

اثر خشکسالی بر کیفیت آب‌های سطحی حوضه هلیل رود، کرمان

زهرا شاه‌رخی ساردو^۱، محمد زارع^۱، سیدعلی محمد میرمحمدی میبدی^{۲*}

محمدحسن رحیمیان^۳ و فهیمه عربی علی‌آباد^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲)

چکیده

خشکسالی‌ها از پدیده‌های آب‌وهوایی هستند که می‌توانند موجب کاهش کیفیت آب سطحی در سطح حوضه‌های آبریز شوند. درک اثرات پیچیده خشکسالی می‌تواند مدیران منابع آب را در پایش تغییرات صورت گرفته در حوضه آبریز و گرفتن تصمیم درست در تهیه برنامه مدیریت حوضه کمک کند. در این مطالعه از داده‌های بارش سالانه هفت ایستگاه سینوپتیک هواشناسی در حوضه هلیل رود در یک دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۷۳-۱۳۹۲) به منظور محاسبه شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص خشکسالی احيایی (RDI) استفاده شد و سال‌های خشک (۱/۳۵- تا ۱/۷۵-) و تر (۱/۷ تا ۲/۴۵) بر اساس مطالعات شبیه‌سازی تعیین شد. چندین شاخص مختلف مبتنی بر داده‌های اقلیمی و سنجش از دور رصد و از آنها برای ارزیابی خشکسالی بر کیفیت آب‌های سطحی استفاده شد. اثر خشکسالی روی پارامترهای کیفی آب طی دوره آماری بررسی شد. نتایج نشان داد بین بیشتر پارامترهای کیفی آب (یون کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، سولفات، سدیم، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و نسبت جذب سدیم) و رخداد پدیده خشکسالی رابطه معنی‌داری در سطح اطمینان پنج درصد وجود دارد. با این حال بین مقدار pH با خشکسالی در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها رابطه معنی‌داری پیدا نشد. نتایج این مطالعات نشان داد که می‌توان با تمرکز روی شاخص‌های خشکسالی به‌عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آب سطحی در شرایط خشکسالی و بهبود آن استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود با تقسیم حوضه هلیل رود به چند منطقه همگن، تأثیر خشکسالی روی کیفیت آب به‌صورت منطقه‌ای بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، آنیون‌ها و کاتیون‌ها، مناطق خشک، جیرفت

۱. گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. گروه آبیاری و زهکشی، مرکز ملی تحقیقات شوری یزد

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: maibody@cc.iut.ac.ir

مقدمه

بیش از ۹۰ درصد از آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. امروزه مقدار منابع موجود آب و میزان تقاضا در حالت توازن قرار ندارد و سه عامل مشکلات ساختاری حاکم بر این بخش، روند رو به رشد جمعیت و نیاز بیشتر به مصرف آب باعث تشدید به هم خوردن این توازن و ایجاد اختلاف شدید بین این دو پارامتر شده است (۱۲). تغییرات آب‌وهوایی، کاهش بارندگی‌ها و دخالت ناصحیح بشر در اجرای برنامه‌های توسعه‌ای موجب شده است تا در مناطق خشک، خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت به وقوع پیوندد و باعث کاهش کمیت و کیفیت آب‌های سطحی این مناطق شود، به گونه‌ای که به دلیل عدم دسترسی به آب با کیفیت مناسب، بسیاری از فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری با چالش اساسی مواجه شده است (۲ و ۷). بنابراین ضرورت دارد آثار خشکسالی در یک منطقه خاص بر کیفیت منابع آب و تغییرات آن بررسی شود تا مهندسان و دانشمندان بتوانند به‌درستی برای سال‌های پیش رو برنامه‌ریزی کنند (۱۱).

تأثیر منفی خشکسالی بر کمیت و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن (کیفیت آب) به‌خوبی مطالعه شده است (۲۵). بررسی مؤلفه‌های مرتبط با کیفیت آب رودخانه راین نشان داد چهار مؤلفه شامل متغیرهای عمومی (دمای آب، اکسیژن محلول و کلروفیل)، یون‌های اصلی (کلرید، سدیم، سولفات، فلوراید و برمید)، مواد مغذی و فلزات سنگین تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته و موجب کاهش معنی‌داری در کیفیت آب بالاخص دمای آب و یون‌های اصلی و فلزات سنگین درون آن شده است (۲۷). هردینکا و همکاران (۶) نیز با بررسی تأثیر سیل و خشکسالی بر کیفیت آب رودخانه‌های لوزنیس و اسکالیس نشان دادند که در مقایسه با شرایط مرجع، وقوع هر دو رخداد موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در کیفیت آب می‌شود.

شریفان و حسنعلی‌زاده (۱۷)، با استفاده از شاخص میانگین متحرک سه و پنج‌ساله خشکسالی‌های استان گلستان و کیفیت منابع آب متأثر از خشکسالی این استان را مطالعه و دریافتند که بیشترین تغییرات در غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها در ایستگاه آق‌قلا قابل مشاهده است و عناصر و ترکیب‌های مختلف

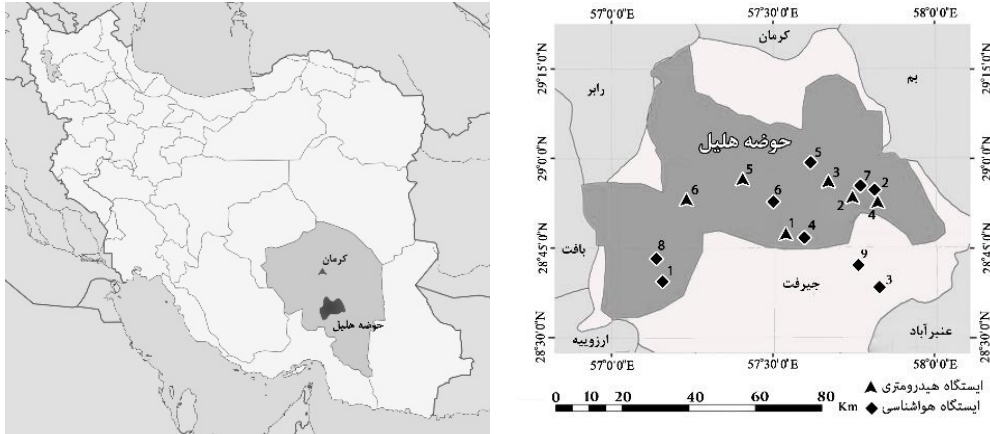
موجود در آب بر کیفیت شیمیایی و فیزیکی آب اثر دارد. مددی‌نیا و همکاران (۸)، وضعیت کیفی آب رودخانه کارون را با استفاده از شاخص کیفی آب بررسی کردند. با وجود پایین بودن شاخص کیفیت آب رودخانه در تمام مسیر، در ایستگاه آخر به‌دلیل ورود مجموع پساب‌های شهری، کمترین شاخص کیفی ثبت شد. همچنین مطالعه فصلی کیفیت آب این رودخانه نشان داد که در فصل پاییز به‌علت شروع بارندگی و کاهش آلاینده‌ها بهترین وضعیت و در فصل بهار لیل کاهش بارندگی، وجود دمای مناسب برای رشد کلی‌فرم‌ها و نیز افزایش کدورت بدترین وضعیت را داشته است. محمودی و همکاران (۹)، با بررسی خشکسالی و تأثیر آن بر کیفیت آب سطحی در استان سیستان و بلوچستان نشان دادند خشکسالی باعث کاهش دبی پایه رودخانه، افزایش متغیرهای دما، نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی آب شده است. تأثیر منفی خشکسالی بر کمیت آب در مطالعه بررسی میزان دبی و شاخص‌های بارندگی رودخانه هلیل‌رود به‌خوبی مطالعه شده است (۱۵) و رابطه مستقیم تغییر شاخص بارندگی با تغییر دبی رودخانه مشاهده کردند.

این مطالعه با هدف شناسایی و پایش کیفیت آب در مناطق مختلف رودخانه هلیل‌رود و بررسی تأثیر خشکسالی بر کیفیت آب این رودخانه و آگاهی از روند تغییرات کیفیت منابع آب سطحی این حوضه و محدودیت‌های کمی و کیفی آن به‌منظور پیش‌بینی پیامدهای خشکسالی‌های بعدی بر کیفیت آب این حوضه و مدیریت درست تقاضا انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

رودخانه هلیل‌رود از رودخانه‌های مهم استان کرمان از کوه‌های بندر در امتداد کوه‌های زاگرس مرکزی و از شمال غربی شهرستان بافت سرچشمه گرفته و در مسیری به طول ۴۰۰ کیلومتر در شهرستان جیرفت جریان دارد. حوضه هلیل‌رود در محدوده ۲۷° ۳۳' تا ۲۹° ۶۰' عرض شمالی و ۱۴° ۵۶' تا ۵۸° ۵۰' طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). در محدوده



شکل ۱. موقعیت حوضه هلیل‌رود در ایران، استان کرمان و شهرستان جیرفت و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد پژوهش

نام ایستگاه	نام رود	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱ حسین‌آباد	هلیل	۹۲۷	۵۷-۳۲-۵۵	۲۸-۴۷-۱۱
۲ دهرود	شور	۱۰۲۰	۵۷-۴۵-۰۶	۲۸-۵۱-۴۹
۳ کلدان	دلفارد	۱۴۳۳	۵۷-۴۰-۴۵	۲۸-۵۵-۵۶
۴ زارین	سقدر	۱۳۳۶	۵۷-۴۷-۳۳	۲۸-۵۴-۳۲
۵ قلعه ریگی	رمون	۱۳۸۰	۵۷-۲۴-۴۷	۲۸-۵۵-۵۹
۶ کنارویییه	هلیل	۱۴۱۰	۵۷-۱۴-۴۲	۲۸-۵۲-۴۴

جدول ۲. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱ فتح‌آباد اسفندقه	۱۸۱۷	۵۷-۰۹-۱۲	۲۸-۳۹-۳۲
۲ زارین	۱۴۰۰	۵۷-۴۷-۳۲	۲۸-۵۴-۲۴
۴ حسین‌آباد صفرزاده	۹۲۰	۵۷-۳۵-۳۲	۲۸-۴۶-۵۶
۵ کراد دلفارد	۲۰۰۰	۵۷-۳۶-۵۷	۲۸-۵۹-۳۰
۶ نراب	۱۳۰۰	۵۷-۳۰	۲۸-۵۳
۷ دهرود	۱۰۰۰	۵۷-۴۴-۵۹	۲۸-۵۱-۵۷
۸ دولت‌آباد	۱۸۰۰	۵۷-۰۸-۳۲	۲۸-۴۳-۱۱

داده‌های مورد استفاده

شش ایستگاه حوضه هلیل‌رود انتخاب و داده‌های کیفی چهار متغیر هدایت الکتریکی (Ec) بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر، مقدار pH، کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم)، آنیون‌ها (سولفات،

این حوضه که بخشی از حوضه غربی جازموریان است که در آن چندین ایستگاه هیدرومتری فعال است. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ و موقعیت آنها در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma_i} \quad (1)$$

که در آن: σ_i انحراف معیار داده‌های i مین ایستگاه، P_i مقادیر بارندگی برای i مین ایستگاه و \bar{P} متوسط بارندگی ایستگاه i ام هستند.

اساس این نمایه برازش استاندارد بر محاسبات احتمالات وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار است. این نمایه فقط از داده‌های بارندگی ماهانه استفاده می‌کند و برای تشخیص کمبود مقدار بارندگی در مقیاس زمان‌های چندگانه (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه) طراحی شده است.

از این روش برای مطالعات خشکسالی مناطق مختلف جهان به‌طور گسترده استفاده شده است. برای مثال می‌توان به کارهای واسیلیادس و همکاران (۲۴) و مشرف و همکاران (۱۳) اشاره کرد.

نمایه خشکسالی RDI

بسیاری از پژوهشگران شاخص RDI را به‌عنوان یک شاخص مناسب برای برآورد خشکسالی معرفی کرده‌اند (۲۰ و ۲۳) که بر اساس داده‌های بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه و یا مجموع سالانه این دو پارامتر قابل محاسبه است (۱۳). برای این منظور ابتدا با استفاده از رابطه ۲ برای هر سال (i) از دوره آماری مورد مطالعه، مقداری با عنوان $a_o^{(i)}$ محاسبه می‌شود:

$$a_o^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} ETP_{ij}} \quad (2)$$

که در آن P و ETP به‌ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل در i امین ماه سال i است. مقدار i از یک تا n (تعداد سال‌هایی که آمار آن در دسترس است) تغییر می‌کند. چنانچه بارندگی و تبخیر و تعرق به‌صورت سالانه محاسبه شوند، نیازی به جمع‌کردن مقادیر ماهانه در این رابطه نخواهد بود. گام بعدی تعیین نمایه‌ای با عنوان RDI نرمال (یا RDI_n) هر سال است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

کلرات، بی‌کربنات و کربنات) برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر، نسبت جذب سدیم (SAR) و مقدار کل جامدات محلول در آب (TDS) برحسب میلی‌گرم بر لیتر این ایستگاه‌ها برای یک دوره آماری ۱۹ ساله (۱۳۹۲-۱۳۷۳)، از سازمان آب منطقه‌ای کرمان تهیه و در محاسبات و تحلیل‌ها استفاده شد. کلیه عملیات نمونه‌برداری و انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی در ایستگاه‌های فوق طبق دستورالعمل استاندارد نمونه‌برداری آب انجام شد (۲۱). همچنین از آمار هفت ایستگاه هواشناسی انتخابی در سطح حوضه استفاده شد.

روش پژوهش

پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات بارش از اداره هواشناسی شهرستان جیرفت، نرمال‌بودن داده‌ها با روش آماری کلموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov Smirnov Test, K-S) و با استفاده از نرم‌افزار SPSS در سطح اطمینان ۹۵ درصد آزمون شد. روند خشکسالی حوضه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های خشکسالی (Reconnaissance Drought Index) RDI و SPI (Standard Precipitation Index) بررسی و مقدار خشکسالی در هر سال تعیین و نقشه‌های پهنه‌بندی منطقه تهیه و نمودار مقایسه‌ای کیفیت پارامترهای مختلف آب (غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، کلراید، بی‌کربنات و سولفات و مقدار pH، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول در آب و نسبت جذب سدیم) در سال‌های مختلف ترسیم و نقشه توزیع یون‌ها در سال خشک و تر رسم شد. پس از آن رابطه شاخص خشکسالی و کیفیت آب در حوضه آبریز هلیل‌رود بررسی و نتایج به‌دست آمده تحلیل و تفسیر شد.

شاخص خشکسالی SPI

با اندازه‌گیری زمان وقوع خشکسالی میزان کاهش آب، در دو بعد مکانی و زمانی مشخص می‌شود (۵). بر این اساس مک‌کی و همکاران (۱۰) با محاسبه اختلاف بین مقادیر بارش و میانگین بارش در یک بازه زمانی مشخص و تقسیم آن (این مقدار) بر انحراف معیار بارش شاخص SPI را پیشنهاد کردند.

دهرود از بی‌کربناته به کلروره و آب حوضه ایستگاه قلعه‌ریگی از بی‌کربناته به سولفات‌ها شد. همین‌طور خشکسالی موجب تغییر تیپ آب سطحی ایستگاه دهرود از منزیک به سدیک و آب سطحی ایستگاه کلدان از منزیک به کلسیک شد.

تجزیه و تحلیل پارامترهای مختلف کیفی آب‌های سطحی حوضه مورد مطالعه در طی دوره خشکی بیانگر وقوع تغییرات قابل توجهی در کیفیت آب‌های سطحی آن شده است، به‌گونه‌ای که بر اساس نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین خشکسالی و تغییرات یون کلسیم در تمام ایستگاه‌ها رابطه معنی‌دار دیده شد و با افزایش SPI (ترسالی) غلظت کلسیم در تمامی ایستگاه‌ها کاهش یافت. شکل ۴ و ۵ نقشه پراکنش یون کلسیم بر اساس نتایج به دست آمده از اثر خشکسالی بر تغییرات غلظت یون کلسیم آب‌های سطحی حوضه مورد مطالعه در دو سال تر (۱۳۷۴) و خشک (۱۳۸۷) نشان داده شده است. در تمام ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه قلعه‌ریگی رابطه معنی‌دار (یک درصد) منفی بین خشکسالی و تغییرات یون کلسیم دیده شد. تجزیه داده‌ها نشان داد که خشکسالی موجب افزایش غلظت یون کلسیم در آب‌های سطحی منطقه شد.

نقشه‌های پراکنش یون منیزیم در رابطه با خشکسالی بیانگر افزایش غلظت یون منیزیم در آب‌های سطحی منطقه بود (شکل ۶ و ۷). همچنین بین خشکسالی و تغییرات یون منیزیم در ایستگاه قلعه‌ریگی در سطح یک درصد و در ایستگاه دهرود در سطح پنج درصد رابطه معنی‌دار بود. در سایر ایستگاه‌ها بین منیزیم و خشکسالی رابطه معنی‌داری مشاهده نشد. ولی ضریب همبستگی در تمام ایستگاه‌ها منفی بود و با افزایش SPI (ترسالی) غلظت منیزیم کاهش یافت.

بین خشکسالی و تغییرات یون سدیم در ایستگاه حسین‌آباد در سطح یک درصد و در ایستگاه‌های کلدان و کناروئیه در سطح پنج درصد رابطه معنی‌دار مشاهده نشد. در سایر ایستگاه‌ها بین سدیم و خشکسالی رابطه معنی‌داری مشاهده نشد، ولی ضریب همبستگی در تمام ایستگاه‌ها منفی بود، یعنی با افزایش SPI (ترسالی)، غلظت سدیم کاهش یافت (شکل ۸ و ۹). آب‌های

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_o^{(i)}}{\bar{a}_o} - 1 \quad (3)$$

که در آن \bar{a}_o : میانگین حسابی اعداد a_o هر سال است. برای محاسبه نمایه استاندارد شده RDI (یا RDIs) از مقادیر سالانه a_o لگاریتم گرفته می‌شود و عددی با عنوان y_i به دست خواهد آمد:

$$y_i = \text{Ln}(a_o^i) \quad (4)$$

سپس میانگین حسابی و انحراف معیار استاندارد این اعداد (به ترتیب \bar{y}_k و $\hat{\sigma}_{yk}$) محاسبه می‌شود. در نهایت نمایه استاندارد شده RDI در هر سال به کمک رابطه ۵ محاسبه خواهد شد و بر اساس جدول ۳ کلاس‌های مختلف خشکسالی تعیین شدند...

$$RDI_S^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_{yk}} \quad (5)$$

طبقه‌بندی آب آبیاری برای استفاده در اراضی کشاورزی

آزمایشگاه شوری خاک آمریکا آب آبیاری را برحسب شوری در چهار گروه با نمایه EC و از نظر نسبت جذبی سدیم (SAR) آن در چهار گروه با نمایه SAR دسته‌بندی کرده است (۱) (جدول ۴) و بر این اساس نمودار معروف ویلکاکس ارائه شده است.

نتایج و بحث

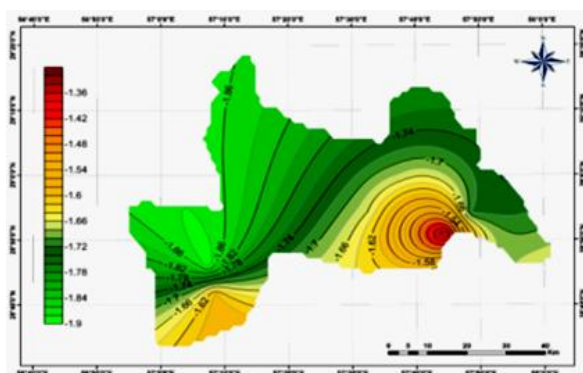
میزان کمبود بارندگی در مقیاس‌های زمانی مختلف برای حوضه مورد مطالعه بر اساس محاسبه شاخص SPI تعیین و نقشه‌های پهنه‌بندی هر سال جداگانه تهیه شد و برای نمونه نقشه پهنه‌بندی SPI حوضه برای دو سال ۱۳۷۴ و ۱۳۸۷ در شکل ۲ و ۳ ارائه شد. بر اساس شاخص SPI برای تمامی ایستگاه‌ها سال ۱۳۷۴ به‌عنوان ترسال‌ترین و سال ۱۳۸۷ به‌عنوان خشکسال‌ترین سال معرفی شد. مقادیر SPI این دو سال به تفکیک ایستگاه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. تداوم خشکسالی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۲ با شدت کم و زیاد، موجب تغییر تیپ آب سطحی ایستگاه حسین‌آباد از کلروره به سولفات‌ها، آب حوضه ایستگاه

جدول ۳. طبقه‌بندی نمایه‌های SPI و RDI و تعریف کلاس‌های خشکسالی متناظر با آن

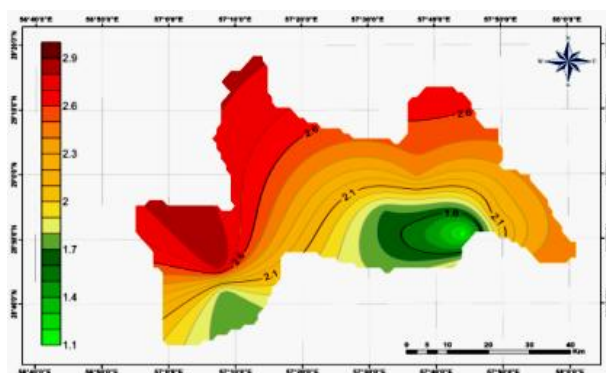
طبقه‌بندی خشکسالی	مقدار نمایه SPI و RDI
به شدت مرطوب	۲ و بیشتر از آن
خیلی مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
نسبتاً مرطوب	۱/۴۹ تا ۱/۰۰
متوسط (نرمال)	۰/۹۹ تا ۰/۹۹
نسبتاً خشک	-۱/۴۹ تا -۱/۰۰
خیلی خشک	-۱/۵۰ تا -۱/۹۹
به شدت خشک	-۲/۰۰ و کمتر از آن

جدول ۴. طبقه‌بندی آب آبیاری برحسب شوری و نسبت جذب سدیم در روش ویلکاکس

کیفیت آب برای کشاورزی	کلاس آب
شیرین - برای کشاورزی کاملاً بی‌ضرر	C1S1
کمی شور - مناسب برای کشاورزی	C2S1, C2S2
شور - قابل استفاده برای کشاورزی	C1S3, C2S3, C3S1, C3S2, C3S3
خیلی شور - برای کشاورزی نامناسب	C1S4, C2S4, C3S4, C4S4, C2S3, C4S2, C4S1



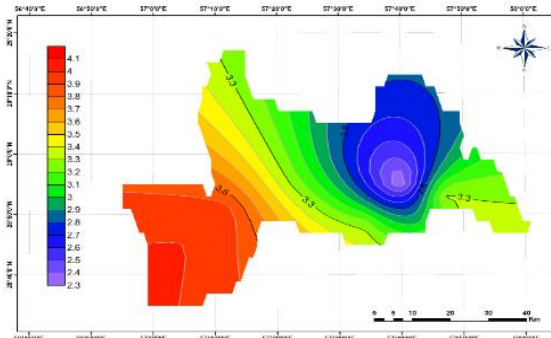
شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی SPI سال ۱۳۸۷



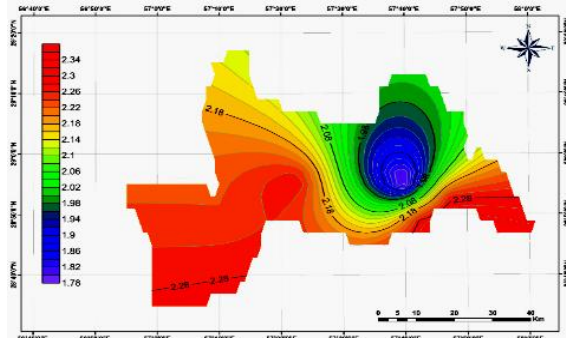
شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی SPI سال ۱۳۷۴

جدول ۵. مقادیر SPI ایستگاه‌های مختلف مورد مطالعه

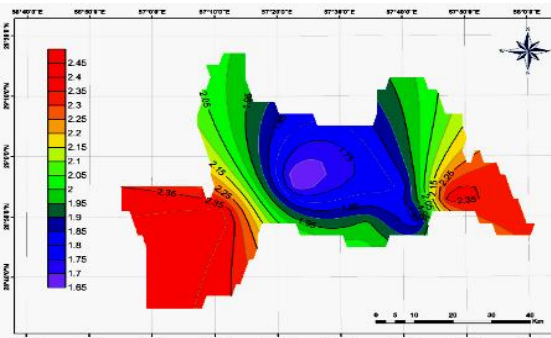
ایستگاه	فتح‌آباد اسفندقه	زارین	حسین‌آباد صفرزاده	کراد دلفاراد	نراب	دهرود	دولت‌آباد
سال ۷۴	۱/۷	۲/۱	۲/۴	۱/۶۵	۲/۴۵	۱/۷	۱/۱
سال ۷۸	-۱/۶	-۱/۷۵	-۱/۵	-۱/۶	-۱/۷	-۱/۷	-۱/۳۵



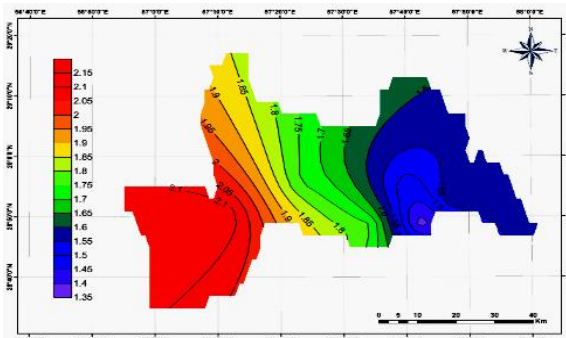
شکل ۵. توزیع کلسیم در حوضه هلیل‌رود در سال ۱۳۸۷



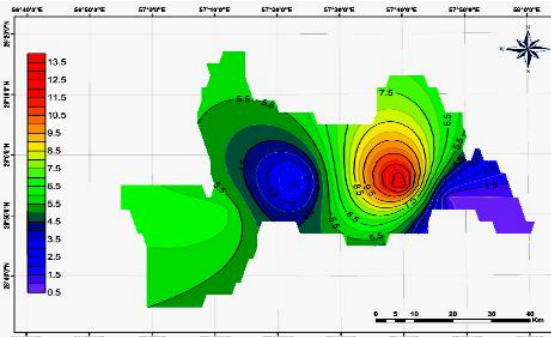
شکل ۴. توزیع کلسیم در حوضه هلیل‌رود در سال ۱۳۷۴



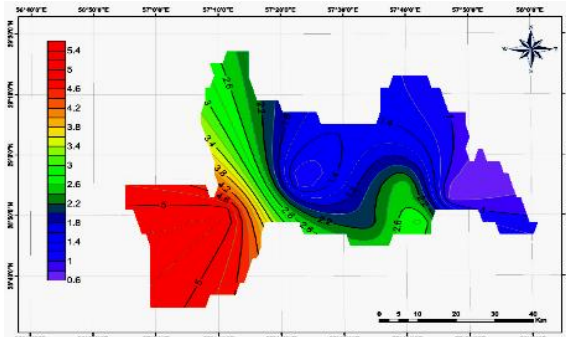
شکل ۷. توزیع منیزیم در حوضه هلیل‌رود در سال ۱۳۸۷



شکل ۶. توزیع منیزیم در حوضه هلیل‌رود در سال ۱۳۷۴



شکل ۹. توزیع سدیم در حوضه هلیل‌رود در سال ۱۳۸۷



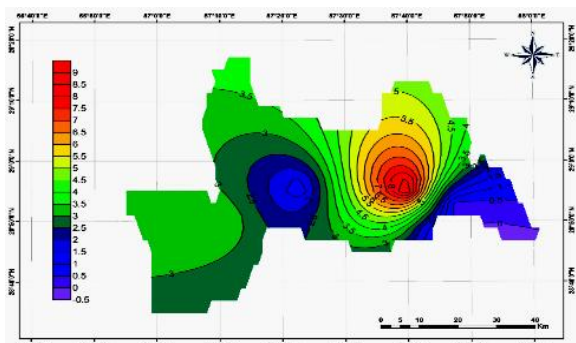
شکل ۸. توزیع سدیم در حوضه هلیل‌رود در سال ۱۳۷۴

(جدول ۶). در سایر ایستگاه‌ها بین کلرید و خشکسالی رابطه معنی‌داری مشاهده نشد.

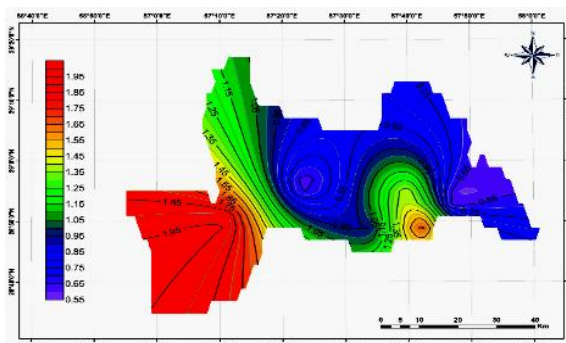
خشکسالی باعث افزایش غلظت یون بی‌کربنات در آب‌های سطحی منطقه شد (شکل ۱۲ و ۱۳). همچنین با افزایش SPI (ترسالی)، در تمامی ایستگاه‌ها، غلظت بی‌کربنات کاهش یافت. بین خشکسالی و تغییرات یون سولفات در تمام ایستگاه‌ها رابطه معنی‌دار وجود داشت. با توجه به منفی بودن ضریب همبستگی در تمام ایستگاه‌ها، افزایش SPI (ترسالی) موجب کاهش غلظت

سطحی با سدیم بالا موجب از بین رفتن خاک و کاهش نفوذپذیری آن می‌شود (۱) که با نتایج قبلی محمودی و همکاران مطابقت دارد (۹).

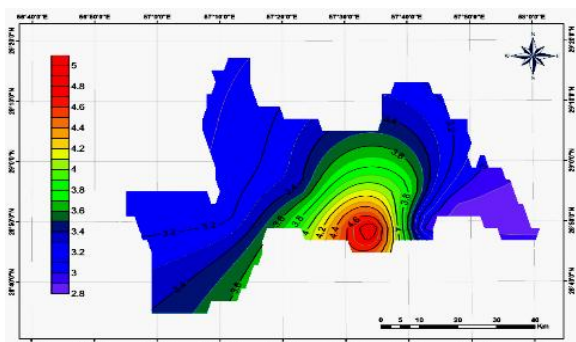
خشکسالی در ایستگاه‌های نظیر دهرود و قلعه‌ریگی باعث کاهش غلظت یون کلراید در آب‌های سطحی و در سایر ایستگاه‌ها باعث افزایش غلظت آن شد (شکل ۱۰ و ۱۱). بین خشکسالی و تغییرات یون کلراید در ایستگاه‌های حسین‌آباد، کلدان و زارین در سطح ۵ درصد رابطه معنی‌دار وجود داشت



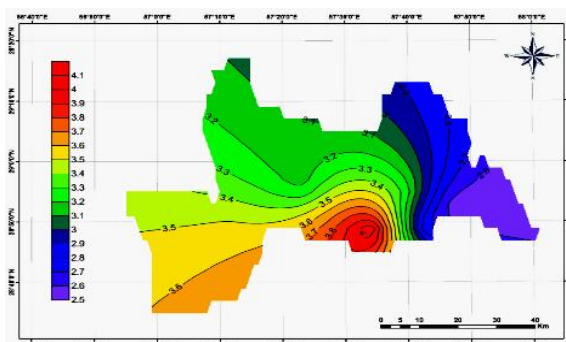
شکل ۱۱. توزیع کلراید در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



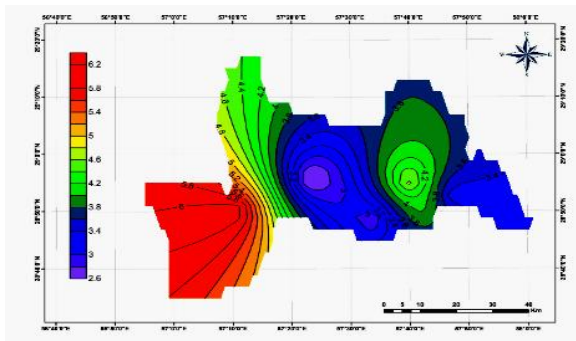
شکل ۱۰. توزیع کلراید در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴



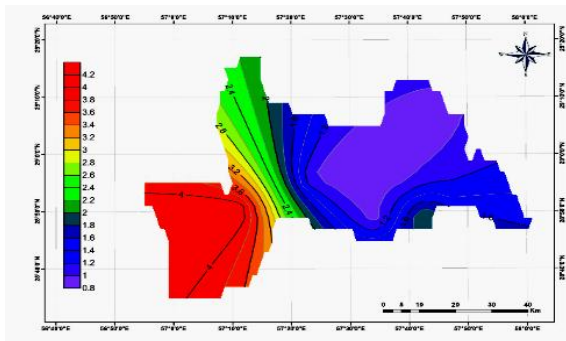
شکل ۱۳. توزیع بی کربنات در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



شکل ۱۲. توزیع بی کربنات در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴



شکل ۱۵. توزیع سولفات در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



شکل ۱۴. توزیع سولفات در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴

تحلیل داده‌های pH ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوضه مورد مطالعه نشان داد که دامنه تغییرات این متغیر در ایستگاه‌های مختلف بین $7/4$ تا $7/95$ متغیر بود. بیشترین مقدار pH ($7/95$) در سال خشک ۱۳۸۷ در ایستگاه دهرود ثبت شد و سایر ایستگاه‌ها دارای pH حداکثر $7/7$ بودند. دامنه تغییرات این متغیر در دو سال تر (۱۳۷۴) و خشک (۱۳۸۷) در ایستگاه کلدان (به ترتیب $7/4$ تا $7/73$) و در ایستگاه دهرود ($7/4$ تا $7/8$)

کلسیم شد (شکل ۱۴ و ۱۵). نتایج این آزمایش در تطابق با نتایج زولسمن و همکاران (۲۷) است که تأثیر منفی خشکسالی بر غلظت یون‌های اصلی موجود در آب مانند کلر، سدیم و سولفات را گزارش کردند. آنها همچنین گزارش کردند در صورتی که قبل از بروز خشکسالی کیفیت آب پایین باشد، آثار خشکسالی می‌تواند بر غلظت یون‌ها شدیدتر باشد که این مقایسه در این آزمایش انجام نشد.

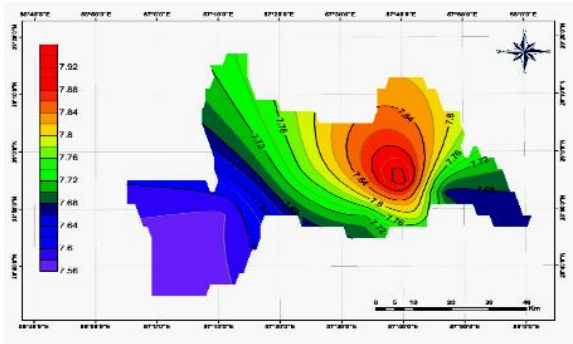
ایستگاه کناررویه در سال ۱۳۸۷ به ۲۶۰ مترمکعب کاهش یافت. در سال خشک (۱۳۸۷) مقدار متغیر SAR به حداکثر مقدار خود رسید و از ۰/۷۷ (ایستگاه کلدان) تا ۵/۳۳ (حسین‌آباد) متغیر بود. در سال تر (۱۳۷۴) این پارامتر به دلیل افزایش دبی، روند کاهشی داشت (شکل‌های ۲۳ و ۲۴) و با وقوع ترسالی‌ها کیفیت آب بهبود یافت (کاهش SAR با افزایش شاخص SPI). بین خشکسالی و تغییرات SAR در تمام ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه قلعه‌ریگی رابطه معنی‌دار وجود داشت که بیانگر تأثیر خشکسالی بر کیفیت آب آبیاری در حوضه هلیل‌رود بود. بر اساس این نتایج می‌توان آب حوضه را در طبقه C۲S۱ و رده کیفی کمی شور دسته‌بندی کرد. محتوای بالای SAR سبب قلیایی شدن خاک (۱) می‌شود. مقایسه نتایج بررسی پارامترهای مرتبط با کیفیت آب حوضه هلیل‌رود شامل شوری، اسیدیته و سنجش آنیون‌ها و کاتیون‌های محلول در آب با یافته‌های هانگ و همکاران (۷) مطابقت دارد. آنها کمبود بارندگی طی دوره خشکسالی را موجب به‌هم‌زدن تعادل آب سطحی دانسته و تداوم این پدیده را عامل پایین‌آمدن سطح آب و کم شدن مساحت رودخانه و افزایش غلظت عناصر محلول در آب (نیترژن و فسفر و ...) عنوان کردند. تفاوت نتایج به‌دست آمده از ایستگاه‌های مختلف بالاخص در پایین‌دست رودخانه در مقایسه با بالادست ممکن است ناشی از تأثیر عوامل مؤثر دیگر (غیر از خشکسالی) بر کیفیت آب باشد. در سال‌های مواجهه حوضه با خشکسالی، کاهش سطح آب رودخانه موجب افزایش غلظت یون‌های محلول در آب شد که این افزایش غلظت به مراتب بیشتر از میزان کاهش آب افزایش یافت که این یافته در همه ایستگاه‌ها مشترک بود. این الگو در تطابق با نتایج مردوخ (۱۴) در مطالعات خود در آمریکای شمالی و نصرتی (۱۶) در مطالعات اثر خشکسالی هیدرولوژیکی بر کیفیت آب رودخانه‌های استان مازندران بود که آنها دلیل این پدیده را مرتبط با تبخیر آب از رودخانه و میزان آب‌های سطحی در حال جریان و تفاوت در تماس این آب‌ها با خاک در مسیر ورودی و خروجی رودخانه گزارش کردند.

بود که از نوسان کمی برخوردار بودند (شکل ۱۶ و ۱۷). بر اساس شکل‌های مذکور، خشکسالی در بیشتر ایستگاه‌ها باعث کاهش pH آب‌های سطحی شده است. بین خشکسالی و تغییرات pH در هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه رابطه معنی‌دار دیده نشد. روند افزایش pH مؤید قلیایی شدن آب است. این یافته در تأیید نتایج روند تغییرات pH و در تطابق با نتایج بسیاری از پژوهشگران است (۹).

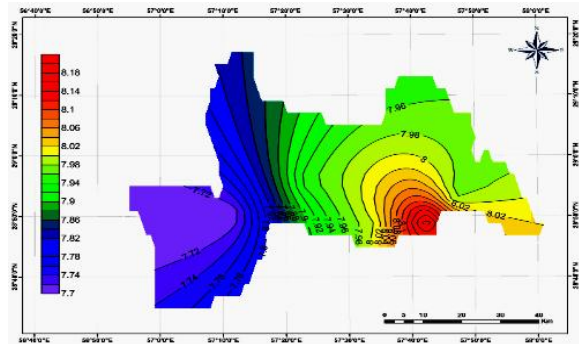
با افزایش SPI (ترسالی)، در تمامی ایستگاه‌ها، EC کاهش و کیفیت آب بهبود یافت (برای مثال سال ۱۳۷۴). در تمامی ایستگاه‌ها خشکسالی باعث افزایش غلظت EC در آب‌های سطحی منطقه شد و با افزایش این پدیده (طی سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۷۹) کیفیت آب کاهش یافت و EC به حداکثر مقدار خود رسید. بین خشکسالی و تغییرات EC در تمام ایستگاه‌ها رابطه معنی‌دار دیده شد. در شرایط خشکسالی دامنه تغییرات EC به‌طور میانگین در ایستگاه‌های مورد مطالعه از ۶۱۰ (ایستگاه قلعه‌ریگی) تا ۱۷۵۰ (ایستگاه دهرود) متغیر بود (شکل ۱۸ و ۱۹).

بررسی داده‌های کیفیت آب ایستگاه‌های انتخابی نشان داد که در طول دوره ۲۰ساله آماری و در تمامی ایستگاه‌ها با افزایش خشکسالی (برای مثال، سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۷۹)، کیفیت آب کاهش یافت و مقدار متغیر TDS به بیشترین مقدار خود رسید. برای مثال مقدار این متغیر در ایستگاه دهرود ۱۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شد که نسبت به وضعیت قبلی آن بیش از ۳/۵ برابر شده بود. با وقوع ترسالی‌ها (۱۳۷۴) کیفیت آب بهبود یافت و مقدار TDS کاهش پیدا کرد (برای مثال ایستگاه قلعه‌ریگی با ۲۳۰). نقشه پراکنش TDS در دو سال تر (۱۳۷۴) و خشک (۱۳۸۷) در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول ۶، بین خشکسالی و تغییرات TDS در تمام ایستگاه‌ها رابطه معنی‌دار در سطح یک درصد دیده شد.

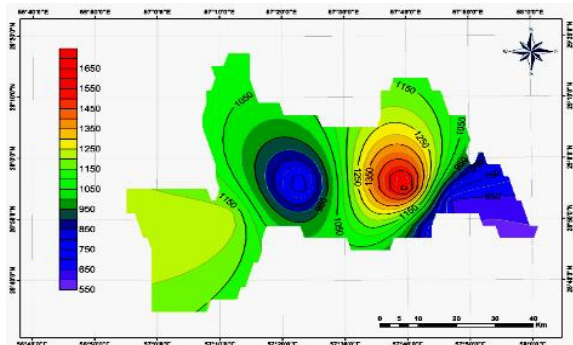
تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که نسبت سدیم قابل جذب (SAR) در طول دوره ۲۰ساله آماری و در تمامی ایستگاه‌ها با افزایش خشکسالی افزایش یافت و در نتیجه باعث کاهش کیفیت آب شد. برای مثال دبی رودخانه هلیل در



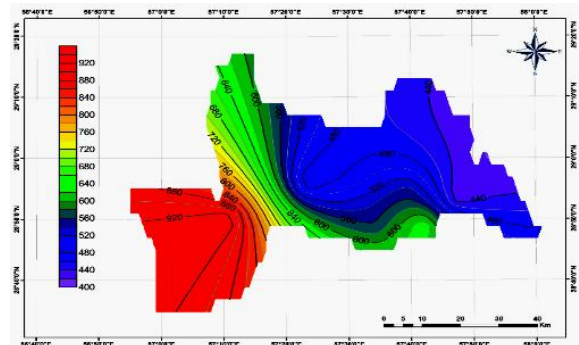
شکل ۱۷. توزیع pH در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



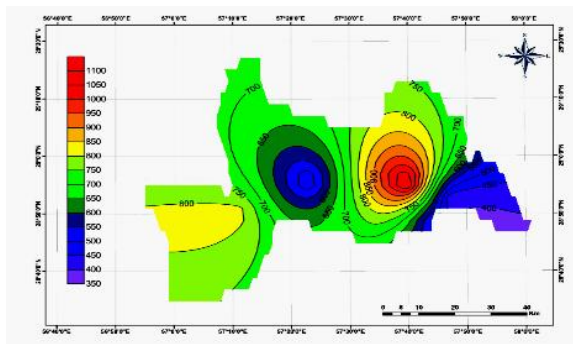
شکل ۱۶. توزیع pH در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴



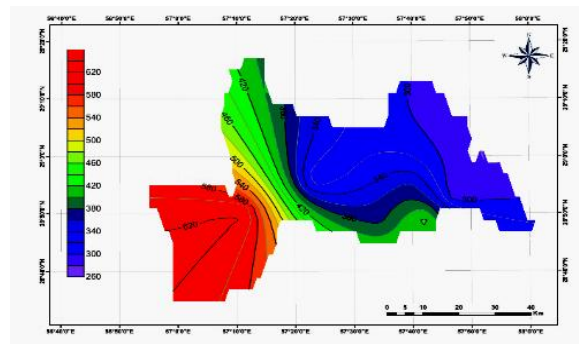
شکل ۱۹. توزیع EC در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



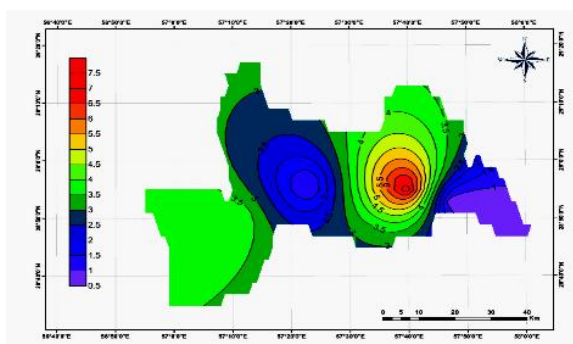
شکل ۱۸. توزیع EC در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴



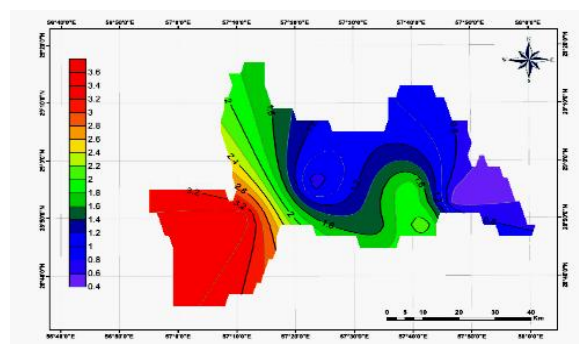
شکل ۲۱. توزیع TDS در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



شکل ۲۰. توزیع TDS در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴



شکل ۲۳. توزیع SAR در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۸۷



شکل ۲۲. توزیع SAR در حوضه هلیلرود در سال ۱۳۷۴

جدول ۶. نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین خشکسالی و یون کلسیم، منیزیم، کلراید، بی‌کربنات، سولفات، pH، EC، SAR و TDS

متغیر	زارین		حسین‌آباد		دهرود		قلعه‌ریگی		کلدان		کناروئیه	
	sig	r	sig	r	sig	r	sig	r	sig	r	sig	r
کلسیم	۰/۰۴	-۰/۶	۰/۷۲	۰/۰	۰/۰۵	-۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۰۴	۰/۶۰	۰/۰۵	۰/۶۱	۰/۰۴
منیزیم	۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۴۳	۰/۰۶	۰/۰۲	-۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۱۱
سدیم	۰/۰۸	-۰/۴	۰/۶۱	۰/۰۴	۰/۰۷	-۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۰۹	۰/۵۰	۰/۰۲	۰/۴۹	۰/۰۳
کلراید	۰/۰۳	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۸۶	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۵۱
بی‌کربنات	۰/۰۹	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۱۷	۰/۰۶	-۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۰۹	۰/۴۸	۰/۰۳	۰/۴۷	۰/۰۳
سولفات	۰/۰۱	۰/۵۱	۰/۶۵	۰/۰۲	۰/۰۳	-۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۰۶	۰/۵۷	۰/۰۸	۰/۵۷	۰/۰۹
pH	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۰۹	+۰/۳۹	۰/۳۰	۰/۱۹	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۱۲
EC	۰/۰۲	۰/۵۱	۰/۶۳	۰/۰۳	۰/۰۲	-۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۰۶	۰/۵۹	۰/۰۶	۰/۵۰	۰/۰۲
TDS	۰/۰۱	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۰۲	۰/۰۶	-۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۰۱	۰/۵۸	۰/۰۸	۰/۵۹	۰/۰۷
SAR	۰/۰۲	۰/۳۵	۰/۵۴	۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۶۷	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۴۰	۰/۰۲	۰/۶۰	۰/۰۶

نتیجه‌گیری

پایش همه‌جانبه و مستمر آب‌های سطحی و ارزیابی ویژگی‌های خشکسالی یک حوضه خاص به‌منظور آگاهی از تغییرات کیفی و کمی آنها می‌تواند به متولیان امر کمک کند تا آنها ضمن دسترسی آسان‌تر به منابع آب (کمی و کیفی) که لازمه حیات انسان و فعالیت‌های مختلف بشری است، حفاظت بهتر این منابع را برنامه‌ریزی کنند. علی‌رغم طبیعی بودن وقوع پدیده خشکسالی، بروز آثار اکولوژیکی و محیطی مختلف به‌ویژه کاهش آب‌های سطحی و کاهش کیفیت آب اجتناب‌ناپذیر است که می‌توان وقوع خشکسالی و آثار آن را با استفاده از آثار و اطلاعات ثبت شده پیش‌بینی کرد و از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی، اتخاذ تصمیم درست در زمان بحران و طراحی و مدیریت بهتر منابع آب، کاهش خسارات به زیرساخت‌ها در مواقع ترسالی استفاده کرد.

براساس نتایج این پژوهش مشخص شد که خشکسالی بر کیفیت آن مؤثر است. این تأثیر با تغییر در غلظت آنیون‌ها، کاتیون‌ها، هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول که به‌میزان زیادی بر مؤلفه‌های آب کشاورزی و شرب مؤثر است خود را نشان داد. به خوبی می‌توان تأثیر منفی خشکسالی بر کمیت آب

را از مطالعه بررسی میزان دبی و شاخص‌های بارندگی رودخانه هلیل‌رود مشاهده کرد.

مشاهده تفاوت کیفیت آب در سال‌های تر و خشک در ایستگاه‌های مختلف، به دلیل تفاوت میزان آب در ایستگاه‌های مختلف نیز بود، به گونه‌ای که احتمالاً در بیشتر موارد همزمان با خشکسالی‌ها، کیفیت آب، بدتر می‌شود.

نتایج این آزمایش محدود به آثار خشکسالی روی رودخانه هلیل‌رود بدون توجه به سایر عوامل دیگر بر کیفیت آب این حوضه بود. دمای بالای آب در تابستان و چگونگی ورود و خروج آب از رودخانه، تناوب‌های متفاوت خشکسالی و ... می‌تواند در پژوهش‌ها آتی مد نظر قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود با توجه به وجود داده‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه در مطالعه‌ای دیگر رابطه خشکسالی بر کیفیت آب‌های سطحی این حوضه با در نظر گرفتن سه پارامتر شدت خشکسالی، مدت بارندگی و شدت بارندگی در دو وضعیت قبل و بعد از خشکسالی بررسی شود تا نقش و سهم منابع آلاینده نظیر زهاب‌ها و رواناب‌ها در تغییر کیفیت آب این حوضه مشخص شود، چرا که خالی شدن آب رودخانه در نتیجه گرمای آب و تبخیر به‌تدریج و به‌آرامی انجام می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 2006. Water, Soil and Plant Relationships. Sixth Edition. Imam Reza University of Mashhad Publication. (In Farsi).
2. Avarnd, R., Sh. Alipur and J. Nasr Esfahani. 2008. Evaluation of water quality of Karun River (Ahvaz region) in Water treatment plant No.2, Ahvaz. In: Proceeding of the First Regional Conference on Optimal Utilization of Water Resources in Lorestan Province. University of Lorestan. (In Farsi).
3. Edossa, D. C., M. S. Babel and A. D. Gupta. 2010. Drought analysis in the Awash River basin, Ethiopia. *Water Resources Management* 24: 1441-1460.
4. Edwards, D. C. and T. B. McKee. 1997. Characteristics of 20th Century in the United States at Multiple Time Scales. Climatology Report Number 97-2. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
5. Guttman, N. B. 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 113-121.
6. Hrdinka, T., O. Novicky, E. Hanslik and M. Rieder. 2012. Possible impacts of floods and droughts on water quality, *Journal of Hydro-environment Research* 6(2): 145-150.
7. Huang, B. B., D. H. Yan, H. Wang, B. F. Cheng and X. H. Cui. 2013. Impacts of drought on the quality of surface water of the basin, *Hydrol. Hydrology and Earth System Sciences* 10: 14463-14493.
8. Madadinia, M., M. Monavari, A. Karbasi, M. Nabavi, E. Rajabzade. 2014. Study on water quality of karoun river (ahvaz region) using water quality index. *Journal of Environmental Science and Technology* 16(1): 49-60. (In Farsi).
9. Mahmudi, P. A. Tavusi and R. Shahvazei. 2014. Drought and its effects on groundwater resources quality in sisthan and Baluchestan Province, Iranian *Journal of Water Research in Agriculture* 29(1): 21-35. (In Farsi).
10. Mckee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration times scales. American Meteorological Society. In: Proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim. Pp. 179-184.
11. Mirmohammady Maibody, S. A. and S. Tarkesh Esfahani. 2017. Drought in Climate Change. Risk Management and Adaptation Strategies. Jihad-University-Industrial Unit-Isfahan. University Jahad Publications. (In Farsi).
12. Mohammad jani, E. and N. Yazdanian. 2014. The analysis of water crisis conjecture in iran and the exigent measures for its management. *Trend (Trend of Economic Research)* 21: 117-144. (In Farsi).
13. Moshref, Z., M. Zare and A. Tabatabaei. 2012. Trend analysis of drought indices SPI, RDI, SDI In Yazd province over the past two decades using nonparametric statistical test. MSc. Thesis. Yazd University. (In Farsi).
14. Murdoch, P. S., J. S. Baron and T. L. Miller. 2000. Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. *Journal of the American Water Resources Association* 36: 347-366.
15. Naderian far, M. and H. Dehghan. 2018. Investigation of the effect of droughts on upstream and downstream of Halil Rud River Jiroft Dam. In: Proceeding of the 13th National Conference on Watershed Management Science & Engineering of Iran and 3rd National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment, University of Mohaghegh Ardabili. (In Farsi).
16. Nosrati, K. 2011. The effects of hydrological drought on water quality, Water Quality, IAHS Publ. 348, 2011.
17. Sharifan, H. and N. Hasanalizade. 2012. Assessment of water resources quality affected by drought. In: Proceeding of the First National Conference on Challenges on Water Resources and Agriculture. Iranian Association of Irrigation and Drainage. Islamic Azad University Isfahan (Khorasgan) Branch. (In Farsi).
18. Shokoohi, A. and R. Morovati. 2014. An investigation on the Urmia Lake Basin drought using RDI and SPI indices. *Watershed Engineering and Management* 6(3): 232-264. (In Farsi).
19. Soleimani Motlagh, M., A. Talebi and M. Zareei. 2012. The Study of drought on the quality of surface water resources in kashkan watershed, *Journal of Watershed Management Reasearch* 6(12) :154-165. (In Farsi).
20. Tsakiris, G. and H. Vangelis. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water (European Water Resources Association)* 9/10: 3-11.
21. United States Environmental Protection Agency (EPA). 1994. Water Quality Standards Handbook: Second Edition. Washington, DC.
22. Van Vliet, M. T. H. and J. J. G. Zwolsman. 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse River. *Journal of Hydrology* 353: 1-17.
23. Vangelis, H., D. Tigkas and G. Tsakiris. 2013. The effect of PET method on reconnaissance drought index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments* 88: 130-140.
24. Vasiliades, L., A. Loukas and N. Liberis. 2011. A water balance derived drought index for Pinios River Basin, Greece. *Water Resources Management* 25(4): 1087-1101.

25. Whitehead, P. G., R. L. Wilby, R. W. Battarbee, M. Kernan and A. J. Wade. 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal* 54: 101-123.
26. Yamoah, C. F., C. A. Francis, G. E. Varvel and W. J. Waltman. 1998. Weather and management impact on crop yield variability, in rotations. *Journal of Production Agriculture* 11(2): 219-225.
27. Zwolsman, J. J. G. and A. J. van Bokhoven. 2007. Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River, a preview of climate change, *Water Science and Technology* 56(4): 45-55.

The Effect of Drought on Surface Water Quality of the Halil-Rood Basin, Kerman

Z. Shahrokhi Sardoo¹, M. Zare¹, S. A. M. Mirmohammady Maibody^{2*}, M. H. Rahimian³
and F. Arabi Aliabad¹

(Received: April 21-2018 ; Accepted: January 22-2019)

Abstract

Droughts are natural events and could lead to declining surface water quality of regional basin. Understanding the complex impacts of drought may help authorities to monitor changes in different regional basin and to make appropriate decision on development of a river basin management plan. In this study 20 years annual precipitation time series from 1994-2013 from 7 synoptic weather stations located in the Halil-Rood basin were analysed using both Standard Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI) and then dry (-1.35 to -1.75) and wet years (1/7 to 2.45) were determined by model simulation studies. Several climate based drought indices and remotely sensed based drought indices were used for monitoring and evaluating of drought. The impact of drought on the water quality parameters in the study area was evaluated. Results showed that there was significant relationship between most of the examined water quality parameters (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , total dissolved solids TDS, SAR) and drought, however there was no significant relationship between water pH and drought. The study indicated that focus on the drought indices might be helpful as a tool in improving surface water resources management under drought condition and may promote sustainable water resources utilization and management in the study area. Also, dividing the Halil-Rood basin into several homogeneous regions is recommended for future studies to prepare a better ground for studying the effect of drought on the quality of water at a regional scale.

Keywords: Drought, arid regions, Anions and Cations Jiroft

-
1. Department of Arid Lands Management, Faculty of Natural Resources and Eremology, Yazd University, Yazd, Iran.
 2. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
 3. Department of Irrigation and Drainage Engineering, National Salinity Research Center, Yazd, Iran.
- *: Corresponding Author, Email: maibody@iut.ac.ir