

بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت و کمیت آبهای زیرزمینی به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و زمین آمار (مطالعه موردی: دشت اصفهان)

پژوهشگران: صدیقه محمدی^۱، محمد نجف زاده^۲، افشین یزدانی^۳

کد پروژه: 14020220-1035-G

چکیده

دشت اصفهان در حوضه باتلاق گاوخونی، محدوده مطالعاتی اصفهان- برخوار با جمعیت، صنایع و کشاورزی گسترده و اضافه برداشت سالیانه از منابع آب زیرزمینی با افت مستمر کمیت و کیفیت آب، جزء محدوده‌های ممنوعه بحرانی کشور است. هدف این تحقیق بررسی تغییرات مکانی و زمانی کمیت و کیفیت (پارامترهای (EC)، (Na)، (As)، (NO₃)، (Pb)، (TH) و شاخص GQI) آبهای زیرزمینی دشت اصفهان جهت مدیریت منابع آب است. در این راستا هیدروگراف‌های واحد بلند و کوتاه مدت دشت به روش تیسن با استفاده از نرم افزار GIS ترسیم شدند. آنالیز تجربی داده‌های کیفی و کمی با نرم‌افزار زمین‌آماري GS+ انجام و مناسب‌ترین معادلات واریوگرام مشخص و بهترین مدل واریوگرام انتخاب شد. تکنیک‌های کریجینگ و IDW با توان‌های ۱ تا ۵ برای هرمتغیر در ابتدا و انتهای دوره‌ی آماری اجرا، جهت بررسی دقت روش‌های میان‌یابی با اعتبار سنجی حذفی، مقادیر MAE، MBE و RMSE برای هر روش میان‌یابی محاسبه و روش مناسب جهت ترسیم نقشه‌ها با GS+ برگزیده شدند. برای تحلیل مکانی متغیرها، نقشه‌های پهنه‌بندی در محیط نرم افزاری GIS رسم شدند. نتایج نشان داد، در ابتدای دوره بیشترین مقادیر متغیرهای کیفی در مناطق شرق، شمال شرق و مرکز دشت مشاهده می‌گردد و شاخص GQI در این نواحی بالاتر بود و کلاً نواحی جنوبی و غربی دشت وضعیت نسبتاً

^۱ عضو هیئت علمی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته mohamadisedigeh@gmail.com

^۲ عضو هیئت علمی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته moha.najafzadeh@gmail.com

^۳ کارشناس ارشد مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب aykh92@gmail.com

بهتری داشتند که برای متغیر آرسنیک و نترات در انتهای دوره نیز صادق است. نواحی شرق به سمت جنوب شرق و مرکز به غرب، بیشینه مقادیر پارامترهای کیفی را در انتهای دوره داشتند. سرب در شمال، شمال غرب و مرکز به شرق نسبتاً زیاد بود. کمترین تراز ایستابی در ابتدای دوره در مناطق مرکزی به شمال و در انتهای دوره در مرکز، شمال و جنوب دشت دیده می‌شود.

کلید واژه‌ها: کیفیت آب زیرزمینی، هیدروگراف دشت، سیستم اطلاعات جغرافیایی، دشت اصفهان، سطح ایستابی، زمین آمار

- مقدمه

آب زیرزمینی یکی از مهمترین منابع تامین آب شیرین مورد نیاز انسان در جهان است که متأسفانه ارتباط مسیرهای حرکتی آب زیرزمینی در چرخه هیدرولوژی به سطح زمین امکان آلوده شدن آن توسط بشر را فراهم می‌آورد که از ارزش آن می‌کاهد. بنابراین تبعات آلودگی آب زیرزمینی و حفاظت آب زیرزمینی از آلودگی، خود دلیل مهم دیگری بر مطالعه آن است و بررسی تغییرات مکانی و زمانی کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی از مسائل اساسی امروزه می‌باشد (بهارلویی، ۱۳۹۲ و طاهری، ۱۳۸۴). آب زیرزمینی در ایران از منابع اصلی تامین آب شرب و کشاورزی می‌باشد که با توسعه صنایع و رشد آلاینده‌ها مشکلات شوری و سدیکی اراضی و آلودگی به فلزات سنگین، کیفیت آن را پایین آورده و علاوه بر سمیت این فلزات، خاصیت تجمع-پذیری، اهمیت بهداشتی آن‌ها را برجسته نموده است که لزوم اولویت بخشی به مطالعه و پایش کیفی و کمی آب در محدوده مطالعاتی اصفهان برقرار را دو چندان می‌نمایند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹). از آنجا که آمار کلاسیک قادر به در نظر گرفتن توزیع مکانی پارامترهای کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی نبوده لذا از زمین‌آمار^۱ به عنوان تکنیکی برای این هدف استفاده می‌شود (مدنی، ۱۳۷۳). تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار در بررسی کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی در جهان و ایران انجام شده است. رشید^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، غلظت فلزات سنگین و متغیرهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی را در اطراف معادن کرومیت مالاکنند پاکستان، با تأکید ویژه بر کیفیت آب، هیدروژئوشیمی، توزیع فضایی، گونه‌زایی ژئوشیمیایی و اثرات بر سلامت انسان بررسی نموده که نتایج نشان داد متغیرهای کدورت، EC، PO_4-3 ، Na^+ ، Mg^{+2} ، Ca^{+2} ، Cr، Ni و Mn از دستورالعمل‌های WHO فراتر رفت. آلودگی فلزات سنگین و اثرات سرطانی بر سلامت، نشان داد که آب‌های زیرزمینی برای آشامیدن، کشاورزی و نیازهای خانگی بسیار نامناسب و نیاز به اقدامات اصلاحی و برنامه‌های مدیریت پایدار است (Rashid et al, 2023). توماس امانوئل^۳ (۲۰۲۳)، در ارزیابی مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی در کلانشهر عبادان نیجریه، با استفاده از تحلیل عاملی و الگوریتم کریجینگ، پارامترهای pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، کربنات‌ها، کلرید، نترات، سولفات، کلسیم، سدیم، منیزیم و پتاسیم را بررسی و شاخص آب زیرزمینی برای تعیین قابلیت شرب آب در منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. نتایج نشان داد که آب زیرزمینی برای نوشیدن و ... مناسب است و Kriging یک ابزار ارزیابی مناسب برای مدل‌سازی پارامترهای محیطی می‌باشد (Thomas et al., 2023). حسن حیدر^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، با هدف

¹ Geostatistics

² Rashid

³ Thomas, Emmanuel

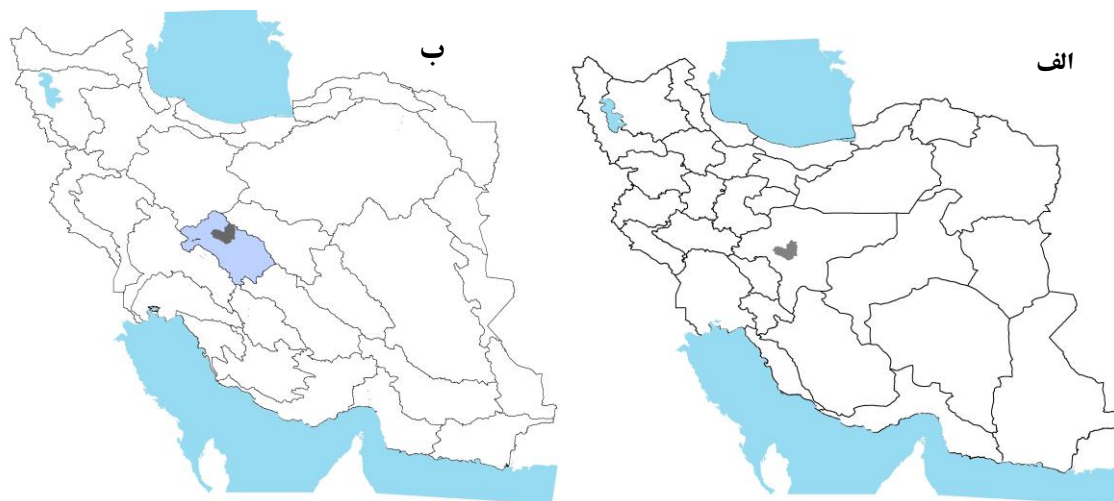
⁴ Hassan, Haider

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و توسعه مدل‌های فضایی با GIS، به روش IDW و کریجینگ در صحرای جنوب غربی عراق، پارامترهای EC، TDS، pH، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی را از ۷۵ نمونه آب چاه آنالیز نمودند. نتایج نشان‌دهنده طیف بالایی از مقادیر EC، TDS، pH اسیدی بود که مشخص شد غلظت کاتیون‌های اصلی (کلسیم و منیزیم) و آنیون‌ها (HCO_3 , Cl , SO_4) از حد قابل قبول آشامیدن WHO با تغییرات قابل توجهی در توزیع آن‌ها فراتر رفته است (Hassan et al., 2023). در داخل کشور نیز سالاری فر (۱۴۰۱)، از روش‌های زمین‌آمار برای بررسی تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت تبریز در یک بازه ۱۵ ساله استفاده و پارامترهای کیفی آب زیرزمینی را به روش‌های فاصله معکوس، توابع شعاع محور و کریجینگ بررسی نمود. نتایج نشان داد غلظت و پارامترها در بخش شمال غرب، غرب و جنوب غربی دشت در دوره زمانی مطالعه افزایش یافته است. عمده پژوهش‌های انجام شده به بررسی تغییرات مکانی کیفی یا کمی آب زیرزمینی پرداخته اند و کمتر پژوهشی به بررسی توام پارامترهای کیفی و کمی آب زیرزمینی پرداخته است لذا تحقیق حاضر با هدف بررسی توزیع مکانی کیفیت و کمیت آب زیرزمینی دشت اصفهان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار انجام شد. در این راستا اهداف تحقیق شامل، بررسی تغییرات مکانی و زمانی کمیت و کیفیت (پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)، مقدار سدیم (Na)، آرسنیک (As)، نترات (NO_3)، سرب (Pb) و سختی کل (TH)) آب‌های زیرزمینی دشت اصفهان و تهیه هیدروگراف‌های واحد دراز مدت و کوتاه مدت دشت جهت برنامه ریزی های آتی و مدیریت بهره برداری بهینه منابع آب است.

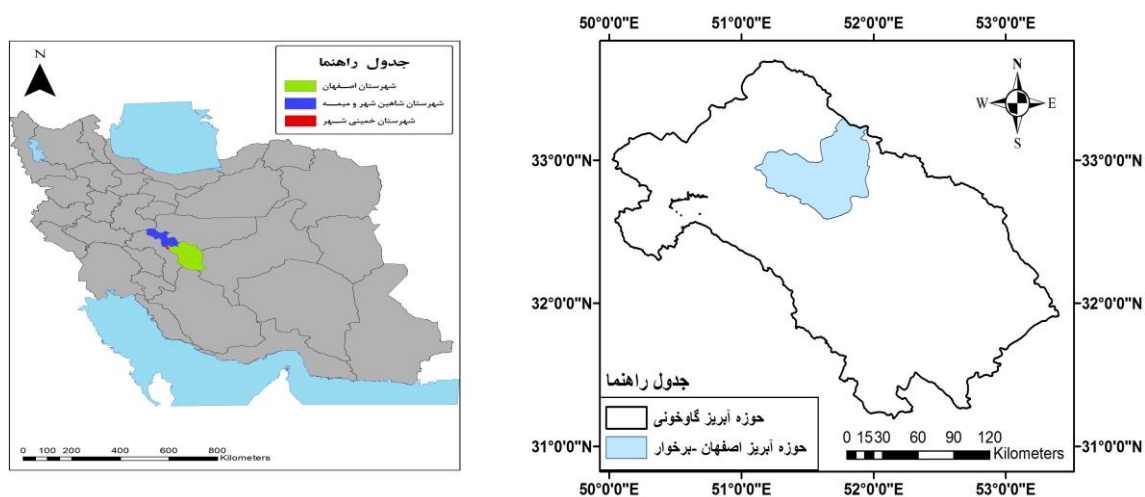
مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت اصفهان در مرکز استان، در محدوده اطراف شهر اصفهان، در حوضه باتلاق گاوخونی و در محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار با وجود جمعیتی بالغ بر ۲/۳ میلیون نفر در ۱۳ شهر و صنایع زیاد و گسترش کشاورزی و باغات، با احتساب اضافه برداشت سالیانه از منابع آب زیرزمینی با افت مستمر کمیت آب، جزء محدوده‌های ممنوعه بحرانی کشور است. محدوده‌ی مطالعاتی این دشت از نظر تقسیمات سیاسی در شهرستان‌های اصفهان، شاهین شهر و میمه و خمینی شهر قرار می‌گیرد و از شهرهای مهم داخل یا نزدیک به آن می‌توان به شهر بزرگ و پر جمعیت اصفهان به عنوان مرکز استان اصفهان، شاهین شهر، خمینی شهر، دولت آباد و برخوار اشاره نمود. دسترسی به منطقه از طریق جاده اصلی اصفهان-تهران میسر است (وزارت نیرو، ۱۳۹۳ و اصغری، ۱۴۰۰).



شکل ۱: موقعیت حوزه آبریز اصفهان-برخوار در نقشه استانهای ایران (الف) و موقعیت آن در حوضه‌های آبریز درجه دو (ب)



شکل ۲: موقعیت حوزه آبریز اصفهان-برخوار در حوضه درجه ۲ گاوخونی

شکل ۳: موقعیت شهرستان‌های اصفهان، خمینی شهر و شاهین شهر و میمه در ایران

روش تحقیق

در راستای انجام تحقیق حاضر، ابتدا اقدام به جمع آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز و تهیه بانک شد. منابع آماری تهیه شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، دفتر مطالعات پایه منابع آب، به صورت آمار خام بوده که اولین گام، جمع آوری این داده‌ها و آماده سازی آن‌ها به صورت مرتب و سازمان یافته و تهیه بانک اطلاعاتی بود. این داده‌ها شامل نقشه زمین شناسی حوضه، نقشه رودخانه‌ها و منابع آب سطحی، محدوده آبخوان و مرز دشت و نیز داده‌های چاههای مشاهده‌ای و انتخابی است. در مورد چاههای مشاهده‌ای، تغییرات سطح و عمق آب زیرزمینی تعداد ۵۳ حلقه چاه مشاهده‌ای پراکنده شده در کل سطح دشت، ماهانه مورد کنترل و رفتارسنجی قرار می‌گیرد. در مورد چاههای انتخابی، از چاههای انتخابی سطح دشت به طور فصلی نمونه برداری و مقادیر کیفی پارامترهای هدایت الکتریکی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی، سدیم، نیترات و سختی کل ثبت می‌شود. در برخی نقاط نیز مقادیر فلزات سنگین از جمله سرب و آرسنیک آب در دو فصل تر و خشک سال در دسترس قرار گرفت. پس از جمع

آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز اقدام به انتخاب پایه زمانی مشترک شد. در این راستا پایه زمانی سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ جهت بررسی وضعیت کمی و کیفی آبخوان دشت انتخاب شد. پس از انتخاب پایه زمانی مشترک، کنترل کیفیت و صحت آمار انجام شد. نرمال بود داده ها در نرم افزار SPSS تحت عنوان آزمون کولموگروف اسمیرنوف^۱ بررسی شد. در مرحله بعد اقدامات به شرح ذیل انجام شد:

- بررسی کمی آب های زیرزمینی دشت با محاسبه تراز سطح آب زیرزمینی

در این راستا ابتدا هیدروگراف واحد دشت در دو بازه زمانی کوتاه مدت و بلند مدت با استفاده از روش چندضلعی های تیسن تهیه شد. سپس اقدام به تهیه نقشه توزیع مکانی سطح تراز آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی شد.

- بررسی کیفی آب های زیرزمینی دشت

این تحلیل ها با استفاده از داده های متغیرهای کیفی و فلزات سنگین برای چاه های انتخابی انجام شدند. در این راستا از آنالیز زمین آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره گرفته شد. به طور کلی یک آنالیز زمین آماری شامل مراحل ذیل است:

- ۱- آنالیز تجربی داده ها
- ۲- تخمین پارامترهای واریوگرام شامل انتخاب مقادیر عددی برای پارامترهای تغییرنا
- ۳- ارزیابی مدل انتخابی که در این مرحله بسیاری از خصوصیات متغیر مورد نظر مشخص می گردد

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

که در آن

$n(h)$: تعداد جفت نمونه های بکار رفته به ازاء یک فاصله مشخص مانند h

$Z(x)$: متغیر مشاهده شده در نقطه x

$Z(x+h)$: مقدار متغیر در دو نقطه به مختصات $(x+h)$ است که به فاصله h از هم قرار دارند.

بنابراین تعداد جفت ها تابع h است که معمولاً با افزایش h تعداد جفت ها کم می شود. در این مرحله واریوگرام مناسب به ساختار فضایی داده ها انتخاب شد که این امر در محیط نرم افزاری GS+ انجام شد. پس از آنالیز زمین آماری، میان یابی و تخمین زمین آماری با استفاده از روشهای درونیایی عکس فاصله با توان ۱ تا ۵ (IDW 1 to 5) و نیز روش زمین آماری کریجینگ (OK) انجام شد.

$$Z^*(xi) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(xi) \quad (2)$$

رابطه (۲) رابطه ی کلی تخمین کریجینگ، که در آن: $Z(xi)$ ، مقدار مشاهده شده Z در نقطه xi ، λ_i وزن یا اهمیت نسبت داده شده به مقدار Z در نقطه xi و $Z^*(x)$ ، مقدار تخمین زده شده Z در نقطه x می باشد. همچنین مقدار برآورد در روش IDW از رابطه ی ذیل محاسبه می شود:

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{Z_i}{(h_{ij}+s)^p} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(h_{ij}+s)^p} \right]} \quad (3)$$

¹ Kolmogorov-Smirnov test

که در آن؛ Z^* : مقدار تخمین در نقطه‌ی مورد نظر، Z_i : مقدار مشاهده شده در نقطه‌ای به فاصله h از نقطه‌ی مورد نظر، H_{ij} : فاصله بین نقطه‌ی مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین، S : فاکتور تعدیل کننده و P : وزن نقطه می‌باشد. (محمدی، ۱۳۸۶)

- ارزیابی روش‌های میان‌یابی با استفاده از تکنیک اعتبارسنجی حذفی (CV)^۱

ارزیابی روش‌های میان‌یابی با استفاده از تکنیک اعتبارسنجی حذفی با شاخص‌های میانگین مطلق خطا یا دقت (MAE)^۲، میانگین انحراف خطا (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد.

- تهیه نقشه پهنه‌بندی مکانی پارامترها در محیط نرم افزار GIS و تجزیه و تحلیل‌های بیشتر

متغیرهای کمیت (تراز سطح آب زیرزمینی) و کیفیت (متغیرهای هدایت الکتریکی (EC)، شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)، مقدار سدیم، آرسنیک (As)، نترات (NO₃)، سرب (Pb) و سختی کل (TH)) مورد بررسی و تحلیل زمین آماری قرار گرفت و در نهایت نقشه توزیع مکانی این متغیرها در محیط نرم افزاری GIS تهیه شد. در ادامه با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی GQI طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی دشت اصفهان جهت مصارف شرب انجام شد.

همچنین در ادامه تحقیق، شاخص کیفیت آب زیرزمینی GQI هر یک از چاههای مورد بررسی در ابتدا و انتهای بازه زمانی مورد مطالعه بدست آمد. این شاخص کیفیت آب، پارامترهای مختلف کیفی آب را برای ارائه مقدار شاخص نهایی با هم ترکیب می‌کند که می‌تواند برای مقایسه‌های مکانی استفاده شود. این شاخص در سال ۱۹۹۲ توسط Babiker و همکاران برای بررسی کیفیت آبخوان Nasuno در کشور ژاپن به کار گرفته شد. محاسبه این شاخص بر اساس استاندارد کیفیت آب شرب WHO شامل سه مرحله می‌باشد: گام اول وزن دهی می‌باشد که برای هر پارامتر با توجه به اهمیت نسبی آن در کیفیت آب زیرزمینی یک وزن خاص از ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود.

گام دوم محاسبه وزن نسبی است که با استفاده از رابطه ۴ بدست می‌آید.

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

که در آن w_i وزن هر پارامتر و n تعداد پارامترها است. گام سوم محاسبه مقیاس نرخ کیفیت q_i است. این مقیاس با تقسیم غلظت هر پارامتر در هر نمونه آب بر مقدار استاندارد آن پارامتر از رابطه ۵ به دست می‌آید:

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

که در آن: C_i غلظت و S_i مقدار استاندارد هر پارامتر شیمیایی در نمونه آب بر حسب (mg/L) است. و در نهایت شاخص GQI از رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$GQI = \frac{\sum_{i=1}^n q_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{رابطه (۶)}$$

وزن هر یک از متغیرها در محاسبه شاخص GQI بر اساس استاندارد WHO از جدول ۱ بدست می‌آید (WHO) (۱۷).

جدول ۱: وزن (Wi) و وزن نسبی (wi) هر پارامتر شیمیایی آب آشامیدنی بر اساس استاندارد WHO

متغیر	WHO (2011) استاندارد	Wi وزن	Wi وزن نسبی
سولفات SO_4^{2-}	200(mg/l)	4	0.122
کلراید Cl^-	250(mg/l)	3	0.083
بیکربنات HCO_3^-	150(mg/l)	3	0.083

¹ Cross Validation

² Mean Absolute Error

اسیدیته pH	6.5-9.2	4	0.112
میزان جامدات محلول TDS	500(mg/l)	5	0.139
هدایت الکتریکی EC	500(μ mho/cm)	5	0.139
پتاسیم K^+	10(mg/l)	2	0.055
سدیم Na^+	200(mg/l)	2	0.055
منیزیم Mg^{2+}	30(mg/l)	2	0.055
کلسیم Ca^{2+}	75(mg/l)	2	0.055
سختی TH	100(mg/l)	4	0.112
Total weight		36	1

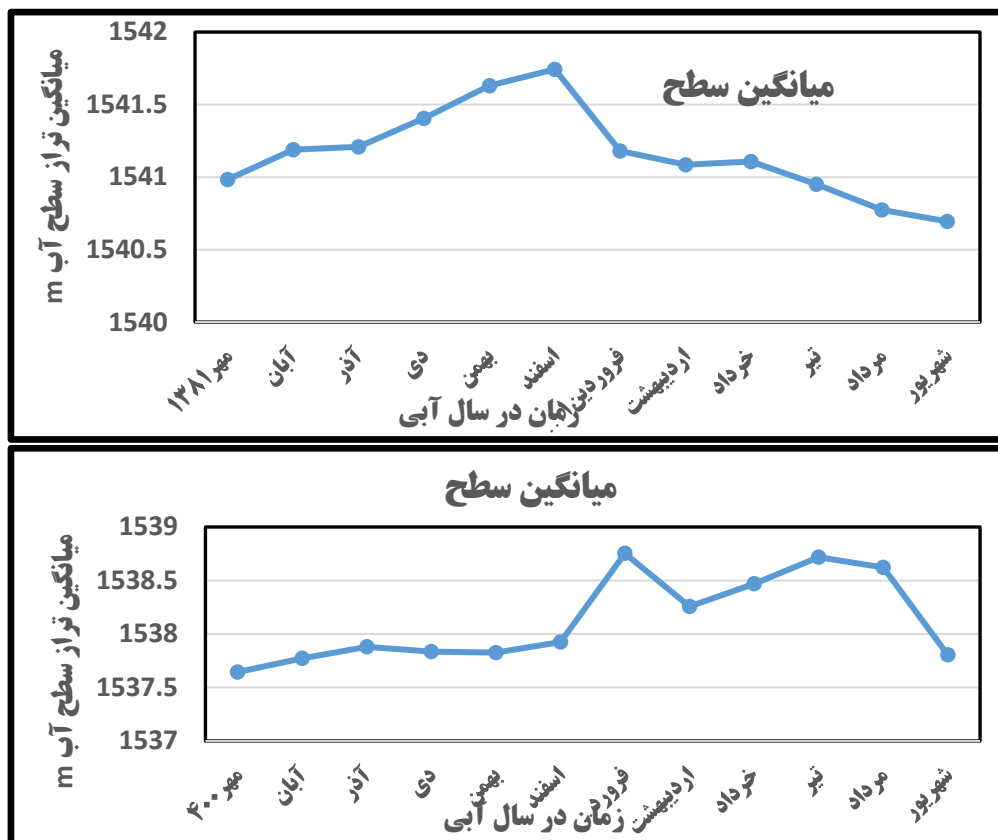
پس از محاسبه شاخص GQI، در هر یک از چاه‌های مورد بررسی اقدام به تهیه نقشه توزیع مکانی این شاخص در محیط نرم افزاری ArcGIS10.5 شد. در نهایت طبقه بندی این شاخص بر اساس جدول ۲ انجام شد:

جدول ۲: طبقه بندی شاخص GQI با هدف تعیین کیفیت آب شرب

دامنه GQI	نوع کیفیت آب
<50	Excellent
50-100	Good
100-200	Poor
200-300	Very poor
>300	Water unsuitable for drinking purpose

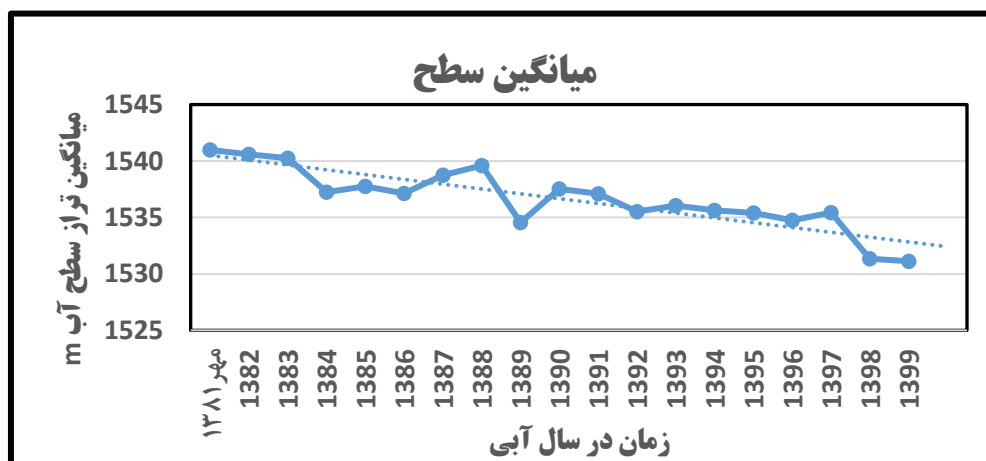
- نتایج

نتایج مربوط به هیدروگراف واحد کوتاه مدت دشت اصفهان در ابتدا و انتهای دوره زمانی مورد بررسی در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: هیدروگراف واحد کوتاه مدت سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱

همچنین هیدروگراف واحد بلند مدت دشت اصفهان در بازه زمانی بیست ساله مورد بررسی در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵: هیدروگراف واحد بلند مدت دشت اصفهان

نتایج حاصل از تحلیل زمین آماری متغیرهای مورد بررسی در جدول ۳ تا ۵ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات واریوگرام مناسب برازش شده برای متغیرهای کمی و کیفی آب زیرزمینی در سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲

مشخصات واریوگرام					متغیر	
ریشه مجموع مربعات ^۲	ضریب تبیین ^۱	نسبت واریانس مکانی به آستانه (C/(C ₀ +C))	آستانه (C ₀ +C)	اثر قطعه‌ای (C ₀)	نوع واریوگرام	
۱۱۷۷۸۰	۰.۱۶۴	۰.۹۹۸	۴۸۳.۷	۱.۰	نمایی	هدایت الکتریکی (EC)
۴۹۰۸۵	۰.۱۲۰	۰.۷۷۲	۲۷۹.۶	۷۷.۶	کروی	سدیم
۱۰۷۲۹	۰.۰۲۷	۰.۹۹۹	۱۱۲.۹	۰.۱	نمایی	سختی کل (TH)
۰.۰۹۶	۰.۳۳۱	۰.۹۷۸	۰.۳۶۸	۰.۰۰۸	گوسی	GQI
۴.۳۳۳	۰.۹۴۵	۰.۹۹۹	۷۸۳۰	۱.۰۰۰	کروی	تراز آب (WT)
E-۰.۸			E-۰.۴	E-۰.۶		

جدول ۴: مشخصات واریوگرام مناسب برازش شده برای متغیرهای کمی و کیفی آب زیرزمینی در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰

مشخصات واریوگرام					متغیر	
ریشه مجموع مربعات	ضریب تشخیص	نسبت واریانس مکانی به آستانه	آستانه	اثر قطعه‌ای	نوع واریوگرام	
۰.۰۶۱	۰.۹۲۰	۰.۹۰۵	۱.۰۹۲	۰.۱۰۴	نمایی	هدایت الکتریکی (EC)
۱.۰۵	۰.۹۱۸	۰.۹۰۴	۴.۵۹۵	۰.۴۴	نمایی	سدیم
۰.۰۴۴	۰.۸۵۲	۰.۹۲۱	۰.۷۵۱	۰.۰۵۹	نمایی	سختی کل (TH)
۰.۰۴۳	۰.۸۹۳	۰.۹۲۳	۰.۸۰۷	۰.۰۶۲	نمایی	GQI
۵.۲۴۲	۰.۵۶۸	۱.۰۰۰	۲۵۶۱	۱.۰۰۰	نمایی	تراز آب (WT)
E+۰.۶						

جدول ۵: مشخصات واریوگرام مناسب برازش شده برای متغیرهای آرسنیک، نیترات، سرب

مشخصات واریوگرام					متغیر	

^۱ Coefficient of determination (R²)

^۲ Root Sum Squared (RSS)

نوع واریوگرام	اثر قطعه‌ای (C_0)	آستانه (C_0+C)	نسبت واریانس مکانی به آستانه ($C/(C_0+C)$)	ضریب تبیین	ریشه مجموع مربعات
آرسنیک	کروی	۰.۰۶۲	۰.۵۵۷	۰.۸۸۹	۰.۰۹۵
نیترات	کروی	۵.۹	۷۰.۳	۰.۹۱۶	۰.۰۰۰
سرب	کروی	۰.۰۰۶	۰.۴۵۱	۰.۹۹۷	۰.۰۰۰

نتایج حاصل از مقایسه روشهای درون یابی در جدول ۶ تا ۷ ارائه شده است.

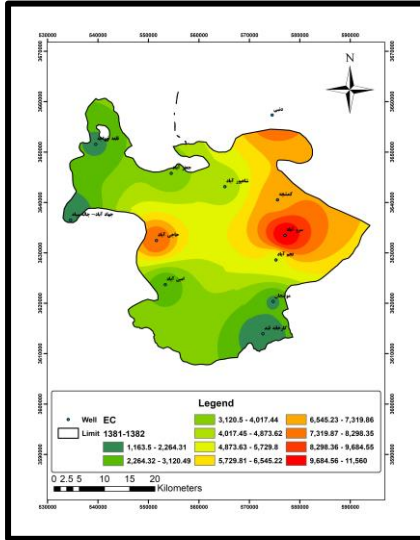
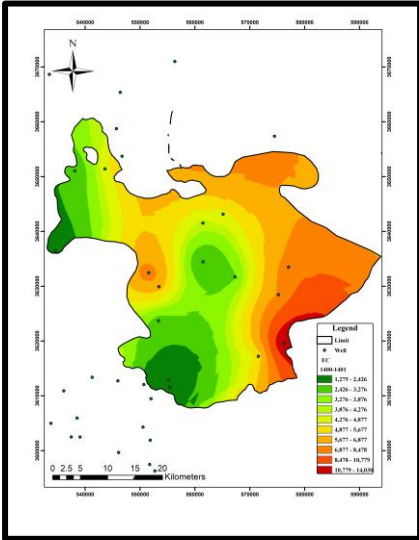
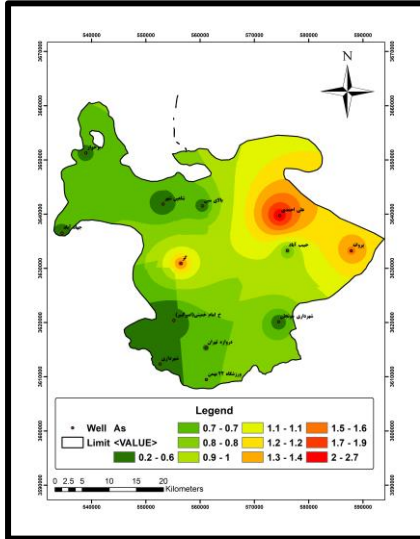
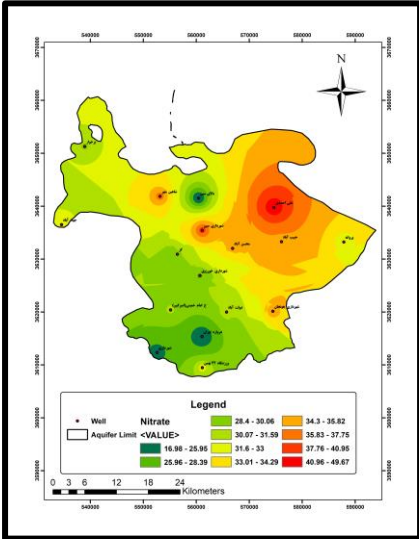
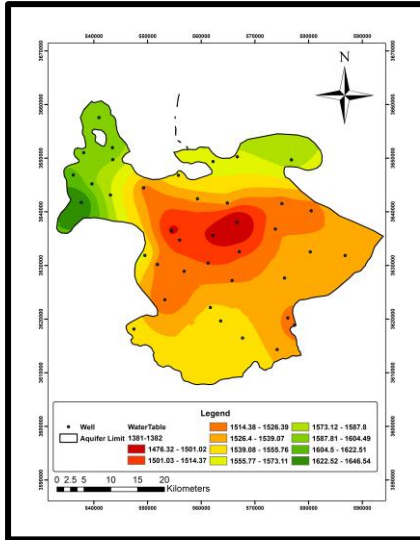
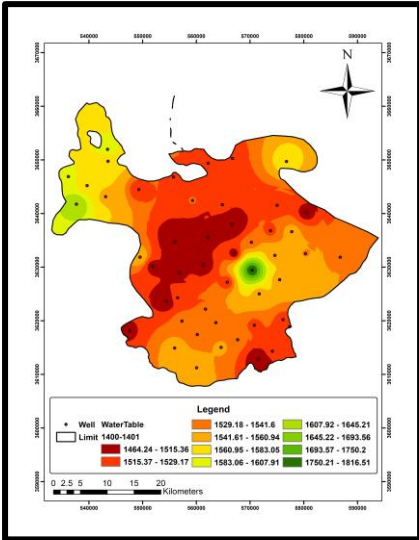
جدول ۶: نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی Kriging و IDW - 1 سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲

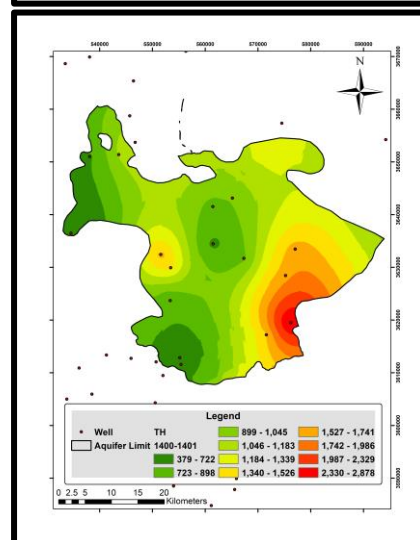
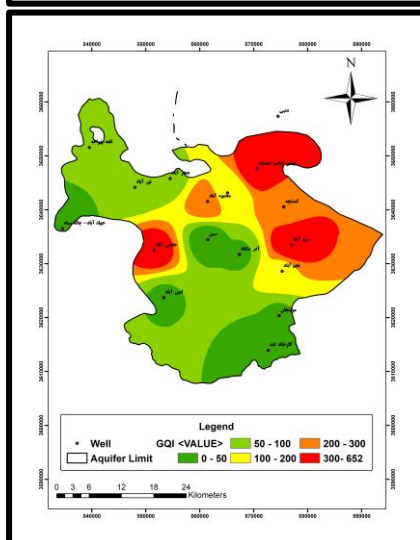
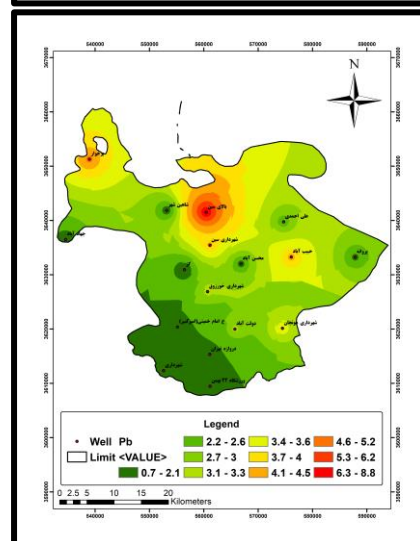
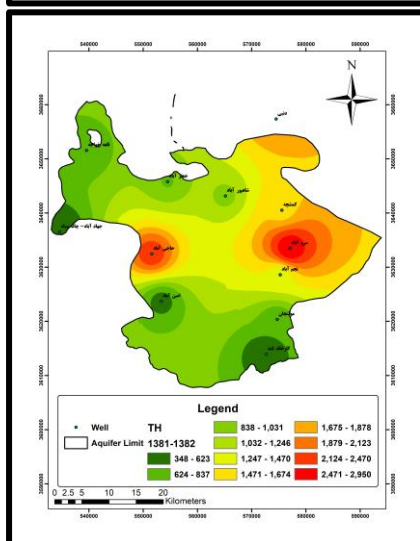
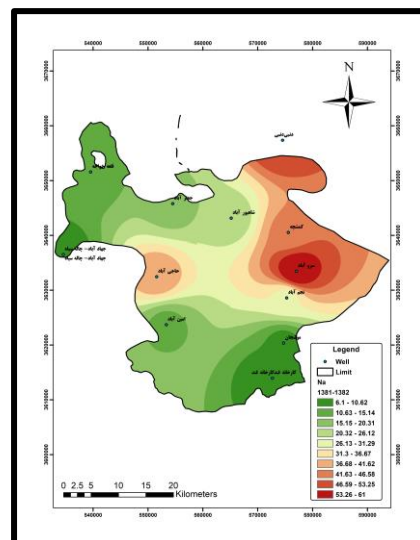
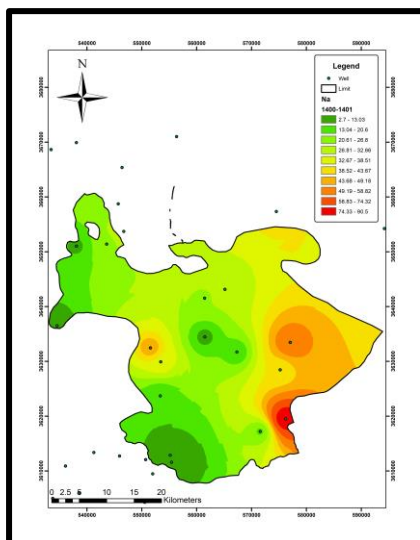
متغیر			Kriging			IDW - 1		
			MAE	MBE	RMSE	MAE	MBE	RMSE
EC	۲۵۰۶	۳۹۹/۶	۳۱۴۸/۱			۲۶۴۵/۱	۲۵۲/۲۵	۳۲۳۶
Na	۱۴/۹	۰/۴۷	۱۷/۰۴			۱۶	۱/۱۸	۱۷/۸۷
TH	۶۵۸/۸۶	-۱۰۹/۳	۸۳۸/۰۷			۶۷۰/۴۸	-۵۵/۶۶	۸۳۹/۱۹
GQI	۱۶۹/۸۹	-۳۳/۰۵	۲۱۲/۷			۱۷۱/۲۶	-۴۳/۴۷	۱۹۸/۶۵
Water Table	۱۲/۶۱	-۱/۰۵	۱۸/۳۵			۱۷/۸۲	-۶/۹۶	۲۴/۱۶

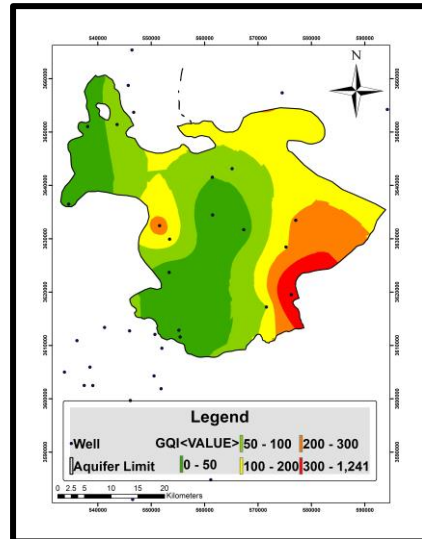
جدول ۷: روش‌های مورد استفاده جهت میان‌یابی نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی

متغیر	زمان	سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲	سال آبی ۱۴۰۰-۱۴۰۱
هدایت الکتریکی (EC)	IDW - 2	Kriging	
سدیم (Na)	IDW - 3	IDW - 2	
سختی کل (TH)	IDW - 2	Kriging	
GQI	IDW - 4	Kriging	
تراز آب (WT)	Kriging	IDW - 2	

نتایج حاصل از تهیه نقشه پهنه‌بندی مکانی متغیرهای مورد بررسی در شکل ۶ ارائه شده است.







شکل ۶: نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهای مورد بررسی در نرم افزار GIS

- بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ارزیابی هیدروگرافها

بررسی‌ها در هیدروگراف واحد بلند مدت دشت نشان داد که طی دوره آماری مورد مطالعه، میزان متوسط سطح آب زیرزمینی دشت اصفهان ۹/۸۶ متر کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از برداشت‌های بی‌رویه و کاهش نزولات جوی باشد. هیدروگراف کوتاه مدت دشت اصفهان در ابتدای دوره آماری نشان‌دهنده افزایش سطح ایستابی آبخوان در دوره‌ی سرد سال و کاهش آن در دوره‌ی گرم سال است. در انتهای دوره آماری نیز، در طول دوره سرد سال افزایشی با شیب ملایم در سطح ایستابی مشاهده می‌گردد و پس از آن نوسانات شدیدی وجود دارد.

- آنالیز زمین آماری

نتایج حاصل از آنالیز زمین آماری شاخص کیفیت آب زیرزمینی در ابتدای دوره‌ی آماری بیانگر مناسب بودن مدل واریوگرام گوسی برای برازش به ساختار فضایی این داده‌ها می‌باشد که این مدل بر خلاف مدل‌های نمایی و کروی رفتاری سهمی‌گون دارد و در پایان دوره آماری مدل نمایی به عنوان بهترین مدل واریوگرامی شناخته شد. تحلیل‌های واریوگرافی مربوط به پارامتر کیفی سدیم و تراز سطح آب زیرزمینی در ابتدای دوره‌ی آماری نشان‌دهنده‌ی مدل کروی به عنوان بهترین مدل برازش شده این پارامترهاست و در انتهای دوره آماری مدل نمایی جهت برازش مناسب بود. بررسی‌های زمین آماری پارامترهای کیفی هدایت الکتریکی و سختی کل در ابتدا و انتهای دوره‌ی آماری نشان‌داد که مدل نمایی به عنوان بهترین مدل برازش شده به ساختار فضایی داده‌های این پارامترها برای اول و آخر دوره مطالعه است. برای متغیرهای آرسنیک، نیترات و سرب مدل کروی بهترین گزینه برای برازش به داده‌های مربوط تعیین شد که شعاع تاثیر این متغیرها به ترتیب ۱۲۰۱۰، ۷۳۴۰ و ۷۳۴۰ متر و مقدار آستانه‌ی آن‌ها نیز به ترتیب معادل ۰/۵۵۷، ۷۰/۳ و ۰/۴۵۱ می‌باشد.

- پهنه‌بندی مکانی متغیرهای کیفی

۱- هدایت الکتریکی: با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی EC در سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲، بیشترین مقادیر در نواحی شرق و شمال شرق محدوده بوده و در نواحی مرکزی و شمالی، مقدار آن نسبتاً در حد متوسط و مناطق جنوبی و شمال غربی نقشه، میزان کمتری از آن مشاهده شد. در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ مقادیر زیادی از EC در شرق محدوده بود و کلاً در نواحی مرکزی و شمالی

دشت اصفهان میزان آن نسبتاً در حد متوسط و در قسمت‌های جنوبی و غربی وضعیت بهتر بود. علت رشد فزاینده مقدار EC را شاید بتوان افزایش تقاضا و بهره برداری‌های شرب و کشاورزی و نیز عدم تغذیه‌ی کافی در این قسمت دانست که در نتیجه‌ی آن میزان انحلال املاح و در پی آن مقدار EC افزایش یافته است.

۲-آرسنیک : در قسمت‌های شمال شرق و شرق و اطراف اراضی گزر آرسنیک بیشترین تراکم را دارد. به طور کلی با حرکت از نواحی شمال و شرق به سمت جنوب و غرب دشت از مقدار آرسنیک کاسته می‌شود به گونه‌ای که در مناطق غربی و جنوب غربی متمایل به مرکز کمترین مقدار این عامل وجود داشت. کمینه مقدار در شاهین شهر و در سایر مناطق در حد متوسط بود.

۳-سرب : در نواحی شمالی و شمال غربی اطراف محدوده مسکونی برخوردار و شهرداری سین و بالا سین تمرکز مقادیر سرب در آب های زیرزمینی مشاهده می گردد و در قسمت‌های جنوبی و غربی متمایل به مرکز و نیز پیرامون چاه پروانه مقادیر سرب نسبتاً کمتر است. محدوده اطراف گزر کمینه مقدار این عامل و در بقیه نواحی در حد متوسط متغیر می‌باشد.

۴-سختی کل : در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ مقدار زیاد این پارامتر در نواحی شرق، شمال شرق و غرب دشت بود. در قسمت‌های جنوبی، شمالی و شمال غربی دشت مقادیر این متغیر به نسبت کمتر و سایر قسمت‌های دشت وضعیت به نسبت متوسط داشتند. در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ بیشترین مقدار سختی کل در قسمت جنوب شرق دشت مشاهده می‌شود. مناطق مرکزی، غربی و جنوبی متمایل به غرب دشت به نسبت کمترین سختی کل را داشتند. مقدار این متغیر در سایر نواحی نسبتاً در حد متوسط بود.

۵-متغیر سدیم : بر اساس نقشه پهنه‌بندی سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ در مناطق شرق و شمال شرقی دشت و همینطور اطراف حاجی آباد بیشترین مقادیر این متغیر به چشم می‌خورد، در قسمت‌های جنوبی و شمال غربی به سمت مرکز این دشت میزان کمتری وجود دارد و در سایر مناطق به خصوص مناطق مرکزی، این پارامتر در حد متوسطی قرار داشت. در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ مطابق نقشه پهنه‌بندی بیشترین میزان آن در نواحی شرق و جنوب شرقی دشت دیده می‌شود.

۶-متغیر نترات : در قسمت‌های شمال شرق و شرق و همچنین اطراف شاهین شهر و گزر بیشترین تراکم را دارد. به طور کلی با حرکت از نواحی شمال شرقی به سمت جنوب غربی دشت اصفهان از مقدار نترات کاسته می‌شود.

۷-شاخص کیفیت آب زیرزمینی : در سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱، بیشترین مقادیر GQI در نواحی شرق و شمال شرق و قسمت‌هایی از غرب محدوده در طبقه بندی خیلی فقیر و نامناسب برای آشامیدن مشاهده شد. در نواحی مرکزی و شمالی، در حد متوسط در طبقه فقیر قرار دارد و در مناطق جنوبی و شمال غربی نقشه، میزان کمتری با طبقه عالی و خوب وجود دارد. در انتهای دوره مقادیر زیادی از این متغیر در شرق محدوده در دسته خیلی فقیر و نامناسب آشامیدن و کلاً در نواحی شمالی به طرف مرکز GQI متوسط در طبقه فقیر و در مرکز، جنوب و غرب آن کمترین مقدار در طبقه‌بندی عالی و خوب قرار دارد.

- پهنه‌بندی متغیر سطح آب زیرزمینی

نتایج نشان داد در ابتدای دوره آماری کمترین تراز ایستابی در قسمت‌های مرکزی در بازه‌ی ۱۴۷۶ تا ۱۵۰۱ متر بوده و با پیشروی به سمت شمال و طرفین دشت به ویژه مناطق غربی، این سطح افزایش می‌یابد. در پایان دوره نواحی مرکزی و قسمت‌هایی از شرق و جنوب شرق به نسبت کمترین تراز ایستابی را داشتند که این مقادیر در رنج ۱۴۶۴ تا ۱۵۱۵ متر نوسان می‌کنند و کلاً با حرکت به سمت حاشیه‌های دشت، مقادیر افزوده شده و به خصوص در قسمت‌های غربی رنج تغییرات به ۱۵۶۲ تا ۱۶۴۵ متر می‌رسد که می‌تواند به علت کاهش برداشت یا تغذیه بیشتر ابرخوان باشد.

- پیشنهادها

با توجه به نتایج ارزیابی‌های کمی و کیفی بدست آمده از آمار و اطلاعات آبخوان دشت اصفهان و همچنین نیاز آبی روز افزون دشت مذکور به منظور تامین آب بخش کشاورزی و تولید محصولات زراعی، پیشنهادهای زیر جهت انجام تحقیقات آتی توصیه می‌گردد:

۱- می‌توان آسیب پذیری آبخوان دشت اصفهان را با در نظر گرفتن اثرات همزمان کاتیون‌ها، آنیون‌ها و سایر شاخص‌های کیفی مورد بررسی در تحقیق حاضر بررسی نمود.

۲- می‌توان از نتایج حاصل از تحقیق حاضر در مدیریت منابع آب و پایش سلامت مردم منطقه استفاده نمود.

۳- از آنجا که جهت انجام ارزیابی کیفی آلودگی‌ها در دشت اصفهان از اطلاعات ماهانه تعداد محدودی چاه استفاده گردید، مقادیر پارامترهای خطای نسبتاً زیادی از مدل نرم افزار GS+ حاصل گردید. مهمترین عامل در افزایش پارامترهای RMSE و MBE را می‌توان کمبود داده‌های مشاهده‌ای در چاه‌ها عنوان نمود. از این‌رو، با بکارگیری داده‌های میدانی بیشتر مربوط به چاه‌های موجود در دشت اصفهان می‌توان سطح دقت مدل GS+ را ارزیابی نمود و به مقادیر خطای کمتری در مدل‌سازی کیفی آب‌های زیرزمینی دست یافت.

۴- می‌توان از مدل‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی (¹ANNs)، برنامه نویسی بیان ژن (²GEP) و مدل درخت (³MT) جهت پیش‌بینی کیفیت آبهای زیرزمینی دشت اصفهان استفاده نمود.

¹ Artificial Neural Network

² Gene Expression Programming

³ Model Tree

مراجع

- [۱] اصغری سراسکانرود ص، زینالی ب، قلعه ا، ارزیابی تغییرات کیفی آبهای زیرزمینی با استفاده از روش های زمین آمار (مطالعه موردی: دشت برخوار استان اصفهان)، نشریه علمی اکوبیولوژی تالاب، ۱۴۰۰، ۴۸، ۶۸-۵۱.
- [۲] بررسی آلودگی آبخوان برخوار- اصفهان به کل هیدروکربن های نفتی در سال ۹۸-۱۳۹۷، سازمان آب منطقه ای اصفهان- مجری: معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، افشین ابراهیمی، محمد مهدی امین، کریم ابراهیمپور، سعید فدایی، حسین کریمی، حسین کرملیان، مهرماه ۱۳۹۹.
- [۳] بهارلویی م، تأثیر نوسانات بارش بر آب های زیرزمینی دشت دامنه، پایان نامه کارشناسی ارشد، جغرافیای طبیعی گرایش اقلیم شناسی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه پیام نور اصفهان، ۱۳۹۲.
- [۴] تدوین سامانه اطلاعات جغرافیایی دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه ای استان اصفهان، وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب منطقه ای اصفهان، دفتر مطالعات پایه منابع آب، گروه تلفیق و بیلان، آبان ماه ۱۳۹۵.
- [۵] تقی زاده حساس ف، استفاده از زمین آمار در تخمین سطح آب زیرزمینی و ضریب نفوذپذیری خاک، پایان نامه کارشناسی ارشد (عمران- خاک و پی)، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۸.
- [۶] سالاری فر م، مقایسه عملکرد روش های جبری و زمین آمار در تعیین تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز، ۱۴۰۱، (۲) ۷.
- [۷] طاهری تیزروع، آبهای زیرزمینی، انتشارات دانشگاه رازی، ۱۳۸۴، چاپ اول، ۲۸۲.
- [۸] گزارش تمدید ممنوعیت اصفهان - برخوار، وزارت نیرو، شرکت آب منطقه ای اصفهان، دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۳، ۱۰۳ صفحه
- [۹] محمدی ص، بررسی تغییرات مکانی کیفیت و کمیت آب های زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از زمین آمار، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۶.
- [۱۰] مدنی ح، مبانی زمین آمار، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۳، ۶۵۹.

[11] ASTM Standard: D 5922-96, "Standard guide for analysis of spatial variation in geostatistical site investigation", 2004.

[12] Babiker IS, Mohamed MA, Hiyama T. Assessing groundwater quality using GIS. Water Resources Management. 2007;21(4):699-715.

[13] Childs, Colin, Interpolating Surfaces in ArcGIS spatial Analyst, Arc User, ESRI, Redlands, CA, 2004.

- [14] Hassan, H. M., Ismaeel, A. J., Ethaib, S., & Al-Zaidi, B. M., Developing Spatial Models of Groundwater Quality in the Southwestern Desert of Iraq Using GIS, Inverse Distance Weighting, and Kriging Interpolation Techniques. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2023, 10(4), p1169.
- [15] Rashid A, Ayub M, Ullah Z, Ali A, Tariq S, Iqbal J, Gao X, Bundschuh J, Li C, Anjum Khattak S, Ali L, El-Serehy H A, Kaushik P, Khan S, Groundwater Quality, Health Risk Assessment, and Source Distribution of Heavy Metals Contamination around Chromite Mines: Application of GIS, Sustainable Groundwater Management, Geostatistics, PCAMLR, and PMF Receptor Model, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3), 2113.
- [16] THOMAS, E .O, Spatial evaluation of groundwater quality using factor analysis and geostatistical Kriging algorithm: A case 5study of Ibadan Metropolis, Nigeria, *Water Practice & Technology*, 2023, 18(3), 592-607., 2001, 246(1), 223-234.
- [17] WHO (2011) WHO Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization, Fourth ed

Abstract

Isfahan plain in Isfahan-Barkhor study area (Gavkhoni swamp basin) with large population, industries ,agriculture and annual over-harvesting of groundwater with continuous decrease in quantity and quality of water, is one of the critical prohibited plains of Iran. The aim of this research is to investigate the spatial and temporal changes in the quantity and quality (parameters (EC), (Na), (As), (NO₃), (Pb), (TH) and (GQI) of the Isfahan plain for management of water resources. So long and short-term unit hydrographs of the plain were drawn in GIS using Thiessen's method. Experimental analysis of qualitative and quantitative data was performed with GS+, the most suitable variogram equations and model were selected. Kriging and IDW1-5 were implemented for each variable at the beginning and end of the statistical period, the values of MAE, MBE and RMSE for each interpolation method are calculated and the appropriate method for mapping were selected by GS+. Zoning maps were provided for spatial analysis by GIS. The results showed at the beginning of the period, the highest values of qualitative variables were observed in the eastern, northeastern and central areas of the plain, and the GQI index was higher in these areas, and generally the southern and western areas of the plain were in a relatively better condition, also for Arsenic and Nitrate at the end of the period, that was true. The areas from east to southeast and center to west had the highest values of quality parameters at the end. Lead was relatively high in the north, northwest and center-east. The lowest water table at the beginning can be seen in the central to the north ,and at the end in the center, north and south of the plain.

Keywords : *Groundwater quality, Plain hydrograph, Geographic Information System, Isfahan plain, Geostatistics*