

مقایسه و پهنه‌بندی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت بجنورد طی دوره‌های خشکسالی و ترسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، RAI و PN

حسین یوسفی^۱، عبدالرضا کاشکی^{۲*}، مختار کرمی^۲، احمد حسین زاده^۲، الیاس ریحانی^۴

۱. دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. استادیار، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری

۳. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی شهری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۳/۰۴)

چکیده

یکی از پیامدهای مهم تغییر اقلیم، افزایش شدت خشکسالی است. خشکسالی یک پدیده طبیعی تکرارشونده است که با کمبود منابع آب در دسترس در یک محدوده جغرافیایی بزرگ و در یک دوره زمانی مشخص، ارتباط دارد. در سال‌های اخیر، افزایش فراوانی وقوع پدیده‌های حدی اقلیمی مانند سیل و خشکسالی، همراه با شواهد گرمایش جهانی سبب افزایش توجه به موضوع‌های اقلیمی شده است. در تحقیق حاضر ابتدا با احصای آمارهای اقلیمی دو ایستگاه بجنورد و اسدلی وضعیت خشکسالی دشت بجنورد با توجه به شاخص‌های خشکسالی SPI، RAI و PN بررسی شده است. سپس، با استفاده از نمودارهای پایپر و ویلکاکس کیفیت منابع آب زیرزمینی طی دوره‌های خشکسالی و ترسالی مقایسه شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد دشت بجنورد طی سال‌های اخیر در وضعیت خشکسالی قرار داشته است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد کیفیت منابع آب در دوره ترسالی بیشتر آب‌های ترکیبی و شیرین بوده، اما در دوره خشکسالی رخساره آب بیشتر از نوع ترکیبی و شورمرزه بوده است. در ضمن، نتایج نشان می‌دهد در دوره خشکسالی بیش از ۵۰ درصد چاه‌های نمونه در وضعیت بسیار شور و نامناسب برای کشاورزی قرار داشته‌اند.

کلیدواژگان: آب‌های زیرزمینی، پهنه‌بندی، خشکسالی، دشت بجنورد.

مقدمه

براساس آخرین گزارش مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم، میانگین دمای جهان تا ۵۰ سال آینده ۰/۶ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد و تا پایان قرن حاضر، حدود ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. این تغییرات در مقیاس منطقه‌ای بسیار زیاد خواهد بود. از جمله مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم، تحت تأثیر قرارداد مؤلفه‌های مؤثر بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز همچون دما، بارش و تبخیر تعرق است [1].

آثار زیان‌بار تغییرات آب و هوا، به‌عنوان تغییرات در محیط زیست زندگی گیاهی و جانوری، پیامدهای نامناسبی برای ترکیب، قابلیت انعطاف، بازدهی اکوسیستم‌های طبیعی، عملکرد سیستم‌های اجتماعی و اقتصادی یا سلامت بشری دارد. پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم را می‌توان به آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم (اقتصادی) طبقه‌بندی کرد [۲]. یکی از پیامدهای مهم تغییر اقلیم شدت خشکسالی است. خشکسالی یک پدیده طبیعی تکرارشونده است که با کمبود منابع آب در دسترس در یک محدوده جغرافیایی بزرگ و در یک دوره زمانی مشخص ارتباط دارد. تعیین ابتدا و انتهای این پدیده مشکل و غیردقیق بوده و به دلیل اینکه آثار آن با افزایش طول دوره خشکسالی افزایش می‌یابد، به عنوان یک پدیده خزنده معرفی شده است. در سال‌های اخیر، افزایش فراوانی وقوع پدیده‌های حدی اقلیمی مانند سیل و خشکسالی، همراه با شواهد گرمایش جهانی سبب افزایش توجه به پتانسیل تغییر اقلیم شده است. بین وقوع خشکسالی‌های متناوب و پدیده تغییر اقلیم رابطه تنگاتنگی وجود دارد. گرم شدن کره زمین سبب افزایش تبخیر و ازدیاد تراکم بخار آب در جو می‌شود. در نتیجه، میزان و الگوهای زمانی-مکانی نزولات آسمانی اعم از باران و برف تغییر می‌کند و به طور بالقوه می‌تواند به تغییر در چرخه آب منجر شود و در نتیجه ناهنجاری‌های هیدرواقلمی همچون خشکسالی‌ها را تشدید کند [۳]. تبعات منفی پدیده تغییر اقلیم تا آنجاست که در بین ده عامل تهدیدآمیز بشر در قرن ۲۱، مانند فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و... مقام نخست را دارد. پدیده‌های حدی مانند سیل و خشکسالی بیش از سایر پدیده‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارند [۴]. خشکسالی با دیگر حوادث طبیعی مانند سیل، توفان و زلزله تفاوت‌هایی دارد. بیشتر این تفاوت‌ها در تأثیر

تدریجی خشکسالی طی یک دوره نسبتاً طولانی، عدم امکان تعیین دقیق زمان شروع و خاتمه و وسعت جغرافیایی تأثیر آن است. از طرف دیگر، نبود تعریف دقیق و قابل قبول جهانی از خشکسالی، به پیچیدگی و سردرگمی این پدیده افزوده است. در کل، خشکسالی کاهش غیرمنتظره بارش در مدتی معین و در منطقه‌ای است که لزوماً خشک نیست. ایران یکی از کشورهای است که در کمربند بیابانی کره زمین قرار دارد و در برخی سال‌ها از خشکسالی و در بعضی دیگر از سال‌ها از ترسالی آسیب می‌پذیرد [۵].

میانگین بارندگی سالانه در ایران ۲۴۰ میلی‌متر، یعنی کمتر از یک سوم میانگین بارش سالانه جهانی، است. این امر لزوم استفاده از آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین نیازهای کشاورزی، شرب و نیز صنعت را اجتناب‌ناپذیر کرده است. آب زیرزمینی جزء مهم‌ترین و بزرگ‌ترین منابع آب‌های شیرین در جهان است. براساس بررسی‌ها و پیش‌بینی‌های انجام‌شده به وسیله کارشناسان سازمان ملل، در سال ۲۰۲۵ میلادی میزان سرانه منابع ایران که در سال ۱۹۹۰ معادل ۲۲۰۰ مترمکعب بوده به رقمی بین ۷۲۶ تا ۸۱۰ مترمکعب کاهش خواهد یافت. بر این اساس، ایران قبل از سال ۲۰۲۵ در زمره کشورهای مواجه با بحران کمبود آب قلمداد می‌شود. با توجه به مطابق نبودن نیازهای کشاورزی و صنعتی با توزیع آب، لزوم کنترل و استفاده بهینه از منابع آب بیش از پیش احساس می‌شود. این امر حساسیت بیشتر آب‌های زیرزمینی را نسبت به استفاده‌های بی‌رویه روشن می‌سازد. پیامد این مسئله در تعدادی از آبخوان‌ها، افت سطح آب زیرزمینی، کسری مخزن، نشست زمین و در نواحی مستعد، پیشروی آب شور است؛ هر چند به منظور جلوگیری از این ناهنجاری‌ها، ممنوعیت توسعه بهره‌برداری در تعدادی از دشت‌های ایران اعمال شده است. با این حال، به نظر می‌رسد که تأمین پایدار آب در حوضه‌های آبخیز، بدون ارزیابی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی و در نتیجه آثار زیست‌محیطی و اجتماعی آن به‌سختی امکان‌پذیر باشد. از این‌رو، برای مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب و خاک پایش مکانی و زمانی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی در مواقع حداکثرهای اقلیمی ضروری به نظر می‌رسد. به این ترتیب، با شناخت این

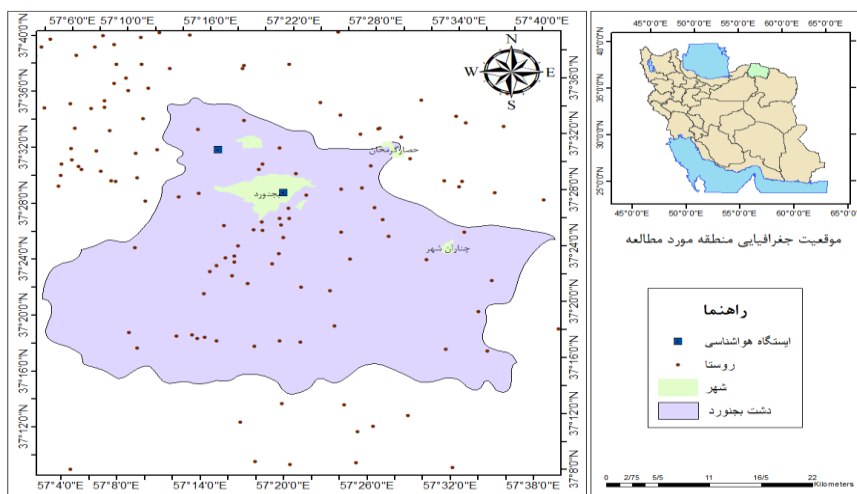
استان گلستان با استفاده از شاخص بارش استاندارد را بررسی کرده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد به طور کلی طی دوره آماری مطالعه‌شده و در همه دوره‌ها هیچ یک از مناطق استان از بروز خشکسالی در امان نبوده و دامنه نوسان خشکسالی در بخش مرکزی و غربی استان بیش از سایر مناطق استان است [۱۱]. یوسفی و همکارانش مطالعه‌ای درباره مدیریت و پهنه‌بندی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI و RDI و با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی در استان مرکزی انجام دادند. آنها در مطالعه یادشده از داده‌های ۱۰ ایستگاه استفاده کردند و با نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی شاخص‌های خشکسالی به دست آمده را پهنه‌بندی کردند و نتیجه گرفتند بخش مرکزی و غربی دشت ریسک‌پذیری شایان توجهی دارد [۱۲]. پارامودیا و انیسی شاخص بارش استاندارد شده SPI در اندونزی را ارزیابی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد شدت خشکسالی در سال ۲۰۱۵ بیشتر از باقی سال‌ها بوده و به‌وضوح ناهنجاری اقلیمی طی دوره مطالعه‌شده قابل رؤیت است [۱۳].

معرفی منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده در پژوهش حاضر دشت بجنورد است که از نظر جغرافیایی در شمال شرقی ایران قرار دارد. متوسط بارش ایستگاه سینوپتیک بجنورد ۲۴۲ میلی‌متر، متوسط دمای آنجا ۱۳/۵۲ سانتی‌گراد و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۰۷۰ متر است.

تغییرات و پیامدهای ناشی از آن، به‌ویژه در صورت وقوع خشکسالی، با برنامه‌ریزی صحیح، بهره‌برداری از منابع آب به طور اصولی و بهینه انجام خواهد شد [۶].

برای تعیین شدت دوره‌های خشکسالی مطالعات زیادی انجام شده است. جهانگیر و نوروزی با استفاده شاخص‌های هواشناسی RAI و PNPI وضعیت خشکسالی در استان خوزستان را ارزیابی و پهنه‌بندی کرده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد شدیدترین خشکسالی منطقه در سال ۲۰۱۰ در استان اتفاق افتاده است [۷]. ناصرزاده و احمدی عملکرد شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و پهنه‌بندی آن در استان قزوین را بررسی کرده‌اند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد شاخص SPI و DI در جایگاه نخست، شاخص ZSI در رتبه دوم و شاخص‌های MCZI و CZI به ترتیب در رتبه‌های سوم و چهارم به لحاظ نشان‌دادن خشکسالی‌های شدید قرار می‌گیرند [۸]. برنا و همکارانش به پایش خشکسالی در ایستگاه‌های دزفول و آبادان با استفاده از شاخص‌های RAI، PN، SIAP، پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد بر اساس دو شاخص RAI و PN فراوانی و شدت خشکسالی در ایستگاه آبادان بیشتر از ایستگاه دزفول است [۹]. انصاری و همکارانش به پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد براساس منطق فازی در ایستگاه مشهد پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آنها پایش خشکسالی با شاخص‌های SPI با SEPI و همبستگی بیش از ۹۰ درصد را بین مقادیر این دو شاخص برای کلیه مقیاس‌های زمانی نشان می‌دهد [۱۰]. بذرافشان و همکارانش وضعیت خشکسالی



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه‌شده

روش کار

در مطالعه حاضر، به دلیل اینکه شاخص‌های آماری همدیگر را پوشش دهند و با توجه به مطالعات انجام شده از سه نوع شاخص خشکسالی استفاده شد که در ابتدا با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی از جمله SPI، RAI و PN به بررسی وضعیت خشکسالی منطقه طی دوره آماری پرداخته شده است. سپس، پایش مکانی و زمانی تغییرات کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی دشت بجنورد طی سال‌های شاخص خشکسالی و ترسالی بررسی و مقایسه شده به گونه‌ای که تغییرات آن در مواقع حداکثرهای اقلیمی (خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها) مشخص شده است. در مقاله حاضر از روش پایپر برای تعیین کیفیت آب زیرزمینی و روش ویلکاکس به منظور طبقه‌بندی آب برای مصارف کشاورزی استفاده شده است. سرانجام، به کمک روش درون‌یابی کریجینگ در محیط GIS پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت بجنورد تهیه شده است.

مقادیر منفی عکس آن است. طبق این روش، خشکسالی زمانی روی می‌دهد که این شاخص منفی شود [۱۴]. این شاخص از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

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

که در آن SPI شاخص استاندارد بارندگی، P_i مقادیر بارش، \bar{P} میانگین متوسط درازمدت بارش و SD انحراف معیار هستند.

جدول ۱. طبقات مختلف خشکسالی در شاخص SPI [۱۵]

مقدار SPI	طبقات خشکسالی
۲ یا بیشتر	(EW) ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	(SW) ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	(MW) ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا ۰/۹۹	(N) نرمال
-۱ تا ۱/۴۹	(MD) خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	(SD) خشکسالی شدید
۲ یا کمتر	(ED) خشکسالی بسیار شدید

شاخص ناهنجاری بارش RAI

شاخص ناهنجاری‌های بارش را ون روی (۱۹۶۵) ارائه کرده است. این شاخص بارندگی ماه یا سال معین را روی مقیاس خطی ارزیابی می‌کند که از روی سری داده‌ها به دست می‌آید. مراحل محاسبه شاخص یادشده عبارت است از:

- محاسبه میانگین درازمدت بارندگی ماهانه در ایستگاه‌های مد نظر \bar{P} ؛
- استخراج میانگین ده مورد از بزرگ‌ترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده طی دوره \bar{M} ؛
- استخراج میانگین ده مورد از کوچک‌ترین مقادیر بارندگی اتفاق افتاده طی دوره \bar{X} ؛
- مقایسه داده‌های بارندگی P با میانگین درازمدت بارندگی.

برای محاسبه ناهنجاری مثبت شاخص زیر به کار می‌رود (رابطه ۲):

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

و برای محاسبه ناهنجاری منفی از شاخص زیر استفاده می‌شود (رابطه ۳):

تجزیه و تحلیل

شاخص استاندارد بارش SPI (Z)

یکی از روش‌های تعیین خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده است که برای پایش خشکسالی در منطقه کلرادو توسط مکی کی و همکارانش ارائه شد. سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب و هوایی به عنوان مناسب‌ترین شاخص شناخته می‌شود. این شاخص برای محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، که بر مبنای داده‌های بارشی همبستگی فراوانی نسبت به هم دارند، استوار است. SPI کوتاه‌مدت، شرایط رطوبت خاک را منعکس کرده و برآورد فصلی از بارندگی را مشخص می‌کند. SPI کوتاه‌مدت، حساسیت بیشتری به تغییرات شرایط رطوبت دارد و SPI طولانی‌مدت، خشکسالی را بهتر منعکس می‌کند و برای این مقیاس زمانی با سطح آب در منابع آب زیرزمینی مرتبط است. به‌منظور تفسیر و بررسی نتایج به دست آمده از این محاسبه جدولی ارائه شده که در آن مقادیر مثبت نشان‌دهنده بارندگی بیش از بارش متوسط و

$$PN = \frac{P}{\bar{P}} * 100 \quad (4)$$

در رابطه یادشده P مجموع بارندگی در سال مفروض به میلی‌متر و \bar{P} میانگین بارش درازمدت به میلی‌متر است. این شاخص بر اساس جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود:

جدول ۳. طبقات مختلف خشکسالی در شاخص PN [۹]

مقدار PN	طبقات خشکسالی
۷۰ تا ۸۰ درصد	خشکسالی ضعیف
۵۵ تا ۷۰ درصد	خشکسالی متوسط
۴۰ تا ۵۵ درصد	خشکسالی شدید
کمتر از ۴۰ درصد	خشکسالی بسیار شدید

نتایج سالانه شاخص‌های خشکسالی (SPI، RAI و PN) برای دو ایستگاه بجنورد و اسدلی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. شاخص‌های خشکسالی SPI، RAI و PN ایستگاه‌های بجنورد و اسدلی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶

زمان	SPI		RAI		PN	
	شاخص سالانه SPI	شاخص سالانه SPI	شاخص سالانه RAI	شاخص سالانه RAI	شاخص سالانه PN	شاخص سالانه PN
	اسدلی	بجنورد	اسدلی	بجنورد	اسدلی	بجنورد
۱۹۹۸	۰/۶۴۶	-۰/۴۹۳	۳/۲۶۷	-۲/۲۱۲	۱۱۳/۹	۸۶/۷
۱۹۹۹	-۰/۳۰۹	۰/۵۳۲	-۱/۵۴۲	۱/۹۵۸	۹۱/۲	۱۱۱/۴
۲۰۰۰	-۰/۸۹۹	۰/۹۹۳	-۳/۷۱۲	۴/۱۰۷	۷۸/۸	۱۲۳/۹
۲۰۰۱	-۱/۸۴۵	-۲/۰۵۱	-۶/۷۲	-۷/۱۹۳	۶۱/۴	۵۶/۷
۲۰۰۲	۱/۳۴۲	۱/۲۳۸	۵/۵۵۵	۵/۳۱	۱۳۲/۷	۱۳۰/۹
۲۰۰۳	-۰/۰۶۶	۱/۷۵۲	-۰/۵۸۶	۷/۹۷۷	۹۶/۶	۱۴۶/۴
۲۰۰۴	۰/۸۸۴	۰/۴۵۳	۳/۴۲۱	۱/۶۰۵	۱۲۰/۱	۱۰۹/۳
۲۰۰۵	۰/۳۵۱	۱/۶۷۸	۱/۱۱۲	۷/۵۷۶	۱۰۶/۵	۱۴۴
۲۰۰۶	-۰/۵۷۵	-۰/۳۴	-۲/۵۵	-۱/۶۴۵	۸۵/۴	۹۰/۱
۲۰۰۷	۱/۰۸۷	۰/۶۴۵	۴/۳۵	۰/۴۶۹	۱۲۵/۶	۱۱۴/۴
۲۰۰۸	-۲/۰۰۶	-۰/۷۸۷	-۷/۲۲۵	-۳/۲۶۵	۵۸/۷	۸۰/۳
۲۰۰۹	۰/۸۰۵	۰/۳۰۲	۳/۰۷	۰/۹۴۲	۱۱۸	۱۰۵/۵
۲۰۱۰	۰/۵۵۹	-۰/۳۵۵	۱/۹۹	-۱/۶۹۸	۱۱۱/۷	۸۹/۸
۲۰۱۱	۱/۳۸۹	-۰/۱۸۵	۵/۷۸۱	-۱/۰۵۱	۱۳۴	۹۳/۷
۲۰۱۲	-۰/۱۶۳	-۰/۳۵۳	-۰/۹۷۴	-۱/۶۹۲	۹۴/۴	۸۹/۸
۲۰۱۳	-۱/۶۶۶	-۱/۸۴۹	-۶/۲۲۳	-۶/۶۲۶	۶۴/۵	۶۰/۱
۲۰۱۴	-۰/۲۴۶	-۰/۷۹۵	-۱/۲۹۹	-۳/۲۹۲	۹۲/۶	۸/۲
۲۰۱۵	۰/۲۸۷	-۰/۲۵۶	۰/۸۴۶	-۱/۳۲۵	۱۰۵	۹۲
۲۰۱۶	۰/۴۴۵	-۰/۱۲۷	۱/۵۰۸	-۰/۸۲۵	۱۰۸/۹	۹۵

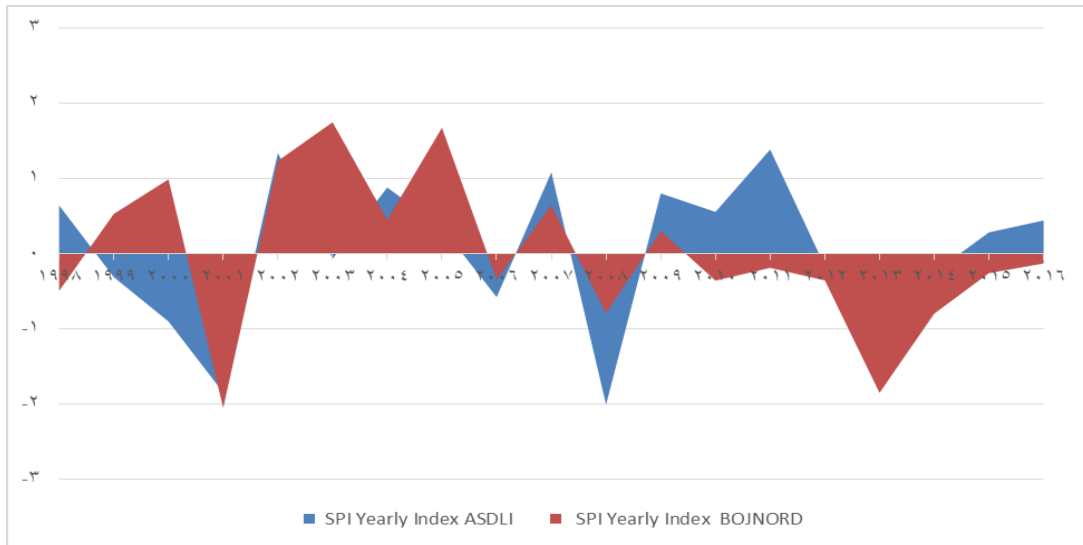
$$RAI = -3 \left[\left[\frac{P - \bar{P}}{M - \bar{P}} \right] \right] \quad (3)$$

جدول ۲. طبقات مختلف خشکسالی در شاخص RAI [۱۷]

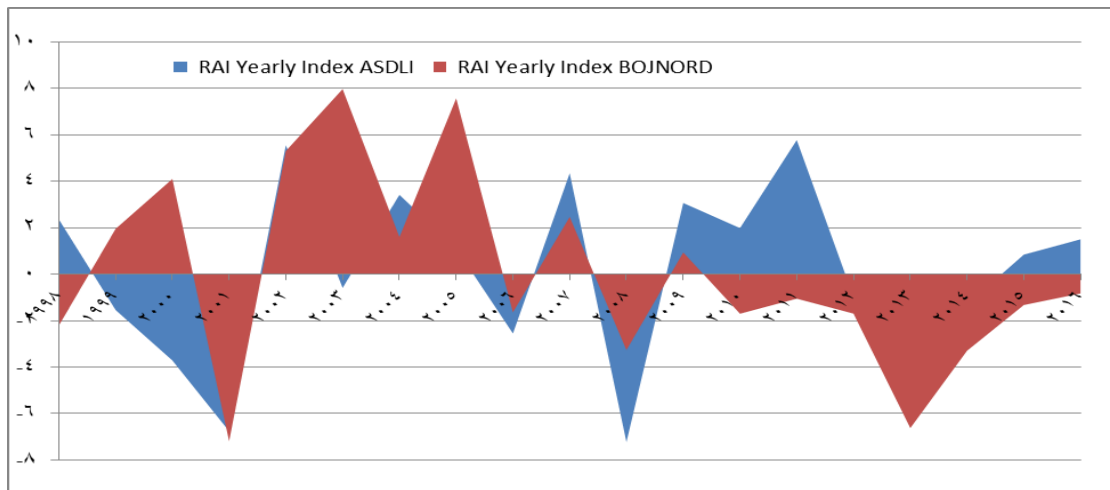
مقدار RAI	طبقات خشکسالی
۰/۳ تا -۰/۳	نزدیک به نرمال
-۰/۳ تا -۱/۲	خشکسالی ضعیف
-۱/۲ تا -۲/۱	خشکسالی متوسط
-۲/۱ تا -۳	خشکسالی شدید
کوچک‌تر یا مساوی -۳	خشکسالی بسیار شدید

شاخص درصد نرمال PN

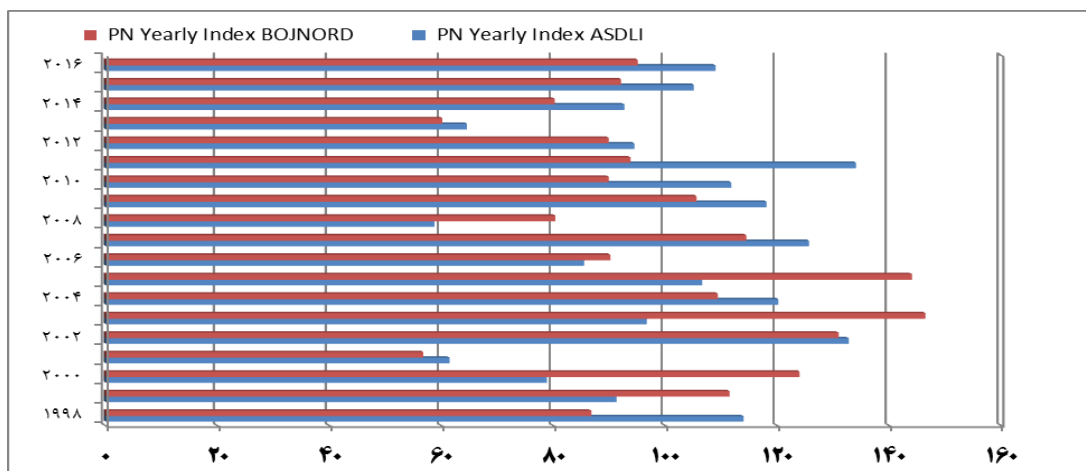
این شاخص از تقسیم میزان بارندگی رخ داده بر مقدار بارندگی نرمال به دست می‌آید و برحسب درصد بیان می‌شود. معادله این شاخص به شرح زیر است (رابطه ۴):



شکل ۲. مقایسه دو ایستگاه با توجه به شاخص SPI



شکل ۳. مقایسه دو ایستگاه با توجه به شاخص RAI



شکل ۴. مقایسه دو ایستگاه با توجه به شاخص PN

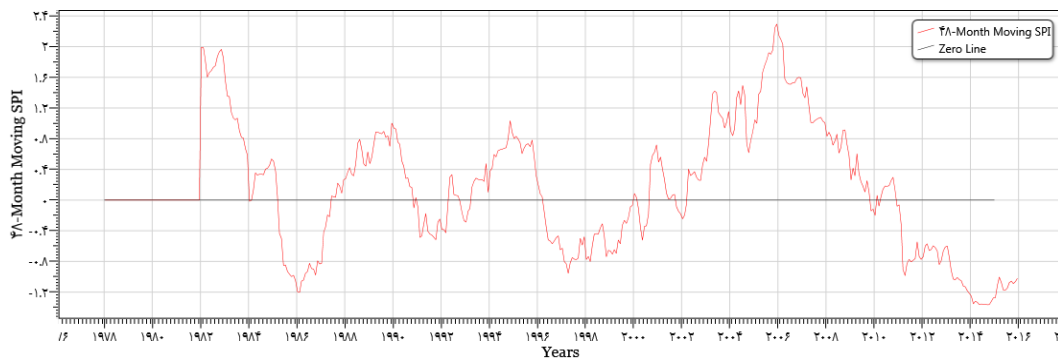
میانگین دوره ترسالی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۸۶ (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸) و ۱۳۹۲ (۲۰۱۴) بررسی شده است.

طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی

مهم‌ترین معیارهای کیفی در طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی، شوری و مقدار سدیم موجود در آن است، زیرا این دو پارامتر بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند و درجه تناسب آب را از نظر آبیاری و تأثیر آن بر نفوذپذیری خاک مشخص می‌کنند. شوری با استفاده از معیار هدایت الکتریکی (EC) و سدیم با یکی از معیارهای نسبت جذب سدیم (SAR) یا درصد سدیم محلول (SSP) یا درصد سدیم قابل تبادل (ESP) سنجیده می‌شود. آب‌ها از نظر میزان سدیم محلول در پنج گروه قرار می‌گیرند [۱۶] که در جدول ۵ آمده است.

همه شاخص‌های خشکسالی بررسی شده نشان می‌دهند طی سال‌های اخیر دشت بجنورد در وضعیت خشکسالی قرار داشته است. این شرایط برای ایستگاه بجنورد شدیدتر است. همان‌طور که گفته شد، شاخص SPI بلندمدت، خشکسالی را بهتر منعکس می‌کند و این مقیاس زمانی با سطح آب زیرزمینی مرتبط است. به همین منظور و با توجه به وجود داده‌های بارندگی ایستگاه بجنورد طی دوره آماری ۳۹ ساله، وضعیت شاخص SPI بلندمدت (۴۸ ماهه) برای ایستگاه محاسبه شده است.

همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد، ایستگاه بجنورد از سال ۲۰۱۰ به بعد همواره در شرایط خشکسالی قرار داشته است. به منظور بررسی تأثیر شرایط خشکسالی بر کیفیت آب زیرزمینی (نمودارهای ویلکاکس و پایپر)



شکل ۵. شاخص SPI بلندمدت ۴۸ ماهه برای ایستگاه بجنورد

جدول ۵. طبقه‌بندی میزان سدیم محلول در آب

$SSP < 20$	عالی
$20 < SSP < 40$	خوب
$40 < SSP < 60$	قابل قبول
$60 < SSP < 80$	مشکوک
$SSP > 80$	بد

منطقه‌ای قرار می‌گیرد که با حرف C از نظر شوری و S از نظر سدیم مشخص می‌شود. مقادیر ۱-۴ به ترتیب نشان‌دهنده کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد هستند. در مجموع، ۱۶ کلاس مختلف برای آب از نظر کیفی می‌توان تعیین کرد که در چهار گروه تفکیک می‌شوند. این طبقه‌بندی در جدول ۶ نشان داده شده است.

در جدول‌های ۷ و ۸ وضعیت آب‌های زیرزمینی طی دو دوره مطالعه‌شده از نظر کشاورزی آورده شده است.

البته، سدیم به تنهایی نمی‌تواند معیار کیفی آب به لحاظ کشاورزی قرار گیرد و بهتر است که تأثیر آن در زمینه شوری کل آب در نظر گرفته شود. بنابراین، طبقه‌بندی ویلکاکس^۱ استفاده می‌شود. این روش، کاربردی‌ترین روش برای طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی در مطالعات هیدرولوژی است. در نمودار ویلکاکس محور افقی به شوری آب و محور عمودی به نسبت جذبی سدیم (SAR) اختصاص دارد. مختصات مربوط به هر آب در

1. Wilcox

جدول ۶. طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی [۱۷]

کیفیت آب برای کشاورزی	کلاس
شیرین - برای کشاورزی کاملاً بی‌اثر	C1S1
کمی شور - برای کشاورزی تقریباً مناسب	C1S2 - C2S2 - C2S1
شور - برای کشاورزی با اعمال تمهیدات لازم مناسب	C1S3 - C2S3 - C3S1 - C3S2 - C3S3
بسیار شور - مضر برای کشاورزی	C4S4 - C4S1 - C1S4 - C2S4 - C3S4 - C4S3 - C4S2

جدول ۷. کیفیت آب از نظر کشاورزی طی دوره ترسالی ۱۳۸۱-۱۳۸۶ (۲۰۰۳-۲۰۰۸)

ردیف	محل نمونه برداری	SAR	EC	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی
۱	گریوان سرچشمه	۰/۷۵	۲۹۷	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۲	بجنورد کارخانه پنبه	۲/۷۶	۱۱۰۵	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۳	رستمی	۲/۱۹	۱۲۴۰	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۴	بش قارداش بش قارداش	۲/۰۹	۷۳۰	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۵	بربر قلعه آب شرب	۱/۴۶	۱۰۳۶	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۶	مهنان بالا	۰/۶۲	۴۷۶	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۷	بجنورد کاوس شادلو	۲/۲۱	۹۰۰	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۸	منکش قورچی	۱/۴۸	۲۳۳۰	C4-S1	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۹	بجنورد کریمی	۰/۷	۱۱۷۹	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۰	شرکت طلوع	۵/۸۱	۲۲۸۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۱۱	پاقلعه بهی چشمه	۱/۲	۵۲۲	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۱۲	کهنه کن معصومی	۳/۵۶	۱۵۶۰	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۳	باز خانه ملاک	۱/۱۳	۵۹۷	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۱۴	کاظمیان	۲/۲۴	۱۳۱۶	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۵	پاقلعه دره چنار	۰/۴۴	۵۲۹	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۱۶	منابع طبیعی	۳/۲۴	۳۳۶۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۱۷	ینگه قلعه سروی	۲/۴۶	۱۱۵۰	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۸	شهرک ولیعصر	۲/۱۳	۱۱۸۸	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۹	درصوفیان سرچشمه	۰/۴۲	۴۱۶	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۲۰	پارک	۲/۹۲	۱۳۵۷	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۲۱	باباامان کرمک	۳/۸	۱۳۰۴	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۲۲	پیغو چشمه دره	۱/۰۳	۴۲۱	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی

جدول ۸. کیفیت آب از نظر کشاورزی طی دوره خشکسالی سالی ۱۳۹۲ (۲۰۱۴)

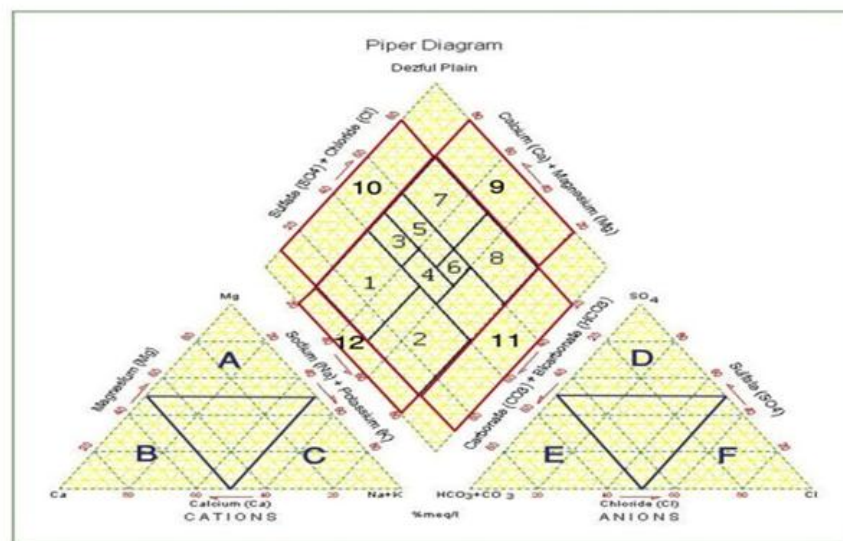
ردیف	محل نمونه برداری	SAR	EC	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی
۱	بجنورد	۴/۸۷	۲۰۴۰	C3-S2	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۲	لنگر-پور حسنی	۹/۷۶	۲۴۲۰	C4-S3	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۳	ملکش	۴/۰۴	۳۸۳۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۴	بجنورد	۴/۰۶	۳۷۶۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۵	بربر قلعه	۲۱/۰۷	۱۸۲۲	C3-S4	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۶	بجنورد	۹/۱۰	۶۵۰	C2-S2	کمی شور - مناسب برای کشاورزی
۷	بجنورد	۱۶/۹۱	۱۶۲۸	C3-S4	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۸	بجنورد	۱/۶۸	۱۶۶۲	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۹	بجنورد	۷/۱	۳۲۸۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۱۰	کهنه کن	۱/۴	۲۰۶۰	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۱	بجنورد	۵/۳۴	۳۰۱۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۱۲	بجنورد	۴/۷۸	۱۵۰۲	C3-S2	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۳	بجنورد	۲/۷۳	۱۲۲۷	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۴	ینگه قلعه	۱/۳۴	۱۶۰۷	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی
۱۵	بجنورد	۵/۵۹	۴۲۴۰	C4-S2	بسیار شور - برای کشاورزی نامناسب
۱۶	بجنورد	۲/۵۶	۱۶۲۶	C3-S1	شور - قابل استفاده برای کشاورزی

محدوده متعلق به هر رخساره در نمودار لوزی شکل پایپر در شکل ۶ نشان داده شده است. این رخساره‌ها می‌توانند در سه نوع اصلی زیر قرار گیرند. بر اساس شکل ۶، سه نوع آب شیرین، ترکیبی و شور مزه قابل شناسایی است. الف) آب‌های شیرین: با توجه به شکل ۶، رخساره‌های ۱ و ۲ در این تیپ قرار می‌گیرند؛ ب) آب‌های ترکیبی: با توجه به شکل ۶، رخساره‌های ۳ تا ۶ در این تیپ قرار می‌گیرند و کیفیت کمتری نسبت به تیپ قبلی دارند. این آب‌ها در دسته آب‌های سخت قرار می‌گیرند؛ ج) آب‌های شور مزه: با توجه به شکل ۶، رخساره‌های ۷ و ۸ در این تیپ قرار دارند. در این تیپ میزان کلرید افزایش یافته، ولی بی‌کربنات آن مانند نمونه‌های قبلی است. همچنین، با توجه به شکل ۶، نوعی تقسیم‌بندی برای رخساره‌هایی که در محدوده‌هایی غیر از موارد یادشده قرار می‌گیرند، وجود دارد که به صورت جدول ۹ است.

تعیین تیپ و رخساره آب

در این مرحله تیپ و رخساره آب توسط نمودار پایپر^۱ مشخص شده است. یکی از روش‌های متداول در تعیین رخساره هیدروشیمی آب، استفاده از نمودار پایپر است. بر اساس نمودار پایپر، هشت رخساره شیمیایی قابل تشخیص هستند که عبارت‌اند از [۱۸]:

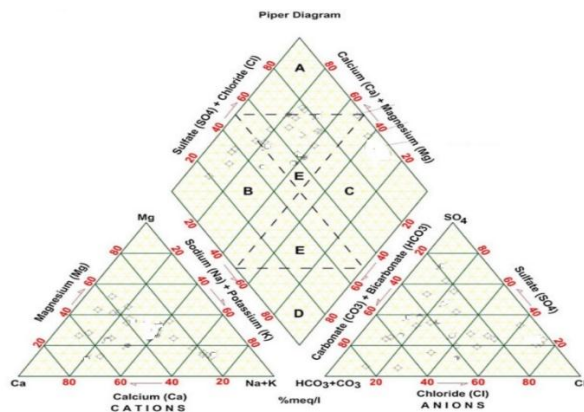
۱. Ca-Mg-HCO₃
۲. Na-HCO₃
۳. Ca-Mg-HCO₃-Cl
۴. Na-HCO₃-Cl
۵. Ca-Mg-Cl-HCO₃
۶. Na-Cl-HCO₃
۷. Ca-Mg-Cl
۸. Na-Cl



شکل ۶. رخساره‌های آب در نمودار پایپر [۱۸]

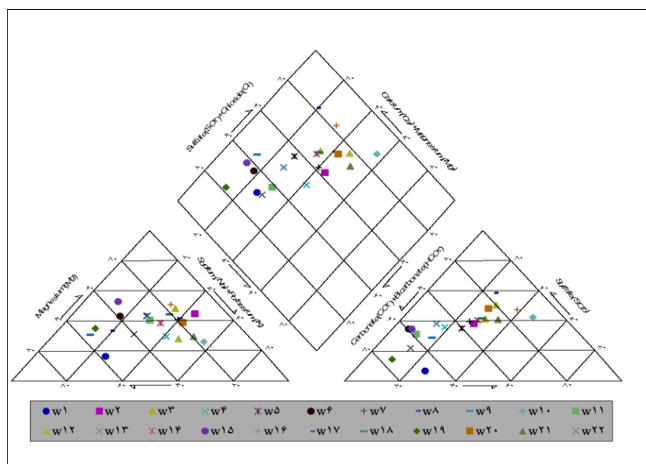
جدول ۹. محدوده / تیپ و رخساره آب [۱۹]

ناحیه A: تیپ منیزیمی	ناحیه ۹: تیپ کلرور- سولفات
ناحیه B: تیپ کلسیمی	ناحیه ۱۰: تیپ کلسیم- منیزیم
ناحیه C: تیپ سدیم- پتاسیمی	ناحیه ۱۱: تیپ سدیم- پتاسیم
ناحیه D: تیپ سولفات	ناحیه ۱۲: تیپ کربنات- بی کربنات
ناحیه E: تیپ بی کربنات- کربنات	

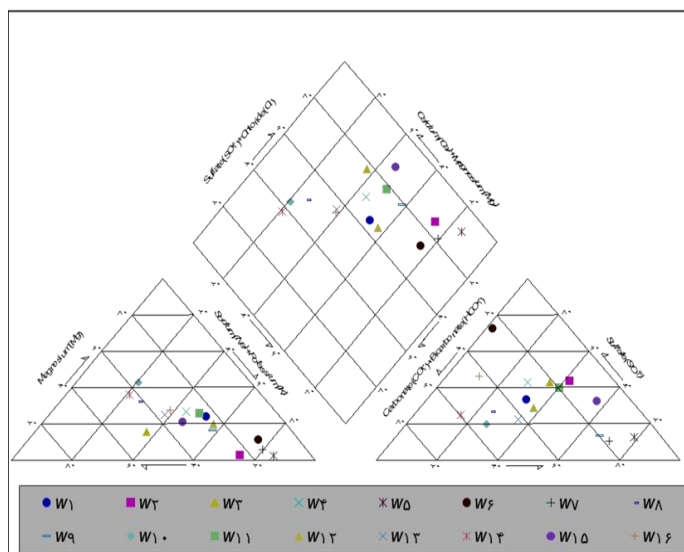


شکل ۷. تیپ آب در نمودار پایپر [۲۰]

این نمودار نشان می‌دهد در دوره ترسالی تمرکز نمونه‌ها در محدوده آب‌های ترکیبی و شیرین قرار می‌گیرند. نواحی A, B, C, D, E و F نیز برای تشریح بهتر تیپ آب به کار می‌روند:



شکل ۸. نمودار پایپر طی سال‌های ۱۳۸۱ - ۱۳۸۶ (۲۰۰۳ - ۲۰۰۸) به عنوان دوره ترسالی



شکل ۹. نمودار پایپر سال ۱۳۹۲ (۲۰۱۵) به عنوان سال خشک

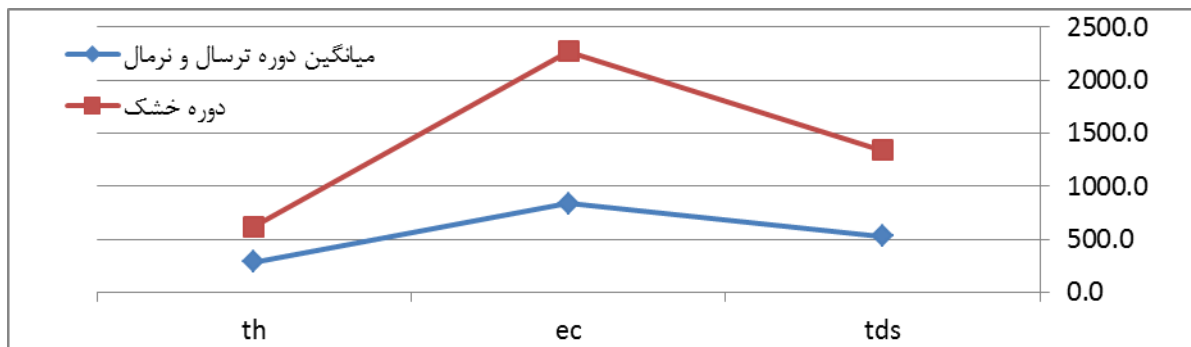
تغییرات مکانی توزیع کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از GIS

در این مرحله از با استفاده از دستور کریجینگ در محیط GIS به پهنه‌بندی کیفیت آب در دشت بجنورد اقدام شده است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ میزان هدایت الکتریکی EC طی دوره ۱۳۸۱-۱۳۸۶ (۲۰۰۳-۲۰۰۸) و سال ۱۳۹۲ (۲۰۱۵) نشان داده شده است.

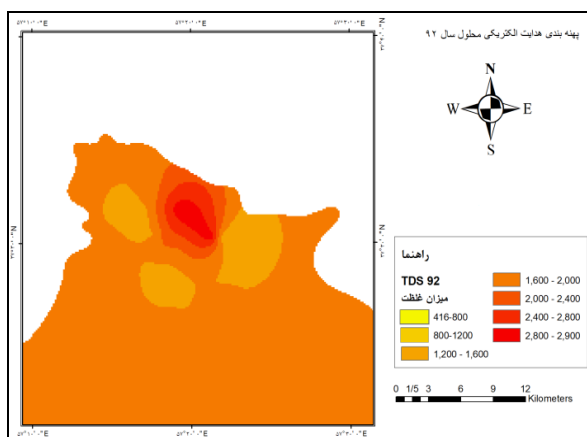
این نمودار نشان می‌دهد در دوره خشکسالی تمرکز نمونه‌ها در محدوده آب‌های شور و ترکیبی و در ناحیه E و C تیپ سدیمی قرار دارند. در واقع، نمودار پایپر نشان می‌دهد کیفیت آب‌های زیرزمینی در دوره ترسالی بسیار بهتر از دوره خشکسالی است. در جدول ۱۰ و شکل ۱۰ میانگین وضعیت دوره ترسالی و نرمال به دوره خشک مقایسه شده است.

جدول ۱۰. مقایسه شاخص‌های کیفیت آب در دوره‌های ترسالی و خشکسالی

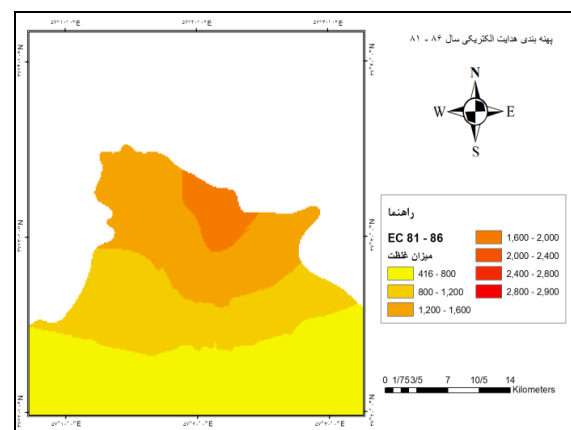
شاخص	TDS	EC	TH	SAR	KATION	NA	MG	CA	ANION	SO4	CL	HCO3	CO3	PH
میانگین دوره ترسالی	۵۲۵/۴	۸۳۳/۸	۲۸۳/۸	۱/۶	۸/۶	۲/۹	۳/۱	۲/۶	۸/۷	۳/۲	۲/۱	۳	۰/۴	۸/۳
دوره خشک	۱۳۴۲/۵	۲۲۷۲/۸	۶۱۸/۳	۶/۴	۲۶/۸	۱۴/۴	۵	۷/۴	۲۷	۸/۲	۱۱/۹	۶/۶	۰/۳	۷/۴



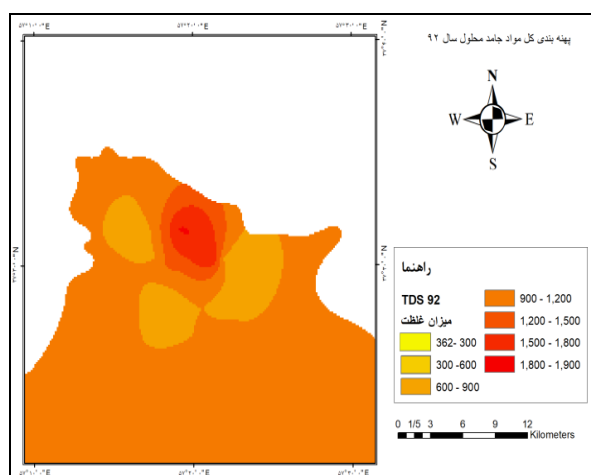
شکل ۱۰. نمودار مقایسه دو دوره طی شاخص‌های EC, TDS, TH در دوره خشکسالی و ترسالی



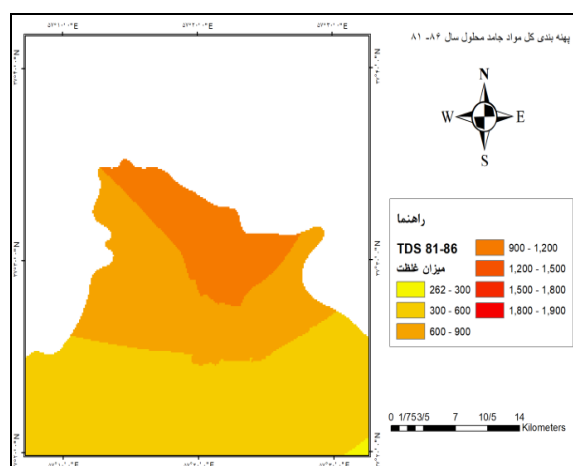
شکل ۱۲. میزان غلظت مواد محلول در آب در سال ۱۳۹۲



شکل ۱۱. میزان غلظت مواد محلول در آب طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۶



شکل ۱۴. میزان TDS طی سال ۱۳۹۲



شکل ۱۳. میزان TDS طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۶

می‌شود که شرایط منابع آب‌های زیرزمینی برای استفاده در کشاورزی نامناسب شده است و استفاده بیش از حد از این منابع می‌تواند سبب شورشیدن خاک‌های منطقه شود. از نظر رخساره‌های هیدروشیمی طی دوره ترسالی وضعیت نمونه‌ها در شرایط آب شیرین و آب‌های ترکیبی قرار داشته‌اند، اما در سال ۱۳۹۲ نمونه‌ها بیشتر در محدوده آب‌های شور و ترکیبی قرار گرفته‌اند. در کل، می‌توان گفت که با توجه به ماهیت جغرافیایی کشور، خشکسالی از جمله پدیده‌هایی است که وقوع آن اجتناب‌ناپذیر است، اما می‌توان با استفاده از آمار و اطلاعات ثبت شده وقوع آن را پیش‌بینی کرد و برای مدیریت بهتر منابع و استفاده بهینه از آنها در مواقع ترسالی برای کاهش خسارت‌ها به زیرساخت‌ها و همچنین کاربران استفاده شده، برنامه‌ریزی‌های لازم را به کار برد. شهر بجنورد با حدود ۲۵۰ هزار نفر جمعیت، به عنوان مرکز استان خراسان شمالی، داخل این دشت قرار دارد. به علت تغییرات اقلیمی میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی (برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی) در چند سال اخیر گسترش زیادی داشته است؛ که این موضوع می‌تواند اثر منفی زیادی بر کیفیت منابع آب و استفاده در مصارف شرب شهر بجنورد داشته باشد.

منابع

- [1].Kelanki M and Karandish F. Forecasting the long-term effects of climate change on climatic components in the region wet, journal of Water and Irrigation Engineering, 2015, 20(5), 131-148. [Persian]

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ میزان مواد محلول TDS طی دوره ۱۳۸۱-۱۳۸۶ (۲۰۰۳-۲۰۰۸) و سال ۱۳۹۲ (۲۰۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که نقشه‌ها نشان می‌دهند، آب‌های زیرزمینی با توجه به شاخص‌های مطرح‌شده، در دوره ترسالی شرایط بسیار بهتری نسبت به دوره خشکسالی دارند.

نتیجه‌گیری

بررسی میزان دوره‌های خشک و تر با شاخص‌های خشکسالی RAI و SPI, PN در محدوده دشت بجنورد نشان می‌دهد تعداد دوره‌های خشک در محدوده دشت طی سال‌های اخیر افزایش یافته است و نیز دوره‌های ترسالی بسیار شدید در محدوده دشت رخ نداده است. همه شاخص‌های محاسبه‌شده وضعیت دشت را در شرایط خشکسالی نشان می‌دهند، اما شاخص SPI بلندمدت ۴۸ ماهه وضعیت خشکسالی منطقه را بسیار بهتر نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، میزان مواد محلول در آب طی خشکسالی چندین برابر دوره ترسالی است. همچنین، بررسی طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر آبیاری و استفاده در مصارف کشاورزی در محدوده دشت نشان می‌دهد طی دوره خشکسالی در آبخوان‌های بررسی شده طبقه‌بندی کلاس بسیار شور و مضر برای کشاورزی افزایش یافته است، به گونه‌ای که طی دوره ترسالی فقط سه نمونه وضعیت نامناسب برای کشاورزی داشته‌اند، در حالی که در سال ۱۳۹۲ این میزان به هشت نمونه (۵۰ درصد نمونه‌ها) افزایش یافته است. بنابراین، مشخص

- [2]. Navare A. An Analysis on International Society Practice toward the Climate Change. Environmental research.2015; 5 (9), 47-58. [Persian]
- [3]. Jamali Z, Khoodrani A. Impacts of climate change on extreme precipitation events in arid (Bandar Abbas) and semi-arid (Shahrekord) stations in Iran. Natural Environment Change. 2015 Jul 1; 1(1):85-94. [Persian]
- [4]. farajzadeh m and ahmadian g. Temporal and Spatial Analysis of Drought with use of SPI Index in Iran. Journals management system.2014; 3(4), 1-16. [Persian]
- [5]. HOSEINIZADE A, SEYED KH, ZAREI H, AKHON AA. The Intensity and Return Period of Drought under Future Climate Change Scenarios in Dezful, Iran. Journal of irrigation science and engineering.2016; 39(1), 33-43. [Persian]
- [6]. ASADZADEH F, KAKI M, SHAKIBA S, RAEI B. Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in QORVEH-CHARDOLI plain. Iran-water resources research.2016; 12(3), 153-165. [Persian]
- [7]. Jahangir M, Norozi e. Numerical comparison of RAI and PNPI meteorological indices to assess and quantify the drought situation in Khuzestan province. Journal of echohydrology, 2017; 4(3), 923-930. [Persian]
- [8]. Naserzade M, Ahmadi E. Evaluation of the performance of meteorological drought indicators in drought evaluation and zoning in Qazvin province. Researches in Geographical Sciences; 2013, 12(27): 141-162. [Persian]
- [9]. Borna R, Azimi F, Saeidi dehaki N. Comparison of SIAP, PN, RAI indicators In the study of drought in Khuzestan province With emphasis on Abadan and Dezful stations, Natural History Quarter, 2010; 3(9), 77-88. [Persian]
- [10]. ANSARI H, DAVARI K, Sanaeinezhad SH. Drought monitoring with new precipitation and evapotranspiration index based on Fuzzy Logic. Journal of Water and Soil, 2010; 24(1), 38-52.
- [11]. Bazrafshan O, MOHSENI SM, Malekian A, Moeini A. A study on drought characteristics of Golestan province using standardized precipitation index (SPI). Journal of rangeland and desert research, 2011; 18(3), 395-407.
- [12]. Yosefi H, Nohegar A, KHosravi Z, Farahani M. Management and zonation Drought using SPI and RDI indices (case study: Markazi province), Journal of echohydrology, 2015; 2(3): 337-344. [Persian]
- [13]. Pramudya Y, Onishi T. Assessment of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Tegal City, Central Java, Indonesia, IOP Conf. Series, Earth and Environmental Science, 2018 Mar; 129(1): 12-19.
- [14]. Roshan M, Karimi V, Abjar J. Investigation of meteorological drought Indices in Mazandaran synoptic Stations, 2011; 2(5), 15-25. [Persian]
- [15]. Moasedi A, Qabaei M. Modification of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on Relevant Probability Distribution Function, Journal of Water and Soil, 2011; 25(5): 1206-1216. [Persian]
- [16]. Khandouzi F, Zangane A, Zamani A, Zhahamat Y. Survey of Hydro-geochemical Quality and Health of Groundwater in Ramian, Golestan Province, Iran, Journal of Health Research in Community, 2015, 1(3): 41-52. [Persian]
- [17]. Mooney PH. *Toward a class analysis of Midwestern agriculture. Rural Sociology. 1983 Dec 1; 48(4): 563.*
- [18]. Sikdar P, Sarkar S, Palchoudhury k, S. Geochemical evolution of groundwater in the Quaternary aquifer of Calcutta and Howrah, India, Journal of Asian Earth Sciences, 2008; 19(5), 579-594.
- [19]. Nadiri A, Asghari A, Frank T-C, Fijani E. Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran, Journal of Earth System Science, 2013; 122(4), 1091-1105.
- [20]. Giglo B, Farid B, Najafi Nejad A, Moqani V, Qiasi A. Evaluation of water quality variation of Zarringol river, journal of Water and Soil Conservation Studies, 2013; 20(1), 77-95. [Persian]