلایلی چون احداث سازه‌های هیدرولیکی باشند. به عنوان مثال ایستگاه ۲۱۱۶۷

جدول ۳. نتایج آزمون‌های نکویی برآزش (توزیع مناسب منتخب هر ماه) (ادامه)

ماه	ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
رازآور	۲۱۱۳۹	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	گاما	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	وینبول	مقادیر حدی تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	پیرسون نوع ۳	پارتو تعمیم یافته
پل کهنه	۲۱۱۴۱	پارتو تعمیم یافته	وینبول	پیرسون نوع ۳	وینبول	مقادیر حدی تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	پیرسون نوع ۳	پارتو تعمیم یافته
قورباغستان	۲۱۱۴۳	پارتو تعمیم یافته	وینبول	پیرسون نوع ۳	نرمال تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	وینبول	وینبول	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	وینبول	پیرسون نوع ۳
نورآباد - یادآور	۲۱۱۴۵	پارتو تعمیم یافته	گاما	مقادیر حدی تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	پیرسون نوع ۳	وینبول
هلیلان - سیمره	۲۱۱۴۷	وینبول	وینبول	پارتو تعمیم یافته	وینبول	وینبول	وینبول	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	پیرسون نوع ۳	پارتو تعمیم یافته
دارنونا	۲۱۱۵۷	پارتو تعمیم یافته	نمایی	مقادیر حدی تعمیم یافته	وینبول	پارتو تعمیم یافته	وینبول	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	وینبول	وینبول	پارتو تعمیم یافته

جدول ۳. نتایج آزمون‌های نکویی برازش (توزیع مناسب منتخب هر ماه) (ادامه)

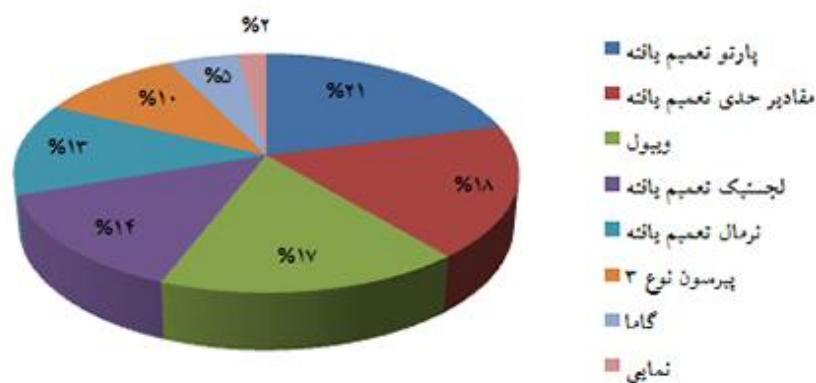
ماه	ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
تنگ سازین	۲۱۱۵۹	ویبول	پارتو تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویبول	پارتو تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	گاما	پیرسون نوع ۳	نرمال تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویبول
ورگچ - شیروان	۲۱۱۶۳	لجستیک تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	گاما	ویبول	ویبول	ویبول	نرمال تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویبول
تنگ سیاب	۲۱۱۶۷	ویبول	نرمال تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	ویبول	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته
دهنو - هرود	۲۱۱۶۹	ویبول	گاما	نرمال تعمیم یافته	گاما	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	نمای	نرمال تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته
کاکا رضا	۲۱۱۷۱	پیرسون نوع ۳	ویبول	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویبول	ویبول	ویبول	ویبول	ویبول	لجستیک تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویبول
سراب صیدعلی	۲۱۱۷۳	ویبول	پیرسون نوع ۳	ویبول	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	گاما	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته

جدول ۳. نتایج آزمون‌های نکویی برآزش (توزیع مناسب منتخب هر ماه) (ادامه)

ماه ایستگاه	دوآب و سیان - کشکان ۲۱۱۷۵	چم انجیر ۲۱۱۷۷	آفرینه - کشکان ۲۱۱۷۹	برآفتاب ۲۱۱۸۱	پل دختر - کشکان ۲۱۱۸۳	جلوگیر - مازین ۲۱۱۸۵
فروردین	پارتو تعمیم یافته	ویپول	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته
اردیبهشت	نرمال تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	گاما	پارتو تعمیم یافته
خرداد	نرمال تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	نمایی	گاما	پارتو تعمیم یافته	ویپول
تیر	لجستیک تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	گاما	پارتو تعمیم یافته
مرداد	ویپول	پارتو تعمیم یافته	نمایی	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته
شهریور	لجستیک تعمیم یافته	ویپول	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته
مهر	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویپول	مقادیر حدی تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	پیرسون نوع ۳	مقادیر حدی تعمیم یافته
آبان	نرمال تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	ویپول	مقادیر حدی تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته
آذر	نرمال تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته
دی	مقادیر حدی تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	پیرسون نوع ۳	مقادیر حدی تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته
بهمن	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	لجستیک تعمیم یافته
اسفند	پارتو تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	مقادیر حدی تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	نرمال تعمیم یافته	پارتو تعمیم یافته

جدول ۳. نتایج آزمون‌های نکویی برآزش (توزیع مناسب منتخب هر ماه) (ادامه)

اسفند	نرمال تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	ویبول	ویبول	نرمال تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	اسفند
بهمن	مقادیر حدی تعمیر یافته	پیرسون نوع ۳	مقادیر حدی تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	گاما	پیرسون نوع ۳	گاما	بهمن
دی	گاما	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	دی
آذر	پارتو تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	پیرسون نوع ۳	گاما	پیرسون نوع ۳	آذر
آبان	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	گاما	نرمال تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	آبان
مهر	نرمال تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	مهر
شهریور	ویبول	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	ویبول	پارتو تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	پیرسون نوع ۳	پیرسون نوع ۳	شهریور
مرداد	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	پیرسون نوع ۳	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	ویبول	مرداد
تیر	مقادیر حدی تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	تیر
خرداد	نرمال تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	ویبول	لجستیک تعمیر یافته	مقادیر حدی تعمیر یافته	پارتو تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	نرمال تعمیر یافته	خرداد
اردیبهشت	نرمال تعمیر یافته	گاما	نرمال تعمیر یافته	پیرسون نوع ۳	ویبول	پارتو تعمیر یافته	پیرسون نوع ۳	ویبول	اردیبهشت
فروردین	ویبول	گاما	پیرسون نوع ۳	نرمال تعمیر یافته	ویبول	پیرسون نوع ۳	نرمال تعمیر یافته	لجستیک تعمیر یافته	فروردین
ماه ایستگاه	پل زال ۲۱۱۸۹	پای پل ۲۱۱۹۱	عبدالحان ۲۱۱۹۳	پل علی آباد- گزندر ۲۱۳۷۷	نظر آباد- سیمره ۲۱۳۸۹	حیدرآباد ۲۱۴۱۱	دره تنگ- کهمان ۲۱۹۵۴		



شکل ۳. میزان استفاده از توابع توزیع آماری به‌عنوان توزیع مناسب ماهانه (درصد)

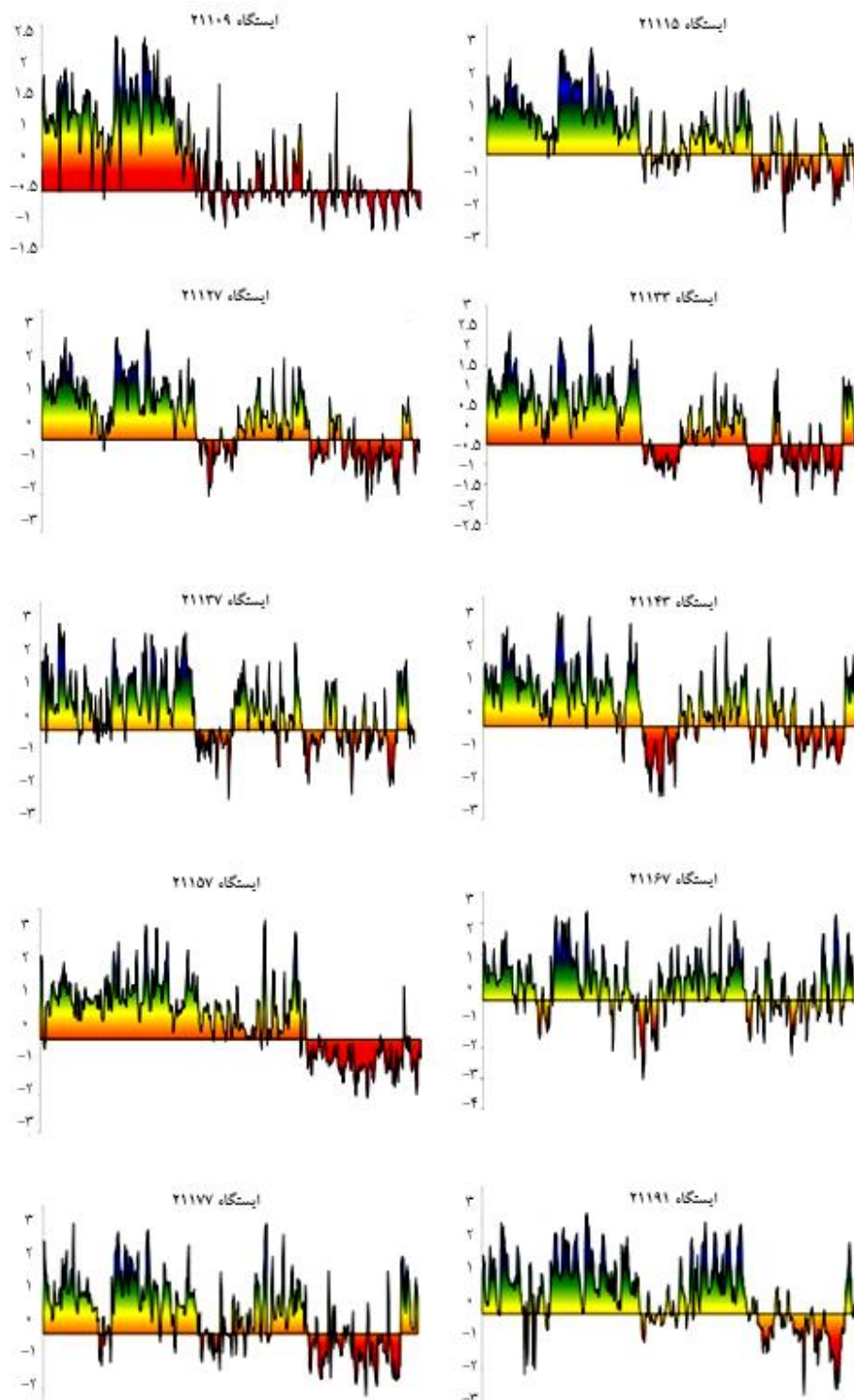
SSI در برخی ایستگاه‌ها شاهد کاهش چشمگیر دبی متوسط ماهانه بودیم که می‌تواند به احداث سازه‌های هیدرولیکی در بالادست ایستگاه‌ها مرتبط باشد (۲). پس از پایش وضعیت خشکسالی‌ها بر اساس شاخص استاندارد جریان به این نتیجه رسیدیم که به‌طور تقریبی در سراسر منطقه مورد مطالعه وضعیت به حالت نرمال بوده است. پس از آن حالت‌های ملایم چه در رابطه با خشکسالی‌ها و چه در رابطه با ترسالی‌ها بوده و حالت‌های حدی یعنی خشکسالی شدید و ترسالی شدید سهم کمتری را از لحاظ وقوع به خود اختصاص داده‌اند. اما نکته دارای اهمیت این است که چه در بررسی ایستگاهی و چه در بررسی سالانه به وضوح شاهد وضعیت خشکسالی در منطقه کرخه هستیم به‌خصوص در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ که دوره ابرخشکسالی را در منطقه داریم که این نتیجه در مطالعات دیگر نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۲ و ۳). در بررسی روند وضعیت خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها همان‌طور که در شکل ۸ نمایان است خشکسالی‌ها روندی رو به افزایش داشته است به‌خصوص خشکسالی شدید و اما ترسالی‌ها روندی کاهشی داشته‌اند. بنابراین می‌بایست اقداماتی جدی در این باره انجام گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در تمام کشور پدیده خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص استاندارد جریان به روش استفاده شده در این پژوهش مورد پایش قرار گیرد.

خشکسالی ملایم در ایستگاه‌های کارخانه (۲۱۱۰۹)، خرس‌آباد (۲۱۱۳۱) و حجت‌آباد (۲۱۱۳۹) با ۱۱۲ بار وقوع و کمترین آن در ایستگاه پل علی‌آباد-گزندر (۲۱۳۷۷) با ۶۶ بار وقوع اتفاق افتاده است.

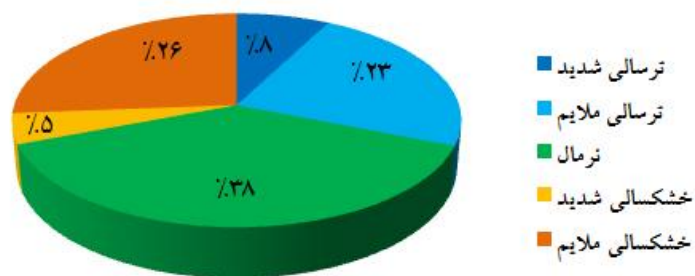
در شکل ۷ سهم هر کدام از وضعیت‌های موجود در دوره آماری ۳۰ ساله نمایش داده شده که در تأیید موارد گفته شده دیده می‌شود به ترتیب بیشترین سهم مربوط به وضعیت نرمال، خشکسالی ملایم، ترسالی ملایم و در آخر ترسالی شدید و خشکسالی شدید کمترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند اما بازهم تأکید می‌شود که در سال‌های اخیر بیشترین وضعیت دیده شده وضعیت خشکسالی ملایم است. در شکل ۸ بررسی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیک به‌صورت سالانه انجام گرفته است که نشان می‌دهد در سال‌های اخیر وضعیت خشکسالی به‌خصوص خشکسالی ملایم بسیار زیاد شده و ترسالی‌ها به شدت کاهش داشته است.

نتیجه‌گیری و بحث

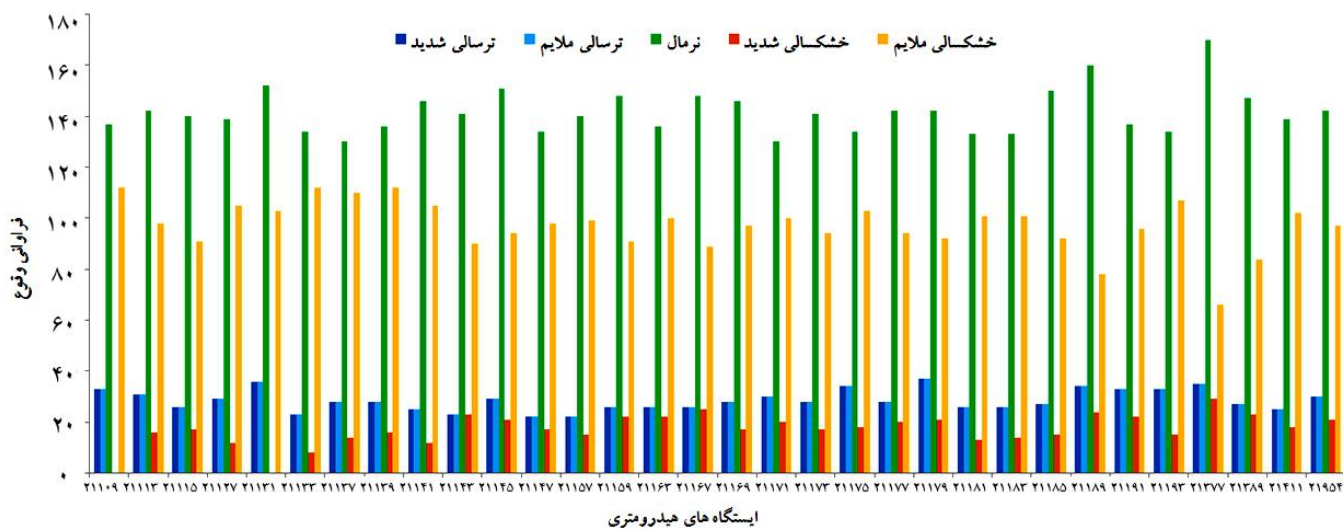
به‌طور کلی پژوهش حاضر نشان داد که برخلاف پژوهش‌های پیشین توزیع گاما را نمی‌توان همیشه به‌عنوان بهترین توزیع انتخاب کرد و توزیع پارتو تعمیم‌یافته بیشترین کاربرد را در این پژوهش داشت. از طرفی باتوجه به سری‌های زمانی شاخص



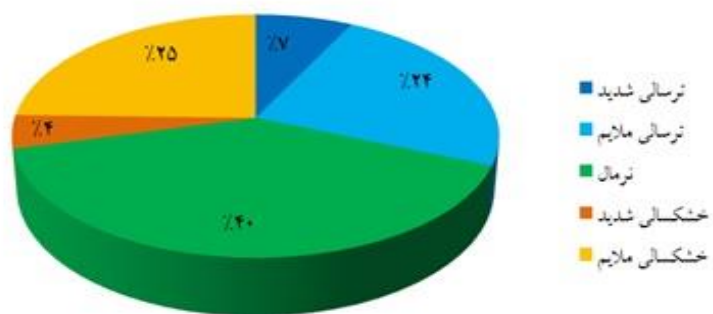
شکل ۴. سری‌های زمانی شاخص SSI در تعدادی از ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه (محور عمودی شاخص SSI و محور افقی زمان)



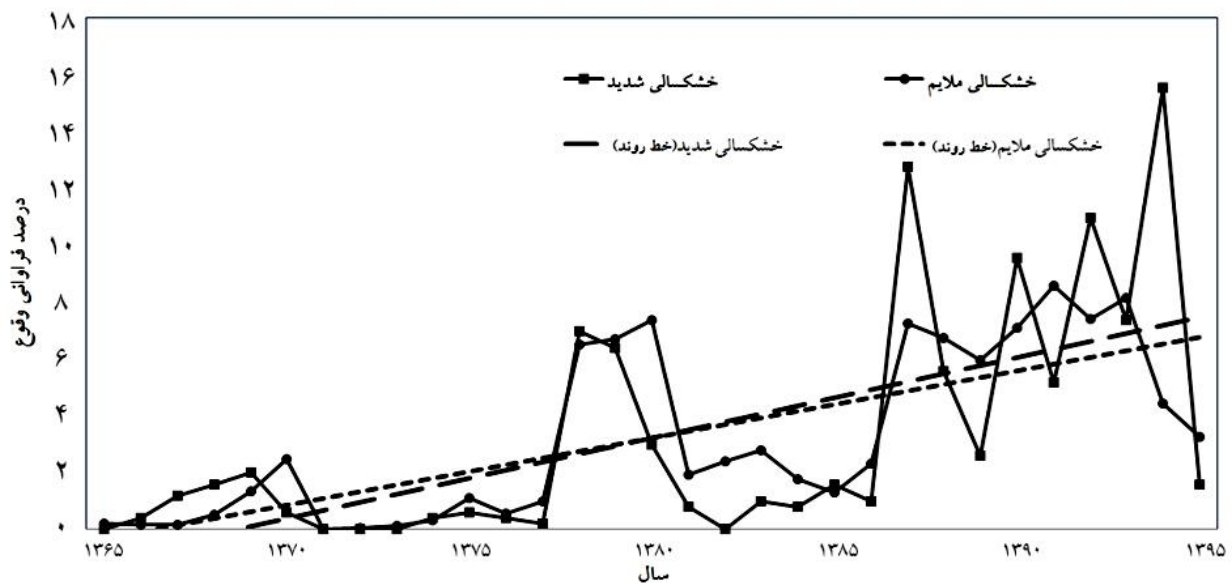
شکل ۵. درصد فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک در ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه



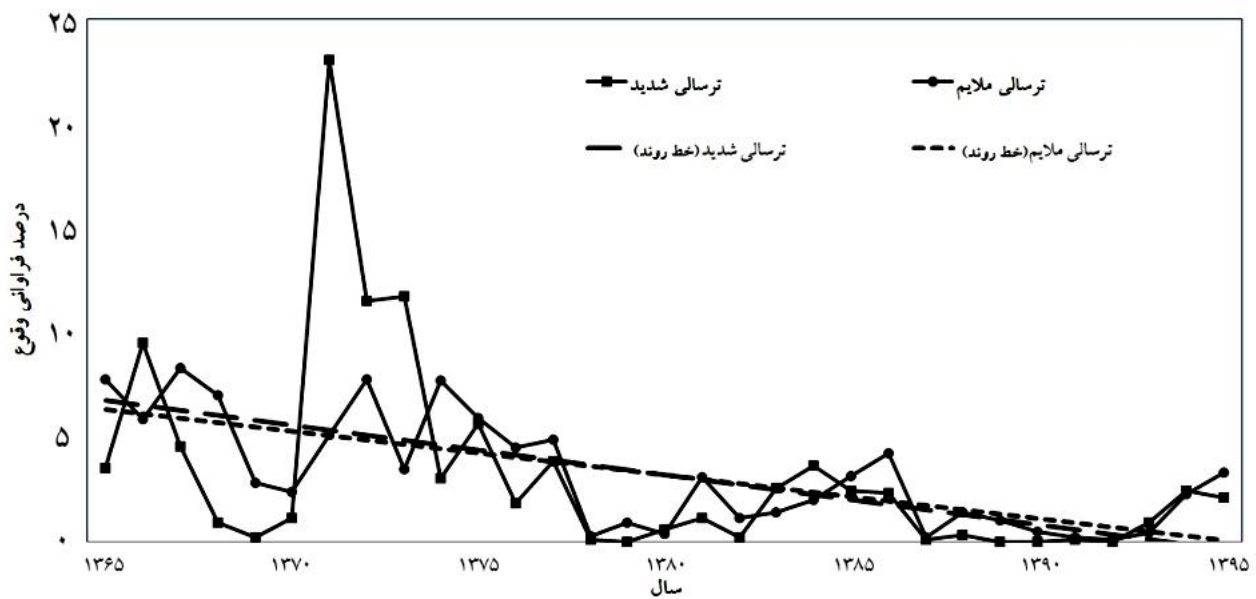
شکل ۶. فراوانی وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در ایستگاه‌ها بر اساس شاخص استاندارد جریان



شکل ۷. درصد فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک در دوره آماری مدنظر



(الف)



(ب)

شکل ۸. درصد فراوانی وقوع خشکسالی‌ها (الف) و ترسالی‌ها (ب) در سال‌ها بر اساس شاخص استاندارد جریان

منابع مورد استفاده

1. Chen, Xu., F. W. Li and P. Feng. 2018. Spatiotemporal variation of hydrological drought based on the Optimal Standardized Streamflow Index in Luanhe River basin, China. *Natural Hazards* 91: 155–178.
2. Chitsaz, V. and P. Mohit Isfahani. 2022. Regional flood frequency analysis in west of Iran. *Iran-Water Resources Research* 18(1): 84-103 (In Farsi).
3. Farsadnia, F., B. Ghahreman, R. Modarres and A. Moghaddam Nia. 2017. Hydrologic drought frequency analysis in Karkhe basin based on bivariate statistical analysis. *Journal of Water and Soil Science* 22(3): 339-355 (in Farsi).

4. Ghasemi, M. 2007. Determining meteorological and hydrological drought indicators in Karkheh watershed. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran (in Farsi).
5. Lorenzo-Lacruz, J., E. Moran-Tejeda, S. M. Vicente-Serrano and J. I. Lopez-Moreno. 2013. Streamflow drought in the Iberian peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 119-134.
6. Nalbantis, I. 2008. Evaluation of a hydrological drought index. *European Water* 23: 67-77.
7. Nalbantis, I. and G. Tsakiris. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management* 23: 881-897.
8. Parvisi, S., S. Eslamian, M. Gheysari, A. R. Gohari, S. Soltani Koupai and P. Mohit Isfahani. 2021. Regional frequency analysis of drought severity of SEI-SRI and SEI-SSI indices in common duration using multivariate L-moments and copula functions (case study: Karkheh river basin). *Journal of Water and Soil Science* 26(3): 159-175 (In Farsi).
9. Salahshour, M. 2013. Regional frequency analysis of hydrological drought using streamflow drought index, Northern Karoon Watershed. Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran (In Farsi).
10. Sergio, M. 2012. Accurate computation of streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering* 17: 318-332.
11. Shamshirband, Sh., S. Hashemi, H. Salimi, S. Samadianfard, E. Asadi, S. Shadkani, K. Kargar, A. Mosavi, N. Nabipour and K. W. Chau. 2020. Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 14: 339-350.
12. Tjeldeman, E., K. Stahl and M. Tallaksen. 2020. Drought characteristics derived based on the standardized streamflow index: a large sample comparison for parametric and nonparametric methods. *Water Resources Research* 56: 1-25.
13. Vafakhah, M. and M. Mahdavi. Presenting a mathematical model to estimate hydrological drought in the central arid regions. In: Proceeding of 1999 Two Regional Conference on Climate Change. Tehran. Iran. 1999. 32-40 (In Farsi).
14. Wilhite, D. A. and M. H. Glantz. 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International* 10: 111-120.

Hydrological Drought Monitoring Based on the Correct Calculation of Standardized Flow Index in the Karkheh Basin

S. Gholizadeh Tehrani^{1*}, S. Soltani Koupai¹, R. Modarres¹ and V. Chitsaz²

(Received: May 24-2023 ; Accepted: July 11-2023)

Abstract

Drought is one of the most destructive and important climate phenomena, whose effect is usually more important on a regional scale. The importance of this phenomenon is more evident in the Karkheh basin due to its size and important role in providing the country's water resources. We aim to monitor hydrologic drought using the accurate calculation of standardized streamflow index (SSI) in one month time scale based on fitting frequency distribution to monthly data and goodness of fit test for each station in Karkheh basin for 30 years (1986-2016). The findings of this research showed that the generalized Pareto distribution was selected as the most appropriate distribution in most months, unlike the previous research that fitted and used only the Gama distribution on the data. The time series of the standard flow index indicated the occurrence of super-drought in 2008 to 2015 years. Also, the significant impact of the construction of hydraulic structures upstream of the basin on the average flow rate was observed in some stations. The results of direct and annual monitoring of the drought situation showed that the Karkheh basin has experienced hydrological drought in recent years, and the drought trend is increasing.

Keywords: Statistical distributions, Goodness of fit tests, Time series, Occurrence probability, Super-drought

1. Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: Sahartehrani827@gmail.com