

محدوده مورد مطالعه و مدل‌سازی آن با روش‌های رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار (GWR) و مجموع مربعات معمولی (OLS) بر اساس متغیرهای مستقل تأثیرگذار پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر، دشت کهورستان با مساحت ۲۷۳/۰۹ کیلومتر مربع از جمله دشت‌های نادر در غرب استان هرمزگان است. این مطالعه بر اساس داده‌های شیمیایی ۱۵ حلقه چاه نیمه عمیق در دشت کهورستان و مقاطع زمانی آبیاری و غیرآبیاری سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸ انجام شد. متغیرهای مستقل تحقیق، شاخص شوری استاندارد شده (NDSI)، بارش تجمعی (Pr)، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، کمبود آب در خاک (DEF)، تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، دمای سطح زمین (LST)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، تبخیر و تعرق واقعی (AET) بودند که از سامانه گوگل ارت انجین (GEE) به شکل تصاویر ماهواره‌ای رستری در مقیاس ماهانه استخراج شدند. همچنین متغیر وابسته تحقیق، شاخص کیفیت آب زیرزمینی (WQI) بود که در سامانه اطلاعات جغرافیایی مدل شد. برای بررسی معناداری ارتباط بین این متغیرها در مقاطع زمانی مختلف از آزمون کای اسکور استفاده شد و سپس از روش‌های رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار (GWR) و حداقل مربعات معمولی (OLS) برای مدل‌سازی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی بهره گرفته شد. برای مقایسه میزان اعتبار یا کارایی مدل‌های رگرسیونی چند متغیره، از معیارهای ضریب تعیین، ریشه میانگین مجذور خطاها و معیار آکائیکه استفاده شد. همچنین خاطر نشان می‌شود، جهت بررسی توزیع فضایی پهنه‌های کیفی آب زیرزمینی از آماره موران محلی در این مقاطع زمانی استفاده شد.

### نتایج و بحث

آزمون کای اسکور نشان از ارتباط معنی‌دار بین متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین با کیفیت آب زیرزمینی داشت و تحلیل خودهمبستگی فضایی نشان داد که توزیع فضایی کیفیت آب زیرزمینی در دشت کهورستان به صورت تصادفی بوده است. از بین دو روش GWR و OLS، روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با ریشه میانگین مربعات خطا معادل ۰/۱۴، مجموع مربعات باقیمانده ۱۱/۳، ضریب تعیین ۰/۸۲ و ضریب آکائیکه ۵۷۰/۱۹ - نتایج بهتری را نسبت به روش OLS ارائه کرد. همچنین NDVI و NDSI با ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) معادل ۰/۴۷ در بازه زمانی نخست (۲۰۰۹/۴)، متغیر NDSI با ضریب تبیین معادل ۰/۶۳ در بازه زمانی دوم (۲۰۰۹/۱۱)، در مقطع زمانی سوم (۲۰۱۸/۵)، دو متغیر NDVI و NDSI با ضریب تبیین معادل ۰/۶۵

## بررسی اثر ویژگی‌های اقلیمی و سطح زمین بر کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های گوگل ارت انجین (GEE) (مطالعه موردی: دشت کهورستان، هرمزگان)

عدنان صادقی لاری<sup>۱\*</sup>، محمد کاظمی<sup>۲</sup>، فاطمه رجبی<sup>۳</sup>  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰  
<https://doi.org/10.22034/18.66.59>

### چکیده مبسوط مقدمه

آب زیرزمینی به عنوان یکی از منابع حیاتی برای تأمین آب شرب و کشاورزی، به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، تغییرات پوشش گیاهی و ... منجر به تغییر در ترکیب شیمیایی آب می‌شود و این موضوع می‌تواند عواقب جدی برای تأمین آب شرب و کشاورزی داشته باشد. کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند آب‌های سطحی دائم در حال تغییر کردن است و در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی جهت مدیریت پهنه‌های کیفی مختلف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. محققین در این زمینه اذعان داشته‌اند که، ویژگی‌های خاک و سطح زمین می‌تواند مستقیماً بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیر بگذارد و مدیریت صحیح خاک می‌تواند به بهبود کیفیت آب کمک کند. از این رو، پژوهش حاضر به بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین بر کیفیت آب زیرزمینی در دشت کهورستان استان هرمزگان پرداخته و به دنبال شناسایی تغییرات کیفی آب در فصول آبیاری و غیرآبیاری است. شایان ذکر است، در تحقیقات پیشین بیشتر با الگوریتم‌های درون‌یابی، میزان WQI در سامانه اطلاعات جغرافیایی برآورد و سطوح طبقات مختلف کیفیت آب زیرزمینی تبیین شده است. در پژوهش حاضر علاوه بر بررسی ارتباط معنادار میان متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین با کیفیت آب زیرزمینی، به بررسی توزیع فضایی این متغیر در

۱- استادیار و نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران  
۲- استادیار، مرکز مطالعات و تحقیقات هرمز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

و مقطع زمانی چهارم (۲۰۱۸/۱۲) نیز صرفاً دو متغیر NDVI و NDSI با ضریب تبیین معادل ۰/۵۵ بیشترین تأثیرگذاری را از بین متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین بر میزان کیفیت آب زیرزمینی نشان دادند. طبقات کیفیت آب زیرزمینی دشت کهورستان فقط دو طبقه بسیار ضعیف و نامناسب برای مصارف کشاورزی بودند. در مقطع زمانی نخست، کلاس کیفی «بسیار ضعیف» از کیفیت آب زیرزمینی دشت کهورستان مساحت ۲/۴۴ کیلومتر مربعی را به خود اختصاص داده است. در مقطع زمانی دوم، تنها کلاس کیفیت آب زیرزمینی دشت کهورستان در این فصل آبیاری، طبقه «نامناسب برای مصارف کشاورزی» با مساحت ۲۷۵/۲ کیلومتر مربع بود. در مقطع زمانی سوم، کلاس «بسیار ضعیف» کیفیت آب زیرزمینی سطحی معادل ۱۴/۹۱ کیلومتر مربع از مساحت دشت و در مقطع زمانی چهارم، مساحت کلاس کیفی «بسیار ضعیف» ۸/۵۱ کیلومتر مربع برآورد شد.

### نتیجه‌گیری

همانگونه که نتایج نشان داد، کیفیت آب زیرزمینی در فصول آبیاری (ماه‌های ۱۱ و ۱۲ سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸) نسبت به فصول غیر آبیاری (ماه‌های ۴ و ۵ سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸) کاسته می‌شود و همچنین سطوح کیفی آب زیرزمینی نیز در فصول آبیاری نسبت به فصول غیر آبیاری کاهش می‌شود. نتایج نشان داد که افزایش پوشش گیاهی و کاهش شوری خاک از عوامل کلیدی در بهبود کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه هستند و با کاهش پوشش گیاهی و افزایش شوری خاک در فصول آبیاری از وسعت و کیفیت پهنه‌های کیفی خوب و متوسط کاسته می‌شود. با توجه به برتری مدل GWR نسبت به OLS، این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری مفید در مدیریت پهنه‌های کیفی منابع آب زیرزمینی و تحلیل تغییرات کیفیت آب به کار رود. در نهایت، پژوهش حاضر تأکید می‌کند که توجه به متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین برای مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی ضروری است. این پژوهش صرفاً به استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی شاخص WQI بر اساس داده‌های شیمیایی چاه‌های مشاهداتی در سامانه اطلاعات جغرافیایی نپرداخته است و در این بین با توجه به اثرگذاری متغیرهای مختلف اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین به پیش‌بینی پهنه‌های مختلف کیفیت آب زیرزمینی با روش‌های رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار و مجموع مربعات معمولی تأکید داشته‌است. اخذ متغیرهای مستقل در مقیاس ماهانه و در بازه‌های زمانی مختلف فصول آبیاری و غیر آبیاری در سامانه آنلاین گوگل ارت انجین (GEE) از دیگر توجهات پژوهش حاضر در بحث بررسی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی بود.

**کلیدواژه‌ها:** شاخص شوری خاک، کیفیت آب زیرزمینی، متغیرهای اقلیمی، مدل جغرافیایی وزن‌دار.

### مقدمه

آب زیرزمینی به عنوان یکی از منابع حیاتی برای تأمین آب شرب و کشاورزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، کیفیت این منابع به طور فزاینده‌ای

تحت تأثیر قرار گرفته است. شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی، به ویژه در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک ضروری است. افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، تغییرات پوشش گیاهی و ... منجر به تغییر در ترکیب شیمیایی آب می‌شود و این موضوع می‌تواند عواقب جدی برای تأمین آب شرب و کشاورزی داشته باشد [۲۷]. تحقیقات نشان داده‌است که وقوع بارش‌های قابل توجه بر خلاف خشکسالی و افزایش دما می‌تواند کیفیت آب زیرزمینی را بهبود بخشد [۸، ۲۴]. جانسون و لی (۲۰۱۹) اعلام کردند مشخصات سطح زمین از جمله پوشش گیاهی و شرایط خاک می‌تواند به طور مستقیم بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیر بگذارد [۱۶]. کیفیت آب‌های زیرزمینی مانند آب‌های سطحی دائم در حال تغییر کردن است. بنابراین نیاز است با شناخت وضع موجود، بررسی تغییرات کیفی آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مناسب، جهت بهبود بخشیدن وضع موجود و جلوگیری از پدید آمدن بحران آب، قدم برداشت [۲۲]. در این راستا، تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که ارتباط معنی‌داری میان متغیرهای اقلیمی، خصوصیات سطح زمین و کیفیت آب زیرزمینی وجود دارد. در این رابطه می‌توان به پژوهش‌های ذیل اشاره کرد؛

دائزه و پاتیل (۲۰۲۲) با استفاده از شاخص WQI با نمونه‌برداری از ۳۵ نقطه و روش درون‌یابی IDW<sup>1</sup> در منطقه بخارکدان جالینای هند، به بررسی توزیع کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور و GIS پرداختند. نامبردگان اعلام کردند که به جز مناطق شمالی بقیه مناطق در رده کیفی ضعیف و بسیار ضعیف قرار دارند که با بارش‌های محلی طبقه کیفی آب‌های زیرزمینی به طبقه خوب و یا ضعیف تغییر کلاس کیفی می‌دهند [۶]. اسمیت و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به بررسی کیفیت آب مناطق شهری با شاخص WQI پرداختند. نامبردگان از تحلیل‌های آماری جهت بررسی کیفیت آب شرب استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد ۳۰٪ از نمونه‌های جمع‌آوری شده دارای کیفیت نامناسب آب آشامیدنی هستند و ارتباط معنی‌داری میان کیفیت آب و ویژگی‌های اقلیمی مانند دما و بارش وجود دارد [۲۴]. جانسون و لی (۲۰۱۹) به بررسی ویژگی‌های خاک بر کیفیت آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی پرداختند و دریافتند که محتوای آلی خاک‌های کشاورزی و بارش‌های شدید با تغییر میزان اسیدیته خاک بر شاخص WQI بیشترین تأثیر را دارند. نامبردگان دریافتند که ویژگی‌های خاک و سطح زمین می‌تواند مستقیماً بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیر بگذارد و مدیریت صحیح خاک می‌تواند به بهبود کیفیت آب کمک کند. ایشان از متغیرهای سختی خاک (میزان کلسیم و منیزیم)، میزان رطوبت موجود در خاک، آلودگی‌های ناشی از کودهای شیمیایی، درصد مواد آلی خاک و میزان اسیدی و قلیائیت خاک استفاده کردند [۱۶]. البیه و زینی (۲۰۱۸) به بررسی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با شاخص‌های طیفی نظیر NDVI

1. Inverse Distance Weighted

پارامتر TDS و EC و SAR همبستگی معنی داری مشاهده شد [۲۰]. بررسی پیشینه پژوهش نشان داد بیشتر تحقیقات قبلی به تهیه نقشه متغیرهای مؤثر بر شاخص WQI با روش‌های درون‌یابی در سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته‌اند و در پایان نقشه شاخص WQI و مساحت طبقات مختلف کیفیت آب زیرزمینی را احصاء کرده‌اند. همچنین در این مطالعات به بررسی معنی‌داری ارتباط میان شاخص‌های طیفی نظیر NDVI، NDSI و ... با میزان آلودگی چاه‌های مشاهداتی پرداخته شد. در پژوهش حاضر به بررسی نقش متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین بر روی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های GEE پرداخته شد و با مدل‌سازی روش‌های GWR و OLS در سامانه اطلاعات جغرافیایی به تهیه نقشه طبقات مختلف کیفیت آب زیرزمینی مبتنی بر شاخص WQI بر خلاف درون‌یابی‌های ساده توجه شد. شایان ذکر است، جهت شناخت نحوه توزیع مکانی و فضایی کیفیت آب زیرزمینی در دشت کهورستان در مقاطع زمانی مختلف از شاخص موران محلی استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی محدوده مورد مطالعه

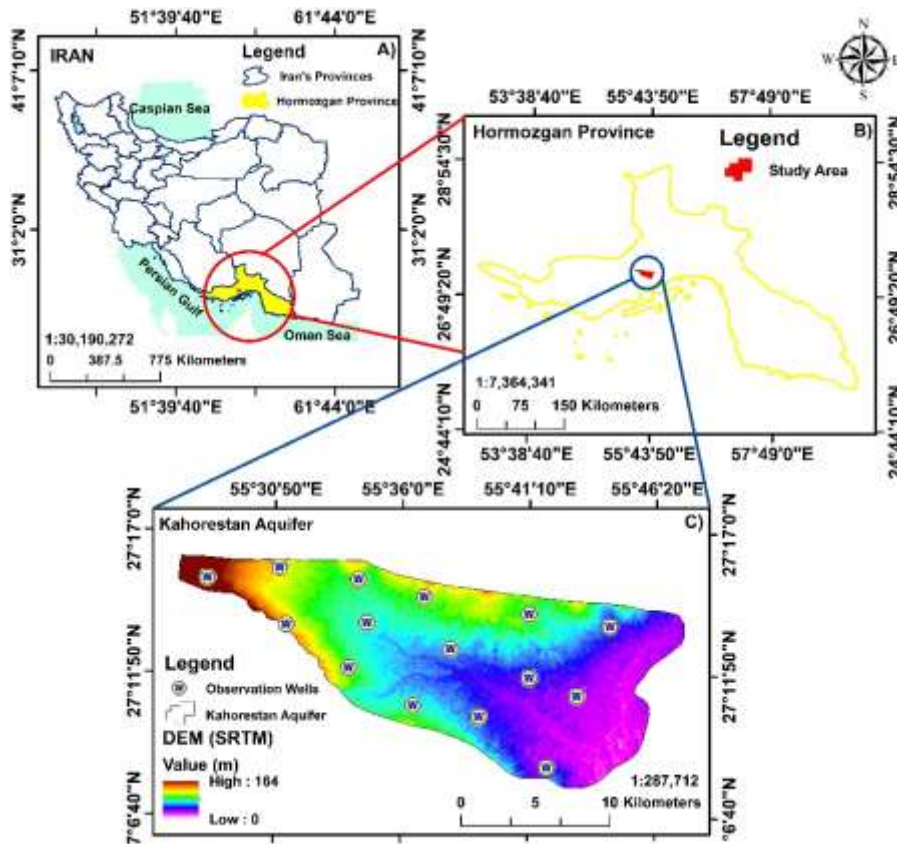
دشت کهورستان با مساحت ۲۷۵/۲ کیلومتر مربع از جمله دشت‌های نادر موجود در غرب استان هرمزگان است، که از گذشته تاکنون تأمین‌کننده آب شرب مناطق اطراف و صنایع استراتژیک منطقه است. این دشت دارای محدودیت منابع آب کشاورزی و شرب است که مورد تهاجم آب‌های لب‌شور نیز قرار گرفته است. در سه دهه اخیر با توجه به افزایش جمعیت در منطقه و گسترش اراضی زیرکشت منابع محدود آب شیرین در آبخوان دشت را کمیاب‌تر نموده است و واضح است که تداوم چنین روندی منجر به شور شدن کامل آبخوان و ایجاد مشکلات جدی اقتصادی-اجتماعی در منطقه خواهد شد. در این مطالعه از اطلاعات ۱۵ حلقه چاه نیمه‌عمیق این منطقه در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹ استفاده شد. این منطقه در محدوده جغرافیایی ۴۰° ۲۶' تا ۱۷° ۲۷' عرض شمالی و ۲۵° ۵۵' تا ۴۶° ۵۵' طول شرقی واقع شده است. ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا ۴۵ متر و میانگین دمای سالانه ۲۵ درجه سانتی‌گراد است [۱۷].

WQI یک شاخص قدرتمند برای تعیین میزان کیفیت آب آشامیدنی است. این شاخص به پنج کلاس مختلف شامل عالی، خوب، ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب برای مصارف شرب طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۱). جهت محاسبه شاخص WQI از داده‌های کیفی استاندارد شده طبق جدول استاندارد WHO<sup>۵</sup> استفاده شده است. رابطه (۱) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد؛

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

<sup>1</sup>NDSI, <sup>2</sup>NDBI, <sup>3</sup>MNDWI و ... در استان سوهاگ مصر پرداختند. نامبردگان طی دوره هشت ساله، با استفاده از شاخص NDBI، تأثیر شهرنشینی را بر کیفیت آب زیرزمینی نشان دادند [۱۰]. همچنین با بررسی شاخص طیفی NDVI به وجود رابطه همبستگی مثبت با کیفیت آب زیرزمینی تأکید کردند و به وجود رابطه معنی‌دار میان شاخص طیفی NDSI با کیفیت آب زیرزمینی نیز اشاره کردند. همچنین نتایج ایشان نشان داد که با افزایش میزان شاخص NDBI و NDVI کیفیت آب زیرزمینی به ترتیب روند کاهشی و افزایشی نشان داده است. نامبردگان با ذکر همبستگی ۰/۵۷ نتیجه گرفتند که ادغام سنجش از دور و کیفیت آب‌های زیرزمینی توضیح دقیقی از تأثیر شهرنشینی، زراعت و سایر فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی ارائه می‌دهد. بای و گیو (۲۰۱۸) با استفاده از روش GWR و اندازه‌گیری متغیرهای نیترات، کلر، سختی آب، نوع خاک و ... به مدل‌سازی کیفیت آب زیرزمینی شهر بیجینگ چین پرداختند. نامبردگان میزان نیترات و فعالیت‌های انسانی را مهمترین متغیر بر کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه شهری دانستند [۳]. سینها (۲۰۱۶) در پژوهشی در خصوص مدل‌سازی کیفیت آب زیرزمینی با مدل OLS، ضمن بررسی فعالیت‌های کشاورزی (کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها)، فعالیت‌های صنعتی (تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و مواد شیمیایی)، ویژگی‌های زمین‌شناسی (نوع خاک و سنگ‌های زیرزمینی)، عوامل اقلیمی (بارش و دما) و آلودگی‌های شهری (فاضلاب‌های خانگی) به عنوان متغیرهای مستقل بر کیفیت آب زیرزمینی، علاوه بر میزان نیترات به عنوان کلیدی‌ترین متغیر، نوع خاک را نیز یکی دیگر از متغیرهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی دانستند [۲۳]. آگیلار و همکاران (۲۰۱۲) نیز با استفاده از تصاویر ماهواره ای و شاخص NDVI در جزیره هاگگ ایالات متحده آمریکا به بررسی پوشش گیاهی و تغییرات آب زیرزمینی پرداختند. نامبردگان بیان کردند، تغییرات پوشش گیاهی با میزان بارش همراه است، در فصول غیرآبیاری بین تبخیر و تعرق، پوشش گیاهی و کیفیت آب زیرزمینی همبستگی معنی‌داری وجود دارد و با کاهش پوشش گیاهی در فصول خشک، کیفیت آب زیرزمینی نیز کاهش یافته است [۲]. در ایران نیز نبی‌پور و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای در دشت ارومیه و در دو سال ۱۳۷۸ و ۱۳۹۳ به بررسی رابطه میان پوشش گیاهی و آلودگی آب زیرزمینی پرداختند. ایشان از تصاویر ماهواره لندست ۷ و ۸ برای سال‌های مذکور شاخص NDVI را استخراج کردند و با آمار کیفی ۸۲ حلقه چاه روابط همبستگی را برآزش دادند. نتیجه حاکی از این مطلب بود که با افزایش پوشش گیاهی منطقه بالاخص کاربری کشاورزی شرق و شمال ارومیه که میزان آلودگی بیشتری نسبت به سایر محدوده‌ها داشت، بین پوشش گیاهی و

1. Normalized Difference Salinity Index
2. Normalized Difference Built-up Index
3. Modified Normalized Difference Water Index
4. Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، چاه‌های نمونه و مدل رقومی ارتفاع بر روی ایران و استان هرمزگان

Fig 1. Kahorestan Plain geographical map and position of the observation wells and SRTM DEM on Iran and Hormozgan province

(TDS) و قلیائیت (SAR) استفاده شد که پارامترهای EC و SAR بدون بعد و سایر پارامترهای ذکر شده برحسب میلی‌گرم در لیتر هستند [۱۳]. در جدول ۲ استاندارد جهانی سازمان بهداشت جهانی برای هر کدام از پارامترهای مذکور ارائه شده است.

جدول ۱- طبقات کیفی شاخص کیفیت آب زیرزمینی [۶، ۹]

Table 1. Groundwater classification based on Water Quality Index

میزان حدودی شاخص کیفیت آب WQI(water quality index)	کیفیت آب water quality
50>	عالی Excellent
50-100	خوب Good
100-200	ضعیف Poor
200-300	خیلی ضعیف Very Poor
300<	نامناسب برای کشاورزی Unfit for Agriculture

به منظور تعیین  $q_i$  از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$q_i = \frac{v_a - v_i}{S_i - v_i} \quad (2)$$

$V_a$  مقدار پارامتر  $i$  در زمان نمونه برداری،  $V_i$  مقدار پارامتر  $i$  در حالت ایده آل و  $S_i$  مقدار پارامتر  $i$  در حالت استاندارد هستند. همچنین جهت محاسبه پارامتر  $W_i$  (رابطه ۳) استفاده شده است.

$$w_i = \frac{k}{S_i} \quad (3)$$

و مقدار  $K$  از رابطه (۴) بدست می‌آید؛

$$k = \frac{1}{\sum \left( \frac{1}{S_i} \right)} \quad (4)$$

در رابطه (۱)  $q_i$  رتبه کیفیت آب را با توجه به غلظت پارامتر  $i$  نشان می‌دهد و  $W$  فاکتور وزن است که بستگی به اهمیت پارامتر کیفی از نظر بهداشت و سلامتی [۱۲]. در رابطه (۳)،  $S_i$  به عنوان یک مرجع برای مقایسه با مقادیر واقعی پارامترها در زمان نمونه برداری استفاده می‌شود تا بتوان کیفیت آب را ارزیابی کرد. در این مطالعه از پارامترهای فیزیک و شیمیایی منابع آب زیرزمینی منطقه از قبیل هدایت الکتریکی (EC) اسیدیته (PH) و آنیون‌های اصلی شامل کلرید ( $CL^-$ )، سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) و بی‌کربنات ( $HCO_3^-$ )، کاتیون‌های اصلی کلسیم ( $Ca^{2+}$ )؛ منیزیم ( $Mg^{2+}$ )، سدیم ( $Na^+$ )، باقیمانده خشک

Table 2. Showing weight assigned and relative weight calculated for selected parameters

وزن نسبی (wi)	وزن هر پارامتر (wi)	مقدار ایده‌ال (Vi)	استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای کشاورزی (Si)	استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای شرب (Si)	پارامتر (میلی‌گرم بر لیتر) Parameter (mg/liter)
0.125	3	7	6.5-8.5	6.5-8.5	pH
0.208	5	0	<2000	<500	TDS
0.083	2	0	<200	<75	Ca <sup>2+</sup>
0.083	2	0	<100	<50	Mg <sup>2+</sup>
0.125	3	0	<200	<200	Na <sup>+</sup>
0.042	1	0	<100	<12	K <sup>+</sup>
0.083	2	0	<500	<300	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
0.125	3	0	<250	<140	CL <sup>-</sup>
0.125	3	0	<250	<250	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

(مختصات جغرافیایی) رابطه‌ای متفاوت بین متغیر وابسته و مستقل بدلیل وابستگی پارامترها یا ضرایب مدل نسبت به مکان وجود دارد. روش رگرسیون وزنی جغرافیایی بر این استوار است که پارامترها یا ضرایب مدل را می‌توان در هر نقطه‌ای از فضا یا مکان مورد مطالعه برآورد کرد. در این روش برای محاسبه پارامترهای مدل در هر نقطه از مشاهدات اطراف آن نقطه استفاده می‌شود، اما به مشاهدات نزدیک وزن بیشتر و به مشاهدات دورتر، وزن کمتری داده می‌شود. اگر فاصله بین مشاهده و نقاط مرجع افزایش یابد، این وزن نیز کاهش می‌یابد. مدل رگرسیون چند متغیره خطی GWR به صورت رابطه (۸) است [۱۱].

$$Y_i(U) = \beta_{0i}(U) + \beta_{1i}(U)X_{1i} + \beta_{2i}(U)X_{2i} + \beta_{mi}(U)X_{mi} \quad (8)$$

در صورتیکه مؤلفه وزن مشاهدات در معادله رگرسیون وارد شود، رابطه بردار پارامترها یا ضرایب بتا، به یک رابطه رگرسیون وزنی جغرافیایی تبدیل می‌شود و مشاهدات نزدیک نسبت به مشاهدات دورتر وزن بیشتری دارند. ضرایب یا پارامترهای مدل با رابطه (۹) تخمین زده می‌شوند:

$$\hat{\beta}(U) = (X^T W(U) X)^{-1} X^T W(U) y \quad (9)$$

که در رابطه (۹)  $W(U)$  ماتریس وزن (ماتریس مربع) در موقعیت  $U$  (مختصات متریک)،  $X^T$  ترانهاده ماتریس متغیرهای مستقل ( $X$ ) هستند. ماتریس وزن تابع مختصات متریک  $U$  با استفاده از رابطه نمایی (۱۰) قابل تخمین است:

$$W_i(U) = e^{-0.5(d_i(U)/h)^2} \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰)،  $W_i(U)$  وزن جغرافیایی مشاهدات  $I$  در موقعیت مکانی  $U$ ،  $d_i(U)$  اندازه فاصله مکانی بین مشاهدات  $i$  و  $h$  پهنای باند انتخابی بر اساس متر هستند [۴]. همچنین در این پژوهش از آماره موران عمومی برای اندازه‌گیری خودهمبستگی فضایی داده‌های

### مدل رگرسیونی حداقل مربعات معمولی (OLS<sup>1</sup>)

حداقل مربعات معمولی یا کمترین میزان مربعات معمولی روشی برای محاسبه پارامترهای مجهول در مدل رگرسیون خطی از طریق کم کردن اختلاف بین متغیرهای جواب مشاهده شده در مجموعه داده و در تجزیه و تحلیل روابط مکانی بین داده‌ها و الگوهای مکانی عوامل مستقل پرداخته شده است. زیربنای فکری روش حداقل مربعات معمولی این است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که مدل رگرسیون نمونه بیشترین نزدیکی را به شواهدات داشته باشد، به عبارت دیگر کمترین انحراف را از مشاهدات فوق نشان دهد. مدل رگرسیون خطی ساده یک متغیره به شکل رابطه (۵) است؛

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

که در آن  $Y$  متغیر وابسته (برآورد شده)،  $X$  متغیر برآورد کننده یا مستقل،  $\varepsilon$  خطا یا انحراف مدل در برآورد،  $\beta_0$  و  $\beta_1$  ضرایب مدل هستند. مدل آماری OLS و ماتریس تخمین ضرایب با روابط (۶) و (۷) بیان می‌شود؛

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (6)$$

$$\hat{\beta} = (XX^T)^{-1} X^T y \quad (7)$$

که در رابطه (۷)  $T$  ترانهاده ماتریس،  $(XX^T)^{-1}$  معکوس ماتریس واریانس-کواریانس،  $X$  ماتریس متغیرهای مستقل است. ضرایب مدل رگرسیون OLS در سراسر مکان ثابت است.

### مدل رگرسیونی وزنی جغرافیایی (GWR<sup>2</sup>)

رگرسیون وزنی جغرافیایی، یک روش رگرسیون فضایی و محلی است که برای مدل‌سازی روابط متغیرهای فضایی استفاده می‌شود. مدل GWR روشی برای مدل‌سازی فرایندهای ناهمگن مکانی است. ناهمگنی مکانی به این معنی است که در هر نقطه

1. Ordinary Least Squares
2. Geographic Weighted Regression

باقیمانده استاندارد شده مقادیر پیش‌بینی مدل‌های OLS و GWR استفاده شد [۱۹، ۲۱ و ۲۶]. آماره موران عمومی بصورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{N}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2} \quad (11)$$

که در آن N تعداد سلول‌ها یا مشاهدات فضایی،  $x_i$  مقدار مشاهده شده سلول  $i$ ، میانگین  $\bar{x}$  میانگین  $x_i$ ها هستند که از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (12)$$

و همچنین  $S_0$  از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$W_{ij} S_0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \quad (13)$$

$W_{ij}$  مقدار وزن فضایی بین سلول  $i$  و سلول  $j$  است که در محدوده تأثیر وابستگی ساختار فضایی را نشان می‌دهد و بر اساس ارتباط هم‌جواری (همسایگی) تعیین می‌شود. بعد از اینکه آماره موران جهانی برای داده‌های مقادیر استاندارد شده پیش‌بینی مدل محاسبه شد، نمره Z استاندارد شده آماره مزبور از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$Z(I) = \frac{1 - E(I)}{S(I)} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)  $E(I)$  و  $S(I)$  به ترتیب انحراف از معیار و میانگین موران عمومی هستند. برای تشخیص اینکه نمره Z بدست آمده از نظر آماری معنی‌دار است یا نه، آن را در یک سطح اطمینان خاص در نظر می‌گیرند و مقایسه می‌کنند. برای نمونه اگر سطح اطمینان ۰/۰۵ باشد، نمره Z بدست آمده در صورتی معنی‌دار است که کمتر از ۱/۹۶- و یا بزرگتر از ۱/۹۶ باشد. چنانچه مقدار آماره موران جهانی به صفر نزدیک باشد نشان می‌دهد که هیچ خودهمبستگی فضایی وجود ندارد و از نظر فضایی با یک الگوی تصادفی مواجه هستیم و بالعکس.

برای مقایسه میزان اعتبار یا کارایی مدل‌های رگرسیونی چند متغیره، از معیارهای زیر برای مقایسه نتایج آن‌ها استفاده شد: ضریب تعیین ( $R^2$ ) که اگر انحراف معیار متغیرهای X و Y به ترتیب به صورت  $S_x$  و  $S_y$  باشد و کواریانس آن‌ها با علامت  $Cov_{xy}$  نشان داده شود، ضریب تعیین از رابطه (۱۵) قابل محاسبه است:

$$R^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx} \cdot S_{yy}} \quad (15)$$

روش معیار اطلاعات آکائیکه (AIC) که معیار اطلاعاتی آکائیکه، معیاری است برای سنجش میزان کارایی نسبی و نشان می‌دهد که

استفاده از یک مدل آماری به چه میزان باعث از دست رفتن اطلاعات می‌شود. به عبارتی، این معیار تعادلی میان دقت مدل و پیچیدگی آن برقرار می‌کند. در مقایسه دو مدل اگر اختلاف معیار اطلاعات آکائیکه کمتر از ۳ باشد، در واقع دو مدل اختلافی بایکدیگر ندارند و وضعیت تقریباً یکسانی دارند [۵]. روش استاندارد برای تعیین حد آستانه AIC وجود ندارد. معیار تصحیح شده آکائیکه از رابطه (۱۶) و (۱۷) بدست می‌آید:

$$AICc = AIC + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (16)$$

$$AIC = 2k - 2Ln(\hat{L}) \quad (17)$$

که در روابط (۱۶) و (۱۷) K تعداد پارامترهای مدل و  $\hat{L}$  مقدار حداکثر درست‌نمایی است. ریشه میانگین مجذور خطاها که جهت مقایسه مدل‌ها از مقادیر ریشه متوسط مربع خطاها مطابق با رابطه (۱۸) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_{exp})^2}{n}} \quad (18)$$

که در رابطه (۱۸)  $x_p$  مقادیر برآورد شده و  $x_{exp}$  مقادیر اندازه‌گیری شده هستند [۲۵]. از جمله متغیرهای مستقل در پژوهش حاضر، شاخص شوری خاک ( $NDSI^2$ ) بود که از رابطه (۱۹) محاسبه شد:

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} \quad (19)$$

در رابطه (۱۸) SWIR باند مادون قرمز کوتاه (معادل باند ۵ تصاویر لندست) و Green باند سبز (معادل باند ۲ تصاویر لندست) است. از دیگر متغیرهای پژوهش حاضر، شاخص پوشش گیاهی بود (NDVI) بود که از رابطه (۲۰) محاسبه شد:

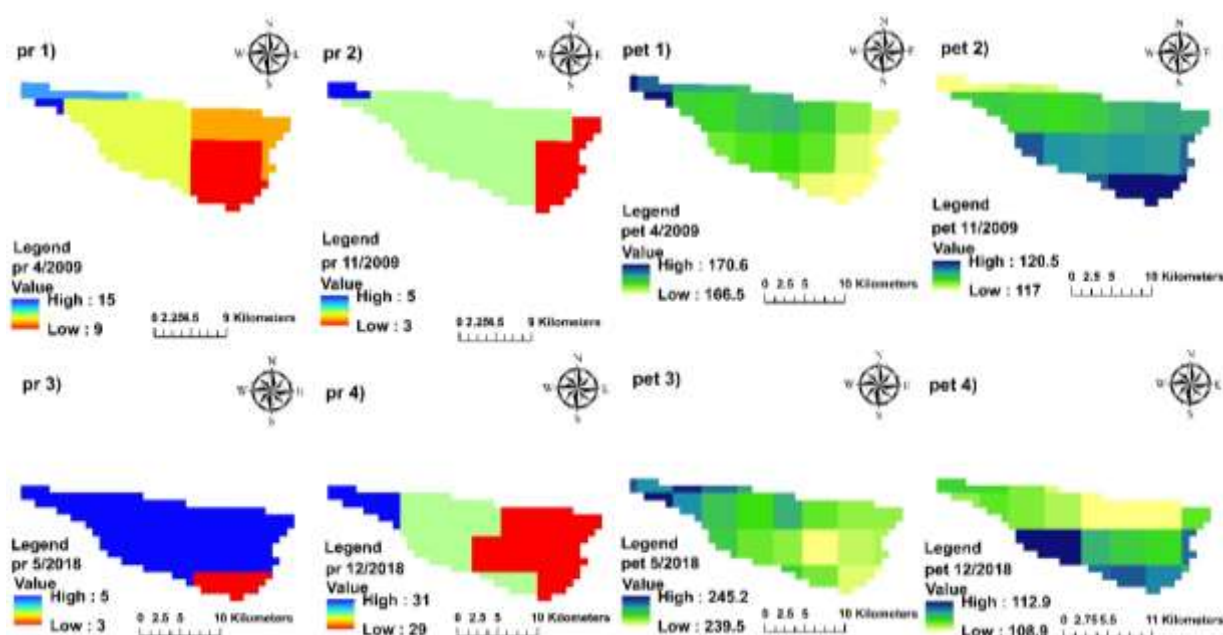
$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰) NIR بازتابش در باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ تصاویر لندست) و Red بازتابش در باند قرمز (باند ۳ تصاویر لندست) هستند. شایان ذکر است شاخص‌های طیفی بالا با استفاده از تصاویر لندست ۸ با میانگین ماهانه و در مقاطع زمانی پژوهش در سامانه GEE کدنویسی و استخراج شدند. از دیگر متغیرهای پژوهش حاضر، تبخیر و تعرق بالقوه ( $PET^3$ ) است که میزان تبخیر و تعرق بالقوه که در شرایط ایده‌آل و بدون محدودیت آب را نشان می‌دهد، واحد آن میلی‌متر است و اساس آن فرمول پنمن-مانیتث است که دما، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی را در نظر می‌گیرد. این متغیر با کدنویسی جاوااسکریپت در محیط GEE برای مقاطع زمانی مختلف تحقیق بر اساس مقیاس ماهانه محاسبه شد. متغیر دیگر

## نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش‌های کمترین مربعات معمولی و رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار به بررسی متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های خاک بر تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در چهار مقطع زمانی در دشت کهورستان استان هرمزگان پرداخته شد. در ادامه کار از تحلیل خودهمبستگی فضایی عمومی، جهت بررسی توزیع فضایی آن در سطح محدوده مورد مطالعه استفاده شد. نتایج نشان داد، توزیع فضایی کیفیت آب زیرزمینی با توجه به متغیرهای مستقل در سطح دشت کهورستان حالت خوشه‌ای و سیستماتیک نداشت و توزیع آمار فضایی آن حالت تصادفی را نشان داد (مقدار شاخص موران معادل  $-0/11$  و مقدار فاکتور  $Z$  معادل  $-0/51$  - محاسبه شده است). در مقطع زمانی نخست (فصل غیرآبیاری ۲۰۰۹/۴) نتایج نشان داد از بین متغیرهای مستقل ورودی، متغیرهای شاخص شوری خاک، بارش تجمعی و شاخص پوشش گیاهی دارای کمترین تورم واریانس و هم‌خطی ( $>$ ) را در بین متغیرهای مستقل را به خود اختصاص داده‌اند. جدول ۳ میزان تورم واریانس در فصول غیرآبیاری و آبیاری ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸ در مقطع مختلف زمانی را نشان می‌دهد.

بارش تجمعی ( $Pr^1$ ) بود که جمع بارش روزانه در ماه مربوطه مد نظر قرار گرفته و بر اساس میلی‌متر است. این متغیر نیز با کدنویسی در سامانه GEE در مقیاس ماهانه برای مقاطع زمانی مختلف پژوهش به شکل تصاویر رستری استخراج شد. متغیر دیگر تبخیر و تعرق واقعی ( $AET^2$ ) بود که بر اساس میلی‌متر بیان می‌شود. متغیر دیگر کمبود آب در خاک ( $DEF^3$ ) بود که این متغیر نیز بر اساس واحد میلی‌متر بیان می‌شود و از جمله پروداکت‌های سنجش از دوری دانشگاه آیداهو<sup>۴</sup> است و در مجموعه داده‌های محیط GEE به شکل تصاویر رستری مقیاس ماهیانه قابلیت استخراج دارد. متغیر دیگر شاخص شدت خشکسالی پالم ( $PDSI$ ) بود که بدون واحد است و بر اساس داده‌های تاریخی تبخیر و بارندگی منطقه محاسبه می‌شود که مقادیر مثبت و بالاتر از  $0/5$  آن نشان‌دهنده شرایط مرطوب و بارشی بیشتر از نرمال است و مقادیر منفی حکایت از خشک و کمبود آب دارد. متغیرهای مورد استفاده در پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین متغیر دمای سطح زمین ( $LST$ ) از فراخوانی پروداکت‌های آماده سنجنده مادیس در سامانه GEE مطابق با بازه‌های زمانی تحقیق، تهیه شد.

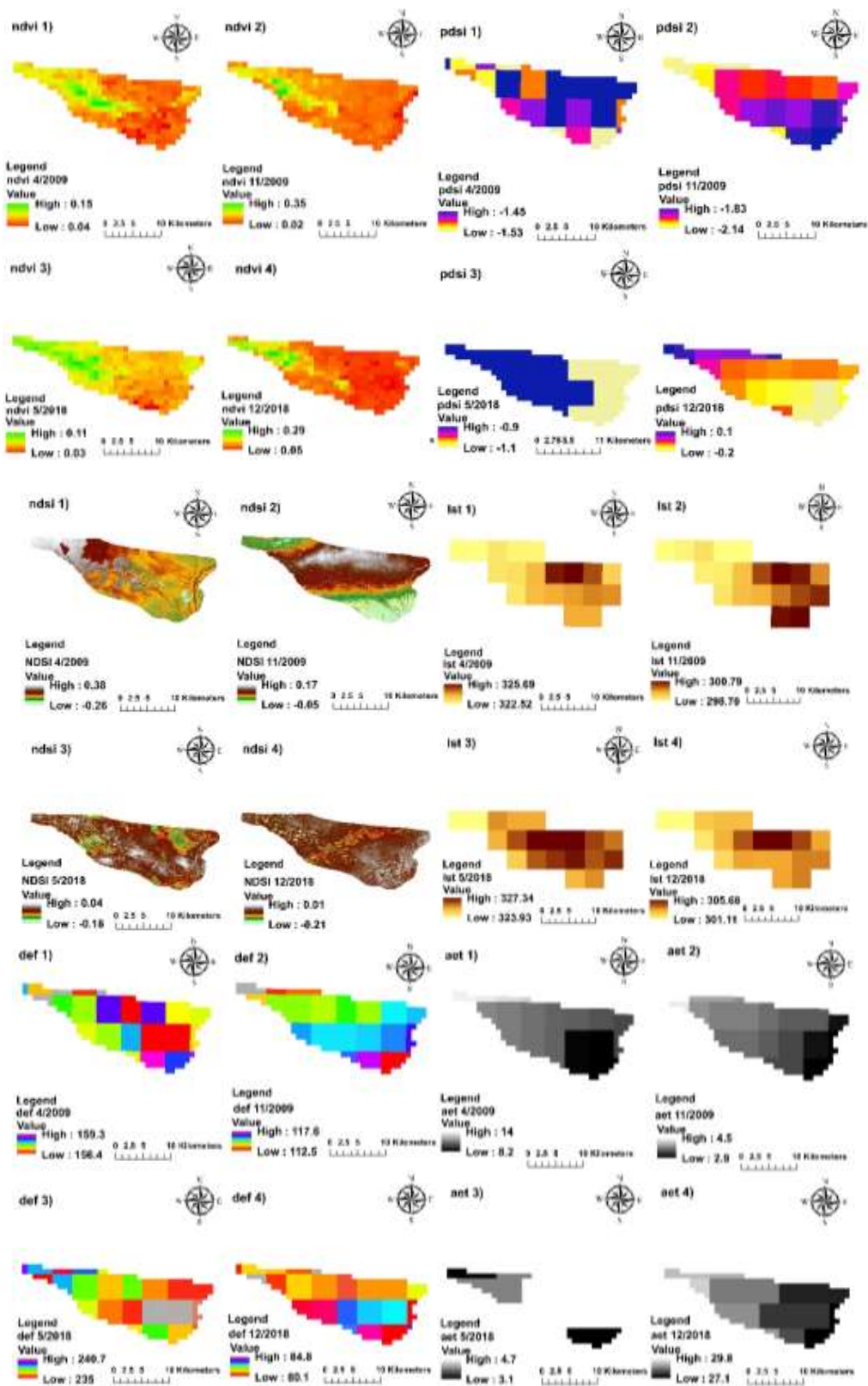


شکل ۲- متغیرهای مستقل بارش تجمعی، تبخیر و تعرق پتانسیل، شاخص خشکسالی پالم، شاخص پوشش گیاهی، شاخص شوری خاک، دمای سطح زمین، کمبود آب در خاک، تبخیر و تعرق واقعی برای چهار مقطع زمانی فصول آبیاری و غیرآبیاری ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸ (به ترتیب از بالا سمت چپ)

Fig 2. Independent variables: cumulative precipitation, potential evapotranspiration, Palmer drought index, vegetation index, soil salinity index, land surface temperature, soil moisture deficit, and actual evapotranspiration for four time periods of irrigation and non-irrigation seasons in 2009 and 2018 (from top left to bottom right)

1. Cumulative Precipitation
2. Actual Evapotranspiration
3. Deficit
4. TerraClimate: Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces, University of Idaho

5. The global Moran's I statistic



ادامه شکل ۲- متغیرهای مستقل بارش تجمعی، تبخیر و تعرق پتانسیل، شاخص خشکسالی پالمر، شاخص پوشش گیاهی، شاخص شوری خاک، دمای سطح زمین، کمبود آب در خاک، تبخیر و تعرق واقعی برای چهار مقطع زمانی فصول آبیاری و غیر آبیاری ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸ (به ترتیب از بالا سمت چپ)

Fig 2. Continued Independent variables: cumulative precipitation, potential evapotranspiration, Palmer drought index, vegetation index, soil salinity index, land surface temperature, soil moisture deficit, and actual evapotranspiration for four time periods of irrigation and non-irrigation seasons in 2009 and 2018 (from top left to bottom right)



همچنین مدل‌سازی OLS در این مقطع زمانی مقدار  $R^2$  معادل ۰/۶۶ و ضریب آکائیکه معادل ۲۹۰/۶۱ را نشان داد. نتایج آزمون کای اسکوتر در درجه آزادی هفت معادل ۰/۷۳ شد که گواه معنی‌داری آزمون ( $P < ۰/۰۵$ ) و وجود روابط معنی‌دار بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است. در مقطع زمانی دوم (فصل آبیاری، ۲۰۰۹/۱۱) نتایج نشان داد از بین متغیرهای مستقل ورودی، متغیرهای شاخص شوری خاک، بارش روزانه، شاخص پوشش گیاهی دارای کمترین تورم واریانس و هم‌خطی ( $V >$ ) در بین متغیرهای مستقل را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۳- میزان تورم واریانس متغیرهای دخیل در مدل OLS در بازه‌های مختلف زمانی

Table 3. The amount of variance inflation of the variables involved in the OLS model in different time periods

دوره زمانی	متغیر	تورم واریانس
Time Period	Variable	Variance inflation (VIF)
2009/04 غیر آبیاری non-irrigated	DEF	15.53
	LST	8.44
	NDVI	1.60
	PET	13.34
	Pr	7.06
2009/11 آبیاری irrigation	NDSI	1.35
	LST	12.27
	NDVI	1.52
2018/05 غیر آبیاری non-irrigated	Pr	1.84
	NDSI	1.19
	DEF	110.42
	LST	7.49
	NDVI	1.32
2018/12 آبیاری irrigation	PET	55.23
	Pr	10.07
	NDSI	1.20
	DEF	47.7
	LST	62.8
	NDVI	2.15
	PET	77.67
	Pr	150.28
	NDSI	1.41

همچنین مدل‌سازی OLS در این مقطع زمانی مقدار  $R^2$  معادل ۰/۵۴ و ضریب آکائیکه معادل ۲۸۶/۳۴ را نشان داد. نتایج آزمون کای اسکوتر در درجه آزادی پنج معادل ۰/۲ شد که گواه معنی‌داری آزمون ( $P < ۰/۰۵$ ) و وجود روابط معنی‌دار بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل می‌باشد. در مقطع زمانی سوم (غیرآبیاری ۲۰۱۸/۵) نتایج نشان داد از بین متغیرهای مستقل ورودی، متغیرهای شاخص شوری خاک و شاخص پوشش گیاهی دارای کمترین تورم واریانس و هم‌خطی ( $V >$ ) در بین متغیرهای مستقل را به خود اختصاص داده‌اند. در این مقطع زمانی مقدار  $R^2$  معادل ۰/۵۷ و ضریب آکائیکه معادل ۲۹۸/۱۳ را نشان داد. نتایج آزمون کای اسکوتر در درجه آزادی هفت معادل ۰/۷۵ شد که گواه معنی‌داری آزمون ( $P < ۰/۰۵$ )

و وجود روابط معنی‌دار بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است. مقدار شاخص موران معادل ۰/۰۸- و مقدار فاکتور Z معادل ۰/۲۷- محاسبه شده است (مقدار Z کمتر از ۱/۵ است). در مقطع زمانی چهارم (آبیاری ۲۰۱۸/۱۲) نتایج نشان داد از بین متغیرهای مستقل ورودی، متغیرهای شاخص شوری خاک و شاخص پوشش گیاهی دارای کمترین تورم واریانس و هم‌خطی ( $V >$ ) در بین متغیرهای مستقل را به خود اختصاص داده‌اند. در این مقطع زمانی مقدار  $R^2$  معادل ۰/۷۵ و ضریب آکائیکه معادل ۲۸۷/۸۱ را نشان داد. نتایج آزمون کای اسکوتر در درجه آزادی هفت معادل ۰/۳۴ شد که گواه معنی‌داری آزمون ( $P < ۰/۰۵$ ) و وجود روابط معنی‌دار بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل بوده است. مقدار شاخص موران معادل ۰/۰۷ و مقدار فاکتور Z معادل ۰/۹۹ محاسبه شده است (مقدار Z کمتر از ۱/۵ است).

در ادامه کار همانگونه که بیان شد، با استفاده از مدل GWR به شناسایی متغیرهای تأثیرگذار جهت توضیح متغیر کیفیت آب زیرزمینی (WQI) پرداخته شد. در مقطع زمانی نخست (۲۰۰۹/۴) تنها دو متغیر NDVI و NDSI با ضریب تبیین ( $R^2$ ) معادل ۰/۴۷ و ضریب آکائیکه معادل ۲۸۲/۱۲ به عنوان تأثیرگذارترین متغیرها بر کیفیت آب زیرزمینی از بین سایر متغیرهای اقلیمی و سطحی شناسایی شدند. در مقطع زمانی دوم تنها متغیر NDSI با ضریب تبیین ( $R^2$ ) معادل ۰/۶۳ و ضریب آکائیکه معادل ۲۸۰/۴۳ به عنوان تأثیرگذارترین متغیر شناخته شد. در مقطع زمانی سوم دو متغیر NDVI و NDSI با ضریب تبیین ( $R^2$ ) معادل ۰/۶۵ و ضریب آکائیکه معادل ۲۹۰/۵۶ به عنوان تأثیرگذارترین متغیرها بر کیفیت آب زیرزمینی از بین سایر متغیرهای اقلیمی و سطحی شناسایی شدند. در نهایت در مقطع زمانی چهارم نیز صرفاً دو متغیر NDVI و NDSI با ضریب تبیین ( $R^2$ ) معادل ۰/۵۵ و ضریب آکائیکه معادل ۲۸۰/۷۲ به عنوان تأثیرگذارترین متغیرها بر کیفیت آب زیرزمینی از بین سایر متغیرهای اقلیمی و سطحی شناسایی شدند. در جدول ۴ معیارهای ارزیابی دو مدل مذکور جهت شبیه‌سازی شاخص کیفیت آب زیرزمینی آورده شده است.

جدول ۴- مقایسه شاخص‌های ارزیابی مدل‌های OLS و GWR

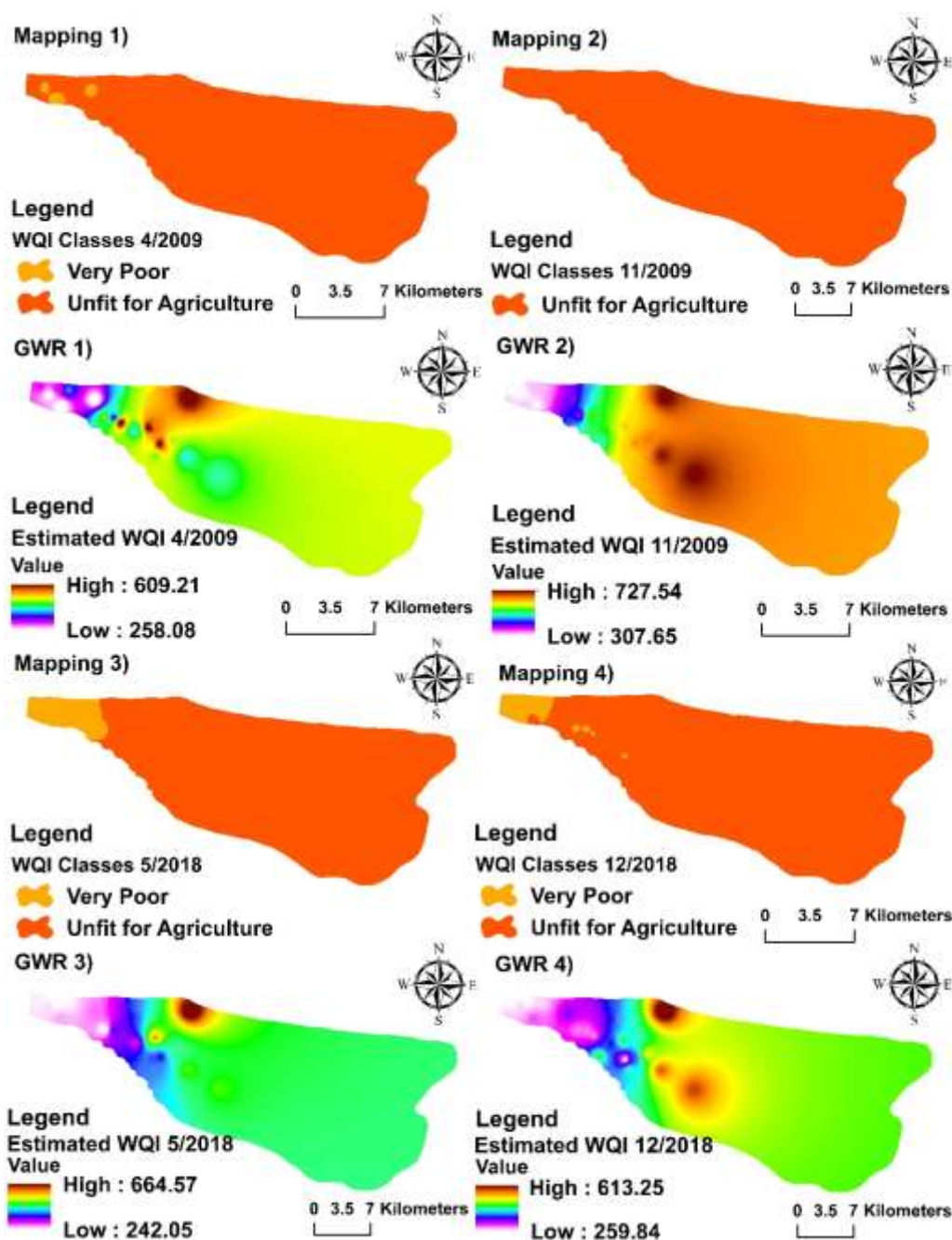
Table 4. Comparison of evaluation indexes of OLS and GWR models

GWR	OLS	شاخص‌های ارزیابی Evaluation indicators
11.3	19.45	RMSE
0.14	0.18	MSE
0.70	0.81	$R^2$
0.71	0.82	$R^2(\text{adj})$
-570.19	-282.46	AIC

همانگونه که جدول (۴) نشان می‌دهد، افزایش مقدار مربعات

متغیرهای مستقل و وابسته نسبت به روش OLS ارائه کرده است. از بین متغیرهای اقلیمی و سطح زمین، متغیرهای پوشش گیاهی و شاخص شوری بیشترین تأثیرگذاری را از بین متغیرهای اقلیمی و ویژگی‌های سطح زمین بر میزان کیفیت آب زیرزمینی نشان دادند. کیفیت آب زیرزمینی در فصول غیرآبیاری به مراتب بهتر از کیفیت آب زیرزمینی در فصول آبیاری بوده است. با توجه به شکل (۳) شاخص WQI با گذشت زمان روند کاهشی دارد و این نشان از بهبود وضعیت کیفیت آب زیرزمینی در دشت کهورستان است. بدین

باقیمانده تعدیل شده و کاهش مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده نشان‌دهنده کاهش خطا و افزایش دقت مدل در برآورد متغیر وابسته و بیانگر برتری مدل GWR به OLS است. رگرسیون وزن‌دار فضایی با تولید داده‌های فضایی این امکان را به وجود آورده تا تغییر فضایی در روابط بین متغیرها مورد بررسی قرار بگیرد. روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با ریشه میانگین مربعات خطا معادل ۰/۱۴، مجموع مربعات باقیمانده ۱۱/۳، ضریب تعیین ۰/۸۲ و ضریب آکائیکه ۵۷۰/۱۹- نتایج بهتری را برای مدل‌سازی میان



شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص WQI بر اساس مدل رگرسیون جغرافیایی وزن‌دار در بازه‌های زمانی مورد مطالعه

Fig 3. Zoning of the WQI index based on the weighted geographic regression model in the studied time periods

منظور تغییرات پهنه‌های سطوح کیفی آب‌زیرزمینی در مقاطع زمانی مختلف در شکل (۳) آورده شده است.

همانگونه که در شکل بالا دیده می‌شود، کیفیت آب‌زیرزمینی در دشت کهورستان در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۸ چه در فصول آبیاری و چه در فصول غیرآبیاری شامل طبقات کیفی «بسیار ضعیف» و «نامناسب برای مصارف کشاورزی» بوده است. اما، حدود حداقل و حداکثر آن‌ها و نیز سطوح طبقات کیفی یادشده در مقاطع زمانی مختلف دارای تغییراتی است که به شرح ذیل هستند؛

در مقطع زمانی نخست یا ۲۰۰۹/۴ (آوریل ۲۰۰۹)، کلاس کیفی «بسیار ضعیف» از کیفیت آب زیرزمینی دشت کهورستان مساحت ۲/۴۴ کیلومترمربعی را بخود اختصاص داده است. بقیه سطح مورد مطالعه شامل کلاس کیفی «نامناسب برای مصارف کشاورزی» است که سطحی معادل ۲۷۲/۷ کیلومترمربع را به خود تخصیص داده است. بهترین مقدار کیفیت آب‌زیرزمینی در این مقطع، ۲۵۸/۰۸ است و طبقه کیفیت حداقلی «بسیار ضعیف» بیشتر در مناطق شمال‌غربی دشت پراکنش دارند.

در مقطع زمانی دوم یا ۲۰۰۹/۱۱ (نوامبر ۲۰۰۹)، تنها کلاس کیفیت آب‌زیرزمینی دشت کهورستان در این فصل آبیاری، طبقه «نامناسب برای مصارف کشاورزی» بوده است که کل سطح دشت را بخود اختصاص داده است. بهترین مقدار کیفیت آب زیرزمینی در این مقطع، ۳۰۷/۶۵ بود. همانگونه که مشاهده می‌شود کیفیت آب‌زیرزمینی در این فصل (آبیاری) نسبت به فصل قبل (غیرآبیاری) کیفیت آب‌زیرزمینی بدتری را نشان می‌دهد و از کیفیت آب‌زیرزمینی کاسته شده است، بطوریکه همان ۰/۸۸٪ مساحت کلاس کیفیت بسیار ضعیف نیز تبدیل به کلاس غیرقابل مصرف برای امورات کشاورزی شده است.

در مقطع زمانی سوم یا ۲۰۱۸/۵ (می ۲۰۱۸)، دو کلاس کیفیت آب زیرزمینی در دشت کهورستان مشاهده شد. کلاس «بسیار ضعیف» کیفیت آب زیرزمینی سطحی معادل ۱۴/۹۱ کیلومترمربع از مساحت دشت را بخود اختصاص داده است و در مقابل کلاس «نامناسب برای مصارف کشاورزی» بقیه سطح دشت کهورستان یا به عبارتی ۲۶۰/۲۹ کیلومترمربع را اشغال نموده است. همانگونه که مشاهده می‌شود کلاس کیفی «بسیار نامناسب» نسبت به فصل غیرآبیاری سال ۲۰۰۹، افزایش سطح معادل ۴/۵۴٪ نشان می‌دهد. در این مقطع زمانی (۲۰۱۸/۵) بهترین مقدار کیفیت آب زیرزمینی، ۲۴۲/۰۵ بوده است که نسبت به فصل غیرآبیاری سال ۲۰۰۹ بهبود نشان می‌دهد.

در مقطع زمانی چهارم یا ۲۰۱۸/۱۲ (دسامبر ۲۰۱۸) بر خلاف فصل آبیاری سال ۲۰۰۹، دو طبقه کیفیت آب‌زیرزمینی شامل «بسیار ضعیف» و «نامناسب برای مصارف کشاورزی» مشاهده شد. مساحت کلاس کیفی نخست ۸/۵۱ کیلومترمربع و سطح کلاس کیفی دوم، ۲۶۶/۶۶ کیلومترمربع بود. همانگونه که مشاهده می‌شود کلاس کیفی «بسیار نامناسب» کیفیت آب زیرزمینی بر خلاف فصل مشابه (۲۰۰۹/۱۱) رشد ۱/۱۰٪ مساحت نشان داده است و سهم این کلاس

از سطح دشت کهورستان به ۳/۱٪ رسیده است. بهترین مقدار کیفیت آب زیرزمینی در این مقطع، ۲۵۹/۸۴ بوده است که نسبت به فصل مشابه سال ۲۰۰۹، رشد چشم‌گیر کیفیت و بهبود آن را نشان می‌دهد. در این مقطع زمانی پراکنش کلاس کیفیت «بسیار نامناسب» از مناطق شمال‌غربی دشت کهورستان به سمت مناطق مرکزی دشت نیز گسترش یافته است و صرفاً محصور به مناطق شمال‌غربی دشت نشده است.

در سال ۲۰۱۸، چه در فصل آبیاری و چه در فصل غیرآبیاری مقادیر WQI، نسبت به سال ۲۰۰۹، مقادیر بهتری را نشان می‌دهند. بطوریکه بهترین مقدار WQI در فصل آبیاری سال ۲۰۱۸، ۲۵۹/۸۴ و در سال ۲۰۰۹، ۳۰۷/۶۵ بوده است. دامنه شاخص کیفیت آب‌زیرزمینی برای مقاطع زمانی یادشده به ترتیب ۳۵۳/۴۱ و ۴۱۹/۸۹ بوده است. دامنه نوسان مقادیر WQI در فصل آبیاری سال ۲۰۱۸، به میزان ۶۶/۴۸ واحد کمتر از مدت مشابه در سال ۲۰۰۹ بود. بهترین مقدار WQI در فصل غیرآبیاری سال ۲۰۱۸، ۲۴۲/۰۵ و در سال ۲۰۰۹، ۲۵۸/۰۸ بوده است. همانگونه که مشاهده شد مساحت طبقات با کیفیت بهتر آب‌زیرزمینی برای سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۲۰۰۹ رشد سطوح نشان داده است. در مجموع برای سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۲۰۰۹ چه در فصل آبیاری و چه در فصل غیرآبیاری بهبود کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی وجود داشته است. آگیلار و همکاران [۲] به رابطه معنی‌دار پوشش گیاهی و کیفیت آب زیرزمینی اشاره کردند و بیان کردند با کاهش پوشش گیاهی در فصول خشک از کیفیت آب زیرزمینی کاسته می‌شود. در پژوهش حاضر نیز با تغییرات مکانی پوشش گیاهی از مناطق شمالی دشت کهورستان به سمت جنوب و شرق دشت از کیفیت آب زیرزمینی کاسته می‌شود و در فصول آبیاری با کاهش پوشش گیاهی نسبت به فصول غیرآبیاری کیفیت آب زیرزمینی دشت کمتر بوده است و از این حیث با نتایج نامبردگان مطابقت دارد. همچنین البیه و زینی [۱۰] به وجود رابطه معنی‌دار میان شاخص‌های NDVI و NDSI با کیفیت آب زیرزمینی اشاره کردند. در پژوهش حاضر علاوه بر آزمون رابطه معنی‌دار میان شاخص‌های طیفی مذکور و کیفیت آب زیرزمینی، این نتیجه حاصل شد که از میان متغیرهای اقلیمی و سطح زمین، بیشترین رابطه و میزان همبستگی میان پوشش گیاهی و شاخص شوری خاک با شاخص کیفیت آب‌زیرزمینی وجود دارد. نبی‌پور و همکاران [۲۰] به وجود رابطه معنی‌دار میان کیفیت آب‌زیرزمینی و شاخص پوشش گیاهی NDVI در دشت ارومیه اشاره کردند که این همبستگی معنی‌دار و مثبت در پژوهش حاضر نیز تصدیق شد. عیدی و امیری [۹] بیان کردند که شاخص WQI با دیگر روش‌های ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی همخوانی دارد و می‌توان آن را به عنوان یک شاخص قابل اطمینان برای بررسی تغییرات مکانی و حتی زمانی کیفیت آب‌زیرزمینی استفاده کرد. همچنین نتایج نامبردگان نشان داد کیفیت آب‌زیرزمینی در چاه‌های نمونه در فصول مرطوب بهتر از فصول خشک هستند. در پژوهش حاضر نیز کیفیت آب زیرزمینی با پایان

یافتن بارش‌های زمستانه و اوایل بهار در دشت کهورستان دارای کیفیت بیشتری نسبت به ماه‌های پایانی سال (میلادی) در اواسط تا اواخر پاییز است. دولت‌کردستانی و همکاران [۷]، روش‌های زمین آماری و شاخص کیفیت آب (WQI) را با توجه به مطالعات افضلی و شاهدی [۱]؛ جاوید و همکاران، [۱۵]؛ دارای توانایی قابل ملاحظه در تحلیل خصوصیات آب‌زیرزمینی و پهنه‌بندی کیفیت آن دانستند. در پژوهش حاضر بجای روش‌های درون‌یابی تکیه بر مدل‌سازی تغییرات مکانی با استفاده از GWR و OLS با استفاده از داده‌های سنجش از دور ویژگی‌های اقلیمی و سطح زمین به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص کیفیت آب زیرزمینی بعنوان متغیر وابسته ورودی به مدل بود و صرفاً بر اساس مدل‌های درون‌یابی برای پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته (WQI) عمل نشد. کیا و همکاران [۱۸] نیز با استفاده از روش‌های درون‌یابی در استان گلستان به بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص کیفیت آب‌زیرزمینی پرداختند. نامبردگان بیان کردند صرفاً در بخش‌های کوچکی از آبخوان که به سواحل شرقی دریای خزر و شمال منطقه مطالعاتی منتهی می‌شود به دلیل شوری آب، شوری خاک و بالا بودن جامدات محلول، مقادیر WQI در طبقه بد قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر به جز محدوده‌های شمال‌غربی آبخوان کهورستان که آن هم برای شرب در طبقات غیرمتناسب قرار دارد، بقیه آبخوان شرایط شرب را ندارند و صرفاً تا نواحی مرکزی دشت برای مصارف کشاورزی قابلیت استفاده دارد. در نواحی شرقی و جنوبی دشت به دلیل حضور رودخانه‌های شور و خاک با شوری بالا و مواد محلول در آن مصارف کشاورزی و شرب مقدور نیست. حسین‌خواه و همکاران [۱۴] در بررسی تغییرات کاربری اراضی بر روی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های GWR و OLS بیان کردند که مدل جغرافیایی وزن‌دار با نشان دادن مقادیر بالاتر  $R^2$ ، مقادیر کمتر ضریب آکائیکه و نیز خودهمبستگی موران نتایج بهتری در مدل‌سازی کیفیت آب‌زیرزمینی ارائه می‌کند. در پژوهش حاضر نیز مدل وزنی جغرافیایی مقادیر بالاتری از  $R^2$ ، ضریب آکائیکه و ... در مقاطع زمانی مختلف نسبت به مدل مجموع مربعات معمولی ارائه کرد و از این حیث با نتایج نامبردگان مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری

وسعت پهنه‌های کیفی آب زیرزمینی دشت کهورستان در مقاطع زمانی غیرآبیاری دارای وسعت و کیفیت بهتری در مقایسه با مقاطع زمانی آبیاری اراضی زراعی است. همانگونه که مشخص شد، پوشش گیاهی بیشتر و نیز مقادیر کمتر شوری خاک در مقاطع زمانی غیرآبیاری (ماه‌های ۴ و ۵ در سال‌های زراعی) اثرگذارترین متغیرها بر کیفیت و وسعت پهنه‌های آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه بودند. به‌طورکلی کیفیت آب‌زیرزمینی در دشت کهورستان روند بهبود را نشان داده است. تغییر کلاس کیفی آب زیرزمینی در دشت کهورستان از غالبیت «نامناسب برای مصارف کشاورزی» به «بسیار ضعیف» در فصول آبیاری مشهود است و این کلاس با  $۳/۱\%$  از سطح دشت،

رشد  $۱۰۰\%$  نسبت به فصل مشابه با گذر زمان نشان داده است. در بازه‌های غیرآبیاری، بیشترین مقدار ضریب همبستگی مکانی مثبت میان پوشش گیاهی و کیفیت آب‌زیرزمینی با مقادیر  $۲/۸-۳/۸$  در نواحی شمال‌غربی دشت مشاهده شد که این روند مثبت ضریب همبستگی، به سمت مرکز دشت کاهش نشان داد. به عبارتی در فصل غیرآبیاری با کاهش پوشش گیاهی کیفیت آب زیرزمینی نیز کاسته شده است. در همین بازه زمانی ضرائب همبستگی میان شوری خاک و کیفیت آب زیرزمینی منفی و با مقادیر  $۲/۱۷-۲/۲۸$  در نواحی شمال‌غربی دشت مشاهده شد. به سمت مرکز دشت مقدار ضریب همبستگی منفی میان کیفیت آب زیرزمینی و شوری خاک روند کاهشی نشان داد، به عبارتی با حرکت به سمت مرکز دشت و افزایش میزان شوری خاک، کیفیت آب زیرزمینی روند نزولی نشان داد. در بازه‌های آبیاری نیز همچنان بیشترین همبستگی مکانی با ضریب همبستگی  $۲-۱/۵۲$  در مناطق شمال‌غربی دشت میان پوشش گیاهی و کیفیت آب‌زیرزمینی مشاهده شده که روند مثبت تغییرات مکانی ضریب همبستگی به سمت مرکز دشت کاهشی بود. پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های OLS و GWR به شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی پرداخت و به شناسایی پهنه‌های کیفی آب‌زیرزمینی با در نظر گرفتن آن عوامل کلیدی توجه کرد. در مورد مدل‌سازی کیفیت آب‌زیرزمینی، مدل GWR بیش از مدل OLS به تنوع فضایی و مکانی و امکان تحلیل چگونگی تغییر روابط بین متغیرها توجه می‌کند. مدل OLS بیشتر به برآوردهای محلی پارامترها توجه دارد و بدین ترتیب روندهای فضایی مهمی را ممکن است نادیده بگیرد. لذا برای محدوده‌های مطالعاتی که پیچیدگی بیشتری بین متغیرها وجود دارد مدل GWR پیاده‌سازی و تفسیر مناسب‌تری ارائه می‌کند. مدل OLS با فرض همگنی و ثابت بودن روابط بین متغیرها در سرتاسر فضا کار می‌کند که یکی دیگر از معایب این مدل است و همچنین این مدل خودهمبستگی‌های فضایی را نیز مدنظر قرار نمی‌دهد. لذا استفاده از مدل وزنی جغرافیایی نسبت به مدل حداقل مربعات معمولی با توجه با نتایج معیارهای ارزیابی مدل در پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود.

### سپاسگزاری

نویسندگان از همراهی دانشگاه هرمزگان تشکر می‌نمایند.

### تضاد منافع نویسندگان

«نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.»

### دسترسی به داده‌ها

«داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.»

### مشارکت نویسندگان

عدنان صادقی‌لاری: مفهوم‌سازی، کنترل و نگارش نتایج و بدنه اصلی مقاله.

11. Erfanian, M. Hosseinkhah, M. and Alijanpour, A. 2013. Introduction to ordinary least squares (OLS) and geographically weighted regression (GWR) methods in spatial modeling of land use effects on water quality. *Extension and Development of Watershed Management*. 1(1): 33–38

12. Eslami, F. Shokoohi, R. Maz, S. M. Darvish Motevalli, M. and Salari, M. 2017. Evaluation of water quality index (WQI) of groundwater supplies in Kerman Province in 2015. *Journal of Occupational and Environmental Health*. 3(1): 48–58.

13. Fashae, M. and Ghoochanian, M. 2022. Spatial evaluation of qualitative parameters of groundwater resources with the aim of its application in agriculture and drinking (Case study: Mehvalat-Feyzabad plain). *Water, Soil, Management, and Modeling*. 2(2): 28–44.

14. Hosenikhah, M. Erfanain, M. and Alikhanpour, M. 2016. Modeling the Effects of Land Use on Water Quality Parameters Using OLS and GWR Multivariate Regression Methods in Fars Province Watersheds. *Journal of environmental studies*. 42(2): 353-373. (In Persian)

15. Javid, A.H. Mirbagheri, S.A. and Karimian, A. 2014. Assessing Dez Dam reservoir water quality by application of WQI and TSI indices. *Iran Journal Health & Environment*. 2: 133-142. (In Persian)

16. Johnson, M. and Lee, T. 2019. Impact of Soil Properties on Water Quality in Agricultural Regions. *Environmental Science and Pollution Research*. 26: 4, 3456-3468.

17. Kazemi, M. Zabihi Silabi, M. Jafarpoor, A. Gharemahmudli, S. Mohammadi, F. 2024. Estimation of Erosion and Sediment Components using the IntErO Model (Case Study: Kahouristan Watershed). *Quarterly journal of environmental erosion research*. 50(2): 177-191. (In Persian)

18. Kia, K. Ghorbani, Kh. and Salarijazi, M. 2019. Assessment of spatial and temporal variations of groundwater quality using WQI during two decades in aquifer of Golestan province. *Iranian journal of soil and water research*. 50 (1): 39-51. (In Persian)

19. McDowell, R. W. McNeill, S. J. Drewry, J. J. Law, R. and Stevenson, B. 2024. Difficulties in using land use pressure and soil quality indicators to predict water quality. *Science of The Total Environment*. 935: 173445.

20. Nabipour, Y. Arian Far, A. and Samadian, M. 2015, Investigating changes in vegetation cover on groundwater pollution in Urmia plain using RS and GIS, 6th National Conference on Water Resources Management of Iran. Sanandaj. 9PP. (In Persian)

21. Nourani, V., Ghaffari, A. Behfar, N. Foroumandi, E. Zeinali,

محمد کاظمی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، کنترل و نگارش نتایج و بدنه اصلی مقاله.  
فاطمه رجبی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش اولیه مقاله.

### منابع مورد استفاده

1. Afzali, A. and Shahedi, k. 2014. Investigation on Trend of Groundwater Quantity-Quality Variation in Amol-Babol Plain. *Journal of Watershed Management Research*. 5:144-156. (In Persian)

2. Aguilar, C., Zinnert, J. C., Polo, M. J., & Young, D. R. (2012). NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation. *Ecological Indicators*, 23, 290-300.

3. Bai, Y. and Guo, H. 2018. Spatial Analysis of Groundwater Quality Using Geographically Weighted Regression: A Case Study in the Beijing Area, China. *Water*. 10(6): 727

4. Brunson, C. Fotheringham, A. S. and Charlton, M. E. 1996. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*. 28(4): 281–298.

5. Chen, X. Li, Y. S. Liu, Z. Yin, K. Li, Z. Wai, O. W. H. and et al. 2004. Integration of multi-source data for water quality classification in the Pearl River estuary and its adjacent coastal waters of Hong Kong. *Continental Shelf Research*. 24(16): 1827–1843.

6. Dandge, K. P. and Patil, S. S. 2022. Spatial distribution of ground water quality index using remote sensing and GIS techniques. *Applied Water Science*. 12(1): 7.

7. Dolatkordestani, M. Nohegar, and A. Janizadeh, S. 2019. Groundwater quality zoning using WQI and Geo-statistical Methods for various consumptions. *Desert ecosystem engineering journal*. 8(24): 95-108. (In Persian)

8. Ebrahimian1, S. Tahmasebipour, N. Adeli, M. Zeinivand, H. and Tahmasebipour, M. 2024. Evaluating the chemicals to reduce evaporation in laboratory levels on water quality (a case study of semi-arid mountainous areas). *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 17(63): 91-99. (In Persian)

9. Eidi, M. and Amiri, F. 2022. Groundwater quality assessment of Dehroud and Tang Eram regions of Dashtestan using water quality index (WQI). *Scientific & research journals management system*. 12(2): 141-153. (In Persian)

10. Elbeih, S. F. and El-Zeiny, A. M. 2018. Qualitative assessment of groundwater quality based on land use spectral retrieved indices: Case study Sohag Governorate. *Egypt. Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 10: 82-92.

25. Tabatabaei, S.H. and Ghazali, M. 2011. Accuracy of interpolation methods in estimating the groundwater level (Case study: Farsan- Jooneghan and Sefiddasht aquifers). *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 15, 11–22.
26. Tu, j. 2011. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. *Applied Geography*. 31(1): 376-392. (In Persian)
27. Zhang, Y. and Chen, X. 2021. Groundwater quality and its relationship with climate change in arid regions: A case study in the Heihe River Basin, China. *Water*. 13(6): 776
- A. Ke, C. Q. and Sankaran, A. 2024. Spatiotemporal assessment of groundwater quality and quantity using geostatistical and ensemble artificial intelligence tools. *Journal of Environmental Management*. 355: 120495.
22. Sarbazi, M. Feiznia, S. and Mahdavi, M. 2018. Study of Groundwater Quality of Mashhad Aquifer using GIS and Multivariate Statistical Techniques. *Journal of Range and Watershed Management* 71(3): 645–657.
23. Sinha, S. and Sinha, A. 2016. Application of Ordinary Least Squares (OLS) Model for Groundwater Quality Assessment: A Case Study of Varanasi District, India. *Water Quality Research Journal*. 51(2): 202-213.
24. Smith, J. Brown, A. and White, R. 2020. Assessment of Water Quality Index (WQI) for Drinking Water in Urban Areas. *Journal of Environmental Management*. 250: 109-117.

## Investigating the Impact of Climatic and Land Surface Characteristics on Groundwater Quality Using Google Earth Engine (GEE) Data (Case Study: Kahorestan Plain, Hormozgan)

Adnan Sadeghi- Lari\*<sup>1</sup>, Mohamad Kazemi<sup>2</sup> and Fatemeh Rajabi<sup>3</sup>

Received: 06-08-2024

Accepted: 31-08-2024

### Extended Abstract

#### Introduction

Groundwater, as one of the vital resources for supplying drinking water and agriculture, is significantly affected by climate change and human activities. Rising temperatures, changing precipitation patterns, and alterations in vegetation lead to changes in the chemical composition of water, which can have serious implications for the provision of drinking water and agricultural needs. The quality of groundwater, like that of surface water, is constantly changing, and in arid and semi-arid plains, identifying and analyzing the factors influencing groundwater quality is crucial for managing various quality zones. Researchers in this field have acknowledged that soil characteristics and land surface can directly impact groundwater quality, and proper soil management can contribute to improving water quality. Therefore, this study examines the impact of climatic variables and land surface characteristics on groundwater quality in the Kahorestan plain of Hormozgan Province, aiming to identify quality changes in water during irrigation and non-irrigation seasons. It is noteworthy that previous research primarily estimated the Water Quality Index (WQI) using interpolation algorithms within Geographic Information Systems (GIS) and delineated different groundwater quality levels. In the present study, in addition to investigating the significant relationships between climatic variables and land surface characteristics with groundwater quality, the spatial distribution of these variables within the study area is analyzed, and modeling is conducted using Geographically Weighted Regression (GWR) and Ordinary Least Squares (OLS) methods based on the influential independent variables.

#### Methodology

The study area in the present research is the Kahorestan plain, covering an area of 273.09 square kilometers, which is one of the rare plains in the western part of Hormozgan Province. This study was conducted based on chemical data from 15 semi-deep wells in the Kahorestan plain during irrigation and non-irrigation periods in the years 2009 and 2018. The independent variables of the study included the Normalized Difference Salinity Index (NDSI), cumulative precipitation (Pr), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), soil water deficit (DEF), potential evapotranspiration (PET), land surface temperature (LST), Palmer Drought Severity Index (PDSI), and actual evapotranspiration (AET), which were extracted as monthly raster satellite images from the Google Earth Engine (GEE). The dependent variable of the study was the Groundwater Quality Index

1. Assistant professor and corresponding author, Department of water science and engineering, Faculty of agriculture and natural resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran Email: adnan.sadeghilari@hormozgan.ac.ir

2. Assistant Professor, Hormoz research center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

3. M.Sc. Student, Department of water science and engineering, Faculty of agriculture and natural resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

satellite images from the Google Earth Engine (GEE). The dependent variable of the study was the Groundwater Quality Index (WQI), which was modeled within a Geographic Information System (GIS). To assess the significance of the relationships between these variables at different time periods, the Chi-square test was employed. Subsequently, Geographically Weighted Regression (GWR) and Ordinary Least Squares (OLS) techniques were utilized to model the spatial variations in groundwater quality. To compare the validity or efficiency of the multiple regression models, criteria such as the coefficient of determination, root mean square error, and Akaike Information Criterion were used. Additionally, it is noted that the Local Moran's I statistic was employed to investigate the spatial distribution of groundwater quality zones during these time periods.

### Results and discussion

The chi-square test indicated a significant relationship between climatic variables and land surface characteristics with groundwater quality. Spatial autocorrelation analysis revealed that the spatial distribution of groundwater quality in the Khorasan plain is random. Among the two methods, GWR (Geographically Weighted Regression) and OLS (Ordinary Least Squares), the GWR technique provided better results with a root mean square error of 0.14, a residual sum of squares of 11.3, a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.82, and an Akaike Information Criterion (AIC) of -570.19, compared to the OLS method. Additionally, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDSI (Normalized Difference Snow Index) showed a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.47 in the first time period (4/2009), with the NDSI variable showing an  $R^2$  of 0.63 in the second time period (11/2009). In the third time period (5/2018), both NDVI and NDSI had an  $R^2$  of 0.65, and in the fourth time period (12/2018), the two variables NDVI and NDSI again showed the highest impact among climatic variables and land surface characteristics on groundwater quality, with an  $R^2$  of 0.55. The groundwater quality classes of the Kahorestan plain only included two categories: very poor and unsuitable for agricultural use. In the first-time frame, the "very poor" quality class of groundwater in the Khorasan plain covered an area of 2.44 Km<sup>2</sup>. In the second time frame, the only groundwater quality class in the Khorasan plain during that irrigation season was "unsuitable for agricultural use," with an area of 275.2 Km<sup>2</sup>. In the third time frame, May 2018, the "very poor" quality class of surface groundwater accounted for 14.91 Km<sup>2</sup> of the plain's area. In the fourth time frame, December 2018, the area classified as "very poor" quality was estimated to be 8.51 Km<sup>2</sup>.

### Conclusion

As the results indicated, groundwater quality during irrigation seasons (months 11 and 12 of the years 2009 and 2018) decreases compared to non-irrigation seasons (months 4 and 5 of the years 2009 and 2018), with the quality levels of groundwater also diminishing during irrigation periods. The findings revealed that increased vegetation cover and reduced soil salinity are key factors in improving groundwater quality in this region. A decrease in vegetation cover and an increase in soil salinity during irrigation seasons lead to a reduction in the extent and quality of good and moderate quality zones. Given the superiority of the GWR model over OLS, this model can serve as a useful tool in managing the quality zones of groundwater resources and analyzing changes in water quality. Ultimately, this research emphasizes that attention to climatic variables and land surface characteristics is essential for the optimal management of groundwater resources. This study not only utilized various interpolation methods for the WQI based on the chemical data from observation wells within a Geographic Information System (GIS), but also highlighted the prediction of different groundwater quality zones using Geographically Weighted Regression and Ordinary Least Squares techniques, considering the impact of various climatic variables and land surface characteristics. Additionally, obtaining





independent variables at a monthly scale across different time periods of irrigation and non-irrigation seasons from the online Google Earth Engine (GEE) was another focus of the current study regarding the examination of groundwater quality changes.

**Keywords:** *Soil salinity index, groundwater quality, climatic variables, geographically weighted model, Global Moran's I.*

#### **Acknowledgement**

The authors are grateful for the support of Hormozgan University.

#### **Conflicts of interest**

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

#### **Data Availability Statement**

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

#### **Authors' contribution**

Adnan Sadeghi-Lari: Conceptualization, controlling and writing, editing and revising the manuscript.

Mohamad Kazemi: Conceptualization, performing software analysis, controlling and writing, editing and revising the manuscript.

Fatemeh Rajabi: Performing software analysis, writing the manuscript.