

ارزیابی تواتر نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی در شناسایی مشخصات منبع آلودگی

فرهاد خامچین مقدم^۱ و سید ناصر باشی ازغدی^{۲*}

چکیده

تشخیص نشت فرآورده‌های نفتی از مخازن نگهداری آن‌ها به منابع آب زیرزمینی، لزوم طراحی سیستم پایش کیفی را در هنگام طراحی این تأسیسات ضروری می‌کند. از جمله پارامترهای اصلی در این زمینه، تعیین تواتر نمونه‌برداری است. الگوریتم پیشنهادی این مقاله با هدف تعیین تواتر مناسب نمونه‌برداری، از تلفیق تحلیل مونت کارلو، مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D و مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II تشکیل شده است. از تحلیل مونت کارلو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در توزیع آلودگی در آب زیرزمینی با استفاده از ۲۰۰۰ بار شبیه‌سازی مکرر مدل‌های کمی و کیفی بر اساس مشخصات مختلفی از منبع آلاینده استفاده شده است. مسأله بهینه‌سازی از اهدافی مانند حداقل‌سازی گستره آلودگی تشخیص داده نشده و تعداد ایستگاه‌های پایش و حداکثر کردن تواتر نمونه‌برداری تشکیل شده است. کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات موجود از آب زیرزمینی در بخشی از محدوده پالایشگاه تهران ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این بود که با استفاده از چهار چاهک پایش و تواتر نمونه‌برداری ۱۰ روزه می‌توان تقریباً در تمامی موارد، بروز آلودگی در منطقه را تشخیص داد. بر اساس این برنامه پایش پیشنهادی، دقت تشخیص مدل ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده در تعیین احتمالاتی محل منبع آلودگی در حدود ۹۹/۲٪ بود.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، الگوریتم بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، پالایشگاه تهران، پایش کیفی، نقاط و تواتر نمونه‌برداری.

ارجاع: خامچین مقدم ف. و باشی ازغدی س. ن. ۱۳۹۷. ارزیابی تواتر نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی در شناسایی مشخصات منبع آلودگی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۸: ۱۱۳-۱۲۱.

۱- استادیار گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد.

۲- دانش‌آموخته مقطع دکتری رشته مهندسی عمران - آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

* نویسنده مسئول: bashinasser64@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

مقدمه

مدیریت پایش کیفی منابع آب زیرزمینی به علت آلودگی شدید ناشی از افزایش آلاینده‌های ورودی، نبود قوانین زیست محیطی با ضمانت اجرایی لازم (به خصوص در کشورهای کمتر توسعه یافته) و هزینه زیاد تصفیه آلاینده‌های ورودی، در دهه‌های گذشته به طور جدی مورد توجه پژوهشگران و سازمان‌های مربوطه قرار داشته است. تمامی موارد ذکر شده و بسیاری از عوامل دیگر باعث بروز مشکلات عدیده‌ای در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شده و مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی از لحاظ کمی و کیفی و همچنین تلاش برای حفاظت و پایش کیفی آن‌ها را به امری ضروری مبدل ساخته است. در این مقاله سعی خواهد شد تا اثر تواتر نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی در تشخیص مشخصات منبع آلودگی بررسی شود. این امر کمک شایانی به شناسایی منبع آلودگی و مدیریت هرچه بهتر منابع مهم آب زیرزمینی خواهد کرد. در ادامه به برخی از پژوهش‌های مهم انجام شده در زمینه مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی پرداخته می‌شود.

هوداک (۲۰۰۴) در پژوهشی، استفاده از دیوارهای بتنی آب‌بند در ترکیب با چاه‌های پایش را برای شناسایی آلودگی رها شده از یک منبع آلودگی مواد زائد جامد بررسی کرد. شبکه پایش با پنج چاه و بدون دیوار آب‌بند در ۸۱٪ مواقع گسترش آلودگی را تشخیص می‌دهد. حال آنکه با استفاده از پرده آب‌بند این مقدار بین ۸۱ تا ۱۰۰٪ متغیر خواهد بود. آن‌ها در این پژوهش از مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D استفاده کردند و موقعیت بهینه پرده آب‌بند را در مرکز و پایین‌دست هیدرولیکی محل دفن زباله پیشنهاد دادند. کیمیا و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه خود توسعه یک مدل برای تعیین تواتر نمونه‌برداری پایش بهینه در دوره اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های پایش آب زیرزمینی را بررسی کردند. در این پژوهش، سری زمانی سطح آب زیرزمینی در ۸۱ چاه پایش کم عمق و عمیق با استفاده از مدل رگرسیون خود همبسته برای تعیین تواتر نمونه‌برداری سطح آب زیرزمینی بررسی و بر اساس آن تواتر نمونه‌برداری ۸/۹ روزه به‌عنوان تواتر منتخب پیشنهاد شد.

باشی ازغدی و کراچیان (۲۰۱۰) با NSGA-II^۱ به‌عنوان مدل بهینه‌سازی چندهدفه، روشی برای مکان‌یابی بهینه چاه‌های پایش مخصوص تشخیص نشت در منابع آب زیرزمینی را ارائه دادند که در این مطالعه تغییرات تواتر نمونه‌برداری بر تعیین مشخصات منبع آلودگی بررسی نشد. کراچیان و معصومی (۲۰۱۰) روشی جدید برای طراحی بهینه ایستگاه‌های پایش آب زیرزمینی ارائه دادند. آنان در این روش از تئوری آنتروپی برای کمی کردن کارایی محل ایستگاه‌های پایش و تواتر آن در شبکه آب زیرزمینی استفاده کردند. روش پیشنهادی برای طراحی بهینه شبکه پایش در آبخوان تهران ارزیابی شد.

مورا فورنیر و داقنی (۲۰۱۲) یک روش ساده ناپارامتریک برای ارزیابی تواتر نمونه‌برداری در منابع آب زیرزمینی ارائه کردند. داتا و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه‌ای را با هدف افزایش دقت تشخیص شار منبع آلاینده و بازطراحی شبکه پایش بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از شبکه پایش طراحی شده فعلی انجام دادند. در این مقاله از تلفیق برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل شبیه‌سازی GMS7.0 استفاده شد. ایشان نشان دادند که نتایج این مقاله برای مسأله واقعی با امکان اجرای تعداد محدودی چاه پایش و عدم قطعیت فراوان در مورد منبع آلاینده و شیوه پاسخ آبخوان به آن همراه باشد، کاربرد مناسبی دارد.

جین و همکاران (۲۰۱۴) روشی را بر پایه آنالیز حساسیت برای مکان‌یابی بهینه چاه‌های پایش با در نظر گرفتن دو عدم قطعیت محل منبع آلودگی و هدایت هیدرولیکی در کانادا ارائه کردند. در این مقاله از یک روش بهینگی متریک به نام D-optimality در ترکیب با متریک فاصله برای انتخاب ایستگاه‌های پایش، تا حد امکان دور از یکدیگر، برای تشخیص منبع آلودگی استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای مثال در صورت استفاده از ۱۵ چاه پایش و روش ارائه شده در این مقاله در مقایسه با انتخاب دستی، خطای تشخیص از ۱۱/۵ به ۵/۵٪ کاهش پیدا می‌کند. اسکویو و همکاران (۲۰۱۵) از تحلیل چندمعیاره برای تحلیل و مدل‌سازی معیارهای اصلی اثرگذار بر طراحی بهینه شبکه پایش تراز آب زیرزمینی استفاده کردند. ایشان از تحلیل سلسله مراتبی AHP^۲ و نرم‌افزار GIS برای نیل به این هدف بهره جستند. نتایج نشان داد

1- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

2- Analytical Hierarchy Process

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و نتایج روش پیشنهادی برای مطالعه موردی آورده شده است.

مواد و روش‌ها

الگوریتم پیشنهادی این مقاله، با هدف انتخاب تواتر مناسب نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی و همچنین تعداد و موقعیت مناسب چاهک‌های پایش آب زیرزمینی در شکل ۱ به اختصار نشان داده شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ابتدا اطلاعات لازم برای مدل‌سازی توسط مدل‌های شبیه‌سازی جمع‌آوری و مدل‌های شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان واسنجی و صحت‌سنجی می‌شوند. سپس برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مسأله، به استفاده از تحلیل مونت کارلو، با اجرای مکرر مدل‌های شبیه‌سازی به ازای مقادیر متعددی از متغیرهای ورودی در بازه تغییراتشان، و تعیین توزیع غلظت متغیرهای کیفی شاخص در محدوده آبخوان مورد مطالعه توجه شد. در ادامه، پس از تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، منحنی تعامل بین اهداف مختلف شامل حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های پایش و حداقل کردن تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده تدوین می‌شود. کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات موجود آبخوان تهران و مخازن ذخیره بخشی از پالایشگاه تهران به‌عنوان یک منبع آلودگی مهم این آبخوان، ارزیابی شد.

مدل شبیه‌سازی و تحلیل مونت کارلو

در این مقاله از مدل MODFLOW (هاربایق و مک‌دونالد، ۱۹۹۶) برای شبیه‌سازی کمی محدوده مطالعاتی استفاده شد. در این مدل، جریان آب زیرزمینی بر اساس روابط موجود تخمین و پس از تعیین ارتفاع آب زیرزمینی در زمان‌های مختلف، مرحله شبیه‌سازی جریان آلاینده به کمک MT3D (ژنگ و ونگ، ۱۹۹۹) آغاز می‌شود. مدل‌های سه بعدی شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D به ترتیب توسط سازمان‌های USGS^۱ و U.S. Army تولید و در دسترس قرار گرفته است و صحت آن را پژوهشگران مختلف تأیید کرده‌اند و استفاده از آنها در بین پژوهشگران این علم به‌طور گسترده مرسوم است (هوداک، ۲۰۰۴؛

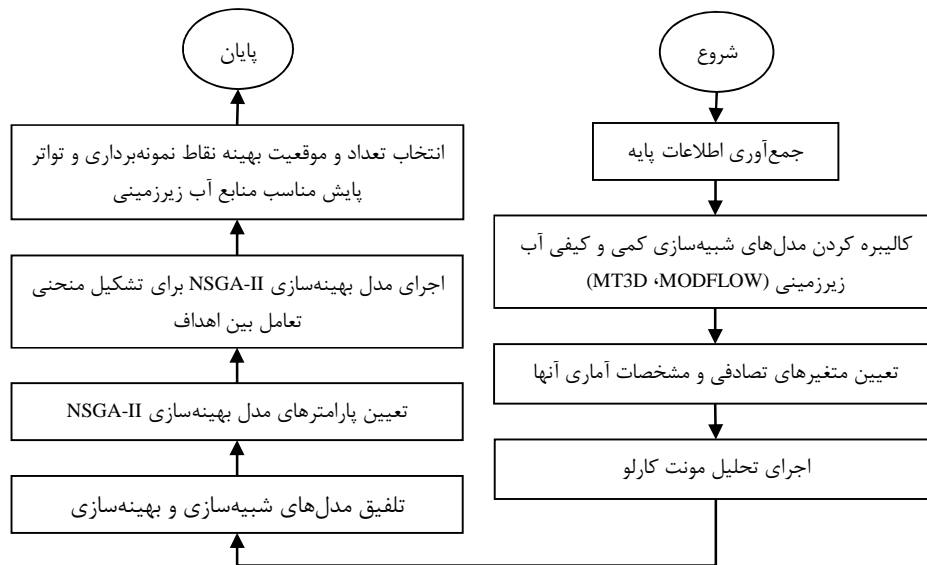
یک درصد از محدوده مطالعاتی، دارای اولویت بسیار زیاد برای پایش است؛ حال آنکه ۹۱٪ دارای اولویت بسیار کم و بقیه مناطق بین این اولویت‌ها متغیر هستند. استفاده از این روش برای پهنه‌بندی منابع آب زیرزمینی جهت پایش کیفی می‌تواند یکی از موضوعات مطرح در ادامه این پژوهش باشد.

جونز فریرا و همکاران (۲۰۱۶) از ترکیبی از روش‌های زمین‌آماری، فیلتر کالمان و یک روش بهینه‌سازی ابتکاری برای تعیین بهینه شبکه پایش آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج نشان داد که با انتخاب بهینه ۶۹ محل پایش به ۹۰٪ دقت پایش کیفی ۱۴۰ نقطه فعلی خواهد رسید. حسینی و کراچیان (۲۰۱۷) روشی جدید برای بازطراحی شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی مبتنی بر یک روش تصمیم‌گیری پیشنهاد دادند. نتایج به دست آمده، نشان داد که بازطراحی انجام شده روی شبکه پایش و استفاده از ۳۳ ایستگاه پایش و نمونه‌برداری با تواتر پنج هفته‌ای در مقایسه با شبکه پایش فعلی با ۵۲ ایستگاه پایش و تواتر نمونه‌برداری ماهانه از کارایی بیشتری برخوردار است.

بررسی پیشینه مطالعات در زمینه پایش منابع آب زیرزمینی حاکی از این است که اگرچه مطالعات گسترده‌ای در این زمینه توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است؛ ولی تعیین تواتر مناسب نمونه‌برداری همزمان با ارائه بهینه تعداد و موقعیت نقاط پایش در مسأله تعیین مشخصات منبع آلاینده نامشخص کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت این موضوع در مسأله پایش نشت آلودگی در منابع آب زیرزمینی، در این مقاله، با تلفیقی از مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D و مدل بهینه‌سازی NSGA-II، فواصل زمانی منتخب نمونه‌برداری به همراه طراحی شبکه پایش در آبخوان تهران (در بخشی از پالایشگاه تهران) ارائه شده است. اهداف بهینه‌سازی در این مقاله شامل حداقل کردن تعداد ایستگاه‌های پایش و حداقل کردن تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده است. عدم قطعیت‌های موجود در مسأله نیز با استفاده از تحلیل مونت کارلو در مورد پارامترهای اثرگذار بر توزیع کمی و کیفی آلودگی در آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، توضیحاتی راجع به مدل‌های

از اجراهای مکرر (شبیه‌سازی) و متغیرهای تصادفی، عدم قطعیت موجود در مسائل مختلف را در نظر می‌گیرد. برای جلوگیری از مشکلات محاسباتی و کاهش زمان اجرا و برای عدم نیاز به اجرای دستی مدل‌های شبیه‌سازی، با استفاده از برنامه‌های رابط، مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D به صورت فایل‌های اجرایی تغییر داده شده‌اند و این فایل‌ها در داخل یک برنامه فرترن به صورت خودکار برای اجراهای مکرر استفاده می‌شوند.

باشی ازغدی و کراچیان، ۲۰۱۰؛ دانا و همکاران، ۲۰۱۳). در پژوهش مروری سودهاکار و همکاران (۲۰۱۶) مقالاتی که در آن‌ها از MODFLOW استفاده شده است، ارائه و جمع‌بندی شده است. در این مدل‌ها از روش تفاضل‌های محدود در حل معادلات حاکم استفاده شد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پژوهش حاضر از تحلیل مونت کارلو استفاده شد. شبیه‌سازی مونت کارلو یک تکنیک آماری- کامپیوتری است که با استفاده



شکل ۱- ساختار مدل پیشنهادی

پایش است که هزینه‌های نمونه‌برداری را با این تابع هدف مرتبط می‌کند. الگوریتم ژنتیک روشی جذاب است که تاکنون کاربردهای متعددی در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های پایش منابع آب داشته است. الگوریتم‌های ژنتیک به خصوص برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بسیار مناسب هستند و به راحتی می‌تواند با یک‌بار اجرا و با زمان محاسبات قابل قبول، منحنی تعامل بین اهداف مختلف را محاسبه کنند. در این پژوهش از مدل الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II که آن را دب و همکاران (۲۰۰۲) ارائه کرده‌اند، استفاده می‌شود.

ماشین‌های بردار پشتیبان

یک روش نسبتاً جدید برای تشخیص الگو (کلاس‌بندی) یا رگرسیون، ماشین‌های بردار پشتیبان هستند. ایده اولیه ماشین‌های بردار پشتیبان را وپنیک در سال ۱۹۹۵ مطرح

مدل بهینه‌سازی

یک مدل بهینه‌سازی، مدلی ریاضی بر اساس یک الگوریتم مشخص برای محاسبه مجموعه‌ای از مقادیر بهینه برای متغیرهای تصمیم برای کمینه یا بیشینه کردن تابع یا توابع هدف بر اساس قیود موجود است. در مدیریت پایش سیستم منابع آب زیرزمینی در پژوهش حاضر، مسأله بهینه‌سازی با اهداف حداقل‌سازی گستره آلودگی تشخیص داده نشده و تعداد ایستگاه‌های پایش است که به ترتیب در معادلات (۱) و (۲) آورده شده است.

$$\text{Minimize } Z_1 = NDPA \quad (1)$$

$$\text{Minimize } Z_2 = N \quad (2)$$

در معادلات فوق، NDPA گستره آلودگی تشخیص داده نشده است که از طریق شمارش تعداد سلول‌هایی که در مدل شبیه‌سازی آلوده نشده محاسبه می‌شود. معیار تشخیص آلودگی هر سلول در این پژوهش ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است. N تعداد چاهک‌های

همچنین به هنگام تماس بدن با خاک آلوده، ممکن است وارد بدن انسان و از طریق جریان خون در سراسر بدن پخش شوند. برای مثال هگزان که از ترکیبات اصلی TPHs است، می‌تواند منجر به ایجاد حساسیت در سیستم گوارشی و اختلالات عصبی و تنفسی شود (پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۷۷).

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، قسمتی از پالایشگاه تهران است که در جنوب شرقی پالایشگاه واقع و شامل ۸ مخزن نفت خام است. این منطقه دارای یک کیلومتر طول و ۵۰۰ متر عرض است. اطلاعات مورد نیاز برای تعریف ابعاد و شبکه‌بندی آبخوان مانند تعداد لایه‌ها، تعداد سلول‌ها و ابعاد هر یک به مدل داده می‌شود. در مدل تدوین شده، تعداد لایه‌ها برابر ۱، تعداد سلول‌ها 50×25 و ابعاد هر یک از سلول‌ها 20×20 متر تعیین شدند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برای تشخیص به موقع و همچنین پوشش دادن کامل منطقه مورد مطالعه، تعداد ۳۷ چاهک پایش پتانسیل در نظر گرفته شده که شیوه قرار گرفتن آن‌ها در این شکل مشخص است. چاهک‌های پایش نهایی از بین این چاهک‌های پتانسیل انتخاب می‌شوند. با استفاده از پژوهش صفوی و سوخک لاری (۱۳۸۵)، مدل شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D واسنجی و نتایج ضرایب واسنجی شده در جدول ۱ برای متغیر کیفی TPH ارائه شد.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج استفاده از الگوریتم پیشنهادی در طراحی برنامه پایش برای بخش جنوبی پالایشگاه تهران ارزیابی شد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در محل و میزان نشت از مخازن، از تحلیل مونت کارلو که تعداد تکرارهای آن در این پژوهش ۲۰۰۰ بار است، استفاده شد. برای کاهش زمان اجرا و عدم نیاز به اجرای دستی مدل‌های شبیه‌سازی، با استفاده از یک برنامه رابط، مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D به صورت فایل‌های اجرایی تغییر داده شده‌اند و این فایل‌ها در داخل یک برنامه فرترن به صورت خودکار اجرا می‌شوند. با استفاده از این برنامه فرترن، بر اساس داده‌های تصادفی تولید شده برای شماره مخزن، مقدار نشت و میزان غلظت ماده آلاینده، مدل شبیه‌سازی ۲۰۰۰ بار اجرا شد و میزان غلظت در هر سلول آبخوان به ازای هر اجرا به دست آمد.

کرد و در چند سال اخیر کاربردهای مهمی در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی به خصوص مهندسی برق داشته است. الگوریتم‌های شبیه‌سازی هوشمند کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی معمولاً قدرمطلق خطا یا مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش را حداقل می‌کنند؛ ولی اصل حداقل‌سازی خطای ساختاری در SVMs^۱ به کار گرفته می‌شود. در مدل‌های کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختار شبکه قبل از آموزش مشخص است و عملاً بهینه نمی‌شود؛ ولی در مدل‌های SVM ساختار شبکه نیز به همراه وزن‌ها، بهینه‌سازی می‌شود. علاوه بر آن SVMs می‌توانند خروجی‌های احتمالاتی نیز داشته باشند. در این مقاله از ماشین‌های بردار پشتیبان برای تعیین مشخصات منبع آلودگی بر اساس غلظت‌های مشاهداتی در چاهک پایش منتخب استفاده شد.

منطقه مورد مطالعه

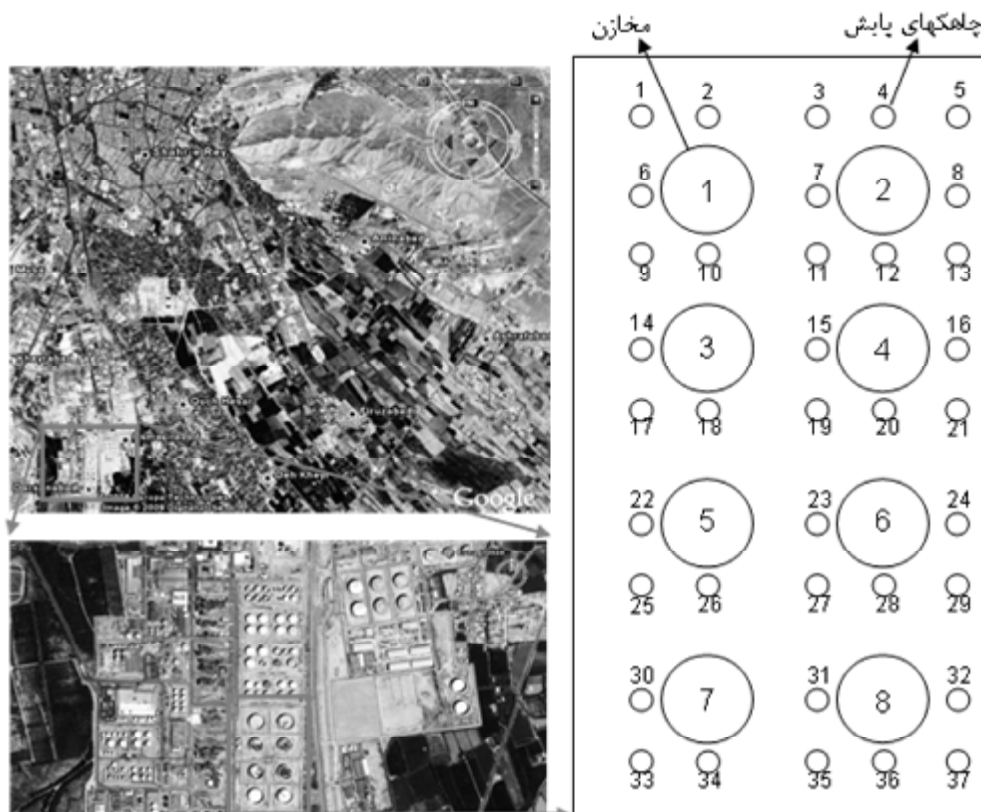
منطقه مورد مطالعه در محدوده باقر شهر واقع در جنوب پالایشگاه تهران است. این منطقه از شمال به شهری و تهران، از شرق به پالایشگاه و روستای اسماعیل‌آباد، از جنوب به روستای قمصر و دورسون‌آباد، از غرب به بهشت‌زهرها محدود می‌شود. ضرائب هیدرولیکی در این بخش آبخوان ۵ متر در روز و متوسط ضخامت لایه آبدار ۳۵ متر است (صفوی و سوخک‌لاری، ۱۳۸۵). آلودگی نفتی منطقه پالایشگاه تهران به دهه‌های گذشته مربوط می‌شود. بررسی آلودگی این منطقه در سال ۱۳۶۷ با نمونه‌برداری از چاه‌های کاتدی موجود در پالایشگاه و انجام آزمایش تقطیر و تعیین درصد برش‌های نفتی و در سال ۱۳۷۷ با نمونه‌برداری از چاه‌های کاتدی، چاه‌های آب و میله چاه‌های قنات‌های موجود در منطقه انجام شد. صفوی و سوخک‌لاری (۱۳۸۵) بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در مورد غلظت ترکیبات نفتی در منطقه پالایشگاه تهران، به مدل‌سازی هیدروکربن‌های نفتی کل TPHs^۲ در منطقه پالایشگاه پرداختند. در این پژوهش نیز از TPH به عنوان شاخص کیفی برای شبیه‌سازی آلودگی در منابع آب زیرزمینی استفاده شد. این ترکیبات به‌هنگام تنفس یا در صورت استفاده از آب یا مواد غذایی آلوده و

1- Support Vector Machines

2- Total Petroleum Hydrocarbons

مترمکعب و انحراف معیار $0.5/0$ و با توزیع نرمال در نظر گرفته شد. شماره مخازن نشت نیز با توزیع یکنواخت بین ۱ تا ۸ تولید و علاوه بر این، برای ارزیابی تواتر نمونه‌برداری از ایستگاه‌های پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی با تواتر ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه استفاده شد. بدین ترتیب با این تواتر نمونه‌برداری‌ها، در هر ماه به ترتیب ۳۰، ۱۵، ۱۰، ۳ و ۲ نوبت سنجش کیفیت منابع آب زیرزمینی صورت گرفت.

بر اساس اطلاعات ارائه شده در مقالات مشابه و گزارش‌های فنی موجود در مورد آلودگی نفتی پالایشگاه تهران، تابع توزیع در نظر گرفته شده برای تولید اعداد تصادفی برای مقدار نشت و غلظت TPH نرمال و برای محل نشت، تابع توزیع یکنواخت بود. مشخصات این متغیرهای تصادفی برای مقدار نشت با میانگین ۷ مترمکعب بر متر بر روز و انحراف معیار $0.67/0$ و با توزیع نرمال، همچنین غلظت TPH با میانگین ۸۵۰ کیلوگرم بر



شکل ۲- موقعیت و محل قرار گرفتن مخازن فراورده‌های نفتی و چاهک‌های پتانسیل در بخش جنوب غربی پالایشگاه تهران

جدول ۱- مشخصات آبخوان و ضرایب واسنجی شده

DMCOEF ^{***}	TRPT ^{**}	TRPV [*]	ضریب ذخیره	تخلخل	نوع آبخوان	مشخصات
۰	۰/۱	۰/۱	۰/۰۶	۰/۴	نامحدود	مقادیر

^{*}Vertical Transverse Dispersion/Longitudinal Dispersion

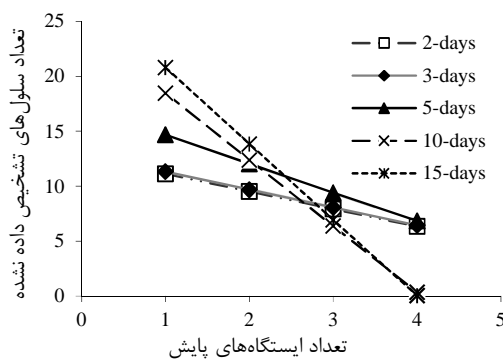
^{**}Horizontal Transverse Dispersion/Longitudinal Dispersion

^{***}Molecular Diffusion Coefficient

پتانسیل (۳۷ عدد) بود. مدل بهینه‌سازی NSGA-II منحنی تعامل میان تواتر نمونه‌برداری از ایستگاه‌های پایش و تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده برای تعداد چاهک‌های پایش مختلف مطابق شکل ۳ به دست آمد. همان‌طور که در این کردار مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد چاهک‌های پایش، تعداد سلول‌های آلوده

برای انتخاب مناسب تواتر پایش در ایستگاه‌های پتانسیل موجود، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف حداقل‌سازی تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده و از تعداد ایستگاه‌های پایش استفاده شد. متغیرهای تصمیم در انتخاب محل ایستگاه‌های پایش از نوع باینری و تعداد آن‌ها (تعداد ژن‌ها) برابر با تعداد چاهک‌های پایش

با شیوه‌های دیگر، در شکل ۴ منحنی تعامل بین تعداد ایستگاه‌های پایش پیشنهادی و تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده آورده شده است. مطابق این کردار تغییرات محسوس در صورت انتخاب چهار ایستگاه پایش در تواتر نمونه‌برداری ۱۰ و ۱۵ روزه وجود ندارد؛ بنابراین نمونه‌برداری ۱۰ روزه با استفاده چهار چاهک پایش در مقایسه با نمونه‌برداری ۱۵ روزه به جهت توانایی در حداقل کردن تعداد سلول‌های تشخیص داده نشده و کاهش گسترش آلودگی پیش از تشخیص آن در منابع آب زیرزمینی منطقه پیشنهاد می‌شود.



شکل ۴- منحنی تعامل محاسبه شده توسط NSGA-II بین تعداد ایستگاه‌های پایش و تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده

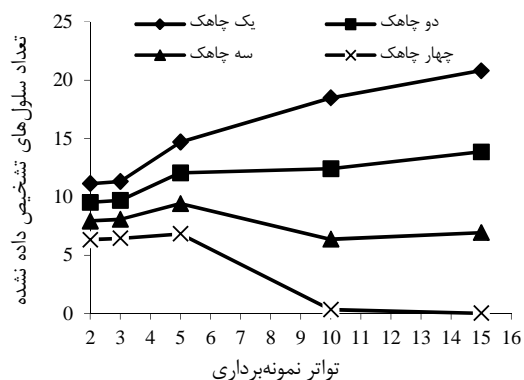
حال بر این اساس، موقعیت ایستگاه‌های منتخب پایش پیشنهادی برای هر یک از تواترهای ارائه شده در شکل ۴ در جدول ۲ آورده شده و موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲- موقعیت ایستگاه‌های پایش پیشنهادی برای فواصل نمونه‌برداری مختلف

تواتر نمونه‌برداری (روز)	تعداد ایستگاه پایش			
	چهار	سه	دو	یک
دو	۱۵،۱۴،۱۰،۷	۱۴،۱۰،۷	۱۰،۷	۱۰
سه	۳۱،۲۲،۱۴،۱۰	۳۱،۲۲،۱۰	۳۱،۱۰	۱۰
پنج	۳۱،۲۳،۱۵،۷	۳۱،۱۵،۷	۳۱،۱۵	۱۵
ده	۳۱،۲۳،۱۵،۷	۲۳،۱۵،۷	۱۵،۷	۷
پانزده	۲۸،۲۶،۱۵،۷	۲۸،۱۵،۷	۲۸،۱۰	۱۰

بر اساس موقعیت ایستگاه‌های پایش پیشنهادی و استفاده از تواتر نمونه‌برداری منتخب ۱۰ روزه، می‌توان منبع بروز آلودگی را با استفاده از نتایج پایش کیفی در محدوده

تشخیص داده نشده کاهش می‌یابد. همچنین مطابق این کردار، در صورتی که از چهار ایستگاه پایش و تواتر نمونه‌برداری ۱۰ و ۱۵ روزه استفاده شود، تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده به میزان محسوس کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در صورت انتخاب یک ایستگاه پایش، افزایش فاصله بین تواتر نمونه‌برداری‌های انجام گرفته منجر به پخش آلودگی و افزایش تعداد سلول‌های تشخیص داده نشده می‌شود؛ به بیان دیگر در صورتی که از تعداد چاهک پایش کمتری استفاده شود، تواتر نمونه‌برداری باید با فواصل کمتری انجام شود و در صورت استفاده از تعداد چاهک بیشتر می‌توان فواصل بین نمونه‌برداری‌ها را افزایش داد. مطابق شکل ۳، در صورت استفاده از چهار چاهک پایش تغییر محسوس بین سلول‌های تشخیص داده نشده در دو حالت تواتر نمونه‌برداری ۱۰ و ۱۵ روزه وجود ندارد؛ لذا پیشنهاد می‌شود، در محدوده مطالعاتی استفاده از چهار چاهک پایش با تواتر نمونه‌برداری ۱۰ روزه پایش متغیر کیفی شاخص مد نظر قرار گیرد. علت این است که در حالت نمونه‌برداری با تواتر ۱۰ روزه در مقایسه با ۱۵ روزه، علاوه بر کاهش محسوس تعداد سلول‌های تشخیص داده نشده، شاهد گسترش کمتری از آلودگی در شبکه هنگام تشخیص آلودگی خواهیم بود؛ به بیان دیگر، با استفاده از نمونه‌برداری ۱۰ روزه نه تنها به تعداد سلول‌های تشخیص داده نشده مشابه حالت ۱۵ روزه دست خواهیم یافت، بلکه گسترش کمتری از آلودگی را در شبکه هنگام تشخیص شاهد خواهیم بود.



شکل ۳- منحنی تعامل محاسبه شده توسط NSGA-II بین تواتر نمونه‌برداری در ایستگاه‌های پایش و تعداد سلول‌های آلوده تشخیص داده نشده

بروز آلودگی ارزیابی شد. الگوریتم پیشنهادی که متشکل از تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3D و مدل بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II است، این قابلیت را فراهم کرده است تا با توجه به سطوح مختلف نیاز ذی‌نفعان و تصمیم‌گیرندگان فواصل مناسب نمونه‌برداری مشخص شود. همچنین بر اساس تواتر نمونه‌برداری منتخب، در این مقاله، موقعیت مناسب نقاط نمونه‌برداری نیز پیشنهاد شد. پیدا کردن فواصل مناسب نمونه‌برداری در کاهش هزینه‌های وارده و به شکل همزمان جلوگیری از گسترش فراوان آلودگی با توجه به دقت تشخیص مورد نیاز وجود آلودگی در منابع آب زیرزمینی بسیار مطلوب و حائز اهمیت است.

سپاس‌گزاری

این مطالعه با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد در قالب یک طرح تحقیقاتی تحت عنوان "ارزیابی تواتر نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی در شناسایی مشخصات منبع آلودگی" انجام شده است.

منابع

۱. پژوهشگاه صنعت نفت. ۱۳۷۷. بررسی آلودگی نفتی آب‌های زیرزمینی منطقه پالایشگاه تهران و پیرامون آن. گزارش فنی.
۲. صفوی ح. ر. و سوخک‌لاری ک. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند احیاء آب‌های زیرزمینی آلوده. شرکت سهامی مدیریت منابع آب، معاونت پژوهش و مطالعات پایه (طرح تحقیقاتی کاربردی) وزارت نیرو. ۱۰۵ ص.

3. Bashi-Azghadi S. N. and Kerachian R. 2010. Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models. Science of the Total Environment. 408(10): 2189-2198.
4. Datta B. Prakash O. Campbell S. and Escalada G. 2013. Efficient identification of unknown groundwater pollution sources using linked simulation-optimization incorporating monitoring location impact factor and frequency factor. Water Resources Management. 27(14): 4959-4976.
5. Deb K. Pratap A. Agarwal S. and Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 6: 182-197.

مطالعاتی به صورت احتمالاتی پیش‌بینی کرد. بدین منظور و با استفاده از زوج مرتب داده‌های تولید شده بر اساس تحلیل مونت کارلو بین منابع آلاینده (۸ مخزن آلاینده) و اطلاعات غلظت به دست آمده در چاهک‌های پایش پیشنهادی بر اساس جدول ۲، الگوریتم SVM آموزش داده می‌شود. مدل آموزش داده شده این امکان را دارد تا با استفاده از غلظت مشاهده شده در چاهک‌های پایش در تواتر نمونه‌برداری ۱۰ روزه منبع آلودگی نامشخص را به صورت احتمالاتی تشخیص دهد. استفاده از این الگوریتم برای تواتر نمونه‌برداری ۱۰ روزه و استفاده از چهار چاهک پایش مطابق با جدول ۲ توسعه داده و نتایج به دست آمده در جدول ۳ ارائه شد. مطابق با جدول ۳، در صورت استفاده از چهار چاهک پایش و تواتر نمونه‌برداری ۱۰ روزه می‌توان تقریباً در تمامی موارد محل بروز آلودگی را در منطقه مشخص کرد. این در حالی است که استفاده از تنها یک چاهک پایش باعث می‌شود که دقت تشخیص محل بروز آلودگی کمتر از ۵۰٪ باشد.

پژوهش باشی ازغدی و کراچیان (۲۰۱۰) تشخیص منبع آلاینده با استفاده از چهار چاهک پایش و نمونه‌برداری با تواتر ۱۵ روزه به دقتی برابر با ۹۹/۶٪ منتج شد، حال آنکه با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، ضمن پیشنهاد تواتر نمونه‌برداری ۱۰ روزه با دقت تشخیص ۹۹/۲٪ (تقریباً مطابق با تواتر ۱۵ روزه) قطعاً شاهد گسترش کمتری از آلودگی در محدوده طرح خواهیم بود.

جدول ۳- دقت تشخیص مدل شبیه‌سازی SVM در تعیین

محل منبع آلودگی احتمالی بر حسب %

تواتر نمونه‌برداری (روز)	تعداد ایستگاه پایش			
	یک	دو	سه	چهار
ده	۴۶/۶	۶۲/۰	۸۵/۸	۰/۲

نتیجه‌گیری

در مطالعات انجام شده در زمینه تشخیص احتمالاتی محل منبع آلاینده در منابع آب زیرزمینی، تواتر نمونه‌برداری با توجه به برنامه پایش طراحی شده یا در حال اجرا ثابت در نظر گرفته شده و بر اثر این پارامتر به‌عنوان یکی از موارد دارای عدم قطعیت در مسأله تشخیص آلودگی توجه نشده بود. در این مقاله، برای تشخیص آلودگی در منابع آب زیرزمینی، فواصل زمانی نمونه‌برداری مختلفی در صورت

17. Zheng C. and Wang P. P. 1999. MT3DMS: a modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, documentation and user's guide. Contract Report SERDP-99-1. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
6. Esquive J. M. Morales G. P. and Esteller M. V. 2015. Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. *Water Resources Management*. 29(9): 3175-3194.
7. Harbaugh A. W. and McDonald M. G. 1996. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model. Open file report 96-485. U.S. Geological Survey.
8. Hosseini M. and Kerachian R. 2017. A Bayesian maximum entropy-based methodology for optimal spatiotemporal design of groundwater monitoring networks. *Environmental Monitoring and Assessment*. 189(433): 1-24.
9. Hudak P. F. 2004. Augmenting groundwater monitoring networks near landfills with slurry cutoff wall. *Environmental Monitoring and Assessment*. 90(14): 113-120.
10. Jin X. Ranjithan R. S. and Mahinthakumar G. 2014. A monitoring network design procedure for three-dimensional (3D) groundwater contaminant source identification. *Environmental Forensics*. 15(1): 78-96.
11. JÚnez-Ferreira H. E. Herrera G. S. González-Hita L. Cardona A. and Mora-Rodríguez J. 2016. Optimal design of monitoring networks for multiple groundwater quality parameters using a Kalman filter: application to the Irapuato-Valle aquifer. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188(39): 1-29.
12. Kerachian R. and Masoumi F. 2010. Optimal redesign of groundwater quality monitoring networks: a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*. 161(1-4): 247-257.
13. Kima G. B. Lee K. K. Lee J. Y. and Yi M. J. 2007. Case study for determination of a water level monitoring frequency for nationwide groundwater monitoring networks in Korea. *Journal of Hydrology*. 342(3-4): 223-237.
14. Moreau-Fournier M. F. and Daughney C. J. 2012. Dynamic groundwater monitoring networks: A manageable method for reviewing sampling frequency. *Journal of Environmental Monitoring*. 14(12): 3129-3136.
15. Sudhakar S. Verma M. K. and Soumya S. 2016. Application of GIS and MODFLOW to ground water hydrology- A Review. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 6(1): 36-42.
16. Vapnik V. N. 1995. The nature of statistical learning theory. Springer-Verlag, New York.

