

مقایسه مدل‌های IBK و M5 با روش‌های زمین‌آماري در کیفیت آب زیرزمینی

فهیمة خادم‌پور^۱، عباس خاشعی سیوکی^{۲*}، علی شهیدی^۳

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، دانشکده کشاورزی، بیرجند، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، دانشکده کشاورزی، بیرجند، ایران.

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، دانشکده کشاورزی، بیرجند، ایران.

* نویسنده مسئول: abbaskhashei@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷

چکیده

در مدیریت کمی آب زیرزمینی، یکی از موارد بسیار مهم و اساسی، تخمین سطح آب زیرزمینی است که معمولاً براساس داده‌هایی که از شبکه چاه‌های مشاهده‌ای بدست می‌آید، انجام می‌گردد. در این پژوهش، هدف اصلی، بررسی شوری آب زیرزمینی دشت مشهد در بازه زمانی ۱ تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ می‌باشد. برای این منظور، از دو مدل آماری IBK و M5 استفاده و نتایج آن‌ها با روش‌های زمین‌آماري مقایسه گردید. در این راستا، از نمونه‌برداری نقطه‌ای با مختصات جغرافیایی X و Y استفاده شد. همچنین، متغیر کلر به عنوان یک متغیر مهم و معیاری برای شوری آب زیرزمینی مد نظر قرار گرفت. دلیل اصلی انتخاب کلر به عنوان متغیر مورد بررسی، همبستگی مناسب آن با ضریب هدایت الکتریکی است. در نهایت، نتایج نشان داد که مدل IBK عملکرد بهتری نسبت به مدل M5 و روش‌های زمین‌آماري داشت. با استفاده از مدل IBK، میزان دقت در پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی به شکل قابل توجهی افزایش یافت. بر اساس مقادیر آماری به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل IBK با داشتن ضریب تبیین برابر با ۰/۹۸، خطای جذر میانگین مربعات برابر با ۲۰۰/۸۵ و میانگین خطای مطلق برابر با ۹۷/۴۸، بهترین مدل برای پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی در دشت مشهد است. در نتیجه، مدل IBK قابلیت بالایی در تخمین دقیق شوری آب زیرزمینی را دارد و می‌توان آن را به عنوان یک ابزار موثر در مدیریت کمی آب زیرزمینی، به کار برد. این مدل با دقت و عملکرد بالا، می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران در اتخاذ تدابیر و راهبردهای مناسب برای حفظ و بهینه‌سازی منابع آب زیرزمینی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، دشت مشهد، شوری، واریوگرام، نرم‌افزار WEKA.

مقدمه

سطح آب زیرزمینی در دشت‌ها جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آبی موجود در دشت‌ها عمیقاً احساس می‌شود. از اساسی ترین موارد در مدیریت کمی منابع آب زیرزمین، تخمین سطح آب با استفاده از داده‌های برداشت شده از شبکه چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشد (زمانی احمد محمودی و همکاران، ۱۳۹۳). در سالیان اخیر، برداشت از منابع آب زیرزمینی به دلیل رشد جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعت افزایش یافته است و برداشت بی‌رویه باعث شورت‌تر شدن منابع شده است. از آنجا که

آب‌های زیرزمینی، بزرگ‌ترین ذخیره قابل‌دسترس آب شیرین در کره زمین را تشکیل می‌دهند. با توجه به کاهش نزولات جوی، خشک‌سالی سال‌های اخیر و در نتیجه کمبود آب در پهنه وسیعی از کشور و افزایش میزان تقاضا برای مصارف مختلف، مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی از اهمیت و حساسیت بسیار زیادی برخوردار است. برای اعمال یک مدیریت صحیح نیاز به شناسایی، به مدل درآوردن و تخمین

در شبکه (MLP) نشان داد که الگوریتم کوتاه مدت بهترین پیش‌بینی را برخواهد داشت.

Kisi (2012) دقت مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان^۱ را در مدل‌سازی تأخیر تعرق مرجع در جنوب منطقه کالیفرنیا بررسی کردند. نتایج با مدل‌های تجربی و مدل شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شد که در نهایت بیانگر دقت این مدل نسبت به روش‌های دیگر بود.

Liang et al. (2016) به برآورد نیترا-نیتروژن با استفاده از روش کوکریجینگ و کریجینگ معمولی در رودخانه راکوون^۲ پرداختند. نتایج نشان داد که مدل کوکریجینگ نسبت به کریجینگ مناسب‌تر می‌باشد.

Maroufpoor et al. (2017) به بررسی توزیع مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت‌های استان کرمان با شبکه عصبی مصنوعی-فازی و مدل‌های زمین آماری پرداختند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر مدل‌ها دقیق‌تر بوده است. همچنین روش کوکریجینگ از روش کریجینگ بهتر عمل کرده است.

بررسی‌ها نشان داده است که تاکنون مطالعات محدودی در ارتباط با مدل‌های IBK و M5 و مقایسه آن‌ها با روش‌های زمین آماری صورت گرفته است؛ لذا، هدف از انجام این پژوهش بررسی شوری آب زیرزمینی دشت مشهد در بازه زمانی ۱ تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ با استفاده از مدل‌های IBK و M5 نرم‌افزار WEKA 3.8^۳ و مقایسه آن‌ها با روش‌های زمین آماری می‌باشد. در نهایت، بهترین مدل برای تخمین شوری آب دشت مشهد بر اساس شاخص‌های آماری انتخاب می‌شود.

مواد و روش‌ها

دشت مشهد با وسعت ۱۶۵۰۰ کیلومتر مربع در شمال شرق استان خراسان رضوی واقع شده است. این منطقه بین طول‌های جغرافیایی ۲۰°۵۸' تا ۸°۶۰' و عرض‌های ۴۰°۳۵' تا ۳۶°۳' ایران قرار دارد. دشت مشهد از سمت شمال به ارتفاعات هزار مسجد (کپه داغ) و از جنوب به کوه‌های بینالود، همچنین از شمال غرب توسط حوضه رودخانه اترک و جنوب شرق با حوضه رودخانه جامرود محدود شده است. جهت کشیدگی هر دو رشته کوه از شمال غرب به جنوب شرق است.

اندوخته‌های آب زیرزمینی از مهمترین منابع بهره‌برداری و توسعه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌روند، پیش منطقه‌ای سطح سفره‌ها و منظور کردن تراز آبی، از بنیادی‌ترین شاخصه‌ها به منظور تأمین توسعه پایدار در چنین مناطقی به حساب می‌آیند (احمدیان و همکاران، ۱۳۹۴).

امروزه جهت پیش‌بینی، یافتن و درک روابط بین پارامترهای مؤثر در تخمین و بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی از روش‌های پیشرفته استفاده می‌گردد. یکی از روش‌های معمول، استفاده از مدل‌های رایانه‌ای می‌باشد، که با توجه به پیشرفت‌ها و قابلیت‌های کامپیوتر در دهه‌های اخیر گسترش چشمگیری یافته است (زمانی احمد محمودی و همکاران، ۱۳۹۳).

در پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی، مطالعات زیادی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

خاشعی سیوکی و سربازی (۱۳۹۳)، به بررسی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های LS-SVM، MLP و زمین آماری در دشت مشهد پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که برای درون‌یابی کیفیت آب زیرزمینی روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ ارجحیت دارد.

رضایی و همکاران (۱۳۹۳)، به طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان دشت رامهرمز پرداختند. نتایج نشان داد که مدل LS-SVM عملکرد مناسبی با $R^2=0.9992$ داشته است.

نکوامال کرمانی و میرعباسی نجف آبادی (۱۳۹۵)، به ارزیابی روش‌های درون‌یابی در تخمین سطح آب زیرزمینی دشت سرخون پرداختند. نتایج مقایسه روش‌ها نشان داد که روش کریجینگ معمولی کروی بهترین روش جهت درون‌یابی سطح آب زیرزمینی دشت سرخون استان هرمزگان می‌باشد.

Barcae and Passarella (2008) برای تهیه نقشه خطر نیترا-نیتروژن از روش کریجینگ و روش‌های شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که روش کریجینگ مناسب‌تر می‌باشد. Lallahema et al. (2005) در مقاله خود به ارزیابی سطح آب زیرزمینی در یک آبخوان آهکی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج به دست آمده با حداقل نرون میانی

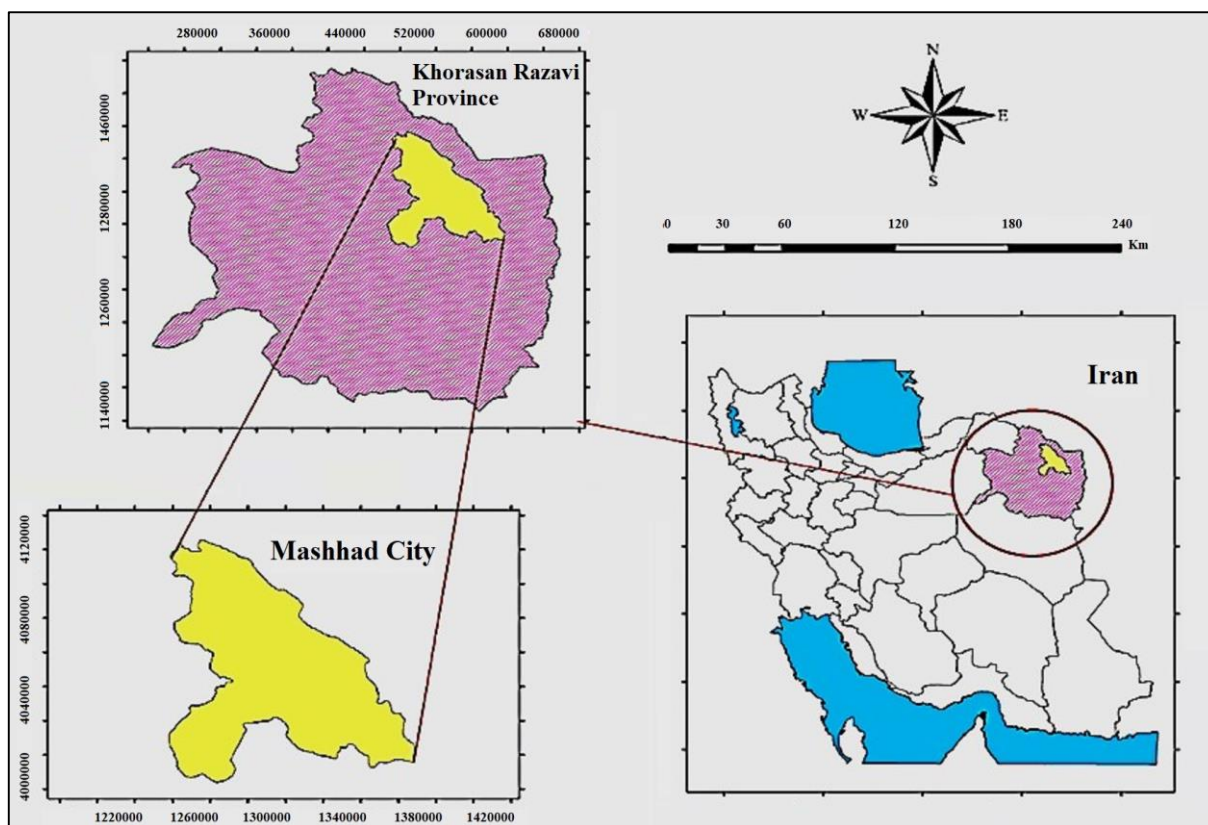
³ Waikato Environment for Knowledge Analysis (V. 3.8)

¹ Least Square Support Vector Machines (LS-SVM)

² Raccoon River

نیروی ایران جمع‌آوری گردید. این داده‌ها از ۱ تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ اندازه‌گیری شده‌اند. ۶۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد آن‌ها برای تست و سایر داده‌ها برای اعتبارسنجی، در نظر گرفته شدند. در این مطالعه، از مدل‌های IBK و M5 نرم‌افزار شبیه‌سازی WEKA استفاده گردید. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۱ مشخصات آماری پارامترهای مورد استفاده آورده شده است.

به سمت جنوب شرق شیب ملایم زمین دشت را شکل داده است. قله بینالود، مرتفع‌ترین نقطه با ارتفاع ۳۳۰۰ متر از سطح دریا است که در جنوب شرق واقع شده و تنگل شور به عنوان خروجی حوضه، با ارتفاع ۸۸۰ متر از سطح دریا پایین‌ترین نقطه است. آب و هوای منطقه، با روش دومارتن اصلاح شده، سرد و خشک است. میانگین بارندگی ۶۲/۱ میلی‌متر و تبخیر-تعرق آن ۳۴۸۳ میلی‌متر است. داده‌های کیفی ۱۲۲ حلقه چاه این دشت در این مطالعه استفاده شد. داده‌ها توسط وزارت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی.

Figure 1- Geographical Location of The Study Area.

دادند و توسط دولت نیوزیلند با مقاصد پژوهشی نیز مورد حمایت مالی قرار گرفت. البته واژه WEKA نام پرندای بومی است که فقط در آن منطقه وجود داشته و دارای خصوصیات کنجکاو است (Witten and Frank, 1993). در حال حاضر، این نرم‌افزار حاوی تعداد زیادی از تکنیک‌های یادگیری ماشین و داده‌کاوی است که امکان مقایسه تکنیک‌های یادگیری

نرم‌افزار WEKA

این نرم‌افزار اولین بار در سال ۱۹۹۲ به منظور جمع‌آوری و یکپارچگی الگوریتم‌های یادگیری ماشین و ابزاری برای پردازش داده‌ای با استفاده از جاوا^۴ پیاده‌سازی و به صورت کد باز تحت مجوز عمومی^۵ GNU GPL منتشر گردید و Witten and Frank (1993) با بکارگیری اهداف داده‌کاوی آن را ارتقا

² GNU General Public License

¹ Java

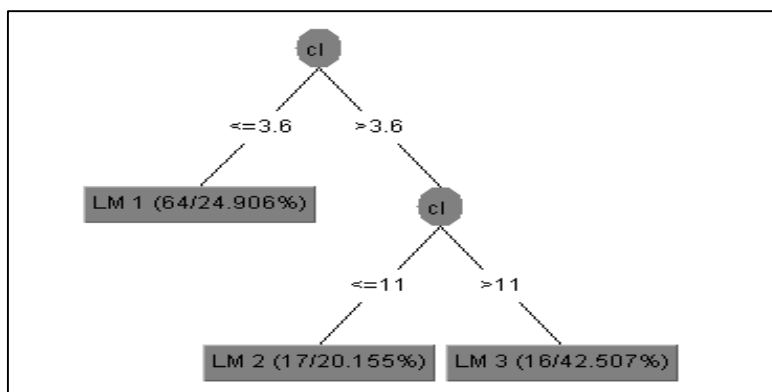
روش درخت تصمیم M5

مدل M5 یک مدل درختی برای پیش‌بینی صفات عددی پیوسته است که در آن توابع رگرسیونی خطی در برگ‌های این درخت متظاهر می‌شوند (Pal, 2006). یک درخت تصمیم معمولاً از چهار بخش ریشه، شاخه، گره‌ها و برگ‌ها تشکیل شده است که گره‌ها با دایره نشان داده می‌شوند و شاخه‌ها نشان دهنده اتصال بین گره‌ها می‌باشند. درخت تصمیم به منظور سادگی در رسم معمولاً از چپ به راست و یا از بالا به پایین کشیده می‌شود، به طوری که ریشه (گره اول) در بالا قرار می‌گیرد. انتهای یک زنجیره را برگ می‌نامند. هر گره مربوط به یک خصوصیت معین است و شاخه‌ها به معنای بازه‌ای از مقادیر هستند. این بازه‌های مقادیر بخش‌های مختلف مجموعه مقادیر معلوم را برای خصوصیت‌ها به دست می‌آورند (Fallahi et al., 2012). فرآیند انشعاب در هر گره بارها تکرار می‌شود تا به گره پایانی یا همان برگ برسد (شکل ۲) که در برگ، مجموع مجذور انحراف از میانگین داده‌ها حدوداً به صفر می‌رسد، با این کار درخت بزرگی توسعه پیدا خواهد کرد (نهرین و همکاران، ۱۳۹۲).

ماشین مختلف را می‌دهد. در یک واسط کاربر گرافیکی در این نرم‌افزار اجازه دسترسی به قابلیت‌هایی مثل تجسم و تحلیل بسیاری از الگوریتم‌های داده‌کاوی وجود دارد (Witten and Frank, 2000).

روش الگوریتم تنبل IBK

در این روش، ابتدا نزدیک‌ترین همسایه‌های متغیر در ماه قبلی بر اساس فاصله اقلیدسی تعیین شده و همسایه‌ها بر اساس یک تابع وزن که بیشترین وزن را به نزدیک‌ترین همسایه می‌دهد باز نمونه‌گیری می‌شوند. این روش در واقع تابع توزیع احتمال شرطی ماه فعلی را نسبت به ماه قبلی تخمین می‌زند و شبیه‌سازی را با استفاده از آن انجام می‌دهد. علاوه بر این، روش IBK، می‌تواند اطلاعات اضافی ویژگی‌های بزرگ مقیاس اقلیمی را نیز به دست دهد. همچنین در شبیه‌سازی چند متغیر از متغیرهای هواشناسی روزانه به کار رفت (Yates et al., 2003).



شکل ۲- ساختار درخت تجزیه.

Figure 2- The Structure of The Parse Tree.

جدول ۱- خصوصیات آماری پارامترهای مورد استفاده.

Table 1- Statistical Characteristics of The Used Parameters.

Parameter	Maximum	Minimum	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation
Longitude	760750	643300	706833	707345.54	1.00
Latitude	4095550	3999822	4040319	404038.41	1.00
Cl (meq/lit)	38	0.2	4.87	7.31	1.50
EC (μmos/cm)	5890	169	1415.67	1934.82	1.37

داده‌های تغییر نیافته و تغییر یافته به صورت لگاریتمی ترسیم شده است (Gundogdu and Guney, 2007).

ارزیابی عملکرد مدل

در پایان جهت ارزیابی و آزمون اعتبار مدل M5، IBK و زمین‌آماري به ارزیابی عملکرد آن‌ها پرداخته شد. برای ارزیابی عملکرد این مدل‌ها از آماره‌های ریشه متوسط خطای مربعات (RMSE)، متوسط قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) مطابق با رابطه ۲ تا ۴ استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{N} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

که در آن، N تعداد کل داده‌ها، X_i داده‌های شبیه‌سازی شده، Y_i داده‌های مشاهداتی، i گام‌های زمانی و $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ میانگین داده‌های X و Y می‌باشد.

نتایج و بحث

شکل ۳ همبستگی بین طول و عرض جغرافیایی و میزان کلر با شوری آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. رابطه EC با کلر به علت اثر کلر بر شوری آب، مستقیم است.

در جدول ۲، بهترین مدل پیش‌بینی برحسب بالا بودن ضریب همبستگی و پایین بودن مقادیر خطا مشخص شده است و بهترین مدل به ترتیب رتبه مشخص گردید. بنابراین، مدل IBK با توجه به بالا بودن R^2 و پایین بودن مقادیر MAE و RMSE پیش‌بینی مطلوب‌تری را نسبت به مدل M5 ارائه کرده است.

محاسبه واریوگرام‌های تجربی و مدل‌سازی تنوع مکانی هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی با استفاده از تحلیلگر زمین‌آمار نرم‌افزار ArcGIS 10.2 انجام شد. برای این کار از آموزش و اعتبارسنجی داده‌ها برای مدل IBK و M5 و داده‌های آزمون برای مدل زمین‌آماري استفاده شد. برای آزمون مدل زمین‌آماري، ابتدا نقشه‌های میان‌یابی هدایت الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 آماده و معادل EC در نقطه تعیین شد و با داده‌های واقعی یعنی داده‌های آزمون مقایسه شد. برای جلوگیری از بیش‌انطباقی^۶، یک معیار توقف به موقع به منظور بهبود سرعت و کارایی آموزش شبکه پذیرفته شد (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۰).

به‌منظور به‌دست آوردن پایداری مدل، مجموعه داده‌ها برای بار اول در محدوده صفر تا ۱ نرمال شدند و بعد از شبیه‌سازی با استفاده از رابطه ۱ به مقادیر اولیه برگشتند.

$$X_{norm} = \left[\frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right] \times 0.8 + 0.1 \quad (1)$$

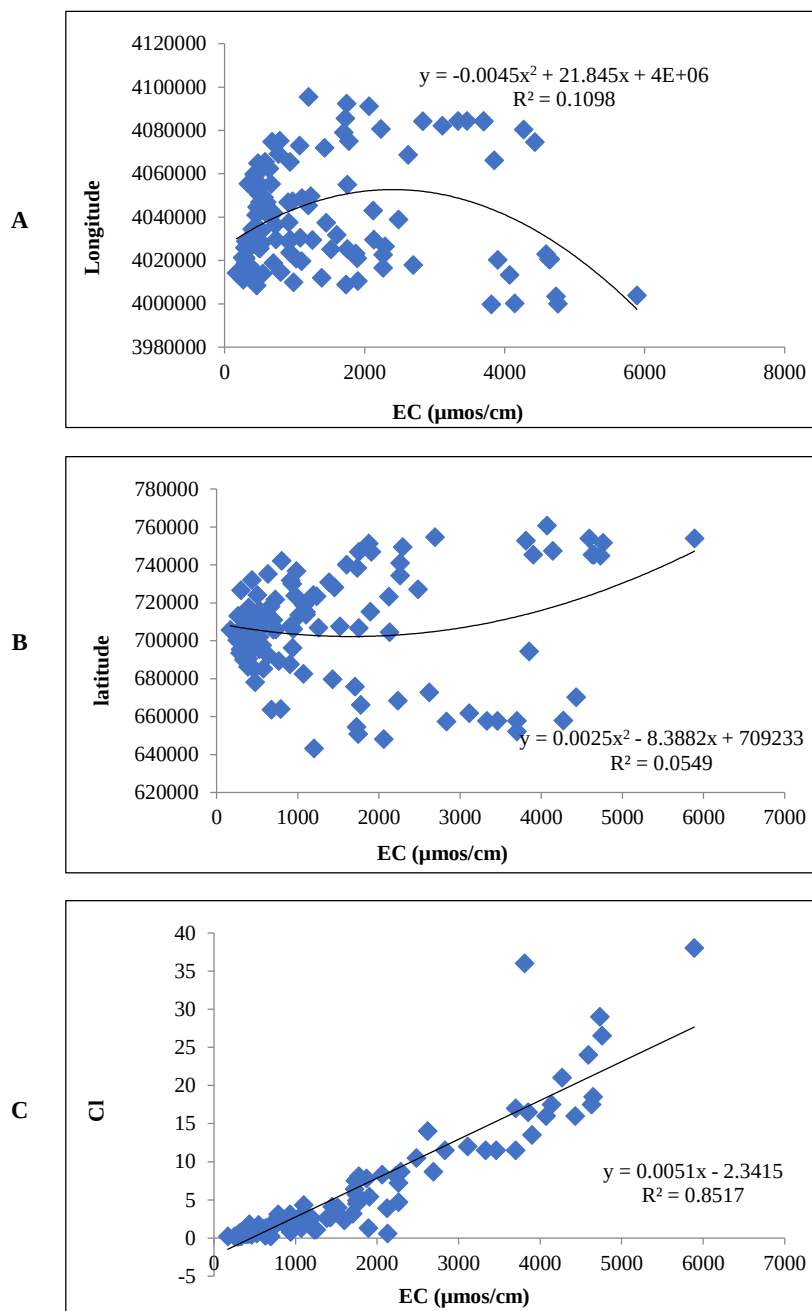
که در این رابطه، X مقدار اولیه، X_{min} و X_{max} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر، X_{norm} مقدار نرمال شده و ۰/۱ و ۰/۸ عوامل سنجش‌اند. برای عوامل سنجش مقادیر مختلفی ممکن است تعیین شود. با این حال هیچ قانون پیشنهادی در روش استاندارد وجود ندارد که بتواند در شرایط خاص استفاده شود. در این مطالعه عوامل سنجش به ترتیب ۰/۱ و ۰/۸ انتخاب شدند (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۰). روش‌های میان-یابی زمین‌آماري استفاده شده، در صورتی که داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند، بهترین نتایج را می‌دهند. برای تعیین نرمال بودن یا نبودن EC آب‌های زیرزمینی، روش‌های مختلف استفاده شده است (مقدم و خاشعی سیوکی، ۱۳۹۲). هیستوگرام EC آب‌های زیرزمینی با منحنی توزیع نرمال با

جدول ۲- نتایج مدل IBK و M5 برای برآورد شوری آب زیرزمینی.

Table 2- Results of IBK and M5 Models for Estimating Groundwater Salinity.

Rank	Model	Train			Test		
		R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE
1	IBK	0.9772	97.4799	200.853	0.9091	327.8736	411.1017
2	M5	0.9161	276.3666	406.0763	0.9686	284.0985	356.53

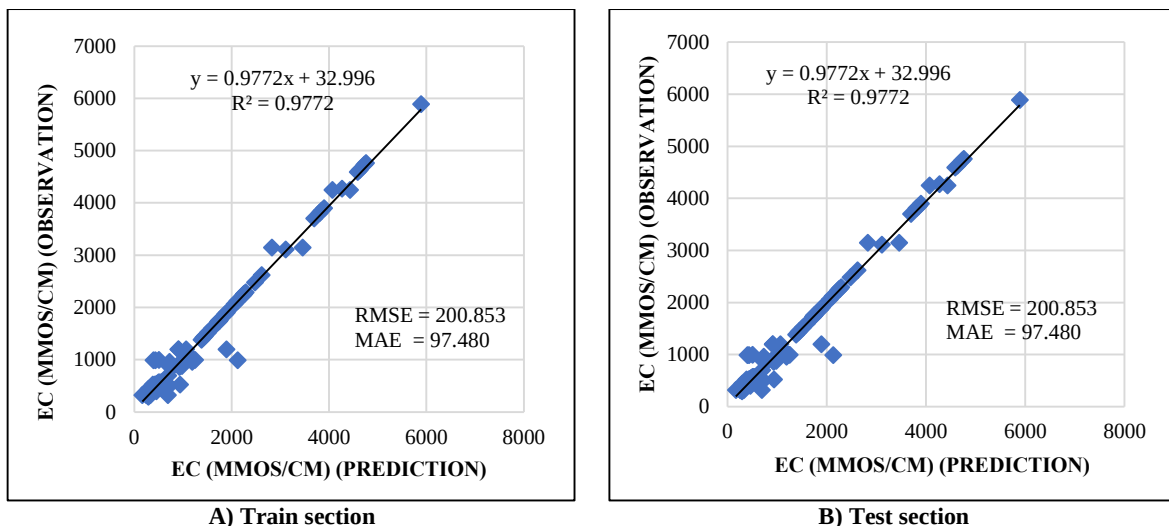
⁶ Overfitting



شکل ۳- همبستگی شوری بر حسب $\mu\text{mos/cm}$ با (A) طول جغرافیایی (X)، (B) عرض جغرافیایی (Y) و (C) میزان کلر (Cl).
Figure 3- Correlation of Salinity in Terms of $\mu\text{mos/cm}$ with A) Longitude (X), B) Latitude (Y) and C) Chlorine Content (Cl).

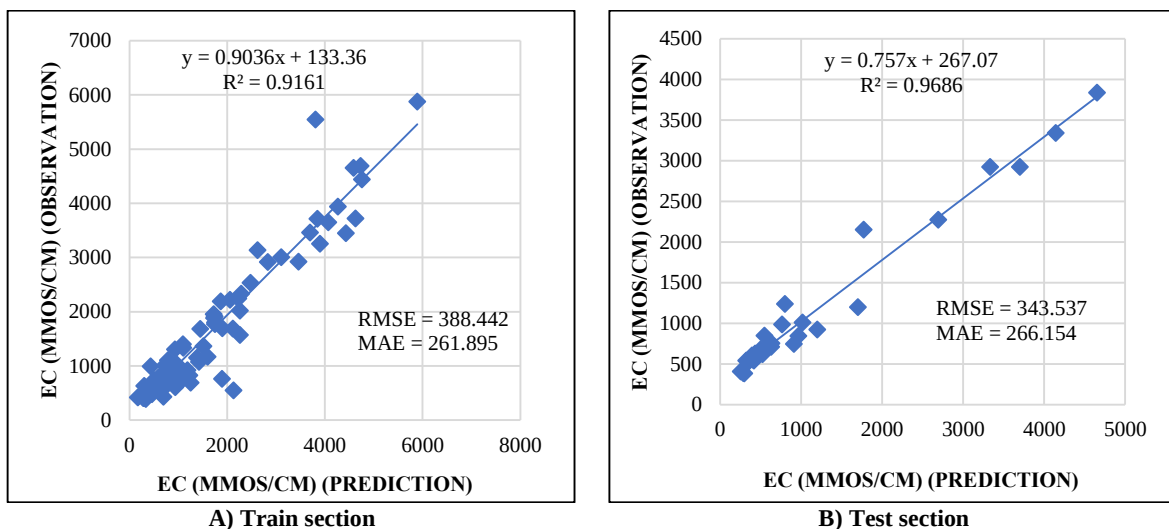
می‌دهد که سازگاری خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده وجود دارد. بهترین مدل برای این مطالعه، دارای مقدار R^2 آموزش و آزمایش داده‌ها به ترتیب ۰/۹۷۷۲ و ۰/۹۰۹۱ است. به‌طور کلی، مقادیر R^2 به وضوح نشان می‌دهد که مدل IBK بهترین مدل برای پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی در دشت مشهد می‌باشد.

شکل ۴ و ۵، عملکرد مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را در بخش آموزش و آزمایش نشان می‌دهد که پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی برای هر دو مدل IBK و M5 در مطالعه حاضر است. از این دو شکل می‌توان دید که مقادیر پیش‌بینی بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری هدایت الکتریکی تقریباً برای تمام مجموعه داده‌هاست. مقدار R^2 بیشتر از ۹۰ نشان



شکل ۴- نتایج مربوط به مدل مطلوب (IBK) در برآورد شوری آب زیرزمینی.

Figure 4- The Results of The Optimal Model (IBK) in The Estimation of Groundwater Salinity.



شکل ۵- نتایج مربوط به مدل M5 در برآورد شوری آب زیرزمینی مدل‌های زمین آماری.

Figure 5- The Results of M5 Model in The Estimation of Groundwater Salinity of Geostatistical Models.

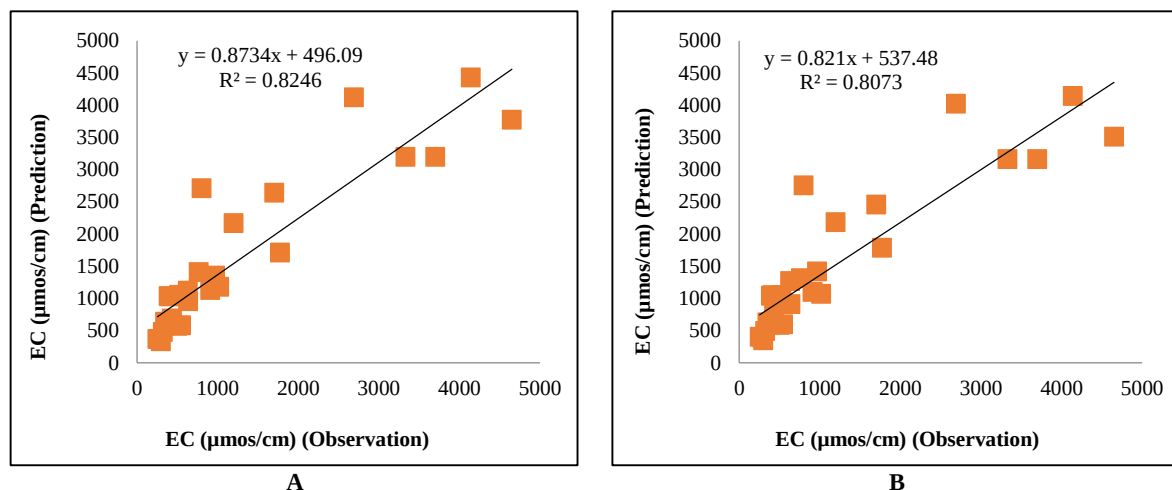
بر این اساس نتیجه گرفته می‌شود مدل کروی دارای وابستگی مکانی بالاتر است (Dagostino et al., 1998). در این مطالعه نسبت اثر قطعه‌ای، نشان از وجود وابستگی مکانی شدید ۰/۳۶ برای مدل کروی بود. رضایی و همکاران تأیید کردند که مدل کروی بهترین نتیجه را به شبیه‌سازی واریوگرام شوری آب زیرزمینی ارائه می‌دهد (رضایی و همکاران، ۱۳۸۹). در مطالعه حاضر، از روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ^۷ برای برآورد شوری آب زیرزمینی استفاده شد. کوکریجینگ شبیه به کریجینگ است و به

کارایی شش مدل دایره‌ای، کروی، پایدار، نمایی و گوسین بر طبق روش اعتبارسنجی متقابل مقایسه شد. نتایج نشان داد که شش مدل مذکور از کارایی نسبتاً مناسبی برخوردار بودند. ریشه میانگین استاندارد خطاها در مدل کروی به ۱ نزدیک‌تر و از بقیه بهتر بود. مدل تطبیقی به واریوگرام تجربی مدل کروی بود که این مطلب از اعتبارسنجی متقابل، اثر قطعه‌ای استنتاج می‌شود. اگر اثر قطعه‌ای کمتر از ۰/۲۵ باشد، می‌توان گفت که وابستگی مکانی شدیدی وجود دارد و اگر بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ باشد، وابستگی مکانی نسبی و متعادل وجود دارد.

⁷ Cokriging

دقت برآورد غلظت نیترات دستاورد بهتری دارد. (Mouser and Rizzo (2000 ثابت کردند روش کوکریجینگ به منظور برآورد کیفیت آب زیرزمینی دقت مناسبی دارد. در این پژوهش میزان افزایش دقت برای پارامترهای RMSE و MAE مدل کوکریجینگ نسبت به کریجینگ به ترتیب ۱۸۵ و ۹۹ درصد بود.

منظور بهتر کردن برآورد و کاهش واریانس برآورد، یک زیرنمونه متغیر دیگر که وابستگی زیادی به نمونه مورد مطالعه دارد، استفاده می‌کند. در این مطالعه از پارامتر کلر برای این امر استفاده شد (شکل ۶). نتایج جدول‌های ۳ و ۴ نشان داد که دقت مدل کوکریجینگ از مدل کریجینگ بیشتر است. این نتایج با نتایج (Dagostino et al., 1998) مطابقت دارد. آن‌ها ثابت کردند شیوه کوکریجینگ در افزایش



شکل ۶- نمودار پراکنش هدایت الکتریکی آب زیرزمینی (A) روش کوکریجینگ و (B) روش کریجینگ.

Figure 6- Distribution Diagram of Electrical Conductivity of Underground Water A) Cokriging Method And B) Kriging Method.

جدول ۳- پارامترهای نیم‌واریوگرام برای شوری آب زیرزمینی در مدل کریجینگ.

Table 3- Semi-Variogram Parameters For Groundwater Salinity In Kriging Model.

Geostatistical Model		Semi-Variogram			Prediction Error	
	Normal Kriging	Nugget Effect	Lag Size	Threshold	RMSE	RMSS
Model	Circular	0.042172	9287.5	1.078	1168	0.7451
	Spherical	0.036361	9287.5	1.0964	1183	0.7467
	Exponential	0	9287.5	0.1104	1196	0.7396
	Spherical	0.16123	9287.5	1.0782	-28.98	-0.00663
	Fixed	0.15359	9287.5	1.3522	-7.954	-0.01021

جدول ۴- پارامترهای نیم‌واریوگرام برای شوری آب زیرزمینی در مدل کوکریجینگ.

Table 4- Semi-Variogram Parameters for Groundwater Salinity in The Cokriging Model.

Geostatistical Model			Semi-Variogram		Prediction Error	
	Normal Kriging	Nugget Effect	Lag Size	Threshold	RMSE	RMSS
Model	Circular	0.04033	7388.6	0.84838	432.4	0.4283
	Spherical	0.033722	7388.6	0.86016	445	0.4313
	Exponential	0	7388.6	1.018	712.3	0.4981
	Spherical	0.15036	7388.6	0.49186	741	0.7586
	Fixed	0.15038	7388.6	0.55882	865	0.7602

جدول ۵- عملکرد آماری مدل‌های IBK، M5 و زمین آماری برای برآورد شوری آب زیرزمینی.

Table 5- Statistical Performance of IBK, M5 And Geostatistical Models for Estimating Groundwater Salinity.

Model	R ²	RMSE (μmos/cm)	MAE (μmos/cm)
ibk	0.98	200.85	97.48
M5	0.92	406.08	276.37
Cokriging	0.82	343.47	452.90
Kriging	0.81	635.55	450.07

نتیجه‌گیری

این پژوهش، چندین مدل را به منظور برآورد ضریب هدایت الکتریکی با استفاده از مجموعه داده‌های طول و عرض جغرافیایی برای آبخوان دشت مشهد که در آب و هوای خشک و نیمه‌خشک موجود است، تحلیل می‌کند. در این مطالعه، از نمونه‌گیری نقطه‌ای X و Y که به ترتیب طول و عرض جغرافیایی می‌باشد و متغیر کلر به علت داشتن همبستگی مناسب با ضریب هدایت الکتریکی استفاده شد. مقایسه مدل‌های مورد استفاده با مدل‌های زمین آماری نشان داد که عملکرد مدل IBK از کوکریجینگ بهتر بود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت مدل IBK قابلیت برآورد دقیق شوری آب زیرزمینی را دارد.

منابع

احمدیان، م.، چاوشیان، م.، درویش، م.، ۱۳۹۴. بررسی نوسان های سطح سفره آب زیرزمینی به عنوان معیاری از تخریب اراضی مناطق نیمه‌خشک با استفاده از فنون زمین آمار (مطالعه موردی دشت کبودرآهنگ- فامنین). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱، ۱۰۹-۱۲۰.

خاشعی سیوکی، ع.، سربازی، م.، ۱۳۹۳. بررسی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های MLP، LS-SVM و زمین آماری. آب و فاضلاب، ۲۶(۳)، ۹۳-۱۰۳.

خاشعی سیوکی، ع.، قهرمان، ب.، کوچک‌زاده، م.، ۱۳۹۲. مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، ANFIS و رگرسیونی در برآورد سطح ایستابی آبخوان دشت نیشابور، آبیاری و زهکشی ایران، ۱: ۱۰-۲۲.

خاشعی سیوکی، ع.، کوچک‌زاده، م.، قهرمان، ب.، ۱۳۹۰. پیش بینی عملکرد گندم دیم از داده های هواشناسی با

با توجه به جدول ۵ و نمودار پراکنش داده‌های به دست آمده و مقادیر پیش‌بینی شده در شکل ۵، نتایج نشان می‌دهد دقت مدل IBK بهتر از مدل‌های M5، کریجینگ و کوکریجینگ می‌باشد. مدل IBK بهترین دقت را با ورودی‌های طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، کلر و EC دارد. جدول ۵ حاکی از قابلیت پایین مدل کریجینگ در مقایسه با مدل کوکریجینگ است. قابل ذکر است که کوکریجینگ قابلیت برآورد کردن خطاهای متداول را دارد و از برآورد آن می‌توان در پیدا کردن الگوی بهینه و توسعه دادن شبکه مشاهداتی استفاده کرد. این یک مزیت خاص کوکریجینگ نسبت به بقیه روش‌های درون‌یابی است (خلقی و حسینی، ۱۳۸۹). به طور کلی، مقادیر R² به دست آمده از جدول ۵ به وضوح نشان می‌دهد که مدل IBK با داشتن R²=۰/۹۸، RMSE=۲۰۰/۸۵ و MAE=۹۷/۴۸ بهترین مدل برای پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی در دشت مشهد است. در مقایسه با نتایج تحقیقات دیگر، خاشعی سیوکی و همکاران (۱۳۹۲)، نتایج مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی (ANFIS) را در برآورد سطح ایستابی آبخوان دشت نیشابور مقایسه کردند. نتایج روش‌های مذکور نشان داد که مدل ANN با R²=۰/۹۴ نسبت به مدل ANFIS از دقت بیشتری برخوردار بود. در مطالعه دیگر، خاشعی سیوکی و سربازی (۱۳۹۲)، به بررسی توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های LS-SVM، MLP و زمین آماری پرداختند. نتایج نشان داد که برای درون‌یابی کیفیت آب زیرزمینی روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ ارجحیت دارد. همچنین، مدل پرسپترون چند لایه با دقت RMSE=۳۶۹/۹، R²=۰/۹۳۲ و MAE=۲۶۵/۷۸ نسبت به دیگر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است.

- Dagostino, V., Greene, E.A., Passarella, G., Vurro, M., 1998. Spatial and temporal study of nitrate concentration in groundwater by means of co regionalization. *Journal of Environmental Geology*, 36: 285-295.
- Fallahi, M.R., Varvani, H., and Goliyan, S. 2012. Precipitation forecasting using regression tree model to flood control. 5th international watershed and water and soil resources management, Kerman, Iran.
- Gundogdu, K.S., Guney, I., 2007. Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging. *Journal of Earth System Science*, 116(1): 49-55.
- Kisi, O., 2012. Least squares support vector machine for modeling daily reference evapotranspiration, *Irrigation Science*, 31(4): 611-619.
- Lallahema, S., Maniaa, J., Hania, A., Najjarb, Y., 2005. on the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media. *Journal of Hydrology*, 307. 92-111.
- Liang, X., Schilling, K., Kuan-Zhang, Y., Jones, C., 2016. CoKriging estimation of Nitrate-Nitrogen loads in an agricultural river. *Journal of Water Resources Management*, 30 (5): 1771-1784.
- Maroufpoor, S., Fakheri-Fard, A., and Shiri, J. 2019. Study of the spatial distribution of groundwater quality using soft computing and geostatistical models. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 25(2), 232-238.
- Mouser, P. J., and Rizzo, D.M. 2004. Evaluation of geostatistics for combined hydrochemistry and microbial community fingerprinting at a waste disposal site. In *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, 1-11.
- Pal, M. 2006. M5 model tree for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4), 825-831.
- Witten, I. H., and Frank, E. 2002. Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. *Acm Sigmod Record*, 31(1), 76-77.
- Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B., Strzepek, K., 2003. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resources Research*, 39 (7): 1-15.
- استفاده از سیستم خبره در استان خراسان، ایران. علوم و فنون کشاورزی ایران، ۱۳: ۶۴۰-۶۲۷.
- رضایی، ا.، خاشعی سیوکی، ع.، شهیدی، ع.، ۱۳۹۳. طراحی شبکه پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM). تحقیقات آب و خاک ایران، ۴: ۳۸۹-۳۹۶.
- رضایی، م.، دعوتگر، ن.، تاجداری، ک.، ابوالپور، ب.، ۱۳۸۹. بررسی تغییرپذیری مکانی برخی عوامل مهم کیفی آب زیرزمینی در گیلان. آب و خاک ایران، ۲۴(۵)، ۹۳۲-۹۴۱.
- زمانی احمد محمودی، ر.، آخوندعلی، ع.م.، زارعی، ح.، رادمش، ف.، ۱۳۹۳. تخمین سطح ایستابی با استفاده از یک روش ترکیبی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک در دشت رامهرمز. مهندسی آب و آبیاری ایران، ۴(۳)، ۲۶-۳۸.
- کاردان مقدم، ح.، خاشه سیوکی، ع.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی در علوم آب توسط زمین آمار. انتشارات آستان قدس. مشهد، ایران
- نکوا مال کرمانی، م.، میرعباسی نجف‌آبادی، ر.، ۱۳۹۵. ارزیابی روش‌های درون‌یابی در تخمین سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سرخون). هیدروژئولوژی، ۲(۲)، ۸۴-۹۵.
- نهرین، ف.، ستاری، م.ت.، بیگزالی، ن.، ۱۳۹۲. مقایسه تخمین بار معلق به دو روش منحنی سنج رسوب و مدل درختی M5 (مطالعه موردی: رودخانه ليقوان چای). دوازدهمین اجلاس هیدرولیک ایران، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- Barcae, E., Passarella, G., 2008. Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation: A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 133: 261-273.