

## پایش ویژگی خشک‌سالی‌های هواشناسی-آب‌شناسی در منطقه هشتگرد و بررسی نقش خشک‌سالی هواشناسی بر تراز آب زیرزمینی

مصطفی ملائی پاکباده<sup>۱</sup>، امیر خسرو جردی<sup>\*</sup>، حسین صدقی<sup>۱</sup>، حسین بابازاده<sup>۱</sup>

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۲/۱۸

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۶/۲۸

### چکیده

خشک‌سالی، پدیده مخرب طبیعی است که طی سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی، در اکثر مناطق ایران رخ داده است. منطقه هشتگرد، به سبب نرخ روزافزون رشد جمعیت و صنایع، با کمبود منابع آب مواجه است که می‌تواند به سبب کاهش تغذیه و یا افزایش برداشت‌ها باشد. در این تحقیق، با استفاده از شاخص خشک‌سالی استاندارد شده سطح آب زیرزمینی (SGLI) و شاخص اکتشاف خشک‌سالی (RDI)، وضعیت خشک‌سالی‌ها در دشت هشتگرد تحلیل گردید. سپس به منظور بررسی تأثیر خشک‌سالی هیدرولوژیکی بر منابع آب زیرزمینی، رابطه تراز ایستابی با شاخص RDI (در ایستگاه سینوپتیک قزوین) تحلیل شد. نتایج نشان داد که برای اکثر چاه‌های مورد مطالعه، همبستگی بین دو عامل فوق (در سطح احتمال ۹۵ درصد) بسیار بالا نیست و عوامل دیگری بر میزان تراز ایستابی تأثیرگذار هستند. رابطه وایازی خطی مابین تراز متوسط سطح ایستابی و RDI بیانگر آن است که درصدی از واریانس تراز متوسط سطح ایستابی (۴۷ درصد)، تحت تأثیر خشک‌سالی می‌باشد. بخش بزرگ‌تری از این واریانس (۵۳ درصد) متأثر از سایر عوامل (به‌ویژه بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی) بوده که نمونه آن در چاه نمک آلان مشاهده شد. بنابراین نتیجه شد که پایین بودن مقدار همبستگی بین شاخص‌های نامبرده در برخی از چاه‌ها، می‌تواند مؤید این موضوع باشد که وضعیت خشک‌سالی منابع زیرزمینی در این محدوده از دشت، فقط متأثر از خشک‌سالی هواشناسی نیست و می‌توان اثرات این عوامل را نیز مورد بررسی قرار داد. مهم‌ترین این عوامل برداشت‌ها از منابع آب زیرزمینی و ساختار زمین‌شناسی مسیر تغذیه تا محل قرارگیری چاه مورد مطالعه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** دشت هشتگرد، شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی، شاخص خشک‌سالی هواشناسی، ضریب همبستگی پیرسون، مشخصه‌های خشک‌سالی.

## مقدمه

خشک‌سالی، یک پدیده جهانی می‌باشد که ناشی از کاهش بارش در بازه زمانی معین بوده که در پهنه‌ای مشخص، اتفاق می‌افتد (مسعودیان، ۱۳۹۰). این پدیده در همه مناطق با اقلیم‌های خشک، معتدل و مرطوب می‌تواند رخ داده و سبب ایجاد آسیب قابل توجه به محیط‌زیست، منابع طبیعی (مانند آب و خاک) و زندگی انسان‌ها شود (مرکباتی، ۱۳۸۷). با توجه به اینکه متغیرهای مختلفی به صورت مستقیم و غیرمستقیم در وقوع یک رخداد خشک‌سالی دخالت دارند، تاکنون تعریف جامعی از این پدیده عنوان نشده و محققین رشته‌های مختلف، از دیدگاه خود این پدیده را تعریف نموده‌اند. به عنوان مثال در بخش زراعت و باغبانی، متخصصین این رشته، نقصان آب در منطقه توسعه ریشه در طی دوره رشد گیاه را خشک‌سالی می‌نامند (کردوانی، ۱۳۸۰). بسیاری از اثرات خشک‌سالی، به طور مستقیم از کمبود بارندگی ناشی نشده و به شرایطی همچون میزان و نحوه‌ی ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و حجم منابع آب‌های زیرزمینی در دسترس مربوط می‌شود که این موارد را می‌توان از پیامدهای اختلال ناشی از خشک‌سالی هواشناسی بر سیستم هیدرولوژیکی قلمداد نمود (Tallaksen and van Lanen, 2004; Mishra and Singh, 2010; Sheffield and Wood, 2011; Seneviratn et al, 2012). استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی<sup>۱</sup> براساس مقدار بارش، یکی از گسترده‌ترین روش‌ها در مطالعات هیدرولوژیکی است (برای نمونه، استفاده از شاخص بارش استاندارد شده یا SPI<sup>۲</sup>) چرا که سری‌های زمانی ثبت شده بارش، در بسیاری از مناطق مجهز به ایستگاه‌های هواشناسی، دارای پوشش فضایی (مکانی) مناسب و دوره‌های مشاهده طولانی (پوشش زمانی) مورد

نیاز برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی هستند. این شاخص‌ها، درک اطلاعات مربوط به متغیرهای هواشناسی را آسان‌تر نموده و دانشمندان را قادر به ارزیابی کمی ناهنجاری‌های آب و هوایی از لحاظ شدت، مدت زمان، فراوانی و وسعت گستره‌ی خشک‌سالی می‌کند (Wilhite et al, 2000). شاخص‌های خشک‌سالی برای شناسایی و نظارت بر خشک‌سالی استفاده می‌شوند (Steinmann et al, 2005). چهار نوع خشک‌سالی شناخته شده عبارتند از: ۱- هواشناسی؛ ۲- کشاورزی؛ ۳- هیدرولوژیکی؛ ۴- اجتماعی-اقتصادی (Wilhite and Glantz, 1985)؛ جامعه هواشناسان آمریکا<sup>۳</sup>، ۲۰۱۳). میشرا و سینگ (Mishra and Singh, 2010) پیشنهاد کردند که کمبود آب زیرزمینی نسبت به متوسط بلند مدت آن، به عنوان نوعی از خشک‌سالی، علاوه بر چهار نوع ذکر شده، طبقه‌بندی شود. تورنتوایت (Thorntwaite, 1947)، معتقد است که خشک‌سالی در هر منطقه، تنها با کمبود بارندگی تعریف نمی‌شود، بلکه مقدار تبخیر-تعرق نیز باید در مطالعات مربوط به خشک‌سالی، لحاظ گردد. برپایه این نظر، در تحقیق حاضر، نوعی از شاخص خشک‌سالی، به نام شاخص اکتشاف خشکی (RDI<sup>۴</sup>) که توسط ساکیریس و ونجلیس (Tsakiris and Vangelis, 2005) ابداع شده، مورد استفاده قرار گرفت. در این شاخص، برای محاسبه شدت‌های مختلف خشک‌سالی به صورت توأمان از آمار بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده می‌شود (Tsakiris and Vangelis, 2005). به منظور ارزیابی وضعیت مخزن آب زیرزمینی (آبخوان) و تغییرات تراز آن، از شاخصی به نام شاخص خشک‌سالی منابع آب زیرزمینی یا GRI<sup>۵</sup> استفاده شد که از نتایج آن می‌توان جهت

منابع آب زیرزمینی استان هرمزگان براساس شاخص‌های RDI و SPI مورد مطالعه قرار گرفته بود، نشان دهنده تأثیرگذارتر بودن خشک‌سالی دوره‌های بلند مدت (۲۴ ماهه) بر منابع آب زیرزمینی با استناد به وجود همبستگی بین دشت‌های استان بوده است. زینالی و همکاران (۱۳۹۵)، اثرات خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در دشت مرنده مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که همبستگی پیرسون بین خشک‌سالی هواشناسی و سطح آب زیرزمینی در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار است و منابع آب‌های زیرزمینی را با تأخیر پنج ماهه تحت تأثیر قرار می‌دهد. عباسی و همکاران (۱۳۹۵)، تغییرات زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و رابطه آن با خشک‌سالی هواشناسی را مورد بررسی قرار دادند و اعلام نمودند که بیش‌ترین مقادیر ضریب همبستگی بین دو شاخص SPI و شاخص خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی GRI، بدون اعمال تأخیر زمانی، برای مقیاس ۲۴ و ۴۸ ماهه است. ارزیابی تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در دشت سروستان استان فارس توسط بهزادی کریمی و امیدوار در سال ۱۳۹۶ انجام شد و نتایج بررسی آنها نشانگر تأثیر تغییر در مقدار بارش‌ها (شاخص خشک‌سالی) بر افت سطح آب زیرزمینی، کم‌تر از تأثیر برداشت‌های بی‌رویه (از چاه‌های مجاز و غیر مجاز) می‌باشد. غفاری و همکاران (۱۳۹۷)، به مقایسه‌ی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی دشت‌های اصفهان - برخوار، نجف‌آباد و چادگان پرداختند و اعلام نمودند که وجود همبستگی پایین بین مقدار بارش و افت سطح آب زیرزمینی،

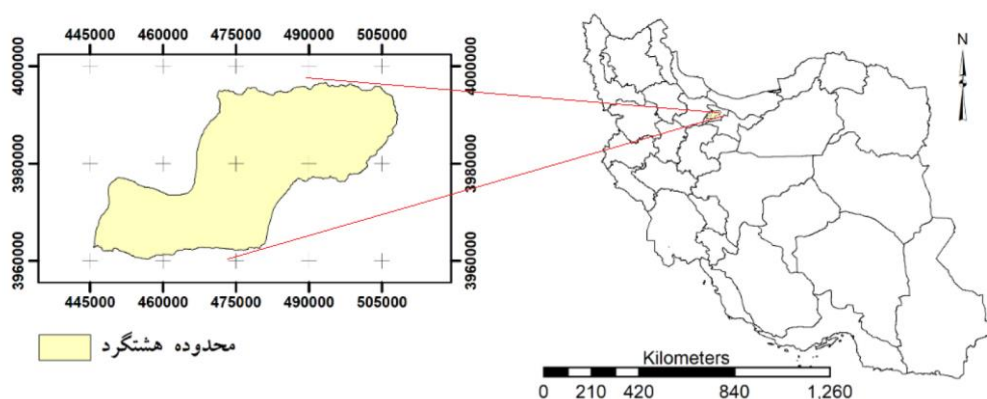
پیش‌بینی اهداف و تصمیم‌گیری‌های مدیریت آبخوان استفاده کرد (بهزادی کریمی و امیدوار، ۱۳۹۶). محققین مختلف، اهمیت ارزیابی رابطه بین بارندگی و رواناب جاری در رودخانه‌ها با سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی مورد تأکید قرار داده‌اند (Chen et al, 2002; Jan et al, 2007; Panda et al, 2007; Wanders et al, 2010; Tirogo et al, 2016). طبق بررسی پاندا و همکاران (Panda et al, 2007)، ارتباط بین بارش باران‌های موسمی و نوسانات آب زیرزمینی مورد سنجش قرار گرفت که نتیجه آن تأثیر کاهش میزان بارش‌ها، در شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی بوده است. رابطه بین نوسانات سطح آب زیرزمینی و شدت بارندگی نیز برای یک چاه منتخب در تایوان مرکزی، توسط جن و همکاران (Jan et al, 2007)، مورد بررسی قرار گرفت. فیوریلو و گوآدانو (Fiorillo and Guadagno, 2010)، رابطه بین خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی و خشک‌سالی هواشناسی را با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) مطالعه کردند. لی و رادل (Li and Rodell, 2014)، وجود همبستگی قوی منطقه‌ای بین مدل مبتنی بر سطح اراضی حوضه و مدل شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی مبتنی بر داده‌های سطح ایستابی را تعیین نمودند. نتایج این بررسی نشانگر همبستگی بالا بین هر دو شاخص یاد شده با مقادیر SPI در مقیاس ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه بوده است. تیروگو و همکاران (Tirogo et al, 2016)، واکنش آب زیرزمینی به بارش را برای منطقه بورکینافاسو، غرب آفریقا گزارش نمودند. نوحه‌گر و حیدرزاده (۲۰۱۶)، به بررسی تأثیرات خشک‌سالی هواشناسی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در استان هرمزگان پرداختند. نتایج این تحقیق که در آن تأثیر خشک‌سالی هواشناسی بر

دشت، از دو شاخص RDI (شاخص خشک‌سالی هواشناسی) و SGLI (شاخص خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی) استفاده و اثرات خشک‌سالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. قابل ذکر است که برای ارزیابی روند احتمالی موجود در سری زمانی نشان‌دهنده خشک‌سالی‌ها (که از شاخص‌های نام‌برده محاسبه می‌شود) از آزمون غیر پارامتری Mann-Kendall استفاده شده و تأثیر تغییرات متغیرهای هواشناسی اخیر بر میزان تراز (سطح) سفره‌های آب زیرزمینی (که هدف اصلی این پژوهش می‌باشد) با فرض ثابت بودن برداشت‌ها در طی دوره زمانی موردنظر، با کمک یک روش آماری (وایازی خطی) مطالعه و بررسی شده است.

#### منطقه مورد مطالعه

دشت هشتگرد با مساحت ۱۱۷۰ کیلومتر مربع، یکی از زیر حوضه‌های اصلی حوضه آبریز دریاچه نمک می‌باشد که در شمال حوضه مزبور و در بخش غربی استان البرز قرار دارد (شکل ۱). این دشت از شمال به حوضه آبریز درجه دو سفیدرود بزرگ، از جنوب به محدوده اشتهارد، از غرب به محدوده قزوین و از شرق به محدوده تهران-کرج، محدود شده است. قابل ذکر است که موقعیت چاه‌های منتخب، در شکل ۲ نشان داده شده است. در مجموع از اطلاعات سطح ایستابی در هشت چاه پیرومتری موجود در دشت و آمار هواشناسی یک ایستگاه سینوپتیک داخل منطقه (هشتگرد) و یک ایستگاه در خارج از منطقه (ایستگاه قزوین) استفاده شد (شهریور ماه ۱۳۹۷ به‌عنوان پایان دوره زمانی ۲۵ ساله منتخب، برای انجام تحقیق در نظر گرفته شد) (جدول ۱ و ۲).

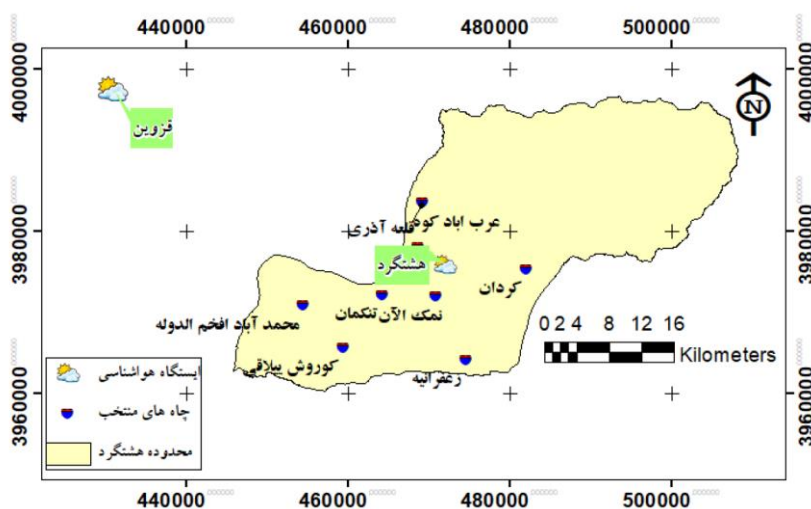
به دلیل عوامل انسانی (افزایش برداشت‌ها) است که مشابه نتیجه تحقیق قاعدی و آگاه (۱۳۹۷) در شهرستان داراب استان فارس بود. لیلاروبن و همکاران (Leelaruban et al, 2017)، رابطه بین شاخص‌های خشک‌سالی و سطح آب زیرزمینی را در ایالات متحده تحقیق نمودند. نتایج تحقیقات آنها تأیید کرد که SPI در مقیاس ۲۴ ماهه، بهترین نتیجه را در مقایسه با سطح آب‌های زیرزمینی در طی خشک‌سالی و برای بیش‌تر چاه‌ها مورد مطالعه، نشان می‌دهد. بلومفیلد و همکاران (Bloomfield et al, 2019)، به بررسی تغییرات دمایی ناشی رفتار انسان‌ها بر مقدار تراز ایستابی پرداخته و از شاخص SPI و SGLI (آب زیرزمینی) پرداختند. نتایج بررسی آنها تأیید کننده افزایش احتمال وقوع خشک‌سالی و کاهش تراز ایستابی در اثر فعالیت‌های انسانی بود. منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر (دشت هشتگرد)، به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی، از پدیده خشک‌سالی مصون نبوده است. نزدیکی شهر هشتگرد به مراکز جمعیتی بزرگی همچون شهرهای تهران و کرج و هجوم سرریز جمعیتی این دو کلان‌شهر به منطقه هشتگرد باعث شده تا منابع اصلی تأمین آب موجود (چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق) دستخوش تغییرات کمی و کیفی قرار بگیرند. در این تحقیق در ابتدا به ارائه نتیجه مطالعات سایر محققین در زمینه موضوعات مرتبط با نوسانات سطح آب زیرزمینی منطقه پرداخته شده و در ادامه با بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی، ارتباط بین خشک‌سالی در چاه‌های انتخابی (خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی) و خشک‌سالی هواشناسی مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت، با هدف تعیین وضعیت و ویژگی‌های خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناسی این



شکل ۱: موقعیت دشت هشتگرد در ایران و استان البرز

می‌باشند. در قسمت غربی منطقه نیز، چاه محمدآباد قرار دارد و کم‌ترین تراز ایستابی نیز در بازه بلند مدت، برای این چاه ثبت شده است (جدول ۲).

چاه‌های منتخب شکل ۲ در تمامی بخش‌های آبخوان دشت هشتگرد پراکنده هستند و در مرتفع‌ترین بخش‌های منطقه، چاه کردان و عرب‌آباد قرار گرفته است که دارای بیش‌ترین تراز آب زیرزمینی نسبت به سطح مبنا (سنگ کف)



شکل ۲: موقعیت چاه‌های منتخب و ایستگاه هواشناسی هشتگرد در محدوده مورد مطالعه

انتخاب چاه‌های دارای داده‌های بلند مدت، داده‌های مفقود کم‌تر و توزیع فضایی و زمانی مناسب، پارامترهای بارندگی ماهانه، دما (کمینه و بیشینه)، باد، رطوبت نسبی و داده‌های ساعت آفتابی برای ۲۵ سال از ایستگاه هواشناسی قزوین (منتهی به شهریور ۱۳۹۷) که نزدیک‌ترین

آب و هوای منطقه در بخش‌های شمالی نیمه‌مرطوب است و به تدریج به سوی جنوب منطقه، با کاهش ارتفاع، به نیمه‌خشک تمایل می‌یابد. طبق روش دِمارتون<sup>۶</sup> (۱۹۲۶)، آب و هوای منطقه (اقلیم) عمدتاً نیمه‌خشک می‌باشد. در این مطالعه با در نظر گرفتن معیارهای مختلفی نظیر

ایستگاه هشتگرد (۱۳ سال)، اطلاعات ایستگاه هواشناسی قزوین (این ایستگاه در فاصله ۷۰ کیلومتری مرکز دشت هشتگرد واقع شده است). به سبب دقت و طولانی بودن دوره زمانی آمار ثبت شده، برای ادامه مراحل تحقیق استفاده شد. جدول ۱ مشخصه‌های اصلی ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

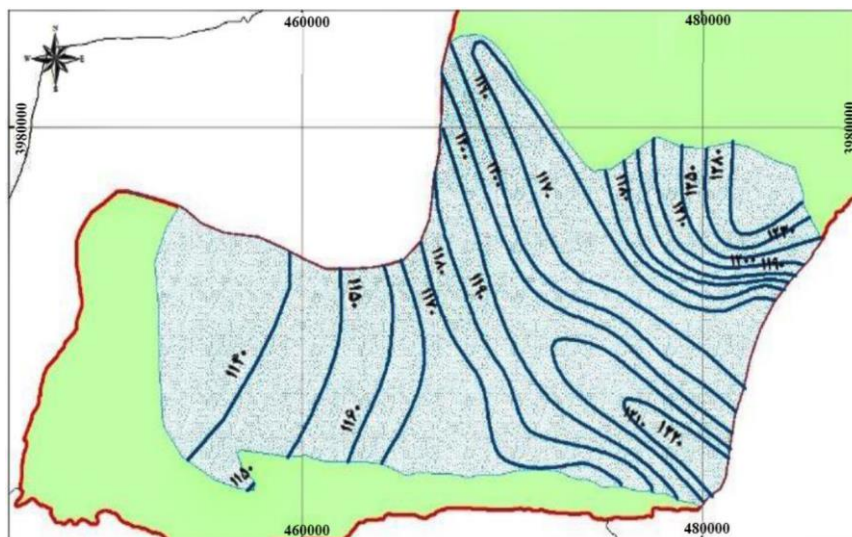
ایستگاه هواشناسی به محدوده مورد مطالعه است و اطلاعات مربوط به تراز آب در چاه‌های منتخب در دشت، از شرکت آب منطقه‌ای البرز تهیه شد. بررسی مقادیر بارش و دما در دو ایستگاه هواشناسی هشتگرد و قزوین برای دوره زمانی مشترک، نشان‌دهنده همبستگی بالای این مقادیر (به ترتیب برابر با ۹۹ و ۹۸ درصد) می‌باشد، از این جهت، با توجه به طولانی نبودن آمار ثبت شده در

جدول ۱: مشخصات ایستگاه هواشناسی قزوین

نام ایستگاه	مختصات (طول و عرض)	ارتفاع (m)	دمای سالانه (c)	بارش سالانه (mm)
قزوین	۳۶/۲۵ و ۵۰/۰۵	۱۸۱۵	۱۴/۳۴	۳۴۱

دمای کشور ثبت شده است. شیب دشت از قسمت‌های شمالی به سمت جنوبی کاهش می‌یابد و جهت جریان‌های سطحی و زیرزمینی از روند شرقی - غربی تبعیت می‌کند (شکل ۳).

متوسط بارش منطقه، بیش‌تر از متوسط بارش‌های کشور (حدود ۲۴۰ میلی‌متر) است (سامانه شرکت مدیریت منابع آب ایران<sup>۱</sup>) و دمای متوسط آن نیز، حدود ۱۳ درجه می‌باشد که کم‌تر از متوسط



شکل ۳: نقشه پیزومتری آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه (هشتگرد)

مناسبی را برای تغذیه‌ی ایجاد کرده است. با حرکت از قسمت‌های شمالی دشت به سمت جنوب منطقه مطالعاتی، رسوبات دانه‌ریزتر شده و

### مواد و روش‌ها

به‌طور کلی، رسوبات درشت‌دانه در شمال دشت به‌خصوص مخروط‌افکنه‌ی رودخانه کردان، مکان

مشخصات چاه‌های انتخاب شده و مقادیر تراز ایستایی را نشان می‌دهد. در این جدول، تراز آب نسبت به سطح مبنا و عمق آب نسبت به سطح زمین، سنجیده شده است.

از عمق آبخوان کاسته می‌شود. در نیمه جنوبی منطقه، آبخوان چندلایه و تحت فشار شکل گرفته که با توجه به رسوبات دانه‌ریزتر نسبت به نیمه شمالی، آبدهی چاه‌ها کم‌تر از قسمت‌های دیگر می‌باشد (شمشکی و همکاران، ۱۳۹۰). جدول ۲

جدول ۲: مشخصات چاه‌های منتخب

نام چاه	مختصات UTM (متر)	متوسط تراز آب زیرزمینی (m)	حداقل عمق آب زیرزمینی (m)	حداکثر عمق آب زیرزمینی (m)
تنکمان	۴۶۴۳۱۹/۳۹۷۲۱۲۵	۱۱۸۸/۹۰	۲۵/۲۶	۲۵/۷۳
زعفرانیه	۴۷۴۵۷۲/۳۹۶۴۱۱۹	۱۲۴۰/۱۴	۴۵/۰۸	۴۶/۵۵
عرب آباد	۴۶۹۲۷۳/۲۹۸۳۵۱۹	۱۳۱۳/۵۵	۱۱۷/۲۴	۱۱۸/۰۶
قلعه آذری	۴۶۸۶۴۵/۳۹۷۸۰۱۳	۱۲۲۵/۵۱	۱۸/۳۳	۱۸/۵۳
کردان	۴۸۲۰۶۹/۳۹۷۵۳۱۵	۱۳۸۰/۴۴	۷۳/۴۲	۷۷/۶۳
کوروش بیلاقی	۴۵۹۳۵۴/۳۹۶۵۶۴۰	۱۱۶۸/۷۷	۱۲/۲۲	۱۲/۳۸
محمد آباد	۴۵۴۳۹۰/۳۹۷۰۸۱۵	۱۱۴۹/۴۳	۸/۵	۸/۷۴
نمک آلان	۴۷۰۹۴۳/۳۹۷۱۹۱۸	۱۲۲۰/۹۵	۷/۵۷	۷/۷۰

در رابطه فوق،  $PET_{ij}$  و  $P_{ij}$  به ترتیب مقدار تبخیر-تعرق و بارش در ماه  $i$  از سال  $j$  می‌باشد. در ادامه با میانگین‌گیری از سری زمانی  $\alpha_0$  ها، مقدار نرمال شده  $RDI$  ها که با  $RDI_n$  نمایش داده می‌شود، محاسبه شد (رابطه ۲).

رابطه ۲

$$RDI_n^i = \frac{\alpha_0^i}{\alpha_0} - 1$$

لازم به ذکر است که شروع ماه محاسبه معمولاً از اکتبر (مهر) می‌باشد که این ماه برای کشورهای متأثر از آب و هوای مدیترانه‌ای معمول است. با توجه به اینکه که  $RDI$  استاندارد و  $SPI$  ابداع شده توسط مک کی و همکاران (Mckee et al, 1993)، به شیوه‌ای مشابه عمل می‌کنند، جدول کلاسه‌ای تقسیم‌بندی مقادیر  $RDI$  و  $SPI$  یکسان است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Shah et al, 2013). به همین جهت، مقدار  $RDI_{st}$  براساس رابطه ۳ محاسبه شد.

### شاخص اکتشاف خشک‌سالی ( $RDI^1$ )

$RDI$  می‌تواند به‌عنوان یک شاخص هواشناسی عمومی برای ارزیابی خشک‌سالی مورد استفاده قرار گیرد (Tsakiris and Vangelis, 2005). این شاخص را می‌توان براساس برآزش تابع مناسب بر روی سری زمانی نسبت بارش به تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) برای هر دوره زمانی دلخواه (مانند ماهانه یا سالانه) محاسبه نمود که در گام اول، باید رابطه ۱ (به‌عنوان  $RDI$  اولیه یا  $\alpha_0$ ) محاسبه شود. در این رابطه، مقدار PET با کمک فرمول پنمن-مانتیت که یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای محاسبه PET در شرایط مختلف آب و هوایی است، تعیین گردید

(Vangelis et al, 2013; Jensen et al, 1990).

رابطه ۱

$$\alpha_0^i = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}}$$

دست می‌آید. قابل ذکر است که مخرج کسر نیز، مقدار انحراف معیار سری‌های لگاریتمی محاسبه شده است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، مقادیر  $RDI_{st}$  را می‌توان با آستانه‌های مشابه با روش SPI مقایسه کرد (جدول ۳).

رابطه ۳)

$$RDI_{st k}^i = \frac{y_k^i - \bar{y}_k^i}{\sigma y_k^i}$$

در رابطه فوق، مقادیر  $y_k^i$  با لگاریتم‌گیری از مقادیر اولیه محاسبه می‌شود و پس از محاسبه لگاریتم‌ها، با میانگین‌گیری از آنها، مقدار  $\bar{y}_k^i$  به

جدول ۳: کلاس‌بندی مقادیر شاخص براساس  $RDI_{st}$  و SPI (Thomas et al, 2016).

مقادیر شاخص‌ها	شماره کلاس
۲ و بیش‌تر	۱ ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	۲ ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	۳ ترسالی متوسط
+۰/۹۹ تا -۰/۹۹	۴ نرمال / نزدیک نرمال
-۱ تا -۱/۵	۵ خشک‌سالی متوسط
-۱ تا -۱/۹۹	۶ خشک‌سالی شدید
-۲ و کم‌تر	۷ خشک‌سالی بسیار شدید

آب زیرزمینی در ماه‌های مورد بررسی و  $\sigma_{wt}$  انحراف استاندارد سطح آب زیرزمینی است. تست ناپارامتری من-کندال ( $MK^{11}$ -Test) تست من-کندال به‌طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل روند سری هواشناسی و آب‌شناسی استفاده می‌شود (Lettenmaier, 1994). علاوه بر این، روش‌های غیر پارامتری مانند MK، بنا به گفته تورگای و ارکان (Turgay and Ercan, 2005)، در مقایسه با روش‌های دیگر آزمون‌های روند، تأثیر کم‌تری از داده‌های پرت دارند. فرض‌های آماری در تست MK به شرح زیر است:

$H_0$ : هیچ روندی در جمعیت مورد آزمون وجود ندارد. و  $H_1$ : روند در سری مورد آزمون وجود دارد. در این مطالعه، آزمون فوق، بر روی سری داده‌های SGLI و براساس روش انجام شده توسط علی‌پور و مکیان (۱۳۹۷)، محاسبه شد. لازم به ذکر است که مقادیر آزمون MK در سطوح مختلف معنی‌داری مقدار احتمال رخداد روند را بررسی

شاخص سطح (تراز) آب زیرزمینی استاندارد شده ( $SGLI^1$ ) شاخص سطح (تراز) آب زیرزمینی، توسط مندیسینو و همکاران (Mendicino et al, 2008)، برای تعیین میزان کسری منابع آب‌های زیرزمینی و ارزیابی وضعیت خشک‌سالی، ابداع گردید. روش محاسبه این شاخص مشابه SPI بوده و به همین جهت، همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، کلاس‌بندی مقادیر خشک‌سالی / ترسالی به دست آمده نیز، طبق جدول SPI انجام می‌شود (Wanders et al, 2010). مقادیر SGLI برای آبخوان دشت هشتگرد توسط رابطه ۴ محاسبه شد:

رابطه ۴)

$$SGLI = \frac{W_{t(m,n)} - \bar{W}_t}{\sigma_{W_t}}$$

در رابطه ۴، SGLI شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی،  $W_t(m,n)$  مقدار سطح آب زیرزمینی در سال  $m$  و ماه  $n$  می‌باشد.  $\bar{W}_t$  میانگین سطح



تبخیر-تعرق) می‌باشد. به هر میزان که طول سری زمانی مورد بررسی بیش‌تر باشد، دقت محاسبه شاخص نیز افزایش خواهد داشت. در مطالعه حاضر، مقادیر شاخص و مشخصه‌های خشک‌سالی آب زیرزمینی و خشک‌سالی هواشناسی تعیین شد. با ارزیابی روند موجود در سری زمانی مقادیر خشک‌سالی آب زیرزمینی (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) نتیجه شد که مقدار SGLI در تمام چاه‌ها دارای روند منفی (روند نزولی) است. زیرا در هر چاه بر روی سری زمانی مقادیر شاخص، آزمون روند اعمال شد و مقدار آن به‌طور متوسط برابر با  $-۲/۱۶$  بدست آمد. بنابراین، برای تمام چاه‌ها روند افزایشی در مورد وقوع رخداد خشک‌سالی وجود دارد.

#### -نتایج بررسی SGLI

سری زمانی SGLI و متوسط تراز ایستابی ماهانه برای هشت چاه منتخب، محاسبه شد (نمودار تغییرات شاخص برای هر یک از چاه‌ها، در شکل ۴ نشان داده شده است) شکل‌های ارائه شده، به ترتیب حروف الفبا (نام چاه‌ها) از بالا به پایین برای چاه‌های معرفی شده در جدول ۲، ترسیم شده‌اند. دوره‌های زیر صفر و خشک‌سالی زیرزمینی با رنگ قرمز نشان داده شده است که این دوره‌ها با مقادیر منفی SGLI (که کوچک‌تر از ۱- هستند) مشخص می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، رفتار سری SGLI مطابق با سطح آب زیرزمینی است. عموماً در چند سال اخیر، مقادیر SGLI زیر صفر بوده که به معنای کاهش سطح آب زیرزمینی می‌باشد. شدیدترین خشک‌سالی‌های محاسبه شده در منطقه، از سال ۱۳۹۳ و بعد از آن رخ داده است. مطابق بررسی‌ها، در سال‌های اخیر، به جز در چاه «محمدآباد» و «تنکمان» که شدت خشک‌سالی

می‌کند و علامت آن نیز، نشان‌دهنده جهت و هم‌چنین میزان بزرگی روند است.

#### ضریب همبستگی آب زیرزمینی و شاخص خشک‌سالی هواشناسی

برای بررسی اثر احتمالی خشک‌سالی هواشناسی (کاهش بارش‌ها، همراه با افزایش تبخیر-تعرق) بر منابع آب زیرزمینی، ضریب همبستگی بین RDI در مقیاس زمانی مختلف و تراز ایستابی، تعیین گردید. ضریب همبستگی بین دو متغیر مورد استفاده، از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Khan et al, 2008).

رابطه ۵)

$$\rho_{RDI, GL} = \frac{Cov(RDI, GL)}{\rho_{RDI} \cdot \rho_{GL}}$$

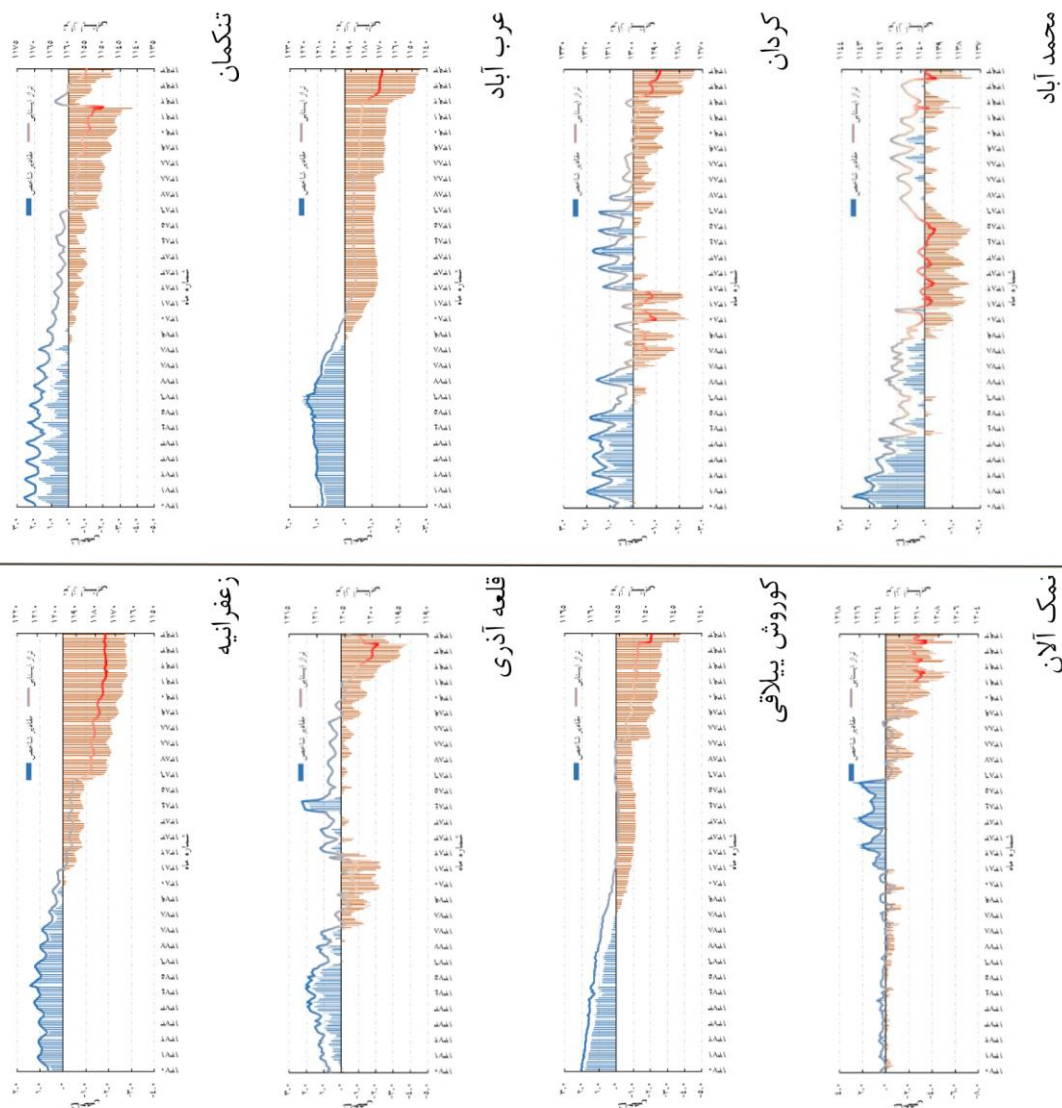
در رابطه فوق  $\rho_{RDI, GL}$  همبستگی بین شاخص مورد محاسبه و تراز ایستابی است. مخرج کسر برابر با انحراف معیار مقادیر شاخص و تراز ایستابی می‌باشد. صورت کسر نیز، کورلیانس بین این دو متغیر می‌باشد. قابل ذکر است که ضریب همبستگی بین متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 24 و پس از پردازش اولیه داده‌ها در Excel 2016 محاسبه شد. نهایتاً بین تراز متوسط سطح ایستابی به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص RDI به‌عنوان متغیر مستقل، رابطه رگرسیون خطی ساده<sup>۱۲</sup>، طی دوره آماری موردنظر، برقرار شد تا مشخص شود که چند درصد از واریانس سطح ایستابی، متأثر از خشک‌سالی هواشناسی و چند درصد سهم عوامل دیگر (مانند برداشت‌ها) می‌باشد.

#### نتایج و بحث

شاخص خشک‌سالی، عدد واحدی است که متأثر از متغیرهای بسیاری (مانند نسبت بارش به

کاهش مقدار SGLI و همچنین، افزایش تعدد سال‌های باقی‌مانده در خشک‌سالی است.

در آنها کاهش یافته است، برای بسیاری از چاه‌ها، شدت خشک‌سالی و وقوع آن افزایش داشته است. افزایش شدت وقوع خشک‌سالی‌ها، معادل با



شکل ۴: سری زمانی مقادیر SGLI برای ۸ چاه منتخب

به ذکر است که شماره کلاسه خشک‌سالی مطابق جدول ۲ می‌باشد.

برای دوره مورد مطالعه، تعداد وقوع هر نوع خشک‌سالی محاسبه شده است و مقادیر هر کلاس خشکی را می‌توان در شکل ۵ مشاهده نمود. لازم



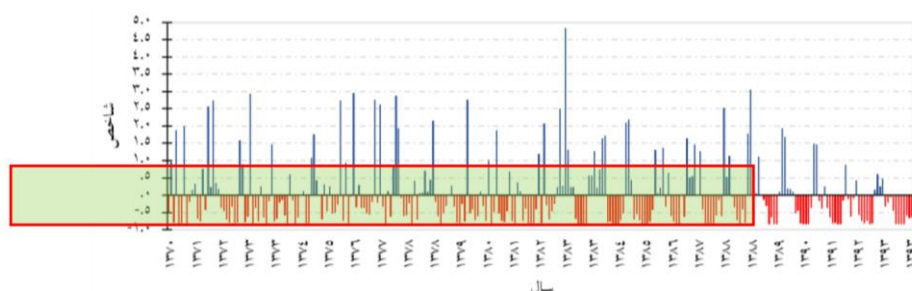
شکل ۵: تعداد رخداد هر کلاس خشکی محاسبه شده با SGLI

چاه کوروش ییلاقی با ۵۶ رویداد خشک‌سالی، از لحاظ کاهش سطح آب، در رتبه دوم قرار دارد. در شکل ۵، رفتار خشک‌سالی افزایشی این چاه قابل مشاهده است.

#### نتایج بررسی RDI

شکل ۶، سری زمانی محاسبه شده RDI را برای ایستگاه سینوپتیک قزوین نشان می‌دهد. این مقادیر در مقیاس سالانه محاسبه شده و طبقه‌بندی کلاس‌های خشک‌سالی نیز براساس آستانه نرمال بین -۱ تا +۱، انجام شد و در شکل زیر، محدوده نمایش داده شده در کادر قرمز، محدوده نرمال شاخص RDI می‌باشد.

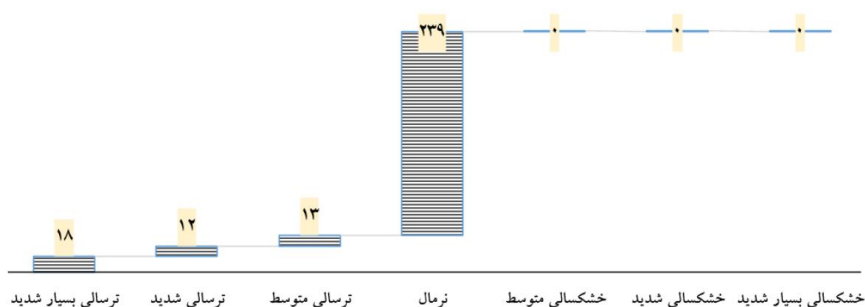
در ارزیابی تعداد رخداد در کلاس‌های خشک‌سالی/ ترسالی، براساس شکل ۵، به استثناء چاه عرب‌آباد که به‌طور کلی در کلاس ۵ (خشک‌سالی متوسط) قرار دارد، تمام چاه‌های مدنظر در تحقیق اخیر، در کلاس ۴ که به شرایط نرمال و نزدیک به نرمال اشاره دارد قرار می‌گیرند. در میان این چاه‌ها، چاه زعفرانیه دارای بیش‌ترین میزان خشک‌سالی در سال‌های اخیر بوده و در شرایط وخیم‌تری نسبت به سایر چاه‌های منتخب در منطقه مورد مطالعه قرار دارد (با تعداد ۷۴ رویداد شدید خشک‌سالی در کلاس ۷ و خشک‌سالی بسیار شدید). پس از چاه زعفرانیه،



شکل ۶: مقادیر RDI براساس آمار ایستگاه هواشناسی قزوین

(Yaduvanshi et al, 2015). در این طبقه‌بندی، مقادیر کمتر از  $-0/49$  در کلاس خشک‌سالی ملایم (ضعیف) قرار دارد که در مطالعه حاضر، این کلاس‌بندی به کار گرفته نشد. مقادیر متمایل به ۱- نشان می‌دهد که در صورت کاهش بارندگی یا افزایش تبخیر-تعرق، ممکن است منطقه هشتگرد، شرایط خشک‌سالی هواشناسی را براساس روش RDI تجربه کند. تعداد دوره‌های نرمال و ترسالی‌های مختلف منطقه (در مقیاس ماهانه)، در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد.

براساس نمودار فوق، در طبقه‌بندی مورد استفاده، می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در طول دوره‌ی مورد مطالعه، در مقیاس سالانه، منطقه مطالعاتی موردنظر، با خشک‌سالی مواجه نبوده و به عبارت دیگر، نسبت بارش به مقادیر ET همیشه بالاتر از میانگین بلند مدت آن قرار داشته است. البته می‌توان بیان نمود که در بازه نرمال شاخص، عموماً مقادیر RDI در محدوده کمتر از صفر (که معروف به دوره نزدیک به نرمال است) قرار دارد. قابل ذکر است که در برخی منابع، آستانه نرمال را بین  $-0/5$  تا  $+0/5$  در نظر می‌گیرند



شکل ۷: تعداد رخداد‌های هر کلاس خشک و تر

یک از کلاس‌های خشکی قرار نمی‌گیرد (مقداری کمتر از ۱- ندارد).

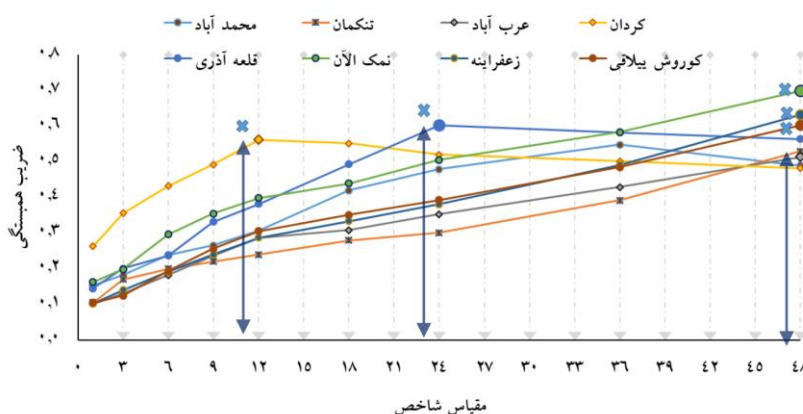
#### همبستگی بین RDI و تراز ایستابی

به منظور درک بهتر پاسخ منطقه به ویژگی‌های خشک‌سالی (مشخصه‌های خشکی)، لازم است همبستگی شاخص و آب زیرزمینی را در

تعداد دوره‌های نرمال در طول سال‌های مورد مطالعه، برابر با ۲۳۹ ماه است و سپس دوره بسیار مرطوب با ۱۸ ماه (RDI بیش‌تر از ۲+) در رتبه بعدی واقع شده است. با توجه به نتایج، برای دوره مورد مطالعه، طبق کلاس‌بندی شاخص خشک‌سالی، ایستگاه هواشناسی قزوین در هیچ

بین RDI و تراز آب زیرزمینی در دشت هشتگرد برای مقیاس ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه است. با این حال، متوسط تراز ایستابی در چاه نمک آلان، بالاترین همبستگی را با شاخص در دوره ۴۸ ماهه (۰/۷) دارد و کمترین مقدار همبستگی بین RDI و آب زیرزمینی، در تمامی منطقه مطالعاتی، برای مقیاس یک و سه ماهه است. برخی مطالعات در دشت هشتگرد، تایید کننده پایین بودن ضریب همبستگی می باشد که دلیل آن ماهیت کمی شاخصها و فاصله چاهها از ایستگاه هواشناسی مورد استفاده بود (بختیاری عنایت و همکاران، ۱۳۹۴).

مقیاسهای مختلف کوتاه مدت و بلند مدت، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا همبستگی پیرسون بین تراز ایستابی و RDI برای دورههای تجمعی (مانند ۱ ماه، ۲ ماه، ... و تا ۴۸ ماه) محاسبه گردید به منظور درک بهتر مقادیر داخل جدول برای چاههای منتخب، این مقادیر به صورت نمودار در شکل ۸ ترسیم شد. در هر چاه، حداکثر مقادیر همبستگی قابل مشاهده بوده و بیشترین همبستگی نیز، توسط علامت X مشخص گردیده است. در نمودارهای شکل ۸، دوره زمانی مربوط به بیشترین همبستگی، توسط فلش عمودی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، می توان دریافت که بیشترین ضریب همبستگی



شکل ۸: همبستگی بین RDI و SGLI به عنوان تابعی از مقیاس زمانی RDI

تاثیرگذارتر است. یعنی اگر یک رخداد خشکسالی رخ دهد، احتمال دارد در ۴ سال آینده، اثر این رخداد در تراز آب زیرزمینی نمایان شود. با توجه به نتایج به دست آمده، بین تراز متوسط سطح ایستابی در هر چاه به عنوان متغیر وابسته و  $RDI_{48}$  ماهه به عنوان متغیر مستقل، رابطه وایزی خطی ساده (رگرسیون خطی) برقرار شد. به عنوان نمونه، معادله رگرسیون خطی بین

همبستگی ۰/۵۶ بین RDI ۱۲ ماهه و متوسط تراز ایستابی در چاه کردان، نشان دهنده واکنش سریع این چاه و منطقه تحت تأثیر آن، نسبت به خشکی هواشناسی (در مقایسه با سایر چاهها) است. به عنوان یک نتیجه کلی، بیشترین همبستگی در تمام چاهها مربوط به مقیاس بلند مدت (۴۸ ماهه) است که نشان می دهد که اثر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی آبهای زیرزمینی، در دورههای بلند مدت، مهم تر و

بر متغیرهای آب و هوایی) بر کاهش سطح ایستابی در آبخوان را می‌توان برداشت‌های بی‌رویه از چاه‌های مجاز و غیر مجاز آب زیرزمینی، توسط ساکنین و صنایع منطقه برای مصارف مختلفی مانند شرب، کشاورزی و صنعت دانست.

### نتیجه‌گیری

تغذیه آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ناشی از اثر متقابل محیط، میزان بارش و تبخیر، ساختار زمین‌شناسی و پوشش گیاهی در محدوده وسیعی از زمان و مکان می‌باشد. در این مطالعه، ضمن بررسی مشخصه‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی، رابطه بین خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی و خشک‌سالی هواشناسی محاسبه گردید (داده‌های سطح آب زیرزمینی از چاه‌هایی (در مجموع هشت چاه) با حداقل نواقص در سری آماری و همچنین، پراکندگی مناسب در منطقه تهیه شد) ضریب همبستگی شاخص RDI و سطح آب‌های زیرزمینی برای دوره آماری ۲۵ ساله (منتهی به شهریور ۱۳۹۷) محاسبه و برای تعیین اینکه کدام مقیاس زمانی برای ارزیابی پاسخ آب‌های زیرزمینی به خشک‌سالی هواشناسی مناسب‌تر می‌باشد، استفاده شد. نتایج نشان داد در منطقه مورد مطالعه، خشک‌سالی رخ نداده و در سال‌های اخیر، مقدار شاخص در محدوده مشکوک به وقوع دوره خشک و در آستانه خشک‌سالی خفیف (مقادیر کوچک‌تر از ۱-) قرار دارد. بررسی متوسط تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در چاه‌های منتخب، نشان داد که کاهش سطح دسترسی به آب دارای روند افزایشی بوده و سفره آب زیرزمینی در طول دوره آماری مورد بررسی در چاه‌های منتخب، افت محسوسی داشته است.

این دو متغیر در چاه نمک‌آلان، به‌صورت رابطه ۶ است:

رابطه ۶)

$$D_y = 1213.5 + 2.23RDI_{48}$$

در رابطه فوق،  $D_y$  میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در سال  $y$  و  $RDI_{48}$  شاخص خشک‌سالی می‌باشد. قابل ذکر است که طبق خروجی به‌دست آمده در SPSS، مقدار آماره sig برای تراز متوسط سطح ایستابی آب، کمتر از ۰/۰۵ است که نشان‌دهنده وجود رابطه خطی معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد در چاه مورد مطالعه است. همچنین، مقدار ضریب تبیین در مدل رگرسیونی فوق، برابر با ۴۷ درصد بود ( $R^2=0/47$ ) که بیانگر میزان تأثیر  $RDI_{48}$  بر تراز متوسط آب زیرزمینی می‌باشد. یعنی ۴۷ درصد از واریانس تراز متوسط آب در چاه مذکور، تحت تأثیر خشک‌سالی می‌باشد و مابقی (یعنی ۵۳ درصد) نیز سهم سایر عوامل موثر بر سطح ایستابی است. اگرچه این ضریب تبیین عدد بالایی نمی‌باشد، اما می‌توان این‌گونه برداشت کرد که اگر روند افزایش دما و کاهش بارش‌ها در منطقه ادامه داشته باشد، باید انتظار خروج مقادیر شاخص RDI از آستانه نرمال و کاهش مقادیر آن به سمت دوره‌های خشک‌سالی (مقادیر کمتر از ۱-) باشیم. قابل ذکر است که پایین بودن مقدار همبستگی بین شاخص‌ها، می‌تواند به این دلیل باشد که در منطقه مورد مطالعه، کاهش تراز ایستابی تنها متأثر از خشک‌سالی هواشناسی (نقصان بارش و افزایش دما) نمی‌باشد. این موضوع توسط ویسی یزدی و همکاران (۱۳۹۶) نیز تأیید شده است. به عبارت دیگر، عوامل مهم‌تری غیر از عوامل آب و هوایی بر سطح آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار هستند که می‌توان اثرات این عوامل را مورد بررسی قرار داد. در حال حاضر، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار (علاوه

تراز متوسط آب، تحت تأثیر خشک‌سالی می‌باشد و مابقی (یعنی ۵۳ درصد) نیز سهم سایر عوامل موثر بر سطح ایستابی است. مطلب دیگری که نیاز به بررسی دارد این موضوع است که ساختار زمین‌شناسی مختلف در دشت مورد مطالعه، سبب شده است که در برخی مناطق تأثیر بارش‌ها بر تراز ایستابی در زمان کوتاهی نمایان شود و در برخی مناطق، این زمان بسیار طولانی باشد. به عبارت دیگر تأثیر زمانی کاهش یا افزایش مقدار بارش‌ها بر سطح ایستابی، به سبب طولانی بودن مسیر (از منطقه تغذیه تا لایه‌های آبداری که در آنها چاه مشاهده‌ای حفر شده) و به سبب ساختار زمین‌شناسی آبخوان (وجود لایه‌هایی با نفوذپذیری کم در مسیر تغذیه تا منطقه تخلیه) می‌باشد. یعنی برای درک صحیح‌تر و دقیق‌تر چگونگی تغییر در میزان تراز ایستابی، باید عواملی مانند مولفه‌های اقلیمی (بارش و دما و ...)، ساختار زمین‌شناسی و سایر عوامل موثر بر میزان سطح ایستابی (برداشت‌ها) مورد بررسی قرار گیرد. در این صورت می‌توان اثر سایر عوامل (۵۳ درصد باقیمانده از سهم عوامل موثر بر تغذیه) بر سطح ایستابی را تعیین نمود. اگر تغذیه یک آبخوان، از ارتفاعات بالادست باشد (مانند دشت هشتگرد)، داشتن انتظار تأثیر کوتاه مدت کاهش یا افزایش بارش‌ها بر میزان تغییرات تراز در تمامی چاه‌های موجود در منطقه، عملاً صحیح نیست و باید سهم سایر عوامل (مانند برداشت از سفره) در کاهش یا افزایش تراز ایستابی را بررسی نمود که این موضوع توسط محققان دیگری مانند نوحه‌گر و همکاران (۱۳۹۵) نیز تایید شده است. ایجاد رابطه بین تراز آب‌های زیرزمینی و شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی (به‌عنوان مثال RDI یا SPI) همان‌طور که در این مطالعه انجام شده، در

صرف نظر از نتایج این مطالعه، محققین این تحقیق دریافتند که شاخص RDI، منعکس‌کننده نسبی پاسخ آب‌های زیرزمینی در مقابل خشک‌سالی هواشناسی است. در بیش‌تر چاه‌ها، مقدار شاخص RDI در مقیاس ۴۸ ماهه، نسبت به سایر مقیاس‌های زمانی مورد استفاده در این مطالعه، همبستگی بیش‌تری با آب‌های زیرزمینی نشان داده است و با نتایج مطالعه شکیبیا و همکاران (۱۳۹۰) در شرق استان کرمانشاه، یاسمنی و همکاران (۱۳۹۱) در دشت تربت جام و بهزادی کریمی و امیدوار (۱۳۹۶) سازگار است. در همین راستا، لی و رادل (Li and Rodell, 2014) گزارش دادند که SPI با مقیاس ۴۸، یک شاخص خشک‌سالی قابل اعتماد در مطالعه پاسخ آب‌های زیرزمینی به خشک‌سالی هواشناسی بوده و این مقیاس می‌تواند برای همبستگی خشک‌سالی هواشناسی و سطح آب در آبخوان، به‌عنوان مقیاس زمانی مناسب در نظر گرفته شود. بنابراین، کاهش بارش و افزایش تبخیر-تعرق در دشت هشتگرد، به‌طور متوسط پس از گذشت چهار سال، بیش‌ترین تأثیر خود را بر منابع آب زیرزمینی در بیش‌تر چاه‌های مورد مطالعه گذاشته است. این تأخیر زمانی، می‌تواند متأثر از عمق سطح آب، تشکیلات زمین‌شناسی، نوع و بافت خاک‌های منطقه در بخش‌های تغذیه‌کننده آب زیرزمینی و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان دشت باشد. همچنین، رابطه وایازی خطی مابین تراز متوسط سطح ایستابی در چاه‌های منتخب و RDI بیانگر آن است که درصدی از واریانس تراز متوسط سطح ایستابی، تحت تأثیر  $RDI_{48}$  و بخش بزرگ‌تر، متأثر از سایر عوامل (به‌ویژه بهره‌برداری بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی منطقه) بوده که نمونه آن در چاه نمک آلان اشاره شده است. ۴۷ درصد از واریانس

واحدهای کوچک مورد مطالعه قرار گیرد. به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی با پراکندگی مناسب و دارا نبودن آمار مناسب در ایستگاه‌های فعلی و همچنین، عدم وجود چاهک‌های مطالعاتی در مناطق مختلف آبخوان در بیش‌تر مناطق کشور، محققین مختلف نیز در مطالعات خود به ناچار از تعدادی چاه و ایستگاه هواشناسی استفاده نموده‌اند که این کار می‌تواند از دقت نتایج بکاهد. با توجه به اینکه آب زیرزمینی، مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب برای مصارف مختلف در دشت هشتگرد می‌باشد بنابراین، برای کاهش اثرات تغییر در متغیرهای هواشناسی بر آب‌های زیرزمینی و استفاده بهینه از منابع آب موجود، ایجاد مراکز تحقیقات خشک‌سالی به‌منظور مطالعه مستمر خشک‌سالی‌ها و بررسی راهکارهای مقابله با آن، ضروری است. علاوه بر موارد بیان شده، جلوگیری از هر نوع بهره‌برداری غیرمجاز از منابع آب موجود و استفاده از طرح‌های تغذیه مصنوعی در مناطقی که آب مازاد وجود دارد، پیشنهاد می‌شود.

نظارت و مدیریت آب‌های زیرزمینی مفید خواهد بود. چنین مطالعاتی می‌تواند مدیران را قادر به تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی در طی دوره‌های دارای خشک‌سالی/ترسالی هواشناسی نماید. مطالعات مشابه، می‌تواند برای درک پاسخ سطح آب زیرزمینی (یا وضعیت آب‌های زیرزمینی) به مشخصه‌های مختلف خشک‌سالی هواشناسی مانند شدت و مدت زمان وقوع خشک‌سالی، مفید واقع گردد. با این حال، رابطه بین شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب‌های زیرزمینی که براساس سطح آب‌های زیرزمینی است، ممکن است فقط دارای نتایج منطقه‌ای باشد و بنابراین، باید برای هر منطقه‌ای، به صورت جداگانه مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اینکه بخشی از محدوده مورد مطالعه، نقش تغذیه‌ی آبخوان را بر عهده دارد، انتخاب چند نقطه‌ی محدود برای بررسی آثار بارش، دما و سایر متغیرهای هواشناسی (و حتی خشک‌سالی هواشناسی) بر سطح آب زیرزمینی، نتایج مطلوبی را به همراه نخواهد داشت و تا حد امکان باید

### پانویس

- 1-Drought Indices
- 2-Standardized Precipitation Index
- 3-American Meteorology Scientist
- 4-Reconnaissance Drought Index
- 5-Groundwater Resources Index
- 6-De Martoune
- 8-<http://wrs.wrm.ir/m3/gozaresh.asp>

- 9-Reconnaissance Drought Index
- 10-Standardized Groundwater Level Index
- 11-Mann-Kendal
- 12-Linear Regression

### منابع

-بهزادی کریمی، ح. و امیدوار، ک.، ۱۳۹۶. ارزیابی تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت سروستان استان فارس، ترویج و توسعه آبخیزداری، جلد ۵، شماره ۱۹، ص ۴۵-۵۶.

-بختیاری عنایت، ب.، ملکیان، آ. و سلاجقه، ع.، ۱۳۹۴. آنالیز همبستگی پایه‌ی زمانی و تأخیر زمانی بین خشک‌سالی اقلیمی و خشک‌سالی آب‌شناختی دشت هشتگرد، تحقیقات آب و خاک ایران، شماره ۴۶، جلد ۴، ص ۶۰۹-۶۱۶.



- جلالی، ل.، بذرافشان، ج. و توکلی، ع.ر.، ۱۳۹۵. ارزیابی شاخص خشکسالی محصول خاص (CSDI) برای محصول گندم در اقلیم معتدل سرد (مطالعه موردی: کرمانشاه)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۳، شماره ۵، ص ۱۶۶۱-۱۶۷۲.
- زینالی، ب.، فریدپور، م. و اصغری سراسکانرودو، ص.، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بر ویژگی‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مرند)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، جلد ۷، شماره ۱۴، ص ۱۷۷-۱۸۷.
- شکیبا، ع.ر.، میرباقری، ب. و خیری، ا.، ۱۳۸۹. خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی در شرق استان کرمانشاه با استفاده از شاخص SPI، جغرافیا، جلد ۸، شماره ۲۵، ص ۱۰۶-۱۲۴.
- شمشکی، ا.، محمدی، ی. و بلورچی، م.ج.، ۱۳۹۰. شناسایی پهنه آبخوان تحت فشار و نقش آن در شکل‌گیری فرونشست زمین در دشت هشتگرد، علوم زمین، دوره ۲۰، شماره ۷۹، ص ۱۳۷-۱۴۲.
- عباسی، ف.، آذرخشی، م.، چپی، ک. و بشیری، م.، ۱۳۹۵. تغییرات زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی دشت قروه و دهگلان و رابطه آن با خشکسالی، دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۲ و ۳، ص ۱۴۳-۱۵۵.
- علیپور، ح. و ملکیان، آ.، ۱۳۹۷. بررسی روند تغییرات آستانه‌های یخبندان (مطالعه موردی: ناحیه شمالغرب ایران)، مخاطرات طبیعی، جلد ۷، شماره ۱۷، ص ۶۹-۸۲.
- غفاری، ص.، مرادی، ح.ر. و مدرس، ر.، ۱۳۹۷. مقایسه‌ی تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی دشت‌های اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و چادگان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۰، شماره ۱، ص ۱۴۱-۱۶۰.
- قائدی، س. و آگاه، س.، ۱۳۹۷. ارزیابی تأثیر عوامل طبیعی و انسانی بر تراز آب‌های زیرزمینی شهرستان داراب، مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۷، شماره ۱۶، ص ۱۴۵-۱۶۰.
- نوحه‌گر، ا.، قشقایی‌زاده، ن.، حیدرزاده، م.، ایدون، م.ر. و پناهی، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب سطحی و زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه میناب)، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۷، ص ۲۸-۴۳.
- ویسی یزدی، س.، فریدحسینی، ع. و مساعدی، ا.، ۱۳۹۶. بررسی همبستگی خشکسالی‌های هواشناسی و آب زیرزمینی در دشت مشهد، شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، انجمن هیدرولیک ایران-دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.
- یاسمنی، ی.، محمدزاده، ح. و مساعدی، ا.، ۱۳۹۱. بررسی اثر خشکسالی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت تربت جام-فریمان با به‌کارگیری شاخص‌های SPI و GRI، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۱۴ تا ۱۶ شهریور ماه، دانشگاه شیراز، شیراز.
- American Meteorological Society (AMS), AMS Information Statement on Drought., 2013. Available online: <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/about-ams/ams-statements/statements-of-the-amsin-force/drought/> (accessed on 25 September 2016).
- Bloomfield, J.P., Marchant, B.P. and McKenzie, A., 2019. Changes in groundwater drought associated with anthropogenic warming, Hydrology and

- Earth System Sciences, v. 23, p. 1393-1408.
- Chang, T.J. and Teoh, C.B., 1995. Use of the kriging method for studying characteristics of ground-water droughts, *Water Resources Bulletin*, v. 31, p. 1001-1007.
- Chen, Z.H., Grasby, S.E. and Osadetz, K.G., 2002. Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: An empirical model, *Journal of Hydrology*, v. 260, p. 102-117.
- De Martonne, E., 1926. Aréisme et indice aridite, *Comptes Rendus de L'Acad Sci, Paris*, v. 182, p. 1395-1398.
- Eltahir, E.A.B. and Yeh, P., 1999. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois, *Water Resources Research*, v. 35, p. 1199-1217.
- Fiorillo, F. and Guadagno, F.M., 2010. Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI, *Water Resour Manag.*, v. 24, p. 1864-1884.
- Jan, C.D., Chen, T.H. and Lo, W.C., 2007. Effect of rainfall intensity and distribution on groundwater level fluctuations, *Journal of Hydrology*, v. 332, p. 348-360.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G., 1990. *Evaporation and irrigation water requirements*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, New York.
- Joetzier, E., Douville, H., Delire, C. and Ciais, P., 2013. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 vs. CMIP3, *Climate Dynamics*, v. 41, p. 2921-2936.
- Khan, S.H., Gabriele, F. and Rana, T., 2008. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on water tables in irrigation areas, *Irrigation Drainage System*, v. 12, p. 159-177.
- Leelaruban, N., Padmanabhan, G. and Oduor, P., 2017. Examining the Relationship between Drought Indices and Groundwater Levels, *Water*, v. 9(82), p. 1-16.
- Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. and Wallis, J.R., 1994. Hydroclimatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *J. Climate*, v. 7, p. 586-607.
- Li, B. and Rodell, M., 2014. Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous U.S. *J. Hydrol.*, v. 526, p. 78-88.
- McKee, T.B., Doeskin, N.J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, January 17-23, American Meteorological Society, Boston, MA, p. 179-184.
- Mendicino, G., Senatore, A. and Versace, P., 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate, *Journal of Hydrology*, v.3, p. 282-302.
- Mishra, A.K. and Singh, V.P.A., 2010. Review of drought concepts, *Journal of Hydrology*, v. 391, p. 204-216.
- Monteith, J.L., 1965. *Evaporation and the environment*, The state and movement of water in living organisms, Cambridge University Press, Swansea, p. 205-234.
- Nohegar, A. and Heydarzadeh, M., 2016. Evaluation of the effects of meteorological drought on ground water table fluctuations (Case study: Hormozgan Province, Iran), *Natural Environment Change*, v. 2(2), p. 111-125.
- Panda, D.K., Mishra, A., Jena, S.K., James, B.K. and Kumar, A., 2007. The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa,

- India Journal of Hydrology, v. 343, p. 140-153.
- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M. et al, 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, C. B. Field et al., Eds., Cambridge University Press, p. 109-230.
- Shah, R., Manekar, V.I., Christian, R.A. and Mistry, N.J., 2013. Estimation of Reconnaissance Drought Index (RDI) for Bhavnagar District, Gujarat, India, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering, v. 7(7), p. 507-510.
- Sheffield, J. and Wood, E.F., 2011. Drought: Past Problems and Future Scenarios, Routledge, 248 p.
- Steinemann, A.C., Hayes, M. and Cavalcanti, L., 2005. Drought indicators and triggers. In Drought and Water Crises: Science, Technology and Management Issues; Wilhite, D., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA: p. 71-92.
- Tallaksen, L.M. and van Lanen, H.A., 2004. Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, Developments in Water Sciences 48, Elsevier B.V., the Netherlands, 580 p.
- Thomas, T., Jaiswal, R.K., Galkate, R.V. and Nayak, T.R. 2016. Reconnaissance Drought Index Based Evaluation of Meteorological Drought Characteristics in Bundelkhand, Procedia Technology, v. 24, p. 23-30.
- Thornthwaite, C.W., 1947. Climate and Moisture Conservation Annal So of Assoc Amer, Geogrs, v. 37(2), p. 87-100.
- Tirogo, J., Jost, A., Biao, A., Valdes-Lao, D., Koussoube, Y. and Ribstein, P., 2016. Climate variability and groundwater response: A case study in Burkina Faso (West Africa), Water 8, p. 171-182.
- Tsakiris, G. and Vangelis, H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration, European water, E. W. Publications 9/10, p. 3-11.
- Turgay, P. and Ercan, K., 2005. Trend Analysis in Turkish Precipitation data, Hydrological processes published online in Wiley Interscience (www.Interscience.wiley.com).
- Vangelis, H., Tigkas, D. and Tsakiris, G., 2013. The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation, Journal of Arid Environments, v. 88, p. 130-140.
- Wanders, N., Henny, A.J., Van Lanen, B. and Anne, F., 2010. Indicators for Drought characterization on a global scale, Wageningen Netherlands: Water and Global Change, Wilhite DA, and Glantz MH, 1985, Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions, Water International, v. 10, p.111-120.
- Wilhite, D.A., Hayes, M.J., Knutson, C. and Smith, K.H., 2000. Planning for drought: moving from crisis to risk management, Jawa-American Water Resources Association, v. 36, p. 697-710.
- Yaduvanshi, A., Srivastava, P.K. and Pandey, A.C., 2015. Integrating TRMM and MODIS satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India, Physics and Chemistry of the Earth, DOI: 10.1016/j.pce.2015.01.006.