

بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی در حوضه آبخیز قره‌سو

مهشید کریمی^{۱*}، کاکا شاهی^۲ و خبهات خسروی^۱

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
۲. دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران
(دریافت: ۹۳/۹/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که بشر به خصوص در سال‌های اخیر با آن مواجه شده است، بحران آب و وقوع خشکسالی است و به همین دلیل بررسی وضعیت خشکسالی در مدیریت بهینه منابع آب اهمیت دارد. هدف از این تحقیق، مطالعه و بررسی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی و همچنین تعیین تأخیر زمانی احتمالی بین وقوع این دو نوع خشکسالی در حوضه آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه است. برای این منظور، از آمار پنج ایستگاه باران سنجی، پنج ایستگاه هیدرومتری و ۲۰ چاه پیژومتری موجود در حوضه و چهار شاخص خشکسالی SDI، SIAP، RAI و SWI برای ارزیابی و تحلیل خشکسالی استفاده شد. در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی در سال ۸۷-۱۳۸۶ با روش کریجینگ معمولی در محیط ArcGIS ترسیم شد. نتایج نشان داد شدت خشکسالی از سال ۱۳۷۸ به تدریج افزایش یافته است که طبق مقادیر به‌دست‌آمده از هریک از شاخص‌های خشکسالی، شدیدترین خشکسالی در سال ۱۳۸۶ و طولانی‌ترین خشکسالی طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ رخ داده است. همچنین نتایج نشان داد که در سال‌های اخیر خشکسالی هیدرولوژیکی با تأخیر زمانی یک تا دو ساله نسبت به خشکسالی هواشناسی رخ داده است. بر اساس نتایج پهنه‌بندی خشکسالی مشخص شد در بیشتر مناطق حوضه، خشکسالی هواشناسی در طبقه خیلی شدید و خشکسالی هیدرولوژیکی جریان‌های سطحی در طبقه متوسط و خشکسالی هیدرولوژیکی منابع آب زیرزمینی در شمال شرقی و جنوب غربی حوزه و تا حدی بخش‌های مرکزی در طبقه خیلی شدید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، حوضه آبخیز قره‌سو، خشکسالی، کریجینگ.

۱. مقدمه

دوره‌ای بلندمدت، به نحوی که باعث کمبود رطوبت در خاک و سبب کاهش آب‌های جاری شود و بدین ترتیب فعالیت‌های انسانی و حیات طبیعی گیاهی و جانوری را برهم زند (خزایی و همکاران، ۱۳۸۲). با توجه به اینکه در شرایط مختلف، تعاریف مختلفی از خشکسالی ارائه شده است، شاخص‌ها و روش‌های مطالعاتی خشکسالی نیز متفاوت است. یک شاخص، پارامترهای مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند بارندگی، دما، تبخیر-تعرق، رواناب و دیگر شاخص‌های تأمین آب را در یک قالب یا فرمول جمع می‌کند و تصویری جامع برای تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد (هادی‌زاده ازغندی، ۱۳۹۰). این شاخص‌ها به‌منظور استفاده بیشتر از داده‌ها و فهم‌پذیر بودن آن‌ها و همچنین ایجاد قدرت تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزان معمولاً تنها به‌صورت یک عدد بیان

منابع آب به‌عنوان موضوعی بااهمیت به‌ویژه در مناطق خشک و کم‌آب جهان از دیرباز همواره مطرح بوده است. در حال حاضر حدود ۸۰ کشور در مناطق خشک جهان قرار گرفته‌اند و ایران نیز به دلیل کم‌بودن بارندگی و پراکنش نامناسب آن، جزو این کشورها به شمار می‌آید. وجود این شرایط همراه با رشد سریع جمعیت و به‌ویژه خشکسالی‌های سال‌های اخیر باعث شده است امروزه تأمین آب در کشور از مهم‌ترین چالش‌ها باشد. خشکسالی از پدیده‌های محیطی شناخته‌شده است و در واقع بخش جدایی‌ناپذیری از تغییرات اقلیمی است که می‌تواند در هر منطقه جغرافیایی حادث شود (مفیدی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). تا کنون تعاریف مختلفی درباره خشکسالی ارائه شده است؛ در یک تعریف کلی خشکسالی عبارت است از کمبود غیرعادی بارش در

بهره‌مند (۲۰۱۳) با استفاده از شاخص خشکسالی جریانات رودخانه‌ای به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز هلیل‌رود پرداختند. نتایج نشان داد خشکسالی در سراسر حوضه رخ داده است و بیشترین فراوانی وقوع خشکسالی، در جنوب حوضه متمرکز شده است. ازین و همکاران (۲۰۱۴) با به‌کارگیری شاخص بارش استاندارد، شاخص سطح آب استاندارد و شاخص استاندارد پوشش گیاهی (Standard Vegetation Index) به بررسی خشکسالی در منطقه نیمه‌خشک مدیترانه پرداختند. نتایج همبستگی خوبی بین SPI و SWI نشان داد و همچنین هماهنگی میان دو شاخص SVI با SWI بیشتر از شاخص‌های SVI و SPI بود.

بررسی‌ها حاکی از آن است که بیشتر تحقیقات تنها به تحلیل خشکسالی هواشناسی پرداختند و به مسئله خشکسالی هیدرولوژیکی که اغلب خسارات جبران‌ناپذیری بر ابعاد مختلف محیط و جوامع بشری تحمیل می‌کند، کمتر توجه شده است. همچنین بیشتر تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در داخل و خارج از کشور بر اساس دو شاخص است، اما در این تحقیق از دو شاخص هواشناسی و دو شاخص هیدرولوژیکی استفاده شد. این امر باعث شد بررسی خشکسالی با استفاده از مؤلفه‌های بارندگی، دبی و سطح چاه‌های پیرومتری با دقت بیشتری صورت پذیرد و تا حدی نتایج را به واقعیت نزدیک‌تر نشان دهد. حوضه قره‌سو از جمله نقاطی است که تحت تأثیر مشکل خشکسالی قرار گرفته است. با توجه به نقش مهم این حوضه در تأمین آب استان و همچنین ارزش تفرجگاهی رودخانه قره‌سو، خشکسالی‌ها می‌تواند موجب چالش‌های اقتصادی و در نهایت بروز بحران‌های اجتماعی در منطقه شود؛ بنابراین هدف از این تحقیق، تعیین دوره‌های ترسالی و خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و بررسی رابطه بین این دو نوع خشکسالی است که از نتایج آن می‌توان در جهت مدیریت اصولی و بهتر منابع آب در حوضه قره‌سو که از مهم‌ترین حوضه‌های استان کرمانشاه است، بهره برد.

می‌شوند. از معروف‌ترین شاخص‌های خشکسالی می‌توان به شاخص پالم (Palmer Drought Severity Index)، (پالم، ۱۹۶۵)، شاخص دهک (Deciles Index)، (گیس و ماهر، ۱۹۶۷) و شاخص بارش استاندارد (Standard Precipitation Index) (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳) اشاره کرد، اما هیچ‌کدام از شاخص‌های مهم به‌طور ذاتی برتر از بقیه شاخص‌ها نیست، بلکه هر کدام از آن‌ها برای کاربرد خاص خود مناسب‌تر از دیگر شاخص‌هاست (هادی‌زاده ازغندی، ۱۳۹۰).

تحقیق‌های گوناگونی در داخل و خارج ایران در زمینه کاربرد شاخص‌های خشکسالی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

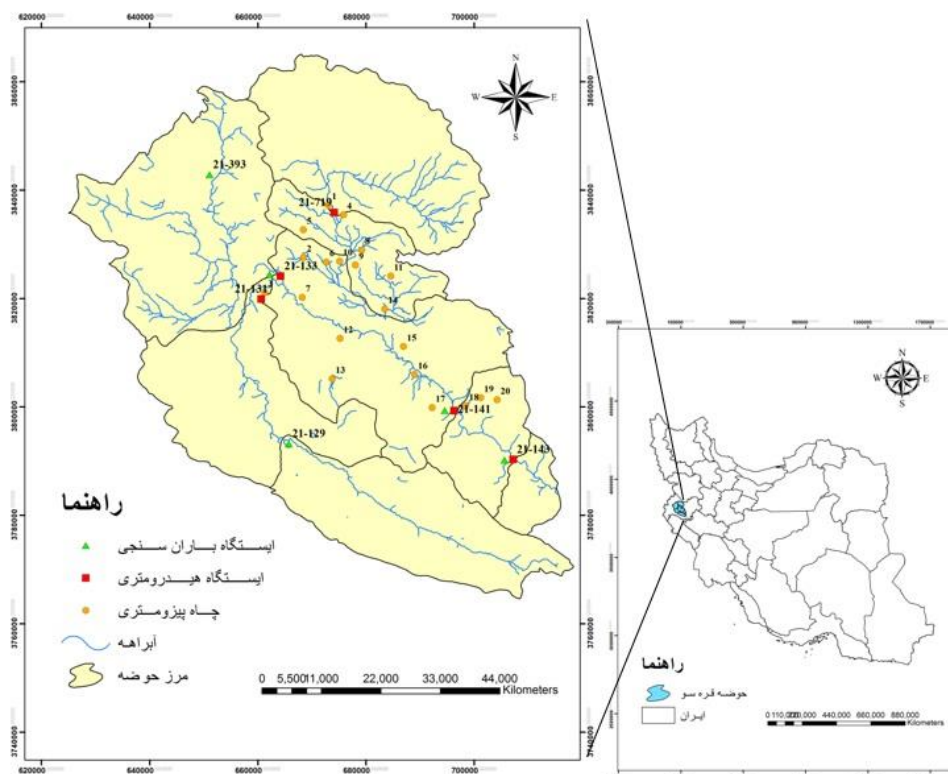
ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) به بررسی شدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از دو شاخص بارش استاندارد و شاخص سطح آب استاندارد (Standard Water Surface Index) در حوضه چغلوندی پرداختند. نتایج نشان‌دهنده افزایش شدت و تداوم خشکسالی‌ها به‌ویژه خشکسالی هیدرولوژیکی در سال‌های اخیر و وجود تأخیر زمانی متفاوت بین وقوع خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی آب‌های سطحی و زیرزمینی است. مفیدی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز اترک و مرادی و همکاران (۱۳۸۸) در حوضه شهر خرم‌آباد با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده و شاخص خشکسالی جریانات رودخانه‌ای (Stream flow Drought Index) به بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی پرداختند. نتایج نشان داد که بین وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی ارتباط معناداری وجود دارد. وقوع خشکسالی در منطقه، اثر خود را به‌صورت آنی یا با تأخیر یک‌ماهه روی منابع آب سطحی نشان داد. ادواسا و همکاران (۲۰۱۰) در حوضه رودخانه آواش اتیوپی برای آنالیز مکانی و زمانی خشکسالی هواشناسی از شاخص بارش استاندارد و برای آنالیز خشکسالی هیدرولوژیکی از جریان رودخانه استفاده کردند. نتایج نشان داد که خشکسالی هیدرولوژیکی به‌طور متوسط با تأخیر ۷ ماهه نسبت به خشکسالی هواشناسی رخ داده است. سلیمانی سردو و

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

قره‌سو رودخانه‌ای در غرب کشور است که از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه کرخه است. حوزه آبخیز قره‌سو از نظر موقعیت جغرافیایی بین $30^{\circ}47'$ و $30^{\circ}46'$ طول شرقی و $35^{\circ}33'$ و $35^{\circ}00'$ عرض شمالی واقع شده است. جهت بررسی خشکسالی

هواشناسی و هیدرولوژیکی در این حوزه آبخیز از داده‌های بارندگی پنج ایستگاه باران‌سنجی، داده‌های دبی پنج ایستگاه هیدرومتری و داده‌های سطح ایستابی ۲۰ چاه پیزومتری با طول دوره آماری مشترک بیست‌یک‌ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۱) استفاده شد. جدول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات ایستگاه‌ها و چاه‌های پیزومتری و شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌ها و چاه‌های پیزومتری واقع در حوزه قره‌سو را نشان می‌دهند.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی، هیدرومتری و چاه‌های پیزومتری واقع در حوزه قره‌سو

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری مورد مطالعه در حوزه قره‌سو

کد	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	رودخانه	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه
۲۱-۱۲۹	ماهیدشت	$46^{\circ}48'$	$34^{\circ}16'$	آب مرک	۱۳۶۰	باران‌سنجی
۲۱-۱۳۱	خرس‌آباد	$46^{\circ}44'$	$34^{\circ}31'$	آب مرک	۱۳۲۰	هیدرومتری
۲۱-۱۳۳	دوآب مرک	$46^{\circ}47'$	$34^{\circ}33'$	قره‌سو	۱۲۹۰	باران‌سنجی و هیدرومتری
۲۱-۱۴۱	پل کهنه	$47^{\circ}8'$	$34^{\circ}19'$	قره‌سو	۱۲۶۰	باران‌سنجی و هیدرومتری
۲۱-۱۴۳	قورباغستان	$47^{\circ}15'$	$34^{\circ}14'$	قره‌سو	۱۳۳۲	باران‌سنجی و هیدرومتری
۲۱-۳۹۳	روانسر	$46^{\circ}39'$	$34^{\circ}43'$	قره‌سو	۱۳۸۸	باران‌سنجی
۲۱-۷۱۹	سرآسیاب	$46^{\circ}54'$	$34^{\circ}39'$	راز‌آور	۱۵۴۳	هیدرومتری

منبع: سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه

جدول ۲. مشخصات چاه‌های پیزومتری مورد مطالعه در حوضه قره‌سو

کد	نام چاه‌های پیزومتری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	پیرمزد	۴۶°۵۳'	۳۴°۳۹'
۲	جلوگیره پایین	۴۶°۵۰'	۳۴°۳۴'
۳	داردرفش قلعه	۴۶°۴۵'	۳۴°۳۱'
۴	ورله	۴۶°۵۵'	۳۴°۳۸'
۵	وزمله	۴۶°۳۱'	۳۴°۳۷'
۶	هشیلان	۴۶°۵۳'	۳۴°۳۴'
۷	بریموند	۴۶°۵۰'	۳۴°۳۰'
۸	محمودآباد	۴۶°۵۷'	۳۴°۳۵'
۹	احمدآباد	۴۶°۵۶'	۳۴°۳۳'
۱۰	لعل آباد	۴۶°۵۴'	۳۴°۳۴'
۱۱	تکیه	۴۶°۰۰'	۳۴°۳۲'
۱۲	قلعه کهنه	۴۶°۵۴'	۳۴°۲۶'
۱۳	قره تپه	۴۶°۵۳'	۳۴°۲۲'
۱۴	چقماران حجت آباد	۴۶°۶۰'	۳۴°۲۹'
۱۵	پیرحیاتی	۴۷°۲۰'	۳۴°۲۵'
۱۶	کهریز	۴۷°۳۰'	۳۴°۲۲'
۱۷	باغ میوه	۴۷°۵۰'	۳۴°۱۹'
۱۸	حصار سفید	۴۷°۹۰'	۳۴°۱۹'
۱۹	سیاه بید	۴۷°۱۱'	۳۴°۲۰'
۲۰	گاگیه	۴۷°۱۳'	۳۴°۱۹'

منبع: سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه

۲.۲. روش تحقیق

در این تحقیق از آمار پنج ایستگاه باران‌سنجی، پنج ایستگاه هیدرومتری و ۲۰ چاه پیزومتری موجود در حوضه استفاده شد و پس از حذف داده‌های پرت و کنترل کیفی و اصلاح و بازسازی داده‌ها، با اجرای آزمون‌های آماری (همگنی من-ویتی، ران تست و رگرسیون) دوره آماری بیست یک ساله (۱۳۹۰-۱۳۶۳) به عنوان دوره آماری مشترک برای تمامی ایستگاه‌ها در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی و تحلیل خشکسالی از چهار شاخص خشکسالی RAI، SIAP، SDI و SWI استفاده شد. در ادامه به معرفی چهار شاخص مورد مطالعه پرداخته شده است. سپس به منظور پهنه‌بندی شدت خشکسالی در محیط نرم‌افزار ArcGIS روش درون‌یابی

کریجینگ معمولی به کار رفت. با بررسی پژوهش‌های داخلی و خارجی از جمله شعبانی (۱۳۸۸)، میرموسوی و میریان (۱۳۹۰)، حمیدیان پور و همکاران (۱۳۹۲)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۳)، سیوندی و قره‌داغی (۲۰۱۴) و اختری و همکاران (۲۰۱۴) مشخص شد که روش کریجینگ به سایر روش‌های درون‌یابی برتری دارد. همچنین به این دلیل که هدف اصلی این پژوهش بررسی رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی است، در این پژوهش سایر روش‌های درون‌یابی ارزیابی نشد.

۲.۲.۱. شاخص ناهنجاری بارش (Rain Fall Anomaly Index)

شاخص ناهنجاری بارش، بارندگی ماه یا سال معین را

۲.۲.۳. شاخص جریان رودخانه‌ای

در این خصوص شاخص SDI با استفاده از داده‌های دبی رودخانه طبق روابط (۴) و (۵) محاسبه شد.

$$SDI_{j,k} = V_{j,k} - V_k / S_k \quad (4)$$

$$V_{j,k} = \sum_{i=1}^{3k} Q_{i,j} \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots; k = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 12$$

که در آن، i سال هیدرولوژیکی؛ j ، ماه (مثلاً برای ماه مهر $j=1$ و برای ماه شهریور $j=12$)؛ k ، دوره زمانی؛ Q ، مقادیر حجمی جریان تجمعی و همچنین پارامترهای V_k و S_k به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری داده‌های تجمعی دبی است (مفیدی پور و همکاران، ۱۳۹۱).

۲.۲.۴. شاخص سطح آب استاندارد

شاخص سطح آب استاندارد در سال ۲۰۰۴ توسط بویان جهت پایش نوسان‌های سطح سفره‌های آب زیرزمینی در بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی ارائه شده است (بویان، ۲۰۰۴) و بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$SWI = \frac{W_{ij} - W_{im}}{\sigma} \quad (6)$$

که در آن، W_{ij} ، سطح ایستابی چاه‌های پیزومتر i تا j ؛ W_{im} ، میانگین ماهانه سطح ایستابی و σ ، انحراف معیار است (بویان، ۲۰۰۴) مقادیر مثبت SWI نشان‌دهنده خشکسالی و مقادیر منفی نشان‌دهنده عدم خشکسالی و شرایط نرمال است. جدول ۳ طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی را بر اساس شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی نشان می‌دهد.

جدول ۳. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

وضعیت خشکسالی	شاخص RAI	شاخص SIAP	شاخص SWI	شاخص SDI
بدون خشکسالی	$-0.3 < RAI < +0.3$	$-0.25 < SIAP < +0.25$	$SWI < 0$	$SDI \geq 0$
خشکسالی ملایم	$-1/2 < RAI < -0.3$	$-0.2 < SIAP < -0.2$	$0 < SWI < 1/99$	$-1 \leq SDI < 0$
خشکسالی متوسط	$-2/1 < RAI < -1/2$	$-0.84 < SIAP < -0.52$	$1 < SWI < 1/49$	$-1/5 \leq SDI < -1$
خشکسالی شدید	$-3 < RAI < -2/1$	$-1/28 < SIAP < -0.84$	$1/5 < SWI < 1/99$	$-2 \leq SDI < -1/5$
خشکسالی خیلی شدید	$RAI < -3$	$SIAP < -1/28$	$SWI \geq 2$	$SDI < -2$

روی مقیاس خطی که از روی سری داده‌ها حاصل می‌شود، ارزیابی می‌کند و اساس آن انحراف مقادیر بارندگی از نرمال است (شایق و سلطانی، ۱۳۹۰). مراحل محاسبه این شاخص به صورت زیر است:

۱. محاسبه میانگین درازمدت بارندگی (\bar{p})؛ ۲. استخراج میانگین ۱۰ مورد از بزرگ‌ترین مقادیر بارندگی رخ داده در دوره‌های مطالعاتی (\bar{m})؛ ۳. استخراج میانگین ۱۰ مورد از کمترین مقادیر بارندگی رخ داده در دوره‌های مطالعاتی (\bar{x}). چنانچه $p \geq \bar{p}$ یا ناهنجاری مثبت باشد این شاخص از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$RAI = 3 \left[\left(\frac{p - \bar{p}}{\bar{m} - \bar{p}} \right) \right] \quad (1)$$

چنانچه $p \leq \bar{p}$ یا ناهنجاری منفی باشد این شاخص از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$RAI = -3 \left[\left(\frac{p - \bar{p}}{\bar{x} - \bar{p}} \right) \right] \quad (2)$$

۲.۲.۲. شاخص معیار بارش سالانه (Standard Index of Annual Precipitation)

در این شاخص ابتدا مجموع بارش‌ها در یک سال را از میانگین مجموع بارش در یک دوره آماری کم کرده و جواب را در مرحله بعد بر انحراف معیار داده‌های دوره آماری موردنظر تقسیم می‌کنیم (برنا و همکاران، ۱۳۸۹) که طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$SIAP = \frac{(p_i - \bar{p})}{SD} \quad (3)$$

p_i ، بارندگی سال هیدرولوژی i م؛ \bar{p} ، میانگین بارندگی در طول آماری و SD ، انحراف معیار سری بارندگی است.

۳. نتایج

در این تحقیق وضعیت خشکسالی در طول دوره آماری موجود و در مقیاس سالانه، بر اساس مقادیر به دست آمده از محاسبه هریک از شاخص‌های ذکر شده و طبق جدول مربوط به طبقات مختلف خشکسالی شاخص‌های موردنظر، برای تمام ایستگاه‌ها و چاه‌های پیرومتری مورد مطالعه تعیین شد.

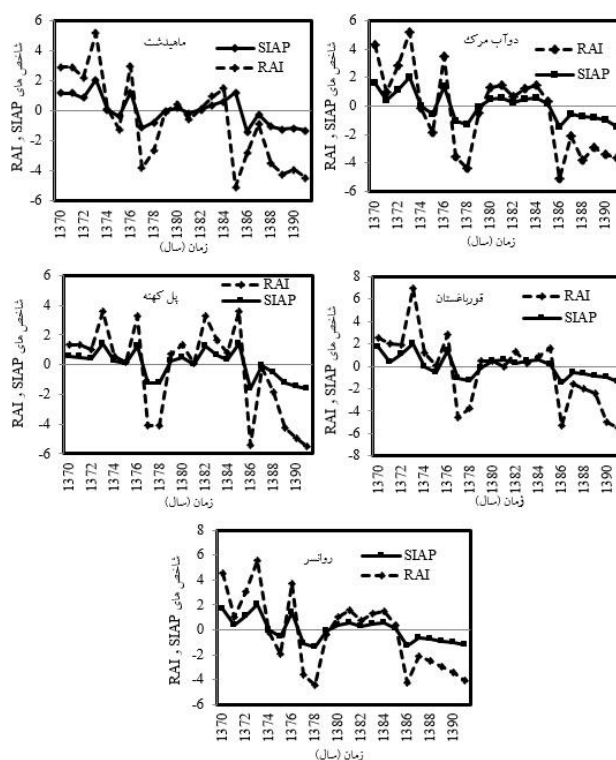
۳.۱. استخراج دوره‌های خشکسالی هواشناسی با دو شاخص RAI و SIAP

نتایج محاسبه دو شاخص RAI و SIAP نشان داد که در ایستگاه ماهیدشت بر اساس دو شاخص گفته شده، خشکسالی در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ رخ داده است. در ایستگاه‌های دوآب مرک، پل کهنه و قورباغستان در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۸۶، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ همچنین در ایستگاه روانسر در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ عدد شاخص منفی بوده و خشکسالی اتفاق افتاده است. شکل ۲ وضعیت خشکسالی را بر اساس

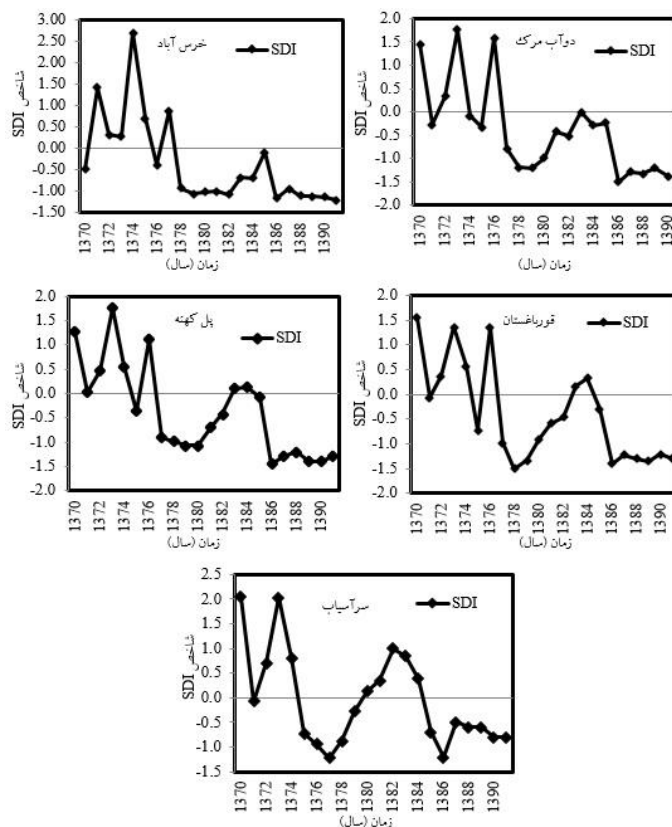
شاخص‌های RAI و SIAP در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

۳.۲. استخراج دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیک با دو شاخص SDI و SWI

نتایج محاسبه شاخص SDI نشان داد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه خشکسالی شدیدی رخ نداده است. خشکسالی در ایستگاه خرس آباد در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۰، ۱۳۸۱، ۱۳۸۲، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ رخ داده است. در ایستگاه دوآب در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۸۶، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ در ایستگاه پل کهنه در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰، ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ خشکسالی اتفاق افتاده است. در ایستگاه قورباغستان خشکسالی در سال‌های ۱۳۷۸، ۱۳۷۹، ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ و در نهایت در ایستگاه سرآسیاب در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۶ رخ داده است. شکل ۳ وضعیت خشکسالی را با استفاده از شاخص SDI در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۲. وضعیت خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص RAI و SIAP در ایستگاه‌های مورد مطالعه

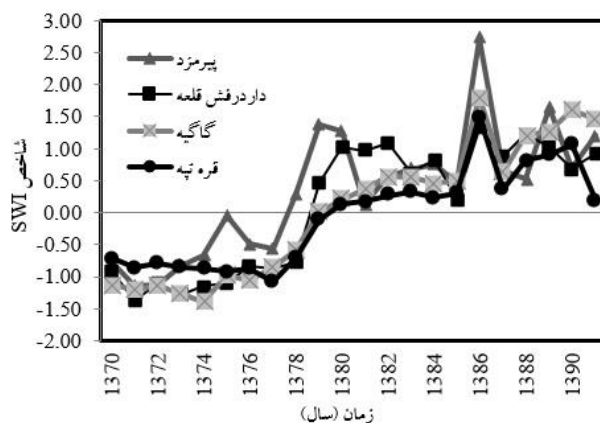


شکل ۳. وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI در ایستگاه‌های مورد مطالعه

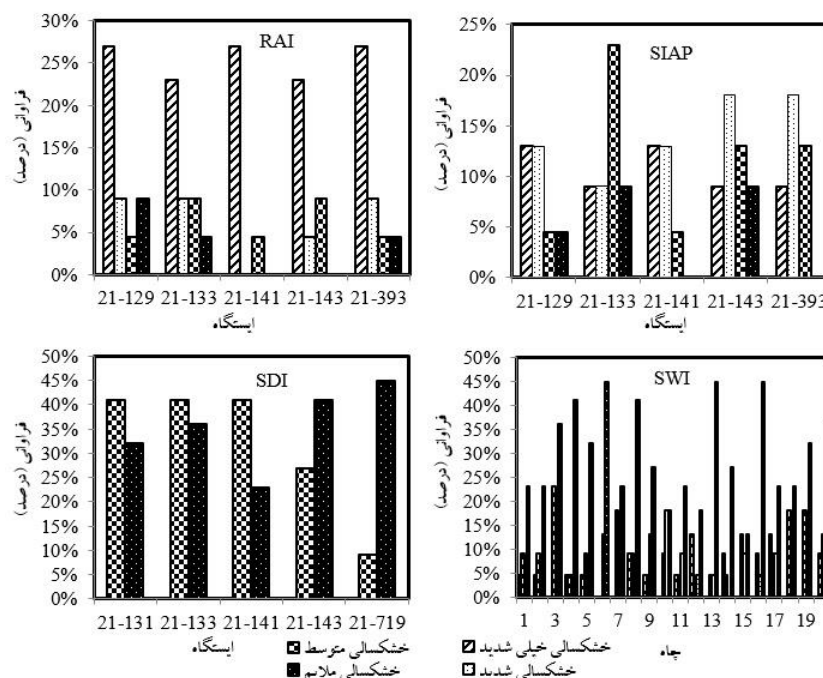
فراوانی برابر ۲۷ درصد و مربوط به ایستگاه‌های ماهیدشت، پل کهنه و روانسر و بر اساس شاخص SIAP بیشترین فراوانی برابر ۲۳ درصد و مربوط به ایستگاه دوآب مرک است. همچنین بر اساس شاخص SDI بیشترین فراوانی در ایستگاه سرآسیاب و برابر با ۴۵ درصد است و در نهایت بر اساس شاخص SWI بیشترین فراوانی برابر ۴۵ درصد و مربوط به چاه‌های پیرومتری هشیلان، قره تپه و کهریز است (شکل ۵).

به‌منظور بررسی خشکسالی آب‌های زیرزمینی در حوضه قره‌سو از شاخص SWI استفاده شد. نتایج محاسبه شاخص SWI نشان داد که در بیشتر چاه‌ها از سال ۱۳۷۸ تا انتهای دوره آماری، روند تغییرات شاخص مثبت بوده و خشکسالی رخ داده است. به‌عنوان نمونه نتایج وضعیت خشکسالی در چاه‌های پیرمزد، داردرفش قلعه، گاگیه و قره تپه در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج نشان داد بر اساس شاخص RAI، بیشترین



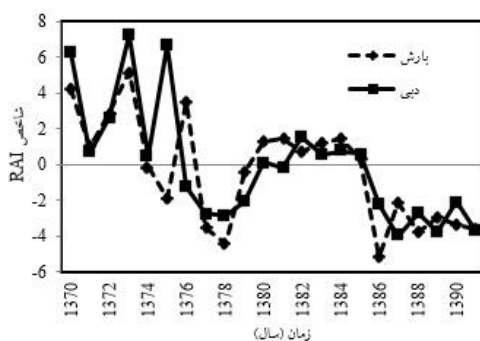
شکل ۴. وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SWI در تعدادی از چاه‌های مورد مطالعه



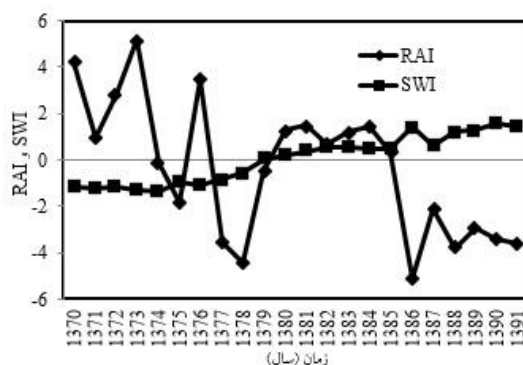
شکل ۵. مقادیر فراوانی وضعیت‌های خشکسالی بر اساس شاخص‌های RAI، SIAP، SDI و SWI

همچنین بین وقوع خشکسالی هیدرولوژیک منابع آب زیرزمینی و خشکسالی هواشناسی در سال‌های اخیر تأخیر یک تا دو ساله مشاهده شد (شکل ۶ و ۷).

نتایج نشان داد از سال آبی ۱۳۸۶-۸۷ خشکسالی هیدرولوژیک جریان‌های سطحی با یک تأخیر زمانی یک‌ساله نسبت به خشکسالی هواشناسی رخ داده است.



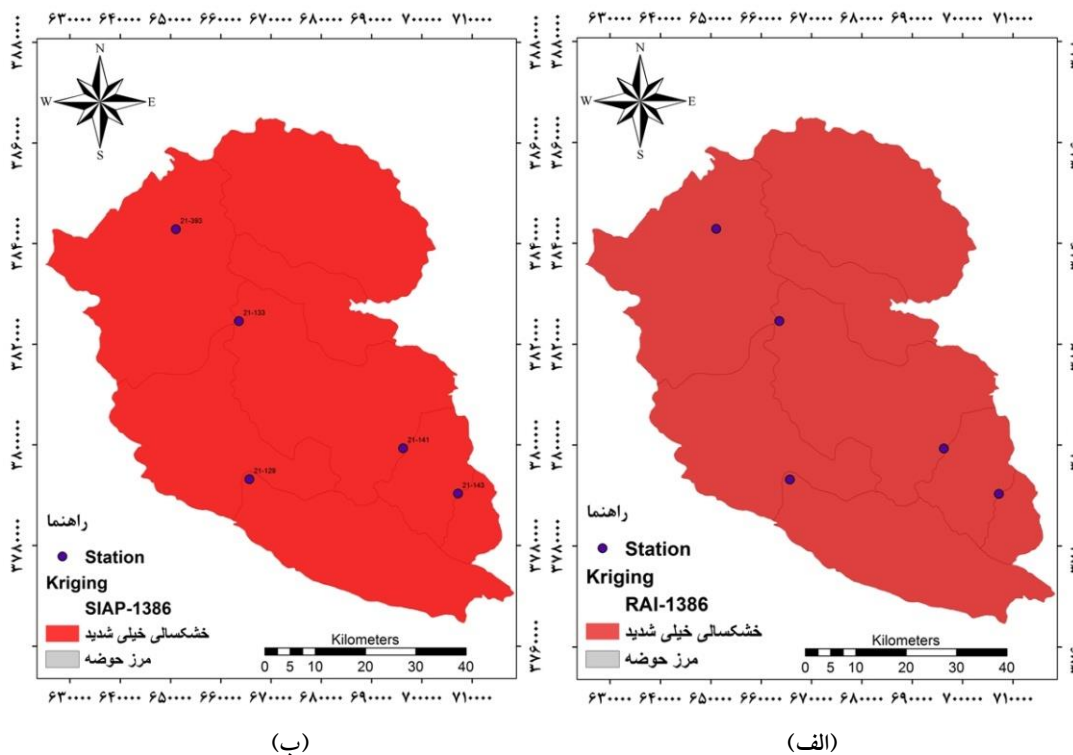
شکل ۶. روند تغییرات خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیک جریان‌های سطحی بر اساس شاخص RAI



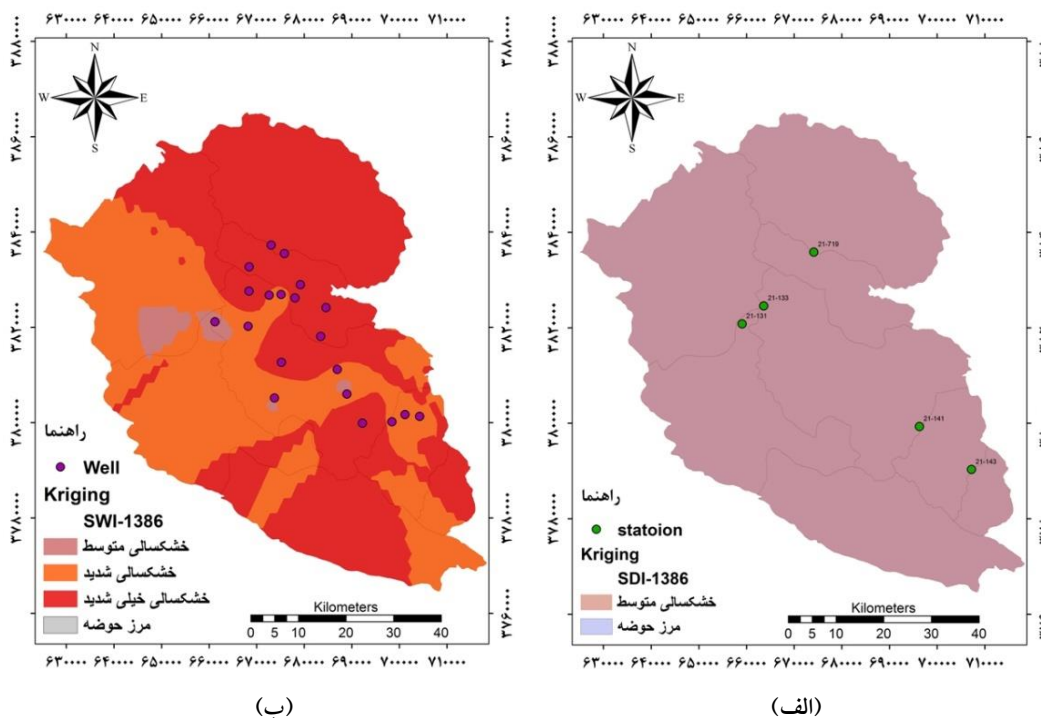
شکل ۷. روند تغییرات خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیک منابع آب زیرزمینی بر اساس شاخص RAI و SWI

هیدرولوژیک در سال ۱۳۸۶-۸۷ ترسیم شد. نتایج نشان داد در بیشتر مناطق حوضه خشکسالی رخ داده است (شکل های ۸ و ۹).

با توجه به اینکه شدیدترین خشکسالی طبق شاخص های خشکسالی به دست آمده در سال ۱۳۸۶ رخ داده است، نقشه پهنه بندی خشکسالی هواشناسی و



شکل ۸. پهنه بندی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص (الف) RAI و (ب) SIAP در سال ۸۶-۸۷



شکل ۹. پهنه بندی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص (الف) SDI و (ب) SWI در سال ۸۶-۸۷

۴. بحث

نتایج به دست آمده از تحلیل شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک نشان داد که در بیشتر سال‌ها در حوضه قره‌سو خشکسالی رخ داده است و شدت خشکسالی از سال ۱۳۷۸ تا انتهای دوره آماری به تدریج افزایش یافته است. این شرایط می‌تواند ناشی از تشدید بحران آب در سال‌های اخیر باشد که با نتایج مرید و پایمزد (۱۳۸۶)، رحیمی و همکاران (۱۳۸۸)، قمقامی و بذرافشان (۱۳۹۱)، اسلامیان و همکاران (۱۳۹۱) و بایزیدی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان داد که شدیدترین خشکسالی طبق مقادیر به دست آمده از هریک از شاخص‌های خشکسالی، در سال ۱۳۸۶ و طولانی‌ترین خشکسالی در سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ رخ داده است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). نتایج به دست آمده از شاخص‌های RAI، SIAP، SDI و SWI نشان داد که از سال‌های آبی ۷۹-۱۳۷۸ خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک جریان‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در بیشتر سال‌ها رخ داده است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴) که علت آن می‌تواند تغییر شرایط اقلیمی در سال‌های اخیر و به دنبال آن بهره‌برداری زیاد از منابع آب سطحی و آب زیرزمینی باشد که با تحقیقات ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) در حوضه آبخیز چغلون‌دی و بذرافشان و خلیلی (۲۰۱۳) در کل ایران مطابقت دارد.

مقایسه نتایج به دست آمده از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک نشان داد، با وجود اینکه بین وقوع این دو نوع خشکسالی تطابق زمانی وجود داشت اما از سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ تا سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ شاخص‌های خشکسالی هواشناسی مثبت و شرایط منطقه نرمال ارزیابی می‌شود و این در حالی است که شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیک در بیشتر ایستگاه‌ها خشکسالی ملایم تا متوسط را نشان می‌دهند. افزایش بارش باران در مقایسه با ریزش برف در این سال‌ها موجب کاهش جریان‌های رودخانه‌ای شده است و از طرفی استفاده بی‌رویه از جریان‌های سطحی توسط کشاورزان و همچنین احداث

چاه‌های پی‌زومتری می‌تواند دلیلی برای این تغییر روند باشد که با نتایج ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) مطابقت دارد. اما با نتایج تحقیق زارعی و همکاران (۲۰۱۳) در کل ایران همخوانی ندارد که می‌تواند علت آن تفاوت در نوع شاخص و مقیاس زمانی در نظر گرفته شده باشد.

نتایج نشان داد بر اساس شاخص RAI، بیشترین فراوانی مربوط به کلاس خشکسالی خیلی شدید در ایستگاه‌های ماهیدشت، پل‌کهنه و روانسر و بر اساس شاخص SIAP بیشترین فراوانی مربوط به کلاس خشکسالی متوسط در ایستگاه دوآب مرک است. همچنین بر اساس شاخص SDI بیشترین فراوانی مربوط به کلاس خشکسالی ملایم در ایستگاه سرآسیاب و بر اساس شاخص SWI بیشترین فراوانی مربوط به کلاس خشکسالی ملایم در چاه‌های پی‌زومتری هشیلان، قره‌تپه و کهریز است.

همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی هواشناسی نشان داد که خشکسالی هواشناسی در کل منطقه رخ داده است که با نتایج ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) همخوانی دارد و بر اساس نقشه پهنه‌بندی خشکسالی هیدرولوژیک، خشکسالی هیدرولوژیک جریان‌های سطحی در کل حوضه در کلاس متوسط و خشکسالی هیدرولوژیک منابع آب زیرزمینی در شمال شرقی و جنوب غربی و تا حدی بخش‌های مرکزی حوضه در کلاس خیلی شدید قرار گرفته است.

نتایج نشان داد خشکسالی هیدرولوژیک با تأخیر زمانی یک تا دو ساله نسبت به خشکسالی هواشناسی در سال‌های اخیر رخ داده است که با نتایج ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) مطابقت دارد. در واقع تعیین این زمان از نظر مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در سال‌های آینده می‌تواند دارای اهمیت باشد.

۵. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد تداوم و شدت

موردی استان سیستان و بلوچستان)، م. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۴، ۴۳-۵۶.

شایق، ا. و سلطانی، س.، ۱۳۹۰، مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در استان یزد، م. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۷، ۲۳۱-۲۴۹.

شعبانی، م.، ۱۳۸۸، ارزیابی کاربرد روش‌های زمین‌آمار در پهنه‌بندی شدت‌های خشکسالی استان فارس، م. مهندسی آب، ۲، ۳۱-۳۶.

قمقما، م. و بذرافشان، ج.، ۱۳۹۱، پیش‌آگاهی وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره ایران با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، م. حفاظت منابع آب و خاک، ۳، ۲-۱۲.

مرادی، ح.، سپهوند، ع. و خزایی، م.، ۱۳۸۸، ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SPI اصلاح شده و SDI (مطالعه موردی: حوزه شهر خرم آباد)، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، کرج، انجمن آبخیزداری ایران، ۱۱۶.

مرید، س. و پایمزد، ش.، ۱۳۸۶، مقایسه روش‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی جهت پایش روزانه خشکسالی (مطالعه موردی دوره خشکسالی ۱۳۸۷ لغایت ۱۳۸۰ استان تهران)، م. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۴۲، ۳۲۵-۳۳۳.

مفیدی‌پور، ن.، بردی‌شیخ، و.، اونق، م. و سعدالدین، ا.، ۱۳۹۱، بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز اترک، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، ۵، ۱۶-۲۶.

ملکی نژاد، ح. و سلیمانی مطلق، م.، ۱۳۹۰، بررسی شدت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه چغلونندی، م. پژوهش آب ایران، ۹، ۶۱-۷۲.

میرموسوی، س. ح. و میریان، م.، ۱۳۹۰، کاربرد روش‌های زمین‌آمار در مطالعات توزیع مکانی بارش (مطالعه موردی: استان کرمان)، نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، ۳۸، ۱۵۳-۱۷۸.

خشکسالی‌ها به‌ویژه خشکسالی هیدرولوژیکی در سال‌های اخیر در حوضه قره‌سو شایان توجه است. از این‌رو نتایج این تحقیق می‌تواند در جهت مدیریت بهینه منابع آبی و برنامه‌ریزی‌های عرضه و تقاضای آب مفید باشد و مدیران و برنامه‌ریزان و کارشناسان را قادر سازد تا به‌موقع تمهیدات لازم را تدارک دیده و راهکارهای عملی را ارائه دهند.

مراجع

اسلامیان، س. س.، قاسمی، م. و سلطانی گرد فرامرزی، س.، ۱۳۹۱، محاسبه و ناحیه‌بندی شاخص‌های جریان کم و تعیین دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کرخه)، م. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۹، ۱-۱۴.

امیدوار، ک.، ابراهیمی، ر. و راستی، ف.، ۱۳۹۳، ارزیابی برخی روش‌های زمین‌آمار در پهنه‌بندی شدت خشکسالی (مطالعه موردی مناطق شمالغرب و مرکزی ایران)، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۱۷، ۳۰-۴۳.

برنا، ر.، عظیمی، ف. و سعیدی دهکی، ن.، ۱۳۸۹، مقایسه شاخص‌های SIAP، PN، RAI در بررسی خشکسالی استان خوزستان با تأکید بر ایستگاه‌های آبادان و دزفول، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۳، ۷۷-۸۸.

حمیدیان‌پور، م.، سلیقه، م. و فلاح قالهری، غ. ع.، ۱۳۹۲، کاربرد انواع روش‌های درون‌یابی به‌منظور پایش و تحلیل فضایی خشکسالی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، م. جغرافیا و توسعه، ۳۰، ۳۰-۵۷-۷۰.

خزایی، م. ر.، تلوری، ع. ا. و جباری، ا.، ۱۳۸۲، تحلیل توزیع فراوانی خشکسالی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه رودخانه قره‌سو)، م. جغرافیا و توسعه، ۲، ۴۵-۵۶.

رحیمی، د.، موحدی، س. و برقی، ح.، ۱۳۸۸، بررسی شدت خشکسالی با شاخص نرمال بارش (مطالعه

- پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ۱۸۴.
- Akhtari, R., Morid, S., Mahdian, M. H. and Smakhtin, V., 2014, Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices, *International Journal of Climatology*, 29, 135-125.
- Bazrafshan, J. and Khalili A., 2013, Spatial analysis of meteorological drought in Iran from 1965 to 2003, *DESERT*, 18, 63-71.
- Byzedi, M., Siosemardeh, M., Rahimi, A. and Mohammadi, K., 2012, Analysis of hydrological drought on Kurdistan Province, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6, 255-259.
- Bhuiyan, C., 2004, Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India, In: *Proceedings of the XXth ISPRS Conference, Int. Soc. Photogram, Remote Sens. Istanbul*, 1-6.
- Edossa, D. C., Babel, M. S. and Gupta, A. D., 2010, Drought analysis in the Awash River basin, Ethiopia, *Water Resource Manage*, 24, 1441-1460.
- Ezzine, H., Bouziane, A. and Quasar, D., 2014, Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indexes in morocco using open short time series data, *Journal of Applied Earth Observation and Geo Information*, 26, 36-48.
- Gibbs, W. J. and Maher, J. V., 1967, Rainfall deciles as drought indicators, *Bureau of Meteorology Bulletin, Commonwealth of Australia: Melbourne*, 48, 37-48.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales, in *Proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January Anaheim: California.
- Palmer, W. C., 1965, *Meteorological drought, Research paper, US Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, DC*, 45, 1-65.
- Sivandi, A. and Gharehdaghi, H., 2014, Performance evaluation of some meteorological drought indices in south of Khuzestan province and zoning IT using geographic information system (GIS), *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 4, 730-738.
- Soleimani Sardou, F. and Bahremand, A., 2013, Hydrological drought analysis using SDI index in Halilrud basin of Iran, *The International Journal of Environmental Resources Research*, 3, 280-288.
- Zarei, R., Sarajian, M. and Bazgeer, S., 2013, Monitoring meteorological drought in Iran using remote sensing and drought indices, *DESERT*, 18, 89-97.
- هادی زاده ارغندی، م.، ۱۳۹۰، پیش بینی و تحلیل فراوانی خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم در خراسان جنوبی،