

ارائه روشی جدید برای ارزیابی کیفیت هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی

حجت امامی^{۱*}، سمیه امامی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

۲. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۶/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۰/۱۳)

چکیده

طی سال‌های اخیر، افزایش میزان شوری و کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی به دلیل نفوذ و اختلاط آلاینده‌ها، به یکی از چالش‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است. این چالش‌ها مخاطراتی جدی در راه توسعه جوامع بشری و سلامت انسان به وجود آورده‌اند. به منظور جلوگیری از مخاطرات آبی و برنامه‌ریزی‌های مناسب برای حفظ منابع آبی، بررسی کیفی منابع آب زیرزمینی از موارد ضروری است. در پژوهش حاضر، روش هوش جمعی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری انتخابات و گرگ خاکستری به منظور تعیین مقادیر بهینه برای پارامترهای کیفی آب نظیر TDS، EC و SAR ارائه شده است. به منظور ارزیابی روش‌های پیشنهادی، از داده‌های مربوط به دشت بستان‌آباد طی دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۲) استفاده شده و نتایج براساس استانداردهای ویلکاکس، شولر و پایپر بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند آب‌های زیرزمینی دشت بستان‌آباد برای مصارف کشاورزی و شرب در حد متوسط تا قابل قبول بوده و به دلیل خورندگی و سختی کم، از نظر استفاده در صنعت مناسب‌اند. بیشتر داده‌ها در کلاس C2S2 قرار گرفتند که برای مقاصد کشاورزی مناسب است. ضریب همبستگی بیش از ۹۵ درصد، بیان‌کننده دقت قابل قبول الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در مقایسه با الگوریتم انتخابات در تخمین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی است.

کلیدواژگان: آب زیرزمینی، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، الگوریتم انتخابات، کیفیت آب.

مقدمه

افزایش جمعیت، نیاز روزافزون به آب شیرین و مواد غذایی از یک طرف و کاهش و پراکندگی توزیع ریزش‌های جوی و نیز کاهش منابع آب‌های سطحی از سوی دیگر، موجب شده است که با برداشت و استفاده بی‌رویه از طریق حفر چاه‌های غیرمجاز با کاهش کیفی و کمی آب‌های زیرزمینی در بیشتر دشت‌های کشور، از جمله دشت بستان‌آباد، مواجه باشیم. نتیجه مطالعات در این زمینه بیان می‌کند که افزایش افت سطح آب زیرزمینی بر کیفیت سفره‌های آبی تأثیر مستقیمی دارد. به همین دلیل، انجام مطالعه ای در زمینه شناخت و بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در مناطق آسیب‌پذیر و حساس ضروری است و این مسئله اهمیت بررسی‌های کیفی آب زیرزمینی را نشان می‌دهد [۱]. اکنون، منابع آب یکی از پایه‌های اساسی توسعه پایدار به‌شمار می‌روند که علاوه بر کمیت، کیفیت آب نیز جزء پارامترهای مهم مورد توجه قرار می‌گیرد. از آنجا که انجام محاسبات به شیوه دستی در دنیای امروز کاری بیهوده است و خطای انسانی را وارد می‌کند و همچنین به دلیل اینکه در روش‌های به‌کاررفته برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی معمولاً از روش سنتی آزمون و خطا استفاده می‌شود و این روش‌ها خالی از خطا نیست، لزوم استفاده از روش‌های حل معادلات غیرخطی همچون روش لاگرانژ یا مدل‌های ریاضیاتی مانند GAMS و... به زمان زیادی نیاز دارند و در موارد متعددی نیز قادر به حل مسئله نخواهند بود. روش‌های نوین فراکاوشی بهینه‌سازی همچون الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم کلونی ذرات (PSO)، الگوریتم جفتگیری زنبور عسل (HBMO) و دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی، کارایی خود را در حل مسائل پیچیده مدیریت منابع آب به اثبات رسانده‌اند [۲ و ۳].

پیشینه تحقیق

امروزه، پژوهشگران در کنار استفاده از دیاگرام‌های تعیین کیفیت آب (شولر، پایپر و ویلکاکس) با استفاده از روش‌های نوین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش‌های فازی-عصبی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و دیگر روش‌های جدید به بررسی و پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی پرداخته‌اند. خمر و همکارانش [۴] در بررسی کیفیت منابع آب در

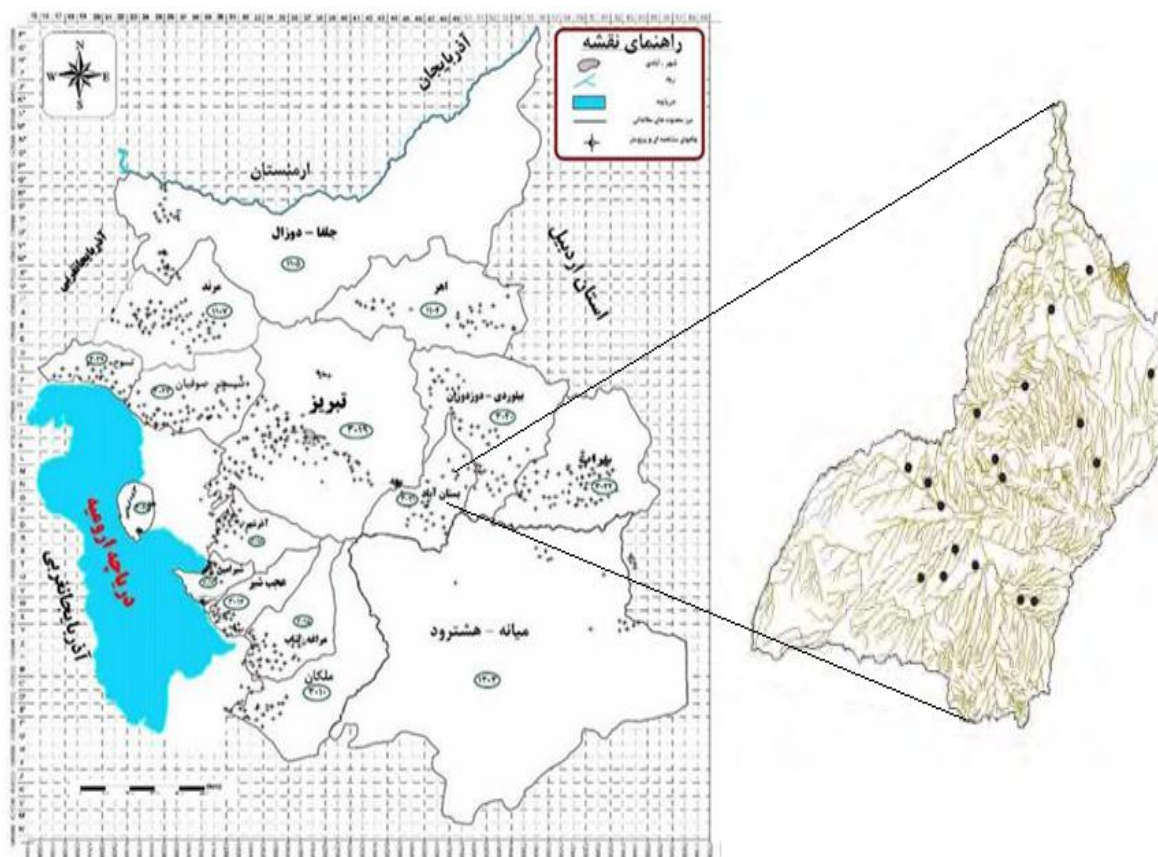
منطقه معدنی کوه زر در غرب تربت حیدریه، پس از اندازه‌گیری کاتیون و آنیون‌های نمونه‌های آب برداشت‌شده از منابع زیرزمینی، تیپ آب منطقه را Na-Cl و Na-HCO₃ گزارش کردند و کیفیت آب را براساس نمودارهای شولر و ویلکاکس، از نظر شرب و کشاورزی نامناسب دانستند. امامی و همکارانش [۵] پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد واقع در آذربایجان شرقی را تخمین زدند. آنها به تخمین پارامترهای کیفی غلظت نسبت جذب سدیم (SAR) و کلر (Cl) با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک اقدام کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها نشان داد مقدار میانگین مربعات خطا در نمونه تست برای غلظت نسبت جذب سدیم و کلر به ترتیب برابر ۰/۰۰۹۱۲ و ۰/۰۰۷۹۰ است. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده از اجرای دو الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه نشان داد الگوریتم رقابت استعماری در مقایسه با روش الگوریتم ژنتیک قدرت، هم‌گرایی و سرعت زیادی دارد. وهاب‌زاده و همکارانش [۶] فرایندهای هیدروژئوشیمی مؤثر در کیفیت آب زیرزمینی در دشت فیروزآباد واقع در غرب استان فارس را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مقادیر کلر و هدایت الکتریکی دشت فیروزآباد از شمال و شمال غرب به سمت مرکز بخش شرقی دشت و از شرق به سمت مرکز افزایش یافته است. از نظر شرب، آب‌های زیرزمینی منطقه براساس دیاگرام شولر در سه طبقه خوب، قابل قبول و متوسط قرار داشت. زارع ایبانه [۷] با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، وجود نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت همدان را پیش‌بینی کرد. نتایج پژوهش ایشان بیان‌کننده تطابق مناسب بین مقادیر به‌دست‌آمده از اجرای شبکه عصبی مصنوعی و مقادیر واقعی بود. رفعتی و همکارانش [۸] روند تغییرات و پایش فلوراید در آب زیرزمینی استان همدان را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روند تغییرات آنیون بین صفر تا ۱/۷۸ میلی‌گرم در لیتر بوده و میزان آن در ۴۹ درصد از ایستگاه‌ها کمتر از استاندارد پیشنهادشده از طرف سازمان حفاظت محیط زیست کشور بوده است. معاشری و همکارانش [۹] نیز از ترکیب سه مدل زمین‌آماری، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم در آب زیرزمینی دشت کاشان بهره گرفتند، که نتایج صحت‌سنجی مدل ارائه‌شده حدود ۹۰/۹ گزارش شده است. در مجموع، با توجه به تحقیقات انجام‌شده بیشتر

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده و داده‌ها

دشت بستان‌آباد در شمال غرب ایران و در استان آذربایجان شرقی به فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان تبریز و از نظر جغرافیایی بین ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه و ۴۷ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه و ۳۸ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه از نظر اقلیمی جزء مناطق نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. اوجان‌چای مهم‌ترین رودخانه بستان‌آباد است که میزان سطح حوضه آبریز اوجان‌چای ۵۶۸ کیلومترمربع و حجم جریان آب آن ۴۶ میلیون مترمکعب است. به دلیل فصلی بودن بیشتر رودخانه‌های استان آذربایجان شرقی، در حال حاضر آب زیرزمینی منبع اصلی برای آب شرب و کشاورزی این مناطق محسوب می‌شود. متوسط دمای سالانه این دشت ۷/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه برابر ۳۰۱/۶۱ میلی‌متر است (شکل ۱).

مطالعات به کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی اقدام کرده‌اند و پژوهش‌های محدودی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به بررسی و تخمین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی پرداخته‌اند. با توجه به اینکه دشت بستان‌آباد مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب بخش‌های مختلف نواحی مجاور خود در بخش شمال غرب کشور است، ارزیابی و همچنین تخمین کیفیت آب زیرزمینی این دشت و اقدامات مدیریتی برای بهبود کیفیت آن و نیز اعتمادپذیری نتایج پایش و کاهش هزینه‌های مربوط به آن، بسیار ضروری است. از این‌رو، هدف از انجام تحقیق حاضر، تخمین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی (TDS, EC, SAR) دشت بستان‌آباد واقع در استان آذربایجان شرقی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) و انتخابات (EA) برای اثبات کارایی این الگوریتم‌ها و نیز به‌کارگیری دیگرام‌های شولر، پایپر و ویلکاکس به منظور بررسی تیپ شیمیایی کیفیت آب است.



شکل ۱. موقعیت دشت بستان‌آباد روی نقشه

تهیه داده‌ها

برای تعیین کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد، از آمار کیفی منابع آب زیرزمینی برای دوره ۱۰ ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۲) که شامل کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم)، آنیون‌ها (سولفات، کلرات، بی‌کربنات و کربنات) اسیدیته (pH)، مقدار کل مواد جامد محلول (TDS) و نسبت جذب سدیم (SAR) می‌شود، استفاده شد [۱۰].

الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) نوعی الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در طبیعت و چگونگی شکار آنها الهام گرفته شده است [۱۱]. این الگوریتم سه مرحله اصلی دارد که عبارت‌اند از:

۱. مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب آن (tracking and approaching)
۲. نزدیک شدن، احاطه کردن شکار و گمراه کردن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند (pursing and encircling)
۳. حمله به شکار (attacking)

در ابتدای الگوریتم، نوع گرگ‌ها مشخص می‌شود. در الگوریتم GWO چهار نوع گرگ وجود دارد: گرگ‌های رهبر یا آلفا، بتا، دلتا و امگا. گرگ‌های آلفا هدایت‌کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شوند. گرگ‌های بتا و دلتا بیشتر به عنوان دستیاران گرگ‌های آلفا مشارکت دارند و بقیه گرگ‌ها به عنوان دنبال‌کننده آن‌ها محسوب می‌شوند. در مرحله نخست الگوریتم، گرگ‌های خاکستری طعمه را طی شکار محاصره می‌کنند. برای مدل کردن رفتار محاصره به صورت ریاضی، معادلات ۱ و ۲ تعریف شده‌اند.

$$X(t+1) = X_p(t) - A.D \quad (1)$$

$$D = |C.X_p(t) - X(t)| \quad (2)$$

در روابط یادشده $X_p(t)$ موقعیت شکار در لحظه t و $X(t)$ موقعیت گرگ در لحظه t است. D فاصله گرگ تا شکار را نشان می‌دهد. A و C بردارهای ضریب هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند (رابطه ۳):

$$\begin{aligned} A &= 2a.r_1 - a \\ C &= 2.r_2 \end{aligned} \quad (3)$$

r_1 و r_2 مقادیر تصادفی اند و a پارامتری است که مقدار آن به صورت خطی از دو تا صفر کاهش می‌یابد. در مرحله شکار، گرگ خاکستری به طعمه محاصره شده حمله می‌کند. روند شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می‌شود. گرگ‌های بتا و دلتا نیز گاهی ممکن است در شکار شرکت کنند. برای شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا از مکان بالقوه طعمه آگاهی بهتری دارند. بنابراین، سه نمونه از بهترین راه حل‌های به دست آمده ذخیره شده و دیگر عوامل جست و جو موقعیت خود را با توجه به موقعیت بهترین عوامل جست و جو به‌روزرسانی می‌کنند. روابط ۴-۶ فرایند شکار را نشان می‌دهند [۱۲ و ۱۳].

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1.X_\alpha - X|, \quad D_\beta = |C_1.X_\beta - X|, \\ D_\delta &= |C_1.X_\delta - X| \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha - A_1.D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta - A_2.D_\beta \\ X_3 &= X_\delta - A_1.D_\delta \end{aligned} \quad (5)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (6)$$

گرگ‌های خاکستری زمانی که شکار متوقف می‌شود به آن حمله می‌کنند و شکار را به پایان می‌رسانند. برای مدل کردن حمله به طعمه، مقدار پارامتر a کاهش می‌یابد. در مرحله جست و جوی طعمه، گرگ‌ها از یکدیگر فاصله می‌گیرند تا نقاط مختلف فضای راه حل را بیابند. برای مدل‌سازی ریاضی این فرایند از بردار تصادفی A با مقدار بزرگ‌تر از ۱ و یا کوچک‌تر از ۱- استفاده می‌شود. شکل ۲، فلوچارت الگوریتم GWO را نشان می‌دهد.

الگوریتم انتخابات

شکل ۳ فلوچارت الگوریتم EA را نشان می‌دهد. الگوریتم انتخابات (EA) از پدیده انتخابات الهام گرفته شده است. الگوریتم EA، یک استراتژی چندعاملی و مبتنی بر جمعیت است که در آن هر عامل جست و جو یک فرد نامیده می‌شود [۱۴]. برای یک مسئله با متغیرهای

$$x_{i_{new}} = \omega x_{i_{old}} \quad (10)$$

ω به صورت رابطه ۱۱ تعریف شده است:

$$\omega = \frac{1}{|E_{c_i} - E_{v_k}| + 1} \quad (11)$$

در مرحله تبلیغات منفی، کاندیداهای سعی می‌کنند رأی‌دهندگان دیگر کاندیداهای ضعیف را به سمت خود جذب کنند. اگر کاندیدای یک حزب در مقایسه با دیگر کاندیداهای ضعیف‌ترین فرد باشد، در این صورت آن حزب ضعیف در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی تبلیغات منفی، ابتدا تعدادی از رأی‌دهندگان از حزب ضعیف انتخاب می‌شوند. سپس، مسابقه‌ای بین احزاب قدرتمند صورت می‌گیرد تا مشخص شود رأی‌دهندگان انتخاب‌شده به کدام حزب ملحق شوند. برای انتخاب رأی‌دهندگان ضعیف از ضعیف‌ترین حزب، فاصله شایستگی بین رأی‌دهندگان و ضعیف‌ترین کاندیدا محاسبه می‌شود و سپس ۵ درصد از دورترین کاندیداهای انتخاب می‌شوند. فاصله بین رأی‌دهندگان انتخاب‌شده و کاندیداهای قدرتمند محاسبه شده و رأی‌دهندگان به نزدیک‌ترین کاندیداهای تخصیص داده می‌شوند. در مرحله ائتلاف، چندین کاندیدا به همدیگر ملحق می‌شوند و یک حزب جدید تشکیل می‌دهند. بین کاندیداهایی که تلاش می‌کنند به همدیگر ملحق شوند، یک کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب می‌شود تا به عنوان کاندیدای پیشرو^۱ باشد و کاندیداهای باقی‌مانده به عنوان کاندیدای تبعیت‌کننده^۲ در نظر گرفته می‌شوند. در ائتلاف، تمامی تبعیت‌کنندگان و حامیان آنها به عنوان رأی‌دهندگان جدید کاندیدای پیشرو در نظر گرفته می‌شود. تا هنگامی که شرایط خاتمه الگوریتم به وجود نیامده است، عملگرهای تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف بارها روی جمعیت اعمال می‌شود تا جمعیت را برای نیل به بهینه سراسری سوق دهد. در نهایت، فرایند بهنگام‌سازی خاتمه می‌یابد و کاندیدایی با بیشترین رأی به عنوان برنده انتخابات اعلام می‌شود. برنده معادل با بهترین راه حل یافته‌شده برای مسئله بهینه‌سازی است [۱۴].

P_i از آرایه‌ای از مقادیر ممکن p_1, p_2, \dots, p_N ، هر فرد برای متغیرها تشکیل شده است (رابطه ۷):

$$P_i = [x_1, x_2, \dots, x_N] \quad (7)$$

شایستگی هر فرد با ارزیابی تابع E روی مقادیر متغیرها متناسب با تابع هدف مسئله محاسبه می‌شود. برخی از بهترین افراد در جمعیت انتخاب می‌شوند تا به عنوان کاندیدا باشند و باقی افراد رأی‌دهندگان را تشکیل می‌دهند که هر یک به عنوان حامی یک کاندیدا هستند. رأی‌دهندگان براساس تشابه عقاید، بین کاندیداهای تقسیم می‌شوند. برای انجام این کار، رأی‌دهنده v_k به عنوان حامی کاندیدا c_i انتخاب می‌شود، اگر معادله ۸ برقرار باشد:

$$P_i = \{v_k : \|E_{v_k} - E_{c_i}\| < \|E_{v_k} - E_{c_j}\| \forall 1 \leq j \leq N_c\} \quad (8)$$

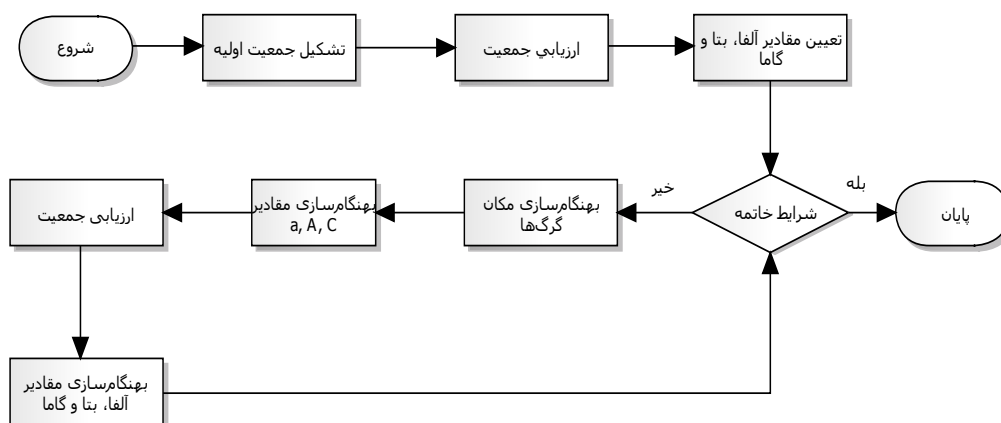
P_i حزب i و N_c تعداد کاندیدهای اولیه اند. E_{v_k} و E_{c_i} به ترتیب شایستگی کاندیدا c_i و رأی‌دهنده v_k را نشان می‌دهد. در اینجا، هر رأی‌دهنده دقیقاً به یک کاندیدا اختصاص داده می‌شود. در پیاده‌سازی‌های صورت‌گرفته ۷ درصد از جمعیت اولیه به عنوان تعداد کاندیدها در نظر گرفته می‌شوند. پس از تشکیل احزاب سیاسی، کاندیداهای تبلیغات انتخاباتی را شروع می‌کنند. تبلیغات انتخاباتی بنیان الگوریتم EA را تشکیل می‌دهد که شامل سه مؤلفه تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف است.

در الگوریتم EA، تبلیغات مثبت، با انتقال برخی از صفات هر کاندیدا به حامیان خود شبیه‌سازی شده است. برای انجام این کار، درون هر حزب، متغیرهای N_s از کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و با متغیرهای انتخابی از رأی‌دهندگان جایگزین می‌شود. N_s به صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۹):

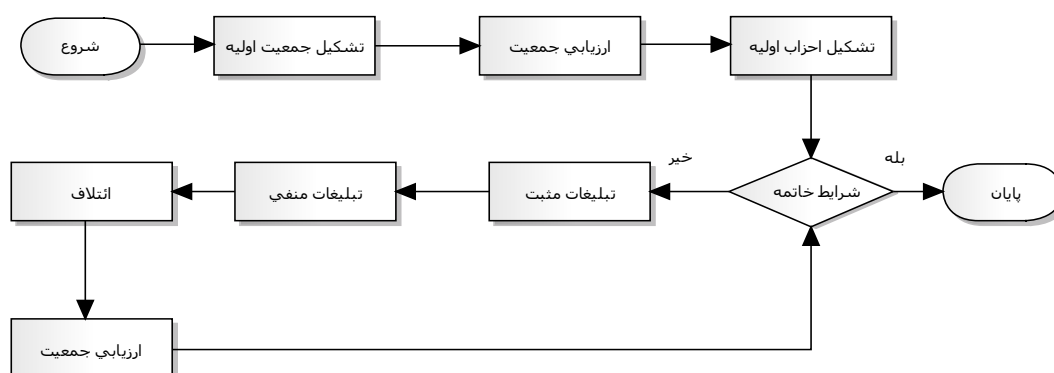
$$N_s = \lceil X_s \times S_c \rceil \quad (9)$$

S_c تعداد متغیرهای کاندیدا و X_s میزان انتخاب است.

متغیرهای انتخاب‌شده با ضریب ω وزن‌دهی شده و سپس در رأی‌دهندگان جایگزین می‌شوند. مقدار جدید متغیر i در یک رأی‌دهنده در مرحله تبلیغات مثبت به صورت رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم گرگ خاکستری



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم انتخابات

در جدول ۱، طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی براساس معیار ویلکاکس ارائه شده است. در نمودار شولر، برای هر یک از مقادیر کاتیون‌ها (Na, K, Mg, Ca) و آنیون‌ها (Cl, SO₄, HCO₃) و نیز درجه سختی آب (TH)، محور جداگانه‌ای در نظر گرفته شده که با تعیین آنها در آزمایشگاه و اتصال نقاط متناظرشان روی این محورها می‌توان به درجه تناسب آب برای شرب پی برد. همچنین در نمودار شولر، یون‌ها در دو مثلث به صورت درصدی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها به میلی‌اکی‌والان بر لیتر رسم می‌شوند که مقادیر ترسیمی برای آنالیز لوزی بین دو مثلث منتقل می‌شود (جدول ۲). در دیاگرام پایپر، مقایسه تعداد زیادی داده‌های آنالیز شده امکان‌پذیر می‌شود، علاوه بر این در دیاگرام پایپر میدان عمل محدودتر و شلوغ‌تر است. اندازه دایره‌های ترسیمی در نمودار پایپر می‌تواند مقدار مواد محلول کلی را نشان دهد. این نمودار بیان‌کننده مشخصات شیمیایی آب بر حسب غلظت نسبی تشکیل‌دهنده آنهاست.

روش نمودار ویلکاکس، شولر و پایپر

در مصارف کشاورزی، آب با غلظت نسبت جذب سدیم (SAR) کم توصیه می‌شود، زیرا به‌زای مقدار معینی از کاتیون سدیم، افزایش کاتیون‌های کلسیم و منیزیم آب به قابلیت جذب سدیم به وسیله خاک منجر شده و در نتیجه زیان آن برای گیاه کمتر می‌شود. اما سدیم به‌تنهایی نمی‌تواند به عنوان معیار کیفی آب از نظر کشاورزی استفاده شود و بهتر است که تأثیر آن در زمینه شوری کل آب در نظر گرفته شود. بنابراین، روش طبقه‌بندی ویلکاکس و استفاده از نمودار آن کاربردی‌ترین روش برای طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی در مطالعات آب‌شناسی است، زیرا در نمودار ویلکاکس، محور افقی به شوری آب (برحسب میکروموس بر سانتی‌متر) و محور عمودی به نسبت جذب سدیم (SAR) اختصاص دارد. از تلفیق دو عامل (هدایت الکتریکی EC و نسبت جذب سدیم SAR)، آب‌ها به ۱۶ طبقه تقسیم می‌شوند که از $C_1 - S_1$ (عالی) شروع و به $C_4 - S_4$ (نامناسب) پایان می‌یابند [۱۵].

جدول ۱. طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی براساس معیار ویلکاکس

طبقه	حدود SAR	حدود EC	طبقه
۱۰-۰	عالی S1	۲۵۰-۰	عالی C1
۱۸-۱۰	خوب S2	۷۵۰-۲۵۰	خوب C2
۲۶-۱۸	متوسط S3	۲۲۵۰-۷۵۰	متوسط C3
۳۲-۲۶	ضعیف S4	۵۰۰۰-۲۲۵۰	ضعیف C4

جدول ۲. طبقه‌بندی آب از نظر شرب در نمودار شولر

TH	TDS	So4	Cl ⁻	Na ⁺	کیفیت
>۲۵۰	<۵۰۰	<۱۴۵	<۱۷۵	<۱۱۵	خوب
۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰-۵۰۰	۲۸۰-۱۴۵	۳۵۰-۱۷۵	۲۳۰-۱۱۵	قابل قبول
۱۰۰۰-۵۰۰	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۵۸۰-۲۸۰	۷۰۰-۳۵۰	۴۶۰-۲۳۰	متوسط
۲۰۰۰-۱۰۰۰	۴۰۰۰-۲۰۰۰	۱۱۵۰-۵۸۰	۱۴۰۰-۷۰۰	۹۲۰-۴۶۰	نامناسب
۴۰۰۰-۲۰۰۰	۸۰۰۰-۴۰۰۰	۲۲۴۰-۱۱۵۰	۲۸۰۰-۱۴۰۰	۱۸۴۰-۹۲۰	کاملاً نامطلوب
>۴۰۰۰		>۲۲۴۰	>۲۸۰۰	>۱۸۴۰	غیر قابل شرب

به ترتیب به منظور تخمین غلظت SAR و EC و TDS به کار گرفته شدند.

$$SAR = C_1 * EC^{C_2} + C_3 * pH^{C_4} + C_5 * TDS^{C_6} + C_7 \quad (12)$$

$$EC = C_1 Mg^{C_2} + C_3 Ca^{C_4} + C_5 pH^{C_6} + C_7 Cl^{C_8} + C_9 \quad (13)$$

$$TDS = C_1 Na^{C_2} + C_3 EC^{C_4} + C_5 Cl^{C_6} + C_7 \quad (14)$$

توابع هدف به صورت روابط ۱۵ تا ۱۷ تعریف شد:

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} (SAR_{obs} - SAR_{GWO})^2 \quad (15)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} (EC_{obs} - EC_{GWO})^2 \quad (16)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} (TDS_{obs} - TDS_{GWO})^2 \quad (17)$$

که در روابط یادشده، $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$ و C_9 ضرایب وزنی و نمایی برای ورودی‌های مد نظر (این ضرایب برای تخمین SAR، TDS و EC متفاوت است)، MSE میانگین مربعات خطا، EC_{obs} ، SAR_{obs} و TDS_{obs} به ترتیب هدایت الکتریکی، نسبت جذبی سدیم و کل مواد جامد محلول مشاهداتی و SAR_{EA} ، EC_{EA} و TDS_{EA} ، SAR_{GWO} ، EC_{GWO} و TDS_{GWO} نیز به ترتیب نسبت جذبی سدیم، هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول

تعریف مسئله

چگونگی ورود داده‌ها در الگوریتم‌های انتخابات و گرگ خاکستری

به منظور بررسی میزان اهمیت هر یک از پارامترهای کیفی استفاده شده در تخمین مقادیر EC، TDS و SAR با استفاده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و انتخابات، پارامترهای pH ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} ، SO_4^{2-} به عنوان ورودی الگوریتم‌ها انتخاب شدند. در ابتدای کار به منظور سنجش کارایی الگوریتم‌ها، به آموزش و صحت‌سنجی الگوریتم‌ها در تخمین پارامترها اقدام شد (جدول ۳). به طور کلی، برای تخمین مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌ها با استفاده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و انتخابات، مقادیر EC و TDS با استفاده از سایر پارامترهای کیفی یعنی کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی (جدول ۳) و SAR استفاده شد. برای مدل‌سازی SAR به عنوان متغیر وابسته نیز از میزان کل عناصر محلول، فراسنج‌های طول و عرض جغرافیایی، EC، TDS و مقادیر pH به عنوان متغیر مستقل استفاده شد. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌های گرگ خاکستری و انتخابات در جدول ۴ و نیز تجزیه و تحلیل آماری داده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۵ ارائه شده است.

کد عددی در نرم‌افزار متلب^۱ به فرم روابط ۱۲ تا ۱۴، برای هر دو الگوریتم EA و GWO استفاده شد که

استفاده کشاورزی و نوع آب منطقه به ترتیب از نمودارهای شولر، ویلکاکس و نمودار تلفیقی پایپر استفاده شده است.

نتایج و بحث

تحلیل آب‌های زیرزمینی دشت بستان‌آباد از طریق نتایج به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم‌های EA و GWO، نمودار ویلکاکس، شولر و پایپر صورت گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از آموزش و صحت‌سنجی الگوریتم‌های گرگ خاکستری و انتخابات و آمار توصیفی پارامترهای مشاهداتی برمبنای شاخص‌های آماری، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2)، در جدول ۵ ارائه شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ (الف تا ج) مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از دو الگوریتم EA و GWO مقایسه شده است.

پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم‌های EA و GWO هستند. C_7 و C_9 مقدار ثابت معادله‌ها هستند.

همچنین، برای مقایسه بهتر، کلیه داده‌های ورودی و خروجی به‌کاررفته در پژوهش، به روش مطرح‌شده لاروس [۱۶]، طبق روابط ۱۸-۲۰ در بازه [L, H]، در پژوهش حاضر معادل یک و صفر انتخاب شد، نرمالیزه شده‌اند.

$$X^* = mX_i + b \quad (18)$$

$$m = \frac{H-L}{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)} \quad (19)$$

$$b = \frac{\text{Max}(X)L - \text{Min}(X)H}{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)} \quad (20)$$

در رابطه ۱۸، X^* متغیر نرمال‌سازی‌شده و X_i متغیر اصلی است.

برای تعیین کیفیت آب از نظر شرب انسان، قابلیت

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از آموزش و صحت‌سنجی الگوریتم‌های انتخابات و گرگ خاکستری در تخمین پارامترها

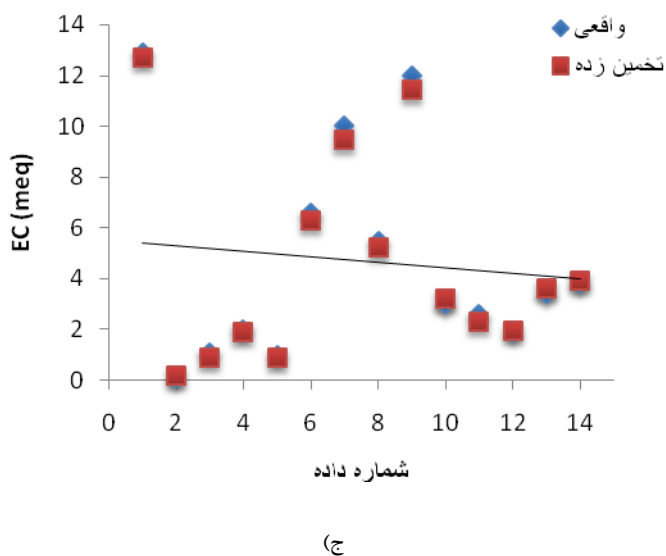
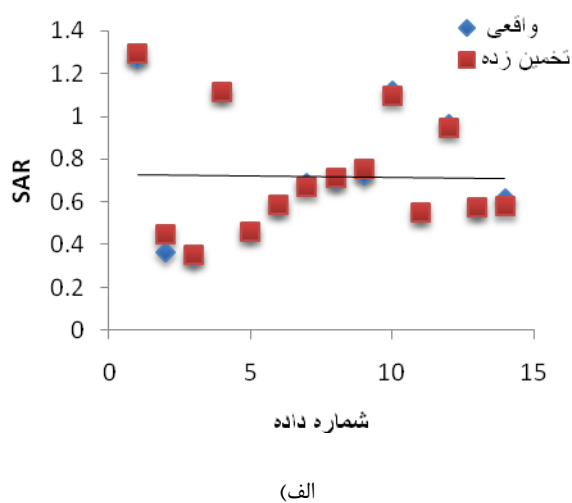
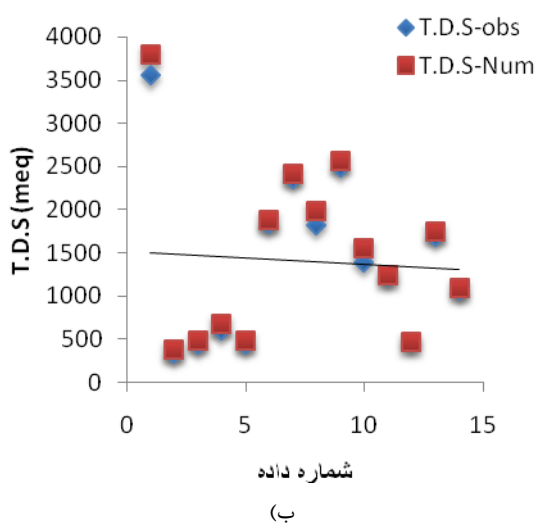
Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}
۶/۷۳	۶/۱۶	۴۳/۱۵	۰/۱۲	۶/۳۸	.	۳۹/۲	۱۲/۷۱
۱/۷۹	۲/۲۶	۱۱/۱۵	۰/۰۲۵	۴/۷۳	.	۰/۳۶	۰/۱۶
۲/۳۳	۲/۴۲	۱/۴۵	۰/۰۸۱	۵/۵۰	۰/۳۵	۰/۵۷	۰/۹
۰/۸۴	۲/۱۱	۷/۳۵	۰/۰۸۷	۶/۳۰	.	۱/۳۲	۱/۸۹
۲/۶۰	۲/۳۶	۲/۱۱	۰/۰۴۳	۵/۱۰	۰/۲۱	۱/۱۷	۰/۸۷
۴/۸۵	۱۳/۱۲۵	۱۲/۳۱	۰/۰۷۲	۷/۴۵	.	۱۶/۱۲۵	۶/۳۰
۹/۱۲	۱۰/۷۳	۱۷/۸۰	۰/۲۲	۱۱/۸۲	.	۱۷/۲۸	۹/۴۵
۷/۴۵	۷/۴۲	۱۵/۰۸	۰/۱۷۵	۹/۹۲	.	۱۵/۱۹	۵/۲۱
۹/۶۵	۱۰/۲۸	۲۲/۵۰	۰/۱۸۱	۸/۲۴	.	۲۱/۰۸	۱۱/۴۳
۳/۲۸	۳/۲۶	۱۵/۷۳	۰/۰۷۳	۷/۳۳	.	۱۲/۶۵	۳/۲۰
۵/۷۸	۶/۶۲	۷/۴۶	۰/۱۹۵	۱۱/۱۰	.	۶/۴۲	۲/۳۲
۴/۱۶	۲/۱۶	۱/۳۵	۰/۰۶۳	۵/۳۵	.	۰/۶۲	۱/۹۷
۶/۷۶	۹/۵۶	۱۰/۷۴	۰/۱۶۵	۱۰/۷	.	۱۳/۵۵	۳/۶۲
۴/۷۸	۵/۱۰	۶/۶۴	۰/۱۸۶	۸/۲۳	.	۵/۷۲	۳/۹۳

جدول ۴. پارامترهای استفاده‌شده در الگوریتم‌های EA و GWO

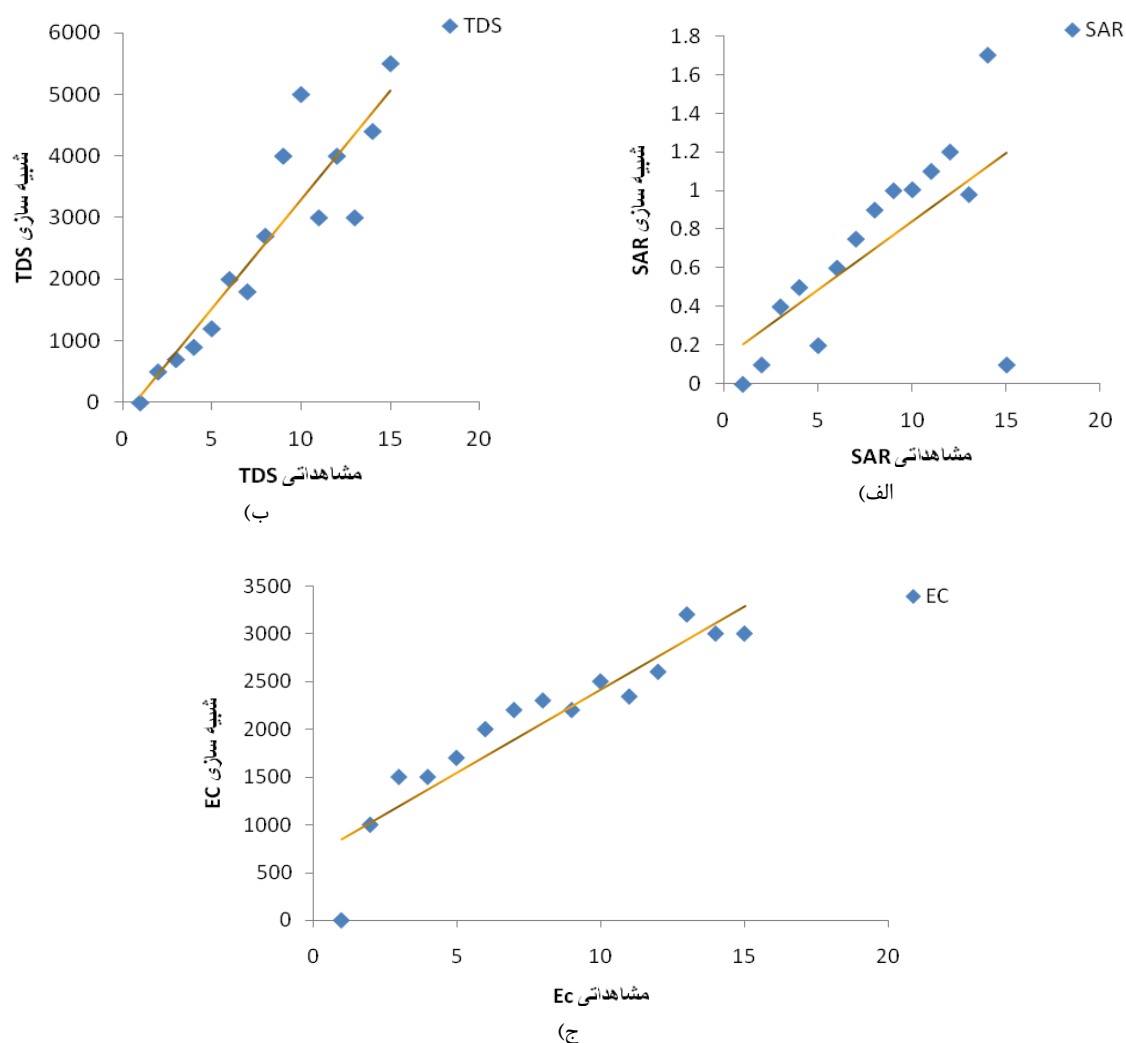
GWO	EA
۱۲	تعداد جمعیت اولیه
۳۰	N_c (تعداد منتخبان به‌عنوان نامزد اول)
-۳۰	میزان اتلاف
۳۰۰	میزان انتخاب

جدول ۵. نتایج آمار توصیفی پارامترهای مشاهداتی

پارامتر	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
Na	۴۳/۰۸	۱/۹	۱۲/۴۰	۹/۳۵	۸۶/۴
Ca	۸/۵	۰/۸	۴/۹۰	۳/۷	۱۳/۵
Mg	۱۳	۲/۱	۶/۲	۶/۳۸	۳۵/۲
Cl	۳۸/۷	۰/۳	۱۰/۲۰	۸/۸	۷۶/۲
So4	۱۲/۱	۰/۱۵	۴/۵	۴/۱	۱۵/۲
HCO3	۱۱/۵	۵/۰۵	۷/۵	۵/۹	۲۷/۱
CO3	۰/۳۲	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۲	۰/۶
K	۰/۱۸۵	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۶۵



شکل ۴. (الف تا ج) مقایسه مقدار غلظت SAR، TDS و EC مشاهداتی و مقادیر به‌دست آمده از اجرای الگوریتم EA



شکل ۵. (الف تا ج) مقایسه مقدار غلظت SAR، TDS، EC مشاهداتی و مقادیر به دست آمده از اجرای الگوریتم GWO

ارزیابی دقت برآورد و پیش‌بینی الگوریتم‌های EA و GWO در جدول ۶ ارائه شده است.

می‌توان گفت که هر دو الگوریتم نتایج قابل قبولی ارائه دادند، اما الگوریتم GWO در مقایسه با الگوریتم EA با داشتن میزان جذر میانگین مربعات خطای کمتر و در نتیجه ضریب همبستگی زیاد، در پژوهش حاضر، روشی مناسب در ارزیابی املاح، هدایت الکتریکی و نسبت جذبی سدیم موجود در آب معرفی شد.

در جدول ۷، نتایج بررسی کیفیت شیمیایی و هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت بستان‌آباد براساس نمودار ویلکاکس برای مصارف کشاورزی ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشتر نمونه‌های بررسی شده در کلاس C2S2 قرار دارند و از نظر کیفی در طبقه خوب برای کشاورزی‌اند.

با توجه به شکل‌های یادشده می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر به دست آمده از اجرای هر دو الگوریتم EA و GWO توانایی و کارایی این دو الگوریتم را در ارزیابی و تخمین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد. همچنین، هر دو الگوریتم در تخمین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد موفق عمل کردند و درصد خطای کمی دارند. مقدار ضریب همبستگی زیاد بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده در داده‌های آموزش و آزمون (میانگین ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده EC، TDS، SAR به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۹۵ و ۰/۹۵۵) برای پارامترهای پیش‌بینی شده، بیان‌کننده قابلیت زیاد الگوریتم گرگ خاکستری برای پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد است (شکل ۴).

در شکل‌های ۸ و ۹، نمودار پایپر آنالیز مشخصات شیمیایی آب دشت بستان‌آباد برای تعیین تیپ رخساره آب‌های زیرزمینی این دشت نشان داده شده است. با توجه به نمودارها، مشخص می‌شود که دامنه تغییر یون‌ها طی سال خشک (۱۳۸۴-۱۳۸۵) بیشتر از سال مرطوب (۱۳۸۵-۱۳۸۶) است. این امر بیان‌کننده غلظت زیاد یون‌ها طی سال خشک نسبت به سال مرطوب است.

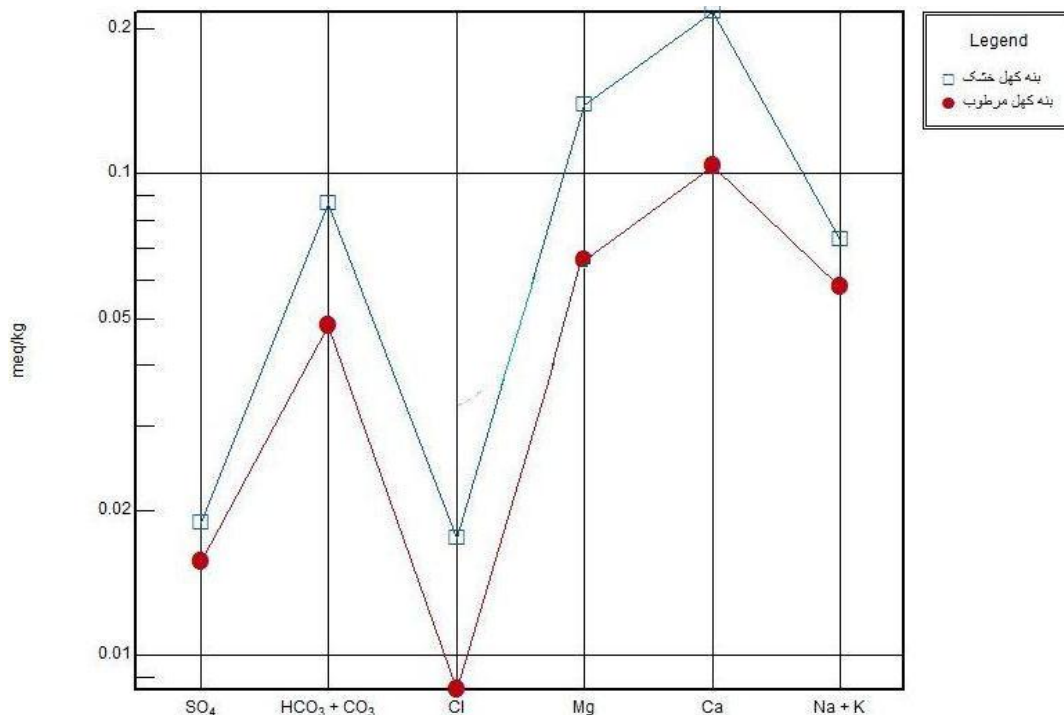
همچنین در شکل‌های ۶ و ۷، دیاگرام شولر مربوط به ارزیابی کیفیت نمونه‌های آب ۱۱ ایستگاه بررسی‌شده طی سال‌های خشک (۱۳۸۴-۱۳۸۵) و سال‌های مرطوب (۱۳۸۵-۱۳۸۶) آورده شده است. با توجه به نمودارها، مشخص می‌شود که مقدار یون‌ها در سال مرطوب همواره کمتر از سال خشک است. در مورد یون کلسیم باید یادآور شد که به علت نوع سازند آهکی و دولومیتی در منطقه، مقدار این یون در سال مرطوب در اکثر ایستگاه‌ها بیشتر از سال خشک است.

جدول ۶. ارزیابی دقت برآورد الگوریتم‌ها در تخمین پارامترهای کیفی

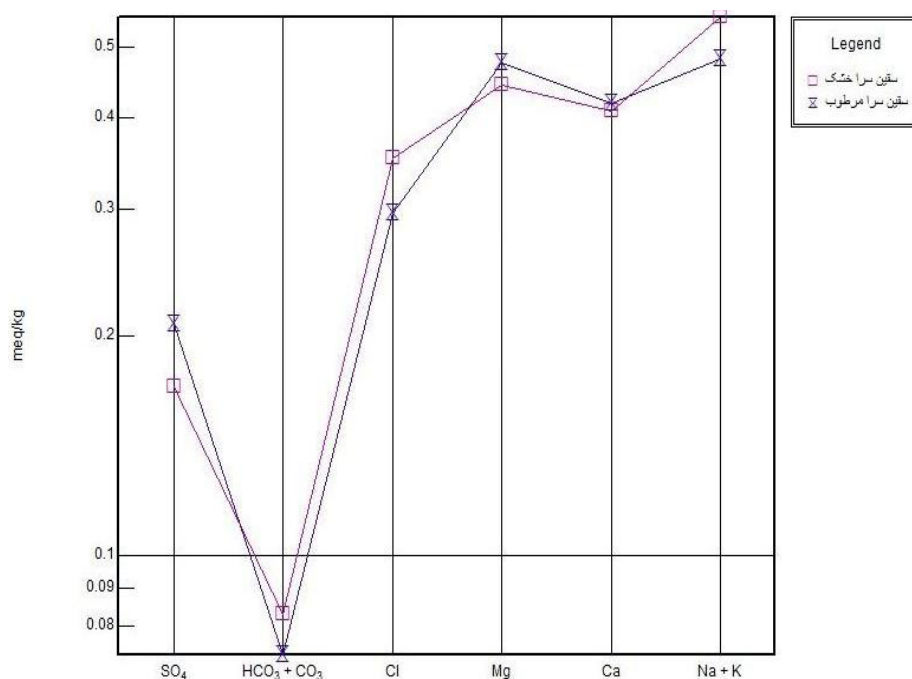
پارامتر		RMSE		R ²	
EA	GWO	EA	GWO	EA	GWO
TDS (mg/Lit)	TDS (mg/Lit)	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۹۲	۰/۹۶
EC (µm/cm)	EC (µm/cm)	۲۱/۸	۱۸/۲	۰/۹۱	۰/۹۵
SAR	SAR	۵/۹	۳/۸	۰/۹۰	۰/۹۵۵

جدول ۷. درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی ویلکاکس برای مصارف کشاورزی در محدوده مطالعه‌شده

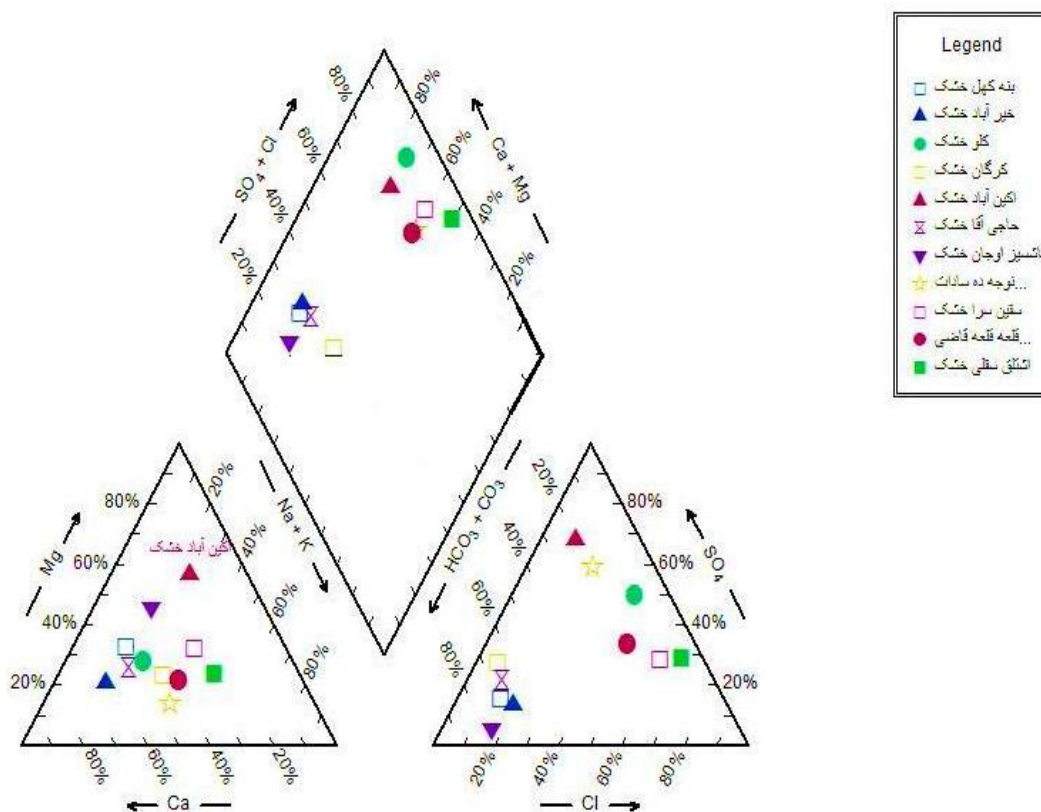
C4			C3				C2				C1				
S4	S3	S2	S1	S4	S3	S2	S1	S4	S3	S2	S1	S4	S3	S2	S1
.	.	۲/۹۰	.	.	۲۹/۴۱	.	.	۱۷/۶۵	۲۳/۵۳	۲۰/۵۹	۵/۸۸



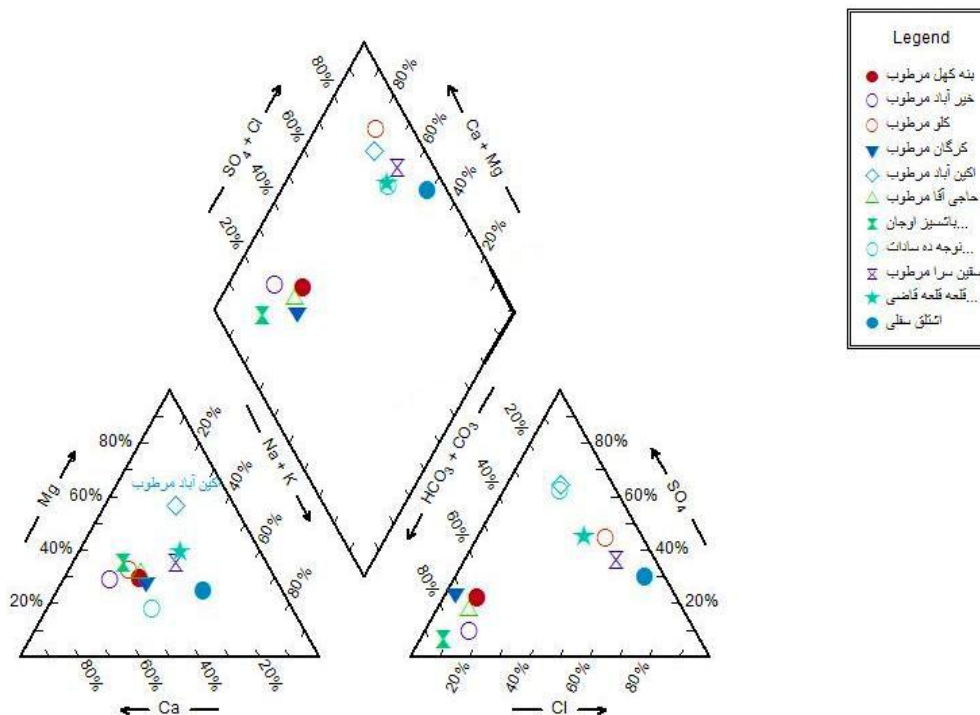
شکل ۶. نمودار شولر آنالیز شیمیایی دشت بستان‌آباد در سال خشک



شکل ۷. نمودار شولر آنالیز شیمیایی دشت بستان آباد در سال خشک



شکل ۸. نمودار پایپر در سال خشک در تمام ایستگاه‌ها طی دوره آماری ۱۰ ساله



شکل ۹. نمودار پایپر در سال مرطوب در تمام ایستگاه‌ها طی دوره آماری ۱۰ ساله

استفاده از نمودار ویلکاکس ارزیابی شد. نتایج نشان داد بیشتر نمونه‌های بررسی شده در کلاس C2S2 جای گرفتند و از نظر کیفی در طبقه خوب برای کشاورزی قرار دارند. بنابراین، استفاده از آب‌های زیرزمینی دشت بستان‌آباد برای کشاورزی محدودیتی ندارد، ولی با توجه به استفاده از کودهای شیمیایی و استفاده فزاینده از این آب‌ها، باید ملاحظات لازم برای آینده اندیشیده شود. همچنین، براساس نمودار شولر و پایپر نیز مشخص شد آب دشت برای مصارف شرب، در حد متوسط تا قابل قبول بوده و نیز به دلیل خورندگی و سختی کم، از نظر استفاده در صنعت مناسب است.

منابع

- [1]. Ahmadi SH, Sedghamiz A. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. Environ. Moint. Assess. 2008; 138: 357- 368. [Persian]
- [2]. Samin M, Soltani J, Zeraatcar Z, Moasheri SA, Sarani N. Spatial Estimation of Groundwater Quality Parameters Based on Water Salinity Data using Kriging and Cokriging Methods. International Conference on Transport, Environment and Civil Engineering. 2012; 5 p. [Persian]

برای تعیین کیفیت آب برای مصارف صنعتی، از ضریب لانزالیه (SI) نمونه آب‌ها طبق رابطه ۲۱ استفاده شد.

$$SI = 2pH_s - pH \quad (21)$$

که در این رابطه، pHs مقدار pH آب در حالت اشباع از کربنات کلسیم است. اگر $SI > 0$ باشد، آب تمایل به رسوب‌گذاری دارد؛ اگر $SI < 0$ باشد آب خورنده است و اگر $SI = 0$ باشد آب حالت خنثی دارد. نتایج نشان داد آب دشت دارای رسوب‌گذاری و خورندگی متوسط تا کمی است که از نظر استفاده در صنعت در حد متوسط تا قابل قبول قرار دارد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای پیش‌بینی و ارزیابی هر چه بهتر پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت بستان‌آباد، از دو روش بهینه‌سازی نوین و قدرتمند الگوریتم‌های EA و GWO بهره گرفته شد. الگوریتم گرگ خاکستری با میانگین ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده TDS EC و SAR به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۹۵ و ۰/۹۵۵ به‌عنوان مدل برتر در پژوهش حاضر معرفی شد. همچنین، ۱۱ نمونه آب زیرزمینی از چاه‌های بهره‌برداری‌شده به دست آمد و با

- [3]. Mohammadzadeh Romiani H, Masoumi F. Optimization of concrete gravity dams dimensions using imperialist competitive algorithm (ICA). The 16th Hydrualic Conference of Iran, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardebili, Ardebil, 15-16 september. 2017. [Persian]
- [4]. Khamr Z, Mahmoodi-Gharaie MH, Omrani S, Sayareh AR. Evaluation of water quality in the Zar mountain of west of Torbat-Heydariieh. Iranian Economic Geology Society Conference. 2012. [Persian]
- [5]. Emami S, Hemmati M, Arvanaghi H. Performance evaluation of Imperialist Competitive and Genetic algorithm for estimating groundwater quality parameters (case study: Bostanabad plain). *Hydrogeology*. 2017; 2(2): 44-53. [Persian]
- [6]. Vahabzadeh Gh, Delavar H, Ghorbani J, Eshrafi MR. Investigation of changes in Chlorine and Salinity levels of groundwater in Firoozabad plain and comparative evaluation of agricultural and drinkable water. *Journal of Research in Environmental Health*. 2018; 4(1): 67-74.
- [7]. Zareh-Abianeh H, Bayat-Vorkeshi M, Akhavan S, Mohammadi M. Estimation of groundwater nitrate in Hamedan-Bahar plain using artificial neural network and data separation effect on prediction precision. *Ecology*. 2011; 37(58): 129-140.
- [8]. Rafati L, Mokhtari M, Fazelinia F, Momtaz SM Mahvi AH. Evaluation of ground water fluoride concentration in Hamadan Province west of IRAN. *Iranian Journal of Health Sciences*. 2013; 1(3): 71-76. [Persian]
- [9]. Moasheri SA, Rezapour OM, Beyranvand Z, Poornoori Z. Estimating the spatial distribution of groundwater quality parameters of Kashan plain with integration method of Geostatistics - Artificial Neural Network Optimized by Genetic-Algorithm. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 2013; 23: 2434-2442.
- [10]. Azarwater.ir [Last Access: 2018/6/22]
- [11]. Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*. 2015; 69: 920140 46-61.
- [12]. Mech LD. Alpha Status, Dominance, and Division of Labor in Wolf Packs, *Canadian Journal of Zoology*. 1999; 77(8): 1196-1203.
- [13]. Muro C, Escobedo R, Spector L, Coppinger R. Wolf-pack (Canis Lupus) Hunting Strategies Emerge from Simple Rules in Computational Simulations, *Behavioural Processes*. 2011; 88(3): 192-197.
- [14]. Emami H, Derakhshan F. Election algorithm: A new socio-politically inspired strategy. *AI Communications*. 2015; 28: 591-603.
- [15]. Eslamian, SS, Lavaei N. Modeling Nitrat pollution of Groundwater using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm in an Arid zone, *international Jornal of water, Special Issue on Groundwater and surface water Interaction (GSWI)*. 2009; 5(2): 194-203.
- [16]. Larose DT. *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining*. Jhon Wiley & Sons Inc. 2005; 240 p.