Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 13
No. 2 (50)

Received:
2023-04-24

Accepted:
2023-07-18

Pages: 53-66

Investigating the Spread of Pollution in the Porous Environment of the Babol Aquifer by MODFLOW and MODPATH Models

Yaser Ghandehari[1], Alireza Zamani Nouri [2*] and Babak Aminnejad [3]

1) Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.
2) Department of Civil Engineering, Shahr-e- Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3) Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.
*Corresponding author email: Dr.zamani1979@gmail.com

Abstract

Background and Aim: Due to the sharp decline of the underground water in the country's plains due to their indiscriminate extraction for agricultural purposes, managers are looking for solutions to manage and restore underground water tables. One of the solutions to compensate for the drop in the underground water level, which is one of the most effective factors in destroying the discharge capacity and increasing the quality in the underground water area, scenarios of reducing withdrawal of farming wells and prepare prohibition plans with the least uncertainty based on the regional sensitivity to pollution. The purpose of this research is to predict the flow and pollution conditions of the area based on numerical models, so that the level network and the direction of the underground water flow of the plain using MODFLOW software in a long-term period and the development of the prediction model using Calibration and validation operations should be performed on the base period of the studies in order to be able to implement the forecast scenarios by applying restrictions and reducing harvesting on aquifer exploitation resources, and specifically agricultural wells, until the stage of stable hydrograph extraction of the plain.

Method: This research was carried out with the aim of estimating and predicting the state of pollution in the urban pollution site, using MODFLOW and MODPATH computer programs in GMS software. To achieve this goal, in the first step, the numerical model of the aquifer flow was prepared and calibrated by the MODFLOW code. Then, the MODPATH code was used to track the contaminated particles in the steady-state progressive method. In the second stage, the impact of the scenario of increasing and decreasing the pumping from the exploitation wells on the travel time, the length of the path and the catchment area of the leachate particles leading to them was predicted and evaluated by the regressive method. In the third step, the tracking of particles leading to qualitative sampling wells in the plain was predicted and evaluated by regressive method in steady state.

Results: According to the automatic calibration and validation approach, the underground water flow model produced the least statistical deviation on the optimization parameters. Also, the particle transfer quality model was correctly implemented on the groundwater flow prediction model. In the Babol aquifer, the waste disposal area outside the designated aquifer is saturated. It was observed that, by adjusting the parameters of the simulation of the transfer of residual pollution cloud particles, an estimate of the concentration was applied to the permeable boundaries and the channel network. This means that in the simulation of particle transport, here the source of pollution spread is the channel network and permeable boundaries, which will be directly affected by pollution during periods of rainfall and especially floods. The concentration limit was given to the model in the form of variable figures based on discharge and precipitation in the range and equal to the primary stable threshold of the research subject (landfill). Based on the cumulative diagram of the outlet concentration from the permeable boundary and flow channel in the southeast region, the trend of changes in the cloud pollution concentration diagram, in the qualitative modeling of the plain, shows that in the forecast period, the increase in concentration will increase linearly. Considering that the waste disposal location is outside the plain, the rate of increase in pollution was not very high until the end of the initial simulation. However, the reason for the increase in concentration accumulation volume can be related to the existence of permeable boundaries and severe drop of underground water in this area. In other words, when the underground water level drops too much in the saturation area of the plain, the direction of the flow will move the volume of polluted water towards the aquifer at a higher speed.

Conclusion: If the situation of groundwater withdrawals continues in the same way, in addition to the reduction of the groundwater storage of the plain, the quality of the remaining water storage will also decrease. This causes more serious problems in the agricultural situation of the region. The results of the implementation of quantitative and qualitative model in order to investigate the infiltration of polluted water from the landfill based on the concentration of pollution, showed that there is a high probability of the infiltration of polluted particles from the south wall side to the aquifer during periods of rainfall Event that current is run in the channels accidently. and then the expansion to the sea will actually occur due to the drop in the water level of the Caspian Sea. Water infiltration is more likely in the eastern regions than in the western regions. The reason for choosing the spread of pollution from the eastern waste disposal site in order to show the accumulation of polluted particles and the repulsion from the sea was the same. It is suggested that in the field of policy making, in order to control the plain's leachate crisis, appropriate bed construction and walling of the waste accumulation area should be applied based on the flow direction.

Keywords: Pollution diffusion, Babol, Groundwater, leachate waste

10.30495/WSRCJ.2023.72853.11370

مقاله پژوهشی

بررسی انتشار آلودگی در محیط متخلخل آبخوان بابل با استفاده ازمدل‌های MODFLOW و MODPATH

یاسر قندهاری[1]، علیرضا زمانی نوری[2*] و بابک امین نژاد[3]

۱) گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.
۲) گروه مهندسی عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه ازاد اسلامی، تهران، ایران.
۳) گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: dr.zamani1979@gmail.com

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم
شماره ۲ (۵۰)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۴/۲۷

صفحات: ٦٦-۵۳

چکیده:

زمینه و هدف: با توجه به افت شدید آب‌های زیرزمینی دشت‌های کشور به دنبال برداشت بی رویه از آنها برای مصارف کشاورزی، مدیران به دنبال راهکارهای مدیریت و احیا سفره‌های آب زیرزمینی هستند. یکی از راهکارهای جبران افت سطح آب زیرزمینی که خود از موثرترین عوامل نابودی ظرفیت تغذیه و افزایش کیفیت در پهنه آب زیرزمینی است، سناریوهای کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی و تهیه طرح-های ممنوعیت با کمترین عدم قطعیت براساس حساسیت ناحیه‌ای به آلودگی است. هدف از این تحقیق پیش‌بینی شرایط انتشار جریان و آلودگی منطقه بر اساس مدل‌های عددی است. شبکه تراز و جهت جریان آب زیرزمینی دشت با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW در یک دوره بلند مدت و توسعه مدل پیش‌بینی با استفاده از عملیات واسنجی و صحت سنجی بر دوره پایه مطالعاتی انجام شود تا بتوان به اجرای سناریوهای پیش‌بینی از طریق اعمال محدودیت و کاهش برداشت بر منابع بهره برداری آبخوان، و مشخصاً چاه‌های کشاورزی، تا مرحله استخراج هیدروگراف پایدار دشت دست یافت.

روش پژوهش: این تحقیق با هدف تخمین و پیش‌بینی وضعیت آلودگی رخ داده در سایت آلودگی شهری، با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای MODFLOW و MODPATH در نرم افزار GMS انجام شد. برای رسیدن به این هدف در مرحله اول، مدل عددی جریان آبخوان بوسیله کد MODFLOW تهیه و کالیبره گردید. سپس کد MODPATH برای ردیابی ذرات آلوده به روش پیشرو در حالت ماندگار مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله دوم، تاثیر سناریوی افزایش و کاهش پمپاژ از چاه‌های بهره برداری بر زمان سیر، طول مسیر و ناحیه گیرش ذرات شیرابه منتهی به آنها به روش پسرو پیش‌بینی و ارزیابی شد. در مرحله سوم، ردیابی ذرات منتهی به چاه‌های نمونه برداری کیفی در دشت به روش پسرو در حالت ماندگار پیش‌بینی و ارزیابی شد.

یافته‌ها: مدل جریان آب زیرمینی با توجه به رویکرد خودکار واسنجی و صحت سنجی، کمترین انحراف آماری را بر روی پارامترهای بهینه-سازی ایجاد نمود. همچنین مدل کیفیت انتقال ذرات بر روی مدل پیش‌بینی جریان آب‌های زیرزمینی به درستی اجرا شد. در آبخوان بابل، محدوده دفن پسماند در حیطه خارج از آبخوان تعیین شده، اشباع است. مشاهده شد، با تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی انتقال ذرات ابر آلودگی پسماند، تخمینی از غلظت به مرزهای تراوا و شبکه آبراهه‌ای اطلاق گردید. به این معنی که در شبیه‌سازی انتقال ذرات، در اینجا منبع گسترش آلودگی، شبکه آبراهه‌ای و مرزهای تراوایی است که مستقیماً در دوره‌های بارندگی و بخصوص طغیان‌های سیلابی، از آلودگی متاثر خواهند بود. حد غلظت به صورت ارقام متغیر بر پایه تغذیه و بارش در محدوده و برابر با آستانه پایدار اولیه مورد تحقیق (لندفیل) به مدل داده شد. بر اساس نمودار تجمعی غلظت خروجی از مرزهای تراوا و مسیل جریان در ناحیه جنوب شرقی نیز روند تغییرات نمودار غلظت ابر آلودگی، در مدل‌سازی کیفی دشت نشان می‌دهد که در دوره پیش‌بینی، افزایش غلظت به شکل خطی بالا خواهد رفت. . با توجه به اینکه محل قرارگیری دفع پساب در محدوده خارج از دشت می‌باشد، سرعت افزایش آلودگی تا دوره پایانی شبیه‌سازی ابتدایی چندان بالا نبوده است. با این حال، علت بالا رفتن حجم انباشت غلظت را می‌توان به وجود مرزهای تراوا و افت شدید آب‌های زیرزمینی در این ناحیه ربط داد. به عبارتی دیگر، با پایین رفتن بیش از اندازه تراز آب‌زیرزمینی در محدوده اشباع دشت، جهت جریان به سمت آبخوان با سرعت بالاتری حجم آب آلوده را منتقل خواهد کرد.

نتایج: چنانچه وضعیت برداشت‌های آب‌های زیرزمینی به همین صورت ادامه یابد، علاوه بر کاسته شدن از ذخایرآب‌های زیرزمینی دشت، کیفیت ذخایرآب باقیمانده نیز کمتر خواهد شد. این امر موجب بروز مشکلات جدی‌تر در وضعیت کشاورزی منطقه می‌شود. نتایج اجرای مدل کمی و کیفی به منظور بررسی نفوذ آب آلوده لندفیل بر پایه تراکم آلودگی، نشان داد با احتمال بالا نفوذ ذرات آلوده از سمت دیواره جنوبی به سمت آبخوان در دوره‌های بارش رخدادی که جریان به صورت تصادفی و در مسیل‌ها جاری می‌شود و سپس گسترش تا دریا عملا به دلیل افت تراز آب دریای خزر رخ خواهد داد. نفوذ آب در نواحی شرقی محتمل تر از نواحی غربی است. دلیل انتخاب انتشار آلودگی محل دفع پسماند شرقی به جهت نمایش انباشت ذرات آلوده و پس زدگی از دریا نیز همین بوده است. پیشنهاد می‌شود تا در حوزه سیاست گذاری، به منظور کنترل بحران شیرابه دشت، بسترسازی مناسب و دیواربندی محدوده انباشت زباله بر اساس جهت جریان اعمال شود.

کلید واژه‌ها: انتشار آلودگی ، بابل، آب زیرزمینی، شیرابه زباله

10.30495/WSRCJ.2023.72853.11370

مقدمه

بررسی تئوریک و نرم‌افزاری برای دستیابی به بهترین مدل-های تحلیل آبخوان‌ها در حیطه رخداد کاهش کیفیت آب، به عنوان یک دغدغه بزرگ دارای منابع متعددی از مطالعات می-باشد. در این حوزه با تمرکز بر کدهای ریاضی که قادر به استخراج بهترین پیش‌بینی از شرایط یک منبع آب در لایه‌های زمین هستند، همچنین روش‌های های‌های بررسی ناهنجاری، تحلیل مطالعات و تجربیات گذشته در منابع داخلی و خارجی مد نظر بوده است. با این حال در زمینه ترکیب روش‌های مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختار آبخوان و تحلیل آماری خروجی‌های مدل‌های تفاضل محدود در ترکیب با روش‌های عددی، مطالعات کمتری صورت پذیرفته است. زانینی و سلیکو[1] (۲۰۱۷) در یک تحقیق بیان کردند که مدل MODFLOW امروزه محبوب ترین ابزار مدل سازی در تحقیق جریان آب در سفره‌های زیرزمینی و در مدل سازی آبخوان‌ها است. برای ساده سازی رابط MODFLOW، GUIهای (منظور از GUIها رابط-های گرافیکی کاربر هستند. یعنی نرم‌افزارهایی که در محیط ویندوز بین کاربر و خود مدل‌های عددی به منظور تسریع و راحتی اجرای محاسبات واسطه می‌شود. در اینجا GMS برای مدل جریان آب زیرزمینی مصداق این واسطه هست) مختلف برای ایجاد فایل‌های تعریف مدل و برای تجسم و تفسیر نتایج به دست آمده است. شبیه‌سازی شبیه‌سازی از منظر استفاده از مدل های کیفیت آب به جهت تصمیم سازی در کنترل بحران می‌توان به موارد زیر مشابه با وضعیت موجود در منطقه مطالعاتی این مقاله اشاره کرد.

چادهاری و راهنما (۲۰۲۳) در یک تحقیق بیان کردند که رشد سریع شهرنشینی و فرآیندهای صنعتی شدن از جمله فعالیت‌های انسان‌ساز منجر به آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود که برای استفاده انسان ناامن می‌شود. در این تحقیق، جریان آب زیرزمینی و مهاجرت آلاینده‌ها از سفره‌های زیرزمینی شهر رجشاهی با استفاده از کدهای MODFLOW و MT3DMS مدل سازی شد. ModelMuse، یک رابط کاربری گرافیکی (GUI)، برای اجرای کدها استفاده می‌شود و داده‌های هیدرولوژیکی و زمین شناسی منطقه به عنوان پارامترهای ورودی برای مدل استفاده می‌شود. فاصله سفر پنج آلاینده انتخاب شده مانند کروم (کروم)، مس (مس)، منگنز (منگنز)، سرب (سرب) و روی (روی)، از منبع (به عنوان مثال محل دفن زباله)، مطابق با زمان سفر شبیه‌سازی شد. از ۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۵۰ سال. نتایج تحقیق نشان داد که فاصله مهاجرت آلاینده‌ها در طول زمان افزایش می‌یابد و از یک روند لگاریتمی پیروی می‌کند. در بین آلاینده‌ها، نتایج مدل پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد که غلظت کروم و سرب در آب‌های زیرزمینی بیش از ۹۰ درصد از استانداردهای آنها در طول دوره ۵۰ ساله متفاوت است، که نشان می‌دهد این دو آلاینده اصلی‌ترین آلاینده‌های آلاینده آب‌های زیرزمینی در آینده هستند. آینده. این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم گیری موثر برای نظارت بر حمل و نقل آلاینده آب‌های زیرزمینی برای یک مکان خاص استفاده شود.

رجاییان و همکاران (۲۰۲۳) در یک تحقیق بیان کردند که با توجه به مسائل مختلف کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی که ناشی از رشد و توسعه جمعیت است، اجرای طرح‌های جامع و اتخاذ تدابیر مدیریتی در جهت حفاظت و احیای منابع آب زیرزمینی بسیار توصیه می‌شود. در این راستا ارزیابی اقدامات مدیریتی مختلف ضروری است زیرا بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان تصمیمات مناسبی در مورد نحوه کنترل مصرف آب به عنوان بخش اصلی سیاست‌های آتی اتخاذ کرد. منطقه مطالعاتی هشتگرد در استان البرز ایران قرار دارد و نیازمند تصمیم گیری‌های مناسب در خصوص نحوه کنترل کاهش شدید منابع آب زیرزمینی و کاهش کیفیت است. میانگین کسری ذخیره سازی ۴،۰۸ میلیون متر مکعب در سال طی سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۶ محقق شد و کیفیت آب کاهش یافت. پژوهش حاضر به بررسی تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW و MT3DMS در پاسخ به طرح‌های مدیریتی مختلف پرداخته است. طرح‌های مدیریتی مختلف بر اساس یک طرح ملی به نام «طرح احیای آبخوان» برای افق ۲۰ ساله (۲۰۱۶-۲۰۳۶) اعمال شد. مشخص شد که با مسدود کردن چاه‌های کشاورزی غیرمجاز و اصلاح پروانه چاه‌های کشاورزی مجاز در کل سطح آبخوان، ذخیره‌سازی به طور متوسط ۷،۲۳ میلیون متر مکعب در سال افزایش می‌یابد و غلظت نیترات و سولفات ۰،۰۶ و ۱،۱۴ میلی‌گرم در لیتر در سال به ترتیب کاهش می‌یابد. تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب تصفیه شده تأثیر بسزایی در کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت آب دارد، اگرچه تأثیر مطلوبی بر سطح آب زیرزمینی نداشته است. در این حالت غلظت نیترات و سولفات به ترتیب ۰/۵۳ و ۲/۲۴ میلی گرم در لیتر در سال کاهش می‌یابد. ژانگ و همکاران[2] (۲۰۱۷)، در یک تحقیق روش رگرسیون subagging برای برآورد حالات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی بکار بردند. در مطالعات این پژوهشگران به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به آب‌های زیرزمینی با عدم قطعیت مرتبط با برآورد روند، یک روش رگرسیون SBR را پیشنهاد کردند. آنها اعلام کردند که در پیاده سازی‌ها، مشخص شده است که روش SBR به صورت بالقوه برای توسعه بیشتر به عنوان یک ابزار موثر تشخیص ناهنجاری و یا شناسایی شکل پرت در داده‌های وضعیت آب-های زیرزمینی مانند سطح آب‌های زیرزمینی و

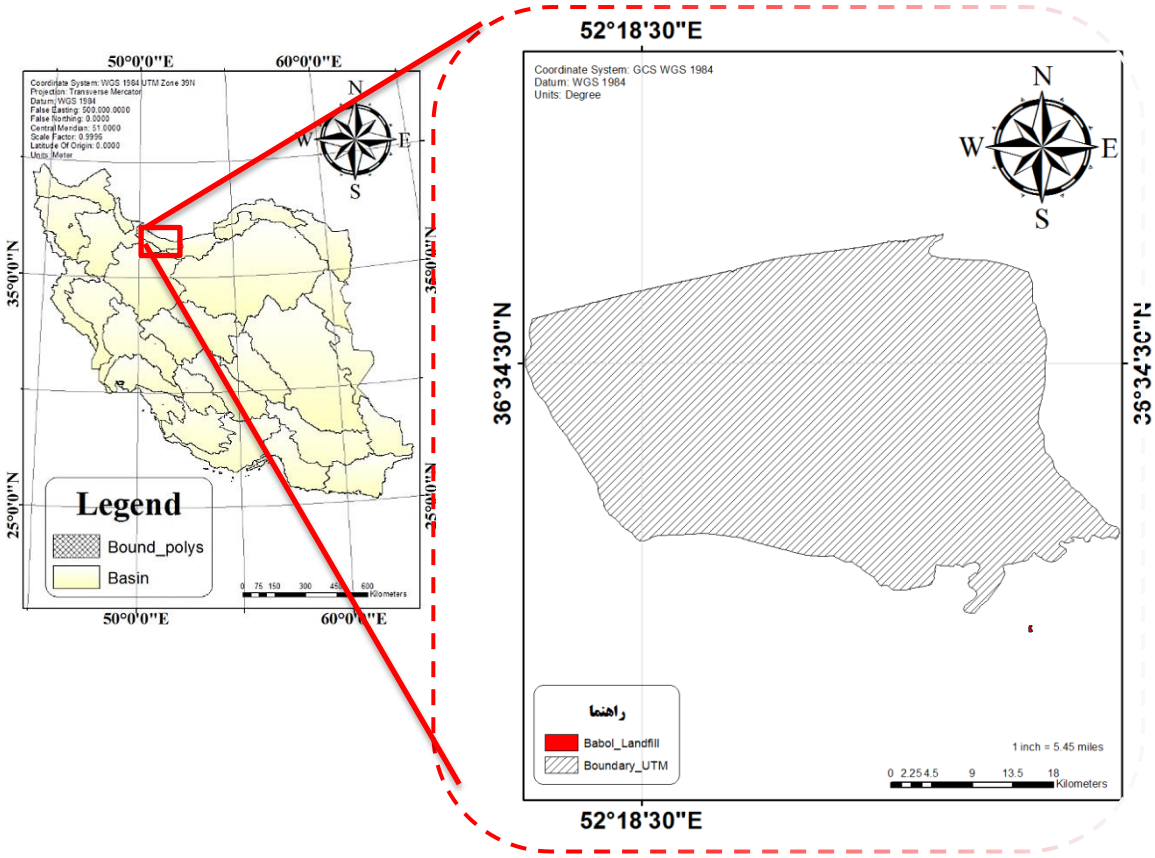
غلظت آلودگی کارا است. ژئونگ و همکاران[۳] (۲۰۱۷)، در یک پژوهش اقدام به شناسایی داده‌های پرت با توزیع غیر گاوسی آب‌های زیرزمینی بر مبنای ارزیابی اثر کلی روند دراز مدت کردند. در تحقیق این پژوهشگران، از سه روش شناسایی داده پرت - قاعده سیگما سه محدوده بین چارکی و میانگین انحراف مطلق که از روش رگرسیون گروهی استفاده می‌کنند، با توجه به خصوصیات غیر گاوسی داده‌های آب زیرزمینی استفاده کردند. روش-های پیشنهادی آنها می‌توانند به عنوان ابزار بالقوه برای شناسایی ناهنجاری‌های آینده با بهره گیری از آموزش مدل بر اساس داده‌های موجود مورد استفاده قرار گیرند. البته با رویکرد صرف مدل سازی و انحرافات عمده پارامتری آنها، درک فصلی و جزیره‌ای از سیستم‌های طبیعی منجر به حصول تصمیم‌های مخرب مدیریتی با توجه به وجود تضاد منافع ذی نفعان و تصمیم سازان می‌گردد. به همین دلیل است که تعیین و جانمایی دقیق آسیب پذیری‌ها به صورت یکپارچه، هزینه دستیابی به یک اکوسیستم پایدار را بسیار کاهش می‌دهد (Minh et al, 2020). در یک سیستم تصمیم سازی محلی، تعیین دقیق شرایط نهایی مستلزم وجود مطالعات مستند می‌باشد. مستند سازی یک ناحیه دقیق منتخب برای تعریف نقشه آسیب پذیری دشت در خطر رخدادهای محتمل افت کیفیت، تنها با استفاده از نقشه‌های مکانی میسر خواهد بود. یک راهکار کاربردی، استفاده از نقشه‌های دارای ارقام کمی به منظور تعیین شانس کاهش خطرات ثانویه هر تصمیم مدیریتی است. بنابراین استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی بعنوان روشی ارزان و سریع در تحقیق چگونگی حرکت، بررسی بیلان و مدیریت بهره برداری از آب‌های زیرزمینی، از اهمیت قابل توجهی برخوردار شده است. بر اساس نوع فرضیات معرف پدیده مورد نظر، مدل‌های مختلفی از نوع جعبه سیاه، مدل مفهومی و مدل ریاضی (تحلیلی و عددی) به عنوان نمایشگر سیستم وجود دارند. پس از مدل‌های نوع جعبه سیاه، می‌توان مدل‌های مفهومی را به واقعیت نزدیک تر دانست. این نوع مدل‌ها با توجه به آنچه در طبیعت آبخوان وجود دارد، مانند شرایط زمین شناسی، نوع جریان، اعم از ورقه‌ای و یا متلاطم، مؤلفه‌های جریان ورودی و خروجی، شرایط مرزی و غیره تهیه می‌شوند (آبفا، ۱۳۹۰). از منظر پارامترهای کیفیت آب نیز، در فضای مکانی خصوصیات جریان آب وابسته به چگالی می می‌باشد، که الزام تحلیل یکپارچه و پیوسته با توجه به این عامل را تاکید می‌کند. گرچه این نوع مدل‌ها در جهت آگاهی و شناخت اولیه از شرایط حاکم بر محیط آبخوان کمک شایانی می‌نمایند، ولی به دلیل توصیفی بودن آن ها، نمی‌توان نتایج را به صورت عدد و رقم ارایه کرد؛ و به همین جهت در مدیریت آبخوان مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. بنابراین برای شناخت بهتر آبخوان از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. در عین حال ساختار پیچیده آبخوان‌ها باعث می‌گردد تا مدل‌های ساده چند متغیره در تولید خروجی‌های پیش‌بینی برای بازه‌های زمانی آتی، چندان توانمند نباشند. از این رو استفاده از کدهای عددی که در یک شبکه تعدیل یافته از سلول‌های تفاضل محدود اجرا می‌شوند، به صورت کاراتری در قالب سناریوهای پیش‌بینی، قادر به نمایش اعمال شرایط مختلف تصمیم گیری بر ظرفیت آبخوان باشند (Duttagupta et al., 2020).

در این تحقیق بر اساس یک شبیه‌سازی بزرگ مقیاس، اثر انتشار آلودگی بر محیط متخلخل آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تحقیق، تعیین رفتار جریان آب زیرزمینی در ناحیه متاثر از احداث مکان دفن پسماند (لندفیل) بابل است. لندفیل در یک فاصله اثر گذار بر تغییرات تراز آب‌های های‌های زیرزمینی دشت بابل در یک دوره آبگیری منجر به تغییرات در کیفیت آب سفره آبی شده است. با توجه به لزوم تعیین جنبه-های فرعی توسعه زیرساخت‌های انسانی در کنترل آلودگی، توسعه یک مدل منعطف در تعیین و اجرای سناریوهای محتمل از دیگر اهداف مهم این تحقیق بوده است.

مواد و روش‌ها

حوضه‌های درجه دو رودخانه‌های بین سفیدرود و هراز و همچنین محدوده رودخانه‌های بین هراز و قره سو در دامنه-های شمالی سلسله جبال البرز میانی و حاشیه جنوبی دریای مازندران و در امتداد ساحل دریا از دلتای سفید رود تا بندرگز گسترش دارد. حدود جغرافیایی منطقه مورد تحقیق بین طول‌های ۴۹ درجه ۴۵ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۵۴ درجه ۴۴ دقیقه و ۲۲ ثانیه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه ۴۴ دقیقه و ۰۴ ثانیه تا ۳۷ درجه ۲۳ دقیقه و ۳۸ ثانیه شمالی قرار دارد. وسعت این مناطق معادل ۲۹۶۶۸/۳ کیلومتر مربع است که به ۷ محدوده مطالعاتی و ۷۸ زیر حوضه تقسیم شده است. این حوضه در تقسیم بندی کلی هیدرولوژی ایران جزئی از حوضه آبریز دریای مازندران بشمار رفته و از شمال به دریای مازندران، از غرب به حوضه سفید رود، از جنوب به حوضه آبریز کویر مرکزی و دریاچه نمک و از شرق به حوضه آبریز گرگان رود محدود می‌باشد (شکل ۱).

محدوده مطالعاتی بابل- آمل با کد ۱۵۰۱ بین طول‌های بین دو محدوده نوشهر-نور در غرب و قائمشهر-جویبار در شرق با مساحت حدود ۶۸۰۴/۱۱ کیلومترمربع واقع شده است که ۱۴۴۸/۶ کیلومترمربع مساحت آن را دشت و بقیه (۵۳۵۵/۵ کیلومتر مربع) ارتفاعات را تشکیل می‌دهد. بالاترین نقطه ارتفاعی این محدوده ۵۶۷۱ و پایین ترین نقطه با ارتفاع ۲۶ متر از سطح دریای آزاد متر در خروجی حوضه واقع شده است. در این محدوده مطالعاتی ۳۷ ایستگاه باران سنجی وزارت نیرو، ۶ ایستگاه تبخیرسنجی وزارت نیرو و همچنین ۳ ایستگاه

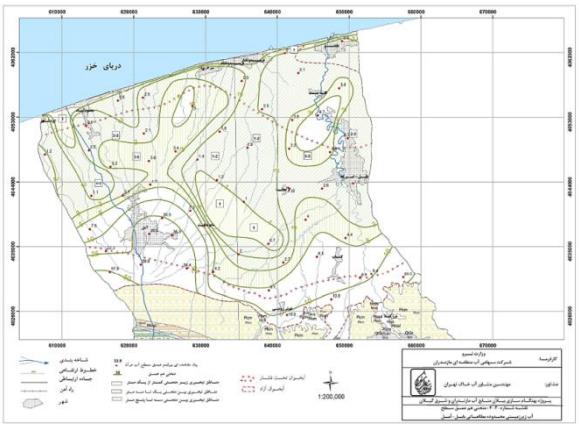


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد تحقیق – آبخوان بابل

سینوپتیک، ۲ ایستگاه کلیماتولوژی و ۲۹ ایستگاه باران سنجی سازمان هواشناسی وجود دارد. تعداد ۶۲۲۷۷ حلقه چاه با برداشت سالانه ۲۳۹/۶۲ میلیون متر مکعب و ۷۸۷۰ دهنه چشمه با تخلیه سالانه ۳۰۹/۲۳ میلیون متر مکعب در این محدوده مطالعاتی شناسایی شده است. حجم کل تخلیه منابع آب‌های زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی برابر با ۵۴۸/۸۵ میلیون متر مکعب در سال است که ۲۵۶/۲۵ میلیون متر مکعب آن مربوط به دشت بابل-آمل و مابقی مربوط به ناحیه ارتفاعات مشرف بر آن می‌باشد. لندفیل بابل در محل جنوب شرقی آبخوان و در موقعیت محصور واقع شده است. با این حال جهت جریان از سمت لندفیل به آبخوان در رخدادهای سیلابی علی رغم پوشش گیاهی وسیع ناحیه می‌باشد. به این صورت که جهت جریانات زیرزمینی نیز به همین شکل منجر به تراکم آلودگی در مرز تراوای دشت است. در این دشت از توزیع همگن چاه‌های مشاهداتی با تراز آب برداشت شده ماهانه به منظور تطبیق نتایج مدل با واقعیت زمین استفاده شد. چاه‌های مذکور در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. موقعیت حفر چاه‌های مشاهداتی در محدوده آبخوان بابل

در این تحقیق با هدف تخمین و پیش‌بینی وضعیت آلودگی رخ داده در سایت آلودگی شهری، با استفاده از شبیه سازهای عددی MODFLOW و MODPATH در نرم افزار GMS انجام شد.



شکل ۳. منحنی‌های هم عمق آب‌های زیرزمینی در محدوده آبخوان

در این تحقیق با هدف تخمین و پیش‌بینی وضعیت آلودگی رخ داده در سایت آلودگی شهری، با استفاده از کدهای عددی MODFLOW و MODPATH در نرم افزار GMS انجام شد.

برای رسیدن به این هدف در مرحله اول، مدل عددی جریان آبخوان بوسیله کد MODFLOW تهیه و واسنجی شد. سپس کد MODPATH برای ردیابی ذرات آلوده به روش پیشرو در حالت ماندگار مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله دوم، تاثیر سناریوی افزایش و کاهش پمپاژ از چاه‌های بهره برداری بر زمان سیر، طول مسیر و ناحیه گیرش ذرات شیرابه منتهی به آنها به روش پسرو پیش‌بینی و ارزیابی شد. در مرحله سوم، ردیابی ذرات منتهی به چاه‌های نمونه برداری کیفی در دشت به روش پسرو در حالت ماندگار پیش‌بینی و ارزیابی شد. پس از توسعه مدل مفهومی، در گام اول مدل به فرم پایدار و به شکل پیشرو با موتور MODFLOW 2005 اجرا شده و نتایج با توجه به عدم قطعیت حاکم در برخی از پارامترهای ورودی با خطای بالا همراه گردید. در این پژوهش پس از آزمون هر سه روش در هر دو حالت پایدار و ناپایدار، نهایتا موتور محاسباتی PCGN با ۱۰۰ تکرار Outer و Inner و با حد بحرانی تغییرات همگرایی ۱ متر و همچنین حد بحرانی خطای همگرایی ۱ متر مکعب در روز انتخاب گردید.

به منظور انجام عملیات واسنجی در شرایط پایدار یا ماندگار، ماه ابتدایی سال اول بازه تاریخی شروع مدل-سازی، انتخاب و بر اساس خطای بالای حاصله در گام اول شبیه‌سازی (مرحله اجرای پیشرو مدل ماندگار) و همچنین جهت جلوگیری از بایاس شدید آماری بر روی یک پارامتر منحصر به فرد، اقدام به واسنجی تمامی پارامترهای دارای عدم قطعیت شد. پارامترهای هدایت هیدرولیکی افقی، ناهمسانگردی افقی هدایت هیدرولیکی، تغذیه از سطح؛ با اختصاص یک عدد کلیدی منفی و مجزا به پوشش‌های مدل مفهومی و با حدس اولیه در حدود کمینه و بیشینه معقول بهینه شد. پس از چهار بار اجرای مدل واسنجی با ۳۰ بار تکرار، مقادیر بهینه نهایی پارامتر تغذیه آمده است. همچنین مقادیر بهینه پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی و ناهمسانگردی افقی نیز در قالب نقاط پایلوت استخراج گردید.

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW در نرم افزار GMS

از جمله کدهایی که کاربرد گسترده‌ای داشته و از مقبولیت بالایی نزد هیدروژیولوژیست‌ها برخوردار بوده و در این تحقیق از آن برای حل معادلات جریان آب‌های زیرزمینی در آبخوان بابل استفاده شده است کد رایانه‌ای MODFLOW می‌باشد. لذا در این قسمت به ویژگی‌های این کد رایانه‌ای اشاره شده است. این ماژول‌ها به صورت بسته گروه‌بندی شده‌اند که هر بسته در ارتباط با قسمتی از سیستم هیدروژیولوژیک به‌کار گرفته می‌شود. تقسیم برنامه به تعدادی برنامه‌های فرعی باعث می‌شود که استفاده کننده به راحتی بتواند مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی نماید (Kresic,2007). این مدل در واقع حل تفاضل محدود برای معادلات دیفرانسیل جزیی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی می‌باشد. مدل MODFLOW جهت شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی در سفره‌هایی با حالت مرزی مشخص و با فرض مقادیر لازم جهت هدایت هیدرولیکی و دیگر پارامترهای سفره کاربرد دارد (Hoaglund,2002). برنامه مورد نظر به زبان فرترن ۷۷ می‌باشد و بر روی بسیاری از رایانه‌ها قابل اجرا است. طراحی قطعه‌های برنامه این توانایی را به کاربر می‌دهد که برای فرآیندهای خاص هیدروژیولوژیکی، فقط ماژول‌هایی که برای تحقیق سیستم مورد نظر نیاز دارد، انتخاب نماید و قطعه خاصی را فعال یا غیرفعال کند. این ویژگی‌ها باعث شده است که مدل MODFLOW امروزه به عنوان کارآمدترین و قابل دسترس‌ترین مدل آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. وجود بسته‌های مختلف در این مدل سبب گردیده که از آن جهت تحقیق انواع آبخوان‌ها استفاده گردد (Zhang,2002).

شبیه‌سازی انتقال آلودگی در جریان آب زیرزمینی

مدل سه بعدی انتقال که به صورت خلاصه MT3D نامیده می‌شود، در سال ۱۹۹۰ توسط زینگ در موسسه پاپادوکس [۴] و شرکا توسعه داده شده است (Aquaveo, 2020). در سال‌های گذشته ویرایش‌های مختلفی از این مدل در شبیه‌سازی انتقال آلودگی بکار گرفته شده است. قابلیت‌ها و مجموعه‌هایی از جمله واکنش‌های ژیوشیمی و بیولوژیکی به آن اضافه شده و با مدل MODFLOW تلفیق گردیده است. این ابزار تحت عنوان مدل کیفیت جریان شناخته شده است.

در امتداد محاسبات مدل کمی، با استفاده از رابطه تفاضل محدود پسرو کد کیفیت جریان بر اساس رابطه حاکم بر انتقال آلودگی، حرکت شیرابه از سطح را مدل‌سازی خواهد کرد.

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C^k}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(\theta v_i C^k)+q_s C_s^k+\sum R_n \qquad (۱)$$

که در آن θ تخلخل مواد، C^k غلظت محلول آلاینده k، t زمان، x فاصله در راستای محورهای کارتزین، D_{ij} تانسور ضریب انشار هیدرولیکی، v_i سرعت جریان آب در محیط متخلخل یا سرعت جریان دارسی، q_s نرخ جریان حجمی در واحد حجم آبخوان، C_s^k غلظت آلاینده k جریان چاه و چشمه و $\sum R_n$ واحد واکنش شیمیایی است.

مطابق معادله حاضر، می‌توان گفت شبیه‌سازی مدل انتقال تنها بر روی مدل کمی جریان آب‌های زیرزمینی واسنجی شده و با کمترین انحراف آماری پارامترهای موثر بر سرعت جریان و بر طبق دقیق‌ترین مدل مفهومی همگرای ممکن امکان پذیر خواهد بود. عبارت $\sum_{k-1}^{N} R_k$ را می‌توان به صورت ذیل نوشت.

$$\sum_{k=1}^{N} R_k=\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}-\lambda\left(\mathrm{C}+\frac{\rho_b}{\theta}\bar{C}\right) \qquad (۲)$$

که در آن ρ_b وزن مخصوص ظاهری محیط متخلخل با ابعاد ML^{-3} و $\bar{C}$ غلظت آلاینده‌های جذب شده در خاک با ابعاد MM^{-1} است. اگر عبارت $\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$، به صورت رابطه موجود نوشته شود؛

$$\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}=\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial C}{\partial t}\frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \qquad (۳)$$

آنگاه با جایگزین کردن معادلات داریم؛

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\delta}{\delta x_i}\left[D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_i}\right]-\frac{\partial}{\partial x_i}(CV_i)+\frac{q_s}{\theta}C_s+\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial C}{\partial t}\frac{\partial \bar{C}}{\partial C}-\lambda(C+\frac{q_s}{\theta}\bar{C}) \qquad (۴)$$

$$R\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\delta}{\delta x_i}\left[D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_i}\right]-\frac{\partial}{\partial x_i}(CV_i)+\frac{q_s}{\theta}C_s+\lambda(C+\frac{q_s}{\theta}\bar{C}) \qquad (۵)$$

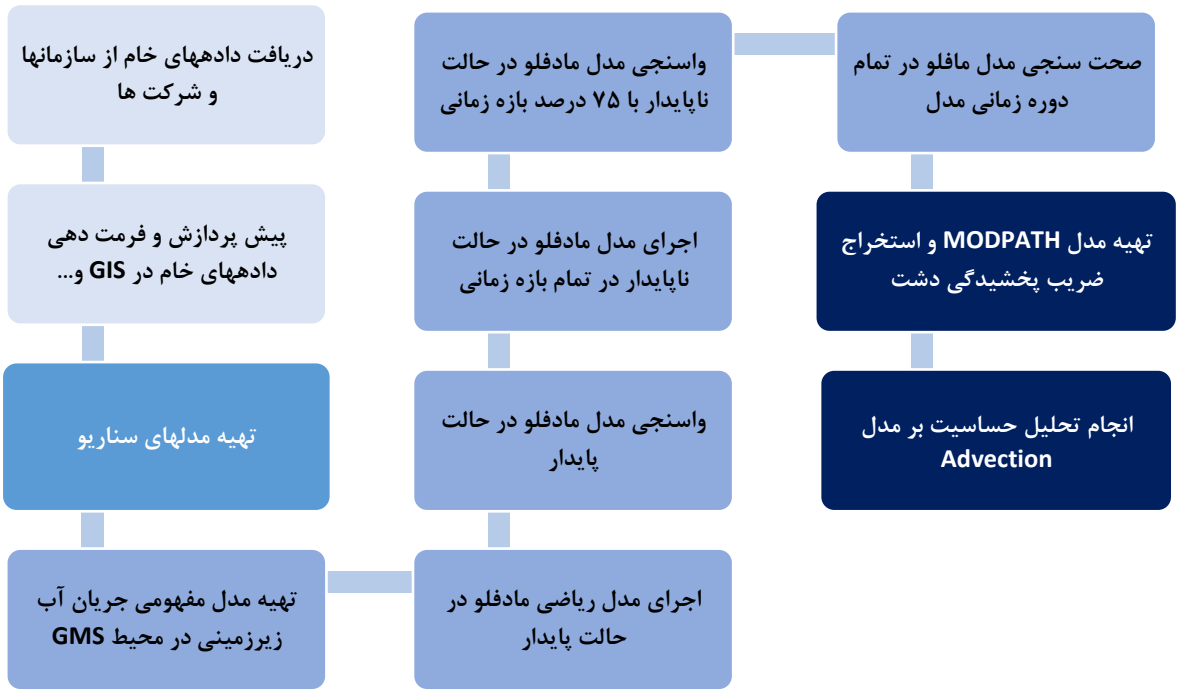
رابطه اخیر، معادله حاکم و اساسی در مدل انتقال به شمار می‌رود که در آن R فاکتور تأخیر نام دارد.

$$R=1+\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \qquad (۶)$$

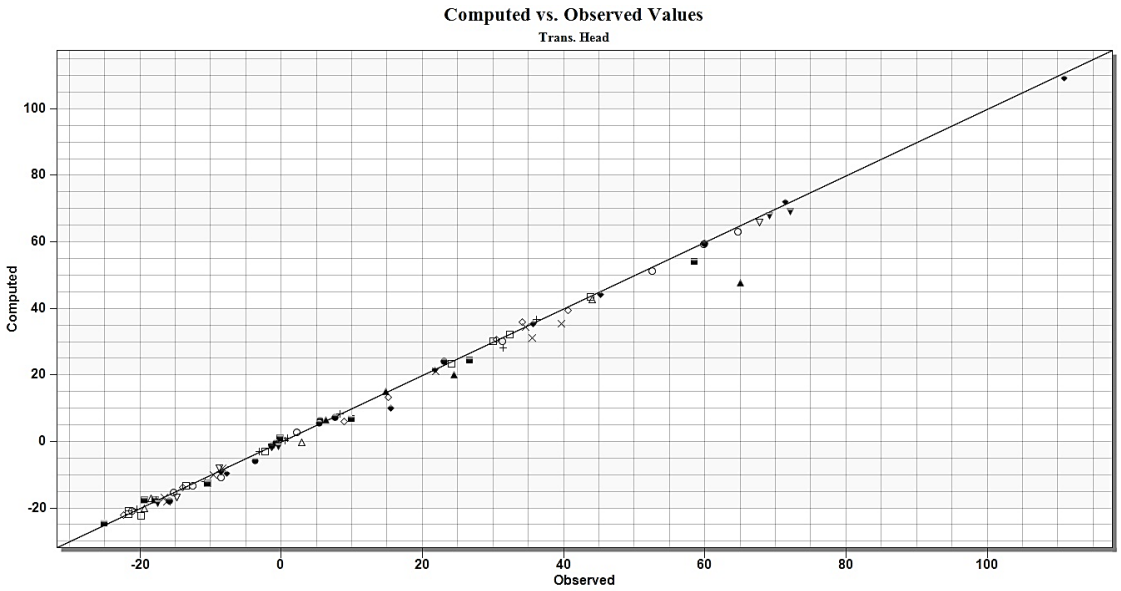
معادلات یاد شده توسط پارامتر v_i به معادله جریان ارتباط پیدا می‌کنند.

$$V_i=-\frac{K_{ii}}{\theta}\frac{\partial h}{\partial x_i} \qquad (۷)$$

که در آن K_{ii} مؤلفه اصلی تانسور هدایت هیدرولیکی با ابعاد LT^{-1} بوده و K بار هیدرولیکی با ابعاد L است که با حل معادله سه بعدی جریان آب‌های زیرزمینی به دست می‌آید. شکل ۴ گردش محاسبات در این پژوهش را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. مراحل اجرای مطالعه در سه بخش کلی



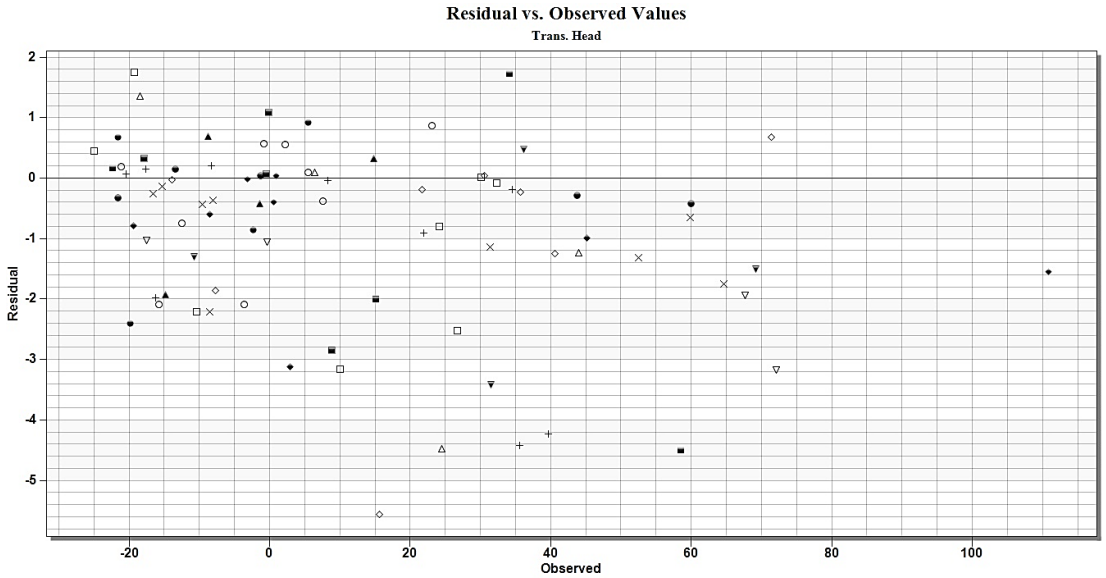
شکل ۵. خطای مقادیر محاسباتی در مقابل داده‌های مشاهداتی صحت سنجی

نتایج و بحث

نتایج مدل

پس از طراحی مدل آب زیرزمینی و اعمال داده‌ها، سپس اجرای مدل و در نهایت تحلیل حساسیت و واسنجی، برای تأمین اعتبار مدل و سنجش دقت در پیش‌بینی وضعیت آینده‌ی آبخوان، صحت‌سنجی مدل صورت گرفت (شکل ۵). برای اطمینان از مدل ساخته شده در آبخوان بابل، فرآیند واسنجی در یک دوره ۱۲۷ ماهه صورت پذیرفت و بنابراین با توجه به ۱۲۷ ماهه بودن بازه مطالعاتی، گام صحت‌سنجی عملا برای ۲۵٪ ماه نهایی از ماه انتهایی شکل گرفت که خطای اندک در مرحله صحت‌سنجی موید دقت در واسنجی صورت گرفته و صحت هیدروگراف سلول‌های شبکه ریاضی بود. نمودار شبیه-سازی سطح آبخوان در دوره زمانی ۱۲۷ ماهه برای همه چاه-های مشاهداتی، با حداقل خطای مطلوب حاصل گردید که ذیلا نمودار خطا برای این مرحله آمده است (شکل‌های ۵ و ۶).

از مهم ترین عوامل موثر بر تعیین نقشه مسیر یابی که مترادف با مفهوم ضریب پخشیدگی است، بیلان می‌باشد. Flow_Budget یک موتور ریاضی است که توسط USGS برای محاسبه بیلان آبی در مدل MODFLOW توسعه یافته است. اعداد استخراجی از موتور FlowBudget بر اساس مدل کمی در حالت غیرماندگار مرحله واسنجی نشان می‌دهد، در دوره ۱۲۷ ماهه شبیه‌سازی به شکل متوسط روزانه سهم مشخصی از ذخیره ثابت آبخوان کاسته شده است. این کاهش با توجه به کاهش سطح آب در آبخوان بابل، معادل با کسری مخزن



شکل ۶. خطای Residual مقادیر محاسباتی در مقابل داده‌های مشاهداتی صحت سنجی

در طول دوره ۱۰ ساله بوده است. مقدار آب ورودی به محدوده علاوه بر وابستگی به حالت فیزیکی آبخوان بابل، نظیر ضرایب هیدرودینامیکی ، به مقدار دبی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری وابستگی مستقیم دارد. بنابراین با افزایش برداشت از آبخوان تغییر در مقدار حجم جریان تبادلی از المان‌های موثر در بیلان قابل انتظار خواهد بود. مدلی که مراحل واسنجی و صحت‌سنجی را پشت سر گذاشته باشد برای پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان مناسب بوده و قادر است با اعمال استرس‌های مورد نظر وضعیت آینده را برای بهبود عملکرد و تصمیمات مدیریتی مشخص کند. در ترکیب با مدل ردیابی ذرات، از پایه محاسباتی جریان به منظور استخراج نقشه ضریب پخشیدگی استفاده می‌گردد. این حالت با تایید مرحله صحت یابی و استخراج عوامل بیلان در تمامی عناصر کلیدی جریان در محدوده دشت بابل میسر بوده است. همچنین بر اساس نقشه تراز آب‌های های‌های زیرزمینی دشت بابل، و با استفاده از ابزار محیط نرم‌افزار GMS خطوط سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی برای تمام محدوده آبخوان و مطابق با کلاسه بندی نمایش بزرگی، مقدار آن رسم شد.

سرعت جریان آب‌های های‌های زیرزمینی در بخش‌های میانه آبخوان از رقم بالایی برخوردار نیست. با این حال به وضوح می‌توان تغییرات عمده در جهت‌گیری در نواحی میانه مشاهده نمود. بیشترین مقدار خطوط سرعت، در نواحی مرزی و در محدوده حاشیه مرزهای تراوا قابل مشاهده است. بنابراین با توجه به حفر چاه‌های فراوان با دبی بهره‌برداری بالا در بخش-های مرکزی آبخوان، نقشه‌های سرعت جریان با ساختار ناهمگن در محدوده دشت بابل تهیه شد.

اجرای مدل انتقال کیفی

به منظور تعیین حرکت جریان از سمت دریا به داخل آبخوان از مدل MODPATH استفاده شد. با این حال به دلیل اینکه دوره محاسباتی در مدل حاضر بسیار کوتاه می باشد. پیش بینی پیشروی شوری دریا به داخل آبخوان مستلزم بررسی های دقیق تری است. از الگوی توزیع همگن (فرض همگنی چگالی و دما) انتقال ذرات با تمرکز بر انتشار آلودگی به داخل آبخوان استفاده شد. به این معنی که در اینجا با بررسی آلودگی شیرابه محل دفع پسماند شهری، برگشت این آلودگی در نواحی هم تراز در تلاقی رود و دریا بررسی شد.

های های‌های **مدل همرفت**

راه حل در نظر گرفته شده برای شرایط همرفت در این تحقیق روش مشخصه‌های ترکیبی است. این روش تلاش می-کند تا روش مشخصه‌ها (MOC[۵]) و روش مشخصه‌های اصلاح شده (MMOC[۶]) را با استفاده از یک طرح سازگار خودکار ترکیب کند. روش مشخصه‌ها در مدل انتقال املاح MOC و MOC3D بصورت گسترده بکار گرفته شده است. یکی از مزیت‌های این روش، قابلیت حل مسائل عددی پیچیده می‌باشد. به همین لحاظ هنگامی که از ذرات زیادی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود بسیار کند عمل می‌کند و نیاز به حافظه کامپیوتری زیادی دارد. این امر عمده‌ترین محدودیت استفاده از این روش به شمار می‌رود.

مدل انتشار

با توجه به روابط ارائه شده، در بسته مربوط به انتشار، مقادیر انتشارپذیری طولی، نسبت آن در طول و عرض و نیز ضریب پخشیدگی مولکولی مؤثر، پارامترهایی است که مدل برای تأثیر دادن پدیده انتشارپذیری ذرات به آن نیاز دارد. مقادیر اولیه پارامترهای مذکور از منابع مرجع استخراج و در طی فرایند شبیه‌سازی بهترین ارزش آن‌ها برای حالت ناپایدار مدل به ترتیب برای TRPT و TRVT که مشخص کننده انتشار ذرات در راستای عمودی و افقی جهات آبخوان می می-باشد، اعداد ۱ و ۰/۱ تعیین شد. بعلاوه ضریب انتشار طولی در این مدل عدد پیش فرض ۵۰ انتخاب گردید.

روند واکنش‌های شیمیایی

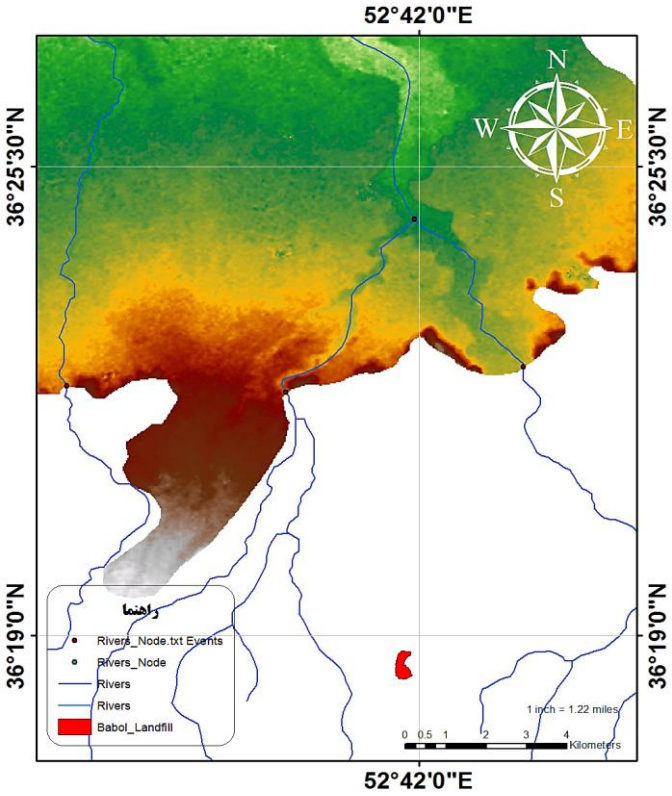
روش استفاده شده در مدل حاضر ایزوترم تعادل خطی با در نظر گرفتن تأثیر عوامل پوسیدگی رادیواکتیو یا تجزیه و تلاشی است. مقادیر پارامترهای ورودی در این بسته برای توده تراکمی ۵۳۵۰۰ میلیگرم در هر متر مکعب، برای ضریب قابت مرحله اول جذف معادل ۰/۰۰۰۰۰۵۸۵، برای نرخ ثابت محلول عدد ۰/۰۰۰۱ و همین مقدار برای پارامتر نرخ ثابت جذب شده، اختصاص داده شد. این ارزش‌ها بر اساس پیش فرض نرم‌افزار بدون تغییر می‌باشند.

به دلیل اینکه موقعیت لندفیل بابل در محدوده خارج از محل سلول‌های شبکه مدل می‌باشد، در توسعه مدل مفهومی انتقال ذرات، حد فاصل سلول‌های شبکه و لندفیل با استفاده از حالت مرزی تعریف شد.

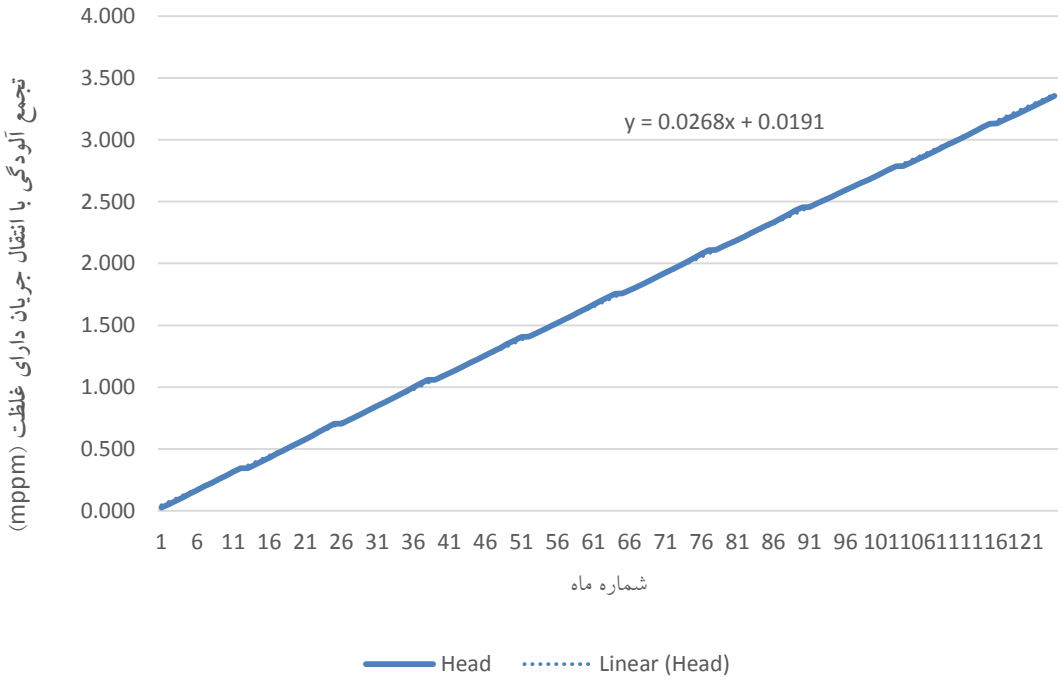
نمودار تجمعی غلظت خروجی از محدوده مرزهای تراوا و رود در ناحیه جنوب شرقی نیز در شکل (۸) نشان داده شده است. روند تغییرات نمودار غلظت ابر آلودگی، در مدل‌سازی کیفی دشت نشان می‌دهد که در دوره پیش‌بینی، افزایش غلظت به شکل خطی بالا خواهد رفت. اگرچه عملاً این فرض به صورت خطی در طبیعت نامحتمل می می‌باشد، اما با توجه به نرخ آلودگی ارائه شده در مدل مفهومی و ارقام ثابت غلظتف صرفا افزایش تراکم مد نظر می‌باشد و نه لزوما بزرگی و مقادیر ارقام.

پس از اجرای مدل کمی و به دنبال آن مدل انتقال آلودگی نتایج گسترش ابر آلودگی به صورت ذیل حاصل شد (شکل ۹).

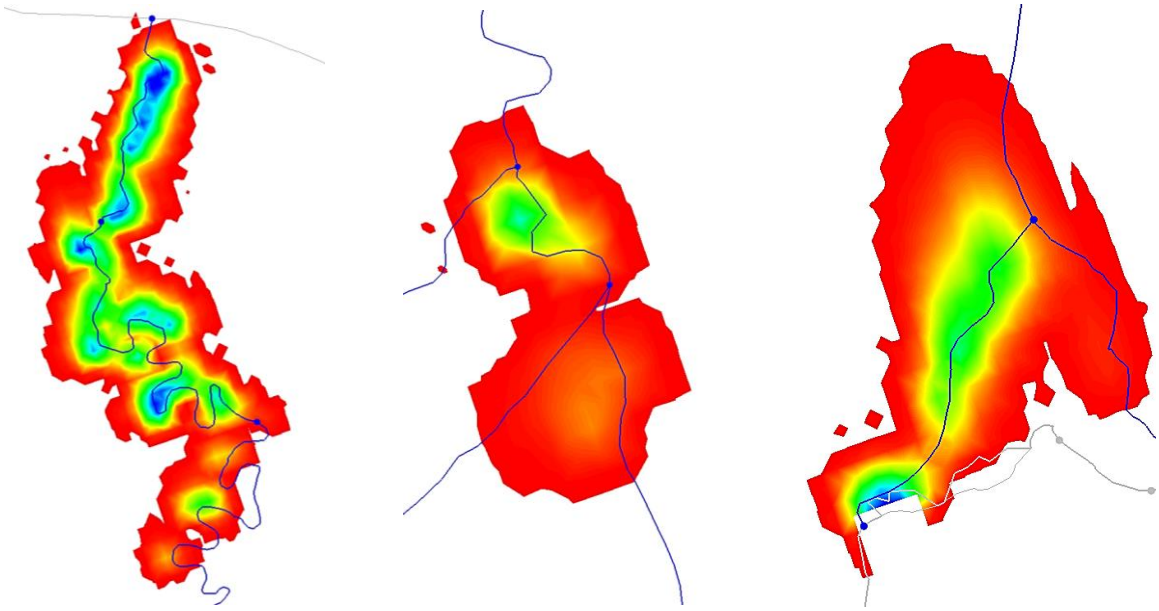
در مجموع با توجه به بافت خاک، شیب و سرعت جریان در این دشت، سه مقطع تجمع و گسترش ابر آلودگی قابل مشاهده می‌باشد. مهم‌ترین بخش انتشار آلودگی در ناحیه جنوبی‌تر مشاهده می‌شود.



شکل ۷. موقعیت آبخوان در مقابل محدوده آسیب لندفیل دشت



شکل ۸. تجمع آلودگی با انتقال جریان دارای غلظت در محدوده دشت

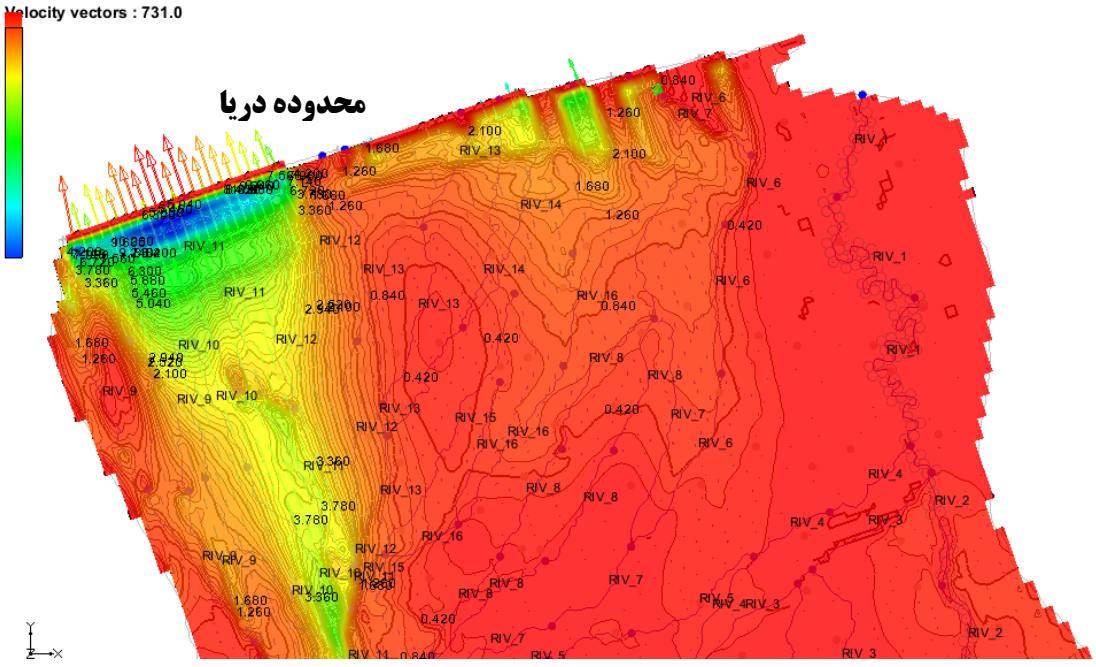


دربخش جنوبی دشت بابل. در بخش میانی دشت بابل. در بخش شمالی دشت بابل.

شکل ۹. موقعیت ابر آلودگی در محدوده آسیب لندفیل دربخش های مختلف دشت بابل

در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که اگرچه در مدل اجرای انتقال ذرات، حالت مرزی آلودگی و همچنین نحوه گسترش جریان در دوره تعیین بیلان، به شکل همگن معرفی شده است، خروجی گسترش آلودگی در برخی مقاطع به شکل تصادفی و با توزیع غیر قابل پیش بینی بوده است. به این معنی که در دوره‌های آتی، با رخدادهایی نظیر تغییر اقلیم و یا تخریب شبکه هیدرومتری، می‌توان انتظار داشت که بخش‌های مقطعی بیشتری درگیر انتشار آلودگی شود.

اکنون با تایید انتقال ذرات تا مرز دریا، احتمال پس زدن آن به داخل آبخوان را معادل بازگشت آب دریا و یا نفوذ آب شور به داخل آبخوان در نظر می‌گیریم (شکل ۱۰).



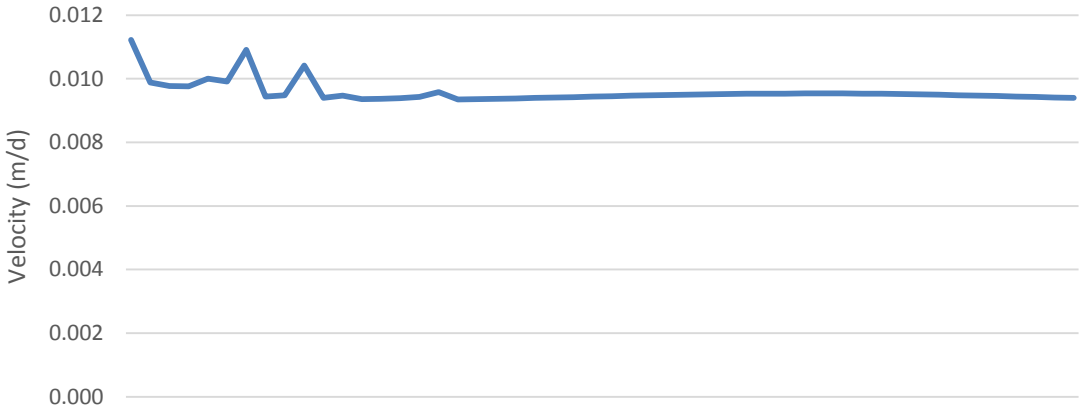
شکل ۱۰. موقعیت نفوذ آب شور از دریای کاسپین به آبخوان بابل

در دو اجرا که حالت دوم شکل بدبینانه بالا زدگی آب دریا را کاهش می داد، احتمال نفوذ آب بررسی شد. با توجه به گسترش شوری با استفاده از موتور بیلان، تعیین تغییرات جرم و غلظت در مدل دوم نیز ممکن است. شکل (۱۱) این تغییرات را نشان می دهد که بر اساس جریان، در گام آخر ۳۰۶۹۹۵۲ کیلوگرم شوری از محدوده کلی آبخوان کاسته شده است (پایان دوره مدل). این به معنی آن است که در کل ۸۳۵۵۸۴ کیلوگرم شوری نسبت به مدل اولیه در این گام در آبخوان انباشت شده است. باید توجه کرد که اگرچه رقم مذکور معادل چیزی کمتر از حتی یک درصد از مقدار کلی جرم شوری مدل سازی است. در همین بازه زمانی صرفا از سمت دریا ۱۶۱۳۱ کیلوگرم شوری از آب دریا به محدوده آبخوان (تمام لایه ها) وارد شده است. اما در شکل واقع گرایانه کاهش آب دریای خزر، ارتفاع آب در دریا پایین آمدگی قابل توجهی داشته است، اما رقم شوری نفوذ کرده به سمت آبخوان ۱۵۹۵،۰۷ کیلوگرم را به صورت کاهشی، صرفا در گام نهایی نشان می دهد.

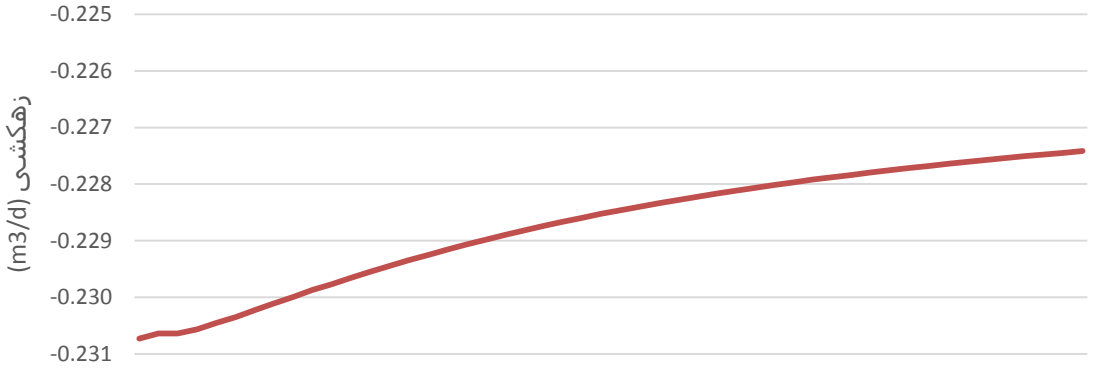
به منظور مقایسه بیلان جریان در دو بخش در یک ستون داده، اختلاف جریان های کلی ورودی و خروجی از محدوده محاسبه شد، می توان مشاهده کرد که اختلاف جریان در در دو مدل حداکثر تا ۹۰۰ متر مکعب در روز است که این مقدار در پایان دوره کاهش می یابد. محاسبات مشابهی برای نواحی غربی نشان می دهد که با عددی مشابه این روند کاملا معکوس نواحی شرقی است که علت آن قطعا بالابودن ارتفاع ناحیه زهکش است. سرعت جریان نیز با استفاده از خلاصه آماری لایه Grid خروجی مدل MODFLOW بدست آمد که مشخص می شود در هر دو مدل وضعیت ناهمسان و متغیر سرعت جریان در دوره دوم به شکل پایدار و همگن عوض می شود (شکل ۱۱).

با توجه به خلاصه آماری لایه Grid سطح آب‌های های‌های زیرزمینی چه در مدل اولیه و چه در مدل دوم، می توان متوسط مقدار تراز آب زیرزمینی و یا پارامترهای دیگر مطرح شده در این تحقیق را (غلظت و سرعت انتشار ذرات) در تمام سلول های آبخوان برای هر گام زمانی محاسبه نماید.

مقدار جریان زهکشی شده از منطقه بر پایه لایه Grid محاسباتی، به صورت آنچه در شکل ۱۲ نشان داده شده است بود. در هر دو مدل اولیه و دوم، جریان زهکش شده در انتهای دوره نسبت به ابتدای آن دارای کاهش حجم (متر مکعب در روز) بوده است. این اختلاف در دو مدل نسبت به ابتدای دوره دارای شکاف بیشتری است. بخوبی می توان مشاهده کرد که با کاهش سطح آب در دریا، افزایش ارتفاع منطقه زهکش منجر به کاهش نفوذ آب شور در مدل دوم بوده است.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات سرعت جریان آب‌های زیرزمینی در مدل های اول و دوم



شکل ۱۲. نمودار تغییرات زهکشی منطقه ساحلی در مدل

نتیجه‌گیری

به منظور ارزیابی عدم قطعیت انتشار آلودگی در محیط متخلخل آبخوان در این پژوهش با استفاده از یک مدل تفاضل محدود جریان آب‌های های‌های زیرزمینی، اقدام به توسعه مدل مفهومی با استفاده از بهترین روش نرم‌افزارمدل‌سازی و طبق داده‌های خام پردازش شده گردید. مدل جریان آب زیرمینی با توجه به رویکرد خودکار واسنجی و صحت‌سنجی، کمترین انحراف آماری را بر روی پارامترهای بهینه‌سازی ایجاد نمود.های های‌های در آبخوان بابل، محدوده دفن پسماند در حیطه خارج از آبخوان تعیین شده اشباع است. نمودار تجمعی غلظت خروجی از محدوده مرزهای تراوا و رود در ناحیه جنوب شرقی نیز روند تغییرات نمودار غلظت ابر آلودگی، در مدل‌سازی کیفی دشت نشان می‌دهد که در دوره پیش‌بینی، افزایش غلظت به شکل خطی بالا خواهد رفت. با توجه به آنکه محل قرار گیری دفع پساب در محدوده خارج از دشت می‌باشد، سرعت افزایش آلودگی تا دوره پایانی شبیه‌سازی ابتدایی چندان بالا نبوده است. با این حال علت بالا رفتن حجم انباشت غلظت را می‌توان به وجود مرزهای تراوا و افت شدید آب‌های های‌های زیرزمینی در این ناحیه ربط داد. به عبارتی دیگر، با پایین رفتن بیش از اندازه تراز آب‌های های‌های زیرزمینی در محدوده اشباع دشت، جهت جریان به سمت آبخوان با سرعت بالاتری حجم آب آلوده را منتقل خواهد کرد. شروع ورود آلودگی به محدوده اگرچه از ماه‌های اولیه دوره پیش‌بینی مورد توجه است، اما در صورت عدم وجود برنامه‌های تغذیه مصنوعی، یا اعمال محدودیت‌های جدی بر منابع آب‌های های‌های زیرزمینی، گسترش بحران امری قطعی خواهد بود. همچنین برداشت از طریق منابع بهره برداری و تراکم نواحی شهری در پایین دست این منطقه در صورت کاهش دسترسی به آب، بهره گیری از منابع تغذیه سطحی را که منجر به تعدیل حالت می‌شود افزایش خواهد داد.

نتایج نشان داد که جهت جریان آبخوان که از بخش‌های جنوبی به سمت شمال دشت می‌باشد، نواحی با ارتفاع کمتر را در معرض خطر آلودگی بیشتر قرار می‌دهد. در خلاصه آماری خروجی مدل، می‌توان مقدار بیلان آلودگی در محدوده مرود تحقیق را به صورت متوسط مشاهده کرد. این تصویر، در انتهای دوره مقدار غلظت را را نشان می‌دهد. رقم آلودگی وارد شده در دوره انتهایی از مرزهای با بار ثابت برابر ۰ می‌باشد. با این حال ۹۸،۹۱۸۰۲ واحد به دریا وارد شده است. از چاه‌های بهره برداری در مسیر گسترش آلودگی به همراه آب استخراجی، حدود ۳۳،۳ واحد، مقدار آلودگی منتشر شده از شبکه آبراهه‌ای در دوره ۱۰ ساله ۱۷۸،۱ واحد بوده است که از این مقدار به جرم ۵۱،۷ واحد از همین شبکه آبراهه‌ای خارج می‌شود. همچنین مرزهای تراوا به مقدار ۹۹،۳ واحد خارج می‌شود. که البته آمار مذکور بسته به دوره مشخص شده ارقام می‌تواند معکوس شوند. در مجموع تفاضل مقدار ورودی و خروی آلودگی به محدوده دشت رقم ۸۱۹۲ واحد را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه بیلان جریان در دو بخش در یک ستون داده به عنوان عامل انتشار ذرات آلاینده، اختلاف جریان های کلی ورودی و خروجی از محدوده محاسبه شد. بر پایه نتایج می توان مشاهده کرد که اختلاف جریان در دو مدل حداکثر تا ۹۰۰ متر مکعب در روز است که این مقدار در پایان دوره کاهش می یابد. محاسبات مشابهی برای نواحی غربی نشان می دهد که با عددی مشابه این روند کاملا معکوس نواحی شرقی است که علت آن قطعا بالابودن ارتفاع ناحیه زهکش است. مدل تحلیل جریان در محدوده لندفیل بابل مشخص کرد که با توجه به جهت جریانات سطحی زیرزمینی، علی رغم وجود پوشش گیاهیی متراکم، این عامل رخدادهای سیلابی که از شیرابه محل دفع پسماند متاثر می‌شود را به صورت جریانات زیر سطحی از برخی نواحی متابل هیدرولیکی به سمت مرز تراوا و از آنجا به محیط اشباع دشت وارد می‌کند. همچنین اثر نفوذ آلودگی به آب‌های سطحی و در نتیجه تغذیه ذرات جریان از بستر رود مشهود است. مدل ارائه شده در این مقاله قابلیت تهیه یک بستر تصمیم سازی را برای مدیران منطقه‌ای به منظور بررسی اثرات کوتاه و بلند مدت اجرای هر گونه سازه توسعه در محل بحرانی دفع پسماند را بر دشت اشباع دارا می‌باشند. در اینجا اثر آلودگی به صورت ابر آلودگی و وسعت تاثیر، ناحیه درگیر از منظر جهت توسعه و پیشرفت انتقال ذرات و همچنین عمق نفوذ قابل بررسی بوده است.

Reference:

Anupam Chowdhury, Mumtahina Rahnuma; Groundwater contaminant transport modeling using MODFLOW and MT3DMS: a case study in Rajshahi City. Water Practice and Technology 2023; wpt2023076. doi: https://doi.org/10.2166/wpt.2023.076.

Rajaeian, S., Ketabchi, H. & Ebadi, T. Investigation on quantitative and qualitative changes of groundwater resources using MODFLOW and MT3DMS: a case study of Hashtgerd aquifer, Iran. Environ Dev Sustain (2023). https://doi.org/10.1007/s10668-022-02904-4.

David W. Pollock, (1994). "User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT", Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model, Reston, Virginia, September.

Duttagupta, S., Mukherjee, A., Das, K., Dutta, A., Bhattacharya, A., & Bhattacharya, J. (2020). Groundwater vulnerability to pesticide pollution assessment in the alluvial aquifer of Western Bengal basin, India using overlay and index method. *Geochemistry*, *80*(4), 125601.

Feo A; Zanini S; Petrella E; Celico F. (2018). "A Python Script to Compute Isochrones for MODFLOW". *Journal of groundwater*; Volume56, Issue2 Pages 343-349

GMS 10.4 Tutorial, "MODPATH, The MODPATH Interface in GMS", (2020). www.Auqaveo.com

Haimi, H. Mulas, M. Corona, F. Marsili-Libelli, S. Lindell, P. Heinonen, M. Vahala, R. (2016). Adaptive data-derived anomaly detection in the activated sludge process of a large-scale wastewater treatment plant. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 52: 65-80.

Jang, Y.-S., N. Sitar, and A. Der Kiureghian., (1994), Reliability analysis of contaminant transport in saturated porous media, *Water Resour. Res*., 30(8):2435-2448.

Jeong, J. Park, E. (2017). A subagging regression method for estimating the qualitative and quantitative state of groundwater. *Hydrogeology Journal.* 25(5): 1491–1500.

Jeong, J. Park, E. Han, W, S. Km, K. Choung, S. Chung, II, M. (2017). Identifying outliers of non-Gaussian groundwater state data based on ensemble estimation for long-term trends. *Journal of Hydrology*. 548: 135-144.

Keshtegar, B., Bagheri, M., Meng, D. et al. (2020), Fuzzy reliability analysis of nanocomposite ZnO beams using hybrid analytical-intelligent method. *Engineering with Computers*.

Langevin, C.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Provost, A.M., "Niswonger, R.G., and Panday, Sorab, (2019). MODFLOW 6 Modular Hydrologic Model version 6.1.0": U.S. *Geological Survey Software Release*, 12 December.

Liu, F, T. Ming, T, K. Zh-Hua, Z. (2008). Isolation forest. Data Mining. ICDM'08. *Eighth IEEE International Conference on Data Mining.*

Mendicino, G, A. Senatore and P. Versace, (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Hydrology Journal*, 357:282-302.

Minh, H.V.T.; Avtar, R.; Kumar, P.; Tran, D.Q.; Ty, T.V.; Behera, H.C.; Kurasaki, M. (2019). Groundwater Quality Assessment Using Fuzzy-AHP in an Giang Province of Vietnam. *Geosciences* 9, 330.

Nathaniel P. Chien; Laura K. Lautz. (2018). Discriminant analysis as a decision-making tool for geochemically fingerprinting sources of groundwater salinity, *Science of The Total Environment*, 618, 15 March, Pages 379-387.

Visual MODFLOW Flex, "Integrated Conceptual & Numerical Groundwater Modeling", (2017).

Zohrevand, Z. Glasser, U. Shahir, H, Y. Tayebi, M, A. Costanzo, R. (2016). Hidden Markov based anomaly detection for water supply systems. Big Data (Big Data), 2016 IEEE International Conference.

یادداشت‌ها

[1] *Zanini and Silico*
[2] *Jang et al.*
[3] *Jeong et al.*
[4] *Papdox*
[5] *Method of characteristics*
[6] *Modified method of characteristics*