

## ارزیابی خشک‌سالی و مداخلات انسانی در کاهش ذخایر آب زیرزمینی

سمیرا زندی‌فر<sup>۱\*</sup>، عادل جلیلی<sup>۲</sup>، زهرا سعیدی‌فر<sup>۳</sup> و مریم نعیمی<sup>۴</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
پست الکترونیک: samira.zandifar@gmail.com

۲- استاد پژوهش، بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- محقق، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

### چکیده

مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای جلوگیری از کاهش سطح آب زیرزمینی، نیازمند شناخت عوامل، شاخص‌ها و معیارهای تغییرات تراز آب زیرزمینی در مناطق تحت تأثیر این پدیده است. بنابراین، برای آگاهی از وضعیت نوسانهای سطح آب‌های زیرزمینی لازم است مطالعات دقیقی برای برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های توسعه منابع آب و پیش‌بینی و هشدار به موقع دوره‌های خشک‌سالی انجام شود. بدین منظور در این مطالعه، به بررسی روند تغییرات آب زیرزمینی در آبخوان‌های محدوده مطالعاتی ماهیدشت در استان کرمانشاه در یک دوره آماری ۳۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۶ پرداخته شد. سپس تأثیر انواع خشک‌سالی‌ها بر روند تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی PDSI، GRI، و SDI، همچنین تغییرات سطح زیرکشت اراضی زراعی آبی و دیم تجزیه و تحلیل شد. براساس نتایج، بالاترین سطح آب زیرزمینی مربوط به نواحی جنوب‌شرقی و حدود ۱۵۳۱ متر است. تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت ماهیدشت به‌طورکلی، روندی نزولی دارد و سطح آب زیرزمینی در طول دوره مطالعاتی با افتی برابر ۲۴/۷۸ متر روبه‌رو بوده است. همچنین نتایج همبستگی پایین دو شاخص خشک‌سالی اقلیمی و آب‌های سطحی با آب‌های زیرزمینی نشان داد، عامل افت سطح آب در آبخوان‌های دشت بر اثر عدم مدیریت و برداشتهای بی‌رویه است. اگرچه آبخوان ماهیدشت به‌عنوان مطالعه موردی در این مقاله انتخاب شده است، روش پیشنهادی می‌تواند در مناطق دیگر نیز برای بهبود حفاظت و مدیریت منابع آب استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نوسانهای سطح آب زیرزمینی، حفاظت و مدیریت منابع آب، آبخوان ماهیدشت، خشک‌سالی.

### مقدمه

دوره خشک، قابلیت تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد و پس از یک دوره زمانی کوتاه، مقدار ذخیره رطوبت خاک تحت تأثیر این شرایط شروع به کاهش می‌کند. در نتیجه تغذیه سیستم آب زیرزمینی کم شده و سطح تراز آب چاه‌ها ممکن است یکسال یا بیشتر پس از شروع خشک‌سالی به کمبود

در کشور خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران، آب از دیرباز نزد نیاکان ما از قدر و منزلتی ویژه برخوردار بوده است. حفظ این منزلت و استفاده بهینه و پایدار از آب تنها در سایه شناخت جامع و همه‌جانبه منابع آب میسر است. طی یک

بارش سبب بروز اولین نشانه‌های خشک‌سالی و در نتیجه ورودی کمتر به سیستم هیدرولوژی می‌شود (Zandifar *et al.*, 2021). با توجه به اهمیت زیاد منابع آب زیرزمینی و مخاطره‌آمیز بودن برداشت بیش از حد از این منابع، وجود مطالعات مختلف و پیش‌بینی نوسانهای آب زیرزمینی در سال‌های اخیر ضروری شده است. در این رابطه در دنیا مطالعات گوناگونی انجام شده که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Moravej و همکاران (۲۰۱۵) به پیش‌بینی تراز سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل سری‌های زمانی خطی پرداختند نتایج پیش‌بینی بیانگر آن بود که تراز سطح آب دریاچه ارومیه تقریباً تا اواسط سال ۱۳۸۹ ثابت بوده و بعد تا سال ۱۳۹۲ افتی شدید داشته است و پس از آن تا سال ۱۳۹۵ دوباره تقریباً ثابت مانده، اما پس از آن دوباره روندی افزایشی خواهد داشت. Gehreles و همکاران (۱۹۹۴) به تحلیل نوسانهای تراز سطحی آب زیرزمینی در کشور هلند پرداختند. نتایج آنان نشان داد، تراز آب در مناطق وسیعی در نتیجه زهکشی آب زیرزمینی، خشک‌سالی و برداشت بی‌رویه آن توسط کشاورزان کاهش یافته است. آنان گزارش کردند با افزایش عمق دسترسی به آب، تراز آب زیرزمینی نسبت به نوسانهای اقلیمی و فعالیت‌های بشری با تأخیر واکنش نشان می‌دهد. Scanlon و همکاران (۲۰۱۲) بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان‌های کالیفرنیا و آثار ناشی از آن را بررسی کردند. آنان بدین‌منظور، سطح آب در هزاران چاه را پایش کردند و کاهش شدید سطح آب زیرزمینی منطقه را که ناشی از تهی‌شدگی شدید آبخوان‌های آنجا بود، مشاهده کردند. کسری مخازن آبخوان‌ها هم تحت تأثیر تغییرات تغذیه آب زیرزمینی و نیز پمپاژ پایدار بوده است. همچنین نتایج آنان نشان داد، تهی‌شدگی آب زیرزمینی در منطقه در دوره‌های خشک‌سالی شدت یافته است، اگرچه در طول دوره‌های پربارش روند تهی‌شدگی کاهش یافته اما بازیابی نشده است. Liu و همکاران (۲۰۱۲) به تحلیل خشک‌سالی هیدرواقلمی و پیش‌بینی آن با استفاده از سه شاخص خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی SPI، PDSI و SRI پرداختند. طبق این پژوهش PDSI و SRI

بارندگی واکنش نشان بدهد (Moustadraf *et al.*, 2003). این مسئله می‌تواند روی جریان سطحی نیز که وابسته به آب‌های زیرزمینی منطقه است، تأثیرگذار باشد (Van Loon, 2013; Havril *et al.*, 2018). آثار تهی‌شدگی سفره‌های آب زیرزمینی پیچیده و وابسته به آبخوان است، اما مشکلات بسیاری در این شرایط متداول است که مهمترین آنها کاهش سطح ایستابی است که خود باعث افزایش هزینه پمپاژ و خشک شدن چاه‌های آب می‌شود (Fishman *et al.*, 2011). از دیگر آثار آن می‌توان به کاهش تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه‌ها و چشمه‌ها، تأثیر بر اکوسیستم‌های موجود و نیز فرونشست زمین اشاره کرد (Sophocleous, 2000; Zandifar *et al.*, 2020). کاهش سطح آب زیرزمینی همچنین می‌تواند باعث افزایش شوری از طریق نفوذ آب شور دریا به آبخوان‌های ساحلی یا نشت از لایه‌های مجاور حاوی آب شور شود (Konikow & Kendy, 2005). بررسی نوسانهای سطح آب زیرزمینی در محدوده‌های خشک و نیمه‌خشک ابزاری مفید در تعیین آثار عوامل مختلف از جمله برداشت و تغذیه بر تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت سطح آب زیرزمینی است (Nayak *et al.*, 2006). خشک‌سالی به‌عنوان یکی از بلاهای طبیعی تأثیرات عمده‌ای بر بخش‌های یک اکوسیستم می‌گذارد. گرچه امکان جلوگیری از وقوع آن وجود ندارد، اما می‌توان با اقداماتی اثرهای منفی آن را کاهش داد. گسترش خشک‌سالی به آرامی انجام می‌شود و آثار آن ممکن است سال‌ها پس از پایان آن باقی بماند. سیستم‌های پایش در تدوین طرح‌های مقابله با خشک‌سالی و مدیریت آن از اهمیت زیادی برخوردار هستند (Zareii *et al.*, 2017; Zynali *et al.*, 2017). منابع آب زیرزمینی بلافاصله تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی به‌ویژه نوسانهای بارندگی قرار نمی‌گیرند، بلکه متأثر از تغییرات بارش و انتقال تدریجی خشک‌سالی در چرخه هیدرولوژیکی است (Zandifar *et al.*, 2020). خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی در دوره‌هایی رخ می‌دهد که مقدار بارندگی در آن دوره کمتر از متوسط بلندمدت باشد (Peters *et al.*, 2003) به‌طورکلی کمبود طولانی‌مدت

Mohammadi و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تغییرات مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با بهره‌گیری از زمین‌آمار پرداختند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی مکانی عمق آب زیرزمینی در سطح دشت نشان داد، روند تغییرات عمق آب زیرزمینی تقریباً از توپوگرافی دشت تبعیت می‌کند. مقایسه نقشه‌های هم‌عمق به‌دست‌آمده، نشان دهنده کاهش سطح آب زیرزمینی در سطح دشت است. به‌طوری‌که نقطه عطف این افزایش شروع دوره خشک‌سالی از سال ۱۳۷۸ است. Mirakbari و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر خشک‌سالی هواشناسی را بر منابع آب سطحی و زیرزمینی (توسط شاخص‌های GRI، SPEI، SDI) را در حوزه رودخانه اعظم هرات بررسی کردند. آنان میزان همبستگی بین این شاخص‌ها را در منطقه مورد نظر نشان دادند. Khosravi Dehkordi و همکاران (۲۰۱۹) خشک‌سالی‌های آب زیرزمینی دشت شهرکرد را با استفاده از شاخص GRI و مدل زنجیره مارکوف پایش و پیش‌بینی کردند. نتایج مطالعات آنان نشان داد، روش زنجیره مارکوف در هر سه مرتبه از دقت خوبی در پیش‌بینی مقادیر شاخص GRI در یک، دو و سه ماه آینده برخوردار بوده است، بنابراین از آن می‌توان برای پیش‌بینی خشک‌سالی آب زیرزمینی دشت شهرکرد استفاده کرد.

اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و کشورهای همجوار و بهره‌برداری‌های نادرست از منابع آب موجب بروز و تشدید بحران خشک‌سالی شده است، در نتیجه برای استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی لازم است کمیت مخازن و روش بهره‌برداری صحیح از آن مشخص شود. نظر به اینکه محدوده مطالعاتی ماهیدشت، بخش وسیعی از استان کرمانشاه را دربرمی‌گیرد و از لحاظ منابع آبی، یکی از دشت‌های بحرانی آن محسوب می‌شود، بررسی وضعیت قابلیت کمی این آبخوان پیشنهاد می‌شود. براین اساس، پژوهش پیش‌رو با هدف بررسی عوامل تأثیرگذار بر خشک‌سالی منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی ماهیدشت با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر در منطقه و تداوم آنها، همچنین تأثیر آن بر کشاورزی و منابع آب است.

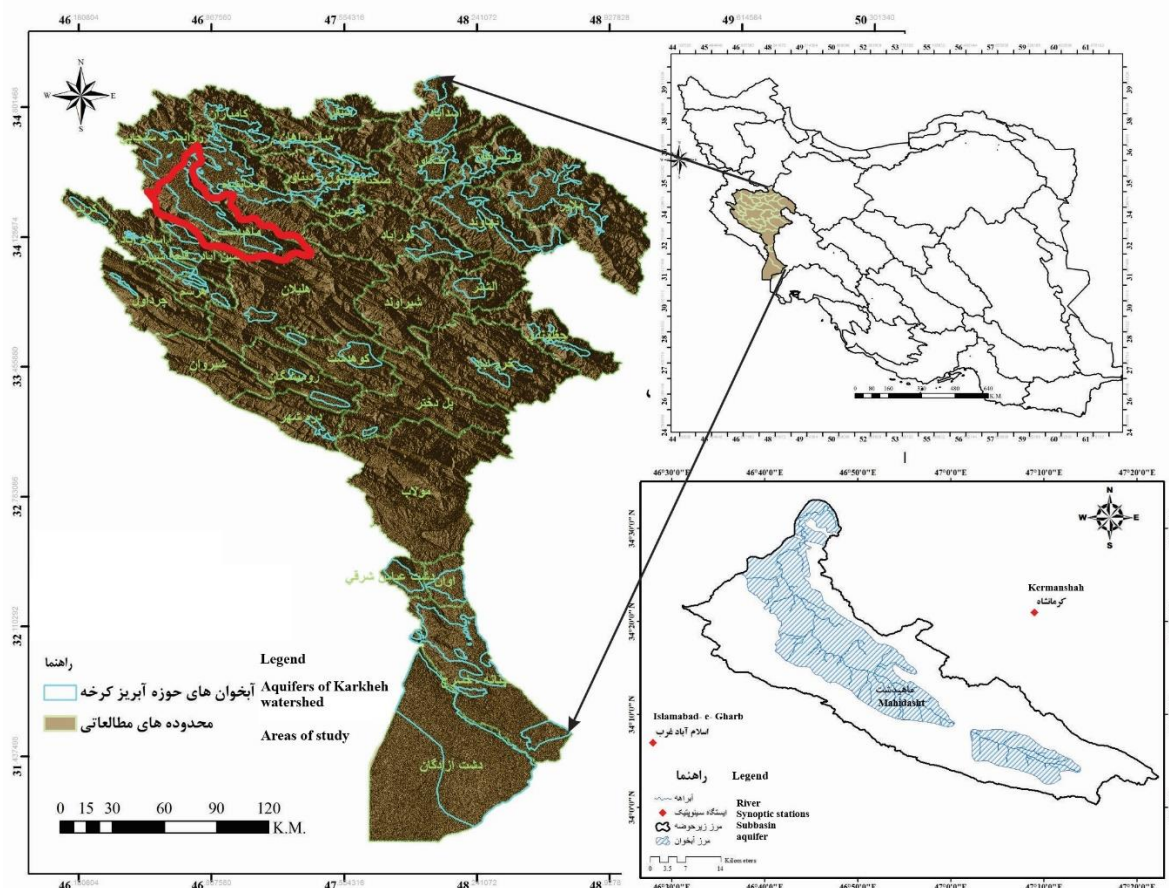
مناسب‌ترین شاخص برای ارزیابی خطر خشک‌سالی آینده در آب‌وهوای به‌طور فزاینده گرم معرفی شدند. Zhang و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی پدیده خشک‌سالی در اقلیم ایالات متحده در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با استفاده از شاخص‌های مختلف خشک‌سالی پرداختند. آنان نشان دادند، شاخص‌های مختلف دارای نقاط قوت و ضعف در اقلیم‌های مختلف در سراسر منطقه هستند. این نتایج نشان داد، شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI) دارای یک ارتباط خوب با SPI کوتاه‌مدت است. نتایج بررسی روابط بین شاخص‌های SPI و SDI در حوزه آبخیز اترک، توسط Mofidipoor و همکاران (۲۰۱۱) رابطه زمانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیک را در گام زمانی سه ماهه با بیشترین همبستگی و در سطح ۹۹ درصد نشان داد. روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و خشک‌سالی آنها با استفاده از شاخص سطح استاندارد آب‌های زیرزمینی در حوزه رودخانه شرقی بنگال غربی هند توسط Halder و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه شد. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آمار آزمون من‌کندال بررسی شده است. نتایج نشان داد این حوزه با خشک‌سالی شدید هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی روبه‌روست که تأثیر ویژه‌ای بر سطح آب‌های زیرزمینی منطقه دارد. Hellwing و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند، این شاخص‌ها و مدل‌ها می‌توانند تأثیر تغییرات آب‌وهوایی را روی آب‌های زیرزمینی در مقیاس وسیعی به‌خوبی نشان دهند. Wang و همکاران (۲۰۲۱) تأثیرات اقلیمی و انسانی بر گسترش خشک‌سالی را با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص رواناب (SRI) به‌ترتیب برای توصیف خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز لاتاهه در چین ارزیابی کردند. نتایج آنان نشان داد، تغییرات آب‌وهوایی انتشار از خشک‌سالی هواشناسی به خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حوضه آبریز لاتاهه را تسریع می‌کند و تقریباً ۳ ماه کوتاه می‌شود. با این حال، فعالیت‌های بشری، انتشار طبیعی از خشک‌سالی هواشناسی به خشک‌سالی هیدرولوژیکی را مختل کرده است. در ایران

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت کلی این محدوده مطالعاتی، ۱۵۰۷ کیلومترمربع است که ۲/۹۴ درصد کل حوزه آبخیز کرخه را دربرمی‌گیرد. حداکثر ارتفاع حوزه از سطح دریا ۲۷۶۴ متر و حداقل ارتفاع ۱۳۱۰ متر و میانگین ارتفاع ۱۵۲۳ متر است.

محدوده مطالعاتی ماهیدشت در استان کرمانشاه و حوزه آبخیز کرخه قرار دارد (شکل ۱). مختصات جغرافیایی آن بین طول‌های ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ۳۴ درجه و ۰۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۵ دقیقه



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی ماهیدشت در حوزه آبخیز کرخه (با رنگ قرمز مشخص شده است) و ایستگاه‌های سینوپتیک نزدیک آبخوان ماهیدشت.

Figure 1. Location of Mahidasht in Karkheh watershed (marked in red) and synoptic stations near Mahidasht aquifer

## روش تحقیق

تحلیل می‌شود. در این پژوهش، مطالعه میزان افت تراز آب زیرزمینی به همراه تهیه نقشه‌های هم‌تراز و آبنمود معرف آبخوان انجام شده است. براین‌اساس، اطلاعات مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان آبرفتی تهیه و آماده‌سازی شد. برای تهیه نقشه خطوط هم‌تراز آب

برای بررسی روند تغییرات آب زیرزمینی و ارزیابی تأثیر انواع خشک‌سالی‌ها بر یکدیگر در دشت ماهیدشت یک دوره آماری ۳۵ ساله (۱۳۹۶-۱۳۶۱) انتخاب و شاخص‌های خشک‌سالی PDSI، GRI و SDI تجزیه‌و

کلیه ایستگاه‌های داخل حوزه و در صورت وجود، ایستگاه‌های مجاور می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در این روش، چاه‌های مشاهده‌ای منتخب منطقه را به یکدیگر وصل کرده و با رسم عمودمنصف‌های اضلاع مثلث‌های حاصل، پلی‌گون‌هایی ایجاد می‌شود، به گونه‌ای که در هر پلی‌گون یک چاه مشاهده‌ای قرار می‌گیرد. مساحت پلی‌گون‌ها محاسبه شده و با استفاده از رابطه زیر، متوسط سطح آب زیرزمینی برای هر ماه از سال در دوره زمانی معین برای کل آبخوان به دست می‌آید (Fisher, 2005).

$$\bar{h} = \frac{\sum ah}{A} \quad (1)$$

در این رابطه،  $h$  سطح آب در چاه مشاهده‌ای،  $a$  مساحت پلی‌گونی که چاه مشاهده‌ای در آن قرار گرفته، و  $A$  مساحت کل پلی‌گون‌هاست. هیدروگراف واحد از ترسیم نمودار متوسط سطح آب زیرزمینی در برابر ماه‌های دوره زمانی مورد نظر حاصل می‌شود.

بررسی تغییرات حجم مخزن آبخوان‌های آبرفتی در این بخش از مقاله با نگاهی به بیلان منابع آب منتهی به سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰، نوسانهای سطح آب زیرزمینی آبخوان‌ها و محاسبات کسری حجم مخزن آبخوان تا سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ تحلیل شد. تغییر حجم ذخیره در آبخوان براساس اختلاف تراز سطح آب و وسعت و ضریب ذخیره متوسط آبخوان محاسبه می‌شود. براساس اطلاعات سطح آب شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و هیدروگراف تعیین شده در هر دشت، همچنین ضریب ذخیره تغییرات حجم ذخیره آبخوان تعیین می‌شود، ضریب ذخیره براساس نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی، یا وضعیت ساختار و دانه‌بندی آبرفت تعیین می‌شود. میزان تغییرات ذخیره آبخوان را می‌توان براساس رابطه زیر تعیین و بررسی کرد.

$$\Delta V = \Delta H \times S \times A \quad (2)$$

زیرزمینی از داده‌های ماه حداقل سال آخر دوره آماری (سال آبی ۹۶-۱۳۹۵) برای آبخوان ماهیدشت استفاده و پهنه‌بندی‌ها توسط درون‌یابی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3 رسم شده است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر، نقشه‌های هم‌تراز آب زیرزمینی برای بازه پنج‌ساله براساس اطلاعات در دسترس ترسیم شده است. نقشه‌های تراز آب زیرزمینی در دوره‌های آماری متفاوت و با استفاده از ارقام متوسط سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای در زمان کمینه (مهر ماه) تهیه شد. مناسب‌ترین دوره آماری برای بررسی داده‌های مربوط به اندازه‌گیری‌های ماهانه تغییرات سطح آب زیرزمینی به گونه‌ای انتخاب شد که دربرگیرنده بیشترین تعداد چاه اندازه‌گیری شده در ماه کم‌آب باشد. شایان ذکر است، در انجام محاسبات و ترسیم نقشه‌های آب زیرزمینی از آمار چاه‌های منتخب در هر دشت استفاده شده است که دارای کامل‌ترین آمار در طول دوره منتخب بوده‌اند، بنابراین، تعداد چاه‌های یادشده در هر دشت لزوماً با تعداد چاه‌های شبکه پیزومتریک یکسان نیست و طول دوره آماری استفاده‌شده نیز لزوماً کل دوره آماری نخواهد بود. در نقشه‌های یادشده، مناطق تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی مشخص شده است.

#### آب‌نمود معرف

برای بررسی تغییرات درازمدت و نوسانهای سطح آب زیرزمینی و نیز تشخیص دوره‌های افزایش و کاهش سطح آب، آب‌نمود معرف در طول دوره آماری با استفاده از نقشه تیسسن کمی (Thiessen) به‌عنوان روشی مرسوم برای آبخوان ماهیدشت تهیه شده است. محاسبه هیدروگراف واحد به روش تیسسن در مواردی که شبکه پیزومتری به صورت متراکم باشد و توزیع باران‌سنگ‌ها یکنواخت نباشد، یا تفاوت مقدار بارندگی در ایستگاه‌های مختلف زیاد باشد، تهیه می‌شود. این روش دقیق‌تر از روش میانگین حسابی است. در اینجا حوضه آبریز را به چند حوزه کوچک‌تر (زیرحوزه) تقسیم‌بندی می‌کنیم و هر ایستگاه جداگانه در یک زیرحوزه قرار می‌گیرد. در نتیجه

هوا نیاز دارد توسط Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰) ارائه و به‌عنوان یک شاخص اقلیمی معرفی شد. رابطه ترازمندی آب اقلیمی به‌صورت رابطه ۳ تعریف شده است.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (3)$$

که P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D اختلاف آنها و i شماره ماه موردنظر است. روابط مختلفی برای محاسبه PET وجود دارد که در استفاده از هر یک از آنها محدودیتی برای SPEI وجود ندارد. در نسخه نخست SPEI از روش ساده Thornthwaite (۱۹۴۸) استفاده شد ولی در نسخه دوم آن (در صورت نبود محدودیت داده) توصیه شده است که از روش پنمن - ماتیت فائو Allen و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شود (که در این تحقیق از روش تورنث‌وایت استفاده شد). در این روش تبخیر - تعرق پتانسیل برای هر یک از ماه‌های سال محاسبه می‌شود. اساس این روش دمای متوسط ماهانه است که به‌صورت زیر عمل می‌شود. در شاخص SPEI هرچه پنجره زمانی کوتاه‌تر در نظر گرفته شود به تغییرات بارندگی و دمای ماهانه سریع‌تر واکنش نشان داده و نوسانهای خشک‌سالی را بهتر نشان می‌دهد. برای اینکه دوره‌های نرمال، ترسالی و خشک سالی در دوره آماری بهتر به نمایش گذاشته شود، از شاخص SPEI استفاده شده است. دوره خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPEI به‌طور مستمر منفی و به‌مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مثبت شود (Bazrafshan & Khalili, 2013). کلاس‌های رطوبتی شاخص SPEI در جدول ۱ ارائه شده است. در اینجا از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه و اسلام‌آباد غرب، که نزدیک‌ترین ایستگاه‌های سینوپتیک به دشت مورد نظر هستند، استفاده شد (شکل ۱).

$\Delta V$ : تغییر حجم ذخیره آبخوان (میلیون مترمکعب)،  $\Delta H$ : اختلاف ارتفاع سطح آب زیرزمینی (متر)، S: ضریب ذخیره، A: مساحت آبخوان (کیلومترمربع) با در نظر گرفتن مساحت آبخوان می‌توان بیان کرد، به طور متوسط سالانه چه حجمی (میلیون مترمکعب) در کل محدوده مطالعاتی مورد نظر براساس متوسط وزنی مقادیر هیدروگراف از ذخیره آبخوان آبرفتی کاسته می‌شود.

تهیه نقشه اراضی کشاورزی و دیم محدوده ماهیدشت برای تهیه نقشه نحوه پراکنش اراضی زراعی آبی و دیم در محدوده مطالعاتی ماهیدشت از ترکیب تصاویر ایجادشده توسط دو پایگاه داده زیر استفاده شده است. نوع اول تصاویر پروژه Global Food Security - Support Analysis Data (GFSAD) تهیه‌شده توسط ناسا برای ایجاد داده‌های زمین‌های زراعی جهانی با وضوح بالاست. محصولات GFSAD از طریق داده‌های سنجنش از دور چند سنجنده (برای نمونه Landsat ، AVHRR ، MODIS)، داده‌های ثانویه و داده‌های مربوط به مزرعه به دست می‌آیند و با هدف مستندسازی پویایی گیاهان زراعی انجام می‌شود. نوع دوم داده‌های مورد استفاده محصول MOD13Q1 V6 سنجنده مودیس است که مقدار شاخص پوشش گیاهی (Vegetation VI: index google earth) را براساس هر پیکسل ارائه می‌دهد. از ترکیب این دو پایگاه داده‌ای تحت سامانه google earth engine نقشه پوشش گیاهی مطابق با پهنه‌بندی تغییرات پنج‌ساله تراز آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت در دو دوره مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۱ و مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۶ تهیه شد.

شاخص بارش - تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد SPEI (Standardized Precipitation Index)

این شاخص که مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای

جدول ۱- طبقه‌بندی خشک‌سالی براساس شاخص بارش استاندارد شده SPEI (McKee et al., 1993).

Table 1. Drought intensity for values of the SPEI standardized precipitation index (McKee et al., 1993)

| طبقات خشک‌سالی<br>Class                | SPEI         |
|--|--------------|
| ترسالی بسیار شدید<br>Extremely Wet     | $2 \leq$     |
| ترسالی شدید<br>Severely Wet            | 1.5 - 1.99   |
| ترسالی ملایم<br>Moderately Wet         | 1 - 1.49     |
| نرمال<br>Normal                        | -0.99 - 0.99 |
| خشک‌سالی ملایم<br>Incipient Dry        | -1 - 1.49    |
| خشک‌سالی شدید<br>Severe Drought        | -1.5 - -1.99 |
| خشک‌سالی بسیار شدید<br>Extreme Drought | $\geq -2$    |

دوره (i) به دست می‌آید (رابطه ۴).

$$d_i = Pr_i - Pr_{C-i} \quad \text{رابطه ۴}$$

پالمر یک الگوریتم بیلان رطوبت آب در خاک را، که در آن از یک مجموعه محاسبات برای اطلاعات درازمدت منطقه (ویژگی‌های خاک، بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل) استفاده می‌شود، به کار برد. این گام شامل دو قسمت است: بخش اول شبیه‌سازی ریاضی بیلان آبی و برآورد عوامل واقعی و پتانسیل بیلان آبی است که شامل مقدار واقعی و پتانسیل تبخیر- تعرق، تغذیه رطوبت، اتلاف رطوبت و رواناب است، سپس محاسبه ضرایب چهارگانه پالمر از روش تورنت‌وایت برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل است و درنهایت از مدل بیلان آبی برای به دست آوردن سایر فاکتورها استفاده کرده است. بخش دوم محاسبه بارش مقتضی شرایط عادی اقلیمی (Prc-i) با استفاده از چهار ضریب ( $\delta_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\alpha_i$ ) و در ادامه محاسبه انحراف رطوبتی در دوره i ام ( $d_i$ ) برای اقلیم مورد نظر است.

شاخص خشک‌سالی پالمر PDSI(Palmer drought severity index)

خشک‌سالی به‌عنوان یک پدیده فیزیکی، تابع قوانین عمومی تکامل سامانه‌های جوی و هیدرولوژیکی است، اما به دلیل پیچیدگی زیاد فرایندهای دخیل در آن، هنوز یک رهیافت دقیق فیزیکی برای آن ارائه نشده است. از پیشگامان مطالعه پدیده خشک‌سالی می‌توان به Palmer (۱۹۶۵) اشاره کرد. Palmer با استفاده از متغیرهای بارش، دما و رطوبت قابل دسترس خاک و براساس یک مدل ترازمندی آب ساده، برای برآورد عرضه و تقاضای رطوبت یک مدل خاک دو لایه، یک شاخص فیزیکی- آماری به نام شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI) را فرمول‌بندی کرد. به دلیل پیچیده و طولانی بودن روش محاسبه این شاخص، به صورت خلاصه مراحل آن ارائه شد. به‌طورکلی روند محاسباتی این شاخص را می‌توان در سه گام بررسی کرد (Azadi et al., 2015).

در گام اول، انحراف رطوبتی اقلیم مورد نظر (d) در هر

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص خشک‌سالی پالمر (Palmer, 1965)

Table 2. Drought intensity for values of the Palmer index (Palmer, 1965)

| طبقات خشک‌سالی<br>Class            | PDSI                      |
|------------------------------------|---------------------------|
| فوق‌العاده مرطوب<br>Extremely Wet  | $4 < PDSI$                |
| خیلی مرطوب<br>Severely Wet         | $3 < PDSI \leq 4$         |
| نسبتاً مرطوب<br>Moderately Wet     | $2 < PDSI \leq 3$         |
| مرطوب خفیف<br>Slightly Wet         | $1 < PDSI \leq 2$         |
| ابتدای رطوبت<br>Incipient Wet      | $0.5 < PDSI \leq 1$       |
| نزدیک به نرمال<br>Near Normal      | $-0.5 \leq PDSI \leq 0.5$ |
| ابتدای خشک‌سالی<br>Incipient Dry   | $-1 \leq PDSI < -0.5$     |
| خشک‌سالی خفیف<br>Mild Drought      | $-2 \leq PDSI < -1$       |
| خشک‌سالی متوسط<br>Moderate Drought | $-3 \leq PDSI < -2$       |
| خیلی خشک<br>Severe Drought         | $-4 \leq PDSI < -3$       |
| فوق‌العاده خشک<br>Extreme Drought  | $PDSI < -4$               |

شاخص خشک‌سالی جریان‌های رودخانه‌ای

#### SDI (Streamflow Drought Index)

برای بررسی وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیکی در دشت مورد مطالعه، از شاخص خشک‌سالی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI) استفاده شد. شاخص SDI مقدار دبی ماهانه هر ایستگاه هیدرومتری را بر توزیع آماری مناسبی برازش می‌دهد. در این مورد شاخص SDI با استفاده از داده‌های دبی ماهانه در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه، طبق روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

$$SDI_{j,k} = V_{j,k} - V_k / S_k \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$V_{j,k} = \sum_{i=1}^{3k} Q_{i,j} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه ۱، Pri میزان بارش در شرایط موجود است. در گام دوم میزان شاخص انحراف رطوبتی ( $Z_i$ ) از طریق بی بعد کردن مقدار انحراف رطوبتی توسط ضریب وزنی مشخصه اقلیمی ( $K_i$ )، تعیین می‌شود (رابطه ۵).

$$Z_i = d_i \times K_i \quad \text{رابطه ۵}$$

در گام سوم برای تحلیل شدت رویداد و تعیین آغاز و پایان آنها، مقدار انحراف رطوبتی به قالب رده‌بندی‌شده تبدیل می‌شود. این قسمت را در پنج مرحله محاسباتی می‌توان بررسی کرد.

۱- تعریف آستانه شدت‌های مختلف خشک‌سالی یا ترسالی، ۲- برآورد عوامل دوام دوره و استخراج رابطه شدت، ۳- تعریف یک عامل با مفهوم احتمالاتی برای پایان هر رویداد، ۴- محاسبه شاخص‌های واسط و ۵- پیمایش معکوس و تعیین شدت و مدت رویدادها.

$$X_i = 0.897 X_{i-1} + 0.333 Z_i \quad \text{رابطه ۶}$$

طبق رابطه (۶)،  $X_i$  (شاخص شدت خشک‌سالی پالمر) در مقطع زمانی  $i$ ، ترکیبی از سهم مشارکت انحراف رطوبتی هر مقطع ( $Z_i$ ) و شدت خشک‌سالی یک دوره ماقبل ( $X_{i-1}$ ) است. ضرایب ۰/۳۳۳ و ۰/۸۹۷ نیز مدت زمان استمرار و دوام یک رویداد خشک‌سالی یا ترسالی را تبیین می‌کنند (Palmer, 1965).

در این مطالعه برای محاسبه این شاخص از پایگاه TerraClimate دانشگاه Idaho که مجموعه‌ای از بیلان اقلیم و آب برای سطوح زمینی جهانی است، تحت سامانه earthengine استفاده شد. داده‌های حاصل از این پایگاه (<https://code.earthengine.google.com>) دارای وضوح زمانی ماهانه و وضوح مکانی ۴ کیلومتر (۱/۲۴ درجه) هستند. جدول ۲ طبقه‌بندی شاخص خشک‌سالی پالمر PDSI را نشان می‌دهد.



$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن،  $D_{y,m}$  مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی در سال  $y$  و ماه  $m$   $\mu_{D,m}$  و  $\sigma_{D,m}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر تراز آب زیرزمینی در ماه  $m$  در طول دوره آماری هستند (Mendicino et al., 2008). طبقه‌بندی مقادیر شاخص GRI در ۹ گروه تقسیم شدند (جدول ۴).

جدول ۴- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی با توجه به مقادیر

شاخص GRI (Mendicino et al., 2008)

Table 4. Drought intensity for values of the GRI index (Mendicino et al., 2008)

| طبقات خشک‌سالی<br>Class                | GRI          |
|--|--------------|
| ترسالی بسیار شدید<br>Extremely Wet     | $2 \leq GRI$ |
| ترسالی شدید<br>Severely Wet            | 1.5-2        |
| ترسالی متوسط<br>Moderately Wet         | 1-1.5        |
| ترسالی ملایم<br>Incipient Wet          | 0.5-1        |
| نرمال<br>Normal                        | -0.5-0.5     |
| خشک‌سالی ملایم<br>Incipient Dry        | -0.5- -1     |
| خشک‌سالی متوسط<br>Moderate Drought     | -1- -1.5     |
| خشک‌سالی شدید<br>Severe Drought        | -1.5- -2     |
| خشک‌سالی بسیار شدید<br>Extreme Drought | $-2 \geq$    |

نتایج و بحث

نقشه‌های هم‌تراز و افت سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی، جهت جریان و نیز

که در آن،  $i$  سال هیدرولوژیکی،  $k$  دوره زمانی،  $Q$  سری‌های زمانی حجم جریان‌های رودخانه‌ای ماهانه،  $V$  و  $S$  به ترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات تجمعی هستند (Nalbantis, 2008). سیستم طبقه‌بندی برای تعریف شدت‌های خشک‌سالی منتج از شاخص بارش استاندارد شده در این پژوهش استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی با توجه به مقادیر

شاخص SDI (Nalbantis, 2008).

Table 3. Drought intensity for values of the SDI index (Nalbantis, 2008)

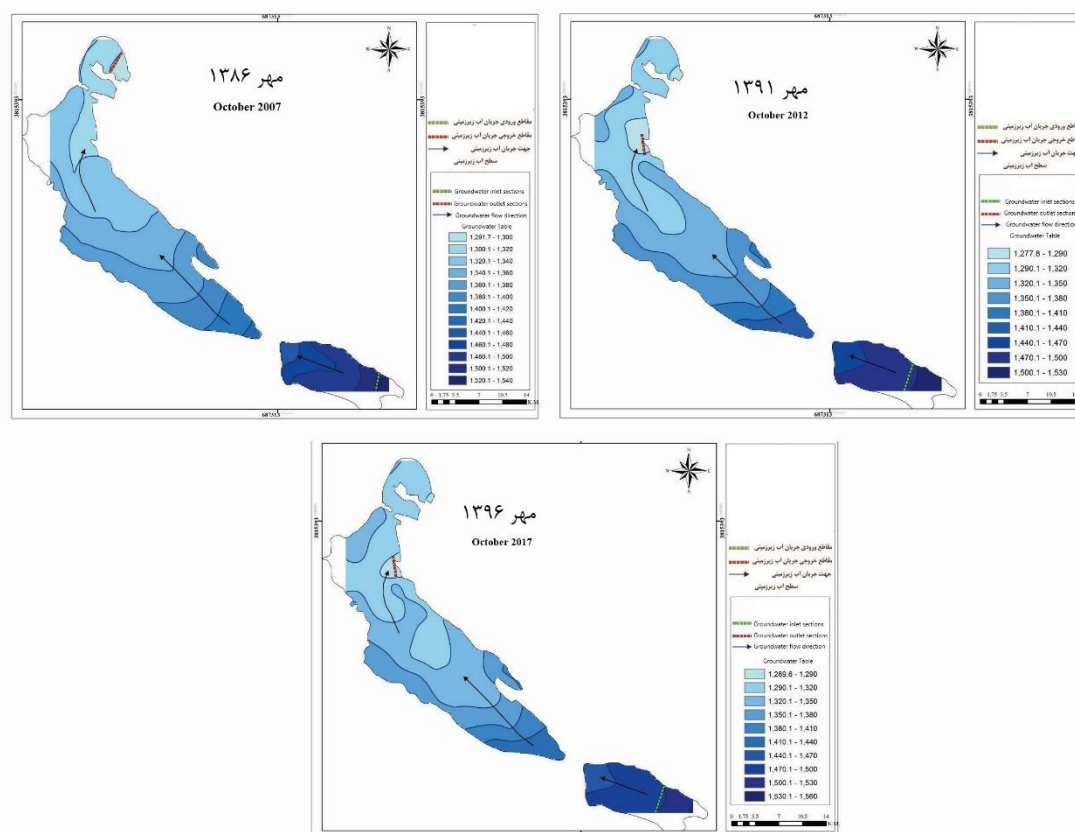
| طبقات خشک‌سالی<br>Class                | SDI          |
|--|--------------|
| ترسالی بسیار شدید<br>Extremely Wet     | $2 \leq SDI$ |
| ترسالی شدید<br>Severely Wet            | 1.5-2        |
| ترسالی متوسط<br>Moderately Wet         | 1-1.5        |
| ترسالی ملایم<br>Incipient Wet          | 0.5-1        |
| نرمال<br>Normal                        | -0.5-0.5     |
| خشک‌سالی ملایم<br>Incipient Dry        | -0.5- -1     |
| خشک‌سالی متوسط<br>Moderate Drought     | -1- -1.5     |
| خشک‌سالی شدید<br>Severe Drought        | -1.5- -2     |
| خشک‌سالی بسیار شدید<br>Extreme Drought | $-2 \geq$    |

شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی

در پژوهش پیش‌رو، GRI (Groundwater Resource Index) به‌عنوان الگوی معتبر و کاربردی استفاده شد. مقدار شاخص GRI با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد.

شده است، به طوری که در نامیوند علیا به حدود ۱۲۶۸ متر می‌رسد. براساس نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی، جریان آب در آبخوان‌های ماهیدشت از جنوب‌شرق به سمت شمال‌غرب جریان دارد.

مقاطع ورودی و خروجی جریان به محدوده آبخوان در مهرماه سال ۹۶، ۹۱ و ۸۶ در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس نقشه مهرماه ۹۶، بیشترین سطح آب زیرزمینی مربوط به جنوب‌شرقی آبخوان‌ها و بیش از ۱۵۳۱ متر در نجف‌آباد است که به سمت غرب و شمال‌غرب به تدریج کم

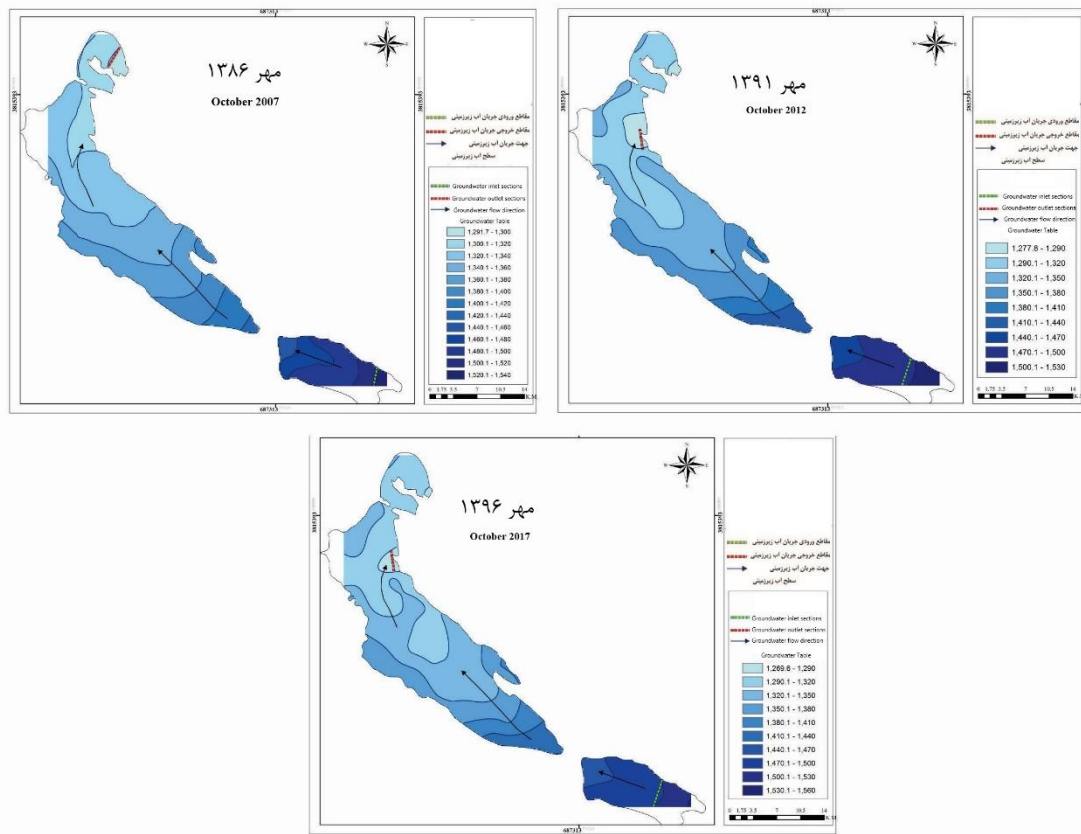


شکل ۲- پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت در مهر ماه سال ۱۳۸۶، ۱۳۹۱، ۱۳۹۶.

Figure 2. Zoning of water table of Mahidasht aquifer in October 2007, 2012, 2017

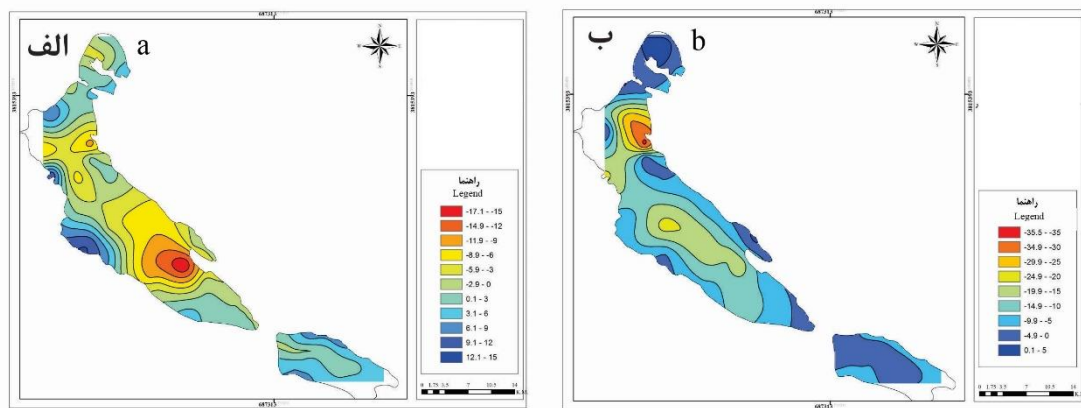
بدون تغییر و حتی در غرب منطقه افزایش تراز تا حدود ۱۵ متر را داشته‌اند. اما طی پنج سال دوم (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶) مقدار افت بیشتر بوده است، به طوری که بیشترین کاهش تراز آب زیرزمینی بیش از ۳۵ متر بوده است.

شکل ۳ پهنه‌بندی تغییرات پنج‌ساله تراز آب زیرزمینی از مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۶ و از مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۱ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ الف طی پنج سال اول (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱) بیشترین کاهش تراز آب زیرزمینی در نواحی میانی با افتی بیش از ۱۷ متر، در برخی مناطق شرایطی



شکل ۲- پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت در مهر ماه سال ۱۳۸۶، ۱۳۹۱، ۱۳۹۶.

Figure 2. Zoning of water table of Mahidasht aquifer in October 2007, 2012, 2017



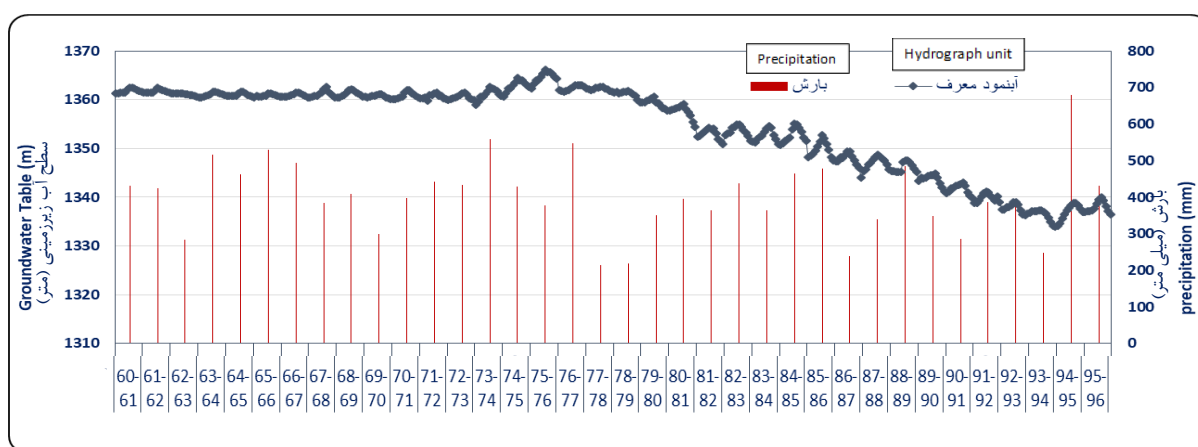
شکل ۳- پهنه‌بندی تغییرات پنج‌ساله تراز آب زیرزمینی آبخوان ماهیدشت. (الف) از مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۱؛ (ب) از مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۶

۱۳۹۶

Figure 3. Zoning five-year changes in the water table of the Mahidasht aquifer: (a) From October 2007 to October 2012; (b) From October 2012 to October 2017

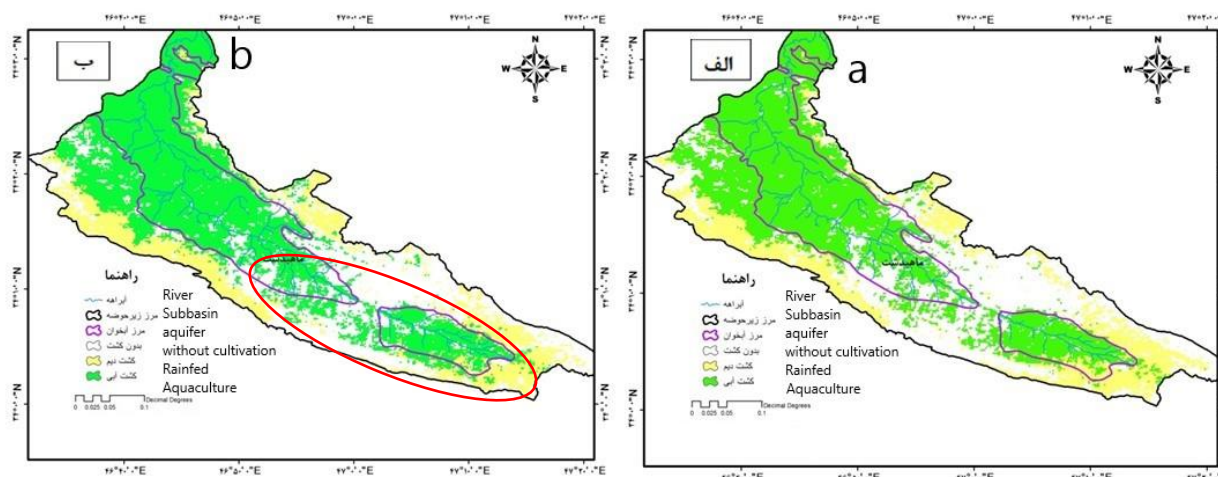
است، این روند همچنان ادامه دارد و سطح آب زیرزمینی در طول این دوره با افتی برابر ۲۴/۷۸ متر روبه‌رو بوده است. بنابراین، متوسط افت سالیانه تراز آب زیرزمینی برابر ۰/۶۹ متر محاسبه می‌شود. با توجه به ارقام آبنمود معرف در سال آبی انتهای دوره (۹۶-۹۵)، تراز آب زیرزمینی در سال آبی ۹۶-۹۵ به میزان ۰/۴ متر افت داشته است.

شکل ۴ آبنمود معرف آبخوان ماهیدشت و میانگین بارش سالیانه برای یک دوره سی و شش ساله (۱۳۶۰-۹۶) را نشان می‌دهد. در این شکل تراز آب زیرزمینی و میانگین بارش سالیانه از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۶ مشخص شده است. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری یادشده حکایت از آن دارد که سطح آب زیرزمینی تا سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ متعادل بوده و بعد با افت مداوم مواجه شده



شکل ۴- آبنمود معرف آبخوان ماهیدشت و میانگین بارش سالیانه در دشت برای یک دوره سی و شش ساله (۱۳۶۰-۱۳۹۶).

Figure 4. Hydrograph of Mahidasht aquifer and average annual precipitation in the plain for a period of thirty-six years (1981-2017).



شکل ۵- تغییرات پنج‌ساله اراضی زراعی آبی و دیم محدوده ماهیدشت. الف) از مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۱، ب) از مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۶  
Figure 5. Five-year changes in irrigated and rainfed arable lands in Mahidasht. a) From October 2007 to October 2012, b) From October 2012 to October 2017

بررسی تغییرات اراضی زراعی آبی و دیم محدوده ماهیدشت  
 شکل ۵ پهنه میانگین پنج ساله سطح اراضی زراعی آبی و دیم از مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۶ و از مهر ۱۳۸۶ تا مهر ۱۳۹۱ را نشان می دهد. مطابق شکل ۵ تقریباً در بیشتر سطح

محدوده آبخوان ماهیدشت شاهد کشاورزی آبی بوده ایم. طی پنج سال دوم (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶)، مقدار سطح زیرکشت به ویژه در نواحی پایین دست افزایش یافته است و از وسعت اراضی دیم کاسته شده است (جدول ۵)، که نشان دهنده افزایش فشار بر منابع آبی منطقه است.

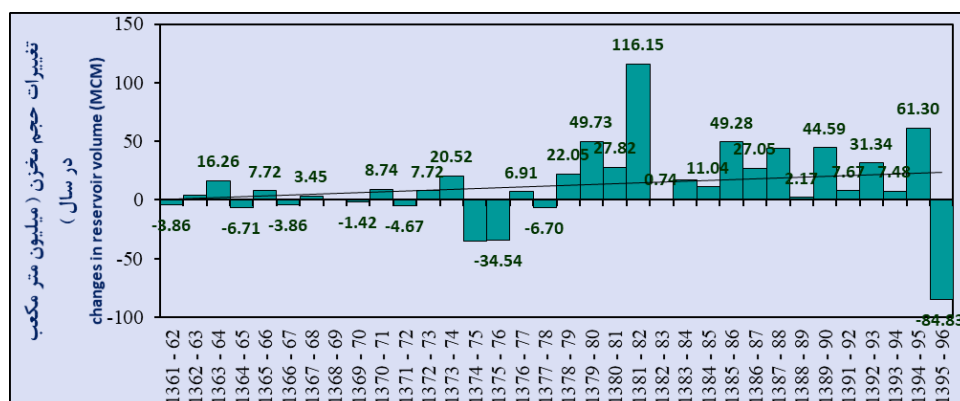
جدول ۵- مساحت سطح زیرکشت دیم و آبی در دشت ماهیدشت

Table 5. Area of rainfed and irrigated cultivation in Mahidasht plain

| نوع کشت          | درصد مساحت      | 2012-2017 | درصد مساحت      | 2007-2012 |
|------------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Cultivation type | Area percentage |           | Area percentage |           |
| کشت دیم          | 18.77           | 247.63    | 18.49           | 277.12    |
| Rainfed          |                 |           |                 |           |
| کشت آبی          | 50.04           | 732.18    | 48.36           | 707.46    |
| Water farming    |                 |           |                 |           |

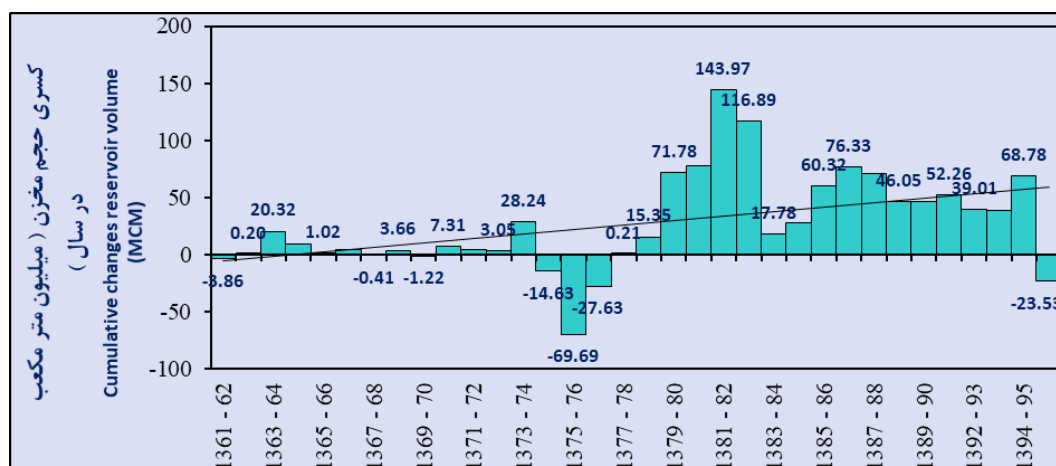
بررسی تغییرات کسری مخزن آبخوان ماهیدشت شبکه چاه های مشاهده ای در آبخوان آبرفتی ماهیدشت با مساحت ۵۸۴/۹۰ کیلومتر مربع از سال آبی ۶۱-۱۳۶۰ تا سال ۹۶-۱۳۹۵ اندازه گیری مستمر داشته و نوسان سطح آبخوان طی ۳۶ سال گذشته بررسی شده است. با توجه به نمودار یادشده، سطح آب زیرزمینی تا سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ متعادل بوده و بعد با افت مداوم مواجه شده است و این روند همچنان ادامه دارد. نوسان ارتفاع سطح آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای دوره اندازه گیری به ترتیب ۳۳/۱۳۶۱ و ۵۵/۱۳۳۶ متر از سطح دریاست. به عبارت دیگر، آبخوان در ۳۶ سال گذشته ۲۴/۷۸ متر افت داشته است. این مقدار افت

با در نظر گرفتن ۵۸۴/۹۰ کیلومتر مربع سطح تبسن و متوسط ضریب ذخیره آبخوان برابر ۴ درصد، بیانگر ۵۷۹/۷۵ میلیون مترمکعب کاهش حجم مخزن آب زیرزمینی در ۳۶ سال گذشته است. به عبارت دیگر، متوسط کسری حجم مخزن آبرفتی حدود ۱۰/۱۶ میلیون مترمکعب در سال است. بنابراین می توان گفت در سال های گذشته علاوه بر مصرف صددرد صد ذخیره تجدیدشونده، بخش قابل توجهی از ذخیره ثابت نیز مورد بهره برداری قرار گرفته است. شکل ۶ و ۷ روند تغییرات سالانه و تجمعی کسری مخزن آبرفتی را به نمایش می گذارد. البته روند تغییرات در بازه زمانی ۳۶ ساله، افزایشی است.



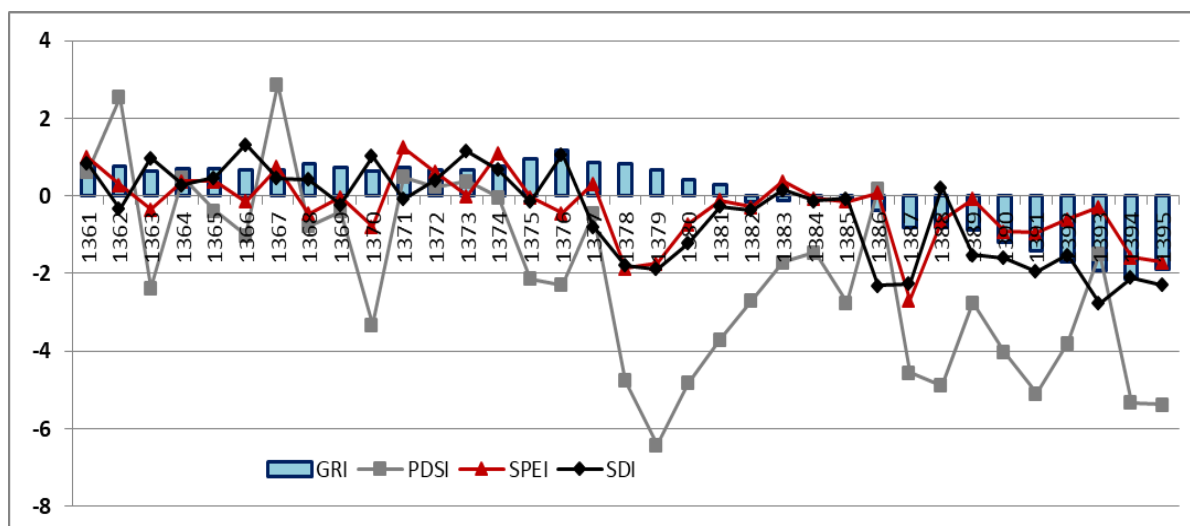
شکل ۶- نمودار تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی ماهیدشت

Figure 6. Annual changes in alluvial aquifer reservoir volume of Mahidasht



شکل ۷- نمودار تغییرات تجمعی حجم مخزن آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی ماهیدشت

Figure 7. Cumulative changes in alluvial aquifer reservoir volume of Mahidasht



شکل ۸- نمودار تغییرات سالانه شاخص‌های اقلیمی (PDSI, SPEI)، هیدرولوژیکی (SDI) و آب زیرزمینی (GRI) محدوده مطالعاتی

ماهیدشت

Figure 8. Annual changes in climatic Index (PDSI, SPEI), hydrology Index (SDI) and hydrogeology Index (GRI) of Mahidasht

سالی یا ترسالی را به صورت پدیده‌ای پویا در نظر می‌گیرد (Palmer, 1965). به همین دلیل در بررسی علل خشک سالی آب‌های زیرزمینی به همراه شاخص‌های SPEI و SDI نتایج قطعی‌تری را ارائه می‌کند. طبق شکل، خشک‌سالی از سال ۱۳۸۷ شدت گرفته و تا پایان دوره با نوسانهایی ادامه می‌یابد. شدیدترین خشک‌سالی اقلیمی در سال ۱۳۷۹ با رقم شاخص  $-6/41$  به وقوع پیوسته است. شاخص خشک

بررسی شاخص‌های اقلیمی، هیدرولوژی و هیدرولوژیکی آبخوان ماهیدشت

در شکل ۸ مقادیر شاخص PDSI در طول دوره آماری سی و پنج ساله (۱۳۶۱-۹۶) برای ماهیدشت نشان داده شده است. در این شاخص از یک الگوریتم بیلان رطوبت آب در خاک همراه با محاسبه ویژگی‌های خاک، بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل استفاده می‌شود و شرایط خشک

جدول ۶- روابط همبستگی بین سطح تراز آب زیرزمینی با شاخص‌های خشک‌سالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، میزان تخلیه از چاه، چشمه و قنات و میزان مصارف

**Table 6. Correlation between groundwater level and arid climatic and hydrological indicators, discharge from wells, springs and aqueducts and consumption**

| Variables   | سطح تراز<br>Water Table |
|---|-------------------------|
| تغییرات سطح تراز<br>Water Table Changes                     | -0.107                  |
| سطح تراز<br>Water Table                                     | 1                       |
| شاخص GRI<br>GRI index                                       | 0.996                   |
| شاخص SDI<br>SDI index                                       | 0.749                   |
| شاخص PDSI<br>PDSI index                                     | 0.460                   |
| شاخص SPEI<br>SPEI index                                     | 0.075                   |
| تعداد چاه نیمه عمیق<br>Number of semi-deep wells            | 0.303                   |
| تخلیه چاه نیمه عمیق (MCM)<br>Semi-deep well discharge (MCM) | 0.853                   |
| تعداد چاه عمیق<br>Number of deep wells                      | -0.899                  |
| تخلیه چاه عمیق (MCM)<br>Deep Well Discharge (MCM)           | -0.048                  |
| تعداد چشمه<br>The number of springs                         | 0.921                   |
| تخلیه چشمه (MCM)<br>Spring discharge (MCM)                  | 0.880                   |
| تعداد قنات<br>The number of springs                         | 0.916                   |
| تخلیه قنات (MCM)<br>Aqueduct Discharge (MCM)                | 0.856                   |
| تخلیه کل (MCM)<br>Total Discharge (MCM)                     | 0.849                   |
| کشاورزی (MCM)<br>Agriculture (MCM)                          | 0.833                   |
| شرب (MCM)<br>drink (MCM)                                    | 0.855                   |
| صنعت (MCM)<br>Industry (MCM)                                | 0.618                   |
| مصرف کل (MCM)<br>Total consumption (MCM)                    | 0.835                   |

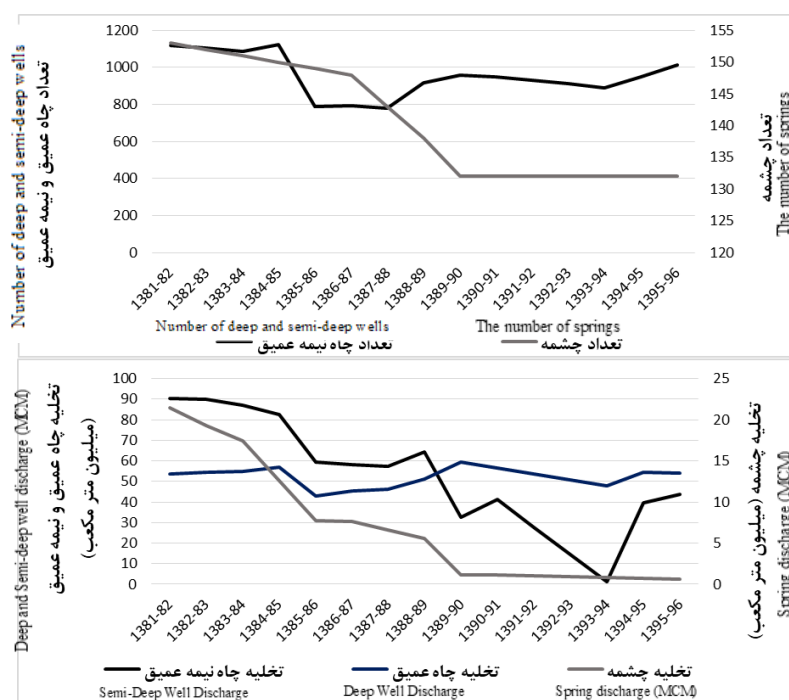
سالی اقلیمی SPEI روند نزولی را نشان می‌دهد و مشابه خشک‌سالی PDSI از سال ۱۳۸۷ شدت گرفته است. شدیدترین خشک‌سالی شاخص مورد نظر با رقم شاخص ۲/۶- مربوط به سال ۱۳۸۷ است. خشک‌سالی هیدرولوژی یا SDI نیز روند نزولی داشته و از سال ۱۳۸۷ نیز شدت گرفته است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، شدیدترین خشک‌سالی مربوط به سال ۱۳۹۴ با رقم شاخص ۵/۳- است. براساس این نمودار، شاخص GRI نیز به‌طور کلی روندی نزولی دارد و تا پایان دوره آماری مقادیر منفی شاخص مشاهده می‌شود. از سال ۱۳۸۲ این روند شدت گرفته، به طوری که شدیدترین خشک‌سالی آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۴ با رقم شاخص ۲/۱- به وقوع پیوسته است.

بررسی روابط همبستگی (جدول ۶ و جدول ۷) بین سطح تراز آب زیرزمینی با عواملی مانند شاخص‌های خشک‌سالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، میزان تخلیه از چاه، چشمه و قنات و میزان مصارف مختلف (کشاورزی، شرب و صنعت) از آبخوان‌ها نشان داد، شاخص‌های هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی (به ترتیب GRI و SDI) بیشترین همبستگی را با سطح تراز آب زیرزمینی داشته‌اند که این همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بوده است. اما در مورد عوامل مدیریتی تأثیرگذار مانند تعداد منابع برداشت و حجم تخلیه آبخوان، نتایج نشان داد، هرچند شاهد همبستگی بالا و مثبت معنی‌دار بین تغییرات تعداد و تخلیه چشمه و قنات با سطح تراز آبخوان هستیم، اما این همبستگی مثبت نشان‌دهنده این واقعیت است که با افزایش خشک‌سالی‌ها و شرایط بحرانی، منابع آبی منطقه کاهش یافته و در نتیجه با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی و خشکیدگی چشمه‌ها مواجه شده‌ایم. این مسئله سبب فشار بیشتر بر منابع آب زیرزمینی و افزایش حفر چاه‌های عمیق و تخلیه از آنها شده که همبستگی منفی و بالایی بین تعداد چاه‌های عمیق و سطح آب زیرزمینی مؤید همین مطلب است. همبستگی بالا و مثبت بین سطح تراز آبخوان و مصارف نیز نشان‌دهنده کاهش مصارف در سطح منطقه همزمان با کاهش سطح تراز است.

جدول ۷- خروجی ضریب همبستگی پیرسون بین SPEI، SDI، PDSI، و مصرف کل آبخوان ماهیدشت، از نرم‌افزار Spss

Table 7. Output of Pearson correlation coefficient between GRI, SDI, SPEI, PDSI and total consumption of Mahidasht aquifer, from Spss software

| Variables                                   | مصرف کل (MCM)<br>total consumption<br>(MCM) | SPEI  | PDSI  | SDI   | GRI   | سطح تراز<br>Water Table |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| سطح تراز<br>Water Table                     | 0.835                                       | 0.075 | 0.460 | 0.749 | 0.996 | 1                       |
| GRI   | 0.829                                       | 0.113 | 0.482 | 0.740 | 1     | 0.996                   |
| sdi   | 0.725                                       | 0.176 | 0.122 | 1     | 0.740 | 0.749                   |
| pdsi  | 0.185                                       | 0.277 | 1     | 0.122 | 0.482 | 0.460                   |
| spei  | 0.138                                       | 1     | 0.277 | 0.176 | 0.113 | 0.075                   |
| مصرف کل (MCM)<br>total consumption<br>(MCM) | 1   | 0.138 | 0.185 | 0.725 | 0.829 | 0.835                   |



شکل ۹- نمودارهای تعداد و برداشت منابع آب دشت ماهیدشت در حوضه آبریز کرخه

Figure 9. Diagrams of number and drainage of water resources in Mahidasht plain

وضعیت بحرانی برای چشمه‌های منطقه با افزایش حفر چاه‌های عمیق و بهره‌برداری بیشتر از آب‌های زیرزمینی این محدوده مطالعاتی نگران‌کننده است، به نحوی که تخلیه از چشمه‌ها در سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ به ۰/۶۱ میلیون مترمکعب رسیده است و میزان تخلیه کل منابع آبی با شیب

همان طوری که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، چاه‌های نیمه‌عمیق، عمیق، قنات‌ها و چشمه‌های متعددی در این محدوده وجود دارند. روند افزایشی تعداد چاه‌های نیمه‌عمیق و عمیق در مقابل روند کاهش تخلیه آنها نشان‌دهنده پایین آمدن سطح آب منطقه و مهاجرت چاه‌های نیمه‌عمیق است.



ویژه در نواحی پایین دست و کاهش وسعت اراضی دیم فشار بر منابع آب زیرزمینی منطقه توجیه پذیر است. تأثیر خشک سالی هواشناسی و هیدرولوژی بر آب های زیرزمینی با تأخیر زمانی انجام می شود و همان طور که در نمودارها دیده می شود، شیب شدت خشک سالی اقلیمی و رودخانه ای و به دنبال آن خشک سالی آب های زیرزمینی، به ترتیب در سال های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ به اوج خود می رسد.

تأثیر خشک سالی بر افت منابع آب زیرزمینی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد و نشان داد، در آبخوان ماهیدشت همبستگی ناچیزی بین شاخص GRI و PDSI در مقایسه با میزان مصرف وجود دارد. نتایج با توجه به افزایش زمین های زیرکشت و افزایش تعداد و میزان بهره برداری از چاه های منطقه و در نتیجه خشک شدن تعداد زیادی از چشمه های منطقه مورد نظر (Russo et al., 2017) قابل تفسیر خواهند بود. به طور کلی بررسی های انجام شده نشان می دهد، تخلیه از چاه های عمیق منطقه از سال ۸۵-۱۳۸۴ اوج گرفته و در مقابل شیب کاهشی شدیدی در خروجی از چشمه ها دیده می شود، در نتیجه آن وضعیت بحرانی برای چشمه ها و آب زیرزمینی منطقه ایجاد شده است.

نتایج همبستگی پایین دو شاخص اقلیمی PDSI و SPEI و شاخص آب های سطحی SDI با شاخص آب زیرزمینی GRI نشان داد، عامل افت سطح آب در آبخوان ها و خشکیدگی چشمه ها را نمی توان تنها با خشک سالی توجیه کرد (Zandifar et al., 2021)، بلکه در برخی موارد برداشت های بی رویه و دخالت های انسانی تأثیر بیشتری نسبت به خشک سالی دارد (Mair et al., 2010; Russo et al., 2017).

نتایج حاصل از این بررسی با نتایج حاصل از تحقیقات SoleimaniSardoo و MesbahZadeh (۲۰۱۸) در حوضه آبریز کرخه، Fiorillo و همکاران (۲۰۱۰) در ایتالیا و SoleimaniSardoo و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه آبریز جازموریان مطابقت دارد. با توجه به میزان افت سطح و کاهش منابع آب

تند کاهشی طی ۱۵ سال تقریباً به نصف رسیده است. بیشترین و کمترین میزان تخلیه آبخوان های آبرفتی و سازندهای سخت به ترتیب مربوط به سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ به میزان ۱۶۷ میلیون مترمکعب و سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ به میزان ۵۰/۰۹ میلیون مترمکعب است.

#### نتیجه گیری

در این پژوهش، منابع آب، نقشه های پنج ساله هم تراز، تغییرات سطح و تغییرات اراضی زراعی آبی و دیم، آب نمود معرف همراه تغییرات متوسط سالیانه میزان بارش، تغییرات حجم مخزن، شاخص های خشک سالی GRI و SDI و PDSI و میزان بهره برداری از منابع آب زیرزمینی برای بررسی عوامل مؤثر بر افت سطح و رفتارسنجی کاهش سطح آب های زیرزمینی، در رابطه با ارائه راهکارهای حفاظت و مدیریت مناسب دشت ماهیدشت محاسبه شد.

نتایج حاصل از بررسی تراز و عمق آب زیرزمینی نشان داد، بالاترین سطح آب زیرزمینی مربوط به نواحی جنوب شرقی و حدود ۱۵۳۱ متر است که به سمت غرب آبخوان به تدریج کم شده است، به طوری که کمترین سطح آب به حدود ۱۲۶۸ متر می رسد. مقدار افت، روند افزایشی داشته، به طوری که بیشترین کاهش تراز آب زیرزمینی در دوره پنج ساله ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ بیش از ۳۵ متر بوده است. نتایج حاصل از هیدروگراف های ترسیمی نشان داد، تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت ماهیدشت به طور کلی روندی نزولی دارد. شیب نزولی سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۶ آغاز و با میزان بارش منطقه همسویی دارد، اما از سال ۱۳۸۸ این همبستگی مشاهده نمی شود و عامل کاهش سطح ایستابی را باید در نحوه مدیریت و برداشت از منابع آبی جستجو کرد. سطح آب زیرزمینی در طول دوره ۳۶ ساله با افتی برابر ۲۴/۷۸ متر روبه رو بوده است. همچنین ۵۷۹/۷۵ میلیون مترمکعب کاهش حجم مخزن آب زیرزمینی در این دوره آماری محاسبه شده است. به عبارت دیگر، متوسط کسری حجم مخزن آبرفتی حدود ۱۶/۱۰ میلیون مترمکعب در سال است. با توجه به افزایش مقدار سطح زیرکشت به

- Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, Using the SPI. *Water Resources Manage*, 24: 1867-1884.
- Gehreles, J.C., Van Geer, F.C. and De Vries, J.J., 1994. Decomposition of groundwater level fluctuations using transfer modeling in an area with shallow to deep unsaturated zones. *Journal of Hydrolog.*, 157: 105-138.
- Halder, S., Roy, M.B. and Roy, P.K., 2020. Analysis of groundwater level trend and groundwater drought using Standard Groundwater Level Index: a case study of an eastern river basin of West Bengal, India. *SN Applied Sciences*, 2(507): 507-531.
- Havril, T., Tóth, Á., Molson, J.W., Galsa, A. and Mádl-Szónyi, J., 2018. Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? *Journal of Hydrology*, 563: 1169-1180.
- Hellwing, J., de Graaf, I.E.M., Weiler, M. and Stahl, K., 2020. Large scale assessment of delayed groundwater responses to drought. *Water Resource*, 56(2): 1-19.
- Khosravi Dehkordi, A., Mirabbasi, R., Samadi Boroujeni, H. and Ghasemi Dastgerdi, A.R., 2019. Monitoring and forecasting of groundwater drought in Shahrekord plain using Groundwater Resource Index (GRI) and Markov chain model. *Hydrogeology*, 4(1): 111-125 (In Persian)
- Konikow, L.F. and Kendy, E., 2005. Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal* 13(1): 317-320.
- Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C.N., Yong, B., Shafer, M.A. and Riley, R., 2012. Hydro climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in Blue River Basin Oklahoma. *Water Resources Management*, 26(10): 2761-2779.
- Mair, A. and Fares, A., 2010. Influence of groundwater pumping and rainfall spatio-temporal variation of stream flow. *Journal of Hydrology*, 393: 287-308.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, American Meteorological Society, pp. 179-184.
- Mendicino, G., Senatore, A. and Versace, P., 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology Journal*, 357: 282-302.
- MesbahZadeh, T. and SoleimaniSardoo, F., 2018. Temporal trend study of hydrological and meteorological drought in Karkheh watershed. *Jwmseir*, 12 (40):105-114 (In Persian).
- Mirakbari, M., Mortezaei, G. and Mohseni, M., 2018. Investigation of Effect Meteorological Drought on Surface and Ground Water Resources by Indices تجدیدپذیر و مصارف آبی در محدوده مطالعاتی ماهیدشت، لزوم برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت صحیح منابع آب‌های زیرزمینی در منطقه ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین پیشنهاد می‌شود، اقدامات مؤثر مانند تغییر الگوی کشت و توسعه اراضی دیم با توجه به آثار جانبی این راهکارها همراه با کاهش مصارف متوازن با پتانسیل‌های منابع آبی و تحقیق در زمینه راندمان انتقال انجام شود.
- سیاسگزاری
- این پژوهش، بخشی از «طرح جامع مطالعات گردوغبار استان خوزستان» زیرپروژه «بررسی و مطالعه کمی آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی آن در سه حوزه آبخیز غرب ایران (کرخه، کارون و جراحی- زهره)» با کد مصوب ۹۷۱۴۱۲-۹۷۰۴۲-۰۹-۰۹-۰۹ است. در اینجا لازم می‌دانم از همکاری و مساعدت رئیس محترم مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، جناب آقای دکتر جلیلی و مسئول مطالعات، جناب آقای مهندس فیاض و راهنمایی‌های ارزنده مدیران و کارشناسان دفتر مطالعات پایه سازمان مدیریت منابع آب ایران در اعتلای بیشتر تحقیق سیاسگزاری نمایم.
- منابع مورد استفاده
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Rase, D. and Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*, Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO Rom, Italy, 300p.
- Azadi, S., Soltani Kopaei, S., Faramarzi, M., Soltani Tudeshki, A. and Pourmanafi, S., 2015. Evaluation of palmer drought severity index in central Iran. *JWSS*, 19(72): 305-319.
- Bazrafshan, J. and Khalili, A., 2013. Spatial analysis of meteorological drought in Iran from 1965 to 2003. *Desert*, 18(1): 63-71.
- Fishman, R.E., 2011. Using water balance models to approximate the effects of climate change on spring catchment discharge: Mt. Hanang, Tanzania. (MS Thesis, Michigan Technological University). Available at: [http://www.geo.mtu.edu/rs4hazards/Project%20resources/theses/fish\\_thesis.pdf](http://www.geo.mtu.edu/rs4hazards/Project%20resources/theses/fish_thesis.pdf).
- Fisher, P.F.; 2005. *Development in spatial data handling*, Springer, Germany, 676p.
- Fiorillo, F., Esposito, L. and Guadagno, FM., 2010.

- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 55-94.
- Van Loon, A.F., 2013. On the propagation of drought. Wageningen University, publication place, 196p.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguer'ia, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718.
- Wang, M., Jiang, SH., Ren, L., YuXu, CH., Menzel, L., Yuan, F., Xu, Q., Liu, Y. and Yang, X., 2021. Separating the effects of climate change and human activities on drought propagation via a natural and human-impacted catchment comparison method. *Journal of Hydrology*, 603: 126913.
- Williams, A.P., Seager, R., Abatzoglou, J.T., Cook, B.I., Smerdon, J.E., Cook, E.R., 2015. Contribution of anthropogenic warming to California a drought during 2012-2014. *Geophysical Research Letters*, 42(16): 6819-6828.
- Zandifar, S., Fijani, E., Naeimi, M. and Khosroshahi, M., 2020. Spatiotemporal variations of groundwater drought indices, Case study: Zohreh- Jarrahi watershed. *Hydrogeology*, 4(2): 108-130 (In Persian).
- Zandifar, S., Dargahian, F., Fijani, E. and Naeimi, M., 2021. The trend of groundwater variations and drought in the Karkheh watershed. *Watershed Management Research Journal*, 34(3): 53-73 (In Persian).
- Zareii, H., Kalantari, N. and Nadri, A., 2017. Climate changes effects on quantity and quality conditions of the Bibitalkhone Karstic Spring, Lali Khuzestan. *Hydrogeology*, 2(2): 1-16 (In Persian).
- Zhang, L., Jiaoa, W., Zhanga, H., Huang, C. and Tonga, Q., 2017. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 190: 96-106.
- Zynali, B., Asghari Saraskanroud, S. and Saffarian Zangir, V., 2017. Monitoring and forecast of drought in Urmia lake basin by SEPI index and ANFIS Model. *Journal Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 4(1): 73-96 (In Persian).
- SPI, SPEI, SDI and GRI. *Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(42):70-80 (In Persian).
- Mofidipoor, N., Brady Sheikh, V. and Ownegh, M., 2011. Sydaldyn A. the analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak. *Watershed jwmr*, 3(5): 16-26 (In Persian).
- Mohammadi, S., Salajegheh, A., Mahdavi, M. and Bagheri, R., 2012. An investigation on spatial and temporal variations of groundwater level in Kerman plain using suitable geostatistical method (During a 10-year period). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 19(1): 61-70 (In Persian).
- Moravej, M., Khalili, K. and Behmanesh, J., 2015. Investigation of relationship between hydrologic processes of precipitation, evaporation and stream flow using linear time series models (Case study: Western Basins of lake Urmia). *Water and Soil*, 29(1): 85-101 (In Persian).
- Moustadraf, J., Razack, M. and Sinan, M., 2003. Evaluation of the impacts of climate changes on the coastal Chaouia aquifer, Morocco, using numerical modeling. *Hydrogeology Journal*, 16(7): 1411-1426.
- Nalbantis, I., 2008. Evaluation of a hydrological drought index. *Water Europe*, 23: 67-77.
- Nayak, P., Satyaji, R. and Sudheer, K.P., 2006. Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resources Management*, 2: 1. 77-99.
- Palmer, W.C., 1965. *Meteorological Drought. Research. Paper No. 45, U. S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C, 58p.*
- Peters, E., 2003. Propagation of drought through groundwater systems, Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments, Dissertation Wageningen Universiteit, Wageningen, 202p.
- Russo, T.A. and Lall, U., 2017. Depletion and response of deep groundwater to climate-induced pumping variability. *Nature Geoscience*, 10(2): 105-108.
- SoleimaniSardoo, F. and Bahremand, A., 2014. Hydrological drought analysis using SDI index in Halilrud basin of Iran. *Journal of Environmental resources Research*, 2(1): 47-56.
- Sophocleous, M., 2000. From safe yield to sustainable development of water resources- the Kansas experience. *Journal of Hydrology*, 235: 27-43.

## Assessing drought and human interface on reducing groundwater reserves

S. Zandifar<sup>1\*</sup>, A. Jalili<sup>2</sup>, Z. Saeedifar<sup>3</sup> and M. Naeimi<sup>4</sup>

1\* - Corresponding author, Assistant Prof., Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, E-mail: samira.zandifar@gmail.com

2- Prof., Botany Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

3- Researcher, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

4- Assistant Prof., Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 01.11.2021

Accepted: 18.04.2022

### Abstract

Proper management and planning to prevent the decline of groundwater levels requires knowledge of the factors, indicators and criteria for changes in groundwater levels in areas affected by this phenomenon. Therefore, in order to be aware of the status of groundwater level fluctuations, it is necessary to conduct detailed studies in order to plan, operate and maintain water resources development plans and to predict and warn in time of drought periods. For this purpose, in the present study, the trend of groundwater changes in aquifers of Mahidasht study area in Kermanshah province in a statistical period of 35 years ending in 2018 was investigated. Then, the impact of droughts on the trend of groundwater level changes was analyzed using PDSI, GRI and SDI drought indices as well as changes in irrigated and rainfed arable lands. According to the results, the highest groundwater level was in the southeast and is about 1531m. Groundwater level changes in Mahidasht plain are generally declining and the groundwater level has dropped by 24.78m during the study period. Also, the results of low correlation between climatic and groundwater drought indices showed that the cause of water level decline in plain aquifers due to irregular impressions and management. Although Mahidasht aquifer has been selected as a case study in this article, the proposed method can be used in other areas to improve the protection and management of water resources.

**Keywords:** Groundwater level fluctuations, protection and management of water resources, Mahidasht aquifer, drought.