

ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان دهگلان با استفاده از روش دراستیک، شبکه عصبی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ

گلاله ولدی^۱، اسفندیار عباس‌نوین‌پور^{۲*} و مطلب بایزیدی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه جغرافیا، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران

نویسنده مسئول: e.abbasnovinpour@urmia.ac.ir *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۳۰

دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۶

چکیده

شرق استان کردستان دارای پتانسیل مناسبی برای ذخیره منابع آب زیرزمینی است. اما بدلیل افزایش بی‌رویه در طول سال‌های متمادی و کاهش بارندگی‌ها حجم ذخایر آبخوان دهگلان واقع در آن کاهش چشم‌گیری داشته است و دشت دهگلان جزو دشت‌های ممنوعه طبقه‌بندی شده است. در این پژوهش به بررسی انتقال و پخش آلودگی در آبخوان دشت دهگلان با استفاده از روش دراستیک پرداخته شد. همچنین جهت مقایسه این روش با روش‌های هوشمند از روش شبکه عصبی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ استفاده گردید. روش دراستیک یکی از روش‌های هم‌پوشانی است که با هفت پارامتر اصلی مؤثر شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی نقشه‌ی حساسیت تهیه می‌شود. در روش‌های هوشمند پارامترهای دراستیک به عنوان ورودی و شاخص دراستیک به عنوان خروجی به مدل‌ها معرفی گردید. برای این منظور هفت لایه رستری با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در محیط GIS تهیه شد و بعد از رتبه‌دهی و وزن‌دهی شاخص دراستیک بین ۷۱ تا ۱۵۳ به دست آمد. نتایج اجرای مدل شبکه عصبی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ به چهار بخش تقسیم‌بندی شد، براساس نتایج مشاهده گردید که نقشه‌های آسیب‌پذیری نشان داد که بخش‌های شمال آبخوان دارای پتانسیل آلودگی متوسط و زیادی است و بایستی محافظت بیشتری از این مناطق صورت گیرد. با توجه به معیارهای ارزیابی نقشه آسیب‌پذیری بدست آمده با شبکه عصبی موجک نسبت به الگوریتم ازدحام مرغ عملکرد بهتری داشته است. بطوریکه براساس معیارهای ارزیابی شاخص دراستیک در شبکه عصبی موجک به ترتیب در بخش‌های غربی، جنوبی، شرقی و مرکزی ($RMSE=0/98=R^2$ و $0/82=RMSE$)، ($RMSE=1/51$ و $0/8=R^2$)، ($RMSE=0/96=R^2$ و $0/69=RMSE$) و ($RMSE=1/2$ و $0/92=R^2$) بدست آمد. همچنین در الگوریتم ازدحام مرغ معیارهای ارزیابی به ترتیب در بخش‌های غربی، جنوبی، شرقی و مرکزی ($RMSE=4/51$ و $0/8=R^2$)، ($RMSE=5/38$ و $0/88=R^2$)، ($RMSE=4/31$ و $0/66=R^2$) و ($RMSE=6/01$ و $0/84=R^2$) بدست آمد. توزیع نیترات با شاخص آسیب‌پذیری در حالت بهینه، نتایج بهتری را در پیش‌بینی مناطق آلوده داشته است.

واژه‌های کلیدی: روش دراستیک، کیفیت، نیترات، هوش مصنوعی

۱- پیشگفتار

کاهش کیفیت این منبع به دنبال داشته است (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). جهت حفاظت از آلودگی توسط پدیده‌های طبیعی و انسانی و همچنین مدیریت مؤثر آن‌ها بررسی هیدروشیمیایی و ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان می‌باشد (وربا و زاپرزک، ۱۹۹۴). اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی و به تبع آن کاهش تغذیه آبخوان‌ها، مصرف آب چشمه‌سارها قبل از اتصال آب‌ها به

منابع آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین نیازهای آبی در اکثر نقاط دنیا می‌باشد. افزایش نیازهای آبی در بخش‌های مختلف و در نتیجه برداشت بیش از ظرفیت آبخوان‌ها منجر به تخریب این منابع با ارزش و افت قابل توجه تراز سطح آب زیرزمینی شده است. تزریق انواع آلاینده‌ها به سفره‌های زیرزمینی که در نتیجه توسعه جوامع شهری، صنعتی و کشاورزی و مدیریت ناصحیح می‌باشد. اثرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را در جهت

قوش و همکاران (۲۰۲۱) به شناسایی آلوده‌ترین مناطق آب زیرزمینی منطقه بیربهم در جنوب بنگال هندوستان پرداختند. دلیل انتخاب این ناحیه آلودگی منطقه از نظر فلوراید و سایر پارامترهای شیمیایی بیان کردند. آن‌ها در این مطالعه از روش دراستیک استفاده کردند. نقشه نهایی آسیب‌پذیری نشان داد که قسمت غربی نسبت به قسمت شرقی آسیب‌پذیرتر است زیرا قسمت‌های غربی ساختار زمین‌شناسی از بازالت و گرانیت تشکیل شده است. آن‌ها بیان کردند که وجود این ساختار باعث هوازگی بیشتر و بالا رفتن سرعت آلودگی کانی‌های مضر در آب‌های زیرزمینی این ناحیه شده است. همچنین نتایج نشان داد که در قسمت غربی این ناحیه مطالعاتی سنگ‌های سخت وجود دارد که باعث شده سطح آب زیرزمینی نسبت به بخش شرقی محدوده مطالعاتی نزدیک به سطح زمین باشد. مدل دراستیک با نمودار ROC^۱ برای اعتبارسنجی استفاده کردند و نتایج نشان داد که مشخصه عملکرد برای این مدل در این منطقه ۷۳ درصد معتبر است.

زرکیا و کروگلیک (۲۰۱۷) ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت سیلابی ویستولا در مرکز لهستان با روش دراستیک انجام شد. نتایج نشان داد که ۱۸/۶۸ درصد از محدوده مطالعاتی دارای پتانسیل آلودگی کم و ۲/۳۱ درصد دارای پتانسیل آلودگی متوسط است. برای تحلیل حساسیت از حذف تک پارامتری استفاده کردند و نتایج نشان داد که عمق آب زیرزمینی مهم‌ترین پارامتر شاخص آسیب‌پذیری است. همچنین آن‌ها بیان کردند که اگرچه سطح آب در بیش از ۹۰ درصد منطقه مورد مطالعه کم عمق (کمتر از ۳ متر) است این امر منجر به افزایش آسیب‌پذیری بالای آب‌های زیرزمینی نمی‌شود. عباس نوین‌پور و همکاران (۲۰۲۲) آسیب‌پذیری آبخوان چهاردولی را انجام دادند. آن‌ها از روش DRASTIC اصلاح شده و مدل بهینه منطبق فازی جهت بهبود روش دراستیک استفاده کردند و برای اعتبارسنجی از مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده استفاده نمودند. برای این منظور بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی این دشت، از ۱۸ نمونه آب در دوره‌های مختلف سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹ که آنالیز نمونه‌های آب در آزمایشگاه آب و خاک استان کردستان استفاده کردند. شاخص دراستیک اصلاح شده بین ۹۶ تا ۱۵۹ بدست آمد و نقشه

رودخانه‌ها و همچنین برداشت آب در بالادست حوضه باعث پایین رفتن سطح آب در چاه‌ها، چشمه‌ها و دریاچه‌ها، کاهش کیفیت آب، فرونشست زمین و افزایش هزینه‌های برداشت می‌شود. سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا روش استاندارد را تحت عنوان روش دراستیک جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی ارائه نمود که بر اساس آن، پارامترهای مختلف هیدروژئولوژی که هر یک در انتقال آلودگی مؤثر می‌باشند با یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش با یکدیگر جمع شده و در نهایت نقشه آسیب‌پذیری را ارائه می‌دهند (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده است و در تمامی روش‌ها آسیب‌پذیری آبخوان براساس انتقال آلودگی از سطح زمین به لایه آبدار برآورد شده است. روش دراستیک یکی از روش‌های متداول استفاده شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی است (آل‌عبدی و همکاران، ۲۰۱۴). از مزایای مدل دراستیک می‌توان به هزینه اندک و تعداد داده‌های کم اشاره کرد، اما ضعف عمده این مدل، اعمال نظرها کارشناسی برای تعیین وزن و رتبه‌دهی پارامترهای به‌کاررفته در آن است (جوانویک و همکاران، ۲۰۰۶). برای بهبود مدل دراستیک تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده است که به تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از هوش مصنوعی اشاره می‌گردد. مقسوم و همکاران (۲۰۲۰) مدل دراستیک و دراستیک اصلاح شده با تأثیرات کاربری اراضی برای ارزیابی حساسیت آب‌های زیرزمینی در امتداد مسیر کریدور اقتصادی چین-پاکستان (CPEC) انجام دادند. نتایج آسیب‌پذیری با مدل دراستیک نشان داد که ۱۹ درصد محدوده دارای آسیب‌پذیری بالا، ۴۲ درصد آسیب‌پذیری متوسط، ۳۷ درصد دارای آسیب‌پذیری کم و دو درصد آسیب‌پذیری بسیار کم در برابر آلودگی آب‌های زیرزمینی است. اعتبارسنجی مدل با پارامتر نیترات نشان داد که مدل دراستیک اصلاح شده با کاربری اراضی (تغییرات انسانی) بهتر از مدل دراستیک بوده است. تحلیل حساسیت انجام شده با حذف تک پارامتر برای تجزیه و تحلیل مدل انجام شد و نتایج آن نشان داد که آسیب‌پذیری آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه تحت تأثیر پارامترهای کاربری اراضی و عمق سطح ایستابی می‌باشد.

¹ Receiver Operating Characteristic Curve

و عرض جغرافیایی "۰۰' ۰۰" تا "۰۰' ۳۵" واقع شده است (شکل ۱). مساحت محدوده ۹۸۲/۴۲ کیلومتر مربع، مساحت آبخوان ۷۷۹/۸۱ کیلومتر مربع، مساحت حوضه آبریز تلوار در دشت دهگلان ۲۵۵۰ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط از سطح دریا ۱۸۷۶ متر است، قسمتی از سرشاخه رودخانه تلوار در حوضه آبریز رودخانه سفیدرود را تشکیل می‌دهد. کوه‌های سرمه علی، عبدالرحمن، اویس، کیوارکور و دربند از مهم‌ترین ارتفاعات حاشیه این دشت هستند این ارتفاعات محدود به نواحی جنوب غربی و جنوب شرقی می‌باشند. این دشت از مرزهای شرقی به خط‌الراس نه چندان مرتفع شانوره و شهرستان قروه، از جنوب به ارتفاعات کوه دربند کیود و کوه دربند، زاجیان، عبدالرحمان و بندآباد، از شمال به ارتفاعات کوه شیدا و آخی کمال و خط‌الراس ارتفاعات مشرف به روستاهای سراب سرخه، جقه، دولت‌آباد، سالارآباد، تیلکوه، امیر آباد، بندل آباد و نهایتاً از غرب به ارتفاعات خاتون شیشه ری، خسروکش، باوریز، یوسف‌سیاه و شهرستان سنندج محدوده می‌گردد.

۲-۲- زمین‌شناسی

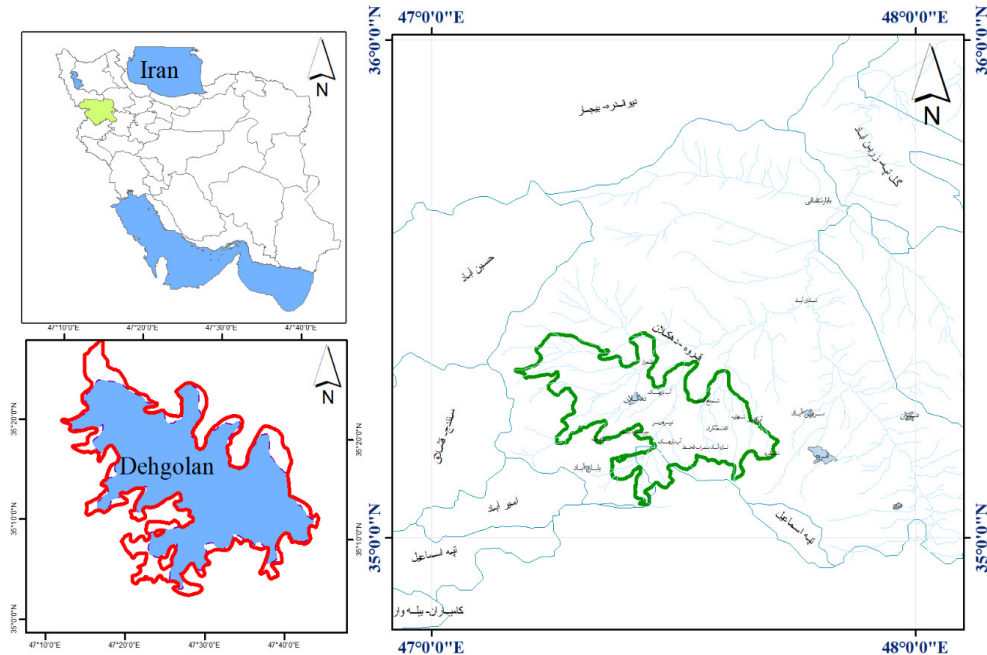
با توجه به سازندهای سخت (سنگ‌های آذرین، دگرگونی و...) به ویژه در حاشیه جنوبی دشت دهگلان، امکان تشکیل سفره در آن‌ها بررسی نشده است. پتانسیل نسبتاً زیاد منابع آبی دشت موجب شده است که تا کنون این نواحی کمتر مورد توجه باشند. معمولاً سنگ‌ها از طریق درز و شکاف‌های موجود، لایه‌بندی طبقات، وجود غارهای کارستی، قدرت و توان لازم برای جذب و ذخیره آب را در خود فراهم می‌سازند. در این سازندها برحسب عمق ناحیه هوازده و شکسته شده و وجود ارتباط هیدرولیکی بین درز و شکاف‌های آن‌ها توانایی تشکیل ذخایر آب زیرزمینی وجود دارد. در سنگ‌های کربناته ناحیه ارتفاعات جنوبی دشت دهگلان درز و شکاف و شکستگی‌های بسیاری مشاهده می‌شود که معبر مناسبی برای آب زیرزمینی به وجود آورده که می‌تواند به لحاظ نفوذ آب‌های فرورو در سنگ‌های کربناته و ایجاد انحلال در این سنگ‌ها و به وجود آوردن مخزن مناسب برای آب باشد. همچنین سنگ‌های ناحیه ارتفاعات جنوبی دشت دهگلان عاملی برای تغذیه سفره آب‌های زیرزمینی می‌باشند. نقشه زمین‌شناسی در شکل (۲) ارائه شده است.

آسیب‌پذیری آبخوان به سه محدوده‌ی کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی شد. نتایج محاسبه ضریب همبستگی (CI) بین شاخص دراستیک اصلاح شده و غلظت نیترات، ۴۱ محاسبه شد. نقشه آسیب‌پذیری بدست آمده از روش فازی نشان داد که نقشه نسبت به نقشه روش دراستیک اولیه بهبود یافته و عملکرد بهتری داشته است. نتایج نشان داد که نواحی پرخطر در این شاخص دراستیک بدست آمده از مدل فازی با مقادیر نیترات بالا عملکرد بهتری داشته است. همچنین نقشه نهایی نشان داد که نواحی مرکزی، شمال غربی و شرقی منطقه دارای بیش‌ترین میزان پتانسیل آلودگی هستند. در بررسی که در سال ۱۳۹۳ از چاه‌های شرب دشت دهگلان انجام شد مشاهده گردید که میانگین غلظت آنیون نیترات در نمونه آب‌های زیرزمینی بعد از کودهی بیش از حد استاندارد بوده که بیانگر روند افزایشی ترکیبات ازت‌دار مصرفی در بخش‌های صنعتی و کشاورزی بیان شد (ظاهری و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به اینکه دشت دهگلان یکی از بزرگ‌ترین دشت‌های استان کردستان بوده و قطب کشاورزی استان به‌شمار می‌رود روند روبه رشد جمعیت، توسعه‌ی اجتماعی و اقتصادی، رونق کشاورزی در منطقه و نیز توسعه صنایع متوسط و کوچک در دهگلان، موجب افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی در این منطقه گردیده است. در پی افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی و مصرف کودهای ازت‌دار در منطقه، کاهش کیفیت آب منطقه به همراه خواهد بود. بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت به‌منظور تعیین مناطق با پتانسیل بالای آلودگی آب زیرزمینی ضرورت دارد. در پژوهش‌های قبلی در منطقه بیشتر از روش‌های منفرد دراستیک، سینتاکس و SI استفاده شده است. بنابراین اصلی‌ترین تفاوت در این پژوهش به کاربرد پارامترهای رتبه‌بندی شده با روش دراستیک و بهینه‌سازی کردن ضرایب هر پارامتر در مدل آسیب‌پذیری با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و تهیه‌ی نقشه آسیب‌پذیری است. برای این منظور روش‌های شبکه عصبی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ به کار گرفته شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

موقعیت محدوده دهگلان واقع در شرق استان کردستان بین طول‌های جغرافیایی "۰۰' ۳۰" تا "۰۷' ۴۷" تا "۰۰' ۱۲' ۴۸"



شکل ۱. موقعیت محدوده آبخوان دهگلان در ایران و استان کردستان
 Fig. 1. The location of the Dehgolan aquifer in Iran and Kurdistan province

نرخ تغذیه در آبخوان، از روش پهنه‌بندی تغییرات حجم آب‌زیرزمینی آبخوان استفاده شده است. ابتدا داده‌های سطح آب برای چاه‌های مشاهده‌ای جمع‌آوری و برای هر یک از آن‌ها پلی‌گون تیسین رسم گردید. در ادامه طبق رابطه (۱) ضریب‌ذخیره برای تغییرات سالانه سطح آب پیرومتر هر تیسین ضرب گردید و بر مدت زمان بررسی تغییرات سطح آب تقسیم گردید.

$$R = S_y \times \Delta h / \Delta t + \text{Pumping} \quad (1)$$

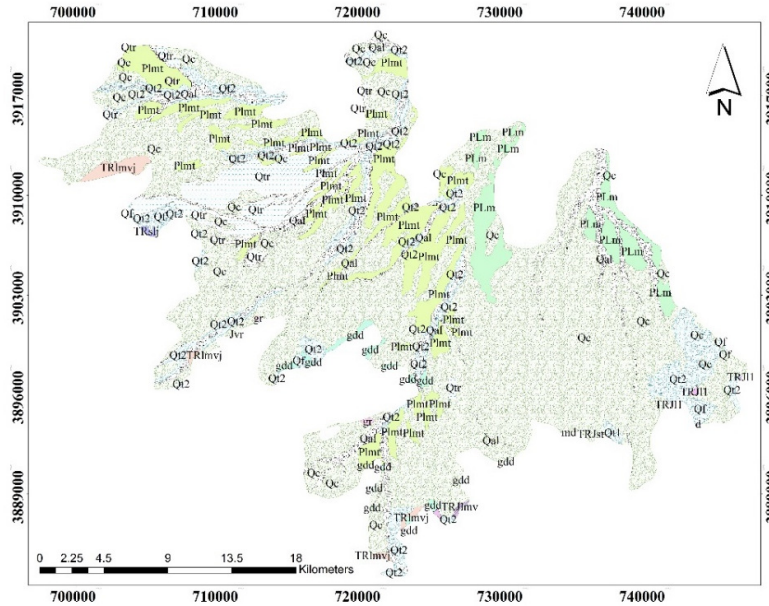
در رابطه بالا R نرخ تغذیه، S_y آبدهی ویژه (ضریب ذخیره)، h ارتفاع تراز آب و t زمان می‌باشد. ایرد اساسی معادله بالا عدم لحاظ آب‌برگشتی حاصل از کشاورزی می‌باشد که به منظور دخالت این گزینه در معادلات میزان برداشت از چاه‌های موجود در هر پلیگون تیسین محاسبه و با عددهای بدست آمده حاصل از معادله بالا جمع گردید و در نهایت عدد بدست آمده بر مساحت هر پلیگون تقسیم گردید و نرخ تغذیه هر پلیگون محاسبه گردید. نرخ تغذیه در هر پلیگون را به چاه مشاهده‌ای براساس آن پلیگون ترسیم شده را تعمیم داده و از روش کریجینگ به منظور پهنه‌بندی در کل محدوده استفاده گردید (نادری و همکاران، ۱۳۹۷).

۳- مدل DRASTIC

همانطور در شکل (۳) ارائه شده این مدل از هفت پارامتر تشکیل شده است که در انتقال آلاینده و آلودگی‌های محیطی و انسانی به آب‌های زیرزمینی مؤثر می‌باشد (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). عمق آب زیرزمینی (D)؛ فاصله بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی، هرچه عمق آب‌های زیرزمینی بیشتر باشد زمان بیشتری طول می‌کشد تا مواد آلاینده به آب زیرزمینی برسد. در نتیجه در اثر هم کنش‌های طبیعی از قبیل تجزیه شیمیایی، جذب و پخش امکان پالایش مواد آلاینده افزایش می‌یابد. بنابراین، سطوح ایستایی عمیق‌تر شانس آلودگی کم‌تر دارند. عمق آب‌های زیرزمینی رابطه مستقیم و تأثیر زیادی در آلودگی سفره دارد، به همین دلیل بیشترین نرخ به عمق کم و نزدیک به سطح که نسبت به آلاینده آسیب‌پذیرتر می‌باشد، تعلق گرفته است (جدول ۱).

تغذیه خالص^۱ (R)؛ بیشتر سرعت بالاتری را برای انتقال آلاینده‌ها به سطح آب زیرزمینی فراهم می‌آورد. هرچه تغذیه زیادتر باشد، آسیب‌پذیری آب‌زیرزمینی به علت احتمال بیشتر انتقال آلاینده‌ها بیشتر می‌شود (بروس، ۱۹۷۸؛ سکندا و همکاران، ۱۹۹۸). جهت بدست آوردن

¹ Recharge

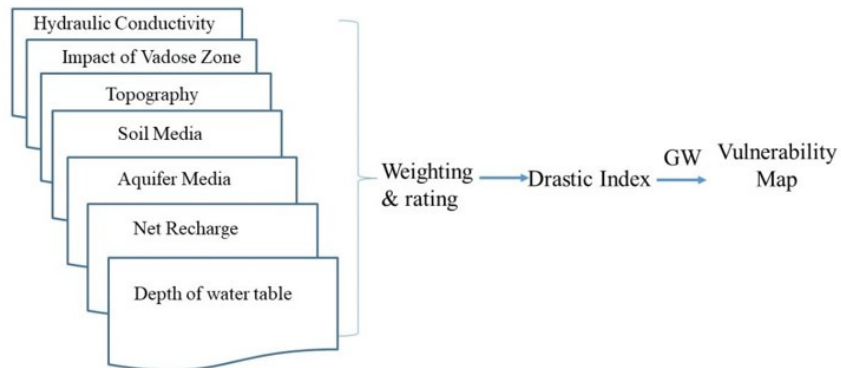


راهنما

- Geo
- Qtr=Rhyolite and acidic volcanics
- PLm=Cream to pink marl with intercalations of sandstone and conglomerate
- Plmt=Tuff, argillaceous limestone, marl, calcareous and conglomerate
- Qal=Recent alluvium (alluvial channel deposits)
- Qc=Silty clay flat
- Qf=High level old gravel fans
- Q1=High level terraces
- Q2=Medium level alluvial deposits
- Qr=Travertine
- TRJ1=White to cream marble thick bedded to massive
- TRJ2=Grey to black marble with actinolite and scapolite
- TRJmv=Dark grey crystalline limestone with interbedded metavolcanic rocks
- TRJlq=Alternation of quartzite and marble
- TRJmv=Meta tuff, limestone
- TRJschq=Alternation of garnet, micaschist, quartzite and marble
- TRJst=Alternation of staurolite schist and quartzite
- TRlmvj= phyllite, slate and meta sandstone
- TRmlj=Gray to black, crystalline
- TRslj=Meta quartzarenite and tuff with intercalation of calcschist and a few volcanic rocks
- d=Dikes and apophysis of aplite granite and granite
- gdd=Granite, granodiorite, syenite, monzosyenite and dioritic gabbro (undifferentiated)
- gr=Microgranite-granite, (jurassic)
- md=Monzodiorite, quartz monzonite, syenite, and quartz diorite

شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی آبخوان دهگلان

Fig. 2. Geological map of Dehgolan aquifer



شکل ۳. مراحل فرایند تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری

Fig. 3. Steps in the process of preparing vulnerability maps

جدول ۱. رتبه‌بندی و وزن مربوط به پارامترها (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

Table 2. Ranking and weight of parameters (Aller et al., 1987)					
امتیاز	محدوده D(m)	امتیاز	محدوده R(cm/year)	امتیاز	محدوده C(m/day)
وزن نسبی ۵		وزن نسبی ۴		وزن نسبی ۳	
۱۰	۰-۱/۵	۱	۰-۵/۰۸	۱	۰/۴-۴/۱
۹	۱/۵-۴/۶	۳	۵/۰۸-۱۰/۱۶	۲	۴/۱-۱۲/۳
۷	۴/۶-۹/۱	۶	۱۰/۱۶-۱۷/۷۸	۴	۱۲/۳-۲۸/۷
۵	۹/۱-۱۵/۲	۸	۱۷/۷۸-۲۵/۴	۶	۲۸/۷-۴۱
۳	۱۵/۲-۲۲/۸	۹	۲۵/۴<	۸	۴۱-۸۲
۲	۱۵/۲-۳۰/۴			۱۰	۸۲<
۱	>۳۰/۴				
امتیاز	محدوده T (%)	امتیاز	محدوده (A)	امتیاز	محدوده (S) وزن
وزن نسبی ۱		وزن نسبی ۳		وزن نسبی ۲	
۱۰	۰-۲	۲	شیل توده‌ای	۱۰	نازک یا بدون لای خاک
۹	۲-۶	۳	دگرگونی	۱۰	شن
۵	۶-۱۲	۴	دگرگونی هوازده	۹	ماسه
۳	۱۲-۱۸	۵	آبرفت	۸	پیت
۱	۱۸<	۶	ماسه‌سنگ، آهک و شیل	۷	رس ترک‌خورده
امتیاز	محدوده (I)	امتیاز	محدوده (A)	امتیاز	محدوده (S) وزن
وزن نسبی ۵		وزن نسبی ۳		وزن نسبی ۲	
۱	لاهی	۶	ماسه‌سنگ توده‌ای	۵	لوم
	محصورکننده				
۳	سیلت/رس	۸	شن و ماسه	۴	لوم سیلتی
۳	شیل	۹	بازالت	۳	لوم رسی
۶	سنگ‌آهک	۱۰	سنگ‌آهک کارستی	۲	لجن ولای
۶	ماسه‌سنگ			۱	رس سخت و متورم نشده
۶	ماسه‌سنگ، شیل				
۶	شن و ماسه و رس				
۴	دگرگونی				
۸	شن و ماسه				
۹	بازالت				
۱۰	سنگ‌آهک کارستی				

به روش IDW درون‌یابی شده و به فرمت رستری تبدیل شد. به این ترتیب، لایه محیط آبخوان آماده شد (ندیری و همکاران، ۱۳۹۸).

محیط خاک^۳ (S)؛ بر میزان تغذیه و توانایی آلاینده‌ها برای نفوذ به محیط وادوز تأثیر می‌گذارد. هر قدر اندازه ذرات تشکیل‌دهنده خاک ریزتر و نفوذپذیری خاک کمتر و درصد مواد آلی و ضخامت خاک بیش‌تر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. بنابراین محیط خاک بر اساس رده‌بندی بافتی آن مشخص می‌گردد و بر اساس آلودگی امتیازبندی می‌شود.

محیط آبخوان^۱ (A)؛ به خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده‌ی منطقه اشباع نظیر میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات و جورشدگی ذرات اشاره دارد که میزان پویای تحرک آلودگی و به عبارتی فرایندهای رقیق‌سازی آلودگی نظیر تجزیه‌ی شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر آنرا کنترل می‌کند. برای تهیه این لایه از اطلاعات لاگ چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده شد و براساس جنس لایه‌های آبخوان، رتبه‌بندی انجام گرفت، به طوری که برای رسوبات ریزدانه، رتبه کمتر و برای رسوبات درشت دانه، رتبه بیشتر اختصاص یافت (جدول ۱). سپس، داده‌های به‌دست آمده

³ Soil Media¹Aquifer Media²Retardation

انتقال (T) بر حسب مترمربع بر روز استفاده شد. بدین صورت که با استفاده از ArcGIS رستری هر دو پارامتر تهیه و سپس طبق رابطه (۲) در محیط ArcGIS با استفاده از Algebra raster رستری هدایت هیدرولیکی تهیه گردید.

$$K = \frac{T}{b} \quad (2)$$

به هر پارامتر براساس استعداد و حساسیت نسبی در برابر آلاینده، یک وزن نسبی از ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود و هم‌چنین رتبه‌بندی براساس مقیاس ۱ تا ۱۰ و اهمیت نسبی آن در پتانسیل آلودگی منطقه ارزیابی انجام می‌شود (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). شاخص دراستیک از طریق جمع فاکتورهای وزنی هر بخش از منطقه محاسبه می‌شود (شکل ۳). شاخص آسیب‌پذیری به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$DI = D_R \quad D_W + R_R \quad R_W + A_R \quad A_W + S_R \quad S_W + T_R \quad T_W + I_R \\ I_W + C_R \quad C_W \quad (3)$$

R و W به ترتیب نشان‌دهنده کلاس و وزن لایه‌ها می‌باشند. مطابق جدول ۲ معمولاً بالاتر بودن رقم شاخص دراستیک (DI)، آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به آلودگی آب زیرزمینی را نشان می‌دهد (آلر و همکاران، ۱۹۸۷).

توپوگرافی (T)؛ برحسب شیب و تغییرات آن عامل کنترل‌کننده‌ای در نفوذ آلاینده‌ها و تشکیل رواناب می‌باشد. در شیب کم فرصت نفوذ بالاتر و نیروی آلودگی بیشتر برای نفوذ آلاینده‌ها وجود دارد.

جنس غیراشباع (I)؛ مربوط به جنس خاک می‌باشد، که از سطح ایستابی شروع و تا زیر منطقه خاک سطحی ادامه دارد. بافت زون غیراشباع، زمان انتقال آلاینده‌ها را از طریق این محیط تعیین می‌کند. روش تهیه لایه محیط غیراشباع، مشابه لایه محیط آبخوان است با این تفاوت که برای تهیه این لایه از جنس رسوبات منطقه غیراشباع استفاده می‌شود. در این روش بی‌بعد از تهیه داده‌های رتبه‌دهی شده، درون‌یابی انجام گرفت و سپس به لایه رستری تبدیل شد و لایه محیط غیراشباع به دست آمد (ندیری و همکاران، ۱۳۹۸).

هدایت هیدرولیکی (C)؛ حرکت آلاینده و پخش آن را از نقطه نفوذ تا رسیدن به منطقه اشباع کنترل می‌نماید. بنابراین، هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود. بیشترین نرخ به بیشترین هدایت هیدرولیکی که نسبت به آلاینده‌ها آسیب‌پذیرتر می‌باشد، تعلق گرفته است. برای این منظور از ضخامت لایه آبخوان (b) بر حسب متر و قابلیت

جدول ۲. جدول شاخص آسیب‌پذیری (آلر و همکاران، ۱۹۸۷)

Table 1. Vulnerability index table (Aller et al., 1987)

محدوده آسیب‌پذیری	آسیب‌پذیری (DI)
< ۷۹	No Risk of Vulnerability
۸۰-۹۹	Very Low
۱۰۰-۱۱۹	Low
۱۲۰-۱۳۹	Low to Medium
۱۴۰-۱۵۹	Medium to High
۱۶۰-۱۷۹	High
۱۸۰-۱۹۹	Very Much
> ۱۹۹	Contamination Total

یک خانواده از توابع مقیاس $\phi(x)$ که به صورت زیر معرفی می‌شوند.

$$\phi_{m,k}(x) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}x - k) \quad m, k \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

اگر $\phi(x)$ را یک تابع مقیاس مادر در نظر بگیریم، مقادیر 2^{-m} و k به ترتیب مربوط به گسترش و انتقال تابع مقیاس مادر هستند. توابع مقیاس رزولوشن m و $\phi_{m,k}(x)$ در اصل

۴- شبکه عصبی موجک

شبکه‌های عصبی مبتنی بر ویولت^۱ که ویولت^۲ نامیده می‌شوند از ترکیب دو تئوری ویولت‌ها و شبکه‌های عصبی به وجود آمده‌اند (صفوی و روماگنولی، ۱۹۹۷). در ویولت‌ها از دو دسته توابع ویولت و توابع مقیاس^۳ استفاده می‌شود.

³ Scaling functions

¹ Wavelet

² Wave net

شبکه پیشخور^۵ در نظر گرفته می‌شوند در این شبکه‌ها هر دو پارامتر انتقال و تغییر مقیاس موجک‌ها در کنار وزن‌هایشان بهینه می‌گردند. در مجموع گام‌های مهم در آموزش و صحت‌سنجی شبکه عصبی موجک به صورت زیر است. داده‌های ورودی به دو دسته جهت آموزش شبکه و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. موجک مادر با احراز شرایط یاد شده پس از اعمال ضرایب انتقال و مقیاس مناسب به موجک فرزند تبدیل می‌شود. توابع فعال‌سازی نرون‌های لایه پنهان شبکه عصبی با انواع موجک‌های فرزند جایگزین می‌شود. شبکه عصبی ویولت ایجاد شده با استفاده از مجموعه داده‌های مربوط به آموزش شبکه، آموزش داده می‌شود. عملکرد کلی شبکه موجک با تجزیه و تحلیل نحوه تخمین داده‌های صحت‌سنجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. و با رضایت‌بخش بودن عملکرد شبکه مرحله آموزش به اتمام می‌رسد. در غیر این صورت مراحل قبل تا دستیابی به بهترین حالت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (کاوه و ایرانمنش، ۱۳۹۰).

۵- الگوریتم ازدحام مرغ^۶ (CSO)

بهینه‌سازی ازدحام مرغ، یک الگوریتم الهام گرفته زیستی است که برای بهینه‌سازی تک هدفه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zouache et al., 2019). بهینه‌سازی ازدحام مرغ از نظم سلسله مراتبی و رفتارهای یک دسته مرغ هنگام جستجوی غذا تقلید می‌کند، جایی که هر مرغ نشان دهنده یک راه حل بالقوه برای یک مسئله بهینه‌سازی است. در اصل، CSO از چهار قانون زیر برای ایده‌آل سازی رفتار مرغ‌ها استفاده می‌کند:

۱- دسته یا ازدحام مرغ گروه مرغ متشکل از چندین گروه است که هر گروه خروس غالب و برتر و یک جفت مرغ و جوجه دارد.

۲- در هر گروه از دسته مرغ، اعتبار و هویت مرغ (خروس، مرغ و جوجه) به ارزش و مقدار تناسب خود مرغ بستگی دارد. جوجه‌هایی که بهترین مقادیر تناسب را دارند به عنوان خروس شناخته می‌شوند. هر کدام از آن‌ها در یک گروه از خروس جلوتر خواهند بود. جوجه‌هایی که از نظر آمادگی جسمانی ضعیف‌تر هستند جوجه‌ها شناخته می‌شوند. بقیه مرغ‌ها خواهند بود.

پایه‌های متعامد فضای برداری vm در رزولوشن m می‌باشند. به عبارتی فضای برداری vm حاوی کلیه تقریب‌های تابع $f(x)$ با رزولوشن m و توسط توابع $\phi_{m,k}(x)$ می‌باشد. بنابراین فضاها برداری $\{vm\}$ حاوی تقریب‌های مختلف تابع $f(x)$ در رزولوشن‌های مختلف می‌باشند. حال اگر wm را فضای برداری متعامد با vm در رزولوشن m فرض کنیم آنگاه می‌تواند دسته‌ای دیگر از پایه‌های متعامد فضای wm که ویولت $\Psi(x)$ نامیده می‌شوند را نیز بصورت زیر بیان نمود (صفوی و روماگنولی، ۱۹۹۷):

$$\Psi_{m,k}(x) = 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}x - k) \quad m, k \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

شبکه عصبی ویولت بر مبنای روابط (۴) و (۵) شکل می‌گیرد و دارای الگوریتم‌های آموزش مخصوص خود می‌باشد که در پژوهشی به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است (وانگ و دینگ، ۲۰۰۳). لازم به ذکر است در حالت کلی خانواده ویولت‌های پیوسته نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R} \quad (6)$$

و تبدیل ویولت برای توابع پیوسته به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{a,b}(f) = \tilde{f}_{(a,b)} = \langle \Psi_{a,b}(t), f(t) \rangle \quad (7)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

پارامتر a به‌عنوان پارامتر گسترش و متناسب با فرکانس می‌باشد (به عبارت دیگر پارامتر تأخیر کوچک متناظر با فرکانس بالا و پارامتر تأخیر بزرگ متناظر با فرکانس پایین می‌باشد) و پارامتر b به‌عنوان پارامتر انتقال و متناسب با زمان می‌باشد. تلفیق تئوری موجک با مفاهیم شبکه عصبی منجر به ایجاد شبکه عصبی موجک می‌گردد و به کارگیری آن می‌تواند جایگزین مناسبی در شبکه‌های عصبی پیشخور جهت تخمین و تقریب توابع غیرخطی اختیاری باشد. شبکه‌های عصبی پیشخور دارای تابع فعال‌سازی سیگموئید^۴ در لایه پنهان می‌باشند. دامنه توابع سیگموئید شامل تمامی اعداد حقیقی بوده و مقدار بازگشتی این تابع نیز به طور یکنواخت از صفر تا یک یا با توجه نوع تابع از ۱ تا ۰- تغییر می‌کند. در حالی که در شبکه‌های عصبی موجک، توابع موجک به‌عنوان تابع فعال‌سازی لایه پنهان

⁶ Chicken Swarm Optimization

⁴ Sigmoid

⁵ Feedforward Network

که در آن Rand یک عدد تصادفی است که به طور یکنواخت بین ۰ و ۱ توزیع می‌شود. r_1 یک شاخص خروس است، در حالی که r_2 یک شاخص جوجه (خروس یا مرغ) است. به طور تصادفی از میان ازدحام یا انبوه انتخاب می‌شود ($r_1 \neq r_2$). جوجه‌ها برای جستجوی غذا در اطراف مادر خود اکتشاف می‌کنند. حرکت جوجه‌ها توسط معادله (۱۴) بدست می‌آید.

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + FL * (x_{m,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (14)$$

جایی که $x_{m,j}^t$ موقعیت مادر جوجه i ام به گونه‌ای است که $m \in [1, N]$ می‌باشد و FL پارامتری است که نشان می‌دهد جوجه با چه سرعتی مادر خود را دنبال می‌کند. برای در نظر گرفتن تفاوت بین جوجه‌های مختلف، FL به طور تصادفی در محدوده $[0, 2]$ انتخاب می‌شود.

معیارهای ارزیابی دقت مدل‌های هوش مصنوعی

در این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی شبکه و توانایی آن برای پیش‌بینی از چهار معیار جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) میزان خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد و ضریب تبیین (R^2) و ضریب همبستگی (r) نشانگر میزان بازه شبکه است، استفاده شد. هر چقدر RMSE و MAE به صفر و R^2 و r به یک میل کنند، یعنی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی بسیار نزدیک به هم است و نتایج مدل کمترین مقدار خطا و بیشترین دقت را دارد. این چهار معیار به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(N_i - \bar{N})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}} \quad (17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

۶- نتایج

در این مطالعه به منظور صحت‌سنجی و مقایسه پیش‌بینی مدل‌ها از غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. شکل (۵) توزیع نیترات را در منطقه نشان می‌دهد که با استفاده از روش IDW پهنه‌بندی شده

۳- بعد از هر چند مرحله (G)، ترتیب سلسله مراتبی، رابطه سلطه و رابطه مادر و کودک باید کاملاً تغییر کند.

۴- جوجه‌ها در جستجوی غذا جفت خروس خود را دنبال می‌کنند. ما فرض می‌کنیم که مرغ‌ها به طور تصادفی غذای خوبی را که دیگران پیدا کرده اند، می‌دزدند. جوجه‌ها در اطراف مادران خود به دنبال غذا می‌گردند. خروس در رقابت برای غذا از مزیت برخوردار است.

در یک گروه مرغ N نفری، ما اعداد زیر را از هم متمایز می‌کنیم: RN، HN، CN و MN که به ترتیب تعداد خروس‌ها، مرغ‌ها، جوجه‌ها و مرغ‌های مادر را نشان می‌دهد. موقعیت هر مرغ در یک فضای D بعدی طبق رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$x_{i,j} \quad (i \in [1, \dots, D]), j \in [1, \dots, D] \quad (8)$$

در الگوریتم CSO سه نوع مرغ وجود دارد. هر نوع معادله حرکت مناسب خود را دارد. خروس‌ها با داشتن بهترین مقادیر تناسب، می‌توانند غذا را در یک مکان وسیع‌تر از کسانی که دارای مقادیر تناسب بدتری هستند، پیدا کنند. حرکت خروس‌ها طبق معادلات (۹) و (۱۰) بدست می‌آید:

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t * (1 + randn(0, 2)) \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} 1 & , \text{if } f_i \leq f_k \\ \exp\left(\frac{f_k - f_i}{|f_i| + \epsilon}\right) & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

که در رابطه، Randn(2,0) یک توزیع گاوسی با میانگین صفر و انحراف استاندارد ۲ است که یک ثابت بسیار کوچک است که برای جلوگیری از تقسیم بر خطای صفر استفاده می‌شود، k شاخص خروس است که به طور تصادفی از بین گروه خروس‌ها انتخاب می‌شود و F_i مقدار تناسب خروس X_i است. مرغ‌ها هم گروه خود را برای جستجوی غذا دنبال می‌کنند. علاوه بر این، آن‌ها همچنین غذای یافت شده خوب توسط مرغ‌های دیگر را به طور تصادفی می‌دزدند، اگرچه توسط مرغ‌های دیگر منع شوند. مرغ‌های برتر و مسلط در رقابت برای غذا از مرغ‌های مطیع‌تر این مزیت را دارند. از نظر ریاضی، حرکت مرغ‌ها را می‌توان از روابط (۱۱) تا (۱۳) بدست آورد:

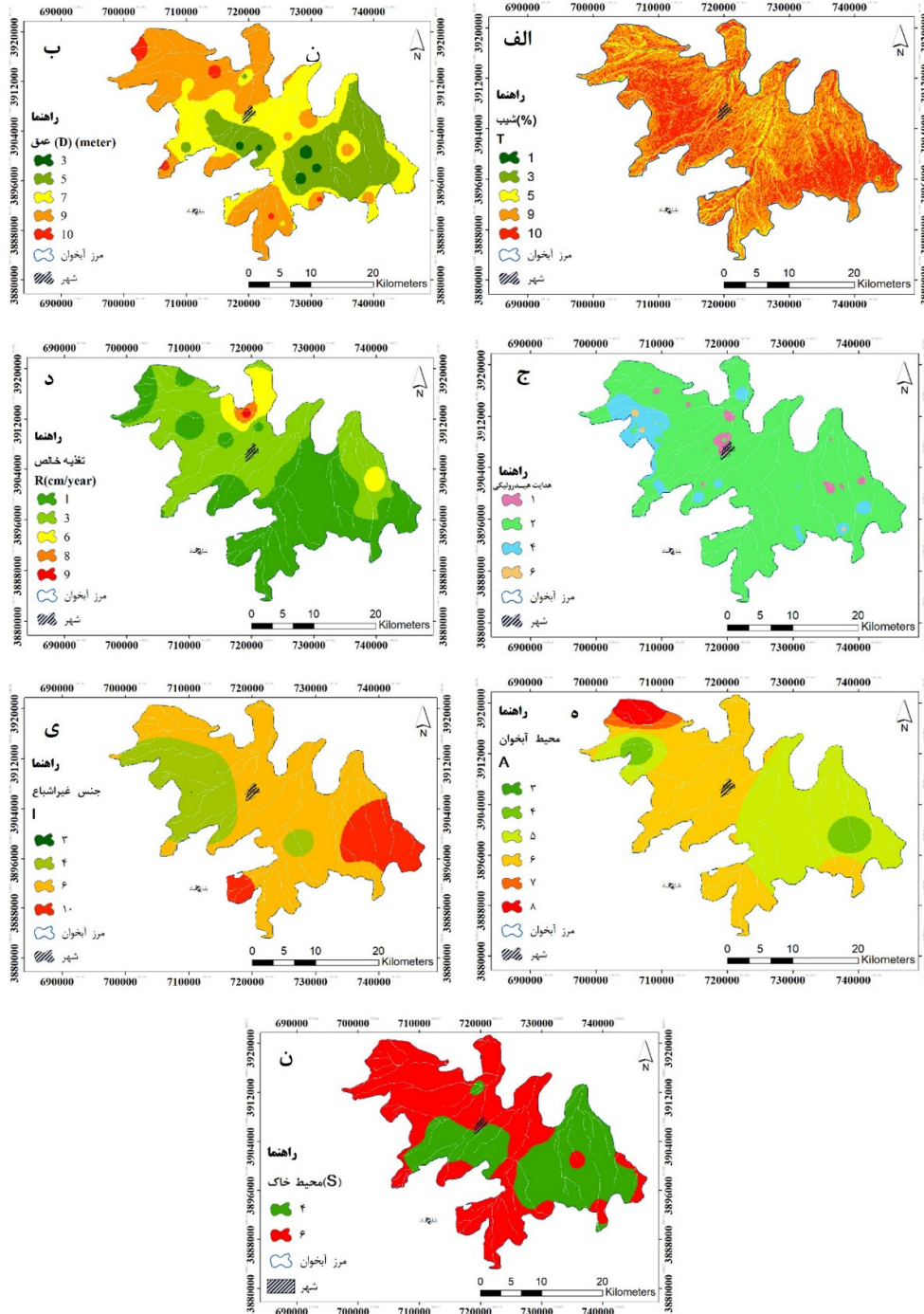
$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + S_1 * Randn * (x_{r_1,j}^t - x_{i,j}^t) + S_2 * Randn * (x_{r_2,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (11)$$

$$S_1 = \exp\left(\frac{f_i - f_{r_1}}{|f_i| + \epsilon}\right) \quad (12)$$

$$S_2 = \exp(f_{r_2} - f_i) \quad (13)$$

۶۰ میلی‌گرم در لیتر نشان می‌دهد. جهت تعیین نقشه‌های هم‌عمق سطح آب زیرزمینی از داده‌های پیزومتر ۵۹ پیزومتر منتخب با داده‌های ماهانه از سال آبی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۹ سازمان مدیریت منابع آب ایران استفاده شد.

است که بیشترین غلظت نترات در آب زیرزمینی را در مرکز آبخوان نزدیک روستاهای (مجیدآباد، مبارک‌آباد کله‌ره‌ش، حسینی، دهرشید و آب‌باریک، جوانمردآباد) و حدود ۸۰ درصد از مساحت آبخوان دارای مقدار کمتر از



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی پارامترهای روش دراستیک: الف) توپوگرافی، ب) عمق سطح آب زیرزمینی، ج) هدایت هیدرولیکی، د) تغذیه خالص، ه) محیط آبخوان، ی) تأثیر منطقه غیراشباع، ن) محیط خاک.

Fig. 5. Zoning map of drastic method parameters: a) topography, b) depth of underground water level, c) hydraulic conductivity, d) net nutrition, e) aquifer environment, j) influence of unsaturated zone, n) soil environment.

حجم آبی را که موجب پراکنش و رقیق‌سازی آلوده‌کننده در مناطق اشباع و غیراشباع می‌گردد، کنترل می‌کند. معمولاً هر چقدر تغذیه بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی نیز بیشتر است. طبیعی است در صورتی که تغذیه بسیار کم باشد، احتمال آلودگی بسیار کاهش می‌یابد. طبق شکل (۵) در دشت دهگلان حدود ۷۰ درصد از کل سطح منطقه دارای ۱۰/۱۶ تا ۵/۰۸ سانتی‌متر در سال تغذیه هست و بیشترین مقدار تغذیه ۲۸/۳ سانتی‌متر در سال است. بنابراین در محدوده مطالعاتی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تغذیه خالص و بعد از آن عمق تا سطح ایستابی عوامل افزایش‌دهنده پتانسیل آسیب‌پذیری محسوب می‌شوند و با درجه تأثیر مناسب، مقدار شن و ماسه موجود در خاک سطحی و عمقی، باعث افزایش پتانسیل آلودگی هستند. در شکل ۶ توزیع نیترات در محدوده آبخوان دهگلان ارائه شده است. طبق این نقشه محدوده مورد مطالعه نیترات در بازه‌ی ۱۰ تا ۲۴۹/۵ میلی‌گرم در لیتر بوده و مناطق بخش مرکزی و جنوبی میزان نیترات بیشتر از حد مجاز (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) است طبق مطالعه منطقه این بخش دارای منطقه مسکونی، ورودی فاضلاب شهری و روستایی، ورود فاضلاب واحدهای صنعتی در محدوده پژوهش و خروجی زهکشی کشاورزی است که باعث افزایش این پارامتر شده است.

۶-۱- نتایج مدل‌سازی با شبکه عصبی موجک

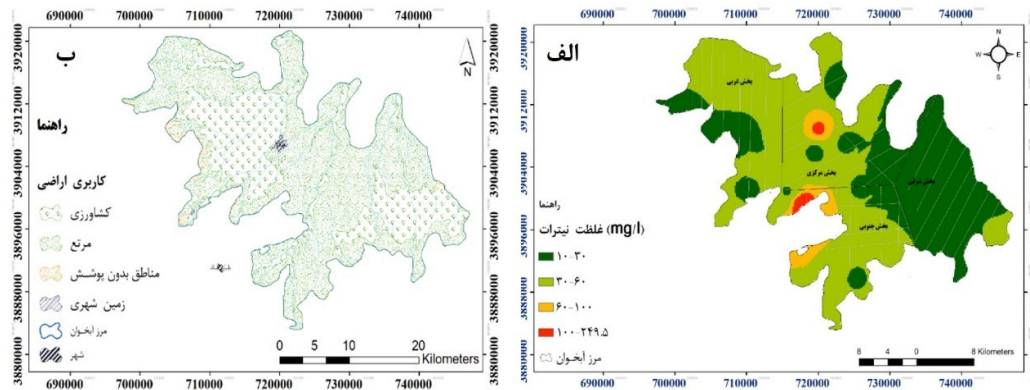
در این پژوهش برای اجرای مدل شبکه هوشمند به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری به‌علت وسعت زیاد دشت و همچنین ناهمگنی موجود، دشت مطالعه شده به چهار بخش (شرقی، غربی، مرکزی و جنوبی) تقسیم شد (شکل ۶) و برای هر بخش بطور جداگانه مدل هوشمند شبکه عصبی موجک اجرا گردید. در این روش هفت پارامتر مدل دراستیک به عنوان ورودی‌های مدل و شاخص آسیب‌پذیری به‌عنوان خروجی مدل انتخاب شد. لذا بعد از تهیه نقشه شاخص دراستیک با استفاده از Raster to Point در محیط ArcGIS به ازای نقاط utm در آن با نقشه‌های رستری شده به ازای هر نقطه هفت پارامتر استخراج گردید و سپس به عنوان ورودی به مدل‌ها داده شد. بنابراین در این پژوهش ۲۸۷۰ نقطه از نقشه‌های رستری استخراج که از این تعداد ۲۱۵۰ نقطه برای مرحله آموزش و ۷۲۰ نقطه برای مرحله صحت‌سنجی استفاده گردید. برای اجرا در مدل عصبی

داده‌های مذکور پس از رفع نواقص و ارزیابی صحت داده‌ها، جهت تهیه نقشه‌های هم‌عمق به کار گرفته شد. جهت تهیه هدایت هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه، نقشه قابلیت انتقال و ضخامت آبخوان از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی اخذ گردید. لایه عمق آب زیرزمینی با استفاده از درون‌یابی کریجینگ برای عمق آب زیرزمینی (D) سطح آب محاسبه شد شکل (۵) و مطابق طبقه‌بندی استاندارد دراستیک رتبه‌بندی شد. در تهیه لایه تغذیه خالص (R)، از تغییرات سطح ایستابی برای سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ استفاده شد. و همچنین با توجه به اینکه خاک منطقه دارای نفوذپذیری کم است طبق رتبه‌بندی دارای ارزشی معادل چهار و شش است. برای تهیه لایه محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، محیط غیراشباع (I) و لایه هدایت هیدرولیکی (C) از لاگ‌های چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. لایه توپوگرافی نیز با تهیه‌ی شیب از نقشه رقومی ارتفاعی دشت حاصل شد. سپس لایه‌های مذکور بر اساس روش استاندارد طبقه‌بندی و نرخ‌بندی شدند. نقشه‌های به‌دست‌آمده از هر پارامتر در شکل (۵) ارائه شده است.

مطابق شکل (۵) تقریباً ۱۰ درصد منطقه مورد مطالعه دارای شیب بین ۱۲-۱۸ درصد است که در شیب متوسط، پتانسیل آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد. ۷۵ درصد بخش مرکزی منطقه دارای شیب کمتر از ۵ درصد است که در شیب‌های کم، پتانسیل آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد که این مطلب در نقشه‌ی آسیب‌پذیری کاملاً مشهود می‌باشد. پس از نظر شیب، دشت دهگلان کمتر پتانسیل آلودگی را دارد. حدود ۶۹ درصد منطقه، فاصله سطح زمین تا سطح ایستابی کمتر از ۱۰ متر هست و با توجه به رتبه‌بندی دراستیک می‌توان نتیجه گرفت که اعماق کمتر از ۱۰ متر تأثیر زیادی در افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری دارد. پارامتر هدایت هیدرولیکی بیان‌کننده قابلیت هدایت آب و آلاینده‌های محلول در آن هست. به‌طور متوسط عمده منطقه مورد مطالعه دارای هدایت هیدرولیکی ۸ متر بر روز هست. این عمل می‌تواند در پتانسیل آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه محدودیت زیادی وارد کند زیرا ۸۰ درصد آبخوان، هدایت هیدرولیکی کمتر از ۱۲ متر بر روز دارد. تغذیه آب زیرزمینی موجب می‌گردد تا آلاینده در صورت وجود به صورت عمودی انتقال یافته و به سطح ایستابی برسد و به صورت افقی در آبخوان حرکت کند. این پارامتر

تیبین (R^2) و RMSE شبکه مصنوعی موجک برای بخش‌های شرق و غرب ۰/۹۶، ۰/۹۸ و ۰/۸۲، ۰/۸۲ به‌دست آمد. مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۳)، برای بخش جنوبی شبکه عصبی موجک بین مقادیر شاخص آسیب‌پذیری با مدل موجک و مقادیر محاسبه شده با دراستیک در مرحله صحت‌سنجی با مقادیر $RMSE=1/51$ و $R^2=0/94$ دارای بیشترین خطا بوده است.

موجکی، ابتدا موجک مناسب (سیملت) انتخاب گردید. سپس با اعمال تبدیل روی داده‌ها، ضرایب تقریب و جزئیات آن‌ها استخراج گردید و داده‌ها به‌وسیله تابع موجک کلاه مکزیکی به‌عنوان توابع فعال‌سازی که مشتق دوم تابع گوسی بوده، تبدیل می‌یابند. برای آموزش شبکه از الگوریتم گرادینان نزولی که در یادگیری شبکه‌های عصبی و حداقل سازی مقدار خطای و تنظیم پارامترهای شبکه استفاده می‌شود، بکار گرفته شد. براساس مقادیر ضریب



شکل ۶. الف) توزیع مکانی غلظت نیترات در آب زیرزمینی و ب) نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه

Fig. 6. a) Spatial distribution of nitrate concentration in underground water b) Land use map of the studied area

جدول ۳. معیارهای ارزیابی دقت شبکه عصبی موجک برای آسیب‌پذیری

Table 3. Criteria for evaluating the accuracy of wavelet neural network for vulnerability

r	R^2	RMSE	MSE	معیارها کلاس آسیب‌پذیری
۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۶۹	۰/۵۱	شرق
۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۶۸	غرب
۰/۹۶	۰/۹۲	۱/۲	۰/۹۵	مرکزی
۰/۹۴	۰/۸۰	۱/۵۱	۱/۰۵	جنوب

غلظت نیترات چاه‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۷ نشان داده شده است. دایره‌های توخالی موقعیت و غلظت نیترات را در منطقه نشان می‌دهد که برای صحت‌سنجی نهایی هر سه روش دراستیک اصلی و نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از خروجی شبکه مصنوعی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ استفاده شده است. با انطباق مقادیر نقاط با نیترات زیاد در محدوده با خطر آلودگی بیشتر قرار گرفته‌اند، این انطباق در نقشه آسیب‌پذیری حاصل از مدل شبکه مصنوعی موجک نسبت به الگوریتم ازدحام مرغ و روش دراستیک اصلی بیشتر است و هیچ چاه آبی که با غلظت نیترات زیاد در منطقه با خطر آلودگی کم قرار ندارد، بلکه در محدوده با خطر آلودگی بیشتر قرار دارند.

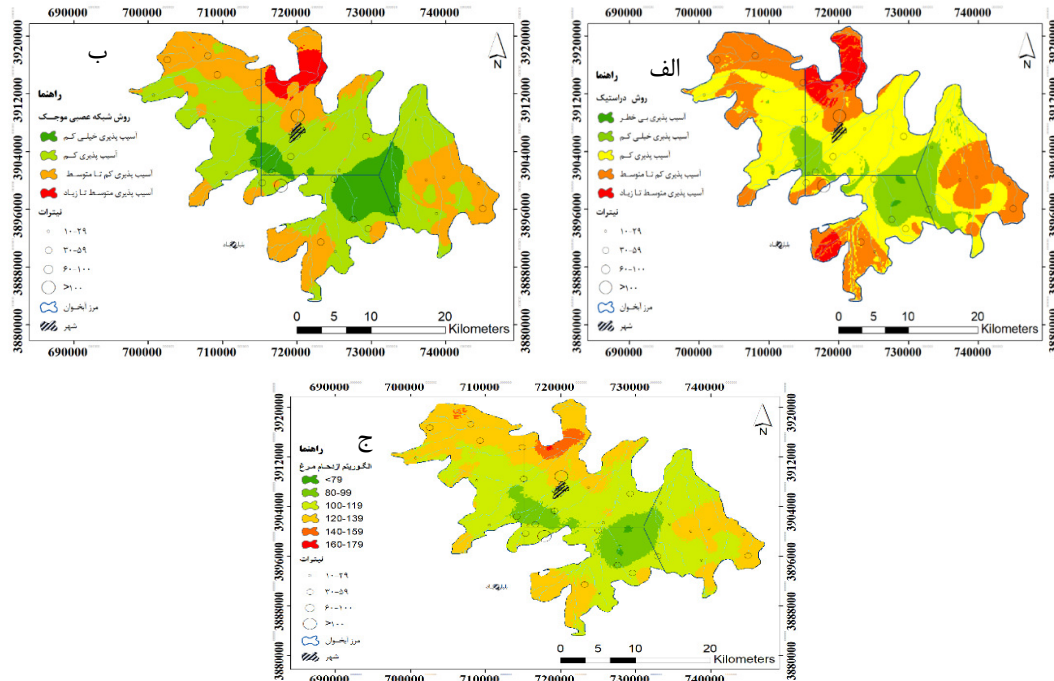
۶-۲- نتایج مدل‌سازی با الگوریتم ازدحام مرغ

در این پژوهش علاوه بر شبکه عصبی موجک از الگوریتم ازدحام مرغ برای آسیب‌پذیری آبخوان دشت دهگلان استفاده شد و معیارهای ارزیابی دقت الگوریتم برای آن نیز ارائه شد. مطابق معیارهای ارائه شده در جدول (۴) بخش جنوبی و مرکزی به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۹۴ و ۰/۹۲ بیشترین همبستگی بین مقادیر شاخص دراستیک و شاخص دراستیک مدل‌سازی شده با مدل الگوریتم ازدحام مرغ بدست آمد. بخش شرقی دشت دارای کمترین همبستگی ($r=0/83$) و بیشترین خطا ($RMSE=7/1$) نسبت به بخش‌های دیگر دشت دارد. پس از خروجی مقادیر آسیب‌پذیری از شبکه مصنوعی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ نقشه‌ی آسیب‌پذیری آبخوان تهیه شده و به‌همراه

جدول ۴. معیارهای ارزیابی دقت الگوریتم ازدحام مرغ برای آسیب‌پذیری

Table 4. Accuracy evaluation criteria of chicken swarm algorithm for vulnerability

r	R2	RMSE	MSE	معیارها کلاس آسیب‌پذیری
۰/۸۳	۰/۶۶	۷/۱	۵/۸۹	شرق
۰/۸۹	۰/۸۰	۴/۵۱	۳/۶۷	غرب
۰/۹۲	۰/۸۴	۶/۰۱	۵/۰۴	مرکزی
۰/۹۴	۰/۸۸	۵/۳۸	۴/۱۹	جنوب



شکل ۷. نقشه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت دهگلان: الف) مدل دراستیک، ب) روش شبکه عصبی موجک و ج) الگوریتم ازدحام مرغ
 Fig. 7. Dehgolan plain groundwater vulnerability map; a) Drastic model, b) wavelet neural network method and c) chicken swarm algorithm

۷- نتیجه‌گیری

تعیین مناطق با پتانسیل زیاد آلودگی ضرورت دارد. در همین راستا هفت پارامتر مؤثر در آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به صورت هفت لایه رستری تهیه شد و شاخص دراستیک با اعمال وزن‌های مربوط به هر پارامتر و تلفیق لایه‌ها با استفاده از تابع همپوشانی از منوی Raster Calculator در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. براساس نتایج بدست آمده شاخص DRASTIC بین ۷۱ تا ۱۵۳ به‌دست آمد که با توجه به طبقه‌بندی آلر و همکاران (۱۹۸۷) آسیب‌پذیری دشت دهگلان در پنج طبقه بی‌خطر، خیلی کم، متوسط و متوسط تا زیاد قرار می‌گیرد. سپس بهینه‌سازی مدل دراستیک با استفاده از مدل شبکه عصبی موجک و الگوریتم ازدحام مرغ انجام گرفت. بعلت وسعت زیاد دشت دهگلان و دقت در اجرای مدل و همچنین

هدف از انجام این تحقیق، تعیین آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت دهگلان با استفاده از مدل دراستیک و سپس بهینه‌سازی آن با استفاده از مدل هوش مصنوعی بوده است. دست دهگلان از مناطق فعال کشاورزی در شرق استان کردستان است که در آن از کودهای کشاورزی زیادی برای محصولات جالیزی استفاده می‌شود، همچنین عدم دفع صحیح فاضلاب‌های شهری و روستایی، وجود معادن بسیار در نزدیک آبخوان منطقه، ورود فاضلاب صنایع موجود در منطقه و مصرف بی‌رویه از آب زیرزمینی منطقه باعث شده آب‌های زیرزمینی بیشتر در معرض آلودگی و همچنین به یکی از دشت‌های ممنوعه در کشور گردد. بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت و

- artificial intelligent for improving DRASTIC method to assess groundwater contamination risk: a case study from Tabriz plain aquifer, Iran, *Stoch Environ Res Risk Assess.* doi.org/10.1007/s00477-015-1088-3.
- Behzad, M., Asghari, K., Coppola, Jr., Emery, A (2010) Comparative Study of SVMs and ANNs in Aquifer Water Level Prediction. *J. Comput. Civ. Eng.* 24: 408-413.
- Fijani, E., Nadiri, A. A., Asghari Moghaddam, A., Tsai, F., T-C., Dixon, B (2013) Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran, *Journal of hydrology.* 530: 89-100. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.038.
- Ghosh, R., Sutradhar, S., Mondal, P., Das, N (2021) Application of DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability: a study on Birbhum district, West Bengal, India. *Modelling Earth Systems and Environment.* 7(7): 3. doi.org/10.1007/s40808-020-01047-7.
- Jovanovic, N. Z., Adams, S., Thomas, A., Fey, M., Beekman, H. E., Campbell, R., Saayman, I., Conrad, J (2006) Improved DRASTIC method for assessment of groundwater vulnerability to generic aqueous phase contaminants, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 92, waste Management and the Environment III, 393-402. doi.org/10.2495/WM060421.
- Kaveh, A., Iran Mansh, A (2010) Artificial neural network in structure optimization, third edition. Publications of the Building and Housing Research Center. (In Persian) <https://www.sid.ir/journal/issue/6620/fa>.
- Krogulec, E., Trzeciak, J (2017) DRASTIC assessment of groundwater vulnerability to pollution in the Vistula floodplain in central Poland. *Hydrology Research*, 48 (4): 1088-1099. doi.org/10.2166/nh.2016.259.
- Maqsoom, A., Aslam, B., Khalil, U., Ghorbanzadeh, O (2020) A GIS-based DRASTIC Model and an Adjusted DRASTIC Model (DRASTICA) for Groundwater Susceptibility Assessment along the China-Pakistan Economic Corridor (CPEC) Route. *International Journal of Geo-Information*, 9(5): 332. doi.org/10.3390/ijgi9050332.
- Mohammad Zahiri, F., Safari, B., Bagheri, Z., Sobhan Ardakani, S (2014) Investigation of nitrate and nitrite pollution in underground water resources of Dehgolan city. *Journal of Man and Environment*, 12(3): 1-11. (In Persian)
- Nadiri, A., Jabraili, N., Qarakhani, M (2018) Comparison of the ability of different combined methods in assessing the vulnerability of groundwater in the Dasht-Qaroh-Dehgolan aquifer. *Journal of Eco-Hydrology*, 6(3): 821-836. (In Persian).
- ناهمگنی موجود، دست به چهار بخش تقسیم شد و برای هر بخش مدل هوشمند اجرا شد، در مطالعات مشابه (قرخانی و همکاران، ۱۳۹۵) برای سایر مدل‌های هوش مصنوعی مورد توجه واقع گردید و مشاهده شد که اجرای مدل‌های هوشمند بدین صورت برای بخش‌های مختلف نسبت به اجرای مدل برای کل دشت نتایج بهتری را نشان خواهد داد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مدل هوشمند شبکه مصنوعی موجک بهتر از الگوریتم ازدحام مرغ مقدار شاخص دراستیک را پیش‌بینی کرده است. همچنین مطابق اعتبارسنجی انجام شده با مقادیر نیترات مشاهده گردید که مدل شبکه مصنوعی موجک نسبت به مدل دراستیک منطقه پیش‌بینی همبستگی زیاد با مقادیر نیترات دارد بطوریکه در مناطقی که میزان نیترات زیاد بوده میزان آسیب‌پذیری بالا و در کلاس‌بندی خطر آلودگی زیاد قرار دارد. در مطالعات (برزگر و همکاران، ۲۰۱۵)، (قره‌خانی و همکاران، ۱۳۹۵)، (عباس‌نوین‌پور و همکاران، ۲۰۱۸)، (فینانجی و همکاران، ۲۰۱۳)، (گمتزی و همکاران، ۲۰۰۶) و (بهزاد و همکاران، ۲۰۱۰) نیز نشان دادند که مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر عملکرد بهتری را دارد.

References

- Abbas Novinpour, E., Moghimi, H., Kaki, M (2022) Aquifer vulnerability based on classical methods and GIS-based fuzzy optimization method (case study: Chahardoli plain in Kurdistan province, Iran). *Arabian Journal of Geosciences.* 15(360): 2-15.
- Abbasnovinpour, E., Masoudi, S., Asghari Moghadam, A (2018) Assessing Vulnerability Aquifer of Nazloochay Plain of Urmia, Using DRASTIC Model and Verification with Nitrate Concentration in GIS. *New Findings in Applied Geology.* 12(23): 92-103. (In Persian) doi.org/10.22084/NFAG.2017.12964.1241.
- Al-Abadi Alaa, M., Al-Shamma'a Ayser, M., Aljabbari Mukdad, H (2014) A GIS-based DRASTIC model for assessing intrinsic groundwater vulnerability in northeastern Missan governorate, southern Iraq, *Appl Water Sci.* doi.org/10.1007/s13201-014-0221-7.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Rebecca, P., Hackett, G (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, EPA 600/2-87-035. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma. EPA/600/2-85-018.
- Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A., Baghban, H (2015) A supervised committee machine

- Nadiri, K., Nadiri, A., Asghari Moghadam, A., Kurd, M (2017) A new method for identifying and determining areas at risk of subsidence (case study: Selmas plain aquifer). *Journal of Eco-Hydrology*, 5(1): 85-97. (In Persian) doi.org/10.22059/ije.2017.233252.601.
- Patel, P., Mehta, D., Sharma, N (2022) A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. *Water supply*. ws2022126.
- Qarakhani, M., Nadiri, A., Asghari Moghadam, A., Sadeghi Aghdam, F (2016) Drastic model optimization using vector machine and artificial neural network to assess aquifer vulnerability. *Ardabil Plain Eco-Hydrology Journal*, 2(3): 311-324. (In Persian).
- Safavi, A. A., Romagnoli, J. A (1997) Application of wavelet-based neural networks to modelling and optimization of an experimental distillation column, (*IFAC Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 10(3): 301-313.
- Vrba, J., Zoporozec, A (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology*. Verlag Heinz Heise GmbH and Co. KG.
- Wang, D., Safavi, A. A., Romagnoli, J. A (2000) Wavelet-based adaptive robust M-estimator for non-linear system identification., *AICHE Journal*, 46(8): 1607-1615.
- Wang, W., Ding, J (2003) Wavelet Network Model and Its Application to the Prediction of Hydrology. *Nature and Science*, 1(1): 67-71.
- Zouache, D., Ould Arby, Y., Nouioua, F., Ben Abdelaziz, F (2019) Multi-objective chicken swarm optimization: A novel algorithm for solving multi-objective optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*.

The vulnerability assessment of Dehghan aquifer ground water using drastic method and wavelet neural network

G. Valadi¹, E. Abbas-Novin-pour^{*2} and M. Bayzidi³

1- M. Sc., (graduated), Dept. of Geography, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Geology, Urmia University, Urmia, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

* e.abbasnovinpour@urmia.ac.ir

Received: 2022.11.7 Accepted: 2023.4.19

Abstract

The East part of Kurdistan province has got considerable potentials for saving ground water. However, the reservoir volume of Dehghan aquifer has significantly decreased due to excessive consumption and low precipitation during past two decades. As a result, it has been classified as a forbidden plain. In this research, the transfer and spread of pollution in Dehghan plain aquifer was investigated using the drastic method. Wavelet neural network and Chicken Swarming Algorithm model were used to compare the study method with other smart methods. Drastic method is one of Sensitivity map overlay methods which is produced with seven main parameters including ground water depth, recharge, topography, soil environment, unsaturated environment and hydraulic conduction. In smart methods, drastic parameters and index were respectively defined as model inputs and outputs. Accordingly, 7 raster layers with a scale of 1:25000 were produced in Arc GIS, and after ranking and weighing, the drastic index was obtained between 71 and 153. The results indicate that northern parts of the aquifer have moderate and high pollution potentials, so they need more protections. Based on evaluation criteria the obtained vulnerability maps using neural network model had a better performance than Chicken Swarming Algorithm so that R2 and RMSE were obtained as (R2=0.98 and RMSE= 0.82), (R2=0.8 and RMSE= 1.51), (R2=0.96 and RMSE= 0.69), (R2=0.92 and RMSE= 1. 2) for western, southern, eastern and central parts respectively. Moreover, R2 and RMSE were obtained by Chicken Swarming Algorithm as (R2=0.8 and RMSE= 4.51), (R2=0.88 and RMSE= 5.38), (R2=0.66 and RMSE= 4.31), (R2=0.84 and RMSE= 6. 01) for western, southern, eastern and central parts respectively. Based on nitrate distribution data, vulnerability index had better results in predicting polluted parts.

Keywords: Drastic Method, Quality, Nitrate, Artificial Intelligence

Introduction

Groundwater sources are one of the most important sources of water supply in most parts of the world. The increase in water needs in different sectors and as a result of harvesting more than the capacity of aquifers has led to the destruction of these valuable resources and a significant drop in the level of underground water. The East part of Kurdistan province has got considerable potentials for saving ground water. However, the reservoir volume of Dehghan aquifer has significantly decreased due to excessive consumption and low precipitation during past two decades. As a result, it has been classified as a forbidden plain. In this research, the transfer and spread of pollution in Dehghan plain aquifer was investigated using the drastic method. Wavelet neural network and Chicken Swarming

Algorithm model were used to compare the study method with other smart methods. Ghosh et al. (2021) identified the most polluted underground water areas of Birbhum region in South Bengal, India. The reason for choosing this area is the pollution of the area in terms of fluoride and other chemical parameters. They used drastic method in this study. Abbas-Novin-pour et al. (2022) conducted the vulnerability of the four-way aquifer. They used the modified DRASTIC method and the optimal fuzzy logic model to improve the DRASTIC method and the measured nitrate values were used for validation. For this purpose, to investigate the hydrogeochemical characteristics of the underground water resources of this plain, they used 18 water samples in different periods of the 2018-2019

water year, which were analyzed in the Water and Soil Laboratory of Kurdistan Province.

Materials & Methods

Drastic method is one of Sensitivity map overlay method which is produced with seven main parameters including ground water depth, recharge, topography, soil environment, unsaturated environment and hydraulic conduction. In smart methods, drastic parameters and index were respectively defined as model inputs and outputs. A relative weight from 1 to 5 is assigned to each parameter based on the aptitude and relative sensitivity to the pollutant, and also the ranking is done based on the scale of 1 to 10 and its relative importance in the pollution potential of the evaluation area. (Aller et al., 1987).

Geology

Considering the hard formations (igneous, metamorphic rocks, etc.) especially in the southern margin of Dehgolan plain, the possibility of table formation in them has not been investigated. The relatively high potential of the plain's water resources has caused these areas to receive less attention so far. Usually, rocks provide the necessary strength and power to absorb and store water through existing seams and cracks, layering of floors, the existence of karst caves. In these formations, depending on the depth of the weathered and fractured area and the existence of hydraulic connection between their seams and cracks, there is the ability to form underground water reserves. In the carbonate rocks of the southern highlands of Dehgolan plain, there are many seams, cracks and fractures, which have created a suitable passage for underground water, which can lead to the penetration of underground water into the carbonate rocks and cause dissolution in them. stones and creating a suitable reservoir for water.

Discussion and Results

Accordingly, 7 raster layers with a scale of 1:25000 were produced in Arc GIS, and after ranking and weighing, the drastic index was obtained between 71 and 153. The results indicate that northern parts of the aquifer have moderate and high pollution potentials, so they need more protections. Based on evaluation criteria the obtained vulnerability maps using

neural network model had a better performance than Chicken Swarming Algorithm so that R2 and RMSE were obtained as (R2=0.98 and RMSE= 0.82), (R2=0.8 and RMSE= 1.51), (R2=0.96 and RMSE= 0.69), (R2=0.92 and RMSE= 1. 2) for western, southern, eastern and central parts respectively. Moreover, R2 and RMSE were obtained by Chicken Swarming Algorithm as (R2=0.8 and RMSE= 4.51), (R2=0.88 and RMSE= 5.38), (R2=0.66 and RMSE= 4.31), (R2=0.84 and RMSE= 6. 01) for western, southern, eastern and central parts respectively. Based on nitrate distribution data, vulnerability index had better results in predicting polluted parts.

Conclusions

Based on the results obtained, the DRASTIC index was between 71 and 153, and according to the classification of Aller et al. (1987), the vulnerability of Dehgolan Plain is placed in five categories: safe, very low, medium, and medium to high. take Then, drastic model optimization was done using wavelet neural network model and chicken swarm algorithm. Due to the large index of Dehgolan Plain and the precision in the implementation of the model as well as the existing heterogeneity, it was divided into four parts and an intelligent model was implemented for each part. and it was observed that the implementation of intelligent models in this way for different sectors will show better results than the implementation of a model for the whole plain. The results of this study showed that the smart artificial wavelet network model predicted the drastic index value better than the chicken swarm algorithm. Also, according to the validation done with nitrate values, it was observed that the wavelet artificial network model has a high correlation with nitrate values compared to the drastic model of the prediction area, so that in areas where the nitrate level is high, the level of vulnerability is high and the pollution risk classification is high. contract. In the studies of (Barzegar et al., 2015), (Qarakhani et al., 2015), (Abbas Navinpour et al., 2018), (Finanji et al., 2013), (Gemtzi et al., 2006) and (Behzad et al., 2010) also showed that artificial intelligence models perform better in predicting vulnerable areas.