

ارزیابی روش‌های زمین‌آماري در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت مشگین شهر با استفاده از شاخص WQI

ياسر حسینی*

گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده:

در این تحقیق کیفیت آب زیرزمینی دشت مشگین بر اساس شاخص WQI و استفاده از روش‌های زمین‌آماري، مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که نتایج و آماره‌های ارزیابی به روش کوکریجینگ نشان داد، واریوگرام متغیر تصادفی شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی از مدل نمایی با اثر قطعه‌ای به ترتیب برابر $(0/02)$ و $(0/05)$ بود. همچنین، سقف واریوگرام برای متغیر WQI برابر $(0/77)$ و برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی برابر $(0/8)$ ، به دست آمد که نشان دهنده نقش موثر مؤلفه ساختاردار واریوگرام نسبت به مؤلفه بی ساختار آن است و استحکام ساختار فضایی منطقه برای هر دو متغیر تصادفی شاخص WQI و هدایت الکتریکی را بیان میکند. نتایج نشان داد، روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار و کوکریجینگ ساده، با مقدار ضریب تبیین $0/85$ و مجذور میانگین مربعات خطا برابر $3/27$ برآورد دقیقی از متغیر تصادفی شاخص WQI دارد. بطور کلی می‌توان گفت ارزیابی به روش کوکریجینگ نشان داد، شاخص WQI در سطح منطقه عموماً در سطح صفر تا صد متغیر بوده و از نظر کیفی در محدوده "عالی" و "خوب" می‌باشد و بیش از ۹۶ درصد منطقه مورد مطالعه از کیفیت مناسبی برای مصارف شرب برخوردار است. نتایج این تحقیق نشان داد که برآوردهای زمین‌آماري در تعیین شاخص WQI در سطح مناطق، مخصوصاً در مناطقی که در آن‌ها، برداشت آب برای مصارف آشامیدنی انجام می‌شود به دلیل دقت بالای این روش، از اهمیت بالایی برخوردار است.

کلمات کلیدی: کیفیت آب زیرزمینی، زمین‌آمار، شاخص WQI، GIS، دشت.

*ایمیل نویسنده مسئول مکاتبات: y_hoseini@uma.ac.ir

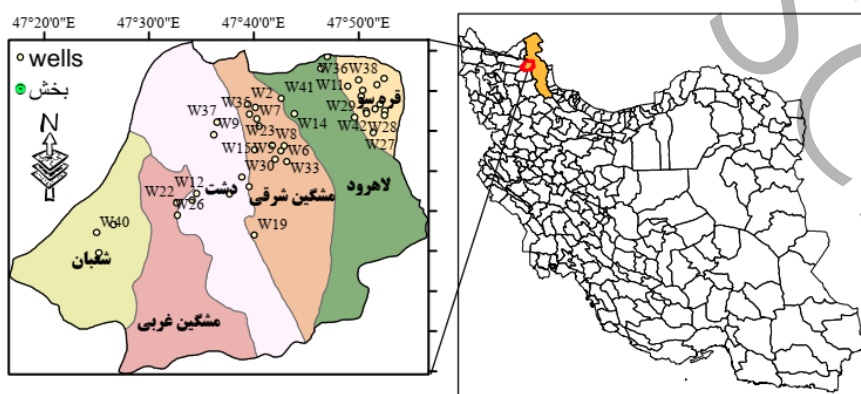
استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث کاهش سطوح ایستابی دشت‌ها و در نتیجه نشست زمین شده است [۱]. لذا، پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی بر گستره یک منطقه مطالعاتی، اولین قدم در برنامه‌ریزی منابع آب است. امروزه، با روی آوردن به استفاده از منابع آب زیرزمینی در اکثر نقاط خشک و نیمه‌خشک به دلیل خشکسالی‌های اخیر و از سوی دیگر، افزایش نفوذ فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به منابع آب زیرزمینی و تکیه بیش از پیش، بر منابع آب زیرزمینی به عنوان منبع تأمین نیاز آبی بخش‌های کشاورزی، شرب، صنعت، سبب تغییر کیفیت این آب‌ها شده است [۲]. این مسئله، اکثر مناطق را با چالش‌های جدی در زمینه کمیت و کیفیت آبهای زیرزمینی مواجهه کرده است [۳]. شاخص‌های مختلفی جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب وجود دارد که یکی از این شاخص‌ها، شاخص استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WQI) می‌باشد. لیکن، از آنجا که آنالیز کیفیت آب زیرزمینی و نمونه برداری آن به صورت نقطه به نقطه انجام می‌شود، لذا، جهت پهنه‌بندی کیفیت آب، نیازمند ابزارهای جدید در قالب اطلاعات مکانی و روش‌های دقیق میان‌یابی می‌باشد که بتواند، ارزیابی کیفی آب زیرزمینی را به طور دقیق در سطح منطقه گسترش داده و امکان بهره‌برداری بهینه از منابع زیرزمینی را فراهم سازد. یکی از این ابزارها و روش‌ها، روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار و یا کریجینگ می‌باشد. زیرا در روش‌های تخمین کلاسیک از جمله روش تیسن موقعیت مکانی داده‌ها و جهت آن‌ها، در برآورد مقادیر متغیر تصادفی مد نظر قرار نمی‌گیرد [۴]. لیکن در زمین‌آمار و تخمین‌های مربوط به آن این دو فاکتور مورد توجه قرار می‌گیرد [۵]. از دیگر خصوصیات زمین‌آمار آن است که مقدار خطای تخمین را محاسبه نموده و همچنین قادر است مقدار خطای نمونه برداری و آماده‌سازی داده‌ها را محاسبه کرده و به این ترتیب شاخصی جهت برآورد استحکام ساختار فضایی و ارتباط مکانی داده‌ها را تعیین نماید [۶]. عبیدای و هوشمند (۱۴۰۰) با تلفیق شاخص WQI و سیستم اطلاعات جغرافیایی، الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی را در منطقه فیروزآباد بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که استفاده از روش‌های مکانی امکان شناسایی دقیق پهنه‌های یحرانی کیفیت آب را فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد، در بخش‌هایی از منطقه، مقادیر ۴ پارامتر کلسیم، کلرید، کدورت و سختی کل بیش از حد مجاز بوده و مقادیر دیگر پارامترها بر استانداردهای سازمان بهداشت جهانی منطبق می‌باشد. یافته‌های این پژوهش مبنای مناسبی برای توسعه مطالعات مبتنی بر زمین‌آمار در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی فراهم کرده است. حشمتی و بیگی هرچگانی (۱۳۹۱) با استفاده از زمین‌آمار کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد را برای استفاده در کشاورزی بررسی کردند و از روش کریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی متغیرها استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده هم‌خوانی و همبستگی مشاهدات بود که حاکی از دقت خوب مدل‌های نیم‌تغیرنما و تخمین‌گر کریجینگ معمولی در میان‌یابی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد بود. در تحقیقی دیگر نخعی و ودیعتی (۱۳۹۲)، کیفیت آب ۲۳ قنات استان تهران را با استفاده از منطق فازی برای مصارف مختلف شرب و کشاورزی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل استنتاج فازی، ابزاری مناسب جهت ارزیابی کیفیت آب قنات به شمار می‌رود. حسن‌علیپور و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی اثرات توسعه شهر اردبیل را بر کیفیت آب سطحی و زیرزمینی دشت اردبیل مورد ارزیابی قرار دادند و اظهار داشتند که در بخش‌های شمال، شمال‌شرق و شرق به طرف مرکز، جنوب و جنوب‌شرقی غلظت پارامترهای کیفیت آب افزایش یافته و علت آن را ناشی از کاهش کیفیت آب در اثر توسعه شهری عنوان نمودند. در تحقیقی که توسط ایمانی و جعفرزاده (۱۴۰۲) انجام شد، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد که تقریباً ۳۶ درصد آب زیرزمینی دشت از کیفیت مطلوب برای مصارف شرب برخوردار بوده و عموماً این مناطق در بخش مرکزی دشت واقع شده است و ۴۶ درصد منطقه، که عموماً در نواحی شمال و شمال شرقی دشت قرار دارند، از کیفیت مناسبی برای شرب برخوردار نمی‌باشند. ملکیان و میردشتوان (۱۳۹۲) با استفاده از داده‌های کیفی برداشت شده از ۴۱ حلقه چاه پیرومتری دشت هشتگرد، و به کمک روش‌های زمین‌آمار کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله، پارامترهای نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی را برای تعیین کیفیت آب آبیاری به روش ویلکاکس درون‌یابی کردند. نتایج نشان داد، ۹۹ درصد سطح آبخوان در رده خوب $C2S1$ و یک درصد از سطح آبخوان در رده متوسط $C3S1$ قرار دارد. شیروانی و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از اطلاعات ۱۰ ساله کیفی آب‌های زیرزمینی دشت صحرای باغ استان فارس، علاوه بر بررسی شاخص خوردگی و شاخص رسوبگذاری آب منطقه با استفاده از یون‌های Ca , Mg , Na , K , HCO_3 و دیگر شاخص‌های وابسته مانند TH , TDS و SAR کیفیت آب زیرزمینی این دشت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها براساس شاخص لانژیر نشان داد، آب‌های زیرزمینی این منطقه دارای پتانسیل متوسط

رسوبگذاری بوده و از نظر شاخص RSI از پتانسیل کم خوردگی برخوردارند. اسلامی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه ای، منابع آب زیرزمینی دشت کرمان را با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد که بخش اعظم دشت از نظر کیفیت آب برای مصارف شرب نامناسب بوده و نیاز به تصفیه دارد. در مطالعه دیگری حمیدیان و همکاران (۱۳۹۶)، کیفیت آب زیرزمینی استان بوشهر را با استفاده از شاخص جهانی کیفیت آب (WQI) مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد، روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در استان منفی بوده و کیفیت آب زیرزمینی منطقه به مرور زمان کاهش داشته است. بهرامی نسب و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از آنالیزهای ۱۶ ایستگاه در دشت رشکان از توابع تبریز، با استفاده از شاخص‌های Na^+ , EC, SAR, K، کیفیت آب زیرزمینی منطقه را بررسی نمودند و نتایج این تحقیق بیانگر عدم محدودیت از نظر SAR و محدودیت جدی از نظر شوری برای پهنه وسیعی از دشت بود. در تحقیق دیگری از آنالیز شیمیایی ۱۲ حلقه چاه واقع در دشت سیدان- فاروق از توابع مرودشت شیراز برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شد [۱۶]. در این مطالعه، از نرم‌افزار RockWare AqQA برای تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی استفاده شد و همچنین پارامترهای SAR و خطر شوری برای طبقه بندی آب استفاده گردید. نتایج نشان داد استفاده از روش های مبتنی بر داده های مکانی، برای پهنه بندی کیفیت آب از دقت مناسب و بالایی برخوردار است. بانژاد و محبزه (۱۳۹۰)، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده کیفی آب ۴۹ چاه دشت رزن قهاوند، شامل هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، Ph، کلراید، سدیم و نسبت جذب سدیم و پهنه‌بندی کیفی پارامترهای ذکر شده در بررسی کیفیت آب زیرزمینی برای کشاورزی استفاده کردند. در پهنه‌بندی ارائه شده توسط آن‌ها، این دشت به سه ناحیه با کیفیت خوب، متوسط و ضعیف تقسیم بندی شد. شاخص‌های کیفیت آب (WQI) به‌عنوان ابزارهای تلفیقی، امکان تبدیل مجموعه‌ای از پارامترهای شیمیایی به یک معیار واحد برای ارزیابی کیفیت آب را فراهم می‌کنند. این شاخص‌ها در بسیاری از مطالعات هیدروژئوشیمیایی برای تحلیل وضعیت منابع آب زیرزمینی به کار رفته‌اند. استفاده از روش‌های زمین‌آماري نیز امکان بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب و شناسایی مناطق بحرانی را فراهم می‌سازد. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به وضعیت کیفی آب زیرزمینی در مقیاس دشت ارائه دهد. با توجه به مطالب بیان شده و از آنجا که بررسی و پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی از اهمیت بالایی در اقتصاد و سلامت مناطق برخوردار است. در این تحقیق، کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مشگین شهر در شمال غربی شهرستان اردبیل، با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و شاخص WQI برای تخمین دقیق و نقطه به نقطه شاخص کیفیت آب در سطح دشت، از نظر مصارف شرب مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه

محدوده مورد مطالعه به وسعت ۱۷۰۵ کیلومتر مربع بخشی از اراضی دشت مشگین در شهرستان مشگین شهر، در حدود ۹۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان اردبیل قرار گرفته است. راه دسترسی اراضی از طریق جاده اردبیل- مشگین شهر می‌باشد. ارتفاع اراضی ۳۵۷ تا ۲۵۴۱ متر از سطح دریا متغیر است. این منطقه با متوسط بارندگی سالانه ۴۸۴/۶ میلیمتر و دمای متوسط سالانه ۱۰ درجه سانتیگراد طبق روش آمبرژه، اقلیم نیمه مرطوب معتدل و طبق روش دومارتن اقلیم نیمه خشک دارد. در این مطالعه کیفیت آب ۴۲ نمونه آب زیرزمینی دشت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) نمای دشت مذکور و نقاط نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت دشت در استان اردبیل و چاه‌های مطالعاتی

Fig. 1. Location of the plain in Ardabil province and study wells

۲-۲- تئوری زمین آمار

روش میانابایی زمین آمار دارای خصوصیتی است، که سبب استفاده روز افزون از این روش در برآوردها شده است. به طور مثال، در روش‌های تخمین کلاسیک، موقعیت مکانی داده‌ها و جهت آن، در برآورد مقادیر متغیر تصادفی در منطقه مد نظر نبوده و ضریب داده‌ها برای تخمین به جهت و مکان آن داده‌ها وابسته نمی‌باشد ولی در زمین‌آمار این دو فاکتور مورد توجه قرار می‌گیرد. از دیگر خصوصیات زمین‌آمار آنست که مقدار خطای تخمین را محاسبه نموده و همچنین قادر است مقدار خطای نمونه برداری و آماده‌سازی داده‌ها را محاسبه نماید. مهم‌ترین مفاهیم زمین‌آمار شامل متغیر ناحیه‌ای^۱، نیم تغییر نما^۲، واریانس تخمین^۳ و روش تخمین می‌باشد [۱۸]. در واقع متغیر ناحیه‌ای به آن دسته از متغیرهای تصادفی گفته می‌شود که مقدار آن در هر مکان مستقل از مختصات آن نقطه بوده و تفاضل مقدار متغیر تصادفی در دو نقطه مختلف بستگی به فاصله آن دو نقطه دارد. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه جزمی و تصادفی تجزیه کرد بنابراین می‌توان نوشت [۱۸]:

$$Z(x) = m(x) + y(x) \quad (1)$$

در رابطه فوق، $Z(x)$: مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای با مختصات (x) ، $m(x)$: مؤلفه جزمی متغیر ناحیه‌ای و $y(x)$: مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه‌ای می‌باشد.

نیم تغییر نما همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده را با توجه به فاصله و جهت آن‌ها نشان می‌دهد. مقدار نیم تغییر نما به شرح زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق، $n(h)$: تعداد جفت نمونه‌های به کار رفته در محاسبات به ازای هر فاصله h است، بنابراین تعداد جفت‌ها تابع h است که معمولاً با افزایش h تعداد جفت‌ها کم می‌شود و $Z(x)$ و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در دو نقطه به مختصات (x) و $(x+h)$ است که به فاصله h از هم قرار دارند.

واریانس تخمین که با نماد $\sigma^2 E$ نشان داده می‌شود، نشانگر واریانس خطای بین مقدار حقیقی و مقدار تخمینی یک متغیر است. توانایی محاسبه واریانس تخمین، یکی از مهم‌ترین نقاط قوت زمین‌آمار است. با داشتن میانگین و واریانس خطای تخمین می‌توان حدود اطمینان یک تخمین را محاسبه کرد. کریجینگ یک روش تخمین زمین‌آمار است که با استفاده از مقادیر معلوم و یک تغییر نما، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. این روش بر منطق میانگین متحرک وزن دار استوار می‌باشد و می‌توان گفت که بهترین تخمینگر خطی نا اریب است [۱۹]. رابطه کلی تخمین کریجینگ بصورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x) \quad (3)$$

در رابطه فوق، $Z(x_1)$: مقدار مشاهده شده Z در نقطه λ_1 : وزن یا اهمیت نسبت داده شده به مقدار Z در نقطه و $Z^*(x)$: مقدار تخمین زده شده Z در نقطه x می‌باشد.

۲-۳- شاخص کیفی آب (WQI)

شاخص کیفی شاخص کیفی آب (WQI) به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت آبهای زیرزمینی برای اهداف شرب در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود. مقدار WQI بر اساس تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. وزن‌های هر پارامتر براساس تأثیر آن بر کیفیت آب به آن اختصاص داده می‌شود. شاخص کیفی آب با استفاده از روش پیشنهادشده توسط دردور و

1-Regionalized variable
2-Semivariogram
3-Estimation variance

همکاران (۲۰۲۱)، به این صورت محاسبه می شود که در مرحله اول، وزن W_i را برای هر یک از دوازده پارامتر فیزیکوشیمیایی، با توجه به اهمیت نسبی آن در کیفیت کلی آب برای اهداف آشامیدنی اختصاص داده میشود. پارامترها و مقادیر اوزان آنها در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که در جدول مشخص است، به نیترات، نیتريت و کل املاح محلول، حداکثر وزن ۵ داده شده است و وزن واحد به منیزیم اختصاص داده شده است، زیرا به ندرت نقش مهمی در کیفیت آب زیرزمینی ایفا می کند. به همین ترتیب، وزن های بین ۱ تا ۵ به سایر پارامترها اختصاص داده شده است. در مرحله دوم، وزن نسبی از رابطه زیر برای پارامترها، محاسبه می شود.

$$W_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (4)$$

که در این رابطه: W_i وزن هر پارامتر، W_i وزن نسبی و n تعداد پارامترهاست.

در مرحله سوم، یک مقیاس رتبه بندی کیفیت (q_i) برای هر پارامتر با استفاده از رابطه زیر اختصاص داده میشود.

$$q_i = \frac{C_i - C_{ip}}{S_i - C_{ip}} \times 100 \quad (5)$$

که در این رابطه: q_i رتبه کیفی است. C_i غلظت پارامتر شیمیایی هر نمونه آب (mg/L)، S_i : استاندارد آب آشامیدنی برای هر پارامتر شیمیایی (mg/L) و C_{ip} : مقدار ایده آل هر پارامتر شیمیایی در آب خالص که برای تمام پارامترها صفر در نظر گرفته میشود به جز pH که مقدار آن برابر ۷ است. در نهایت شاخص کیفی آب (WQI)، از رابطه زیر محاسبه می گردد. که با در نظر گرفتن حدود جدول (۲)، کیفیت آب از لحاظ شرب طبقه بندی می شود.

$$WQI = \sum_{i=1}^N q_i \times W_i \quad (6)$$

جدول ۱. وزن و اوزان نسبی شاخص های کیفی آب در روش WQI [۲۱].

Table 1. Weights and relative weights of water quality indicators in the WQI method [21].

وزن نسبی	وزن	واحد	پارامتر شیمیایی
RW_i	W_i		
۰/۰۹	۴	-	pH
۰/۱۳	۴	$\mu\text{S/cm}$	EC
۰/۱۱	۵	mg/L	TDS
۰/۱۱	۲	mg/L	TH
۰/۰۸	۲	mg/L	Ca^{2+}
۰/۰۸	۱	mg/L	Mg^{2+}
۰/۰۸	۳	mg/L	Na^+
۰/۱	۳	mg/L	Cl^-
۰/۰۶	۴	mg/L	SO_4^{2-}
۰/۱	۳	mg/L	HCO_3
۰/۰۶	۲	mg/L	K^+
۱	۳۴	-	مجموع

جدول ۲. طبقه بندی کیفیت آب در روش WQI [۲۲].

Table 2. Water quality classification in the WQI method [22].

محدوده شاخص	کمتر از ۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۳۰۰	بیشتر از ۳۰۰
وضعیت آب	عالی	خوب	ضعیف	بسیار ضعیف	نامناسب

برای ارزیابی روش کریجینگ، از آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ε)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تبیین (R^2)، و بهره‌وری مدل (EF) استفاده می‌گردد. بهترین پیش‌بینی‌ها زمانی رخ می‌دهد که آماره‌های ME، RMSE، ε و MAE به صفر و EF و R^2 به یک میل نمایند. روابط (۷) الی (۱۱) معادلات آماره‌های مذکور را نشان می‌دهند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (10)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (11)$$

در روابط فوق، N: تعداد نمونه، P_i : مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_i : مقادیر واقعی، $\bar{P}$: میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، $\bar{Q}$: میانگین مقادیر واقعی می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

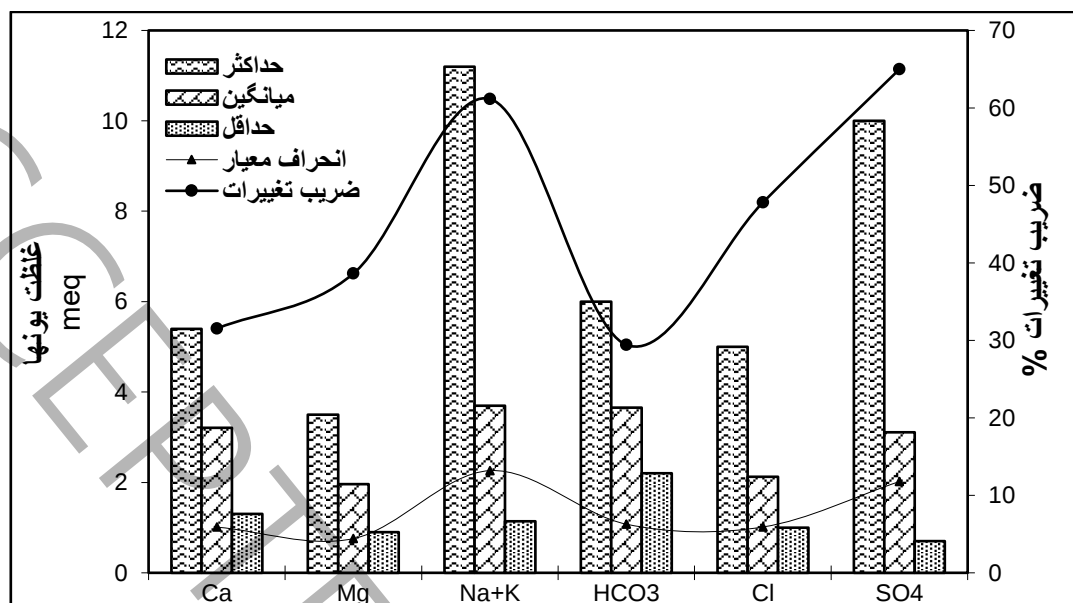
۳-۱- بررسی آماری نتایج کیفیت نمونه‌های آب زیرزمینی

در جدول ۳ نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب، از لحاظ آماری ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی نمونه آب چاه‌ها به ترتیب برابر با ۴۱۷ و ۲۱۴۰ میکروموس بر سانتیمتر می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، کیفیت آب در دشت مشکین به علت آبخوایی اراضی کشاورزی و نفوذ به آب زیرزمینی مناسب نمی‌باشد. در شکل ۲، نمودار نمایه‌های آماری نمونه‌های آب زیرزمینی ارائه شده است. با توجه به این شکل، یون‌های سولفات، سدیم و پتاسیم تغییرات زیادی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

جدول ۳. مشخصه‌های آماری مؤلفه‌های مختلف شیمیایی.

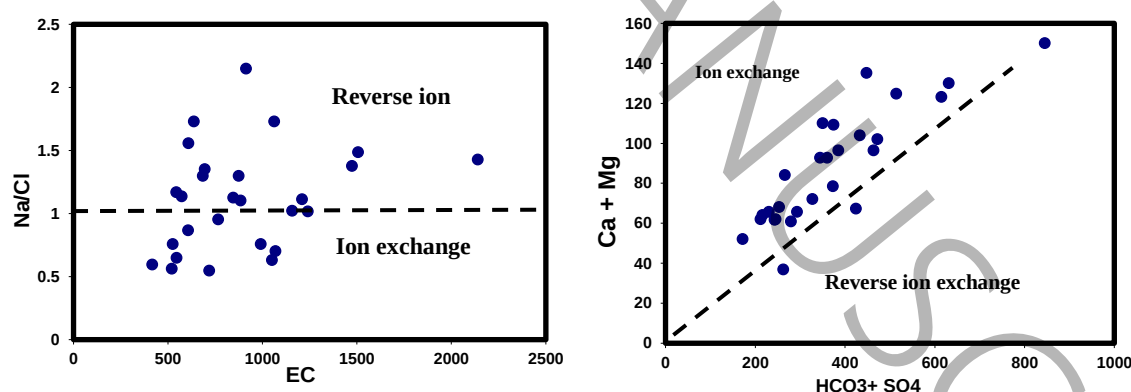
Table 3. Statistical characteristics of various chemical components.

SO ₄ (meq/L)	Cl (meq/L)	CO ₃ (meq/L)	HCO ₃ (meq/L)	K (meq/L)	Na (meq/L)	Mg (meq/L)	Ca (meq/L)	PH	T.D.S (mg/L)	EC (μS/cm)	پارامتر
۳/۱۱	۲/۱۲	۰/۱۹	۰/۶۶	۰/۰۹	۳/۶۱	۱/۹۶	۳/۲۱	۷	۶۲۲	۸۶۷	میانگین حسابی
۲/۰۲	۱/۰۱	۰/۶۷	۱/۰۸	۰/۰۷	۲/۲۲	۰/۷۶	۱/۰۱	۰/۴۷	۲۶۵	۳۸۵	انحراف معیار
۶۴/۹	۴۷/۶	۳۵۲	۲۹/۵	۷۷/۷	۶۱/۵	۳۸/۷	۳۱/۴	۶/۶	۴۲/۶	۴۲/۸	ضریب تغییرات (درصد)
۱۰	۵	۲/۵	۶	۰/۲	۱۱	۳/۵	۵/۴	۸	۱۴۶۰	۲۱۴۰	حداکثر
۰/۷	۱	۰	۲/۲	۰	۱/۱	۰/۹	۱/۳	۵/۸	۲۹۱	۴۱۷	حداقل
۴	۱/۵	۰	۳	۰/۱	۴	۲	۲/۵	۶/۹	۷۲۰	مد ندارد	مد
۲/۷	۱/۶	۰	۳/۵	۰/۱	۳	۱/۹	۳	۷	۵۹۱	۸۴۵	میان
۹/۳	۴	۲/۵	۳/۸	۰/۲	۹/۹	۲/۶	۴/۱	۰/۲	۱۱۶۸	۱۷۲۳	دامنه تغییرات
۱/۷	۱/۰۷	۳/۴۵	۰/۶	۰/۳۳	۱/۶۵	۰/۵۹	۰/۳۵	-۰/۵۵	۱/۴	۱/۴۵	چولگی
۴/۰۸	۱/۰۳	۰/۴۵	۱/۶۱	۰	۴/۹۵	۰/۵۷	۱/۰۲	۰/۲۲	۷۰۶۷۳	۱۴۸۵۱۳	واریانس



شکل ۲. نمایه‌های آماری نمونه‌های آب زیرزمینی دشت مشگین.
Fig. 2. Statistical profiles of groundwater samples from the Meshgin Plain

برای تعیین فرایندهای تبادل یونی و تبادل یونی معکوس در سفره آبدار دشت مشگین دو نمودار ترکیبی با استفاده از توابع بین متشکله‌های شیمیایی متأثر از فرایند تبادل یونی تهیه گردید. در شکل ۳ نمودار دو متغیره $Ca+Mg$ در مقابل HCO_3+SO_4 نمایش داده شده است. خط ۱:۱ نشان دهنده فرایندهای انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس می‌باشد. بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی در اطراف خط ۱:۱ قرار نگرفته‌اند، این امر نشان دهنده عدم انحلال کانی ژپس در دشت می‌باشد. همچنین در شکل ۳ نمودار دو متغیره Na / Cl در مقابل EC برای نمونه‌های آب زیرزمینی ارائه گردیده است. نمونه‌هایی که در بالای خط $Na / Cl = 1$ واقع شده‌اند، منشاء دوگانه دارند. با توجه به این نمودار، در همه نمونه‌های آب زیرزمینی رخداد فرایند تبادل یونی مشاهده می‌شود.



شکل ۳. نمودارهای دو متغیره یون‌های مرتبط با تبادل یونی.
Fig. 3. Bivariate diagrams of ions related to ion exchange.

نتایج طبقه‌بندی هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی در تعدادی از چاه‌های منطقه نشان داد که رخساره‌های غالب منطقه شامل تیپ‌های بی‌کربناته - کلسیک و بی‌کربناته - سدیک هستند (جدول ۴). در بیشتر نمونه‌ها، یون بی‌کربنات به عنوان آنیون غالب مشاهده شد که بیانگر تأثیر فرایند هوازدگی و انحلال کانی‌های کربناته در تغذیه آبخوان است. در مقابل، در تعدادی از نقاط نظیر فخرآباد، دده‌بیگل، چپقان، جلایر، آق‌درق و جبدرق، رخساره سولفات مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده نقش انحلال کانی‌های سولفات نظیر ژپس و انیدریت در ترکیب شیمیایی آب باشد. غلبه یون‌های کلسیم و سدیم در بین کاتیون‌ها نیز بیانگر مراحل مختلف تکامل شیمیایی آب

زیرزمینی و وقوع فرآیندهای تبادل یونی در بخش‌هایی از آبخوان است. بررسی تیپ و رخساره آب نشان داد که اکثر نمونه‌ها در محدوده توسعه انتقالی قرار دارند که بیانگر تغییر تدریجی کیفیت شیمیایی آب در مسیر جریان زیرزمینی است. همچنین حضور همزمان رخساره‌های کلسیک و سدیک نشان‌دهنده ناهمگنی شرایط زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی در سطح دشت است. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که فرآیندهای انحلال سنگ‌های کربناته و تبخیری، همراه با تبادل یونی، از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه محسوب می‌شوند [۲۴]، [۲۵].

جدول ۴. تیپ و رخساره نمونه‌های آب زیرزمینی.

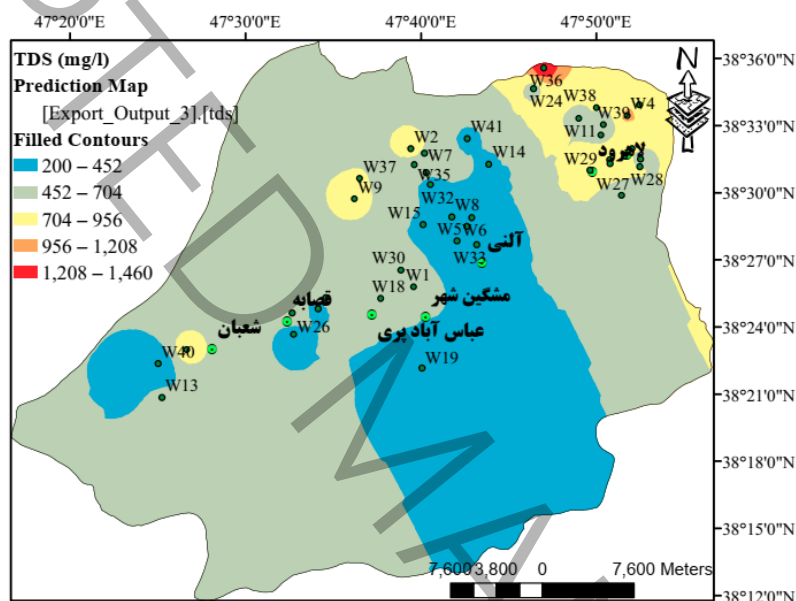
Table 4. Type and facies of groundwater samples.

محل نمونه‌برداری	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	نحوه توسعه
انار	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
دره بیگلر	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
زیرزمین	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
سولاخو	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
سواره	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
عربلو	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
فخرآباد	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
قورت تپه	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
قره درویش	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
اهالی قریه لحاق	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
میرکندی	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
احمدبیگلر	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
گلر	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
دده بیگلر	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
مرغداری کریمی	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
لاهرود	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
نصیرآباد	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
چپقان	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
جلایر	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
آلنی	$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه انتقالی
پورتقی	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
آلنی کارخانه کبریت	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
آق درق	$\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	سولفاته	کلسیک	سولفاته کلسیک	توسعه انتقالی
بیجق	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$	بی کربناته	کلسیک	بی کربناته کلسیک	توسعه مخلوط
جیدرق	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	سولفاته	سدیک	سولفاته سدیک	توسعه انتقالی
دوشانلو	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	$\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی

۲-۳- نقشه‌های هم‌ارزش پارامترهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی

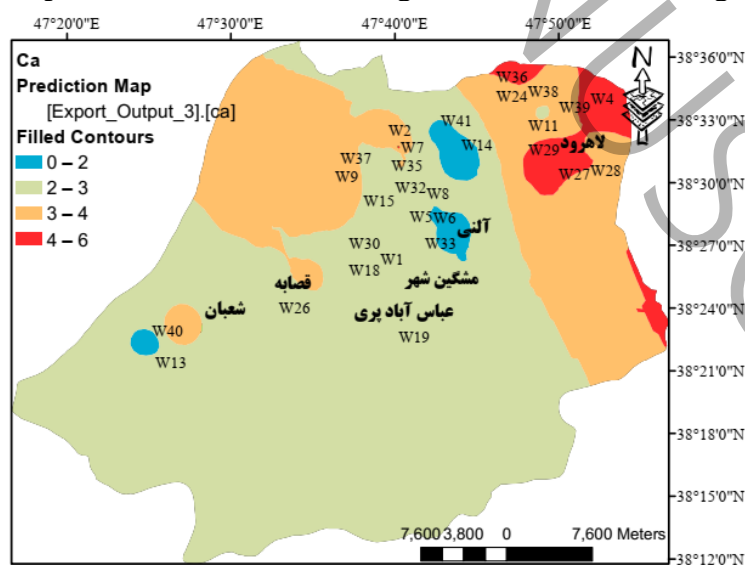
در این بخش جهت بررسی توزیع مکانی متشکله‌های شیمیایی آب زیرزمینی دشت مشگین اقدام به تهیه نقشه‌های هم‌میزان پارامترهای مختلف گردید و نقشه‌های هم‌ارزش مجموع املاح و یون‌های اصلی با استفاده از نتایج آنالیز نمونه‌برداری تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. در اشکال ۴ تا ۸، تعدادی از منحنی‌های هم‌ارزش پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت آب را بر اساس شاخص WQI نشان داده شده است. منحنی‌های هم‌ارزش مجموع املاح محلول در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مقدار املاح آب زیرزمینی از سمت جنوب به سمت شمال شرق دشت افزایش می‌یابد. در شکل ۵ نقشه هم‌مقدار یون کلسیم نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داده شده است. با توجه به این شکل غلظت کلسیم از بخش شمالی به سمت جنوب و غرب دشت کاهش می‌یابد. علت این موضوع

انحلال بیشتر کانی‌های حاوی کلسیم مانند ژئپس در مسیر جریان آب زیرزمینی است. همچنین نقشه هم مقدار منیزیم دشت مشگین در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار منیزیم در بخش شمال شرقی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. مقدار منیزیم در این بخش بین ۲/۵ تا ۳/۵ (میلی‌اکی‌والان گرم در لیتر) است. بطور کلی منیزیم از سمت جنوب و مرکز به سمت شمال و شمال شرق دشت افزایش می‌یابد، این مناطق در محدوده بخش لاهرود قرار دارد. در شکل ۷، نقشه هم مقدار سدیم نشان داده شده است، همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار سدیم از سمت جنوب به سمت شمال دشت افزایش می‌یابد. در شکل ۸، نقشه هم ارزش یون سولفات نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، مقدار سولفات به سمت شمال شرقی در منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه رسوبات آبرفتی نیز دارای کانی ژئپس می‌باشند، بنابراین افزایش غلظت سولفات در این نواحی نسبت به بقیه مناطق دشت پذیرفتنی است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود حداکثر غلظت سولفات در شمال شرقی در محدوده ۸ تا ۱۰ (میلی‌اکی‌والان گرم در لیتر) است.



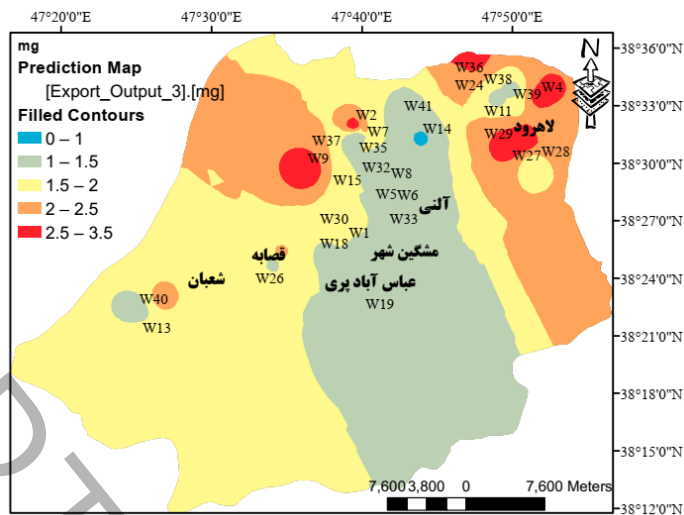
شکل ۴. نقشه هم ارزش مجموع املاح آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 4. Map of the total solute value of groundwater in the Meshgin Plain.



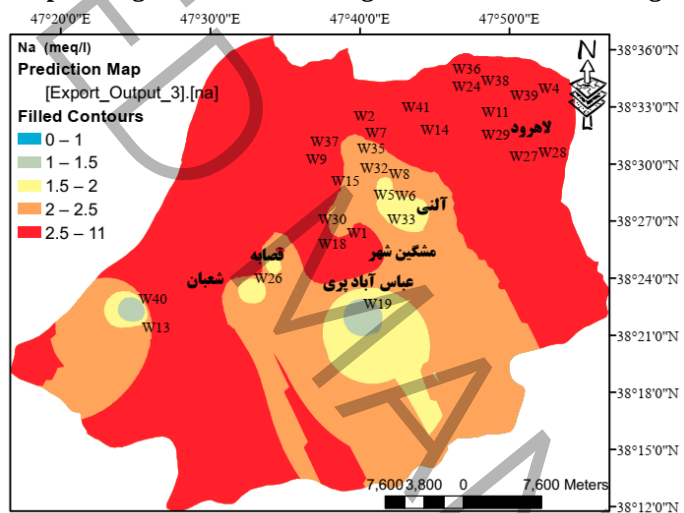
شکل ۵. نقشه هم ارزش کلسیم آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 5. Calcium isovalue map of groundwater in the Meshgin Plain.



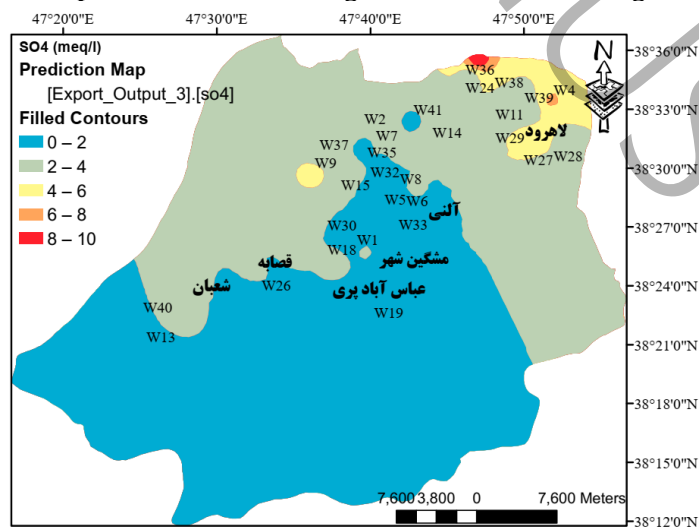
شکل ۶. نقشه هم ارزش منیزیم آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 6. Map of magnesium isovalue of groundwater in the Meshgin Plain.



شکل ۷. نقشه هم ارزش سدیم آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 7. Map of sodium isovalue of groundwater in the Meshgin Plain.

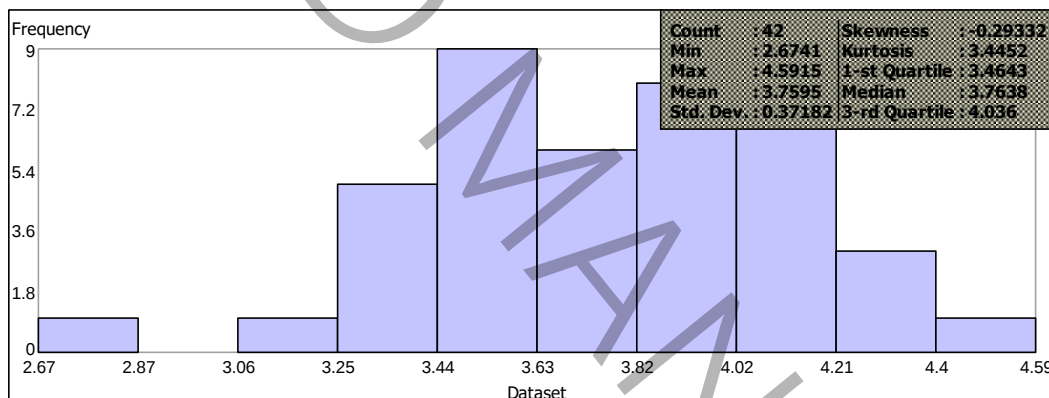


شکل ۸. نقشه هم ارزش سولفات آب زیرزمینی دشت مشگین.

Fig. 8. Map of sulfate isovalues of groundwater in the Meshgin Plain.

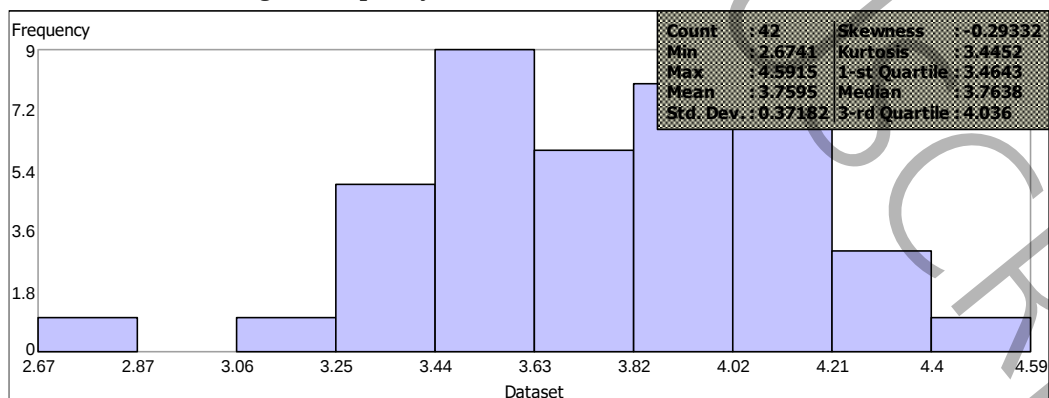
۳-۳- ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص WQI و روش زمین آمار

پس از اعمال ضرایب وزنی پارامترهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی به روش WQI در نقشه های هم ارزش و روی هم قرارگیری نقشه های مذکور و تعیین شاخص WQI در منطقه، از آنجا که جهت برآورد شاخص WQI به روش کوکریجینگ نیاز به داده های با توزیع نرمال می باشد، نخست منحنی فراوانی داده های شاخص WQI و هدایت الکتریکی به عنوان متغیر کمکی، در سطح منطقه محاسبه شد، از آنجا که توزیع نرمال داده ها، می بایست دارای چولگی صفر و کشفیدگی ۳ باشد، به منظور بررسی پیش فرض نرمال بودن داده ها، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی انجام شد. نتایج نشان داد که هر دو متغیر در سطح احتمال ۵ درصد از توزیع نرمال قابل قبولی برخوردار هستند ($P>0.05$). با این وجود، به منظور کاهش اثر چولگی مثبت و بهبود پایداری مدل واریوگرام، تبدیل لگاریتمی نیز مورد بررسی قرار گرفت که موجب نزدیک تر شدن توزیع داده ها به حالت نرمال گردید. به منظور بررسی نرمال بودن داده های شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نتایج جدول ۵ نشان داد که هر دو متغیر قبل و بعد از تبدیل لگاریتمی دارای توزیع نرمال قابل قبول هستند. با این وجود، به منظور کاهش میزان چولگی و بهبود پایداری مدل های زمین آماری، تبدیل لگاریتمی داده ها نیز مورد استفاده قرار گرفت. برای این کار از روش های تبدیل توزیع غیر نرمال به نرمال در نرم افزار Gis10.4 و افزونه تحلیل زمین آماری^۱ استفاده شد لذا با استفاده از روش لوگ نرمال، توزیع داده ها به توزیع نرمال نزدیک شد (اشکال ۹ و ۱۰). سپس با دادن مختصات UTM نقاط به نرم افزار وجود یا عدم وجود روند در داده ها بررسی گردید که وجود روند در داده ها در جهات X و Y مشاهده گردید، لذا از آنجا که در تخمین به روش کوکریجینگ می بایست روند را از داده ها حذف نمود، لذا در مرحله بعد روند داده ها حذف گردید (اشکال ۱۱ و ۱۲).



شکل ۹. نمودار فراوانی شاخص WQI تبدیل شده.

Fig. 9. Frequency chart of the converted WQI index.



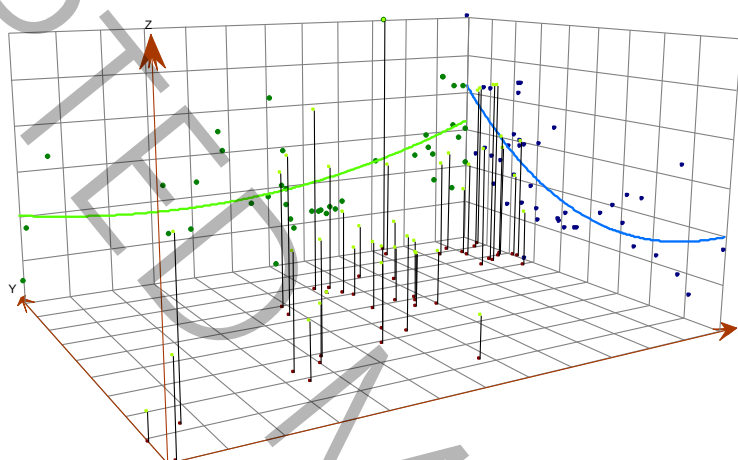
شکل ۱۰. نمودار فراوانی متغیر کمکی هدایت الکتریکی تبدیل شده.

Fig. 10. Frequency plot of the transformed electrical conductivity auxiliary variable.

جدول ۵. نتایج آزمون کولموگروو-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌های WQI و هدایت الکتریکی قبل و بعد از تبدیل لگاریتمی.

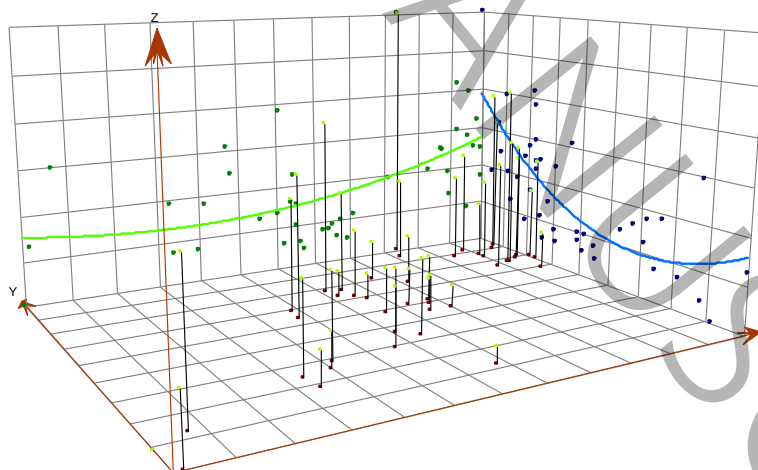
Table 5. Results of the Kolmogorov-Smirnov test to check the normality of WQI and electrical conductivity data before and after logarithmic transformation.

متغیر	وضعیت داده	تعداد نمونه	آماره K-S	مقدار P	نتیجه
(EC)	قبل از تبدیل	۴۲	۰/۱۰۶	۰/۶۸۹	نرمال
	بعد از تبدیل لگاریتمی		۰/۰۷۹	۰/۹۳۴	نرمال
(WQI)	قبل از تبدیل	۴۲	۰/۱۱۲	۰/۶۲۸	نرمال
	بعد از تبدیل لگاریتمی		۰/۰۹۸	۰/۷۸	نرمال



شکل ۱۱. وجود روند در راستای محورهای x,y برای شاخص WQI.

Fig. 11. The existence of a trend along the x,y axes for the WQI index.



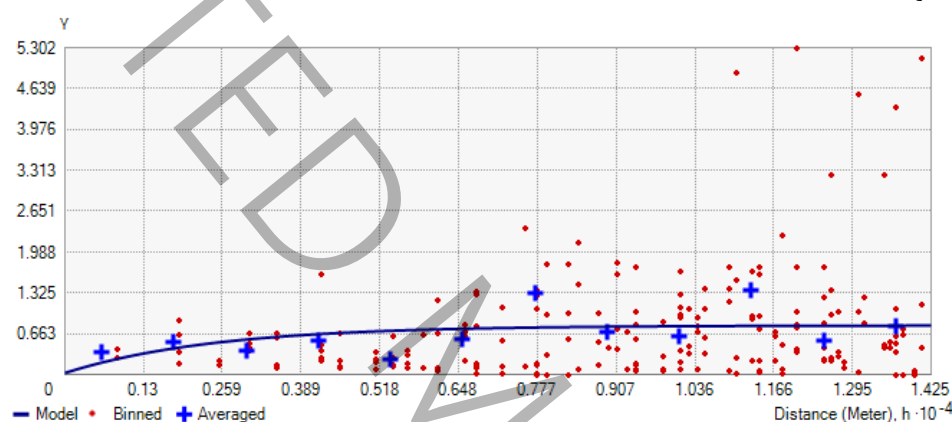
شکل ۱۲. وجود روند در راستای محورهای x,y برای شاخص کمکی هدایت الکتریکی.

Fig. 12. The existence of a trend along the x,y axes for the auxiliary index of electrical conductivity.

سپس بهترین واریوگرام این شاخص که دارای کمترین اثر قطعه ای بود انتخاب گردید، برای برآورد شاخص WQI نیز پس از نرمال‌سازی و حذف روند داده‌ها، نیم‌تغیرنا منطقه تعیین گردید این واریوگرام از مدل نمایی^۱ با میزان اثر قطعه‌ای^۲ (۰/۰۲) برای

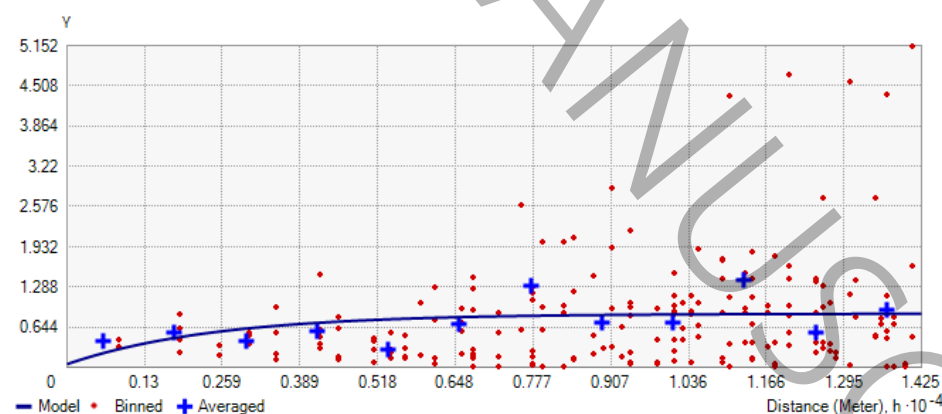
1-Exponential
2- Nugget

شاخص WQI و (۰/۰۵) برای متغیر کمی هدایت الکتریکی و سقف واریوگرام^۱ (۰/۷۷) برای متغیر WQI، و (۰/۸) برای متغیر کمی هدایت الکتریکی، به دست آمد. با توجه به این اعداد، از آنجا که نسبت اثر قطعه‌ای به سقف واریوگرام در هر دو متغیر، بسیار کوچکتر از ۰/۵ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که نقش مؤلفه ساختاردار واریوگرام بیش از نقش مؤلفه بی ساختار آن است و این نشان‌دهنده استحکام ساختار فضایی منطقه می‌باشد. در اشکال ۱۳ و ۱۴ سمی واریوگرام شاخص WQI و متغیر کمی هدایت الکتریکی نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار فضایی کیفیت آب در منطقه از پایداری مناسبی برخوردار بوده و تغییرات مکانی WQI به صورت تصادفی و بدون الگوی مشخص رخ نمی‌دهد. وجود ساختار مکانی قوی در داده‌ها بیانگر این است که عوامل زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی نقش اصلی را در کنترل پراکنش فضایی کیفیت آب ایفا می‌کنند. در نتیجه، اعمال روش‌های زمین‌آماري برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات مکانی WQI در این دشت از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است. این موضوع دقت نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب را افزایش داده و امکان مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌سازد. با وجود مناسب بودن تعداد جفت داده‌ها برای تحلیل نیم‌تغیرنما، افزایش تعداد نقاط نمونه‌برداری در مطالعات آتی می‌تواند موجب بهبود پایداری واریوگرام و کاهش عدم قطعیت تخمین‌های مکانی شود.



شکل ۱۳. سمی واریوگرام بدست آمده در روش کریجینگ ساده برای متغیر WQI.

Fig. 13. Semivariogram obtained in the simple kriging method for the WQI variable.



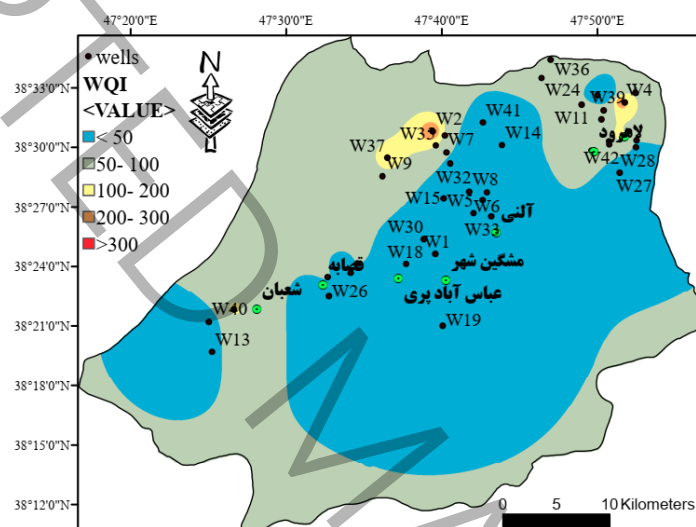
شکل ۱۴. سمی واریوگرام بدست آمده در روش کریجینگ ساده برای متغیر کمی هدایت الکتریکی.

Fig. 14. Semivariogram obtained in the simple kriging method for the auxiliary variable of electrical conductivity.

در نهایت برآورد داده‌ها جهت تعیین بهترین نوع کریجینگ، به روش‌های مختلف کوکریجینگ ساده^۲، کوکریجینگ معمولی^۳ و کوکریجینگ عمومی^۴ صورت گرفت و با توجه به نتایج دقیق‌تر کوکریجینگ ساده، این مدل برای تخمین استفاده شد، در

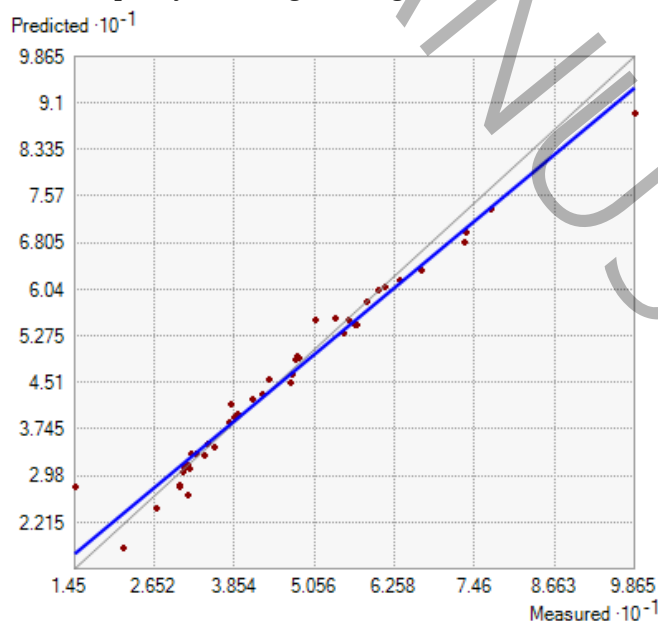
- 1-Sill
- 2- Simple Co-kriging
- 3-Ordinary Co-kriging
- 4- Universal Co-kriging

شکل ۱۵ پراکنش شاخص WQI با استفاده از روش کوکریجینگ ساده در سطح منطقه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۶ روش اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی تخمین شاخص WQI ارائه شده است. همانطور که در تصویر مشخص است، نشان می دهد که مدل کوکریجینگ ساده از قابلیت خوب و دقت بالایی در پیش بینی شاخص WQI برخوردار است، که با نتایج کاستلینی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد، ایشان در مطالعه ای نشان داد با محاسبه نسبت آستانه به هر قطعه ای بیش از ۶۰ درصد، که نشان دهنده ساختار فضایی قوی متغیر ناحیه ای در منطقه است، می توان برآوردهای دقیقی از متغیر ناحیه ای ارائه داد در تحقیق حاضر نیز به دلیل آنکه اثر قطعه ای برای دو متغیر ناحیه ای مقدار نزدیک به صفر محاسبه گردید، برآوردهای دقیقی از متغیرهای ناحیه ای انجام شد. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، وجود منطقه ای با کیفیت آب زیرزمینی "عالی" برای شرب در قسمت مرکزی دشت در قسمت مشگین شهر و عباس آباد پری و همچنین غرب دشت، در ناحیه قصابه مشاهده می شود، در سایر مناطق دشت، کیفیت آب زیرزمینی از نظر شاخص WQI غالباً "خوب" طبقه بندی شده است.



شکل ۱۵. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص WQI و روش کوکریجینگ ساده.

Fig. 15. Assessment of groundwater quality in the region using the WQI index and the simple co-kriging method.



شکل ۱۶. روش اعتبارسنجی متقابل جهت ارزیابی روش کوکریجینگ ساده.

Fig. 16. Cross-validation method for evaluating the simple co-kriging method.

جدول ۶، طبقه بندی مساحت دشت را بر اساس شاخص کیفیت WQI را نشان می دهد و جدول ۷ نیز شاخص های کمی ارزیابی مدل را بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، درصد خطای نسبی (ϵ)، ضریب تعیین (R^2) و بازده مدل (EF) نشان می دهد. همانطور که در جدول ۷ به وضوح نشان داده شده است، روش های مبتنی بر زمین آمار و مدل کوکریجینگ ساده، با مقدار ضریب تبیین ۰/۸۵ و مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۳/۲۷ دارای برازش و برآورد دقیقی از متغیر تصادفی شاخص WQI می باشد. این دقت برآورد از مطالعات انجام شده توسط اقیار و همکاران (۲۰۰۷) با مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۰/۴ و ضریب تبیین برابر ۰/۶ بیش تر است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر فرآیندهای هوازدگی سنگ ها، انحلال کانی ها و تبادل یونی قرار دارد که با نتایج مطالعات اخیر در آبخوان های مختلف جهان همخوانی دارد [۲۵]. بطور کلی می توان گفت ارزیابی به روش کریجینگ نشان می دهد، شاخص WQI در سطح منطقه عموماً در سطح ۱۰۰-۰ بوده و از نظر شاخص WQI مناسب برای مقاصد شرب طبقه بندی می شود. نتایج نشان می دهد، تغییرات مکانی شاخص WQI در منطقه مورد مطالعه، ارتباط نزدیکی با شرایط هیدروژئولوژیکی دارد. جهت جریان آب زیرزمینی نقش مهمی در انتقال املاح و شکل گیری الگوهای مکانی کیفیت آب ایفا می کند. همچنین تنوع لیتولوژی سازندهای زمین شناسی موجب تفاوت در میزان انحلال و آزاد سازی یون ها در آبخوان شده است. علاوه بر این، کاربری اراضی به ویژه فعالیت های کشاورزی می تواند از طریق ورود آلاینده ها و کودهای شیمیایی بر افزایش یا کاهش کیفیت آب زیرزمینی اثرگذار باشد.

نتایج این پژوهش به وضوح نشان می دهد که روش های زمین آماری، به ویژه کوکریجینگ ساده، با استفاده از متغیر کمکی هدایت الکتریکی، در مقایسه با بسیاری از مطالعات پیشین، توان بالاتری در تبیین ساختار فضایی و برآورد دقیق شاخص کیفیت آب (WQI) در مقیاس دشت دارد. مقدار بسیار کم اثر قطعه ای و نسبت ناچیز آن به سقف واریوگرام برای هر دو متغیر WQI و EC در این مطالعه، بیانگر وجود یک ساختار فضایی بسیار قوی و پیوسته است؛ به گونه ای که بخش عمده تغییرات کیفیت آب زیرزمینی ناشی از فرآیندهای ساختاری و قابل تفسیر بوده و نقش نوسانات تصادفی حداقلی است. این یافته با نتایج کاستلینی و همکاران (۲۰۱۹) که وجود ساختار فضایی قوی را عامل اصلی افزایش دقت مدل های زمین آماری معرفی کرده اند، همخوانی دارد، با این تفاوت که شدت پیوستگی مکانی در دشت مشگین در سطح بالاتری نسبت به بسیاری از مناطق گزارش شده در مطالعه ایشان قرار دارد. همچنین نسبت اثر قطعه ای به سقف واریوگرام در این تحقیق به مراتب کمتر از مقادیر گزارش شده توسط چاوهان و همکاران (۲۰۲۲) و آدی مالا و چیان (۲۰۲۱) است که نشان می دهد استفاده از متغیر کمکی مناسب نظیر هدایت الکتریکی می تواند به طور مؤثری عدم قطعیت برآورد شاخص WQI را کاهش داده و نقش مؤلفه ساختاردار را در مدل سازی فضایی تقویت کند. از نظر دقت مدل، مقدار بالای ضریب تعیین ($R^2 = 0.85$) و مقدار نسبتاً پایین RMSE (حدود ۳/۲۷) در این پژوهش، عملکرد بهتری را نسبت به اغلب مطالعات مبتنی بر کریجینگ معمولی یا WQI کلاسیک نشان می دهد؛ به طوری که در پژوهش های آدی مالا و چیان (۲۰۲۱) و یاداو و همکاران (۲۰۲۳) مقادیر R^2 معمولاً بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۸ گزارش شده است. از منظر کیفی نیز، نتایج این تحقیق نشان داد که بیش از ۹۶ درصد از سطح دشت مشگین در طبقات «عالی» و «خوب» قرار دارد، در حالی که در بسیاری از دشت های ایران و مناطق نیمه خشک جهان، سهم این طبقات کیفی به طور قابل توجهی کمتر گزارش شده است ([۱۳]، [۲۷]). این اختلاف می تواند ناشی از تفاوت در شرایط زمین شناسی، شدت بهره برداری از منابع آب زیرزمینی، الگوی جریان آبخوان و نیز میزان فعالیت های کشاورزی باشد. افزون بر این، تمرکز نواحی با کیفیت بالاتر در بخش های مرکزی و غربی دشت مشگین با کاهش تدریجی غلظت یون های محلول همخوانی دارد، در حالی که پژوهش های جدید مبتنی بر یادگیری ماشین نشان می دهند که در بسیاری از دشت های کشاورزی، فعالیت های انسانی می تواند به سرعت منجر به گسترش پهنه های با WQI نامطلوب شود [۲۸]. در سال های اخیر، ترکیب شاخص کیفیت آب (WQI) با روش های زمین آماری و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات مکانی کیفیت آب دارای الگوی منسجم بوده و به شدت تحت تأثیر شرایط زمین شناسی و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی است. مطالعات مشابه نیز نشان داده اند که روش های زمین آماری مانند کریجینگ نسبت به روش های قطعی، دقت بالاتری در پهنه بندی شاخص های کیفیت آب دارند [۲۹]. همچنین استفاده از GIS در کنار WQI امکان شناسایی مناطق بحرانی و تحلیل فضایی دقیق تر را فراهم می سازد [۳۰]. از سوی دیگر، رویکردهای ترکیبی مبتنی بر GIS و مدل های پیشرفته نشان داده اند که می توانند عدم قطعیت مکانی را کاهش داده و قابلیت اعتماد نقشه های کیفیت آب را افزایش دهند [۳۱]. علاوه بر این، مطالعات اخیر بیان کرده اند که فرآیندهای

طبیعی مانند انحلال کانی‌ها، تبادل یونی و تأثیر فعالیت‌های انسانی نقش کلیدی در کنترل کیفیت آب زیرزمینی دارند [۳۲]. در مجموع، نتایج این پژوهش بر اهمیت استفاده از رویکردهای تلفیقی WQI-GIS-Geostatistics برای مدیریت پایدار منابع آب تأکید دارد. این روش‌ها می‌توانند به عنوان ابزار تصمیم‌گیری در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرند. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه فعالیت‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد، اما تاکنون اثر آن‌ها به‌صورت گسترده موجب افت شدید کیفیت آب زیرزمینی نشده است. در مجموع، یافته‌های این پژوهش در مقایسه با مطالعات مشابه داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که تلفیق شاخص WQI به‌عنوان یک متغیر مکانی با روش کوکریجینگ ساده و استفاده هدفمند از هدایت الکتریکی به‌عنوان متغیر کمکی، نه تنها دقت برآورد فضایی کیفیت آب زیرزمینی را به‌طور معناداری افزایش داده، بلکه با ارائه شواهد آماری روشن از استحکام بالای ساختار فضایی شاخص WQI و کاهش عدم قطعیت تخمین، یک چارچوب روش‌شناختی نوآورانه و قابل تعمیم برای پایش، مدیریت و حفاظت از منابع آب شرب در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کند که می‌تواند مبنایی برای توسعه مطالعات آینده و ادغام با رویکردهای پیشرفته‌تر تحلیل مکانی و تصمیم‌گیری باشد. از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به استفاده از داده‌های یک دوره زمانی مشخص اشاره کرد که امکان بررسی تغییرات فصلی و سالانه کیفیت آب زیرزمینی را محدود می‌سازد. همچنین، تعداد محدود چاه‌های نمونه‌برداری (۴۲ حلقه چاه) می‌تواند بر دقت تحلیل‌های زمین‌آماري و پایداری نیم‌تغیرنا اثرگذار باشد. عدم بررسی تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی و کیفیت آن در دوره‌های خشکسالی از دیگر محدودیت‌های مهم این مطالعه است. با این وجود، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای مطالعات تکمیلی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۶. مقادیر شاخص WQI مناطق به روش کوکریجینگ برای مصارف آشامیدنی.

Table 6. WQI index values of regions using the cokriging method for drinking water uses.

درصد از کل	مساحت (کیلومتر مربع)	وضعیت آب	محدوده شاخص
۴۴	۷۵۰	عالی	کمتر از ۵۰
۵۲	۸۸۶	خوب	۵۰-۱۰۰
۳	۵۲	ضعیف	۱۰۰-۲۰۰
۱	۱۷	بسیار ضعیف	۲۰۰-۳۰۰
۰	۰	نامناسب	بیشتر از ۳۰۰
۱۰۰	۱۷۰۵		مجموع

جدول ۷. شاخص‌های عملکردی مدل برای شاخص WQI.

Table 7. Model performance indicators for the WQI index.

R ²	ε %	MAE (%)	RMSE (%)	EF
۰/۸۵	۳/۶	۰/۲۱	۳/۲۷	۰/۷۱

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کیفیت آب زیرزمینی دشت مشگین با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماري در محیط GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص WQI ابزار مناسبی برای تلفیق پارامترهای متعدد هیدرو شیمیایی و ارائه یک تصویر جامع از وضعیت کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه است. بررسی آماری و فضایی داده‌ها بیانگر آن بود که شاخص WQI و متغیر هدایت الکتریکی از ساختار فضایی قوی و پیوسته‌ای برخوردارند که این امر امکان مدل‌سازی دقیق تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی را فراهم کرده است. در این راستا، استفاده از روش کوکریجینگ ساده با بهره‌گیری از هدایت الکتریکی به‌عنوان متغیر کمکی، نسبت به روش‌های تک‌متغیره، دقت بالاتری در برآورد و پهنه‌بندی شاخص WQI ارائه داد. نتایج پهنه‌بندی کیفی نشان داد که بخش عمده‌ای از سطح دشت مشگین در طبقات کیفی «عالی» و «خوب» قرار دارد که بیانگر وضعیت نسبتاً مطلوب کیفیت آب زیرزمینی

برای مصارف شرب در منطقه مورد مطالعه است. با این حال، وجود نواحی محدود با کیفیت پایین تر نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی به‌طور کامل یکنواخت نبوده و تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. این تغییرات مکانی می‌تواند ناشی از شرایط زمین‌شناسی، جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، میزان انحلال املاح و همچنین شدت فعالیت‌های کشاورزی در برخی بخش‌های دشت باشد. از این رو، نتایج این مطالعه بر اهمیت توجه هم‌زمان به فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی در مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کند. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه داخلی و بین‌المللی نشان داد که دقت برآورد شاخص WQI و پیوستگی مکانی آن در دشت مشکین در سطح بالاتری نسبت به بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک گزارش شده قرار دارد. این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب صحیح متغیر کمکی و به‌کارگیری روش‌های مناسب زمین‌آمار می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت اعتماد نتایج داشته باشد. در مجموع، چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد کارآمد و قابل تعمیم برای پایش و مدیریت کیفیت آب زیرزمینی در دشت‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد و مبنای علمی برای تصمیم‌گیری مدیران منابع آب، برنامه‌ریزی حفاظت از منابع آب شرب و پیشگیری از افت کیفی آب زیرزمینی در آینده فراهم آورد.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی طی قرار داد پژوهشی ۲۴۷۴۱ تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع و مراجع

- [1] M. Pashaei Far, R. Dehghanzadeh, M.E. Ramazani, O. Rafieian, A. Najayi, Assessment of hydrogeochemical processes and groundwater quality using WQI, graphical methods, and multivariate statistical analyses: Case study of Shabestar plain, *Journal of Water Resources Engineering*, 16(56) (2023) 15–30 (in Persian).
- [2] M. Mirshkari, M. Tabatabai, R.H. Mohammadi, Assessment of spatial and temporal groundwater quality variations in Seydan-Farouq plain for agricultural, industrial, and drinking purposes, *National Conference on Water and Wastewater Engineering*, Kerman, Iran (2012) (in Persian).
- [3] M. Hassanaliipour, A. Esmailiouri, E. Ahmadi, Y. Imani, M. Raeuf, M.R. Abazar, Assessment of urban development impacts on quantity and quality of surface and groundwater in Ardabil plain, *Environmental Science Studies*, 7(3) (2022) 5374–5385 (in Persian).
- [4] Turkish Statistical Institute (TUIK), *Agricultural Statistics Summary*, 2018.
- [5] F. Karimi, S. Sultana, A. Shirzadi Babakan, D. Royall, Land suitability evaluation for organic agriculture of wheat using GIS and multi-criteria analysis, *Applied Geography*, 4(3) (2018) 326–342.
- [6] Y. Hoseini, M. Kamrani, Using a fuzzy logic decision system to optimize the land suitability evaluation for a sprinkler irrigation method, *Outlook on Agriculture*, 47(4) (2018) 298–307.
- [7] H.F. Obidavi, Z. Fatemeh, Spatial distribution of water quality index based on WHO standards using GIS: Case study of Firoozabad groundwater, *Human and Environment Journal* (2021) (in Persian).
- [8] S. Hashmati, H. Beigi Harchgani, Spatial patterns and zoning of groundwater quality indices of Shahr-e-Kord for designing drip irrigation systems, *Proceedings of the 5th Environmental Engineering Conference*, Tehran, Iran (2012) (in Persian).
- [9] M. Nakhaei, M. Vadiati, Application of fuzzy inference model for assessing qanat water quality for drinking and agricultural uses (Tehran province), *Journal of Advanced Applied Geology*, 6 (2013) (in Persian).
- [10] B. Imani, J. Jafarzadeh, Groundwater quality assessment for drinking purposes in rural areas using geostatistical analysis and GIS: Case study of Ardabil County, *Quarterly Journal of Geographical Information Science*, 32(127) (2023) 151–170 (in Persian).
- [11] A. Malkian, M. Mirdashtvan, Groundwater quality assessment for agricultural use using geostatistical analyses: Case study of Hashtgerd plain, Alborz province, *Journal of Rangeland and Watershed Management*, 68(4) (2015) 809–820 (in Persian).

- [12] T. Shirvani, I. Shirvani Sarouyi, M.H. Bouchani, F. Aref, Groundwater quality assessment of Sahra-ye-Bagh plain for agricultural and industrial uses, *Ecohydrology*, 2(4) (2015) 345–356 (in Persian).
- [13] F. Eslami, R. Shokouhi, S. Mazloumi, M. Darvish Motavali, M. Salari, Assessment of Water Quality Index (WQI) of groundwater resources in Kerman province in 2015, *Journal of Occupational Health and Environment*, 1(3) (2017) 45–48 (in Persian).
- [14] L. Hamidian, S.H. Meraji, E. Fijani, S. Batalblooi, Assessment of groundwater quality in Bushehr province using water quality index, *Journal of Hydrogeology*, 2(1) (2017) 31–44 (in Persian).
- [15] R. Bahrami Nasab, H. Pir Kharati, A. Abbasfam, Z. Sheikhi, D. Bazargan, Groundwater quality assessment of Rashkan plain for agricultural use, *Proceedings of the First Conference on Fundamental Research in Agricultural and Environmental Sciences*, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (2019) (in Persian).
- [16] M. Qareh Mahmoudloo, A. Zare, Groundwater quality assessment of Seydan-Farouq plain for agricultural purposes, *Proceedings of the 2nd National Conference on Agricultural Science, Natural Resources, and Environment of Iran*, Tehran, Iran (2018) (in Persian).
- [17] H. Banzhad, H. Mohebzadeh, Groundwater quality assessment of Razan-Qahavand plain for agricultural use using GIS, *Quarterly Journal of Geographical Space Studies*, 12(38) (2011) 9 (in Persian).
- [18] A.A. Hosseini Pak, *Geostatistics*, University of Tehran Press, Tehran, Iran (1998) (in Persian).
- [19] Y. Hoseini, Optimization of saturated hydraulic conductivity estimation using kriging in drainage networks, *Applied Water Science*, 13 (2023) 94. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01897-3>.
- [20] F. Dardour, et al., A novel approach for groundwater quality assessment using WQI, *Journal of Hydrology*, 598 (2021) 126465.
- [21] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th Edition, Incorporating the 1st Addendum, Geneva, Switzerland (2017).
- [22] N. Adimalla, H. Qian, Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) and GIS techniques in semi-arid regions, *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (2021) 100–115.
- [23] M. Castellini, A.M. Stellacci, M. Tomaiuolo, E. Barca, Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in a durum wheat field: An assessment by the BEST-Procedure, *Water*, 11 (2019) 1434.
- [24] W.A. Agyare, S.J. Park, P.L.G. Vlek, Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity, *Vadose Zone Journal*, 6(2) (2007) 423–431.
- [25] M.H. Razi, W. Wilopo, D.P.E. Putra, Hydrogeochemical evolution and water–rock interaction processes in the multilayer volcanic aquifer of Yogyakarta-Sleman Groundwater Basin, Indonesia, *Environmental Earth Sciences*, 83 (2024) 164. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11477-6>.
- [26] R.S. Chauhan, S. Singh, M. Kumar, A comprehensive water quality index based on analytic hierarchy process for groundwater quality assessment, *Ecological Indicators*, 145 (2022) 109582. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109582>.
- [27] K.K. Yadav, N. Gupta, V. Kumar, J.K. Singh, Integrated WQI–GIS approach for groundwater quality assessment in arid and semi-arid regions, *Sustainable Water Resources Management*, 9 (2023) 67.
- [28] H. Zheng, S. Hou, J. Liu, Y. Xiong, Y. Wang, Advanced machine learning approaches for groundwater quality assessment using water quality indices, *Journal of Hydrology*, 629 (2024) 130402. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130402>.
- [29] F.A. Ababakr, K.O. Ahmed, A. Amini, H. Gökçekuş, Spatio-temporal variations of groundwater quality index using geostatistical methods and GIS, *Applied Water Science*, 13 (2023) 206. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02010-4>.
- [30] V.B. Patil, V.R. Saraf, Review of groundwater mapping and water quality assessment using GIS and Water Quality Index (WQI), *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(21s) (2024) 4612.

- [31] H.M. Shuaibu, S.M. Abdullahi, A.A. Yusuf, M.B. Bello, Hydrogeochemical processes controlling groundwater quality and sustainability in arid environments, *Water*, 16(4) (2024) 601. <https://doi.org/10.3390/w16040601>.
- [32] L. Seraiche, R. Benzaid, M. Khelifi, Groundwater vulnerability assessment in semi-arid regions using GIS-based multi-criteria and geostatistical approaches, *arXiv preprint* (2026). <https://arxiv.org/abs/2602.00023>