

ارزیابی تاثیر خشکسالی اقلیمی بر کیفیت جریان‌های آب سطحی استان کردستان، غرب ایران

مجید ملکی^۱، آریتا بهبهانی‌نیا^{۲*}، مینا مکی‌آقا^۳ و بهزاد شاهمرادی^۴

۱) دانشجوی دکتری تخصصی رشته مدیریت محیط‌زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲) دانشیار گروه محیط زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. *پارانه نویسنده مسئول مکاتبات: az.bebahaninia@iau.ac.ir

۳) استادیار گروه محیط زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

۴) استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

چکیده

ارزیابی کمی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی و مکانی و بررسی تاثیر آن بر کیفیت منابع آب سطحی پیش‌نیاز ضروری و مهم برای تسهیل در مدیریت موثر منابع آب و سازگاری مناسب با شرایط خشکسالی در هر منطقه به‌شمار می‌آید. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاثیر خشکسالی اقلیمی بر کیفیت منابع آب سطحی در استان کردستان انجام شد. بدین منظور، نسبت به جمع‌آوری آمار مقادیر روزانه بارش، دما، تبخیر و سنجه‌های کیفی آب از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان در دوره آماری ۳۴ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۸) اقدام شد. برای کمی‌سازی و تعیین سال‌های شاخص خشکسالی و ترسالی در دوره آماری مورد مطالعه، مقادیر شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده محاسبه شد. نتایج نشان داد مقادیر محاسبه شده شاخص طی دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۱۸ در دامنه ۱/۳۳- تا ۱/۷۰ متغیر بوده و شرایط اقلیمی «خشکسالی متوسط» تا «ترسالی شدید» در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی می‌کند. نتایج ارزیابی رابطه بین خشکسالی با سنجه‌های کیفی آب بیان‌گر همبستگی مثبت و معنی‌دار بین خشکسالی با پارامترهای سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی همگی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱۰ بود ($p < 0/010$). در همین حال، روند افزایشی مقادیر سنجه‌های کیفی آب مربوط به سال شاخص خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت به میانگین طولانی‌مدت حاکی از تاثیر کاهش بارندگی، افزایش دما و تبخیر-تعرق بر کاهش کیفیت آب سطحی طی این دوره بود. همچنین، نتایج تعیین غلظت سنجه‌های کیفی آب از مناطق اقلیمی مختلف استان کردستان نشان داد بیشینه میانگین طولانی‌مدت غلظت سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیته و هدایت الکتریکی مربوط به منطقه شرقی و بیانگر تاثیر تنوع اقلیمی و بروز خشکسالی بوده است. از طرفی، نتایج توزیع مکانی میانگین مقادیر بارش، دما و تبخیر-تعرق موید تاثیر تنوع اقلیمی بر کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه بوده است. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش به‌عنوان مجموعه داده‌های اولیه و علمی برای مدیریت و بهینه‌سازی مصرف آب‌های سطحی در استان کردستان از طریق اقدامات کنترلی و تمهیدات مدیریتی به‌ویژه در مواقع خشکسالی مفید خواهد بود. افزون بر این، پایش منظم و دوره‌ای کیفیت جریان‌های سطحی به‌ویژه در مواقع خشکسالی برای حفظ کیفیت آب و تضمین بهره‌برداری پایدار از منابع آب سطحی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب سطحی، استان کردستان، خشکسالی اقلیمی، سنجه‌های کیفی آب، شاخص SPEI.

رودخانه‌ها به عنوان یکی از اجزای حیاتی پیکره‌های آب شیرین و منابع مهم تامین آب مورد نیاز جوامع انسانی (شرب، کشاورزی و صنعت)، نقش اساسی در توسعه و ثبات اقتصادی- اجتماعی جوامع ایفا می‌کنند. با این حال، آسیب‌پذیری کمی و کیفی این جریان‌های سطحی تحت تاثیر تنش‌ها و تغییرات محیطی ناشی از فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی چالشی مهم در بهره‌برداری پایدار از این منابع آبی است (طیبی و سبحان‌اردکانی، ۱۳۹۱؛ طباطبایی هاشمی و همکاران، ۱۴۰۲). در این خصوص، تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی به سبب تغییر در الگوی بارش (برف به باران)، نوسانات دما و تبخیر-تعرق یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی موثر در تغییرات کمی و کیفی منابع آب سطحی به شمار می‌آید (ایمانی‌بوژانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Hosseinzadeh Talaei et al., 2014).

خشکسالی هواشناسی به عنوان نمودی بارز از تغییرات اقلیمی، پیامد اصلی توازن افزایش دما و کاهش (کمبود) بارش در بازه‌ای معین نسبت به میانگین طولانی‌مدت در منطقه‌ای معین است (Imani Buzhani et al., 2024). بروز این پدیده به‌ویژه در مناطق خشک و نیم‌خشک نه تنها می‌تواند به واسطه کاهش کمی منابع آب سطحی از طریق کاهش تغذیه جریان‌های سطحی، بحران کمبود آب را تشدید کند، بلکه می‌تواند به سبب کاهش کیفیت آب از طریق افزایش دما، کاهش جریان آب و افزایش تبخیر منجر به افزایش مخاطرات بالقوه محیط‌زیستی، اقتصادی- اجتماعی و بهداشتی شود (Chen et al., 2024). در این خصوص، اعمال محدودیت و یا ممنوعیت توسعه استحصال از منابع آب سطحی در شرایط خشکسالی (بحرانی)، راهکاری مناسب جهت مدیریت کمی این منابع محسوب می‌شود. این در حالی است که تضمین حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع آب سطحی مستلزم ارزیابی تاثیر خشکسالی بر ویژگی‌های کیفی جریان‌های سطحی است. از طرفی، ارزیابی کمی خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی با استفاده از شاخص‌های مرتبط به منظور تسهیل در مدیریت موثر منابع آب و سازگاری مناسب با شرایط خشکسالی حایز اهمیت ویژه‌ای است. در

این خصوص، شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده^۱ به عنوان رویکرد ترکیبی نوین و مناسب، ابزاری مهم و کارآمد برای تعیین و پایش خشکسالی اقلیمی در مقیاس‌های زمانی مختلف محسوب می‌شود که به سبب لحاظ کردن پارامترهای بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل، درک جامعی از بیلان آبی را نیز ارائه می‌نماید (Panday et al., 2024; Samiei & Alijanian, 2025). به علاوه، تعیین کیفیت آب از طریق سنجش‌های کیفی شامل آنیون‌ها (سولفات، کلر و بی‌کربنات)، کاتیون‌ها (سدیم، کلسیم و منیزیم)، کل جامدات محلول^۲، pH و هدایت الکتریکی^۳ ابزاری موثر و ضروری به منظور مدیریت و بهینه‌سازی مصرف منابع آب به شمار می‌آید (ترکمانی‌تمبکی و خامه‌چیان، ۱۴۰۳؛ Ghobadi et al., 2022).

امروزه، ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت منابع آب سطحی، گامی مهم و ضروری جهت بهبود و توسعه راهبردها و ابزارهای مدیریت منابع آب به منظور کاهش مخاطرات خشکسالی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید که به‌طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته است. در این خصوص، ارزیابی اثر خشکسالی بر کیفیت آب رودخانه گذارخوش ایلام نشان داد افزایش دما و کاهش دبی طی دوره خشکسالی به عنوان عوامل اصلی افزایش غلظت آنیون‌ها (سولفات، کلر و بی‌کربنات)، کاتیون‌ها (سدیم، کلسیم و منیزیم) و هدایت الکتریکی منجر به کاهش کیفیت آب در زمان‌های بحرانی شده است (قیصوری و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، در پژوهشی که با هدف ارزیابی اثر خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی حوضه هلیل‌رود کرمان انجام شد، نتایج نشان داد بین پارامترهای کیفی (آنیون‌ها، کاتیون‌ها، هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول) و رخداد پدیده خشکسالی رابطه معنی‌داری وجود داشته و خشکسالی با تغییر در غلظت سنجش‌های شیمیایی آب منجر به کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه شده است (شاهرخی و همکاران، ۱۳۹۸). از طرفی، نتایج ارزیابی تاثیر خشکسالی بر کیفیت آب در حوضه رودخانه مایپو شیلی نشان داد افزایش مقادیر

1. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)
2. Total Dissolved Solids (TDS)
3. Electrical Conductivity (EC)

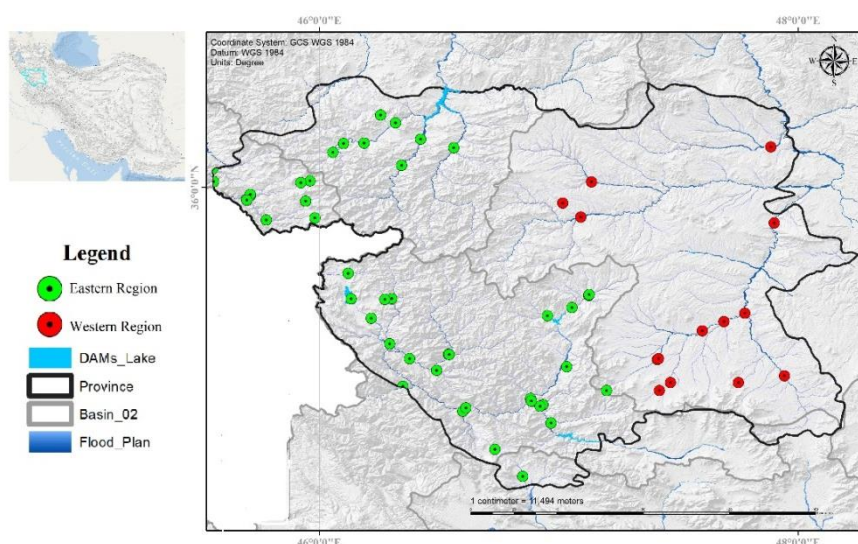
پارامترهای فیزیکوشیمیایی (دما، برخی عناصر بالقوه سمی، آنیون‌ها، کاتیون‌ها و هدایت الکتریکی) و کاهش کیفیت آب در دوره‌های خشکسالی با کاهش دبی رودخانه مرتبط بوده است (Peña-Guerrero et al., 2020). از دیگر سو بررسی تاثیر خشکسالی اقلیمی بر کیفیت آب در حوضه راریتان ایالت نیوجرسی نشان داد میانگین غلظت آلاینده‌ها (فسفر کل، نیتروژن کل و کدورت) در دوره‌های خشکسالی به سبب عوامل مختلف از جمله افزایش دما و کاهش بارندگی در مقایسه با دوره‌های ترسالی بیشتر بوده است (Giri et al., 2021). از طرفی، ارزیابی پارامترهای کیفی آب سطحی در حوضه آبخیز دشت مهران در دوره‌های ترسالی و خشکسالی نشان داد نوسانات آب و هوایی به عنوان یکی از عوامل موثر بر افزایش غلظت آنیون‌ها، کاتیون‌ها، کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی، کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه را به دنبال داشته است (علی پناهی و همکاران، ۱۴۰۱). علاوه بر این، نتایج ارزیابی اثر خشکسالی بر کیفیت آب سد تی-چی تایوان، افزایش مقادیر پارامترهای کیفی آب (نیتروژن و فسفر کل، دما، اسیدیته و هدایت الکتریکی) طی دوره‌های خشکسالی را با افزایش دما، کاهش بارندگی و سطح آب مرتبط دانست (Lin et al., 2023). این در حالی است که ارزیابی تاثیر خشکسالی بر کیفیت رودخانه کشف‌رود با استفاده از شاخص‌های SPI^1 و $SPEI$ نشان داد با کاهش میزان بارندگی و افزایش دما، و به تبع آن شروع خشکسالی، کیفیت آب به ویژه در ایستگاه‌های پایین دست کاهش یافته است (حلمی و شهیدی، ۱۴۰۲). این در حالی است که فرهادی‌نژاد و همکاران با بررسی رابطه بین تغییرات دبی ناشی از خشکسالی و کیفیت منابع آب سطحی حوضه رودخانه تیره گزارش کردند بیشینه غلظت پارامترهای کیفی آب (هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها) مربوط به دوره‌های خشکسالی بوده است (فرهادی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۳). از دیگر سو، ارزیابی تغییرات کیفیت آب دریاچه اکسنچون چین نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب طی دوره‌های خشکسالی ناشی از افزایش غلظت فسفر و نیتروژن کل بوده است (Chen et al., 2024).

نظر به شرایط اقلیمی (خشک و نیم‌خشک) کشور ایران، محدودیت منابع آبی و افزایش و تداوم وقوع خشکسالی‌های اجتناب‌ناپذیر از یک سو، و لزوم کنترل و پایش منابع آب سطحی به منظور حفاظت از محیط زیست و توسعه پایدار اقتصادی-اجتماعی از سوی دیگر، ارزیابی کمی خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی و تاثیر آن بر کیفیت منابع آب سطحی پیش‌نیازی اساسی و ضروری به منظور تدوین و توسعه راهبردهای مدیریتی موثر منابع آب متناسب با شرایط اقلیمی هر منطقه به شمار می‌آید. در این خصوص، با توجه به شرایط و اهمیت استان کردستان به لحاظ منابع آب سطحی (سهم ۸۹ درصدی منابع آب سطحی از کل منابع آبی تجدیدپذیر استان) و نقش آن در تعادل زیستی، بوم‌شناختی، اقتصادی-اجتماعی و تامین آب مورد نیاز شرب و کشاورزی، شناسایی ویژگی‌های خشکسالی در سطح منطقه و تعیین کیفیت منابع آب سطحی به ویژه از حیث پارامترهای شیمیایی با هدف تسهیل در مدیریت و بهینه‌سازی مصرف آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، تنوع ویژگی‌های محیطی (توپوگرافی و اقلیمی) در استان کردستان به عنوان یکی از عوامل موثر بر تغییر مقادیر پارامترهای شیمیایی آب در مواقع خشکسالی و ترسالی می‌تواند نقش مهمی در کیفیت آب ایفا کند. از این رو، تعیین کیفیت آب در مواقع خشکسالی و ترسالی در ارتباط با اقلیم‌های متفاوت در استان کردستان برای مدیریت موثر و کاهش خطرات محیط‌زیستی-اجتماعی خشکسالی متناسب با شرایط اقلیمی ضروری است. با این حال، بررسی سوابق نشان داد تاکنون مطالعه جامع و مشابهی در خصوص ارزیابی تاثیر خشکسالی اقلیمی بر کیفیت منابع آب سطحی در استان کردستان انجام نشده است. بنابراین، این پژوهش با هدف کمی‌سازی و تعیین سال‌های شاخص خشکسالی و ترسالی در یک دوره آماری ۳۴ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۵) در سطح استان کردستان با استفاده از شاخص $SPEI$ انجام شده است. از طرفی، در خصوص نوآوری این پژوهش می‌توان به بررسی تغییرات پارامترهای شیمیایی آب در مواقع خشکسالی و ترسالی در ارتباط با اقلیم‌های متفاوت در استان کردستان اشاره نمود.

معرفی منطقه مورد مطالعه: استان کردستان با ۲۸،۲۰۳ کیلومترمربع مساحت در ۴۵ تا ۴۸ درجه طول شرقی و ۳۴ تا ۳۶ درجه عرض شمالی در غرب ایران واقع شده است. میانگین دما و بارندگی سالانه در این استان به ترتیب برابر با ۱۰/۹ درجه سلسیوس و ۴۵۰ میلی متر ثبت شده است. کمترین و بیشترین وقوع بارندگی با میانگین سالانه ۳۰۰ و ۸۵۰ میلی متر به ترتیب مربوط به مناطق شرقی و غربی این استان است. فراوانی ریزش‌های جوی در استان کردستان قابلیت مناسبی از دسترسی به منابع آب به ویژه آب‌های سطحی را فراهم کرده است (سیحان‌اردکانی و همکاران، ۱۳۹۵). سرشاخه‌های پنج رودخانه بزرگ زرينه‌رود، قزل‌اوزن، زاب کوچک، سیروان و کرخه در استان کردستان واقع شده است و حوضه‌های آبریز فرعی آنها کل استان را دربر می‌گیرد. همچنین، مناطق شرقی و غربی استان کردستان به ترتیب با ۱۷ و ۸۳ درصد از کمترین و بیشترین سهم رواناب سطحی در استان برخوردار هستند (دانش‌مهر و هدایت، ۱۴۰۲؛ تکیه‌خواه و همکاران، ۱۴۰۳).

جمع‌آوری داده‌ها: در این پژوهش، پس از انجام مطالعه‌های اولیه کتابخانه‌ای و میدانی و به منظور ارزیابی کمی خشکسالی اقلیمی و بررسی تغییرات کمی عوامل کلیدی موثر بر کیفیت آب شامل آنیون‌ها (سولفات، کلر و بی‌کربنات)، کاتیون‌ها

(سدیم، کلسیم و منیزیم)، کل جامدات محلول، اسیدیته و هدایت الکتریکی در شرایط حدی اقلیمی (خشکسالی و ترسالی)، نسبت به جمع‌آوری آمار مقادیر روزانه بارش، دما، تبخیر و سنجه‌های کیفی مورد بررسی از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان اقدام شد. از طرفی، به منظور هم‌زمانی سال‌های آماری، یک دوره مشترک ۳۴ ساله بین سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۸۵ (دوره آماری مطلوب از نظر طرح‌های آب شناختی) انتخاب شد. همچنین، به منظور ارزیابی کیفیت جریان‌های سطحی نسبت به هر سنجه کیفی مورد مطالعه (پارامترهای سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیته و هدایت الکتریکی) در مواقع خشکسالی و ترسالی در ارتباط با اقلیم‌های متفاوت استان کردستان، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی (دما، بارش، تبخیر-تعرق) در سطح استان کردستان، نسبت به طبقه‌بندی محدوده مورد مطالعه به مناطق اقلیمی مختلف اقدام شد. بر این اساس، مناطق شرقی و غربی به عنوان دو منطقه اقلیمی عمده در استان کردستان شناسایی شدند. موقعیت جغرافیایی و مکان‌های نمونه‌برداری در مناطق مختلف اقلیمی استان کردستان در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و مکان‌های نمونه‌برداری در مناطق مختلف اقلیمی استان کردستان

ارزیابی کمی خشکسالی

داده های D به ترتیب با استفاده از روابط (۶) و (۷) محاسبه

شدند:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه های (۶) و (۷): α , β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D در دامنه $-\infty < D < \infty$ هستند.

شاخص SPEI به عنوان مقادیر استاندارد شده $F(x)$ با استفاده از روابط (۸) و (۹) محاسبه شدند:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$W = \sqrt{-2\ln(P)}, P \leq 0.5 \quad \text{رابطه (۹)}$$

در روابط (۸) و (۹): مقادیر ثابت برای d_1 , d_2 و d_3 به ترتیب برابر با $1/432788$, $1/189269$ و $0/001308$ و برای C_0 , C_1 و C_2 نیز به ترتیب برابر با $2/515517$, $0/802853$ و $0/103228$ هستند. همچنین، W برای محاسبه مقادیر $P \leq 0/5$ است. در صورتی که P بزرگ تر از $0/5$ باشد، $1-P$ جایگزین P شده و علامت SPEI معکوس خواهد شد. طبقه بندی و تفسیر شاخص SPEI در جدول (۱) آورده شده است (Lu et al., 2025). مقادیر منفی شاخص SPEI بیانگر وقوع خشکسالی و کاهش بیلان آب و مقادیر مثبت آن نیز نشان دهنده پایان خشکسالی و افزایش بیلان آب است.

شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده: در این پژوهش، برای کمی سازی و تعیین سال های شاخص خشکسالی و ترسالی در دوره آماری مورد مطالعه، شاخص SPEI با استفاده از روابط (۱) تا (۹) محاسبه شد (برخوری و همکاران، ۱۴۰۳؛ Samiei & Alijanian, 2025):

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$m = 6.75 \times 10^{-7}I^3 - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 1.79 \times 10^{-2}I \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$K = \left(\frac{N}{12}\right)\left(\frac{NDM}{30}\right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در روابط (۱) تا (۴): T و m به ترتیب دمای میانگین ماهانه بر حسب درجه سلسیوس و ضریب وابستگی به I را نشان می دهند. I شاخص گرما یا مجموع شاخص ۱۲ ماهه i است. K , NDM و N نیز به ترتیب بیانگر ضریب تصحیح بر حسب ماه و عرض جغرافیایی، تعداد روزهای یک ماه و بیشینه تعداد ساعات تابش هستند.

در همین حال، اختلاف بارش (P) و تبخیر- تعرق پتانسیل^۲ برای ماه i با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵)، D_i مقادیر اختلاف میزان بارش و تبخیر- تعرق برای ماه i را نمایندگی می کند. P_i و PET_i نیز به ترتیب بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل ماهانه (بر حسب میلی متر) را نشان می دهند.

نظر به لزوم استفاده از یک توزیع سه پارامتری برای پوشش مقادیر D_i ، تابع توزیع لجستیک لگاریتمی به دلیل تناسب بیشتر با داده های دارای چولگی و نیز دنباله طولانی تر در دامنه انتهایی توزیع، از کارایی بهتر و برازش مناسبی در تعیین تابع تراکم احتمال یا pdf سری زمانی D در مقیاس های مختلف زمانی برخوردار بوده و مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع لجستیک لگاریتمی و تابع تجمعی توزیع احتمالی سری

1. Precipitation

2. Potential Evapotranspiration (PET)

جدول ۱. طبقه‌بندی شاخص SPEI

طبقه توصیفی	مقدار
ترسالی خیلی شدید	$SPEI \geq 2/00$
ترسالی شدید	$1/50 \leq SPEI < 2/00$
ترسالی متوسط	$1/00 \leq SPEI < 1/50$
نرمال	$-0/99 \leq SPEI < 0/99$
خشکسالی متوسط	$-1/50 \leq SPEI < -1/00$
خشکسالی شدید	$-2/00 \leq SPEI < -1/50$
خشکسالی خیلی شدید	$SPEI \leq -2/00$

از آزمون همبستگی پیرسون^۴ استفاده شد. جهت مقایسه میانگین غلظت سنج‌های کیفی آب در مناطق شرقی و غربی استان کردستان از آزمون تی مستقل^۵ در سطح معنی‌داری ۵ درصد بهره گرفته شد. از طرفی، به منظور بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی و درک بهتر تفاوت اقلیمی در استان کردستان، نسبت به تهیه نقشه‌های توزیع مکانی میانگین مقادیر بارش، دما و تبخیر- تعرق بر اساس روش عمومی کریجینگ معمولی در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.6 اقدام شد.

نتایج

نتایج ارزیابی کمی خشکسالی: نتایج محاسبه شاخص SPEI طی دوره آماری ۳۴ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۸) در شکل (۲) آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که کمینه مقادیر شاخص SPEI با $1/33-$ مربوط به سال ۲۰۰۸ به عنوان سال شاخص خشکسالی بوده و شرایط اقلیمی «خشکسالی متوسط» را نمایندگی می‌کند. در همین حال، بیشینه مقادیر شاخص SPEI با $1/70+$ به سال ۱۹۹۴ یعنی سال شاخص ترسالی تعلق داشته و شرایط اقلیمی «ترسالی شدید» را نشان می‌دهد.

ارزیابی کیفیت آب: به منظور سنجش و ارزیابی کیفیت جریان‌های سطحی نسبت به هر سنجه کیفی مورد مطالعه (پارامترهای سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی) در مواقع خشکسالی، تغییرات کمی مقادیر این عوامل در شرایط حدی اقلیمی (خشکسالی و ترسالی) طی دوره آماری ۳۴ ساله به تفکیک دو منطقه شرقی و غربی مورد بررسی قرار گرفت.

پردازش آماری داده‌ها: در این پژوهش، سری زمانی شاخص SPEI طی دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۱۸ در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شد. پردازش آماری داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS^۱ انجام یافت. بدین صورت که همگنی داده‌ها با استفاده از روش آزمون توالی^۲ مورد بررسی قرار گرفت. برای بازسازی نواقص آماری از روش همبستگی استفاده و نرمال بودن توزیع داده‌ها نیز توسط آزمون کولموگوروف- اسمیرنوف^۳ بررسی شد. همچنین، به منظور ارزیابی رابطه بین خشکسالی و سنجه‌های کیفی مورد بررسی

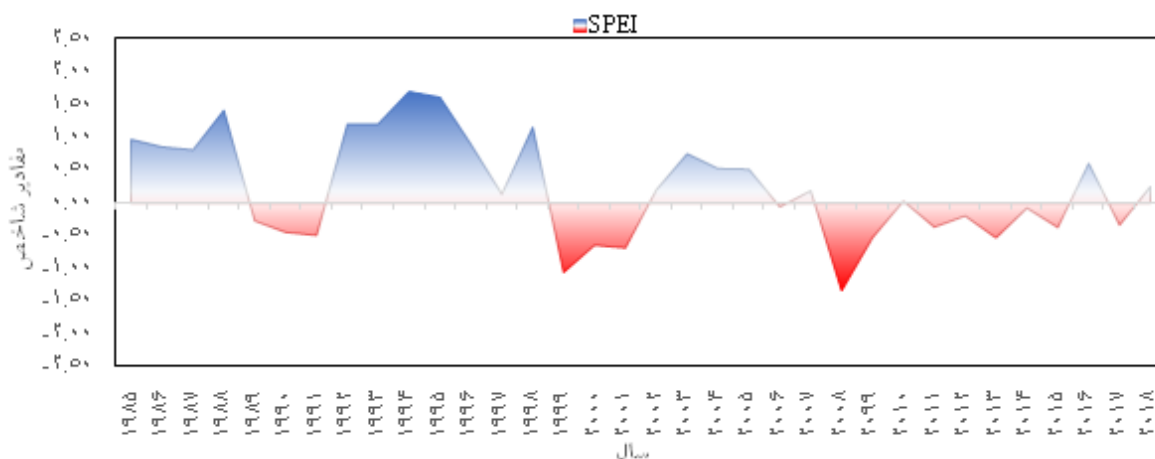
1. Statistical Package for Social Science

2. Run Test

3. Kolmogorov-Smirnov Test, K-S

4. Pearson Correlation Coefficient (PCC)

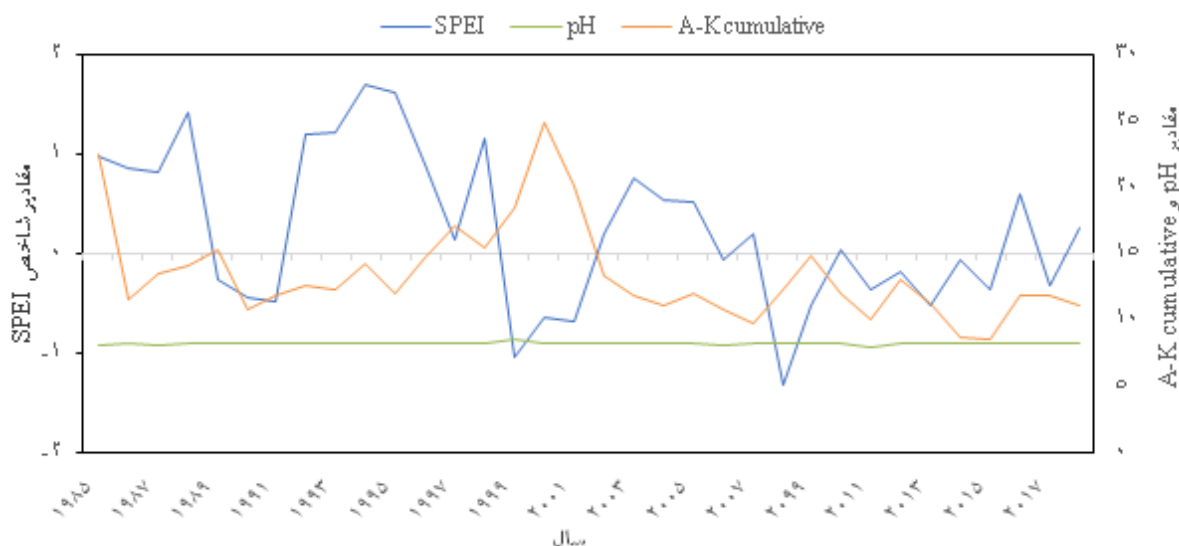
5. Independent Samples T-Test



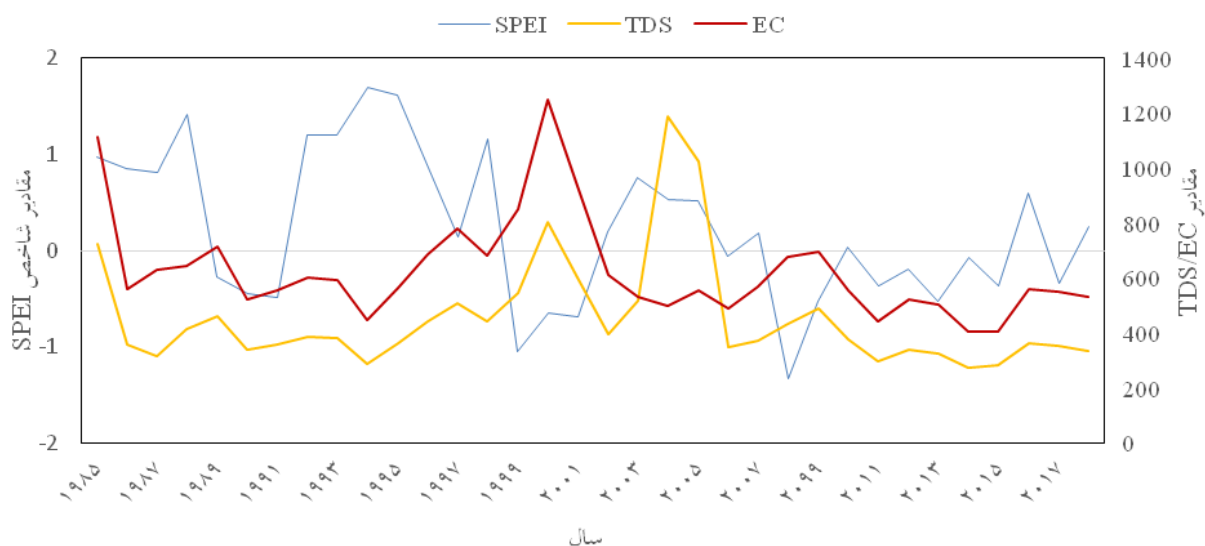
شکل ۲. تغییرات زمانی شاخص SPEI طی دوره آماری ۳۴ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۸) در استان کردستان

لیتر، ۴۰۷ دسی‌زیمنس در سانتی‌متر و ۷/۸۸ مربوط به دوره‌هایی با مقادیر زیاد شاخص SPEI (ترسالی اقلیمی) بوده است. در همین حال، بیشینه مقادیر مجموع آنیون‌ها-کاتیون‌ها، EC، TDS و pH به ترتیب با ۲۴/۹ میلی‌گرم در لیتر، ۱۱۸۷ میلی‌گرم در لیتر، ۱۲۴۹ میکروزیمنس در سانتی‌متر و ۸/۴۷ به بازه‌های زمانی با مقادیر کم شاخص SPEI (خشکسالی اقلیمی) تعلق داشتند.

نتایج ارزیابی تاثیر خشکسالی بر کیفیت آب: روند تغییرات زمانی مقادیر سنجه‌های کیفی مورد بررسی طی دوره آماری ۳۴ ساله (شکل‌های (۳) و (۴)) نشان داد الگوی نوسانات مقادیر مجموع آنیون‌ها-کاتیون‌ها، کل جامدات محلول، اسیدیته و هدایت الکتریکی مشابه بوده و به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر تغییرات زمانی مقادیر شاخص SPEI بوده است. بر این اساس، کمینه مقادیر مجموع آنیون‌ها-کاتیون‌ها، TDS، EC و pH به ترتیب با ۸/۵۵ میلی‌گرم در لیتر، ۲۷۴ میلی‌گرم در



شکل ۳. تغییرات زمانی مقادیر مجموع آنیون‌ها-کاتیون‌ها و pH طی دوره آماری ۳۴ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۸) در استان کردستان



شکل ۴. تغییرات زمانی مقادیر TDS و EC طی دوره آماری ۳۴ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۸) در استان کردستان

مثبت (مستقیم) و معنی دار با Na , Mg , Ca , Cl , HCO_3 , SO_4 ،
TDS و EC داشته و به طور قابل توجهی مقادیر این سنجه‌های
کیفی را تحت تاثیر قرار داده است.

نتایج بررسی همبستگی بین مقادیر سنجه‌های کیفی آب با
خشکسالی در جدول (۲) آورده شده است. نتایج آزمون
آماري همبستگی پیرسون بیانگر آن است که خشکسالی رابطه

جدول ۲. ضرایب همبستگی پیرسون بین خشکسالی و سنجه‌های کیفی آب

سنجه کیفی آب									عامل مورد بررسی
هدایت الکتریکی	اسیدیته	کل جامدات محلول	سدیم	منیزیم	کلسیم	کلر	بی‌کربنات	سولفات	
۰/۲۸۴**	۰/۰۲۷	۰/۱۴۲**	۰/۲۸۵**	۰/۲۷۱**	۰/۱۸۴**	۰/۲۲۹**	۰/۳۵**	۰/۲۴۰**	

الکتریکی مربوط به سال شاخص خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت
به میانگین طولانی مدت در منطقه شرقی به ترتیب با ۹۸/۰،
۹/۰۱، ۷۰/۰، ۱۵/۰، ۲۴/۰، ۲۳/۰، ۱۳/۰، ۲/۰۰ و ۱۷/۰ درصد
تغییرات و در منطقه غربی نیز به ترتیب با ۸۹/۰، ۶/۰۱، ۴۳/۰،
۱۰/۰، ۱۲/۰، ۱۷/۰، ۷/۰۰ و ۱/۰۰ درصد تغییرات در
هر دو منطقه از روند افزایشی برخوردار بودند. از طرفی، با
توجه به $p < ۰/۰۵$ ، میانگین طولانی مدت مقادیر سولفات،
بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول و
هدایت الکتریکی در منطقه شرقی به ترتیب با ۵/۳۲، ۲/۹۴،
۴/۹۳، ۴/۱۹، ۲/۶۷، ۶/۴۱، ۸۴۴ میلی گرم در لیتر و ۱۲۶۴
میکروزیمنس در سانتی متر اختلاف معنی دار آماری با مقادیر
مربوط به منطقه غربی داشته و بزرگتر از مقادیر میانگین
طولانی مدت این سنجه‌ها در منطقه غربی بودند.

نتایج تغییرات کمی میانگین مقادیر سنجه‌های کیفی آب در
سال‌های شاخص ترسالی (۱۹۹۴) و خشکسالی (۲۰۰۸)
نسبت به میانگین طولانی مدت طی دوره آماری مورد مطالعه
(۳۴ سال) به تفکیک مناطق شرقی و غربی استان کردستان در
جدول (۳) آورده شده است. با استناد به نتایج، مقادیر
سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات
محلول و هدایت الکتریکی طی سال شاخص ترسالی (۱۹۹۴)
نسبت به میانگین طولانی مدت در منطقه شرقی به ترتیب
۲۳/۰، ۸/۰۴، ۲۲/۰، ۱۲/۱، ۲۵/۰، ۲۰/۱، ۱۰/۰ و ۶/۰۳ درصد
و در منطقه غربی به ترتیب با ۱۸/۲، ۷/۰۲، ۱۷/۱، ۸/۰۰، ۲۱/۰،
۱۸/۰، ۴/۰۱ و ۳/۰۰ درصد کاهش را نشان داده‌اند. این در
حالی است که مقادیر سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم،
منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیته و هدایت

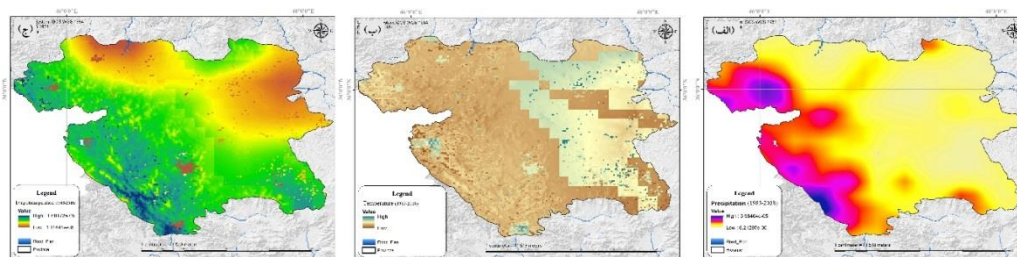
جدول ۳. تغییرات کمی سنجه های کیفیت آب در سال های شاخص ترسالی (۱۹۹۴) و خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت به میانگین طولانی مدت طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۸۵-۲۰۱۸) به تفکیک مناطق شرقی و غربی استان کردستان

سنجه کیفی	واحد	میانگین طولانی مدت	سال شاخص ترسالی (۱۹۹۴)		سال شاخص خشکسالی (۲۰۰۸)		میانگین	
			منطقه شرقی	منطقه غربی	منطقه شرقی	منطقه غربی	درصد	تغییرات
سولفات	mg/L	۲/۹۴*	۲/۲۶	-۲۳/۰	۰/۳۴۳	-۱۸/۲	۵/۸۲	۹۸/۰
بی کربنات	mg/L	۵/۳۲*	۴/۸۹	-۸/۰۴	۳/۱۴	-۷/۰۲	۵/۷۹	۹/۰۱
کلر	mg/L	۴/۹۳*	۳/۸۴	-۲۲/۰	۰/۳۱۸	-۱۷/۱	۸/۳۹	۷۰/۰
کلسیم	mg/L	۴/۱۹*	۳/۱۳	-۱۲/۱	۲/۸۸	-۸/۰۰	۴/۸۴	۱۵/۰
منیزیم	mg/L	۲/۶۷*	۲/۰۱	-۲۵/۰	۰/۶۵۹	-۲۱/۰	۳/۳۲	۲۴/۰
سدیم	mg/L	۶/۴۱*	۵/۱۲	-۲۰/۱	۰/۴۳۲	-۱۸/۰	۷/۸۹	۲۳/۰
کل جامدات محلول	mg/L	۸۴۴*	۲۷۳	-۱۰/۰	۲۶۳	-۴/۰۱	۹۵۶	۱۳/۰
اسیدیته	-	۸/۱۹	۸/۱۶	۸/۱۵	۰/۰۰	۸/۱۲	۰/۰۰	۸/۲۸
هدایت الکتریکی	μs/cm	۱۲۶۴*	۴۲۰	-۶/۰۳	۴۰۶	-۳/۰۰	۱۴۸۵	۱۷/۰

* بیانگر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < ۰/۰۵$) بین میانگین سنجه های کیفیت آب در منطقه شرقی و منطقه غربی استان کردستان بر اساس نتایج آزمون تی-مستقل نمونه است.

تعلق داشت. در همین حال، بیشینه توزیع مقادیر این پارامتر مربوط به شرق منطقه مورد مطالعه بوده است (شکل ۵ب). از دیگر سو، کمینه توزیع مقادیر تبخیر- ترق در منطقه مورد مطالعه مربوط به نواحی شمالی و شمال شرقی استان کردستان بوده است. این در حالی است که بیشینه توزیع مقادیر این پارامتر مربوط به جنوب شرقی و غرب منطقه مورد مطالعه بوده است (شکل ۵ج).

نتایج توزیع مکانی میانگین مقادیر بارش، دما و تبخیر- ترق طی دوره آماری مورد مطالعه (۳۴ سال) در استان کردستان (شکل ۵) نشان داد که کمینه توزیع مقادیر بارش در منطقه مورد مطالعه مربوط به نواحی شرقی استان کردستان بوده است. این در حالی است که بیشینه توزیع مقادیر این پارامتر مربوط به غرب منطقه مورد مطالعه بود (شکل ۵الف). از طرفی، کمینه توزیع مقادیر دما به نواحی غربی استان کردستان



شکل ۵. توزیع مکانی مقادیر میانگین بارش (الف)، دما (ب) و تبخیر- ترق (ج) در استان کردستان

بحث و نتیجه گیری

SPEI به عنوان ابزار مناسب تعیین خشکسالی اقلیمی، رویکردی مفید برای درک جامع از بیلان آب محسوب می شود (Panday et al., 2024). نتایج مقادیر محاسبه شده شاخص SPEI طی دوره آماری ۳۴ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۸)

کمی سازی خشکسالی در مقیاس های مختلف زمانی و مکانی و ارزیابی تاثیر آن بر کیفیت منابع آب سطحی پیش نیاز ضروری و مهم برای مدیریت موثر منابع آب متناسب با شرایط اقلیمی هر منطقه به شمار می آید. در این راستا، شاخص

بیانگر تناوب خشکسالی و ترسالی با شدت‌های مختلف (خشکسالی متوسط تا ترسالی شدید) در استان کردستان بود. در این خصوص، فراوانی خشکسالی متوسط، نرمال، ترسالی متوسط و ترسالی شدید به ترتیب برابر با ۵/۹۲، ۷۶/۵، ۱۱/۷ و ۵/۸۸ درصد بود. از طرفی، روند کاهشی مقادیر شاخص SPEI طی دوره آماری مورد بررسی به‌ویژه در ۱۰ سال انتهایی آن می‌تواند به‌عنوان تهدید بالقوه مضر اقلیمی منجر به افزایش بروز خشکسالی، کاهش بیلان آب و افزایش مخاطرات بالقوه مضر محیط‌زیستی، بوم‌شناختی و اجتماعی-اقتصادی شود (سعیدی‌پور و همکاران، ۱۳۹۸؛ رزمخواه و همکاران، ۱۴۰۱). از این‌رو، اقدامات کنترلی و تمهیدات مدیریتی به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی در منطقه مورد مطالعه ضروری است. در این راستا و نظر به اینکه سال‌های ۲۰۰۸ و ۱۹۹۴ به ترتیب کمینه و بیشینه مقادیر شاخص SPEI را به‌خود اختصاص داده‌اند، بنابراین به‌عنوان سال‌های شاخص خشکسالی و ترسالی برای بررسی اثر خشکسالی بر کیفیت آب سطحی لحاظ شدند.

تعیین کیفیت آب برای مدیریت و برنامه‌ریزی‌های جامع منابع آب به‌ویژه در مواقع خشکسالی حایز اهمیت ویژه‌ای است. در این خصوص، سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی از جمله مهم‌ترین سنجه‌های کیفی آب به‌شمار می‌آیند که به‌طور مسقیم بر کیفیت و محدودیت استفاده از آب برای کاربری‌های مختلف از جمله شرب، کشاورزی، صنعت و آبی‌پروری تأثیرگذار هستند. در این خصوص، افزایش مقادیر کاتیون‌های کلسیم و منیزیم به‌سبب ایجاد سختی، محدودیت استفاده از آب برای شرب و صنعت را به‌دنبال خواهند داشت. بی‌کربنات، سدیم و هدایت الکتریکی (شوری) نیز به‌عنوان معیارهای کیفی مهم برای مصارف کشاورزی نه‌تنها بر رشد گیاه موثر هستند، بلکه درجه تناسب آب به‌لحاظ آبیاری و تأثیر بر نفوذپذیری خاک را نیز مشخص می‌کنند (محمودی و همکاران، ۱۳۹۴). کدورت آب نیز تحت تأثیر مقادیر کل جامدات محلول بوده و افزایش مقدار آن به لحاظ شرب حایز اهمیت ویژه‌ای است (Golzadeh et al., 2023). از طرفی، افزایش غلظت کلر به لحاظ رشد گیاه سمی خواهد بود. همچنین، افزایش غلظت سولفات می‌تواند منجر به تخریب

سازه‌های آبی شود (قیصوری و همکاران، ۱۳۹۷؛ علی‌پناهی و همکاران، ۱۴۰۱). نتایج تغییرات زمانی مقادیر مجموع آنیون‌ها- کاتیون‌ها، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی نشان داد الگوی نوسانات مقادیر همه سنجه‌های مورد مطالعه مشابه بوده و به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات زمانی مقادیر شاخص SPEI بوده است. بر این اساس، بیشینه مقادیر مجموع آنیون‌ها- کاتیون‌ها، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی مربوط به دوره‌های خشکسالی اقلیمی بود. یافته‌ها، افزون بر اینکه ارتباط مستقیم مقادیر سنجه‌های کیفی مورد مطالعه با مقادیر شاخص SPEI را نشان می‌دهد، موید تأثیر خشکسالی اقلیمی بر کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه است. در این خصوص، محدودیت استفاده از آب برای مصارف کشاورزی، شرب و حتی صنعت به سبب کاهش کیفیت آب در دوره‌های خشکسالی نه‌تنها می‌تواند منجر به تشدید اثرات بالقوه مضر این پدیده اقلیمی شود، بلکه می‌تواند پیامدهای نامطلوب اقتصادی- اجتماعی نیز در منطقه مورد مطالعه برجای گذارد. از این‌رو، اقدامات کنترلی و تمهیدات مدیریتی به‌منظور حفاظت از کیفیت و تضمین بهره‌برداری پایدار از منابع آب سطحی به‌ویژه در مواقع خشکسالی ضروری است. در مطالعات مشابه، شاه‌رخ و همکاران (۱۳۹۸) و علی‌پناهی و همکاران (۱۴۰۱) نیز با ارزیابی اثر خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی به ترتیب حوضه‌های هلیل‌رود کرمان و دشت مهران گزارش کردند افزایش مقادیر سنجه‌های کیفی آب (هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها) متأثر از خشکسالی بوده که منجر به کاهش کیفیت آب در مناطق مورد مطالعه شده است.

خشکسالی به‌سبب تغییر در الگوی بارش (برف به باران)، نوسانات دما و تبخیر- تعرق یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی موثر بر تغییرات کیفی منابع آب سطحی به‌شمار می‌آید (ایمانی‌بورژانی و همکاران، ۱۴۰۱). بر این اساس، به‌منظور درک رابطه بین خشکسالی و مقادیر سنجه‌های کیفی آب، آزمون همبستگی پیرسون اجرا شد. نتایج آزمون بیانگر وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین خشکسالی با پارامترهای سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول هدایت الکتریکی بود. در این خصوص، می‌توان اذعان

۱۳۹۴؛ حلمی و شهیدی، ۱۴۰۲؛ فرهادی نژاد و همکاران، ۱۴۰۳؛ Lin et al., 2023). از طرفی، نتایج نشان داد میانگین طولانی مدت غلظت سولفات، بی کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی در منطقه شرقی به طور معنی داری بزرگ تر از میانگین طولانی مدت غلظت این سنجها در منطقه غربی بوده است. در این خصوص، میانگین غلظت متمایز سنجهای کیفی آب در اقلیم های مختلف استان کردستان افزون بر اینکه بیانگر تاثیر قابل توجه تنوع اقلیمی است، نشان می دهد تغییرات اقلیمی و بروز خشکسالی به عنوان عامل اصلی و عمده احتمالی طبیعی به طور قابل توجهی منجر به افزایش غلظت سنجهای کیفیت آب در منطقه شرقی شده است. همچنین، نتایج نشان داد بیشینه تغییرات کمی مقادیر سنجهای کیفی آب در سال های شاخص ترسالی (۱۹۹۴) و خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت به میانگین طولانی مدت طی دوره آماری مورد مطالعه (۳۴ سال) مربوط به مناطق شرقی بوده است. به علاوه، نتایج توزیع مکانی مقادیر میانگین بارش، دما و تبخیر- تعرق طی دوره آماری مورد مطالعه (۳۴ سال) در استان کردستان نشان داد کمینه توزیع مقادیر بارش در منطقه مورد مطالعه مربوط به نواحی شرقی استان کردستان و بیشینه توزیع مقادیر دما و تبخیر- تعرق همگی مربوط به شرق و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه بوده است. یافته ها، افزون بر اینکه ارتباط مستقیم مقادیر دما، بارش و تبخیر- تعرق با غلظت سنجهای کیفیت آب در مکان های نمونه برداری را نشان می دهد، موید تاثیر تنوع اقلیمی بر کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه نیز است. همچنین، نظر به شرایط اقلیمی در منطقه شرقی و بیشینه مقادیر غلظت سنجهای کیفی آب در این منطقه، بروز خشکسالی و افزایش غلظت این سنجها در آینده می تواند به عنوان تهدید بالقوه برای سلامت بوم سازگان، منجر به افزایش بروز ریسک های محیط زیستی شود. از این رو، تمهیدات مدیریتی به منظور حفاظت از کیفیت و تضمین بهره برداری پایدار از جریان های آب سطحی و کاهش ریسک های محیط زیستی به ویژه در منطقه شرق ضروری است.

این مطالعه با هدف ارزیابی تاثیر خشکسالی اقلیمی بر کیفیت جریان های سطحی استان کردستان انجام یافت. نتایج تعیین

داشت کاهش بارندگی و افزایش دما و تبخیر- تعرق طی دوره خشکسالی به طور قابل توجهی بر غلظت سنجهای کیفی آب موثر بوده است. در پژوهشی دیگر، روابط مثبت و معنی دار بین خشکسالی با سنجهای کیفی آب رودخانه کشف رود (سولفات، بی کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی) با افزایش دما و تبخیر- تعرق و کاهش بارندگی طی دوره خشکسالی مرتبط دانسته شد (حلمی و شهیدی، ۱۴۰۲).

بارش، دما و تبخیر- تعرق به سبب تاثیر بر غلظت سنجهای کیفی آب (آنیون ها، کاتیون ها، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی) از عوامل مهم تاثیرگذار بر کیفیت آب محسوب می شوند (حلمی و شهیدی، ۱۴۰۲). نتایج بررسی تغییرات کمی سنجهای کیفیت آب در سال های شاخص ترسالی (۱۹۹۴) و خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت به میانگین طولانی مدت طی دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۱۸-۱۹۸۵) در استان کردستان نشان داد تغییرات کمی مقادیر سولفات، بی کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی مربوط به سال شاخص خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت به میانگین طولانی مدت در هر دو منطقه شرقی و غربی روند افزایشی را نشان داد. این در حالی است که تغییرات کمی مقادیر همه سنجهای کیفی مورد مطالعه طی سال شاخص ترسالی (۱۹۹۴) نسبت به میانگین طولانی مدت در هر دو منطقه شرقی و غربی از روند کاهشی برخوردار بود. یافته های حاصل می تواند بیانگر تاثیر نوسانات بارش، دما و تبخیر- تعرق بر کیفیت منابع آب سطحی طی دوره آماری ۳۴ ساله باشد. بر این اساس، روند افزایشی مقادیر سولفات، بی کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی و به تبع آن کاهش کیفیت آب طی سال شاخص خشکسالی (۲۰۰۸) نسبت به میانگین طولانی مدت را می توان با کاهش بارندگی، افزایش دما و تبخیر- تعرق در بازه زمانی خشکسالی مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تایید نتایج حاصل، افزایش مقادیر سنجهای کیفی آب (آنیون ها، کاتیون ها، کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی) در دوره های خشکسالی نسبت به میانگین طولانی مدت با افزایش دما و کاهش بارندگی در بازه های خشکسالی مرتبط دانسته شد (محمودی و همکاران،

خشکسالی‌های اقلیمی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص SPEI و بررسی تغییرات سنجه‌های کیفی آب در مواقع حداکثرهای اقلیمی (خشکسالی و ترسالی) نشان داد بین سنجه‌های کیفی آب (سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی) و خشکسالی رابطه معنی‌داری وجود داشته و افزایش غلظت آنیون‌ها، کاتیون‌ها، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی ناشی از کاهش بارندگی، افزایش دما و تبخیر- تفرق طی دوره خشکسالی منجر به کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه شده است. همچنین، نتایج تعیین غلظت سنجه‌های کیفی آب از مناطق اقلیمی مختلف استان کردستان نشان داد بیشینه میانگین طولانی‌مدت غلظت سنجه‌های سولفات، بی‌کربنات، کلر، کلسیم، منیزیم، سدیم، کل جامدات محلول، اسیدیت و هدایت الکتریکی مربوط به منطقه شرقی و بیانگر تاثیر تنوع اقلیمی و بروز خشکسالی بوده است. در همین حال، نتایج توزیع مکانی میانگین مقادیر دما، بارش و تبخیر- تفرق موید تاثیر تنوع اقلیمی بر کاهش کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه بود. اگرچه، نتایج حاصل از این پژوهش با ارایه بینش کاملی از تاثیر خشکسالی بر کیفیت جریان‌های سطحی استان کردستان برای مدیریت و بهینه‌سازی مصرف منابع آب سطحی از طریق اقدامات کنترلی و تمهیدات مدیریتی مفید خواهد بود، اما با توجه به اثرات نامطلوب خشکسالی بر کیفیت آب، پایش منظم و دوره‌ای کیفیت آب به‌ویژه در مواقع خشکسالی و در منطقه شرقی قابل توصیه است. همچنین، تغییر الگوی کشت (کاهش سطح زیرکشت محصولات با نیاز آبی زیاد)، استفاده از روش‌های نوین آبیاری، آموزش کشاورزان و شهروندان در خصوص مصرف بهینه آب به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی با هدف حفاظت از کیفیت و تضمین بهره‌برداری پایدار از منابع آب سطحی مفید و موثر خواهد بود.

در نهایت، از آنجایی که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و منابع مالی در دسترس مواجه بود، در پژوهش‌های آتی نسبت به ارزیابی سایر عوامل موثر بر کیفیت آب نظیر ورودی‌های انسانی (پساب‌های کشاورزی و شهری) قابل توصیه است. از طرف دیگر، نظر به اهمیت منابع آب سطحی در استان کردستان و به‌منظور تدوین برنامه‌های طولانی‌مدت

مدیریتی و بهره‌برداری مناسب و پایدار از منابع آب سطحی در منطقه مورد مطالعه، پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس فن‌آوری‌های سنجش از دور، تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های اقلیمی نیز پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رساله دکتری تخصصی مدیریت محیط زیست مصوب واحد رودهن دانشگاه آزاد اسلامی با کد ۱۱۳۷۴۸۶۰۰۵۴۵۷۲۹۳۲۴۰۱۹۱۶۲۴۶۹۵۶۷ است که بدین‌وسیله نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه برای فراهم کردن امکانات اجرای مطالعه، سپاسگزاری می‌نماید.

منابع

ایمانی‌بوژانی، ف.، کیانی‌صدر، م.، سبحان‌اردکانی، س.، لرستانی، ب. و چراغی، م. (۱۴۰۱) پایش چند شاخصی خشکسالی کشاورزی در شهرستان کرمانشاه. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۴): ۸۰۴-۸۱۵.

برخوری، س.، دولت‌کردستانی، م. و جواهری، ک. (۱۴۰۳) بررسی تغییرات پوشش گیاهی متاثر از خشکسالی در جنوب استان کرمان. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۴(۴): ۱۸-۳۱.

ترکمانی‌تمبکی، ح. و خامه‌چیان، م. (۱۴۰۳) بررسی کیفیت آب‌های سطحی ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده مطالعاتی سد سرنی شهرستان میناب برای مصارف مختلف با استفاده از نرم افزار Aq.QA. محیط‌شناسی، ۵۰(۴): ۴۱۳-۴۳۴.

تکیه‌خواه، ج.، کاتورانی، ش.، صیدی، س.، سهراب‌نژاد، چ. و جعفری، م. (۱۴۰۳) شناخت راهبرد و راهکارهای عملی جهت پیشگیری جرایم حوزه منابع آب زیرزمینی به‌منظور کاهش اثرات بحران آب در استان کردستان. محیط‌زیست و مهندسی آب، ۱۰(۳): ۴۲۹-۴۳۷.

حلمی، م. و شهیدی، ع. (۱۴۰۲) استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی تاثیر خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی، مطالعه موردی: رودخانه کشف‌رود. مجله پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم، ۱(۱): ۸۳-۹۶.

- دانش مهر، ح. و هدایت، ع. (۱۴۰۲) تضاد فرصت/ چالش توسعه: مدیریت پایدار منابع آب استان کردستان در کشمکش های نهادی و عمومی. مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۲): ۲۱-۳۵.
- رزمخواه، ه.، قهرمانی، ع.، فرارویی، ع. و رستمی راوری، ا. (۱۴۰۱) ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک، مطالعه موردی: رودخانه زهره. مدیریت جامع حوزه های آبخیز، ۲(۳): ۵۸-۸۱.
- سبحان اردکانی، س.، محمودنژاد، س. و حیدری، م. (۱۳۹۵) بررسی آلودگی آب رودخانه کلین کبود مریوان به فلزات سنگین در فصول بهار و تابستان سال ۱۳۹۲. پژوهش در بهداشت محیط، ۲(۴): ۳۱۱-۳۲۰.
- سعیدی پور، م.، رادمنش، ف.، اسلامیان، س. و شریفی، م. (۱۳۹۸) تحلیل منطقه ای خشکسالی در حوضه آبریز کارون با استفاده از شاخص های SPI و SPEI. علوم آب و خاک، ۲۳(۲): ۳۹۷-۴۱۵.
- شاهرخی، ز.، زارع، م.، میرمحمدی میبدی، س. و عربی علی آباد، ف. (۱۳۹۸) اثر خشکسالی بر کیفیت آب های سطحی حوضه هلیل رود، کرمان. علوم آب و خاک، ۲۳(۳): ۳۶۷-۳۸۰.
- طباطبایی هاشمی، م.، سرائی تبریزی، م. و بابازاده، ح. (۱۴۰۲) بررسی کیفی منابع آب های سطحی در جهت دستیابی به کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، مطالعه موردی: رودخانه مرزی ارس. مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدیدشونده، ۱۴(۱): ۱۱۱-۱۲۳.
- طیعی، ل. و سبحان اردکانی، س. (۱۳۹۱) سنجش پارامترهای کیفی آب رودخانه گاماسیاب و عوامل موثر بر آن. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۵۳(۲۴): ۳۷-۴۸.
- علی پناهی، ک.، رستمی، ن. و قیصوری، م. (۱۴۰۱) ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی دشت مهران بر پارامترهای کیفی آب سطحی در دوره های ترسالی و خشکسالی. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۴): ۱۲۷-۱۴۴.
- فرهادی نژاد، ط.، ویس کرمی، ا. و زند، م. (۱۴۰۳) بررسی رابطه بین تغییرات دبی ناشی از خشکسالی و کیفیت منابع
- آب سطحی حوضه رودخانه تیره. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۶(۱): ۶۴-۸۱.
- قیصوری، م.، سلطانی گردهرامزی، س. و قاسمی، م. (۱۳۹۷) ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک و تاثیر آن بر کیفیت آب، مطالعه موردی: رودخانه گدارخوش. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۱(۴): ۹۱-۱۰۵.
- محمودی، پ.، طاوسی، ت. و شاهوژئی، ع. (۱۳۹۴) خشکسالی و تاثیر آن بر کیفیت منابع آب سطحی در استان سیستان و بلوچستان. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹(۱): ۲۱-۳۵.
- Chen, J., Xu, J., Yi, Q., Peng, J., Lang, Y., Yang, L.E. and Zhang, J. (2024) Multidimensional water level and water quality response to severe drought in Xingyun Lake. *Heliyon*, 10(11): e32213.
- Ghobadi, A., Cheraghi, M., Sobhanardakani, S., Lorestani, B. and Merrikhpour, H. (2022) Groundwater quality modeling using a novel hybrid data-intelligence model based on Grey wolf optimization algorithm and multi-layer perceptron artificial neural network, Case study: Asadabad plain, Hamedan, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(6): 8716-8730.
- Giri, S., Mishra, A., Zhang, Z., Lathrop, R.G. and Alnahit, A.O. (2021) Meteorological and hydrological drought analysis and its impact on water quality and stream integrity. *Sustainability*, 13(15): 8175.
- Golzadeh, N., Lorestani, B., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M. and Khorasani, N. (2023) Comparing the effectiveness of ferric chloride chemical coagulant and natural coagulant of plane tree leaves in turbidity removal from industrial wastewater. *Research on Chemical Intermediates*, 49: 5613-5633. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11164-023-05151-y/>
- Hosseinzadeh Talae, P., Shifteh Some'e, B. and Sobhanardakani, S. (2014) Time trend and change point of reference evapotranspiration over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 116(3-4): 639-647.
- Imani Buzhani, F., Kiani Sadr, M., Sobhanardakani, S., Lorestani, B. and Cheraghi, M. (2024) Remote sensing assessment of multi-year drought vulnerability of agriculture in Kangavar, Kermanshah Province, Western Iran. *Natural Hazards*, 120: 3865-3890.
- Lin, Y.I., Pan, S.Y., Chang, H.H., Yu, M.S. and Lin, W.L. (2023) Will extreme drought impact the reservoir water quality? A 30-year observational study. *Agricultural Water Management*, 289: 108574. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108574/>
- Lu, Y., Yang, T., Fu, J. and Song, W. (2025) Utility of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to detect agricultural droughts over

- agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. Hydrological Sciences Journal, 65(6): 1005-1021.
- Samiei, S. and Alijanian, M. (2025) A comprehensive spatiotemporal and risk reduction drought assessment study utilizing SPEI index for Urmia Lake Basin, Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 58: 102203. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102203/>
- China. Journal of Hydrology: Regional Studies, 58: 102190. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102190/>
- Panday, D.P., Kumar, M., Agarwal, V., Torres-Martínez, J.A. and Mahlknecht, J. (2024) Corroboration of arsenic variation over the Indian Peninsula through standardized precipitation evapotranspiration indices and groundwater level fluctuations: Water quantity indicators for water quality prediction. Science of the Total Environment, 954: 176339. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176339/>
- Peña-Guerrero, M.D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L. and Meza, F. (2020) Drought impacts on water quality and potential implications for

Assessment of climatic drought effect on the quality of surface water flows of Kurdistan Province, west of Iran

Majid Maleki¹, Azita Behbahania^{2*}, Mina Maki Aleagha³ and Behzad Shahmoradi⁴

- 1) Ph.D. Candidate, Department of Environmental Management, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran.
- 2) Associate Professor, Department of Environment, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran.
*Corresponding Author Email Address: az.bahbahania@iau.ac.ir
- 3) Assistant Professor, Department of Environment, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran
- 4) Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran.

Date of Submission: 2025/05/04

Date of Acceptance: 2025/06/27

Abstract

Quantitative assessment of drought at different temporal and spatial scales using indices such as SPEI and investigating its impact on surface water quality is a necessary and important prerequisite for facilitating effective management of water resources and appropriate adaptation to drought conditions in each region. Therefore, this study was performed to evaluate the impact of climatic drought on the quality of surface water resources of Kurdistan Province. In so doing, amounts of daily precipitation, temperature, evaporation, and water quality parameters data were collected from the Regional Water Company of Kurdistan Province during the 34-year statistical period (1985-2018). The standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI) values were calculated to quantify and determine the dry and wet years in the statistical period under study. The calculated SPEI values during the statistical period 1985-2018 varied from -1.33 to 1.70 and represented the climatic conditions of "moderate drought" to "severe wet" in the study area. The results showed that a positive and significant correlation between drought and the SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl, Ca, Mg, Na, TDS and EC. Meanwhile, the increasing trend of water quality parameters during the drought (2008) compared to the long-term average indicated the effect of reduced rainfall as well as increased temperature and evapotranspiration on the reduction of surface water quality during the drought period. Also, the results showed that the highest long-term average values of SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl, Ca, Mg, Na, TDS, pH, and EC were related to the eastern region of the study area, indicating the impact of climatic diversity and the occurrence of drought. On the other hand, the results of the spatial distribution of the average values of precipitation, temperature, and evapotranspiration confirmed that the impact of climatic diversity on the reduction of water quality in the study region. Overall, the results of this study will be useful as a primary and scientific data set for managing and optimizing surface water use in Kurdistan Province through control measures and management measures, especially during droughts. In addition, regular and periodic monitoring of surface water quality, especially during droughts, is recommended to protect water quality and ensure sustainable use of surface water resources.

Keywords: Climatic drought, Kurdistan Province, SPEI index, Surface water, Water quality parameters.