

بررسی ارتباط بین توزیع مکانی و زمانی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک (مطالعه موردی: دشت جیرفت)

زهرا سنجری^۱، مهدی حیات‌زاده^{۲*}، فرزانه فتوحی فیروزآباد^۳، علی فتح‌زاده^۴، فاطمه روستایی صدرآباد^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳

چکیده

برای مقابله مؤثر با خشکسالی، شناسایی عوامل اقلیمی غالب که منجر به رویدادهای خشکسالی می‌شود، بسیار بااهمیت است. تحقیق حاضر با هدف بررسی توزیع مکانی و زمانی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیک (SDI) انجام گرفت. بدین منظور از اطلاعات بارش ۱۰ ایستگاه سینوپتیک و کلیماتولوژی در دوره آماری مشترک (۱۳۷۵-۱۳۹۹) و ۷ ایستگاه هیدرومتری در دوره آماری (۱۳۷۲-۱۳۹۵) استفاده شد. برای بررسی توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی از روش‌های زمین‌آماري و برای بررسی توزیع زمانی و تعیین روند تغییرات از آزمون من-کندال استفاده شد. برای بررسی ارتباط بین شاخص‌های SPI و SDI از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج حاصل از شاخص SPI نشان داد که در دوره کوتاه‌مدت و بلندمدت در برخی از سال‌ها (۸ سال ناپیوسته) خشکسالی خیلی شدید اتفاق افتاده است که براساس طبقه‌بندی شاخص SPI مقدار بارش در این سال‌ها خیلی کمتر از نرمال بوده است. درمقابل، نتایج شاخص SDI برای ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد که در دهه ۱۳۸۰ و به‌ویژه ماه‌های مرداد، آذر و اسفند جریانی کمتر از نرمال داشته و شرایط خشکی حاکم بوده است. نتایج حاصل از ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که بیشترین همبستگی بین شاخص‌های SPI و SDI در مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه وجود دارد. در همه ایستگاه‌ها ارتباط معنی‌داری بین شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک وجود ندارد. یکی از دلایل این اختلاف می‌تواند حاصل منشأ گرفتن جریان زیرسطحی در بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری که باعث ایجاد جریانی پایه شده است باشد. نتایج روند تغییرات شاخص‌های SPI و SDI نشان داد که ایستگاه‌های موجود در دو سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ دارای اختلاف معناداری با یکدیگرند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات جریان رودخانه پس از یک تأخیر زمانی از شرایط بارش در منطقه تأثیر می‌پذیرد.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی، IDW، خشکسالی، من-کندال.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، zahrasalemi313@gmail.com

۲. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، f.fotouhi@ardakan.ac.ir

۴. دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، Fat@ardakan.ac.ir

۵. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، froustaei@ardakan.ac.ir

مقدمه

کاهش بارش و دخالت نادرست انسان‌ها در اجرای برنامه‌های توسعه‌ای باعث تشدید خشکسالی‌های طولانی‌مدت شده است و آب‌های سطحی نیز کاهش یافته و در فعالیت‌های کشاورزی و دام‌پروری اختلال ایجاد کرده است (شاه‌رخ‌سار و همکاران، ۲۰۱۹). این پدیده یک فرایند طبیعی پیچیده است که به دلیل کاهش ریزش‌های جوی برای چندین ماه یا سال اتفاق می‌افتد، اگرچه خشکسالی بر اثر کمبود بارندگی‌هاست، دما و باد نیز در وقوع این رخداد دخالت دارند (جهانزیب و همکاران، ۲۰۲۰). اکثر مناطق جهان به دلیل گرمای جهانی و فعالیت‌های نادرست بشر، شاهد تغییرات شدید آب‌وهوا هستند (وو^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی، جدی‌ترین معضل فیزیکی برای کشاورزی، خشکسالی می‌باشد و آزاد شدن گازهای گلخانه‌ای بر اثر سوخت‌های فسیلی و چوب جنگل‌ها، باعث افزایش گرمایش جهانی در جو شده است که این روند از اواسط دهه ۱۹۷۰ در حال افزایش است (صفراد و همکاران، ۲۰۱۵). خشکسالی به عنوان یک ناهنجار اقلیمی است که در همه اقلیم‌ها اتفاق می‌افتد و بیشتر نواحی جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (مالیک^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم IPCC^۳ در عرض‌های میانی از جمله ایران شاهد چشمگیر افزایش خشکسالی هستیم (فولر و اکستروم^۴، ۲۰۰۹). مناطق آسیایی دچار آسیب‌های جبران‌ناپذیری خواهند بود و تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۱۰۰ میلیون نفر در معرض شدید کاهش آب قرار خواهند گرفت و باعث افت ذخایر زیرزمینی نیز می‌گردد (سوونک^۵ و همکاران، ۲۰۱۴). از طرفی، بیش از دوسوم مناطق ایران را نواحی خشک و نیمه‌خشک در بر می‌گیرد. یکی از دلایل خشکی ایران را می‌توان در وجود رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس جست‌وجو نمود که مانع از ورود ابرهای باران‌زا به قسمت‌های مرکزی و شرقی ایران شده‌اند، و به علت نوسانات بیشتر در مقدار بارش، قسمت‌های مرکزی و جنوب کشور

دارای آسیب‌های محیطی بیشتری است. خشکسالی در هر اقلیمی اتفاق می‌افتد اما مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به این پدیده شکننده‌تر و حساس‌ترند. دشت جیرفت نیز از این قاعده مستثنی نیست و در آب و هوای خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. در این منطقه بر اثر خشکسالی آب مخازن سدها کاهش یافته و آب چشمه‌ها کم شده و اثر نامطلوبی بر آب‌های سطحی و نیز زیرزمینی گذاشته است. دشت جیرفت از قطب‌های مهم کشاورزی در جنوب کرمان است که خشکسالی خسارات زیادی را به این منطقه وارد کرده است. با توجه به گستره و تنوع خشکسالی‌ها آگاهی از ارتباط زمانی و مکانی آن‌ها برای اقدامات مدیریتی برای کاهش خسارت‌های احتمالی حائز اهمیت است. اولین مرحله خشکسالی، نوع هواشناسی آن است که در صورت تداوم از نظر زمانی در یک مکان خاص منجر به خشکسالی‌های هیدرولوژیک و در نهایت آسیب‌های اقتصادی و اجتماعی می‌گردد. لذا با توجه به اهمیت موضوع تحقیق‌های گسترده‌ای در این زمینه در ایران و جهان صورت گرفته است. شاکر سوره و اسدی (۲۰۱۹) در دشت سلماس، ارتباط بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی بر نوسانات سطح آب‌زیرزمینی را بررسی نمودند؛ آن‌ها نتیجه گرفتند که بین خشکسالی هواشناسی با خشکسالی آب زیرزمینی رابطه معنی‌داری با تأخیر فاز زمانی یک‌ماهه GRI و خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی آب‌زیرزمینی با تأخیر شش‌ماهه GRI وجود دارد. امیری و پورقاسمی (۲۰۱۹) در استان فارس ارتباط بین خشکسالی‌های آب‌شناسی حوزه آبخیز مهارلو را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که خشکسالی هیدرولوژیک دارای روند معنی‌دار و خشکسالی هواشناسی روند خاص به دنبال ندارد و قسمت‌های جنوب غرب و مرکز بیشترین ترسالی و نواحی شمال غرب بیشترین شدت خشکسالی را می‌توان دید.

جوان (۲۰۲۱) در ارومیه به بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم پرداخت. نتایج حاکی از روند معنی‌دار SPI در دوره‌های آینده براساس سناریو RCP8.5 است. بواکوا^۶ و همکاران (۲۰۲۱) در برزیل

1. Wu
2. Malik
3. Intergovernmental Panel of Climate Change
4. Fowler & Ekstrom
5. Schwank

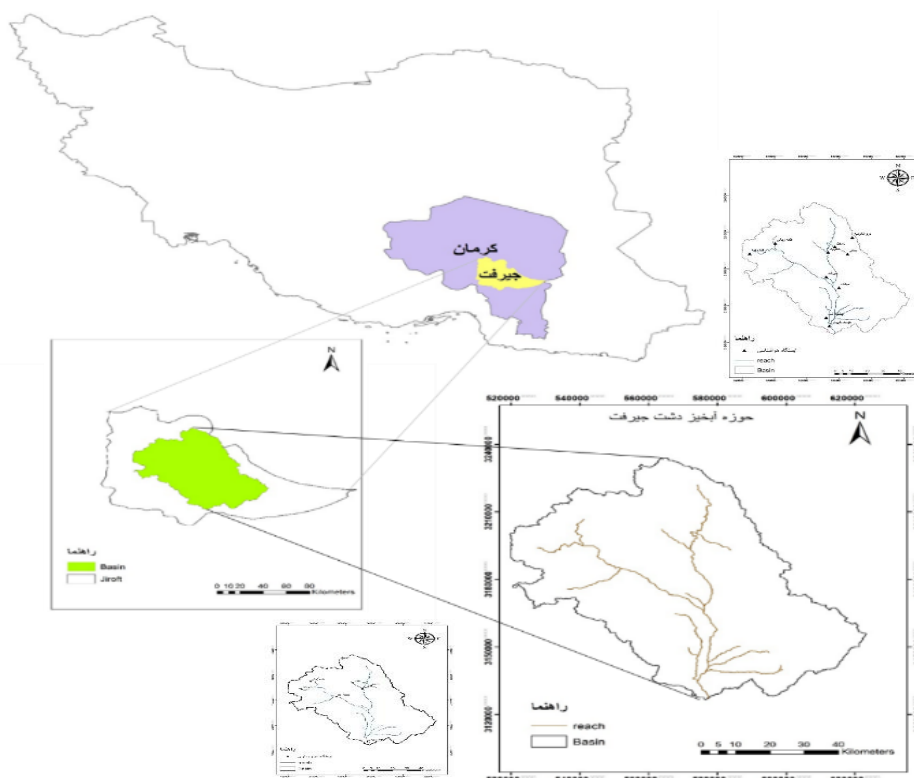
شده است. متوسط بارندگی و دما به ترتیب ۱۷۳ میلی‌متر و ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد است. جزء مناطق نیمه‌خشک در جنوب کرمان است؛ دشت جیرفت وسعتی برابر با ۶۰۱۷ کیلومتر مربع دارد، حداکثر و حداقل ارتفاع به ترتیب ۳۸۵۹ و ۵۰۳ متر و در فاصله ۲۳۰ کیلومتری از مرکز استان واقع شده است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و همچنین موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری را در کشور ایران و استان کرمان نشان می‌دهد.

الگوهای مکانی و زمانی انتشار از خشکسالی هواشناسی تا هیدرولوژیکی را در ۴۵۷ حوضه بررسی کردند و سپس با استفاده از شاخص استاندارد تبخیر و تعرق و جریان، انتشار خشکسالی هیدرولوژیکی را مورد بررسی قرار دادند؛ سپس به این نتیجه دست یافتند که خشکسالی‌های هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی طولانی‌تر و شدیدتر است و شدیدترین خشکسالی هواشناسی مربوط به مناطق مرطوب (آمازون و برزیل جنوبی)، و شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی نیز در خشک‌ترین منطقه (شمال شرق برزیل و جنوب شرق برزیل) است. سارور^۱ و همکاران (۲۰۲۲) در حوضه سوان در پاکستان به مطالعه خطر خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای پرداختند و نیز از شاخص SPI و SDI برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی و همچنین با استفاده از تحلیل رگرسیون، تحلیل روند با استفاده از آزمون من-کندال و میانگین متحرک برای بررسی ارتباط بین انواع خشکسالی استفاده کردند؛ آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که یک ارتباط قوی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود دارد که در مقیاس زمانی و مکانی متفاوت است. با توجه به اهمیت دشت جیرفت به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی کشور و تأثیر خشکسالی‌ها در اقتصاد کشاورزی منطقه، هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات خشکسالی طی یک دوره آماری ۲۳ ساله، محاسبه شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیک (SDI) و همچنین بررسی ارتباط مکانی و زمانی این دو نوع خشکسالی می‌باشد. لذا با توجه به اهمیت اقتصاد کشاورزی در کشور و منطقه مورد مطالعه به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی، شناخت ارتباط توأم مکانی و زمانی خشکسالی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که تحقیق حاضر به این مهم پرداخته است.

داده‌ها و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

جیرفت در جنوب استان کرمان در طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی و عرض ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی واقع



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های اقلیمی و هیدرومتری

Figure (1): Location of the study area and climatic and hydrometric stations

در پژوهش حاضر داده‌های بارش ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی چشمه‌شاه، دهرود، دروغ‌گوئی، جیرفت، کناروئی، کهنک شیبانی، میانده، سغدر، قلعه‌ریگی، زارین طی یک دوره آماری ۲۴ ساله از سال آبی ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ و داده‌های دبی ۷ ایستگاه هیدرومتری، کهنک شیبانی، حسین‌آباد، دهرود، زارین، کلدان، کناروئی، قلعه‌ریگی طی یک دوره آماری ۲۳ ساله از سال آبی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵ جمع‌آوری و مورد پردازش قرار گرفت. سپس مقادیر شاخص خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI و خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در محیط نرم‌افزار DIP^۱ محاسبه شد.

مقیاس‌های زمانی محاسبه کرد. بررسی‌ها نشان دادند که توزیع احتمال بارش در یک ایستگاه غالباً از توزیع احتمال گاما پیروی می‌کند (کوشکی و همکاران، ۲۰۱۷). برای محاسبه شاخص SPI ابتدا یک توزیع گاما با پارامترهای محاسبه‌شده به اطلاعات بارش هر ایستگاه برازش داده می‌شود. پارامترهای شکل (α) و مقیاس توزیع (β) برای هر سری بارش باید جداگانه محاسبه شود. SPI متغیری از تابع توزیع نرمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مد نظر از تابع گامای به‌دست‌آمده مساوی باشد. بهترین حالت انتقال یک متغیر از یک توزیع آماری به توزیع آماری دیگر، انتقال هم احتمال است که در آن احتمال‌های کمتر یا مساوی دو متغیر از دو توزیع برابر با هم فرض می‌شوند (کازم‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶). برای محاسبه این شاخص، داده‌های بارش به‌صورت ماهانه استخراج و سری زمانی تشکیل شده و پس از محاسبه میانگین و انحراف معیار سری‌های زمانی، مقدار شاخص SPI مشخص می‌گردد (رابطه ۱) (فرمان‌آرا و همکاران، ۲۰۲۰).

$$SPI = \left(\frac{Pi - \bar{P}}{S} \right) \quad (1)$$

این شاخص اولین بار توسط مک کی^۲ و همکاران (۱۹۹۳) به‌منظور پایش خشکسالی هواشناسی ابداع شد. نقطه قوت شاخص SPI این است که می‌توان آن را برای انواعی از

شاخص بارش استاندارد (SPI)

در پژوهش حاضر داده‌های بارش ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی چشمه‌شاه، دهرود، دروغ‌گوئی، جیرفت، کناروئی، کهنک شیبانی، میانده، سغدر، قلعه‌ریگی، زارین طی یک دوره آماری ۲۴ ساله از سال آبی ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ و داده‌های دبی ۷ ایستگاه هیدرومتری، کهنک شیبانی، حسین‌آباد، دهرود، زارین، کلدان، کناروئی، قلعه‌ریگی طی یک دوره آماری ۲۳ ساله از سال آبی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵ جمع‌آوری و مورد پردازش قرار گرفت. سپس مقادیر شاخص خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI و خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در محیط نرم‌افزار DIP^۱ محاسبه شد.

1. Drought Indices Package

2. Mckee

جدول (۲): طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SDI
 Table (2): Drought classification based on SDI index

حالت	وضعیت خشکسالی	دامنه شاخص SDI
۱	فاقد خشکسالی	بیشتر از صفر
۲	خشکسالی ملایم	۰ تا -۱
۳	خشکسالی متوسط	-۱/۵ تا -۱
۴	خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۲
۵	فوق‌العاده خشک	کمتر از -۲

بررسی روند داده‌های اقلیمی و هیدرومتری

آزمون من-کندال ابتدا توسط من^۲ (۱۹۴۵) و سپس توسط کندال^۳ (۱۹۷۵) براساس رتبه داده‌ها در یک سری زمانی گسترش نمود، و یک آزمون براساس رتبه است که به منظور تشخیص روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار می‌رود و به دو دسته پارامتریک و ناپارامتریک تقسیم‌بندی می‌شود؛ با استفاده از این روش تغییرات داده‌ها شناسایی، نوع و زمان مشخص می‌شود. آمار پارامتریک مستلزم پیش‌فرض‌هایی در جامعه‌ای که در آن نمونه‌گیری صورت گرفته باشد و به عنوان مهم‌ترین پیش‌فرض، فرض می‌شود که توزیع جامعه نرمال است، اما آزمون ناپارامتریک مستلزم هیچ‌گونه فرضی نیست و از نقاط قوت آن می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره کرد. فرض صفر در این آزمون بر تصادفی بودن و فقدان روند در سری داده‌هاست و پذیرش فرض یک دلیل بر وجود روند در سری داده‌هاست و به دو صورت آزمون (T) و آزمون نموداری من-کندال است؛ با استفاده از نرم‌افزار من-کندال داده‌های دبی و بارش وارد نرم‌افزار شده و با استفاده از نمودار مربوط به هر کدام از پارامترها برای دوره آماری مورد نظر می‌توان روند یا عدم روند و همچنین تغییرات ناگهانی داده‌ها را تشخیص داد. آزمون MK براساس رابطه‌های (۳) تا (۶) است:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (3)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(s) = n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \quad (5)$$

که در رابطه (۱) مقدار بارندگی در دوره مد نظر، $\bar{P}$ متوسط طولانی مدت بارش برای دوره زمانی مورد نظر، S انحراف معیار بارندگی است. ویژگی دیگر شاخص SPI امکان تعیین آستانه خشکسالی برای هر دوره زمانی است. جدول (۱) طبقه‌بندی حالت‌های مختلف خشکسالی را به روش SPI نشان می‌دهد.

 جدول (۱): طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SPI
 Table (1): Drought classification based on SPI index

حالت	وضعیت خشکسالی	دامنه شاخص SPI
۱	فوق‌العاده مرطوب	بیشتر از ۲+
۲	خیلی مرطوب	۱/۵+ تا ۲+
۳	نسبتاً مرطوب	۱+ تا ۱/۵+
۴	مرطوب ملایم	۱+ تا ۰
۵	خشکسالی ملایم	۰ تا -۱
۶	نسبتاً خشک	-۱ تا -۱/۵
۷	خیلی خشک	-۱/۵ تا -۲
۸	فوق‌العاده خشک	کمتر از -۲

شاخص خشکسالی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI)

یکی از اجزای اصلی معادله بیلان آب، رواناب سطحی (SDI) است. شاخص SDI اولین بار توسط نالبانتیس^۱ (۲۰۰۸) ارائه شد، روش محاسبه این شاخص همانند SPI است با این تفاوت که در شاخص SPI، فاکتورهای محاسباتی بارندگی است اما در شاخص SDI فاکتور محاسباتی، داده‌های دبی جریان است و از نظر مقیاس زمانی به صورت ماهانه تأکید شده است. در تحقیق حاضر شاخص SDI به مشابه شاخص SPI محاسبه شد. این شاخص برحسب حجم تجمعی جریانات رودخانه (V_{ik}) برای دوره مبنای (k) مربوط به (i) سال هیدرولوژیکی به صورت رابطه (۲) می‌باشد. جدول طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SDI مطابق جدول (۲) آورده شده است (جهانگیر و همکاران، ۲۰۲۰).

$$sdi_{ik} = \frac{v_{ik} - v_k}{S_k} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \quad k = 4, 3, 2, 1$$

v_k : میانگین مجموع حجم دبی

S_k : انحراف معیار جریانات تجمعی برای دوره مبنای K

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

در روابط فوق، n تعداد داده‌های مشاهده طول دوره آماری، x_i آیین داده مشاهده‌ای و x_j آیین داده مشاهده‌ای و q تعداد گروه‌های ایجادشده و tp تعداد داده‌های برابر در p این گروه و Z_{mk} مقدار آماره من-کندال. مقدار منفی Z_{mk} روند نزولی و مقدار مثبت، روند صعودی در سری داده‌ها را نشان می‌دهد با توجه به سطح معنی‌داری ۹۵ درصد اگر مقدار Z_{mk} بیشتر از ۱/۹۶ باشد، فرض صفر رد و سری زمانی دارای روند معنی‌دار و در غیر این صورت فاقد روند است.

پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی

برای ایجاد نقشه پیوسته از مکان مورد نظر نیاز به روش درون‌یابی است. بدین منظور روش‌های مختلفی برای درون‌یابی ارائه شده که در این پژوهش از دو روش کریجینگ^۱ و روش وزن‌دهی فاصله معکوس^۲ استفاده شده است. روش وزن‌دهی فاصله معکوس از جمله روش‌هایی است که به منظور پهنه‌بندی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به کار می‌رود (صابری و سلطانی‌گرددفرامریزی، ۲۰۱۷) و از متداول‌ترین روش‌های درون‌یابی نقاط پراکنده محسوب می‌شود که نشان‌دهنده اثر غیریکسان یک پارامتر بر نقاط اطرافش یکسان است و بر این فرض استوار است که با افزایش فاصله از مبدأ این اثر کمتر می‌شود؛ در این صورت هرچه فاصله داده معلوم از نقطه مجهول افزایش یابد، نیاز است که وزن‌ها براساس فاصله کم شود؛ بنابراین فاصله‌ها معکوس می‌شود و به منظور نقاط اندازه‌گیری‌شده در پیش‌بینی نقاط مجهول، از فاصله معکوس استفاده می‌شود و طبق رابطه (۷) به دست می‌آید. در رابطه (۸) نیز مدل کریجینگ نشان داده شده است.

$$Z^0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^q} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^q}} \quad (7)$$

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (8)$$

که در آن $\gamma(h)$: مقدار نیم تغییرنما در فاصله (h) ، $Z(x_i + h)$: مقدار مشاهده‌شده متغیر مورد نظر که به فاصله h از $Z(x_i)$ قرار

دارد؛ $Z(x_i)$: مقدار مشاهده‌شده متغیر مورد نظر، $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های به‌کاررفته در محاسبه است که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند. ایساک^۳ معمولاً هرچه h افزایش یابد، تعداد جفت‌ها کم می‌شود. با افزایش h ، مقدار نیم تغییرنما تا فاصله معینی اضافه می‌شود و پس از آن به حد ثابتی می‌رسد که حد آستانه نامیده می‌شود (لثوپالس و دیادسو، ۲۰۰۶).

$$(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (9)$$

در این رابطه $Z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده در موقعیت i_{th} است و λ_i وزن مقدار اندازه‌گیری‌شده در موقعیت i_{th} است؛ همچنین s_0 واقعیت پیش‌بینی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری‌شده یا معلوم است. در این روش ابتدا واریوگرام مناسب به ساختار فضایی داده‌ها براساس کمترین میزان RMSE^۵ برازش داده شده و بعد درون‌یابی انجام می‌شود.

جدول (۳): ماتریس ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص

خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

Table (3): Pearson correlation coefficient matrix between meteorological and hydrological drought indices

شاخص‌ها و دوره‌ها	SDI ۳ ماهه	SDI ۶ ماهه	SDI ۱۲ ماهه	SDI ۲۴ ماهه	SDI ۴۸ ماهه
SPI ۳ ماهه	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۳۹
SPI ۶ ماهه	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۵۳
SPI ۱۲ ماهه	۰/۳۶	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۷۶
SPI ۲۴ ماهه	۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۷۹
SPI ۴۸ ماهه	۰/۳۲	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۶۵	۰/۸۴

معیارهای ارزیابی

روش‌های مختلف درون‌یابی برحسب روش ارزیابی متقابل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که در این روش یک نقطه به‌صورت موقتی حذف و با اعمال درون‌یابی برای آن نقطه حذف شده، مقداری برآورد می‌شود و سپس نقطه حذف‌شده به محل قبلی خود برگردانده می‌شود و نقطه دیگری نیز حذف می‌گردد و برای هر نقطه به‌صورت جداگانه مقداری برآورد می‌گردد و به همین ترتیب برای تمام نقاط انجام می‌شود و در آخر نیز یک جدول با دو ستون که شامل مقدار واقعی و مقدار برآورد شده

3. Isaaks

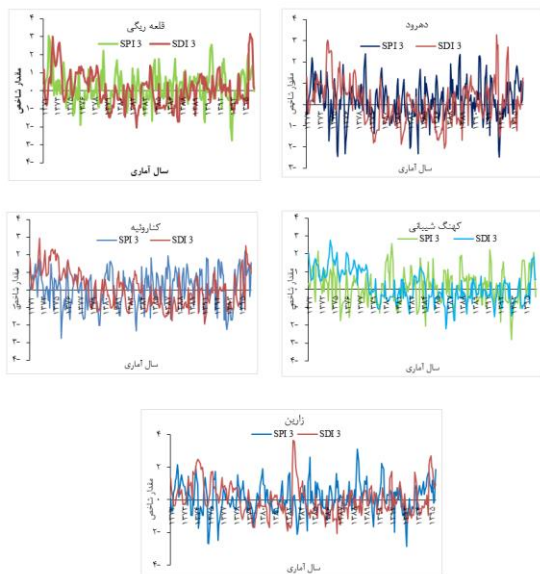
4. Latinopoulos & Theodossiou

5. Root Mean Squared Error

1. Kriging

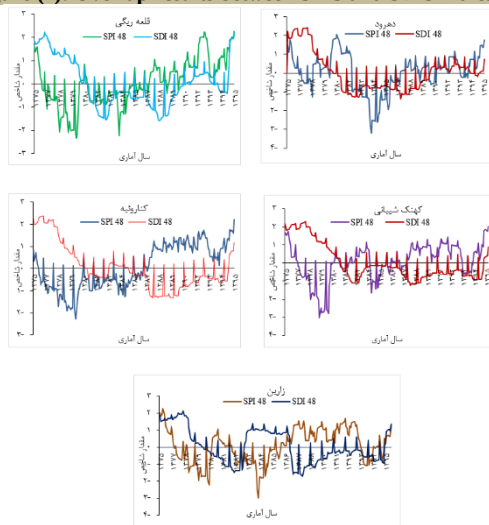
2. Inverse Distance Weighting (IDW)

آن شده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که در همه ایستگاه‌ها ارتباط بین شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی برقرار نیست؛ به عبارتی زمانی که خشکسالی هیدرولوژیکی وجود داشته، شاخص خشکسالی هواشناسی شرایط دیگری را نشان داده است. یکی از دلایل این اختلافات منشأ گرفتن جریان‌ها در بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری است که باعث ایجاد جریانی پایه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که در بیشتر سال‌هایی که بارش کمتر از نرمال بوده، جریان رودخانه را تحت تأثیر قرار داده و باعث کمبود جریان و سیر نزولی آن شده است.



شکل (۲): نتایج همپوشانی بین شاخص‌های SPI3 و SDI3

Figure (2): Overlap results between SPI3 and SDI3 indicators



شکل (۳): نتایج همپوشانی بین شاخص‌های SPI48 و SDI48

Figure (3): Overlap results between SPI48 and SDI48 indicators

ارائه می‌گردد و با استفاده از این مقادیر می‌توان شاخص‌های RMSE، MAE و MBE را به ترتیب طبق رابطه (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) محاسبه کرد؛ هرچه مقدار این دو به صفر نزدیک شود مدل از دقت بالایی برخوردار است (خسروی و مظفری، ۲۰۱۶).

مهم‌ترین معیار برای ارزیابی تخمین، مقدار مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum ((Z^*_i) - (Z_i))^2}{n}} \quad (10)$$

$Z^*(x_i)$ مقدار تخمین زده شده و $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده در نقطه نام و n تعداد مشاهدات است. اصولاً مناسب‌ترین روش درونیابی، روشی است که مقادیر RMSE حداقل مقدار را داشته باشند.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (11)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (12)$$

$Z^*(x_i)$ مقدار برآورد شده، $Z(x_i)$ مقدار واقعی، N تعداد داده‌ها، MAE میانگین خطا مطلق و MBE میانگین انحراف خطا است.

نتایج و بحث

ارتباط بین شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی (SPI و SDI)

در این پژوهش براساس اطلاعات ایستگاه‌های اقلیمی و هیدرومتری، وضعیت خشکسالی با استفاده از دو شاخص SPI و SDI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شد. در شکل (۲) و (۳) و جدول (۳) نتایج همبستگی بین دو شاخص SPI و SDI در گام‌های زمانی ۳ و ۴۸ ماهه نشان داده شده است. برای بررسی و تطابق وضعیت شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی از ایستگاه‌های مشترک استفاده شد. با توجه به شکل (۲) ایستگاه‌های کهنک شیبانی، کنارویه، زارین، دهرود و قلعه‌ریگی در دو شاخص هواشناسی و هیدرولوژیکی منطبق بر یکدیگرند. پس می‌توان گفت در بیشتر سال‌هایی که بارش کمتر از نرمال بوده، جریان رودخانه را تحت تأثیر قرار داده و باعث کمبود جریان و سیر نزولی

1. Mean Absolute Error
2. Mean Bias Error

نتایج آزمون روند خشکسالی

نتایج آزمون من‌کنندال برای داده‌های دبی جریان ایستگاه‌های هیدرومتری بررسی و نتایج آن در جداول (۶) و (۷) نشان داده شده است؛ براساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در شاخص SDI ۳ ماهه ایستگاه‌های کلدان، دهرود، زارین و کهنک شیبانی دارای روند معناداری هستند؛ به عبارتی در همه ایستگاه‌ها روند معنادار و مثبتی در این مقیاس زمانی وجود دارد، اما در ایستگاه کهنک شیبانی، روند منفی وجود دارد. با توجه به نتایج در مقیاس‌های زمانی ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه نیز براساس مقدار Z یک روند معنادار مثبت وجود دارد.

جدول (۶): نتایج روند تغییرات شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی در

مقیاس زمانی ۳ ماهه

Table (6): Results of the trend of changes in the hydrological drought index on a 3-month time scale

نام ایستگاه	Test Z	Signific.	Q
دهرود	۱/۶۹	+	۰/۰۳۸
کلدان	۳/۴۰	***	۰/۰۷۲
زارین	۱/۱۹		۰/۰۱۸
حسین آباد	۱/۹۱	+	۰/۰۳۱
کهنک شیبانی	-۱/۷۹	+	-۰/۰۲۷
کناروئیه	۱/۵۶		۰/۰۳۷
قلعه‌ریگی	۳/۹۴	***	۰/۱۳۳

جدول (۷): نتایج روند تغییرات شاخص خشکسالی هواشناسی در

مقیاس زمانی ۴۸ ماهه

Table (7): Results of the trend of changes in the hydrological drought index on a 48-month time scale

نام ایستگاه	Test Z	Signific.	Q
دهرود	۵/۹۳	***	۰/۱۱۹
کلدان	۱/۲۴		۰/۰۱۴
زارین	۵/۷۰	***	۰/۱۵۰
حسین آباد	۵/۳۹	***	۰/۱۰۱
کهنک شیبانی	۵/۱۳	***	۰/۰۷۱
کناروئیه	۵/۷۷	***	۰/۰۷۳
قلعه‌ریگی	-۱/۸۵	+	-۰/۰۳۳

پس از بررسی همپوشانی دو شاخص، تابع همبستگی متقابل در مقیاس‌های زمانی مختلف تحلیل گردید. برای مثال در گام زمانی ۱۲ ماهه (شکل ۴) خطوط افقی نشان‌دهنده محدوده بحرانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد است که در این محدوده ارتباط معناداری بین دو شاخص موجود نیست؛ به

روند شاخص خشکسالی هواشناسی برای گام‌های زمانی مختلف محاسبه گردید که نتایج روند داده‌ها برای SPI ۳ ماهه و ۴۸ ماهه در اشکال (۲ و ۳) و جداول (۴ و ۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج روند تغییرات شاخص SPI سه‌ماهه مشخص شد که ایستگاه چشمه‌شاه و کناروئیه به‌ترتیب در دو سطح ۹۵ و ۹۹ درصد دارای اختلاف معناداری با بقیه ایستگاه‌ها هستند؛ به عبارتی شاخص SPI سه‌ماهه طی دوره آماری ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۹ دارای روند منفی است، ولی بقیه ایستگاه‌ها روندی ندارند (جدول ۴). نتایج بررسی روند تغییرات ایستگاه‌ها براساس شاخص SPI ۴۸ ماهه در جدول (۵) نشان داده شده است؛ نتایج نشان داد که در دو مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه، ایستگاه‌های چشمه‌شاه، کناروئیه، کهنک شیبانی، میانده، سغدر و قلعه‌ریگی دارای روندی منفی و نزولی هستند.

جدول (۴): نتایج روند تغییرات شاخص خشکسالی هواشناسی در

مقیاس زمانی ۳ ماهه

Table (4): Results of the trend of changes in the meteorological drought index on a 3-month time scale

نام ایستگاه	Test Z	Signific.	Q
چشمه‌شاه	-۲/۰۸	*	-۰/۰۳۳
دهرود	۰/۲۱		۰/۰۰۶
دروغ‌گوئیه	-۱/۳۵		-۰/۰۵۱
جیرفت	۱/۲۶		۰/۰۲۴
کناروئیه	-۱/۸۵	**	-۰/۰۳۹
کهنک شیبانی	-۰/۳۳		-۰/۰۰۸
میانده	-۱/۲۶		-۰/۰۱۷
سغدر	-۰/۶۸		-۰/۰۳۳
قلعه‌ریگی	-۱/۵۲		-۰/۰۲۳
زارین	-۱/۲۶		-۰/۰۳۳

جدول (۵): نتایج روند تغییرات شاخص خشکسالی هواشناسی در

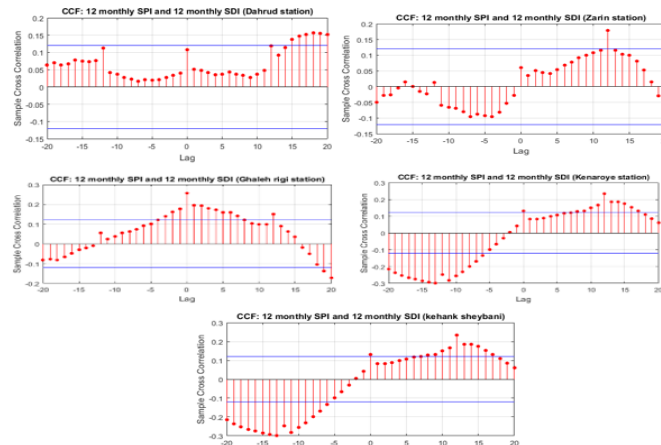
مقیاس زمانی ۴۸ ماهه

Table (5): Results of the trend of changes in the meteorological drought index on a 48-month time scale

نام ایستگاه	Test Z	Signific.	Q
چشمه‌شاه	-۵/۲۹	***	-۰/۱۰۳
دهرود	-۵/۱۱	***	-۰/۰۹۸
دروغ‌گوئیه	-۴/۷۷	***	-۰/۱۲۰
جیرفت	-۴/۶۲	***	-۰/۰۹۲
کناروئیه	-۴/۵۹	***	-۰/۰۸۶
کهنک شیبانی	-۵/۴۱	***	-۰/۱۲۷
میانده	-۴/۸۶	***	-۰/۰۹۹
سغدر	-۴/۱۷	***	-۰/۰۷۹
قلعه‌ریگی	-۴/۶۸	***	-۰/۱۲۸
زارین	-۵/۴۱	***	-۰/۱۴۲

عبارتی p -value آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ است. محور عمودی میزان همبستگی و محور افقی تأخیر زمانی در داده‌ها را نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت که در ایستگاه‌های دهرود برای مقیاس زمانی ۳ ماهه در Lag ۷ همبستگی وجود دارد، سپس همبستگی ندارند تا lag ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ همبستگی معنی‌دار

وجود دارد که یعنی پس از ۱۶ ماه بعد از خشکسالی هواشناسی، بیشترین تأثیر خشکسالی هیدرولوژیکی مشاهده می‌شود. جدول (۸) نتایج آزمون من-کندال روی داده‌های بارش، و جدول (۹) نتایج آزمون من-کندال روی داده‌های دبی را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نتایج بررسی همبستگی تأخیری بین دو شاخص خشکسالی SPI و SDI در مقیاس ۱۲ ماهه

Figure (4): Results of the lagged correlation study between the two drought indices SPI and SDI on a 12-month scale

جدول (۸): سری‌های زمانی شاخص بارش استاندارد

Table (8): Standard precipitation index time series

نام ایستگاه	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12	SPI-18	SPI-24	SPI-48	بارندگی
چشمه‌شاه	-۲/۰۷۸*	-۲/۷*	-۳/۱۵*	-۳/۱۸*	-۲/۵۰۶*	-۴/۶۲۳*	-۵/۲۸۹*	۱۲/۰۷
دهرود	۰/۲۱۰	-۰/۷	-۰/۸۶۸	-۱/۵۶۳	-۲/۸۰۶*	-۲/۷۷۸*	-۵/۱۰۷*	۱۷/۸۸
دروغکویه	-۱/۳۵۴	-۱/۰۹۸	-۱/۰۹۱	-۰/۹۴۲	-۱/۹۶	-۲/۳۵۱*	-۴/۷۷۳*	۲۶/۷۲
قلعه‌ریگی	-۱/۵۱۸	-۲/۲۴۳*	-۲/۵۸*	-۲/۸۵۶*	-۲/۸۲۸*	-۴/۱۵۷*	-۴/۶۸*	۱۳/۳۱
جیرفت	۱/۲۶۲	۰/۴۶۴	-۰/۸۴۳	-۱/۵۱۴	-۳/۰۲۸*	-۴/۱۷۵*	-۴/۶۲۴*	۱۳/۳۷
کنارویه	-۱/۸۴۶	-۲/۵۴۷*	-۳/۱۹۹*	-۳/۵۴۷*	-۳/۳۰۱*	-۵/۰۲۱*	-۴/۵۹۲*	۱۴/۱۵
کهنک شیبانی	-۰/۳۲۷	-۲/۰۳۲*	-۲/۹۰۲*	-۳/۹۲۲*	-۳/۷۲۱*	-۵/۰۸۱*	-۵/۴۱*	۱۲/۸۳
میانه	-۱/۲۶۲	-۲/۲۴۲*	-۲/۴۵۵*	-۳/۳۴۲*	-۲/۶۰۶*	-۳/۹۹۵*	-۴/۸۶۱*	۱۱/۸۳
سغدر	-۰/۶۷۷	-۱/۳۷۷	-۳/۱۵*	-۴/۰۹۵*	-۴/۰۶۹*	-۴/۶۲۶*	-۴/۱۶۹*	۲۳/۹۷
زارین	-۱/۲۶۲	-۱/۸۴۵	-۱/۲۹	-۱/۱۹۱	-۱/۹۶	-۲/۹۰۷*	-۵/۴۰۵*	۲۹/۴۹

جدول (۹): سری‌های زمانی شاخص دبی استاندارد شده

Table (9): Standard discharge index time series

نام ایستگاه	SDI-3	SDI-6	SDI-9	SDI-12	SDI-18	SDI-24	SDI-48	دبی
دهرود	۱/۶۸۸	۲/۷۳۱	۴/۰۱۹	۵/۳۴۳	۵/۹۲۵	۲/۰۹۴	۲/۶۹۵	۵/۱۰۸
کلدان	۳/۳۹۸	۴/۶۱۵	۲/۹۷۷	۲/۲۳۳	۱/۲۴۳	-۰/۲۶۴	۳/۸۷۹	۰/۸۶۶
زارین	۱/۱۹۱	۳/۰۰۱	۴/۱۴۷	۴/۷۱۴	۵/۷۰۴	۴/۰۴۵	۳/۶۸۹	۱/۱۷۹
حسین‌آباد	۱/۹۱۱	۳/۱۵۲	۵/۲۶۳	۵/۹۰۵	۵/۳۹۱	۴/۹۵۸	۳/۲۰۸	۸/۱۳۸
کهنک شیبانی	-۱/۷۸۶	-۰/۴۴۶	۰/۴۹۶	۰/۸۹۴	۵/۱۲۷	۵/۰۳۴	۲/۴	۶/۰۲۷
کنارویه	۱/۵۶۲	۳/۰۷۸	۴/۷۳۷	۵/۵۶۴	۵/۷۷۲	۱/۶۲۱	۰/۹۶۸	۷/۷۹۹
قلعه‌ریگی	۳/۹۴۳	۳/۷۹۷	۲/۷۷۸	۱/۱۶۵	-۱/۸۵	-۴/۷۱۲	۱/۰۲۷	۱

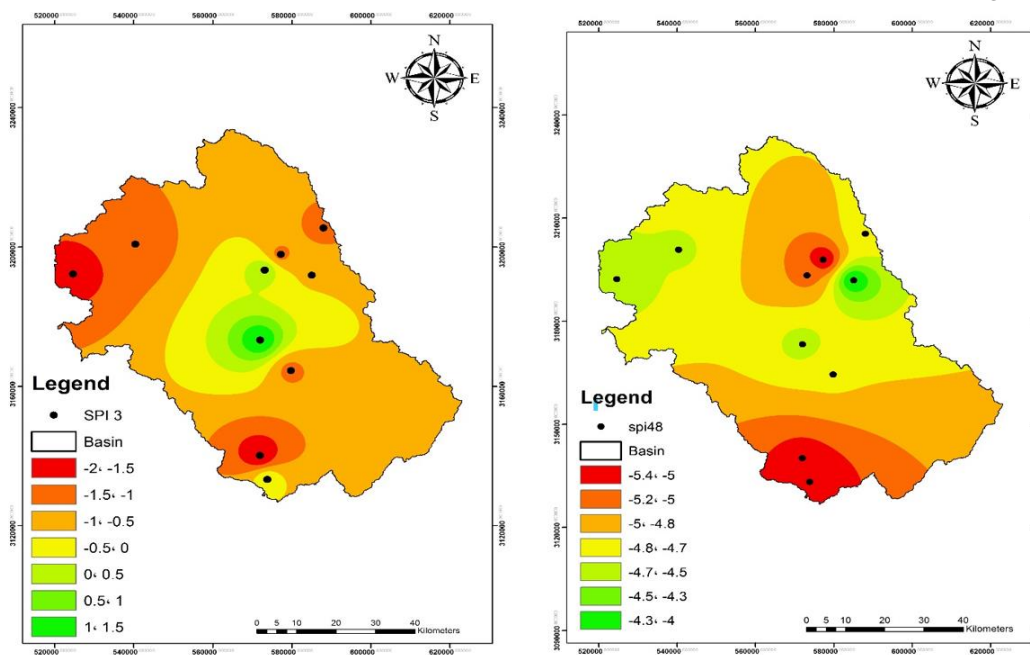
جدول (۱۰): مقادیر خطای اندازه‌گیری روش‌های زمین‌آمار برای شاخص خشکسالی

Table (10): Measurement error values of geostatistical methods for drought index

وزندگی معکوس فاصله						دوره
MAE		MBE		RMSE		(ماه)
SPI	SDI	SPI	SDI	SPI	SDI	
۲/۰۱۴	۱/۰۰۱	-۰/۰۷۵	-۰/۱۲۳	۱/۱۸	۱/۹۶	۳
۲/۰۲۲	۱/۰۲	-۰/۰۶۲	-۰/۱۵۳	۰/۹۷	۱/۶	۶
۱/۶۵۲	۱/۰۵	-۰/۰۴۶	-۰/۰۶۲۱	۰/۹۲	۱/۸	۹
۲/۳۲۸	۳/۲۸۵	-۰/۰۱۲۴	۰/۴۱۵	۱/۲۵	۲/۷	۱۲
۱/۷۶۵	۳/۶۲۵	۰/۲۱۸	۰/۳۴۸	۱/۰۵	۳/۹	۱۸
۱/۶۵۲	۳/۴۲۵	۰/۱۴۲	۰/۱۹۶	۰/۸۹	۳/۸	۲۴
۲/۳	۲/۳۹۶	۰/۴۶۲	۰/۱۹۸	۰/۳۶	۰/۷	۴۸

نتایج پهنه‌بندی شاخص خشکسالی

در این پژوهش از بین روش‌های زمین‌آمار کریجینگ، تابع شعاعی، چندجمله‌ای و عکس فاصله وزنی براساس نتایج آزمون صحت آماری مناسب‌ترین مدل برای نشان دادن پراکنش خشکسالی در مقیاس‌های مختلف مدل عکس فاصله وزنی است. جدول (۱۰) مقادیر شاخص‌های خطا برای انتخاب روش پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در دوره‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. براساس این جدول دل IDW دارای مقادیر خطای کمتری بودند که به‌عنوان مدل مناسب برای نشان دادن پهنه‌بندی انتخاب شدند. شکل (۵) نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص خشکسالی SPI در دوره‌های زمانی ۳ و ۴۸ ماهه را نشان می‌دهد.

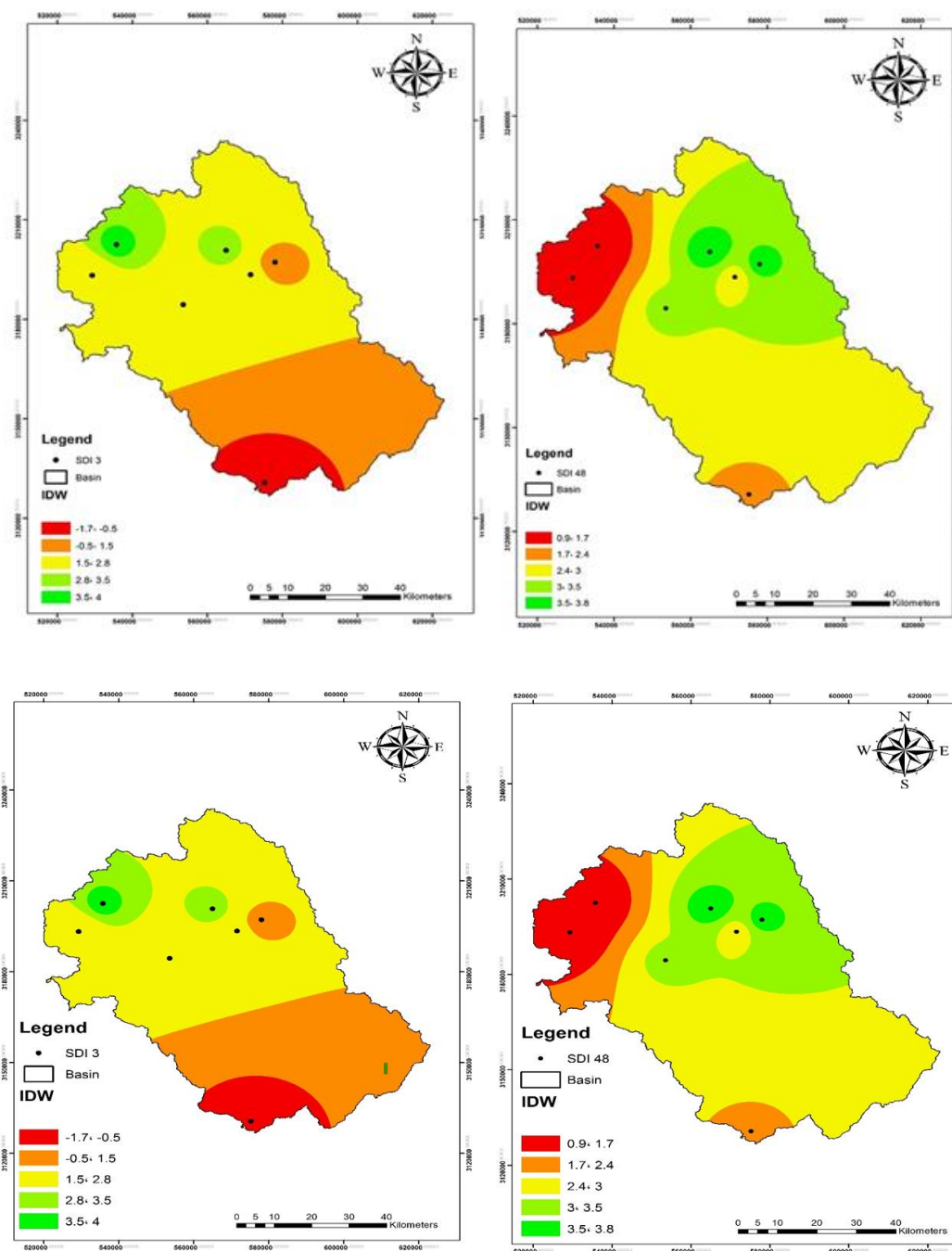


شکل (۵): نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی هواشناسی در دو سری زمانی ۳ و ۴۸ ماهه دشت جیرفت

Figure (5): Zoning map of the meteorological drought index in two 3 and 48 month time series of the jiroft plain

بودند. با توجه به نقشه‌های به‌دست‌آمده از سری زمانی ۱۲ تا ۴۸ ماهه روند خشکسالی هواشناسی در سایر ایستگاه‌ها عدد منفی را نشان می‌دهد که خشکسالی در حال افزایش است و دارای روندی معنادار نیز می‌باشد. شکل (۶) نیز نتایج پهنه‌بندی ۳ و ۴۸ ماهه شاخص SDI را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۵) مشخص شد که خشکسالی شدید در شمال غرب منطقه و جنوب دشت وجود دارد. بیشتر مساحت منطقه در محدوده نزدیک نرمال یا نسبتاً خشک قرار دارد. بررسی وضعیت خشکسالی در مقیاس‌های بلندمدت ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه دارای شرایط متفاوتی نسبت به دوره‌های کوتاه‌مدت



شکل (۶): نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی هیدرولوژیک در دو سری زمانی ۳ و ۴۸ ماهه دشت جیرفت

Figure (6): Zoning map of the hydrological drought index in two 3 and 48 month time series of the jiroft plain

غرب هم دیده می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت براساس این شاخص بیشتر منطقه در وضعیت نرمال و نزدیک نرمال قرار دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از شاخص SPI، تعداد فراوانی خشکسالی در دوره‌های کوتاه مدت با تغییرات همراه

براساس نتایج شاخص SDI در دوره زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه بیشترین شدت خشکسالی در جنوب و جنوب غرب منطقه و در دوره ۱۲ ماهه قسمتی از شمال غرب و جنوب غرب را شامل می‌شود. بیشتر منطقه دارای وضعیت نرمال است، در شاخص‌های ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه که به ترتیب قسمتی از شمال غرب را می‌گیرد، سپس در نهایت به صورت خیلی کم در جنوب

(۲۰۱۸)، مای رونایدیس و همکاران (۲۰۱۸) و مندل و مجمارد (۲۰۱۵) همراستاست.

با بررسی و همپوشانی نمودارهای هریک از شاخص‌ها در دوره‌های مختلف مشخص شد که با افزایش مقیاس زمانی همپوشانی کمتر می‌شود ولی برای تعیین ارتباط و همبستگی بین شاخص‌ها از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد که نتایج نشان داد بیشترین همبستگی بین مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه است. کاظمی و کاظمی (۲۰۲۲)، ساری صراف و همکاران (۲۰۱۵)، نشان دادند که با توجه به میانگین متحرک در محاسبه شاخص SDI، هرچه دوره زمانی بالاتر رود همبستگی نیز بیشتر می‌شود. همچنین سارور و همکاران (۲۰۲۲) در حوضه سوان در پاکستان با شاخص‌های SPI و SDI و تحلیل رگرسیون، تحلیل روند آزمون من-کندال و میانگین متحرک نشان دادند که یک ارتباط قوی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود دارد که در مقیاس زمانی و مکانی متفاوت است. براساس مطالعات روستائی صدرآبادی و ولی (۲۰۱۶) نتایج این تأخیر زمانی را بین شاخص خشکسالی و گردوغبار در ایران مرکزی نشان دادند و نقش تأخیر زمانی خشکسالی هواشناسی در ایجاد گردوغبار را بیان کردند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از سری زمانی ۱۲ تا ۴۸ ماهه روند خشکسالی هواشناسی در اغلب ایستگاه‌ها عدد منفی را نشان می‌دهد. لذا خشکسالی در حال افزایش و دارای روندی معنادار نیست. براساس نتایج شاخص SDI ۳، ۶ و ۹ ماهه بیشترین شدت خشکسالی در جنوب و جنوب غرب منطقه بوده است و دوره ۱۲ ماهه قسمتی از شمال غرب و جنوب غرب را شامل می‌شود. بیشتر منطقه دارای وضعیت نرمال است. در شاخص‌های ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه که به‌ترتیب قمستی از شمال غرب را می‌گیرد، در نهایت به‌صورت خیلی کم در جنوب غرب هم دیده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت براساس این شاخص بیشتر منطقه در وضعیت نرمال و نزدیک به نرمال قرار دارد.

است و بیشترین واقعه آماری در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۹، ۱۳۸۰، ۱۳۸۷، ۱۳۸۴، ۱۳۸۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۶ رخ داده است. به عبارتی در دوره‌های کوتاه‌مدت عمق خشکسالی شدید است، اما با افزایش مقیاس زمانی خشکسالی در طبقات مختلف نمایان می‌شود. شاخص خشکسالی هواشناسی در مقیاس بلندمدت در طبقات نرمال تا خیلی خشک قرار گرفته است که این نیز به‌علت تأخیر زمانی بین ماه‌های دارای بارش است. در این راستا کوشکی و همکاران (۲۰۱۷)، رضوی‌زاده و درگاهیان (۲۰۲۱)، کاظمی و کاظمی (۲۰۲۲) و ساری صراف و همکاران (۲۰۱۵) تأخیر زمانی را علت اصلی وضعیت خشکسالی در دوره‌های زمانی معرفی کردند. در این راستا حیدری مطلق و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی شاخص خشکسالی هیدرولوژیک (SDI) در ۳ دوره ۳، ۶ و ۹ ماهه ابراز داشتند که با افزایش دوره زمانی، تعداد و فراوانی خشکسالی، بیشتر می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده هرچه دوره زمانی بیشتر می‌شود، دوره خشکی را نیز بیشتر نشان می‌دهد. یکی از دلایل اصلی تغییرات براساس تأثیری است که جریان از بارش باران می‌گیرد. در این راستا مفیدی‌پور (۲۰۱۲) در تحقیق خود اشاره کرد که خشکسالی هواشناسی سبب کاهش جریان آب‌های سطحی می‌شود و این تأثیر در همان ماه و یا با یک ماه تأخیر اتفاق می‌افتد. حیدری مطلق و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی شاخص خشکسالی هیدرولوژیک (SDI) در سه دوره ۳، ۶ و ۹ ماهه دست یافتند که دوره ۹ ماهه دارای تعداد و فراوانی بیشتری نسبت به کوتاه‌مدت با توجه به تأخیر زمانی و تأثیر بارش بر روی جریان هستند. مای رونایدیس و همکاران (۲۰۱۸) با توجه به نتایج آزمون من-کندال بر روی شاخص SDI نشان دادند که شرایط خشکسالی با گذشت زمان بیشتر می‌شود. مندل و مجمارد (۲۰۱۵) در هند با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات هیدرولوژیکی نشان دادند که تغییرات اقلیمی منطقه می‌تواند به تغییرات هیدرولوژیک منجر شود؛ یعنی با افزایش دوره زمانی جریان تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نتایج تحقیق حاضر با مفیدی‌پور (۲۰۱۲)، حیدری مطلق و همکاران

منابع

- Amiri, M., & Pourqasemi, H. R. (2019). Investigating the relationship between hydrological and meteorological droughts in Maharlu watershed, Fars province. *Watershed engineering and management scientific-research journal*, 11(3), 725-738. [In Persian].
- Bevacqua, A. G., Chaffe, P. L., Chagas, V. B., & AghaKouchak, A. (2021). Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. *Journal of Hydrology*, 603, 126902.
- Fowler, H. J. & Ekstrom, M. (2009). Multi-model ensemble estimates of climate change impacts on UK seasonal precipitation extremes. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3), 385-416.
- Jehanzaib, M., Sattar, M. N., Lee, J. H., & Kim, T. W. (2020). Investigating effect of climate change on drought propagation from meteorological to hydrological drought using multi-model ensemble projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 7-21.
- Jevan, kh. (2021). Meteorological drought in Urmia station using SPI index under climate change scenarios (RCP). *Journal of Climate Change Research*, 2(5), 94-81 [In Persian]
- Kazemi, R., & Khazai, M. R. (2022). Prediction of Tehran and Yazd climate change in the future under RCP scenarios and by LARS-WG model. *Environmental Science and Technology Quarterly*, 24(6), 31-44 [In Persian].
- Farmanara, S. M., Bakhtiari, B., & Sayari, N. (2020). Meteorological drought characteristics analysis under climate change effect using Copula in Fars Province. *Water and spil*. 34 (5), 1157-1173.
- Kazemzadeh, M., & Malekian, A. (2016). Spatial characteristics and temporal trends of meteorological and hydrological droughts in northwestern Iran. *Natural Hazards*, 80, 191-210.
- Khosravi, Y., & Mozaffari, G. H. (2016). Error analysis in SPI drought index assessment using geostatistics, case study: Bushehr province. *The scientific-research and international quarterly of the Iranian Geographical Society*, 14(48), 189-213 [In Persian].
- Kushki, R., Rahimi, M., Amiri, M., Mohammadi, M. (2016). *Investigating the relationship between meteorological and hydrological drought in Karkheh watershed*. Master's thesis, Faculty of Desertology, Semnan University. [In Persian].
- Kushki, R., Rahimi, M., Amiri, M., Mohammadi, M., & Dastorani, j. (2017). Investigating the temporal relationship of meteorological drought in Karkheh watershed. *Journal of Ecohydrology*, 4(3), 687-698 [In Persian].
- Malik, A., Tikhamarine, Y., Souag-Gamane, D., Rai, P., Sammen, S. S., & Kisi, O. (2021). Support vector regression integrated with novel meta-heuristic algorithms for meteorological drought prediction. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 891-909.
- Myronidis, D., Ioannou, K., Fotakis, D., & Dorflinger, G. (2018). Streamflow and hydrological drought trend analysis and forecasting in Cyprus. *Water resources management*, 32, 1759-1776.
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *Journal of European Water*, 23(24), 67-77.
- Qaisori, M., Soltani Gardfaramarzi, S., & Ghasemi, M. (2018). Evaluation of meteorological and hydrological drought and its effect on water quality parameters (case study: Godar Khosh watershed). *Irrigation Science and Engineering*, 41(4), 91-105 [In Persian].
- Roustaei sadr abadi, F., & Veli, A. (2016). *Investigating the meteorological drought trend in central Iran and its effect on the wind erosion rate*. Doctoral dissertation in the field of desertification, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University. [In Persian].
- Sabri, A., & Soltani Gardfaramarzi, S. (2017). Evaluation of geostatistical methods in the zoning of drought intensity in West Azarbaijan province. *Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 7(3), 151-165 [In Persian].
- Safrad, T., Azizi, GH., Mohammadi, H., & Faraji Sabokbar, H. (2015). The variability of Siberian high pressure intensity during the period of global warming. *Geography and natural hazards*, 4(1), 77-94 [In Persian].
- Sari-Saraf, B., Mahmoudi, S., Zangheh, S., & Pashaei, Z. (2015). Monitoring and forecasting drought and drought in Tabriz using CLIMGEN model and SPI index. *Hydrogeomorphology*, 2(2), 61-78 [In Persian].
- Sarwar, A. N., Waseem, M., Azam, M., Abbas, A., Ahmad, I., Lee, J. E., & Haq, F. U. (2022). Shifting of Meteorological to Hydrological Drought Risk at Regional Scale. *Applied Sciences*, 12(11), 5560.
- Schwank, J., Escobar, R., Giron, G. H., & Moran-Tejeda, E. (2014). Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability. *Environmental Science Policy*, 43, 91-97.
- Shahruxh Sardo, Z., Zarea, M., Mirmohammadi meybodi, S, A, M., Rahimian, M, H., & Arabi Ali Abad, F. (2019). The effect of drought on the quality of surface water in Halil Road basin, Kerman. *Journal of water and soil sciences (sciences of agricultural techniques and natural resources)*, 23(3), PP 380-367. [In Persian].

23. Shakersureh, F., & Asadi, E. (2019). The relationship between meteorological and hydrological droughts in Selmas Plain. *Scientific-Research Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 8(22), 89-100. [In Persian].
24. Theodossiou, N., & Latinopoulos, P. (2006). Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environmental Modelling and Software*, 21(7), 991-1000.
25. Heidari motlagh, A., Nasrolahi, A., Sharifipour, M., & Veysi, S. (2021). Evaluation of Different Models for Estimating Reference Evapotranspiration (ET_o) in Aleshtar Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1409-1421.
26. Wu, J., Chen, X., Yao, H., & Zhang, D. (2021). Multi-timescale assessment of propagation thresholds from meteorological to hydrological drought. *Science of the Total Environment*, 765, PP144232.
27. Mondal, A., & Mujmard, P.P. (2015). Regional hydrological impacts of climate change: implications for water management in India. *Proceeding of the international Association of Hydrological Sciences*, 366, 34-43.

Investigating the relationship between the spatial and temporal distribution of meteorological and hydrological drought indicators (Case study: Jiroft Plain)

Zahra Senjari,¹ Mehdi Hayatzadeh,^{2*} Farzaneh Fotohi Firuzabad,³ Ali Fathzadeh,⁴
Fatemeh Roustai Sadrabad⁵

Received: 24/09/2024

Accepted: 12/04/2025

Extended Abstract

Introduction: Drought is an unavoidable natural disaster with far-reaching detrimental effects on various sectors, including water resources, agriculture, and the environment. Effective drought management necessitates identifying the dominant climatic factors that contribute to these events. Consequently, employing weather indicators and models, alongside analyzing the distribution of variables to accurately understand the underlying processes, is essential. Given that over two-thirds of Iran's regions are classified as arid and semi-arid – a condition partly attributed to the Alborz and Zagros mountain ranges hindering rain clouds from reaching the central and eastern parts – and experiencing greater precipitation variability, the central and southern regions of the country face more significant environmental damage. This research was conducted to investigate the spatial and temporal distribution of meteorological (SPI) and hydrological (SDI) drought indices.

Materials and Methods: In this research, precipitation data from 10 synoptic and climatology stations (covering the common statistical period of 1996-2020) and 7 hydrometric stations (covering the statistical period of 1993-2016) were utilized. Geostatistical methods were employed to analyze the spatial distribution of drought indicators, while the Mann-Kendall test was used to assess the temporal distribution and identify trends in changes. Pearson's correlation coefficient was calculated to examine the relationship between the SPI and SDI indices. The Mann-Kendall test, a non-parametric method, requires no specific distributional assumptions, making it suitable for time series that do not follow a particular distribution. The null hypothesis of this test posits randomness and the absence of a trend in the data series. Rejection of the null hypothesis indicates the presence of a statistically significant trend. Trend detection, as well as the identification of abrupt changes in the data, can be achieved through the Mann-Kendall test using both the test statistic (T) and the Mann-Kendall diagram. By inputting discharge and precipitation data into the software, the trend (or lack thereof) and any sudden shifts within the desired statistical period can be visualized using the corresponding graphs for each parameter.

Results: The results of the SPI index revealed that very severe droughts occurred in some years over both short-term and long-term periods (spanning 8 consecutive years). According to the SPI classification, precipitation amounts during these years were significantly below normal. Conversely, the SDI index results for the hydrometric stations indicated below-normal flow and prevalent dry conditions in the 2000s (specifically the Iranian calendar decade of the 1380s), particularly in August, December, and March. The Kahnag-Shibani, Kenaroieh, Zarin, Dehroud, and Qhala-Rigi stations showed consistency between the meteorological and hydrological indicators, suggesting that in most years with below-normal rainfall, river flow was negatively impacted, leading to reduced flow and a downward trend. Pearson's correlation coefficient results demonstrated the strongest correlation between the SPI and SDI indices at 12, 24, and 48-month time scales.

1. Master's student, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University; Email: zahasalemi313@gmail.com

2. Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University; Email: mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

3. Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University; Email: fotouhi@ardakan.ac.ir

4. Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University; Email: Fat@ardakan.ac.ir

5. Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University; Email: froustaei@ardakan.ac.ir

Discussion and Conclusion: Across all stations, no statistically significant relationship was found between the meteorological and hydrological drought indices. In other words, instances of hydrological drought did not consistently coincide with meteorological drought conditions. One potential reason for this discrepancy could be the influence of upstream flows contributing to baseflow at the hydrometric stations. Within the studied area, the most significant fluctuations in flow rate occurred during March, December, and August, while April, May, July, September, and November exhibited relatively stable and good flow conditions. A primary factor contributing to short-term flow variations is the utilization of moving averages and changes in precipitation across different months in the calculation of the SDI index. The analysis of SPI and SDI index variations revealed significant differences between the existing stations at the 95% and 99% confidence levels. Overall, it can be concluded that changes in river flow are influenced by the rainfall conditions in the region, albeit with a time lag.

Keywords: Zoning, IDW, drought, Maan-Kendall.