

## شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI) به عنوان روشی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی (مطالعه موردی: دشت دیر- آبدان، استان بوشهر)

محمد فاریابی<sup>۱\*</sup> و جابر مظفری زاده<sup>۲</sup>

۱. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت

۲. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۲۸؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۱/۳۰)

### چکیده

پدیده خشکسالی آثار منفی بزرگی بر منابع آب و محیط‌های وابسته به آن می‌گذارد و در برخی سال‌ها خسارت‌های جبران‌ناپذیری را سبب می‌شود. یکی از انواع مهم این پدیده، خشکسالی آب زیرزمینی است که بر اثر تغذیه ناکافی آبخوان‌ها به وجود می‌آید. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر خشکسالی و مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت دیر- آبدان در استان بوشهر است. برای این کار از آمار و داده‌هایی مانند بارندگی، تراز سطح آب زیرزمینی، نتایج آنالیز شیمیایی چاه‌های پایش کیفی و دبی چاه‌های بهره‌برداری استفاده شده است. وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) بررسی شده است. در این تحقیق شاخص جدیدی به نام شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI) معرفی شده است. این شاخص ترکیبی از شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)، شاخص اصلاح‌شده هدایت الکتریکی (MSECI) و شاخص استاندارد شده دبی چاه‌های بهره‌برداری (SWDI) است. بر اساس نتایج به دست آمده میانگین شاخص خشکسالی آب زیرزمینی کمتر از ۱- است. این موضوع نشان‌دهنده خشکسالی آب زیرزمینی با شدت متوسط است. این خشکسالی سبب تخریب کیفیت آب زیرزمینی نیز شده است. با توجه به شاخص MSECI، بحرانی‌ترین بخش آبخوان مناطق جنوبی آن است. از دیدگاه پتانسیل کمی آبخوان (شاخص SWDI) نیز مناسب‌ترین بخش آبخوان مناطق شمالی آن است. بر اساس میزان شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی، کمترین میزان شاخص HDMI (کمتر از ۴-) در بخش جنوبی محدوده دیر- آبدان و در مجاورت خلیج فارس دیده می‌شود، بنابراین بهره‌برداری از آبخوان در این مناطق توصیه نمی‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** آب زیرزمینی، خشکسالی، شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI)، محدوده دیر- آبدان.

## مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های جوّی است که بخش‌های مختلف محیطی را در طول دوره حاکمیت خود تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱]. اگرچه تعاریف متفاوتی برای این پدیده ارائه شده، به‌طور کلی خشکسالی نتیجه کمبود بارش طی یک دوره ممتد زمانی (یک فصل یا بیشتر) است. کاهش ذخایر آب سطحی شامل کاهش ذخایر مخازن سدها، خشک شدن چشمه‌ها و قنات‌ها، پیشروی بیابان، کاهش پوشش گیاهی، افت سطح آب زیرزمینی، خشک شدن مراتع، کاهش نفوذپذیری خاک، کاهش آب رودخانه‌ها، مشکلات اقتصادی-اجتماعی، مهاجرت کشاورزان و خالی شدن روستاها از جمله پیامدهای خشکسالی است [۲].

یکی از بخش‌های متأثر از شرایط بلندمدت خشکسالی، منابع آب زیرزمینی هستند که متأسفانه کمتر از سایر بخش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به دلیل کمبود بارش موجب افت سطح آب زیرزمینی می‌شود. خشکسالی سبب کاهش نزولات جوّی و درنهایت کاهش میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی خواهد شد. به‌علاوه، کاهش نزولات جوّی سبب نیاز به آبیاری بیشتر و پمپاژ بیشتر از آبخوان‌ها می‌شود. مجموعه این عوامل سبب افت کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی خواهد شد.

سازمان ملل متحد هشدار داده است که اگر جهان به میزان فعلی به مصرف آب ادامه دهد، تا سال ۲۰۲۵ بیش از دو میلیارد و هفتصد میلیون نفر در جهان با کمبود آب مواجه خواهند شد. براساس گزارش سازمان ملل در آینده‌ای نزدیک ۳۱ کشور جهان با کمبود آب مواجه خواهند شد و نام ایران به‌عنوان یکی از کشورهای بحرانی درگیر کمبود آب در آینده ذکر شده است. بنابراین، پایش خشکسالی و بررسی تأثیر آن بر منابع آب یکی از پیش‌نیازهای مهم مدیریت منابع آب است. کارایی سیستم‌های پایش خشکسالی به مقدار زیادی تحت تأثیر انتخاب دقیق شاخص خشکسالی قرار می‌گیرد. این شاخص باید به‌طور مناسبی نشان‌دهنده شرایط خشکسالی باشد [۴]. در سال‌های گذشته شاخص‌های مختلفی برای مطالعه خشکسالی توسعه پیدا کرده‌اند. برای مثال، شاخص بارش استاندارد (SPI) که برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی به‌کار می‌رود و از داده‌های بارندگی استفاده می‌کند. شاخص درصدی از نرمال (PN) که مفهوم اساسی آن تقسیم بارش واقعی بر بارش

نرمال است [۱]. شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) که پارامترهایی مانند دما، بارش، رطوبت خاک و تبخیر و تعرق را برای بررسی خشکسالی به‌کار می‌برد. شاخص خشکسالی احيائي (RDI) نیز براساس فاکتورهای اقلیمی و هواشناسی، سطح آب رودخانه، بارش برف، جریان‌های سطحی، ذخایر آب و همچنین دما محاسبه می‌شود. شاخص بارش مؤثر (ERI) به‌عنوان یکی از شاخص‌های جدید خشکسالی در سال‌های اخیر ارائه شده است. این شاخص براساس تحلیل‌های کمی از بارش مؤثر روزانه استوار است [۳]. شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) نیز به‌عنوان شاخصی جدید برای پایش خشکسالی آب زیرزمینی معرفی شده و از داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی برای پایش خشکسالی آب زیرزمینی استفاده می‌کند [۲]. وقتی با یک سیستم‌های پیچیده روبه‌رو هستیم معمولاً یک شاخص واحد توانایی توصیف و بررسی ویژگی‌های مختلف خشکسالی را ندارد [۴]. بنابراین، باید از شاخص‌های متعددی برای پایش خشکسالی و بررسی جنبه‌های مختلف آن استفاده کنیم. بر همین اساس در سال‌های اخیر تحقیقات خشکسالی به‌منظور پایش خشکسالی با ترکیب شاخص‌های مختلف توسعه یافته است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب انجام شده است. بر اساس تحقیقات ناظم‌السادات [۵] درصد فراوانی وقوع خشکسالی و شدت آن در کشور بسیار زیاد بوده که بیشترین فراوانی با ۵۰ درصد متعلق به منطقه بندرعباس است. سپس به‌ترتیب، زابل ۴۶/۷، زاهدان ۴۳، یزد ۴۲، ایرانشهر ۴۰ و کرمان ۲۷ درصد بیشترین خشکسالی را دارند. عزیزی [۶] تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت قزوین را بررسی کرده است. این محقق بیان می‌کند که خشکسالی‌های اقلیمی با تأخیر دو تا سه ماه بر سطح آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند. بر اساس مطالعات نظامی و خارا [۷] خشکسالی سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۷۹ سبب کاهش عمق آب، کاهش اکسیژن محلول آب، افزایش دمای آب و کاهش میزان غذا در تالاب امیر کلایه شده است. شکیب و همکارانش [۸] خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب زیرزمینی در شرق استان کرمانشاه را با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند. این محققان بیان کردند که خشکسالی کارکرد بسیار مهمی در افت سطح آب زیرزمینی داشته است. ناصرزاده و احمدی [۹] در پژوهشی با عنوان «بررسی عملکرد شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در

بررسی رابطه بین خشکسالی و سطح آب زیرزمینی در یکی از مناطق استرالیا به این نتیجه رسیدند که بین شاخص بارندگی استاندارد و سطح آب زیرزمینی کم عمق منطقه ارتباطی قوی وجود دارد. مندیسینو و همکارانش [۴] با استفاده از شاخص های SPI و GRI به بررسی خشکسالی در منطقه کالابریا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات سنگ شناسی حوضه بر شاخص GRI مؤثر است و sff تاخیر مرحله ای GRI نسبت به SPI می شود. مایر و فارس [۱۷] به منظور ارزیابی رابطه زمانی- مکانی بین جریان سطحی، بارندگی و آب زیرزمینی از داده های تاریخی طولانی مدت در حوضه هاوایی استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها بیان کننده کاهش معنادار جریان پایه آب های سطحی از سال ۱۹۶۰ بود، در حالی که بارندگی روند معناداری را در این دوره نشان نداد. شهید و هازاریکا [۱۸] تأثیر خشکسالی بر آب زیرزمینی در شمال بنگلادش را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد برداشت آب زیرزمینی در فصل خشک تأثیر زیادی در افت سطح آب زیرزمینی دارد و اگر مداخلات انسانی در سامانه آب زیرزمینی وجود نداشت، بارندگی مهم ترین عامل تأثیرگذار بر افت سطح آب زیرزمینی بود. بارکی و بایلی [۱۹] تأثیر تغییرات اقلیمی و خشکسالی را بر حجم نلزه های حاوی آب زیرزمینی شیرین در جزایر مارشال مطالعه کردند. نتایج این مطالعات نشان داد در شرایط خشکسالی آب زیرزمینی شیرین جزایر کوچک افت زیادی را نشان می دهد.

ماهیت آرام و خزشی خشکسالی سبب شده است که این پدیده به راحتی و به طور دقیق قابل ارزیابی نباشد. اغلب آثار خشکسالی غیرسازه ای است و گستره جغرافیایی وسیع تری را نسبت به سایر بلاهای طبیعی تحت تأثیر خود قرار می دهد. مشخصه های غیرسازه ای تأثیرات خشکسالی، مانعی بر سر راه تخمین درست و قابل اعتماد شدت و در نهایت مانعی در برابر توسعه طرح های آمادگی در مقابل خشکسالی و مدیریت آن شده است [۲]. مدیریت منابع آب در شرایط بحرانی از جنبه تأمین آب مورد نیاز و عدم خسارت به منابع آب حائز اهمیت است. در این مقاله مدیریت منابع آب زیرزمینی به عنوان مهم ترین منبع آب موجود در دشت دیر- آبدان بررسی شده است. بدین منظور سعی شده است شاخص جدیدی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی ارائه شود.

ارزیابی خشکسالی و پهنه بندی آن در استان قزوین دریافتند که شاخص SPI برای نشان دادن خشکسالی های شدید در جایگاه نخست قرار دارد. چمن پیرا و همکارانش [۱۰] تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت الشتر را با استفاده از شاخص GRI بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد خشکسالی های هواشناسی و آب زیرزمینی به ترتیب بر فصول زمستان و پاییز منطبق هستند و مدیریت بهینه بهره برداری از آب های زیرزمینی به خصوص در فصول بهار و تابستان آثار بسیار مهمی در جلوگیری از تخریب منابع آب زیرزمینی منطقه دارد. خوشحال و همکارانش [۱۱] تأثیر خشکسالی بر آب های زیرزمینی در حوضه دهگلان در استان کردستان را بررسی کردند. در این مطالعه واکنش آب زیرزمینی در برابر خشکسالی در دوره های زمانی مختلف بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد دو عامل بزرگی و طول دوره خشکسالی ها در میزان افت سطح آب زیرزمینی تأثیر مهمی دارند. کرمی [۱۲] تأثیر خشکسالی های هواشناسی در افت آب زیرزمینی در دشت تبریز را با استفاده از شاخص SPI و روش های آمار دومتغیره بررسی کرد. نتایج این مطالعه نشان داد خشکسالی آب زیرزمینی با دو ماه تأخیر نسبت به خشکسالی هواشناسی بروز می کند. آل بوعلی و همکارانش [۱۳] آثار خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت کاشان را با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد علاوه بر خشکسالی، بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی نیز عامل افت سطح آب زیرزمینی است و سهم برداشت بی رویه در افت سطح آبخوان به مراتب بیش از خشکسالی است.

مک کی و همکارانش [۱۴] شاخص بارش استاندارد شده (SPI) را به منظور تعریف و پایش خشکسالی و تعیین کمبود بارش در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه توسعه دادند. مرکز ملی تعدیل خشکسالی ایالت متحده نیز به منظور پایش خشکسالی و شرایط ذخیره رطوبت خاک از شاخص SPI استفاده می کند. اسکایبک و آلن [۱۵] از مدل ریاضی مادفلو<sup>۱</sup> به منظور مطالعه تأثیر تغییرات اقلیمی بر دو آبخوان کوچک در غرب کانادا و ایالات متحده آمریکا استفاده کردند. نتایج این تحقیق تأثیر کم تغییرات اقلیمی را بر تغذیه و سطح آب زیرزمینی نشان داد. خان و همکارانش [۱۶] در

## مواد و روش‌ها

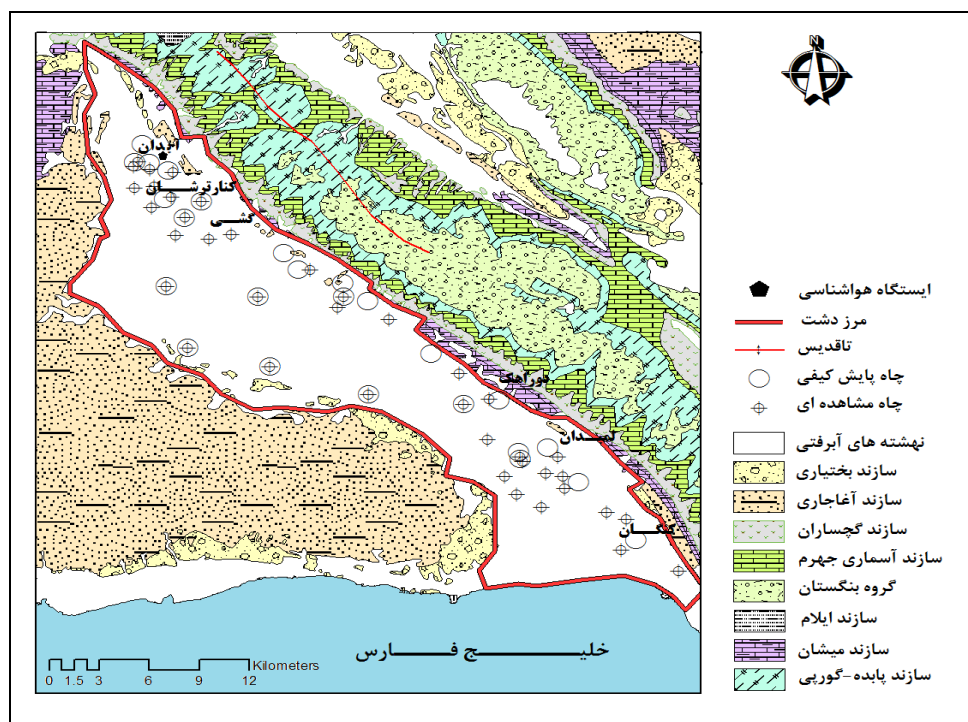
## منطقه مطالعه شده

محدوده دیر-آبدان بین طول‌های جغرافیایی ۲۰° ۵۱ تا ۳۳° ۵۲ شرقی و عرض‌های ۲۷° ۳۶ تا ۲۸° ۱۴ دقیقه شمالی در جنوب استان بوشهر واقع شده است. مساحت این محدوده ۱۵۴۴ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا به‌طور متوسط ۲۲۳ متر است. مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناسی این محدوده شامل سازند کنگلومرای بختیاری (کنگلومرا)، سازند آغاچاری (ماسه‌سنگ و مارن)، سازند گچساران (مارن، گچ و نمک)، سازند آسماری چهارم (آهک)، گروه بنگستان (ماسه‌سنگ و شیل)، سازند ایلام (آهک با میان‌لایه‌های شیلی)، سازند میشان (آهک)، سازند پایده گورپی (شیل و مارن) و رسوبات آبرفتی (گراول، شن، ماسه و مقداری رس) هستند. آبخوان منطقه مطالعه شده نیز یک آبخوان آزاد است. برای پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت دیر-آبدان از ۳۵ چاه مشاهده‌ای (پیزومتر) و ۲۷ چاه پایش کیفی (منبع انتخابی) استفاده می‌شود (شکل ۱). سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای به‌صورت ماهانه و پارامترهای کیفی آب در چاه‌های پایش کیفی

به‌صورت فصلی اندازه‌گیری می‌شود. ایستگاه هواشناسی آبدان نیز در مجاورت شهر آبدان قرار گرفته است. این ایستگاه از نوع باران‌سنجی است [۲۰].

## روش تحقیق

روش استفاده شده در این تحقیق برای به‌کارگیری تصمیمات مدیریتی شامل جنبه‌های مختلفی از جمله وضعیت خشکسالی، وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی، که خود نتیجه تأثیر شرایط اقلیمی و هیدروژئولوژیکی است و قابلیت کمی آبخوان می‌شود. در این مطالعه از نوسانات بارندگی و تراز آب زیرزمینی برای بررسی خشکسالی استفاده شده است. برای کمی کردن تأثیرات خشکسالی نیز از دو شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) استفاده شده است. شاخص‌های SPI و GRI به‌عنوان دو شاخص مفید و قابل اعتماد برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی و هیدروژئولوژیکی در ایران و سایر کشورهای دنیا به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند [۱۰]. برای پهنه‌بندی مکانی شاخص‌های مختلف خشکسالی در این مطالعه از روش زمین‌آماري کریجینگ<sup>۱</sup> استفاده شده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده همراه با موقعیت ایستگاه‌های انتخابی (چاه‌های مشاهده‌ای و چاه‌های پایش کیفی)

پارامترهای کیفی آبخوان مانند میزان بی کربنات، کلراید و سولفات محلول در آب قرار می گیرد. برای تعیین وضعیت کیفی آبخوان که تأثیر زیادی در مدیریت منابع آب زیرزمینی دارد، از شاخص هدایت الکتریکی استاندارد شده (SECI) استفاده شده است. این شاخص توسط صیف و همکارانش (۱۳۹۲) ارائه شده و به صورت زیر محاسبه می شود [۳]:

$$SECI = \frac{EC_i - EC_{avg}}{\sigma} \quad (3)$$

در این رابطه  $EC_i$  هدایت الکتریکی منبع آب زیرزمینی مد نظر،  $EC_{avg}$  و  $\sigma$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار هدایت الکتریکی منابع آب زیرزمینی (چاه، قنات و چشمه) در دوره آماری مد نظر است. از آنجا که روند نزولی سطح آب زیرزمینی مشخص کننده خشکسالی است، اما درباره هدایت الکتریکی این روند به صورت صعودی است (بر اثر خشکسالی و افت سطح آب، هدایت الکتریکی آب زیرزمینی افزایش می یابد)، برای هماهنگ شدن دو شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) و تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی بر اثر خشکسالی و در نهایت ارزیابی اثر ترکیبی آنها در این مطالعه، شاخص تعریف شده توسط صیف و همکارانش به صورت زیر اصلاح شد:

$$MSECI = - \left( \frac{EC_i - EC_{avg}}{\sigma} \right) \quad (4)$$

در این فرمول MSECI نشان دهنده شاخص اصلاح شده هدایت الکتریکی استاندارد<sup>۴</sup> است.

#### شاخص دبی استاندارد چاه های بهره برداری<sup>۵</sup>

برای ارزیابی وضعیت کمی آبخوان ها معمولاً از ضرایب قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی آنها استفاده می شود. در منطقه مطالعه شده نقشه های این ضرایب تهیه نشده و اطلاعات مربوط به ضرایب هیدرولیکی محاسبه شده فقط در سه نقطه از آبخوان موجود است. بنابراین، از چگونگی پراکندگی چاه های بهره برداری و دبی آنها برای ارزیابی پتانسیل کمی آبخوان استفاده شده است، زیرا معمولاً دبی بیشتر نشان دهنده قابلیت انتقال بیشتر آبخوان و وضعیت هیدروژئولوژیکی مناسب تر خواهد بود. برای اینکه مقدار دبی چاه ها را نیز بتوان در این مطالعه استفاده کرد و در واقع مقادیر دبی نیز با دو شاخص قبلی، قابل مقایسه و

#### شاخص بارش استاندارد<sup>۱</sup>

شاخص بارش استاندارد (SPI) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود [۱]:

$$SPI = \frac{X_i - X_{avg}}{S_x} \quad (1)$$

در این رابطه  $X_i$  مقدار بارندگی،  $X_{avg}$  میانگین بارندگی در دوره آماری مد نظر و  $S_x$  انحراف معیار بارندگی دوره آماری است.

#### شاخص منبع آب زیرزمینی<sup>۲</sup>

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) با توجه به رابطه زیر محاسبه می شود [۱۳]:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\delta_{D,m}} \quad (2)$$

پارامتر  $D_{y,m}$  در این رابطه تراز سطح ایستابی در ماه  $m$  از سال  $y$  و پارامترهای  $\mu_{D,m}$  و  $\delta_{D,m}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده های سطح ایستابی ماه  $m$  برای  $D$  سال هستند. بعد از محاسبه شاخص های بارش استاندارد و شاخص منبع آب زیرزمینی، وضعیت خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی بر اساس جدول ۱ تعیین می شود.

جدول ۱. تعیین وضعیت خشکسالی با توجه به شاخص های SPI و GRI [۲۱]

وضعیت اقلیمی	مقدار شاخص SPI و GRI
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۹۹ تا ۱/۵
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نزدیک به بهنجار	-۰/۹۹ تا -۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱/۴۹ تا -۱
خشکسالی شدید	-۱/۹۹ تا -۱/۵
خشکسالی بسیار شدید	-۲ و کمتر

#### شاخص هدایت الکتریکی استاندارد<sup>۳</sup>

هدایت الکتریکی آب زیرزمینی بهترین پارامتری است که می تواند وضعیت کیفی آب زیرزمینی را نشان دهد، زیرا تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی مانند اقلیم، زمین شناسی، وضعیت بهره برداری از آبخوان و همین طور

4. Modified Standardized Electrical Conductivity Index  
5. Standardized Well Discharge Index

1. Standardized Precipitation Index  
2. Groundwater Resource Index  
3. Standardized Electrical Conductivity Index

دیده می‌شود. شدت این خشکسالی در سال‌های اخیر در حال افزایش است. نقشه پهنه‌بندی شاخص GRI در سال‌های آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۴ و ۱۳۹۰-۱۳۹۱ به‌عنوان دو سال مرطوب و خشک نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. در سال آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۵ بخش وسیعی از محدوده دیر-آبدان وضعیت نرمال و ترسالی دارد و فقط در بخش کوچکی در جنوب شرقی منطقه خشکسالی آب زیرزمینی متوسط دیده می‌شود (شکل ۳). در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ بخش وسیعی از محدوده مطالعه شده خشکسالی متوسط دارد. در بخش‌های مرکزی محدوده دیر-آبدان خشکسالی آب زیرزمینی شدید و بسیار شدید هم مشاهده می‌شود (شکل ۳). بنابراین، شدت خشکسالی آب زیرزمینی از ابتدای دوره آماری به سمت پایان دوره افزایش یافته است.

برای بررسی چگونگی تأثیرگذاری خشکسالی اقلیمی بر خشکسالی آب زیرزمینی، مقایسه‌ای بین شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) طی دوره آماری مشترک صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس زمانی ماهانه در سطح معناداری ۹۵ درصد ( $\alpha=0/05$ ) رابطه معناداری دارند و این رابطه به‌گونه‌ای است که با افزایش مقیاس زمانی، ضریب همبستگی این دو شاخص افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴، پایدارترین تأثیر زمانی خشکسالی هواشناسی (SPI) بر خشکسالی آب زیرزمینی (GRI) در بازه زمانی ۲۴ ماهه مشاهده می‌شود. به‌طوری که قبل از این بازه زمانی مقدار همبستگی کم و بعد از آن، تغییرات منحنی به‌صورت صعودی است.

ترکیب باشند، دبی چاه‌های بهره‌برداری طبق رابطه زیر به‌صورت استاندارد درآمد:

$$SWDI = \frac{Q_i - Q_{avg}}{\sigma} \quad (5)$$

در این رابطه SWDI نشان‌دهنده شاخص دبی استاندارد چاه،  $Q_i$  دبی چاه مد نظر،  $Q_{avg}$  و  $\sigma$  به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار دبی چاه‌های بهره‌برداری است.

#### شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی<sup>۱</sup>

در این مطالعه با ترکیب سه شاخص خشکسالی آب زیرزمینی (GRI)، شاخص اصلاح‌شده هدایت الکتریکی (MSECI) و شاخص دبی استاندارد چاه‌های بهره‌برداری (SWDI)، شاخص جدیدی به‌نام شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI) معرفی می‌شود. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$HDMI = GRI + MSECI + SWDI \quad (6)$$

با توجه به اینکه معمولاً بیشترین و کمترین این شاخص در محدوده ۶- و ۶+ قرار می‌گیرد، چگونگی مدیریت بهره‌برداری از آبخوان براساس جدول ۲ پیشنهاد می‌شود.

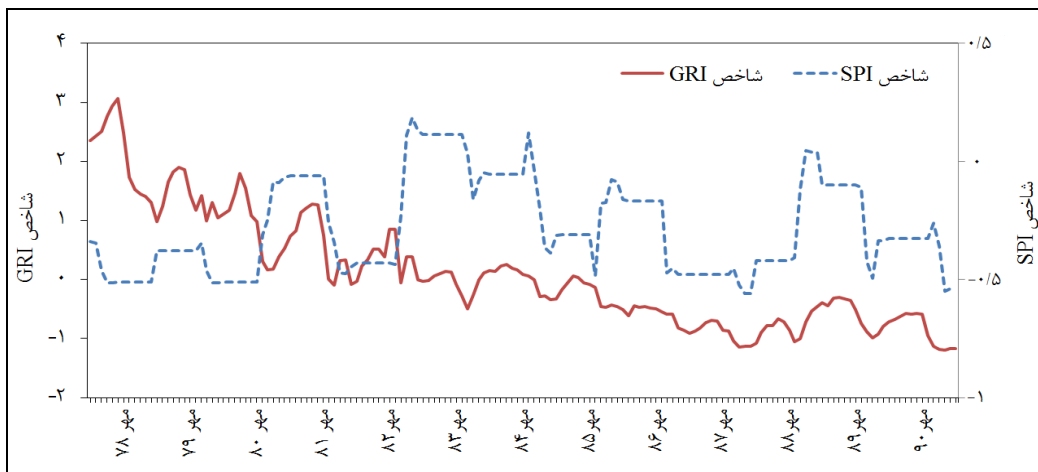
#### یافته‌ها

##### وضعیت خشکسالی

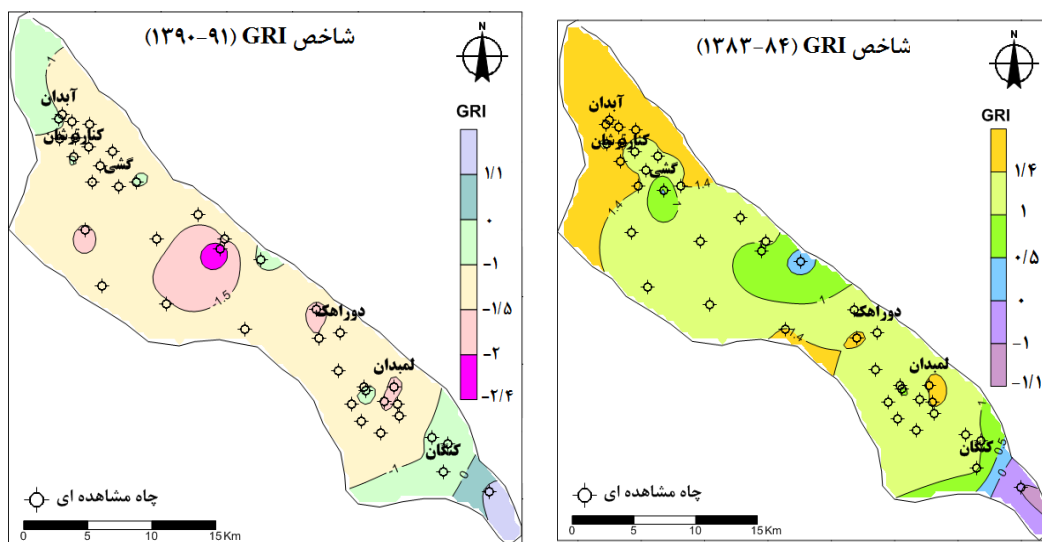
نمودار تغییرات شاخص SPI دوازده‌ماهه ایستگاه هواشناسی آبدان و شاخص GRI ماهانه آبخوان محدوده دیر-آبدان در شکل ۲ ارائه شده است. کمترین، میانگین و بیشترین شاخص SPI در دوره آماری ۱۳۷۸-۱۳۹۱ به‌ترتیب برابر با ۰/۵۶، -۰/۲۹ و ۰/۱۸ است. با توجه به شکل ۲، از آذر تا اسفند ۱۳۸۸ یک دوره خشکسالی آب زیرزمینی متوسط مشاهده می‌شود. از آذرماه ۱۳۹۰ تا کنون نیز این خشکسالی با شدت متوسط در این محدوده

جدول ۲. میزان تأثیر خشکسالی و پیشنهادهای مدیریتی با توجه به شاخص HDMI

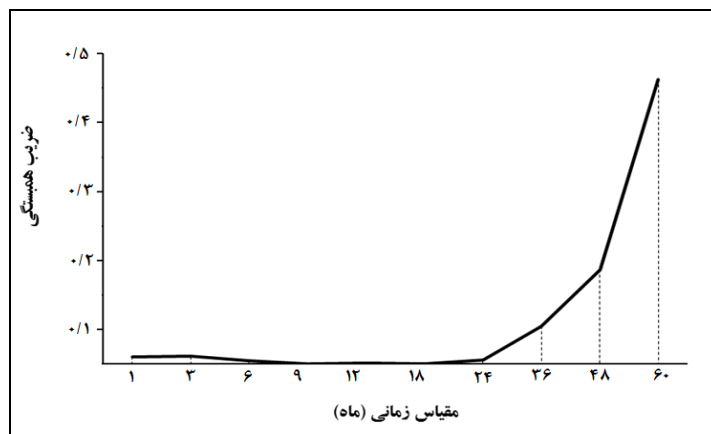
مقدار شاخص HDMI	میزان تأثیر خشکسالی	چگونگی بهره‌برداری
>۶	بدون تأثیر	بهره‌برداری بدون مشکل
۳-۶	کم	بهره‌برداری بدون مشکل
۰-۳	متوسط	بهره‌برداری با محدودیت کم
-۳-۰	متوسط	بهره‌برداری محدود
-۶- -۳	زیاد	عدم بهره‌برداری
<-۶	خیلی زیاد	عدم بهره‌برداری



شکل ۲. تغییرات شاخص SPI دوازده‌ماهه و شاخص GRI ماهانه در منطقه مطالعه‌شده



شکل ۳. شاخص GRI محدوده دیر-آبدان در سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۴ (الف) و سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ (ب)

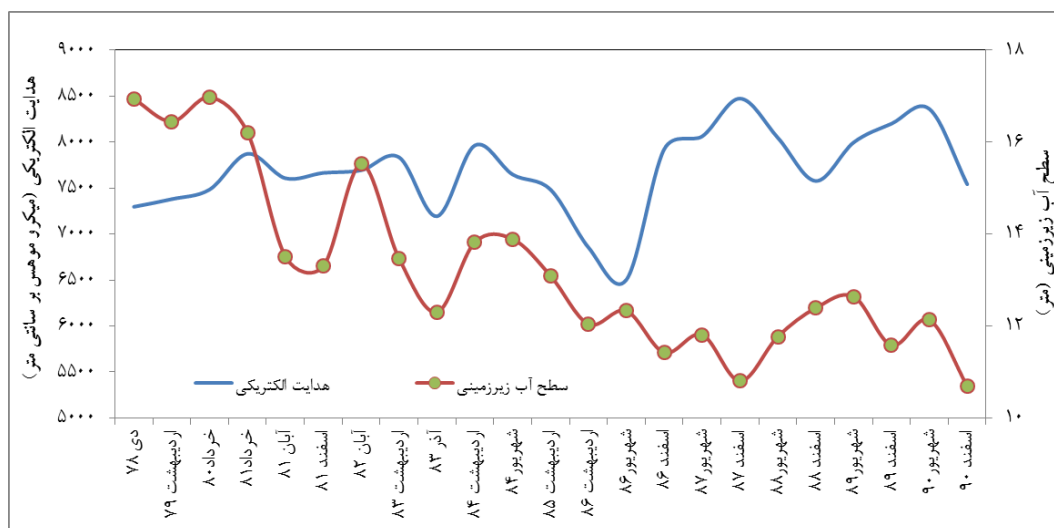


شکل ۴. ضریب همبستگی شاخص‌های SPI و GRI در مقیاس‌های زمانی مختلف

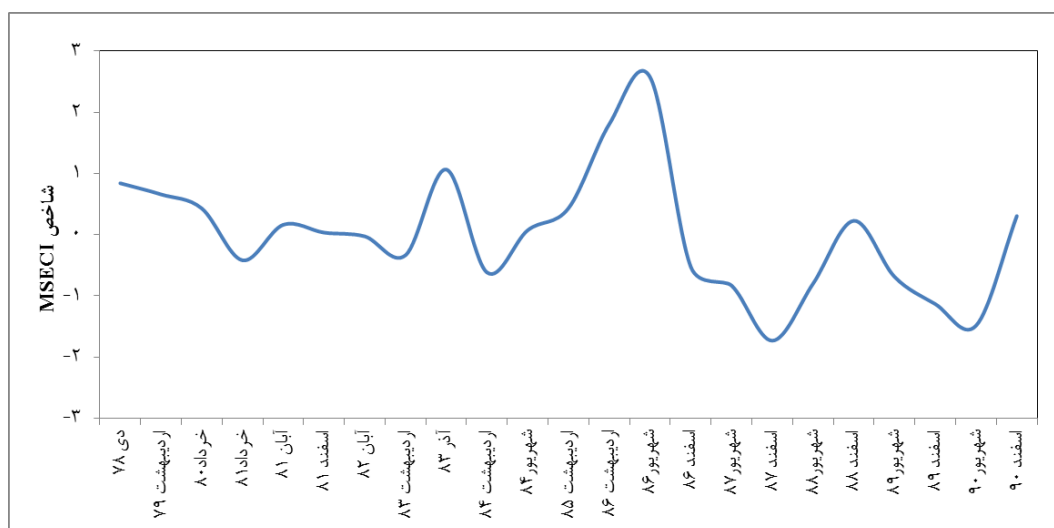
## هدایت الکتریکی آب زیرزمینی

شکل ۶ منحنی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی محدوده دیر- آبدان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه مطالعه شده به صورت یک روند نزولی است. این روند نزولی با افزایش مقدار هدایت الکتریکی آب زیرزمینی همراه است (شکل ۵). این موضوع بیان می‌کند که افت سطح آب زیرزمینی سبب افزایش املاح و شوری آب زیرزمینی شده است. برای محاسبه شاخص اصلاح شده هدایت الکتریکی استاندارد از داده‌های هدایت الکتریکی چاه‌های پایش کیفی (منابع انتخابی) استفاده شده است. در شکل ۶ تغییرات متوسط شاخص اصلاح شده هدایت

الکتریکی در طول زمان نشان داده شده است. مقدار این شاخص نیز از ابتدا به سمت انتهای دوره آماری کاهش یافته که نشان‌دهنده نامناسب شدن کیفیت آب با گذشت زمان است. نقشه پهنه‌بندی شاخص MSECI دشت دیر- آبدان نیز در شکل ۷ الف ارائه شده است. با توجه به این نقشه، فقط مناطقی در بخش‌های شمالی آبخوان وضعیت مناسبی از لحاظ کیفیت آب زیرزمینی دارند. بحرانی‌ترین مناطق از لحاظ افزایش میزان هدایت الکتریکی نیز بخش جنوبی منطقه است که در مجاورت خلیج فارس قرار گرفته است. در این مناطق خطر نفوذ آب شور دریا به آبخوان و تخریب کیفیت آب نیز وجود دارد.



شکل ۵. تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و تراز سطح ایستابی در محدوده دیر- آبدان



شکل ۶. تغییرات زمانی میانگین شاخص MSECI در منطقه مطالعه شده



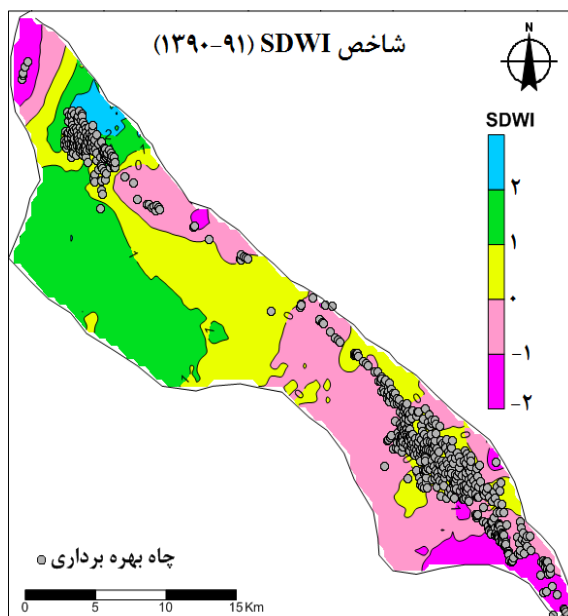
## دبی چاه‌های بهره‌برداری

تعداد چاه‌های بهره‌برداری محدوده دیر-آبدان بیش از ۵۹۰ حلقه است. کمترین، میانگین و بیشترین دبی این چاه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵، ۷/۴ و ۱۸ لیتر در ثانیه است [۲۰]. بیشتر این چاه‌ها برای آبیاری محصولات کشاورزی استفاده می‌شوند. با استفاده از نتایج آماربرداری چاه‌های بهره‌برداری در سال ۱۳۹۱ و با توجه به رابطه ۵، دبی استاندارد چاه‌های بهره‌برداری محاسبه شده است. شکل ۷ ب نقشه شاخص دبی استاندارد چاه‌های بهره‌برداری (SWDI) را نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین این شاخص در منطقه مطالعه شده به ترتیب برابر با ۲- و ۲/۶ است. با توجه به شکل ۷ ب، مناسب‌ترین بخش آبخوان از لحاظ کمی، بخش شمالی محدوده مطالعه شده (اراضی مجاور شهر آبدان) است. مناطق جنوبی آبخوان به خصوص در مجاورت خلیج فارس پتانسیل آب زیرزمینی چندان در مقایسه با سایر بخش‌های منطقه ندارند.

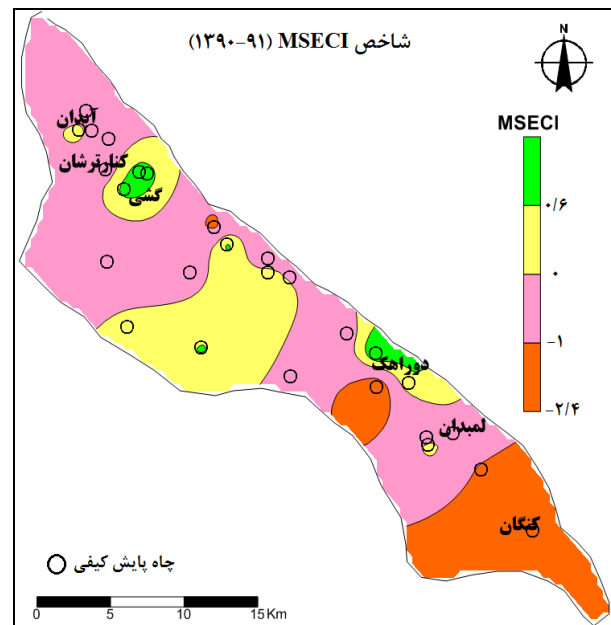
## مدیریت آبخوان در شرایط خشکسالی

برای مدیریت آبخوان در شرایط خشکسالی، شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI) از ترکیب

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)، شاخص اصلاح‌شده هدایت الکتریکی استاندارد (MSECI) و شاخص دبی استاندارد چاه‌های بهره‌برداری (SWDI) محاسبه شد. شکل ۸ نقشه شاخص HDMI در دشت دیر-آبدان را نشان می‌دهد. مقدار این شاخص بین ۴- و ۱ تغییر می‌کند. کمترین میزان این شاخص و در واقع بحرانی‌ترین بخش‌های منطقه در بخش جنوبی آن و در مجاورت خلیج فارس مشاهده می‌شود (شکل ۸). در این مناطق کیفیت و کمیت آب زیرزمینی مناسب نیست، زیرا در این مناطق رسوبات ریزدانه هستند و احتمال نفوذ آب شور دریا به داخل آبخوان هم وجود دارد. بیشترین میزان شاخص HDMI نیز در مجاورت شهر آبدان و روستای کنارتراشان مشاهده می‌شود. این مناطق از لحاظ تأثیر خشکسالی، کمیت و کیفیت آب زیرزمینی وضعیت مناسبی نسبت به بخش‌های دیگر منطقه دارند. بنابراین، در صورت نیاز به منابع آب شیرین جدید بهتر است چاه‌های جدید در مناطق شمالی محدوده به خصوص در اراضی مجاور شهر آبدان حفر شوند. البته با توجه به روند نزولی سطح آب زیرزمینی بهتر است از حفر چاه‌های جدید جز در موارد بسیار ضروری جلوگیری شود.

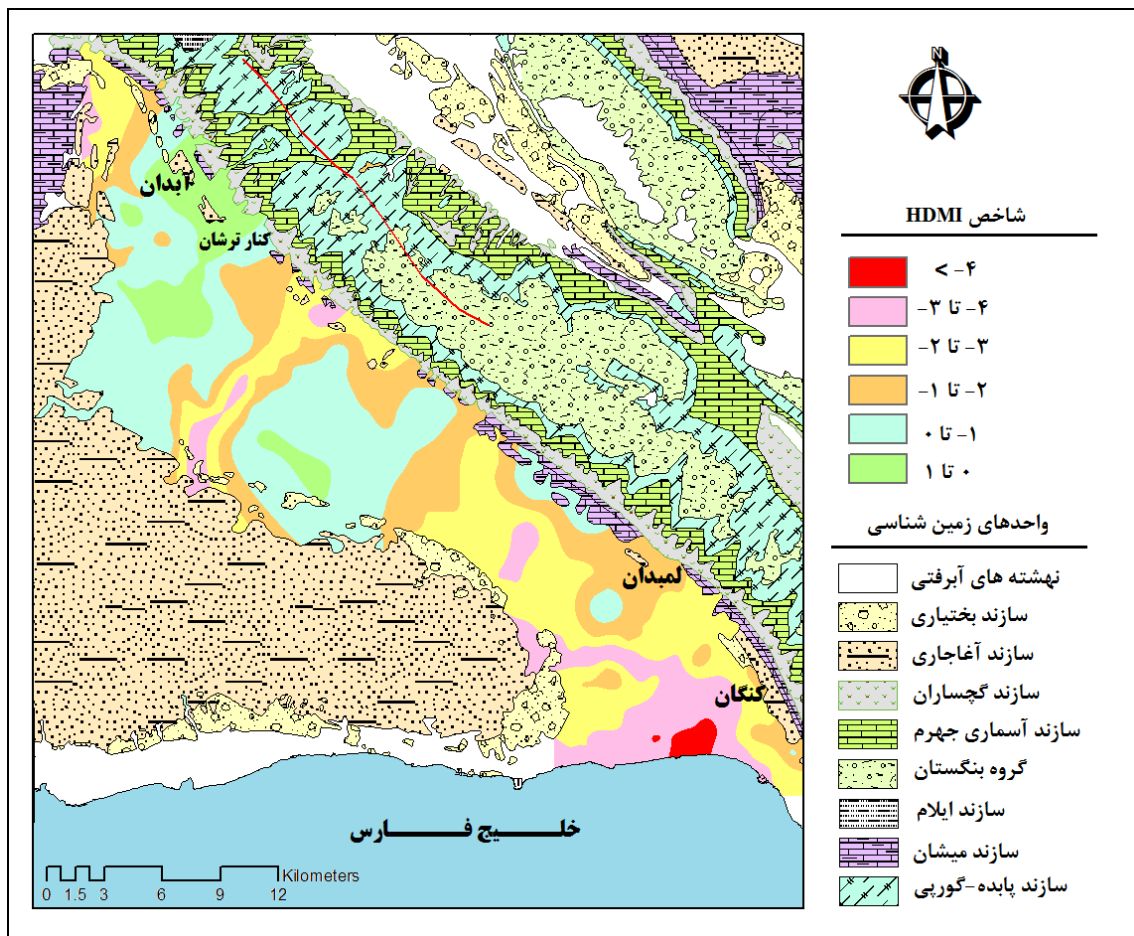


ب



الف

شکل ۷. نقشه شاخص‌های MSECI (الف) و SWDI (ب) محدوده دیر-آبدان



شکل ۸. نقشه شاخص HDMI محدوده دیر-آبدان

### بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شد با تلفیق شاخص های مهم خشکسالی، رهنمودهایی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت دیر-آبدان در شرایط خشکسالی ارائه شود. بدین منظور شاخص های مختلفی به کار گرفته شد. خشکسالی اقلیمی و خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) بررسی شدند. در این مطالعه شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI) معرفی شد. این شاخص از ترکیب سه شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)، شاخص تصحیح شده هدایت الکتریکی استاندارد (MSECI) و شاخص دبی استاندارد بهره برداری (SWDI) به دست آمده است.

از لحاظ خشکسالی آب زیرزمینی، بخش وسیعی از دشت دیر-آبدان خشکسالی متوسط دارد. البته در بخش های مرکزی این محدوده خشکسالی آب زیرزمینی

شدید و بسیار شدید هم مشاهده می شود. شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) در مقیاس زمانی ماهانه رابطه معناداری دارد و با افزایش مقیاس زمانی، ضریب همبستگی این دو شاخص افزایش می یابد. بر اساس شاخص اصلاح شده هدایت الکتریکی استاندارد (MSECI)، بحرانی ترین بخش دشت دیر-آبدان بخش جنوبی آن است. با توجه به شاخص دبی استاندارد چاه های بهره برداری (SWDI)، مناسب ترین مناطق آبخوان از لحاظ کمی بخش های شمالی این محدوده هستند.

شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی (HDMI) که تأثیر ترکیبی وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی، کمیت و کیفیت آبخوان را در نظر می گیرد، می تواند به عنوان شاخصی مهم در مدیریت بهره برداری از آبخوان به کار رود. بر اساس این شاخص، بحرانی ترین بخش های منطقه در بخش جنوبی آن قرار دارند. بنابراین، مهم ترین راهبرد در مدیریت آبخوان منطقه مطالعه شده در شرایط خشکسالی،

- Journal of Geography, 2010; 8(25): 105-124. [Persian].
- [9]. Naserzadeh M, Ahmadi E. Meteorological drought indices in assessing the performance of the drought and its zoning in Qazvin. Applied Research of GIS (Geographical Sciences), 2012; 12(27): 141-162. [Persian].
- [10]. Chamanpira Gh, Zehtabian Gh, Ahmadi H, Malekian A. Effect of drought on groundwater resources in order to optimize utilization management, case study: Alashtar plain. Watershed Engineering and Management, 2014; 6(1): 10-20 [Persian].
- [11]. Khoshhal J, Ghayoor HA, Moradi M. A survey on the impact of groundwater drought in Dehgolan basin, Kurdistan province. Natural Geography Research, 2012; 79: 19-36 [Persian].
- [12]. Karami F. Evaluation of Meteorological Drought Effects in the Reduction of Ground Watertable (Case study: Tabriz Plain). Journal of Geography and Planning, 2011; 16(31): 111-131 [Persian].
- [13]. Aleboali A, Ghazavi R, Sadatinezhad SJ. Study the effects of drought on groundwater resources using SPI index (A case study: Kashan plain). Desert Ecosystem Engineering Journal, 2016; 5(10): 13-22 [Persian].
- [14]. Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th conference of applied climatology, Anaheim. 1993
- [15]. Scibek J, Allen DM. Comparing modeled responses of two high-permeability unconfined aquifers to predicted climate change. Global and Planetary Change, 2006; 50: 50-62.
- [16]. Khan S, Gabriel HF, Rana T. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on water tables in irrigation areas. Irrigation Drainage System. 2008; 22: 159-177.
- [17]. Mair A, Fares A. Influence of groundwater pumping and rainfall spatio-temporal variation of stream flow. Journal of Hydrology. 2010; 393 :287-308.
- [18]. Shahid S, Hazarika MK. Groundwater drought in the northwestern district of Bangladesh. Water Resource Management, 2010; 24(10): 1989-2006.
- [19]. Khan MA, Gadiwala MS. A Study of drought over Sindh (Pakistan) using standardized precipitation index (SPI) 1951 to 2010. Pakistan Journal of Meteorology, 2013; 9(18): 15-22.
- عدم بهره‌برداری از آبخوان در مناطق جنوبی آن به خصوص در مجاورت خلیج فارس است. با توجه به شاخص HDMI، مناطق شمالی محدوده دیر-آبدان وضعیت مناسب‌تری از نظر تأثیر خشکسالی و منابع آب زیرزمینی دارند. بنابراین، در صورت نیاز ضروری، بهتر است چاه‌های جدید در مناطق شمالی محدوده به خصوص در اراضی مجاور شهر آبدان و روستای کنارترشان حفر شوند. نتایج این تحقیق نشان داد شاخص مدیریت خشکسالی هیدروژئولوژیکی می‌تواند به عنوان روشی مفید و منطبق بر شرایط واقعی برای کمک به تصمیم‌گیری بهتر و مدیریت منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی به کار رود.
- ### منابع
- [1]. Fayabi M, Kalantari N. Evaluation of drought phenomena in Rod e Zard basin, Khuzestan province. 10th seminar on irrigation and evaporation decrease. 2009. [Persian].
- [2]. Abdollahi Kh. Assessing the spatial and temporal pattern of meteorological drought in Iran. Available at <http://drought.iranhydrology.net>.
- [3]. Seif M, Mohammadzade H, Sayyad H. Evaluation of drought effect on groundwater resource in Fasa plain using standardized precipitation index and groundwater standardized electrical conductivity. Water Resource Engineering, 2012; 5(13): 55-72. [Persian].
- [4]. Mendicino G, Senatore A, Versace P. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. Journal of Hydrology, 2008; 357: 282-302.
- [5]. Nazemossadat MJ. Is it raining? Drought and excess rainfall in Iran and their relationship with the El Nino-southern oscillation. Shiraz University press, 120 p. [Persian].
- [6]. Azizi Gh. Relation between recent drought and groundwater resources in the Qazvin plain. Geographical Research Journal, 2003; 35 (46): 131-143 [Persian]
- [7]. Nazemi Sh, Khara H. Investigation on drought effect on diversity, frequency and distribution of benthic fauna in Amirkelaye wetland. Iranian Scientific Fisheries Journal, 2005; 14 (3): 141-156 [Persian].
- [8]. Shakiba W, Mirbagheri B, Kheiri A. Drought and its impact on groundwater resources in East of Kermanshah province using SPI index.

- [20]. Barkey BL, Bailey RT. Estimating the impact of drought on groundwater resources of the Marshall Islands. *Water*, 2017; 9 (41): 1-12.
- [21]. Boushehr Regional Water Authority. Report of groundwater resource of Boushehr province. 2012. [Persian].
- [22]. Bigonah S, Ekhtesasi M, Faryabi M. Evaluation of Drought effect on groundwater resources in Jiroft plain using GRI index. 9th symposium of watershed science and engineering, Yazd University. 2012. [Persian].