



مقایسه عملکرد روش‌های جبری و زمین‌آمار در تعیین تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی

دشت تبریز

مبارک سالاری فر*

۱- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: Mobaraksalari@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

چکیده

کیفیت آب‌های زیرزمینی یکی از موارد بسیار مهم در مطالعات هیدرولوژیک به شمار می‌رود. بررسی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی به لحاظ مکانی یکی از مواردی است که در تعیین مناسب بودن آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی دخالت دارد. اطلاع از نحوه تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی یک ابزار مهم در بررسی‌های این منابع از نظر آلاینده‌ها و ... به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر از روش‌های زمین‌آمار برای بررسی تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت تبریز در یک بازه ۱۵ ساله بهره برده شد. پارامترهای مورد مطالعه شامل کلر، سولفات، سختی کل، مواد نامحلول، اسیدیته، نسبت جذبی سدیم، هدایت الکتریکی، سدیم، منیزیم و کلسیم بودند که توسط روش فاصله معکوس، توابع شعاع محور و کریجینگ مورد بررسی مکانی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد غلظت و تراکم پارامترها در بخش شمال غرب، غرب و جنوب غربی دشت در دوره زمانی مورد مطالعه افزایش یافته است که این امر خود حاکی از کاهش کیفیت آب در این منطقه نسبت به مناطق دیگر دشت تبریز می‌باشد. همچنین دقت دو روش توابع شعاع محور و کریجینگ بسته به نوع پارامتر مورد مطالعه، برای مدل‌سازی مناسب تشخیص داده شد. در مجموع با مقایسه نقشه‌های تهیه‌شده برای پارامترها مشاهده می‌شود که پهنه‌های مشخص شده برای این پارامترها تقریباً از یک الگوی خاص پیروی کرده و میزان کمینه و بیشینه تمامی پارامترها در نواحی مشترکی از دشت واقع شده است.

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی، روش‌های جبری، روش‌های زمین‌آمار، کیفیت آب زیرزمینی، واریوگرام، ویلاکاس.

مقدمه

آب بسیار مهم است. علاوه بر این، درک توزیع فضایی کیفیت آب‌های زیرزمینی به مسئولان کمک می‌کند تا استراتژی مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی را به منظور تضمین توسعه پایدار جامعه توسعه دهند. نقشه‌برداری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار به خوبی شناخته شده است. مطالعات متعددی در مورد ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار در سراسر جهان انجام شده است. (Sarath Prasanth et al., 2012). مطالعه‌ای را برای ارزیابی توزیع فضایی کیفیت آب زیرزمینی در شهر ساحلی آلاپوزا در هند انجام دادند. نتایج نشان داد که آب‌های

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. افزایش بی‌رویه جمعیت و در نتیجه آن بهره‌برداری بیش‌ازحد از آبخوان‌ها، منابع آب زیرزمینی را در معرض کاهش شدید و افت کیفیت آب آن قرار داده است. عوامل زیادی از جمله: بارش، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی منطقه، ساختار زمین‌شناسی حوضه، تغذیه آب‌های زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی در زمین بر کیفیت آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند (Zhou et al., 2013). مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده

غلظت یون سولفات با روش RBF^۹ با مقادیر RMSE برابر ۰/۰۵، ۰/۳۳، ۰/۲۷ و ۰/۴ و پارامترهای EC^۸ و TDS^۹ با روش IDW با مقادیر RMSE ۸۴/۶۲ و ۵۶/۳۶ بهتر تخمین شده‌اند. رزمخواه و همکاران (۱۳۹۹) از تکنیک تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، برای تحلیل شوری و پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت خفر جهرم استفاده کردند. در ارزیابی روش‌های درون‌یابی فصل پاییز مدل Kriging و در فصل بهار مدل Splin به عنوان مدل برتر شناخته شد. محمدی و سلاجقه (۱۳۹۶) به کمک بهترین تخمین‌گر زمین‌آمار تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت کرمان را بررسی کردند. روش لوگ کریجینگ به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی جهت پهنه‌بندی پارامترهای کیفی (کلر و هدایت الکتریکی) حاصل شد. Moghaddam et al. (2018) به بررسی تنوع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت گناباد با استفاده از مدل‌های تعیین‌کننده و زمین‌آماري پرداختند. داده‌ها مربوط به ۴۴ حلقه چاه بهره‌برداری در دشت گناباد در استان خراسان رضوی در سال ۹۳-۱۳۹۲ بود. نتایج نشان داد که روش IDW با توان‌های ۳ و ۴ بر اساس معیارهای ارزیابی RMSE، R و MRE^{۱۰} کمترین خطا و بیشترین همبستگی را نسبت به روش‌های GPI^{۱۱}، LPI^{۱۲}، OK^{۱۳}، SK^{۱۴} و UK^{۱۵} دارد. Said et al. (2021) توزیع مکانی پارامترهای کیفی pH، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و غلظت سدیم و کلرید آب زیرزمینی دشت بوساسو را برای ارزیابی کیفیت این آب‌ها در مصارف آبیاری و شرب بررسی کردند. از روش کریجینگ معمولی استفاده شد. تفسیر نتایج تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نشان داد که بیشتر چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه به‌جز ناحیه مرکزی به‌دلیل شوری بالا برای مصارف شرب و به‌دلیل خطر شور شدن برای آبیاری نامناسب هستند و فقط برای آبیاری محصولات مقاوم به شوری قابل استفاده است. Masood et al. (2021) برای درک بهتر کیفیت آب آشامیدنی منطقه هاریانا در هند شاخص کیفیت آب، GIS و تکنیک‌های آماری

زیرزمینی کاملاً برای تأمین آب شرب مناسب هستند. علاوه بر این، نشان می‌داد که آب زیرزمینی برای اهداف آبیاری به‌استثنای چند سایت مناسب است. گنجه‌ای و همکاران (۱۳۹۹) کیفیت آب زیرزمینی دشت آذرشهر برای مصارف کشاورزی را با استفاده از روش‌های زمین‌آمار بررسی کردند. آن‌ها دریافتند روش کریجینگ^۱ با RMSE^۲ کمتر و NS^۳ بیشتر بهترین روش میان‌یابی می‌باشد. نتایج نشان داد براساس طبقه‌بندی ویلکاکس^۴، کیفیت آب زیرزمینی دشت آذرشهر اغلب در کلاس خیلی شور (C4S1) قرار دارد. حیدرزاده و معزی (۱۳۹۷) به تحلیل کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت آمل-بابل و پهنه‌بندی سدیم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند، وضعیت آلودگی با توجه به کاربری اراضی در اطراف مناطق صنعتی و شهرهای پرجمعیت بحرانی‌تر می‌باشد. همچنین با بررسی وضعیت آبدهی و تشخیص سال‌های ترسالی و خشک‌سالی و نرمال رابطه افزایش آلودگی در سال‌های با دبی کمتر کاملاً مشهود می‌باشد. پیرزاده و اسور (۱۳۹۹) در مطالعات خود از روش‌های زمین‌آمار (کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و IDW^۵) و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت سیرجان استفاده کردند. از میان روش‌های درون‌یابی، روش کریجینگ ساده برای اکثر نمونه‌ها بهترین نتایج را نشان داد. درنهایت طبق نقشه‌های پهنه‌بندی، غلظت یون‌ها طی سال‌های مورد مطالعه رو به افزایش بود و تجمع غلظت یون‌ها در غرب و جنوب دشت سیرجان بیشتر بود که این امر با موقعیت قرارگیری چاه‌ها و برداشت بی‌رویه آب از این منطقه برای کشاورزی در تعامل است. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد روش‌های جبری و زمین‌آمار را در تعیین تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بروجن مقایسه کردند. نتایج بررسی آنان نشان داد پارامتر سختی کل (TH)^۶ با روش کریجینگ ساده با RMSE=۳۰/۷۲، پارامترهای PH و SAR، غلظت یون کلر و

⁹ Total Dissolved solid

¹⁰ Mean Relative Error

¹¹ Global Polynomial Interpolation

¹² Local Polynomial Interpolation

¹³ Ordinary Kriging

¹⁴ Simple Kriging

¹⁵ Universal Kriging

¹ kriging

² Root Mean Square Errors

³ Nash Sutcliffe

⁴ Wilcox

⁵ Inverse Distance Weighing

⁶ Total Hardness

⁷ Radial Basis Functions

⁸ Electric conductivity

حد شمالی آن به کوه‌های میشو، حد جنوبی آن به توده کوهستانی سهند و حد شرقی آن به شهر تبریز محدود می‌شود. بیشترین درصد مساحت دشت تبریز را به ترتیب شهرهای تبریز، اهر، بستان‌آباد، هریس، مرند و بخش کوچکی از آن را شبستر تشکیل می‌دهد. در دشت تبریز دو نوع آبخوان آزاد و تحت فشار می‌توان شناسایی کرد. آبخوان آزاد که در کل دشت گسترده شده و در مناطق تغذیه دشت از بالادست دارای کیفیت آب خوب و در طول مسیر جریان رودخانه آبی‌چای و قسمت انتهایی دشت کاملاً شور می‌باشد. رود اصلی دشت، آبی‌چای می‌باشد که به طرف دریاچه ارومیه جریان دارد. سایر رودخانه‌های دشت را سعیدآبادچای، مهران‌رود، گمناب‌چای و غیره تشکیل می‌دهند (Asghari Moghaddam, 1991). در شکل ۱ موقعیت منطقه و چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی دریافت شده است. این داده‌ها مربوط به ۶۷ چاه و قنات در سطح حوضه و در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ است. ۱۰ پارامتر کیفی شامل سولفات، کلر، pH، کل جامدات محلول، سختی کل، نسبت جذبی سدیم، هدایت الکتریکی، سدیم، منیزیم و کلسیم برای تعیین توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی استفاده شد. تغییرات متغیرهای گشتاور مرکزی داده‌ها در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. با توجه به مقادیر جداول ۱ و ۲ می‌توان بیان کرد که، بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین در بین پارامترها در سال ۱۳۸۱ به ترتیب مربوط به EC و Mg، در سال ۱۳۹۵ مربوط به EC و SAR می‌باشد. در مورد مقادیر دامنه تغییرات مربوط به پارامترهای مورد استفاده، پارامتر EC با ۱۴۲۲۷ (۱۳۸۱) و ۲۴۴۵/۹۷ (۱۳۹۵) بیش‌ترین و pH با مقدار ۲/۴ (۱۳۸۱) و ۱/۴ (۱۳۹۵) کم‌ترین ضریب تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند.

چندمتغیره را ادغام کردند. تفسیر تجزیه و تحلیل WQI^{۱۶} بر اساس GWQI^{۱۷} و EWQI^{۱۸} نشان داد که ۶۴ درصد از نمونه‌ها به برکت "ضعیف" تا "بسیار ضعیف" تعلق دارند. همچنین نتیجه مدل‌سازی نیم-واریوگرام نشان داد که مدل گاوسی بهترین تناسب را برای داده‌های EWQI و GWQI به دست می‌آورد. کلاتری و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی کمی و کیفی آبخوان باغملک با استفاده از روش تحلیل آماری، روش‌های هیدروشیمیایی و GIS پرداختند. نتایج نشان داد سطح آب زیرزمینی دچار افت شده که حاصل از کاهش بارندگی و خشکسالی بوده است. همچنین کیفیت آب زیرزمینی به دلیل تأثیر سازند گچساران و انحلال سیمان آهکی سازند کنگلومرای بختیاری کاهش یافته است.

دشت تبریز به دلیل تراکم بالای جمعیتی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای تأمین آب آشامیدنی و مصارف کشاورزی این جمعیت علاوه بر آب‌های سطحی از منابع آب زیرزمینی نیز استفاده می‌شود. کاهش حجم آب‌های زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه از یک‌سو و فعالیت‌های انسانی از سوی دیگر، کیفیت منابع آب زیرزمینی را کاهش داده است. مطالعه کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی جهت استفاده برای مصارف شرب و آبیاری لازم است. با توجه به موارد ذکر شده هدف از تحقیق حاضر ارزیابی توانایی روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی پارامترهای کیفی و بررسی تغییر کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ می‌باشد. بدین منظور علاوه بر روش‌های مرسوم زمین‌آمار (کریجینگ و IDW) از روش RBF نیز استفاده شده و کیفیت آب زیرزمینی در دو سال با فاصله زمانی ۱۴ سال مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

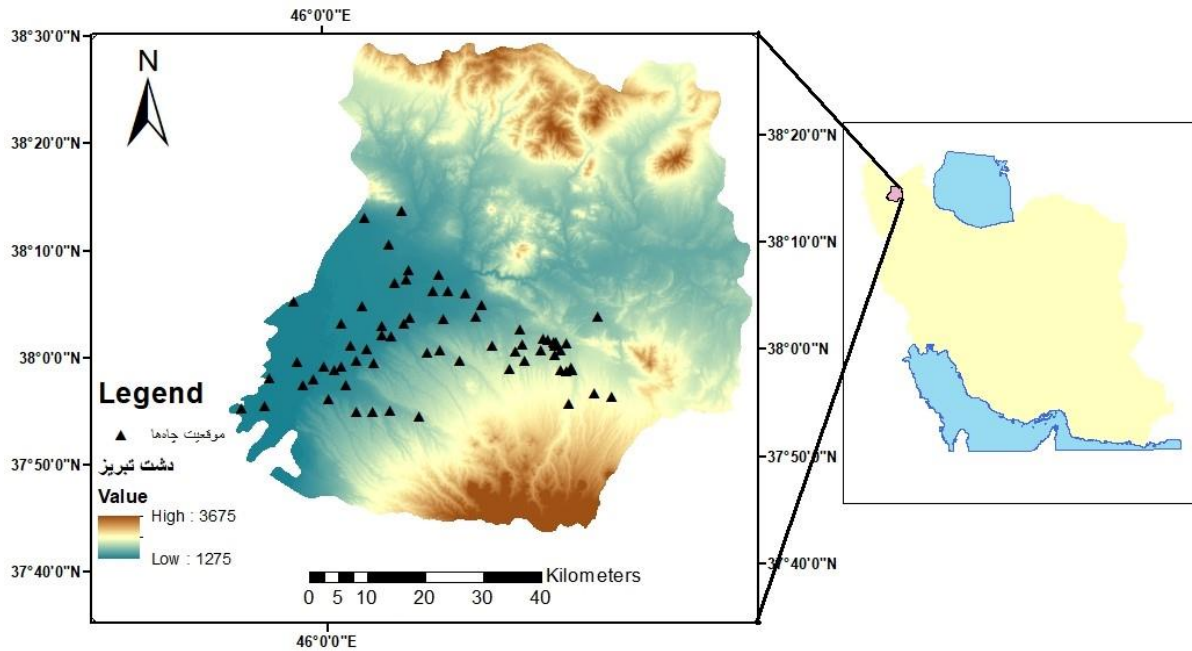
منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی دشت تبریز با مساحت سه‌هزار هکتاری در شمال غرب ایران در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. حد غربی دشت تبریز به باتلاق‌های نمکی حاشیه دریاچه ارومیه،

¹⁸ Entropy Water Quality Index

¹⁶ Water Quality Index

¹⁷ Ground Water Quality Index



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه برداری شده.

جدول ۱- مقادیر مربوط به پارامترهای آماری کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۸۱.

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس	انحراف معیار	دامنه تغییرات	چولگی	کشیدگی
SO ₄	mg L ⁻¹	۰/۱	۲۵/۱۶	۵/۳۵	۳/۱۹۱	۵/۶۵	۲۵/۰۶	۱/۷۹	۳/۱۹
Cl	mg L ⁻¹	۰/۲	۱۱۴/۶۳	۱۸/۵۷	۶۶۶/۵۶	۲۵/۸۲	۱۱۴/۴۳	۱/۸	۲/۸۴
pH	mg L ⁻¹	۶/۷	۹/۱	۷/۹۶	۰/۳۱۸	۰/۵۶۴	۲/۴	-۰/۳۹	-۰/۷۴
TDS	mg L ⁻¹	۱۵۶/۶۲	۸۶۱۸/۴	۱۸۰۳/۸۱	۳۷۴۴۳۰۸/۸۶	۱۹۳۵/۰۲	۸۴۶۱/۷۸	۱/۷	۲/۵
TH	mg L ⁻¹	۵۸	۲۴۱۴	۵۸۵/۷۱	۳۵۱۹۸۰/۶۶	۵۹۳/۲۸	۲۳۵۶	۱/۵۶	۱/۷۹
SAR	μmhos cm ⁻¹	۰/۷	۳۰/۴	۶/۳	۲۷/۵۲	۷/۲۳	۲۹/۷	۱/۶۹	۱/۸۳
EC	μmhos cm ⁻¹	۲۰۳	۱۴۴۳۰	۲۸۳۵/۶۵	۹۷۶۴۸۰۳/۴۶	۳۱۲۴/۸۷	۱۴۲۲۷	۱/۷	۲/۶
Na	mg L ⁻¹	۰/۷	۱۱۲/۳۵	۱۶/۲۲	۵۱۶/۳	۲۲/۷۲	۱۱۱/۶۵	۲/۲۱	۴/۹۶
Mg	mg L ⁻¹	۰/۱	۲۶	۴/۲۹	۲۳/۷۲	۴/۸۷	۲۵/۹	۲/۰۲	۴/۹۳
Ca	mg L ⁻¹	۱/۱	۳۶/۳۹	۷/۴۳	۶۸/۱۲	۸/۲۵	۳۵/۲۹	۲/۰۷	۳/۸۶

جدول ۲- مقادیر مربوط به پارامترهای آماری کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۹۵.

T پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس	انحراف معیار	دامنه تغییرات	چولگی	کشیدگی
SO ₄	mg L ⁻¹	۰/۱۷	۲۳	۴/۷۸	۱۶/۹۸	۴/۱۲	۲۲/۸۳	۱/۶۳	۴/۰۹
Cl	mg L ⁻¹	۰/۲۴	۹۰/۶۲	۱۶/۰۴	۴۴۳/۷۹	۲۱/۰۷	۹۰/۳۸	۱/۴۹	۱/۴۴
pH	mg L ⁻¹	۶/۷	۸/۱	۷/۴	۰/۱۳	۰/۳۶	۱/۴	-۰/۱۷	-۰/۹۶
TDS	mg L ⁻¹	۱۳۹/۳۳	۶۹۳۸/۷۵	۱۶۴۳/۱۵	۲۵۵۳۶۰۸/۱۶	۱۵۹۸	۶۷۹۹/۴۲	۱/۲۴	۰/۷۴
TH	mg L ⁻¹	۶۸	۲۸۵۰	۶۶۱/۸۸	۳۹۱۹۴۳/۳۵	۶۲۶/۰۵	۲۷۸۲	۱/۸	۳/۰۱
SAR	μmhos cm ⁻¹	۰/۴۱	۲۱/۲۳	۴/۲۵	۲۲/۵۸	۴/۷۵	۲۰/۸۲	۱/۹۵	۳/۱۷
EC	μmhos cm ⁻¹	۲۳۲/۲۲	۱۰۶۷۵	۲۵۴۵/۳۷	۵۹۸۲۷۵۶/۰۳	۲۴۴۵/۹۷	۱۰۴۴۲/۷۸	۱/۲۵	۰/۷۷
Na	mg L ⁻¹	۰/۵۲	۵۶/۵	۱۲/۲۳	۲۲۳/۵۷	۱۴/۹۵	۵۵/۹۸	۱/۵۲	۱/۱۷
Mg	mg L ⁻¹	۰/۴۴	۲۰/۴	۵/۱	۲۰/۶۵	۴/۵۴	۱۹/۹۶	۱/۲	۰/۹۷
Ca	mg L ⁻¹	۰/۹۲	۴۰	۸/۱۴	۷/۱۶۹	۸/۴۷	۳۹/۰۸	۲/۱	۴/۰۲

and Lowe (1988) معرفی شدند. در این روش اغلب، تابع انتقال در لایه میانی، تابع گوسین و در لایه خروجی، تابع خطی است (Dibike et al., 1999). عموماً آموزش شبکه RBF به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول به‌طور عمده یادگیری از نوع بدون نظارت است که با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی، پارامترهای توابع پایه، با استفاده از اطلاعات ورودی تعیین می‌شود و در بخش دوم که یادگیری از نوع با نظارت است، وزن‌های بین لایه میانی و لایه خروجی با استفاده از روش‌های کاهش شیب و رگرسیون خطی تعیین می‌شود. روش RBF از جمله روش‌های درون‌یابی است که در آن‌ها سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌کند. این روش حالتی از شبکه عصبی مصنوعی است. تابع شعاعی، تابعی به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد که وابسته به فاصله بین $X \in R^d$ و نقطه ثابت $X_j \in R^d$ است.

$$\Phi_j(x) = \Phi(|x - x_j|) \quad (2)$$

در این تابع Φ تابعی پیوسته و وابسته به هر زیرمجموعه $\Omega \in R^d$ می‌باشد. R نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین هر جفت نقطه در مجموعه Ω است (خسروی و عباسی، ۲۰۱۵). این روش می‌تواند روی داده‌هایی که به‌طور نامنظم در یک منطقه پخش شده‌اند اعمال شده و یک درون‌یابی چندمتغیره هموار روی داده‌ها انجام دهد (محمدی، ۱۳۸۵). روش RBF شامل مدل‌های Completely regularized spline، Spline with Inverse Multiquadric، Multiquadric function، tension function و Thin-plate spline می‌باشد.

روش کریجینگ

روش درون‌یابی کریجینگ یک روش برای درون‌یابی خطی بهینه با حداقل میانگین خطای درونی است. کریجینگ به‌عنوان یک تخمین‌گر دقیق شناخته شده است. در این روش، وجود شبکه‌های مشاهده‌ای لزوم ندارد، هنگامی که داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند، تنها نقاط همسایگی داده‌های برآورد شده برای برآورد ساختار متغیرهای منطقه‌ای کافی است. تغییرپذیری فضایی یک متغیر منطقه‌ای و تخمین مقدار مکان‌های اندازه‌گیری نشده با یک نیم-واریوگرام توصیف می‌شود. نیم-واریوگرام تجربی یک نمایش گرافیکی میانگین

در برآورد توزیع مکانی با رویکرد زمین‌آمار از روش‌های درون‌یابی به دو طریق قطعی و زمین‌آمار استفاده می‌گردد. در روش قطعی تنها از توابع ریاضی استفاده می‌شود (روش‌های IDW و RBF). در صورتی که روش زمین‌آمار (کریجینگ) بر اساس تئوری متغیرات ناحیه‌ای بوده و به توابع ریاضی و آمار وابسته است و از مدل واریوگرام^{۱۹} که ابزار اصلی در زمین‌آمار است برای توصیف پیوستگی فضایی داده‌های ورودی و تخمین مقدار مکان‌های اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود (Momeni et al, 2015).

روش IDW

از مهم‌ترین روش‌های درون‌یابی، روش وزن‌دهی معکوس فاصله می‌باشد. در این روش وزن نقاط نمونه بر روی نقطه مجهول براساس فاصله بین نقاط معلوم و نقطه مجهول محاسبه می‌شود. این وزن‌ها توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شوند، به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توان‌های کوچک‌تر وزن‌ها را به طول یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. این روش برخلاف روش کریجینگ از فرضیات مربوط به ارتباط مکانی بین داده‌ها پیروی نمی‌کند (واریوگرام ندارد) و تنها بر این فرض متکی است که نقاط نزدیک‌تر به نقطه برآورد، نسبت به نقاط دورتر شباهت بیشتری به آن دارند. رابطه ۱ چگونگی محاسبه وزن‌ها را در این روش نشان می‌دهد:

$$\lambda_i = \left(\frac{D_0}{D_i}\right)^\alpha - 1 \quad (1)$$

که در آن λ_i وزن نقطه نمونه i ام، D_i فاصله بین نقطه نمونه i ام و نقطه مجهول، D_0 شعاع همسایگی و α توان وزن‌دهی می‌باشد. انتخاب توان در روش IDW می‌تواند توسط روش اعتبارسنجی تقاطعی صورت گیرد. نکته‌ای که در این روش وجود دارد این است که؛ به نقاط دارای فاصله یکسان از نقطه مورد تخمین، وزن یکسان داده می‌شود و موقعیت و آرایش آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.

روش RBF

شبکه‌های تابع پایه شعاعی از نوع شبکه‌های پیشرو همراه با یک لایه میانی هستند که برای اولین بار توسط Broomhed

¹⁹ Semivariogram

هدایت الکتریکی، سدیم، منیزیم و کلسیم در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵ در جداول ۳ و ۴ ارائه گردیده است. با توجه به روش‌های مختلف درون‌یابی نتیجه می‌شود؛ روش IDW در هیچ‌کدام از موارد نتیجه خوبی نداشته و روش کریجینگ و RBF تقریباً نتایج مشابهی ارائه کردند که در برخی موارد RBF و در برخی کریجینگ بهتر بوده است. مناسب‌ترین روش با مقادیر RMSE و ME کمتر با علامت * در جداول ۳ و ۴ مشخص شده است.

با توجه به نتایج جداول ۳ و ۴ به‌طور قطع نمی‌توان یک روش را برای همه پارامترهای کیفی پیشنهاد کرد. حتی با گذر زمان روش مناسب برای یک پارامتر تغییر کرده است. در حالت کلی چون نتایج حاصل از روش کریجینگ و RBF تفاوت کمی باهم دارند می‌توان هرکدام از این روش‌ها را جایگزین دیگری کرد. در روش RBF در اغلب موارد مدل Spline with tension به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شده است. در روش کریجینگ در اکثر پارامترها مدل Exponential بهترین نتایج را ارائه کرده است.

پهنه‌بندی مکانی برخی از پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی با توجه به انتخاب بهترین روش درون‌یابی ترسیم و در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از کیفیت آب زیرزمینی دشت و رسم نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترها نشان می‌دهد که غلظت یون‌ها طی سال‌های مورد مطالعه در بخش جنوبی دشت تقریباً ثابت است. دلیل آن مجاورت با توده کوهستانی سهند است، که دارای بارش مناسب و بدون هیچ‌گونه برداشتی از منابع آب زیرزمینی است. به علت هم‌جواری دشت تبریز با دریاچه ارومیه از سمت غرب و برداشت مازاد از آبخوان که باعث نفوذ آب شور به سفره آب زیرزمینی شده است؛ هرچقدر به سمت غرب و شمال منطقه حرکت شود بر غلظت یون‌ها افزوده می‌شود. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی با گذشت زمان در قسمت شمال شرقی که بخشی از شهر هریس می‌باشد؛ غلظت یون‌ها کاهش داشته است. بهبود کیفیت آب این بخش از دشت، ناشی از انسداد برخی چاه‌ها در شهر هریس و نصب کنتورهای هوشمند بر سر چاه‌ها در سال‌های اخیر است که مانع از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی شده است.

متغیر مربع بین دو نقطه همسایگی به فاصله h است که در رابطه ۳ نشان داده شده است (Marsily, 1986; Journel, 1989).

$$\gamma^{(h)} = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [(z(x+h) - z(x))^2] \quad (3)$$

$z(x)$ و $z(x+h)$ ارزش متغیر در نقاط x و نقطه‌ای به فاصله h از نقطه x اند. آنالیز همبستگی مکانی بر اساس ساختار نیم-واریوگرام‌ها که وجود وابستگی مکانی را در بین متغیرها تعیین می‌کنند، صورت می‌گیرد. نیم‌واریوگرام‌ها برای تعیین درجه همبستگی و دامنه وابستگی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر نیم-واریوگرام می‌تواند به سه پارامتر اثر قطعه‌ای، سقف و دامنه توصیف شود (Yang et al., 2009). مدل‌های روش کریجینگ عبارتند از: Spherical, Circular, Gaussian, Exponential, Pantaspherical, Tetraspherical, Rational Quadratic, Hole Effect, K-Bessel, J-Bessel و Stable.

برای ارزیابی روش‌های مذکور از ابزار Geostatistical Analyst در نرم‌افزار Arc GIS 10.4 استفاده گردید (دلبری و همکاران، ۱۳۹۵).

معیارهای ارزیابی

به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های پیش‌بینی شده و انتخاب بهترین روش درون‌یابی، از دو معیار ارزیابی شاخص ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (4)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i) \quad (5)$$

که در آن‌ها، x_i مقدار داده مشاهده‌شده، y_i مقدار داده، N مجموع مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده، f_i مقدار پیش‌بینی‌شده و o_i مقدار مشاهده‌شده می‌باشد.

نتایج و بحث

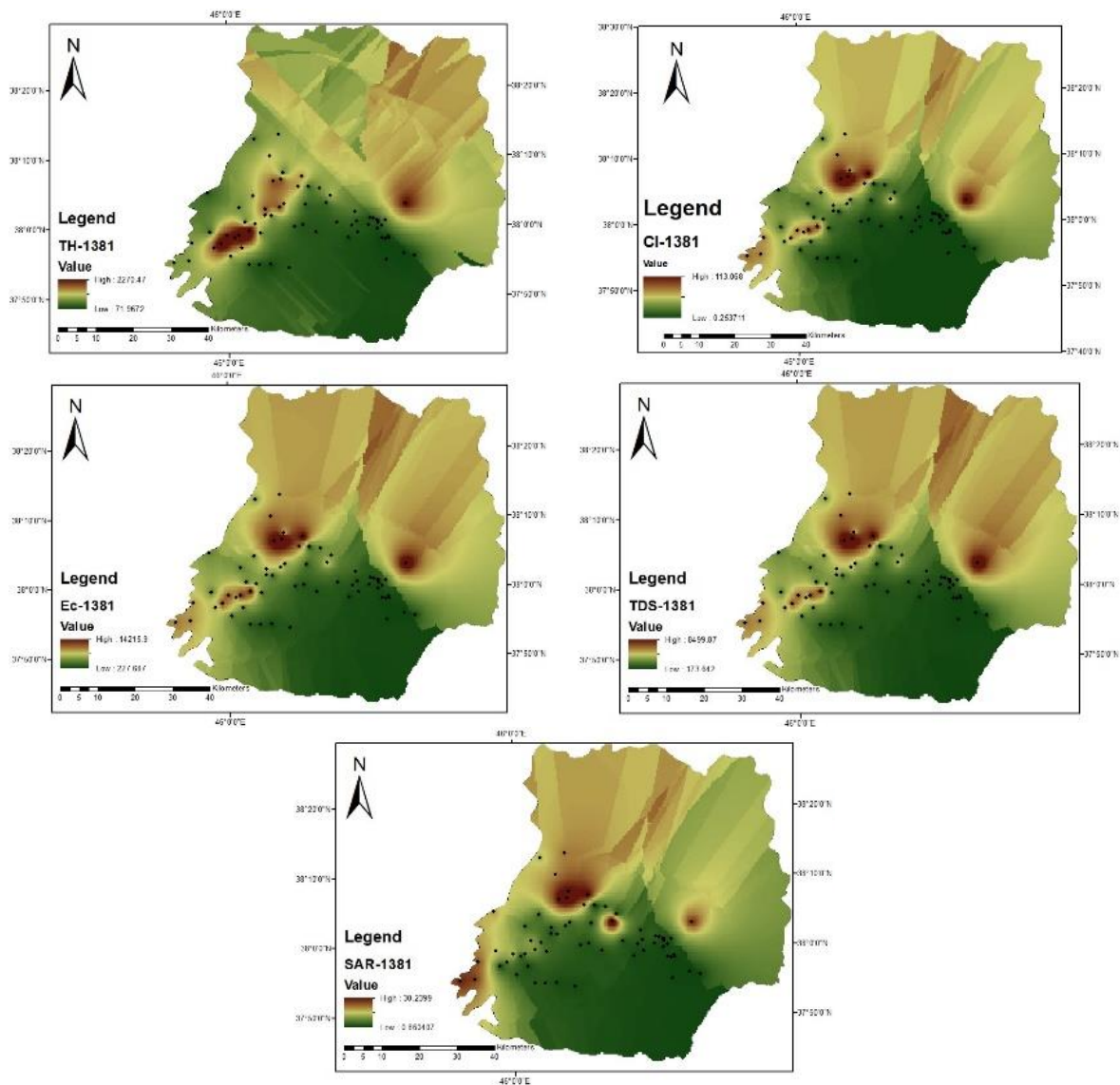
روش IDW و انواع مدل‌های RBF و کریجینگ در نرم‌افزار Arc GIS اجرا شد. مقادیر RMSE و ME برای هر یک از روش‌های معین و زمین‌آماری برای پارامترهای سولفات، کلر، pH، کل جامدات محلول، سختی کل، نسبت جذبی سدیم،

جدول ۳- خطاهای تخمین زده شده برای هر یک از روش های درون یابی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۸۱.

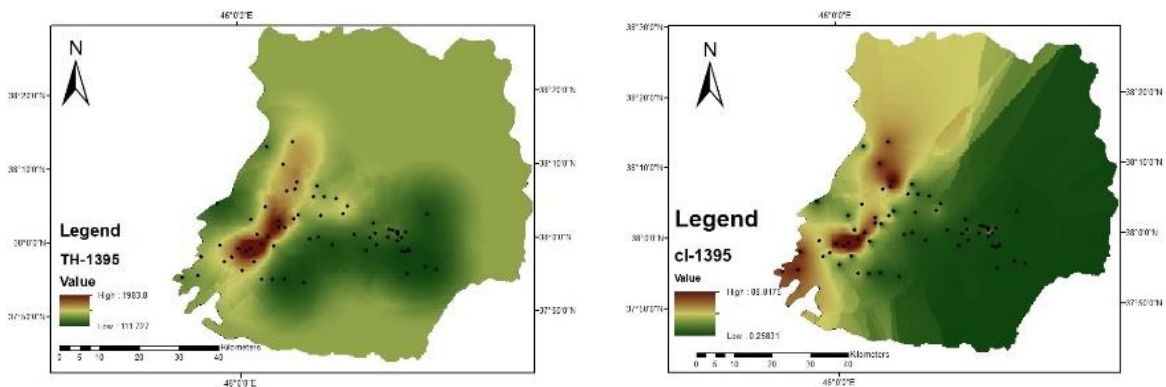
معیار		مدل بهینه انتخاب شده	روش های درون یابی	پارامتر کیفیت آب
ME	RMSE			
-۰/۵۲	۵/۳۱	-	IDW	SO ₄
-۰/۱۷	۴/۸۷	Spline with tension	RBF	
-۰/۰۶	۴/۶۱	Hole Effect	*Kriging	
-۰/۵۷	۲۱/۳۹	-	IDW	Cl
-۰/۵۶	۲۰/۸	Completely Regularized Spline	*RBF	
-۰/۳۷	۲۱/۲۷	Exponential	Kriging	
-۰/۰۸	۰/۵۷	-	IDW	pH
-۰/۰۴	۰/۵۵	Spline with tension	RBF	
.	۰/۵۴	Exponential	*Kriging	
۳۶/۸۷	۱۶۰۷/۲	-	IDW	TDS
-۴۶/۲۱	۱۵۶۴/۶۴	Completely Regularized Spline	*RBF	
-۴۰/۸	۱۵۹۵/۳۴	Exponential	Kriging	
۶۸/۲۲	۵۱۸/۲۱	-	IDW	TH
۱۸/۲۴	۴۷۹/۲۷	Spline with tension	RBF	
۵/۹۶	۴۷۵/۹۴	k-Bessel	*Kriging	
-۰/۴۲	۵/۲	-	IDW	SAR
-۰/۳۴	۵/۰۷	Spline with tension	*RBF	
-۰/۲۳	۵/۰۹	Exponential	Kriging	
۸۹/۲۳	۲۶۰۶/۰۸	-	IDW	EC
-۶۰/۸۶	۲۵۲۰/۲۸	Completely Regularized Spline	*RBF	
-۴۹/۵۵	۲۵۸۰/۰۴	Exponential	Kriging	
-۰/۵۴	۱۸/۱۴	-	IDW	Na
-۰/۹۶	۱۷/۸۲	Spline with tension	*RBF	
-۰/۷	۱۸/۱۷	Exponential	Kriging	
-۰/۰۷	۴/۴۳	-	IDW	Mg
-۰/۰۹	۴/۲۸	Thin Plate spline	*RBF	
-۰/۱۶	۴/۴	Exponential	Kriging	
۱/۲۹	۶/۹۷	-	IDW	Ca
-۰/۵۳	۶/۲۵	Completely Regularized Spline	RBF	
-۰/۲۹	۶/۲۳	Stable	*Kriging	

جدول ۴- خطاهای تخمین زده شده برای هر یک از روش های درون یابی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۹۵.

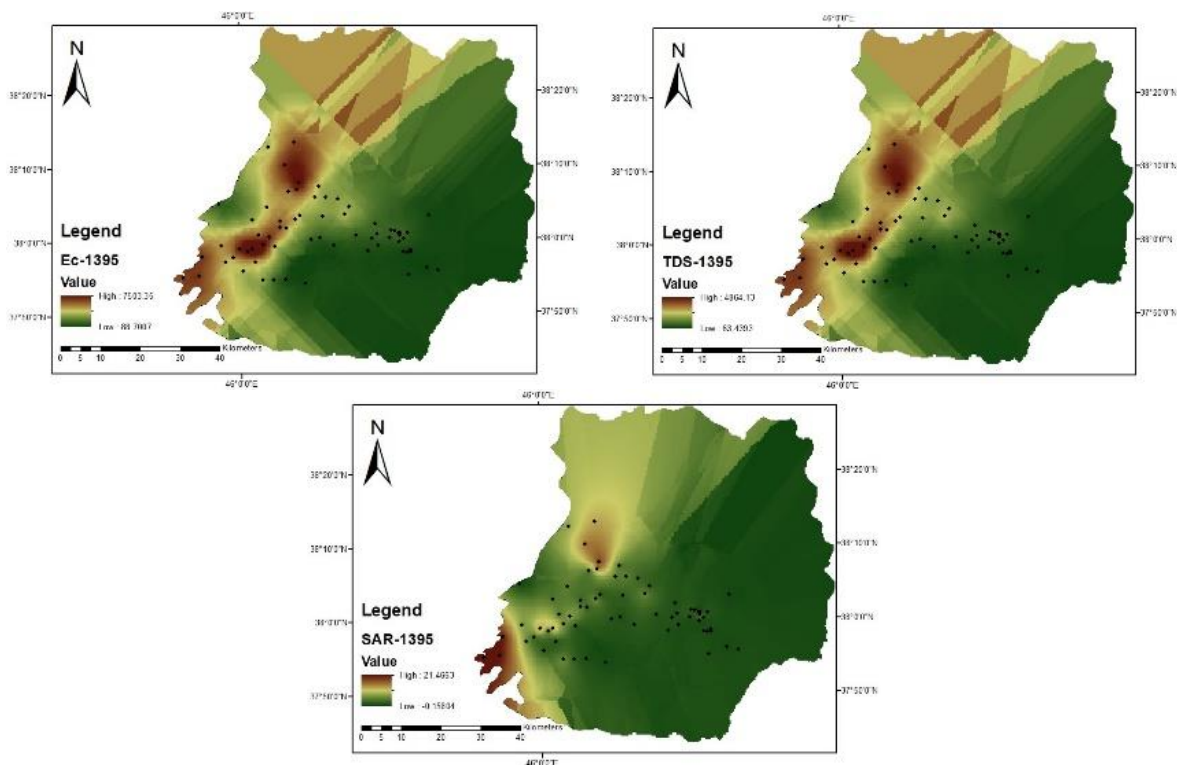
معیار		مدل بهینه انتخاب شده	روش های درون یابی	پارامتر کیفیت آب
ME	RMSE			
-۰/۶۶	۳/۶۸	-	IDW	SO ₄
-۰/۳۷	۳/۹۳	Inverse Multiquadric	RBF	
-۰/۱۳	۳/۱۶	J-Bessel	*Kriging	
۲/۵۴	۱۶/۶	-	IDW	Cl
-۰/۸۴	۱۵/۹	Completely Regularized Spline	*RBF	
-۰/۵۳	۱۵/۹۴	Spherical	Kriging	
-۰/۰۱	۰/۳۷	-	IDW	pH
-۰/۰۱	۰/۳۵	Spline with tension	*RBF	
-۰/۰۱	۰/۳۷	Rational Quadratic	Kriging	
۲۱۳/۳۶	۱۲۴۱/۰۵	-	IDW	TDS
۷۲/۰۸	۱۱۸۰/۹۲	Spline with tension	RBF	
۴۰/۴۵	۱۱۵۸/۵۶	Circular	*Kriging	
۱۱۹/۲۶	۵۱۳/۴۶	-	IDW	TH
۴۷/۶۴	۴۷۳/۰۹	Spline with tension	RBF	
۲۴/۵۶	۴۶۰/۰۶	Circular	*Kriging	
-۰/۰۲	۲/۹۳	-	IDW	SAR
-۰/۱۸	۲/۸۶	Multiquadric	*RBF	
-۰/۰۷	۳/۲۷	Exponential	Kriging	
۳۳۰/۳۵	۱۹۰۸/۴۵	-	IDW	EC
۱۱۲/۱۶	۱۸۱۵/۵۳	Spline with tension	RBF	
۶۲/۳۷	۱۷۸۱/۲۲	Circular	*Kriging	
۱/۰۵	۱۱/۳۷	-	IDW	Na
-۰/۱۸	۱۱/۱۵	Spline with tension	*RBF	
-۰/۳۱	۱۱/۶۶	Exponential	Kriging	
-۰/۶۶	۳/۵۹	-	IDW	Mg
-۰/۲۶	۳/۳۸	Spline with tension	RBF	
-۰/۰۸	۳/۳۱	Spherical	*Kriging	
۱/۷۲	۷/۱۳	-	IDW	Ca
-۰/۶۹	۶/۵۴	Spline with tension	RBF	
-۰/۳۶	۶/۳۸	Circular	*Kriging	



شکل ۲- پهنه‌بندی برخی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۸۱.



شکل ۳- پهنه‌بندی برخی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۹۵.



ادامه شکل ۳- پهنه‌بندی برخی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت تبریز، سال ۱۳۹۵.

در حالت کلی برای طبقه‌بندی آب زیرزمینی آب آبیاری از دیاگرام ویلکاکس^{۲۰} استفاده می‌شود. در این دیاگرام براساس دو فاکتور نسبت جذبی سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) کیفیت آب برای کشاورزی مشخص می‌گردد. براساس جدول ۵، در دیاگرام ویلکاکس، آب کشاورزی به ۱۶ رده از C1S1 تا C4S4 تقسیم‌بندی می‌شود. بازه‌بندی SAR و EC در جدول ۶ آورده شده است (Wilcox, 1995).

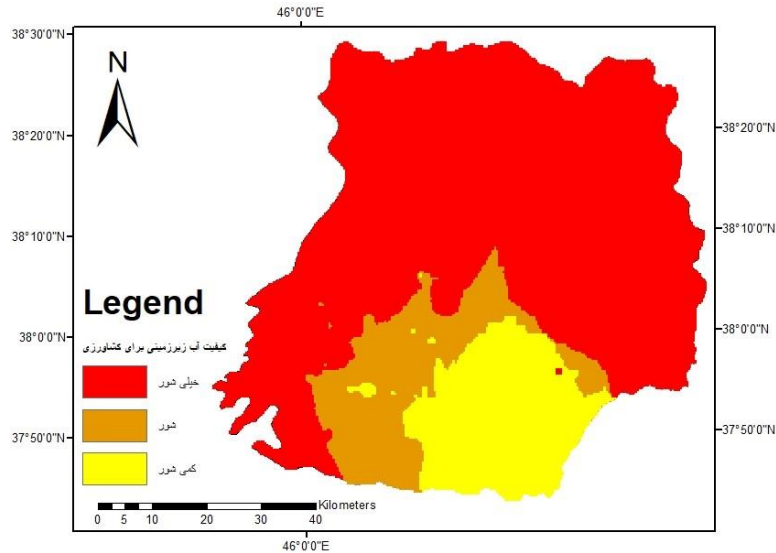
جدول ۵- طبقه‌بندی آب آبیاری کشاورزی براساس دیاگرام ویلکاکس.

نوع کیفیت آب برای کشاورزی	رده آب
شیرین - برای کشاورزی کاملاً بی‌ضرر	C1S1
کمی‌شور- برای کشاورزی تقریباً مناسب	C2S1,C2S2,C1S2
شور- مناسب برای کشاورزی با اعمال تمهیدات	C3S3,C3S2,C3S1,C2S3,C1S3
خیلی شور - مضر برای کشاورزی	C1S4,C2S4,C3S4,C4S4,C4S3,C4S2,C4S1

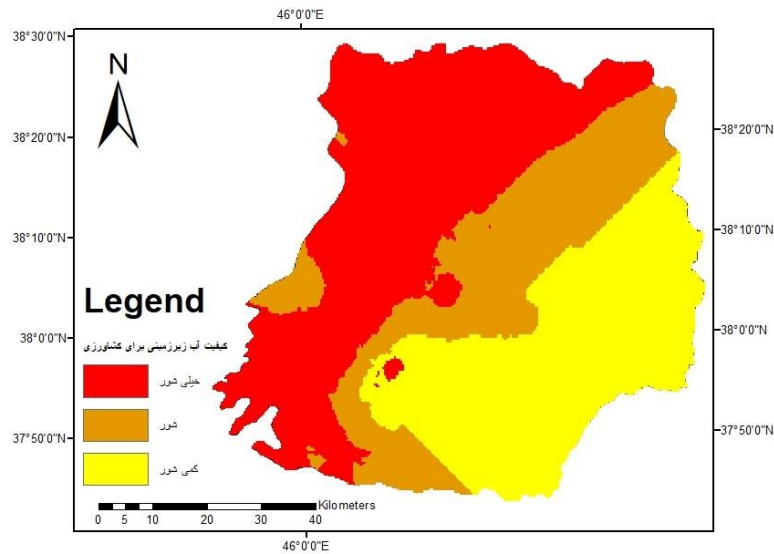
جدول ۶- بازه‌های EC و SAR در دیاگرام ویلکاکس..

نسبت جذبی سدیم SAR ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$)	کلاس	هدایت الکتریکی EC ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$)	کلاس
۰-۱۰	S1	۲۵۰-۱۰۰	C1
۱۸-۱۰	S2	۷۵۰-۲۵۰	C2
۲۶-۱۸	S3	۲۲۵۰-۷۵۰	C3
>۲۶	S4	>۲۲۵۰	C4

طبق نقشه کلاس‌بندی شده در شکل ۴ و ۵، کیفیت آب زیرزمینی دشت تبریز به سه کلاس C2S1 (کمی شور)، C3S1 (شور) و C4S2 (خیلی شور) تقسیم‌بندی شده است. با بررسی نقشه‌های به‌دست‌آمده بر اساس دیاگرام ویلکاکس مشاهده می‌شود، که آب زیرزمینی این دشت در بیشتر نقاط آن برای مصارف کشاورزی مناسب نیست. البته کیفیت آب زیرزمینی در بخش شرقی دشت، در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۸۱ بهتر شده و برای کشاورزی تقریباً مناسب می‌باشد.



شکل ۴- نقشه کلاس‌بندی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، سال ۱۳۸۱.



شکل ۵- نقشه کلاس‌بندی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، سال ۱۳۹۵.

هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت تبریز، وضعیت پارامترهای مختلف، شامل سولفات، کلر، pH، کل جامدات محلول، سختی کل، نسبت جذبی سدیم، هدایت الکتریکی، سدیم، منیزیم و کلسیم، در سطح دشت مشخص شد. بدین ترتیب، از سال ۱۳۸۱ تا سال ۱۳۹۵ غلظت و تراکم پارامترها در بخش شمال‌غرب، غرب و جنوب‌غربی افزایش می‌یابد که

نتیجه‌گیری

به سبب بهره‌برداری بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در دشت تبریز طی سالیان اخیر و همچنین مجاورت این دشت با دریاچه ارومیه که سبب نشست آب شور در آبخوان می‌شود؛ این منطقه به‌عنوان دشت ممنوعه بحرانی شناخته شده است. طبق نقشه‌های تهیه‌شده جهت پهنه‌بندی پارامترهای

حیدرزاده، ن.، معزی، م.، ۱۳۹۷. تحلیل کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت آمل-بابل و پهنه‌بندی سدیم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۰(۴): ۸۱-۹۳.

دلبری، م.، امینی رکان، ا.، صادقی مرشد، مجتبی، ۱۳۹۵. پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی استان گلستان برای مصارف کشاورزی با استفاده از زمین‌آمار و GIS. نشریه هیدروژئولوژی، ۱(۱): ۱۰۷-۱۲۳.

رزمخواه، ه.، محمدی، ع.، رستمی راوری، ا.، فرارویی، ع.، ۱۳۹۹. تحلیل شوری و پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، مطالعه موردی: دشت خفر جهرم. سومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، دانشگاه شیراز، ۶-۴ آذر ماه ۱۳۹۹، شیراز، ایران.

کلانتری، ن.، ایرانی اصل، ا.، محمدی، ه.، ۱۴۰۱. بررسی کمی و کیفی آبخوان باغملک با استفاده از روش تحلیل آماری، روش‌های هیدروشیمیایی و GIS. نشریه هیدروژئولوژی، ۱(۱۷): ۸۱-۹۳.

گنجه‌ای، س.، شیرینی، ن.، شیرینی، ج.، ۱۳۹۹. مدلسازی مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت آذرشهر برای مصارف کشاورزی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار. نشریه دانش آب و خاک، ۳۰(۴): ۱۱۷-۱۰۵.

محمدی، ج.، ۱۳۸۵. پدومتری ۲ (آمار مکانی)، انتشارات پلک، تهران، ایران، ۴۵۳.

محمدی، ص.، سلاجقه، ع.، ۱۳۹۶. بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی به کمک بهترین تخمین‌گر زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت کرمان). نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۳۹): ۶۱-۴۹.

Asghari Moghaddam, A., 1991. The hydrology of Tabriz area, Iran. Ph.D Thesis. University College London, London.

Broomhed, D.S & Lowe, D., 1988. Multivariate functional interpolation and adaptive networks. Journal complex system, 4: 321-355.

این امر خود حاکی از کاهش کیفیت آب در این منطقه نسبت به مناطق دیگر دشت تبریز می‌باشد. در بخش شرقی و جنوب‌شرقی با کاهش غلظت پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی افزایش یافته و آب این منطقه از دشت تقریباً مناسب برای کشاورزی می‌باشد. با مقایسه نقشه‌های تهیه‌شده برای پارامترها مشاهده می‌شود؛ پهنه‌های مشخص‌شده برای این پارامترها به‌جز سختی کل، تقریباً از یک الگوی خاص پیروی کرده و میزان کمینه و بیشینه تمامی پارامترها در نواحی مشترکی از دشت واقع شده است. از آنجاکه موضوع پژوهش حاضر بررسی روش‌های زمین‌آمار می‌باشد، این روش‌ها در کنار روش‌های جبری موردبررسی قرار گرفت و مشاهده شد که پارامترهای متفاوت و داده‌های آماری مختلف نیازمند روش‌های مختلف جبری و زمین‌آمار می‌باشند و نمی‌توان جهت پهنه‌بندی پارامترهای متفاوت تنها از یک روش استفاده کرد. ضمن اینکه روش‌های جبری و روش‌های زمین‌آمار هر دو کارایی سودمندی در پهنه‌بندی عناصر مختلف داشته‌اند. بررسی مطالعات انجام‌شده نیز نشان می‌دهد که روش‌های درون‌یابی، بسته به نوع متغیر و ویژگی‌های منطقه، تراکم نقاط اندازه‌گیری و نحوه آرایش آن‌ها دقت متفاوتی را ارائه می‌کنند و نمی‌توان نتایج یک منطقه را به‌راحتی به منطقه‌های دیگر تعمیم داد. با توجه به آنچه بیان شد، روش‌های آماری به‌منظور تحلیل نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌های آب زیرزمینی مناسب هستند و می‌توانند به‌عنوان یک ابزار کمکی در تغییرات مکانی متغیرهای کیفیت آب در تصمیم‌گیری بکار گرفته شوند.

منابع

اسفندیاری درآباد، ف.، قربانی فیلی آبادی، ر.، نصیری خیابوی، ع.، مصطفی‌زاده، ر.، ۱۳۹۸. مقایسه عملکرد روش‌های جبری و زمین‌آمار در تعیین تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بروجن. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۰): ۱۱۵-۱۳۰.

پیرزاده، ب.، اسور، ط.، ۱۳۹۹. تحلیل تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی به کمک روش‌های زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت سیرجان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۲): ۲۶۶-۲۷۵.

- qualitative parameters (Case study: Gonabad plain). *Journal of research in environmental health*, 1(3): 165-176.
- Said, A., Yurtal, R., Cetin, M., Golpinar, M., 2021. Evaluation of some groundwater quality parameters using geostatistics in the urban coastal aquifer of Bosaso plain, Somalia. *Journal of Agricultural Sciences (Tarim Bilimleri Dergisi)*, 27(1): 88-97.
- Sarath Prasanth, S V., Magesh, N., Jitheshlal, K., Chandrasekar, N., Gangadhar, K., 2012. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the coastal stretch of Alappuzha District, Kerala, India. *Applied Water Science*, 2(3): 165-175.
- Wilcox, L., 1955. *Classification and use of irrigation waters*. US DA, Washington.
- Yang, P., Mao, R., Shao, H., Gao, Y., 2009. An investigation on the distribution of eight hazardous heavy metals in the suburban farmland of China. *Journal of hazardous materials*, 167 (1): 1246-1251.
- Zhou, Y., Wang, Y., Li, Y., Zwahlen, F., Boillat, J., 2013. Hydrogeochemical characteristics of central Jiangnan Plain, China. *Environ. Earth Sci.*, 68: 765-778.
- Dibike, Y.B., Slomatine, D., Abbott, M.B., 1999. On the encapsulation of numerical-hydraulic models in artificial neural network. *Journal of hydraulic research*, 37 (2): 147-161.
- Journel, A.G., 1989. *Fundamentals of geostatistics in five lessons*, Short course in geology, American geophysical union, 8: 1-10.
- Khosravi, Y., Abbasi, E., 2015. Spatial analysis of environmental data with geostatistics. *Azar klak, zanzan*, 280.
- Marsily, G.d., 1986. *Quantitative hydrogeology*. Academic press, 440p.
- Masood, A., Aslam, M., Pham, Q.B., Khan, W., Masood, S. 2021. Integrating water quality index, GIS and multivariate statistical techniques towards a better understanding of drinking water quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, pages 26860-26876.
- Moghaddam, A., Moteallemi, A., Joulaei, F., Peirovi, R., 2018. A spatial variation study of groundwater quality parameters in the Gonabad Plain using deterministic and geostatistical models. *Desalination and Water Treatment*, 103: 261-269.
- Momeni Damaneh, J., Joulaei, F., Alidadi, H., Peiravi, R., 2015. Evaluation of interpolation methods to determine spatial variation of groundwater