

Optimization of aquifers' hydrodynamic coefficients by numerical modeling (Case study: Damaneh-Daran Plain Aquifer)

Mohammad Reza Raeisi Dehkordi ^{1*}, Amir Hossein Yeganeh Mazhar ¹

¹ Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Water is a renewable resource that naturally follows a hydrologic cycle. Huge groundwater tables are essential resources that are utilized as underground water. Irregular population increase in the last three decades, limited surface waters, and too much utilization of groundwater tables damaged the Iranian aquifers irreparably, both quantitatively and qualitatively. Today, with the introduction of extensive industrial activities and chemical fertilizers in agriculture, the most important source of human life is at risk. Groundwater pollution is often caused by toxic wastewater from industries, agriculture, or sewage storage sources. The effects of different pollutants in the environment are different. One of these pollutants is nitrate. The contamination of underground water with nitrate ions is an important global problem, the most important source of which is arbitrary agricultural activities and the excessive use of nitrogenous chemical fertilizers. Numerical simulation of groundwater flow and contamination transport is a vital aquifer resource management tool that estimates the hydraulic and hydrologic parameters of the aquifer. In previous studies conducted by researchers, only flow modeling or only pollution transfer has been discussed, which we have studied both cases in the present study. Therefore, in this research, the flow and transfer of pollution has been investigated separately and completely.

Materials and Methods

In this research, the flow and transfer of pollution were investigated separately and completely. In this paper, the general aquifer software simulation algorithm is first discussed. The Damaneh aquifer is then introduced. Damaneh is located in Isfahan Province in the catchment basin of the Falat Markazi. The region's specifications are given, and its hydrologic and hydrogeological features are stated. The process of creating the conceptual and numeral model is discussed, and the aquifer modeling process is examined in detail. The last section discusses the modeling of contaminant transport. According to the climatic conditions of the region, the Damaneh plain faces alternating wet and dry periods. For this reason, for the model to better match the nature of the aquifer, a wet and dry period has been applied to the model. According to the monthly rainfall statistics, from 2005 to 2008 was a dry season and from 2009 to 2013 there was a large relative drop in rainfall, which was applied to the model as a drought period. This study presents the results of mathematical modeling of the groundwaters' flow and contaminant transport and their simulation in the Damaneh aquifer. Groundwater modeling system (GMS) software was used. The necessary information, such as geological, hydrological, hydrogeological information, and topographic maps are gathered. The aquifer flow model in stable and unstable states was run next. The model is optimally calibrated for hydraulic conductivity and specific yield up to a particular standard error. It was verified using an unsteady period to ensure the simulation results' accuracy. To predict the water level fluctuations and the response of the two optimized coefficients, the Damaneh aquifer was simulated for a specific time interval using two distinct scenarios.

Results and Discussion

Statistical analysis of flow model errors in a stable state gived maximum observed and calculated water levels of 0.87 m and RMSE and correlation coefficients of 0.99 m and 99.9 % and 1.113 m and 99.7 % for calibration and verification periods, respectively. The correlation coefficient between the observed and calculated data for transport modeling was 89.1 %. The error values indicate that the designed flow and contamination transport mathematical models match the aquifer's natural conditions well. They give a good simulation of the hydrological system. In the aquifer, the presented results of these discoveries have high uncertainty, because, in some wells of the adjacent logs,

drastic differences between the type and profile of these logs can be seen. To calculate the path length and movement time of pollution particles on the surface of the aquifer, points were determined and the MODPATH model was run in Forward mode. The results showed that the transit time was between 2 and 7 years, and the shortest and longest paths traveled by the particles in this period of time were 312 m and 6200 m, respectively. As the modeling results showed, the concentration of nitrate in most areas of the Damaneh aquifer exceeded 80 mg/l during the past years 2007 to 2008 and according to drinking water consumption standards, it is necessary to reduce the nitrate concentration or clean the Damaneh aquifer. A sensitivity analysis shows that the flow model is more sensitive to hydraulic conductivity and specific yield. The transport model is most susceptible to the surface recharge, porosity, and longitudinal coefficient of variation parameters, respectively. It is not sensitive to recharge from the aquifer's borders. The results of the transfer model showed that only one halo of pollution is forming in the Damaneh aquifer and it is spreading in the entire aquifer at an approximate speed of 15 m d⁻¹.

Conclusion

According to the error values, it can be concluded that the mathematical model designed for the flow and transfer of pollution has a good match with the natural conditions of the aquifer and has well simulated the behavior of the hydrological system. It is suggested to prepare accurate and new statistics of the exploitation wells in the region, although it is very expensive at the level of plains such as the Doman plain, but the special conditions of this plain require more attention. Providing smart meters is the most effective harvesting control programs in the region.

Keywords: Daman-Daran Aquifer, Hydrodynamic Coefficients, Nitrate, Numerical Modeling, Optimization, Pollutant Transfer

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: mohamadreza.raeisi.d@gmail.com

Citation: Raeisi Dehkordi, M., & Yeganeh Mazhar, A. (2023). Optimization of aquifers' hydrodynamic coefficients by numerical modeling (Case study: Damaneh-Daran Plain Aquifer). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 262-278. DOI: 10.22098/mmws.2022.11683.1155
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.17.5

Received: 17 October 2022, Received in revised form: 18 November 2022, Accepted: 19 November 2022, Published online: 19 November 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 262-278

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بهینه سازی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان ها با روش های عددی (مطالعه موردی: آبخوان دشت دامنه-داران)

محمد رضا رئیسی دهکردی^{۱*}، امیرحسین یگانه مظهر^۱

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

افزایش بی‌رویه جمعیت در سه دهه اخیر، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی منجر به خسارات جبران‌ناپذیری از نظر کمی و کیفی به آبخوان‌های کشور شده است. شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال آلودگی آب‌های زیرزمینی به دلیل تخمین پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی ابزار مهمی برای مدیریت منابع آب آبخوان‌هاست. پژوهش حاضر نتایج حاصل از یک مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت دامنه-داران در فلات مرکزی و زیرحوضه گاوخونی در غرب استان اصفهان را نشان می‌دهد. برای انجام این کار از نرم‌افزار مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی (GMS) استفاده شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و نقشه‌های توپوگرافی، مدل جریان آبخوان برای حالت پایدار و ناپایدار اجرا و واسنجی مدل برای دو پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه تا رسیدن به یک سطح خطای استاندارد، بهینه‌سازی شد. سپس برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی برای یک دوره غیرماندگار، آزمون صحت‌سنجی انجام شد. نتایج به‌دست آمده از مرحله صحت‌سنجی نشان‌دهنده همبستگی بالا و قابل‌قبول بین بار مشاهداتی و شبیه‌سازی است. کم‌ترین مقدار همبستگی ۹۹/۷ درصد بود، که با توجه به تغییرات زیاد تراز در طول ۱۸ ماه قابل‌قبول است. برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب و پاسخ دو ضریب بهینه‌سازی شده با تعریف دو سناریوی متفاوت برای یک بازه زمانی مشخص آبخوان شبیه‌سازی شد. در این حالت نتایج مبین این است که پارامترها بهینه‌سازی شده و شرایط فیزیکی آبخوان به خوبی استخراج شده است. همچنین نتایج مدل انتقال نشان داد که در آبخوان فقط یک هاله آلودگی در حال شکل‌گیری است و با سرعت تقریبی ۱۵ متر در روز در کل آبخوان، در حال گسترش است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان دامنه-داران، انتقال آلودگی، بهینه‌سازی، روش عددی، ضرایب هیدرودینامیکی، نیترات

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohamadreza.raeisi.d@gmail.com

استناد: رئیسی دهکردی، م. و یگانه مظهر، ا.ح. (۱۴۰۲). بهینه‌سازی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان ها با روش های عددی (مطالعه موردی آبخوان دشت دامنه-داران). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۲۶۲-۲۷۸.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11683.1155

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.17.5



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۲۶۲ تا ۲۷۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

آب منبعی تجدیدشونده است که به‌طور طبیعی از چرخه هیدرولوژیکی پیروی می‌کند. امروزه با پیشرفت فناوری در صنعت کشاورزی و توسعه شهرها، نیاز به استفاده از منابع زیرزمینی روز به روز افزایش یافته است. از طرف دیگر استفاده بیش از حد آب‌های زیرزمینی و ورود آلاینده‌ها به این منابع از طریق چاه‌های فاضلاب، فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ آب‌های سطحی آلوده، مشکلات فراوانی را برای این منابع به وجود آورده است (Mardani et al., 2018). تأثیرات آلاینده‌های مختلف در محیط زیست متفاوت بوده و یکی از این آلاینده‌ها نیترات است که آلودگی آب زیرزمینی به یون نیترات مشکل جهانی مهمی که فعالیت‌های خودسرانه کشاورزی و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار و غیره مهم‌ترین منبع آن است (Atai Ashtiani and Ketabchi, 2014). مدیریت منابع آب زیرزمینی در گام اول مستلزم شناخت کافی از سیستم آبخوان و معادلات مربوط به آن بوده و در گام دوم، نیاز به ابزاری دارد تا بتواند عکس‌العمل تنش‌های مختلف کمی و کیفی وارد به آبخوان را در شرایط فعلی و آینده پیش‌بینی کند. در این میان با ابزاری مانند شبیه‌سازی‌ها و یا مدل‌ها می‌توان با دقت قابل‌قبولی شرایط مشابه آن‌چه در طبیعت موجود است را به وجود آورد و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافت (Rezaei et al., 2020). در پژوهش حاضر برنامه سیستم مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی^۱ (GMS) مورد استفاده قرار گرفت. در سنگ بستر آبخوان‌ها، آب از شکستگی‌ها و دیگر فضاهای خالی سنگ بستر وارد آن می‌شود. همچنین برخی از انواع سنگ بستر مانند سنگ بستر ماسه سنگی ممکن است دارای فضاهای خالی اضافی باشد که توسط آب‌های زیرزمینی پر می‌شوند. معمولاً آب‌های زیرزمینی به آهستگی حرکت نموده و این حرکت وابسته به خصوصیات زیرسطحی مانند شیب هیدرولیکی یا شیب سطح ایستابی است (Mohtashami et al., 2022). امروزه با ورود فعالیت‌های گسترده صنعتی و استفاده از کودهای شیمیایی در کشاورزی مهم‌ترین منبع حیات بشر در معرض مخاطره واقع شده است. آلودگی آب‌های زیرزمینی اغلب به دلیل فاضلاب‌های سمی ناشی از صنایع، کشاورزی و یا از منابع ذخیره فاضلاب شکل می‌گیرد (Singh and Datta, 2004). آلاینده‌های گوناگون بسته به منشأ و حالیت‌پذیری در آب هر کدام به‌گونه‌ای خطرناک است. از طرف دیگر، پخش آلودگی‌های محلول در آب به پارامترهای محیطی که در آن حرکت می‌کند بستگی دارد. از جمله این پارامترها که به انتقال و پخش آلاینده‌ها کمک می‌کند می‌توان به ضریب پراکندگی^۲ و ضریب هدایت هیدرولیکی^۳ اشاره کرد. هدایت

الکتریکی و غلظت یون‌های سدیم، کلر و نیترات در آب زیرزمینی ناشی از مواد معدنی نامحلول و فعالیت‌های خود انسان همانند عملیات کشاورزی فشرده، کاربرد کودهای شیمیایی، شرب و صنعت است (Jalali, 2007).

(Lalehzari et al., 2014) برای ارزیابی و محاسبه آسیب‌پذیری آبخوان شهرکرد به آلودگی نیترات از دو مدل DRATIC و روش‌های عددی بهره گرفتند. آن‌ها ابتدا نقشه آسیب‌پذیری آبخوان را با روش DRATIC در محیط ArcGIS تهیه کردند. سپس با توجه به غلظت اندازه‌گیری شده بین ۶ تا ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر با استفاده از نرم‌افزار SIMLAB2.2، تعداد ۵۰۰۰ عدد تصادفی با توزیع نرمال تولید کرده و با استفاده از روش مونت‌کارلو و کد MT3DMS برای داده‌ها مدل را اجرا نمودند. در مرحله بعد برای واسنجی و صحت‌سنجی از داده‌های سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ استفاده کردند که حداکثر RMSE برابر ۲/۲ میلی‌گرم بر لیتر را تأییدکننده مدل عددی فرض کردند و به این نتیجه دست یافتند که نقشه آسیب‌پذیری تهیه شده برای آلودگی نیترات دشت شهرکرد می‌تواند برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی بلندمدت مفید واقع شود. (Barati et al., 2019) مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیکی در آبخوان آزاد را در دشت کرمانشاه انجام دادند. نتایج پژوهش فوق نشان داد که مقدار هدایت هیدرولیکی در آبخوان دشت کرمانشاه، از ۰/۱ تا ۳۰ متر در روز و مقدار آبدهی ویژه از ۰/۰۲ تا ۰/۴ متغیر است. مقادیر سطح ایستابی محاسبه شده توسط مدل و سطح ایستابی مشاهداتی در پی‌زومترها دارای همبستگی بالایی هستند و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا همواره کمتر از یک است که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول مدل برای شبیه‌سازی وضعیت آبخوان است. (Mohammad Mirzaei et al., 2018) نیز بهینه‌سازی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان آزاد گرگان‌رود را با استفاده از مدل ریاضی GMS بررسی نمودند. در پژوهش آن‌ها واسنجی مدل در حالت ماندگار برای اصلاح هدایت هیدرولیکی در یک دوره زمانی یک ماهه (آبان ۱۳۹۱) و در شرایط غیرماندگار، برای بهینه‌کردن ضریب آبدهی ویژه برای یک سال در ۱۲ گام زمانی ماهانه آذر ۱۳۹۱ تا آبان ۱۳۹۲ اجرا شده است. مقدار هدایت هیدرولیکی از واسنجی مدل آبخوان در شرایط پایدار بین ۱۲ تا ۱۶/۴ متر بر روز و تغییرات آبدهی ویژه نیز در دوره ناپایدار، بهینه و مقادیر آن بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ برآورد شده است. (Roshani et al., 2019) به مطالعه تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ آب در خاک با استفاده از بهینه‌سازی معادلات نفوذ SCS و هورتون^۳ به‌منظور شبیه‌سازی یک نهر آبیاری پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها

³ Hydraulic Conductivity Coefficient

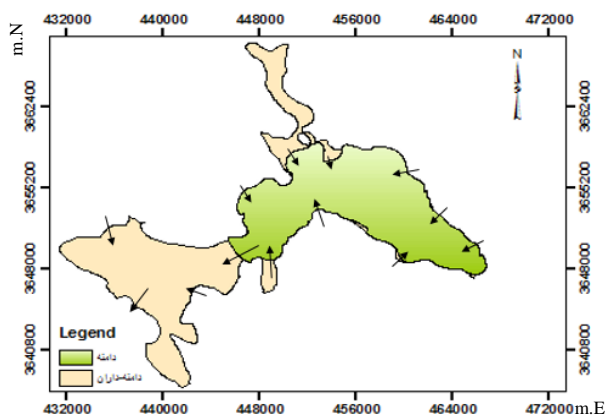
⁴ Horton

¹ Groundwater Modeling System

² Dispersion Coefficient

حوضه آبریز دامنه-داران در حوضه آبریز فلات مرکزی و زیرحوضه گاوخونی در غرب استان اصفهان با وسعت $711/2$ کیلومتر مربع و به‌عبارتی در قسمت شمال غرب حوضه واقع شده است. $293/7$ کیلومتر از وسعت محدوده را دشت و $417/6$ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل داده است. حداقل ارتفاع محدوده 2212 متر، مربوط به بخش جنوبی محدوده حوضه آبریز در مجاور دشت بوئین-میان‌دشت و حداکثر ارتفاع 3286 متر از سطح دریا، مربوط به قسمت‌های شمالی محدوده است (Rahmani et al., 2022).

آبخوان آبرفتی دامنه با مساحت $220/3$ کیلومتر مربع در 75 درصد از مساحت $293/7$ کیلومتر مربع) گسترده شده است. این آبخوان را معمولاً برای مطالعه به سه آبخوان دره بید، دامنه-داران و سواران تقسیم می‌کنند. در پژوهش حاضر به مدل‌سازی آبخوان دامنه-داران پرداخته شده است که در ادامه پژوهش حاضر، آبخوان مذکور به‌صورت اختصار آن یعنی آبخوان دامنه استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱- مرز آبخوان دامنه و ارتباط هیدرولیکی آبخوان با آبخوان‌های مجاور (Safavi, 2014)

Figure 1- Aquifer boundary Damaneh and hydraulic relationship of the aquifer with adjacent aquifers (Safavi, 2014)

۲-۲- روش شبیه‌سازی و مطالعه آبخوان دامنه

در این قسمت ابتدا الگوریتم شبیه‌سازی عمومی آبخوان‌ها در نرم‌افزار بیان شده، سپس به معرفی آبخوان دامنه که از مناطق مهم کشاورزی در استان اصفهان و کشور است پرداخته می‌شود. مشخصات این منطقه ذکر گردیده و عملیات صورت گرفته برای تهیه مدل مفهومی و مدل عددی بیان و همچنین تفسیر جزء به جزء مدل‌سازی آبخوان شرح داده و در بخش آخر روند مدل‌سازی انتقال آلاینده در حالت استوکاستیک ارائه شده است.

۲-۲-۱- الگوریتم شبیه‌سازی عددی سیستم آبخوان

تهیه یک مدل عددی را می‌توان بر اساس نوع و میزان پیچیدگی مدل تعیین و تعریف کرد. افراد مختلفی تعاریف و مراحل متفاوتی را

نشان داد، که مقدار متوسط خطای نسبی بین هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و محاسباتی از روش ارائه شده، کم‌تر از پنج درصد است. با افزایش طول بازه مورد بررسی، مقادیر دبی نفوذ، به‌دلیل کاهش بار استاتیکی آب، کاهش می‌یابند. بازدهی مدل بر اساس معیار نش-ساتکلیف در تمامی طول‌ها بیش از 90 درصد بود که دلالت بر این دارد که استفاده هم‌زمان از معادله هورتون و روش روندیابی اینرسی صفر بهترین نتیجه را ارائه می‌کند. Sarvari et al. (2020) به بررسی اندرکنش رودخانه و آبخوان در دشت بجنورد به‌وسیله اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌سازی عددی پرداختند. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد که در حالت فعلی به‌طور متوسط مقدار شش و نیم میلیون مترمکعب در سال از بستر رودخانه به آبخوان نفوذ می‌کند، درحالی‌که چهار میلیون مترمکعب در سال توسط رودخانه از آبخوان زهکش شده است. همچنین تبدلات آبخوان و رودخانه در این منطقه قابل توجه بوده و نادیده گرفتن آن باعث می‌شود دیگر مؤلفه‌های بیلان با خطا برآورد شوند. Kord et al. (2019) موضوع مدل‌سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی را مورد مطالعه قرار دادند. بعد از مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، بر اساس مقدار افت، آبخوان دشت اردبیل به پانزده بخش، زون‌بندی و پس از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار PEST، مقادیر برداشت مجاز محاسبه شد. بر اساس نتایج تعادل بخشی سطح ایستابی آبخوان، بیش‌ترین بهره‌برداری مربوط به شرق آبخوان و کم‌ترین بهره‌برداری مربوط به مرکز دشت به‌دست آمد.

مطالعات مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در ایران اولین بار در سال 1348 خورشیدی توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای دشت ورامین تهیه شد (Ministry of Energy, 2014). از آن به بعد تعداد زیادی آبخوان در سراسر کشور توسط دانشگاه‌ها و شرکت‌های مشاوره‌ای و شرکت آب منطقه‌ای شبیه‌سازی شده است. از آنجایی که نتایج حاصل از آبخوان‌های مدل‌سازی شده برای همان آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین نمی‌توان از نتایج حاصل شده برای مدل‌سازی سایر آبخوان‌ها استفاده کرد. در پژوهش‌های قبلی که توسط پژوهشگران انجام شده است، فقط به مدل‌سازی جریان و یا صرفاً به انتقال آلودگی پرداخته شده که ما در پژوهش حاضر هر دو مورد را مورد مطالعه قرار داده‌ایم. بنابراین در این پژوهش جریان و انتقال آلودگی به‌صورت مجزا و به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

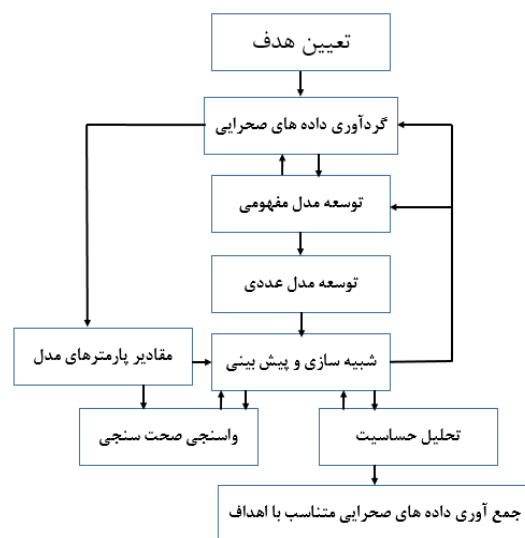
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی یک چارچوب یکپارچه است که می‌توان داده‌ها و اطلاعات مربوط به هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی را با توجه به آن تفسیر نمود (Atai Ashtiani and Ketabchi, 2014). Izady et al. (2014) یک روش گام به گام شش مرحله‌ای (صفر تا پنج) را برای تهیه مدل مفهومی آب زیرزمینی ارائه کردند (شکل ۳). در این روش، هدف از مرحله صفر یا مقدماتی، جمع‌آوری تمام شامل داده‌های منابع آب، هواشناسی و پارامترهای هیدرودینامیکی، زمین‌شناسی و توپوگرافی می‌شوند.

۳-۲- نیترا

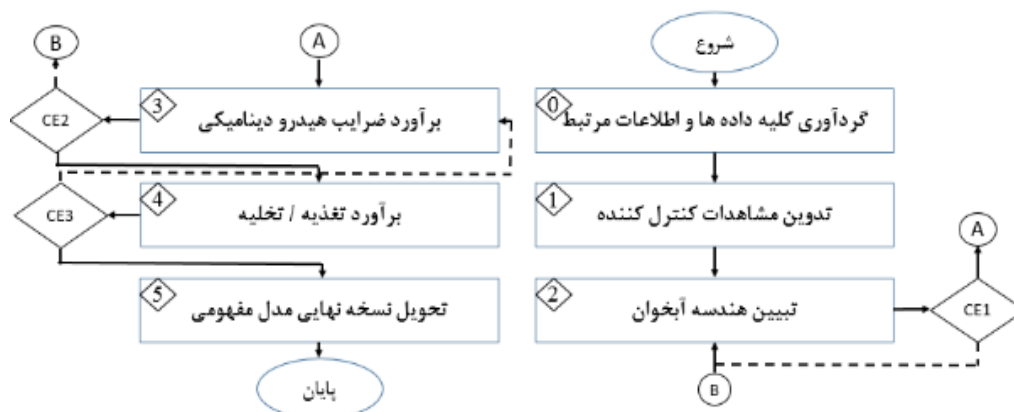
نیترا از آلاینده‌های آب زیرزمینی عناصر چرخه نیتروژن است، به‌گونه‌ای که آلودگی منابع آب زیرزمینی به نیترا از مهم‌ترین مسائل زیست محیطی محسوب می‌شود (Raеisi Dehkordi, 2022).

برای این فرآیند مانند شکل ۲ که توسط Bear and Cheng (2010) ارائه شده است، پیشنهاد کرده‌اند.



شکل ۲- مراحل تهیه مدل عددی (Bear and Cheng, 2010)
Figure 2- Steps to prepare a numerical model (Bear and Cheng, 2010)

۲-۲-۲- تهیه مدل مفهومی



شکل ۳- شمای عمومی فرآیندها
Figure 3- General outline of processes

را از دست می‌دهد و اتم‌های اکسیژن را جذب می‌کند. در تبدیل آمونیوم به نیترا، نه تنها آمونیوم اتم‌های هیدروژن را از دست می‌دهد و اتم‌های اکسیژن به دست می‌آورد، بلکه دو الکترون هم به دست می‌آورد و آن را از کاتیون با بار مثبت به آنیون با بار منفی تبدیل می‌کند. نیترا به قدر کافی محلول است و حلالیت آن نمی‌تواند محدودکننده غلظت آن در آب باشد (Raеisi Dehkordi and Yeganeh Mazhar, 2021). سؤالی که مطرح می‌شود این است که آیا نیترا از طریق ذرات ریز خاک قابل جذب است؟

این مواد به طرق مختلف نظیر تماس منابع آب با فاضلاب و یا تخلیه آب‌های شست و شو شده زمین‌های کشاورزی در رودخانه، وارد منابع آب می‌شوند. جهت بررسی توزیع نیترا در آب‌های زیرزمینی باید شناخت دقیقی نسبت به فرآیندهای شیمیایی حاکم بر تبدیل نیتروژن وجود داشته باشد. به همین دلیل این موضوع در طی دو دهه گذشته، شدیداً مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است (Ahmadi, 2022). نیترا ترکیب کاملاً اکسید شده نیتروژن بوده، و در مقابل اکسایش پایدار است. اما به‌طور بالقوه یک عامل اکساینده قوی محسوب می‌شود. تبدیل آمونیوم به نیترا به‌طور آشکار اکسایش است. چرا که اتم‌های هیدروژن

نشده و اختلاف آن با اندازه‌گیری‌های صحرایی، در حد قابل قبولی نیست. به‌منظور کاهش اختلاف بین نتایج محاسباتی با مشاهدات، واسنجی مدل صورت گرفته و مدل واسنجی می‌شود. پارامترهای متغیر در واسنجی، به هدف از ساخت مدل و سطح اطمینان داده‌های خام اولیه بستگی دارد. در مرحله واسنجی مدل، هر چه شناخت از لایه آبدار بیشتر باشد واسنجی بهتری صورت خواهد گرفت. معیارهای مختلفی نیز برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده، وجود دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به میانگین خطای اریب، میانگین قدرمطلق خطاها و جذر میانگین مربع خطا اشاره کرد. روابط مربوط به هر کدام به‌صورت زیر است (Sharafati et al., 2021):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i^* - Z_i]}{n} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |[Z_i^* - Z_i]|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z_i^* - Z_i]^2}{n}} \quad (3)$$

در روابط بالا، Z_i : داده مشاهداتی، Z_i^* : داده پیش‌بینی شده و n : تعداد داده‌ها است.

۲-۵- مراحل تهیه مدل

پژوهش حاضر با بررسی و مرور منابع مختلف علمی و در دو بخش مجزا برای مدل‌سازی جریان (بخش اول) و برای مدل‌سازی انتقال آلودگی (بخش دوم) طراحی شد.

۲-۶- تهیه مدل مفهومی

بر اساس شش مرحله تشریح شده در شکل ۲، برای تهیه مدل مفهومی و استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، مدل مفهومی آبخوان دامنه در قسمت‌های مرز آبخوان، چاه‌های مشاهداتی و چاه‌های بهره‌برداری، نقشه تراز سطح زمین و سطح کف، تغذیه آبخوان، جریان آب زیرزمینی ورودی و خروجی و ضرایب هیدرودینامیکی ساخته شد.

۲-۷- توسعه مدل عددی

با بررسی تمامی شرایط و اطلاعات موجود، برای شبیه‌سازی آبخوان مورد مطالعه اندازه سلول‌های شبکه مدل 150×150 متر در نظر گرفته شد (شکل ۴). در پایان شبکه‌ای متشکل از 13416 سلول به‌دست آمد. در مدل حاضر با توجه به شرایط آبخوان (نبود دریاچه و یا رودخانه و سطح آب ثابت در سطح زمین) سلول با بار ثابت وجود نداشته و مدل متشکل از شبکه‌ای با سلول‌های فعال و غیرفعال است.

PH بیش‌تر خاک‌های کشاورزی جهان، در دامنه $5/5$ تا $8/0$ با به‌کار بردن آهک نگه داشته می‌شود که کمی اسیدی تا قلیایی محسوب می‌شود (Khalili et al., 2021). در این مقادیر pH، رس‌ها روی هم رفته حامل بار منفی هستند. بارهای الکتریکی همنام یکدیگر را دفع می‌کنند، بنابراین کاتیون‌هایی همانند پتاسیم و کلسیم به سطح رس جذب می‌شوند، درحالی‌که آنیون‌هایی همانند نیترات و کلرید نه‌تنها جذب نمی‌شوند بلکه واقعاً توسط رس‌ها دفع می‌شوند (Mohtashami et al., 2022).

نیاز به عملیات پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی آلوده بر اساس نتایج یک ارزیابی دقیق از منابع آب زیرزمینی و برنامه پایش تدوین شده، تشخیص داده می‌شود. به‌طور کلی، اگر پایش آب زیرزمینی نشان دهد که آب زیرزمینی تا غلظت‌هایی آلوده شده است که از نظر سلامت انسان و محیط زیست بسیار مضر است، نیاز به عملیات پاک‌سازی احساس می‌شود (Raeisi Dehkordi, 2022).

یکی از مهم‌ترین مراحل در برنامه پاک‌سازی، مشخص کردن اهداف است. اهداف مختلفی ممکن است برای یک عملیات پاک‌سازی منابع آب زیرزمینی تعریف شود؛ (۱) بازیابی و ترمیم کامل، (۲) بازیابی ناقص، (۳) پاک‌سازی تا حد استانداردهای سلامت، (۴) استفاده از سیاست‌های محدودیتی و (۵) محصورسازی آلودگی. بعد از این‌که هدف عملیات پاک‌سازی انتخاب شد، فرآیند پاک‌سازی باید برای رسیدن به هدف اعمال شود. در کل، آب زیرزمینی با یکی از سه روش ذکر شده پاک‌سازی می‌شود: ۱- محصورسازی آلودگی، ۲- استخراج آلودگی و ۳- تصفیه آب زیرزمینی آلوده.

سؤالی که در مورد آبخوان‌های آلوده شده به نیترات مطرح می‌شود این است که نیترات با چه روشی از آب زیرزمینی حذف می‌شود؟ معمولاً رسیدن به غلظت در حد مجاز سلامت انسان، هدف از کاهش غلظت نیترات در آبخوان‌های آلوده است. دنیتریفیکاسیون یا نیترات‌زدایی با تبدیل نیترات به گازها تنها فرآیندی است که غلظت نیترات را کاهش می‌دهد.

۲-۴- توسعه مدل عددی

در این گام، مدل ریاضی مناسب (که در این‌جا یک مدل عددی است) انتخاب و مدل مفهومی به آن تبدیل می‌شود. انتخاب ابعاد و تقسیمات زمانی و مکانی مدل عددی کاملاً به هدف مدل‌سازی و مدل مفهومی وابسته است (Izady et al., 2014). هم‌چنین در این مرحله، شرایط مرزی باید به زبان ریاضی تعریف شوند.

۲-۴-۱- واسنجی مدل

پس از واردکردن پارامترهای لازم، مدل برای اولین بار اجرا می‌شود. تقریباً در ساخت هر مدلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در اولین محاسبه، با مشاهدات اختلاف زیادی داشته، بر آن منطبق

و واسنجی به کمیت و کیفیت داده‌های موجود و صحت مورد انتظار از نتایج مدل بستگی دارد. عملاً بهتر است هر سه روش مورد بررسی قرار گیرد تا مشاهده شود که کدام روش نتایج بهتری را برای مسئله خاص ارائه می‌کند. در این پژوهش پس از آزمون هر سه روش در هر دو حالت پایدار و ناپایدار نهایتاً روش سوم (PCG2) انتخاب شد.

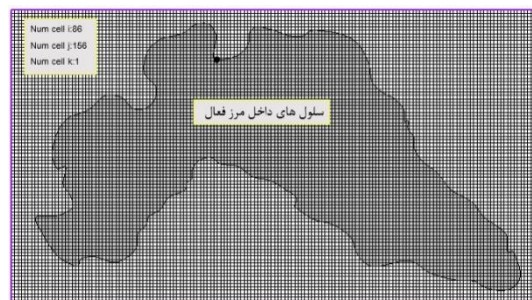
۲-۷-۴- واسنجی

دو عامل حاکم و مؤثر بر روند تغییرات سطح آب در این آبخوان تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بودند. از آن جایی که در آبخوان‌های آزاد شرایط حاکم اساساً شرایط غیرماندگار است، بنابراین باید واسنجی مدل در این شرایط صورت گیرد. اگر مدل در شرایط ماندگار واسنجی شود در رابطه سیال در محیط متخلخل، آبدهی ویژه حذف می‌شود. با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه آمار و اطلاعات در رابطه با ضریب هدایت هیدرولیکی کم بود، باید ابتدا پارامترها توسط مدل تخمین زده شود. به‌طور کلی در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی دو نوع روش واسنجی وجود دارد؛ ۱- روش‌های دستی مبتنی بر سعی و خطا و ۲- روش‌های اتوماتیک مبتنی بر بهینه‌سازی (PEST).

در این پژوهش واسنجی در سه مرحله انجام شد: مرحله اول (در شرایط ماندگار برای تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان و ناهمگنی افقی با استفاده از کد PEST و روش دستی، مرحله دوم) در شرایط غیرماندگار برای بهینه‌سازی آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی با استفاده از کد PEST و مرحله سوم) در شرایط غیرماندگار برای تخمین میزان تغذیه و تخلیه آبخوان به روش دستی.

۲-۷-۵- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت در واقع به معنی مشخص نمودن حساسیت مدل نسبت به پارامترهای متفاوتی است که به آن اعمال شده است. به طور قطع در مدل‌سازی یک آبخوان جایگاه یا رده ویژه‌ای برای تحلیل حساسیت یا واسنجی نمی‌توان قرار داد. این دو مرحله مدل‌سازی در پژوهش حاضر به دلیل نظم نگارشی به صورت متوالی هم قرار گرفته‌اند. چرا که ارتباط بین واسنجی مدل و تحلیل حساسیت همواره به صورت زنجیره‌ای تا زمان رسیدن به بهترین نتیجه ادامه خواهد داشت، و هیچ‌کدام بر دیگری تقدم یا تأخر ندارند. برای تحلیل حساسیت پارامترهای واسنجی ابتدا ۲۰ پایلوت برای هر یک از پارامترها در سطح آبخوان مشخص شد. سپس مدل واسنجی شد و بعد از بررسی اختلاف بین بار هیدرولیکی محاسبه‌ای و اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای، تحلیل حساسیت صورت گرفت و میزان تأثیر هر یک از پایلوت‌ها برای واسنجی مشخص شد. در کنار پایلوت‌های که تأثیر زیادی



شکل ۴- شبکه‌بندی و سلول‌های فعال مدل عددی آبخوان دامنه
Figure 4- Networking and Active Cells Numerical Model of Aquifer Damaneh

۲-۷-۱- تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی

مدل مفهومی پس از ایجاد شبکه و مشخص شدن سلول‌های فعال و غیرفعال، به مدل عددی تبدیل می‌شود. در این پژوهش لایه‌های تغذیه، تخلیه، چاه‌های مشاهده‌ای و سه پارامتر سطح آب، توپوگرافی سطح زمین و توپوگرافی سنگ کف که به صورت نقطه وارد نرم‌افزار شدند، سپس با درون‌یابی به روش کریجینگ و تعریف واریوگرام مناسب، به مدل عددی تبدیل شدند.

۲-۷-۲- شرایط مرزی

به صورت کلی مرزهای مدل می‌تواند از مرز با بار هیدرولیکی مشخص، مرز با شدت جریان معلوم (مرز نوع دوم) و یا مرز با شدت جریان وابسته به بار هیدرولیکی (مرز نوع سوم) باشد. مرزهای نفوذناپذیر جزء مرز با شدت جریان معلوم هستند. در نهایت پس از رسم خطوط هم‌پتانسیل، و بررسی زمین‌شناسی منطقه، مرزهای مدل به دو صورت مرز فیزیکی و مرز وابسته به بار هیدرولیکی مطابق شرایط طبیعی آبخوان تعیین شد. برای تعریف مرزهای هیدرولیکی دشت دامنه از بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی (GHB)، جهت تخمین میزان آب ورودی و خروجی به دشت برای مدل استفاده شد. در این بسته از مدل، تعیین بار هیدرولیکی در سلول‌های مرزی و گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده و نیز با احتساب قابلیت انتقال آب، میزان جریان ورودی و خروجی برآورد می‌شود.

۲-۷-۳- اجرای مدل

گسترده‌ترین روش‌های محاسباتی MODFLOW، روش به‌شدت ضمنی یا روش SIP، روش فوق تخفیف متوالی یا روش SSOR و روش (PCG2) هستند. مطمئناً اولین نتیجه به‌دست آمده از مدل، به دلیل کافی و دقیق نبودن آمار و اطلاعات موجود از ساختار واقعی آبخوان، به صورت برآزش رضایتمندانه بین بار هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده نخواهد بود. تعداد اجراهای مدل نیز در هر دو حالت اجرا

Correlations: Observed, Computed (Validation)				
Pearson correlation of Observed and Computed = 0.999				
P-Value = 0.000				
Regression Analysis: Observed versus Computed (Validation)				
The regression equation is				
Observed_1 = - 2.5 + 1.00 Computed_1				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-2.49	50.05	-0.05	0.962
Computed_1	1.00039	0.02182	45.85	0.000
S = 0.998204 R-Sq = 99.7% R-Sq(adj) = 99.7%				

شکل ۵- خروجی نرم‌افزار MINITAB برای داده‌های محاسباتی و مشاهداتی برای دوره صحت‌سنجی، با ضریب همبستگی ۹۹/۷ درصد، ضریب تعیین ۰/۹۹ و سطح معناداری صفر.

Figure 5- Output of MINITAB software for calculation and observation data for the validation period, with a correlation coefficient of 99.7 %, determination coefficient of 0.99, and significance level of zero

۲-۷-۷- اعمال تنش‌های متفاوت برای تغذیه

در یک لایه آبدار دست نخورده که تغذیه و تخلیه به صورت طبیعی انجام می‌گیرد با ایجاد تغییرات در لایه آبدار نظیر تخلیه و یا تغذیه مصنوعی، واکنش لایه آبدار به صورت نوسانات سطح آب زیرزمینی و تغییرات تخلیه و تغذیه طبیعی، انجام می‌گیرد. یک مدل کاملاً دقیق و واقعی باید به گونه‌ای بر پا شود که با ایجاد هر گونه تغییرات قادر باشد عکس‌العمل طبیعی لایه آبدار را شبیه‌سازی کند (Shahbazi, 2012).

با توجه به شرایط اقلیمی منطقه، دشت دامنه با دوره‌های مرطوب و خشک به صورت متناوبی روبه‌رو است، به همین دلیل، برای این که مدل با طبیعت آبخوان بهتر منطبق شود، یک دوره مرطوب و خشک به مدل اعمال شده است. مدل‌سازی برای یک دوره ۱۰۲ ماه (از مهر ۱۳۸۴ تا اسفند ۱۳۹۲) اجرا شد. با توجه به آمار بارندگی ماهانه از سال ۸۴ تا ۸۷ به‌عنوان مرطوب و از ۸۸ تا ۹۲ با افت نسبی زیادی در بارندگی بوده که به‌عنوان دوره خشک به مدل اعمال شد.

۲-۸- مدل‌سازی انتقال آلاینده

به‌طور کلی فرآیندهای اصلی در حرکت آلاینده‌های پایستار در یک لایه آبدار، فرآیندهای انتقال و پخشیدگی هیدرودینامیکی هستند. فرآیند انتقال حرکت آلاینده با همان سرعت آب زیرزمینی را توصیف می‌کند، در صورتی که فرآیند پخشیدگی عملاً انتشار و پراکندگی آلاینده را در اثر انحراف سرعت واقعی جریان از سرعت متوسط آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Kahe et al., 2021). پژوهشگران بسیاری در سال ۱۹۸۱ آزمایش‌های گوناگونی برای به‌دست آوردن ضرایب پراکندگی انجام دادند. آن‌ها در حین انجام آزمایش‌ها به تأثیر مقیاس مسأله روی ضریب

بسته به نوع خاصیتی که دارند به سطح آبخوان پایلوت‌های اضافه شد. این سیکل واسنجی- تحلیل حساسیت تا رسیدن به نتایج معقول برای واسنجی ادامه پیدا کرد. در نهایت تعداد پایلوت‌های اضافه شده به ضریب هدایت هیدرولیکی ۳۷ و برای آبدهی ویژه ۲۴ عدد می‌باشد که نشان می‌دهد ضریب هدایت هیدرولیکی حساسیت بیش‌تری نسبت به ضریب آبدهی ویژه دارد. بسیاری از مطالعات موجود دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و تغذیه را حساس‌ترین پارامتر در مدل‌سازی خویش عنوان کرده‌اند. در این پژوهش به‌دلیل این‌که تغییرات میزان بارندگی در طی زمان مدل‌سازی بسیار زیاد است و پارامتر تغذیه به‌صورت ناپایدار وارد مدل شد و نرم‌افزار GMS توانایی واسنجی تغذیه در حالت ناپایدار را ندارد، بنابراین پارامتر تغذیه مورد واسنجی قرار نگرفت.

۲-۷-۶- صحت‌سنجی^۱

به‌علت وجود عدم قطعیت‌آور واسنجی، مجموعه مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل واسنجی شده ممکن است مقادیر صحرائی را با دقت خوبی نشان ندهد. امکان دارد پارامترهای واسنجی شده، تحت شرایط مرزی و تنش‌های هیدرولوژیک مختلف سیستم را به خوبی نشان ندهد. در مرحله صحت‌سنجی اگر مدل بتواند حوادث دوره زمانی غیر از واسنجی را شبیه‌سازی کند، ترکیب پارامترهای به‌کار رفته درست است. صحت‌سنجی ضرایب هیدرودینامیکی به‌کار رفته در مدل، از مهرماه ۱۳۹۱ تا اسفند ۱۳۹۲ (۱۸ ماه) مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین انتظار می‌رود که میزان خطا و اختلاف بین بار محاسباتی و مشاهداتی این مرحله از مرحله واسنجی بیش‌تر باشد. چرا که در این مرحله هیچ‌گونه پارامتری بهینه نمی‌شود. مقادیر خطای میانگین (ME) خطای میانگین مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) در طول دوره واسنجی در جدول ۱ و گزارش نرم‌افزار MINITAB در شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مرحله صحت‌سنجی نشان‌دهنده همبستگی بالا و قابل‌قبول بین بار مشاهداتی و شبیه‌سازی است. کم‌ترین مقدار همبستگی ۹۹/۷ درصد است که با توجه به تغییرات زیاد تراز در طول ۱۸ ماه قابل‌قبول است.

جدول ۱- مقادیر آماری خطاها در دوره واسنجی و صحت‌سنجی
Table 1- Statistical values of errors in the calibration and verification period

دوره اعمال تنش	مدت (ماه)	ME	MAE	RMSE	R^2
واسنجی	12	-0.24	0.78	0.99	99.9
صحت‌سنجی	18	0.14	0.66	1.11	99.7

¹ Validation

² Uncertainty analysis

به‌صورت استوکاستیک است. نرم‌افزار GMS ابزارهای متنوعی را برای مدل‌سازی استوکاستیک قرار داده که یکی از این روش‌ها استفاده از نرم‌افزار زمین‌آمار T-PROGS است. در این پژوهش برای مدل انتقال آب زیرزمینی آبخوان دامنه از روش استوکاستیک با داده‌های کد T-PROG استفاده شد.

از آن‌جایی که مدل‌های کیفی بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های کمی ساخته می‌شوند، بنابراین مدل کمی آبخوان دامنه در حالت استوکاستیک طراحی شد.

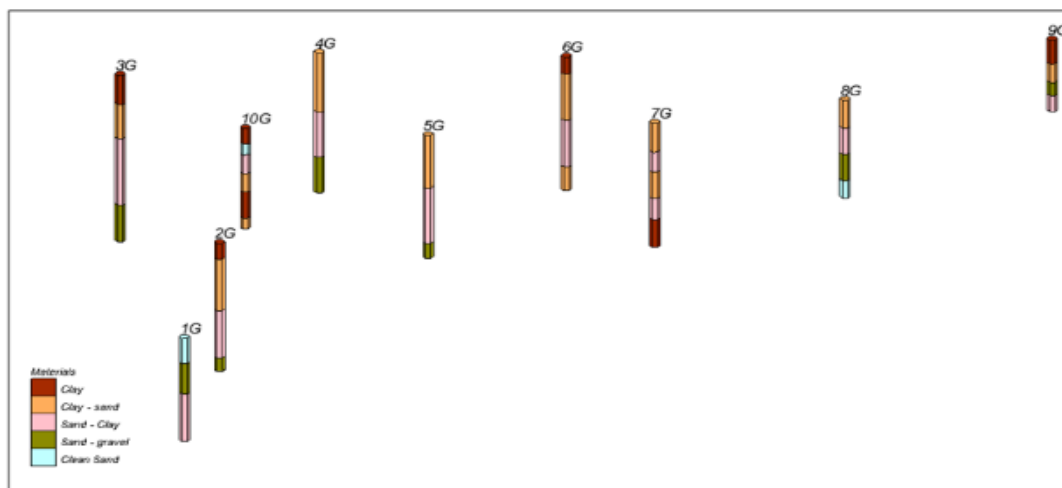
۲-۸-۱- ایجاد لاگ‌های حفاری با استفاده از ابزار Borehole

ابتدا اطلاعات نُه چاه اکتشافی که در منطقه وجود دارد، با استفاده از مدول Borehole در نرم‌افزار GMS ساخته شد. مقطع‌های عرضی تغییرات جنس آبخوان بین نقاط مختلف راه، پس از ساخت گمانه‌ها و تعیین لاگ آن‌ها در GMS، ایجاد شدند. داده‌های چاه‌های اکتشافی نشان می‌دهد که جنس آبخوان دامنه به پنج قسمت، رس، رس-ماسه، ماسه-رس، ماسه-شن و ماسه تقسیم می‌شود. شکل ۶ توالی چینه‌نگاری حفاری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر چاه شماره ۱۰ در نرم‌افزار SGEMS برای بالا بردن دقت مدل‌سازی ساخته شد.

دیسپرسیویته پی بردند. در مقیاس آزمایشگاهی مقدار متوسط a_L هنگامی که طول مسیر جریان ۳۰ سانتی‌متر بود برابر ۰/۳۵- به دست آمد. در آزمایش تزریق تک چاهی آن‌ها مقدار a_L را برای مسیرهای جریان ۳/۱ و پنج متری به ترتیب سه و نه سانتی‌متر به دست آوردند. ولی در آزمایش تزریق دو چاهی با گردش مجدد هنگامی که دو چاه در فاصله هشت متری هم قرار داشتند، مقدار a_L برابر ۵۰ سانتی‌متر تعیین شد. در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مسیر جریان طولانی‌تر مقادیر پراکندگی طولی بزرگ‌تری را برای برازش داده‌ها به دست می‌آورد (Safavi and Moslehi Baharanchi, 2010).

۲-۸-۲- مدل‌سازی انتقال آلودگی آبخوان دامنه

با توجه به این که میزان غلظت نترات برای دو سال (از مهر ۸۶ تا مهر ۸۸) و فقط برای چاه‌های شرب داران و دامنه در دسترس بود، مدل انتقال نترات برای این دو سال طراحی شد. از طرفی برای مدل‌سازی انتقال آب زیرزمینی آبخوان دامنه که داده‌هایی از تعدادی چاه مشاهده‌ای (تنها برای پنج چاه شرب) در اختیار است، معمولاً داده‌های میدان تغییرات، عدم قطعیت زیادی را به همراه دارد و توسعه روش‌های قوی‌تر برای تخمین مشخصه‌های انتقال مورد نیاز است. روشی که کاربرد رو به گسترشی دارد، مدل‌سازی

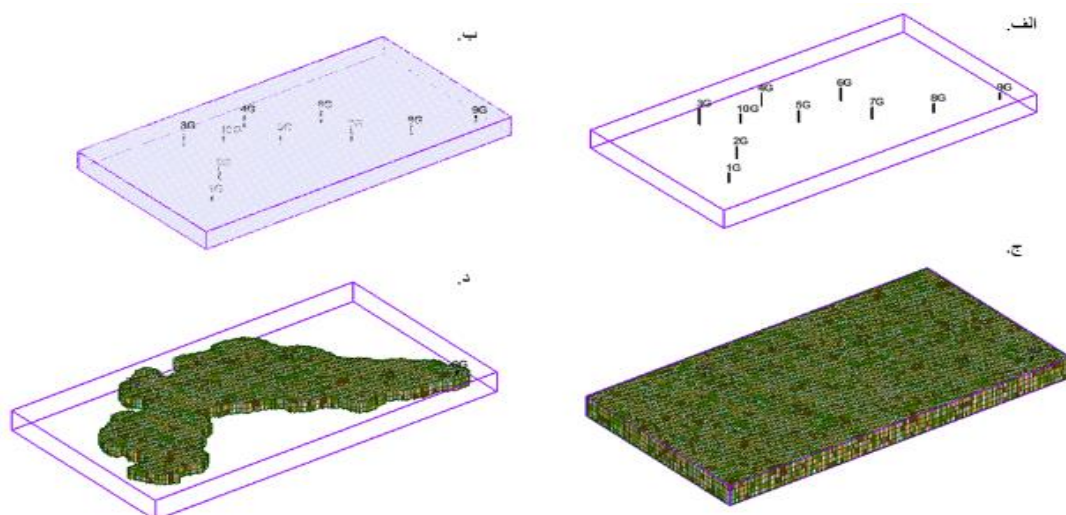


شکل ۶- توالی چینه‌نگاری حفاری

Figure 6- Drilling stratigraphic sequence

شدند (شکل ۷ الف). مرحله دوم شبکه همگنی به ابعاد سلول‌های ۱۵۰ متری به تعداد ۱۳۴۱۶ به طوری که کل آبخوان را پوشش دهد ایجاد شد (شکل ۷ ب). مرحله سوم با اجرای نرم‌افزار T-PROGS مواد تشکیل‌دهنده کل شبکه مشخص شد (شکل ۷ ج). مرحله چهارم شبکه به سلول‌های که داخل مرز آبخوان محدود شد (شکل ۷ د).

۲-۸-۲-۱-۲- تمهیم اطلاعات لاگ حفاری به کل آبخوان با استفاده از کد T-PROGS
پس از ایجاد لاگ‌های چاه‌های اکتشافی و تعیین مرز، ضخامت و شبکه‌بندی آبخوان منطقه مورد مطالعه از کد T-PROGS برای مشخص کردن جنس و ناهمگنی کل آبخوان استفاده شد. شکل ۷ فرآیند ساخت مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان دامنه را نشان می‌دهند. در مرحله اول لاگ‌های حفاری آبخوان دامنه ایجاد



شکل ۷- چهار مرحله ساخت مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی آبخوان دامنه

Figure 7- Four stages of construction of a three-dimensional geological model of an aquifer Damaneh

خروجی‌های مدل MODFLOW با ۳۰ خروجی تعریف شده در نرم‌افزار T-PROG برابر است. از این ۳۰ پاسخ مدل، پاسخی که کم‌ترین خطا را داشت برای اجرای مدل MODPATH انتخاب شد. ذرات برای بررسی حرکت روبه جلوی آلودگی در نقاط مختلف دشت قرار داده شده و انتقال آلودگی توسط ردیابی حرکت آن‌ها شبیه‌سازی شد. با توجه به رابطه موجود بین طول مسیر جریان و ضریب دیسپرسیویته طولی، مقادیر این پارامتر در مناطق مختلف آبخوان تخمین زده شد. به این ترتیب لایه ضریب پراکنندگی طولی در GIS ساخته و به کد MT3DMS انتقال داده شد. مقادیر ضریب پراکنندگی عرضی و عمودی با توجه به نتایج آزمایشگاهی EPA به ترتیب برابر با $a_T = \frac{1}{\lambda} a_L$ و $a_V = \frac{1}{\lambda} a_L$ وارد کد MT3DMS و همچنین ضریب انتشار مولکولی برای نیترات 5×10^{-5} مترمربع بر روز منظور شده است (Kord et al., 2019).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بهینه‌سازی ضرایب هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار جدول ۲ اختلاف سطح آب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای را در حالت پایدار نشان می‌دهد که بیش‌تر این اختلاف ۰/۸۷ متر در محدوده چاه شماره ۸ نه است. اگر اختلاف سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در بازه تعیین شده قرار گیرد رنگ میله چاه مشاهده‌ای سبز خواهد بود. اگر میزان خطا بیش از حد تعیین شده و کم‌تر از ۲۰۰ درصد تعیین شده باشد، رنگ آن زرد و اگر بیش‌تر از ۲۰۰ درصد باشد به رنگ قرمز خواهد بود. پس از اجرای مدل، انطباق قابل‌قبولی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسبه‌ای مشاهده شد، شکل ۸ ضریب هدایت هیدرولیکی برای واسنجی در حالت پایدار را نشان می‌دهد.

در این پژوهش ۳۰ خروجی متفاوت با کد T-PROGS ساخته شد. سپس داده‌های این خروجی وارد کد MODFLOW شد و بعد از انتخاب حالت استوکاستیک مدل اجرا شد.

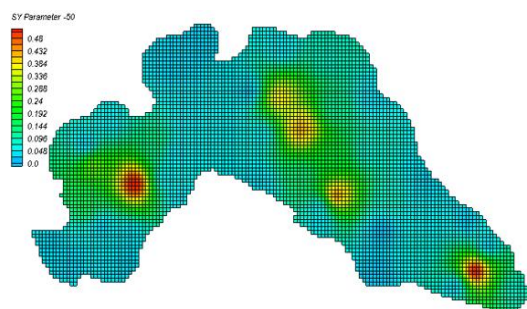
۲-۸-۲- تکمیل مدل انتقال در حالت استوکاستیک

۲-۸-۲-۱- توسعه مدل مفهومی

پس از تکمیل مدل جریان، مدل انتقال اجرا می‌شود. مدل انتقال علاوه بر داده‌های اولیه که برای مدل جریان استفاده می‌شود نیاز به اطلاعات بیش‌تری دارد که می‌توان به مواردی هم‌چون تخلخل، ضریب پراکنندگی طولی و عرضی، مقدار غلظت آلاینده ورودی به آبخوان، وزن مخصوص خاک و مقدار انحلال مواد آلاینده اشاره کرد. در این پژوهش مقادیر تخلخل و وزن مخصوص خاک در قسمت مدل‌سازی لاگ‌های حفاری برای هر یک از مصالح مشخص شدند. چون هدف این پژوهش مدل‌سازی انتقال نیترات است و همان‌طور که در بخش شیمی نیترات به ویژگی‌های نیترات اشاره شد، و مشخص شد که نیترات ماده شیمیایی با حالیت بالا و هم‌چنین دارای بار منفی است، به همین خاطر جذب خاک نمی‌شود و انحلال بسیار پایینی را دارد. در پژوهش حاضر مقدار جذب نیترات به خاک صفر در نظر گرفته شد.

۲-۸-۲-۲- ضریب پراکنندگی طولی، عرضی و عمودی

یکی از راهکارهایی که از طریق آن می‌توان طول مسیرهای جریان را تخمین زد استفاده از مدل ردیاب MODPATH است. مدل MODPATH معمولاً در تلفیق با MODFLOW به کار می‌رود. در نتیجه معمولاً باید نتایج و بسته‌های به کار رفته در مدل شبیه‌ساز جریان را در مدل MODPATH نیز وارد شود (Rezapor Tabari et al., 2021). در حالت استوکاستیک تعداد



شکل ۱۰- پهنه‌بندی آبدهی ویژه
Figure 10- Special discharge zoning

۳-۳-۳ نتایج مدل‌سازی انتقال نیترات

هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه در مدل‌سازی جریان و تخلخل و ضریب پراکندگی در مدل‌سازی انتقال آلودگی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در شبیه‌سازی آبخوان‌ها محسوب می‌شوند (Ghadimi and Ketabchi, 2019). برای تولید اطلاعات مشخصات زمین در کل سطح آبخوان، نرم‌افزار GMS کد T-PROG را برای این منظور قرار داده است. در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی انتقال نیترات آبخوان دامنه از مدل‌سازی استوکاستیک نرم‌افزار GMS استفاده شد.

۳-۳-۱ نتایج خروجی T-PROGS

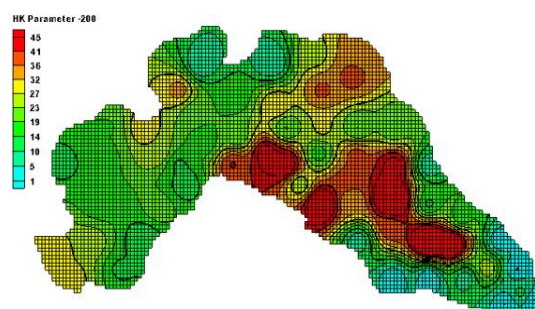
نرم‌افزار T-PORGS در واقع با استفاده از احتمال شرطی اطلاعات لاگ‌های حفاری را در کل سطح آبخوان تعمیم می‌دهد. در آبخوان دامنه نتایج ارائه شده این اکتشافات از عدم قطعیت بالایی برخوردار بوده، چرا که در برخی چاه‌های لاگ‌های مجاور تفاوت‌های فاحشی بین جنس و پروفیل این لاگ‌ها دیده می‌شود. به همین منظور ۳۰ خروجی متفاوت از نرم‌افزار T-PROGS حاصل شد و از آن‌جایی که امکان بررسی خطاهای درون‌یابی و انتخاب بهترین ناهمگنی درون‌یابی شده در GMS نیست تمامی خروجی‌های T-PROGS برای ورودی احتمالاتی وارد کد MODFLOW شد. برای نمونه شکل ۱۱ توزیع ناهمگنی مصالح سطح زمین را برای سه خروجی متفاوت T-PROGS نشان می‌دهد.

۳-۳-۲ نتایج خروجی MODPATH

برای محاسبه طول مسیر و زمان حرکت ذرات آلودگی در سطح آبخوان نقاطی مشخص و مدل MODPATH اجرا شد. نتایج زمان انتقال را بین دو تا هفت سال نشان داد که کوتاه‌ترین و طولانی‌ترین مسیر طی شده ذرات در این بازه زمانی به ترتیب ۳۱۲ و ۶۲۰۰ متر است. شکل ۱۲ مسیر حرکت ذرات را در سطح آبخوان نشان می‌دهد. حرکت ذرات آبخوان به پنج ناحیه تقسیم شد که هر ناحیه نشان‌دهنده یک طول مسیر حرکت است (شکل ۱۳).

جدول ۲- مقایسه سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای
Table 2- Comparison of observational and calculated water levels

شماره چاه مشاهداتی	سطح آب مشاهده شده	سطح آب محاسبه شده	اختلاف
OBS-1	2274.89	2274.84	-0.05
OBS-2	2285.8	2285.73	-0.07
OBS-3	2318.25	2318.41	0.159
OBS-4	2312.29	2312.13	-0.156
OBS-5	2319.38	2319.36	-0.021
OBS-6	2317.29	2317.24	-0.046
OBS-7	2321.36	2320.57	-0.788
OBS-8	2323.63	2333.67	0.228
OBS-9	2391.47	2392.35	0.88

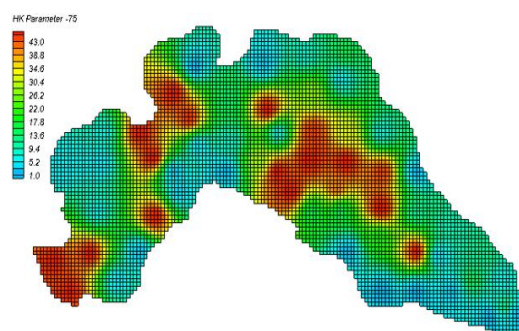


شکل ۸- پهنه‌بندی ضریب هدایت هیدرولیکی برای واسنجی در حالت پایدار
(بر حسب متر بر روز)

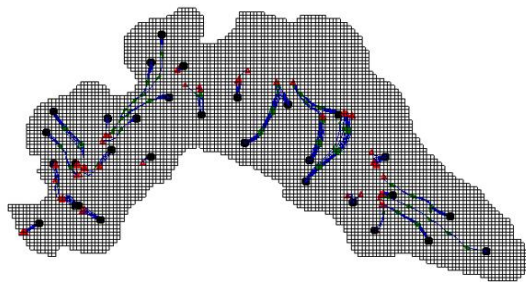
Figure 8- Hydraulic conductivity zoning for steady state calibration (in meters per day)

۳-۳-۲ بهینه‌سازی ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در حالت پایدار

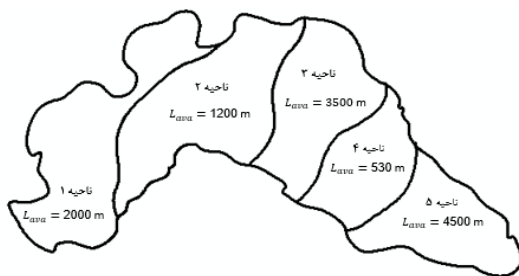
با استفاده از نرم‌افزار MINITAB تحلیل آماری بین داده‌های مشاهداتی که مقدار ضریب همبستگی ۹۹/۹ درصد، ضریب تعیین یک با سطح معناداری صفر به دست آمده نشان‌دهنده این است که تطابق خوبی بین سطح آب زیرزمینی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای وجود دارد. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب پهنه‌بندی نهایی ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را نشان می‌دهند.



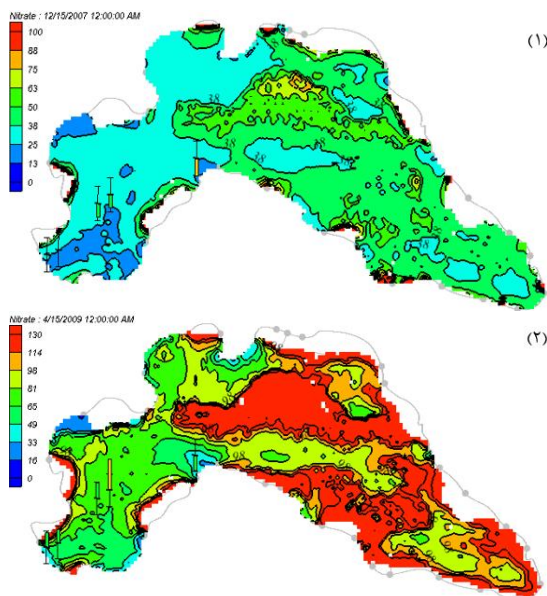
شکل ۹- پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی
Figure 9- Hydraulic conduction zoning



شکل ۱۲- مسیر حرکت ذرات، خروجی برنامه
Figure 12- Particle path, program output



شکل ۱۳- پنج ناحیه با طول مشخصی از حرکت ذرات
Figure 13- Five areas with a certain length of particle motion



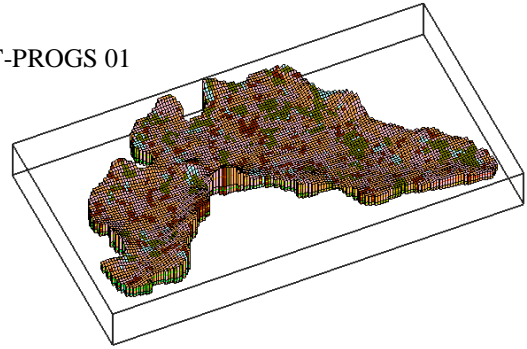
شکل ۱۴- روند شکل‌گیری و حرکت هاله آلودگی در آبخوان دامنه در ابتدای مدل‌سازی (۱) و پایان مدل‌سازی (۲)

Figure 14- The process of formation and movement of the pollution halo in the aquifer Damane at the beginning of modeling (1) and the end of modeling (2)

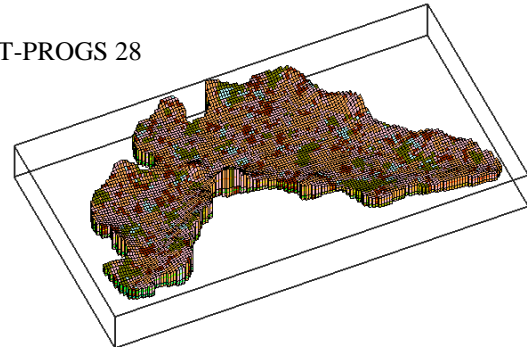
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان آبخوان آزاد دامنه از کد MODFLOW و برای انتقال آلودگی از کد MT3DMS در قالب نرم‌افزار GMS10.1 برای شبیه‌سازی در حالت پایدار و ناپایدار استفاده شد. تحلیل آماری خطاها برای مدل‌سازی جریان

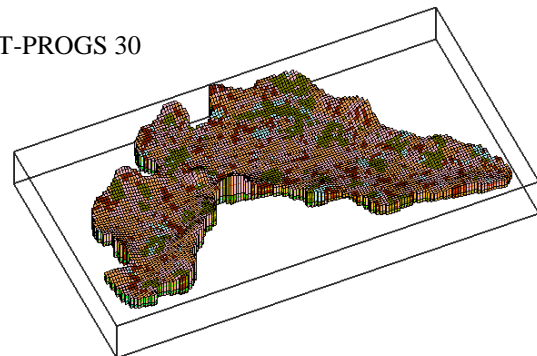
T-PROGS 01



T-PROGS 28



T-PROGS 30



شکل ۱۱- ناهمگنی آبخوان برای سه خروجی متفاوت

Figure 11- Aquifer heterogeneity for 3 different T-PROGS outputs

۳-۳-۳- بررسی حرکت هاله آلودگی

حرکت هاله آلودگی تشکیل شده در دشت دامنه با استفاده از خروجی‌های MT3DMS مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصاً در نقاطی از آبخوان که فعالیت‌ها کشاورزی زیادتر بوده، غلظت نیترات آب زیرزمینی در این نقاط بیشتر است. مدل MT3DMS هاله آلودگی شکل گرفته در سطح آبخوان دامنه را به خوبی تحلیل می‌کند. شکل ۱۴ هاله آلودگی را در چهار دوره متفاوت نشان می‌دهد.

همان‌طور که از اشکال مشخص است هاله آلودگی از مرکز فعالیت‌های کشاورزی شروع شده و در طول زمان در جهت عرضی و طولی گسترش پیدا می‌کند و در طی دو سال غلظت نیترات در سطح آبخوان از میزان حد مجاز فراتر رفته و همچنین حداکثر و حداقل غلظت نیترات به ترتیب ۱۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم است.

نشان می‌دهد که با کاهش نرخ پمپاژ، حجم آب ورودی از مرزهای GHB کاهش پیدا می‌کند و همچنین با کاهش نرخ پمپاژ، حجم آب خروجی از مرزها افزایش پیدا می‌کند.

۶- نتایج ردیابی ذرات نشان می‌دهد که عمده‌ترین علل آلودگی چاه‌های شرب داران عبارت‌اند از: عدم وجود سیستم جمع‌آوری تصفیه فاضلاب در شهر دامنه و واقع شدن چاه آب شرب شهرداران در مسیر جریان فاضلاب محلی، تأثیرپذیری از زمین‌های کشاورزی مجاور به دلیل وجود گرادیان هیدرولیکی به سمت منطقه. علاوه بر این گستره وسیعی از شمال دشت به واسطه استفاده از کودهای نیتروژنه در عملیات کشاورزی و تخلیه چاه فاضلاب دارای غلظتی رو به افزایش است.

۷- نتایج مدل انتقال نشان داد که در آبخوان دامنه فقط یک هاله آلودگی در حال شکل‌گیری است که مرکز این هاله آلودگی در موقعیت $UTMY=3656715$ و $UTMY=456655$ قرار گرفته و با سرعت تقریبی ۱۵ متر در روز در حال گسترش در کل آبخوان است. در فروردین سال ۸۸ مرکز هاله آلودگی دارای غلظت ۱۳۰ میلی‌گرم در لیتر بوده که با افزایش فاصله از مرکز هاله از مقدار غلظت نیترات کاسته می‌شود.

۸- نیترات روشویی شده از سطح آبخوان در ماه‌های فروردین و اردیبهشت بیش‌ترین و در ماه‌های شهریور تا آبان کم‌ترین میزان را دارد. این نتیجه مطابق با الگوی کشت و مصرف کودهای کشاورزی در این محدوده است.

۹- همان‌طور که نتایج مدل‌سازی نشان داد غلظت نیترات در بیش‌تر مناطق آبخوان دامنه از مرز ۸۰ میلی‌گرم در لیتر در طی سال‌های ۸۶ تا ۸۷ گذشته و طبق استانداردهای مصرف آب شرب بیش از حد مجاز است و کاهش غلظت نیترات و پاک‌سازی آبخوان دامنه ضروری است.

۱۰- از سه روش مطرح شده برای پاک‌سازی آبخوان، روش محصورسازی هاله آلودگی به دلیل نزدیک چگالی‌های آب زلال با آب نیترات دار و روش استخراج آلودگی به دلیل پهنای هاله آلودگی و تعداد زیاد چاه‌های بهره‌بردار قابل‌اجرا نیستند و فقط روش تصفیه آب برای کاهش غلظت نیترات و رسیدن به حد مجاز در آبخوان دامنه مناسب است.

۱۱- نتایج تحلیل حساسیت و واسنجی نشان می‌دهد که مدل به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدی ویژه نسبتاً حساسیت زیادی دارد، توصیه می‌شود برای درک بهتر این پارامترها و رسیدن به نتایج بهتر آزمایش‌های بیش‌تری در منطقه انجام شود.

۱۲- پیشنهاد می‌شود آمار دقیق و جدید از چاه‌های بهره‌بردار در منطقه تهیه گردد، اگرچه در سطح دشت‌هایی نظیر دشت دامنه بسیار هزینه‌بر است، اما شرایط ویژه این دشت، توجه

در حالت پایدار حداکثر اختلاف تراز آب مشاهده‌ای با محاسباتی $0/87$ متر و میزان خطای RMSE و ضریب همبستگی در حالت ناپایدار برای دوره واسنجی به ترتیب $0/99$ متر و $99/9$ درصد و برای دوره صحت‌سنجی به ترتیب $1/113$ متر و $99/7$ درصد حاصل شد. برای مدل‌سازی انتقال ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی $89/1$ درصد است.

با توجه به مقادیر خطا می‌توان نتیجه گرفت که مدل ریاضی طراحی شده برای جریان و انتقال آلودگی تطبیق خوبی با شرایط طبیعی آبخوان دارد و رفتار سیستم هیدرولوژیکی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است:

۱- نتایج تحلیل حساسیت مدل جریان نشان داد که مدل به ترتیب به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه حساسیت بیش‌تری دارد و همچنین مدل انتقال نیز به ترتیب به تغذیه از سطح، تخلخل و ضریب پراکندگی طولی و به تغذیه از مرزهای آبخوان حساسیت بیش‌تری دارد.

۲- نتایج سناریوهای تعریف شده نشان می‌دهد که استحصال از آبخوان دامنه با سیاست فعلی باعث خشک‌شدن قسمت‌های بیش‌تری از آبخوان شده به طوری که حداکثر افت در محدوده چاه مشاهداتی پنج به میزان $12/20$ متر و حداقل مقدار افت در محدوده چاه مشاهده‌ای سه به میزان $1/70$ متر است. کاهش در نرخ پمپاژ از آبخوان تأثیر مثبت و البته متفاوت بر روی سطح آبخوان گذاشته، به طوری که بیش‌ترین تأثیر در محدوده چاه دو به میزان 94 درصد است.

۳- تحلیل هیدروگراف‌ها از سال 1384 تا 1392 نشان می‌دهند که آبخوان دامنه توسعه یافته و لازم است که برای این آبخوان برداشت مجاز تعریف شود. در این مطالعه برای تحقق برداشت مجاز ابتدا رابطه‌ای برای تغذیه و افت سطح آب نسبت به سال 1384 تهیه و متناسب با نمودار حاصله نرخ پمپاژ را تغییر داده و بعد از اجرای مدل هیدروگراف چاه‌ها استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از نمودار تغذیه- پمپاژ می‌توان سطح آب را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی در حد معینی کنترل کرد.

۴- تفسیر هیدروگراف‌های حاصل شده از مدل‌سازی با استفاده از نمودار تغذیه- پمپاژ نشان می‌دهد که مناطقی که به مرز آبخوان نزدیک هستند بیش‌تر تحت تأثیر مرز آبخوان قرار گرفته و به تنش‌های اعمال شده به آبخوان واکنشی نشان نمی‌دهد. همچنین در نقاطی که مخروط افت چاه‌های بهره‌بردار با هم تلاقی دارند اثر کاهش برداشت آب تأثیر کم‌تری نسبت به مناطقی که چاه‌های بهره‌بردار دارای تراکم کم هستند را دارد.

۵- تغییرات بیلان آبی، در زمانی که سطح آب با کاهش نرخ پمپاژ افزایش می‌یابد، با بررسی حجم آب ورودی و خروجی از مرزهای (GHB) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی

بیش‌تری را می‌طلبید. ارائه‌کننده هوشمند مؤثرترین برنامه‌های کنترل برداشت در منطقه است.

سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر مهدی شاهرخی بابت مساعدت و راهنمایی‌هایی که در جهت انجام این تحقیق کردند، کمال تشکر

منابع

- احمدی، ع. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات کیفی آب زیرزمینی در دشت ورامین تهران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۳(۱)، ۱۴-۲۶. براتی، خ.، عابدی کوپایی، ج.، آذری، آ.، درویشی، ا.، و یوسفی، ع. (۱۳۹۸). مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیکی در آبخوان آزاد (مطالعه موردی: دشت کرمانشاه). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۳(۳)، ۶۸۷-۷۰۰.
- خلیلی، ر.، منتصری، ح.، متقی، ح. و جلیلی، م. (۱۴۰۰). ارزیابی کیفیت آب رودخانه تالار استان مازندران با استفاده از ترکیب شاخص‌های کیفیت آب و مدل‌سازی چندمتغیره. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۳(۴)، ۳۰-۴۷.
- رضایی، م.، بایمزد، ش. و اعظمی، ا. (۱۳۹۹). بررسی اثر سد کرخه بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMS (مطالعه موردی: دشت عباس، دهلران). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۳(۳)، ۲۶۵-۲۷۶.
- رحمانی، غ.، چیت‌سازان، م. و غفوری، ح. (۱۴۰۱). تعیین ارتباط افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در آبخوان دشت دامنه-داران با ترکیب مدل‌های عددی و تحلیلی. *زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، ۱۲(۲)، ۲۵۹-۲۷۵.
- روشنی، ه.، حیدری، م. و ستوده‌نیا، ع. (۱۳۹۸). تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نفوذ آب در خاک با استفاده از بهینه‌سازی معادلات نفوذ SCS و Horton. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۱(۱)، ۲۰۱-۲۱۳.
- رئیس‌دهکردی، م. (۱۴۰۱). تشریح انواع آلودگی‌ها در منابع آبی و حفاظت از منابع آب. *رویکردهای نوین در مهندسی عمران*، ۱(۱)، ۴۲-۵۲.
- رئیس‌دهکردی، م. و یگانه مظهر، ا. (۱۴۰۰). مشخصات و ویژگی‌های محیط متخلخل و انواع لایه‌های آبدار و همچنین تشریح انواع آلاینده‌ها در آبخوان‌ها. *رویکردهای نوین در مهندسی عمران*، ۱(۱)، ۵۷-۶۹.
- سروری، س. و ضیائی، ع. و جودوی، ع. (۱۳۹۸). بررسی اندرکنش رودخانه و آبخوان در دشت بجنورد به‌وسیله اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌سازی عددی. *آب و خاک*، ۳۳(۵)، ۶۷۱-۶۸۳.

University of Technology Publications, 917 pages (in Persian).

- Barati, Kh., Abedi Kopapi, J., Azari, A., Darvishi, E., & Yousefi, A. (2019). Ground water Modeling to determine hydrodynamics coefficients in unconfined aquifer (case study: Kermanshah Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3), 687-700 (in Persian).

را داریم. همچنین از جناب آقای دکتر احمد شرافتی، رئیس گروه ساخت و آب و عضو هیئت‌علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات بابت آموزش‌ها و راهنمایی‌های مؤثر ایشان، مراتب سپاس و قدردانی را داریم.

- شهبازی، م. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی و مدیریت آبخوان دشت خانمیرزا با استفاده از مدل MODFLOW. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
- صفوی، ح. و مصلحی بهارانچی، ا. (۱۳۸۹). تخمین ضرایب دیسپرسیو ته مکانیکی با استفاده از مدل MODPATH. مطالعه موردی: آبخوان کوهپایه-سگری اصفهان. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- صفوی، ح. (۱۳۹۳). هیدرولوژی مهندسی. چاپ چهارم، انتشارات ارکان دانش اصفهان، ۷۰۶ صفحه.
- عطایی آشتیانی، ب. و کتابچی، ح. (۱۳۹۳). هیدرولیک و آلودگی آب‌های زیرزمینی. چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۹۱۷ صفحه.
- کرد، م.، اصغری مقدم، ا. و نخعی، م. (۱۳۹۸). مدل‌سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی. *هیدروژئولوژی*، ۴(۱)، ۱۵۳-۱۶۷.
- لاله‌زاری، ر.، انصاری سامانی، ف.، معاضد، ه. و حقیقتی، ب. (۱۳۹۳). انتقال مواد جامد محلول به منابع برداشت آب شرب شهرکرد در اثر استفاده مجدد از آب آبیاری. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳(۳)، ۲۳۷-۲۵۱.
- محمدمیرزایی، ف.، ذاکری نیا، م. و هزارجریبی، ا. (۱۳۹۷). بهینه‌سازی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان آزاد گرگانرود با استفاده از مدل ریاضی GMS. اولین همایش ملی علوم کشاورزی و زیست محیطی ایران، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
- مردانی، ز.، ابراهیمی، ک.، عراقی‌نژاد، ش. و لیاقت، ع. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر غلظت آلودگی بر ضرایب پراکندگی طولی و عرضی محیط متخلخل اشباع. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۵(۱۳)، ۱۲۵۷-۱۲۶۹.
- وزارت نیرو، (۱۳۹۳). پیش‌نویس راهنمای تهیه مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی. شرکت مدیریت منابع ایران، تهران، ایران.

References

- Ahmadi, A. (2022). Investigation of groundwater quality changes in Varamin Plain of Tehran. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(1), 14-26 (in Persian).
- Atai Ashtiani, B., & Ketabachi, H. (2014). *Hydraulics and groundwater pollution*. 1th Edition: Sharif

- Bear, J., & Cheng, A. (2010). Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Part of the book series: *Theory and Applications of Transport in Porous Media*, Springer Science+Business Media.
- Ghadimi, S., & Ketabchi, H. (2019). Possibility of cooperative management in groundwater resources using an evolutionary hydro-economic simulation-optimization model. *Journal of Hydrology*, 578(4), 124094.
- Izady, A., Davaary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Alipoor, A., Joodavi, A., & Brusseau, M.L. (2014). A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(9), 3611-3631.
- Jalali, M. (2007). Assessment of the chemical components of Famenin groundwater, western Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 29(5), 357-374.
- Kahe, M.S., Javadi, S., Roozbahani, A., & Mohammadi, K. (2021). Parametric uncertainty analysis on hydrodynamic coefficients in groundwater numerical models using Monte Carlo method and RPEM. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 11583-11606.
- Khalili, R., Montaseri, H., Motaghi, H., & Jalili, M. (2021). Water quality assessment of the Talar River in Mazandaran Province based on a combination of water quality indicators and multivariate modeling. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 30-40 (in Persian).
- Kord, M., Asghari Moghaddam, A., & Nakhaei, M. (2019). Numerical modeling of Ardabil plain aquifer and its management using optimization of groundwater extraction. *Hydrogeology*, 4(1), 153-167 (in Persian).
- Lalehzari, R., Ansari Samany, F., Moazed, H., & Haghighti, B., (2014). Transport of total dissolved solids into urban discharge sources by irrigation water reuse effect. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(3), 237-251 (in Persian).
- Mardani, Z., Ebrahimi, K., Araghinejad, Sh., & Liaghat, A. (2018). Laboratory study on the effects of tracer concentration changes on longitudinal and transverse dispersion coefficients in saturated porous media. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(13), 1257-1269 (in Persian).
- Ministry of Energy, (2014). Draft guide for preparation of groundwater mathematical model. Iran Resources Management Company, Tehran, Iran (in Persian).
- Mohammad Mirzaei, F., Zakerinia, M., & Hezarjaribi, A. (2018). Optimizing the hydrodynamic coefficients of the open aquifer of Gorganrud using the GMS mathematical model. The 1th national conference of agricultural and environmental sciences of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Mohtashami, A., Hashemi Monfared, S.A., Azizyan, G., & Akbarpour, A. (2022). Numerical simulation of groundwater in an unconfined aquifer with a novel hybrid model (case study: Birjand aquifer, Iran). *Journal of Hydroinformatics*, 24(1), 160-178.
- Rahmani, G., Chitsazan, M., & Ghafouri, H. (2022). Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and analytical models. *Advanced Applied Geology*, 12(2), 259-275 (in Persian).
- Rezaei, M., Paimozd, Sh., & Aazami, A. (2020). Investigating of the effect of Karkkeh dam on underground water resources using GMS model (case study: Dasht-Abbas, Dehleran). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(3), 265-276 (in Persian).
- Raeisi Dehkordi, M. (2022). Describing the types of pollution in water resources and protecting water resources. *Journal of New Approaches in Civil Engineering*, 6(1), 42-52 (in Persian).
- Raeisi Dehkordi, M., & Yeganeh Mazhar, A. (2021). Properties and Characteristics of Porous Media and Types of Aquifers as well as Description of Pollutants in Aquifers. *Journal of New Approaches in Civil Engineering*, 5(1), 57-69 (in Persian).
- Roshani, H., Heydari, M., & Sotoodhnia, A. (2019). Estimation of hydrodynamic infiltration coefficients using optimization of SCS and Horton equations. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 50(1), 201-213 (in Persian).
- Rezapour Tabari, M.M., Eilbeigi, M., & Chitsazan, M. (2021). Multi-objective optimal model for sustainable management of groundwater resources in an arid and semiarid area using a coupled optimization-simulation modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 22179-22202.
- Safavi, H., & Moslehi Baharanchi, E. (2010). Estimation of mechanical dispersivity coefficients using MODPATH model, case study: Kohpayeh-Segzai aquifer of Isfahan. The 5th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, (in Persian).
- Safavi, H. (2014). *Engineering Hydrology*. 4th Edition: Isfahan Arkan Danesh Publications, 706 pages (in Persian).
- Sarvari, S., Ziaei, A., & Joodavi, A. (2020). Investigating of river-aquifer interactions in Bojnourd plain using reach measurements and numerical modeling. *Journal of Water and Soil*, 33(5), 671-683 (in Persian).
- Shahbazi, M. (2012). Simulation and management of Khanmirza plain aquifer using MODFLOW model. Master's Thesis, Yazd University, Yazd, Iran (in Persian).

Sharafati, A., Haghbin, M., Torabi, M., & Yaseen, Z.M. (2021). Assessment of novel nature-inspired fuzzy models for predicting long contraction scouring and related uncertainties. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(3), 665 – 681.

Singh, R.M., & Datta, B. (2004). Groundwater pollution source identification and simultaneous parameter estimation using pattern matching by artificial neural network. *Environmental Forensics*, 5(3), 143 – 153.