

## ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب‌زیرزمینی براساس شکست خط لوله انتقال سوخت تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه با استفاده از روش یادگیری ماشین (ML)

مهدی حقیقی<sup>۱</sup>، علی دلنواز<sup>۲\*</sup>، پوریا رشوند<sup>۳</sup> و محمد دلنواز<sup>۴</sup>

### چکیده

در این پژوهش هدف اصلی ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بر اساس آسیب شبکه انتقال سوخت شهری در برابر وقوع زلزله بوده‌است. در این راستا مطالعه موردی روی سیستم انتقال سوخت شهر تهران و آبخوان دشت تهران-کرج انجام شده است. به منظور ارزیابی آسیب لرزه‌ای خط لوله سوخت مدفون تهران براساس مشخصات اجزای شبکه انتقال سوخت، سه سناریوی احتمالی زلزله در منطقه مطالعه شد. برای ارزیابی آسیب در خط لوله، مدلی جامع با استفاده از روش یادگیری ماشین توسعه داده شده است. این مدل قابلیت ارزیابی و پیش‌بینی آسیب و نوع آسیب (نشتی، شکست کامل) را در خط لوله دارد. همچنین ارزیابی آلودگی آبخوان با بهره‌گیری از مدل DRASTIC انجام شده است. نتایج نشان داد که مدل ارزیابی آسیب لرزه‌ای خط لوله براساس روش یادگیری ماشین عملکرد خوبی در پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای شبکه انتقال سوخت دارد؛ به طوری که ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) برای داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۰۴ و ۰/۹۹ بود. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان خسارت وارده به شبکه انتقال سوخت تهران بر اساس سناریوی زلزله با بزرگای ۶ ریشتر، ۲۴ نشتی و ۶ خرابی و بر اساس سناریوی با بزرگای زلزله ۷ ریشتر ۲۷ نشتی و ۸ خرابی بوده‌است. با ارزیابی نتایج نقشه‌های آلودگی سفره‌های زیرزمینی حاصل از مدل DRASTIC مشخص شد که ۴۰ درصد آبخوان تهران دارای پتانسیل آلودگی متوسط و ۱۵ درصد دارای پتانسیل آلودگی پایین در سناریوی لرزه‌ای با بزرگای ۶ ریشتر بوده‌است. همچنین در سناریوی لرزه‌ای با بزرگای ۷ ریشتر ۵۲ درصد دارای پتانسیل آلودگی متوسط و ۱۹ درصد دارای پتانسیل آلودگی پایین بوده‌است. مدل توسعه‌یافته (مدل ارزیابی آسیب لرزه‌ای آب‌های زیرزمینی) می‌تواند در سایر موارد مشابه و به عنوان بستری برای تحلیل‌های تکمیلی بیشتر استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** آسیب‌پذیری لرزه‌ای، آلودگی آب‌زیرزمینی، خط لوله سوخت، روش یادگیری ماشین، مدل DRASTIC.

**ارجاع:** حقیقی م.، دلنواز ع.، رشوند پ. و دلنواز م. ۱۴۰۳. ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب‌زیرزمینی براساس شکست خط لوله انتقال سوخت تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه با استفاده از روش یادگیری ماشین (ML). مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۵۲-۹۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14490.2549>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران.

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول: [a.delnavaz@qiau.ac.ir](mailto:a.delnavaz@qiau.ac.ir)

## مقدمه

مساله آب و دسترسی به منابع آب سالم یکی از مهمترین چالش‌ها و دغدغه‌های دولت‌ها و جوامع در قرن حاضر است. با افزایش جمعیت و گسترش دامنه فعالیت‌های انسان در بخش‌های مختلف صنعتی، کشاورزی، اجتماعی و رفاهی، تقاضای مصرف آب افزایش یافته است؛ در حالی که مقدار آب کره زمین ثابت است، ۹۷ درصد کل آب کره زمین شور بوده و در دریاها و اقیانوس‌ها قرار دارد. ۲ درصد از ۳ درصد آب شیرین باقیمانده به صورت یخ‌های قطبی و تنها ۱ درصد آن به صورت آب‌های زیرزمینی قابل استفاده است. همچنین آب‌زیرزمینی یکی از بخش‌های اساسی چرخه طبیعی آب می‌باشد و جریان پایه‌ی اکوسیستم‌های مختلف آبی را فراهم می‌کند؛ بنابراین حفاظت و دور نگهداشتن آن از انواع آلودگی ضروری است. افزایش قابل توجه بار آلودگی و تنوع آلاینده‌های مختلف، نیاز به مدیریت کمی و کیفی سیستم‌های منابع آب را بیش‌ازپیش ضروری ساخته است. یکی از پیامدهای مخرب زمین‌لرزه ایجاد شکست در سازه‌ها و تاسیسات زیربنایی هر منطقه همچون سیستم انتقال سوخت بوده است. به طور کلی سیستم انتقال سوخت در شهرها از لوله‌های مدفون در خاک جهت انتقال سوخت و مخازن مختلف بر روی زمین برای دپو و نگهداری مواد نفتی تشکیل شده است با رخداد زمین‌لرزه و حرکت صفحات تکتونیکی زمین شاهد دو پدیده اصلی مخرب بوده ایم: ۱- شکست کامل لوله‌های انتقال سوخت و ۲- ایجاد ترک در لوله‌ها (نشت مواد نفتی). بر اساس موقعیت کارگذاری سیستم انتقال سوخت که از لوله‌های مدفون در خاک تشکیل شده است، انتظار می‌رود که پس از شکست لوله و نشت مواد نفتی، محتویات داخل لوله‌های سیستم انتقال سوخت به عنوان آلاینده در خاک حرکت کرده و علاوه بر آلودگی خاک بر اساس ضریب هیدرولیکی انتقال، به منابع آب زیرزمینی راه یافته و سبب آلودگی این منابع ارزشمند گردد.

با توجه به ماهیت زمین‌لرزه که در دسته‌بندی پدیده‌های تصادفی بوده و پیش‌بینی دقیقی از زمان، مکان و شدت آن نمی‌توان ارائه داد و همچنین بر اساس پارامترهای متعدد دخیل در عملکرد سیستم انتقال سوخت تحت بارگذاری لرزه‌ای که دارای عدم قطعیت‌های وسیعی بوده است، و با در نظر گرفتن پیامدهای زیست محیطی حاصل از شکست -نشت مواد نفتی از سیستم انتقال سوخت، نیاز

است تا مطالعات وسیعی در غالب (آنالیز آسیب‌پذیری، آنالیز ریسک) روی شبکه انتقال سوخت تحت سناریوهای مختلف زمین‌لرزه صورت پذیرد و با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت ارزیابی بر آلودگی منابع آب زیرزمینی توسط نشت آلاینده‌های نفتی حاصل از شکست سیستم انتقال سوخت پیاده سازی شود. در این راستا مطالعات ارزشمندی پیرامون آنالیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله مدفون توسط محققین انجام شده است. موزر و فولکمن (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای به ارزیابی روش‌های مختلف طراحی، بهره‌برداری و عملکرد خط لوله مدفون تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای پرداختند. در راستای ارزیابی رفتار لرزه‌ای شبکه انتقال سوخت (شبکه خطه لوله) مطالعات جامعی توسط داتا (۱۹۹۹) و بورسوتزکی (۲۰۰۶) انجام شد. هویک و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی به بررسی و ارزیابی روش‌های آنالیز ریسک و خطرپذیری خط لوله مدفون در شرایط تغییرشکل‌های دائمی زمین پرداخت. سلجوک و یوگمان (۲۰۰۰) در راستای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه خط لوله تحت خطر تغییر شکل‌های ناشی از جابه‌جایی زمین، مطالعات جامعی انجام داد. توپراک و تاکسین (۲۰۰۷) به بررسی خسارات ناشی از وقوع زمین‌لرزه بر خط لوله مدفون پرداختند، نتایج حاصل بیانگر ارائه روش تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر اساس روابط تجربی بود. تارینکان و همکاران (۲۰۱۱) از نقشه‌های خطر برای شناسایی قطعات آسیب‌پذیر خطوط لوله در برابر زلزله و تدوین استراتژی‌های کاهش آثار با انجام مطالعات جامع ریسک لرزه‌ای استفاده کردند. اسپوتیو (۲۰۱۱) سیستم اطلاعاتی GIS را در مورد خصوصیات فیزیکی و اجرائی خط لوله انتقال گاز به منظور شناسایی رفتار لرزه‌ای همه اجزای سیستم توسعه داد، همچنین خطر تغییر شکل موقتی زمین و نیز تغییر شکل دائمی زمین و تأثیر آن بر شبکه خط لوله گاز مطالعه شد، در نهایت شبیه‌سازی‌های شرایط محتمل برای ارزیابی پاسخ سیستم بر حسب عملکرد شاخص‌های مختلف و ترکیب حالت‌های مختلف انجام شد.

ککیرگه (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای به ارزیابی ریسک کمی خطوط مدفون سوخت پرداخت. وی با استفاده از روش شاخص<sup>۱</sup> و آنالیز چند متغیره، متدولوژی ریسک خطوط مدفون سوخت را ارائه داد، در این پژوهش ۵ متغیر مؤثر:

حساسیت آب سطحی-حساسیت آب زیرزمینی-منابع اکولوژیکی زمین-کاربری اراضی و منابع باستانی به عنوان متغیرهای آنالیز ریسک حساسیت‌سنجی و در نهایت ریسک فاکتورهای مختلف ارزیابی شد. گلبرگ و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به ارزیابی عوامل خطر لوله و اولویت‌بندی شدت خطر آنها به منظور جلوگیری از اثرات آنها در تالاب بین المللی شادگان ایران پرداختند. در این تحقیق از روش‌های برنامه‌ریزی سلسله مراتبی<sup>۱</sup> و روش دلفی استفاده و اثرات ریسک خطوط لوله بر عوامل زیست محیطی منطقه به صورت کمی بیان شد. مارتینی و همکاران (۲۰۱۸) کاهش نشت آب در شبکه توزیع را بررسی کردند و یک استراتژی مناسب برای کنترل فعال میزان نشت ارائه دادند. در این پژوهش هدف اصلی بررسی روش‌های شناسایی نشت بر مبنای ویژگی‌های ذاتی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و نه بر مبنای بزرگی نسبی آنها بود. آنها یک مدل کوچک از شبکه توزیع را شبیه‌سازی کردند. نتایج آزمایشگاهی اثربخشی روش پیشنهادی را تأیید کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) یک روش جدید برای ارزیابی ایمنی خطوط مدفون تحت فشار، تحت شرایط لرزه‌ای غیر تصادفی و بر اساس مدل ابری ارائه دادند. لی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود به ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله انتقال گاز شهری پرداختند. در این پژوهش برای تحلیل آسیب و ارزیابی ریسک در خط لوله انتقال گاز از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. کرمی مقدم و مهدوی عادل (۲۰۲۰) در پژوهشی به ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله مدفون با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی المان محدود و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله با بهره‌گیری از الگوریتم رگرسیون روش یادگیری ماشین پرداختند، نتایج حاصل بیانگر عملکرد نسبتاً قابل قبول روش ارائه شده برای تحلیل آسیب‌پذیری در خط لوله مدفون بود. گرموسو و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای خطوط لوله مدفون با استفاده از یک مدل پارامتری سه بعدی برهمکنش خاک-خط لوله پرداختند. ماکراکیس و همکاران (۲۰۲۲) مطالعه‌ای پیرامون ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله انتقال گاز در شرایط کارگذاری در خاک

نرم انجام دادند. در این پژوهش از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> برای تحلیل آسیب‌پذیری خط لوله تحت شرایط جابه‌جایی زمین و با درنظر گرفتن محیط پیرامون لوله (خاک نرم) استفاده شد، نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول روش ANN در ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله بوده‌است. ایتو و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه، آسیب لوله‌های فولادی مدفون را با استفاده از یادگیری ماشین بررسی کردند. در این پژوهش از یک الگوریتم یادگیری ماشین نظارت شده با روش تقویت گرادیان استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد مدل ارائه شده در پیش‌بینی آسیب لوله قابل قبول بوده‌است. جین-قی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد مدل احتمالی حالت شکست نهایی خط لوله، رابطه بین PGV و حداکثر کرنش خط لوله مدفون پرداختند. همچنین مدل آسیب‌پذیری لرزه‌ای براساس مشخصات خط لوله همچون: جنس مواد، ضخامت، قطر و طول مشخصه توسعه داده شد. نتایج حاصل از این پژوهش ارائه مدلی نظری برای تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای در ارزیابی خطر لرزه‌ای خطوط لوله مدفون بوده‌است.

در راستای ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی و آسیب‌پذیری آبخوان مطالعات جامعی توسط محققین مختلف (رجستانکر (۱۹۹۵) اقوشی و همکاران (۱۹۹۵)، کلاسون (۲۰۰۴)) انجام شده است. نتایج حاصل بیانگر تغییرات کیفیت و خصوصیات آب زیرزمینی پس از وقوع زمین‌لرزه در مناطق مختلف بوده‌است. لیو و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه خود به بررسی وضعیت آبخوان پس از وقوع زمین‌لرزه با بزرگای ۷/۲ ریشتر پرداختند، نتایج نشان داد که پس از زلزله یک سری تغییرات موقتی و دائمی در خصوصیات شیمیائی آب اتفاق افتاد. مقادیر غلظت کلسیم و بی کربنات قبل از زلزله دارای نرخ افزایش زیادی بودند ولی پس از زلزله با نرخ ثابتی کاهش یافتند. ملکوتیان و نوری (۲۰۱۰) پژوهشی در راستای تعیین اثر زلزله روی کیفیت شیمیائی منابع آب زیرزمینی در نواحی نزدیک کانون زمین‌لرزه پرداختند، در این مطالعه زلزله‌ای با بزرگای ۶/۳ ریشتر و تأثیر آن بر خصوصیات آب زیرزمینی بررسی شد، نتایج نشان داد که کیفیت شیمیایی آب چاه‌ها پس از زلزله نسبت به قبل از زلزله دارای نوسانات بیشتری بود. تغییرات مقادیر شاخص بین ۷۰ تا

بهره‌گیری از مدل DRASTIC در منطقه نیمه خشک پرداخته، نتایج بیانگر عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی پتانسیل آلودگی و آسیب‌پذیری آبخوان بوده‌است. یو و همکاران (۲۰۲۲) ضرایب و وزن مؤلفه‌های تشکیل دهنده مدل DRASTIC را ارزیابی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر بهینه‌سازی پارامترها و وزن‌های مدل DRASTIC به منظور تحقق برآوردهای قابلیت اطمینان آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بوده‌است.

در این پژوهش با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی براساس شکست خط لوله انتقال سوخت تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه تحقیق جامعی در قالب مطالعه موردی بر سیستم انتقال سوخت و آبخوان شهر تهران انجام شده‌است. در گام نخست پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزه‌ای خط لوله مدفون شناسایی و استخراج و برای ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله مدلی جامع با بهره‌گیری از روش یادگیری ماشین ML توسعه داده شده‌است. در نهایت با بهره‌گیری از مدل ارائه شده و براساس سناریوهای لرزه‌ای مختلف میزان آسیب در خط لوله انتقال سوخت شهر تهران پیش‌بینی شده‌است. پس از بررسی عملکرد شبکه انتقال سوخت (آنالیز خطرپذیری، آنالیز آسیب‌پذیری، آنالیز ریسک)، با بهره‌گیری از مدل DRASTIC اثر نشت فراورده‌های سوختی بر آب‌های زیرزمینی ارزیابی و میزان آلودگی آبخوان شهر تهران تحت هر یک از سناریوهای لرزه‌ای ارزیابی شده‌است.

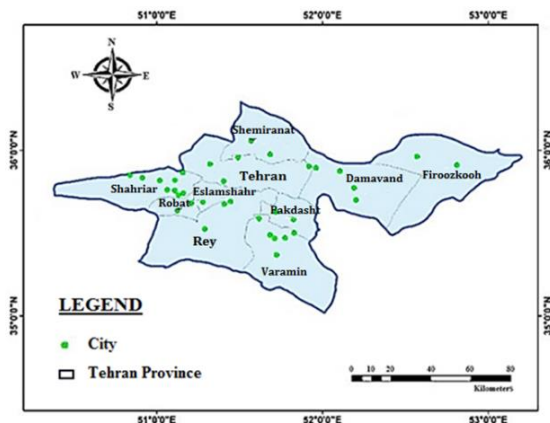
## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی

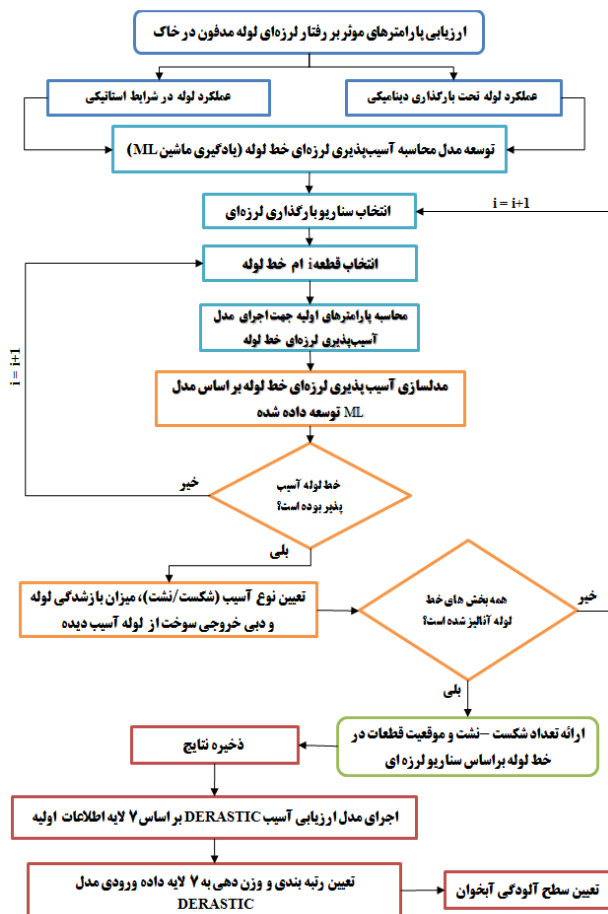
دشت تهران به دلیل دارا بودن پهنه‌هایی وسیع از زمین‌های مسکونی، کشاورزی و صنعتی از جنبه‌های مختلف به‌ویژه اقتصادی، سیاسی و اجتماعی جزو مهمترین دشت‌های ایران محسوب می‌شود. درصد بالایی از آب شرب شهر تهران از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. علاوه بر این از این آب برای مصارف کشاورزی دشت ورامین هم استفاده می‌شود که توسط ایستگاه‌های پمپاژ و کانال‌های آبرسانی به آنجا منتقل می‌شود. در صورت آلودگی آب‌های زیرزمینی آبخوان تهران، محصولات کشاورزی و سبزیجات دشت ورامین که توسط مردم تهران مصرف می‌شوند آلوده می‌گردند و سلامتی شهروندان به خطر می‌افتد.

۸۳ درصد در نوسان بود. قریشی و سید (۲۰۱۴) به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان شهر لاهور پاکستان به کمک مدل DRASTIC در محیط GIS پرداختند. آنها نقش فعالیت‌های انسانی و ظرفیت طبیعی آبخوان در میزان آسیب‌پذیری را برجسته دانستند. میزان آسیب‌پذیری برای هر پارامتر با آنالیز حساسیت و به کمک GIS انجام شد و نتایج در اختیار مدیران تصمیم گیرنده منابع آب قرار گرفت. جعفری و همکاران (۲۰۱۶) آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل آلودگی و ارزیابی ریسک به منظور حفاظت از آبخوان‌ها در برابر آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی را بررسی کردند. در این مطالعه یک روش جدید ارزیابی ریسک به منظور پیش‌بینی میزان آلودگی نواحی آسیب‌پذیر بکار برده شد. آنها با ترکیب روش DRASTIC و روش شبیه‌سازی مونت کارلو نشان دادند که نقشه‌های آسیب‌پذیری با نقشه‌های ریسک یکی نیستند و اینکه نقشه‌های ریسک به صورت بهتری شرایط واقعی را نشان می‌دهد. ژنگ و همکاران (۲۰۱۷) در زمینه مدیریت منابع آب و با استفاده از مدل DRASTIC به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان پرداختند. این تحقیق نشان داد که چگونه ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به کمک روش کالیبراسیون باینری ژنتیک الگوریتم (Bi-GA) با دقت بالا انجام می‌شود. میاو و همکاران (۲۰۱۹) آلودگی آب زیرزمینی یکی از معادن استان جیلین کشور چین را ارزیابی کردند. آلودگی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از آنالیز SPA3 انجام و عدم قطعیت ناشی از اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو در نظر گرفته شد. برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی، آنالیز حساسیت روی پارامترها و متغیرهای حساس با استفاده از روش کریجینگ<sup>۱</sup> انجام شد و در نهایت درصد آلودگی در ۷ حلقه چاه پایین دست مشخص گردید. باربولسکو (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای عملکرد مدل DRASTIC برای ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی بررسی کردند. در این پژوهش که به صورت مروری انجام شد، مزایا و معایب مدل DRASTIC و مهمترین تحقیقات صورت گرفته براساس این مدل ارزیابی شد. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول مدل DRASTIC در شبیه‌سازی آلودگی و ارزیابی پتانسیل آلودگی آبخوان بوده‌است. برا و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی با

روش‌شناسی انجام پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه جغرافیایی منطقه مطالعاتی پژوهش



شکل ۲- روش‌شناسی انجام پژوهش

### آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله مدفون

برای توسعه مدل پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای بر خط لوله مطالعات جامعی بر پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققین پیشین انجام شده است. ضعف اصلی مدل‌های ارائه شده تا به امروز در نظر گرفتن بخشی از پارامترهای

بر اساس اطلاعات موجود، آبخوان شهر تهران دارای تغییرات سازندگی است؛ به گونه‌ای که از سمت شوش تا بالای گسل ری، یک مخزن طبیعی ایجاد کرده است و در نتیجه عمده آلودگی در این نواحی به سمت این مخزن حرکت خواهد کرد. از دیگر موارد مهم این است که جهت شیب هیدرولیکی آبخوان تهران در بخش‌های شرقی، از شمال به جنوب و در بخش‌های غربی، از شمال غربی به جنوب شرقی است و این مطلب از دو نظر شرایط را بدتر کرده است: یکی اینکه دو خط لوله مدفون سوخت شهر تهران در همین جهت‌ها قرار دارند و مساله دیگر اینکه اکثر چاه‌های برداشت آب شرب شهر تهران در پایین دست آبخوان و قسمت‌های جنوبی شهر قرار دارند و اگر این چاه‌ها به آلاینده‌های نفتی آلوده شوند کل آب شرب تهران مورد تهدید جدی قرار می‌گیرد؛ چراکه حدود ۴۰٪ از مخازن آب شرب تهران از منابع آب زیرزمینی تغذیه می‌شود و در صورت آلوده شدن این چاه‌ها، ۶۰ درصد بقیه‌ی آب مخازن هم که از سدهای اطراف تغذیه می‌شوند، آلوده می‌شوند. بنابراین اهمیت آبخوان تهران به عنوان منبع مهم آب شرب شهر پرجمعیت تهران، شیب طبیعی آبخوان و قرارگیری خطوط انتقال در جهت شیب آبخوان و نیز قرار گرفتن اکثر چاه‌های آب شرب در قسمت‌های جنوبی در پایین دشت تهران از مهمترین موارد بالا بردن ریسک آلودگی و در نتیجه ضرورت تحقیق در جامعه است. در این پژوهش مطالعه روی شبکه انتقال سوخت شهر تهران و ارزیابی آلودگی آبخوان تهران انجام شده است. در شکل ۱ نقشه جغرافیایی و موقعیت مکانی شهر تهران ارائه شده است.

### روش تحقیق

در این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر شکست خط لوله انتقال سوخت شهر تهران در شرایط وقوع زمین‌لرزه، بر آلودگی منابع آب زیرزمینی، ابتدا با ارزیابی پارامترهای مؤثر بر رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در خاک مدلی با بهره‌گیری از روش یادگیری ماشین ML برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه انتقال سوخت توسعه داده شد. همچنین برای ارزیابی آلودگی آبخوان تحت تأثیر نشت مواد هیدروکربنی از خط لوله آسیب‌دیده با بهره‌گیری از روش DRASTIC سطح آلودگی آبخوان تحت سناریوهای مختلف زمین‌لرزه ارزیابی شد. در فلوچارت (شکل ۲)

می‌نماید. در مدل پژوهش برای ارزیابی رفتار استاتیکی و استخراج تنش نرمال وارد بر لوله ۶ پارامتر.

۱- عمق کارگذاری خط لوله، ۲- ضخامت لوله، ۳- قطر لوله، ۴- میزان بارش (در نظر گرفتن سطح آب در محیط خاک که به صورت مستقیم بر میزان تنش محوری بر لوله مؤثر بوده است)، ۵- مدول الاستیسیته لوله (در نظر گرفتن جنس متریال لوله)، ۶- وزن مخصوص خاک پیرامون لوله به عنوان اصلی‌ترین مؤلفه‌های مؤثر در نظر گرفته شده است. خروجی حاصل از این بخش ارائه دهنده میزان تنش وارد بر لوله تحت شرایط عدم بارگذاری لرزه‌ای بوده‌است. با بهره‌گیری از نتایج حاصل از بخش اول مدل، عملکرد لرزه‌ای لوله که بیانگر میزان آسیب لرزه‌ای بر خط لوله بوده، توسعه داده شده است. به طور کلی رفتار لرزه‌ای لوله و به تبع آن آسیب وارد بر خط لوله تحت تأثیر سه پارامتر اصلی: ۱- عمق کارگذاری لوله، ۲- میزان جابه‌جایی خاک پیرامون لوله تحت بارگذاری لرزه‌ای و ۳- اندرکنش خاک و لوله (نیروی اصطکاک بین خاک و لوله) بوده‌است. از بین سه پارامتر مذکور، عمق کارگذاری لوله بر اساس مشخصات خط لوله به مدل وارد می‌شود. پارامتر دوم که بیانگر میزان جابه‌جایی خاک پیرامون لوله بر اساس سناریو بارگذاری لرزه‌ای است، بر اساس روابط تقریبی ارائه شده محاسبه شده است؛ بر این اساس با توجه به بزرگای زمین‌لرزه میزان جابه‌جایی خاک از معادله (۱) تقریب زده می‌شود:

$$\log(MD) = -5.26 + 0.79M \quad (1)$$

در این معادله پارامتر  $M$  بیانگر بزرگای زمین‌لرزه با واحد ریشتر است، همچنین پارامتر  $MD$  میزان جابه‌جایی بیشینه خاک تحت بارگذاری لرزه‌ای با واحد اینچ بوده‌است. در بخش دوم مدل پژوهش برای محاسبه اندرکنش خاک-لوله میزان اصطکاک بین خاک و لوله با بهره‌گیری از تنش نرمال محاسبه شده در بخش اول مدل بر اساس معادله (۲) محاسبه شده است:

$$f_m = \sigma' \tan \phi_p \quad (2)$$

در اینجا پارامتر  $f_m$ : اصطکاک بین خاک-لوله در واحد طول لوله،  $\sigma'$ : تنش نرمال در عمق کارگذاری،  $\phi$ : زاویه اصطکاک بین خاک و لوله و  $\phi_p$ : قطر لوله بوده‌است. به‌طور کلی در الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیاز است تا ابتدا براساس مجموعه‌ای از داده‌های اولیه (ماتریس  $x$  و بردار پاسخ  $y$ ) مدل عددی آموزش دیده و ارتباطی منطقی

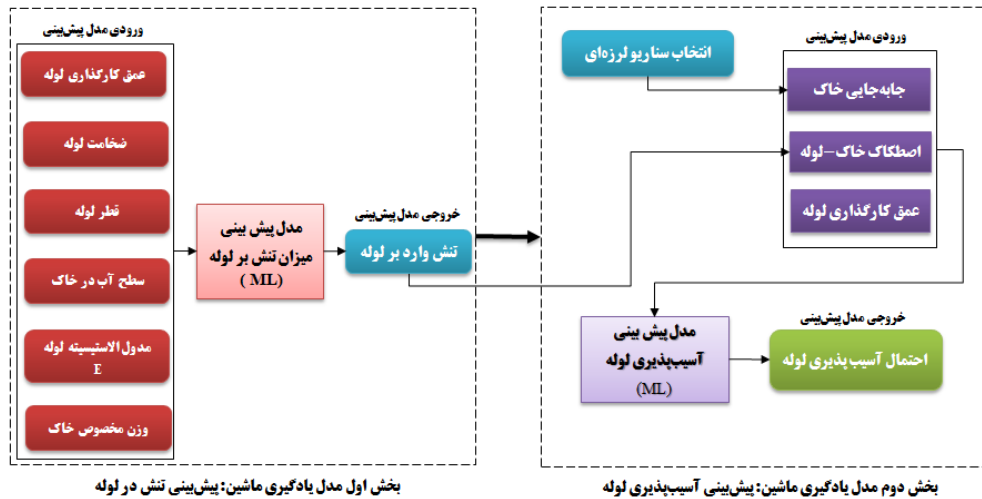
مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای لوله تحت شرایط بارگذاری دینامیکی زمین‌لرزه بوده که سبب گردیده مدل‌های ارائه شده دارای عملکرد محدودی باشد. به طور کلی برای بررسی رفتار لوله مدفون در زمین باید شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بر لوله تجزیه و تحلیل شود تا رفتار لرزه‌ای لوله به درستی مدلسازی شود. منظور از بارگذاری استاتیکی، عملکرد لوله در شرایط عدم وجود بارگذاری لرزه‌ای بوده است، در این شرایط لوله تحت تنش‌های اعمالی از محیط خاک بوده که بر اساس خصوصیات خاک، عمق کارگذاری و شرایط وجود آب در خاک (میزان بارش و نفوذ بر زمین-تراز آب در محیط خاک) بررسی شده است؛ بنابراین در شرایط استاتیکی میزان تنش نرمال وارد بر لوله از خاک پیرامون به عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی در ارزیابی آسیب لرزه‌ای خط لوله طبقه بندی می‌شود. علاوه بر این لوله در شرایط بارگذاری لرزه‌ای تحت تنش‌های برشی بر اساس جابه‌جایی توده خاک پیرامون قرار گرفته که منجر به رخداد آسیب (شکست یا نشت) در بدنه لوله می‌شود.

بنابراین برای آنالیز دقیق آسیب لرزه‌ای بر خط لوله علاوه بر در نظر گرفتن میزان تنش‌های نرمال تحت شرایط استاتیکی باید تنش‌های برشی حاصل از حرکت خاک پیرامون لوله بر اساس بارگذاری لرزه‌ای ارزیابی شود. با توجه به موارد مذکور در مدل ارزیابی آسیب لرزه‌ای توسعه داده شده در این پژوهش هر دو شرایط استاتیکی و دینامیکی حاکم بر خط لوله مدنظر قرار گرفته است براین اساس مدل توسعه داده شده به دو بخش اصلی شامل ۱- بخش اول: پیش‌بینی عملکرد لوله تحت شرایط استاتیک (تنش نرمال حاکم بر لوله) و ۲- بخش دوم: پیش‌بینی عملکرد لوله تحت شرایط بارگذاری دینامیکی تقسیم شده است. در (شکل ۳) فلوچارت الگوریتم عددی ارزیابی آسیب لرزه‌ای بر اساس روش یادگیری ماشین ارائه شده است.

مدل ارزیابی آسیب‌پذیری خط لوله توسعه داده شده در این پژوهش، در بخش اول بر اساس پارامترهای مؤثر در رفتار استاتیکی لوله میزان تنش نرمال وارد بر خط لوله را پیش‌بینی می‌کند و در بخش دوم بر اساس پارامترهای لرزه‌ای و بهره‌گیری از نتایج بخش اول (تنش نرمال استاتیکی) میزان آسیب وارد بر خط لوله را پیش‌بینی

شده است. همچنین در بخش دوم مدل پیش‌بینی از مجموعه داده با تعداد ۴۸۰ داده که بیانگر ارتباط بین ۳ متغیر (ماتریس  $X$ ) و بردار پاسخ (بردار  $Y$ ) بوده استفاده شده است. خصوصیات آماری مجموعه داده به‌کارگیری شده در الگوریتم‌های هوش مصنوعی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

بین ورودی (ماتریس متغیرها  $x$ ) و بردار پاسخ ( $y$ ) ایجاد شود. با توجه به توضیحات مذکور برای برپاسازی مدل‌های عددی، در بخش اول مدل (پیش‌بینی تنش بر لوله مدفون) براساس ارزیابی مطالعات پیشین از مجموعه‌ای از داده‌ها که دارای ۵۴۲ داده اولیه بر اساس تغییرات متغیرها (ماتریس  $x$ ) و بردار پاسخ (بردار  $y$ ) بوده، استفاده



شکل ۳- الگوریتم مدل عددی پژوهش (ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله)

جدول ۱- مشخصه‌های آماری مجموعه داده‌های اولیه برای آموزش مدل‌های پیش‌بینی تنش در لوله مدفون

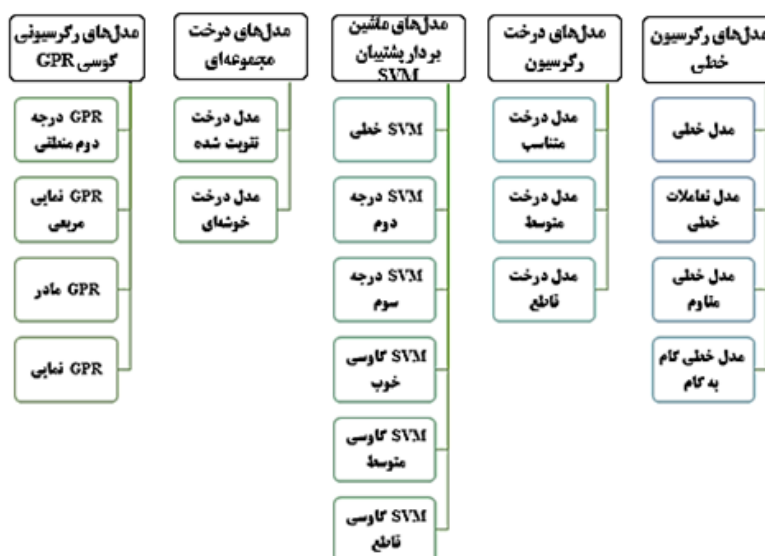
| متغیر/ پاسخ                     | ماکزیمم<br>Max | مینیمم<br>Min | میانگین<br>Mean | انحراف معیار<br>Std |
|---------------------------------|----------------|---------------|-----------------|---------------------|
| x1: عمق کارگذاری خط لوله [m]    | ۶              | ۱             | ۲/۷۲۷۳          | ۱/۲۴۹۸              |
| x2: ضخامت لوله [m]              | ۰/۰۴           | ۰/۰۱          | ۰/۰۲۰۵          | ۰/۰۰۴۷              |
| x3: قطر لوله [m]                | ۰/۸            | ۰/۲           | ۰/۶۰۹۱          | ۰/۲۶۴۴              |
| x4: سطح آب در محیط خاک [m]      | ۲/۴            | ۰             | ۰/۹۴۵۵          | ۰/۹۰۱۹              |
| x5: مدول الاستیسیته لوله [Mpa]  | ۳/۸۶           | ۳/۵۶          | ۳/۵۷۳۶          | ۰/۰۶۲۵              |
| x6: وزن مخصوص خاک [Kg/m3]       | ۲۶۰۰           | ۱۷۵۰          | ۱۷۸۸/۶۳         | ۱۷۷/۰۵              |
| y: تنش وارد بر لوله مدفون [Mpa] | ۵۴/۲۱۲         | ۶/۶۴۱         | ۱۸/۱۰           | ۱۱/۹۲۵              |
| تعداد کل داده‌ها                | ۵۴۲            |               |                 |                     |
| Dataset No.                     |                |               |                 |                     |

جدول ۲- مشخصه‌های آماری مجموعه داده‌های اولیه برای آموزش مدل‌های پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری لوله مدفون

| متغیر/پاسخ                        | ماکزیمم<br>Max | مینیمم<br>Min | میانگین<br>Mean | انحراف معیار<br>Std |
|-----------------------------------|----------------|---------------|-----------------|---------------------|
| X1: عمق کارگذاری خط لوله [m]      | ۰/۹۳           | ۰/۱۸          | ۰/۴۹۷۱          | ۰/۲۰۳۲              |
| X2: میزان جابه جایی خاک [m]       | ۱              | ۰             | ۰/۴۱۸۴          | ۰/۲۶۴۶              |
| X3: اندرکنش خاک و لوله (اصطکاک)   | ۰/۹۵           | ۰/۸۱          | ۰/۸۹۰۹          | ۰/۰۲۶۳              |
| Y: احتمال آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله | ۰/۹۲           | ۰             | ۰/۴۲۳۴          | ۰/۱۸۵۱              |
| تعداد کل داده‌ها                  | ۴۸۰            |               |                 |                     |
| Dataset No.                       |                |               |                 |                     |

ماتریس متغیرها  $X$  و بردار نتایج  $Y$  را پیاده‌سازی می‌نماید. در این پژوهش از ۵ الگوریتم اصلی یادگیری ماشین که هرکدام دارای شاخه‌های محاسباتی مختلفی است به شرح ذیل استفاده شده است. در ادامه الگوریتم‌های یادگیری ماشین که در مدل‌های محاسباتی برای پیش‌بینی تنش بر لوله مدفون و احتمال آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله به‌کارگیری شده ارائه شده است (فلوچارت شکل (۴)).

مدل‌های عددی توسعه داده شده در این پژوهش شامل دو بخش اصلی: ۱- پیش‌بینی تنش وارد بر لوله مدفون و ۲- پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری خط لوله بوده است. با توجه به مجموعه داده‌های اولیه ارائه شده (جدول ۱ و ۲)، مدل‌های پیش‌بینی براساس الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسعه داده شده است. روش یادگیری ماشین همچون روش مبتنی بر داده بر اساس مجموعه داده‌های اولیه فرایند استخراج ویژگی‌ها و برقراری ارتباط منطقی بین



شکل ۴- الگوریتم‌های یادگیری ماشین به کارگیری شده در مدل عددی پژوهش

شناسی و هیدرولوژیکی که می‌تواند به طور بالقوه بر آلودگی آبخوان تأثیر بگذارد تعریف می‌شود. DRASTIC یک نقشه شاخص عددی از آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ارائه می‌دهد که از رتبه‌بندی و وزن اختصاص داده شده به هفت پارامتر اصلی مذکور، حاصل می‌شود. رویه پیاده‌سازی مدل در معادله (۳) فرمول‌بندی شده است. هرچه نمره شاخص DRASTIC بالاتر باشد، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی بیشتر است اگر دامنه وزن دهی به پارامترهای اصلی مدل بین ۱ تا ۵ باشد، کمترین شاخص DRASTIC مقدار ۲۳ و بزرگترین آن ۲۳۰ است. شاخص DI بیانگر پتانسیل آلودگی آبخوان بوده که براساس معادله (۳) محاسبه می‌شود.

$$DERASTIC\ Index = \sum_{i=1}^{n1} D_{wi} D_{ri} + \sum_{i=1}^{n2} R_{wi} R_{ri} + \sum_{i=1}^{n3} A_{wi} A_{ri} + \sum_{i=1}^{n4} S_{wi} S_{ri} + \sum_{i=1}^{n5} T_{wi} T_{ri} + \sum_{i=1}^{n6} I_{wi} I_{ri} + \sum_{i=1}^{n7} C_{wi} C_{ri} \quad (3)$$

## مدل DRASTIC

در این پژوهش در راستای بررسی تأثیر آثار زیست محیطی و آلودگی آبخوان سفره زیرزمینی استان تهران براساس نشت فرآورده‌های نفتی حاصل از آسیب لرزه‌ای خط لوله سوخت تحت وقوع زمین‌لرزه، از مدل DRASTIC استفاده شده است. مدل DRASTIC براساس ارزیابی ۷ پارامتر میزان آلودگی منتقل شده به آبخوان را مدلسازی نموده و پهنه‌بندی آلودگی آب زیرزمینی را ارائه می‌نماید. هفت پارامتر اصلی برای اجرای مدل DRASTIC عبارتند از: ۱- D: عمق تا سفره آب زیرزمینی، ۲- R: نرخ جریان ورودی به سمت آبخوان، ۳- A: خصوصیات محیط آبخوان، ۴- S: خصوصیات محیط خاک، ۵- T: توپوگرافی، ۶- I: تأثیر محیط ناحیه غیر اشباع بالای آبخوان، ۷- C: هدایت هیدرولیکی. DRASTIC یک مدل مفهومی است که به عنوان توصیف ترکیبی از مهمترین عوامل زمین

و هرچه مقادیر این ضریب به یک نزدیکتر باشد بیانگر عملکرد مدل دقیق‌تر است. براساس مطالعات مختلف مقادیر بالاتر از ۰/۵ برای ضریب نش نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل است.

جدول ۴- دامنه تغییرات و امتیازبندی پارامترهای مدل DRASTIC در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان

| وزن | دامنه تغییرات پارامتر | پارامتر                      |
|-----|-----------------------|------------------------------|
| ۷   | ۱۵-۱۰                 | عمق سطح ایستابی<br>پارامتر D |
| ۵   | ۲۰-۱۵                 |                              |
| ۳   | ۲۵-۲۰                 |                              |
| ۲   | ۳۰-۲۵                 |                              |
| ۱   | ۵-۲                   | تغذیه خالص<br>پارامتر R      |
| ۳   | ۷-۵                   |                              |
| ۵   | ۹-۷                   |                              |
| ۷   | ۱۱-۹                  |                              |
| ۹   | ۱۳-۱۱                 | محیط آبخوان<br>پارامتر A     |
| ۳   | ماسه و سنگ متناوب     |                              |
| ۷   | رس                    |                              |
| ۹   | شن و ماسه             |                              |
| ۱۰  | سنگ و صخره            | محیط خاک<br>پارامتر S        |
| ۹   | شن                    |                              |
| ۸   | شنی لومی              |                              |
| ۷   | شنی رسی لومی          |                              |
| ۶   | رسی لومی              | شیب توپوگرافی<br>پارامتر T   |
| ۵   | سیلتی لوم             |                              |
| ۴   | لومی ماسه‌ای          |                              |
| ۳   | رسی                   |                              |
| ۲   | لومی                  | منطقه غیراشباع<br>پارامتر I  |
| ۱۰  | ۲-۰                   |                              |
| ۹   | ۶-۲                   |                              |
| ۵   | ۱۲-۶                  |                              |
| ۳   | ۱۸-۱۲                 | هدایت هیدرولیکی<br>پارامتر C |
| ۱   | >۱۸                   |                              |
| ۳   | سیلت و رس             |                              |
| ۵   | رس مخلوط              |                              |
| ۷   | ماسه و رس             | دولومیت و سنگ آهکی           |
| ۹   | دولومیت و سنگ آهکی    |                              |
| ۱   | ۴-۰/۴                 |                              |
| ۲   | ۱۲-۴                  |                              |
| ۴   | ۲۸-۱۲                 | هدایت هیدرولیکی<br>پارامتر C |
| ۶   | ۴۰-۲۸                 |                              |
| ۸   | ۸۰-۴۰                 |                              |

پارامترهای موجود در معادله (۳) نمایانگر ۷ پارامتر اصلی مدل DRASTIC بوده است، در ترم‌های موجود در رابطه زیروند  $\bar{I}$  معرف امتیازدهی به هر پارامتر و زیروند  $\bar{w}$  نمایانگر وزن اختصاص داده شده برای هریک از پارامترها بوده است. در جدول ۳ وزن‌های نسبت داده شده به پارامترهای هفت‌گانه و در جدول ۴ دامنه تغییرات هر پارامتر و امتیازدهی به آن ارائه شده است.

جدول ۳- وزن‌های نسبت داده شده به پارامترهای مدل DRASTIC

| پارامترهای مدل DRASTIC | وزن اصلی در مدل     |
|------------------------|---------------------|
| D                      | عمق آب زیرزمینی     |
| R                      | تغذیه خالص          |
| A                      | محیط آبخوان         |
| S                      | محیط خاک            |
| T                      | توپوگرافی           |
| I                      | اثر منطقه غیر اشباع |
| C                      | هدایت هیدرولیکی     |

## نتایج و بحث

### ارزیابی عملکرد مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله مدفون

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی و پیش‌بینی تنش وارد بر لوله مدفون با بهره‌گیری از روش ML و بر اساس الگوریتم‌های مختلف روش یادگیری ماشین ارائه شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل ML از سه نمونه‌های آماری میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب ضریب نش-سانکلیف (E<sub>SN</sub>) استفاده شده است. در جدول ۵ نمونه‌های آماری مذکور بر اساس مدل‌های توسعه یافته با بهره‌گیری از الگوریتم‌های مختلف ML ارائه شده است. ضریب نش شاخصی رایج برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر داده است. این ضریب بیانگر حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطا بوده که براساس نسبت واریانس مقادیر باقیمانده ارائه می‌شود:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{sim} - y_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{sim} - \bar{y}_{obs})^2} \quad (4)$$

در معادله (۴) پارامتر  $y_{sim}$  مقادیر محاسبه شده توسط مدل و  $y_{obs}$  مقادیر دقیق (داده مشاهداتی) بوده است. دامنه تغییرات ضریب نش بین منفی بینهایت تا یک بوده

۰/۰۰۳۲۹ و میزان همبستگی  $r$  معادل با ۰/۹۹۹ بوده است. همچنین مقادیر ضریب نش  $E_{NS}$  برای الگوریتم GPR نمایی معادل با ۰/۷۲۹۵ بوده که بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی تنش در لوله بوده است.

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، در این بخش نتایج حاصل از مدلسازی و پیش‌بینی احتمال آسیب لرزهای لوله با بهره‌گیری از روش ML و بر اساس الگوریتم‌های مختلف روش یادگیری ماشین ارائه شده است. در جدول ۶ آزمون‌های آماری  $MSE$ ,  $RMSE$ ,  $r$ ,  $E_{NS}$  بر اساس مدل‌های توسعه یافته با بهره‌گیری از الگوریتم‌های مختلف ML در راستای پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری لوله ارائه شده است.

نتایج حاصل از عملکرد مدل یادگیری ماشین براساس الگوریتم‌های مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج ارائه شده بیانگر میزان خطای پیش‌بینی تنش وارد بر لوله مدفون نسبت به مقادیر دقیق براساس مجموعه داده اولیه بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که مدل‌های GPR (Gaussian Process Regression Models) دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر محاسباتی یادگیری ماشین بوده‌اند. براساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که از بین الگوریتم‌های روش GPR الگوریتم Exponential GPR دارای میزان خطای کمینه بوده؛ به گونه‌ای که مدل یادگیری ماشین توسعه داده شده براساس این الگوریتم دارای خطای  $MSE$  معادل با

جدول ۵- نتایج حاصل از ارزیابی مدل ML پیش‌بینی تنش در لوله بر اساس الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین

| $E_{NS}$ | MSE      | $r$   | RMSE    | الگوریتم‌های یادگیری ماشین |
|----------|----------|-------|---------|----------------------------|
| ۰/۳۴۷۴   | ۳۹/۰۲۱   | ۰/۷۳  | ۰/۲۴۶۷  | مدل خطی                    |
| ۰/۳۳۵۲   | ۴۱/۵۵۹۹  | ۰/۷۱  | ۰/۴۴۶۷  | مدل تعاملات خطی            |
| ۰/۱۳۱۹   | ۹۵/۴     | ۰/۳۳  | ۹/۷۶۷۳  | مدل خطی مقاوم              |
| ۰/۳۴۳۲   | ۳۹/۸۸۵   | ۰/۷۲  | ۶/۳۱۵۵  | مدل خطی گام به گام         |
| ۰/۲۳۹۱   | ۶۴/۲۵۲   | ۰/۵۵  | ۸/۰۱۵۸  | مدل درخت متناسب            |
| ۰/۰۰۰۲   | ۱۴۲/۲۱   | ۰/۲۸  | ۱۱/۹۲   | مدل درخت متوسط             |
| ۰/۰۰۰۲   | ۱۴۲/۲۱   | ۰/۲۸  | ۱۱/۹۲   | مدل درخت قاطع              |
| ۰/۳۰۴۲   | ۴۸/۳۳۹   | ۰/۶۶  | ۶/۹۵۲۶  | SVM خطی                    |
| ۰/۶۲۲۲   | ۳/۰۸۵۹   | ۰/۹۸  | ۱/۷۵۶۷  | SVM درجه دوم               |
| ۰/۶۶۹۶   | ۰/۹۶۳۰۲  | ۰/۹۸  | ۰/۹۸۱۳۴ | SVM درجه سوم               |
| ۰/۱۹۹۸   | ۷۴/۹۶۶   | ۰/۴۷  | ۸/۶۵۸۳  | SVM گاوسی خوب              |
| ۰/۲۳۸۵   | ۶۴/۴۱۸   | ۰/۵۵  | ۸/۰۲۶۱  | SVM گاوسی متوسط            |
| ۰/۰۲۹۷   | ۱۳۰/۸۳   | ۰/۳۹  | ۱۱/۴۳۸  | SVM گاوسی قاطع             |
| ۰/۱۸۳۵   | ۷۹/۶۶    | ۰/۴۴  | ۸/۹۲۵۶  | درخت تقویت شده             |
| ۰/۱۰۸۳   | ۱۰۳/۱    | ۰/۲۸  | ۱۰/۱۵۴  | درخت خوشه‌ای               |
| ۰/۶۸۴۲   | ۰/۵۵۳۵   | ۰/۹۹  | ۰/۷۴۴۱  | GPR درجه دوم منطقی         |
| ۰/۶۷۰۷   | ۰/۹۲۸۲   | ۰/۹۹  | ۰/۹۶۳۵۴ | GPR نمایی مربعی            |
| ۰/۶۷۹۰   | ۰/۶۸۶۹۱  | ۰/۹۹  | ۰/۸۲۸۸  | GPR مادر                   |
| ۰/۷۲۹۵   | ۰/۰۰۰۱۰۸ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۳۲۹ | GPR نمایی                  |

براساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که مدل‌های GPR<sup>۱</sup> دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر محاسباتی یادگیری ماشین بوده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که از بین الگوریتم‌های روش GPR الگوریتم Rational Quadratic GPR

نتایج حاصل از عملکرد مدل یادگیری ماشین پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزهای براساس الگوریتم‌های مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج ارائه شده بیانگر میزان خطای پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری لرزهای لوله نسبت به مقادیر دقیق براساس مجموعه داده اولیه بوده است.

GPR درجه دوم منطقی معادل با ۰/۷۸۴۲ بوده که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله بوده است.

بوده؛ به گونه‌ای که مدل یادگیری ماشین توسعه داده شده براساس این الگوریتم دارای خطای MSE معادل با ۰/۰۰۳۲۹ و میزان همبستگی  $r$  معادل با ۰/۹۹۹ بوده است. همچنین مقادیر ضریب نش  $E_{NS}$  برای الگوریتم

جدول ۶- نتایج حاصل از ارزیابی مدل ML پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای در لوله بر اساس الگوریتم‌های یادگیری ماشین

| الگوریتم‌های یادگیری ماشین      | RMSE     | r     | MSE        | $E_{NS}$ |
|---------------------------------|----------|-------|------------|----------|
| مدل خطی                         | ۰/۱۰۲۳۹  | ۰/۶۲  | ۰/۰۱۰۴۸    | ۰/۳۰۹۹   |
| مدل‌های رگرسیون خطی             | ۰/۰۸۹۶۲  | ۰/۷۱  | ۰/۰۰۸۰۳    | ۰/۳۷۰۴   |
|                                 | ۰/۱۳۷۴۶  | ۰/۳۱  | ۰/۰۱۸۸۹    | ۰/۱۴۳۸   |
|                                 | ۰/۰۸۹۸۷  | ۰/۷۱  | ۰/۰۰۸۰۷۷   | ۰/۳۶۹۲   |
| مدل‌های درخت رگرسیون            | ۰/۰۴۹۷   | ۰/۹۱  | ۰/۰۰۲۴۷    | ۰/۵۵۹۴   |
|                                 | ۰/۰۸۴۵   | ۰/۷۳  | ۰/۰۰۷۲۹    | ۰/۳۹۴۶   |
|                                 | ۰/۱۶۵۶   | ۰/۷۵  | ۰/۰۲۷۴۳    | ۰/۰۱۰۶   |
| مدل‌های ماشین بردار پشتیبان SVM | ۰/۱۲۶۴   | ۰/۴۲  | ۰/۰۱۵۹۸    | ۰/۱۹۶۲   |
|                                 | ۰/۰۶۳۹   | ۰/۸۵  | ۰/۰۰۴۰۸    | ۰/۴۹۲۲   |
|                                 | ۰/۰۶۲۸   | ۰/۸۶  | ۰/۰۰۳۹۵    | ۰/۴۹۷۴   |
|                                 | ۰/۰۵۲۹   | ۰/۹   | ۰/۰۰۲۸۰۵   | ۰/۵۴۴۳   |
|                                 | ۰/۰۶۳۳۱۱ | ۰/۸۵  | ۰/۰۰۴۰۰۸   | ۰/۴۹۵۰   |
|                                 | ۰/۱۲۳۹   | ۰/۴۴  | ۰/۰۱۵۳۶    | ۰/۲۰۸۰   |
| مدل‌های درخت مجموعه‌ای          | ۰/۰۵۷۰۹۱ | ۰/۸۸  | ۰/۰۰۳۲۵۹   | ۰/۵۲۴۴   |
|                                 | ۰/۰۹۳۱۱۸ | ۰/۶۸  | ۰/۰۰۸۶۷۱   | ۰/۳۵۳۸   |
| مدل‌های رگرسیون گوسی GPR        | ۰/۰۰۲۲۳  | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۰۰۰۴۹  | ۰/۷۸۴۲   |
|                                 | ۰/۰۵۹۸   | ۰/۸۷  | ۰/۰۰۳۵۷۹   | ۰/۵۱۱۶   |
|                                 | ۰/۰۰۵۲۴  | ۰/۹۸  | ۰/۰۰۲۰۷    | ۰/۷۶۹۹   |
|                                 | ۰/۰۰۴۳   | ۰/۹۹  | ۰/۰۰۰۰۰۱۸۵ | ۰/۷۷۴۴   |

### نتایج حاصل از مدل‌های آسیب لرزه‌ای خط لوله

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل مشخص گردید که مدل ارزیابی احتمال آسیب‌پذیری لرزه‌ای براساس روش یادگیری ماشین فرایند پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای در خط لوله مدفون را پیاده‌سازی می‌کند. در مدل‌های توسعه داده شده در این پژوهش سه سناریو لرزه‌ای شامل سناریو ۱: زمین‌لرزه با بزرگای ۵ ریشتر ( $M_w = 5$ )، سناریو ۲: زمین‌لرزه با بزرگای ۶ ریشتر ( $M_w = 6$ ) و سناریو ۳: زمین‌لرزه با بزرگای ۷ ریشتر ( $M_w = 7$ ) مطالعه شده است.

در گام اول اجرای مدل، سناریوی لرزه‌ای انتخاب می‌شود. پس از انتخاب سناریو، تعداد تکرار شبیه‌سازی مونت کارلو برای پارامترهای غیرقطعی (متغیرهای تصادفی (۱- عمق کارگذاری، ۲- مدول الاستیسیته، ۳- چگالی خاک، ۴-

بزرگای زمین‌لرزه)) تعیین می‌شود. هر بخش از خط لوله براساس مشخصات اصلی قطعه مورد نظر ارزیابی گردیده و احتمال آسیب‌پذیری قطعات مختلف خط لوله محاسبه می‌شود، این روند تا آخرین قطعه از خط لوله طی شده و نتایج حاصل از پیش‌بینی احتمال آسیب‌پذیری خط لوله استخراج شده است. در نهایت مقادیر بحرانی به‌دست آمده برای احتمال آسیب ارزیابی گردیده و براساس نتایج حاصله تعداد شکست و نشت در لوله (شکست: احتمال آسیب‌پذیری  $< 0/8$ ، نشت:  $< 0/8$  احتمال آسیب‌پذیری  $< 0/6$ ) محاسبه و استخراج شده است.

قطعاتی از خط لوله که دارای احتمال آسیب‌پذیری بیش از ۸۰ درصد بوده به عنوان شکست و قطعاتی که دارای احتمال آسیب‌پذیری بین ۶۰ تا ۸۰ درصد بوده به عنوان نشت در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل

DRASTIC است، بر اساس وزن‌های ارائه شده برای پارامترها (جدول ۳) و همچنین دامنه تغییرات و امتیازبندی مقادیر هریک از هفت پارامتر (جدول ۴) استفاده شده است. در این مرحله براساس داده‌های اخذ شده از استان تهران براساس دامنه تغییرات هفت پارامتر مدل و امتیازبندی آنها لایه‌های اطلاعاتی برای هر پارامتر ایجاد شده است. در شکل ۵، هفت لایه اطلاعات پارامترهای اولیه مدل DRASTIC و نقشه پتانسیل آلودگی آبخوان (شاخص DRASTIC) برای منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است. در شکل ۵ نقشه پتانسیل آلودگی آبخوان در استان تهران برای ۵ سطح: ۱- آلودگی ناچیز ( $DI < 79$ )، ۲- آلودگی کم ( $80 < DI < 99$ )، ۳- آلودگی متوسط ( $100 < DI < 119$ )، ۴- آلودگی زیاد ( $120 < DI < 139$ )، ۵- آلودگی خیلی زیاد ( $DI > 140$ ) براساس رنج تغییرات DI (شاخص DRASTIC) ارائه شده است. در جدول ۸ پتانسیل آلودگی آبخوان براساس درصد مساحت برای ۵ سطح آلودگی تعریف شده، نمایش داده شده است.

جدول ۸- درصد تغییرات پتانسیل آلودگی آبخوان استان تهران براساس سطح آسیب‌پذیری

| سطح<br>آسیب‌پذیری | مساحت اشغال<br>(Km <sup>2</sup> ) | درصد مساحت نسبت<br>به کل منطقه |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| ناچیز             | ۸۳۵                               | ۶ %                            |
| کم                | ۳۶۴۰                              | ۲۷ %                           |
| متوسط             | ۳۰۴۰                              | ۲۲ %                           |
| زیاد              | ۳۰۸۲                              | ۲۳ %                           |
| خیلی زیاد         | ۲۹۸۰                              | ۲۲ %                           |

در جدول ۸ میزان تغییرات پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی در استان تهران براساس ۵ سطح آسیب‌پذیری مدل DRASTIC ارائه شده است. براساس نتایج مشخص می‌شود که ۲۲٪ آبخوان استان تهران دارای پتانسیل آلودگی خیلی زیاد و ۲۳٪ دارای پتانسیل آلودگی زیاد بوده‌است. به بیان دیگر ۵۵٪ از منابع آب زیرزمینی در استان تهران دارای سطح ریسک آلودگی زیاد بوده‌است. نتایج حاصل بیانگر نقشه پهنه‌بندی آلودگی آبخوان در استان تهران براساس مدل DRASTIC بوده‌است. برای ارزیابی تأثیر نشت حاصل از آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت، آبخوان شهر تهران بررسی شده است. با

بیانگر تعداد قطعات شکست، تعداد نشت و موقعیت قطعات آسیب دیده (شکست، نشت) از خط لوله براساس سناریوی لرزه‌ای انتخاب شده، بوده‌است. براساس مدل ارائه شده آنالیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر خط لوله انتقال سوخت شهر تهران انجام شده است. براساس داده‌های اولیه از مشخصات و خصوصیات خط لوله سوخت شهر تهران کل شبکه انتقال به ۸۳۴ قطعه با داده‌های اولیه مشخص تقسیم بندی شده که براساس الگوریتم ارائه شده هر قطعه ارزیابی شده و با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت (شبیه‌سازی مونت کارلو) احتمال آسیب‌پذیری هر قطعه پیش‌بینی شده است. در نهایت براساس میزان احتمال آسیب محاسبه شده نوع آسیب (شکست یا نشت) در قطعات آسیب دیده ارائه شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل برای سناریوهای لرزه‌ای مختلف و براساس مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از آنالیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت شهر تهران

| سناریو                | ML Model  |            |
|-----------------------|-----------|------------|
|                       | تعداد نشت | تعداد شکست |
| سناریو اول: $M_w = 5$ | ۱۵        | ۲          |
| سناریو دوم: $M_w = 6$ | ۲۴        | ۶          |
| سناریو سوم: $M_w = 7$ | ۲۷        | ۸          |

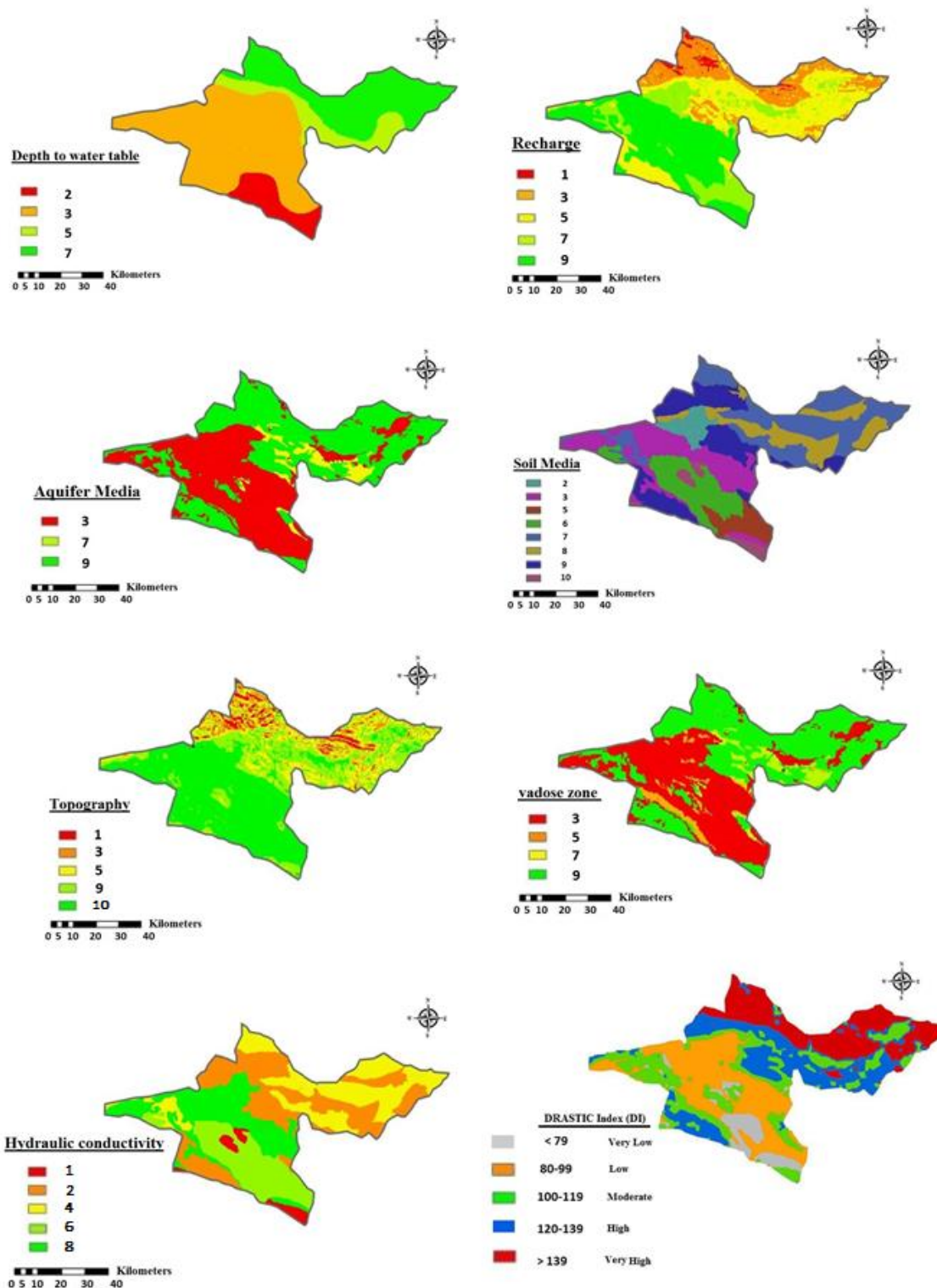
نتایج حاصل از اجرای مدل آنالیز آسیب‌پذیری خط لوله انتقال سوخت شهر تهران براساس سه سناریو لرزه‌ای و در قالب بهره‌گیری از مدل پیش‌بینی یادگیری ماشین ML ارائه شده است. با بررسی نتایج حاصل مشخص می‌گردد که تعداد شکست و نشت در خط لوله براساس افزایش شدت زمین‌لرزه افزایش یافته؛ به گونه‌ای که تعداد شکست بر اساس مدل ML در زمین‌لرزه با بزرگای ۵ ریشتر معادل با ۲ و در زمین‌لرزه ۷ ریشتری معادل با ۸ بوده‌است. همچنین تعداد نشت بر اساس سناریو اول معادل با ۱۵ بوده که با افزایش بزرگای زمین‌لرزه (سناریو سوم  $M_w = 7$ ) به ۲۷ افزایش یافته‌است.

### ارزیابی آلودگی آبخوان براساس مدل DRASTIC

برای اجرای مدل DRASTIC لایه‌های اطلاعاتی که حاوی نقشه‌های رقومی برای هریک از هفت پارامتر اصلی مدل

آبخوان در محدوده دشت تهران-کرج براساس شاخص دراستیک (DI) در شکل ۶ ارائه شده است.

توجه به نتایج حاصل از مدل DRASTIC میزان پتانسیل آلودگی در آبخوان شهر تهران استخراج و در جدول ۹ ارائه شده است. همچنین نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آلودگی



شکل ۵- لایه‌های اطلاعاتی مدل DRASTIC و نقشه پتانسیل آلودگی آبخوان (DI)

است. براساس نتایج حاصل مشخص می شود که دقت مدل DRASTIC اجرا شده در این پژوهش نسبت به مطالعه محمدی و همکاران (۲۰۰۹) دارای خطای ۴.۸٪ و نسبت به مطالعه نوری و همکاران (۲۰۱۹) دارای خطای ۶.۰۵٪ در تخمین پتانسیل آلودگی آبخوان شهر تهران بوده که بیانگر دقت قابل قبول مدل DRASTIC در ارزیابی آلودگی آبخوان شهر تهران است.

جدول ۱۰- ارزیابی عملکرد مدل DRASTIC

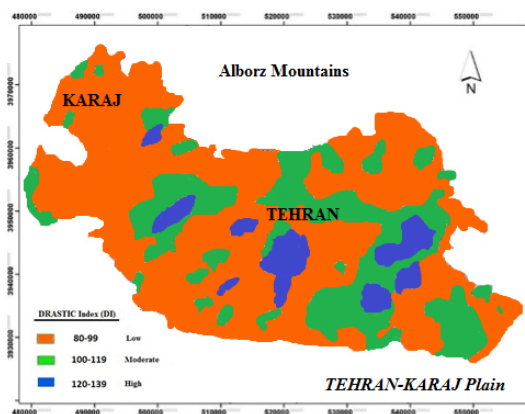
| سطح آسیب پذیری                  |                                  |            | عملکرد مدل<br>DRASTIC          |
|---------------------------------|----------------------------------|------------|--------------------------------|
| زیاد                            | متوسط                            | ناچیز و کم |                                |
| ۱۸/۰۰%                          | ۲۲%                              | ۵۹/۶۰%     | محمدی و همکاران<br>(۲۰۰۹)      |
| ۱۷%                             | ۱۸/۰۰%                           | ۶۵/۰۵%     | نوری و همکاران<br>(۲۰۱۹)       |
| ۱۸%                             | ۲۰%                              | ۶۳%        | نتایج حاصل از<br>پژوهش         |
| مطالعه نوری و<br>همکاران (۲۰۱۹) | مطالعه محمدی و همکاران<br>(۲۰۰۹) |            | میانگین درصد خطای<br>مدل پژوهش |
| ۶/۰۵%                           | ۴/۸%                             |            |                                |

در راستای ارزیابی تأثیر نشت فرآورده های سوختی براساس آسیب لرزه ای خط لوله انتقال سوخت شهر تهران، پس از اجرای مدل های پیش بینی آسیب پذیری لرزه ای و استخراج تعداد شکست و نشت در لوله و تعیین لوله های آسیب دیده، میزان تخلیه از لوله های آسیب دیده به عنوان یک لایه اطلاعاتی تغذیه مواد آلاینده به مدل DRASTIC وارد و میزان تغییرات پتانسیل آلودگی آبخوان شهر تهران براساس سطح آسیب پذیری استخراج شده است. براین اساس میزان نشت از لوله برای شرایط شکست کامل معادل با ۸۰٪ دبی جریان در لوله و برای شرایط نشت معادل با ۶۰٪ دبی جریان در لوله در نظر گرفته شده است در ادامه (جدول ۱۱ تا ۱۳) نتایج حاصل از تغییرات آلودگی آبخوان شهر تهران براساس سه سناریو لرزه ای ارائه شده است.

در جدول ۱۱ پهنه بندی آلودگی آبخوان شهر تهران بر اساس سناریو اول لرزه ای (رخداد زمین لرزه با بزرگای ۵ Mw =) و با استفاده از مدل پیش بینی آسیب پذیری لرزه ای یادگیری ماشین ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می شود که تحت رخداد زمین لرزه ای با بزرگای ۵ ریشتر پهنه بندی آلودگی آبخوان دستخوش تغییر شده است و مساحت محدوده با سطح آلودگی

جدول ۹- درصد تغییرات پتانسیل آلودگی آبخوان شهر تهران براساس سطح آسیب پذیری مدل DRASTIC

| سطح آسیب پذیری | مساحت اشغال (Km <sup>2</sup> ) | درصد مساحت نسبت به کل منطقه |
|----------------|--------------------------------|-----------------------------|
| ناچیز          | ۰                              | -                           |
| کم             | ۱۵۱۹                           | ۶۲ %                        |
| متوسط          | ۴۹۰                            | ۲۰ %                        |
| زیاد           | ۴۴۱                            | ۱۸ %                        |
| خیلی زیاد      | ۰                              | -                           |



شکل ۶- نقشه پتانسیل آلودگی آبخوان در محدوده شهر تهران (دشت تهران-کرج)

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۹ مشخص می شود که آبخوان در محدوده شهر تهران دارای پتانسیل آسیب پذیری در سه سطح کم (۶۲٪ محدوده)، متوسط (۲۰٪ محدوده) و زیاد (۱۸٪ محدوده) است و دارای سطح آسیب پذیری ناچیز و خیلی زیاد نیست.

روش DRASTIC با توجه به میزان وزن اختصاص داده شده به هریک از هفت لایه اطلاعاتی براساس معادله (۳) میزان شاخص آلودگی آبخوان را محاسبه می نماید. در روش DRASTIC فرایند کالیبراسیون و اختصاص وزن به لایه های اطلاعاتی در استخراج نتایج دقیق از پهنه بندی آلودگی آبخوان مؤثر بوده است. در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد مدل DRASTIC در استخراج پتانسیل آلودگی آبخوان شهر تهران، نتایج حاصل با نتایج پژوهش های محمدی و همکاران (۲۰۰۹) و نوری و همکاران (۲۰۱۹) که به ارزیابی میزان آلودگی آبخوان شهر تهران با بهره گیری از مدل DRASTIC پرداخته بودند، مقایسه و ارزیابی شد. در جدول ۱۰ پهنه بندی آلودگی آبخوان در محدوده شهر تهران براساس نتایج حاصل از این پژوهش و دو مطالعه ذکر شده ارائه شده

ارائه شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل ارزیابی آلودگی آبخوان شهر تهران تحت سناریو سوم لرزه‌ای در جدول ۱۳ براساس مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با رخداد زمین‌لرزه با بزرگای ۷ ریشتر منابع آب زیرزمینی شهر تهران دچار آلودگی وسیع در اثر نشت فرآورده‌های سوختی از خط لوله انتقال سوخت شده است؛ به گونه‌ای که براساس درصد مساحت، سطح آلودگی کم ۱۸٪، آلودگی متوسط ۴۵٪ و سطح آلودگی زیاد ۳۷٪ بوده است. براساس نتایج حاصل (جدول ۱۳) در صورت وقوع زمین‌لرزه با بزرگای ۷ ریشتر، میزان آلودگی آبخوان با سطح آلودگی متوسط، ۲۵٪ و با سطح آلودگی زیاد، ۱۹٪ بر اساس مدل پیش‌بینی یافته‌است.

**جدول ۱۲- پهنه‌بندی آلودگی آبخوان شهر تهران براساس آسیب لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت تحت سناریو دوم**

| Scenario 2: Mw = 6 |            |                             |
|--------------------|------------|-----------------------------|
| سطح آسیب‌پذیری     | درصد مساحت | درصد تغییرات به شرایط نرمال |
| کم                 | ۲۲٪        | ۴۰٪-                        |
| متوسط              | ۵۵٪        | ۳۵٪                         |
| زیاد               | ۲۳٪        | ۵٪                          |
| خیلی زیاد          | -          | -                           |

**جدول ۱۳- پهنه‌بندی آلودگی آبخوان شهر تهران براساس آسیب لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت تحت سناریو سوم**

| Scenario 3: Mw = 7 |              |                                          |
|--------------------|--------------|------------------------------------------|
| سطح آسیب‌پذیری     | مساحت (درصد) | میزان تغییرات نسبت به شرایط نرمال (درصد) |
| کم                 | ۱۸           | ۴۴-                                      |
| متوسط              | ۴۵           | ۲۵                                       |
| زیاد               | ۳۷           | ۱۹                                       |
| خیلی زیاد          | -            | -                                        |

برای ارزیابی تغییرات آلودگی آبخوان در محدوده شهر تهران براساس نشت مواد هیدروکربنی از شبکه انتقال سوخت تحت سناریوهای مختلف لرزه‌ای، در شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی آلودگی آبخوان براساس نشت از شبکه انتقال سوخت تحت ۳ سناریو زمین‌لرزه ارائه شده است.

متوسط حدوداً ۹٪ افزایش یافته‌است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی که بیانگر تعداد شکست ۲ و تعداد نشت ۱۵ تحت سناریو اول لرزه‌ای در خط لوله بوده، میزان تغییرات ۱۰٪ در سطح آسیب‌پذیری متوسط قابل بررسی بوده‌است. اصلی‌ترین نتیجه حاصل از ارزیابی میزان آلودگی آبخوان شهر تهران براساس سناریو اول، آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت و به طبع آن آلودگی منابع آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی بوده است که لزوم ارائه استرژژی‌های مدیریتی برای مقابله و کاهش آثار مخرب وقوع زمین‌لرزه را (حتی با بزرگای ۵ ریشتر که در دسته‌بندی زمین‌لرزه‌های بزرگ طبقه‌بندی نمی‌شود) بر منابع آب زیرزمینی شهر تهران بیش از پیش روشن می‌سازد. در جدول ۱۲ نتایج حاصل از اجرای مدل پژوهش براساس سناریو دوم لرزه‌ای (رخداد زمین‌لرزه با بزرگای  $M_w = 6$ ) ارائه شده است. نتایج ارائه شده بیانگر پهنه‌بندی آلودگی آبخوان شهر تهران براساس رخداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶ ریشتر و برپایه مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری خط لوله سوخت بوده‌است.

**جدول ۱۱- پهنه‌بندی آلودگی آبخوان شهر تهران براساس آسیب لرزه‌ای خط لوله انتقال سوخت تحت سناریو اول**

| Scenario 1: Mw = 5 |            |                             |
|--------------------|------------|-----------------------------|
| سطح آسیب‌پذیری     | درصد مساحت | درصد تغییرات به شرایط نرمال |
| کم                 | ۵۳٪        | ۹٪-                         |
| متوسط              | ۲۹٪        | ۹٪                          |
| زیاد               | ۱۸٪        | -                           |
| خیلی زیاد          | -          | -                           |

براساس نتایج حاصل از اجرای سناریو دوم لرزه‌ای (زمین‌لرزه با بزرگای ۶ ریشتر) (جدول ۱۲) و براساس مدل پیش‌بینی آسیب لرزه‌ای ML مساحت محدوده با سطح آلودگی متوسط ۳۵٪ و سطح آلودگی زیاد ۵٪ افزایش یافته‌است. نتایج حاصل از ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی شهر تهران براساس وقوع زمین‌لرزه با بزرگای ۶ ریشتر (سناریو دوم لرزه‌ای) نشان‌دهنده افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان براساس آسیب در خط لوله سوخت بوده‌است. در جدول ۱۳ نتایج حاصل از اجرای مدل پژوهش برای ارزیابی آلودگی آبخوان شهر تهران در سناریو لرزه‌ای سوم (رخداد زمین‌لرزه با بزرگای ۷ ریشتر)

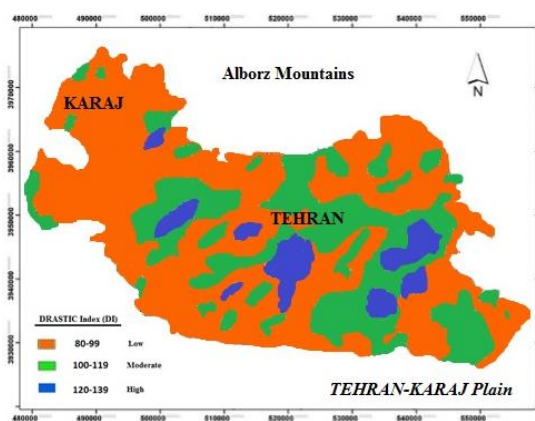
آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله مدفون با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و با بهره‌گیری از روش یادگیری ماشین توسعه داده شده است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌های عددی توسعه داده شده بیانگر عملکرد قابل قبول و دقت بالای پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای لوله بوده‌است؛ همچنین ارزیابی آلودگی آبخوان با بهره‌گیری از مدل DRASTIC پیاده‌سازی شده است.

در این پژوهش برای توسعه مدل پیش‌بینی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خط لوله مدفون از ۵ الگوریتم اصلی یادگیری ماشین که هرکدام دارای شاخه‌های محاسباتی مختلفی است، استفاده شده است.

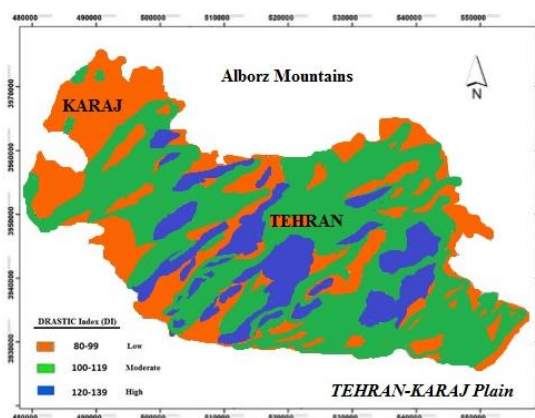
نتایج حاصل از عملکرد مدل یادگیری ماشین براساس الگوریتم‌های مختلف بیانگر میزان خطای پیش‌بینی تنش وارد بر لوله مدفون نسبت به مقادیر دقیق براساس مجموعه داده اولیه بوده‌است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌شود که مدل‌های GPR (Gaussian Process Regression Models) دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر محاسباتی یادگیری ماشین بوده‌اند. براساس نتایج حاصل مشخص شد که از بین الگوریتم‌های روش GPR الگوریتم Exponential GPR دارای میزان خطای کمینه بوده؛ به گونه‌ای که مدل یادگیری ماشین توسعه داده شده براساس این الگوریتم دارای خطای MSE معادل با ۰/۰۳۲۹ و میزان همبستگی  $r$  معادل با ۰/۹۹۹ بوده‌است.

در این پژوهش برای در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت در داده‌های ورودی مدل‌های پیش‌بینی تنش و احتمال آسیب لرزه‌ای که به صورت مستقیم بر نتایج حاصل مؤثر هستند، شرایط عدم قطعیت در داده‌های ورودی مدل در نظر گرفته شده است. با توجه به هدف اصلی که ارزیابی احتمال آسیب‌پذیری لرزه‌ای در خط لوله مدفون تحت سناریوهای مختلف زمین‌لرزه بوده، با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت در مقادیر داده‌های ورودی مدل، بحرانی‌ترین شرایط برای احتمال آسیب‌پذیری لوله استخراج شد. بر این اساس ۴ پارامتر اصلی عمق کارگذاری، مدول الاستیسیته، چگالی خاک و بزرگای زمین‌لرزه در مدل‌های عددی براساس شرایط عدم قطعیت در مقادیر اولیه ورودی و با بهره‌گیری از تابع توزیع احتمال و ضریب تغییرات به تعداد تکرار روش مونت‌کارلو در مدل وارد و بحرانی‌ترین نتایج (بالاترین احتمال شکست لرزه‌ای لوله) استخراج

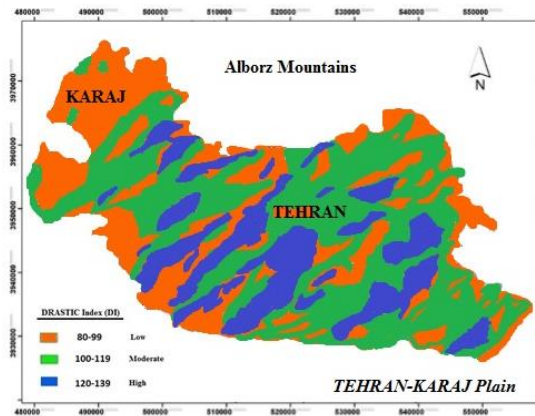
الف



ب



ج



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی آلودگی آبخوان براساس نشت از شبکه انتقال سوخت در سناریوهای مختلف بارگذاری لرزه‌ای (الف) سناریو اول بارگذاری لرزه‌ای (زمین‌لرزه با بزرگای ۵ ریشتر)، (ب) سناریو دوم بارگذاری لرزه‌ای (زمین‌لرزه با بزرگای ۶ ریشتر)، (ج) سناریو سوم بارگذاری لرزه‌ای (زمین‌لرزه با بزرگای ۷ ریشتر)

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلی جامع برای ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی براساس آسیب‌پذیری خط لوله انتقال سوخت در شرایط وقوع زمین‌لرزه ارائه شده است. در مدل پژوهش

4. Cekirge H.M. 2015. Quantitative risk assessment for crude oil pipelines. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*. 3(3): 147-153.
5. Claesson L. Skelton A. Graham C. Dietl C. Mörtz M. Torssander P. and Kockum I. 2004. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake. *Geology*. 32(8): 641-644.
6. Datta T. K. 1999. Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review. *Nuclear engineering and design*. 192(2-3): 271-284.
7. Esposito S. Iervolino I. Silvestri F. d'Onofrio A. Santo A. Cavalieri F. and Franchin P. 2012. Seismic Risk Analysis of Lifelines: Preliminary Results for the Case-Study of L'Aquila ENEL Rete Gas. In 15th world conference of earthquake engineering, Lisbon (Portugal): 2998-1.
8. Germoso C. Gonzalez O. and Chinesta F. 2021. Seismic vulnerability assessment of buried pipelines: A 3D parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 143: 106627.
9. Golbarg F. Nabi Bidhendi G. and Hoveidi H. 2018. Environmental management of oil pipelines risks in the wetland areas by Delphi and MCDM techniques: case of Shadegan international wetland, Iran. *Pollution*. 4(2): 195-210.
10. Huyck C. K. Eguchi R. T. Watkins R. M. Seligson H. A. Bucknam S. and Bortugno E. 2003. URAMP (Utilities Regional Assessment of Mitigation Priorities)—A Benefit-Cost Analysis Tool for Water, Wastewater and Drainage Utilities: Software Development. In *Advancing Mitigation Technologies and Disaster Response for Lifeline Systems*. 484-493.
11. Ito A. Okutsu M. Furukawa A. Shoji G. and Suzuki T. 2022. Earthquake Damage Prediction of Underground Steel Pipe with Screw Joint Using Machine Learning. In *Lifelines*. 2022: 613-620.
12. Jafari F. Javadi S. Golmohammadi G. Mohammadi K. Khodadadi A. and Mohammadzadeh M. 2016. Groundwater risk mapping prediction using mathematical modeling and the Monte Carlo technique. *Environmental Earth Sciences*. 75: 1-11.
13. Jang W. S. Engel B. Harbor J. and Theller L. 2017. Aquifer vulnerability assessment for sustainable groundwater management using DRASTIC. *Water*. 9(10): 792.
14. Jin-qi D. O. N. G. Shan-suo Z. H. E. N. G. Xiao-kui X. I. E. Feng Y. A. N. G. Shun-li C. H. E. and Xiao-hang L. I. U. 2023. Seismic vulnerability analysis of pipeline considering the influence of near-fault pulse-

شده است. در این پژوهش تعداد تکرار شبیه‌سازی مونت کارلو معادل با ۱۰۰۰۰۰ مرتبه تکرار در نظر گرفته شده است؛ به بیان دیگر برای هریک از ۴ پارامتر غیرقطعی (عمق کارگذاری، مدول الاستیسیته، چگالی خاک و بزرگای زمین‌لرزه) در مدل‌های عددی، ۱۰۰۰۰۰ مقدار تصادفی براساس تابع توزیع احتمال و ضریب تغییرات ایجاد و نتایج براساس مقادیر تصادفی اولیه پیش‌بینی شده است.

در این پژوهش با بهره‌گیری از مدل DRASTIC براساس ارزیابی ۷ پارامتر (هفت لایه اطلاعاتی مدل DRASTIC) میزان آلودگی منتقل شده به آبخوان مدلسازی و پهنه‌بندی آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است. نتایج حاصل از ارزیابی آلودگی آبخوان شهر تهران براساس آسیب خط لوله سوخت تحت زمین‌لرزه با بزرگای ۵، ۶ و ۷ ریشتر ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مدل ایجاد شده در این پژوهش قابلیت پیاده سازی در مناطق مختلف شهری و همچنین ارزیابی عملکرد سیستم انتقال سوخت تحت سناریوهای مختلف زمین‌لرزه و ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی را دارا بوده است و به عنوان یک مدل مرجع می‌تواند به صورت گسترده مورد استفاده فعالان و طراحان قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران به جهت تأمین داده‌های پژوهش قدردانی می‌نمایند.

### منابع

1. Barbulescu A. 2020. Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. *Water*. 12(5): 1356.
2. Bera A. Mukhopadhyay B. P. Chowdhury P. Ghosh A. and Biswas S. 2021. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 214(1): 112085.
3. Borsutzky R. 2006. Seismic risk analysis of buried lifelines: simulation of seismic ground motion. Technical report International Graduate College Risk management of natural and civilization hazards on buildings and infrastructure. Periodical report.

26. Ogoshi K. Mori I. Gotoh K. and Ogawa K. 1996. Did arsenic contamination in the Inagawa River occur in geogenic relation to the Great Hanshin (Kobe) Earthquake of 1995? *Applied organometallic chemistry*. 10(9): 757-760.
27. Qureshi A. and Sayed A. H. 2014. Situation analysis of the water resources of Lahore establishing a case for water stewardship. WWF-Pakistan and Cleaner Production Institute (CPI), Lahore, Pakistan. 1-45.
28. Rojstaczer S. Wolf S. and Michel R. 1995. Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*. 373(6511): 237-239.
29. Selçuk A. S. and Yüçemen M. S. 2000. Reliability of lifeline networks with multiple sources under seismic hazard. *Natural Hazards*. 21: 1-18.
30. Tanircan G. Tsereteli N. Garaveliev E. Siyahi B. Varazanashvili O. Mammadli T. Yethirmishli Q. Cehlidze T. Axundov A. and Safak E. 2011. Seismic Hazard Assessment for Southern Caucasus-Eastern Turkey Energy Corridor. In *Proceed. of the EGU Conf.*
31. Toprak S. and Taskin F. 2007. Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking. *Natural hazards*. 40: 1-24.
32. Yu H. Wu Q. Zeng Y. Zheng L. Xu L. Liu S. and Wang D. 2022. Integrated variable weight model and improved DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment in a shallow porous aquifer. *Journal of Hydrology*. 608: 127538.
33. Zhang P. Wang Y. and Qin G. 2019. A novel method to assess safety of buried pressure pipelines under non-random process seismic excitation based on cloud model. *Applied Sciences*. 9(4): 812.
- type ground motion. *Engineering Mechanics*. 40(5): 104-116.
15. Karamy Moghadam A. and Mahdavi Adeli M. 2020. Application of Artificial Neural Networks for Seismic Analysis and Design of Buried Pipelines in Heterogeneous Soils. *Journal of Hydraulic Structures*. 6(4): 60-74.
16. Li F. Wang W. Xu J. Yi J. and Wang Q. 2019. Comparative study on vulnerability assessment for urban buried gas pipeline network based on SVM and ANN methods. *Process Safety and Environmental Protection*. 122: 23-32.
17. Liu C.P. Wang C.H. and Hwang L.S. 2010. Temporal variation of seepage water chemistry before and after the Hengchun Ms 7.2 earthquake in south Taiwan. *Geoderma*. 155(1-2):107-114.
18. Makrakis N. Psarropoulos P.N. and Tsompanakis Y. 2022. ANN-Based Assessment of Soft Surface Soil Layers' Impact on Fault Rupture Propagation and Kinematic Distress of Gas Pipelines. *Infrastructures*. 8(1): 6.
19. Malakootian M. and Nouri J. 2010. Chemical variations of ground water affected by the earthquake in bam region Malakootian, M. *International Journal of Environmental Research*. 4(3): 443-454.
20. Martini A. Rivola A. and Troncossi M. 2018. Autocorrelation analysis of vibro-acoustic signals measured in a test field for water leak detection. *Applied Sciences*. 8(12): 2450.
21. Miao T. S. Lu W. X. Luo J. N. and Guo J. Y. 2019. Application of set pair analysis and uncertainty analysis in groundwater pollution assessment and prediction: a case study of a typical molybdenum mining area in central Jilin province. China. *Environmental Earth Sciences*. 78: 1-15.
22. Mohammadi K. Niknam R. and Majd V. J. 2009. Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran. *Environmental geology*. 58: 437-446.
23. Moser A. P. and Folkman S. 2008. Design of Pressure Pipes. *Buried Pipe Design*, McGraw-Hill Inc.
24. Ni P. Mangalathu S. and Liu K. 2020. Enhanced fragility analysis of buried pipelines through Lasso regression. *Acta Geotechnica*. 15: 471-487.
25. Noori R. Ghahremanzadeh H. Kløve B. Adamowski J. F. and Baghvand A. 2019. Modified-DRASTIC, modified-SINTACS and SI methods for groundwater vulnerability assessment in the southern Tehran aquifer. *Journal of Environmental Science and Health. Part A*. 54(1): 89-100.