



تغییرات مکانی خشکسالی هیدرولوژیک جریان در رودخانه‌های استان اردبیل

ناهیده پرچمی^۱، رئوف مصطفی‌زاده^۲، اباذر اسمعیلی عوری^۳، رسول ایمانی^۴

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده‌ی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۲- دانشیار گروه آموزشی منابع طبیعی و عضو پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استاد گروه آموزشی منابع طبیعی و عضو پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴- دانش‌آموخته‌ی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۲

چکیده

در حین وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی، ضمن عدم نیاز آبی بهره‌برداران، جریان رودخانه کاهش یافته و کیفیت اکوسیستم رودخانه تخریب خواهد شد. تعیین تغییرات زمانی و مکانی شاخص خشکسالی هیدرولوژیک، امکان برنامه‌ریزی به‌منظور استفاده بهینه از آب رودخانه‌ها فراهم می‌کند. در این پژوهش، تغییرات زمانی و مکانی شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای (SDI) در ۲۸ ایستگاه هیدرومتری استان اردبیل مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر SDI با نرم‌افزار DrinC محاسبه و ویژگی‌های خشکسالی هیدرولوژیک تحلیل و تغییرات مکانی SDI در مقیاس‌های زمانی ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه در نرم‌افزار GIS تعیین شد. مقادیر SDI یک ماهه (خشکسالی‌های کوتاه‌مدت) نشان داد که خشکسالی در رودخانه‌های کم‌آب بیش‌تر اتفاق افتاده است. این در حالی است که اکثر ایستگاه‌های پر آب و کم آب، دوره‌های ترسالی شدید داشته‌اند. مقادیر SDI سالانه (بلندمدت) در اکثر ایستگاه‌های در بین بازه $-1 \leq SDI \leq 1/5$ ، قرار داشته که نشان از وقوع خشکسالی ملایم هستند. تغییرات مکانی مقادیر SDI نشان داد که تغییرات مکانی در مقیاس یک‌ماهه کاملاً متفاوت از مقیاس سالانه است. کم‌ترین وقوع SDI در ایستگاه‌های بالادست و رودخانه‌های جاری در دامنه‌های سبلان بود. خشکسالی‌های شدید و خیلی‌شدید در رودخانه‌هایی اتفاق می‌افتد که آبدهی آن کم است. هر اندازه آبدهی رودخانه بیش‌تر باشد وقوع خشکسالی‌های شدید کاهش می‌یابد و ثبات جریان آن از رودخانه‌هایی با آبدهی کم بیش‌تر است.

کلمات کلیدی: خشکسالی هیدرولوژیک، تغییرات مکانی، شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای، DrinC، استان اردبیل.

۱-مقدمه

خشکسالی حالتی نرمال و مستمر از اقلیم است که تقریباً در تمامی مناطق اقلیمی با ویژگی‌های متفاوت رخ می‌دهد (خزایی و همکاران، ۱۳۸۲: ۴۶). خشکسالی به‌عنوان کاهش میزان نزولات جوی نسبت به میانگین طولانی‌مدت منطقه بیان شده است. یکی از جامع‌ترین و کامل‌ترین تعاریف برای این پدیده توسط (پالمر، ۱۹۶۵) تحت عنوان کمبود رطوبت مستمر و غیرطبیعی ارائه شده است. واژه‌ی مستمر، بیان‌گر زمان آغاز تا پایان خشکسالی با زمان تداوم، و واژه‌ی غیرطبیعی به انحراف یا نوسان منفی نسبت به شرایط میانگین طبیعی دلالت دارد. امکان اجتناب از خشکی وجود ندارد، اما امکان سازماندهی و آمادگی در برابر خشکسالی وجود دارد. از آن قابل انجام است. موفقیت در سازگاری با خشکی به چگونگی تعریف خشکسالی و برآورد خصوصیات آن بستگی دارد (اسماختین و هوگز، ۲۰۰۴). خشکسالی ضمن تأثیر بر منابع آب سطحی، بر منابع آب زیرزمینی هم تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش تولید برق آبی و اختلال در زیستگاه‌های حاشیه رودخانه می‌شود و بر فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی تأثیر بگذارد. برای کاهش اثرات خشکسالی، شناخت خصوصیات خشکسالی نظیر زمان شروع، وسعت و شدت خشکسالی ضروری است. با تحلیل آمار و اطلاعات موجود می‌توان وقوع آن را برای دوره‌های بازگشت مختلف برآورد نمود و با اتخاذ تدابیر مدیریتی و اجرای طرح‌های مقابله و سازش با خشکسالی، تأثیرات و پیامدهای ناشی از آن را کاهش داد. خشکسالی هیدرولوژیکی با تأخیر نسبت به خشکسالی‌های اقلیمی و کشاورزی رخ می‌دهد چون زمان طولانی‌تری مورد نیاز است تا این کاهش بارش بتواند خود را در اجزای سیستم هیدرولوژیکی از قبیل جریان آب رودخانه‌ها، کاهش رطوبت خاک و یا سطح آب دریاچه‌ها و مخازن نشان دهد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷، ۱۹۰؛ امینی و همکاران، ۱۳۹۸ الف، ۴۷۴). بنابراین تأثیر خشکسالی هیدرولوژیکی در بخش‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی کاملاً متمایز از یکدیگر است (خروشی عیسی‌لو و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۵۰). خشکسالی می‌تواند بر عملکرد رودخانه‌ای مانند کیفیت آب و همچنین عملکرد اکولوژیکی و گردشگری یک منطقه اثر گذارد. دوره خشکسالی از دیدگاه هیدرولوژیکی عبارت است از دوره‌ای که در آن مقادیر جریان از مقدار یک آستانه مدیریتی در برگیرنده مصارف آشامیدنی، کشاورزی و صنعت است، به‌طور قابل توجهی کم‌تر باشد. تحلیل خشکسالی و جریان‌های کمینه به‌منظور برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، توجیه اقتصادی پروژه‌های آبی احداث شده در مسیر رودخانه‌ها، حمایت از حیات وحش، تولید برق آبی، حفاظت از محیط‌زیست، مدیریت کیفی آب، مدیریت آب‌های زیرزمینی، آبرسانی از شهرها ضروری است (اسلامیان و همکاران، ۱۳۸۳). در دهه‌های اخیر، خشکسالی و کاهش میزان بارندگی، همراه با مدیریت نادرست منابع آبی

کشور و عدم توجه به آمایش سرزمین، منجر به کمبود آب در کشور شده است. افزایش برداشت از آب‌های سطحی و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی در بخش کشاورزی، بیش‌ترین سهم را در مصرف منابع آبی موجود کشور و در نهایت ایجاد خشکسالی شده است. برای تعیین و تشخیص خشکسالی شاخص‌های مختلفی ارائه شده است، برخی از شاخص‌ها تنها از متغیر بارندگی استفاده می‌کنند و خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی ماهیانه و سالیانه مورد بررسی قرار می‌دهند که می‌توان به شاخص‌هایی هم‌چون^۱ PDSI، درصد نرمال، شاخص بارش استاندارد، شاخص بارش و شاخص بی‌نظمی بارش اشاره نمود (هئیم^۲، ۲۰۰۲). شاخص‌های دیگری نیز هم‌چون شاخص تأمین آب سطحی SWSI، شاخص رطوبت محصول CMI، شاخص کمبود رطوبت خاک SMDI، شاخص خشکسالی ویژه هر محصول CSDI، شاخص خشکسالی احيائي RDI، شاخص بارش موثر ERI برای بررسی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف و با فاکتورهای موثر متفاوت به‌کار می‌روند. درک و تفسیر خشکسالی هیدرولوژیکی نیازمند استفاده از داده‌های زیاد با طول دوره‌ی آماری بلندمدت و متغیرهای متنوع است. شاخص جریان رودخانه‌ای ابتدا توسط نالبانتیس (۲۰۰۸) ارائه شد و سپس توسط نالبانتیس و ساکاریس (۲۰۰۹) برای تعیین خشکسالی هیدرولوژیکی توسعه داده شد که کاهش جریان‌های رودخانه‌ها، مخازن آب، دریاچه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی را مشخص می‌کند. اصول محاسباتی شاخص مذکور مشابه شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است (شوکل و وود^۳، ۲۰۰۸؛ ۶). در خصوص مطالعه خشکسالی هیدرولوژیک، مطالعات متعددی صورت گرفته است. پاندوماس^۴ و همکاران (۲۰۲۰) با ارزیابی وقوع خشکسالی جریان در حوضه رودخانه نام-فونگ در شمال شرقی تایلند، شرایط وقوع آن را در تحت سناریوهای اقلیمی در آینده پیش‌بینی کردند. بر اساس شاخص خشکسالی ۶ ماهه، احتمال وقوع خشکسالی‌ها در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۳۱) با فراوانی تجمعی ۹۷/۵ درصد رخ خواهد داد. حسن و همکاران (۲۰۲۱) با تبیین الگوی مکانی شاخص SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف در شبه‌جزیره مالزی نتیجه گرفتند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در اکثر مناطق اتفاق افتاده است و با شدت نسبتاً بالا در شمال شرق و جنوب شرق شبه‌جزیره مالزی مشاهده شد. نازارنکو^۵ و همکاران (۲۰۲۲) الگوهای خشکسالی زمانی و مکانی در رودخانه‌های دشت لیتوانی را با هدف پیش‌بینی اقلیمی در آینده ارزیابی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که الگوهای مختلف خشکسالی در سه منطقه هیدرولوژیکی لیتوانی (وجود دارد و تعداد ماه‌های خشک و حداقل مقدار شاخص افزایش یافته و طول دوره‌ی خشکسالی افزایش یافته است. ارگول و آپادین^۶ (۲۰۲۲) با استفاده از شاخص SDI در منطقه نلیحان^۷ را پیش‌بینی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که خشکسالی‌های

1- Palmer Drought Severity Index
2- Heim
3- Shukla and Wood
4- Pandhumas

5- Nazarenko
6- Erogluer and Apaydin
7- Nallihan

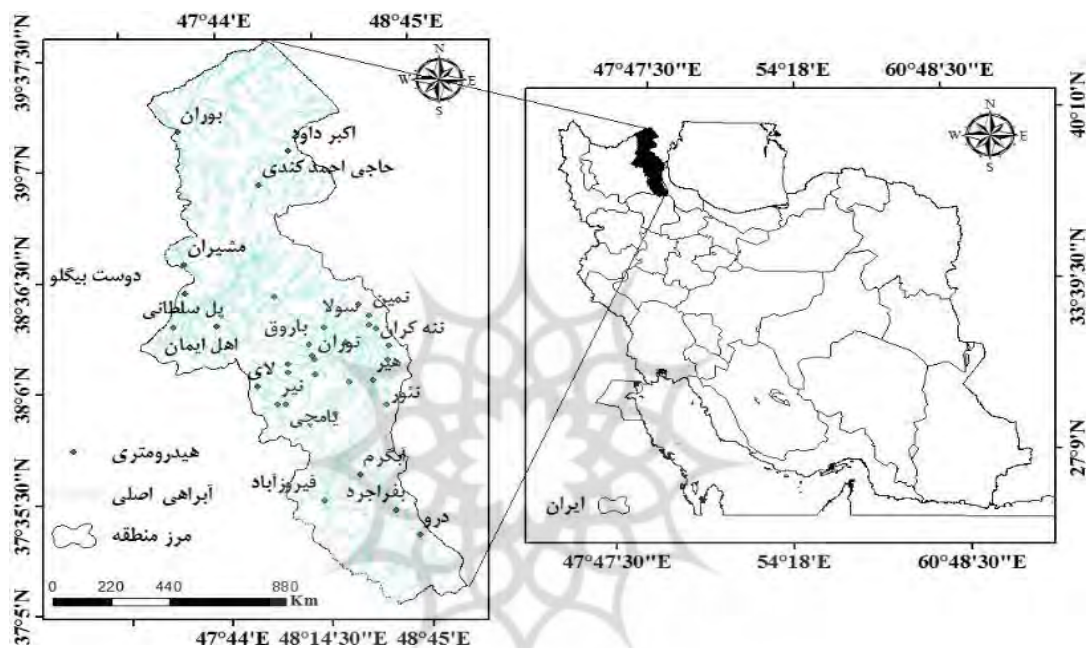
خفیف در سال‌های گذشته وقوع بیش‌تری داشته‌اند، اما تعداد خشک‌سالی‌های متوسط و شدید به تدریج افزایش یافته است. قیصوری و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در رودخانه گدارخوش در استان ایلام پرداخته‌اند. محاسبه شاخص جریان کم Q_{90} ، شاخص هواشناسی SPI و شاخص SDI در پنج مقیاس زمانی نشان داد که شدت و تداوم خشک‌سالی هیدرولوژیک افزایش یافته است. در مجموع می‌توان گفت که وقوع خشک‌سالی در مناطق مختلف تحت تأثیر تغییرات بارش بوده است. باید اشاره شود که تغییرات مکانی و زمانی در مناطق مختلف متفاوت بوده و تحت تأثیر عوامل و اقلیم محلی است. لذا ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی خشک‌سالی می‌تواند در پیش‌بینی و مدیریت آب موثر باشد. علاوه بر خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و تخریب پوشش گیاهی از عوامل مهم تشدید بحران آب است. با توجه به افزایش دما و کاهش بارش و نیز تغییرات اقلیمی، تشدید خشک‌سالی و افت آب‌های سطحی و زیرزمینی در استان اردبیل نیازمند مطالعه و مدیریت است. ارزیابی خشک‌سالی جریان در استان اردبیل می‌تواند در تعیین اهداف مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از شاخص SDI در ایستگاه‌های هیدرومتری استان اردبیل است.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان اردبیل با مساحت ۱۷۹۵۳ کیلومتر مربع است که در شمال غربی فلات ایران به مختصات جغرافیایی $26^{\circ} 46' 47''$ تا $34^{\circ} 5' 48''$ طول شرقی و $51^{\circ} 53' 37''$ تا $33^{\circ} 14' 38''$ عرض شمالی واقع شده است. این استان از شمال با جمهوری آذربایجان، از قسمت شرق با استان گیلان، از جنوب با استان زنجان و از غرب با استان آذربایجان شرقی هم‌جوار است (نصیری‌خیای و مصطفی‌زاده، ۱۳۹۷). تغییرات ارتفاعی آن از ۴۰ تا ۴۸۱۱ متر متغیر است. ارتفاع حداکثر در قله سبلان، ارتفاع حداقل در شهرستان مغان پارس آباد و ارتفاع متوسط در دشت اردبیل به ترتیب ۴۸۱۱، ۴۰ و ۱۸۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است. استان اردبیل دارای اقلیم سردسیر کوهستانی است. متوسط بارش سالیانه در غرب استان بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، مناطق جنوبی استان ۳۵۰ میلی‌متر و مناطق شمالی استان ۲۱۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر است (آسیابی و همکاران، ۱۳۹۶). مقدار تبخیر و تعرق متوسط سالانه در استان اردبیل از ۶۰۰ تا ۱۷۰۰ میلی‌متر و مقدار دمای متوسط سالانه از ۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس در مناطق مختلف متغیر است (مهری و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به کوهستانی بودن منطقه و نزول بخش اعظم بارندگی‌ها به شکل برف و ذوب تدریجی آن در بهار و حتی تابستان، جریان پایه بخش عمده جریان‌های رودخانه‌ای را در استان اردبیل تشکیل می‌دهد. در شکل ۱ موقعیت

منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت کشوری و استانی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در استان اردبیل

Fig (1): The location of the study area in Iran and Ardabil province along with the river gauge stations

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش به منظور بررسی شاخص خشکسالی هیدرولوژیک از آمار داده‌های دبی ۲۸ ایستگاه هیدرومتری به دلیل دارا بودن طول دوره‌ی آماری طولانی مدت استفاده شده است، داده‌های مورد استفاده از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل دریافت شد و دوره آماری مشترک داده‌ها تهیه شد و سپس براساس دوره‌ی آماری مشترک ایستگاه‌های مورد مطالعه برای سال‌های آماری ۴۸ سال (۱۳۴۸ تا ۱۳۹۴) انتخاب شد. موقعیت کشوری و استانی شبکه آبراه‌ای و ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیک در رودخانه‌های استان اردبیل

Table (1): Characteristics of studied hydrometric stations in the assessment of hydrological drought in rivers of Ardabil province

ردیف	نام شهرستان	نام رودخانه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دبی متوسط (مترمکعب بر ثانیه)	سطح حوضه (کیلومتر مربع)
۱		بالخوچای	پل الماس	۴۸-۱۱-۱۹	۴۸-۰۸-۱۶	۱۴۴۰	۳/۰۴	۱۰۷۰
۲		قره‌سو	سامیان	۴۸-۱۴-۴۸	۵۳-۲۲-۳۸	۱۲۹۰	۵/۶۴	۴۰۰۴
۳		نیرچای	نیر	۳۸-۵۹-۴۷	۳۸-۰۲-۰۲	۱۶۲۴	۱/۲۲	۲۵۶
۴		قره‌سو	آلادیزگه	۴۸-۳۵-۲۲	۳۸-۱۷-۰۰	۱۳۴۷	۰/۲	۲۲
۵		ویلادرق چای	ویلادرق	۳۸-۱۰-۳۸	۱۹-۴۸-۰۳	۱۸۰۰	۰/۰۷۲	۹۴
۶	اردبیل	شهریورچای	باروق	۴۸-۱۰-۰۶	۳۸-۱۸-۱۷	۱۴۱۰	۰/۱۸۴	۹۶
۷		یدی‌بولیک‌چای	عموقین	۴۷-۱۰-۴۰	۳۸-۱۵-۰۷	۱۳۸۵	۰/۰۱۸۹	۱۱۰
۸		آق‌چای	شمس‌آباد	۴۸-۱۵-۱۴	۳۷-۵۹-۵۳	۱۴۹۳	۰/۲۸۷	۱۲۸
۹		لای‌چای	لای	۴۷-۵۴-۰۳	۳۸-۰۷-۰۰	۲۰۶۸	۰/۱۲۲	۳۶
۱۰		نوران‌چای	آتشگاه	۴۸-۰۳-۲۳	۳۸-۱۳-۰۵	۱۷۷۳	۰/۰۱۱۴	۴۴
۱۱		نوران‌چای	نوران	۴۸-۱۱-۳۷	۳۸-۱۳-۵۹	۱۴۲۳	۰/۳۰۲	۱۲۶
۱۲		نرگس‌چای	ننه‌کران	۴۸-۳۱-۳۲	۳۸-۲۲-۱۷	۱۳۵۰	۰/۰۸۰	۴۰
۱۳		سولاچای	سولا	۴۸-۲۹-۰۴	۳۸-۲۳-۱۴	۱۳۵۲	۰/۰۱۸۴	۴۴
۱۴	نمین	سقزچی‌چای	ایریل	۴۸-۳۴-۳۰	۳۸-۱۳-۲۳	۱۳۷۵	۰/۲۵۶	۸
۱۵		نمین‌چای	نمین	۴۸-۲۹-۰۶	۳۸-۲۵-۴۵	۱۴۵۹	۰/۰۹۲	۴۴
۱۶		هیرچای	هیر	۳۸-۱۰-۲۸	۳۸-۰۴-۵۵	۱۵۷۵	۰/۳۰۸	۱۷۸
۱۷	هیر	قوری‌چای	کوزه‌تیراچی	۴۸-۲۲-۰۱	۳۸-۰۷-۲۸	۱۳۹۴	۰/۹۳۱	۸۱۲٫۵
۱۸		بالخوچای	گیلانده	۴۸-۲۱-۴۳	۳۸-۱۸-۱۶	۱۳۳۲	۲/۴۰	۱۶۳۸
۱۹		شاهرود	درو	۴۸-۴۱-۴۸	۳۷-۲۴-۳۸	۱۶۵۱	۰/۶۵	۱۵۸
۲۰	خلخال	فیروز‌آبادچای	فیروز‌آباد	۴۸-۱۳-۳۵	۳۷-۳۵-۰۸	۱۱۵۳	۲/۹۵	۱۵۱۵
۲۱		هروچای	آبگرم	۴۸-۲۴-۲۵	۳۷-۴۱-۴۵	۱۵۳۵	۲/۱۱	۵۹۰
۲۲	مشگین شهر	قره‌سو	دوست‌بیگللو	۴۷-۳۲-۱۸	۳۸-۳۳-۰۲	۷۸۰	۷/۲۸	۷۳۱۱
۲۳		قره‌سو	ارباب‌کندی	۴۸-۰۱-۵۸	۳۸-۲۹-۴۱	۱۱۱۶	۲/۱۹	۴۸۰۰
۲۴		خیابوچای	پل‌سلطانی	۴۷-۴۱-۳۹	۳۸-۲۳-۵۶	۱۴۲۰	۰/۷۹۰	۹۸
۲۵		دره‌رود	بوران	۴۷-۳۱-۰۸	۳۹-۱۷-۴۱	۲۴۴	۱۷/۹۷	۱۳۹۷۹
۲۶		دره‌رود	مشیران	۴۷-۳۲-۰۱	۳۸-۴۱-۱۰	۷۰۵	۱۳/۷۹	۱۱۳۷۹
۲۷	مغان	برزندچای	حاج‌احمد‌کندی	۴۷-۵۶-۱۷	۳۹-۰۲-۱۰	۸۲۰	۰/۱۶۶	۱۵۷
۲۸		ساریقمیش	اکبرداوود	۱۹-۴۸-۰۵	۳۹-۱۱-۴۵	۳۴۴	۰/۱۷۱	۷۱۰

۳-۲- محاسبه شاخص خشکسالی هیدرولوژیک (SDI)

به‌منظور محاسبه خشکسالی هیدرولوژیک با روش SDI ابتدا داده‌های روزانه دبی به‌صورت ماهانه مرتب شده و در ادامه، خشکسالی جریان رودخانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار DrinC¹ v1.5.73 (ابزار محاسبه‌گر شاخص خشکسالی) تعیین شد. نرم‌افزار مذکور، یک ابزار پرکاربرد برای محاسبه شاخص‌های مختلف خشکسالی با تأکید بر محاسبه شاخص RDI یا شاخص شناسایی خشکسالی، شاخص SDI یا شاخص خشکسالی رودخانه‌ای (SPI) یا شاخص استاندارد شده بارش و هم‌چنین دهک‌های بارشی است (تیکاس^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). از مشخصات رایج شاخص مذکور نیاز آن‌ها به تعداد نسبتاً کم داده برای محاسبه و راحتی تفسیر نتایج است (تیکاس و همکاران، ۲۰۱۵). در ادامه ویژگی‌های شاخص‌های محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت. باید اشاره شود که برای در نظر گرفتن خشکسالی با تداوم‌های مختلف، مقادیر شاخص خشکسالی جریان با مقیاس‌های زمانی ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (ازکایا و زیبرگ^۳، ۲۰۱۹).

۳-۲-۴ شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای (SDI)

این شاخص توسط نالبانتیس در سال ۲۰۰۸ ارائه شد و سپس در سال ۲۰۰۹ توسط نالبانتیس و ساکاریس برای مشخص کردن خشکسالی هیدرولوژیکی توسعه داده شد. شاخص SDI با استفاده از داده‌های دبی رودخانه طبق رابطه‌ی (۳-۱۲) تعریف می‌شود (امینی و همکاران، ۱۳۹۸ ب):

$$SDI = V_{j,K} - V_K/S_K \quad i=1,2, \quad K=1,2,3,4 \quad (1)$$

که در آن، $V_{j,K}$ با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۳) محاسبه می‌شود:

$$V_{j,K} = \int_{i=1}^{3k} Q_{i,j} \quad j=1,2, \quad 12 \quad (2)$$

که در آن، i سال هیدرولوژیکی، j ماه (برای ماه مهر $j=1$ و برای ماه شهریور $j=12$ ، دوره زمانی، Q مقادیر حجمی جریان سطحی ماهانه، V مقادیر حجمی جریان تجمعی و پارامترهای V_k و S_k به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار سری داده‌های تجمعی دبی است. در جدول (۲) طبقه‌بندی حالت‌های خشکسالی هیدرولوژیک با شاخص SDI ارائه شده است که مبنای طبقه‌بندی و تعیین شدت خشکسالی در این تحقیق است.

جدول (۲): طبقه‌بندی حالت‌های خشکسالی هیدرولوژیک با شاخص SDI (نالبانتیس و ساکاریس، ۲۰۰۹)
Table (2): Classification of hydrological drought conditions based on SDI index (Nalbantis and Sacaris, 2009)

حالت	شرح	مقیاس (بازه)	احتمال وقوع (%)
۰	بدون خشکسالی	$SDI \geq 0$	۵۰
۱	خشکسالی ملایم یا جزئی	$-1 \leq SDI < 0$	۳۴/۱
۲	خشکسالی متوسط	$-1/5 \leq SDI < -1$	۹/۲
۳	خشکسالی شدید	$-2 \leq SDI < -1/5$	۴/۴
۴	خشکسالی خیلی شدید	$SDI \leq -2$	۳/۲

۵-۲- درون‌یابی شاخص SDI در مقیاس‌های ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه

پس از محاسبه مقادیر شاخص‌های SDI در مقیاس‌های ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه با استفاده از آمار طولانی مدت در ۲۸ ایستگاه هیدرومتری در منطقه مورد مطالعه، مقادیر مذکور به روش وزنی معکوس فاصله^۱ درون‌یابی شد. تفاوت عمده روش‌های درون‌یابی، در برآورد متغیر وزنی است. تغییرات مکانی مقادیر SDI ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه در نرم‌افزار GIS و بازه داده‌ها با استفاده از طبقه‌بندی مقادیر SDI مطابق با جدول ۳ انجام شده است. در درون‌یابی به روش وزن‌دهی عکس فاصله یا IDW مقادیر اندازه‌گیری شده که نزدیک‌ترین موقعیت را به محل پیش‌بینی دارند نسبت به موقعیت‌های دورتر تأثیر بیشتری بر مقدار پیش‌بینی دارند. در این روش سطحی از نقاط اندازه‌گیری شده بر پایه مسافت و همسانی ایجاد می‌شود (رابطه‌ی ۳)، (جانستون^۲ و همکاران، ۲۰۰۴).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^q} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^q}} \quad (3)$$

که در آن؛ Z مقدار درون‌یابی شده، Z_i مقدار نمونه‌برداری شده، D_i فاصله بین مقادیر درون‌یابی شده و نمونه‌برداری شده و q یک ثابت مناسب است. در ادامه نقشه تغییرات مکانی شاخص خشکسالی جریان در مقیاس‌های مختلف زمانی تهیه و تجزیه و تحلیل شدند.

۳- نتایج

۳-۱- تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از SDI

شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای SDI در مقیاس‌های ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه نتایج حاصل از طبقه‌بندی داده‌های حاصل از شاخص‌های SDI ۱ ماهه، ۳ ماهه و ۶ ماهه و سالانه به ترتیب در

1- Inverse Distance Weight (IDW)

2- Johnston

جداول ذیل ارائه شده است. مقادیر شاخص خشکسالی جریان یک و سه ماهه در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر شاخص خشکسالی جریان یک و سه ماهه در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه
Table (3): Monthly and 3-month drought index values in the studied hydrometric stations

نام ایستگاه	شاخص SDI یک ماهه				شاخص SDI سه ماهه			
	حد اقل	حد اکثر	میانگین	چولگی	حد اقل	حد اکثر	میانگین	چولگی
پل الماس	-۳/۴۷	۳/۴۷	۰/۰۱	-۰/۷۳	-۳/۱۹	۲/۹۸	۰/۰۱	-۰/۹۳
نوران	-۲/۳۶	۲/۴۰	۰/۰۳	۰/۲۵	-۱/۳۲	۲/۳۰	۰/۰۹	۰/۵۹
ایریل	-۳/۱۴	۲/۴۹	۰/۰۶	-۰/۱۸	-۱/۸۷	۲/۱۴	۰/۰۱	-۰/۰۳
فیروزآباد	-۲/۱۷	۳/۰۷	-۰/۰۲	۰/۳۴	-۱/۷۳	۲/۹۴	-۰/۰۲	۰/۶۹
باروق	-۳/۰۶	۲/۶۳	۰/۰۸	-۰/۱۱	-۲/۳۱	۲/۳۶	-۰/۰۱	-۰/۱۱
آتشگاه	-۲/۳۲	۳/۳۰	-۰/۰۱	۰/۸۳	-۱/۷۴	۳/۰۱	-۰/۰۱	۰/۶۳
ارباب‌کندی	-۳/۲۸	۲/۶۶	-۰/۰۳	۰/۴۷	-۱/۸۵	۲/۵۳	-۰/۰۳	۰/۵۴
عموقین	-۲/۲۶	۲/۶۵	-۰/۰۲	۰/۱۴	-۲/۴۹	۲/۱۴	-۰/۰۲	-۰/۰۱
آلادیزگه	-۲/۲۷	۳/۸۲	-۰/۰۲	۰/۵۹	-۲/۰۴	۳/۹۷	-۰/۰۴	۰/۸۶
اکبرداوود	-۱/۷۹	۳/۳۹	-۰/۰۴	۱/۱۵	-۱/۶۶	۳/۱۹	-۰/۰۲	۰/۸۹
آبگرم	-۲/۰۲	۲/۸۳	-۰/۰۱	۰/۴۹	-۱/۷۹	۲/۵۲	-۰/۰۱	۰/۵۶
حاج احمدکندی	-۳/۳۶	۲/۷۸	-۰/۰۱	-۰/۱۲	-۳/۴۳	۲/۵۵	-۰/۰۱	-۰/۰۲
درو	-۲/۳۱	۳/۹۹	-۰/۰۱	۰/۴۷	-۲/۳۵	۲/۸۷	۰	۰/۱۸
ننه‌کران	-۲/۰۶	۳/۱۸	۰/۰۳	۰/۳۹	-۲/۰۷	۳/۳۱	-۰/۰۱	۰/۴۵
ویلادرق	-۲/۹۲	۴/۰۲	۰	۰/۳۲	-۲/۳۷	۳/۷۰	۰	۰/۰۶
شمس‌آباد	-۲/۴۳	۲/۹۲	۰/۱۳	۰/۰۴	-۲/۳۱	۲/۴۳	۰/۰۱	۰/۱۷
سولا	-۲/۱۳	۳/۳۷	-۰/۰۵	۰/۶۸	-۱/۶۷	۳/۳۹	-۰/۰۱	۰/۷۶
لای	-۳/۱۲	۳/۴۴	۰	۰/۳۰	-۲/۵۸	۲/۶۳	۰	-۰/۳۴
دوست‌بیگلو	-۲/۴۴	۳/۵۶	-۰/۰۱	۰/۱۱	-۲/۴۰	۲/۷۳	۰	-۰/۱۶
پل سلطانی	-۳/۱۶	۳/۳۳	-۰/۰۶	۰/۲۵	-۲/۹۵	۲/۵۶	۰/۰۴	۰/۰۴۷
سامیان	-۲/۳۱	۲/۸۴	۰/۰۲	۰/۱۴	-۲/۲۴	۲/۴۴	۰/۰۱	-۰/۰۰۵
کوزه‌تپراقی	-۲/۰۲	۲/۵۲	-۰/۰۱	۰/۱۸	-۲/۰۳	۲/۷۳	-۰/۰۳	۰/۰۵۶
نمین	-۱/۹۱	۲/۳۶	۰/۰۵	۰/۴۷	-۱/۸۷	۱/۹۴	۰/۰۲	-۰/۱۳
نیر	-۳/۱۸	۴/۶۴	۰	۰/۱۹	-۳/۲۷	۳/۷۲	۰	۰/۰۳۷
هیر	-۲/۷۶	۳/۵۳	۰	۰/۱۸	-۲/۹۵	۲/۵۱	۰	۰/۱۷
گیلانده	-۱/۹۸	۲/۱۵	۰/۱۳	-۰/۱۸	-۱/۹۸	۱/۷۵	۰/۰۹	-۰/۵۹
بوران	-۲/۵۲	۳/۲۴	۰	۰/۰۹۳	-۲/۵۵	۳/۱۸	-۰/۰۱	۰/۰۸
مشیران	-۲/۲۴	۳/۴۶	۰	۰/۱۴	-۲/۲۸	۲/۹۰	۰	۰

براساس جدول ۳، شاخص SDI یک ماهه، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در حوضه مطالعاتی را نشان می‌دهد که خشکسالی‌های شدید در رودخانه‌های کم‌آب بیش‌تر اتفاق افتاده است. این در حالی است که اکثر ایستگاه‌های پر آب و کم آب، دوره‌های ترسالی را شدید اتفاق افتاده است. متوسط مقادیر SDI یک ماهه در ایستگاه‌های فیروزآباد، آتشگاه، ارباب‌کندی، عموقین، آلدیزگه، اکبرداوود، آبگرم، حاج‌احمدکندی، درو، سولا، دوست‌بیگلوی، پل‌سلطانی، کوزه‌تپراقی به‌ترتیب دارای مقادیر منفی $-0/02$ ، $-0/01$ ، $-0/03$ ، $-0/02$ ، $-0/04$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/05$ ، $-0/01$ ، $-0/06$ و $-0/01$ هستند که با توجه به جدول (۲) نشان از وقوع خشکسالی ملایم در ایستگاه‌های مذکور است. ایستگاه‌های پل‌الماس، بوران، ایریل، باروق، ننه‌کران، شمس‌آباد، سامیان، نمین، گیلانده با مقادیر مثبت در کوتاه‌مدت دارای ترسالی هستند. ایستگاه‌های ویلادرق، لای، نیر، هیر، بوران و مشیران دارای وضعیت خشکسالی نرمال هستند. ایستگاه‌های پل‌الماس، ایریل، باروق، حاج‌احمدکندی و گیلانده به‌ترتیب با مقدار $-0/18$ ، $-0/11$ ، $-0/12$ و $-0/18$ دارای چولگی منفی هستند، که بیان‌گر وقوع بیش‌تر خشکسالی نسبت به دوره‌های ترسالی است. ایستگاه‌های نوران، فیروزآباد، آتشگاه، ارباب‌کندی، عموقین، آلدیزگه، اکبرداوود، آبگرم، درو، ننه‌کران، ویلادرق، شمس‌آباد، سولا، لای، دوست‌بیگلوی، پل‌سلطانی، سامیان، کوزه‌تپراقی، نمین، نیر، هیر، بوران و مشیران دارای چولگی مثبت هستند که نشان‌دهنده وقوع بیش‌تر دوره‌های ترسالی است. چولگی شدید مثبت در ایستگاه هیدرومتری در ایستگاه اکبرداوود با مقدار $1/15$ است که نشان‌دهنده تمایل بیش‌تر به وقوع ترسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه است.

مقادیر SDI سه ماهه، خشکسالی‌های متوسط در حوضه مطالعاتی را نشان می‌دهد که ایستگاه‌های فیروزآباد، باروق، آتشگاه، ارباب‌کندی، عموقین، آلدیزگه، اکبرداوود، آبگرم، حاج‌احمدکندی، ننه‌کران، کوزه‌تپراقی و بوران به‌ترتیب دارای مقادیر منفی $-0/02$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/02$ ، $-0/04$ ، $-0/02$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ ، $-0/01$ هستند که در مجموع و بر اساس مقادیر میانگین شاخص خشکسالی جریان، نشان از وجود خشکسالی ملایم در حوضه مطالعاتی است. همچنین ایستگاه‌های پل‌الماس، نوران، ایریل، شمس‌آباد، پل‌سلطانی، سامیان، نمین، گیلانده دارای مقادیر مثبت $0/01$ ، $0/09$ ، $0/01$ ، $0/01$ ، $0/01$ ، $0/04$ ، $0/01$ ، $0/02$ ، $0/09$ می‌باشند که حاکی از ترسالی است و ایستگاه‌های درو، لای، نیر، هیر از حوضه‌های نرمال از نظر وقوع خشکسالی هستند. ایستگاه‌های پل‌الماس، ایریل، باروق، عموقین، گیلانده، سامیان، دوست‌بیگلوی و حاج‌احمدکندی به‌ترتیب با مقادیر $-0/93$ ، $-0/03$ ، $-0/01$ ، $-0/59$ ، $-0/05$ ، $-0/16$ و $-0/2$ دارای مقدار چولگی منفی هستند که نشان‌دهنده وقوع بیش‌تر دوره‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. مقادیر شاخص خشکسالی جریان ۶ ماهه و سالانه در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول (۴): مقادیر شاخص خشکسالی جریان ۶ ماهه و سالانه در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

Table (4): The values of 6-month drought index values in the studied hydrometric stations

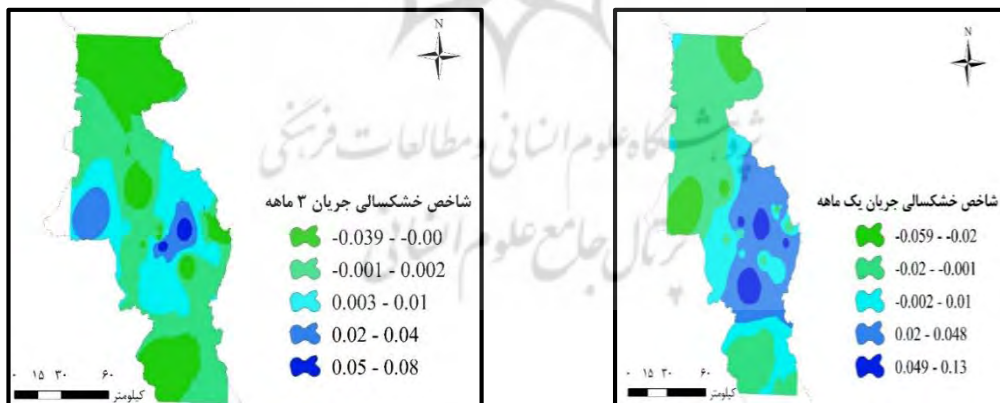
نام ایستگاه		SDI شش ماهه			SDI سالانه		
آماره	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	مقدار میانگین	چولگی	کم‌ترین مقدار بیش‌ترین مقدار	مقدار میانگین	چولگی
پل الماس	-۲/۵۲	۱/۹۲	۰/۰۱	-۰/۹۸	-۲/۴۸	۱/۴۵	-۱/۱۸
نوران	-۱/۳۱	۱/۵۳	۰/۰۸	-۰/۰۸	-۱/۳۹	۲/۰۶	۱/۱۳
ایرپل	-۱/۹۵	۱/۹۵	۰	-۰/۴۲	-۱/۹۵	۱/۸۴	-۰/۱۱
فیروزآباد	-۱/۶۰	۱/۹۳	۰	۰/۳۳	-۱/۵۵	۲/۰۷	۰/۳۳
باروق	-۲/۲۳	۲/۱۶	۰	-۰/۳۴	-۲/۰۱	۲/۱۵	-۰/۰۵
آتشگاه	-۱/۶۰	۲/۲۶	۰	۰/۴۰	-۱/۵۵	۲/۲۵	۰/۶۰
ارباب‌کندی	-۱/۵۵	۲/۰۳	-۰/۰۱	۰/۳۵	-۱/۳۱	۲/۲۱	۰/۶۷
عموقین	-۱/۹۳	۲/۲۶	۰	۰/۴۶	-۱/۷۵	۱/۷۰	۰/۲۹
آلادیزگه	-۱/۹۵	۳/۹۶	-۰/۰۵	۱/۶۰	-۰/۸۲	۴/۱۹	۳/۸۲
اکبرداوود	-۱/۲۸	۳/۰۳	۰	۱/۲۷	-۱/۴۹	۲/۴۰	۰/۵۸
آبگرم	-۱/۴۱	۲/۰۹	۰	۰/۵۹	-۱/۳۵	۲/۱۸	۰/۶۳
حاج احمدکندی	-۱/۸۸	۱/۸۶	-۰/۰۱	۰/۴۲	-۱/۰۷	۲/۸۶	۲/۱۲
درو	-۲/۲۴	۲/۳۶	۰	۰/۵۵	-۲/۰۲	۱/۸۲	-۰/۱۶
ننه‌کران	-۱/۸۵	۲/۵۷	۰	۰/۱۵	-۱/۸۰	۲/۴۸	۰/۶۳
ویلادرق	-۲/۳۰	۳/۱۱	۰	۱/۰۱	-۱/۸۸	۲/۲۵	۰/۴۲
شمس‌آباد	-۱/۹۱	۲/۱۹	-۰/۰۲	۰/۴	-۱/۵۳	۲/۳۶	۱/۳۰
سولا	-۱/۲۴	۳/۰۴	-۰/۰۴	۱/۴۶	-۱/۸۰	۲/۳۰	۰/۵۳
لای	-۱/۸۸	۲/۹۲	۰	۰/۴۱	-۱/۵۶	۲/۴۰	-۰/۳۴
دوست‌بیگللو	-۲/۱۲	۲/۰۴	۰	-۰/۲۲	-۲/۰۳	۱/۹۰	-۰/۳۱
پل سلطانی	-۳/۹۷	۲/۵۱	۰	-۰/۵۱	-۱/۹۹	۲/۴۷	۰/۳۶
سامیان	-۲/۲۰	۲/۱۶	۰	-۰/۰۹	-۱/۷۶	۱/۷۶	۰/۰۴
کوزه‌تپراقی	-۱/۵۹	۱/۶۴	-۰/۰۳	۰/۰۱۸	-۱/۷۱	۱/۵۵	-۰/۱۳
نمین	-۱/۶۹	۱/۹۹	-۰/۰۱	۰/۱۳	-۱/۵۰	۲/۴۵	۰/۹۳
نیر	-۲/۲۶	۳/۳۱	۰	۰/۵۱	-۱/۸۸	۳/۳۸	-۰/۷۹
هیر	-۲/۳۷	۲/۵۶	۰	۰/۲۵	-۲/۰۲	۲/۳۵	۰/۳۹
گیلانده	-۲/۳۳	۱/۳۳	۰/۰۲	-۱/۰۷	-۱/۶۳	۱/۸۲	۰/۵۶
بوران	-۲/۲۹	۲/۵۷	۰	-۰/۰۵	-۱/۶۵	۱/۷۵	۰/۲۲
مشیران	-۲/۰۶	۲/۱۸	۰	-۰/۱۱	-۱/۷۷	۱/۸۷	-۰/۲۶

براساس جدول ۴، متوسط مقادیر SDI ۶ ماهه در ایستگاه‌های آلادیزگه، حاج‌احمدکندی، شمس‌آباد، سولا، کوزه‌تپراقی، نمین با مقادیر منفی ۰/۰۵، -۰/۰۱، -۰/۰۲، -۰/۰۴، -۰/۰۳، -۰/۰۱ نشان از وقوع خشکسالی

ملایم در حوضه مطالعاتی دارد. ایستگاه‌های پل الماس، نوران، گیلانده به ترتیب با مقادیر مثبت ۰/۰۸، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ دارای ترسالی هستند و ایستگاه‌های ایریل، فیروزآباد، باروق، آتشگاه، اکبرداوود، آبگرم، درو، ننه کران، لای، دوست بیگلر، پل سلطانی، سامیان، نیر، هیر بوران و مشیران، حوضه‌های نرمال از نظر وقوع خشکسالی هستند. مقادیر SDI سالانه خشکسالی‌های بلندمدت را در حوضه مطالعاتی نشان می‌دهند که متوسط مقادیر SDI سالانه در ایستگاه‌های نوران، ایریل، باروق، ارباب‌کندی، عموقین، آلاذیزگه، حاج‌احمدکندی، ننه کران، شمس‌آباد، کوزه‌تپراقی، نمین، گیلانده و بوران به ترتیب برابر مقدار ۰/۱۴، ۰/۰۶، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۱۳، ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۱، ۰/۱۴، ۰/۰۳، ۰/۰۱، ۰/۲۳ و ۰/۰۴ هستند که نشان از وجود خشکسالی ملایم در حوضه است. متوسط مقادیر ایستگاه‌های پل الماس، اکبرداوود و سولا به ترتیب با مقدار ۰/۰۱، ۰/۰۷ و ۰/۰۵ دارای مقدار مثبت (ترسالی) هستند. ایستگاه‌های فیروزآباد، آتشگاه، آبگرم، ویلادرق، لای، دوست بیگلر، پل سلطانی، سامیان، نیر، هیر، مشیران حوضه‌هایی دارای وضعیت خشکسالی نرمال هستند.

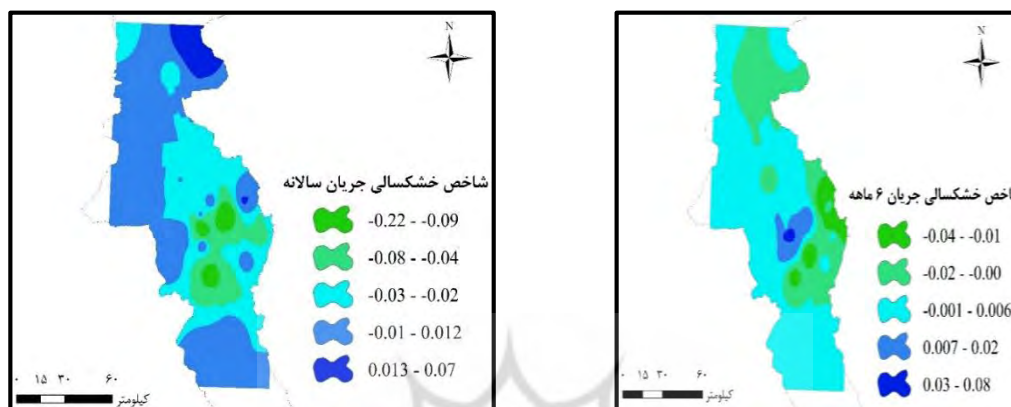
۳-۲- تغییرات مکانی شاخص SDI ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه

تغییرات مکانی شاخص‌های SDI ۱ ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.



شکل (۲): تغییرات مکانی شاخص SDI یک ماهه (راست) و ۳ ماهه (چپ) در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی

Fig. (2): Spatial changes of the 1-month SDI (Right) and 3-month SDI (left) index in the studied hydrometric stations



شکل (۳): تغییرات مکانی شاخص SDI ۶ ماهه (راست) و سالانه (چپ) در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی

Fig. (3): Spatial changes of the 3-month SDI (right) and annual SDI (left) index in the studied hydrometric stations

با توجه به شکل ۲، مقادیر SDI یک ماهه (خشکسالی کوتاه‌مدت)، وقوع خشکسالی ملایم در قسمت مرکزی استان بیش‌تر مشهود است. در این راستا، از کایا و زبیرگ (۲۰۱۹) نیز با بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه دجله در کشور ترکیه به تحلیل تغییرات شاخص SDI در مقیاس‌های مختلف زمانی پرداخته‌اند و بیان نموده‌اند که تقریباً همه ایستگاه‌ها حداقل یک دوره خشکسالی شدید را در طول دوره مطالعه نشان داده‌اند. هم‌چنین حسن و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه تغییرات الگوی مکانی شاخص خشکسالی جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف بیان نموده‌اند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در اکثر مناطق اتفاق افتاده است و خشکسالی‌هایی با شدت نسبتاً بالا در مناطق محدودی از شبه‌جزیره مالزی مشاهده شده است. با توجه به جدول ۲، بازه $-1 \leq SDI \leq -1/5$ ، نشان‌دهنده خشکسالی متوسط در منطقه است. با توجه به شکل ۳، شاخص SDI سه ماهه در بازه $SDI \leq 0$ ، نشان‌دهنده خشکسالی ملایم است و اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی این نوع از خشکسالی را تجربه نموده‌اند. شکل ۳، شاخص SDI ۶ ماهه، بیش‌تر ایستگاه‌ها در بازه $-1 \leq SDI \leq 0$ ، قرار گرفته و همانند شاخص SDI سه ماهه، خشکسالی ملایم حاکم است و با توجه به شکل ۵، شاخص SDI سالانه (بلندمدت) اکثر ایستگاه‌های در بین بازه $-1 \leq SDI \leq -1/5$ ، قرار داشته و خشکسالی ملایم دارند.

۴- نتیجه‌گیری

خشکسالی هیدرولوژیکی بخشی از رژیم طبیعی جریان است اما وقایع شدید و طولانی‌مدت باعث کاهش جریان آب رودخانه‌ها و محدودیت استفاده‌های انسانی و کاهش جریان محیط زیستی از جریان آب خواهد شد. تغییرات مکانی شاخص SDI در مقیاس‌های مختلف زمانی در استان مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل تغییرات مکانی نقشه‌های شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای نشان داد که در مقیاس زمانی یک ماهه (شکل ۲)، مناطق مرکزی استان اردبیل دارای

شرایط ترسالی هستند. این در حالی است که در مقیاس سه ماهه مناطق بیش‌تری از منطقه مورد مطالعه وقوع خشکسالی را تجربه نموده است. این در حالی است که در مقیاس سالانه (شکل ۵)، وقوع خشکسالی‌ها در مناطق مرکزی استان اردبیل مشاهده شده است. این تفاوت رفتار وقوع خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی، می‌تواند در تحلیل اثرات وقوع خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد. قابل ذکر است که شدت وقوع خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی سالانه بیش‌تر بوده است. لذا می‌توان انتظار داشت که خشکسالی‌های سالانه اثرات شدیدتری بر اکوسیستم و آب در دسترس برای اهداف مختلف خواهد داشت. نتایج نشان داد که کم‌ترین وقوع خشکسالی هیدرولوژیک جریان در ایستگاه‌های بالادست و دامنه‌های سبلان بوده است. بر اساس نتایج ارائه شده در خصوص شاخص خشکسالی در مقیاس سالانه می‌توان گفت که اکثر ایستگاه‌های پایین‌دست خشکسالی‌های شدید را تجربه نموده‌اند. در این راستا، نتایج آمینی و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی تأثیر احداث سد در رودخانه‌های اردبیل، نتیجه گرفتند که احداث سد یامچی باعث کاهش رژیم جریان در پایین‌دست شده و افزایش وقوع رخداد‌های خشکسالی هیدرولوژیک را سبب شده است. درحالی‌که سد سبلان باعث تعدیل و تنظیم رژیم جریان در پایین‌دست شده و از شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیک کاسته است و نقش بیش‌تری در تنظیم جریان داشته است. نکته قابل توجه این است که نتایج در مقیاس‌های مختلف دارای تحلیل‌های متفاوتی است و می‌توان تحلیل‌های جداگانه‌ای از تغییرات خشکسالی کوتاه و طولانی‌مدت ارائه نمود. در این راستا، پاندوماس و همکاران (۲۰۲۰) با ارزیابی وقوع خشکسالی جریان در شمال شرقی تایلند به کارائی شاخص‌های بارش استاندارد و شاخص خشکسالی جریان در پایش خشکسالی تأکید کرده‌اند. این در حالی است که ارگولر و آپایدین (۲۰۲۲) در تحلیل وقوع خشکسالی در کشور ترکیه نتیجه گرفتند که خشکسالی ۶ ماهه جریان رودخانه می‌تواند در پیش‌بینی خشکسالی‌های آتی مفید باشد. باید اشاره شود که مصرف آب برای اهداف آبیاری و شرب باعث تشدید وقوع خشکسالی‌ها شده است. در مجموع می‌توان گفت که انتخاب مقیاس زمانی بر اساس هدف، یکی از موارد اصلی در تحلیل‌های مرتبط با خشکسالی است و همان‌گونه که در پژوهش حاضر مشخص شد، نتایج تحلیل خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی ممکن است با هم متفاوت باشد. قابل ذکر است که ارزیابی نتایج و تحلیل خشکسالی با سایر روش‌ها می‌تواند در تحلیل‌های تکمیلی و ارزیابی جامع مفید واقع شود.

۵-منابع

- Amini, H., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Sharari, M., & Zabihi, M. (2019a). Hydrological drought response of regulated river flow under the influence of dam reservoir in Ardabil Province. *Earth and Space Physics*, 45(2): 473-486. (In Persian)
- Amini, H., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Sharari, M., & Zabihi, M. (2019b). Hydrological Drought Assessment and Analysis of its Characteristic Using the Stream flow Drought Index (SDI) at Hydrometry Stations in the Province of Ardabil. *Watershed Management Research*, 32(3): 21-36. (In Persian).
- Asiabi Hir, R., Mostafazadeh, R., Raof, M., & Esmali Ouri, A. (2018). Multi- Criteria evaluation of water poverty index spatial variations in some watershed of Ardabil Province: *Ecohydrology*, 4(4): 997- 1009. (In Persian).
- Erogluer, T.A., & Apaydin, H. (2022). Estimation of drought by Streamflow Drought Index (SDI) and Artificial Neural Networks (ANNs) in Ankara-Nallihan region. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology* 8(2):348. DOI: 10.24925/turjaf.v8i2.348-357.3045.
- Eslamian, S., Zarei, A., & Abrishamchi, A. (2004). Regional estimation of low flows for Mazandaran River basin. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 8 (1); 27-38. (In Persian).
- Gheisouri, M., Soltani-Gerdefaramarzi, S., Ghasemi, M. (2019). Assessment of meteorological and hydrological drought and its effect on water quality: (Case Study: Godarkhosh River). *Irrigation Science and Engineering*, 4(41): 91-105. (In Persian).
- Hasan, H.H., Mohd Razali, S.F., Muhammad, N.S., & Ahmad, A. (2021). Hydrological drought across Peninsular Malaysia: implication of drought index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-176> .
- Heim, R.R. (2002). *A review of twentieth-century drought indices used in the United States*: Bulletin of the American Meteorological Society, 83: 1149-1165
- Johnston, K.m., Verhoef, M., Krivoruchko, K., & Lucas, L. (2004). ArcGIS 9: Using Arcgis geostatistical analysis. *ESRI*, 300p.
- Khazaei, M.R., Telvari, A., Jabari, E. (2003). Hydrological drought frequency distribution analysis (Case study: Ghareh Soo River Basin). *Geography and Development*, 1(2) 45- 56. (In Persian).
- Khoroshi Isalo, s., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A., & Raof, M. (2017). Evaluation of temporal and spatial changes of river hydrological health index in Ardabil watersheds: *EcoHydrology*, 2: 3933-397. (In Persian).
- Mehri, S., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A., & Ghorbani, A. (2017). Temporal and spatial changes of basal flow in rivers of Ardabil province: *Earth and Space Physics*. 43 (3): 623-

634. (In Persian).

- Mostafazadeh, R., Haji, Kh., Esmali-Ouri, A., Mirzaei, Sh. (2019). Estimating the monthly flow deficit during hydrological drought periods in Gorganroud River Basin. *Watershed Management Research*, 9(18):190-196. (In Persian).
- Nalbantis, I and G. Tsakiris, (2009). Assessment of hydrological drought revisited: *Water Resources Management*, 23(5): 881-897.
- Nalbantis, I, (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water*, 23(24): 67-77.
- Nasiri khiavi, A., Faraji, A., & Mostafazadeh, R. (2019). Streamflow response to rainfall changes using the climate elasticity index in hydrometric stations of Ardabil province, *Hydrogeomorphology*, 21(6):1-22. (In Persian).
- Nasiri khiavi, A., Mostafazadeh, R (2019) Spatio-Temporal Assessment of River Flow Discharge Variability Indices in some Watersheds of Ardabil Province. *Hydrogeomorphology*, 17:23-44. (In Persian).
- Nazarenko, S.; Kriaučiūnienė, J.; Šarauskiene, D.; & Jakimavičius, D. (2022). Patterns of Past and Future Droughts in Permanent Lowland Rivers. *Water*, 14, 71.
- Ozkaya, A., Y. Zeberg, (2019). A 40-year analysis of the hydrological drought index for the Tigris basin, turkey. *Water*, 11(657): 15pp.
- Palmer, W.C., (1965). *Meteorological Drought*. U.S. Weather Bureau Research Paper 45, 58 pages. (Available from NOAA Library and Information Services Division, Washington, D.C 2085).
- Pandhumas, T., Kuntiyawichai, K., Jothityangkoon, C., & Suryadi, F. X. (2020). Assessment of climate change impacts on drought severity using SPI and SDI over the Lower Nam Phong River Basin, Thailand. *Engineering and Applied Science Research*, 47(3), 326–338 .
- Shukla, S., and A.W. Wood (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysics Research Letter*, 35(2): 1-8.
- Soleimani Sardo, F., & Bahremand, A. (2015). Investigation of Hydrological Drought Using SDI Index in Iran's Halilrood Basin: *Environmental Resource Research*, 1(3): 279-288.
- Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: A software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, 8(3):697-709.