



Influence of the Babolsar landfill leachate on groundwater quality

Tahereh Azari¹, Marzieh Touri Kadar-Ghale², Fatemeh Kardel^{3*}

1. Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, University of Kharazmi, Karaj, Iran

2. MSc, Department of Environmental Sciences, Faculty of Marine and Environmental Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

3. Associate Professor, Department of Environmental sciences, Faculty of Marine and Environmental Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Article info

Article history

Received: 27 June 2023

Accepted: 21 August 2023

Keywords:

Groundwater Pollution,
Landfill, Heavy metals,
MT3DMS, MODFLOW.



Abstract

The infiltration of leachate resulting from waste disposal into the ground and reaching the groundwater aquifers leads to the pollution of groundwater resources. Considering the importance of water resources in the critical situation of Iran, it is necessary to carry out serious research to protect the existing resources. This research is a case study to simulate the process of leakage and transfer of leachate from landfill to groundwater and the spread and migration of four heavy metals (lead, iron, zinc and cadmium) in the unconfined alluvial aquifer of Babolsar city. The 5 ha landfill investigated in this study receives 150 tons of solid waste per day from Babolsar city. Infiltration and transfer of leachate to this aquifer is simulated using finite difference technique and MODFLOW, MT3DMS codes in GMS software. After the implementation and calibration of the quantitative model, the qualitative model was implemented for four heavy metals (lead, iron, zinc and cadmium). By applying the processes of convection, hydrodynamic dispersion and absorption, the natural cleaning potential of each element was investigated and the qualitative model of pollutant transport was calibrated and the amount and rate of absorption in the studied range were determined for each element. Based on the simulation results, the structure and geological material have had the greatest impact on the transfer of leachate from municipal solid waste in the traditional landfill in Babolsar. Due to their low permeability and high capacity to absorb contaminants, clay and organic matter in the soil of the studied area have prevented the transmission and spread of pollution plume in the alluvial aquifer of Babolsar. In order to predict the potential of natural cleaning of the aquifer in the coming years and determine the fate of these elements, the graph of changes in the concentration of these elements until they reach the standard allowed concentration was drawn with respect to time and the equation for each element was determined. The cleaning equations obtained from the qualitative model are a suitable tool for predicting the development of the pollution plume in the aquifer and determining the natural changes in the concentration of these elements with time for the optimal management of the aquifer in the hands of experts.

Introduction

Pollution of ground and surface water resources through industrial, urban and

agricultural wastes and effluents is a serious problem in most parts of the world, especially in developing countries (Todd and Mays,

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106451>

*Corresponding author: Fatemeh Kardel; E-mail: F.Kardel@umz.ac.ir

How to cite this article: Azari, T., Touri Kadar-Ghale, M., Kardel, F., 2023. Influence of the Babolsar landfill leachate on groundwater quality. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(1), 227- 259.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106451>



2005). In our country, Iran, there are serious problems in the field of environmental pollutants, and the statistics provided by the relevant organizations are worrying in this regard. One of the important types of pollutants in our country's environment are potentially toxic elements and heavy metals that will have irreparable effects on groundwater resources in the long run. Heavy metals are of anthropogenic or terrestrial origin, or both. These potentially toxic elements present in wastes and effluents are finally concentrated in the environment and are absorbed by the human body based on the cumulative factor, leaving dangerous effects. The increasing production of waste in the country as well as the lack of proper waste disposal systems has led to the open disposal of waste in most of the country's plains.

In recent years, one of the most important and efficient tools for managing groundwater resources is the flow and pollution transfer models of aquifers, which have attracted the attention of many researchers due to saving time and money (Banejad et al., 2013).

Many studies have been conducted on the issue of pollution transfer from landfills and landfills (Han et al., 2014; Powell et al., 2015). Rojas (2004) conducted a study to determine the potential of groundwater pollution by leachate released from a 22-hectare landfill in Manila, Philippines, and modeled groundwater flow and pollution transfer using the FEMWATER module available in GMS. By using VISUAL HELP software, this researcher also determined the rate of leachate produced from this landfill site and the extent of its infiltration into the subsurface areas, and based on the results of the modeling, predicted the transfer of pollution for a non-reactive compound over a 50-year period. He also concluded that pollution of 150 and 250

mg/liter will occur in the next 5 and 10 years, respectively, in the groundwater resources of the Manila landfill area. Tauhid-Ur-Rahman (2009) modeled the transfer of pollution from a landfill in Uganda using FEMLAB software and concluded that the plume of pollution reaches the groundwater after 40 hours from the production site. Rouholahnejad and Sadrnejad (2009) modeled the landfill in the coastal area of Lebanon using FDM and FVM methods and also VISUAL HELP software to show that the leachate concentration meters even they will not reach the downstream areas in the next 75 years.

Zogi and Ghavidel (2011) used the HELP model to estimate the amount of leachate produced by landfills in Semnan city and concluded that rainfall, evaporation and transpiration have the greatest effect on the increase and decrease of production, respectively. Khanlari et al. (2013) studied the impact of leachate from the Hamedan landfill on groundwater and concluded that the geological and hydrogeological conditions of the landfill play an important role in the spread of pollution, and the amount of pollution in the surface aquifer is higher than in the deep aquifer. Motazeri (2013) modeled the pollution of groundwater sources and soil around the landfill in Shahrood city and concluded that the main factor of leachate transfer to the water table is the high permeability of the soil. Nakhaei et al. (2015) using HYDRUS and VISUAL HELP software, modeled the transfer of pollution caused by the leachate leakage of the Rasht landfill and concluded that in a period of 50 years, due to the insignificant concentration of infiltrated leachate and the high density of the layer at a depth of 40 meters, the transfer of pollution to the groundwater is prevented and the transfer of pollution takes place only in the

upper sedimentary parts. [Kakaei and Riyahi Bakhtiari \(2016\)](#) investigated the risk of leachate containing heavy metals from hazardous waste entering the groundwater in the Hamadan landfill using the IWEM model and concluded that it is necessary to determine the type of cover in order to prevent leachate from entering the groundwater. [Baghvand et al. \(2016\)](#) in a study to investigate the pollution of groundwater resources around the landfill of Takestan city, reached the conclusion that leachate leakage has changed the quality of groundwater resources near the landfill of Takestan. [Taheri Tizro et al. \(2018\)](#), conducted a study on the modeling of leachate transfer from landfill to deep aquifer located in Dasht Bahar and concluded that the geological condition of the landfill area has the greatest impact to the transfer of leachate pollution to the groundwater and in this plain so that the existence of a conglomerate layer has prevented the transfer of pollution to the groundwater. [Ranjbar and Pirzadeh \(2022\)](#) investigated the quantitative and qualitative condition of Dasht-e-Heng with MODFLOW and MT3DMS modeling. They showed that the reason for the increase in TDS of water from the center of the plain to the south of the aquifer is the structure and the type of formation, absorption wells and agricultural land use.

In this research, the study case is the Babolsar landfill, which is located in residential and coastal lands and is not designed according to sanitary and engineering principles. Also, in this place, the covering of the wastes and their compaction with sediments in order to reduce washing by rainwater and the penetration of leachate into the lower layers is not done properly, therefore this area is prone to groundwater pollution. Considering that no study has been done so far

to check the quality of groundwater in the Babolsar landfill area, in this research the potential of the Babolsar landfill in transferring heavy metals to the groundwater resources has been investigated using quantitative and qualitative modeling.

Material and methods

Case study

The studied area is part of the Babol-Amol plain of the Mazandaran study area. The study area is about 250 square kilometers. The Babolsar landfill with an area of 5 square kilometers is located in the northwestern part of the study area. This region is bounded by the Caspian Sea from the north, the Alborz Mountains from the south, the Qaimshahr-Joibar area from the east, and the Noor-Nowshahr area from the west. The most important surface streams in this area are the Babol and the Shazdeh rivers, which enter the plain from the heights of Alborz, flow along the plain and finally join the Caspian Sea. The water of these rivers is used for agriculture in the surrounding villages ([Yamani et al., 2006](#)). There are no outcrops of geological formations in the Babol-Amol area except for discontinuous Quaternary alluvial sediments.

Designing numerical model of the case study

In this research, flow and transfer modeling was done using the Mudflow and MT3DMS model ([Anderson and Woessner, 1992](#)). The modeling area is 250 square kilometers. The northern border is considered as a hydraulic border with a constant head boundary, and the western, eastern and southern borders of the plain are considered as borders with a variable head. The grid of this conceptual model is covered by 32 rows and 47 columns, considering the dimensions of 500 × 500 meters. The map of the bedrock and topography was also entered into the model. In

order to run the model, the initial conditions of the model (initial hydraulic load of the cells) must be determined. To calculate the steady state initial hydraulic head, the May 2012 equipotential map was used, and the hydraulic head was interpolated for all the cells of the study area and entered into the steady state flow model. In the unsteady state, water level information for each month was entered into the flow model in the same way. After all the data required by Mudflow (initial conditions, boundary conditions, level of the roof and bottom of the aquifer, feeding and discharging factors of the aquifer) were entered into the model, the model was ready to run. Calibration is done in steady and unsteady state in order to optimize the aquifer parameters (hydraulic conductivity and specific yield).

Designing qualitative model of the case study

In this research, in order to simulate the contamination of groundwater with heavy metals (cadmium, iron, lead and zinc) in Babolsar landfill site, 8 sampling wells have been used. The concentration of each of these elements in groundwater samples has been measured in one period (September 1400). Since the Babolsar aquifer flow model was set for the year 2012 and the sampling of heavy metals was for the year 2021, first the quantitative model was updated for the year 2021 and then the results of qualitative sampling for heavy metals from September 2021 for 4 months were considered to build the qualitative model of the aquifer.

In this study, the advection is applied by the Third order TVD scheme (Ultimate) method. Dispersion is applied to the qualitative model based on empirical relationships and using the type of granularity and the hydraulic conductivity value estimated in the flow model section. Due to the clay texture of the

soil of the study area and the presence of organic carbon in the soil, the absorption effect has been applied in the pollution model. Considering that the main source of heavy metals in the study area is the Babolsar landfill, this 5 ha area was considered as the source of pollution injection. Also, the concentration of heavy metals in the leachate samples obtained from the bottom of the landfill was considered as the initial concentration and was applied to the qualitative model of the plain from the Basic Transport Package menu and the Starting Concentration section. In this research, the pollution model was first implemented for each heavy metal (cadmium, iron, lead and zinc) and then by considering the delay factor and absorption factor, the pollution model was recalibrated for each element.

In order to predict the fate of each heavy metal in the study area in the coming years and to determine the self-remediation potential of the aquifer, the qualitative model of the plain for each element with an initial concentration of 2000 mg/L and the absorption rate obtained from the calibration was carried out and the graph of changes in the concentration of these elements with respect to the time to the point of reaching the permissible concentration was drawn and the purification equation for each element was obtained.

Results and Discussion

The potential of heavy metals transfer in groundwater resources of the landfill area of Babolsar city and the potential of its natural cleaning in the aquifer were simulated. Considering the loess of the soil texture of the study area and the presence of abundant clay and organic carbon in the soil of the area, apart from the processes of convection and hydrodynamic dispersion, the most important physical and chemical process effective in

cleaning the aquifer is the process of surface absorption. The changes in the relative concentration of each heavy metal until reaching the permitted standard concentration were simulated and plotted against time, and the equation for the purification of each element was determined, and these equations can be a simple tool for predicting the natural changes in the concentration of these elements with time in the hands of experts. Based on the cleaning equations obtained from the qualitative simulation of the Babolsar aquifer, the time required for the complete natural removal of elements such as lead, iron, zinc and cadmium in the landfill area will be equivalent to 15, 21, 27 and 50 months, respectively. Based on the results of the simulation of heavy metal pollution investigated in the study area and the maximum allowed standard concentration, 4 km for drinking and to 2 km for agricultural use from the center of the landfill are unsuitable.

Conclusions

Considering the soil texture of the study area and the presence of clay and organic carbon in it, the most important chemical and physical reaction in the aquifer is related to surface absorption.

It seems that elements such as lead, zinc, iron and cadmium are absorbed by clay minerals and organic carbon in the environment, and some iron is deposited in the form of iron and aluminum oxides.

Among the simulated elements, cadmium has the lowest absorption and lead has the highest absorption in the studied range.

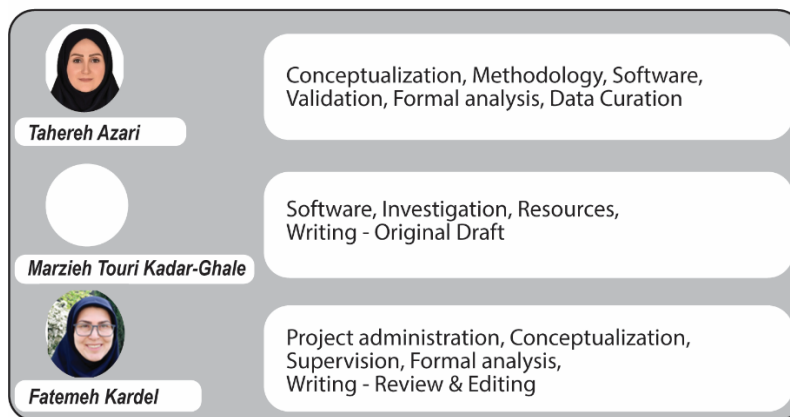
References

Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. ISBN-13: 978-0-12-059485-6.

- Baghvand, A., Nasirzade, R., Abdoli, M.A., Vosough, A., 2016. Investigation of contamination of groundwater sources surrounding landfill sites, case study: Takestan city landfill site. *Journal of Environmental Studies*, 41(4), 909-921.
- Banejad, H., Mohebzadeh, H., Ghobadi, Mohammad-Hosein., Heidari, M., 2013. Numerical simulation of flow and pollution transfer in groundwater, case study: Dasht Nahavand aquifer. *Water and Soil Science Journal* 27(2), 33-77 (In Persian).
- Han, D., Tong, X., Currell, M.J., Cao, G., Jin, M., Tong, C., 2014. Evaluation of the impact of an uncontrolled landfill on surrounding groundwater quality, Zhoukou, China. *Journal of Geochemical Exploration* 136, 24-39.
- Kakaei, K., Riyahi-Bakhtiari, A., 2016. Risk Assessment of Groundwaters Pollution by Heavy Metals of Hamadan Landfill Leachate and appropriate cover Recommendation. *International Journal of Environmental Health Research* 2(3), 221-227.
- Khanlari, G.H., Taleb Bidokhti, A.R., Momeni, A.A., Ahmadi, H.R., 2013. The effect of leachate of Hamedan landfill site on groundwater. *Journal of Iranian Association of Engineering Geology* 5(3), 81-106.
- Motazeri, H., 2013. Investigating and modeling the pollution of groundwater resources and soil around the landfill site Shahrood. Master's Degree Thesis. Iran. Islamic Azad University, Shahrood (In Persian).
- Nakhaei, M., Amiri, V., Rezaei, K., Moosaei, F., 2015. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of Rasht waste disposal site in Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74(1), 233-246.
- Powell, J.T., Townsend, T.G., Zimmerman, J.B., 2015. Estimates of solid waste disposal rates and reduction targets for landfill gas emissions. *Natural Climate Change* 6(2), 162-165.
- Ranjbar, A., Pirzadeh, B., 2022. Investigation of groundwater status of Hengam plain using

- quantitative and qualitative models (MODFLOW and MT3DMS). *Journal of Iranian Water Engineering Research* 1(1), 27-44 (In Persian).
- Rojas, D. Jr. S., 2004. A study of the potential groundwater contamination from the leachate of the Payatas Dumpsite in Metro Manila, Philippines. Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Program.
- Rouhollahnejad, E., Sadrnejad, S.A., 2009. Numerical Simulation of Leachate Transport in to the Groundwater at Landfill Sites. 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation July 13-17, Cairns, Australia.
- Sari Regional Water Company., 2022. analysis of statistics and information and water balance of Mazandaran rivers catchment area (In Persian).
- Taheri-Tizro, A., Sarhadi, B., Mohamadi, M., 2018. MODFLOW/MT3DMS based modeling leachate pollution transfer in solid waste disposal of Bahar plain deep aquifer. *Iranian Journal of Health Sciences* 6(2), 11-30.
- Tauhid-Ur-Rahman, M.d., 2009. An investigation of the contaminant transport from the disposal site, using FEMLAB. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 4(2), 79-88.
- Todd, D.K., Mays Larry, W., 2005. *Groundwater Hydrology*. 4th ed. NewYork: John Wiley & Sons, Inc, pp. 358.
- Yamani, M., Hoseinzadeh, M.M., NoheGar, A., 2006. Hydrodynamics of Talar and Babol rivers and its role in the instability and change of their geometric characteristics. *Geographical research* 38(55), 15-33 (In Persian).
- Zogi, M.J., Ghavidel, A., 2011. Prediction of landfill leachate amount using HELP model Case study: Semnan landfill. *Iranian Journal of Health and Environment*, 4(1), 65-75.

CRediT authorship contribution statement





تأثیر شیرابه لندفیل شهرستان بابلسر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی

طاهره آذری^۱، مرضیه طوری کادر قلعه^۲، فاطمه کاردل^{۳*}

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران
۲. کارشناسی ارشد، گروه علوم محیط زیست، دانشکده علوم دریایی و محیطی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران
۳. دانشیار، گروه علوم محیط زیست، دانشکده علوم دریایی و محیطی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>نفوذ شیرابه حاصل از دفن پسماندها به داخل زمین و رسیدن آن به سفره‌های آب زیرزمینی منجر به آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌گردد. با توجه به اهمیت منابع آب در وضعیت بحرانی کشور ایران، انجام تحقیقات جدی جهت حفاظت منابع موجود ضروری است. این تحقیق یک مطالعه موردی از شبیه‌سازی فرآیند نشت و انتقال شیرابه از لندفیل به آب زیرزمینی و میزان گسترش و مهاجرت چهار فلز سنگین (سرب، آهن، روی و کادمیوم) در آبخوان آبرفتی آزاد شهرستان بابلسر است. لندفیل مورد مطالعه در این تحقیق با مساحت ۵ هکتار روزانه ۱۵۰ تن زباله جامد شهرستان بابلسر را دریافت می‌کند. نفوذ و انتقال شیرابه به این آبخوان با استفاده از تکنیک تفاضل محدود و کدهای MODFLOW، MT3DMS در نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی شده است. پس از اجرا و کالیبراسیون مدل کمی، مدل کیفی برای چهار فلز سنگین (سرب، آهن، روی و کادمیوم) اجرا گردید. با اعمال فرآیندهای همرفت، پراکنش هیدرودینامیکی و جذب، پتانسیل پاکسازی طبیعی هر عنصر بررسی شد و مدل کیفی انتقال آلاینده واسنجی و مقدار و نرخ جذب در محدوده مورد مطالعه برای هر عنصر تعیین گردید. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، ساختار و جنس زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را در انتقال شیرابه حاصل از زباله‌های جامد شهری در لندفیل سنتی بابلسر داشته است. رس و مواد آلی موجود در خاک محدوده مورد مطالعه به دلیل تراوایی کم و ظرفیت بالای جذب آلاینده‌ها از انتقال و گسترش ابر آلودگی در آبخوان آبرفتی بابلسر جلوگیری نموده است. جهت پیش‌بینی پتانسیل پاکسازی طبیعی آبخوان در سال‌های آتی و تعیین سرنوشت این عناصر، نمودار تغییرات غلظت این عناصر تا رسیدن به غلظت استاندارد مجاز نسبت به زمان ترسیم گردید و معادله مربوط به هر عنصر تعیین شد. معادلات پاکسازی حاصل از مدل کیفی، ابزار مناسبی برای پیش‌بینی توسعه‌هاله آلودگی در آبخوان و تعیین تغییرات طبیعی غلظت این عناصر با زمان جهت مدیریت بهینه آبخوان در دست متخصصان است.</p>	<p>تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰</p> <p>واژه‌های کلیدی آلودگی آب زیرزمینی، لندفیل، فلزات سنگین، MT3DMS، MODFLOW</p>



مقدمه

آلودگی منابع آب زیرزمینی و سطحی از طریق پسماندها و پساب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی مشکلی جدی در اکثر نقاط دنیا به ویژه کشورهای در حال توسعه محسوب است (Todd and Mays, 2005). در کشور ایران مشکلات جدی در زمینه آلاینده‌های محیط زیست وجود دارد و آمارهای ارائه

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106451>

*نویسنده مسئول: فاطمه کاردل F.Kardel@umz.ac.ir

استناد به این مقاله آذری، ط، طوری کادر قلعه، م، کاردل، ک. (۱۴۰۲) تأثیر شیرابه لندفیل شهرستان بابلسر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۱، صفحه ۲۲۷ تا ۲۵۹. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106451>



شده توسط سازمان‌های ذیربط در این خصوص نگران کننده است (Alavi-Dehkordi et al., 2016). یکی از انواع آلاینده‌های مهم محیط زیست کشور ما، عناصر بالقوه سمی و فلزات سنگین هستند که در درازمدت اثرات جبران ناپذیری بر منابع آب زیرزمینی خواهند داشت. فلزات سنگین دارای منشأ انسان‌زاد، زمین‌زاد و یا هر دو هستند (Kakaei and Riyahi, 2016). این عناصر بالقوه سمی موجود در پسماندها و پساب‌ها در نهایت در محیط زیست تمرکز می‌یابند و بر اساس فاکتور تجمع‌ی جذب بدن انسان‌ها می‌شوند و اثرات خطرناکی از خود بر جای می‌گذارند. تولید روزافزون زباله در کشور و همچنین عدم وجود سیستم‌های دفن زباله مناسب منجر به دفع زباله به صورت روباز در اکثر دشت‌های کشور شده است که این عمل، آبخوان‌های محل دفن زباله‌ها را در معرض خطر جدی آلودگی آب زیرزمینی قرار داده است. در سال‌های اخیر یکی از ابزارهای مهم و کارآمد جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی، مدل‌های جریان و انتقال آلودگی آبخوان‌ها می‌باشند که به علت صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته‌اند (Rayne et al., 2001; Rojas, 2004; El Yaouti et al., 2008; Bear and Chang, 2010; Alijani et al., 2013; Banejad et al., 2013; Alavi-Dehkordi et al., 2016). در رابطه با بحث انتقال آلودگی از لندفیل‌ها و مکان‌های دفن زباله مطالعات زیادی صورت گرفته است (Fatta et al., 1999; Saarela, 2003; Chofqi et al., 2004; Lee et al., 2006; Han et al., 2014; El-Salam and Abu-Zuid, 2015; Powell et al., 2015).

تعیین پتانسیل آلودگی منابع آب زیرزمینی توسط شیرابه رها شده از یک لندفیل با مساحت ۲۲ هکتار در مانیل فیلیپین انجام داد و مدل‌های جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی با استفاده از مدول FEMWATER موجود در GMS را تهیه نمود. همچنین این محقق با استفاده از نرم‌افزار VISUAL HELP، نرخ شیرابه تولیدی از محل این لندفیل و میزان نفوذ آن به مناطق زیرسطحی را تعیین کرد و بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی، انتقال آلودگی برای یک ترکیب غیر واکنشی در یک بازه زمانی ۵۰ ساله را پیش‌بینی نمود. ایشان همچنین نتیجه گرفت که آلودگی ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در ۵ و ۱۰ سال آینده در منابع آب زیرزمینی محدوده لندفیل مانیل ایجاد خواهد شد. توحید الرحمن (Tauhid-Ur-Rahman, 2009) انتقال آلودگی از محل دفن زباله در اوگاندا را با استفاده از نرم‌افزار FEMLAB مدل‌سازی نمود و به این نتیجه رسید که موج آلودگی بعد از گذشت ۴۰ ساعت از محل تولید به آب زیرزمینی می‌رسد. روح‌الله‌نژاد و صدرنژاد (Rouholahnejad and Sadrnejad, 2009) لندفیل موجود در منطقه ساحلی لبنان را با استفاده از روش‌های FDM و FVM و نیز با بهره‌گیری از نرم‌افزار VISUAL HELP مدل‌سازی نمودند و نشان دادند که کنتورهای غلظت شیرابه حتی در ۷۵ سال آینده نیز به مناطق پایین دست نخواهند رسید. کیتا و همکاران (Keita et al., 2009) به ارزیابی انتقال تعدادی از آلاینده‌های آلی در آب‌های زیرزمینی کم

در این خصوص نگران کننده است (Alavi-Dehkordi et al., 2016). یکی از انواع آلاینده‌های مهم محیط زیست کشور ما، عناصر بالقوه سمی و فلزات سنگین هستند که در درازمدت اثرات جبران ناپذیری بر منابع آب زیرزمینی خواهند داشت. فلزات سنگین دارای منشأ انسان‌زاد، زمین‌زاد و یا هر دو هستند (Kakaei and Riyahi, 2016). این عناصر بالقوه سمی موجود در پسماندها و پساب‌ها در نهایت در محیط زیست تمرکز می‌یابند و بر اساس فاکتور تجمع‌ی جذب بدن انسان‌ها می‌شوند و اثرات خطرناکی از خود بر جای می‌گذارند. تولید روزافزون زباله در کشور و همچنین عدم وجود سیستم‌های دفن زباله مناسب منجر به دفع زباله به صورت روباز در اکثر دشت‌های کشور شده است که این عمل، آبخوان‌های محل دفن زباله‌ها را در معرض خطر جدی آلودگی آب زیرزمینی قرار داده است. در سال‌های اخیر یکی از ابزارهای مهم و کارآمد جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی، مدل‌های جریان و انتقال آلودگی آبخوان‌ها می‌باشند که به علت صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته‌اند (Rayne et al., 2001; Rojas, 2004; El Yaouti et al., 2008; Bear and Chang, 2010; Alijani et al., 2013; Banejad et al., 2013; Alavi-Dehkordi et al., 2016). در رابطه با بحث انتقال آلودگی از لندفیل‌ها و مکان‌های دفن زباله مطالعات زیادی صورت گرفته است (Fatta et al., 1999; Saarela, 2003; Chofqi et al., 2004; Lee et al., 2006; Han et al., 2014; El-Salam and Abu-Zuid, 2015; Powell et al., 2015).

نفوذپذیری خاک می‌باشد. نخعی و همکاران (Nakhaei et al., 2015) در تحقیقی با استفاده از نرم‌افزارهای HYDRUS و VISUAL HELP نحوه انتقال آلودگی ناشی از نشت شیرابه لندفیل شهر رشت را مدل‌سازی کردند و به این نتیجه دست یافتند که در بازه زمانی ۵۰ ساله به دلیل ناچیز بودن غلظت شیرابه نفوذی و تراکم بالای لایه در عمق ۴۰ متری، از انتقال آلودگی به آب زیرزمینی جلوگیری شده و انتقال آلودگی تنها در قسمت‌های رسوبی بالایی صورت می‌گیرد.

کاکایی و ریاحی بختیاری (Kakaei and Riyahi Bakhtiari, 2016) در مطالعه‌ای خطر ورود شیرابه حاوی فلزات سنگین ناشی از پسماندهای خطرناک به آب زیرزمینی در لندفیل شهر همدان را با استفاده از مدل IWEM مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تعیین نوع پوشش به منظور جلوگیری از ورود شیرابه به آب زیرزمینی امری ضروری است. باغ‌وند و همکاران (Baghvand et al., 2016) در مطالعه‌ای جهت بررسی آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی اطراف لندفیل شهر تاکستان به این نتیجه دست یافتند که نشت شیرابه باعث تغییر کیفیت منابع آب زیرزمینی مجاور لندفیل تاکستان شده است. علوی دهکردی و همکاران (Alavi Dehkordi et al., 2016) در تحقیقی مدل‌سازی انتقال فلزات سنگین شیرابه‌های ناشی از دفن پسماند بر سفره آب زیرزمینی شهرکرد با استفاده از کد MT3DMS و GIS به این نتیجه رسیدند که با دو برابر شدن نرخ نفوذ آلودگی به آب زیرزمینی، غلظت آلودگی در

عمق و آب‌های سطحی محدوده لندفیل Jiaxing پرداختند. رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2010) در مطالعه‌ای با بررسی کیفیت آب ۵ حلقه چاه پایین دست لندفیل شهر سنندج به این نتیجه رسیدند که آب چاه‌های مورد مطالعه قابل شرب نمی‌باشند اما قابل استفاده در بخش کشاورزی و آبیاری هستند. پیروز و همکاران (Piruz et al., 2010) در تحقیقی بر روی لندفیل شهر رشت (منطقه جنگلی سراوان) به این نتیجه رسیدند که منابع آب سطحی، زیرزمینی و خاک منطقه به شدت آلوده شده و امکان جلوگیری از پیشروی آلودگی در منطقه وجود ندارد و با توجه به شیب منطقه، شیرابه راهی رودخانه زرچوب می‌شود. زوگی و قویدل (Zogi and Ghavidel, 2011) با استفاده از مدل HELP میزان شیرابه تولید شده در لندفیل شهرستان سمنان را تخمین زدند و به این نتیجه رسیدند که بارندگی، تبخیر و تعرق به ترتیب بیشترین تأثیر را روی افزایش و کاهش تولید شیرابه دارند. خانلری و همکاران (Khanlari et al., 2013) به مطالعه و بررسی میزان تأثیر شیرابه‌های حاصل از لندفیل شهر همدان بر آب‌های زیرزمینی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی محل دفن، نقش مهمی در گسترش آلودگی دارد و میزان آلودگی در آبخوان سطحی بیشتر از آبخوان عمیق است. موتذری (Motazeri, 2013) به مدل‌سازی آلودگی منابع آب زیرزمینی و خاک اطراف لندفیل شهر شاهرود پرداخت و به این نتیجه دست یافت که عامل اصلی انتقال شیرابه به سفره سطحی، بالابودن

لندفیل شهرکرد دو برابر و در هفشجان بیش از دو برابر می‌شود. برای طاهری تیزرو و همکاران (Taheri) (Tizro et al., 2018)، تحقیقی را بر روی مدل‌سازی انتقال شیرابه از لندفیل به آبخوان عمیق واقع در دشت بهار انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که وضعیت زمین‌شناسی محدوده لندفیل بیشترین تأثیر را در انتقال آلودگی شیرابه به آب زیرزمینی بر عهده دارد و در این دشت، وجود یک لایه کنگلومرایی ناتروا مانع از انتقال آلودگی به آب زیرزمینی این منطقه شده است. رنجبر و پیرزاده (Ranjbar and Pirzadeh, 2022) وضعیت کمی و کیفی دشت هنگام را با مدل‌سازی MODFLOW و MT3DMS مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که علت افزایش TDS آب از مرکز دشت تا جنوب آبخوان، ساختار و نوع سازند، چاه‌های جذبی و کاربری اراضی کشاورزی می‌باشد.

مورد مطالعاتی در این تحقیق، لندفیل بابلسر (واقع در استان مازندران) می‌باشد که در اراضی با کاربری مسکونی و ساحلی قرار گرفته است و مطابق اصول بهداشتی و مهندسی طراحی نشده است. همچنین در این مکان، پوشش زباله‌ها و متراکم نمودن آنها با رسوبات به منظور کاهش شستشو توسط آب باران و نفوذ شیرابه به لایه‌های زیرین به درستی صورت نمی‌گیرد؛ به همین دلیل این منطقه مستعد آلودگی آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به اینکه تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای جهت بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی محدوده لندفیل بابلسر انجام نشده است، پتانسیل انتقال فلزات سنگین به منابع آب

زیرزمینی محدوده مطالعاتی با استفاده از مدل‌سازی کمی و کیفی بررسی شده است تا کیفیت آب زیرزمینی و نحوه انتقال آلودگی فلزات سنگین ناشی از نشت شیرابه از محل لندفیل شهرستان بابلسر به آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد. یکی دیگر از اهداف، شناسایی مناطق مستعد آلودگی در جهت جریان موج آلودگی است که بر اساس آن، اقدامات لازم جهت پاکسازی آبخوان و جلوگیری از گسترش ابر آلودگی در آینده صورت گیرد.

مواد و روش‌ها

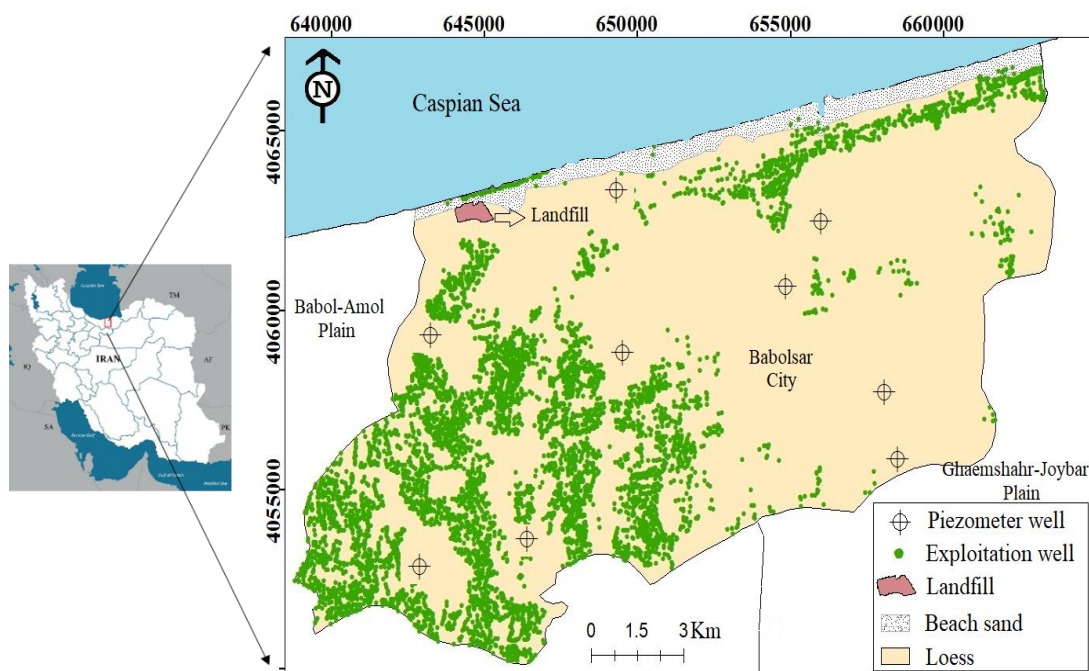
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از محدوده مطالعاتی بابل-آمل در استان مازندران است که با مختصات جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع است و لندفیل بابلسر با مساحت ۵ کیلومتر مربع در بخش شمال غربی آن قرار دارد (شکل ۱). این منطقه از شمال به دریای خزر، از جنوب به رشته کوه البرز، از شرق به محدوده مطالعاتی قائمشهر-جویبار و از غرب به محدوده مطالعاتی نور-نوشهر محدود می‌گردد. مهم‌ترین جریان‌های سطحی این محدوده، رودخانه بابل رود و رودخانه شازده می‌باشد که از ارتفاعات البرز وارد دشت شده و در طول دشت جریان داشته و در نهایت به دریای خزر می‌پیوندند. از آب این رودخانه جهت کشاورزی در روستاهای اطراف استفاده می‌شود (Yamani et al., 2006). در محدوده

۸۰۰ میلی‌متر در سال است (Sari Regional Water Company, 2022).

براساس جدیدترین آماربرداری که توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران در سال ۱۴۰۱ صورت گرفته است (Sari Regional Water Company, 2022)، هیچ چشمه و قناتی در محدوده مورد مطالعه وجود ندارد اما تعداد ۹ حلقه چاه پیژومتری و تعداد ۶۳۰۵ حلقه چاه در این محدوده وجود دارد که ۸۶ درصد از آنها با عمق کمتر از ۲۵ متر و ۱۴ درصد باقیمانده چاه‌های عمیق با عمق بیش از ۲۵ متر هستند (شکل ۱). در محدوده مورد مطالعه سالانه حجم ۲۱۴۵۰۲۲۰ متر مکعب آب زیرزمینی توسط این چاه‌ها تخلیه می‌گردد که ۹۸/۳ درصد از این آب جهت مصارف کشاورزی از نوع شالی و باغات و ۱/۷ درصد باقیمانده برای مصارف شرب، صنعت و آبی‌پروری استفاده می‌شود (Sari Regional Water Company, 2022).

بابل-آمل رخنمون هیچ سازند قدیمی زمین‌شناسی وجود ندارد؛ به استثناء رسوبات آبرفتی ناپیوسته کواترنری که حاصل تجزیه و تخریب سازندهای زمین‌شناسی بوده و تحت تأثیر عواملی همچون باد، باران، رواناب و نیروی ثقل حمل شده و در مناطق خاصی بر جای گذاشته شده‌اند (شکل ۱). رسوبات ناپیوسته‌ای که در محدوده مورد مطالعه وجود دارند عبارتند از رسوبات ساحلی (ماسه دارای کوکینا) مربوط به کواترنری فوقانی و رسوبات دشت ساحلی (ماسه ریزدانه به همراه لس) مربوط به کواترنری تحتانی (Sari Regional Water Company, 2022). یکی از پارامترهای پایه‌ای تأثیرگذار بر وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی، میزان ریزش‌های جوی است. در محدوده مورد مطالعه، تنها یک ایستگاه باران‌سنجی عرب‌خیل واقع شده است که میزان بارندگی ماهانه و سالانه در این ایستگاه به محدوده مطالعاتی تعمیم داده شده است. متوسط بارش سالانه در این محدوده در بازه زمانی (۱۳۹۹-۱۳۴۴) حدود



شکل ۱- موقعیت چاه‌های پیزومتری، بهره‌برداری و لندفیل در محدوده مورد مطالعه

Fig.1. The location of piezometric and exploitation wells and the landfill in the study area

انتقال سه‌بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل

روش کار

را می‌توان با استفاده از معادله دیفرانسیل جزئی زیر

عملکرد کدهای MODFLOW و MT3DMS

در کدهای خانواده MODFLOW بیان نمود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی که انتقال آلاینده‌هایی از نمونه k در سه بعد در یک سیستم جریان ناپایدار آب زیرزمینی شرح می‌دهد را می‌توان به صورت زیر نمایش داد (Kersic, 2006):

در این معادله، مجموع جبری جریان آب در جهت سه محور اصلی به اضافه آب برداشت شده یا تغذیه شده (R)، مساوی با تغییر حجم مخزن است. S ، ضریب ذخیره و بدون بعد می‌باشد و عبارت است از حجم آبی است که از واحد سطح قسمت لایه آبدار به ازای یک واحد تغییر بار آبی آزاد یا اضافه می‌شود.

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_y \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (2)$$

MT3DMS, Aqua chem., MOC3D, SUTRA, HST3D, SeaFeFlow, Win flow, GWVistas بدون شک مدلی که بیشترین کاربرد را در کیفیت آب‌های زیرزمینی داشته، مدل MT3DMS می‌باشد. این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان و آلودگی را در سیستم دوبعدی و سه‌بعدی دارد. در این تحقیق با استفاده از مدل MT3DMS مدل‌سازی فرآیند انتقال صورت گرفت (Anderson and Woessner, 1992).

ساخت مدل مفهومی

در این تحقیق مدل آب زیرزمینی برای آبخوان شهرستان بابلسر تهیه شده است. مساحت محدوده مدل‌سازی ۲۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد. در این محدوده، مقاطع تغذیه‌کننده جانبی آبخوان در قسمت‌های جنوبی، غربی و شرقی دشت و مقاطع تخلیه‌کننده زیرزمینی در ضلع شمالی دشت (دریاچه خزر) واقع شده‌اند. بنابراین مرز شمالی به عنوان مرز هیدرولیکی با بار ثابت و مرز غربی، شرقی و جنوبی دشت به عنوان مرزهایی با بار هیدرولیکی متغیر در نظر گرفته شده است. شکل ۲، شبکه‌بندی مدل آب زیرزمینی آبخوان بابلسر را نشان می‌دهد که در آن اندازه سلول‌ها ۵۰۰ در ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده و آبخوان توسط ۳۲ سطر و ۴۷ ستون پوشش داده شده است.

در این معادله:

θ : تخلخل محیط (بدون بعد)

C^k : غلظت حل شده نمونه k [ML^{-3}]

t : زمان [T]

X_{ij} : فاصله در امتداد محور مختصات دکارتی x [L]

D_{ij} : ضریب پخش هیدرودینامیکی [L^2T^{-1}]

V_i : سرعت خطی آب منفذی [LT^{-1}]

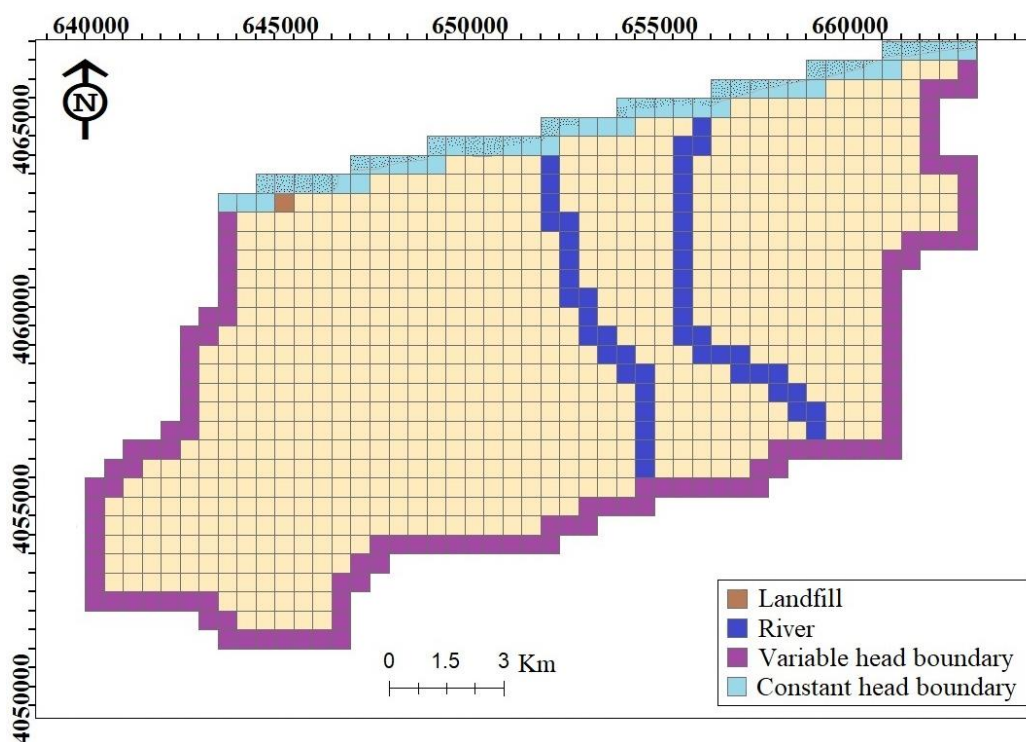
q_s : نرخ انتقال حجمی در واحد حجم آبخوان [T^{-1}]

C_s^k : غلظت تغذیه یا تخلیه برای نمونه k [ML^{-3}]

R_n : واکنش شیمیایی [$ML^{-3}T^{-1}$]

ترم سمت چپ این معادله معرف تغییرات غلظت، ترم اول سمت راست معرف فرآیند پراکنش هیدرودینامیکی، ترم دوم سمت راست معرف فرآیند همرفت، ترم سوم سمت راست معرف تزریق/تخلیه و ترم چهارم سمت راست معرف فرآیندهای شیمیایی است.

با توجه به نیاز به حل معادلات جریان و آلودگی در آب‌های زیرزمینی از حدود سی سال پیش در اکثر مراکز تحقیقاتی دانشگاهی و مهندسی مشاور دنیا، مدل‌سازی عددی آغاز شد. در میان مدل‌های ارائه شده از سال ۱۹۹۵ مانند PM Win, Aqua3D, GMS,

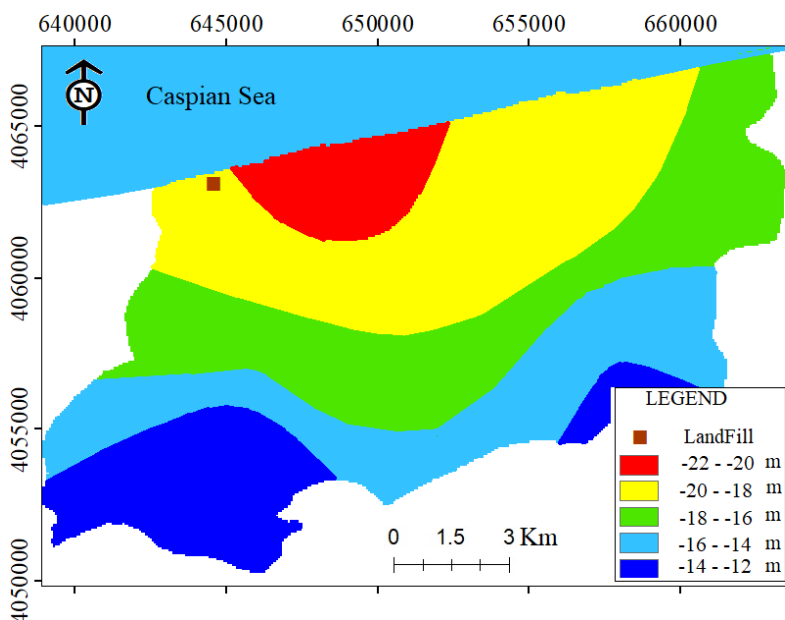


شکل ۲- شبکه مدل جریان و انتقال آلودگی آبخوان آبرفتی بابلسر

Fig. 2. The network of flow and pollution transfer model of the Babolsar alluvial aquifer

آبخوان موجود در منطقه مورد مطالعه از نوع آبرفتی و آزاد می‌باشد. در نتیجه سقف آبخوان، سطح زمین بوده و با استفاده از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ توپوگرافی منطقه و استفاده از نرم‌افزارهای GIS و SURFER، ارقام ارتفاعی به مدل وارد گردید (شکل ۳). با استفاده از نقشه توپوگرافی و نقشه هم ضخامت آبرفت، تراز سنگ کف آبخوان درون‌یابی گردید و به صورت فایل GRD به مدل وارد گردید (شکل ۴).

آبخوان موجود در منطقه مورد مطالعه از نوع آبرفتی و آزاد می‌باشد. در نتیجه سقف آبخوان، سطح زمین بوده و با استفاده از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ توپوگرافی منطقه و استفاده از نرم‌افزارهای GIS و



شکل ۳- نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

Fig.3. Topography map of the study area

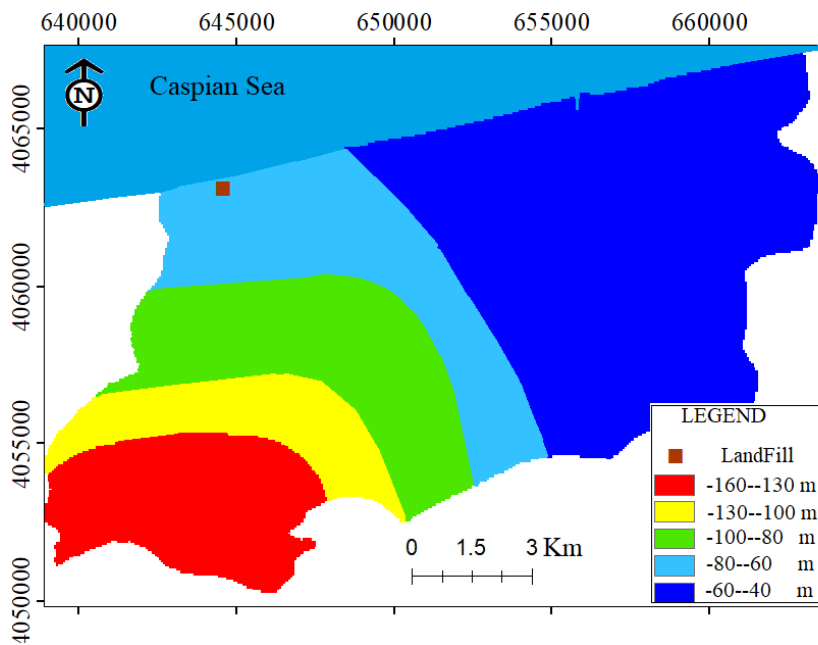


Fig. 4. The aquifer bed rock map of the study area

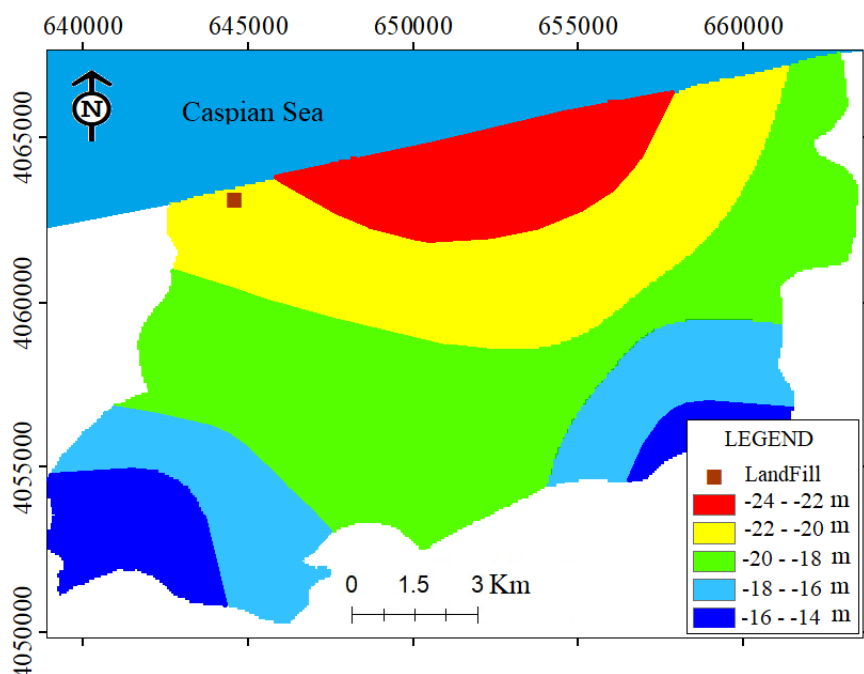
شکل ۴- نقشه سنگ کف آبخوان منطقه مورد مطالعه

ماه ۱۳۹۱ استفاده شد. سپس، بار هیدرولیکی برای تمامی سلول‌های محدوده مورد مطالعه درون‌یابی شده و به مدل جریان در شرایط پایدار وارد گردید. در

جهت اجرای مدل بایستی شرایط اولیه مدل (بار آبی اولیه سلول‌ها) تعیین گردد. برای محاسبه بار آبی اولیه در شرایط پایدار از نقشه هم پتانسیل اردیبهشت

موقعیت پیزومترها در شبکه مدل در شکل ۵ نشان داده شده است.

شرایط ناپایدار نیز به همین روش اطلاعات سطح آب برای هر ماه وارد مدل جریان در شرایط ناپایدار گردید. سطح آب اولیه سلول‌های فعال مدل و



شکل ۵- نقشه سطح آب اولیه در آبخوان بابلسر (اردیبهشت ۹۱)

Fig.5. The initial water level map of the Babolsar aquifer (May 2012).

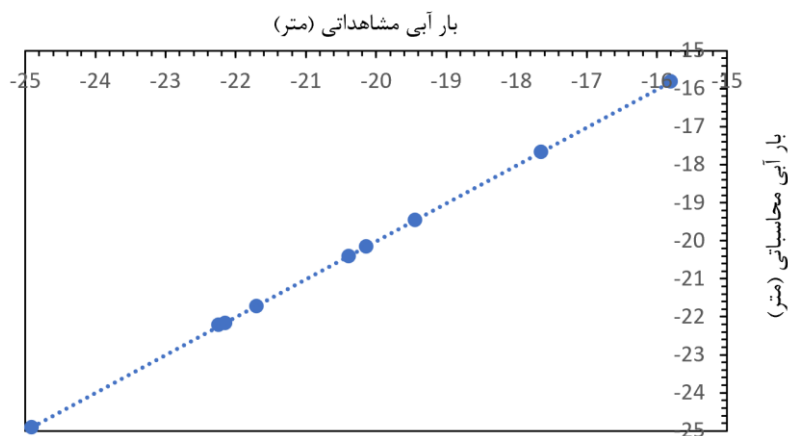
محاسباتی مادفلو مانند SOR1، GMG، LMG، SIP1، PCG2 مدل را اجرا کرد. بهتر است همه روش‌ها مورد بررسی قرار گیرند تا مشخص شود کدام روش بهترین نتیجه با کمترین میزان خطا را ارائه می‌دهد. معمولاً در اولین اجرا برازش مناسبی بین بار آبی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده به دست نخواهد آمد. برای دست یافتن به یک برازش قابل قبول بایستی خطاهای احتمالی موجود در فرایند مدل‌سازی شناسایی شده و واسنجی گردد. در مرحله واسنجی بایستی شرایط مرزی و پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان به گونه‌ای تنظیم شود که

اجرای اولیه و واسنجی مدل در شرایط پایدار
 پس از آنکه تمامی داده‌های مورد نیاز مادفلو (شرایط اولیه، شرایط مرزی، تراز سقف و کف آبخوان، عوامل تغذیه و تخلیه آبخوان) به مدل وارد گردید، مدل آماده اجرا است. جهت تصحیح خطاهای احتمالی می‌توان از یکی از امکانات نرم‌افزار GMS بنام Checker Model استفاده کرد که خطاهای واضح یا مشکلات پنهانی و بالقوه موجود بر سر راه اجرای مدل را گزارش می‌دهد. در مرحله بعدی و پس از رفع خطاهای گزارش شده توسط Checker Model می‌توان با انتخاب یکی از روش‌های

خطای میانگین (ME)، خطای میانگین مطلق (MAE)، مجذور متوسط مربع خطاها (RMSE) و نمودار پراکندگی بین داده‌های پس از فرایند واسنجی، میزان خطا در تمام پیژومترها به کمتر از ۰/۱ متر رسید. نمودار پراکندگی (Scatter-gram) در پایان واسنجی در شرایط پایدار نشان می‌دهد که تطابق مناسبی بین بار آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای ۹ پیژومتر موجود در دشت، توسط مدل جریان وجود دارد و مدل جریان دشت بابلسر به خوبی در این مرحله کالیبره گشته و برای ورود به مرحله بعدی (شرایط ناپایدار) آماده شده است (شکل ۶). شکل ۷، نقشه بار آبی مشاهداتی و محاسباتی در پایان دوره واسنجی (اردیبهشت ۱۳۹۱) را نشان می‌دهد. مقدار هدایت هیدرولیکی بهینه شده در شکل ۸، با شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان و مشاهدات صحرایی مطابقت دارد.

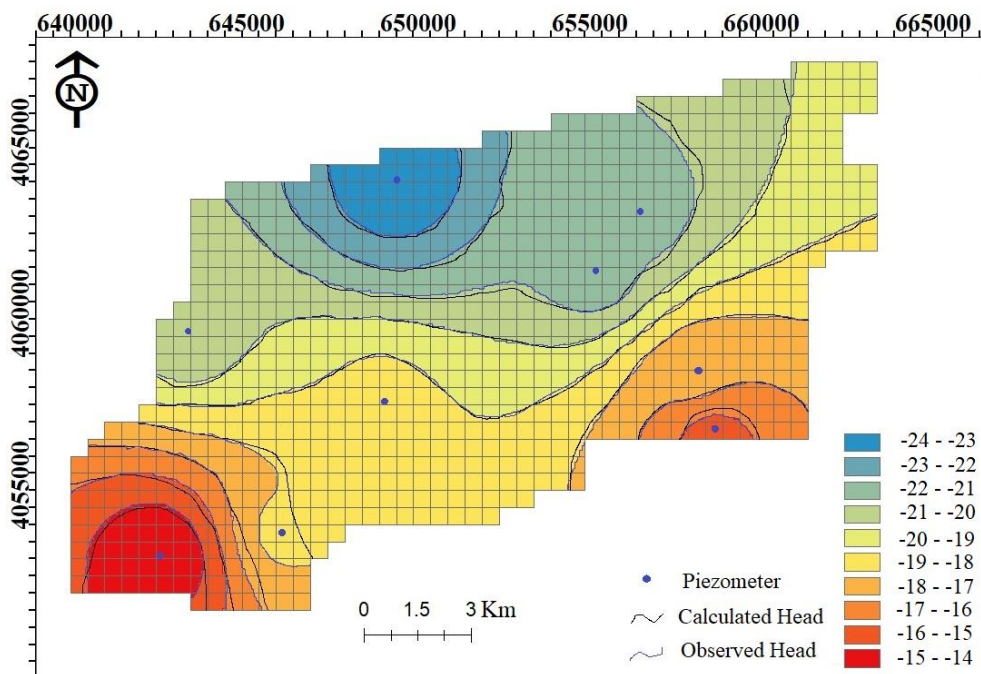
نتایج بدست آمده از مدل، بسیار نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای و صحرایی بوده و در محدوده خطای قابل قبول قرار گیرد. در مدل جریان آبخوان دشت بابلسر، میزان خطای قابل قبول ۰/۱ متر در نظر گرفته شده است (Kersic, 2006). واسنجی در شرایط پایدار به منظور بهینه کردن پارامترهای آبخوان (هدایت هیدرولیکی) و شرایط مرزی انجام می‌شود. در این تحقیق واسنجی برای یک دوره ۳۱ روزه اردیبهشت ماه ۱۳۹۱ در نظر گرفته شد. جهت واسنجی از روش آزمون و خطا استفاده گردید که در این روش مقادیر اولیه خصوصیات آبخوان، شرایط مرزی و تنش‌ها در هر بار اجرای مدل تغییر داده می‌شوند تا بهترین برازش بین هد هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی بدست آید.

به منظور ارزیابی نتایج واسنجی از امکانات نرم‌افزار GMS مانند هدف واسنجی (Calibration Target).



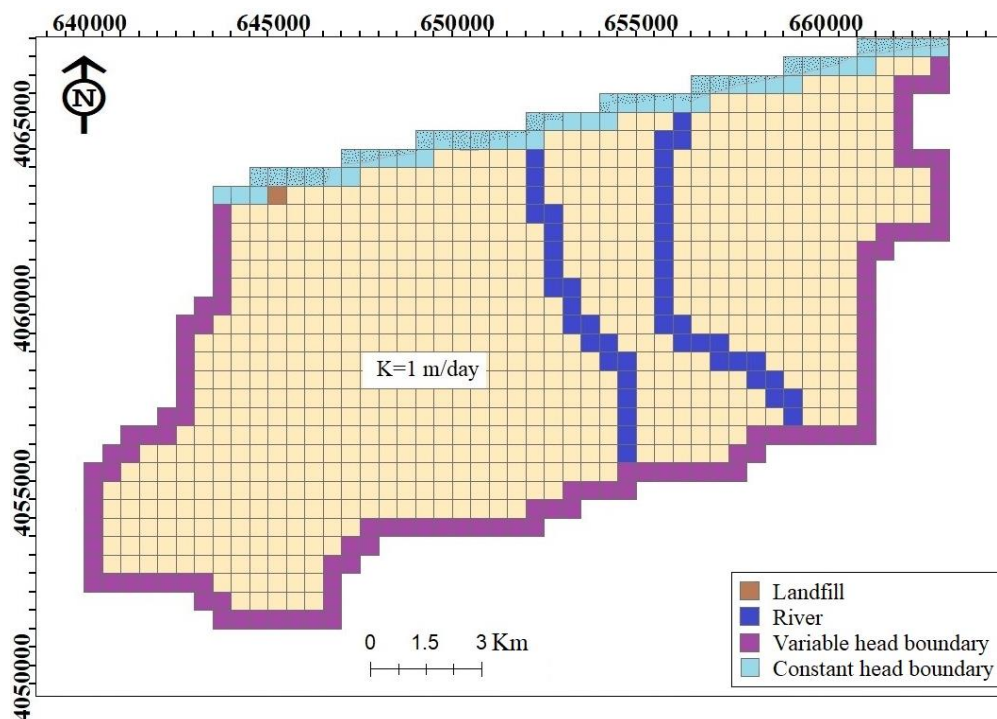
شکل ۶- نمودار پراکندگی بار آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل در شرایط پایدار

Fig.6. The scatter diagram of observed and simulated hydraulic head by the model in steady state



شکل ۷- بار آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل در پایان واسنجی در شرایط پایدار (اردیبهشت ۱۳۹۱)

Fig. 7. The Observational and computational hydraulic head at the end of calibration period in steady state (May 2012)



شکل ۸- مقدار هدایت هیدرولیکی واسنجی شده مدل دشت بابلسر

Fig. 8. The calibrated hydraulic conductivity of the Babolsar plain

واسنجی مدل در شرایط ناپایدار

نتایج حاصل از تنظیم مدل در شرایط پایدار به عنوان اطلاعات اولیه در شرایط ناپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس داده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، دوره تنش به صورت ماهانه انتخاب گردید و در مجموع ۱۰ دوره تنش (خرداد ۱۳۹۱ تا اسفند ۱۳۹۱) جهت واسنجی مدل در شرایط ناپایدار در نظر گرفته شد. با توجه به این موضوع که کل محدوده دشت مورد مطالعه از جنس ماسه ریزدانه به همراه لس می‌باشد مقدار اولیه آبدهی ویژه ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. در شرایط ناپایدار بایستی داده‌های ورودی به مدل تکمیل شوند و اثر کلیه عوامل ورودی و خروجی آب به آبخوان (تنش‌ها) در نظر گرفته شود. این تنش‌ها توسط بسته‌های مختلف (تغذیه، تبخیر و تعرق، چاه، ...) در GMS شبیه‌سازی می‌شوند.

تغذیه آبخوان

- تغذیه آبخوان از طریق آب برگشتی چاه‌های کشاورزی با توجه به شیوه آبیاری و کرت‌بندی زمین‌های کشاورزی حدود ۲۰ درصد حجم آب مورد استفاده در کشاورزی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان تغذیه از طریق برگشت آب چاه‌های شرب و صنعتی به ترتیب حدود ۶۰ و ۵۰ درصد به مدل اعمال شده‌اند.

- مقدار تغذیه آبخوان از بارش با توجه به خصوصیات منطقه مورد مطالعه مانند دانه‌بندی خاک، شیب اراضی، پوشش گیاهی و میزان رطوبت خاک، حدود ۲۰ درصد حجم بارندگی در نظر گرفته

شده است.

- جهت محاسبه میزان تغذیه از بستر رودخانه، میزان حجم آب ورودی به محدوده در ایستگاه‌های هیدرومتری مربوط به رودخانه بابلرود و شازده رودخانه با استفاده از میزان دبی روزانه محاسبه گردید. سپس بر اساس بافت و دانه‌بندی آبخوان و کف رودخانه، حدود ۱۷ درصد از آب ورودی رودخانه به صورت نفوذ به قسمت‌هایی از آبخوان دشت که در آن رودخانه نقش تغذیه کننده دشت را داشته، اعمال شد.

تخلیه آبخوان

- بر اساس آخرین آمار از چاه‌های محدوده مورد مطالعه، میزان حجم تخلیه آب از طریق پمپاژ چاه‌های کشاورزی، شرب و صنعتی به مدل منطقه اعمال شد.

- میزان تبخیر از آبخوان آب زیرزمینی به عمق آب زیرزمینی، بافت خاک و پوشش گیاهی منطقه بستگی دارد. جهت محاسبه تبخیر از سطح آبخوان، مناطق هم عمق کمتر از سه متر که در قسمت‌های میانی و شمالی دشت بابلسر واقع شده‌اند، مشخص شده و با توجه به خصوصیات منطقه مورد مطالعه حدود ۲ درصد حجم تبخیر، در نظر گرفته شده است.

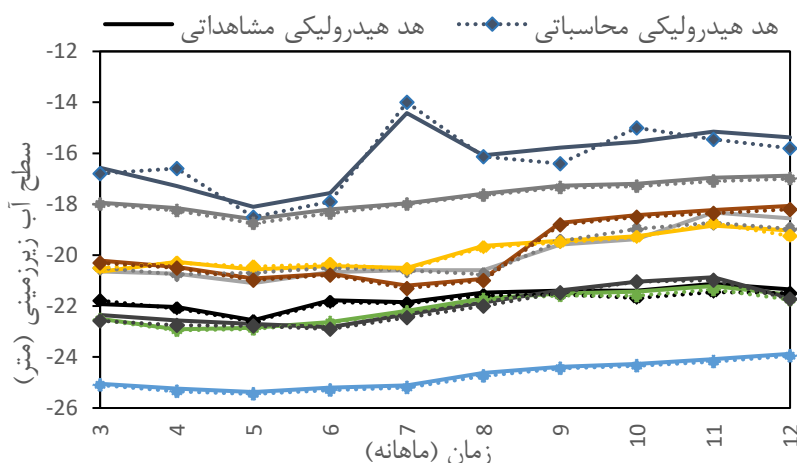
- با توجه به نقشه تراز آب زیرزمینی ملاحظه می‌شود که در مناطقی از دشت سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح آب رودخانه می‌باشد و رودخانه نقش زهکش را در دشت ایفا می‌کند. جهت محاسبه مقدار زهکشی آبخوان از طریق رودخانه، با در نظر گرفتن

دارای مقداری خطای ناشی از عوامل مختلف هستند. در مرحله واسنجی (کالیبراسیون) با ایجاد تغییر در مقدار پارامترهای موثر، مدل تصحیح شد و در نهایت واسنجی مدل در شرایط ناپایدار به پایان رسید. پس از پایان فرآیند واسنجی، مقدار خطا در تمامی پیژومترها و در ۱۰ دوره تنش ماهانه به کمتر از ۰/۱ متر رسید. هیدروگراف هد محاسباتی و مشاهداتی ۹ پیژومتر موجود در دشت در ۱۰ دوره تنش ماهانه در پایان واسنجی در شرایط ناپایدار نشان می‌دهد که مدل جریان دشت بابلسر به خوبی در مرحله ناپایدار کالیبره گشته و جهت پیاده‌سازی مدل انتقال آلودگی آماده می‌باشد (شکل ۹). شکل ۱۰، نقشه بار آبی مشاهداتی و محاسباتی در پایان دوره واسنجی در شرایط ناپایدار (اسفند ۱۳۹۱) را نشان می‌دهد. مقدار آبدهی ویژه بهینه شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است که با شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان و مشاهدات صحرائی مطابقت دارد.

عوامل ورودی و خروجی در طول مسیر رودخانه، اختلاف حجم آب عبوری از ایستگاه‌های هیدرومتری ورودی و خروجی رودخانه به زهکشی از آبخوان آب زیرزمینی نسبت داده شده است.

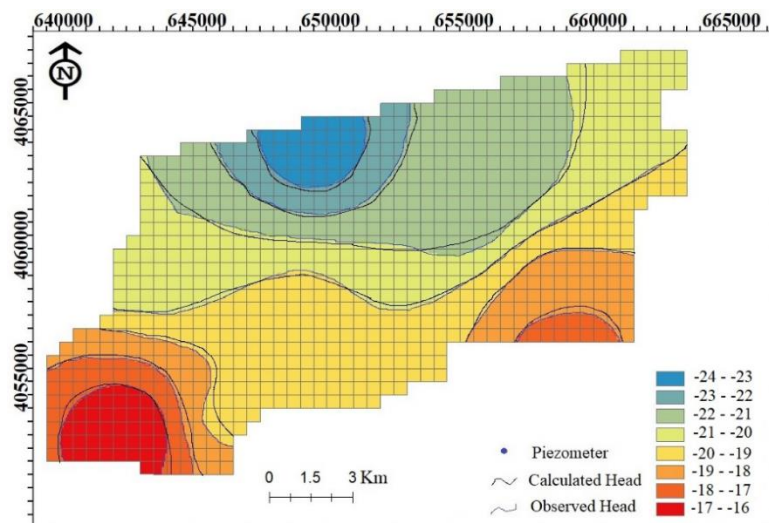
اجرا و واسنجی مدل در شرایط ناپایدار

در این تحقیق به منظور واسنجی مدل در شرایط ناپایدار اطلاعات سطح آب پیژومترها در یک دوره ۱۰ ماهه (خرداد تا اسفند ۱۳۹۱) به صورت فایل متنی به نرم‌افزار GMS وارد گردید و به تمامی سلول‌های محدوده مورد مطالعه تعمیم داده شد. پس از تکمیل فرآیند وارد نمودن تمامی عوامل تغذیه و تخلیه آبخوان، مدل در شرایط ناپایدار اجرا گردید و مقدار بار آبی (سطح آب زیرزمینی در پیژومترها) در انتهای هر دوره تنش (از خرداد تا اسفند ۱۳۹۱) محاسبه گشت. بدیهی است در اولین اجرای مدل، بار آبی محاسباتی و مشاهداتی منطبق بر هم نمی‌باشند و



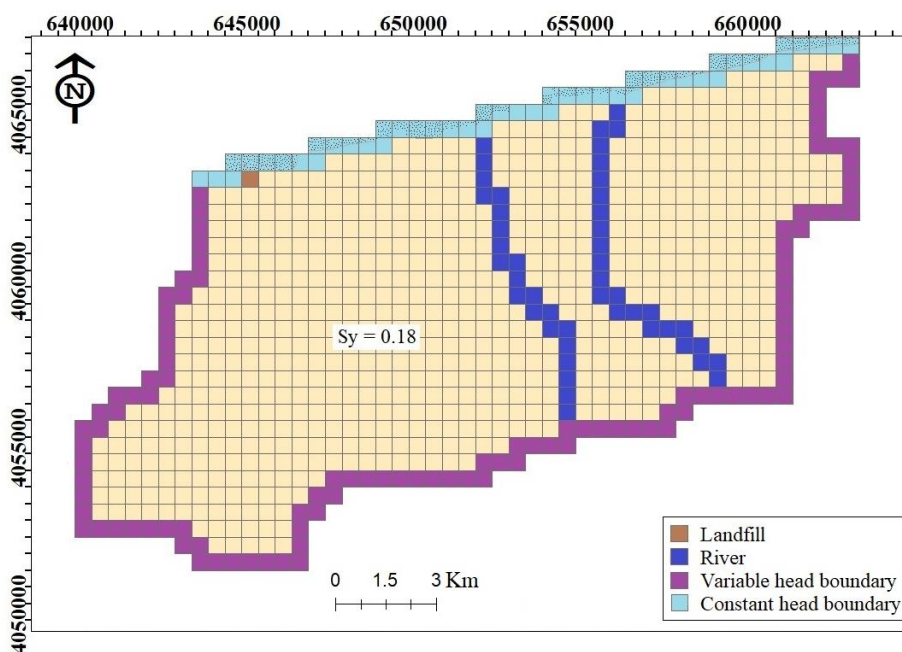
شکل ۹- بار آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده منطقه مورد مطالعه در شرایط ناپایدار

Fig.9. The observational and computational head in the case study in unsteady state



شکل ۱۰- بار آبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل در پایان واسنجی در شرایط ناپایدار (اسفند ۱۳۹۱)

Fig.10. The observation and calculation head at the end of the calibration period in unsteady state (March 2012)



شکل ۱۱- مقدار آبدهی ویژه واسنجی شده مدل دشت بابلسر

Fig.11. The calibrated specific yield of the case study

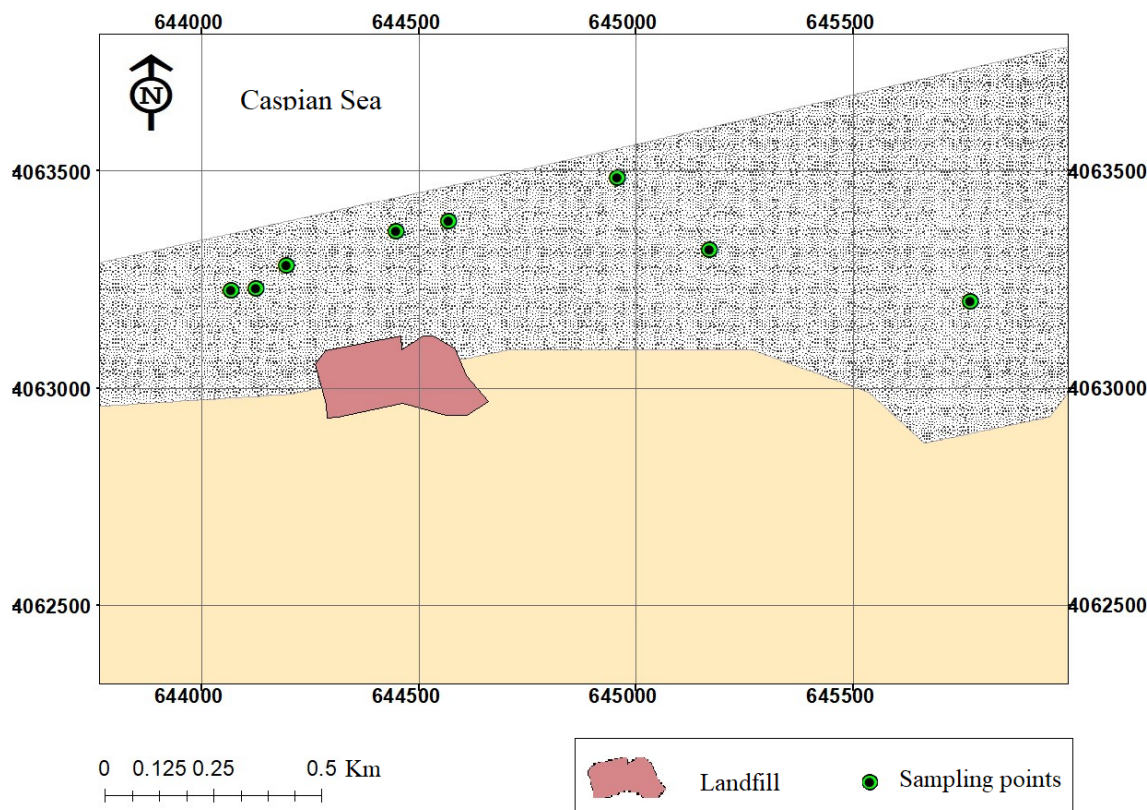
جدول ۱- مقادیر خطای محاسبه شده مدل جریان واسنجی شده در دوره‌های تنش مختلف سال ۱۳۹۱ (مقادیر بر حسب متر)
 Table 1. Calculated error values (m) related to the calibrated flow model in different stress periods of 2012-2013

Parameter	yaM	enuJ	yInJ	tsuguA	rebmetpeS	rebotcO	rebmevoN	rebmeceD	yraunaJ	February	hcrAM
ME	0.03	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04
MAE	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02
RMS	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01

نمونه برداری کیفی

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی آلودگی فلزات سنگین آب زیرزمینی (کادمیوم، آهن، سرب و روی) در محل لندفیل بابلسر، از ۸ حلقه چاه استفاده شده است که موقعیت چاه‌ها بر اساس موقعیت لندفیل و جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه انتخاب شده است. در تمامی مراحل نمونه‌برداری، استانداردها مدنظر قرار گرفته است. نمونه‌برداری در یک دوره شهریور ۱۴۰۰ انجام شده است. در شکل ۱۲، موقعیت نقاط نمونه‌برداری نشان داده شده است. بر اساس آمار کیفی به دست آمده از سازمان آب

منطقه‌ای ساری، میانگین اسیدینگی (pH) آب زیرزمینی آبخوان بابلسر ۷/۴۵ و دامنه آن از ۶/۴ تا ۹/۷ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده ماهیت قلیایی بیشتر نمونه‌های آب می‌باشد. هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی آبخوان بابلسر از ۶۳۲ تا ۲۲۷۰ با میانگین ۱۳۸۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. میانگین کل مواد جامد محلول (Total Dissolved Solid – TDS) در آب زیرزمینی آبخوان بابلسر ۸۹۵ و گستره آن از ۴۳۵ تا ۱۵۹۸ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است.



شکل ۱۲- موقعیت نقاط نمونه برداری در اطراف لندفیل بابلسر

Fig. 12. Location of sampling points around the Babolsar landfill

۱۴۰۰ بوده است ابتدا مدل کمی برای سال ۱۴۰۰ به روزرسانی گردید و سپس نتایج حاصل از نمونه برداری کیفی برای فلزات سنگین از شهریور ۱۴۰۰ به مدت ۴ ماه جهت ساخت مدل کیفی آبخوان در نظر گرفته شد.

اعمال پدیده‌های فرارفت، پراکنش و واکنش‌های شیمیایی به مدل کیفی

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی کیفی آب زیرزمینی از مدل MT3DMS استفاده شده است که این مدل بر اساس نگرش تلفیقی اولرین-لاگرانژین

طراحی مدل کیفی آبخوان بابلسر

پس از اینکه مدل کمی جریان آب زیرزمینی در یک دشت با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی و کالیبره گردید و ضرائب هیدرودینامیکی قابل قبولی حاصل گشت، فیلد سرعت حاصل از مدل کمی دشت می‌تواند در مدل انتقال آلودگی به کار گرفته شود و اقدام به تهیه مدل کیفی آبخوان پرداخت. از آنجایی که مدل جریان آبخوان بابلسر برای سال ۱۳۹۱ تنظیم شده بود و نمونه برداری فلزات سنگین مربوط به سال

حرکت ذرات محلول در آب را شبیه‌سازی می‌کند. در این مطالعه پدیده فرارفت (Advection) که همان حرکت ذرات آلاینده با سرعت حرکت آب زیرزمینی است توسط روش Third order TVD scheme (Ultimate) اعمال شده است. پدیده پراکنش (Dispersion) که بر انتقال آلاینده‌ها بسیار تاثیرگذار است با تخمین ضریب پراکنش براساس روابط تجربی و با استفاده از نوع دانه‌بندی و مقدار هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده در بخش مدل جریان به مدل کیفی اعمال می‌شود. به منظور بررسی واکنش‌های شیمیایی در منطقه مورد مطالعه از بسته واکنش‌های شیمیایی (Chemical Reaction Package) استفاده گشته است. در این بخش ویژگی‌های آلاینده تعیین‌کننده انجام واکنش‌های شیمیایی در محیط آبخوان می‌باشد. در رابطه با واکنش شیمیایی آلاینده با آبخوان، پارامتری به نام فاکتور تأخیر نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند که این فاکتور با روش جذب خطی و با استفاده از چگالی محیط متخلخل محاسبه می‌گردد. با توجه به رسی بودن بافت خاک منطقه مورد مطالعه و وجود کربن آلی در خاک که دو عامل مهم و اثرگذار در جذب فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمناک هستند، اثر عامل جذب در مدل آلودگی اعمال شده است.

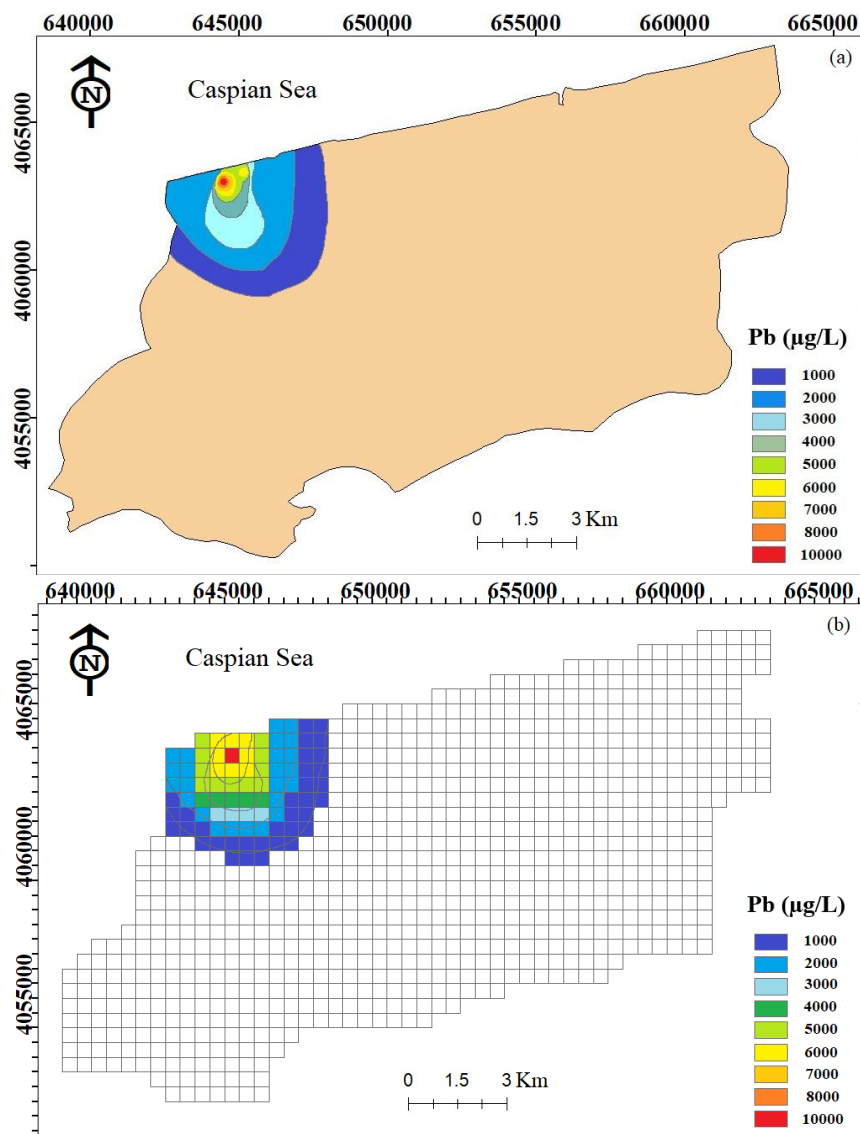
اجرای مدل کیفی برای هر یک از فلزات سنگین

با توجه به اینکه منشأ اصلی فلزات سنگین در محدوده مورد مطالعه، لندفیل بابلسر می‌باشد این محدوده با مساحت ۵ هکتار به عنوان منبع تزریق آلودگی در منطقه لحاظ گردید. همچنین غلظت فلزات سنگین موجود در نمونه‌های شیرابه حاصل از کف لندفیل به عنوان غلظت اولیه در نظر گرفته شد و از منوی Basic Transport Package قسمت Starting Concentration به مدل کیفی دشت اعمال گردید.

در این تحقیق ابتدا مدل آلودگی برای هر یک از فلزات سنگین (کادمیوم، آهن، سرب و روی) اجرا شد و سپس با در نظر گرفتن فاکتور تأخیر و عامل جذب، مدل آلودگی برای هر عنصر واسنجی گردید.

سرب (Pb)

غلظت سرب موجود در شیرابه لندفیل بابلسر در شهریور ۱۴۰۰ به عنوان غلظت اولیه منشأ آلودگی به سلول‌های مدل اعمال گشت و سپس مدل MT3DMS اجرا گردید. در مرحله بعد مدل با نرخ‌های جذب (۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۱، ۰/۰۱۲، ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۶، ۰/۰۱۸، ۰/۰۲) لیتر در روز برای شهریور ۱۴۰۰ واسنجی گردید. بر اساس نتایج واسنجی، نرخ جذب سرب در منطقه مورد مطالعه ۰/۰۱۶ لیتر در روز می‌باشد. شکل ۱۳، نشان‌دهنده انطباق خوب مدل کیفی آبخوان با نقشه پهنه‌بندی غلظت‌های مشاهده‌ای سرب در شهریورماه می‌باشد.



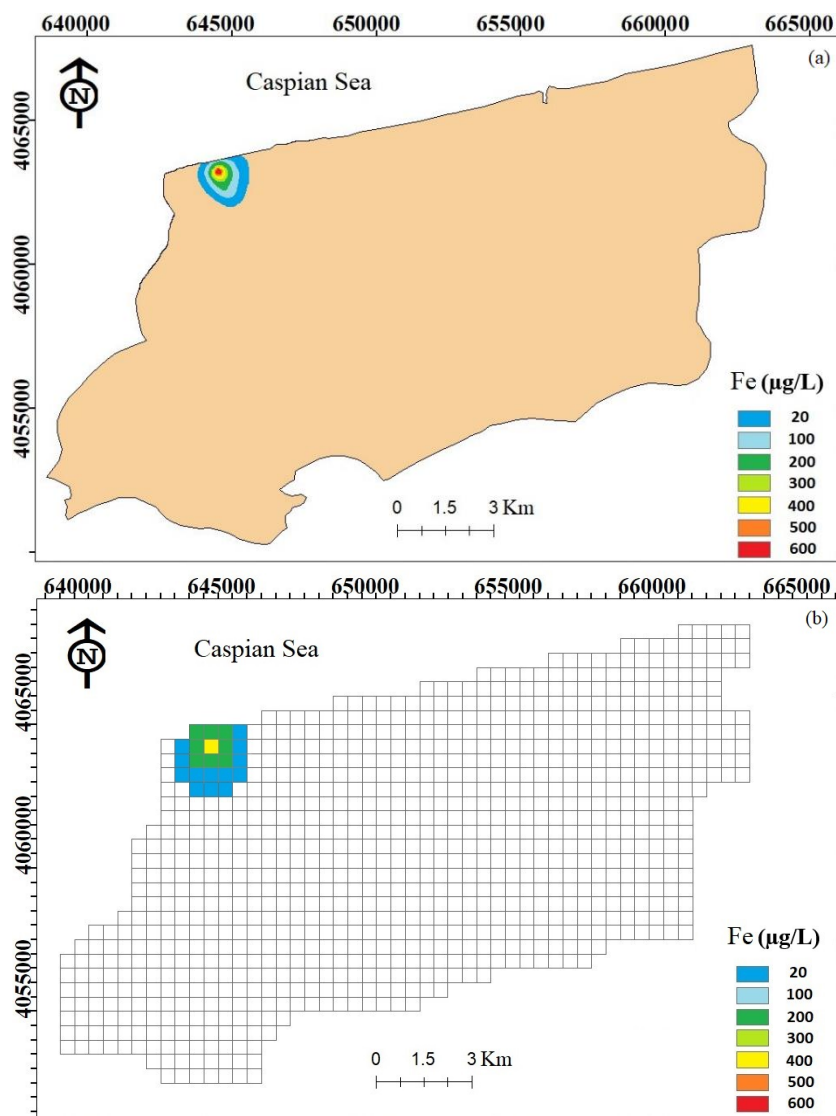
شکل ۱۳- غلظت‌های مشاهده‌ای (a) و شبیه‌سازی شده (b) سرب پس از واسنجی در محدوده لندفیل بابلسر در شهریور ۱۴۰۰
 Fig.13. The observed (a) and simulated (b) concentrations of lead after calibration in the Babolsar landfill in September 2012

۰/۰۰۴، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۹

۰/۰۱ و ۰/۰۲) لیتر در روز برای شهریور ۱۴۰۰
 واسنجی گشت. نتایج واسنجی نشان می‌دهد که نرخ
 جذب برای این عنصر در محدوده مطالعاتی ۰/۰۰۵
 لیتر در روز می‌باشد. شکل ۱۴، نشان‌دهنده انطباق
 خوب مدل کیفی آبخوان با نقشه پهنه‌بندی
 غلظت‌های مشاهده‌ای آهن در شهریورماه می‌باشد.

آهن (Fe)

غلظت آهن موجود در شیرابه لندفیل بابلسر در
 شهریور ۱۴۰۰ به عنوان غلظت اولیه منشأ آلودگی به
 سلول‌های مدل اعمال گشت و سپس مدل
 MT3DMS اجرا گردید. در مرحله بعد مدل با
 نرخ‌های جذب (۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳،



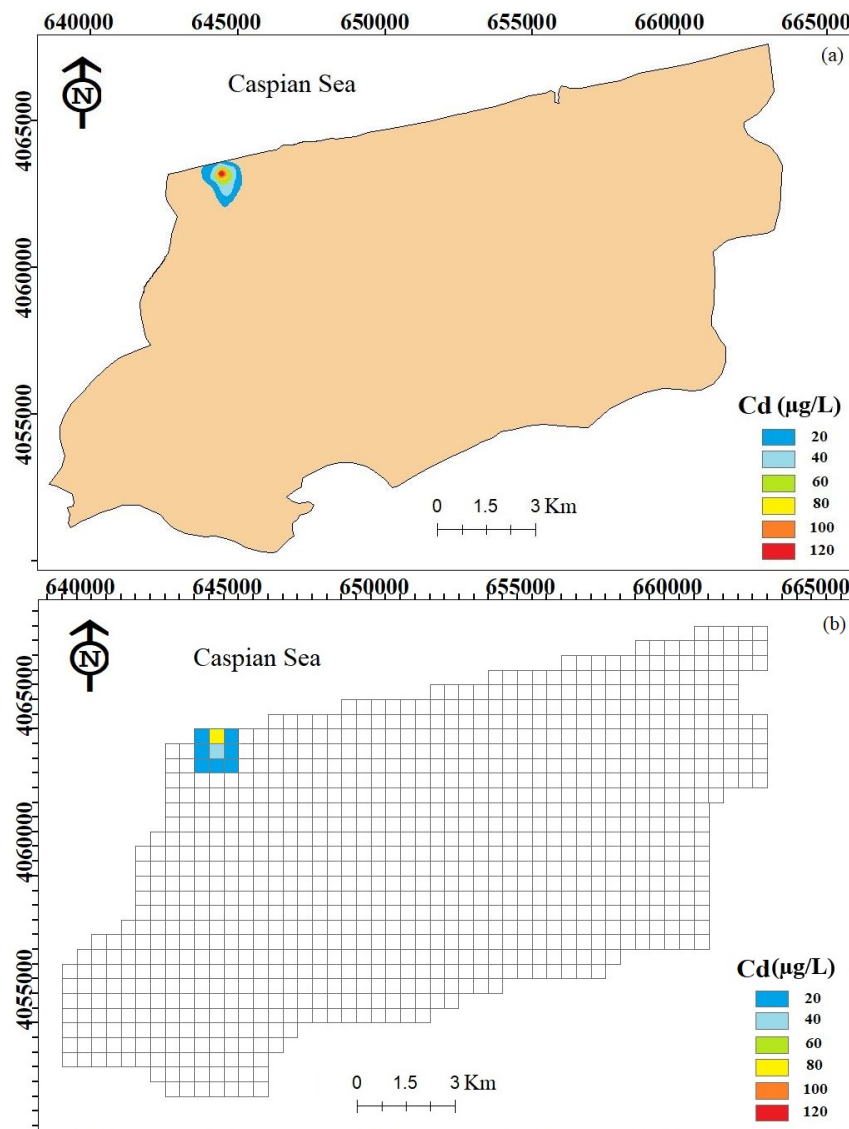
شکل ۱۴- غلظت‌های مشاهده‌ای (a) و شبیه‌سازی شده (b) آهن پس از واسنجی در محدوده لندفیل بابلسر در شهریور ۱۴۰۰
 Fig.14. The observed (a) and simulated (b) concentrations of iron after calibration in the Babolsar landfill in September 2012

کادمیوم (Cd)

۰/۰۰۵، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱ و
 ۰/۰۲) لیتر در روز برای شهریور ۱۴۰۰ واسنجی
 گشت. نتایج واسنجی نشان می‌دهد که نرخ جذب
 برای این عنصر در محدوده مطالعاتی ۰/۰۰۴ لیتر در
 روز می‌باشد. شکل ۱۵، بیانگر تطابق خوب غلظت‌های
 مشاهده‌ای کادمیوم با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط

غلظت کادمیوم موجود در شیرابه لندفیل بابلسر
 در شهریور ۱۴۰۰ به عنوان غلظت اولیه منشأ آلودگی
 به سلول‌های مدل اعمال شد و سپس مدل
 MT3DMS اجرا گردید. در مرحله بعد مدل با
 نرخ‌های جذب (۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۴،

مدل کیفی در شهریور ماه می باشد.



شکل ۱۵- غلظت‌های مشاهده‌ای (a) و شبیه‌سازی شده (b) کادمیوم پس از واسنجی در محدوده لندفیل بابلسر در شهریور ۱۴۰۰
 Fig. 15. The observed (a) and simulated (b) concentrations of cadmium after calibration in the Babolsar landfill in September 2012

(۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۷)

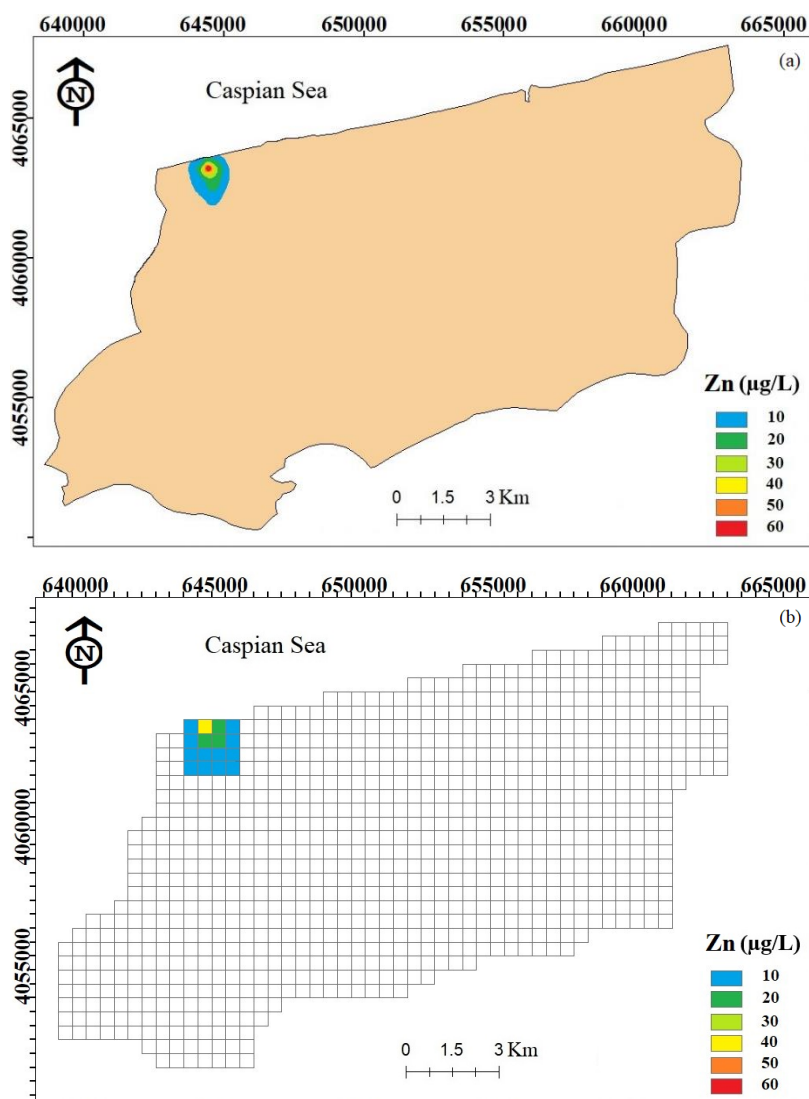
۰/۰۰۷، ۰/۰۰۸، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱، ۰/۰۲) لیتر در روز

برای شهریور ۱۴۰۰ واسنجی گشت. نتایج واسنجی نشان می‌دهد که نرخ جذب برای این عنصر در محدوده مطالعاتی ۰/۰۰۷ لیتر در روز می‌باشد. شکل

روی (Zn)

غلظت روی موجود در شیرابه لندفیل بابلسر در شهریور ۱۴۰۰ به عنوان غلظت اولیه منشأ آلودگی به سلول‌های مدل اعمال شد و سپس مدل MT3DMS اجرا گردید. در مرحله بعد مدل با نرخ‌های جذب

۱۶، بیانگر تطابق خوب غلظت‌های مشاهده‌ای روی با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل کیفی در شهریور ماه می‌باشد.



شکل ۱۶- غلظت‌های مشاهده‌ای (a) و شبیه‌سازی شده (b) روی پس از واسنجی در محدوده لندفیل بابلسر در شهریور ۱۴۰۰
Fig.16. The observed (a) and simulated (b) concentrations of zinc after calibration in the Babolsar landfill in September 2012

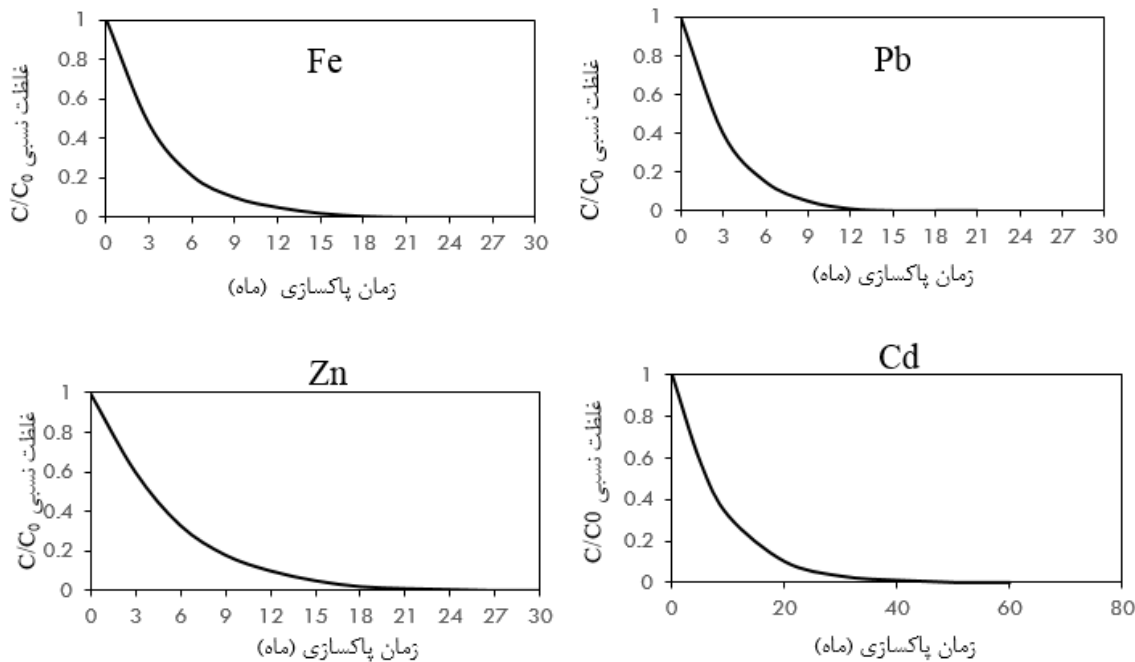
کنیم و پتانسیل خودپالایی آبخوان را تعیین نمایم،
مدل کیفی دشت برای هر عنصر با غلظت اولیه ۲۰۰۰
میلی‌گرم در لیتر و نرخ جذب به دست آمده از مرحله

پیش‌بینی

برای اینکه سرنوشت هر یک از فلزات سنگین را
در محدوده مورد مطالعه در سال‌های آینده پیش‌بینی

به هر عنصر حاصل گشت که در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول، C غلظت عناصر، C_0 غلظت اولیه عناصر و t زمان پاکسازی از محیط می باشد.

واسنجی اجرا گردید و نمودار تغییرات غلظت این عناصر نسبت به زمان تا نقطه رسیدن به غلظت مجاز ترسیم گردید (شکل ۱۷) و معادله پاکسازی مربوط



شکل ۱۷- تغییرات غلظت نسبی فلزات سنگین نسبت به زمان

Fig.17. Changes in the relative concentration of heavy metals versus time

جدول ۲- معادله پاکسازی فلزات سنگین در محدوده مطالعاتی بابلسر

Table 2. The equation of cleaning heavy metals in THE Babolsar aquifer

نام عنصر	معادله پاکسازی
Fe	$C/C_0 = 1.006e^{-0.26t}$
Zn	$C/C_0 = 1.006e^{-0.19t}$
Pb	$C/C_0 = 1.067e^{-0.36t}$
Cd	$C/C_0 = 1.010e^{-0.11t}$

گردید. با توجه به لسی بودن بافت خاک منطقه مورد مطالعه و وجود رس فراوان و کربن آلی در خاک منطقه، به غیر از فرآیندهای همرفت و پراکنش هیدرودینامیکی، مهم ترین فرآیند فیزیکی و شیمیایی

نتایج شبیه سازی آلودگی لندفیل بابلسر

در این فصل پتانسیل انتقال فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی محدوده لندفیل شهرستان بابلسر و پتانسیل پاکسازی طبیعی آن در آبخوان شبیه سازی

۲۷ و ۵۰ ماه خواهد بود. همچنین بر اساس نتایج شبیه‌سازی کیفی آبخوان، نرخ و مقدار جذب هر یک از این عناصر در محدوده لندفیل بابلسر به صورت جدول ۳ می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلودگی فلزات سنگین مورد بررسی در محدوده مطالعاتی و حداکثر غلظت استاندارد مجاز جدول ۳، آب‌های زیرزمینی تا فاصله چهار کیلومتری از مرکز لندفیل برای کاربری شرب و تا فاصله دو کیلومتری از مرکز لندفیل برای کاربری کشاورزی نامناسب می‌باشند.

موثر در پاکسازی آبخوان، فرآیند جذب سطحی می‌باشد. تغییرات غلظت نسبی هر یک از فلزات سنگین تا رسیدن به غلظت استاندارد مجاز شبیه‌سازی و نسبت به زمان ترسیم گشت و معادله پاکسازی هر عنصر تعیین گردید. این معادلات می‌تواند ابزار ساده‌ای برای پیش‌بینی تغییرات طبیعی غلظت این عناصر با زمان در دست کارشناسان باشد. بر اساس معادلات پاکسازی حاصل از شبیه‌سازی کیفی آبخوان بابلسر، مدت زمان لازم جهت حذف کامل طبیعی عناصری مانند سرب، آهن، روی و کادمیوم در محدوده لندفیل به ترتیب معادل ۱۵، ۲۱،

جدول ۳- مقدار و نرخ جذب فلزات سنگین در خاک محدوده لندفیل بابلسر و استاندارد کیفیت منابع آب

Table 3. The amount and absorption rate of heavy metals in the soil of the Babolsar landfill and water resource quality standards

عنصر	نرخ جذب (Lit/day) $\times 10^{-4}$	مقدار جذب (mg/kg) $\times 10^{-4}$	کاربری شرب (mg/l)	کاربری کشاورزی (mg/l)	کاربری صنعت (mg/l)
Fe	1-200	0.01-2.1	0.3	5	1
Zn	70-100	0.88-1.2	3	2	-
Pb	142	2.25	0.01	-	-
Cd	45	0.5	0.003	0.01	-

نتیجه‌گیری

(خودپالایی آبخوان) بررسی و در نهایت تغییرات نرخ جذب برای هر عنصر در گستره مدل‌سازی، محاسبه گردید. تغییرات غلظت هر یک از فلزات سنگین تا رسیدن به غلظت استاندارد مجاز شبیه‌سازی و نسبت به زمان ترسیم گشت و معادله مربوط به هر عنصر تعیین گردید که این معادلات می‌تواند ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی تغییرات طبیعی غلظت عناصر با زمان در دست کارشناسان باشد. با توجه به بافت خاک منطقه مورد مطالعه و وجود رس و کربن آلی فراوان

در این تحقیق مدل جریان و انتقال آلودگی فلزات سنگین در آبخوان محدوده لندفیل شهرستان بابلسر در قالب مدل‌های عددی MODFLOW و MT3DMS تدوین گردید. مدل انتقال برای هر یک از فلزات سنگین اجرا شد. سپس با تغییر در نرخ جذب، مدل برای هر یک از این عناصر واسنجی گشت و با در نظر گرفتن فرآیندهای همرفت، پراکنش هیدرودینامیکی و جذب، پتانسیل پاکسازی طبیعی

آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی برای کاربری کشاورزی از نظر سرب و کادمیوم تا فاصله دو کیلومتری از مرکز لندفیل نامناسب و از نظر آهن و روی مناسب هستند. بنابراین بر اساس این نتایج می‌توان استنباط نمود از آنجایی که آب‌های زیرزمینی تا فاصله دو کیلومتری از مرکز لندفیل از نظر غلظت سرب و کادمیوم بیشتر از حداکثر غلظت مجاز استاندارد برای کاربری کشاورزی هستند، جهت مصارف کشاورزی نباید مورد استفاده قرار گیرند اما برای کاربری صنعتی قابل استفاده هستند.

با مدل طراحی شده می‌توان هر سناریو تزریق و تخلیه آلاینده را در آبخوان شبیه‌سازی نمود. در واقع مدل این توانایی را دارد که سرنوشت هر یک از عناصر را در محیط آبخوان پیش‌بینی کند. به این معنا که چنانچه غلظت اولیه یک عنصر به مدل داده شود، مدل می‌تواند پیش‌بینی کند که این عنصر در سال‌های آینده چه سرنوشتی خواهد داشت و هاله آلودگی حاصل از آن تا کجا توسعه خواهد یافت. بعلاوه، بر اساس پیش‌بینی مدل، روش‌های جلوگیری از افزایش آلودگی آبخوان و مدیریت بهینه آن را می‌توان بررسی نمود.

در آن، مهم‌ترین واکنش شیمیایی و فیزیکی در آبخوان مربوط به جذب سطحی است. به نظر می‌رسد عناصری مانند سرب، روی، آهن و کادمیوم توسط کانی‌های رسی و کربن آلی موجود در محیط جذب سطحی می‌شوند و مقداری از آهن هم به صورت اکسیدهای آهن و آلومینیوم رسوب می‌کند. در میان عناصر شبیه‌سازی شده، عنصر کادمیوم کمترین و عنصر سرب بیشترین مقدار جذب را در محدوده مورد مطالعه دارد.

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی آلودگی فلزات سنگین مورد بررسی در محدوده مطالعاتی و میزان غلظت استاندارد مجاز برای کاربری شرب، آب‌های زیرزمینی تا فاصله چهار کیلومتری از مرکز لندفیل از نظر سرب بسیار نامناسب، از نظر آهن تا فاصله یک کیلومتری از مرکز لندفیل نامناسب، از نظر کادمیوم تا فاصله چهار کیلومتری از مرکز لندفیل بسیار نامناسب و از نظر روی مناسب می‌باشد. بنابراین بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که چون آب‌های زیرزمینی تا فاصله چهار کیلومتری از مرکز لندفیل از نظر غلظت سرب و کادمیوم بیشتر از حداکثر غلظت مجاز استاندارد برای کاربری شرب می‌باشند، به منظور مصارف شرب نباید مورد استفاده قرار گیرند.

References

Alavi-Dehkordi, S.K., Asadi, M., Khodabakhshi, A., 2016. Modeling of heavy metals transfer from waste landfill to groundwater table in Shahrekord using MT3DMS and GIS code. 2nd

International Conference Geography Sciences, Ardabil, Iran.

Alijani, F., Ataeizadeh, S., OstadHashemi, Zohreh., Mirzaei, L., 2013. The worst place of urban waste in Iran, simulation of Andimeshk landfill on the quality of groundwater with MT3DMS. National conference of applied civil

- engineering and new achievements, Karaj, Saze Kavir Company (In Persian).
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. ISBN-13: 978-0-12-059485-6.
- Baghvand, A., Nasirzade, R., Abdoli, M.A., Vosoogh, A., 2016. Investigation of contamination of groundwater sources surrounding landfill sites, case study: Takestan city landfill site. *International Journal of Environmental Studies* 41(4), 909-921.
- Banejad, H., Mohebzadeh, H., Ghobadi, Mohammad-Hosein., Heidari, M., 2013. Numerical simulation of flow and pollution transfer in groundwater, case study: Dasht Nahavand aquifer. *Water and Soil Science Journal* 27(2), 33-77 (In Persian).
- Bear, J., Cheng, A.H.D., 2010. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. ISBN: 978-1-4020-6682-5.
- Chofqi, A., Younsi, A., Lhadi, E.K., Mania, J., Mudry, J., Veron, A., 2004. Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African earth sciences* 39(3), 509-516.
- El-Salam, M.M.A., Abu-Zuid, G.I., 2015. Impact of landfill leachate on the groundwater quality: A case study in Egypt. *Journal of Advanced Research* 6(4), 579-586.
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Kaufmann, O., 2008. Modelling groundwater flow and advective Ccontaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research* 2(3), 192-209.
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Loizidou, M., 1999. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area. *Environmental Geochemistry and Health* 21(2), 175-190.
- Han, D., Tong, X., Currell, M.J., Cao, G., Jin, M., Tong, C., 2014. Evaluation of the impact of an uncontrolled landfill on surrounding groundwater quality, Zhoukou, China. *Journal of Geochemical Exploration* 136, 24-39.
- Kakaei, K., Riyahi-Bakhtiari, A., 2016. Risk Assessment of Groundwaters Pollution by Heavy Metals of Hamadan Landfill Leachate and appropriate cover recommendation. *International Journal of Environmental Health Research* 2(3), 221-227.
- Keita, S., Tang, Zh., Dong, Sh., Jiang, Y., 2010. Evaluation of some organic pollutants transport into the shallow groundwater and surface water of Jiaying landfill area. *American Journal of Applied Science* 6(12), 2010-2017.
- Kresic, N., 2006. Hydrogeology and groundwater modeling. 2nd Edition. New York: Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, pp.807.
- Khanlari, G.H., Taleb Bidokhti, A.R., Momeni, A.A., Ahmadi, H.R., 2013. The effect of leachate of Hamedan landfill site on groundwater. *JIA Engineering Geology* 5(3), 81-106.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Kwon, H.P., Yoon, H.S., Lee, S.S., Kim, J.H., Kim, C.G., 2006. Attenuation of landfill leachate at two uncontrolled landfills. *Environmental geology* 51(4), 581-593.
- Motazeri, H., 2013. Investigating and modeling the pollution of groundwater resources and soil around the landfill site Shahrood. Master's Degree Thesis. Iran. Islamic Azad University, Shahrood (In Persian).
- Nakhaei, M., Amiri, V., Rezaei, K., Moosaei, F., 2015. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of Rasht waste disposal site in Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74(1), 233-246.
- Piruz, B., Razdar, B., Bagherzade, A., Kardar, S., Kavianpour, R., 2010. Treatment of Rasht city landfill in Saravan forest area at Gilan province. 4th Conference and Exhibition on Environmental Engineering. Tehran University.
- Powell, J.T., Townsend, T.G., Zimmerman, J.B., 2015. Estimates of solid waste disposal rates and reduction targets for landfill gas emissions. *Nature Climate Change* 6(2), 162-165.

- Ranjbar, A., Pirzadeh, B., 2022. Investigation of groundwater status of Hengam plain using quantitative and qualitative models (MODFLOW and MT3DMS). *Journal of Iranian Water Engineering Research* 1(1), 27-44 (In Persian).
- Rayne, T.W., Bradbury, K.R., Muldoon, M.A., 2001. Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal* 9(5), 432-450.
- Rezaei, R., Maleki, A., Safari, M., Ghavami, A.A., 2010. Assessment of chemical pollution of groundwater resources in downstream areas of Sanandaj city landfill. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences* 3(15), 89-98.
- Rojas, D.Jr.S., 2004. A study of the potential groundwater contamination from the leachate of the Payatas Dumpsite in Metro Manila, Philippines. Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Program.
- Rouholahnejad, E., Sadrnejad, S.A., 2009. Numerical Simulation of Leachate Transport in to the Groundwater at Landfill Sites. 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation July 13-17, Cairns, Australia.
- Saarela, J., 2003. Pilot investigations of surface parts of three closed landfills and factors affecting them. *Environmental monitoring and Assessment* 84(1), 183-192.
- Sari Regional Water Company., 2022. analysis of statistics and information and water balance of Mazandaran rivers catchment area (In Persian).
- Taheri-Tizro, A., Sarhadi, B., Mohamadi, M., 2018. MODFLOW/MT3DMS based modeling leachate pollution transfer in solid waste disposal of Bahar plain deep aquifer. *Iranian Journal of Health Sciences* 6(2), 11-30.
- Tauhid-Ur-Rahman, M.d., 2009. An investigation of the contaminant transport from the disposal site, using FEMLAB. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 4(2), 79-88.
- Todd, D.K., Mays Larry, W., 2005. *Groundwater Hydrology*. 4th ed. NewYork: John Wiley & Sons, Inc, pp. 358.
- Yamani, M., Hoseinzadeh, M.M., NoheGar, A., 2006. Hydrodynamics of Talar and Babol rivers and its role in the instability and change of their geometric characteristics. *Geographical research* 38(55), 15-33 (In Persian).
- Zogi, M.J., Ghavidel, A., 2011. Prediction of landfill leachate amount using HELP model Case study: Semnan landfill. *Journal of Environmental Health* 4(1), 65-75.