



## Assessment of Pollution Risk Caused by Nitrate in the Azarshahr Plain Aquifer Using Artificial Intelligence Models

N. Jabraili Andaryan<sup>1</sup>, A. Nadiri<sup>2\*</sup>, and M. Gharekhani<sup>3</sup>

### Abstract

Azarshahr plain is one of the wide plains in Lake Urmia basin which has an important source of groundwater and it is at risk of nitrate pollution due to the agricultural prosperity in this plain. Therefore, it is necessary to protect these groundwater resources using the most suitable and inexpensive solutions by identifying the areas exposed to the risk of pollution. In this study, in order to investigate the inherent vulnerability and risk of contamination, geological data, hydrogeological information and geophysical data were used as well as the digital elevation map of SRTM satellite with a spatial accuracy of 30 meters. Also the concentration of nitrate contaminant sampled from 35 different sources with appropriate distribution was used for validation. The pollution risk of Azarshahr plain aquifer was investigated using "Source-Pathway- Receptor" method. In this method, after identifying the source of pollution, the aquifer vulnerability was considered as a pathway. Improved DRASTIC method by SFL, M5P and RS models were used to evaluate the aquifer vulnerability, then the vulnerability map to nitrate contaminant was obtained. Based on the highest correlation ( $r = 0.87$ ) and the lowest error ( $RMSE = 0.06$ ), the M5P model was selected as the best model for vulnerability assessment. Finally, the risk map of nitrate pollution was obtained by multiplying the vulnerability of the aquifer (based on the M5P model) and the velocity of the groundwater. The results showed that the pollution risk of aquifer to nitrate pollutant is high in the central part of the aquifer.

**Keywords:** Azarshahr Aquifer, Contamination Risk, Nitrate, M5P Model.

Received: August 26, 2023

Accepted: January 9, 2024

## ارزیابی ریسک آلودگی ناشی از نیترات در آبخوان دشت آذرشهر با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی

ناصر جبرائیلی اندریان<sup>۱</sup>، عطاءاله ندیری<sup>۲\*</sup> و مریم قره‌خانی<sup>۳</sup>

### چکیده

دشت آذرشهر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، دارای منبع مهم آب زیرزمینی است و به علت رونق کشاورزی در معرض خطر آلودگی نیترات قرار دارد؛ لذا حفاظت از منابع آب زیرزمینی با شناسایی مناطق در معرض ریسک آلودگی ضروری است. در این مطالعه به منظور بررسی آسیب‌پذیری ذاتی و ریسک آلودگی از داده‌های زمین‌شناسی، داده‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوفیزیکی و نیز نقشه رقومی ارتفاعی ماهواره SRTM با دقت مکانی ۳۰ متر و در نهایت جهت صحت‌سنجی از غلظت آلاینده نیترات نمونه‌برداری شده از ۳۵ منبع مختلف با پراکندگی و توزیع مناسب استفاده شده است. در پژوهش حاضر ریسک آلودگی آبخوان دشت آذرشهر با روش "منبع-مسیر-هدف" مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش بعد از شناسایی منبع آلودگی، آسیب‌پذیری آبخوان به‌عنوان مسیر در نظر گرفته شد. برای ارزیابی آسیب‌پذیری، از روش DRASTIC بهبود یافته با استفاده از سه مدل فازی ساجنو (SFL)، الگوریتم درخت تصمیم (M5P) و الگوریتم زیر فضای تصادفی (RS) استفاده شد و در نهایت نقشه آسیب‌پذیری نسبت به آلاینده نیترات به دست آمد. از بین مدل‌های هوش مصنوعی بر اساس بیشترین ضریب همبستگی ( $r=0.87$ ) و کمترین میزان خطا ( $RMSE=0.06$ )، مدل M5P به‌عنوان بهترین مدل جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت آذرشهر انتخاب شد. در نهایت نقشه ریسک آلودگی نیترات از حاصل ضرب آسیب‌پذیری آبخوان (بر اساس مدل M5P) در سرعت جریان آب زیرزمینی به دست آمد. نتایج نشان داد ریسک آلودگی آبخوان نسبت به آلاینده نیترات در قسمتی از مرکز، جنوب و جنوب شرق آبخوان بالا است.

**کلمات کلیدی:** آبخوان آذرشهر، ریسک آلودگی، نیترات، مدل M5P.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۶/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹

1- Ph.D. Student in Hydrogeology, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: nasserjabraili@gmail.com

2- Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: nadiri.ata@gmail.com

3- Ph.D. in Hydrogeology, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: m.gharekhani90@gmail.com

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.187191](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.187191)

۱- دانشجوی دکتری آب زمین‌شناسی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دکتری آب زمین‌شناسی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکان‌پذیر است.



روش‌های دیگری برای ارزیابی ریسک نیز به کار رفته است (Bera et al., 2022, Jafari and Nikoo, 2016, Rajput et al., 2020, Wang et al., 2012). مثلاً (Neshat et al., 2015) با هدف تعیین ریسک آلودگی آب زیرزمینی در یک منطقه کشاورزی در جنوب ایران، روشی را ارائه دادند که با تلفیق نقشه آسیب‌پذیری DRASTIC و احتمال وقوع آلودگی بود. نقشه توزیع مکانی غلظت نیترات در منطقه مطالعاتی با استفاده از درون‌یابی به روش کریجینگ تهیه و علاوه بر این، از شبیه‌سازی مونت کارلو نیز بهره برده شد. نتایج بدست آمده از مقایسه شاخص آسیب‌پذیری و طبقه‌بندی ریسک، میزان بالایی از مشابهت در نتایج را نشان داد. در پژوهش دیگری Nadiri et al. (2018) مسئله ریسک کل را برای آبخوان‌هایی که در معرض آلودگی با منشاء زمین‌زاد و انسان‌زاد است؛ معرفی کردند. ایشان سپس در مطالعات متعددی به تکمیل این روش‌ها پرداخته‌اند (Nadiri et al., 2021, Razzagh et al., 2021, Nadiri et al., 2022). Gharekhani et al. (2021) ریسک آبخوان سلماس با استفاده از روش DRASTIC-L و سرعت آب‌زیرزمینی مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی وزن پارامترهای DRASTIC-L استفاده کردند و در نهایت نقشه ریسک آلودگی نیترات از حاصل ضرب آسیب‌پذیری آبخوان در سرعت جریان آب‌زیرزمینی حاصل شده است. برای ارزیابی ریسک در مورد آلودگی آب زیرزمینی بیشتر از مدل "منبع (خطر ایجاد شده توسط فعالیت یک آلاینده بالقوه) - مسیر (آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان نسبت به آلودگی) - هدف (پیامدهای احتمالی یک آلودگی برای آب زیرزمینی)" استفاده می‌شود (Nobre et al., 2007). در پژوهش حاضر نیز از روش "منبع-مسیر-هدف" استفاده شده است با این تفاوت که در بخش مسیر، نتایج آسیب‌پذیری آبخوان که مسیر انتقال آلودگی در نظر گرفته شده است ابتدا با استفاده از ۳ مدل هوش مصنوعی فازی ساجنو (SFL)، درخت تصمیم‌گیری M5P و الگوریتم زیرفضای تصادفی (RS<sup>3</sup>) بهبود یافته و سپس از بین مدل‌ها بهترین مدل جهت ارزیابی ریسک آلودگی استفاده شده است که به نوعی نوآوری پژوهش حاضر محسوب می‌شود. مدل SFL کاربرد متداول در بررسی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها دارد ولی مدل‌های M5P و RS به صورت گسترده استفاده نشده است لذا در این پژوهش کارایی این مدل‌ها نیز بررسی شده است. با توجه به اینکه تاکنون بررسی‌های صورت گرفته در منطقه مطالعاتی نقشه‌های آسیب‌پذیری بوده ولی در این پژوهش علاوه بر تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان و اصلاح آن با مدل‌های هوش مصنوعی، بر اساس روش "منبع-مسیر-هدف"، ریسک آلودگی آبخوان دشت آذرشهر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

آب‌های زیرزمینی یکی از اساسی‌ترین منابع تأمین آب مصرفی موردنیاز در بسیاری از کشورها موردتوجه قرار گرفته است که در اثر تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی تصفیه نشده، استفاده بیش از حد از کودها و آفت‌کش‌ها و سایر فعالیت‌های مشابه آلوده شده است. در مناطق کشاورزی استفاده بیش از حد از کودها و آفت‌کش‌ها باعث افزایش آلودگی نیترات می‌شود. به همین خاطر بررسی ریسک آلودگی این منابع یکی از رکن‌های مدیریتی کشورها است. منابع آلودگی و آسیب‌پذیری دو عامل اصلی در ارزیابی ریسک هستند. برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، سه گروه روش وجود دارد: ۱- روش‌های آماری؛ ۲- روش‌های بر پایه فرایندهای فیزیکی و ۳- روش‌های همپوشانی و شاخص (Nobre et al., 2007). از بین این روش‌ها، روش‌های همپوشانی که بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند برای تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی کاملاً مؤثر هستند. از جمله روش‌های همپوشانی ارائه شده برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان می‌توان به روش DRASTIC، SINTACS، GODS و SI اشاره کرد که در همه این روش‌ها، آسیب‌پذیری آبخوان بر اساس انتقال آلودگی از سطح زمین به لایه آبدار برآورد می‌شود. این روش‌ها در به‌کارگیری نوع و تعداد پارامترها باهم تفاوت دارند و در نهایت منجر به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می‌شوند. روش‌های همپوشانی، مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی هستند؛ زیرا نسبت به سایر روش‌ها ارزان هستند، به‌طور مستقیم به هدف می‌رسند، داده‌های مورد استفاده آن‌ها در دسترس یا قابل تخمین می‌باشند و نتایج نهایی آن‌ها به آسانی قابل توصیف است و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مناسب هستند (Sener and Davraz, 2013). در خصوص آسیب‌پذیری و آلودگی منابع آب زیرزمینی با روش‌های همپوشانی پژوهش‌هایی انجام شده که هر کدام از نقطه نظرهای مختلفی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند (Barzegar et al., 2018, Nadiri et al., 2019, Neshat et al., 2015, Taghavi et al., 2023, Xiong et al., 2022). Nadiri et al. (2019) مطالعه‌ای در مورد بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان با استفاده از روش‌های DRASTIC، SI و SINTACS انجام دادند، ایشان برای دستیابی به نتایج بهتر، روش‌های منفرد یاد شده را با روش‌های نظارت شده شامل مدل فازی ساجنو، الگوریتم ژنتیک و روش‌های نظارت نشده شامل روش مربوط به شاخص همبستگی (CI) ترکیب کردند. نتایج نشان داد شاخص همبستگی هر سه روش ترکیبی بیشتر از روش‌های منفرد (DRASTIC، SINTACS و SI) است و بین روش‌های ترکیبی، مدل فازی ساجنو بیشترین شاخص همبستگی را دارد. علاوه بر این،

## ۲- مواد و روش

### ۱-۲- محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز آبخوان دشت آذرشهر بخشی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت کل ۵۸۰ کیلومتر مربع در ۴۰ کیلومتری جنوب غرب تبریز و در ساحل شرقی دریاچه ارومیه واقع شده است. وسعت دشت آبرفتی آذرشهر در حدود ۱۳۰ کیلومتر مربع است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و حوضه آبریز آن نشان داده شده است. رودخانه آذرشهر چای تنها منبع آب سطحی موجود در منطقه بوده که اغلب در فصل زراعی به ویژه در نواحی پایین دست خشک است. از این رو اصلی ترین منبع آب برای مصارف کشاورزی آب زیرزمینی است و به دلیل حاصلخیزی خاک منطقه، کشاورزی رونق بالایی داشته و از منابع اصلی درآمد ساکنین محسوب می شود. ورود فاضلاب های شهری، روستایی و صنعتی و همچنین استفاده از فضولات حیوانی و کودهای شیمیایی در بخش کشاورزی باعث نفوذ نترات به آب زیرزمینی منطقه شده است.

### ۲-۲- ریسک آلودگی آبخوان مدل سازی

ریسک آلودگی منابع آب را زمانی می توان مورد ارزیابی قرار داد که آسیب پذیری محیط فیزیکی و بار آلودگی ایجاد شده در اثر فعالیت های انسانی بررسی شده باشند. روش های متعددی برای ارزیابی

آسیب پذیری آب زیرزمینی وجود دارد که می توان به روش Van Stempfort, ) AVI, (Aller et al., 1987) DRASTIC SI, (Civita, 1990) SINTACS, (Foster, 1987) GOD, (1993) (Ribeiro, 2000) اشاره کرد. در مقایسه با ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی، روش های متداول کمتری برای ارزیابی منبع آلودگی وجود دارد که می تواند بعلاوه تنوع منبع آلودگی، مقیاس آلودگی و تصادفی بودن حوادث آلودگی باشد. برای ارزیابی ریسک در مورد آلودگی آب زیرزمینی بیشتر از مدل "منبع (خطر ایجاد شده توسط فعالیت یک آلاینده بالقوه) - مسیر (آسیب پذیری ذاتی آبخوان نسبت به آلودگی) - هدف (پیامدهای احتمالی یک آلودگی برای آب زیرزمینی)" استفاده می شود (Nobre et al., 2007). در پژوهش حاضر نیز از روش "منبع - مسیر - هدف" استفاده شده است.

### ۳-۲- آسیب پذیری آبخوان

روش DRASTIC یک روش کمی متداول در جهان است که برای اولین بار در آمریکا در سال ۱۹۷۸ برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی در یک مقیاس ناحیه ای طراحی شده که بر اساس آن پارامترهای مختلف هیدروژئولوژی که هر یک در انتقال آلودگی تأثیرگذارند با یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش با یکدیگر جمع شده در نهایت نقشه آسیب پذیری را ارائه می دهد.

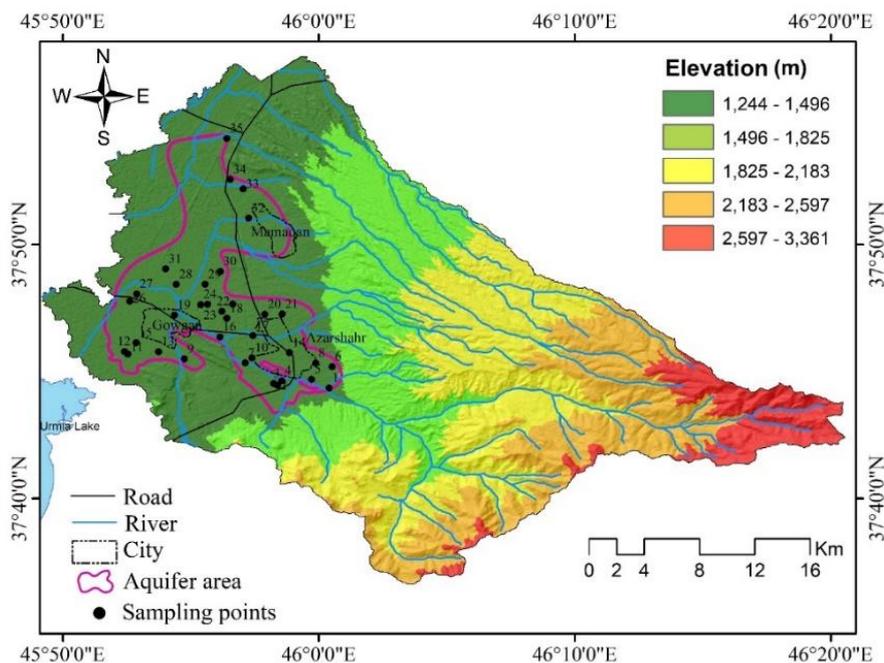


Fig. 1- The location of the study area and sampling points.

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

کردن داده‌ها که این عمل با تعریف تابع عضویت انجام می‌شود، ب) ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی که این کار نیز با یک سری قوانین مانند اگر آنگاه (if-then) انجام می‌شود، ج) مرحله آخر، بررسی سیستم است که به دو روش ممدانی و ساجنو قابل اجراست. تفاوت این دو روش در خروجی آنهاست که در روش ممدانی تابع عضویت خروجی، مجموعه‌های فازی هستند، اما در مدل ساجنو، خروجی به ثابت یا خطی است که توسط روش دسته‌بندی به دست می‌آید.

#### ۲-۴-۲- الگوریتم درخت تصمیم (M5P)

درخت تصمیم برای انجام پیش‌بینی، ساختاری مشابه درخت ایجاد می‌کند به این صورت که ابتدا کار خود را با استفاده از تمام نمونه‌های آموزشی شروع می‌کند و متغیری که بهترین دسته‌بندی را انجام می‌دهد انتخاب می‌کند و زیرمجموعه‌هایی تشکیل می‌دهد. شاخه‌های درخت نتیجه آزمونی است که در هر مرحله توسط الگوریتم بر روی گره‌های میانی صورت می‌گیرد. پیش‌بینی‌ها نیز در برگ‌های درخت ظاهر می‌شوند (Debeljak and Džeroski, 2011). از جمله ویژگی‌های بارز مدل‌های M5P ارائه روابط رگرسیونی و معادلات ریاضی کاربردی بسیار ساده و قابل فهم و در عین حال با دقت مناسب جهت تخمین و پیش‌بینی‌ها است. مدل درختی M5P قابلیت پیش‌بینی متغیرهای پیوسته عددی از روی پارامترهای عددی را دارد و نتایج پیش‌بینی شده به صورت مدل‌های رگرسیونی خطی ظاهر می‌شوند. معیار تقسیم در یک گره بر اساس انتخاب انحراف معیار مقادیر خروجی که به آن گره می‌رسند به عنوان معیاری از خطا است. با آزمودن هر پارامتر در گره کاهش مورد انتظار در خطا ایجاد می‌شود. کاهش انحراف معیار با رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Wang and Witten, 1996).

$$SDR = \frac{m}{|T|} \times \beta(i) \times \left[ sd(T) - \sum_{i \in (L,R)} \frac{|T_i|}{|T|} \times sd(T_i) \right] \quad (3)$$

که در آن، SDR کاهش انحراف معیار است. T نشان‌دهنده سری نمونه‌هایی است که به گره می‌رسد، m تعداد نمونه‌هایی است که برای این پارامتر گم شده ندارند،  $\beta(i)$  یک عامل اصلاحی است و  $T_L$  و  $T_R$  مجموعه‌هایی هستند که از تقسیم بر روی این پارامترها به وجود می‌آیند. هرس<sup>۵</sup> درخت به معنای حذف گره‌های اضافی برای جلوگیری از بیش‌برازش درخت به داده‌های آموزشی است. مرحله آخر ساخت مدل‌های درختی هموارسازی<sup>۳</sup> است که برای جبران ناپیوستگی‌هایی که به ناچار میان مدل‌های خطی همجوار در

این روش بر اساس هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی است که شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیراشباع (I) و ضریب هدایت هیدرولیکی (C) است. در روش دراستیک به هر پارامتر یک رتبه (از ۱ تا ۱۰) و یک وزن (از ۱ تا ۵) برحسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود؛ از این‌رو شاخص دراستیک بر اساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Aller et al., 1987):

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

در رابطه بالا DI شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه، r رتبه و w وزنی است که به هر پارامتر اختصاص یافته است. ساده بودن روش DRASTIC مزیت این روش بوده؛ ولی این روش ضعف‌هایی نیز دارد، مثلاً اعمال قضاوت کارشناسی در وزن‌دهی و رتبه‌دهی و نیز عدم قطعیت ایجاد شده در اثر وزن‌دهی و رتبه‌دهی است. در این پژوهش بجای وزن‌دهی بر اساس نظر کارشناسی از سه مدل هوش مصنوعی SFL، M5P و RS استفاده شده است.

#### ۲-۴-۴- مدل‌های هوش مصنوعی

در هر سه مدل بکار گرفته شده برای بهبود روش دراستیک، هفت لایه مربوط به روش دراستیک از جمله پارامترهای D، R، A، S، T، I و C به عنوان ورودی‌های مدل‌ها و شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده (CVI<sup>۲</sup>) با مقادیر نیترات (رابطه ۲) به عنوان خروجی مدل تعریف شده است. بعد از نرمال‌سازی داده‌های ورودی و خروجی، داده‌ها به ۲ بخش تقسیم شدند به طوری که ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش مدل‌ها و ۲۰ درصد برای آزمون مدل‌ها استفاده شدند. در نهایت بعد از مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های SFL، M5P و RS، شاخص آسیب‌پذیری عددی بین صفر و یک به دست آمد که به ترتیب حداقل و حداکثر شاخص آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد.

$$CVI = \frac{Vul_{max}}{(NO3)_{max}} \times (NO3) \quad (2)$$

#### ۲-۴-۱- مدل فازی ساجنو (SFL)

منطق فازی به عنوان جایگزینی برای توضیح عدم قطعیت استفاده شده است. از آنجا که در همه روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، عدم قطعیت به علت خطاهای اطلاعاتی و متغیر بودن پارامترهای هیدروژئولوژیکی، امری ذاتی است. ارائه مدلی که توانایی پاسخ‌گویی در شرایط عدم قطعیت را داشته باشد ابزار مناسبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری خواهد بود. هر سیستم فازی شامل سه بخش اصلی است: الف) فازی

برگ‌های درخت هرس شده اتفاق می‌افتد صورت می‌گیرد (Wang and Witten, 1996).

## ۲-۴-۳- الگوریتم (RS) Random Subspace

این الگوریتم به‌عنوان یک الگوریتم یادگیری موازی<sup>۶</sup> برای بهبود عملکرد طبقه‌بندی در روش‌های داده‌کاوی ارائه شده است. این الگوریتم ابتدا از طریق تقسیم داده‌های مکانی به تعداد داده‌های کوچک‌تر با خصوصیات مکانی مشخص و سپس اجرای الگوریتم مینا برای هر دسته از داده‌های کوچک‌تر و ترکیب نتایج آن‌ها باعث افزایش عملکرد در طبقه‌بندی می‌شود. این الگوریتم یک روش فرعی را برای طبقه‌بندی‌های پایه آموزشی ایجاد می‌کند و به‌عنوان یک مزیت، نمونه‌های مختلف از فضای مشخصه به جای فضای نمونه استفاده می‌شود (Skurichina et al., 2002). مشکل برآزش بیش از حد داده‌های آموزشی برای طبقه‌بندی در درختان تصمیم‌گیری با بالاترین دقت را می‌توان با استفاده از زیرفضای تصادفی بر طرف کرد (Hosseini et al., 2020). بنابراین، از مجموعه داده‌های آموزشی اصلی، فضای فرعی به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و از طریق ترکیبی از روش‌های رای‌گیری، نتیجه نهایی ایجاد می‌شود.

## ۲-۴-۴- تهیه لایه‌های روش DRASTIC

هفت پارامتر موردنیاز برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری روش DRASTIC و نحوه تهیه لایه‌های اطلاعاتی آن به شرح زیر است: عمق آب زیرزمینی (D): این پارامتر نشان‌دهنده فاصله بین سطح زمین و سطح ایستابی است. هر چه عمق آب زیرزمینی کمتر باشد احتمال رسیدن آلودگی به سطح ایستابی و خطر آلودگی آبخوان بیشتر است. برای تهیه لایه رستری عمق آب زیرزمینی اطلاعات عمق آب ۲۵ چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه مطالعاتی برای سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ استفاده شد. داده‌های عمق آب زیرزمینی در محیط نرم‌افزار ArcGIS به روش معکوس فاصله وزنی (IDW<sup>۵</sup>) درون‌یابی شده و پس از تبدیل شدن به رستر، لایه عمق آب زیرزمینی به دست آمد (شکل ۲-الف).

تغذیه خالص (R): تغذیه خالص آبخوان نشان‌دهنده مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح آب زیرزمینی می‌رسد. هرچه تغذیه بیشتر باشد احتمال آلودگی آبخوان افزایش می‌یابد؛ زیرا آلاینده‌های بیشتری را از سطح زمین شسته و به آب زیرزمینی انتقال می‌دهد. برای محاسبه مقدار تغذیه آبخوان، از روش تغییرات حجم آب زیرزمینی آبخوان استفاده شده است. به این صورت که با در نظر گرفتن روش (Scanlon et al., 2002) و همچنین نرخ پمپاژ از آبخوان

استفاده شده است (Nadiri et al., 2017). بر اساس روش Scanlon و همکاران برای محاسبه میزان تغذیه، میزان تغییرات سطح آب بین دوره ترسالی و خشکسالی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از ضریب ذخیره آبخوان و بر اساس رابطه ۳ نرخ تغذیه محاسبه می‌شود. در این رابطه R نرخ تغذیه، Sy آبدهی ویژه (ضریب ذخیره)،  $\Delta h$  تغییرات سطح آب،  $\Delta t$  تغییرات زمان است. این روش بر این فرض استوار است که تغییرات در تراز آب زیرزمینی در آبخوان آزاد ناشی از تغذیه از سطح است. همچنین، هیچ پمپاژی از آبخوان صورت نمی‌گیرد (Scanlon et al., 2002) با توجه به اینکه از آبخوان آذرشهر پمپاژ انجام می‌گیرد لذا برای محاسبه نرخ تغذیه، روش Scanlon با اعمال تغییراتی و با در نظر گرفتن میزان حجم آب پمپاژ یافته به کار گرفته شد. برای این منظور ابتدا تغییرات سالانه سطح آب هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس آمار سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی محاسبه گردید و سپس با ضرب کردن این تغییرات در ضریب ذخیره آبخوان، تغییرات حجم مخزن بدست آمد. در ادامه برای هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه شبکه‌بندی Theissen رسم گردید و مجموع پمپاژ از چاه‌های واقع در هر پلی‌گون بر اساس آمار ۱۴۰۰ اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی محاسبه شد. سپس با محاسبه مساحت هر پلی‌گون و تغییرات سطح آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهده‌ای با استفاده از رابطه ۴، نرخ تغذیه خالص برای هر پلی‌گون محاسبه گردید (قابل ذکر است که مقدار حجم آب پمپاژ شده و تغییرات سطح آب در بازه زمانی یک سال به واحد ارتفاع تبدیل گردید و بنابر این تغذیه بر حسب سانتی‌متر در سال بدست آمد). نقشه تهیه شده در شکل ۲-ب نشان داده شده است. پارامترهای رابطه ۴ نیز مانند رابطه ۳ است و Pumping نشانگر میزان برداشت از آبخوان است.

$$R = Sy \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (3)$$

$$R = Sy \times \frac{\Delta h}{\Delta t} \pm \text{Pumping} \quad (4)$$

محیط آبخوان (A): محیط آبخوان همان جنس بخش اشباع آبخوان است که میزان تخلخل، جنس، اندازه و جور شدگی ذرات، میزان رقیق شدن آلودگی بر اثر تجزیه شیمیایی، جذب و پخش را کنترل می‌کند. هر چقدر رسوبات دانه‌درشت باشند، امکان انتقال آلاینده‌ها بیشتر است. برای تهیه لایه محیط آبخوان از اطلاعات جنس رسوبات ۱۹ لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده شد و بر اساس جنس لایه‌های آبخوان در هر یک از چاه‌ها (از سطح ایستابی تا سنگ کف)، یک ارزش عددی بین ۱ (رسوبات دانه‌ریز) تا ۱۰ (رسوبات دانه‌درشت) به‌منظور رتبه‌بندی اختصاص یافت. سپس برای اطلاعات نقطه‌ای در محیط نرم‌افزار ArcGIS به روش کریجینگ

معمولی درون‌یابی انجام شد و لایه رستری محیط آبخوان تهیه شد (شکل ۲-ج).

محیط خاک (S): لایه محیط خاک قسمت بالایی منطقه غیراشباع است که تا حد ریشه گیاهان یا فعالیت موجودات ارگانیکی ادامه دارد. این لایه تأثیر قابل توجهی در میزان تغذیه به آبخوان داشته و هرچه این قسمت از خاک دانه‌درشت‌تر باشد فضای خالی احتمال انتقال آلاینده به خاک را بیشتر می‌کند و برعکس در خاک‌های ریزدانه احتمال انتقال کمتر است. برای تهیه این لایه، به دلیل کمبود اطلاعات از وضعیت خاک منطقه، از اطلاعات جنس ۲ متر لایه سطحی رسوبات لاگ‌های حفاری چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده شد. سپس همانند روش تهیه لایه محیط آبخوان، لایه محیط خاک نیز بر اساس بافت ریز یا درشت‌دانه بودن رسوبات ارزش‌گذاری شد و سپس اطلاعات نقطه‌ای با روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شده و لایه رستری محیط خاک تهیه شد (شکل ۲-د).

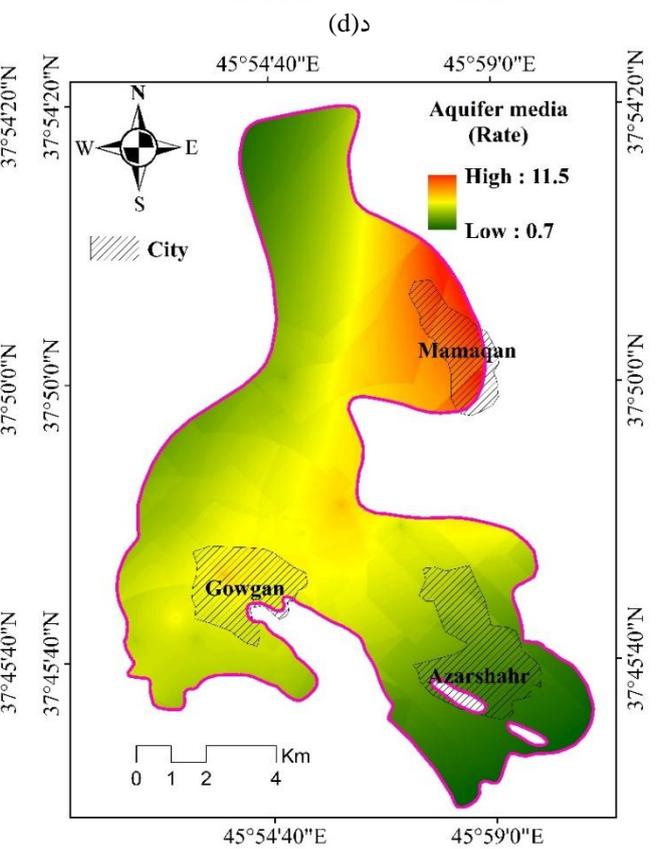
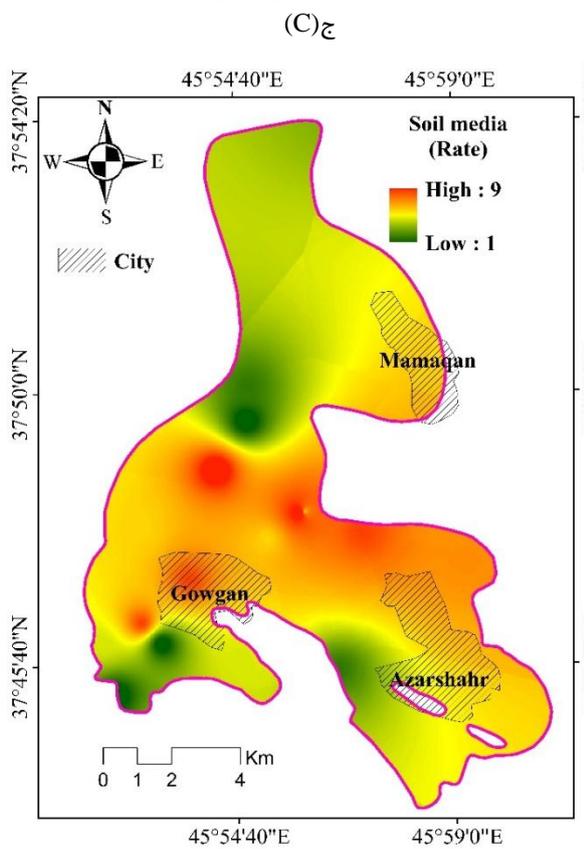
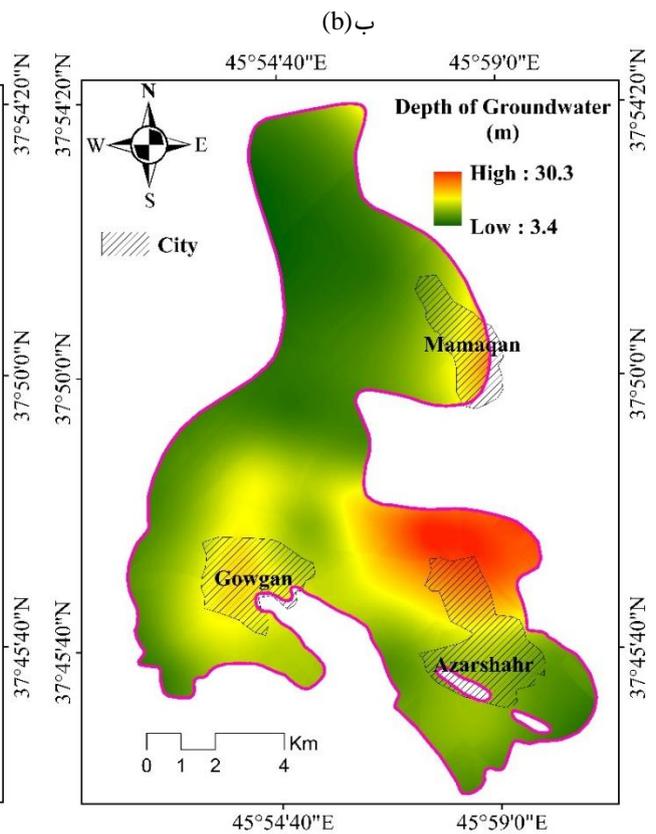
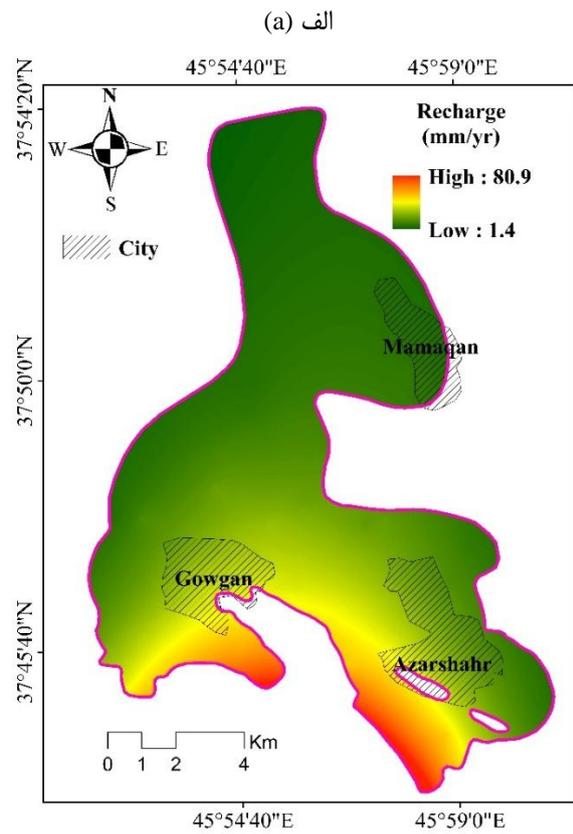
توپوگرافی (T): پارامتر توپوگرافی به تغییرات شیب سطح زمین اشاره دارد. این پارامتر زمان ماندگاری آلاینده را روی زمین نشان می‌دهد. هرچه شیب توپوگرافی کمتر باشد، زمان ماندگاری آلاینده در سطح زمین بیشتر شده و در نتیجه، زمان لازم برای نفوذ آلاینده فراهم می‌شود و آلاینده بیشتری به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند. برای تهیه لایه توپوگرافی، ابتدا مدل رقمی شده ارتفاع (DEM) منطقه تهیه شده و سپس نقشه درصد شیب در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد (شکل ۲-و).

محیط غیراشباع (I): منظور از محیط غیراشباع، جنس رسوبات بخش غیراشباع آبخوان است که حداقل سطح ایستابی تا زیر سطح خاک را شامل می‌شود. آبی که وارد آبخوان می‌شود، ابتدا باید از محیط غیراشباع عبور کند. هرچه رسوبات این قسمت درشت‌دانه باشند خطر آلودگی و انتقال آلاینده‌ها به آبخوان نیز بیشتر خواهد بود. 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 تهیه این لایه بعد از رتبه دهی، داده‌های نقطه‌ای به روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شد و سپس به لایه رستری تبدیل شد (شکل ۲-ه).

هدایت هیدرولیکی (C): هدایت هیدرولیکی معیار اندازه‌گیری جریان سیال است (Das et al., 2017) و هرچه هدایت هیدرولیکی آبخوان بیشتر باشد؛ سرعت انتشار آلاینده نیز بیشتر خواهد بود و در نتیجه آسیب‌پذیری و خطر آلودگی آبخوان نیز بیشتر می‌شود. با در نظر گرفتن دانه‌بندی ذرات تشکیل‌دهنده آبخوان و درصد هریک از مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت آذرشهر برآورد شد. سپس داده‌های نقطه‌ای به روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شد و نقشه رستری هدایت هیدرولیکی تهیه شد (شکل ۲-ی).

### ۳- نتایج و بحث

پس از تهیه و رتبه‌بندی لایه‌های مربوط به هفت پارامتر مورد نیاز، هم‌پوشانی این لایه‌های اطلاعاتی با اعمال وزن‌های اختصاصی‌شان و طبق رابطه ۱ در نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفت و نقشه توزیع مکانی شاخص آسیب‌پذیری آبخوان آذرشهر به دست آمد (شکل ۳-الف). برای صحت‌سنجی و بررسی عملکرد روش DRASTIC، ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و مقدار نیترات محاسبه شد که مقدار ۰/۴۹ حاصل شد. با توجه به اینکه مقدار ضریب همبستگی کمتر از حد قابل قبول بود؛ لذا جهت افزایش همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و میزان آلاینده نیترات از ۳ مدل هوش مصنوعی SFL، M5P و RS برای تدقیق روش DRASTIC در شناسایی نقاط آسیب‌پذیر منطقه مطالعاتی استفاده شد. در شکل ۳-ب، ج و د به ترتیب نقشه آسیب‌پذیری DRASTIC بهینه‌شده با ۳ مدل SFL، RS و M5P نشان داده شده است. در ادامه عملکرد مدل‌ها، با استفاده از ضریب همبستگی (r) و مجذور مربعات خطا (RMSE) اعتبارسنجی شدند. r و RMSE بین نقشه DRASTIC اصلاح شده حاصل و مقادیر نیترات در جدول ۱ نشان داد که مدل درختی M5P با  $r = 0.87$  و  $RMSE = 0.06$  بهترین عملکرد را در میان مدل‌ها داشته که نشان‌دهنده کارآمدی این مدل در افزایش دقت نقشه آسیب‌پذیری است. خروجی درخت مدل M5P در شکل ۴ نشان داده شده است. میزان همبستگی دراستیک اصلی با میزان نیترات ۰/۴۹ بوده و می‌توان گفت تمام مدل‌های به کار برده شده به میزان چشمگیری عملکرد روش DRASTIC را بهبود بخشیده است (جدول ۱).



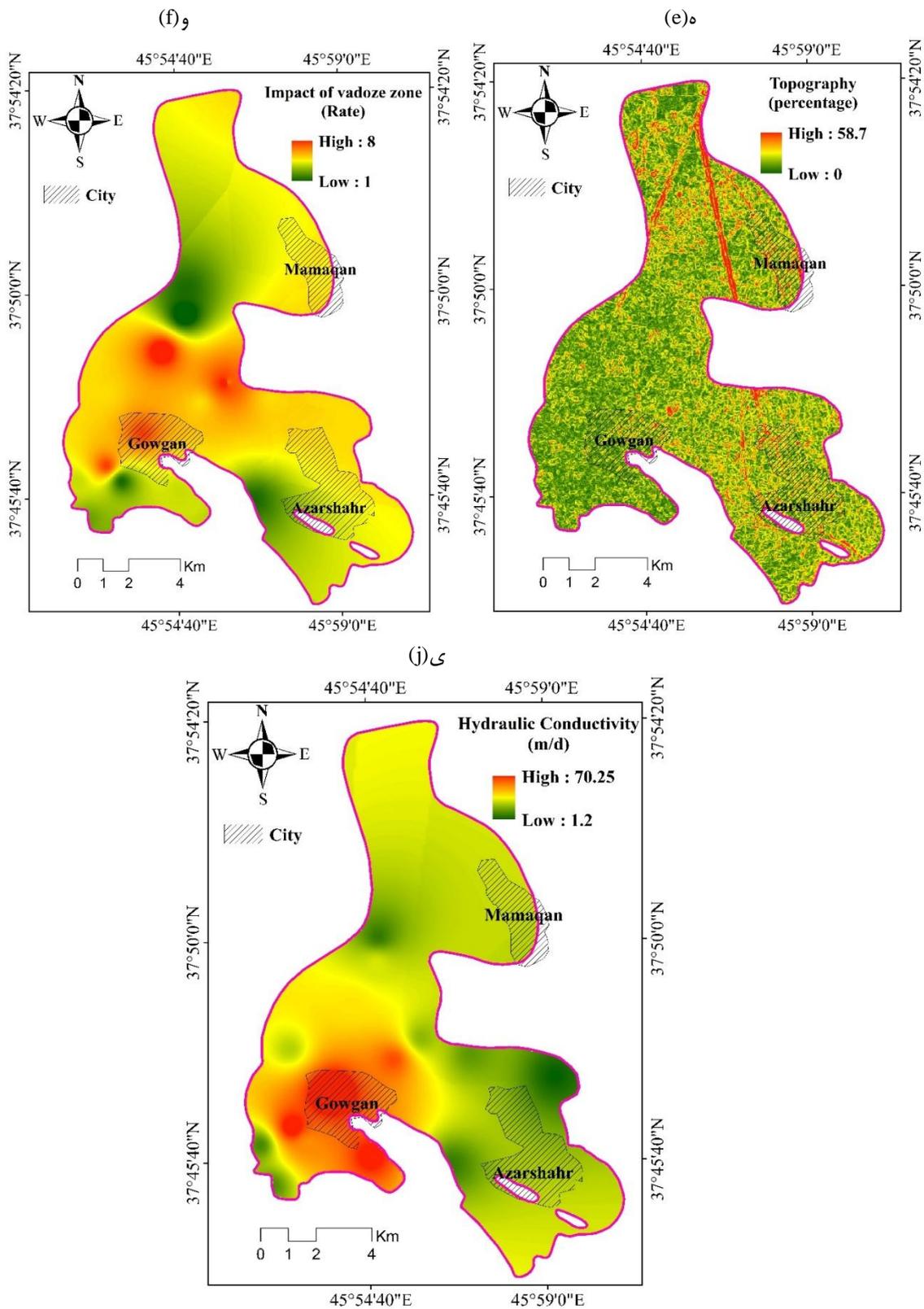


Fig. 2- Parameters of DRASTIC framework, a) Depth of groundwater, b) Recharge, c) Aquifer media, d) Soil media, f) Topography, e) Impact of the vadoze zone media, and J) Hydraulic conductivity

شکل ۲- پارامترهای روش دراستیک، الف) عمق آب زیرزمینی، ب) تغذیه آب زیرزمینی، ج) محیط آبخوان، د) محیط خاک، و

توپوگرافی، ه) محیط غیراشباع، ی) هدایت هیدرولیکی



**Table 1- Correlation coefficient and RMSE for DRASTIC framework and different models**  
**جدول ۱- ضریب همبستگی و مجذور مربعات خطای محاسبه شده برای روش DRASTIC و مدل‌های مختلف**

Model	r	RMSE
DRASTIC	0.49	-
SFL	0.71	0.07
M5P	0.87	0.06
RS	0.82	0.071

در آسیب‌پذیری M5P محاسبه شد و نقشه ریسک آلودگی آبخوان آذرشهر تهیه گردید که در شکل ۶ نشان داده شده است.

$$X_i^n = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

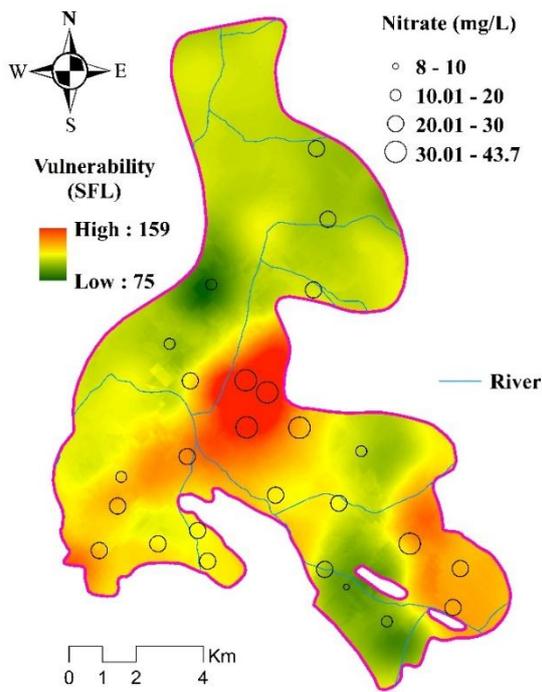
بر اساس نقشه ریسک آلودگی، در قسمت‌های مرکزی و بخش‌هایی از شرق و جنوب شرق آبخوان ریسک آلودگی نسبت به آلاینده نترات بالاتر از بقیه قسمت‌های آبخوان است. در صورت کلاس‌بندی ریسک به کلاس‌های ریسک خیلی کم (۰-۰/۲)، ریسک کم (۰/۲-۰/۴)، ریسک متوسط (۰/۴-۰/۶)، ریسک زیاد (۰/۶-۰/۸) و ریسک خیلی زیاد (۰/۸-۱)، مقدار ریسک آلودگی آبخوان دشت آذرشهر نسبت به آلودگی نترات در بازه ۰ تا ۰/۴۴ است که در کلاس ریسک خیلی کم تا متوسط قرار می‌گیرد.

به علت اینکه در قسمت مرکزی و جنوب و جنوب شرقی آبخوان آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان نسبتاً بالا بوده، سرعت آب زیرزمینی نیز نسبتاً بالاست از این رو این قسمت از آبخوان ریسک بالاتری نسبت به بقیه قسمت‌های آبخوان دارد. همچنین در قسمتی شمال شرق آبخوان در اطراف شهر ممقان سرعت آب زیرزمینی نسبتاً بالا است در صورتی که آسیب‌پذیری در این قسمت پایین است به همین دلیل ریسک در این قسمت‌ها پایین است. در بقیه قسمت‌هایی که آسیب‌پذیری آبخوان کم بوده و سرعت جریان آب زیرزمینی نیز کم است طبیعتاً ریسک نیز در این قسمت‌ها در رده بسیار کم است.

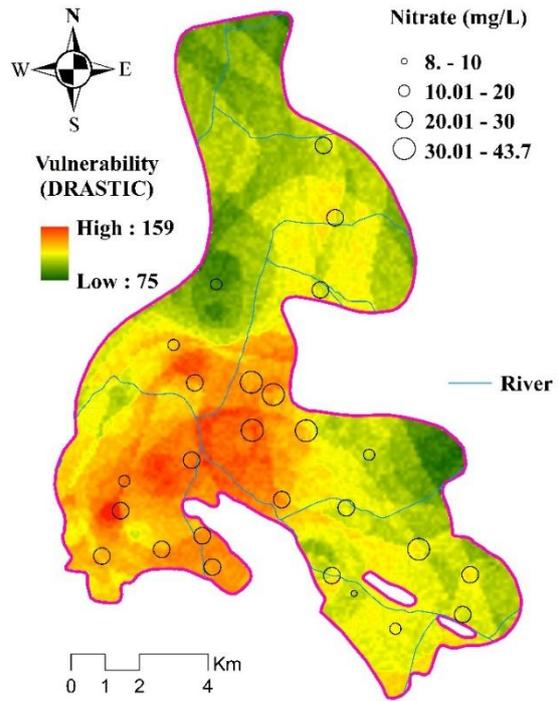
به‌منظور تهیه نقشه ریسک آلودگی نترات، نقشه آسیب‌پذیری M5P که شاخص آسیب‌پذیری دقیق‌تری را نسبت به این آلاینده در بیشتر مکان‌های نمونه‌برداری ایجاد کرده بود انتخاب شد. در مرحله بعد با توجه به اینکه نقشه ریسک آلودگی از حاصل‌ضرب نقشه آسیب‌پذیری در سرعت جریان آب زیرزمینی به دست می‌آید (Nadiri et al., 2018).

لذا لازم است که سرعت جریان آب زیرزمینی نیز محاسبه شود. برای محاسبه سرعت جریان آب زیرزمینی از رابطه داریسی (V=KI) استفاده شد. در این معادله، K هدایت هیدرولیکی بوده که در شکل ۲-۱ نشان داده شده و I نیز شیب هیدرولیکی است که با استفاده از نقشه تراز سطح ایستابی محاسبه شد که مقدار آن بین ۰/۰۰۱۳ تا ۱/۹۳ به دست آمد (شکل ۵-الف). سرعت جریان آب زیرزمینی بر اساس معادله داریسی از حاصل‌ضرب هدایت هیدرولیکی (K) و شیب هیدرولیکی (I) حاصل شد که در (شکل ۵-ب) نشان داده شده است. بر اساس این نقشه سرعت جریان آب زیرزمینی در قسمت‌هایی از جنوب و جنوب شرقی بالا است که این امر به علت بالابودن گرادیان و همچنین بالابودن هدایت هیدرولیکی در نتیجه درشت‌دانه بودن رسوبات این بخش است؛ بنابراین در صورت وجود آلاینده در این قسمت از آبخوان، احتمال انتقال بیشتر خواهد بود.

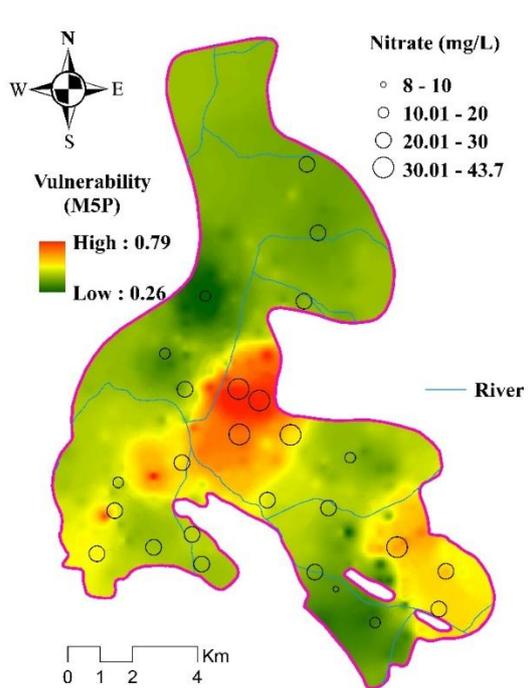
بعد از محاسبه سرعت آب زیرزمینی و نرمال‌سازی آن بر اساس رابطه ۵، ریسک آلودگی آبخوان از حاصل‌ضرب سرعت جریان آب زیرزمینی



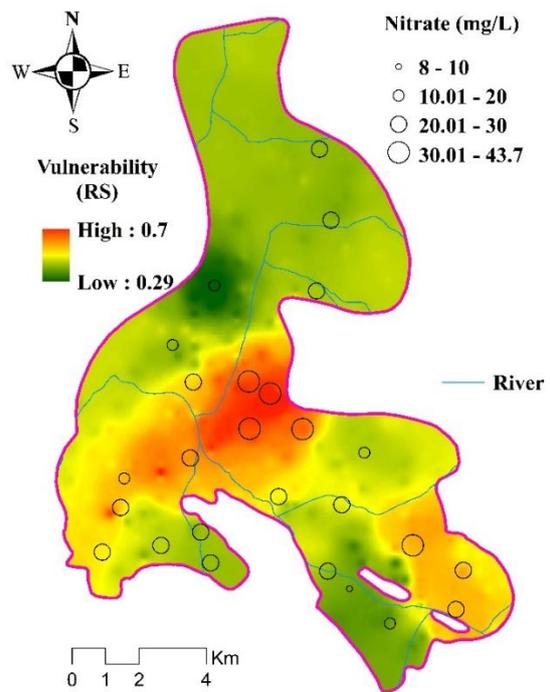
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Fig. 3- Vulnerability maps from: a) SFL, b) DRASTIC, c) MSP, d) RS  
 شکل ۳- نقشه آسیب پذیری به دست آمده از: الف) DRASTIC، ب) SFL، ج) RS، د) MSP

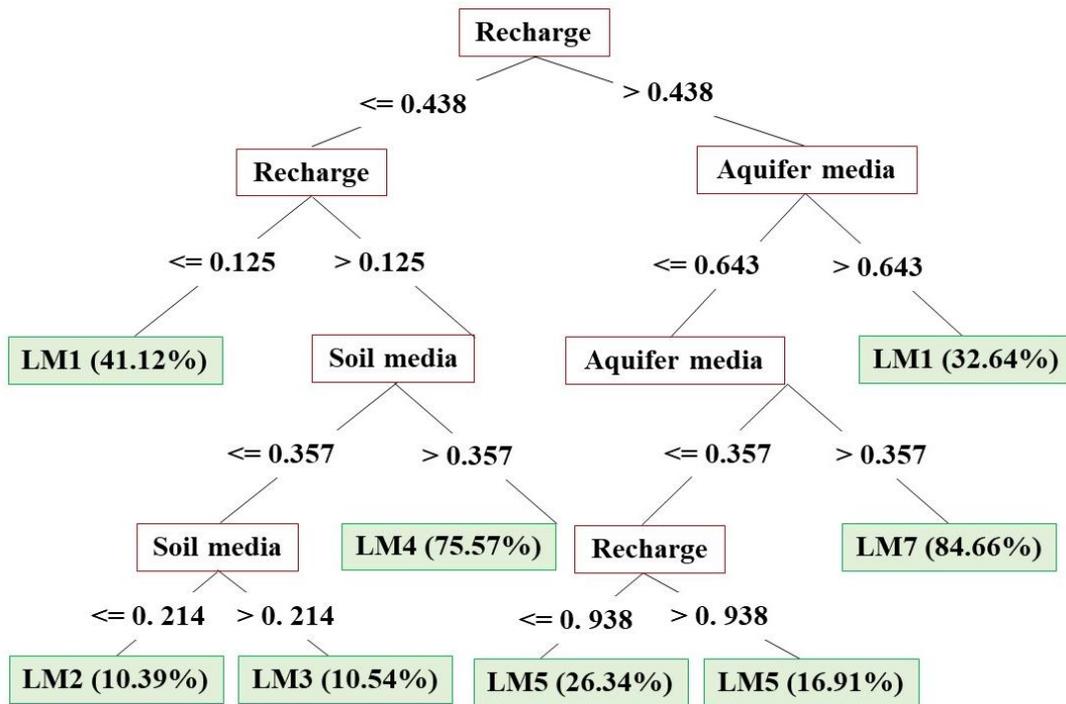


Fig. 4- Classification tree of MSP model  
 شکل ۴- درخت طبقه‌بندی مدل MSP

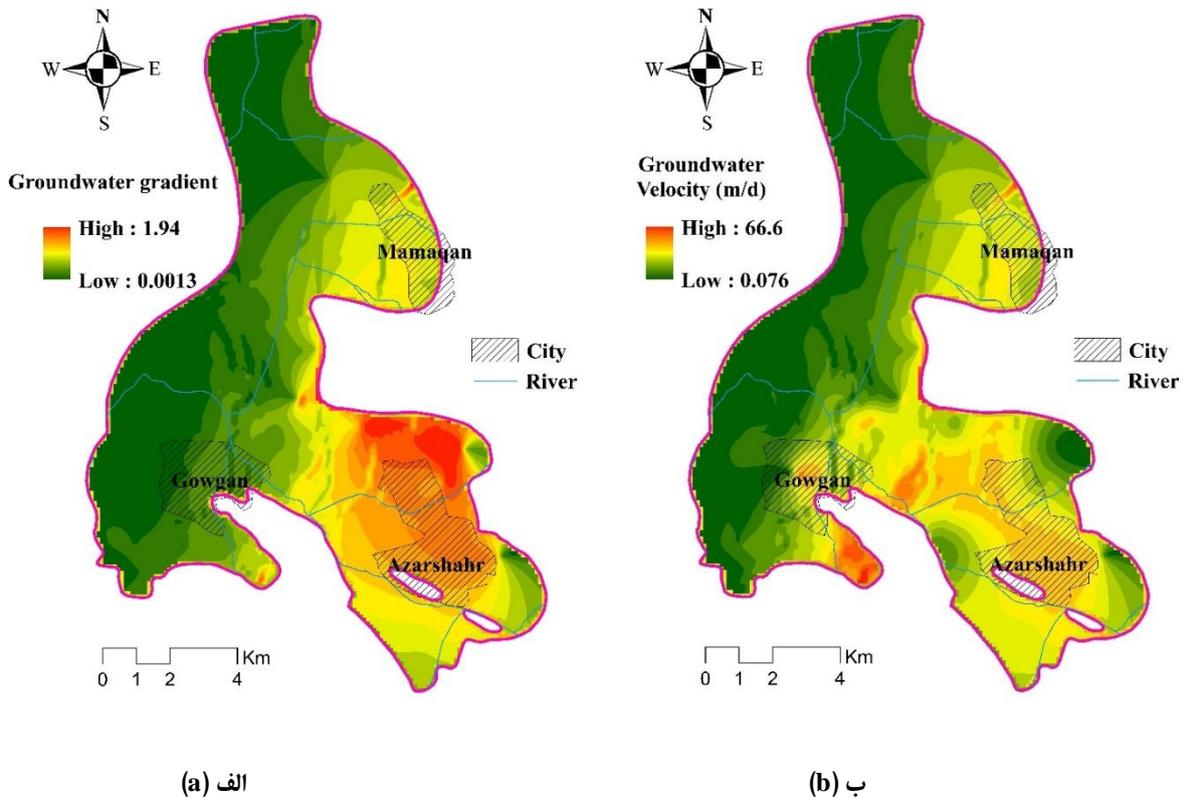
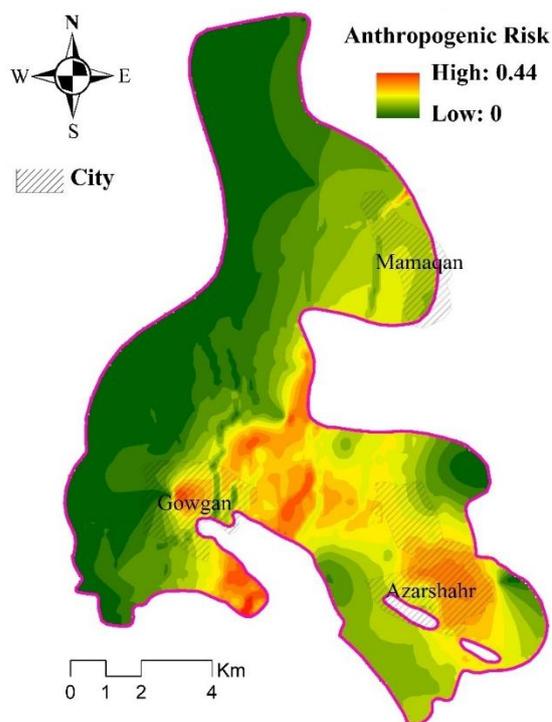


Fig. 5- a) The groundwater velocity map, b) The hydraulic gradient map.  
 شکل ۵- الف) نقشه سرعت جریان آب زیرزمینی، ب) نقشه گرادیان هیدرولیکی

شرق آبخوان بالا است. در این مناطق، مدیریت دقیق در استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند شستشوی نیترات به آب زیرزمینی را کاهش داده و در نتیجه از بروز بسیاری از مشکلات بعدی جلوگیری کند. در برنامه‌های طراحی کودها موارد زیر باید در نظر گرفته شود: آنالیز آب و خاک برای تعیین دقیق نیتروژن موردنیاز محصولات، تعیین نیتروژن موجود در گیاهان در هر منطقه و سپس تعیین مقدار کود موردنیاز، همچنین جلوگیری از تخلیه فضلاب‌های انسانی در چاه‌های جذبی و استفاده از سیستم فضلاب شهری و تصفیه خانه از موارد مهم جهت کاهش آلودگی است. در این پژوهش برخلاف اکثر مطالعات پیشین صورت گرفته در آبخوان‌ها به ویژه در آبخوان‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه که تمرکز آن‌ها بر روی آسیب‌پذیری بوده است، مسئله ریسک آلودگی آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری از جمله فاکتورهای مؤثر بر تهیه لایه‌های رستری DRASTIC می‌توان به تعداد نقاط داده، فاصله بین موقعیت نقاط داده و توزیع داده‌ها اشاره کرد که این‌ها دارای عدم قطعیت هستند. در این پژوهش جهت کاهش عدم قطعیت بجای استفاده از نظرهای کارشناسی در اعمال رتبه و وزن از روش‌های هوش مصنوعی استفاده شد ولی به علت استفاده از درونیابی برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی بررسی میزان عدم قطعیت توصیه می‌شود.



**Fig. 6- The groundwater pollution risk map regarding nitrate**  
 شکل ۶- نقشه ریسک آلودگی آب زیرزمینی نسبت به نیترات

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش تعیین ریسک آلودگی آبخوان دشت آذرشهر نسبت به آلاینده نیترات است. برای این منظور ابتدا بررسی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به نیترات با استفاده از روش DRASTIC انجام گرفت. سپس به منظور کاهش اعمال نظرهای کارشناسی در وزن‌دهی و رتبه‌دهی به پارامترهای روش دراستیک، مدل‌سازی آسیب‌پذیری با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی از جمله مدل‌های SFL، M5P و RS انجام گرفت. نتایج نشان داد تمام مدل‌های هوش مصنوعی عملکرد بهتری از روش DRASTIC اولیه داشته و در بین مدل‌های هوش مصنوعی بر اساس بیشترین ضریب همبستگی ( $r=0.87$ ) و کمترین میزان خطا ( $RMSE=0.06$ )، مدل M5P به‌عنوان بهترین مدل جهت ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه مطالعاتی انتخاب شد. این مدل توانست نسبت به DRASTIC اولیه و مدل‌های SFL و RS ضریب همبستگی را به ترتیب ۳۸، ۱۶ و ۵ درصد افزایش دهد. بنابراین روش M5P برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آذرشهر نسبت به بقیه روش‌ها بهتر است. در نهایت نقشه ریسک آلودگی نیترات از حاصل ضرب آسیب‌پذیری آبخوان (براساس مدل M5P) در سرعت جریان آب زیرزمینی به دست آمد. نتایج نشان داد ریسک آلودگی آبخوان نسبت به آلاینده نیترات در قسمتی از مرکز، جنوب و جنوب

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Correlation Index
- 2- Sugeno Fuzzy Logic
- 3- Random Subspace
- 4- Corrected Vulnerability Index
- 5- Smoothing
- 6- Parallel Learning Algorithm (PLA)
- 7- Digital Elevation Model

## ۵- مراجع

- Aller L, & Thornhill J (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency
- Barzegar R, Moghaddam A A, Deo R, Fijani E, & Tziritis E (2018) Mapping groundwater contamination risk of multiple aquifers using multi-model ensemble of machine learning algorithms. *Science of the Total Environment* 621:697-712
- Bera A, Mukhopadhyay B P, & Das S (2022) Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid Totko river basin, India using GIS-based DRASTIC model and AHP techniques. *Chemosphere* 307:135831
- Civita M (1990) *Legenda unificata per le Carte della vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/ Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. Studi sulla Vulnerabilita degli Acquiferi*
- Das A, Maiti S, Naidu S, & Gupta G (2017) Estimation of spatial variability of aquifer parameters from geophysical methods: a case study of sindhudurg district, Maharashtra, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31:1709-1726
- Debeljak M, & Džeroski S (2011) Decision trees in ecological modelling. *Modelling complex ecological dynamics: An introduction into ecological modelling for students, teachers & scientists* 197:209
- Foster S S D (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh Hg (eds) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proc Inf TNO Comm Hydrol Res, The Hague* 38:69-86
- Gharekhani M, Nadiri A A, Asghari Moghaddam A, & Sadeghfam S (2021) Investigation of contamination risk using optimized DRASTIC-L method with genetic algorithm in salmas alain Aquifer. *Irrigation and Water Engineering* 11(4):160-174 (In Persian)
- Hosseini F S, Choubin B, Mosavi A, Nabipour N, Shamshirband S, Darabi H, Torabi Haghighi A (2020) Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: Application of the simulated annealing feature selection method. *Science of The Total Environment* 711:135161
- Jafari S M, & Nikoo M R (2016) Groundwater risk assessment based on optimization framework using DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences* 9:1-14
- Nadiri A A, Aghdam F, Razzagh S, Barzegar R, Jabraili-Andaryan N, & Senapathi V (2022) Using a soft computing OSPRC risk framework to analyze multiple contaminants from multiple sources; A case study from Khoy Plain, NW Iran. *Chemosphere* 308:136527
- Nadiri A A, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, & Moghaddam A A (2017) Groundwater vulnerability indices conditioned by supervised intelligence committee machine (SICM). *Science of the Total Environment* 574:691-706
- Nadiri A A, Jabraili N, & Gharekhani M (2019) Comparison of different combination methods ability on groundwater vulnerability assessment in Qorveh-Dehgolan plain aquifer. *Iranian journal of Ecohydrology* 6(3):821-836 (In Persian)
- Nadiri A A, Sadeghfam S, Gharekhani M, Khatibi R, & Akbari E (2018) Introducing the risk aggregation problem to aquifers exposed to impacts of anthropogenic and geogenic origins on a modular basis using 'risk cells'. *Journal of Environmental Management* 217:654-667
- Nadiri A A, Sedghi Z, & Khatibi R (2021) Qualitative risk aggregation problems for the safety of multiple aquifers exposed to nitrate, fluoride and arsenic contaminants by a 'Total Information Management' framework. *Journal of Hydrology* 595:126011
- Neshat A, Pradhan B, & Javadi S (2015) Risk assessment of groundwater pollution using Monte Carlo approach in an agricultural region: an example from Kerman plain, Iran. *Computers, Environment, and Urban Systems* 50:66-73
- Nobre R C M, Rotunno Filho O C, Mansur W J, Nobre M M M, & Cosenza C A N (2007) Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology* 94(3-4):277-292
- Rajput H, Goyal R, & Brighu U (2020) Modification and optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability and contamination risk assessment for Bhiwadi region of Rajasthan, India. *Environmental Earth Sciences* 79:1-15
- Razzagh S, Nadiri A A, Khatibi R, Sadeghfam S, Senapathi V, & Sekar S (2021) An investigation to human health risks from multiple contaminants and multiple origins by introducing 'Total Information Management'. *Environmental Science and Pollution Research* 28:18702-18724

- Ribeiro L (2000) Desenvolvimento de um indice para avaliar a susceptibilidade. ERSHA-CVRM, 1:8
- Scanlon BR, Healy R W, & Cook P G (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal 10:18–39
- Sener E, & Davraz A (2013) Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: The case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). Hydrogeology Journal 21(3):701-714
- Taghavi N, Niven R K, Kramer M, & Paull D J (2023) Comparison of DRASTIC and DRASTICL groundwater vulnerability assessments of the Burdekin basin, Queensland, Australia. Science of The Total Environment 858:159945
- Stempvoort D V, Ewert L, & Wassenaar L (1993) Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal 18(1):25-37
- Wang J, He J, & Chen H (2012) Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing plain, China. Science of the Total Environment 432:216-226
- Wang Y, & Witten I H (1996) Induction of model trees for predicting continuous classes. (Working paper 96/23). Hamilton, New Zealand: University of Waikato, Department of Computer Science
- Xiong H, Wang Y, Guo X, Han J, MA C, & Zhang X (2022) Current status and future challenges of groundwater vulnerability assessment: A bibliometric analysis. Journal of Hydrology 615:128694