

پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری حوزه آبخیز چالوس مبتنی بر شاخص خشک‌سالی

رضا چمنی^۱، سید حمیدرضا صادقی^{۲*}، مهدی وفاخواه^۳ و مریم نقدی^۴

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ^۲ استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور و ^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

چکیده

خشک‌سالی از جمله بلاهای طبیعی مرتبط با آب و هوا و یکی از بزرگ‌ترین تهدیدهای بقای انسان است که تأثیرات نامطلوبی بر پایداری اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی می‌گذارد. حال آن‌که مقوله‌های مرتبط بر آن و از جمله تأثیر آن بر سلامت حوزه آبخیز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس، در این پژوهش سعی شده است تا سلامت حوزه آبخیز چالوس بر اساس تغییرات پایایی (R_{el})، تاب‌آوری (R_{es}) و آسیب‌پذیری (V_{ul}) تحت تأثیر خشک‌سالی مستند به دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴ مورد ارزیابی قرار گیرد. برای انجام این پژوهش، داده‌های بارندگی نه ایستگاه با روش عکس مجذور فاصله برای آبخیز میان‌یابی شد. سپس، با تعیین میانگین و انحراف معیار داده‌ها، شاخص خشک‌سالی (SPI) تعیین شد. همچنین، برای محاسبه شاخص‌های R_{el} ، R_{es} و V_{ul} از مقدار میانه شاخص SPI استفاده شد. سپس، با محاسبه مقدار میانگین هندسی این شاخص‌ها وضعیت کلی سلامت آبخیز تعیین شد. نتایج پژوهش نشان داد، شاخص SPI در دوره آماری مذکور با مقادیری بین $-۱/۴۳$ و $۲/۲۵$ الگویی همانند بارندگی داشته و با افزایش بارندگی در انتهای دوره، این شاخص نیز مقادیر مثبت بیشتری را به خود اختصاص داده است. ارزیابی سلامت آبخیز نیز نشان داد که شاخص‌های R_{el} ، R_{es} و V_{ul} به ترتیب $۰/۵$ ، $۰/۲۳$ تا $۰/۶۲$ و $۰/۰۶$ تا یک را داشته است. میانگین هندسی این شاخص‌ها نیز بین $۰/۱۹$ تا $۰/۵۸$ بود. نهایتاً متوسط شاخص سلامت حوزه آبخیز چالوس بر اساس پویایی شاخص خشک‌سالی $۰/۴۵$ و در گروه "متوسط" بود که نتایج به دست آمده دلالت بر متوسط بودن شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه و طبعاً نقش ماشه‌ای دخالت‌های انسانی در تهدید سلامت آبخیز چالوس دارد. یافته‌های بررسی نقش مهمی در تبیین شیوه‌های مدیریت سازگار حوزه آبخیز مذکور ایفا خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: آبخیز سالم، ارزیابی سلامت بوم‌سازگان، تخریب آبخیز، شاخص SPI، مدیریت جامع آبخیز

مقدمه

عملکردهای مناسب محیط زیستی دارند (Hamel و همکاران، ۲۰۱۸؛ Alilou و همکاران، ۲۰۱۹؛ Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۹). امروزه فعالیت‌های انسانی، کاهش آب در دسترس، تخریب اراضی (Sadoddin و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mosaffaie و همکاران، ۲۰۱۵)

حوزه‌های آبخیز سالم نقش اساسی در ارائه خدمات مختلف از جمله منابع آب، حفاظت از زیستگاه، کنترل فرسایش و رسوب، کنترل سیلاب، تنظیم آب و هوا، مسکن، رفع نیازهای فرهنگی و

دلیل، اهمیت کمی کردن شاخص‌ها و روش‌های ارزیابی سلامت حوضه‌ها انکارناپذیر است (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، روش‌ها و مدل‌های متنوعی برای ارزیابی خشک‌سالی در حوضه‌های آبخیز ارائه شده است (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۸). مدل پایایی^۱ (R_{el})، تاب‌آوری^۲ (R_{es}) و آسیب‌پذیری^۳ (V_{ul}) از جمله مدل‌هایی است که امروزه در زمینه ارزیابی سلامت آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۶). چارچوب $R_{el}R_{es}V_{ul}$ در ابتدا به-وسیله Hashimoto و همکاران (۱۹۸۲) برای توصیف عملکرد یک سامانه مخزن چند منظوره ارائه شده است. در این روش، قابلیت اطمینان تکرار یا احتمال وجود حوضه آبخیز در حالت رضایت‌بخش در کل دوره ارزیابی را اندازه‌گیری می‌کند. تاب‌آوری میزان رسیدن یک سامانه به حالت مطلوب بعد از شکست را بیان می‌کند و آسیب‌پذیری میزان نامطلوب بودن وضعیت و یا عوامل ایجادکننده را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ با رویکردی جامع به تجزیه و تحلیل احتمال موفقیت یا شکست یک حوضه آبخیز و میزان بهبودی آن از حالت‌های نامطلوب می‌پردازند. ارزیابی شاخص‌های جامع $R_{el}R_{es}V_{ul}$ در طولانی‌مدت، درکی عمیق در مورد عملکرد حوضه آبخیز در شرایط متغیر آب و هوایی را فراهم می‌کند (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات متعددی (Sobral و همکاران، ۲۰۱۹؛ Danandeh Mehr و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ali و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ahmed Suliman و همکاران، ۲۰۲۰؛ Santos و همکاران، ۲۰۲۱) به ارزیابی خشک‌سالی با شاخص‌های دیگر از جمله SPI پرداخته‌اند و خشک‌سالی را در مناطق مختلف طبقه‌بندی کرده‌اند. در ایران نیز می‌توان به مطالعات مختلف (MirAkbari و همکاران، ۲۰۱۸؛ Mesbahzadeh و Alipour، ۲۰۱۸؛ Rezaei و همکاران، ۲۰۱۸؛ Yusefi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Hosseinpour و Fatehi Marj، ۲۰۱۸؛ Olighiniya و همکاران، ۲۰۱۹؛ Madanchi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Jahangir و همکاران، ۲۰۱۹) در زمینه ارزیابی

Hazbavi و Sadeghi، ۲۰۱۷)، تغییر در پوشش گیاهی و خاک (Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۸)، تشدید شهرنشینی، حذف پوشش گیاهی و جایگزینی آن با سطوح غیرقابل نفوذ، جنگل‌زدایی (Mehdi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Hoque و همکاران، ۲۰۱۴)، عدم وجود یک سامانه مدیریتی کارآمد و ساز و کارهای مناسب و بروز خشک‌سالی‌ها (Won و همکاران، ۲۰۲۰)، بیش از گذشته، سلامت حوضه‌ها را متأثر ساخته، سبب بروز اختلالات چشم‌گیری در ارائه خدمات حوضه آبخیز شده است (Sadoddin و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mosaffaie و Salehpour Jam، ۲۰۱۸). در این بین، خشک‌سالی‌ها به دلیل تغییرات مکانی، زمانی و منطقه‌ای بودن، پیچیده هستند و از آنجا که با شدت‌های مختلفی اتفاق می‌افتند، اثر تجمعی آن‌ها و شناسایی شروع و پایان آن‌ها دشوار است (Tirivarombo و همکاران، ۲۰۱۸). خشک‌سالی به‌طور طبیعی تقریباً در هر نوع آب و هوایی رخ می‌دهد (Freire-González و همکاران، ۲۰۱۷؛ Abeyingha و Rajapaksha، ۲۰۲۰)، اما گاهی اوقات خشک‌سالی‌ها به حوادث شدید و فاجعه‌های جدی و خطرناکی تبدیل می‌شوند که می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر بخش‌های مختلف جامعه از جمله منابع آب و محیط زیست داشته باشند (Won و همکاران، ۲۰۱۸). چنانچه این عوامل از حد آستانه خود عبور کنند، مقدمات تخریب حوضه‌های آبخیز را فراهم می‌کند (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۶). این تخریب مداوم در حوضه‌ها، سلامت و ارائه خدمات برای موجودات زنده و انسان را کاهش می‌دهد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۹). وجود این مشکلات، افزایش اهمیت و نیاز به یک رویکرد یکپارچه برای مدیریت آبخیزها را افزایش می‌دهد (Wang و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mosaffaie و Salehpour Jam، ۲۰۱۸). به‌طوری‌که هدف آن حفظ و بازیابی سلامت و بهره‌وری بوم‌سازگان‌ها است (Mosaffaie و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجا که شناخت تمام برهم‌ریختگی‌ها و عوامل ایجادکننده آن‌ها در حوضه‌ها و طبعاً پیش‌گیری یا پیش‌بینی آن‌ها اغلب دشوار است، لذا، استفاده از شاخص‌های مختلف برای نظارت بر وضعیت سلامت یا عملکرد یک حوضه خاص، ضروری است. به همین

¹ Reliability

² Resilience

³ Vulnerability

سطح زمین، آبخیزی پرشیب و کوهستانی با جهت کلی شمالی محسوب می‌شود.

داده‌های اقلیمی: در این پژوهش از داده‌های سالیانه بارندگی نه ایستگاه باران‌سنجی برای دوره ۱۳۹۴-۱۳۶۵ استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها در مقیاس حوزه آبخیز یا زیرحوضه‌ها نیاز به بارندگی متوسط حوضه یا زیرحوضه دارد که دارای تغییراتی نسبت به داده‌های نقطه یا داده‌های شبکه‌ای است. برای این منظور، روش عکس مجذور فاصله از جمله روش‌هایی است که کاربرد آن در استان مازندران توصیه شده است (Hakimdoust و همکاران، ۲۰۱۷). لذا، از این روش برای تخمین بارندگی متوسط سالیانه آبخیز (R) طبق رابطه (۱) استفاده شد (Tirivarombo و همکاران، ۲۰۱۸).

$$R = \sum_1^n \left[\frac{R_i}{d^2} \right] \div \left[\frac{1}{d^2} \right] \quad (1)$$

که در آن، R_i و d^2 به ترتیب بارش در ایستگاه i و فاصله زیرحوضه تا ایستگاه i است.

محاسبه SPI: شاخص ارزیابی خشک‌سالی بر اساس توزیع احتمال بارش طولانی‌مدت با استفاده از تابع گاما طراحی شده است (Mckee و همکاران، ۱۹۹۳). بارش نرمال شده و SPI به‌عنوان تعداد انحراف داده‌هایی است که بارش مشاهده شده از میانگین بلندمدت خود منحرف می‌شود. بنابراین، می‌توان از آن برای تعریف و مقایسه شرایط خشک‌سالی در مناطق مختلف استفاده کرد. این شاخص تخمین مناسب و قابل اعتمادی از میزان، شدت و تغییرات فضایی خشک‌سالی‌ها ارائه می‌دهد. اگر بارش بیشتر از میانگین بلندمدت باشد، SPI مثبت است و اگر بارش کمتر از درازمدت بارندگی باشد، SPI منفی است. برخلاف سایر شاخص‌های خشک‌سالی، استفاده از SPI از دشواری کمتری برخوردار است، زیرا فقط به یک سری داده ورودی واحد از بارش طولانی‌مدت نیاز دارد (Hughes و Smakhtin، ۲۰۰۴). این شاخص به شرح رابطه (۲) محاسبه می‌شود که در آن X و X_i و σ به ترتیب بارش مشاهده‌ای، میانگین بارش و انحراف معیار دوره بارندگی است.

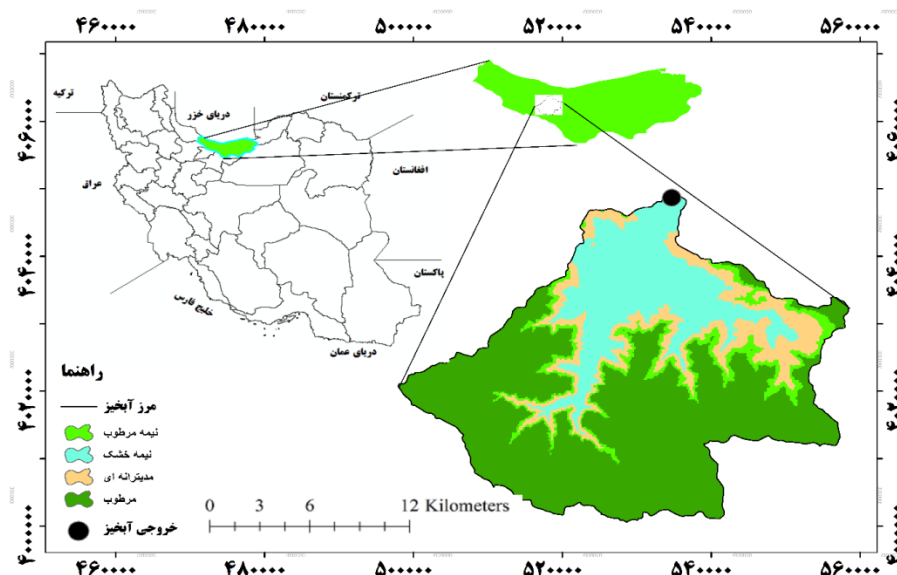
$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (2)$$

خشک‌سالی با شاخص SPI اشاره کرد. اما مطالعات کمتری ارزیابی توأم خشک‌سالی با شاخص‌های پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری را مورد استفاده و ارزیابی قرار داده‌اند. در این رابطه، Hazbavi و همکاران (۲۰۱۸) قابلیت تغییر شاخص‌های قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری با توجه به الگوهای خشک‌سالی در سه حوزه آبخیز شازند در ایران، Xarrama در پرتغال و Foyle در ایرلند شمالی ارزیابی نمودند. همچنین، Sadeghi و Hazbavi (۲۰۱۷) تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ مبتنی بر خشک‌سالی در حوزه آبخیز شازند برای سه سال ۱۹۸۶، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۸ را ارزیابی و بررسی کردند.

نتایج پژوهش‌های انجام‌شده با استفاده از شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ امکان استفاده از این شاخص‌ها در زمینه‌های مختلف از جمله خشک‌سالی را تأیید می‌کنند (Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۸). لذا، در این پژوهش سعی شده است با کمی کردن شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ ، درک صحیح و قابل قبولی از میزان پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری حوزه آبخیز چالوس استان مازندران در مقابله با خشک‌سالی و تغییرات بارندگی در طول دوره ۱۳۹۴-۱۳۶۵ را ارائه کرد. همچنین، تغییرپذیری شاخص SPI بر پایه شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ را تجزیه و تحلیل و وضعیت آبخیز را نسبت به میزان تغییرات خشک‌سالی در طول زمان ارزیابی کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز چالوس (شکل ۱) با مختصات جغرافیایی $51^{\circ} 40' 25''$ تا $50^{\circ} 58' 22''$ طول شرقی و $36^{\circ} 8' 56''$ تا $36^{\circ} 36' 1''$ عرض شمالی، یکی از حوزه‌های آبخیز دریای خزر با مساحت $151620/6$ هکتار است (Vafakhah و همکاران، ۲۰۱۵). به لحاظ آب و هوایی نیز اقلیم نیمه‌مرطوب سرد تا مرطوب سرد بخش اعظمی از آبخیز را در بر می‌گیرد. در نقاط پست آن اقلیم نیمه‌خشک سرد نیز دیده می‌شود. بارندگی آن نیز از حدود ۲۸۸ تا ۱۵۳۸ میلی‌متر متغیر است (GhorbanniyaKhaybari و همکاران، ۲۰۱۷). به لحاظ ارتفاعی، حوزه آبخیز چالوس با کمینه و بیشینه ارتفاع ۱۵۸ و ۴۲۶۰ متر از



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز چالوس و پراکنش مکانی اقلیم زیر آبخیزهای آن

$$Vulnerability(v_{ul}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^T \left\{ \frac{L_{obs}(i) - L_{std}(i)}{L_{std}(i)} \right\} H[L_{obs} - L_{std}(i)] \quad (5)$$

$$Y = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (6)$$

برای نشان دادن وضعیت کلی سلامت حوزه آبخیز از شاخص‌های سلامت میانگین گرفته می‌شود به نحوی که میزان اثر هر کدام از شاخص‌ها در سلامت حوزه آبخیز دخالت داده شده، نمایی کلی از سلامت آن ارائه می‌شود. برای تعیین این شاخص نیاز به تعیین وزن و تجمیع عملکرد شاخص‌هاست (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۹). لذا، برای محاسبه $R_{el}R_{es}V_{ul}$ نهایی از سه شاخص پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری با توجه به ضرورت لحاظ حساسیت بیشتر نسبت به تغییرات متغیرهای جداگانه بر اساس رابطه (۷)، میانگین هندسی ($R_{el}R_{es}V_{ul}$) گرفته شد (Wiegand و همکاران، ۲۰۱۳).

$$(R_{el}R_{es}V_{ul}) = \left[\prod_{i=1}^3 R_{el} \cdot R_{es} \cdot V_{ul} \right]^{1/3} \quad (7)$$

نتایج و بحث

تغییرات بارندگی و شاخص SPI: متوسط بارندگی سالیانه ایستگاه‌های مورد استفاده و شاخص SPI آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این دوره کمترین و بیشترین بارندگی در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۶۶

محاسبه شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$: در این پژوهش، برای محاسبه شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ از تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی ماهانه SPI از روابط (۳) تا (۵) به شرح زیر استفاده شده است. در این روابط M تعداد وقایع شکست است (تعداد ماه‌هایی که SPI زیر آستانه قرار می‌گیرد)، $d(j)$ مدت زمان رویداد شکست j th است، T تعداد کل فواصل زمانی، $L_{obs}(i)$ مقدار مشاهده شده، $L_{std}(i)$ مقدار حد آستانه و $[H]$ عملکرد تابع پله‌ای Heaviside^۱ است. این تابع برای جلوگیری از ورود حوادث شکست در محاسبه آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار کل $[H]$ در معادله مزبور برای مقادیر منفی، صفر و مقادیر مثبت به ترتیب صفر، یک و ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، استانداردسازی داده‌ها برای حذف اثرات بزرگی و ایجاد قابلیت مقایسه داده‌ها با یکدیگر صورت گرفت. در این پژوهش، پس از محاسبه SPI هر زیر آبخیز، اقدام به استانداردسازی آن‌ها شد. برای این منظور از رابطه (۶) استفاده شد (Hazbavi و Sadeghi، ۲۰۱۷).

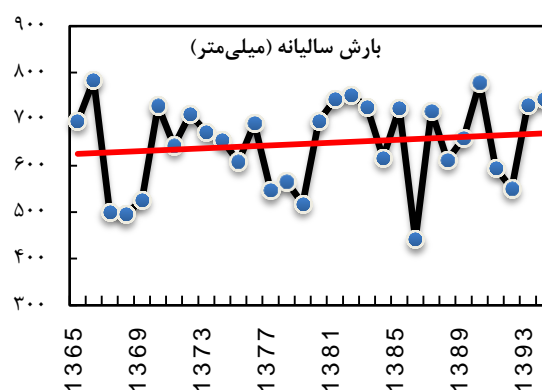
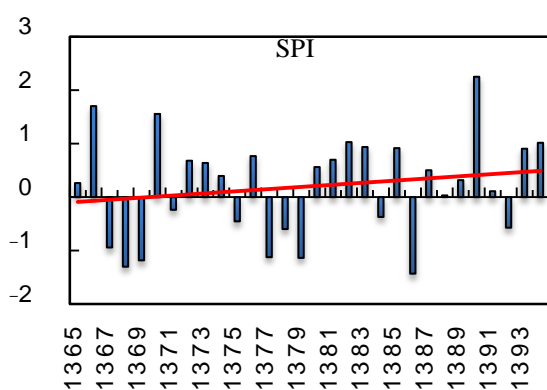
$$Reliability(R_{el}) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d[j]}{T} \quad (3)$$

$$Resilience(R_{es}) = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (4)$$

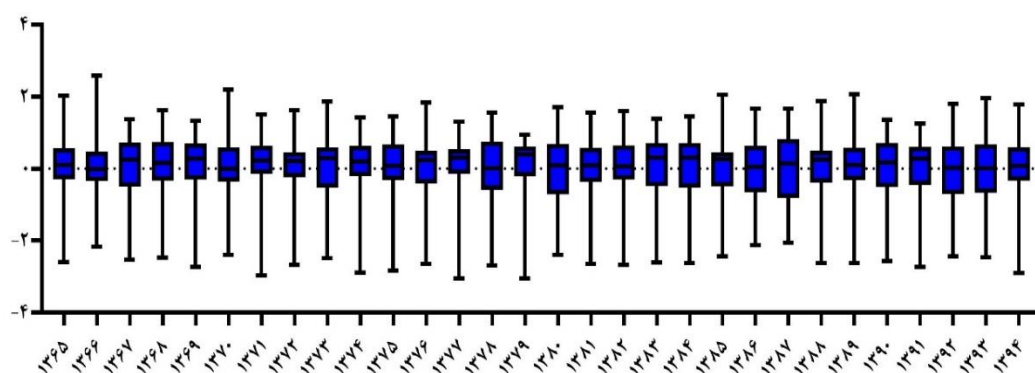
^۱ Heaviside step function

حوزه آبخیز چالوس به‌وسیله Akbari Nudehi (۲۰۱۹) و Karimi و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأیید شده است. نتایج کمی شاخص SPI نشان داد، تغییرات زمانی خشک‌سالی در حوزه آبخیز چالوس از الگوی بارندگی تبعیت می‌کند و با تغییر در میزان بارش این شاخص نیز تغییر می‌کند و دامنه تغییرات این شاخص در آبخیز ۱/۴۳- تا ۲/۲۵ متغیر است که نشان می‌دهد، خشک‌سالی‌هایی با شدت بالاتر نیز در دوره‌های گذشته در این حوضه اتفاق افتاده است و می‌تواند منابع آب حوضه را نیز تحت تأثیر قرار دهد. مطالعات Mohhammadpour Zidi و همکاران (۲۰۱۴) نیز تأیید می‌کند که در منطقه غرب مازندران خشک‌سالی‌هایی با درجه‌های "نرمال خشک"، "کمی خشک" و "خیلی خشک" رخ داده است که نتایج و یافته‌های این پژوهش را تأیید می‌کند.

به‌ترتیب به میزان ۴۴۰/۷ و ۷۸۴ میلی‌متر اتفاق افتاده است. شکل ۲، نشان می‌دهد که شاخص روند تغییرات SPI در دوره مطالعاتی افزایشی بوده و کمترین و بیشترین مقادیر آن در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۰ به‌ترتیب ۱/۴۳- و ۲/۲۵ رخ داده است. تغییرات سالیانه شاخص SPI نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲، بارندگی حالت صعودی داشته است و در طول دوره افزایش می‌یابد. نتایج روندیابی آزمون من-کندال نیز نشان می‌دهد، بارندگی در سطح ۹۹ درصد دارای روند افزایشی و با شیب ۱/۹۸ میلی‌متر است. نتایج مطالعات پیشین (Khoshraveh و همکاران، ۲۰۱۳) نیز نشان داد که بارندگی در غرب استان مازندران و حوزه آبخیز چالوس در سطح ۹۹ درصد روند صعودی داشته است. کاربرد شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در استان مازندران مشتمل بر



شکل ۲- متوسط بارندگی سالیانه و شاخص SPI حوزه آبخیز چالوس



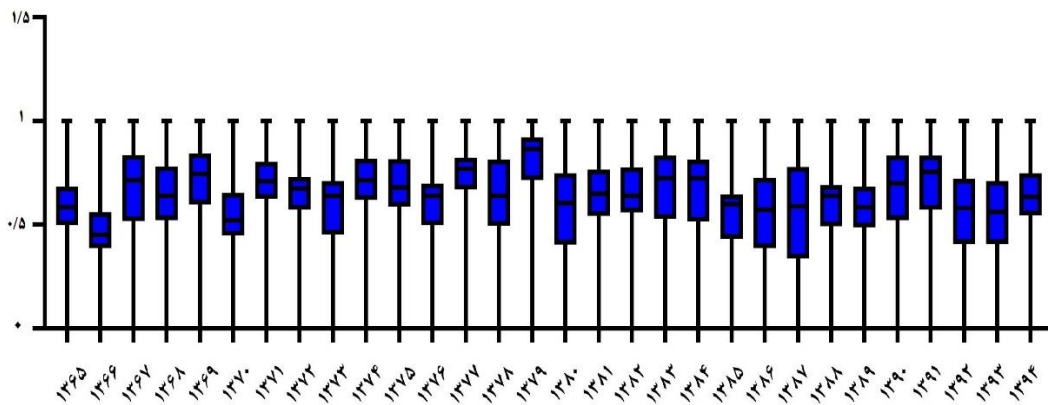
شکل ۳- تغییرات SPI سالیانه حوزه آبخیز چالوس

را پس از استانداردسازی برای دوره مورد مطالعه در حوزه آبخیز چالوس نشان می‌دهد. مطابق روابط (۳) تا (۵) تغییرات مقادیر $ReIResV_{ul}$ در حوزه آبخیز چالوس

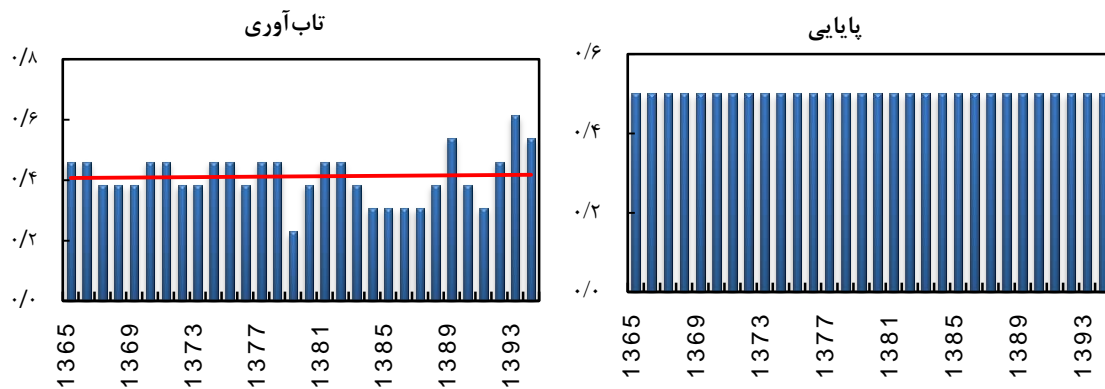
شاخص پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری: برای محاسبه شاخص‌های $ReIResV_{ul}$ نیاز به استاندارد کردن داده‌ها برای مقایسه بهتر است. شکل ۴، شاخص SPI

مطالعه به‌حالت پایدار نزدیک می‌شوند. جدول ۱ نشان می‌دهد، حوزه آبخیز چالوس در سال ۱۳۷۹ از کمترین میزان تاب‌آوری برخوردار بوده است. با کاهش تاب‌آوری، آسیب‌پذیری آبخیز نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در سال مذکور آبخیز با شاخص آسیب‌پذیری ۰/۰۶ بیشترین میزان آسیب‌پذیری را تجربه کرده است.

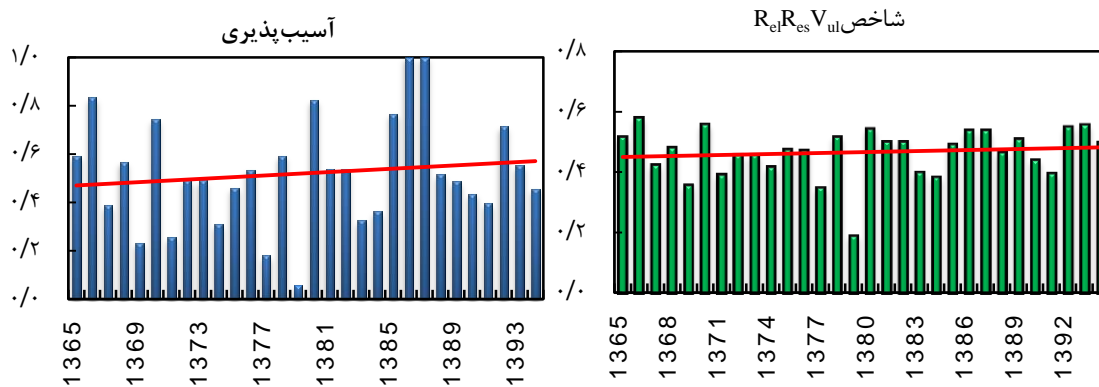
محاسبه شده، در شکل‌های ۵ و ۶ و جدول ۱ نشان داده شده است. در طول دوره مورد مطالعه، نوسانات زیادی در مقادیر $R_{el}R_{es}V_{ul}$ مشاهده می‌شود. مقادیر پایایی در یک مقدار برابر ۰/۵ ثابت شده است. اما برای شاخص‌های تاب‌آوری و آسیب‌پذیری به‌ترتیب مقادیری بین ۰/۲۳ تا ۰/۶۲ و ۰/۶۰ تا یک را به خود اختصاص داده است. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است که مقادیر $R_{el}R_{es}V_{ul}$ برای دوره مورد



شکل ۴- تغییرات SPI استانداردشده در حوزه آبخیز چالوس



شکل ۵- تغییرات سالیانه شاخص پایایی (R_{el}) و تاب‌آوری (R_{es}) حوزه آبخیز چالوس



شکل ۶- تغییرات سالیانه شاخص آسیب‌پذیری (V_{ul}) و شاخص $R_{el}R_{es}V_{ul}$ حوزه آبخیز چالوس

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های پایایی (R_{el})، تاب‌آوری (R_{es}) و آسیب‌پذیری (V_{ul}) زیرآبخیزها

V_{ul}	R_{es}	R_{el}	سال	V_{ul}	R_{es}	R_{el}	سال	V_{ul}	R_{es}	R_{el}	سال	V_{ul}	R_{es}	R_{el}	سال
۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۵	۱۳۸۹	۰/۵۴	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۸۱	۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۷۳	۰/۵۹	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۶۵
۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۹۰	۰/۵۴	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۸۲	۰/۳۱	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۷۴	۰/۸۳	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۶۶
۰/۴۰	۰/۳۱	۰/۵	۱۳۹۱	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۸۳	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۷۵	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۶۷
۰/۷۱	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۹۲	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۵	۱۳۸۴	۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۷۶	۰/۵۷	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۶۸
۰/۵۵	۰/۶۲	۰/۵	۱۳۹۳	۰/۷۷	۰/۳۱	۰/۵	۱۳۸۵	۰/۱۸	۰/۶۴	۰/۵	۱۳۷۷	۰/۲۳	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۶۹
۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۵	۱۳۹۴	۱	۰/۳۱	۰/۵	۱۳۸۶	۰/۵۹	۰/۶۴	۰/۵	۱۳۸۸	۰/۷۴	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۷۰
-	-	-	-	۱	۰/۳۱	۰/۵	۱۳۸۷	۰/۰۶	۰/۲۳	۰/۵	۱۳۷۹	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۵	۱۳۷۱
-	-	-	-	۰/۵۱	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۸۸	۰/۸۲	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۸۰	۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۵	۱۳۷۲

کندال نیز نشان می‌دهد که تغییرات آسیب‌پذیری در دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۴ معنی‌دار نبوده، این شاخص روند صعودی جزئی را تجربه کرده است. برای تعیین وضعیت حوزه آبخیز چالوس نسبت به شرایط خشک‌سالی، از شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ میانگین هندسی گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود، میانگین هندسی این سه شاخص نیز از الگوی شاخص‌ها پیروی می‌کند و با نزدیک شدن به انتهای دوره مورد مطالعه، این شاخص نیز روند صعودی داشته، افزایش می‌یابد. این افزایش نشان‌دهنده بهبود شرایط آبخیز نسبت به تغییرات زمانی خشک‌سالی است. با توجه به شکل ۶، کمترین میزان شاخص $R_{el}R_{es}V_{ul}$ در سال ۱۳۷۹ به میزان ۰/۱۹ اتفاق افتاده است. نتایج آزمون من-کندال این شاخص با شیب اندک روند صعودی داشته و در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد، این تغییرات معنی‌دار هستند. با توجه به شکل ۶، متوسط شاخص $R_{el}R_{es}V_{ul}$ حوزه آبخیز ۰/۴۵ محاسبه شد که نشان‌دهنده پایین بودن سطح سلامتی آبخیز نسبت به خشک‌سالی است و در صورت ادامه این روند، پایایی و انعطاف‌پذیری آبخیز در برابر خشک‌سالی کاهش و آسیب‌پذیری آبخیز افزایش خواهد یافت.

تغییرات مکانی و زمانی پیچیده بارندگی‌ها (Hakimdoost و همکاران، ۲۰۱۷) و به‌دنبال آن عدم ثبات شرایط حوزه آبخیز باعث افزایش عدم اطمینان در بهره‌برداری انسانی و استفاده از منابع آب و به دنبال آن، افزایش پتانسیل برای از دست دادن خدمات مختلف حوزه آبخیز، از جمله تأمین آب و کنترل سیل می‌شود (Min و همکاران، ۲۰۱۳؛ Milly و همکاران،

انتظار می‌رود، با تغییر در شرایط بارندگی‌ها، شاخص‌های $R_{el}R_{es}V_{ul}$ نیز تغییر پیدا کنند، به‌طوری‌که در سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۶۸ سه دوره متوالی آبخیز بارندگی کمتر از نرمال را دریافت کرده، این امر سبب آن شد، در این بازه زمانی آبخیز قدرت کافی و تاب‌آوری مناسب برای خروج از شرایط بحرانی را نداشته باشد. تغییر در میزان و زمان بارندگی‌ها و بعضاً عدم توانایی آبخیز در برگشت به شرایط مطلوب و قابل‌انتظار سبب شده است، آبخیز از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار باشد. از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۰ تغییرات آسیب‌پذیری آبخیز از دامنه تغییرات بیشتری برخوردار بوده است و در سال‌های مختلف تغییرات نسبت به هم فاحش‌تر بوده است. همان‌طور که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌شود، در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۱، ۱۳۷۷ و ۱۳۷۹ حوزه از بیشترین آسیب‌پذیری برخوردار بوده است، به‌طوری‌که سال ۱۳۷۹ با ضریب شاخص آسیب‌پذیری ۰/۰۶، آسیب‌پذیرترین سال در دوره مورد ارزیابی بوده است. این در حالی است که از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴ دامنه تغییرات شاخص آسیب‌پذیری کمتر شده و آبخیز از حالت پایدارتری برخوردار شده است. Khoshravesht و همکاران (۲۰۱۷) نیز با آشکارسازی تغییرات بارندگی شمال کشور بیان کردند، بارندگی‌ها در غرب استان مازندران و به‌خصوص در تمام زیرحوزه‌های آبخیز چالوس طی دوره ۴۰ ساله در سطح اطمینان ۹۹ درصد روند صعودی داشته است و این امر یکی از دلایل اصلی پایدار شدن تغییرات آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری آبخیز در بخش انتهایی دوره مورد مطالعه (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴) است. آزمون روندیابی من-

همچنین، افزایش پایایی و تاب‌آوری آبخیز باید در نظر گرفته شود. از طرفی، کاهش شاخص $ReIR_{es}V_{ul}$ نشان‌دهنده کاهش بارندگی و به دنبال آن کاهش منابع آب در آبخیز است که نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت مدیریتی و حفاظتی برای استفاده پایدار از منابع آب و همچنین، استقرار بدون مشکل پوشش گیاهی و تثبیت آن در بلندمدت است (Sadeghi و Hazbavi, ۲۰۱۷). در مطالعات مشابه نیز Hazbavi و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعات خود در سه حوزه آبخیز شازند ایران، Xarrama پرتغال و Foyle ایرلند دریافتند که تغییرات بارندگی و شرایط آب و هوایی از مهمترین عوامل مؤثر بر خشک‌سالی و شاخص‌های $ReIR_{es}V_{ul}$ هستند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از چارچوب ارزیابی تغییرات پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری برای ارزیابی وضعیت سلامت حوزه آبخیز چالوس استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد، حوزه آبخیز چالوس در دوره ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴ از پایایی ثابت (۰/۵) ولی تاب‌آوری و آسیب‌پذیری به ترتیب ۰/۲۳ تا ۰/۶۲ و ۰/۰۶ تا یک برخوردار بوده است. بر این اساس، متوسط شاخص سلامت حوزه آبخیز چالوس بر اساس پویایی شاخص خشک‌سالی ۰/۴۵ و در گروه "متوسط" قرار گرفته است. نتایج پژوهش می‌تواند زمینه هماهنگی‌های بیشتر بین سیاست‌گذاران، مدیران و بهره‌برداران محلی برای استفاده از راهبردهای موفق و شناسایی و اولویت‌بندی عوامل تخریب در حوزه را ایجاد کند. همچنین، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند گامی مهم و اساسی در راستای اقدامات بیشتر برای جلوگیری از تخریب و بهره‌گیری مناسب از منابع حوزه آبخیز را فراهم کند.

لذا، بهره‌برداری و استفاده از منابع آب به‌وسیله انسان، تحت تأثیر برنامه‌ریزی و ساخت پروژه‌های مختلف حفاظت از آب می‌تواند در ارائه و تسریع خدمات حوزه آبخیز مؤثر باشد. در حال حاضر، برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها و مدیریت منابع آب تقریباً همه پروژه‌ها بر اساس فرض ایستایی هیدرولوژیکی است (Hui و همکاران، ۲۰۱۸)، در حالی که تغییرات آب و هوایی و تشدید فعالیت‌های انسانی، ثابت بودن مجموعه‌های هواشناسی (به‌عنوان مثال بارش و رواناب) را تغییر داده است (Han و همکاران، ۲۰۱۹). در آینده، وابستگی رشد جمعیت و شهرنشینی به منابع آب بیشتر افزایش خواهد یافت که متعاقباً منجر به افزایش خطرات کمبود آب می‌شود. بنابراین، یک چالش اساسی مدیریت منابع آب تعیین چگونگی ارزیابی قابلیت اطمینان و آسیب‌پذیری پروژه‌های مربوط به آب در زمینه عدم اطمینان آب و هوایی است (Ren و همکاران، ۲۰۲۰). ارزیابی آسیب‌پذیری حوزه آبخیز بر اساس تغییرات آب و هوایی، پیش‌بینی استفاده از آب و پیش‌بینی تغییر کاربری زمین و وضعیت اقتصادی انجام می‌شود. انتظار می‌رود، در حوزه آبخیز، افزایش اراضی غیرقابل نفوذ باعث افزایش آسیب‌پذیری آبخیز و کاهش دسترسی به آب را در آینده به دنبال داشته باشد. همچنین، افزایش تراکم جمعیت در آبخیز، آسیب‌پذیری آن در دسترسی به آب را افزایش خواهد داد. به لحاظ اجتماعی نیز تغییر در میزان استقلال مالی ساکنان حوزه آبخیز شاخص مهمی در مدیریت منابع آب حوضه است، زیرا باعث ایجاد پشتیبانی قابل توجهی در پشتیبانی عمومی برای احیای حوضه‌های تحت تأثیر می‌شود. هر چه میزان استقلال مالی یک حوضه بالاتر باشد، ثبات منابع آب یک حوزه آبخیز بیشتر است (Ahn و Kim، ۲۰۱۹). لذا، اقدامات مناسب سازگاری با این شرایط و

منابع مورد استفاده

1. Abeysingha, N.S. and U.R.L.N. Rajapaksha. 2020. SPI-based spatiotemporal drought over Sri Lanka. *Advances in Meteorology*, 2020: 1-10.
2. Ahmed Suliman, A.H., T.A. Awchi, M. Al-Mola and S. Shahid. 2020. Evaluation of remotely sensed precipitation sources for drought assessment in semi-arid Iraq. *Atmospheric Research*, 242: 105007.
3. Ahn, S.R. and S.J. Kim. 2019. Assessment of watershed health, vulnerability and resilience for determining protection and restoration priorities. *Environmental Modelling and Software*, 122: 103926.

4. Ali, M., R.C. Deo, T. Maraseni and N.J. Downs. 2019. Improving SPI-derived drought forecasts incorporating synoptic-scale climate indices in multi-phase multivariate empirical mode decomposition model hybridized with simulated annealing and kernel ridge regression algorithms. *Journal of Hydrology*, 576: 164-184.
5. Alilou, H., O. Rahmati, V.P. Singh, B. Choubin, B. Pradhan, S. Keesstra and S.H.R. Sadeghi. 2019. Evaluation of watershed health using Fuzzy-ANP approach considering geo-environmental and topo-hydrological criteria. *Journal of Environmental Management*, 232: 22-36.
6. Danandeh Mehr, A., A.U. Sorman, E. Kahya and M. Hesami Afshar. 2019. Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 2: 1-40.
7. Freire-González, J., C. Decker and J.W. Hall. 2017. The economic impacts of droughts: a framework for analysis. *Ecological Economics*, 132: 196-204.
8. Ghorbanniya khaybari, V., M.M. Mirsanjari and M. Armin. 2017. Forecasting of forest land change in the Chaloosrood Watershed. *Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 8: 79-91 (in Persian).
9. Hakimdoust, S.Y., A. Mohhamadpour zindi and M.S. Gerami. 2017. Spatial analysis of showers in Mazandaran Province in the GIS environment. *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 26: 191-203 (in Persian).
10. Han, Z.M., S.Z. Huang, Q. Huang, G. Leng, H. Wang, L. He, W. Fang and P. Li. 2019. Assessing GRACE-based terrestrial water storage anomalies dynamics at multi-timescales and their correlations with teleconnection factors in Yunnan Province, China. *Journal of Hydrology*, 574: 836-850.
11. Hashimoto, T., D.P. Loucks and J. Stedinger. 1982. Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18: 14-20.
12. Hazbavi, Z., J.E.M. Baartman, J.P. Nunes, S.D. Keesstra and S.H.R. Sadeghi. 2018. Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. *Ecological Indicators*, 87: 196-208.
13. Hazbavi, S.D., Z. Keesstra, J.P. Nunes, J.E.M. Baartman, M. Gholamalifard and S.H.R. Sadeghi. 2018. Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates. *Ecological Indicators*, 93: 781-790.
14. Hazbavi, Z. and S.H.R. Sadeghi. 2017. Watershed health characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. *Land Degradation and Development*, 28: 1528-1537.
15. Hazbavi, Z., S.H.R. Sadeghi, M. Gholamalifard and A.A. Davudirad. 2019. Watershed health assessment using the Pressure-State-Response (PSR) framework. *Land Degradation and Development*, 31: 3-19.
16. Hoque, Y.M., C. Raj, M.M. Hantush, I. Chaubey and R.S. Govindaraju. 2014. How do land-use and climate change affect watershed health? a scenario-based analysis. *Water Quality, Exposure and Health*, 6: 19-33.
17. Hosseinpour, M. and A. Fatehi Marj. 2018. Spatial analysis of meteorological drought during the first half of the water year 2013-2014 compared to the same period of the last water year using SPI and PN indexes in Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10: 495-506 (in Persian).
18. Hui, R., J. Herman, J. Lund and K. Madani. 2018. Adaptive water infrastructure planning for nonstationary hydrology. *Advances in Water Resources*, 118: 83-94.
19. Jahangir, M.H., L. Noor Azar and S.M.E. Azimi. 2019. Analysis of the head of drought branches SPTI, SPI, SPEI using SOFM roots compared network in the province of Chahar Mahal Bakhtiari. *Eco Hydrology*, 6: 837-847 (in Persian).
20. Karimi, V. and D. Akbari Nudehi. 2019. Comparison of meteorological drought indices in Mazandaran Province. *Nayvar*, 43: 73-85 (in Persian).
21. Karimi, V., M. Habibnejad roshhan and A. Abkar. 2011. Investigation of meteorological drought Indexes in Mazandaran synoptic stations. *Investigation of meteorological drought indices in synoptic stations of Mazandaran. Irrigation and Water Engineering*, 2: 15-25 (in Persian).
22. Khoshravesh, M., M. Mir Naseri and M. Pesar Koloo. 2017. Change detection of precipitation trend of northern part of Iran using Mann-Kendall non-parametric test. *Journal of Watershed Management Research*, 8: 223-231 (in Persian).
23. Madanchi, P., K.M. Shahdi, K. Habibnejad and A. Fatehi Marj. 2019. Zoning climatic drought and drought magnitude using SPI Index and Kirijing geostatistical method, case study: Kerman Province. *Irrigation and Water Engineering of Iran*, 10: 203-226 (in Persian).
24. McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. AMS, Boston, MA. 179-184.

25. Mehdi, B., R. Ludwig and B. Lehner. 2015. Evaluating the impacts of climate change and crop land use change on Streamflow, Nitrates and Phosphorus: a modeling study in Bavaria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4: 60-90.
26. Mesbahzadeh, T. and N. Alipour. 2018. Evaluation of the effect of drought on the occurrence of dust phenomenon using PNI, SPI and ZSI indices. *Rangeland and Watershed Management*, 71: 505-5015 (in Persian).
27. Milly, P.C.D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z.W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier and V. Kryanova. 2015. On critiques of "stationarity is dead: water management? *Water Resources Research*, 51: 7785-7789.
28. Min, S.K., X. Zhang, F.W. Zwiers and G.C. Hegerl. 2013. Human contribution to more intense precipitation extremes. *Nature*, 498: 378-381.
29. Mir akbari, M., Gh. Mortezaei Feriz Hendi and M. Mohseni Saravi. 2018. Investigation of the effect of meteorological drought on surface and groundwater resources by GRI, SPI, SPEI and SDI indices. *Watershed Management Science and Engineering*, 12: 70-80 (in Persian).
30. Mohamadpour zidi, A., K. Bozorgmer and S.Y. Hahimdoust. 2014. Spatial study of climatic drought based on standard precipitation SPI, case study: Mazandaran Province. *Geographical Arrangement of Space*, 4: 179-194 (in Persian).
31. Mosaffaie, J. 2015. Comparison of two methods of regional flood frequency analysis by using L-moments. *Water Resources Management*, 42: 313-321.
32. Mosaffaie, J. and A. Salehpour Jam. 2018. Economic assessment of the investment in soil and water conservation projects of watershed management. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 2-10.
33. Munir Hayet Khan, M., N. Shazwani Muhammad and A. El-Shafie. 2020. Wavelet based hybrid ANN-ARIMA models for meteorological drought forecasting. *Journal of Hydrology*, 590: 125380.
34. Olighiniya, T., N. Rasuli Majd and A. Hezar Jeribi. 2019. Evaluation and comparison of drought indices of West Azerbaijan Province using PI, CZI, PNI indexes and Geographic Information System (GIS). *Irrigation Science and Engineering*, 42: 175-188 (in Persian).
35. Poff, N.L., C.M. Brown, T.E. Grantham, J.H. Matthews, M.A. Palmer, C.M. Spence, R.L. Wilby, M. Haasnoot, G.F. Mendoza, K.C. Dominique and A. Baeza. 2016. Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Climate Change*, 6: 25-34.
36. Ren, K., S. Huang, Q. Huang, H. Wang, G. Leng, W. Fang and L. Li. 2020. Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources. *Journal of Cleaner Production*, 252: 119806.
37. Rezaei, H., N. Khanmohamadi, M. Montaseri and J. Behmanesh. 2018. Evaluating the selection of the most suitable probability distribution function for using the RDI and SPI drought indices. *Journal of Soil and Water Science*, 25: 29-40 (in Persian).
38. Sadeghi, S.H.R., Z. Hazbavi and M. Gholamalifard. 2019. Interactive impacts of climatic, hydrologic, and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment*, 648: 880-893.
39. Sadeghi, S.H.R. and Z. Hazbavi. 2017. Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought index, case study: Shazand Watershed in Iran. *Science of the Total Environment*, 587: 168-176.
40. Sadeghi, S.H.R. and Z. Hazbavi. 2016. Watershed health (part 1) conceptual model of reliability, flexibility and vulnerability. *Extension and Development of Watershed Management*, 14: 39-43 (in Persian).
41. Sadoddin, A., V.B. Sheikh, M. Ownegh, A. Najafi Nejad and S.H.R. Sadeghi. 2016. Development of a national mega research project on the integrated watershed management for Iran. *Environmental Resources Research*, 4: 231-238.
42. Santos, C.A.G., R.M.B. Neto, T.V.M. do Nascimento, R.M. da Silva, M. Mishra and T.G. Frade. 2021. Geospatial drought severity analysis based on PERSIANN-CDR estimated rainfall data for Odisha state in India (1983-2018). *Science of the Total Environmental*, 750: 141258.
43. Smakhtin, V.U. and D.A. Hughes. 2004. Review, automated estimation and analyses of drought indices in South Asia. *International Water Management Institute*, 3: 1-24.
44. Sobral, B.S., J.F. de Oliveira-Júnior, G. de Gois, E.R. Pereira-Júnior, P.M. de Bodas Terassi, J.G.R. Muniz-Júnior and M. Zeri. 2019. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. *Atmospheric Research*, 220: 141-154.
45. Tirivarombo, S., D. Osupile and P. Eliasson. 2018. Drought monitoring and analysis: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [SPEI] and Standardized Precipitation Index [SPI]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 106: 1-10.
46. Vafakhah, M., M.R. Javadi and J. Najafi Majed. 2015. The effect of land use change on runoff in Chalousrood Watershed. *Eco Hydrology*, 2: 211-220 (in Persian).

47. Van Loon, A.F. and H.A.J. van Lanen. 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research*, 49: 1483–1502.
48. Wang, G., Sh. Mang, H. Cai, Sh. Liu, Zh. Zhang, L. Wang and J. Innes. 2016. Integrated watershed management: evolution, development and emerging trends. *Journal of Forestry Research*, 27: 967–994
49. Wiegand, A.N., C. Walker, P.F. Duncan, A. Roiko and N. Tindale. 2013. A systematic approach for modelling quantitative lake ecosystem data to facilitate proactive urban lake management. *Environmental Systems Research*, 2: 1-12.
50. Won, J., J. Choi, O. Lee and S. Kim. 2020. Copula-based Joint Drought Index using SPI and EDDI and its application to climate change. *Science of the Total Environment*, 744: 140701.
51. Yusefi, H., A.M. Kashki, A. Karami and E. Rihani. 2018. Comparison and configuration of groundwater quality in Bojnourd Plain during drought and wet seasons using indicators SPI, RAI, and PN. *Eco Hydrology*, 5: 993-1005 (in Persian).