مدلسازی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های هوشمند و داده‌کاوی

مجتبی خوش روش[۱]، سید محمد رضا حسینی وردنجانی[*۲] ، هاجر طاهری[۳]، بهمن نادری سامانی [۴]، ابوطالب جلیلی [۵]

۱- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- دانش آموخته دکتری آبیاری و زهکشی از دانشگاه صنعتی اصفهان کارشناس آب و خاک جهاد کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه شهرکرد

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه شهرکرد

[*]**نویسنده مسئول: mohammad.mrh2015@gmail.com**

خلاصه

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع اصلی برای تامین نیاز بخش‌های مختلف مصرف کننده آب در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشند. آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی به دلیل مواد شیمیایی یک نگرانی اساسی برای مدیریت کیفیت این منابع است. پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی ازنظر عوامل محیطی و اقتصادی بسیار مهم است. استفاده از روش‌های مرسوم برای ارزیابی کیفیت آب، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، پرهزینه و حجیم است. در این تحقیق به مرور مطالعات مدلسازی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های هوشمند و داده‌کاوی پرداخته شد. نتایج نشان داد مدل‌های هوشمند و داده‌کاوی در پیش‌بینی کم‌هزینه و به‌موقع کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از پارامترهای فیزیکی به‌عنوان متغیرهای ورودی، عملکرد مطلوبی دارند. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل‌ها بسیار مفید، موثر و همچنین باعث کاهش خطا و صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد.

کلمات کلیدی: یادگیری ماشین، شبکه عصبی، پایش، آب زیرزمینی.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از با ارزش ترین و مهم ترین منابع آب در جهان، نقش مستقیم و تعیین کننده ای در جنبه‌های مختلف زندگی بشر از جمله کشاورزی، توسعه صنعتی و تامین آب آشامیدنی ایفا می‌کند (Qadir et al,2007; Wada et al,2010). آب‌های زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی دارای مزیت‌های مختلفی مانند کیفیت بالاتر و آلودگی کمتر هستند. در اغلب موارد آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که آب‌های سطحی خیلی کم می‌باشند قابل‌دسترس هستند (Nas and Berktay, 2010; Shabbir and Ahmad, 2015). منابع آب زیرزمینی به‌طور متناوب برای اقدامات مختلف ازجمله فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی استفاده می‌شود. بااین‌حال افزایش تقاضای جهانی برای آب منجر به بهره‌برداری بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی شده و باعث کاهش کیفیت این منابع شده است (Nordin et al, 2021). بنابراین پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی ازنظر عوامل محیطی و اقتصادی بسیار مهم است (Das et

al, 2022). عدم آگاهی از وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند مشکلاتی را برای مدیریت منابع آب ازنظر وضعیت بهداشتی و سلامت مردم و هم‌چنین توسعه‌های مورد نیاز در هر منطقه ایجاد نماید، لذا آگاهی از وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی، تغییرات و کنترل آن یکی از نیازهای مدیریتی بوده و بسیار ضروری است. در این تحقیق به بررسی مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج کشور در خصوص مدلسازی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های هوشمند و داده‌کاوی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مدل‌های هوشمند و داده‌کاوی اخیر به طور گسترده‌ای در مطالعات هیدرولوژی و منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق به بررسی مطالعات انجام شده در داخل و خارج کشور در خصوص ارزیابی مدل‌های مختلف هوش مصنوعی و داده‌کاوی در مدلسازی کیفیت آب زیرزمینی پرداخته شده‌است. در این قسمت به معرفی تعدادی از پرکاربردترین این مدل‌ها پرداخته می‌شود.

شبکه عصبی مصنوعی

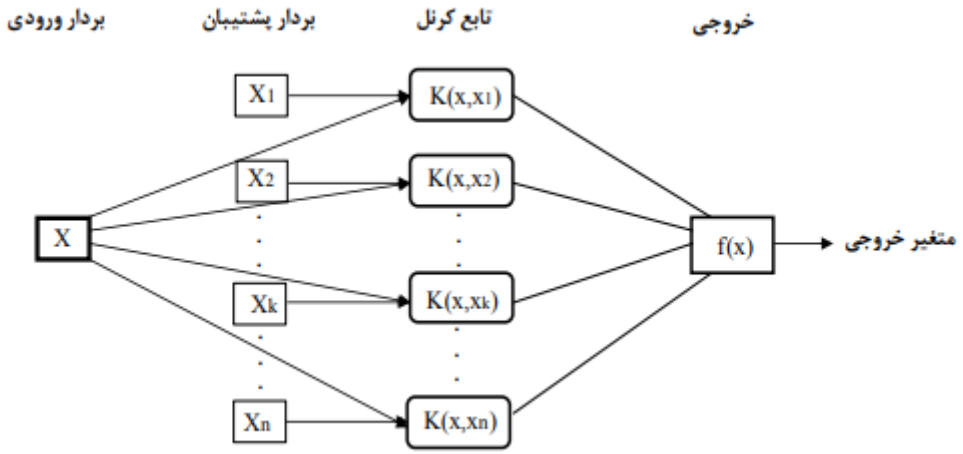
شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN ابزار قوی برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی می‌باشند که با تقلید از سیستم عصبی بیولوژیک ساخته شده‌اند. قدرت انعطاف پذیری و تصحیح پذیری بالایی در انطباق خود با داده‌های موجود دارند به طوری که می‌توانند نظم و هماهنگی موجود در داخل این داده‌ها را پیدا نموده و بر اساس پاراترهای ورودی وقوع پدیدها را پیش‌بینی نماید. این شبکه‌ها می‌توانند با حداقل تعداد متغیرهای مستقل اندازگیری شده، پیش‌بینی مناسبی از متغیرهای وابسته با دقت قابل قبول ارائه دهند. این شبکه‌ها در برگیرنده‌ی قابلیت درک و تعمیم راه حل معنی‌دار برای مسائلی از نمونه‌ها، در صورتی که داده‌ها حاوی خطا و یا ناقص باشند و سازگار نمودن راه‌حل‌ها با شرایط متغیر و پردازش سریعتر اطلاعات می‌باشد (Basheer and Hajmeer, 2000). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه عصبی مصنوعی که عملکرد آن را به انسان نزدیکتر می‌نماید، قدرت یادگیری است. یادگیری به طور کلی به سه دسته با سرپرستی، بدون سرپرستی و زوجی تقسیم می‌شود (jianchanget al.,1996). شبکه‌های عصبی بر اساس معماری به دو دسته‌ی کلی شبکه‌های عصبی پیشخور و بازگشتی تقسیم می‌شوند.

مدل استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS)

همانطور که در قسمت قبلی بیان گردید شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN ابزار قوی برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی می‌باشند حال اگر عملکردهای منطق فازی در شبکه عصبی و یادگیری شرکت و طبقه‌بندی کردن شبکه عصبی در سیستم‌های فازی شرکت داده شوند یک شبکه عصبی-فازی تشکیل خواهد شد (هوشمند و جورابیان، ۱۳۸۱). ساختار شبکه عصبی فازی شامل پنج لایه است. این ساختار متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت قوانین و توابع عضویت ورودی و خروجی انتخاب می‌گردد. این مدل از الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه بندی دارد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹).

ماشین بردار پشتیبان (Support vector machines - SVMs)

SVM یکی دیگر از الگوریتم های یادگیری ساده و نظارت شده است که توسط کورتس و وپنیک معرفی شده است. (Cortes and Vapnik, 1995). این مدل هم در طبقه بندی الگو و هم در تحلیل رگرسیون استفاده می شود. SVM مرزی به نام hyper-plane ایجاد می کند تا خطای تعمیم بین جداسازی کلاس داده و داده را به حداقل برساند (Amari and Wu, 1999). ماشین بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کارآمد بر مبنای تئوری بهینیه -سازی مقید است که از اصل استقرای کمینه سازی خطای ساختاری استفاده کرده و منجر به یک جواب بهینه کلی می‌گردد. ساختار مدل ماشین بردار پشتیبان در شکل ۱ نشان داده شده است (عیسی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸)



شکل۱- ساختار مدل ماشین بردار پشتیبان

مدل جنگل تصادفی (Random forest)

RF به یک ابزار محبوب برای حل مشکلات رگرسیون و طبقه بندی تبدیل شده است. RF یک روش گروهی براساس روش درخت رگرسیون است که برای عملکرد بهتر معرفی شده‌است. (Breiman, 2001). فرآیند ساخت مدل در RF مشابه روش CART اما بدون هرس است. (Breiman, 1984). هم چنین در حالی که یک درخت رگرسیون تنها توسط یک درخت رشد می‌کند، RF توسط جنگل درختان رشد می‌کند. به عبارت دیگر، بر خلاف یک درخت رگرسیون، در RF برای هر درخت تنها زیرمجموعه‌ای از متغیرهای ورودی اعمال می‌شود. تعداد ورودی‌ها در هر درخت و همچنین تعداد درختان در جنگل می‌تواند متمایز باشد و به مجموعه داده‌ها بستگی دارد.

مدل رگرسیون چند متغیره

در رگرسیون چندمتغیره متخصصان آمار سعی در توسعه روابطی هستند که بتوان با آن میزان تغییر یا مقدار متغیر وابسته را با توجه به میزان تغییر یا مقدار دو یا چند متغییر مستقل دیگر پیش‌بینی نمود (آذر و مومنی، ۱۳۸۱). در مدل رگرسیون خطی چندگانه، یکی از فرض‌های بنیادی مدل آن است که خطاها مستقل و دارای توزیع نرمال باشند.

نتایج و بحث

عسگری و همکاران (۱۳۹۰) به پیشبینی پارامترهای کیفی TDS، EC و TH در آب زیرزمینی دشت بیرجند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. در این تحقیق کار مدلسازی پارامترهای کیفی EC،TDS و TH در آب زیرزمینی دشت بیرجند بر اساس سایر مؤلفه‌های شیمیایی یعنی آنیونها و کاتیونهای اصلی SAR نسبت جذب سدیم و pH با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام گردید. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب مدل شبکه عصبی مصنوعی در تخمین پارامترهای مورد بررسی می‌باشد.

در تحقیقی در شهر اصفهان به برآورد آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی حاشیه رودخانه زاینده‌رود اصفهان با استفاده از کیفیت آب و شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت. ۱۰۰ حلقه چاه (۷۷ چاه کشاورزی، ۱۳ چاه شرب و ۱۰ چاه باغ) در محدوده حاشیه رودخانه زاینده رود اصفهان، ایران انتخاب شد. از نرم افزار متلب و شبکه سه لایه پرسپترون استفاده شد. قانون یادگیری پس انتشار و تابع فعال سازی سیگموئید برای فرآیند آموزش اعمال شد. پس از

آزمایش‌های مکرر، شبکه‌ای با یک لایه پنهان و ۱۹ نورون کمترین خطا را در فرآیند آموزش شبکه، آزمایش و اعتبارسنجی انجام می‌دهد. نتایج نشان داد که مدل های ANN را می توان برای بررسی پارامترهای کیفیت آب به کار برد (Ostad et a, 2017).

در تحقیقی در کشور هند به بررسی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون خطی چندگانه (MLR) برای پیش بینی تناسب کیفیت آب زیرزمینی برای آشامیدن از حوضه رودخانه شیوگانگا، واقع در دامنه های شرقی منطقه گات غربی هند استفاده کرده است. با توجه به این موضوع، سی و چهار نمونه آب زیرزمینی نماینده جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شده‌اند. به منظور ایجاد مدلی دقیق و سازگار برای پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی مبتنی بر WQI، یک الگوریتم انتشار سه لایه پشتی Levenberg-Marquardt در معماری ANN استفاده شد. علاوه بر این، مدل MLR برای بررسی کارایی پیش‌بینی ANN استفاده می‌شود. نتایج تأیید می‌کند که پیش‌بینی‌های مدل ANN رضایت‌بخش است و عملکرد ثابت قابل قبولی را برای هر دو فصل تأیید می کند. مدل ANN پیشنهادی ممکن است در مطالعات مشابه پیش بینی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف آشامیدنی مفید باشد (Kadam et a, 2019).

عیسی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) به تخمین پارامترهای کیفی آب‌خوان دشت گیلان با استفاده از آزمون گاما و مدل-های ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. از داده‌های ۱۳۲ چاهک مشاهداتی در دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۳ در این تحقیق استفاده گردید. نتایج نشان داد که هر یک از دو مدل SVM و ANN توانایی بسیار زیادی در تخمین پارامترهای کیفی آب‌خوان‌ها دارند. همچنین عملکرد مدل SVM نسبت به مدلANN ، به‌ازای تعداد ورودی کمتر بهتر است و در تعداد ورودی بیشتر برعکس می‌باشد. نتایج بخش دوم نشان داد که آزمون گاما می‌تواند به‌صورت کاملا کابردی و دقیق در تعیین ترکیب‌های ورودی موثر مورد استفاده قرار گیرد.

رخ شاد و شهیدی (۱۴۰۰) به بررسی عملکرد شش روش ترکیبی هوشمند در مدل سازی کیفی آب زیرزمینی در دشت بافق پرداختند. آن ها از روش سیستم استنتاج عصبی-فازی (ANFIS) جهت مدل-سازی کیفی آب زیرزمینی دشت بافق در استان یزد، از ۶ الگوریتم فراابتکاری بهینه-سازی ازدحام ذرات (PSO)، ژنتیک (GA)، رقابت استعماری (ICA)، کرم شب-تاب (FA)، فرهنگی (CA) و استراتژی تکامل انطباق ماتریس کوواریانس (CMA-ES) استفاده نمودند. رای انتخاب بهترین ترکیب ورودی جهت تخمین سه پارامتر هدایت الکتریکی (EC)، جذب سدیم (SAR) و سختی کل (TH) از روش های پیرسون و اسپیرمن برای تحلیل حساسیت و میزان همبستگی سایر پارامترها استفاده گردید. نتایج نشان داد که هر شش روش ترکیبی عملکرد بسیار مناسبی را در مدل-سازی پارامترهای آب زیرزمینی از خود نشان دادند.

مقدسی و همکاران (۱۴۰۰) به مقایسه و ارزیابی مدل‌های هوشمند و زمین‌آمار به‌منظور تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی در دشت کمیجان پرداخته شد. در این تحقیق از روش های شبکه عصبی تطبیقی فازی (FANN) و روش زمین آماری مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی و اطلاعات ۳۶ حلقه چاه برای دشت کمیجان، استان مرکزی، ایران استفاده گردید. با مقایسه نتایج شبکه عصبی تطبیقی زمین آماری و فازی می توان دریافت که مدل FANN نسبت به مدل زمین آماری کارایی بالاتری دارد.

در تحقیقی در کشور هند به پیش‌بینی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک یادگیری ماشینی (یک مدل مبتنی بر یادگیری عمیق (DL) و مقایسه با سه مدل یادگیری ماشینی (ML) دیگر، یعنی جنگل تصادفی (RF)، تقویت گرادیان فوق‌العاده (XGBoost) و شبکه عصبی مصنوعی) پرداخته شد. در مجموع ۲۲۶ نمونه آب زیرزمینی از یک منطقه کشاورزی آرنگ در ناحیه رایپور، چاتیسگار، هند جمع‌آوری شد و پارامترهای فیزیکوشیمیایی مختلف برای محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی مبتنی بر وزن آنتروپی (EWQI) اندازه‌گیری شد. عملکرد پیش‌بینی مدل‌ها با معرفی پنج معیار خطا

تعیین می‌شود. نتایج نشان داد که مدل DL بهترین مدل پیش‌بینی با بالاترین دقت از نظر R2 است، یعنی R2 = 0996 در برابر (R2 = 0.886) RF، (R2 = 0.0.927) XGBoost و (R2 = 0.917) ANN). نتایج نشان می‌دهد که مدل DL واقعی‌ترین و دقیق‌ترین رویکرد در پیش‌بینی کیفیت آب‌های زیرزمینی است (Singha et al, 2021).

در تحقیقی در کشور مراکش به پیش‌بینی کل جامد محلول (TDS)، شوری بالقوه (PS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم قابل تعویض (ESP)، نسبت جذب منیزیم (MAR) و کربنات سدیم باقی‌مانده (RSC) به کمک مدل‌های تقویت تطبیقی (Adaboost)، جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) با استفاده از ۵۲۰ نمونه آب زیرزمینی پرداخته شد. هدایت الکتریکی (EC)، دما (T) و pH به عنوان ورودی مدل‌ها بودند. نتایج نشان داد که عملکرد کلی پیش‌بینی مدل‌های Adaboost و RF بالاتر از SVR و ANN است (Bilali et al, 2021).
در تحقیقی به ارزیابی کیفیت منابع آب و مناسب بودن آن برای مصارف شرب در ایالت دریای سرخ، در کشور سودان پرداخته شد. در این تحقیق مناسب بودن منابع آب آشامیدنی (سطحی و زیرزمینی) برای مصارف شرب با استفاده از روش شاخص کیفیت آب (WQI) ارزیابی شد. شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی WQI با استفاده از الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی انتشار به جلو (BP ANN) برای بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ANN دقت پیش‌بینی بسیار بالایی در مدل‌سازی WQI با مقادیر R2 بیشتر از ۰.۹۵ در طول آموزش، آزمایش و اعتبار سنجی نشان داد (Ismael et al, 2021).

در تحقیقی به ارزیابی تناسب آب زیرزمینی برای مصارف انسانی و مدلسازی شاخص کیفیت آب به صورت زمانی و مکانی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در کشور الجزایر پرداخته شد. ۳۷ نمونه از هشت حلقه چاه مختلف در منطقه طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ برداشت شد. نتایج نشان داد که مدل ANN عملکرد مطلوبی در مدل‌سازی شاخص کیفیت آب WQI دارد (Haghbin et al, 2021).

در تحقیقی به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS)، الگوریتم تکاملی (EA) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در مدل‌سازی کیفیت آب زیرزمینی و پیش‌بینی مناسب بودن آن در مصارف خانگی، پرداخته شد. نتایج تجزیه و تحلیل بین چهار روش هوش مصنوعی نشان داد که ANN هنگام مدیریت تعداد زیادی از مجموعه داده‌ها و پیش بینی‌های دقیق به دلیل توانایی آن در مدل سازی روابط پیچیده غیرخطی، علی رغم برخی ضعف‌ها، بهتر عمل می کند (Nordin et al, 2021).

عسگری و اگدرنژاد (۱۴۰۱) به مدل سازی آب زیرزمینی با استفاده از روش های هوش مصنوعی ANN و ANN+GA و مقایسه نتایج آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده در دشت اندیمشک دزفول پرداختند. اطلاعات جمع‌آوری شده برای ورودی به دو مدل شامل داده‌های هواشناسی و پارامترهای کیفی آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ به‌صورت ماهانه از ۷۶ چاه می‌باشند. تایج نشان داد، مدل بهینه برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی ANN+GA با تابع محرک تانژانت سیگموئید و مدل بهینه برای شبیه‌سازی شوری آب زیرزمینی ANN+GA با تابع محرک لگاریتم سیگموئید می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل مورد استفاده بسیار مفید، موثر و همچنین باعث کاهش خطا و صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد.

علیمرادی و همکاران (۱۴۰۱) پیش بینی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های یادگیری ماشین در دشت زاهدان پرداختند. داده‌های ورودی بر اساس نمونه‌برداری‌های کیفیت آب در سال آبی ۱۳۹۷ از ۵۹ حلقه چاه مشاهداتی بود. مقایسه مدل‌های مختلف GIS و یادگیری ماشین نیز حاکی از برتری قابل توجه مدل‌های یادگیری ماشین در تخمین پارامترهای مورد بررسی می‌باشد.

بیات ورکشی و همکاران (۱۴۰۱) به مقایسه عملکرد مدل‌های هوشمند در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب سطحی و زیرزمینی در دشت ساوه پرداختند. آنها از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و عصبی-فازی (CANFIS) در شبیه‌سازی پارامترهای مهم کیفی آب سطحی و زیرزمینی دشت ساوه شامل TH, EC, SAR, TDS استفاده نمودند. متغیرهای کیفی pH, Ca, Mg, Cl, SO4 طی دوره ۵۰ ساله از ۱۳۴۵ لغایت ۱۳۹۵ به عنوان متغیرهای ورودی انتخاب گردیدند. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب مدل های فوق در شبیه سازی پارامترهای کیفی آب سطحی و زیرزمینی در دشت فوق بود.

نتیجه‌گیری:

کیفیت آب نقش مهمی در هر سیستم آبی ایفا می‌کند. استفاده از روش‌های مرسوم برای ارزیابی کیفیت آب معمولاً برای کشاورزان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، پرهزینه و پر زحمت است. مدل‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی اخیرا در مباحث هیدرولوژی و منابع آب کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی می‌تواند از طریق پیش‌بینی و ارزیابی شاخص‌های کیفی آب با استفاده از پارامترهای فیزیکی به عنوان پارامتر ورودی کاربردی و مفید باشد. با بررسی‌های انجام شده درمی‌یابیم که پذیرش موفقیت‌آمیز مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی تحت تأثیر انتخاب پارامترهای ورودی مناسب، انواع توابع منحصر به فرد، کارایی معیارهای عملکرد و غیره است. استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی می‌تواند در طراحی و برنامه‌ریزی مدیریت آب‌های زیرزمینی و استراتژی‌های پیشگیری از آلودگی مفید باشد.

منابع

۱. رخ شاد, امیر محمد, شهیدی, علی. (۱۴۰۰). عملکرد شش روش ترکیبی هوشمند در مدل‌سازی کیفی آب زیرزمینی مطالعه موردی: دشت بافق. هیدروژئولوژی, ۶(۱), ۱۲۶-۱۳۹.

۲. مریم بیات ورکشی; احمد باقری; مریم هاشمی. "مقایسه عملکرد مدل‌های هوشمند در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب سطحی و زیرزمینی (مطالعه موردی:دشت ساوه)". نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران, ۱۲, ۳, ۱۴۰۱, ۲۴۳-۲۶۰.

۳. عسکری، محمد صادق و آریافر، احمد و ضیاء، حسن،۱۳۹۰، پیشبینی پارامترهای کیفی EC،TDS و TH در آب زیرزمینی دشت بیرجند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی،هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست

۴. علیمرادی, هژیر, روحی مقدم, عین اله, خالقی, مهسا, بامری, ابوالفضل. (۱۴۰۱). پیش بینی و پهنه بندی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از مدل های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش های یادگیری ماشین (مطالعه موردی: دشت زاهدان). هیدروژئولوژی, ۷(۲), ۴۳-۶۰.

۵. عسکری, جیران, & اگدرنژاد, اصلان. (۱۴۰۱). مدل سازی آب زیرزمینی با استفاده از روش های هوش مصنوعی (مطالعه موردی: دشت دزفول-اندیمشک). مجله پژوهش در بهداشت محیط, ۸(۲), ۱۶۰-۱۷۱.

۶. مقدسی مه نوش، مردیان مهدی، پارسا محسن. مقایسه و ارزیابی مدل‌های هوشمند و زمین‌آمار به‌منظور تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی (دشت کمیجان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۴۰۰; ۱۲ (۲۴) :۵۴-۶۴

۷. ابراهیمی, حکیمه, آقاشریعتمداری, زهرا, حجابی, سمیه & ,نازی قمشلو, آرزو. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد تابش کل خورشیدی .هواشناسی کشاورزی 8(1)،14-3 .

۸. هوشمند، ر. جورابیان، م. ۱۳۸۱. منطق فازی و شبکه های عصبی (مفاهیم و کاربردها)، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳۰۰ صفحه.

۹. آذر، عادل؛ مومنی، منصور. ۱۳۸۱. آمار و کاربرد آن در مدیریت» انتشارات سمت، تهران، چاپ۶،

۱۰. عیسی زاده, محمد, بی آزار, سید مصطفی, اشرف زاده, افشین & ,خانجانی, رضوان. (۱۳۹۸). تخمین پارامترهای کیفی آب‌خوان دشت گیلان با استفاده از آزمون گاما و مدل-های ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی .علوم و تکنولوژی محیط زیست.(2)21 ,21-1 .

11. Amari, S., Wu, S., 1999. Improving support vector machine classifiers by modifying kernel functions. Neural Netw. 12 (6), 783–789.

12. I. A. Basheer, M. Hajmeer. 2000. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design,and application. J Microbiologic, Meth 43: 3-31,

13. Haghbin, M., Sharafati, A., Dixon, B. et al.2021. Application of Soft Computing Models for Simulating Nitrate Contamination in Groundwater: Comprehensive Review, Assessment and Future Opportunities. Arch Computat Methods Eng 28, 3569–3591 .

14. Ostad-Ali-Askari, K., Shayannejad, M. & Ghorbanizadeh-Kharazi, H. ۲۰۱۷. Artificial neural network for modeling nitrate pollution of groundwater in marginal area of Zayandeh-rood River, Isfahan, Iran. KSCE J Civ Eng 21, 134–140.
15. Kadam, A.K., Wagh, V.M., Muley, A.A. et al.۲۰۱۹. Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River basin, India. Model. Earth Syst. Environ. 5, 951–962 .
16. Breiman, L., 1984. Classification and Regression Trees. Routledge, New York.
17. Breiman, L., 2001. Random forests. Machine Learn. 45, 5–32.
18. Chen, Yingyi, Lihua Song, Yeqi Liu, Ling Yang, and Daoliang Li. 2020. "A Review of the Artificial Neural Network Models for Water Quality Prediction" *Applied Sciences* 10, no. 17: 5776.
19. Khaki, M., Yusoff, I., and Islami., N . 2014. Application of the Artificial Neural Network and Neuro-fuzzy System for Assessment of Groundwater Quality,Clean Soil Watar, Volume43, Issue4, Pages 551-560
20. Bilali, A.E., Taleb, A., and Brouziyne, Y. 2021. Groundwater quality forecasting using machine learning algorithms for irrigation purposes, Agricultural Water Management, Volume 245, 106625
21. Singha, S., Pasupuleti, S., Singha, S.S., Singh, R and Kumar, S.,. 2021.Prediction of groundwater quality using efficient machine learning technique, Chemosphere, Volume 276, , 130265
22. M. Qadir, B.R. Sharma, A. Bruggeman, R. Choukr-Allah, F. Karajeh,. 2007 .Nonconventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries, Agricult. Water Manage. 87 (1) 2–22.
23. Y. Wada, L.P. Van Beek, C.M. Van Kempen, J.W. Reckman, S. Vasak, M.F. 2010. Bierkens, Global depletion of groundwater resources, Geophys. Res. Lett. 37(20).
24. Ostad-Ali-Askari, K., Shayannejad, M. & Ghorbanizadeh-Kharazi, H. ۲۰۱۷. Artificial neural network for modeling nitrate pollution of groundwater in marginal area of Zayandeh-rood River, Isfahan, Iran. KSCE J Civ Eng 21, 134–140.
25. Haghbin, M., Sharafati, A., Dixon, B. et al.2021. Application of Soft Computing Models for Simulating Nitrate Contamination in Groundwater: Comprehensive Review, Assessment and Future Opportunities. Arch Computat Methods Eng 28, 3569–3591 .

26. Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. Mach. Learn. 20 (3), 273–297.

27. K. Jianchang, K. Anil, K. M. Mohiuddin.1996. Artifical Neural network. Computer, March, P.352.,
28. Nordin, N. F. C., Mohd, N. S., Koting, S., Ismail, Z., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2021). Groundwater quality forecasting modelling using artificial intelligence: A review. Groundwater for Sustainable Development, 14, 100643.