

مقاله علمی - پژوهشی

بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در دشت مهاباد

سعیده احراری^۱ و امید رجا^{۲*}

چکیده

در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری تخصصی به نام DrinC (محاسب شاخص‌های خشکسالی) با هدف بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در دشت مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی استفاده شد. از دو شاخص که اخیراً توسعه یافته (شاخص‌های RDI و SDI) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش، تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص ۱۲ ماهه در پایش دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی مناسب‌ترین مقیاس برای کلیه شاخص‌های خشکسالی است. مقایسه سری‌های زمانی شاخص‌های خشک‌سالی SPEI و SPI در طول دوره آماری نشان داد که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، اختلاف رفتاری دو شاخص از لحاظ شدت شاخص بیشتر می‌شود. دلیل این اختلاف می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییرات بارندگی و منظور نمودن پارامتر تبخیر و تعرق پتانسیل در این شاخص باشد. بررسی‌ها نشان داد که شاخص RDI تقریباً روند مشابهی مانند شاخص SPEI دارد. دو عامل بارش و تبخیر و تعرق در برآورد میزان این شاخص همانند شاخص SPEI تأثیر گذارند. همچنین، تغییرات شاخص SDI در طول دوره آماری نیز روند مشابهی با شاخص SPEI نشان داد. خشک‌سالی هیدرولوژیکی معمولاً هم‌زمان با خشک‌سالی هواشناسی رخ نمی‌دهد و با تأخیری نسبت به آن‌ها روی می‌دهد؛ زیرا زمان طولانی‌تری مورد نیاز است تا اینکه کاهش بارش بتواند اثر خود را بر اجزای سامانه‌های هیدرولوژیکی از قبیل جریان‌های سطحی و رطوبت خاک نشان دهد. به‌طور کلی نتایج نشان داد بسته نرم‌افزاری DrinC شامل ابزارهای مفیدی است که برای برآوردن نیازهای طیف گسترده‌ای از موارد تصمیم‌گیری کمک می‌کند. این نرم‌افزار ممکن است در کاربردهای مختلفی مانند پایش خشک‌سالی، ارزیابی توزیع مکانی خشک‌سالی، بررسی سناریوهای اقلیمی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. آگاهی و شناخت از ماهیت شاخص‌های خشک‌سالی از طریق بررسی و مقایسه نتایج شاخص‌های مختلف خشک‌سالی این امکان را به تصمیم‌گیران و مدیران می‌دهد تا درک بهتری نسبت به شروع خشک‌سالی و برنامه‌ریزی میان‌مدت و بلندمدت برای سازگاری با آن داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: آذربایجان غربی، پایش، تبخیر و تعرق، درجه حرارت، DrinC

مقدمه

جهان تأثیر می‌گذارد. تقریباً همه عوامل تعیین‌کننده چرخه هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که از بارش شروع می‌شود و با جریان در سیستم‌های آب سطحی یا تغذیه و ذخیره‌سازی در سفره‌های آب زیرزمینی پایان می‌یابد. بنابراین، عامل تعیین‌کننده‌ای که باید انتخاب شود بستگی به این دارد که تمرکز تجزیه و تحلیل بر کدام بخش از چرخه هیدرولوژیکی هست (Tsakiris et al. 2013). شاخص‌های خشک‌سالی معمولاً یا با اعمال دستی معادلات و روش‌های مربوطه و یا با استفاده از

خشک‌سالی به‌عنوان یک خطر طبیعی بزرگ در نظر گرفته می‌شود که بر چندین بخش از اقتصاد و محیط‌زیست در سراسر

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ دکتری، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (* نویسنده مسئول: omid.raja@ut.ac.ir).

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵

ابزارهای طراحی شده محاسبه می‌شوند. چنین ابزارهایی ممکن است در چارچوب بسته‌های نرم‌افزاری دیگر (مانند MATLAB، ArcGIS، R-project، و غیره) یا به‌عنوان نرم‌افزار مستقل، شامل یک یا چند شاخص، کار کنند. برخی از ابزارهای موجود برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی در زیر بدان اشاره شده است. برنامه SPI_SL_6، یک برنامه ساده برای محاسبه شاخص بارش استاندارد شده برای فواصل مختلف ماهانه است (NDMC، 2014). برنامه SPATSIM، عمدتاً یک بسته نرم‌افزاری مدیریت اطلاعات منابع آب است که می‌تواند برای محاسبه شاخص‌های مبتنی بر بارش، مانند شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، دهک‌ها، شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) و انحرافات از میانگین بلندمدت و میانگین بارش استفاده شود. این بسته شامل یک سیستم مدیریت پایگاه داده یکپارچه است که از فایل‌های شکل GIS به‌عنوان شکل اصلی مقادیر دسترسی به داده‌ها استفاده می‌کند (Smakhtin and Hughes, 2007). بسته SPEI مجموعه‌ای از توابع برای R-project است که می‌تواند برای محاسبه شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) و SPI استفاده شود (Beguería and Vicente-Serrano, 2013). همچنین بسته CDI، یک نرم‌افزار مبتنی بر MS Excel هست که توسعه‌یافته توسط FAO SWALIM (Balint et al., 2011) است. این بسته چهار شاخص خشکسالی بارش (PDI)، شاخص خشکسالی دما (TDI)، شاخص خشکسالی گیاهی (VDI) و شاخص ترکیبی خشکسالی (CDI) را محاسبه می‌کند؛ به‌طور کلی بسیاری از ابزارهای موجود اغلب به مهارت‌های کامپیوتری پیشرفته توسط کاربر یا آشنایی با بسته‌های نرم‌افزاری خاص نیاز دارند که وظیفه محاسبه شاخص‌های خشکسالی را به متخصصان محدود می‌کند. توسعه نرم‌افزار تخصصی و مستقل برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی که رابط کاربری ساده‌ای را ارائه دهد و خروجی‌های واضح و قابل مقایسه را تولید کند می‌تواند برای استفاده آکادمیک و عملیاتی بسیار مفید باشد. علاوه بر این، در نظر گرفتن نتایج چندین شاخص خشکسالی ممکن است به یک ارزیابی جامع از شدت خشکسالی منجر شود و دیدگاه بهتری به اهداف تحقیقاتی یا مدیریتی خاص بدهد. بر اساس ملاحظات فوق، بسته

نرم‌افزاری به نام DrinC در مرکز ارزیابی مخاطرات طبیعی و برنامه‌ریزی پیشگیرانه و آزمایشگاه کارهای احیاء و مدیریت منابع آب دانشگاه فنی ملی آتن توسعه‌یافته است. از این بسته می‌توان برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی جهت توصیف خشکسالی، پایش خشکسالی، تحلیل فضایی خشکسالی و بررسی سناریوهای اقلیمی استفاده کرد (Tigkas et al., 2015). کاربر می‌تواند از طریق یک رابط مبتنی بر ویندوز از میان چندین گزینه که ممکن است با نیازهای خاص هر کار یا مطالعه موردی مناسب‌تر باشد، انتخاب کند. علاوه بر این، DrinC شامل دو ماژول برای محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه از طریق روش‌های مبتنی بر دما و برای پایش خشکسالی است. DrinC (ماشین حساب شاخص‌های خشکسالی) یک بسته نرم‌افزاری است که برای ارائه یک رابط ساده است؛ اما سازگار برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی توسعه‌یافته است. DrinC را می‌توان برای محاسبه دو شاخص اخیراً توسعه‌یافته یعنی شاخص خشکسالی شناسایی (RDI) و شاخص خشکسالی جریان سطحی (SDI) استفاده کرد. همچنین از این بسته نرم‌افزاری می‌توان برای محاسبه دو شاخص به‌طور شناخته‌شده یعنی شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و دهک‌های بارش (PD) استفاده کرد. علاوه بر این، این نرم‌افزار شامل یک ماژول برای تخمین تبخیر و تعرق بالقوه (PET) از طریق روش‌های مبتنی بر دما است که برای محاسبه RDI مفید است. این نرم‌افزار ممکن است در کاربردهای مختلفی مانند پایش خشکسالی، ارزیابی توزیع فضایی خشکسالی، بررسی سناریوهای اقلیمی و خشکسالی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این نرم‌افزار به‌عنوان یک ابزار تحقیقاتی و عملیاتی مفید برای تجزیه و تحلیل خشکسالی در حال افزایش است. نرم‌افزار DrinC در چندین برنامه کاربردی و مطالعات برای ارزیابی و پایش خشکسالی، عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شده است. اداره آب سازمان منابع مالت از DrinC برای تجزیه و تحلیل رویدادهای خشکسالی در کشور از دو شاخص RDI و SPI استفاده کرد. همچنین، در این مطالعه تلاش شده است مشکلاتی که می‌تواند ناشی از کمبود آب به‌دلیل حوادث شدید خشکسالی باشد، ارزیابی گردد (Borg, 2009).

آبخیز اورتو در سیسیل تجزیه و تحلیل کردند. هر دو اندازه‌گیری ماهواره‌ای و معمولی به منظور ارزیابی اثرات آب و هوایی بر پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد (Capodici et al., 2008). سرویس هواشناسی قبرس نیز در دو مطالعه از DrinC برای ارزیابی و پایش خشکسالی در قبرس با استفاده از شبکه گسترده‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی و تکنیک‌های GIS استفاده کرده است (Pashiardis and Michaelides, 2008). در مطالعه دیگر رجا و همکاران (۱۳۹۸) از شاخص SPEI برای ارزیابی وضعیت خشکسالی در منطقه مرودشت - خرامه استان فارس استفاده کردند. نتایج محاسبه‌ی شاخص SPEI⁶ محاسبه‌شده برای مقیاس‌های زمانی یک‌ماهه، سه ماه، چهار ماهه، شش ماه، ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه نشان داد که شاخص SPEI ۱۲ ماهه در پایش افت سطح ایستابی مناسب‌ترین مقیاس است. بیشترین و کمترین مقدار شاخص SPEI ۱۲ ماهه برای ایستگاه درودزن در بازه‌ی مورد بررسی (۹۵ - ۱۳۸۵) به ترتیب برابر ۱/۰۳- و ۲/۱۸- (خشکسالی بسیار شدید) در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۸ به دست آمد. همین پارامترها در ایستگاه تخت‌جمشید به ترتیب ۱/۴۵- و ۱/۷- (خشکسالی شدید) در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ به دست آمد. از نرم‌افزار DrinC برای پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های RDI و SPI در شیراز استفاده و با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد شاخص RDI نتایج بهتر و دقیق‌تری را نشان می‌دهد و این شاخص برای پایش خشکسالی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که میزان بارندگی آن کم است، پیشنهاد شد (Ansarifard and Shamsnia, 2018). در مطالعه مشابه دیگری شاخص‌های مختلف خشکسالی RDI و SPI در منطقه خشک و نیمه‌خشک هند با استفاده از نرم‌افزار DrinC مورد بررسی قرار گرفت (Surendran et al., 2019). نتایج نشان داد شاخص RDI به دلیل تطابق و پیش‌بینی با دقت مناسب و بالا در سال‌های خشک و مرطوب به‌عنوان یک شاخص مؤثر در پایش خشکسالی در نظر گرفته شد.

دانشگاه اصفهان و سازمان هواشناسی کشور نیز از DrinC برای پایش عملیاتی خشکسالی در منطقه اصفهان استفاده کردند. از داده‌های هواشناسی ۱۰ ایستگاه برای محاسبه شاخص‌های RDI¹ و SPI² استفاده شد (Mostafavi Darani et al., 2011). در مطالعه دیگر مرکز ارزیابی مخاطرات طبیعی و برنامه‌ریزی پیشگیرانه دانشگاه فنی ملی آتن³ (NTUA) دوره‌های خشکسالی را در سطح منطقه‌ای در جزیره کرت مورد مطالعه قرار داد. این مرکز مجموعه‌ای از نقشه‌های خشکسالی سالانه را با استفاده از DrinC همراه با مدل توزیع فضایی تولید کردند (Tsakiris et al., 2007b). دانشگاه تسالی نیز از DrinC برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی برای یک دوره ۴۵ ساله با استفاده از سه شاخص خشکسالی (Deciles، Palmer Z، RDI) استفاده کرد (Kanellou et al, 2008). همچنین آزمایشگاه کار احیاء و مدیریت منابع آب مرکز NTUA در یونان به منظور ارزیابی تأثیر خشکسالی و تغییرات اقلیمی بر جریان رودخانه‌ها در حوزه‌های آبخیز کوچک از DrinC به همراه مدل بارندگی-رواناب استفاده کرد. این مطالعه در شش حوزه آبخیز کوچک در شمال پلوپونز⁴ انجام شد. شاخص RDI برای چندین دوره مرجع (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماه) محاسبه شد. همچنین از شاخص SDI⁵ برای نشان دادن خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده شد. معادلات رگرسیون بین RDI و SDI به دست آمد که سطح خشکسالی هیدرولوژیکی را برای کل سال پیش‌بینی می‌کند. علاوه بر این، hcنرم‌افزار DrinC برای نشان دادن طیف گسترده‌ای از سناریوها شامل تغییرات آب و هوایی احتمالی و رویدادهای خشکسالی با شدت‌های مختلف در منطقه شمال پلوپونز استفاده شد. نوموگرام‌ها برای تخمین تغییر سالانه جریان ناشی از هر سناریوی تغییر آب و هوا ابداع شدند (Tigkas et al., 2012). در مطالعه دیگر رصدخانه آب منطقه سیسیل و دانشگاه پالرمو سری‌های زمانی داده‌های آب و هوایی (بارندگی و دما) را با استفاده از شاخص‌های خشکسالی (RDI و SPI) و شاخص داده‌های پوشش گیاهی (NDVI) را در حوضه

⁴ N. Peloponnese

⁵ Streamflow Drought Index

⁶ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

¹ Reconnaissance Drought Index

² Standardized Precipitation Index

³ The National Technical University of Athens

شاخص‌های خشکسالی را می‌توان در زمینه‌های علمی (آموزش، پژوهش، مطالعات و غیره) و همچنین در سطوح استراتژیک و عملیاتی (تصمیم‌گیری، مدیریت فعال و کاهش خشکسالی و غیره) به کاربرد که طیف وسیعی از کاربران را در برمی‌گیرد. البته هیچ شاخص واحدی به‌طور جهانی توصیه نشده است. بنابراین در بیشتر موارد لازم است بیش از یک شاخص در نظر گرفته شود (Morid et al., 2006). هدف این از انجام این مطالعه نیز برآورد و مقایسه شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در منطقه مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی با استفاده از نرم‌افزار DrinC بود. بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف خشک‌سالی این امکان را به تصمیم‌گیران و مدیران می‌دهد تا با آگاهی از ماهیت شاخص‌ها و نتایج آن‌ها، درک بهتری نسبت به شروع خشکسالی داشته باشند. همچنین به پیش‌بینی و برنامه‌ریزی میان‌مدت و بلندمدت برای سازگاری با آن کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حوضه مهابادچای یکی از مناطق مرتفع و از نظر وسعت، چهارمین زیر حوضه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که کل حوضه دارای مساحتی برابر با ۱۵۱۶ کیلومترمربع، واقع در شمال غربی ایران و جنوب غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که حدود ۲/۹ درصد از کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در برمی‌گیرد (دستجردی و همکاران، ۱۳۹۸). مشخصات کلی این حوضه در جدول ۱ ارائه شده است. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری به استان آذربایجان غربی تعلق دارد. به طوری که از شمال به جلگه مهاباد، از جنوب به حوضه آبریز زاب، از سمت غرب به حوضه آبریز گادار و از سمت شرق به حوضه آبریز سیمینه‌رود مجاورت دارد (شریف آذری و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۲). حداکثر ارتفاع محدوده حدود ۲۵۰۰ متر است که به ارتفاعات محدوده‌های مرزی غرب تعلق دارد. حداقل ارتفاع محدوده نیز حدود ۱۲۷۰ متر است که به حواشی دریاچه ارومیه مربوط است. از شهرهای مهم در این

بررسی‌ها نشان داده است که شاخص‌های SPEI و RDI به دلیل در نظر گرفتن بارش مؤثر براساس داده‌های بارش و تبخیر و تعرق به‌عنوان شاخص‌های مناسب در پایش و ارزیابی خشکسالی معرفی شده‌اند. این شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزار DrinC به‌عنوان یک نرم‌افزار کاربردی از طریق یک رویکرد ساده و قابل درک قابل محاسبه است (Tigkas et al., 2022; et al., 2021). در مطالعه‌ای شاخص‌های SPEI، RDI و SDI برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در منطقه دلتای مکونگ ویتنام^۱ با استفاده از نرم‌افزار DrinC استفاده شد. نتایج نشان داد این شاخص‌های می‌توانند در درک تفاوت بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی منطقه‌ای کمک کنند و برای پیش‌بینی میان‌مدت و بلندمدت خشکسالی و برنامه‌ریزی مدیران برای آن استفاده شوند (Minh et al., 2024). خشکسالی پدیده‌ای پیچیده است که عمدتاً با شدت، مدت و گستردگی منطقه‌ای مشخص می‌شود. در بین این سه بعد، شدت خشکسالی عامل کلیدی است که می‌تواند برای تجزیه و تحلیل خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد. شاخص‌های خشکسالی معمولاً برای ارزیابی شدت خشکسالی به روشی معنادار استفاده می‌شوند. بارش و تبخیر و تعرق دو پارامتر مهم و ضروری برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی هستند. از این رو برای پایش تغییرات اقلیمی دوره‌ای فعلی و آتی می‌توان از شاخص‌های خشکسالی که با در نظر گرفتن مقادیر بارش و مقدار تبخیر و تعرق استفاده کرد. به‌طورمعمول، خشکسالی‌ها بر اساس اهداف مطالعه تعیین و مشخص می‌شوند. خشکسالی‌ها در سه دسته هواشناسی (بارش، تبخیر و تعرق بالقوه)، هیدرولوژیکی (جریان سطحی یا تغذیه آب زیرزمینی)، کشاورزی (رطوبت خاک) طبقه‌بندی می‌شوند. شاخص‌های خشکسالی ابزارهای ضروری برای توصیف و پایش خشکسالی هستند. این شاخص‌ها عملکردهای پیچیده اقلیمی را ساده می‌کنند و می‌توانند ناهنجاری‌های اقلیمی را از نظر شدت، مدت و فراوانی بررسی کنند. همچنین آن‌ها بسیار مفید هستند؛ زیرا می‌توانند اطلاعات قابل درک در مورد شدت دوره‌های خشکسالی را به مخاطبان منتقل کنند (Tsakiris et al., 2007c).

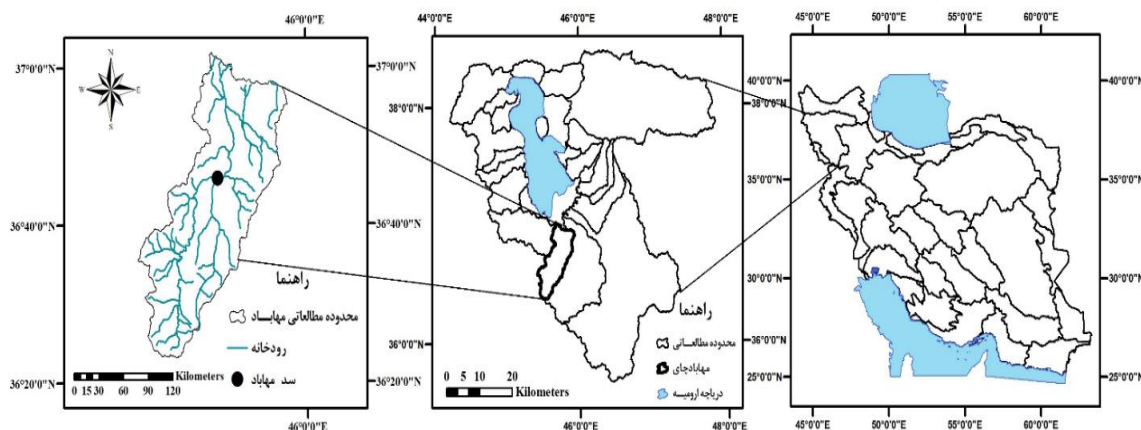
¹ The low-lying Vietnamese Mekong Delta

جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی از استوا در جنوب غربی دریاچه ارومیه قرار گرفته است. منطقه مهاباد، در طول دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ میلادی متوسط بارندگی سالانه ۴۰۲ میلی‌متر و به لحاظ اقلیمی دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک است. متوسط تبخیر سالانه از تشت ۱۸۶۰ میلی‌متر و متوسط تبخیر از سطح آزاد ۱۵۶۰/۶ میلی‌متر است.

محدوده می‌توان به شهر مهاباد و همچنین از سازه‌های مهم در این محدوده می‌توان به سد مهاباد و شبکه آبیاری و زهکشی پایین‌دست آن اشاره نمود. موقعیت این محدوده در کشور و حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شکل ۱ نشان داده شده است. دشت مهاباد واقع در محدوده مطالعاتی مهابادچای با وسعت ۲۴۹ کیلومترمربع در موقعیت طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی و عرض

جدول ۱- مشخصات کلی حوضه مهابادچای (مطالعات بهنگام سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ۱۳۹۳)

نام محدوده مطالعاتی	مساحت دشت (کیلومترمربع)	مساحت ارتفاعات (کیلومترمربع)	مساحت محدوده مطالعاتی (کیلومترمربع)	ارتفاع متوسط از سطح دریا (متر)	متوسط بارش ۳۰ ساله (میلی‌متر)
مهابادچای	۲۴۹	۱۲۵۹	۱۵۰۸	۱۶۳۴	۴۰۲



شکل ۱- موقعیت دشت مهاباد در حوضه دریاچه ارومیه و کشور

می‌گیرد. همچنین ضریب خشکی دومارتن (I) ۱۷/۲ برآورد شد که با توجه به محدوده تغییرات ضریب خشکی دومارتن، دشت مهاباد در اقلیم نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. علاوه بر نیمه‌خشک بودن، منطقه دارای زمستان‌های طولانی و تابستان‌های نسبتاً گرم و خشک است. با توجه به نقش مؤثر پارامترهای مختلف هواشناسی در مطالعات بیلان منابع آب، بررسی آمار و اطلاعات و تجزیه و تحلیل آن‌ها امری بدیهی و ضروری است. مشخصات ایستگاه سینوپتیک مهاباد واقع در دشت مهاباد در جدول ۲ ارائه شده است.

طبقه‌بندی اقلیمی توصیفی از وضعیت آب‌وهوای یک منطقه بوده و نتیجه توأم پدیده‌های هواشناسی است. اقلیم معنای گسترده‌ای داشته و تنها به پارامترهای هواشناسی محدود نمی‌شود بلکه مجموعه عوامل فیزیکی، شیمیایی، زیست‌محیطی و فرهنگی را در برمی‌گیرد. در مسائل هیدرولوژی، اقلیم به عوامل هواشناسی محدود شده و تأثیر سایر عوامل را در نظر گرفته نمی‌شود. در این مطالعه وضعیت اقلیمی منطقه بر اساس روش تجربی آمبرژه و دومارتن با استفاده از آمار ایستگاه هواشناسی مهاباد بررسی شد. ضریب آمبرژه (Q) ۳۹/۲ برآورد شد که با توجه به اقلیم نمای آمبرژه دشت مهاباد در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در محدوده و اطراف منطقه مورد مطالعه

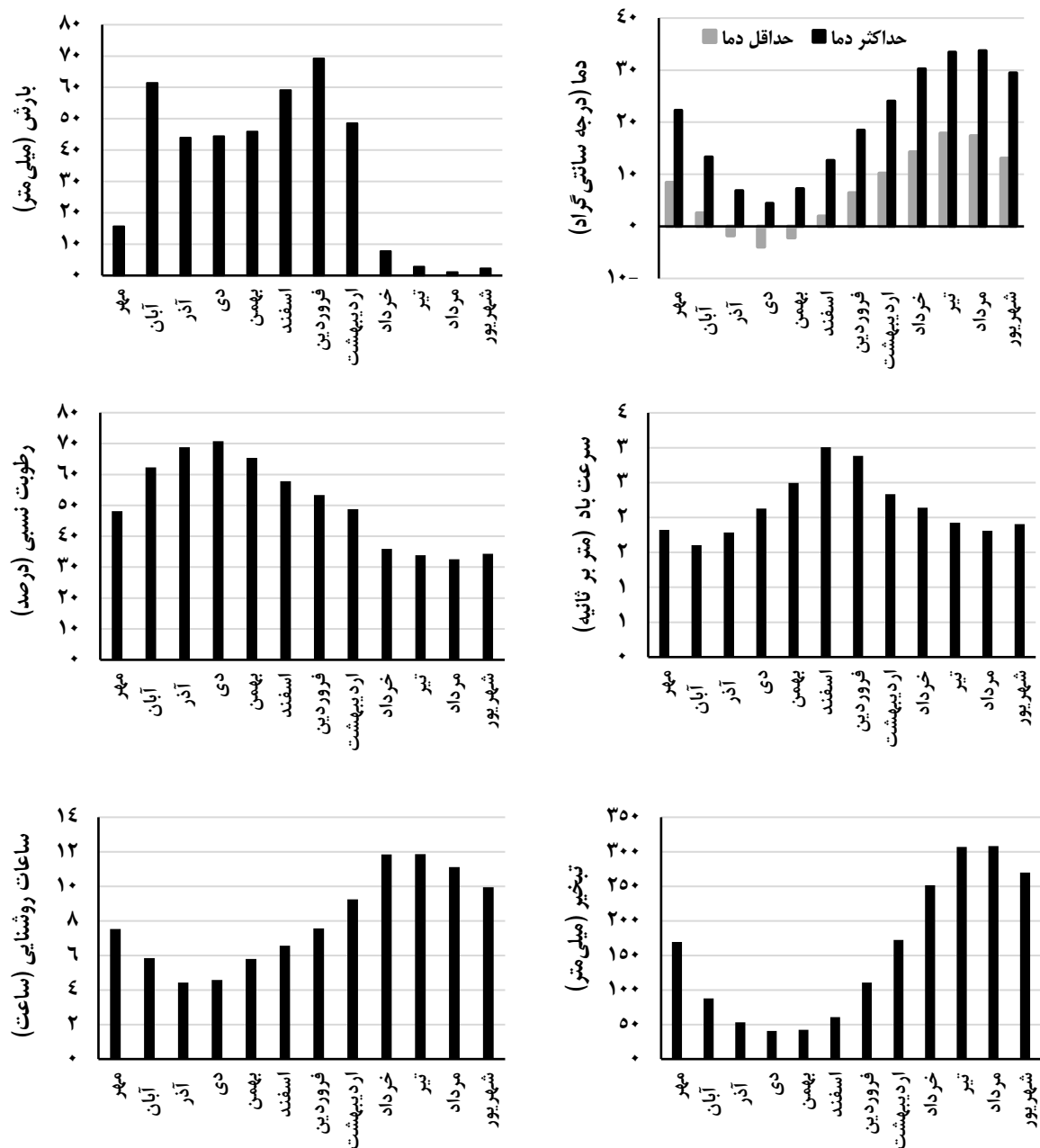
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال تاسیس	مشخصات جغرافیایی			میانگین بارش سالانه (میلی متر)
			طول	عرض	ارتفاع	
مه‌آباد	سینوپتیک اصلی	۱۳۶۲	۴۵° ۴۳'	۳۶° ۴۵'	۱۳۵۲	۴۰۲

۱۱/۸۶ و ۴/۴۲ ساعت مشاهده شده است. همچنین حداکثر و حداقل تبخیر ماهانه در ماه‌های مرداد و دی به میزان ۳۰۸/۱ و ۴۰/۹ میلی متر در ایستگاه مه‌آباد ثبت شده است.

نرم‌افزار DrinC، داده‌ها و شاخص‌های خشکسالی

وقوع خشکسالی هواشناسی با تداوم زیاد بر منابع آب سطحی تأثیر می‌گذارد. بدین دلیل خشکسالی هیدرولوژیکی را باید به همراه تأثیرات کاهش دوره بارش (خشکسالی هواشناسی) بررسی کرد. بنابراین شناخت و تعیین دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به مدیران و برنامه‌ریزان در تعیین استراتژی‌های مدیریت منابع آب کمک خواهد کرد. به‌طور کلی شاخص‌های خشکسالی از نظر متغیرهای هواشناسی موردنیاز، متفاوت می‌باشند. درعین حال، اساس آماری آن‌ها یکسان است. بدین معنی که داده‌ها بر توزیع مناسب، برازش داده شده و سپس مقادیر هم احتمال تجمعی از توزیع مناسب به توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌گردد. در این مطالعه، از شاخص خشکسالی SPI مبتنی بر متغیر بارندگی و شاخص‌های خشکسالی SPEI و RDI مبتنی بر دو متغیر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل و نیز شاخص خشکسالی SDI مبتنی بر جریان‌ات سطحی (رواناب) با استفاده از نرم‌افزار DrinC مورد بررسی قرار گرفت.

به‌طور کلی در این مطالعه برای ارزیابی و پایش شاخص‌های خشکسالی، ایستگاه سینوپتیک مه‌آباد معرف منطقه انتخاب شد. در زیر خلاصه‌ای از پارامترهای اقلیمی مهم آن پرداخته شده است. بارندگی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی است. تغییرات متوسط بارندگی ماهانه، حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات روشنایی و تبخیر در دوره زمانی درازمدت (۹۸-۱۳۶۲) برای ایستگاه سینوپتیک مه‌آباد در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی نحوه توزیع بارش‌های ماهانه نشان می‌دهد در این محدوده فروردین پر باران‌ترین ماه سال با حدود ۱۷/۲ درصد بارش سالانه و نیز کمترین مقدار بارندگی سالانه به ماه مرداد تعلق داشته و معادل ۰/۳ درصد است. مقادیر بارش در طی فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و تابستان مطابق با آمار درازمدت برابر با ۳۰/۱، ۳۷/۱، ۳۱/۲ و ۱/۶ درصد است. متوسط حداکثر و حداقل ماهانه دما با میزان ۳۳/۷۲ و ۲/۱۷- درجه سانتی‌گراد به ترتیب در ماه‌های مرداد و بهمن اتفاق افتاده است. متوسط حداکثر و حداقل ماهانه رطوبت نسبی در ماه‌های ۷۰/۷۲ و ۳۲/۵۳ درصد در ماه‌های دی و مرداد مشاهده شده است. مقادیر متوسط حداکثر و حداقل ماهانه سرعت باد در ماه‌های اسفند و آبان با مقادیر ۳/۰۱ و ۱/۶ متر بر ثانیه و متوسط حداکثر و حداقل ماهانه ساعات آفتابی در ماه‌های مرداد و آذر با مقادیر



شکل ۲- متوسط بارندگی، درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات روشنایی و تبخیر ماهانه درازمدت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مهاباد (۹۸-۱۳۶۲)

نرم افزار DrinC

احیا و مدیریت منابع آب دانشگاه فنی ملی آتن استفاده شد (Tigkas et al., 2015). DrinC ابزاری کاربرپسندی است که برای محاسبه چندین شاخص خشکسالی ارائه شده است. هدف

در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری DrinC¹ تهیه شده در مرکز ارزیابی خطرات طبیعی و برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه و موسسه

¹ Drought Indices Calculator

دیگر از ویژگی‌های نرم‌افزار، عملکرد "حالت چندنقطه‌ای"^۱ است که با آن می‌توان مجموعه‌ای از داده‌های ورودی برای چندین نقطه مکانی را وارد کرد و هر شاخص خشکسالی را می‌توان برای هر نقطه از طریق یک روند تکراری محاسبه کرد. این روش خودکار ممکن است برای ارزیابی توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی و تولید نقشه‌های خشکسالی استفاده شود.

داده‌های مورد استفاده

محاسبه هر شاخص به داده‌های ورودی متفاوتی نیاز دارد، همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است. داده‌ها را می‌توان مستقیماً از فایل‌های MS Excel به صورت دستی یا خودکار وارد کرد. داده‌ها می‌توانند ماهانه یا سالانه باشند و گزینه‌ای برای استفاده از سری داده‌های واقعی (تا ۱۵۰ سال) یا مصنوعی (تا ۱۵۰۰ سال) وجود دارد. همچنین گزینه‌ای برای تبدیل داده‌های بارندگی به داده‌های بارندگی مؤثر وجود دارد. داده‌های وارد شده در یک پنجره مدیریت بارگذاری می‌شوند جایی که می‌توان آن‌ها را بررسی و ویرایش کرد.

نرم‌افزار DrinC یک ماژول برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) با روش‌های مبتنی بر دما ارائه می‌دهد که از روش‌های هارگریوز و سامانی (Hargreaves and Samani, 1982, 1985)، تورنت وایت (Thornthwaite, 1947)، بلنی - کریدل (Doorenbos and Pruitt, 1977) و پنمن - مانتیت فائو (Allen et al., 1998) برای محاسبه آن استفاده می‌کند. معادله هارگریوز و سامانی به داده‌های حداقل و حداکثر دما نیاز دارد، درحالی‌که دو مورد دیگر (تورنت وایت و بلنی - کریدل) فقط به داده‌های میانگین دما نیاز دارند. معادله پنمن - مانتیت نیز به داده‌های حداقل و حداکثر دما، حداقل و حداکثر رطوبت، سرعت باد و ساعات روشنایی نیاز دارد. در این مطالعه از معادله پنمن - مانتیت فائو برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) استفاده شد. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل و حداکثر ماهانه، سرعت باد، ساعات روشنایی و بارش ماهانه بین سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۹ میلادی (۱۳۷۰-۱۳۹۸ هجری شمسی) از ایستگاه

اصلی در طراحی این نرم‌افزار، قابلیت آن در برآورد انواع مختلف خشک‌سالی (هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی) است. نرم‌افزار DrinC دارای عملکرد کامل رابط کاربری گرافیکی (GUI) است و بر روی سیستم عامل‌های MS Windows اجرا می‌شود. در طول توسعه بسته نرم‌افزاری بر حفظ ساختاری ساده، جامع و کاربرپسند تأکید شده است. تمام عملکردها از طریق منوی اصلی نرم‌افزار قابل دسترسی هستند و در هر پنجره چندین گزینه اضافی برای هر عملیات وجود دارد.

شاخص‌های خشکسالی را می‌توان از طریق یک روش سازگار محاسبه کرد و به کاربر این توانایی را می‌دهد تا پارامترهایی را که متناسب با نیازها یا هدف هر مطالعه است، برآورد کند. به‌عنوان مثال، مفاهیم نظری اولیه SPI و RDI متفاوت است؛ زیرا SPI به ترتیب ماهانه محاسبه می‌شود (McKee, 1993)، درحالی‌که RDI برای دوره‌های گسسته بر اساس سال آبی محاسبه می‌شود (Tsakiris et al., 2007a). در DrinC گزینه‌ای برای استفاده از هر دو روش برای هر شاخص وجود دارد که امکان مقایسه نتایج بین RDI و SPI را فراهم می‌کند. علاوه بر این، استفاده از توزیع گاما یا لوگ نرمال ممکن است انتخاب شود. پیش‌فرض اولیه در DrinC سال هیدرولوژیکی (اکتبر - سپتامبر) است، بنابراین دوره محاسبه پیش‌فرض از اکتبر شروع می‌شود و مراحل اصلی زمانی ماهانه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه است. بالین‌حال، می‌توان مراحل زمانی دیگری (به‌عنوان مثال ۴ ماهه) یا ماه‌های شروع (مانند ژانویه) را تعریف کرد. این انعطاف‌پذیری ممکن است برای برنامه‌ریزی‌ها در دنیای واقعی مفید باشد. به‌عنوان مثال، مطالعه اثرات خشکسالی بر محصولات خاص باید با دوره رشد محصول هم‌زمان باشد. همچنین گزینه‌ای برای محاسبه توالی شاخص‌های خشکسالی برای هر ماه وجود دارد و خروجی‌ها ممکن است در هر ماه یا هر دوره ارائه شود تا مقایسه مستقیمی از شدت خشکسالی در دوره‌های خاص برای هر سال ارائه گردد. همچنین نتایج را می‌توان در فایل‌های MS Excel ذخیره کرد و کاربر می‌تواند فرمت خروجی و سایر گزینه‌ها (به‌عنوان مثال نمودارهای ترسیم شده به صورت خودکار) را انتخاب کند. یکی

¹ Multi-points mode

مقدم بر شروع انواع دیگر خشکسالی است. شاخص‌های مختلفی برای نظارت و ارزیابی میزان خشکسالی‌های هواشناسی وجود دارد. از طریق خشکسالی هواشناسی مبتنی بر باران، می‌توان میزان خشکسالی را فقط با توجه به میزان بارش بررسی کرد. از شاخص‌های خشکسالی معمولاً برای ارزیابی شدت خشکسالی استفاده می‌شود. در این مطالعه، از شاخص‌های خشکسالی استاندارد شده بارش SPI^7 (McKee et al., 1993)، باران - تبخیر و تعرق استاندارد شده (Vicente-Serrano et al., 2010) $SPEI^8$ ، خشکسالی احيایی (Tsakiris and Vangelis, 2005) RDI^9 و جریان استاندارد (Nalbantis and Tsakiris, 2009) SDI^{10} برای پایش و تعیین دوره‌های ترسالی، نرمال و خشکسالی استفاده شد.

شاخص استاندارد شده بارش (SPI) برای هر مکانی براساس داده‌های بارش ثبت شده در طولانی‌مدت قابل محاسبه است. شاخص SPI نخستین بار توسط مک‌کی و همکاران استفاده کردند (McKee et al., 1993). این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای مقیاس زمانی مشخص و با توجه به انحراف معیار آن به دست می‌آید و تنها عامل مؤثر در محاسبه این شاخص، میزان بارندگی است. داده‌های بارش ثبت شده در بلندمدت به یک توزیع احتمالاتی برازش و سپس به یک توزیع نرمال تغییر شکل داده می‌شوند، به طوری که میانگین SPI در مکان و دوره زمانی موردنظر صفر و واریانس آن یک است. محاسبه شاخص خشکسالی SPI در هر مقیاس‌های زمانی از مزیت‌های این شاخص است. در این شاخص توزیع احتمال بارش یک ایستگاه معمولاً از توزیع گاما پیروی می‌کند. برای بررسی اثرات اقلیم بر وضعیت منابع آب محدوده، از شاخص بارش، تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) که توسط ویسنت - سرانو و همکاران پیشنهاد شد، استفاده شد. این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل

هواشناسی سینوپتیک مهاباد برای بررسی شاخص‌های خشکسالی RDI، SPEI و SPI و از داده‌های جریان سطحی ماهانه برای برآورد شاخص خشکسالی SDI در نرم‌افزار DrinC استفاده شد.

جدول ۳- داده‌های ورودی موردنیاز برای هر شاخص

شاخص	داده موردنیاز
SPI	بارندگی
RDI, SPEI	بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل (یا دما)
SDI	جریان سطحی

شاخص‌های خشکسالی

خشکسالی پدیده‌ای پیچیده است که عمدتاً با شدت، مدت‌زمان و میزان آن مشخص می‌شود. از بین این سه بعد، شدت خشکسالی عامل اصلی است که می‌تواند برای تجزیه و تحلیل خشکسالی استفاده شود. به طور کلی هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC) خشکسالی را یک دوره طولانی‌مدت کاهش بارش معرفی کرده است، به طوری که کمبود بارش منجر به کاهش آب قابل دسترس می‌شود. انجمن هواشناسی آمریکا (AMS) خشکسالی را به چهار دسته تقسیم می‌کند: خشکسالی هواشناسی^۳ (کاهش یا عدم بارش)، خشکسالی کشاورزی^۴ (عدم کاهش رطوبت خاک منطقه ریشه)، خشکسالی هیدرولوژیکی^۵ (کاهش و یا خشک شدن ذخیره آب‌های سطحی) و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی^۶ (فقدان منبع آب برای فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی). استانداردها برای بیان خشکسالی مبتنی بر اقلیم‌شناسی منطقه است. به طور معمول، اندازه‌گیری‌های هواشناسی اولین شاخص‌های خشکسالی می‌باشند. خشکسالی هواشناسی را می‌توان در نتیجه کاهش و یا عدم بارش مشاهده کرد و آن را در یک منطقه برای یک دوره زمانی تعریف کرد. این شرایط معمولاً برای هر منطقه متفاوت است؛ زیرا شرایط جوی در مناطق مختلف از نظر مکان و زمان بسیار متغیر است. خشکسالی هواشناسی با توجه به شاخص‌های تعریف آن بر اساس داده‌های آب‌وهوا به نوعی

⁶ Socioeconomic drought

⁷ Standardized Precipitation Index

⁸ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

⁹ Reconnaissance Drought Index

¹⁰ Streamflow Drought Index

¹ The Intergovernmental Panel on Climate Change

² The American Meteorological Society

³ Meteorological drought

⁴ Agricultural drought

⁵ Hydrological drought

نرمال منطقه نشان می‌دهد. یکی دیگر از پرکاربردترین این شاخص‌ها، شاخص جریان استاندارد (SDI) است. این شاخص برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر مبنای جریان رودخانه به‌عنوان منبع آب سطحی است که مطابق با دستورالعمل نالبانتیس (۲۰۰۸) از یک سری زمانی حجم جریان ماهانه استفاده می‌کند (Nalbantis, 2008). طبقه‌بندی شاخص SDI همانند طبقه‌بندی شاخص‌های خشک‌سالی SPI و RDI است. طبقه‌بندی این شاخص در جدول ۶ ارائه شده است (Nalbantis and Tsakiris, 2009).

جدول ۵- طبقه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از شاخص RDI

مقدار	طبقه‌ی خشک‌سالی
$RDI \geq 2$	رطوبت بسیار شدید
$1/5 \leq RDI \leq 1/99$	رطوبت شدید
$1 \leq RDI \leq 1/49$	رطوبت متوسط
$0/49 \leq RDI \leq 1$	رطوبت خفیف
$-0/49 \leq RDI \leq -0/49$	نرمال
$-1 \leq RDI \leq -0/49$	خشک‌سالی خفیف
$-1/49 \leq RDI \leq -1$	خشک‌سالی متوسط
$-1/99 \leq RDI \leq -1/5$	خشک‌سالی شدید
$RDI \leq -2$	خشک‌سالی بسیار شدید

جدول ۶- طبقه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از شاخص SDI

مقدار	طبقه‌ی خشک‌سالی
$SDI \geq 2$	رطوبت بسیار شدید
$1/5 \leq SDI \leq 1/99$	رطوبت شدید
$1 \leq SDI \leq 1/49$	رطوبت متوسط
$0/49 \leq SDI \leq 1$	رطوبت خفیف
$-0/49 \leq SDI \leq -0/49$	نرمال
$-1 \leq SDI \leq -0/49$	خشک‌سالی خفیف
$-1/49 \leq SDI \leq -1$	خشک‌سالی متوسط
$-1/99 \leq SDI \leq -1/5$	خشک‌سالی شدید
$SDI \leq -2$	خشک‌سالی بسیار شدید

شاخص‌های RDI، SPEI و SPI به خشک‌سالی هواشناسی اشاره می‌کنند. علاوه بر این، شاخص‌های SPEI و RDI می‌تواند برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد؛

استفاده می‌نماید (Vicente-Serrano et al., 2010). برای برآورد شاخص‌های SPEI و SPI ابتدا داده‌های بارندگی و تبخیر و تعرق روزانه (ماهانه) پتانسیل ایستگاه سینوپتیک مهاباد (۱۳۷۰-۱۳۹۷)، استخراج و سری‌های زمانی تشکیل شد. شاخص‌های SPEI و SPI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند یک، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه گردد. مقادیر مثبت این شاخص‌ها بیانگر بیشتر بودن بارندگی از میانه و مقادیر منفی بیانگر کمتر بودن بارندگی از میانه است. بنابراین، مقادیر مثبت SPI و SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص‌ها می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشک‌سالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. مقادیر استاندارد این شاخص‌ها (SPI و SPEI) در جدول ۴ ارائه شده است (Mckee et al., 1993).

جدول ۴- طبقه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI

مقدار	طبقه‌ی خشک‌سالی
$SEPI \geq 2$	رطوبت بسیار شدید
$1/5 \leq SEPI \leq 1/99$	رطوبت شدید
$1 \leq SEPI \leq 1/49$	رطوبت متوسط
$-0/99 \leq SEPI \leq 0/99$	نرمال
$-1/49 \leq SEPI \leq -1$	خشک‌سالی متوسط
$-1/99 \leq SEPI \leq -1/5$	خشک‌سالی شدید
$SEPI \leq -2$	خشک‌سالی بسیار شدید

شاخص RDI اولین بار برای مناطق مدیترانه‌ای پیشنهاد شد (Tsakiris and Vangelis, 2005). برای محاسبه‌ی این شاخص، از نسبت بارندگی (P) به تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای سال‌های مختلف آماری استفاده می‌شود که برابر با نسبت شاخص خشک‌سالی ارائه شده از سوی سازمان فائو است (Tsakiris et al., 2007). طبقه‌بندی این شاخص خشک‌سالی در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر مثبت RDI بیانگر دوره مرطوب، درحالی‌که مقادیر منفی بیانگر دوره خشک را در مقابل شرایط

مناسب‌ترین مقیاس است (Al-Khafaji and Al-Ameri, 2021). لذا نتایج بررسی شاخص‌ها در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۳ ارائه شده است.

نتایج نشان داد بیشترین و کمترین مقدار شاخص SPI ۱۲ ماهه برای ایستگاه مهاباد در بازه‌ی مورد بررسی (۲۰۲۰-۱۹۹۰) به ترتیب برابر ۱/۶۹ (ترسالی شدید) و ۲/۲۷- (خشکسالی بسیار شدید) در سال‌های آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۲ و ۲۰۱۷-۲۰۱۶، بیشترین و کمترین مقدار شاخص SPEI ۱۲ ماهه به ترتیب ۱/۹۷ (ترسالی شدید) و ۱/۱۵- (خشکسالی متوسط) در سال‌های آبی ۱۹۹۴-۱۹۹۳ و ۲۰۰۰-۱۹۹۹، بیشترین و کمترین مقدار شاخص RDI ۱۲ ماهه به ترتیب ۱/۷۱ (ترسالی شدید) و ۲/۲۱- (خشکسالی بسیار شدید) در سال‌های آبی ۱۹۹۳-۱۹۹۲ و ۲۰۱۷-۲۰۱۶ و بیشترین و کمترین مقدار شاخص SDI ۱۲ ماهه به ترتیب ۱/۷۱ (ترسالی شدید) و ۲/۱۳- (خشکسالی بسیار شدید) در سال‌های آبی ۱۹۹۳-۱۹۹۲ و ۱۹۹۹-۱۹۹۸ اتفاق افتاده است. میانگین شاخص SPI، SPEI، RDI و SDI ۱۲ ماهه به ترتیب صفر، ۰/۴۲، صفر و صفر محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که به‌طور کلی طی بازه‌ی زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ علی‌رغم وجود دوره‌های تر و خشک، منطقه در شرایط نرمال قرار داشته است. نتایج نشان داد مستقل از نوع شاخص مورد استفاده در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه به‌طور مثال سال ۱۷-۲۰۱۶ خشک و سال ۲۰۰۳-۰۴ تر است.

نتایج نشان داد تداوم خشکسالی‌ها در شاخص SPEI طولانی مدت‌تر از تداوم خشکسالی‌ها در SPI است. این نتایج در تمامی بازه‌های زمانی صدق می‌نماید. همچنین، شاخص SPEI نسبت به تغییرات جزئی بارش حساسیت کمتری را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات شاخص SPI تا حدودی بیشتر از شاخص SPEI مشاهده شد. این امر را می‌توان در وقایع حدی ترسالی و خشکسالی رخ داده شده در شکل ۳ مشاهده کرد. با مقایسه سری‌های زمانی شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPI در طول دوره آماری می‌توان دریافت که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، اختلاف رفتاری دو شاخص هم از لحاظ شدت شاخص بیشتر می‌شود که می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییرات بارندگی و منظور

زیرا می‌تواند تعادل و بیلان آب را به‌اندازه کافی توصیف کند (Tsakiris et al., 2010). از طرف دیگر، شاخص SDI در خصوص خشکسالی هیدرولوژیکی کاربرد دارد و از جریان سطحی به‌عنوان عامل تعیین‌کننده استفاده می‌کند. جدا از روش‌های پیشنهادی محاسبه برای هر شاخص، DrinC شامل روش‌های جایگزینی است که امکان مقایسه نتایج را در بین شاخص‌ها فراهم می‌کند. این یک مزیت کلیدی به کاربر می‌دهد، زیرا انعطاف‌پذیری را برای انتخاب گزینه‌های مختلف برای تنظیم خروجی‌ها مطابق با نیازهای خاص فراهم می‌کند. به‌دلیل ساده سهل‌الوصول بودن متغیر مورد استفاده در شاخص SPI، شاخص فوق مبنای ارزیابی دیگر شاخص‌هاست (Mishra and Desai, 2005). لذا هر چقدر میزان هم‌بستگی شاخص‌های SPEI، RDI و SDI به شاخص SPI بیشتر باشد، شاخص SPI می‌تواند به‌عنوان سنج مناسب برای پیش خشکسالی برای اقلیم مورد نظر معرفی شود و هر چقدر هم‌بستگی شاخص‌های مذکور با SPI پایین‌تر باشد باید به دنبال شاخص مناسب بین سایر شاخص‌ها بود که علاوه بر بارش، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، رواناب سطحی و غیره را نیز در نظر می‌گیرند (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۵؛ بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸).

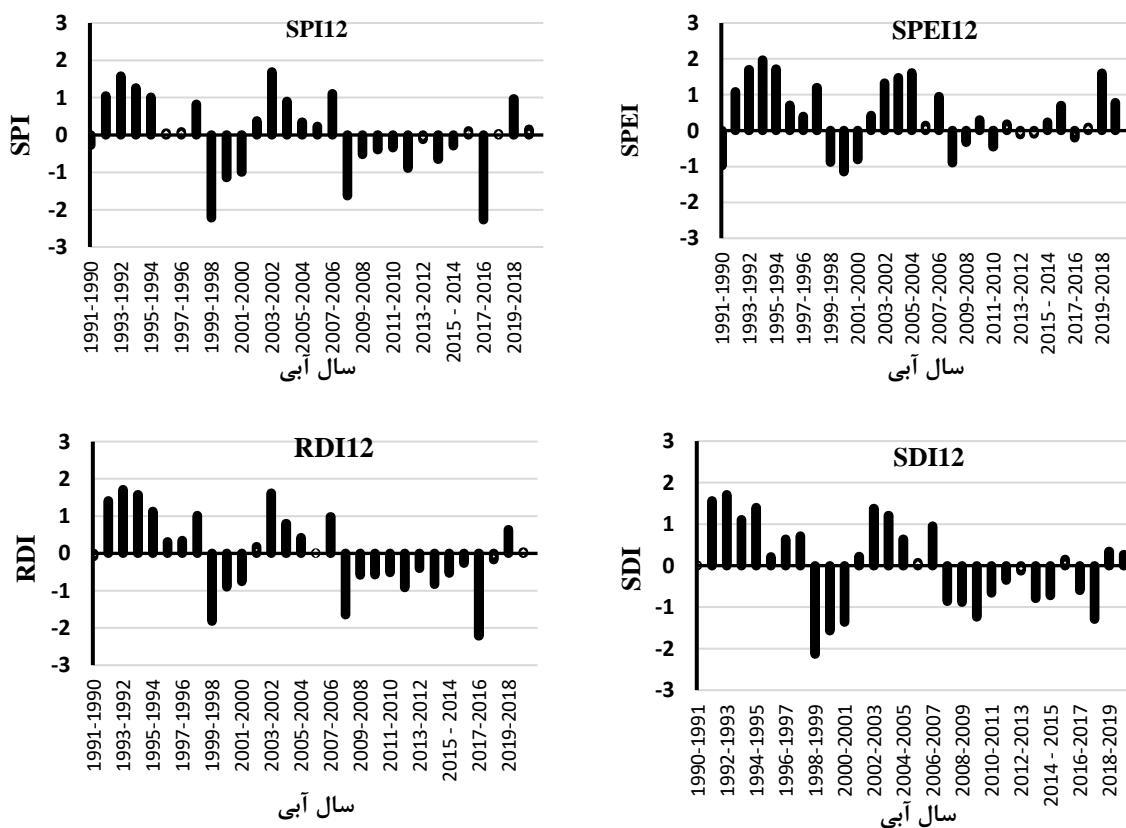
نتایج و بحث

در ابتدا شاخص‌های SPEI، SPI، RDI و SDI به‌طور جداگانه با مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۱۲ ماهه برای محدوده مطالعاتی مهاباد محاسبه شد. بررسی‌ها نشان داده است بیشترین همبستگی میان شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه اتفاق افتاده است (میراکبری و همکاران، ۱۳۹۷). در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت در همه شاخص‌ها، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب، زیاد است. با افزایش مقیاس‌های زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آن‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین به‌طور کلی از بین شاخص‌های محاسبه شده بر اساس مقیاس‌های زمانی یک‌ماهه، سه ماه، چهار ماهه، شش ماه و ۱۲ ماهه برای کلیه شاخص‌ها، شاخص ۱۲ ماهه در پایش دوره‌های خشکسالی و ترسالی

نشان داد که شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی SDI نتایج مشابهی از نظر شدت و مدت خشک‌سالی با شاخص‌های SPEI و RDI داشته است (Al-Khafaji and Al-Ameri, 2021).

همه شاخص‌های مورد بررسی در این مطالعه دارای محدوده یکسان می‌باشند. همچنین، با توجه به این‌که شاخص SPI صرفاً خشک‌سالی هواشناسی، شاخص‌های SPEI و RDI مبین شاخص خشک‌سالی کشاورزی و هیدرولوژیکی و نیز SDI صرفاً خشک‌سالی هیدرولوژیکی را بیان می‌کند؛ بنابراین می‌توان تأثیر شاخص خشک‌سالی‌ها بر یکدیگر را از طریق همبستگی بین آن‌ها را با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون مقایسه نمود. نتایج این روش ارزیابی شاخص‌های خشک‌سالی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ برای ایستگاه مهاباد در جدول ۷ ارائه شده است.

نمودن پارامتر درجه حرارت در این شاخص باشد (نصرتی، ۱۳۹۳؛ میراکبری و همکاران، ۱۳۹۷؛ رضایی قلعه و قربانی، ۱۳۹۷؛ Vicente-Serrano et al., 2010; Surendran et al., 2019; Abd-Elhamid et al., 2024). شاخص RDI تقریباً روند مشابهی مانند SPEI دارد. با توجه به این‌که دو عامل بارش و تبخیر و تعرق نیز همانند روش SPEI در برآورد میزان این شاخص تأثیر گذارند؛ لذا دور از انتظار نبود. سایر محققین نیز بیان کرده‌اند که استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق علاوه بر بارش در برآورد شاخص خشک‌سالی‌های SPEI و RDI نقش مهمی در وقوع خشک‌سالی و برآورد آن دارند (Ansarifard, S and Shamsnia; 2018; Surendran et al., 2019; Al-Khafaji and Al-Ameri, 2021). همچنین، تغییرات شاخص SDI در طول دوره آماری نیز روند مشابهی با شاخص SPEI نشان داد. در این راستا نتایج مطالعه‌ای در حوضه آبریز سد موصل عراق نیز



شکل ۳- نتایج محاسبه شاخص خشک‌سالی SPI12، SPEI12، RDI12 و SDI12 برای ایستگاه مهاباد

SPEI را ناشی از افزایش تبخیر و تعرق در فصل‌های بهار و تابستان محاسبه شده با شاخص SPEI نسبت دادند؛ بنابراین دما و تبخیر و تعرق تأثیر قابل توجهی در محاسبه SPEI داشته؛ به طوری که سبب تفاوت بین مقادیر این دو شاخص می‌شود (Vicente-Serrano et al., 2010). همچنین، شاخص SPEI از همبستگی بالاتری با SDI نسبت به شاخص SPI برخوردار بود که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برابر با ۰/۸۴ به دست آمد نتایج مطالعه‌ای در ویتنام با بررسی شدت، مدت و فراوانی شاخص‌های خشکسالی SPEI، RDI و SDI نشان داد که یک ضریب همبستگی قوی بین وقایع و شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه وجود دارد (Minh et al., 2024). همچنین سایر محققین نیز این موضوع را در تحقیقات خود تأیید کرده‌اند (میراکبری و همکاران، ۱۳۹۷؛ Batool et al., 2021).

نتایج بیانگر رابطه مناسب دو شاخص SDI و RDI است؛ به طوری که ضریب همبستگی پیرسون در سطح یک درصد در مقیاس‌های زمانی ۱۲ ماهه برابر ۰/۸۸ به دست آمد. نتایج سایر محققین نیز نشان داده است که همبستگی خوبی بین شاخص‌های خشکسالی SDI و RDI در مقیاس زمانی بلندمدت ۱۲ ماهه وجود دارد که این نتایج به درک منطقه‌ای از شروع خشکسالی و سازوکارهای مربوط به آن کمک می‌کند. این نتایج برای پیش‌بینی میان مدت و بلندمدت خشکسالی و برنامه‌ریزی برای سازگاری با آن حائز اهمیت است (Al-Khafaji and Al-Ameri, 2021). نتایج نشان داد شاخص‌های SPEI و SPI دارای همبستگی معنی‌دار، اما پایین‌تر نسبت به سایر شاخص‌ها داشت؛ اما شاخص SPEI پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی داشته است. نتایج مطالعات مصطفی‌زاده و ذبیحی (۱۳۹۵) و ویسنت-سرانو و همکاران (۲۰۱۰) نیز همبستگی پایین‌تر میان شاخص‌های SPI و

جدول ۷- همبستگی بین مقادیر محاسبه شده شاخص‌های SPEI، RDI، SDI و SPI

شاخص	SPI12	SPEI12	RDI12	SDI12
SPI12	-	۰/۶۲	۰/۷۴	۰/۶۲
SPEI12	۰/۶۲	-	۰/۸۳	۰/۸۴
RDI12	۰/۷۴	۰/۸۳	-	-
SDI12	۰/۶۲	۰/۸۴	۰/۸۸	-

سرعت باد می‌توانند بر میزان تبخیر و تعرق تأثیر بگذارند. میزان تقاضای آب برای محصولات کشاورزی نیز وابسته به میزان درجه حرارت است. بنابراین با افزایش دما، نیاز آبی افزایش می‌یابد. به طور کلی نقش تبخیر و تعرق پتانسیل در وقوع خشکسالی کشاورزی بسیار چشم‌گیر است. در این مطالعه نیز از روش تبخیر و تعرق مرجع به روش پنمن-مانتیت فائو استفاده شد که پارامترهای اقلیمی مختلفی را در نظر می‌گیرد. بنابراین شاخص خشکسالی SPEI مبتنی بر میزان بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل یا مرجع در مقایسه با شاخص‌هایی که تنها از بارندگی استفاده می‌نمایند (مانند SPI) می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشکسالی لحاظ نماید که از محاسن این شاخص

به طور کلی شاخص SPI صرفاً از میزان بارندگی روزانه و یا ماهانه استفاده می‌کند. این شاخص به عنوان یک ابزار مفید برای پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی و حتی وقوع سیل معرفی شده است؛ به طوری که نتایج آن می‌تواند برای مدیران و تصمیم‌گیران در برنامه‌ریزی کارآمد و مدیریت ریسک سیل و خشکسالی کمک کند تا اثرات چنین خطراتی را کاهش دهد (Abd-Elhamid et al., 2024). با این حال بسیاری از محققان بر اهمیت درجه حرارت بر شرایط خشکسالی تأکید نموده‌اند؛ به طوری که افزایش آن منجر به افزایش تبخیر و تعرق و موجب تشدید پدیده خشکسالی می‌گردد (Kempes et al., 2008; Surendran et al., 2019). علاوه بر درجه حرارت، عواملی مانند تابش خورشید، رطوبت و

در عین حال در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب از شاخص‌های مبتنی بر بارش مانند SPI می‌تواند به خوبی نشانگر وضعیت خشک‌سالی باشد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۶). از طرف دیگر نتایج نشان داد با توجه به همبستگی قابل قبول ($r=0/84$) بین شاخص‌های SDI با SPEI می‌توان از آن در پایش دوره‌های ترسالی، نرمال و خشک‌سالی نیز استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری محاسبه‌کننده شاخص‌های خشک‌سالی (DrinC) به عنوان یک ابزار کاربرپسند برای ارزیابی چندین شاخص خشک‌سالی مختلف شامل SPI، SPEI، RDI و SDI برای پایش خشک‌سالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در دشت مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی استفاده شد. مطالعات خشک‌سالی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است. معیارهای اصلی برای انتخاب شاخص‌ها عبارت بودند از: الف) داشتن نیازهای داده‌ای نسبتاً کم، که به کاربرد نرم‌افزار در بسیاری از مناطق اجازه می‌دهد و ب) نتایج آن‌ها به وضوح برای استفاده عملیاتی مستقیم و کارآمد تفسیر شود. بر اساس این معیارها، دو شاخص اخیراً توسعه‌یافته (SDI و RDI) و دو شاخص شناخته‌شده‌تر (SPEI و SPI) در این مطالعه برای محاسبه پایش خشک‌سالی با استفاده از نرم‌افزار DrinC استفاده شدند. همان‌طور که می‌توان به راحتی درک کرد، شاخص‌های RDI، SPI و SPEI به خشک‌سالی هواشناسی اشاره می‌کنند و از بارش (و علاوه بر آن تبخیر و تعرق بالقوه فقط برای SPEI و RDI) به عنوان عامل تعیین‌کننده اصلی استفاده می‌کنند. علاوه بر این، شاخص‌های SPEI و RDI می‌توانند برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند؛ زیرا می‌توانند به اندازه کافی بیان آب و رطوبت خاک را توصیف کنند. استفاده از این دو شاخص در توصیف خشک‌سالی کشاورزی به‌ویژه زمانی مفید است که دوره‌های مرجع مربوط به مراحل توسعه و رشد محصول انتخاب شود. از سوی دیگر، شاخص SDI برای خشک‌سالی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود که از جریان سطحی به- عنوان پارامتر تعیین‌کننده کلیدی استفاده می‌کند. لازم به ذکر است

محسوب می‌گردد (Surendran et al., 2019; Al-Khafaji and Al-Ameri, 2021; Tigkas et al., 2022).

خشک‌سالی هیدرولوژیکی معمولاً هم‌زمان با خشک‌سالی هواشناسی نبوده و با تأخیری نسبت به آن‌ها روی می‌دهد چرا که زمان طولانی‌تری مورد نیاز است تا اینکه کاهش بارش بتواند اثر خود را بر اجزای سامانه‌های هیدرولوژیکی از قبیل جریان‌های سطحی و رطوبت خاک نشان دهد (Avand et al., 2024). به‌طور کلی کاهش بارش به عنوان عامل اصلی دوره‌های خشک‌سالی بر منابع آب سطحی تأثیرگذار است. در این مطالعه از شاخص SDI برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر مبنای جریان رودخانه به عنوان منبع آب سطحی استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد نوسانات دبی و بارش تقریباً رفتار مشابهی دارند. به طوری که هر زمان مقدار بارندگی کاهش یا افزایش یافته، متعاقباً دبی نیز افزایش یا کاهش یافته است؛ اما یک تأخیر زمانی در روند دیده می‌شود. به همین دلیل همبستگی خوبی میان خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (SPI-SDI) برقرار نشده است ($r=0/62$). عامل آن را می‌توان تأثیر عاملی به غیر از بارندگی بر دبی جریان دانست. این بدان معناست که تنها عامل کمبود بارندگی بر روی کاهش دبی جریان تأثیرگذار نیست و عواملی همچون برداشت بیش از حد از منابع آب سطحی در بالادست حوضه در کنار کاهش بارندگی تأثیرگذار است. در مطالعه‌ای نیز بررسی شاخص خشک‌سالی SPI و SDI نشان دادند که خشک‌سالی هیدرولوژیکی و هواشناسی دارای هم‌زمانی نیستند و می‌توان با مدیریت مناسب اثرات خشک‌سالی هواشناسی و سایر عوامل محرکه دیگر در تشدید وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی جلوگیری کرد (آوند و همکاران، ۱۴۰۲). سایر محققان نیز این شاخص را یک شاخص حساس به خشک‌سالی هیدرولوژیکی و راهی برای ارتباط خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بیان کرده‌اند (نصرتی، ۱۳۹۳؛ Lorenzo-Lacruz et al., 2010).

به‌طور کلی با توجه به همبستگی زیاد تبخیر و تعرق (ET_0) با وضعیت خشک‌سالی، استفاده از شاخص SPEI در مقایسه با شاخص‌های SPI، RDI و SDI برای پایش دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی در مناطق نیمه‌خشک و خشک توصیه شده است.

شاخص خشکسالی به‌دست می‌آورد. بنابراین پیشنهاد می‌شود از این نرم‌افزار در کاربردهای مختلفی مانند پایش خشکسالی، ارزیابی توزیع مکانی خشکسالی، بررسی سناریوهای اقلیمی و خشکسالی و غیره مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

آوند، م.ت.، مرادی، ح.ر. و حزابوی، ز. ۱۴۰۲. ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تجن. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. انتشار آنلاین.

بذرافشان، ا.، محمودزاده، ف. و بذرافشان، ج. ۱۳۹۵. ارزیابی روند تغییرات خشک‌سالی بر اساس شاخص بارش استاندارد شده و شاخص تبخیر - تعرق استاندارد شده در سواحل جنوبی ایران. مجله مدیریت بیابان. ۴ (۸): ۶۹-۵۴.

بذرافشان، ا.، محمودزاده، ف.، عسگری‌نژاد، ا. و بذرافشان، ج. ۱۳۹۸. مقایسه تطبیقی شاخص‌های RDI، SPI و SPEI در تحلیل روند شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۲ (۳): ۱۳۱-۱۱۷.

دستجردی، ا.، مجردی، ب. و علیزاده، ح. ۱۳۹۸. شناسایی و آماده‌سازی منابع مناسب داده‌های هواشناسی مبتنی بر GIS برای شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه توزیعی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰ (۷): ۱۷۸۱-۱۷۹۱.

رجا، ا.، پارسی‌نژاد، م.، سهرابی، ت. و احمدآلی، خ. ۱۳۹۸. بررسی وضعیت منابع آب محدوده مرودشت-خرامه با استفاده از شاخص‌های تحلیل پایداری. تحقیقات خاک و آب ایران. ۵۰ (۴): ۸۹۸-۹۰۹.

رضایی‌قلعه، ل. و قربانی، خ. ۱۳۹۷. تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان. نشریه هواشناسی کشاورزی. ۱۶ (۱): ۳۱-۴۰.

شریف‌آذری، س. و عراقی‌نژاد، ش. ۱۳۹۲. توسعه مدل ناپارامتری شبیه‌ساز داده‌های ماهانه هیدرولوژیکی. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۳ (۱): ۸۳-۹۵.

مطالعات بهنگام سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. ۱۳۹۳. گزارش بیلان منابع آب

که DrinC امکان مقایسه نتایج بین شاخص‌ها را فراهم می‌کند. نتایج نشان داد در کلیه شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت زیاد است؛ اما با افزایش مقیاس‌های زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش یافته و تداوم آن‌ها افزایش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر در میان مقیاس‌های زمانی، شاخص ۱۲ ماهه در پایش دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی مناسب‌ترین مقیاس تشخیص داده شد که سایر محققین نیز این به مسئله اذعان کرده‌اند. مقایسه سری‌های زمانی شاخص‌های خشک‌سالی SPEI و SPI در طول دوره آماری نشان داد که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، اختلاف رفتاری دو شاخص هم از لحاظ شدت شاخص بیشتر می‌شود که می‌تواند دلیلی بر حساسیت شاخص SPEI به تغییرات بارندگی و منظور نمودن پارامتر درجه حرارت در این شاخص باشد. بررسی‌ها نشان داد که شاخص RDI تقریباً روند مشابهی مانند SPEI دارد؛ زیرا دو عامل بارش و تبخیر و تعرق نیز همانند روش SPEI در برآورد میزان این شاخص تأثیر گذارند. همچنین، تغییرات شاخص SDI در طول دوره آماری نیز روند مشابهی با شاخص SPEI نشان داد. خشک‌سالی هیدرولوژیکی معمولاً هم‌زمان با خشک‌سالی هواشناسی رخ نمی‌دهد و با تأخیری نسبت به آن‌ها روی می‌دهد؛ زیرا زمان طولانی‌تری مورد نیاز است تا اینکه کاهش بارش بتواند اثر خود را بر اجزای سامانه‌های هیدرولوژیکی از قبیل جریان‌های سطحی و رطوبت خاک نشان دهد.

به‌طورکلی بسته نرم‌افزاری DrinC محاسبه شاخص‌های خشکسالی را تسهیل می‌کند و به تصمیم‌گیران و ذینفعان کمک می‌کند تا تخمین قابل‌اعتمادی از شدت هر دوره خشکسالی را به اشتراک بگذارند. همچنین نرم‌افزار DrinC می‌تواند ارزیابی سریع شدت خشکسالی را برای تعدادی از سناریوهای احتمالی اقلیمی آینده تسهیل کند. لازم به ذکر است که با استفاده از DrinC می‌توان بیش از یک شاخص خشکسالی را به‌راحتی محاسبه کرد و تصویر کاملاً جامعی از شدت خشکسالی به‌دست آورد. درنهایت، از کاربردهای گسترده نرم‌افزار DrinC در کشورهای مختلف به نظر می‌رسد که به‌تدریج زمینه تبدیل شدن به یک بسته نرم‌افزاری پرکاربرد برای ارزیابی شدت خشکسالی را از طریق محاسبه چندین

- Tajan Watershed, Northern Iran. *Water*. 16(13): 1784.
- Balint, Z., Mutua, F.M. and Muchiri, P. 2011. Drought Monitoring with the Combined Drought Index, FAO-SWALIM Nairobi, Kenya.
- Batool, S., Mahmood, S. A. and Shirazi, S. A. 2021. Appraisal of Drought Indices based on Climatic Variability using DrinC Software for Potwar Region in Punjab Pakistan during 1981–2019.
- Beguéría, S. and Vicente-Serrano, S.M. 2013. Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. <http://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf> (accessed July 2, 2014)
- Borg, D.S. 2009. An application of drought indices in Malta, case study. *European Water*. 25/26: 25-38.
- Capodici, F., Ciralo, G., La Loggia, G., Liuzzo, L., Noto, L.V. and Noto, M.T. 2008. Time series analysis of climate and vegetation variables in the Oreto watershed (Sicily, Italy). *European Water*. 23/24: 133-145.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd edition, FAO, Rome, p. 179.*
- Hargraeves, G.H. and Samani, Z.A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *ASCE. J. Irrigation and Drainage Division*. 108(3): 225-230.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transaction of ASAE*. 1(2): 96-99.
- Kanellou, E., Domenikiotis, C., Blanta, A., Hondronikou, E. and Dalezios, N.R. 2008. Index-based drought assessment in semi-arid areas of Greece based on conventional data. *European Water*. 23(24): 87-98.
- Kempes, C. P., Myers, O. B., Breshears, D. D. and Ebersole, J.J. 2008. Comparing response of *Pinus edulis* tree-ring growth to five alternate moisture indices using historic meteorological data. *Journal of Arid Environments*. 72(4): 350-357.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguéría, S., García-Ruiz, J.M. and Cuadrat, J. M. 2010. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*. 386(1-4): 13-26.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to مصطفی‌زاده، ر. و ذبیحی، م. ۱۳۹۵. تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). *فیزیک زمین و فضا*. ۴۲(۳): ۶۳۳-۶۴۳.
- محدوده مطالعاتی مهاباد، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران. شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی. ۵: ۸۱ ص.
- میراکبری، م.، مرتضایی، قاسم رضایی، ف. و محسنی، م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر خشک‌سالی هواشناسی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی توسط شاخص‌های SPI، SPEI، SDI و GRI. *مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*. ۱۲(۴۲): ۷۰-۸۰.
- نصرتی، ک. ۱۳۹۳. ارزیابی شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشک‌سالی در اقلیم‌های مختلف ایران، فصلنامه علوم محیطی. ۱۲(۴): ۷۳-۶۳.
- یوسفی، م.، انصاری، ح.، مساعدی، ا. و صمدی، س.ز. ۱۳۹۶. بررسی همبستگی بین سه شاخص خشک‌سالی با تعداد از پارامترهای آب و هوایی در چند نمونه اقلیمی ایران. *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۳(۳): ۱۹۷-۱۹۴.
- Abd-Elhamid, H. F., Zelenáková, M., Soláková, T., Saleh, O. K. and El-Dakak, A. M. 2024. Monitoring flood and drought risks in arid and semi-arid regions using remote sensing data and standardized precipitation index: A case study of Syria. *Journal of Flood Risk Management*. 17(1): e12961.
- Al-Khafaji, M. S. and Al-Ameri, R. A. 2021. Evaluation of drought indices correlation for drought frequency analysis of the Mosul dam watershed. In *IOP conference series: earth and environmental science*. 779 (1): 012077. IOP Publishing.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome. 300(9): D05109.
- Ansarifard, S. and Shamsnia, S. A. 2018. Monitoring drought by reconnaissance drought index (RDI) and standardized precipitation index (SPI) using DrinC software. *Water Utility Journal*. 20: 29-35.
- Avand, M., Moradi, H. R. and Hazbavi, Z. 2024. Interactive Changes in Climatic and Hydrological Droughts, Water Quality, and Land Use/Cover of

- drought from humid, semi-arid and arid regions of India using DrinC model with different drought indices. *Water Resources Management*. 33: 1521-1540.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach towards a rational classification of climates. *Geog. Rev.* 38: 55-94.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Proutsos, N. and Tsakiris, G. 2022. Incorporating aSPI and eRDI in drought indices calculator (DrinC) software for agricultural drought characterisation and monitoring. *Hydrology*. 9(6): 100.
- Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G. 2015. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*. 8(3): 697-709.
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Vangelis, H., Verbeiren, B., Huysmans, M., Tychon, B., Jacquemin, I., Canters, F., Vanderhaegen, S., Engelen, G., Poelmans, L., De Becker, P. and Batelaan, O. 2013. A system-based paradigm of drought analysis for operational management. *Water Resources Management*. 27: 5281-5297.
- Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G. 2012. Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Science of the Total Environment*. 440: 33-41.
- Tsakiris, G., Vangelis, H. and Tigkas, D. 2010. Drought impacts on yield potential in rainfed agriculture. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Drought Management 'Economics of Drought and Drought Preparedness in a Climate Change Context'*, 4-6 March 2010, Istanbul, Turkey: 191-197.
- Tsakiris, G., Pangalou, D. and Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resources Management*. 21: 821-833.
- Tsakiris, G., Pangalou, D. and Vangelis, H. 2007a. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*. 21(5): 821-833.
- Tsakiris, G., Tigkas, D., Vangelis, H. and Pangalou, D. 2007b. Regional drought identification and assessment – case study in Crete. In *methods and tools for drought analysis and management*, Rossi et al. (Eds.). Springer, the Netherlands. 169-191.
- Tsakiris, G., Pangalou, D. and Vangelis, H. 2007c. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*. 21(5): 821-833.
- time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society Boston, MA, 179-183.
- Michaelides, S. and Pashiardis, S. 2008. Monitoring Drought in Cyprus during the 2007-2008 hydrometeorological year by using the Standardized Precipitation Index (SPI). *European Water*. 23/24: 123-131.
- Minh, H. V. T., Kumar, P., Van Toan, N., Nguyen, P. C., Van Ty, T., Lavane, K., ... and Downes, N. K. 2024. Deciphering the relationship between meteorological and hydrological drought in Ben Tre province, Vietnam. *Natural Hazards*. 120(6): 5869-5894.
- Mishra, A.K. and Desai, V.R. 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*. 19: 326-339.
- Morid, S., Smakhtin, V.U., Moghaddasi, M. 2006. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*. 26: 971-985.
- Mostafavi Darani, S.M., Khoshhal Dastjerdi, J., Parandeh, A., Ghatrehsamani, M. 2011. Drought monitoring in Isfahan province (Iran) by comparison of SPI and RDI. 'European Conference on Applications of Meteorology' EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 8, EMS2011-229, 11th EMS/10th ECAM. 12-16 Sept. 2011, Berlin, Germany.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resource Management*. 23: 881-897.
- NDMC - National Drought Mitigation Center. 2014. Program to Calculate Standardized Precipitation Index. <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx> (accessed June 30, 2014)
- Pashiardis, S. and Michaelides, S. 2008. Implementation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance Drought Index (RDI) for Regional Drought Assessment: A case study for Cyprus. *European Water*. 23/24: 57-65.
- Smakhtin, V.U. and Hughes, D.A. 2007. Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling and Software*. 22: 880-890
- Surendran, U., Anagha, B., Raja, P., Kumar, V., Rajan, K. and Jayakumar, M. 2019. Analysis of

sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*. 23(7): 1696-1718.

Tsakiris, G. and Vangelis, H. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 9/10:3-11

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I. 2010. A multiscalar drought index

Assessment of Meteorological, Agricultural, and Hydrological Drought Indicators in Mahabad Plain

S. Arari¹ and O .Raja^{2*}

Abstract

In this study, a specialized software package called DrinC (Drought Indicators Calculator) was used to investigate meteorological, agricultural, and hydrological drought indicators in Mahabad plain, located in West Azarbaijan province, Iran. Two recently developed indices (RDI (Reconnaissance Drought Index) and SDI (Streamflow Drought Index) indices), along with the standardized precipitation index (SPI) and the standardized precipitation, evapotranspiration index (SPEI) were used. The results showed that the 12-month time scale is the most appropriate for monitoring drought and wet periods across all indices. A comparing of the time series of SPEI and SPI over the statistical period revealed that at the 12-month time scale, the difference in behavior between the two indices increases in terms of drought severity. The reason for this difference can be attributed to the sensitivity of SPEI to both precipitation changes and the inclusion of potential evapotranspiration in its calculation. The findings also indicated that RDI index exhibits a trend similar to SPEI, as both indices are influenced by precipitation and evapotranspiration. Likewise, variations in the SDI index over the statistical period showed pattern resembling that of SPEI. Hydrological drought typically does not occur simultaneously with meteorological drought and tends to lag behind, as it takes more time for reduced precipitation to affect hydrological components such as surface runoff and soil moisture. In general, the results showed that the DrinC software provides useful tools that support a wide range of decision-making needs. This software can be employed for various purposes such as drought monitoring, spatial distribution analysis of drought, and climate scenario assessment. Gaining knowledge about the nature of drought indices through comparative analysis allows policymakers and managers to better understand drought onset and to develop medium- and long-term adaptation strategies.

Keywords: Drinc, Evapotranspiration, Monitoring Temperature, West Azerbaijan

¹ M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² Ph.D., Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (*Corresponded Author, omid.raja@ut.ac.ir)

Received: 22 Apr 2024

Accepted: 26 Sep 2024