



دوره ۳۴، شماره ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه‌های ۷۳-۵۳

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2021.343333.1352

پژوهش‌های آبخیزداری

مقاله‌ی پژوهشی



روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه

سمیرا زندی‌فر

(نویسنده‌ی مسئول)* استادیار بخش بیابان، مؤسسه‌ی تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

فاطمه درگاهیان

استادیار بخش بیابان، مؤسسه‌ی تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

الهام فیجانی

استادیار دانشکده‌ی زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

مریم نعیمی

استادیار بخش بیابان، مؤسسه‌ی تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: samira.zandifar@gmail.com

تاریخ دریافت: ۰۸ تیر ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۳۰ آذر ۱۳۹۹

چکیده

مدیریت منابع‌های آب در کشورهای هم‌چون ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک به دلیل تغییر اقلیمی کره‌ی زمین و افزایش جمعیت ضروری است. بررسی خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی و عامل‌های مؤثر بر افت تراز آب‌های زیرزمینی برای یافتن راه‌کارهای آن‌ها حیاتی است. برای بررسی روند تغییر آب زیرزمینی و ارزیابی تاثیر خشک‌سالی‌های گوناگون بر هم در آبخیز کرخه شاخص‌های خشک‌سالی SPEI و SDI، در دوره‌ی داده‌برداری ۱۱ ساله (۱۳۸۵-۱۳۹۵) تجزیه و تحلیل شد. نتیجه نشان داد که در بیش‌تر مناطق با خشک‌سالی اقلیمی، خشک‌سالی آب‌شناسی نیز با هماهنگی و انطباق خوبی رخ داده‌است. میانگین شاخص GRI در محدوده‌های بررسی‌شده‌ی آبخیز کرخه نشان‌دهنده‌ی خشک‌سالی ملایم برای محدوده‌های سنقر، نهاوند، صحنه، هرسم، خرم‌آباد، تویسرکان، اسدآباد، ملایر، بیستون-دیناور، میان‌راهان و حسن‌آباد-قلعه شیان است. در محدوده‌های بررسی‌شده‌ی چغلودی، کوه‌دشت، کنگاور، اسلام‌آباد غرب، روانسر-سنجایی، کرمانشاه و ماهیدشت، خشک‌سالی‌های شدیدتری با شاخص خشک‌سالی به ترتیب ۱/۰۸-، ۱/۱۳-، ۱/۲۱-، ۱/۲۳-، ۱/۲۵-، ۱/۳۱- و ۱/۳۵- تشخیص داده شد، که نشان‌دهنده‌ی کاهش تراز ایست‌آبی و افزایش عمق آب زیرزمینی است. شاخص GRI در این دوره در شرق، غرب و مرکز آبخیز نمایان‌تر است، و در سال‌های پایانی محدوده‌های مرکزی درگیر خشک‌سالی‌های شدیدتری شده‌اند. این انطباق در نقشه‌ی پهنه‌بندی SPEI دیده می‌شود. علاوه بر این در برخی موارد برداشت‌های بی‌رویه به نسبت تاثیر بیش‌تری در افت تراز آب دارند. بنابراین ایجاد مدیریت یکپارچه برای پایداری منابع‌های آب زیرزمینی به‌خصوص در بخش کشاورزی، و اصلاح مدیریت شیوه‌های سنتی برداشت آب زیرزمینی الزامی است. قبل از این که خشک‌سالی‌های هواشناسی و در ادامه‌ی آن خشک‌سالی منابع‌های آب سطحی بر افت تراز آب زیرزمینی تاثیرگذار شود، اقدام‌های لازم برای جلوگیری از اثرهای بد بر منابع‌های آب انجام شود.

واژگان کلیدی: افت تراز آب‌های زیرزمینی، آبخیز کرخه، شاخص خشک‌سالی، SPEI، GRI

نشان داد که وقوع خشک‌سالی در منطقه اثر خود را آبی یا با تاخیر یک ماهه بر منبع‌های آب سطحی نمایان می‌سازد. بررسی خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی در دو شهرستان ارومیه و خوی (حیدری و همکاران، ۲۰۰۹) نشان داد که در شهرستان ارومیه خشک‌سالی آب‌شناسی با تاخیر زمانی یک ماهه و در خوی با تاخیر زمانی ۲ ماهه از خشک‌سالی هواشناسی بروز کرده است. پایداری خشک‌سالی آب‌شناسی نیز به ترتیب تا سه ماه و پنج ماه پس از وقوع آن تعیین شد. سلیمانی و بهره‌مند (۲۰۱۴) در حوزه‌ی بختگان به این نتیجه رسیدند که اثر خشک‌سالی اقلیمی بر خشک‌سالی آب‌شناسی در رودخانه‌های موقتی و فصلی همزمان است. نتیجه‌ی ژنگ و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی اقلیم ایالات متحده در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ نشان داد که شاخص‌های مختلف در اقلیم‌های مختلف در سراسر منطقه قوت‌ها و ضعف‌های گوناگون دارند، و شاخص وضعیت رطوبت خاک ارتباط خوبی با SPI کوتاه مدت دارد. بروکو و همکاران (۲۰۱۸) روند تراز آب زیرزمینی ۳۸۱ چاه را در جنوب استرالیا در برابر تغییر اقلیمی به مدت ۲۶ سال با روش من‌کنندال اصلاحی و تخمین‌گر سن بررسی کردند. بررسی روند تغییر تراز آب‌های زیرزمینی و خشک‌سالی آن‌ها با شاخص تراز بمعیار آب‌های زیرزمینی در حوزه‌ی رودخانه‌ی شرقی بنگال غربی هند (هالدر و همکاران ۲۰۲۰) با آزمون من‌کنندال نشان داد این حوزه با خشک‌سالی شدید هواشناسی، آب‌شناسی و کشاورزی روبه‌رو است، که تاثیر ویژه‌ی بر تراز آب‌های زیرزمینی منطقه دارند. هولینگ و همکاران (۲۰۲۰) بیان داشتند که این شاخص‌ها و مدل‌ها ممکن است تاثیر تغییر آب و هوا را بر آب‌های زیرزمینی در مقیاس وسیعی به‌خوبی نشان دهد. در ایران، نتیجه‌ی بررسی تغییر مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با بهره‌گیری از زمین‌آمار (محمدی و همکاران ۲۰۱۲) نشان داد که روند تغییر عمق آب زیرزمینی تقریباً از پستی‌بلندی دشت تبعیت می‌کند و کاهش تراز آب زیرزمینی در تراز دشت هم‌زمان با شروع دوره‌ی خشک‌سالی از سال ۱۳۷۸ است. پیری و انصاری (۲۰۱۳) به بررسی شدت خشک‌سالی دشت سیستان با پنج شاخص DPI^4 ، RDI^5 ، SPI^6 ، RAI^7 و PN^8 پرداختند. میراکبری و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر خشک‌سالی هواشناسی را بر منبع‌های آب سطحی و زیرزمینی (با شاخص‌های GRI^9 ، SPI^10 و $SPEI^9$) و SDI^1 در آبخیز رودخانه‌ی اعظم هرات بررسی کردند. بررسی تاثیر خشک‌سالی‌های هواشناسی بر تراز آب زیرزمینی

خشک‌سالی با دیگر بلاهای طبیعی از این رو متفاوت است که تعیین دقیق شروع و پایان آن تا حدودی مشکل است. گسترش خشک‌سالی به آرامی است و اثرهای آن ممکن است سال‌ها پس از پایان آن بماند. سامانه‌های پایش در تدوین طرح‌های مقابله با خشک‌سالی و مدیریت آن اهمیت زیادی دارد (زارعی و همکاران ۲۰۱۷؛ زینالی و همکاران ۲۰۱۷). منبع‌های آب زیرزمینی بی‌فاصله از تغییر آب‌وهوا به ویژه نوسان‌های بارندگی تأثیر نمی‌گیرد، بل که متأثر از تغییر بارش و انتقال تدریجی خشک‌سالی در چرخه‌ی آب‌شناسی است. به‌طور کلی کمبود درازمدت بارش سبب بروز اولین نشانه‌های خشک‌سالی و در نتیجه ورود کم‌تر آب به سامانه‌ی آبی می‌شود. در دوره‌ی خشک، امکان تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد و پس از زمانی کوتاه، مقدار ذخیره‌ی رطوبت خاک بر اثر این شرایط شروع به کاهش یافتن می‌کند. در نتیجه تغذیه‌ی سامانه‌ی آب زیرزمینی کم می‌شود و تراز آب چاه‌ها ممکن است یک سال یا بیش‌تر پس از شروع خشک‌سالی به کمبود بارندگی واکنش نشان دهد. این روی‌داد ممکن است بر جریان سطحی وابسته به آب‌های زیرزمینی منطقه نیز تاثیر بگذارد (ون‌لون ۲۰۱۳). خشک‌سالی یکی از بلاهای طبیعی تاثیرهای عمده‌ی بر بخش‌های بوم‌سامانه می‌گذارد. گرچه امکان جلوگیری از وقوع آن نیست، می‌توان با اقدام‌هایی اثرهای منفی آن را کاهش داد. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی و بررسی وضعیت خشک‌سالی هواشناسی و اثرهای کمی آن داده شده است که هر یک بر پایه‌ی به‌کارگیری متغیرهای هواشناسی و روش‌های محاسبه‌ی متفاوتی طراحی شده‌اند (استرلینگ و همکاران ۱۹۹۶، فرناندز و سالاس ۱۹۹۹، ریچارد ۲۰۰۲، چن و همکاران ۲۰۰۴، کوپرینگ ۲۰۰۹، مایر و فارس ۲۰۱۰، ژنگ و همکاران ۲۰۱۷). نتیجه‌ی کوپرینگ (۲۰۰۹) نشان داد که شاخص بارش معیاری و دهک‌ها/ درصد برای پایش خشک‌سالی‌های هواشناسی مناسب است. نتیجه‌ی خشک‌سالی آبی اقلیمی و پیش‌بینی آن با سه شاخص خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی SPI^1 ، $PDSI^2$ و SRI^3 (لیو و همکاران ۲۰۱۲) نشان داد که $PDSI^2$ و SRI^3 مناسب‌ترین شاخص برای ارزیابی خطر خشک‌سالی آینده در آب و هوای فزاینده گرم‌اند. شیو و ویلسون (۲۰۰۰) اثبات کردند که تبخیر و تعرق نقش مهمی در تغییرپذیری خشک‌سالی بر پایه‌ی ترازنامه‌ی رطوبت خاک دارد. نتیجه‌های کاشفی (۲۰۰۸)

- 1 - Standardized Precipitation Index
- 2 - Palmer Drought Severity Index
- 3 - Standardized Runoff Index
- 4 - Deciles of Precipitation Index
- 5 - Reclamation Drought Index
- 6 - Rainfall Anomaly Index
- 7 - Percent of Normal
- 8- Groundwater Resource Index
- 9 - Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- 10 - Streamflow Drought Index

تغییر تراز آب زیرزمینی محدوده‌های آبخیز کرخه در مقایسه با هم، بر پایه‌ی خشک‌سالی‌های اخیر در منطقه است. در نهایت تاثیر تغییر در دوره داده‌برداری تجزیه و تحلیل شد.

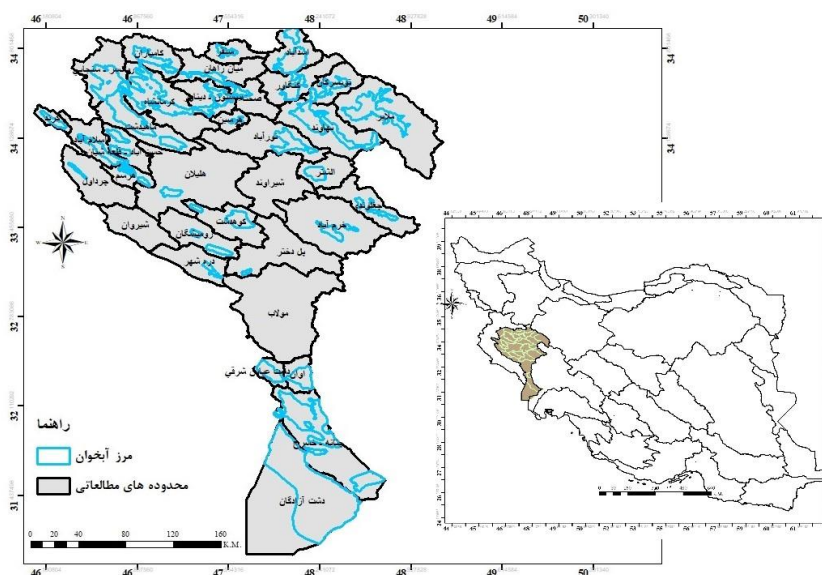
مواد و روش‌ها

آبخیز رودخانه‌ی کرخه در بیش‌تر استان کرمانشاه، جنوب و غرب استان همدان، غرب استان‌های لرستان و خوزستان، شرق استان ایلام و بخشی از جنوب کردستان است. وسعت کل آن حدود 51337 km^2 است، که 19089 km^2 آن دشت و 32248 km^2 در بلندی‌ها است. آبخیز کرخه به سه آبخیز با شناسه‌ی سه رقمی (کرخه، کشکان، سیمره) و ۳۵ محدوده (شکل ۱) تقسیم شده‌است (وزارت نیرو ۱۹۹۱).

شرایط اقلیمی در منطقه بر پایه‌ی سیمای پستی‌بلندی آن عمدتاً متأثر از سازگان هواشناسی زاگرس در غرب و جنوب غرب است. فقط در بخشی از آبخیز رودخانه‌ی گاماسیاب (آبخیز رودخانه‌های آب ملایر، نهاوند) به‌علت بودن راه‌های ارتباط هوایی با دشت‌های مرکزی فلات ایران از اقلیم این ناحیه به‌ویژه در تابستان تأثیر می‌گیرد. آبخیز کرخه در سه ناحیه‌ی زمین‌شناسی سنندج-سیرجان، زاگرس رورانده (داخلی) و زاگرس چین‌خورده (بخش بزرگ‌تر آبخیز: ۶۱/۴٪) است (وزارت نیرو ۱۹۹۱).

برای بررسی روند تغییر آب زیرزمینی و ارزیابی تأثیر خشک‌سالی‌های گوناگون بر یک‌دیگر در دشت‌های آبخیز کرخه دوره‌ی آماری ۱۵ ساله (۱۳۹۶-۱۳۸۱) و شاخص‌های خشک‌سالی GRI و SDI تجزیه و تحلیل کرده شد.

دشت تربت جام خراسان رضوی با شاخص GRI نشان داد که رابطه‌ی معنی‌داری بین خشک‌سالی هواشناسی و خشک‌سالی آب زیرزمینی با تأخیر زمانی هست (یاسمینی و همکاران، ۲۰۱۲). نتیجه‌ی بررسی خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد با شاخص GRI و مدل زنجیره‌ی مارکوف (خسروی دهکردی و همکاران ۲۰۱۹) نشان داد که این مدل در هر سه مرتبه دقت خوبی در پیش‌بینی کردن اندازه‌های شاخص GRI در یک، دو و سه ماه آینده دارد. نیکبخت و مرادی (۲۰۱۹) اثر خشک‌سالی بر منبع‌های آب زیرزمینی را با شاخص آب و هوایی SPI و شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی GRI برای دشت هشنگرد در سال‌های ۱۲۴۹ تا ۱۲۶۹ بررسی کردند. به طور کلی می‌توان جمع‌بندی کرد که رعایت کردن محدودیت قانونی برداشت از منبع‌های آب‌های زیرزمینی و جامع‌نگری در اجرای طرح‌های توسعه‌ی منبع‌های آب برای مدیریت کردن منسجم و یکپارچه‌ی منبع‌های آب ضروری‌اند. در سال‌های اخیر به‌علت کاهش منبع‌های آب سطحی آبخیز کرخه، بهره‌گیری از آب‌های زیرزمینی این حوزه به‌شدت افزایش یافته است، که به تبع آن تراز آب زیرزمینی در بیش‌تر ناحیه‌ها افت چشم‌گیری پیدا کرده است. اگرچه در پژوهش‌های قبلی شاخص‌های خشک‌سالی متعددی برای پیش‌بینی و یافتن شدت خشک‌سالی داده شده است، پژوهش‌های بسیار کمی وضعیت منبع‌های آب زیرزمینی و شدت خشک‌سالی‌های SDI، GRI و SPEI را به‌روش هم‌زمان و مقایسه‌ی در وسعت حوزه از سراب تا پایاب، سالانه بررسی و تحلیل کرده‌اند، که این پژوهش را از پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند. هدف این پژوهش بررسی



شکل ۱- موقعیت آبخیزان‌ها و محدوده‌های پژوهشی در آبخیز کرخه.

روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه

شاخص‌های خشک‌سالی معمولاً نقطه‌ی محاسبه می‌شود، و لازم است به‌روش مکانی پردازش و نقشه‌های آن تهیه شود. شاخص آب زیرزمینی (GRI) که الگویی معتبر و کاربردی برای پایش وضعیت خشک‌سالی آب زیرزمینی است (مهندسینو و همکاران ۲۰۰۸) به‌کار برده شد (رابطه‌ی ۱).

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad 1$$

$D_{y,m}$ اندازه‌ی تراز آب زیرزمینی در سال y و ماه m ، $\mu_{D,m}$ و $\sigma_{D,m}$ به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار اندازه‌ی تراز آب زیرزمینی در ماه m در طول دوره آماری. طبقه‌بندی اندازه‌های شاخص GRI در جدول ۱ نشان داده شده است. شاخص GRI با شاخص SDI که شاخص آب‌شناسی است (نالبانتیس ۲۰۰۸، نالبانتیس و ساکرپس ۲۰۰۹، اسکندری ۲۰۱۶) مقایسه، و رابطه‌ی آن‌ها بررسی شد. برای بررسی وضعیت دو رودخانه در حوزه، شاخص خشک‌سالی جریان‌های رودخانه‌ی (SDI) به‌کار برده‌شد (مطالعات آب‌شناسی آبخیز جراحی ۲۰۱۹).

اندازه‌ی افت تراز آب زیرزمینی دشت‌های آبخیز کرخه و نقشه‌های هم‌تراز بررسی شد. اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ی در آبخوان‌های آبرفتی تهیه و آماده شد. برای تهیه‌ی نقشه، خط‌های هم‌تراز و هم‌عمق آب زیرزمینی داده‌های ماه کمینه‌ی سال آخر دوره‌ی آماری (سال آبی ۹۶-۱۳۹۵) برای آبخوان‌های آبخیز به‌کار برده‌شد، و پهنه‌بندی‌ها با درون‌یابی در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس ۱۰،۳،۱ رسم شد. نقشه‌های تراز آب زیرزمینی در دوره‌های آماری متفاوت و با اندازه‌های متوسط تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ی در زمان کمینه (مهر ماه) تهیه شد. مناسب‌ترین دوره‌ی آماری برای بررسی داده‌های اندازه‌گیری‌های ماهانه‌ی تغییر تراز آب زیرزمینی به گونه‌ی انتخاب شد که دربرگیرنده‌ی بیش‌ترین تعداد چاه اندازه‌گرفته در ماه کم‌آب باشد. در انجام محاسبه‌ها و ترسیم نقشه‌های آب زیرزمینی از آمار چاه‌های منتخب در هر دشت بهره گرفته شد، که کامل‌ترین آمار در دوره‌ی منتخب بود. بنابراین تعداد این چاه‌ها در هر دشت لزوماً با تعداد چاه‌های شبکه‌ی پیژومتری یکسان نبود، و طول دوره‌ی آماری نیز لزوماً کل دوره‌ی آماری نبود.

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی برپایه‌ی شاخص GRI.

GRI	رده‌های خشک‌سالی
$2 \leq$	ترسالی بسیار شدید
$1.5 - 2$	ترسالی شدید
$1 - 1.5$	ترسالی متوسط
$0.5 - 1$	ترسالی ملایم
$-0.5 - 0.5$	بهنجار
$-0.5 - -1$	خشک‌سالی ملایم
$-1 - -1.5$	خشک‌سالی متوسط
$-1.5 - -2$	خشک‌سالی شدید
≥ -2	خشک‌سالی بسیار شدید

۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه؛ Q مجموعه‌های زمانی حجم جریان‌های رودخانه‌ی ماهانه، V و S به‌ترتیب میانگین مجموع حجم آب‌دهی و انحراف معیار حجم جریان‌های تجمعی است. برای تعریف‌کردن شدت‌های خشک‌سالی منتج از شاخص بارش بمعیار شده سامانه‌ی رده‌بندی (جدول ۲) به‌کار برده شد.

$$SDI_{j,k} = V_{j,k} - V_k/S_k \quad 2$$

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

i سال آب‌شناسی؛ j شماره‌ی ماه در ترتیب سالانه؛ k دوره‌ی زمانی (اندازه‌ی ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب بیان‌گر دوره‌های زمانی

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی برپایه‌ی اندازه‌ی شاخص SDI.

رده‌های خشک‌سالی	SDI
بسیار مرطوب	$2 \leq$
خیلی مرطوب	$1/5 - 2$
نسبتاً مرطوب	$1 - 1/5$
نزدیک به بهنجار	$0 - 1$
ملازم	$0 - -1$
نسبتاً خشک	$-1 - -1/5$
خیلی خشک	$-1/5 - -2$
بسیار خشک	≥ -2

این تحقیق روش تورنت وایت به کار برده‌شده. توان تبخیر-تعرق برای ماه‌های سال محاسبه شد. اساس این روش دمای متوسط ماهانه است. در شاخص SPEI هرچه پنجره‌ی زمانی کوتاه‌تر گرفته شود به تغییر بارندگی و دمای ماهانه سریع‌تر واکنش داده است، و نوسان‌های خشک‌سالی را بهتر نشان می‌دهد. برای این که دوره‌های بهنجار، ترسالی و خشک‌سالی در دوره‌ی آماري مشترک (۲۰۱۴-۱۹۹۰) برای ۳۷ ایستگاه هم‌دید کشور بهتر نمایش داده شود، شاخص SPEI به کار برده شد. دوره‌ی خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPEI به طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کم‌تر برسد، و هنگامی پایان می‌یابد که SPEI مثبت شود (بذرافشان و خلیلی ۲۰۱۳). رده‌های رطوبتی شاخص SPEI در جدول ۳ آورده شده است.

شاخص بعمیار توان بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) بر پایه‌ی محاسبه‌ی ترازمندی آب اقلیمی است، و برای محاسبه به داده‌های ماهانه‌ی بارندگی و دمای هوا نیاز دارد (ویسنه-سرانو ۲۰۱۰). معادله‌ی ترازمندی آب اقلیمی با رابطه‌ی ۴ تعریف شده است.

$$D_i = P_i - PET_i$$

۴

P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D اختلاف آن‌ها و i شماره‌ی ماه مورد نظر است. معادله‌های گوناگونی برای محاسبه‌ی PET هست، که در کاربرد آن‌ها محدودیتی برای SPEI نیست. در نسخه‌ی نخست SPEI روش ساده‌ی تورنت وایت (۱۹۴۸) به کار برده شد، ولی در نسخه‌ی دوم آن (اگر محدودیتی در داده نباشد) توصیه شده است که به روش پنمن-مانتیت فائو آلن و همکاران (۱۹۹۸) انجام شود. در

جدول ۳- طبقه‌بندی خشک‌سالی بر پایه‌ی شاخص بارش معیار شده‌ی SPEI (مک‌کی و همکاران ۱۹۹۳).

SPEI	رده‌های خشک‌سالی
$2 \leq$	ترسالی بسیار شدید
$1/5 - 1/99$	ترسالی شدید
$1 - 1/49$	ترسالی ملازم
$-0/99 - 0/99$	بهنجار
$-1 - 1/49$	خشک‌سالی ملازم
$-1/5 - -1/99$	خشک‌سالی شدید
≥ -2	خشک‌سالی بسیار شدید

نتایج و بحث

۶۰۵ Mm³ رسید (شکل ۲). افزایش تعداد چاه‌ها و کاهش تخلیه از آن‌ها مهاجرت چاه‌های نیمه‌عمیق را نشان می‌دهد، و هم‌زمان با کم‌آب شدن مخزن سفره‌های آب زیرزمینی و پایین رفتن تراز آب، از چاه‌های عمیق آب برداشته شده است. چاه‌های عمیق زده‌شده در آب‌خیز کرخه در ۱۳۸۱ نزدیک به ۶۷۹۰ و تخلیه از آن‌ها بیش‌تر از ۱۶۴۰/۶ Mm³ بود، در حالی که در ۱۳۹۶ به ۹۴۲۶ و ۱۶۶۹/۲ Mm³ رسید. از تعداد چشمه‌های منطقه کاسته شد؛ روند خشک‌شدگی آن‌ها با افزایش تخلیه از چاه‌ها، خشک‌سالی

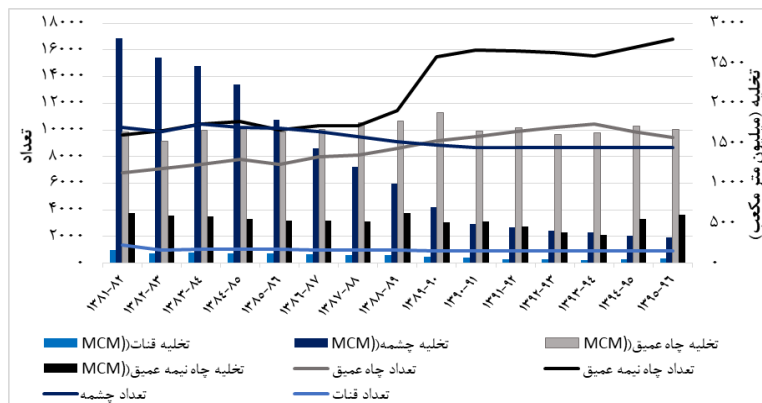
در آب‌خیز کرخه ۳۵۸۰۹ منبع آب زیرزمینی (چاه، قنات و چشمه) هست، که تخلیه‌ی سالانه‌ی آن‌ها حدود ۲۶۵۰/۶ میلیون مترمکعب است. روند افزایشی مهمی در تعداد چاه زده‌شده، و روند کاهش در اندازه‌ی تخلیه‌ی چاه‌های نیمه‌عمیق در آب‌خیز کرخه است، به طوری که تعداد چاه‌های نیمه‌عمیق در ۱۳۸۱ نزدیک به ۹۶۰۴ و تخلیه از آن‌ها بیش‌تر از ۶۲۸ Mm³ بود، که در ۱۳۹۶ به ۱۶۸۱۲ و کم‌تر از

روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه

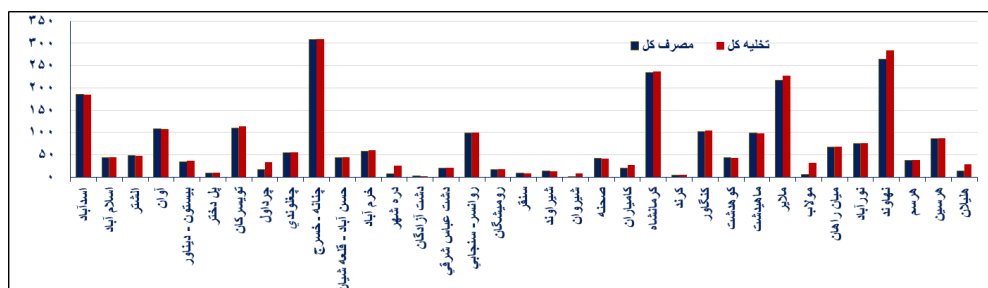
روند عمومی منحنی‌ها در ناحیه‌های مختلف آبخیز کرخه یکسان و هم‌سو نیست، به طوری که در شمال و جنوب آبخیز تقریباً شرقی-غربی، و در سایر مناطق کاملاً متنوع است. تنوع روند منحنی‌ها در بخش‌های مختلف آبخیز در هر محدوده نشان می‌دهد که جهت جریان آب زیرزمینی متفاوت است، عمدتاً از جهت عمومی جریان‌های سطحی و رودخانه‌ها و پستی‌بلندی زمین تبعیت می‌کند، و روند مشخصی در کل آبخیز مشاهده نمی‌شود. با این حال به طور تقریبی می‌توان گفت که جهت جریان آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی و جنوبی آبخیز تقریباً شمالی-جنوبی است. ناحیه‌های تخلیه و پایانه‌ی خروجی همگی آبخوان‌های آبرفتی به سمت جنوب آبخیز، یعنی محدوده‌ی دشت آزادگان و چنانه-خسرج و سرانجام خلیج فارس است. شکل ۵ نمودار تغییر ۱۰ ساله‌ی تراز آب زیرزمینی از مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۶ را در محدوده‌های مختلف آبخیز کرخه نشان می‌دهد. در این ده سال بیش‌ترین کاهش تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت عباس شرقی با بیش از ۱۳ متر افت رخ داد. تغییر تراز آب زیرزمینی در برخی بخش‌های آبخیز کم‌ترین و در بعضی مناطق هیچ بود، و در جاهایی مانند بخش‌هایی از آبخوان‌های کنگاور، هرسم، ماهیدشت، اسداباد و تویسرکان افزایش مشاهده شد.

اقلیمی و پایین آمدن تراز آب زیرزمینی منطقه منطبق است. تعداد آن‌ها در ۱۳۸۱ نزدیک به ۱۰۵۲۱ و تخلیه از آن‌ها بیش‌تر از 2812 Mm^3 بود و در ۱۳۹۶ به ۸۶۶۶ و $320/2 \text{ Mm}^3$ رسید. بیش‌ترین اندازه‌ی برداشت از منبع‌های آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ها در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ در چنانه-خسرج ($309/1 \text{ Mm}^3$) و کم‌ترین آن در دشت آزادگان ($2/2 \text{ Mm}^3$) بود (شکل ۳). در بخش‌هایی از آبخیز کرخه که حجم بیش‌تری از آب زیرزمینی با چاه خارج می‌شود خروجی از چشمه‌ها کم‌تر شد و تاثیر آن در کاهش آبدهی پایه‌ی رودخانه‌ها مهم بود. نقشه‌ی پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی در مهر ۹۶ برای آبخیز کرخه در شکل ۴ نشان داده شده است. بیش‌ترین تراز آب زیرزمینی در ناحیه‌ی شمالی منطقه، در آبخوان نورآباد (بیش از ۱۹۴۰ متر) بود که به سمت ناحیه‌ی جنوبی آبخوان به تدریج کم شد، به طوری که در جنوب آبخیز به ۱۵ متر در آبخوان دشت آزادگان رسید.

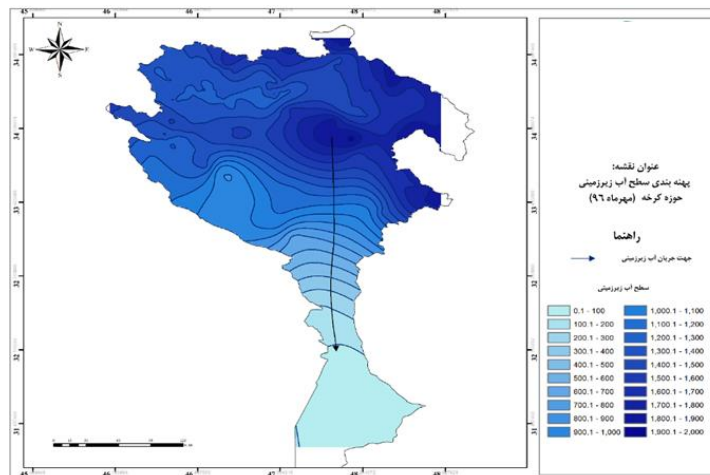
نقشه‌ی هم‌تراز آب زیرزمینی در آبخیز کرخه نشان می‌دهد که تراز آب زیرزمینی از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. بنابراین به‌طور کلی آب زیرزمینی در آبخیز از بلندی‌های شمالی به سمت جنوب آبخیز جریان دارد. بیش‌ترین تغذیه در مخروط افکنه‌های مشرف بر دشت‌ها است.



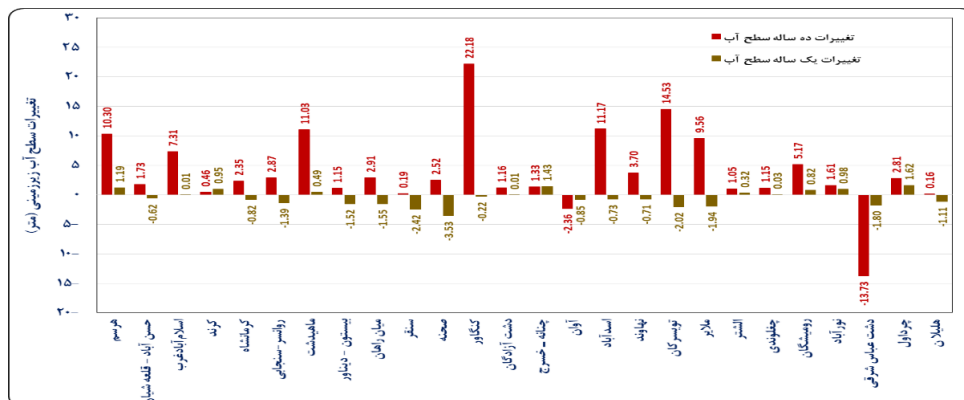
شکل ۲- روند تغییر تعداد و تخلیه‌ی چاه، چشمه و فئات در آبخیز کرخه در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۱-۱۳۹۶.



شکل ۳- وضعیت تخلیه و مصرف از منبع‌های آب زیرزمینی محدوده‌های آبخیز کرخه در سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ (میلیون متر مکعب).



شکل ۴- پهنه بندی تراز آب زیرزمینی در آبخیز کرخه (مهر ۱۳۹۶).

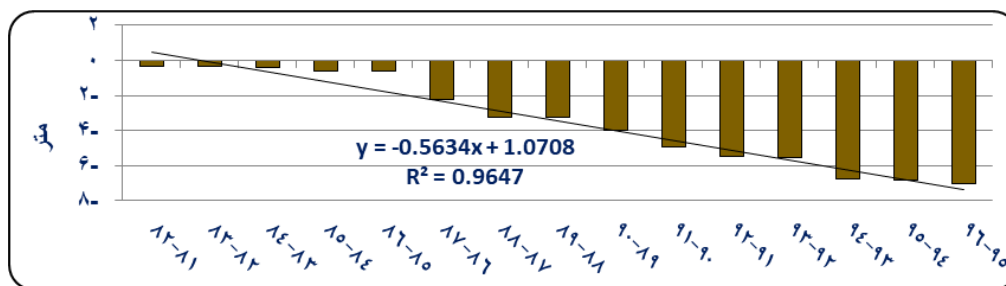


شکل ۵- تغییرات یک ساله (۹۵ و ۹۶) و ده ساله تراز آب زیرزمینی به تفکیک آبخوان در آبخیز کرخه.

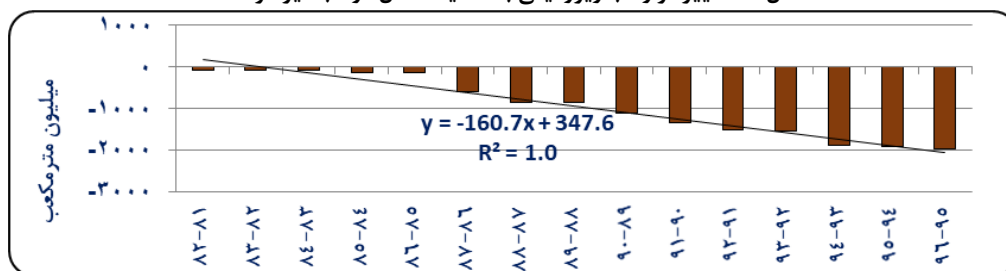
برای بررسی روند و چگونگی نوسان‌های تراز آب زیرزمینی در یک سال آبی و درازمدت، و محاسبه‌ی اندازه‌ی افت یا بالآمدگی تراز آب در بازه‌ی زمانی، بر پایه‌ی اندازه‌گیری‌های تراز آب چاه‌های مشاهده‌ی، نمودار آبی معرف آبخوان‌های آبرفتی تهیه شد. اغلب آبخوان‌های آبخیز کمابیش با افت مداوم تراز آب زیرزمینی مواجه‌اند. مقدار و شدت افت نیز در دوره‌های اندازه‌گیری متفاوت بود، و شدت آن در دهه‌ی اخیر همراه با استمرار افت بیش‌تر شده است. نمودارهای آبی معرف مقدار افت کلی در دوره‌ی اندازه‌گیری نشان می‌دهد که از کمینه‌ی ۰/۲ تا بیشینه‌ی ۳۰/۰۸ متر مشاهده شده است. کمینه در محدوده‌ی کرند در دوره‌ی ۲۱ ساله، و بیشینه در محدوده‌ی کنگاور در دوره‌ی زمانی ۳۴ ساله است.

در سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ تراز آب زیرزمینی آبخیز ۷/۰۱ متر افت داشت (شکل ۶). بررسی تغییر ذخیره‌ی آبخوان‌های آبخیز نشان می‌دهد که کل کاهش ذخیره‌ی ثابت آبخوان‌ها در دوره‌ی پایش 3119 Mm^3 و متوسط سالانه‌ی آن $131/14 \text{ Mm}^3$ بود (شکل ۷). کم‌ترین کاهش کل $0/7 \text{ Mm}^3$ در محدوده‌ی سنقر و بیش‌ترین آن $579/75 \text{ Mm}^3$ در محدوده‌ی ماهیدشت بود. متوسط کاهش سالانه بر پایه‌ی مقدار کاهش ذخیره‌ی ثابت در دوره‌ی پایش محاسبه شد. حدود تغییر این عامل کم‌تر از 5 Mm^3 در ۰/۱ در تعدادی از آبخوان‌ها، تا بیش‌تر از 5 Mm^3 در تعدادی دیگر است. بیش‌ترین مقدار کاهش سالانه $20/50 \text{ Mm}^3$ در محدوده‌ی ملایر بود. محدوده‌ی اسدآباد با متوسط کاهش سالانه‌ی $16/85 \text{ Mm}^3$ در مرتبه‌ی بعدی بود.

روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه



شکل ۶- تغییر تراز آب زیرزمینی به تفکیک سال در آبخیز کرخه.



شکل ۷- روند تغییر حجم تجمعی مخازن آبخوان‌ها به تفکیک سال در آبخیز کرخه.

شکل ۸ تا ۱۷ شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی را در آبخیز کرخه در دوره‌ی آماری ۱۱ ساله (۱۳۸۵-۱۳۹۶) نشان می‌دهد. در سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ آب‌های زیرزمینی دشت آزادگان طبق شاخص GRI در ترسالی متوسط (۱/۴۳)، و دشت عباس شرقی در خشک‌سالی متوسط (۱-) بود. بقیه‌ی محدوده‌ها در این سال آبی بین محدوده‌ی بهنجار تا ترسالی متوسط شناخته شد. ایستگاه‌های آب‌شناسی بین ترسالی ملایم تا خشک‌سالی ملایم بود.

در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ آب‌های زیرزمینی دشت عباس شرقی در ترسالی ملایم (۰/۷) بود. در همین سال خشک‌سالی متوسط (۱/۴۸-) در کرمانشاه رخ داد. بقیه‌ی محدوده‌ها در وضعیت بهنجار تا خشک‌سالی متوسط شناخته شد. ایستگاه‌های آب‌شناسی جز پنج ایستگاه که در محدوده‌ی خشک‌سالی ملایم و متوسط، در خشک‌سالی شدید و بسیار شدید بود.

در سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ آب‌های زیرزمینی دشت عباس شرقی در ترسالی ملایم (۰/۸۷) و کرمانشاه در خشک‌سالی شدید (۱/۶۹-) بود. بقیه‌ی محدوده‌ها در وضعیت بهنجار تا خشک‌سالی شدید شناخته شد. ایستگاه‌های آب‌شناسی به‌طور پراکنده بین خشک‌سالی ملایم تا خشک‌سالی بسیار شدید بود. در سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ آب‌های زیرزمینی میان چنانه-خسرج در ترسالی شدید (۱/۵۱) بود. در همین سال خشک‌سالی شدید (۱/۹۴-) در کنگاور رخ داد. بقیه‌ی محدوده‌ها جز پنج

شکل ۸ تا ۱۷ شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی را در آبخیز کرخه در دوره‌ی آماری ۱۱ ساله (۱۳۸۵-۱۳۹۶) نشان می‌دهد. در سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ آب‌های زیرزمینی دشت آزادگان طبق شاخص GRI در ترسالی متوسط (۱/۴۳)، و دشت عباس شرقی در خشک‌سالی متوسط (۱-) بود. بقیه‌ی محدوده‌ها در این سال آبی بین محدوده‌ی بهنجار تا ترسالی متوسط شناخته شد. ایستگاه‌های آب‌شناسی بین ترسالی ملایم تا خشک‌سالی ملایم بود.

در سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ آب‌های زیرزمینی دشت آزادگان در ترسالی متوسط (۱/۲۳) بود. در همین سال خشک‌سالی متوسط (۱/۰۴-) در پل دختر رخ داد. بقیه‌ی محدوده‌ها در این سال آبی، تقریباً بین این حدود (ترسالی ملایم تا خشک‌سالی ملایم) شناخته شد. ایستگاه‌های آب‌شناسی بین وضعیت خشک‌سالی ملایم تا خشک‌سالی بسیار شدید بود.

در سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ آب‌های زیرزمینی کرند در وضعیت ترسالی ملایم (۰/۷۵)، و میان‌راهان در خشک‌سالی شدید (۱/۷۳-) بود. بقیه‌ی محدوده‌های این سال آبی در وضعیت بهنجار، خشک‌سالی ملایم و متوسط شناخته شد.

بیش‌ترین خشک‌سالی در ۱۰ سال دوره‌ی آماری بررسی شده بعد از سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ بود. بیش از نیمی از ایستگاه‌های این آبخیز (۱۳ ایستگاه) در خشک‌سالی بسیار شدید و بقیه (۱۱ ایستگاه) در خشک‌سالی متوسط و شدید بود.

در سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ آب‌های زیرزمینی کرند در ترسالی ملایم (۰/۸) بود. در همین سال خشک‌سالی متوسط

کرخه (شکل ۱۸) نشان دهنده‌ی وقوع خشک‌سالی متوسط در سال‌های آبی ۹۲-۱۳۹۱، ۹۳-۱۳۹۲ و ۹۴-۱۳۹۳ است. در سال‌های آبی ۸۹-۱۳۸۸، ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۱-۱۳۹۰ خشک‌سالی ملایم رخ داد. این شاخص نشان می‌دهد که در سال‌های آبی ۸۶-۱۳۸۵، ۸۷-۱۳۸۶، ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۶-۱۳۹۵ وضعیت بهنجار بود. شاخص خشک‌سالی آب‌شناسی SDI در سال‌های ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۴-۱۳۹۳ نمایان‌گر خشک‌سالی بسیار شدید است، که در مقایسه با شاخص GRI ارتباط مشخصی را همراه با تأخیر زمانی نشان می‌دهد (شکل ۱۹). به‌طور کلی بررسی اندازه‌ی میانگین شاخص GRI در محدوده‌های بررسی‌شده‌ی آب‌خیز کرخه در دوره‌ی یازده ساله (۹۶-۱۳۸۵) (شکل ۱۹) نشان دهنده‌ی مقدار شاخص ۰/۶۷ برای دشت‌عباس شرقی (ترسالی ملایم)، وضعیت بهنجار برای پل دختر، آوان، کرند، چنانه-خسرج، دشت آزادگان، نورآباد، هلیلان، الشتر، چرداول و رومیشگان است.

محدوده‌های سنقر نهبوند، صحنه، هرسم، خرم‌آباد، تویسرکان، اسدآباد، ملایر، بیستون-دیناور، میان‌راهان و حسن‌آباد-قلعه‌شیمان خشک‌سالی ملایم را نشان دادند. برای بقیه‌ی محدوده‌ها مقدار شاخص خشک‌سالی بیش‌تری به‌دست آمد. مقدار آن ۰/۰۸-، ۰/۱۳-، ۰/۲۱-، ۰/۲۳-، ۰/۲۵-، ۰/۳۱- و ۰/۳۵- به‌ترتیب برای چغلوئندی، کوه‌دشت، کنگاور، اسلام‌آباد غرب، روانسر-سنجایی، کرمانشاه و ماهیدشت بود، که نشان دهنده‌ی کاهش تراز ایست‌آبی و افزایش عمق آب زیرزمینی در منطقه، به‌دلیل بهره‌گیری از این منابع‌ها برای تامین آب بخش‌های مختلف است. به‌طور کلی بیش‌ترین شدت خشک‌سالی‌های آب‌شناسی در خروجی حوزه بود، و جز در ۸۵ و ۹۴ که سال‌های ابتدایی و انتهایی این دهه بود، در سال‌های دیگر همه‌ی حوزه در خشک‌سالی‌های شدید بود. این خشک‌سالی‌های شدید تا حدود زیادی بر وضعیت جریان خروجی حوزه تأثیر گذاشت. بررسی سازه‌ها نشان داد که آن‌ها تأثیر مستقیمی بر جریان‌های رودخانه‌یی نداشته‌اند. شکل ۲۰ و جدول ۴ نشان می‌دهد که خشک‌سالی‌های رخ داده بیش‌ترین انطباق را با خشک‌سالی هواشناسی داشته‌اند، که مدیریت صحیح و بحرانی را واجب می‌کند.

مقایسه‌ی شاخص SDI و SPEI نشان می‌دهد که در بیش‌تر منطقه‌های با خشک‌سالی اقلیمی، خشک‌سالی آب‌شناسی نیز با هماهنگی و انطباق زیادی رخ داد. خشک‌سالی آب زیرزمینی با تأخیر یک ساله نسبت به خشک‌سالی هواشناسی اتفاق افتاد، که طبیعی است و با نتیجه‌ی مطالعات مندسینو و همکاران (۲۰۰۸) نیز مطابقت دارد.

محدوده‌ی با وضعیت بهنجار تا ترسالی متوسط، در محدوده‌ی خشک‌سالی ملایم تا شدید بود. ایستگاه‌های آب‌شناسی بین وضعیت خشک‌سالی ملایم تا خشک‌سالی بسیار شدید بود.

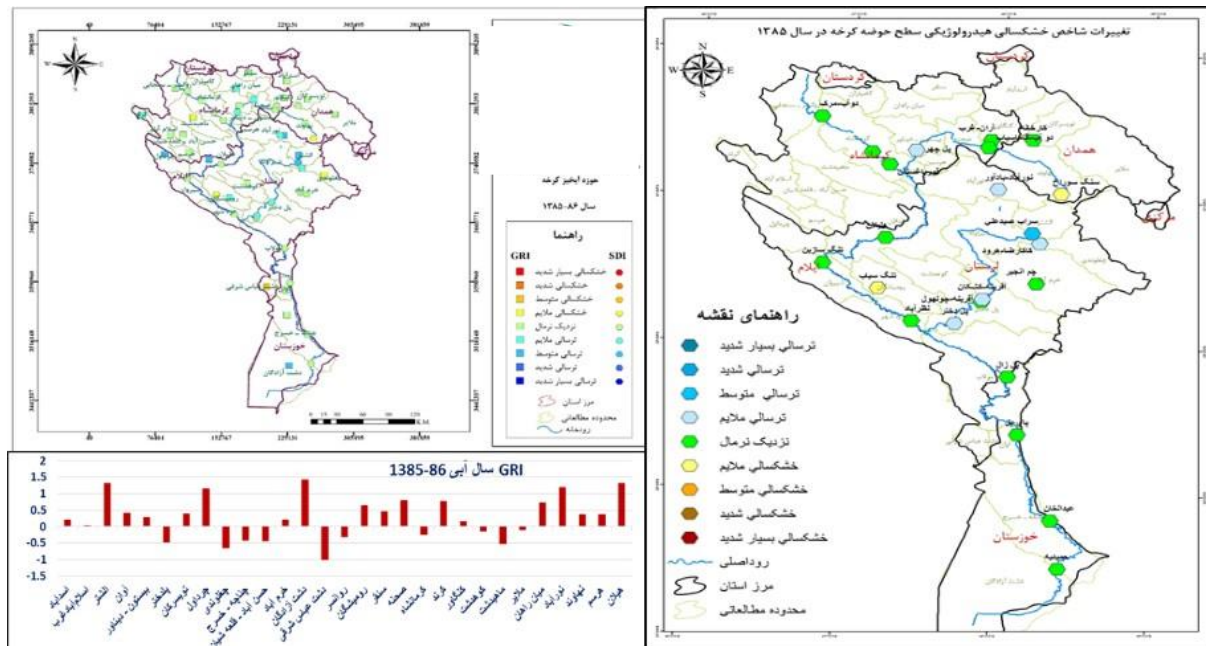
در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ آب‌های زیرزمینی دشت عباس شرقی در ترسالی بسیار شدید (۲/۱۲)، و روانسر-سنجایی در خشک‌سالی شدید (۲/۱-) بود. بقیه‌ی محدوده‌ها جز پنج محدوده‌ی در وضعیت ترسالی ملایم تا بسیار شدید، در وضعیت خشک‌سالی متوسط تا بسیار شدید بود.

در دوره‌ی آماری ده ساله‌ی بررسی‌شده، ایستگاه‌های آب‌شناسی بیش‌ترین خشک‌سالی را در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ نشان دادند، به طوری که ۱۷ ایستگاه در خشک‌سالی بسیار شدید و بقیه (۶ ایستگاه) در خشک‌سالی متوسط و شدید بود. در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ آب‌های زیرزمینی دشت‌عباس شرقی در ترسالی بسیار شدید (۲/۲۷) بود. در همین سال خشک‌سالی بسیار شدید (۲/۱۵-) در اسلام‌آباد غرب رخ داد. بقیه‌ی محدوده‌ها جز هفت محدوده‌ی در وضعیت بهنجار تا ترسالی متوسط، در وضعیت بهنجار تا خشک‌سالی بسیار شدید بود. ایستگاه‌های آب‌شناسی بین ترسالی متوسط تا خشک‌سالی متوسط بود.

این نقشه‌ها نشان می‌دهد که در سال اول دوره‌ی آماری محدوده‌های بررسی‌شده در شرایط خشک‌سالی نیست، و در بسیاری از جاها شرایط بهنجار و حتی ترسالی است. در ۸۷-۱۳۸۶ اندازه‌ی شاخص به سمت خشک‌سالی پیش رفت، اما هنوز در بسیاری از محدوده‌ها شرایط نزدیک به بهنجار است. در سال‌های بعد با افزایش دوره‌ی زمانی، شرایط به‌تدریج به سمت خشک‌سالی پیش رفت، و شدت خشک‌سالی به‌طور کلی نسبت به سال قبل افزایش داشت، و در سال‌های پایانی بیش‌تر شد، اما در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ نسبت به روند کلی دوره‌ی آماری شدت گرفت. با این حال، در سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ هر دو شاخص روند متفاوتی نسبت به کل دوره نشان دادند، به‌طوری که در همه‌ی محدوده‌ها شرایط نزدیک به بهنجار بود. این انطباق بین دو شاخص تأثیرپذیری آب زیرزمینی را از شرایط اقلیمی در آب‌خیز نشان می‌دهد. در بیش‌تر سال‌ها در بخش‌های جنوبی آب‌خیز شدت شرایط خشک‌سالی کم‌تر از نواحی شمالی است. شدیدترین خشک‌سالی آب زیرزمینی در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ رخ داد، و نسبت به روند کلی دوره‌ی آماری شرایط خشک‌سالی شدت گرفت. به‌طور کلی در بیش‌تر محدوده‌ها بین شاخص SDI و GRI هم‌بستگی بود. البته در برخی موارد تأثیر خشک‌سالی آب‌شناسی بر آب‌های زیرزمینی با تأخیر زمانی بود.

بررسی اندازه‌ی میانگین سالانه‌ی شاخص GRI در کل آب‌خیز

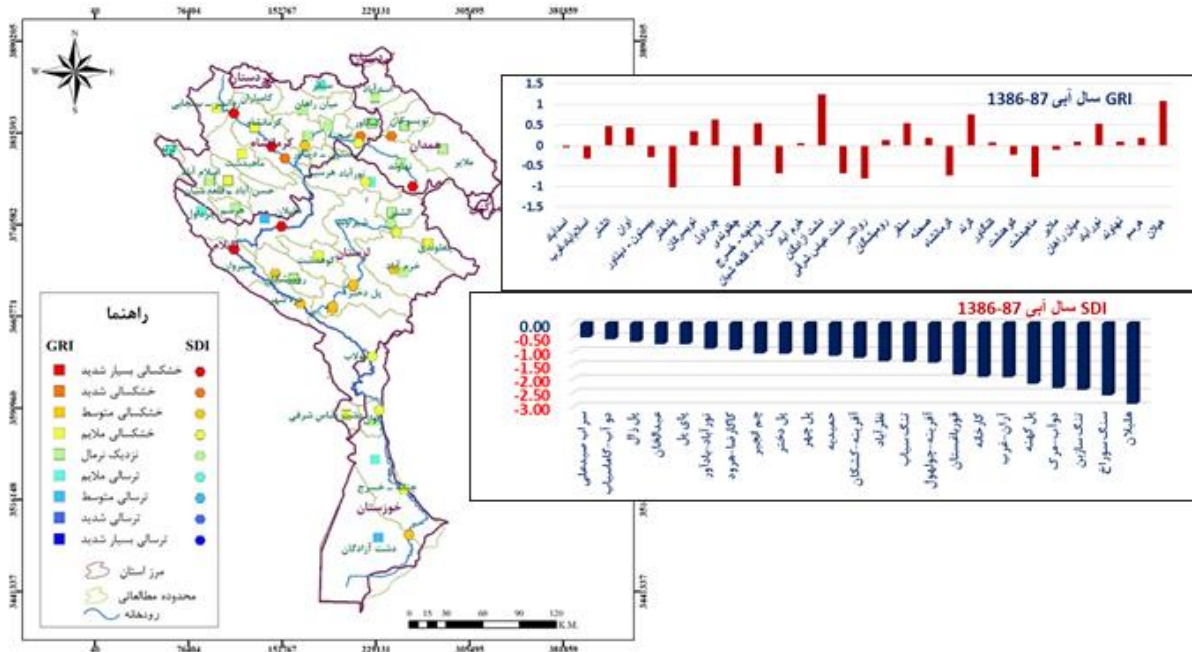
روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه



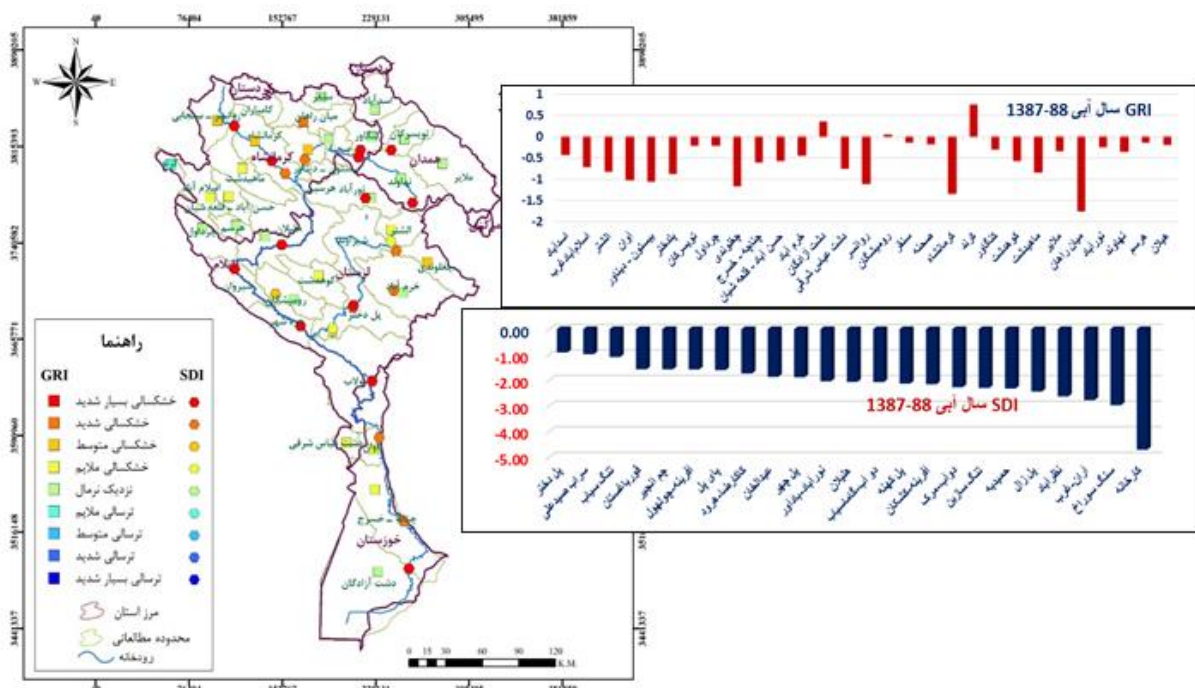
شکل ۸- نقشه و نمودارهای مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آبخیز کرخه در سال ۸۶-۱۳۸۵.

آبخیز نیز درگیر خشک‌سالی‌های شدیدتر شده‌اند. این انطباق در نقشه‌ی پهنه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی آبخیز دیده می‌شود، و به نتیجه‌ی بررسی بروکو و همکاران (۲۰۱۸) شباهت دارد.

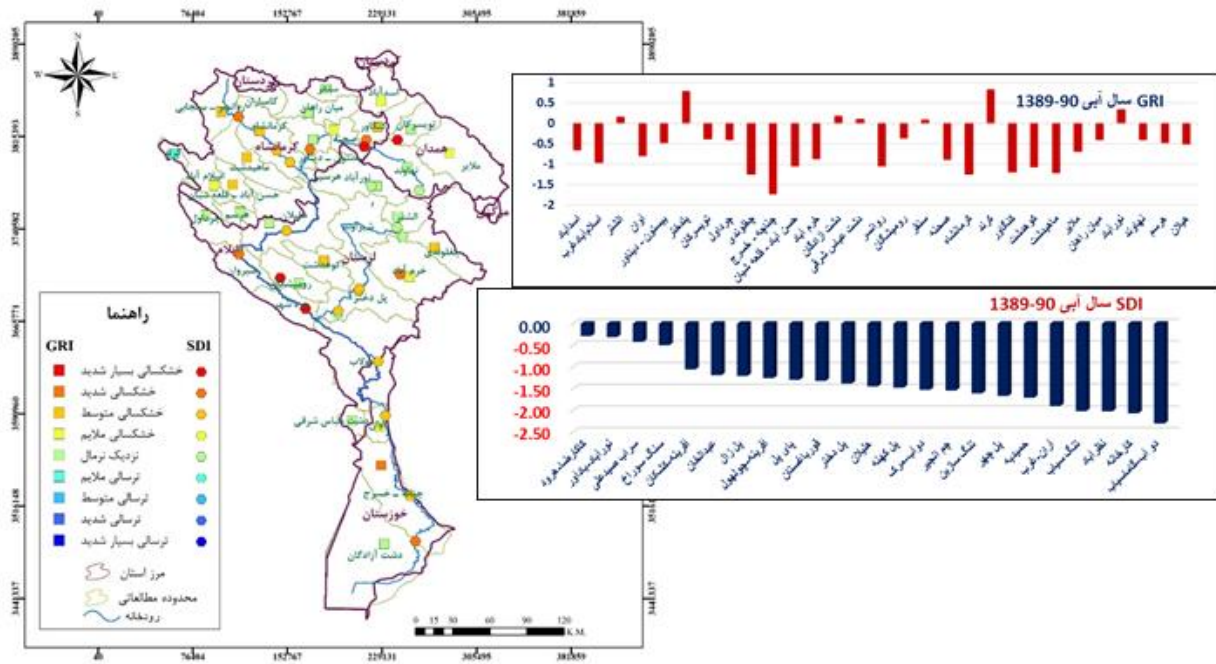
دلیل آن را می‌توان تاخیر در نفوذ آب باران و یا برف به عمق زمین دانست. شاخص خشک‌سالی GRI در دوره‌ی آماری ده ساله‌ی آبخیز کرخه، در شرق، غرب و مرکز آبخیز نمایان‌تر است، و در سال‌های پایانی آن محدوده‌های مرکزی



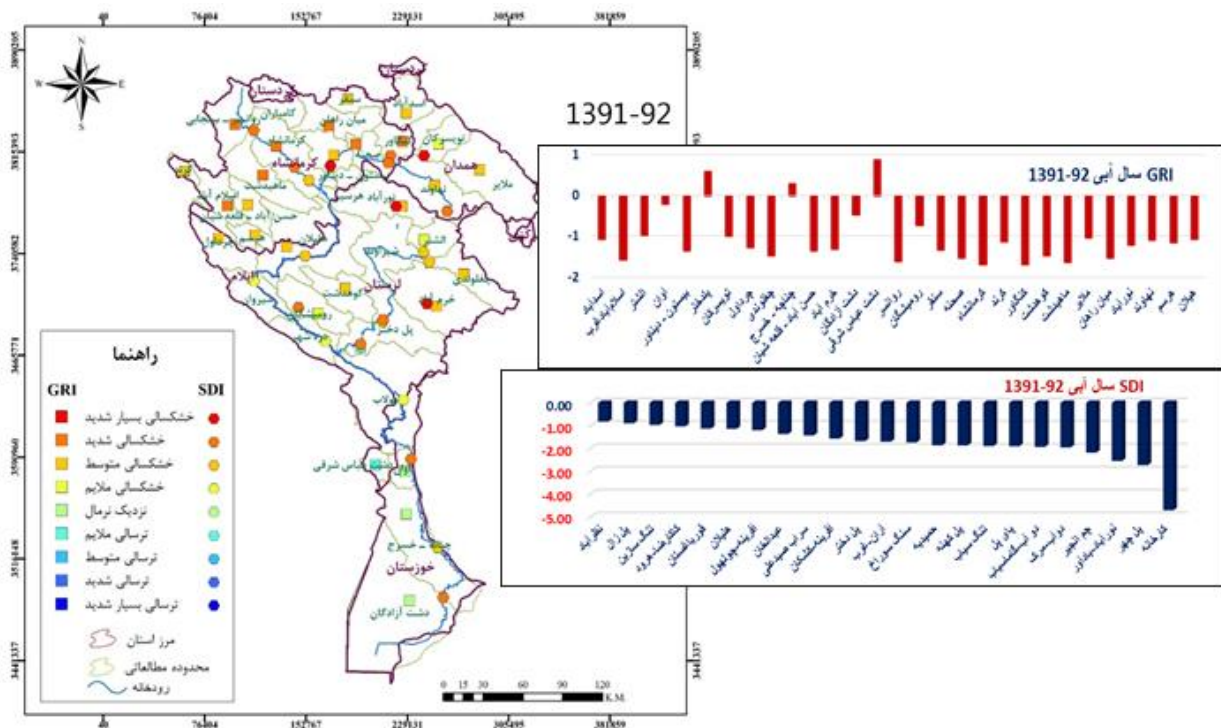
شکل ۹- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آبخیز کرخه در سال ۱۳۸۶-۸۷.



شکل ۱۰- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آبخیز کرخه در سال ۱۳۸۷-۸۸.

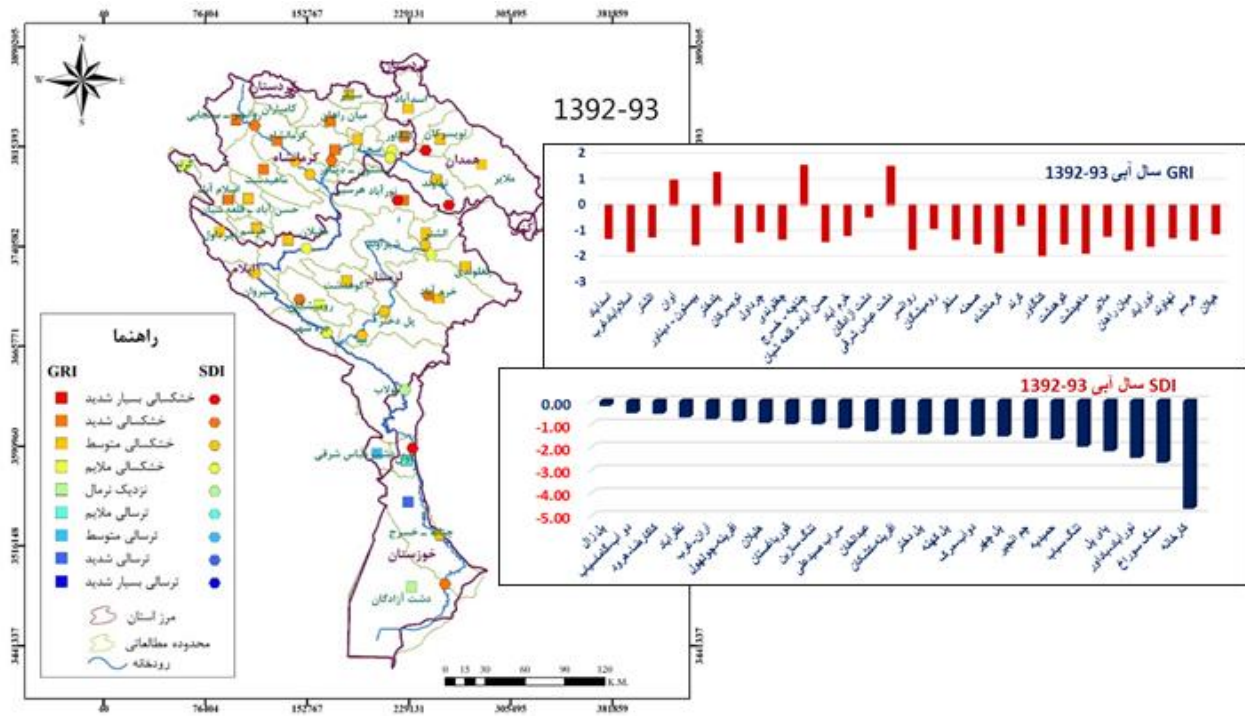


شکل ۱۳- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آب‌خیز کرخه در سال ۹۱-۱۳۹۰.

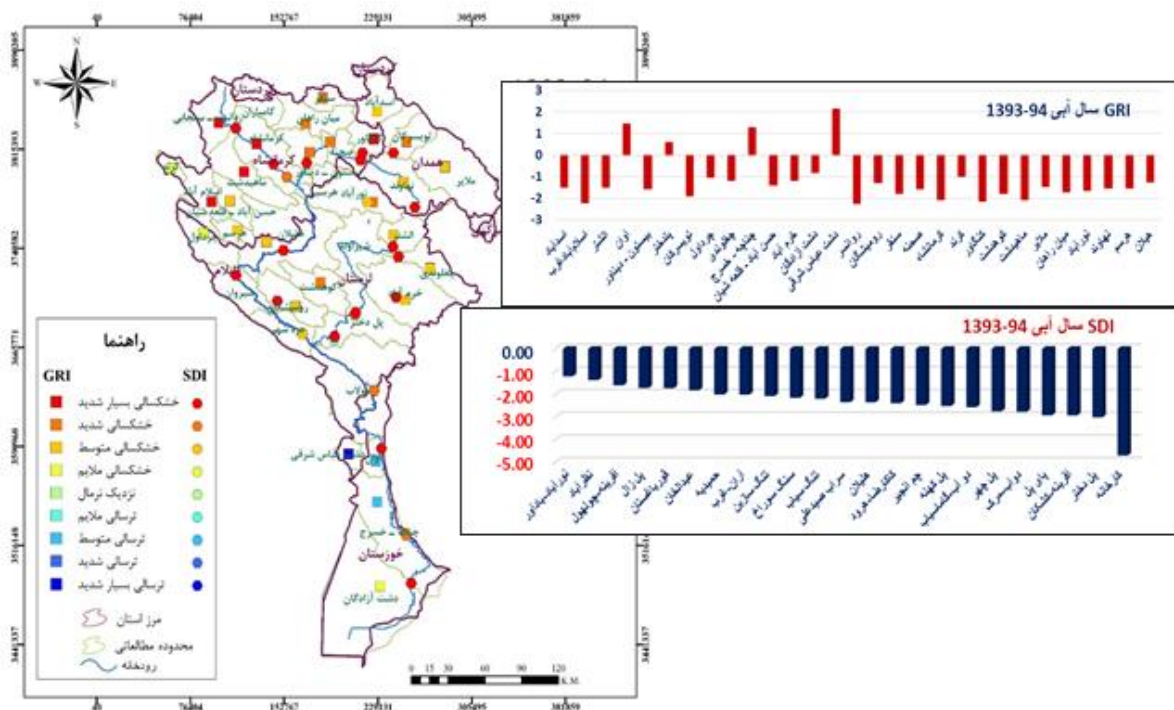


شکل ۱۴- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آب‌خیز کرخه در سال ۹۲-۱۳۹۱.

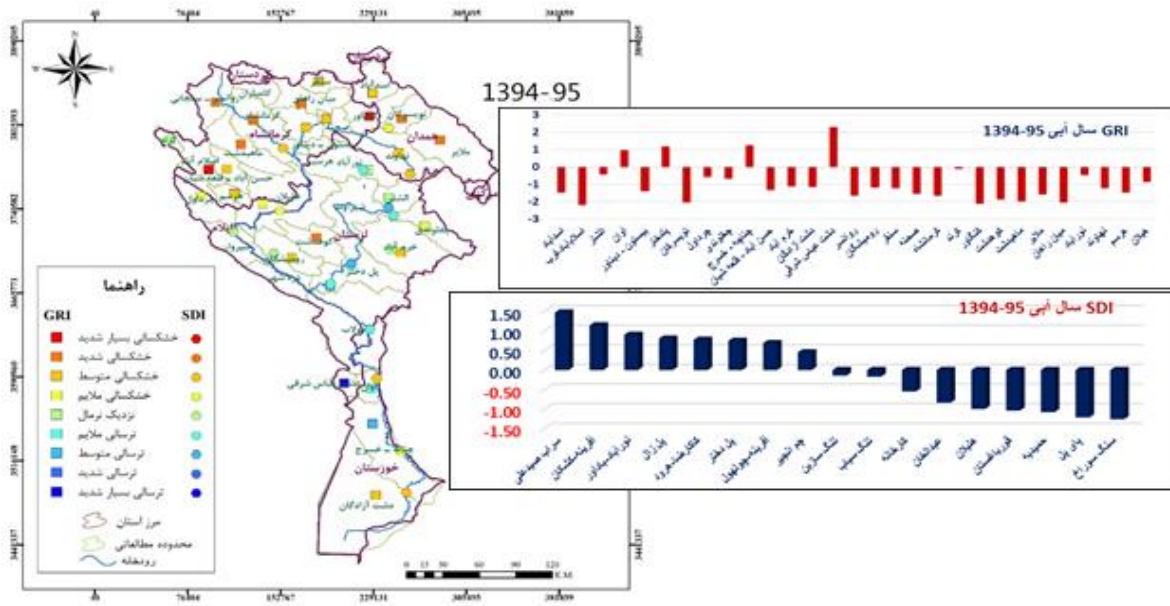
روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه



شکل ۱۵- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آبخیز کرخه سال ۹۳-۱۳۹۲.



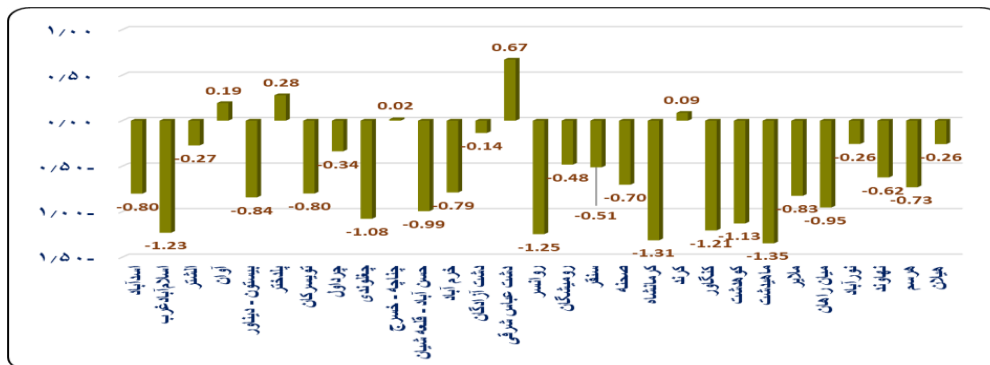
شکل ۱۶- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آبخیز کرخه در سال ۹۴-۱۳۹۳.



شکل ۱۷- مقایسه‌ی میانگین شاخص خشک‌سالی GRI و SDI در آب‌خیز کرخه در سال ۹۵-۱۳۹۴.



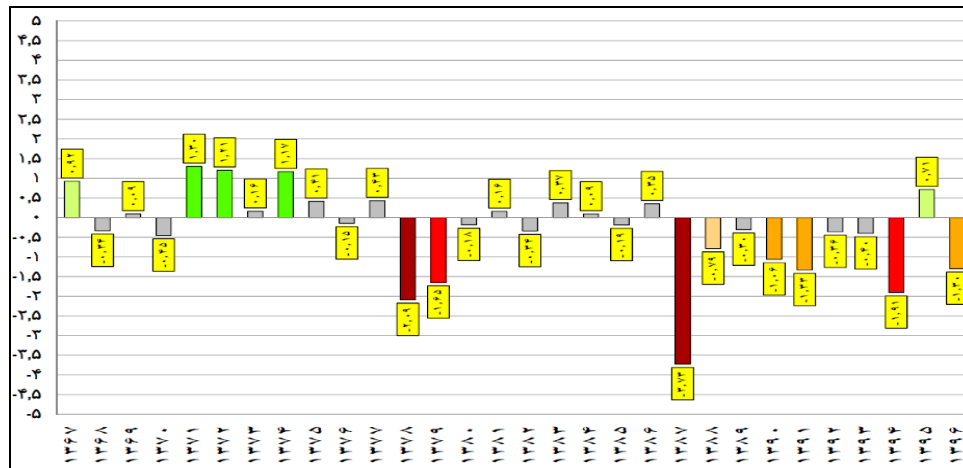
شکل ۱۸- مقایسه‌ی میانگین تغییر خشک‌سالی SDI (مطالعات جامع گردوغبار خوزستان ۲۰۱۹) و GRI نسبت به زمان (نمودار قرمز شاخص GRI و نمودار سبز شاخص SDI).



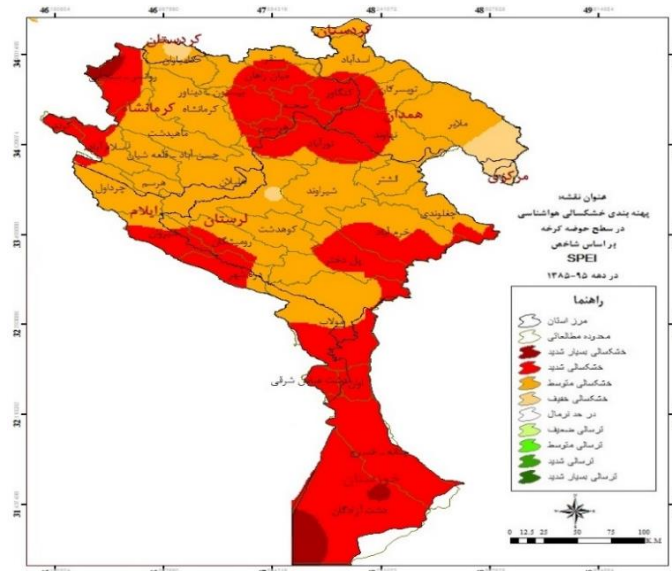
روند تغییر تراز و خشک‌سالی ذخیره‌های آب زیرزمینی در آبخیز کرخه

نتیجه‌ی نیکبخت و مرادی (۲۰۱۹) مطابقت دارد. خشک‌سالی اقلیمی پدیده‌ی پیش‌گیری‌ناپذیر است، بنابراین برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت صحیح منابع‌های آب زیرزمینی در منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

اگر چه گاهی وقوع خشک‌سالی اقلیمی و به تبع آن خشک‌سالی آب‌شناسی باعث افت تراز آب زیرزمینی در آبخیز شده است، نتیجه‌ها نشان می‌دهد که عامل‌های دیگری مانند برداشت بیش‌از حد از منابع‌های آب زیرزمینی مؤثرتر اند. این یافته با



شکل ۲۰- روند تغییر خشک‌سالی بر پایه‌ی شاخص خشک‌سالی SPEI در آبخیز کرخه.



شکل ۲۱- گستره‌ی خشک‌سالی با شاخص اقلیمی SPEI در دهه‌ی ۹۵-۱۳۸۵ در آبخیز کرخه.

جدول ۴- مقایسه‌ی مقدار شاخص خشک‌سالی‌های GRI، SPEI و SDI در آب‌خیز کرخه در یک دهه.

سال	SPEI	SDI	GRI
۱۳۸۵	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۲۷
۱۳۸۶	۰/۳۵	۱/۴۲	۰/۰۲
۱۳۸۷	۳/۷۳	-۲/۰۶	-۰/۵
۱۳۸۸	۰/۷۹	-۰/۶۶	-۰/۶۱
۱۳۸۹	۰/۳	-۱/۳۷	-۰/۵۲
۱۳۹۰	۱/۰۶	-۱/۷۲	-۰/۸
۱۳۹۱	۱/۳۳	-۱/۷۴	-۱/۰۳۱
۱۳۹۲	۰/۳۶	-۱/۴۷	-۱
۱۳۹۳	۰/۴	-۲/۳۳	-۱/۱۲
۱۳۹۴	۱/۹۱	-۰/۰۲	-۰/۹
۱۳۹۵	۰/۷۱	-۰/۵۱	-۰/۴۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش منابع‌های آب، نقشه‌ی هم‌تراز و شاخص‌های خشک‌سالی GRI و SDI و SPEI برای دشت‌های برگزیده محاسبه شد. نتیجه‌ی این بررسی با نتیجه‌ی یاسینی و همکاران (۲۰۱۲) در دشت تربت‌جام فریمان، سیف و همکاران (۲۰۱۲)، کاشفی (۲۰۰۸) در استان سمنان، سلیمانی ساردو و همکاران (۲۰۱۴) در آب‌خیز جازموریان، مفیدی پور و همکاران (۲۰۱۱) در آب‌خیز اترک و آذره، و حیدری و همکاران (۲۰۰۹) در شهرستان ارومیه مطابقت دارد. بیش‌ترین اندازه‌ی بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در سال آماری ۹۰-۱۳۸۹ بود. بیش‌ترین افت تراز آب زیرزمینی در پنج سال آخر دوره‌ی آماری دیده شد. محاسبه و بررسی شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی نشان می‌دهد که در این آب‌خیز خشک‌سالی آب‌شناسی رخ داده است، و شروع آن از سال ۱۳۸۸ به بعد، هم‌زمان با افزایش خشک‌سالی‌های اقلیمی با تاخیر زمانی یک‌ساله، از بخش‌های شمال غربی به بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه بود. شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی در دوره‌ی آماری ده ساله در آب‌خیز کرخه، در شرق، غرب و مرکز بیش‌تر بود. در بیش‌تر محدوده‌ها بین شاخص‌های SPEI، GRI و SDI هم‌بستگی بود. البته گاهی تأثیر خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی بر آب‌های زیرزمینی با تأخیر زمانی بود. این یافته ممکن است به علت شرایط زمین‌شناسی حوزه و کارستی بودن باشد. از این رو، آب قبل از رسیدن به خروجی حوزه در سفره‌های زیرزمینی نفوذ کرده است. نقشه‌های سالانه این تاخیر ۶ ماه تا یک ساله‌ی خشک‌سالی آب‌های سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد.

به هم‌ریختگی بین عرضه و تقاضای آب زیرزمینی و تشدید آن در شرایط تغییر اقلیم از مساله‌های مهم در مدیریت منابع‌های آب کشور است. این موضوع لزوم توجه به اثرهای تغییر اقلیم بر منابع‌های آب تجدیدپذیر و مصرف آب را آشکار می‌کند. بنابراین با دانستن فاصله‌ی زمانی بین خشک‌سالی آب‌شناسی و آب زیرزمینی می‌توان قبل از این که خشک‌سالی‌های هواشناسی، و در ادامه‌ی آن خشک‌سالی منابع‌های آب سطحی بر افت تراز آب زیرزمینی تأثیرگذار شود، اقدام‌های لازم برای جلوگیری از پیدا شدن اثرهای بد بر منابع‌های آبی انجام شود. با دانستن این فاصله‌ی زمانی به مدیران و برنامه‌ریزان امکان داده می‌شود که بدانند چه زمانی تا بروز خشک‌سالی آب زیرزمینی، و در نهایت کاهش منابع‌های آب زیرزمینی دارند. هم‌اکنون برای جبران کردن کسری آب در مصرف رو به رشد کشاورزی از سهم دشت‌های ممنوع کشور برداشت می‌کنیم. از آن‌جا که ۸۹٪ از آب برداشته از منابع‌های زیرزمینی در کشاورزی مصرف می‌شود، برای نجات دشت‌ها، باید مصرف آب کشاورزی را مهار کرد. بنابراین کنش‌های موثری مانند طرح‌های آب‌خیزداری، تغییر الگوی کشت در منطقه‌های کم‌آب، گسترده کردن کشت دیم، رعایت کردن الگوی مصرف خانواده‌ها، آموزش بهینه‌سازی مصرف آب در مدرسه‌ها، و بهره‌گیری از ظرفیت رسانه‌ها پیشنهاد می‌شود. مدیریت یکپارچه‌ی بهره‌برداری، و تحقیق در زمینه‌ی کارآیی انتقال در این بخش نیز ضروری است. به طور کلی، مهم‌ترین راه‌کار در این آب‌خیز کاهش دادن مصرف، متوازن با توانمندی‌های منابع‌های آبی است.

- Bazrafshan J, Khalili A. 2013. Spatial analysis of meteorological drought in Iran from 1965 to 2003. *Desert*. 18(1): 63–71.
- Brocque A, Kath J, Smith K. 2018. Chronic groundwater decline: A multi-decadal analysis of groundwater trends under extreme climate cycles. 561: 976–986.
- Chen Z, Grasby S, Osadetz KG. 2004. Relation between climate variability and groundwater level in the upper carbonate aquifer, south Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*. 290: 62–43.
- Eskandari Damaneh H, Zehtabian Gh, Khosravi R, Azareh H. 2016. A. Investigation and analysis of temporal and spatial relationship between meteorological and hydrological drought in Tehran Province. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 24(96): 113–120. (In Persian).
- Easterling DR, Karl TR, Mason EH, Hughes PY, Bowman DP. 1996. United states historical climatology network (U.S. HCN) monthly temperature and precipitation data. ORNL/CDIAC-87, NDP-019/R3, Carbon Dioxide information analysis center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 280 p.
- Fernandez B, Salas JD. 1999a. Return period and risk of hydrologic events. I: Mathematical formulation. *ASCE J. Hydrol. Eng.*, 4(4): 297–307.
- Halder S, Roy MB, Roy PK. 2020. Analysis of groundwater level trend and groundwater drought using Standard Groundwater Level Index: A case study of an eastern river basin of West Bengal, India. *SN Appl. Sci.* 2(507).
- Hellwig J, de Graaf IEM, Weiler M, Stahl K. 2020. Large scale assessment of delayed groundwater responses to drought. *Water Resource*. 56(2): 1–28.
- Heydari M, Farrokhi E, Tanian S, Hesari B. 2009. Analysis of meteorological and hydrological drought by the use of DIP software Areas to be studied: Urmia and Khoy. Fifth National Conference on Iran Watershed Management Science and Engineering. 114 p. (In Persian).
- Hu Q Wilson G D. 2000. Effect of temperature anomalies on the Palmer drought severity index in the central United States, *International Journal of Climatology*, 20(1): 1899-1911.
- Hydrological Studies of Jarahi Watershed. 2019. Comprehensive Dust Study of Khuzeestan, Research Institute of Forests and Rangelands. 220 p. (In Persian).
- Karimi V, Kamkar-Haghighi A, Sepaskhah A, khalili D. 2005. An evaluation of meteorological drought in Fars Province. *Journal of Water and Soil Science*, 5(4):1–11. (In Persian).
- Kashefi M. 2008. Zoning and drought risk management in Semnan Province. MSc thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 167 p. (In Persian).
- Khosravi Dehkordi A, Mirabbasi R, Samadi Boroujeni H, Ghasemi Dashtgerdi AR. 2019. Monitoring and forecasting of groundwater drought in Shahrekord Plain using groundwater resource index (GRI) and Markov chain model. *Hydrogeology*, 4(1): 111–125. (In Persian).
- Liu L, Hong Y, Bednarczyk CN, Yong B, Shafer MA, Riley R. 2012. Hydro climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in Blue River Basin Oklahoma. *Water Resources Management*, 26(10): 2761–2779.
- Mair A, Fares A. 2010. Influence of groundwater pumping and rainfall spatio-temporal variation of stream flow. *Journal of Hydrology*. 393(3–

- 4):287-308.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conference On Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteorological Society, 179-184.
- Mendicino GA, Senatore P, Versace A. 2008. A groundwater resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology Journal*. 357(3-4): 282-302.
- Ministry of Energy, Jamab Consulting Engineers Co. 1991. Comprehensive water plan of the country groundwater resources of Karkheh Catchment Area. 419 p.
- Mirakbari M, Mortezaei G, Mohseni M. 2018. Investigation of effect meteorological drought on surface and ground water resources by Indices SPI, SPEI, SDI and GRI. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 12(42):70-80. (In Persian).
- Mofidipoor N, Brady Sheikh V, Ownegh M, Sydalayn A. 2011. The analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak. *Watershed Jwmr*. 3(5): 16-26. (In Persian).
- Mohamadi S, Salajegheh A, Mahdavi M, Bagheri R. 2012. An investigation on spatial and temporal variations of groundwater level in Kerman Plain using suitable geostatistical method (During a 10-year period). *Iranian journal of Range and Desert Reseach*. 19(1): 61-70. (In Persian).
- Nayak P, Satyaji R, Sudheer KP. 2006. Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resources Management*, 2: (1): 77-99.
- Nikbakht J, Moradi I. 2019. Effect of drought on Hashtgerd Plain groundwater quantity and quality considering irrigation use. *Iran-Water Resources Research* 14(4):120-131. (In Persian).
- Piri H, Ansari H. 2013. Study of drought in Sistan Plain and its impact on Hamoun International Wetland. *Wetland Ecobiology*. 5 (1): 63-74. (In Persian).
- Quiring SM. 2009. Monitoring drought: An evaluation of meteorological drought indices. *Texas A&M University. Geography Compass*, 3 (1): 64-88. 10.1111/j.1749-8198.2008.00207.x
- Richard RH. 2002. A review of twentieth century drought Indices used in the United States. *American Meteorological Society*, pp. 1149-1165.
- Seif M, Mohammadzade H, Mosaedi A. 2012. Assess the impact of drought on groundwater resources in Fasa aquifer using standardized precipitation index, A measure of electrical conductivity of groundwater resources. *Journal of Water Resources*, 5(1): 45-59.
- Soleimani Sardoo F, Bahremand A. 2014. Hydrological drought analysis using SDI index in Halilrud Basin of Iran. *Journal of Environmental Resources Research*. 2(1): 47-56.
- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38(1):55-94.
- Van Loon AF. 2013. On the propagation of drought, Ph.D. Dissertation. Wageningen University 210 p.
- Vicente-Serrano SM, Beguer'ia S, López-Moreno JI. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 23(7):1696-1718.
- Yasamani S, Mohammadzadeh H, Mosaedi A. 2012. Effect of drought on groundwater levels in Torbatjam Plain using indices SPI and GRI. 6th Congress of Geological Society of Iran. Shiraz: Shiraz University, pp. 120-141 (In Persian).
- Zareii H, Kalantari N, Nadri A. 2017. Climate changes effects on quantity and quality condi-

- tions of the bibitalkhone Karstic Spring, Lali Khuzeṣtan. Hydrogeology. 2(2): 1–16. (In Persian).
- Zhang L, Jiaoa W, Zhanga H, Huanga C, Tonga Q. 2017. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. Remote Sensing of Environment. 190(2): 96–106.
- zynali B, Asghari Saraskanroud S, Saffarian Zangir V. 2017. Monitoring and forecast of drought in Urmia Lake Basin by SEPI Index and AN-FIS Model. Journal Spatial analysis of environmental hazards. 4 (1): 73–96. (In Persian).



Watershed Management Research

VOL. 34, No. 3, Ser. No: 132, Autumn 2021, pp. 53 -73
DOI: 10.22092/wmej.2021.343333.1352

Research Paper



The Trend of Groundwater Variations and Drought in the Karkheh Watershed

Samira Zandifar

(Corresponding Author)* Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Fatemeh Dargahian

Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Elham Fijani

Assistant Professor of Hydrogeology, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Maryam Naeimi

Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

*Corresponding Authors Email: samira.zandifar@gmail.com

Received: 28 June 2020

Accepted: 20 December 2020

Abstract

Water resources management is essential in countries, such as Iran, with arid and semi-arid climates due to global climate change and population growth. Knowledge of hydrogeological droughts and effective factors on groundwater drawdown is essential in providing management solutions for these vital resources. Therefore, the purpose of this study was to analyze the trend of groundwater variations and assessment of groundwater shortage in the Karkheh Watershed using the SPEI, SDI and GRI drought indices in an eleven-year statistical period (2006-2017). The results indicated that in most of the study areas, there was a correlation between the SPEI and SDI indices. The mean values of the GRI index in the study area of Karkheh watershed area show weak drought for the Sanghar, Nahavand, Sahneh, Hersam, Khorramabad, Tuysarkan, Asadabad, Malayer, Bis-ton-Dinavar, Mian Rahan and Hassanabad-Qala-e-Shian areas. A more severe drought with the drought indices of -1.08, -1.13, -1.21, -1.23, -1.25, -1.31 and -1.35 was determined for Chaghlou, Kuhdasht, Kangavar, Islamabad Gharb, Ravansar-Sanjabi, Kermanshah and Mahidasht respectively. These indicate a decrease in the water level elevation and an increase in the depth to the groundwater in these areas. The GRI drought index is more visible during the ten-year statistical period in the east, west and center of the Karkheh Catchment Area; while in the last years of this period, the central areas of the catchment had been affected by more severe droughts, which may be confirmed by the SPI zoning map. Although in most cases climatic drought, and consequently hydrological drought had caused the depletion of groundwater level in the basin, the results of comparison between the two types of drought indicated the effectiveness of other factors such as exploitation of the groundwater resources. Therefore, it is necessary to establish an integrated management for the sustainability of groundwater resources, especially in the agricultural sector, as well as reforming the management of traditional groundwater abstraction systems, before meteorological droughts and subsequent surface water shortages affect groundwater levels.

Keywords: GRI drought index, groundwater drawdown, Karkheh Watershed, SDI drought index