




## Estimation of hydrodynamic coefficients in oil-contaminated aquifers

Fatemeh Ebrahimi<sup>\*1</sup>, Mohammad Nakhaei<sup>2</sup>, Hamid Reza Nassery<sup>3</sup>, Kamal Khodaei<sup>4</sup>

1. PhD of Hydrogeology, Tehran, Iran
2. Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran
3. Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4. Research Institute of Applied Sciences, ACECR, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Article info	Abstract
<p><b>Article history</b> Received: 18 July 2020 Accepted: 30 January 2023</p> <p><b>Keywords:</b> Hydrodynamic coefficients, Oil Specific Yield, LNAPL Transmissivity, LDRM Model.</p> 	<p>One of the most important concerns in aquifers adjacent to oil facilities is pollution caused by LNAPL leaks. Because these compounds are lighter than water, they float as a layer on the surface of the water and move with the water flow. Recovery of LNAPLs is always difficult and expensive. This study aims to manage the recovering cost by determining the hydrodynamic coefficients of LNAPL. The hydrodynamic coefficients include transmissivity and specific yield. In this study, for the first time, the term oil specific yield was used instead of specific yield according to the type of fluid in the aquifer. The Rockwork model was used to calculate the oil specific yield and the LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model) was used to calculate the LNAPL transmissivity coefficient. The inputs to the LDRM include soil and LNAPL parameters, porosity, hydraulic conductivity of water saturation, van Genuchten parameters, mass densities of water and LNAPL, surface tensions of water-LNAPL, LNAPL-air and water-air, and water and LNAPL viscosities. From the inputs, LNAPL transmissivities and recoverable and total LNAPL specific volumes were extracted as output results. With the help of the obtained results, maps of LNAPL transmissivities, thickness and recoverable volume of LNAPL were prepared and the best recovery locations were introduced.</p>

### Introduction

Pollution caused by oil facilities can be one of the major concerns for groundwater pollution. Oil compounds are divided into two groups, LNAPL and DNAPL, based on their weight. LNAPLs are lighter in weight and form a floating layer on the water table. There are several methods to recover LNAPLs. The aim of this study is to find the hydrodynamic coefficients of LNAPL. In most cases, the hydrodynamic coefficients are determined by pumping tests, laboratory tests and inverse

modeling, which are often difficult and expensive. Pumping test is the most common technique to determine the hydrodynamic coefficients of an aquifer. Many studies have been done on the use of pumping tests and graphical methods of curve fitting to find hydrodynamic coefficients in different parts of the world. (Yitbarek et al., 2013; Chesnaux et al., 2012; Elsheikh et al., 2009; Asghari Moghaddam, 2006; Jalludin, and Razack, 2004; Nasimi and Mohammadi, 2015). Groundwater modeling is also an alternative

**DOI** <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.103041>

**\*Corresponding author:** Fatemeh Ebrahimi; E-mail: ebrahimi.f@gmail.com

**How to cite this article:** Ebrahimi, F., Nakhaei, M., Nassery, H.R., Khodaei, K., 2023. Estimation of hydrodynamic coefficients in oil-contaminated aquifers. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(2), 39- 61. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.103041>



method for finding hydrodynamic coefficients. In this method, hydraulic parameters are estimated using known variables such as water level head. In inverse modeling, there are several methods to find the hydraulic parameters. The MODFLOW model is one of the most important models for determining hydrodynamic coefficients. This model can be implemented in both stable and unstable conditions. Many studies have been done in the field of using MODFLOW to find hydraulic parameters or to modify these parameters (Don et al., 2005; Thorley and Callander, 2005; Mirabbasi and Rahnema, 2008; Abedi Koupaei and Gholabchian 2015).

In the cleanup of contaminated aquifers, multi-phase transport and flow models are used to find the location of the recovery well. These models can also be used to evaluate environmental and human health risks. These models have been used since the mid-1980s (Abriola and Pinder, 1985; Baehr and Corapcioglu, 1987; Kaluarachchi and Parker, 1989; Kuppusamy et al., 1987) and have been further developed in recent years (Pruess and Battistelli, 2002; Sookhak Lari et al., 2018) has been developed. Farr et al. (1990) and Lenhard and Parker (1990) proposed models to estimate the distribution of LNAPL in the subsurface based on the pressure and properties of the fluid.

Parker and Lenhard (1989) proposed a method to determine LNAPL saturations and relative permeabilities in the vertical slice to estimate LNAPL specific volumes (LNAPL volume in vertical slice) and LNAPL transmissivities (LNAPL flow rate in vertical slice). Parker and Lenhard's method has been used as a basis for the numerical models developed by Kaluarachchi et al. (1989) and API (2007) for predicting subsurface LNAPL movement from LNAPL thicknesses

measured in wells. Recently, Lenhard et al. (2017) and Ebrahimi et al. (2019) have used a model to estimate the LNAPL specific volumes and their effects on LNAPL transmissivities. In relatively recent studies, researchers have used linear and nonlinear optimization models coupled with numerical models to develop remediation strategies (Dokou and Karatzas 2013; Qin et al. 2009a; Sookhak Lari et al., 2019).

### Results and discussion

The study area in this research is Esmaeilabad village. This village is located in the south of Tehran and is close to oil facilities. Ebrahimi et al. (2019), Bashi-Azghadi and Kerachian (2010), and Sookhak Lari and Safavi (2008) conducted numerical studies in the general area, but not directly in the study area, nor did they attempt to identify locations to recover LNAPL.

In the saturated zone, water and oil fill all the pores of the soil and rock, so the porosity indicates the amount of water and oil in the porous media. Not all of the fluids in the saturated zone can be recovered by drainage or pumping because molecular forces and surface tension keep some of the fluids in place. The amount of water released due to drainage, from lowering the water table is called Specific yield. In this study, the term of "oil specific yield" (OSY) is used instead of Specific yield. OSY can be obtained from the following relationship. Where  $V_r$  is the recovered volume of oil and  $V_t$  is the total volume of the oil layer at a place.

$$OSY = V_r/V_t \quad (1)$$

To calculate the oil specific yield (OSY), the aquifer model for the oil layer was made by rockwork software. The recorded height of the oil and water levels (corrected water level) in different time periods were entered to the

rockwork as the upper and lower oil depths, respectively. Then the model (aquifer) was made for the oil layer and the volume of the oil layer was calculated for each period. The Oil layer ( $V_t$ ) and recovery ( $V_r$ ) volumes in each time period are according to Table 1 and the average oil specific yield (OSY) was calculated is equal to 0.01.

The LDRM model has been used to calculate LNAPL transmissivity. The LDRM model also predicts the recoverable LNAPL specific volume and the volumetric flow of LNAPL into a well assuming a LNAPL capture radius. Inputs required for LDRM are LNAPL and water mass densities; air-water, air-LNAPL, and LNAPL-water interfacial tensions; LNAPL and water viscosities; van Genuchten parameters; some estimate of the LNAPL residual saturation or LNAPL F-factor (a LDRM parameter); porosity; water-saturated hydraulic conductivity; and a capture radius of LNAPL around wells. The inputs are used to predict the recoverable and total LNAPL specific volumes, LNAPL transmissivity, and LNAPL volumetric flow rate into a well.

First, the model was run for 6 wells and the predicted and observed LNAPL recovery volumes were compared. A consistent and good agreement was found between the predicted and observed recovery volumes for the 6 mentioned wells. The model was then

implemented for the rest of the wells (75 wells) and the results were prepared as maps.

### Conclusion

The aim of this study is to find the hydrodynamic coefficients of LNAPL. In most cases, hydrodynamic coefficients are determined by pumping tests, laboratory tests and inverse modeling, which are often difficult and expensive. Hydrodynamic coefficients include Specific yield and transmissivity. Hydrodynamic coefficients for oil-contaminated aquifers are completely different. In the present study, the term "oil specific yield" has been used to indicate the amount of oil released due to drainage, from lowering the oil level in an oil-contaminated aquifer.

In order to estimate the oil specific yield coefficient, the LNAPL layer model was made by Rockwork software and the average of oil specific yield was calculated which is equal to 0.01. The type of soil in the study area is silty clay and also the type of fluid is LNAPL, so the obtained value can be reasonable.

The LDRM model was also used to determine the LNAPL transmissivities. The obtained results were prepared in the form of maps and then the optimal location of the wells for the recovery of LNAPL was introduced. The LNAPL transmissivities range was estimated to range from 0.01 to 2.47 square meters per day.

### References

Abedi Koupai, J., Gholabchian, M., 2015. Estimation of Hydrodynamic Parameters of Groundwater Resources in Kouhpayeh- Segzi Watershed Using Modflow. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 19 (72) 281-292. In Persian.

Abriola, L.M., Pinder, G.F., 1985. A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds, 2, Numerical simulation. *Water Resources Research*, 21: 19-26.





API (American Petroleum Institute), 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM). Volume 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous

- Media. API Publ. No. 4760. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- Asghari Moghaddam, A., Allaf Najib, M., 2006. Hydrogeologic characteristics of the alluvial tuff aquifer of northern Sahand Mountain slopes, Tabriz, Iran. *Hydrogeology Journal* 14(7): 1319–1329.
- Baehr, A.L., Corapcioglu, M.Y., 1987. A compositional multiphase model for groundwater contamination by petroleum products, 2, Numerical solution. *Water Resources Research*, 23: 201-214.
- Chesnaux, R., Rafini, S., Elliott, A-P., 2012. A numerical investigation to illustrate the consequences of hydraulic connections between granular and fractured-rock aquifers”, *Hydrogeology Journal* 20(8): 1669–1680.
- Dokou, Z., Karatzas, G.P., 2013. Multi-objective optimization for free-phase LNAPL recovery using evolutionary computation algorithms. *Hydrological Sciences Journal*, 58: 671-685.
- Don, N.C., Araki, H., Yamanishi, H. and Koga, K., 2005. Simulation of groundwater flow and environmental effects resulting from pumping. *Environmental Geology*. 47:361-374.
- Ebrahimi, F., Lenhard, R.J., Nakhaei, M., Nassery, H.R., 2019. An approach to optimize the location of LNAPL recovery wells using the concept of a LNAPL specific yield. *Environ Sci Pollut Res.* pp 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06052-7>.
- Ebrahimi, F., Nakhaei, M., Nassery, H.R., Khodaei, K., Kisi, O., 2019. Light non-aqueous phase liquids simulation using artificial intelligence models: Esmailabad aquifer case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 8: 245-254.
- El Harrouni, K. D., Ouazar, G.A., Walters, A.H.D., Cheng., 1996. Groundwater optimization and parameter estimation by genetic algorithm and dual reciprocity boundary element method”, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 18: 287–296.
- Elsheikh, A.E.M., Elsayed Zeielabdein, K.A., Babikir, I.A.A., 2009. Groundwater balance in the Khor Arbaat basin, Red Sea State, eastern Sudan. *Hydrogeology Journal* 17(8): 2075–2082.
- Jalludin, M., Razack, M., 2004. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeology Journal* 12(2): 159–170.
- Kaluarachchi, J.J., Parker, J.C., 1989. An efficient finite element method for modeling multiphase flow in porous media. *Water Resources Research*, 25: 43-54.
- Kuppusamy, T., Sheng, J., Parker, J.C., Lenhard, R.J., et al., 1987. Finite element analysis of multiphase immiscible flow through soils. *Water Resources Research*, 23: 625-631.
- Lenhard, R.J., Rayner, J.L., Davis, G.B., et al., 2017. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*, 205: 1-11.
- Mirabbasi, R. and Rahnema, M.B., 2008. The impact of construction of Tangooye dam on the groundwater resources by simulation of Sirjan plain aquifer using Modflow software. *Iranian Water Research Journal*. 1(1):1-9.
- Nasimi, A., Mohammadi, Z., 2015. Evaluation of methods for determination of hydrodynamic coefficients of aquifer based on pumping test in Fars province, *Journal of Water and Soil Science*. 25 (2/4) 201-215.
- Pruess, K., Battistelli, A., 2005. TMVOC, A Numerical Simulator for Three-Phase Non-isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Variably Saturated Heterogeneous Media. Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3n95k4nm>.
- Sookhak Lari, K., Johnson, C.D., Rayner, J.L., Davis, G.B., et al., 2018. Field-scale multiphase LNAPL remediation: Validating a new computational framework against sequential field pilot trials. *Journal of Hazardous Materials*, 345: 87-96.
- Sookhak Lari, K., Rayner, J. L., & Davis, G. B., et al., 2019. Toward optimizing LNAPL remediation. *Water Resources Research*, <https://doi.org/10.1029/2018WR023380>.
- Thorley, M., Callander, P., 2005. Christchurch city groundwater model”, *Environment Canterbury report*, U05/53. pp: 10.
- Yitbarek Baye, A., Razack, M., Ayenew, T., Zemedagegnehu E., 2013. Estimating transmissivity using empirical and geostatistical methods in the volcanic aquifers of Upper Awash Basin central Ethiopia”, *Environmental Earth Sciences*, 69 (6)1791–1802.

Bashi-Azghadi, S.N., Kerachian, R., 2010. Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models. *Science of the Total Environment*, 408: 2189-2198.

Sookhak Lari, K., Safavi, H., 2008. A simulation-optimization model for “air praring” and “pump and treat” groundwater remediation technologies. *Journal of Environmental Informatics*, 12: 44-53.

### CRedit authorship contribution statement

 <b>Fatemeh Ebrahimi</b>	Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing-Original Draft
 <b>Mohammad Nakhaei</b>	Formal analysis, Validation, Methodology, Writing-Review & Editing, Supervision, Project administration
 <b>Hamid Reza Nassery</b>	Supervision, Project administration
 <b>Kamal Khodaei</b>	Supervision, Project administration, Funding acquisition



## تخمین ضرایب هیدرودینامیک در آبخوان‌های آلوده به نفت

فاطمه ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، محمد نخعی<sup>۲</sup>، حمید رضا ناصری<sup>۳</sup>، کمال خدایی<sup>۴</sup>

۱. دکترای هیدروژئولوژی، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

۳. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>تاریخچه مقاله</b> دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰</p> <p><b>واژه های کلیدی</b> ضرایب هیدرودینامیک، نفت دهی ویژه، قابلیت انتقال LNAPL، مدل LDRM</p> 	<p>یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در آبخوان‌های مجاور به تاسیسات نفتی، آلودگی ناشی از نشت LNAPL ها می‌باشد. این ترکیبات با توجه به وزن کمترشان نسبت به آب، به صورت لایه در روی سطح آب شناور می‌مانند و همراه با جریان آب گسترش پیدا می‌کنند. بازیافت LNAPL ها همواره مشکل و پرهزینه است. این مطالعه قصد دارد با تعیین ضرایب هیدرودینامیکی LNAPL هزینه‌های بازیافت را مدیریت نماید. ضرایب هیدرودینامیکی شامل قابلیت انتقال و آبدهی ویژه می‌باشد. در این مطالعه برای اولین بار بجای عبارت "آبدهی ویژه" از عبارت "نفت دهی ویژه" با توجه به نوع سیال موجود در آبخوان، استفاده شده است. برای محاسبه نفت دهی ویژه و حجم کل LNAPL از مدل سازی حجم LNAPL شناور روی سطح ایستایی توسط نرم افزار Rockwork و برای محاسبه ضریب قابلیت انتقال LNAPL از مدل LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model) استفاده شد. بدین صورت که پارامترهای خاک و LNAPL شامل تخلخل، هدایت هیدرولیکی اشباع آب، پارامترهای ونگنوختن، چگالی‌های جرمی آب و LNAPL، کشش‌های سطحی آب- LNAPL، LNAPL- هوا و آب- هوا، ویسکوزیته‌های آب و LNAPL به عنوان پارامترهای ورودی به مدل LDRM معرفی شد و ضریب قابلیت انتقال و حجم ویژه قابل استحصال به عنوان نتایج خروجی از آن استخراج گردید. در پایان با کمک نتایج بدست آمده نقشه‌های ضریب قابلیت انتقال، ضخامت و حجم قابل استحصال LNAPL تهیه و جهت یافتن بهترین محل‌های بازیافت معرفی شدند.</p>

### مقدمه

آلودگی‌های ناشی از تاسیسات نفتی می‌تواند یکی از عمده‌ترین نگرانی‌ها برای آلودگی آب‌های زیرزمینی باشد. ترکیبات نفتی بر حسب وزنشان به دو گروه LNAPL و DNAPL تقسیم می‌شوند. LNAPL ها

آب یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین عوامل حیات موجودات زنده است. آب زیرزمینی دومین ذخیره آب شیرین در دنیا محسوب می‌شود که امروزه به دلیل رشد صنعت، در معرض آلودگی قرار گرفته است.

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.103041>

\*نویسنده مسئول: فاطمه ابراهیمی [ebrahimii.edu@gmail.com](mailto:ebrahimii.edu@gmail.com)

استناد به این مقاله: ابراهیمی، ف.، نخعی، م.، ناصری، ح.ر.، خدایی، ک. (۱۴۰۱) تخمین ضرایب هیدرودینامیک در آبخوان‌های آلوده به نفت. مجله

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.103041>

علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۲، صفحه ۳۹ تا ۶۱.



و هانتوش، آنالیز شده و پارامترهای هیدرولیکی محاسبه می‌شود (Samuel and Jha, 2003). این آزمون اغلب با هدف تعیین ضرایب هیدرودینامیک و همینطور جهت برآورد برداشت‌های غیر اصولی و بررسی تغییرات کمی و کیفی آبخوان انجام می‌شود (Mokhtari and Espahbod, 2009). سلیمانی و همکاران (Soleimani et al., 2016) برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان دشت الشتر از نتایج آزمون‌های پمپاژ و مدل تحلیلی مانچ که خطاهای ناشی از زهکشی لحظه‌ای، عدم تراکم پذیری آبخوان آزاد و ذخیره چاه را در نظر می‌گیرد، استفاده نمودند. ضرایب حاصل با نتایج آزمون‌های پمپاژ و مطالعات ژئوالکتریک مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان در هر دوره خشکسالی نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابند. مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با استفاده از آزمون‌های پمپاژ و روش‌های گرافیکی برازش منحنی برای یافتن ضرایب هیدرودینامیکی، در نقاط مختلف دنیا انجام شده است (Asghari Moghaddam, 2006; Chesnaux et al., 2012; Elsheikh et al., 2009; Jalludin, and Razack, 2004; Nasimi and Mohammadi, 2015; Yitbarek et al., 2013). استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری مثل الگوریتم ژنتیکی و کلونی مورچگان نیز در سال‌های اخیر به علت سرعت اجرا و دقت بالا رواج یافته است. روح‌الهی (Rohallahi, 2011) از روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک برای برآورد ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان آزاد استفاده نمود. ایشان داده‌های آزمون پمپاژ را با

در نفوذ به درون زمین از زون غیر اشباع عبور کرده و به صورت لایه‌ای شناور در روی سطح ایستابی قرار می‌گیرند و همسو با جریان آب حرکت کرده و گسترش می‌یابند. روش‌های مختلفی برای برداشت و پاکسازی LNAPL ها از آبخوان وجود دارد. یکی از این تکنیک‌ها Recovery یا بازیافت می‌باشد. در این روش آب آلوده به بیرون از آبخوان پمپ شده و در صورت لزوم، تصفیه شده و دوباره به زیرزمین تزریق می‌شود. در آبخوان‌های آلوده به LNAPL روند حرکت و مهاجرت آلودگی متفاوت می‌باشد و ضرایب هیدرودینامیکی هاله آلودگی بر اساس ویژگی‌های سیال، متفاوت از دیگر بخش‌های آبخوان است. در این مطالعه هدف یافتن ضرایب هیدرودینامیکی دخیل در هدایت LNAPL می‌باشد. ضرایب هیدرودینامیکی سیال در اغلب موارد توسط آزمون‌های پمپاژ و همچنین آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی معکوس تعیین می‌شوند که اغلب دشوار و پرهزینه هستند.

آزمون پمپاژ تکنیک استاندارد و متداول‌ترین تکنیک برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان است که به وسیله برداشت آب از یک چاه با یک دبی ثابت یا متغیر و مشاهده تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی در یک یا دو چاه مشاهده‌ای دیگر با یک فاصله مشخص از چاه اصلی و یا ثبت اندازه‌گیری سطح آب در چاه پمپاژ صورت می‌گیرد (Ghafoori., 2012; Kresic, 2007). در این تست مقادیر افت-زمان بر اساس نوع آبخوان از طریق راه حل‌های تحلیلی مثل مدل تاپس، تاپس اصلاح شده

سه روش نیومن، تاپس اصلاح شده و آزمایش برگشت مورد تفسیر و بررسی قرار داد و برای این منظور از مدل Aquifer test استفاده کرد. سپس از الگوریتم ژنتیک برای برآورد مقادیر افت-زمان و تخمین ضرایب هیدرودینامیکی استفاده نمود. نتایج نشان دادند که این روش نسبت به روش‌های دیگر سریع‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌باشد. باطنی و همکاران (Bateni et al., 2015) از الگوریتم‌های ژنتیکی و کلونی مورچگان برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان استفاده نمودند و نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از روشهای فرابتکاری دارای دقت بالاتری نسبت به روش‌های گرافیکی (مدل تیس و ژاکوب) و مدل GAMS بوده و همچنین الگوریتم کلونی مورچگان دارای سرعت بالاتری در رسیدن به راه‌حل بهینه می‌باشد در حالی که روش‌های گرافیکی اغلب زمان‌بر می‌باشند.

همچنین مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از هوش مصنوعی و مدل‌های بهینه‌سازی، جهت تفسیر نتایج آزمون پمپاژ انجام شده است (El Harrouni et al., 1996; Jha et al., 2006; Li et al., 2006; Lingireddy, 1998; Rajesh et al., 2010). یک روش جایگزین برای یافتن ضرایب هیدرودینامیکی استفاده از مدل‌سازی آب زیرزمینی می‌باشد. در این روش با استفاده از متغیرهای معلوم مثل هد سطح آب، پارامترهای هیدرولیکی تخمین زده می‌شوند. چندین روش برای راه‌حل معکوس و یافتن پارامترهای هیدرولیکی وجود دارد. مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW یکی از مهم‌ترین مدل‌ها

جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیک می‌باشد که می‌تواند در دو حالت پایدار و ناپایدار اجرا شود. مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از MODFLOW برای یافتن پارامترهای هیدرولیکی و یا اصلاح این پارامترها صورت گرفته است (Don et al., 2005; Mirabbasi and Rahnama, 2008; Thorley and Callander, 2005). عابدی‌کوپایی و گلابچیان (Abedi Koupaei and Gholabchian, 2015) در مطالعه خود جهت ارزیابی ضرایب هیدرودینامیکی حوضه آبخیز کوهپایه سگزی از مدل MODFLOW استفاده کردند. در این مطالعه مدل برای دو حالت پایدار و ناپایدار اجرا شد و نتایج نیز با مقادیر مشاهده‌ای کالیبره شدند. ملکی و همکاران (Maleki et al., 2010) از مدل آب زیرزمینی MODFLOW و از واسط گرافیکی GMS برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت شاهرود استفاده کرده و سپس از نتایج مدل برای اصلاح ضرایب هیدرودینامیکی استفاده نمودند. در مطالعه حاضر نوع سیال موجود در محیط، LNAPL و آب می‌باشد و هدف از این مطالعه یافتن ضرایب هیدرودینامیکی LNAPL است. LNAPL از ترکیبات نفتی سبک بوده و در روی سطح ایستابی به حالت شناور باقی می‌ماند. بنابراین ضرایب هیدرودینامیکی چنین آبخوانی متفاوت از بقیه می‌باشد.

مدل‌های چند فازی انتقال و جریان می‌تواند برای توسعه استراتژی‌های پاکسازی نواحی آلوده توسط یافتن محل چاه و ارزیابی فاکتورهای اجرایی توسعه یابد. مدل‌های عددی همچنین می‌تواند برای ارزیابی ریسک‌های زیست محیطی و سلامتی انسان نیز به

عمودی) و قابلیت‌های انتقال (نرخ جریان LNAPL در جهت عمودی) آن پیش‌بینی کردند. روش لنهاارد و پارکر (Lenhard and Parker, 1990) به عنوان مبنا برای مدل‌های عددی توسعه یافته توسط کالراچی و پارکر (Kaluarachchi and Parker, 1990) و ای پی آی (API, 2007) برای پیش‌بینی حرکت زیرسطحی LNAPL استفاده شده است. اخیراً لنهاارد و همکاران (Lenhard et al., 2017) یک مدل برای تخمین حجم‌های ویژه LNAPL پسماند، بدام افتاده و سیال و تاثیر آنها بر روی قابلیت‌های انتقال LNAPL پیشنهاد کردند. همچنین ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2019) با بهره‌گیری از مدل LDRM قابلیت انتقال و حجم‌های ویژه و قابل استحصال آلودگی LNAPL را با در اختیار داشتن خصوصیات ویژه هر چاه برآورد نمودند. در اکثر مواقع، همه پارامترهای ورودی در نواحی آلوده اندازه‌گیری نمی‌شود و مطالعات به طور کلی از تخمین‌های منتشر شده و تعدادی از پارامترها و خصوصیات اندازه‌گیری شده استفاده می‌کنند. این مطالعه نیز با هدف تعیین ضرایب هیدرودینامیکی دخیل در هدایت و حرکت آلاینده انجام شده است. در این مطالعه برای دستیابی به برخی از پارامترهای اندازه‌گیری نشده از نتایج مدل‌سازی‌های اجرا شده روی منطقه مورد مطالعه همچون مدل‌سازی آب زیرزمینی (GMS) استفاده گردید. همچنین در این مطالعه از عبارت نفت‌دهی ویژه برای معرفی میزان توان نفت‌دهی آبخوان آلوده استفاده گردید. برای محاسبه ضریب نفت‌دهی ویژه اقدام به ساخت مدل Aquifer برای لایه LNAPL

کار گرفته شود. این مدل‌ها از اواسط دهه ۱۹۸۰ (Abriola and Pinder, 1985; Baehr and Corapcioglu, 1987; Kaluarachchi and Parker, 1987; Kuppasamy et al., 1989) و بیشتر در سال‌های اخیر (Pruess and Battistelli, 2002; Sookhak Lari et al., 2018) توسعه یافته‌اند. به طور کلی در هنگام استفاده از مدل‌های عددی بایستی خصوصیات سیال و محیط به عنوان شرایط اولیه و همچنین شرایط مرزی جهت پیش‌بینی رفتار زیرسطحی LNAPL معلوم باشد. در مطالعات نسبتاً اخیر، محققین از مدل‌های بهینه‌سازی خطی و غیر-خطی در ترکیب با مدل‌های عددی برای توسعه استراتژی‌های موثر پاکسازی که سازگار با توابع هدف (شامل کمینه‌سازی هزینه) و متغیرهای چندگانه (Dokou and Karatzas, 2013; Qin et al., 2009a; Sookhak Lari et al., 2019) باشد استفاده می‌کنند. اگر چه این مدل‌ها ممکن است بدلیل پیچیدگی‌های بیشتر و همچنین نیازمندی‌های محاسباتی نسبتاً بزرگ و هزینه‌های مرتبط کاربردی نباشند (Qin et al., 2009b).

فار و همکاران (Farr et al., 1990) و لنهاارد و پارکر (Lenhard and Parker, 1990) مدل‌هایی را برای تخمین توزیع LNAPL در زیرسطح و حجم آن براساس فشار و خصوصیات سیال و محیط پیشنهاد کردند. لنهاارد و پارکر (Lenhard and Parker, 1990) یک روش برای تعیین اشباع‌های LNAPL و نفوذپذیری‌های نسبی در جهت عمودی جهت تخمین حجم‌های ویژه LNAPL (حجم LNAPL در جهت

بازیافت LNAPL حفر گردیده است. جنس خاک این محدوده از نوع رس سیلتی است که مانع از گسترش آلودگی می‌شود. این نوع خاک بدلیل داشتن مکش بالا، به سختی مایع را از ذخیره خود رها می‌سازد. یکی از اهداف این مطالعه، تعیین ضرایب هیدرودینامیک (ضریب نفت دهی ویژه و قابلیت انتقال LNAPL) است آنچنان که بتوان با کمک نتایج بدست آمده محل‌های بهینه را برای برداشت نفت انتخاب نموده و از هدررفت هزینه جلوگیری نمود.

### نوسانات سطح آب زیرزمینی و LNAPL و

#### تصحیح سطح آب زیرزمینی در آبخوان

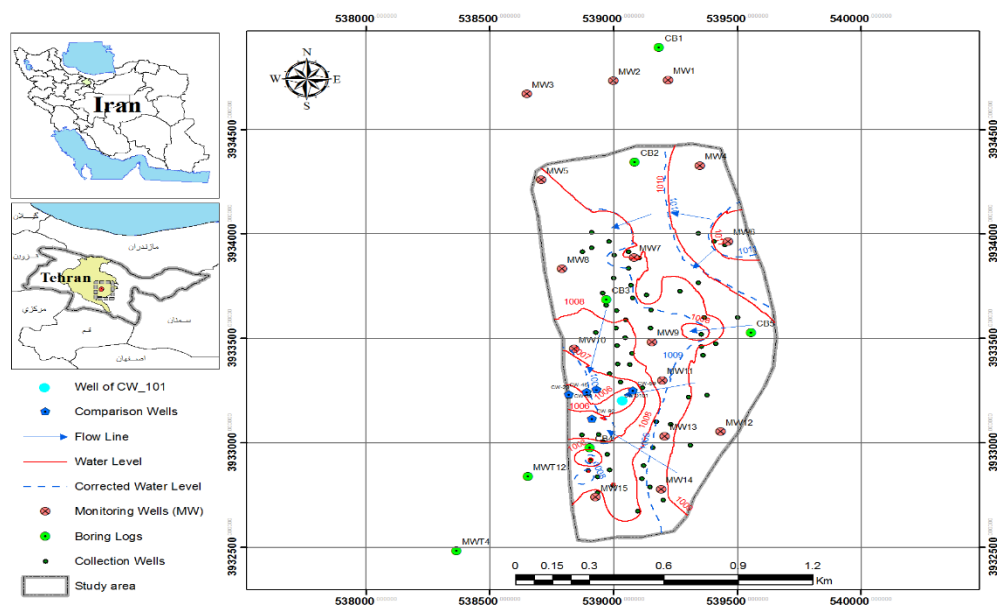
یکی از داده‌های مهم مورد استفاده در این تحقیق ارتفاع سطوح آب و LNAPL است که بایستی بدرستی تعیین و تغییرات و نوسانات آنها محاسبه گردد. برای تعیین نوسانات سالیانه آب زیرزمینی و LNAPL ابتدا سطح آب زیرزمینی تصحیح شد و سپس اقدام به ترسیم هیدروگراف برای کل محدوده مطالعاتی گردید. باید توجه شود که در آبخوان‌های آلوده به LNAPL، سطح آب مشاهده‌ای همیشه پایین‌تر از تراز واقعی سطح آب آبخوان، قرار می‌گیرد که این، نیاز به تصحیح خواهد داشت.

توسط نرم افزار Rockwork شد و برای تعیین قابلیت انتقال LNAPL از مدل LDRM استفاده شد. در اینجا ابتدا مدل، برای چاه‌هایی با داده‌های معلوم اجرا و سپس مدل برای محدوده وسیع‌تر و با تعداد چاه‌های بیشتر اجرا شد. نتایج بدست آمده در قالب نقشه‌هایی آماده‌سازی و سپس محل بهینه چاه‌ها برای بازیافت معرفی شد.

### مواد و روش‌ها

#### مطالعه موردی

برداشت آلودگی LNAPL از آبخوان اغلب مشکل و پرهزینه است. یکی از راه‌ها برای این منظور برداشت آلودگی و انتقال آن به سطح زمین می‌باشد. نخستین مرحله در برنامه‌ریزی چنین روش‌هایی، تعیین اهداف طراحی می‌باشد. اغلب کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی برداشت آلاینده به عنوان مهم‌ترین اهداف طراحی در نظر گرفته می‌شوند. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق روستای اسماعیل‌آباد است. این روستا در جنوب تهران واقع شده است و در بخش غربی در مجاورت تاسیسات نفتی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نشت LNAPL سبب آلوده شدن خاک و آب‌زیرزمینی این روستا شده است. چندین چاه برای



شکل 1- نقشه منطقه مورد مطالعه (روستای اسماعیل آباد- تهران) و محل چاه‌های مشاهده‌ای، بازیافت، اکتشافی و چاه‌های گمانه در منطقه مورد مطالعه.

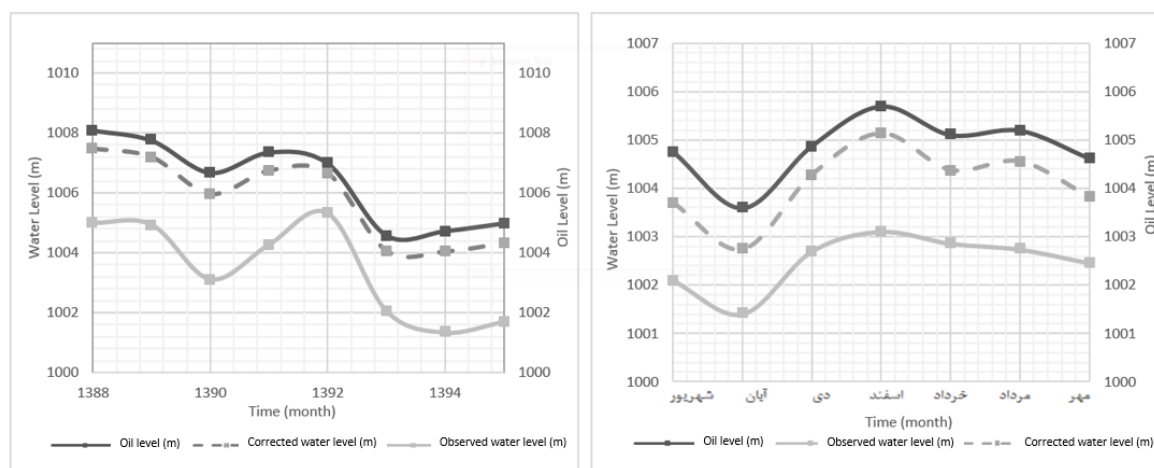
Fig. 1. Map of the study area (Esmailabad village-Tehran) and the location of observation wells, recovery wells, exploratory wells and boreholes in the study area.

محدوده مورد مطالعه در فاصله زمانی بلندمدت (هشت ساله) و کوتاه مدت (سال ۹۶-۱۳۹۵) ترسیم گردید (شکل ۲). همانطور که از هیدروگرافها مشاهده می‌شود، با وجود انجام عملیات برداشت LNAPL، تغییرات سطح آب و LNAPL در طول هشت سال و دوره زمانی مورد مطالعه بسیار اندک است. مهم‌ترین دلیل این مسئله رسی بودن خاک محدوده و دشواری برداشت LNAPL و همچنین عدم برداشت آب زیرزمینی است. بنابراین برای سرعت بخشیدن به عملیات پاکسازی، یافتن محل‌هایی با ضرایب هیدرودینامیکی بالاتر ضروری است (Ebrahimi et al., 2019).

در این مطالعه برای تصحیح سطح آب (ارتفاع فصل مشترک سطح آب و هوا یا ارتفاع سطح ایستابی) از رابطه لنهارد و پارکر (Lenhard and Parker, 1990) استفاده شده است (۱).

$$z_{aw} = (1 - \rho_{ro})z_{nw} + \rho_{ro} z_{an} \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho_{ro}$  چگالی ویژه LNAPL (نسبت چگالی جرم LNAPL به چگالی جرم آب)،  $z_{aw}$  ارتفاع سطح ایستابی،  $z_{an}$  ارتفاع فصل مشترک سطح هوا- LNAPL و  $z_{nw}$  ارتفاع فصل مشترک سطح LNAPL- آب می‌باشد. همچنین با کمک داده‌های مشاهده‌ای تراز LNAPL و ارتفاع تصحیح شده سطح آب، هیدروگراف تغییرات سطح آب و نفت برای کل



شکل ۲ - هیدروگراف کوتاه و بلند مدت در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2. Short and long term hydrograph in the study area

در این رابطه  $OS_y$  نفت دهی ویژه،  $V_y$  برابر با حجم برداشت واقعی از لایه نفتی و  $V_t$  برابر با حجم کل لایه نفتی می‌باشد.

### قابلیت انتقال LNAPL

قابلیت انتقال، پارامتری است که قابلیت عبور آب را در تمام ضخامت لایه آبدار نشان می‌دهد و واحد مصطلح برای آن مترمربع بر روز است. برای زمانی که سیال موجود درون آبخوان از نوع آب باشد، ضریب قابلیت انتقال از رابطه (۳) بدست می‌آید که  $K$  هدایت هیدرولیکی آبخوان و  $b$  ضخامت آبخوان می‌باشد.

$$T = K \times b \quad (3)$$

همانطور که گفته شد در این مطالعه، آبخوان آلوده به LNAPL است و خصوصیات هیدرودینامیکی آن کاملاً متفاوت بوده و از رابطه (۴) برای محاسبه ضریب قابلیت انتقال LNAPL استفاده می‌شود (API, 2007).

$$T_n(b_n) = \frac{\rho_l}{\mu_l} \int_{z_{nw}}^{z_{max}} K_{ws}(z) k_m(S_w S_n) dz \quad (4)$$

### نفت دهی ویژه

در منطقه اشباع، آب و نفت تمام منافذ خاک و سنگ را پر می‌کند. بنابراین تخلخل نمایانگر میزان آب و نفت موجود در واحد حجم است. تمام مایعات موجود در محیط اشباع را نمی‌توان با زهکشی یا پمپاژ از آن خارج نمود، زیرا که نیروهای مولکولی و کشش سطحی بخشی از آب و نفت را در محل نگه می‌دارند. این در حالیست که برای خاک‌های رسی و سیلتی شدت این نیروها زیادتر است. توان آبدهی آبخوان نسبت به آب، به نام ضریب ذخیره و در آبخوان‌های آزاد تحت عنوان آبدهی ویژه نامیده می‌شود. در اینجا برای محاسبه این ضریب نسبت به سیال نفت، از عنوان "نفت دهی ویژه" استفاده شده است. نفت دهی ویژه بیانگر این است که چقدر می‌توان از آبخوان، آلودگی نفتی برداشت نمود و برابر با حجم نفت برداشت شده به حجم کل لایه نفتی می‌باشد (رابطه ۲).

$$OS_y = \frac{V_y}{V_t} \times 100 \quad (2)$$

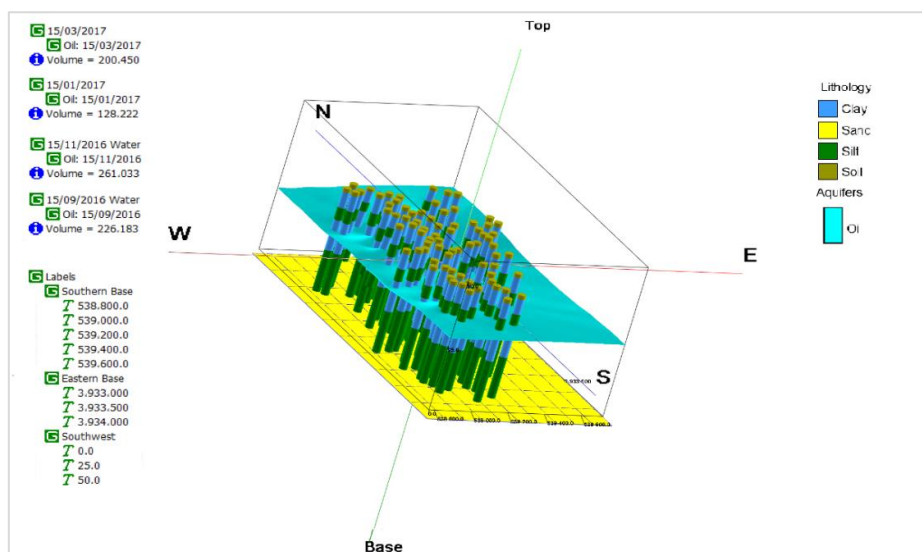
مساحت توزیع LNAPL و حجم‌های واقعی آن در اطراف هر چاه گردید.

### بحث

برای محاسبه نفت‌دهی ویژه آبخوان طبق رابطه ۲، نیازمند داشتن حجم کل لایه نفتی هستیم. برای این منظور مدل آبخوان (Aquifer) برای لایه نفتی توسط نرم افزار rockwork 16 تهیه شد. در اینجا ارتفاع ثبت شده از سطوح نفت و آب (سطح آب تصحیح شده) در دوره‌های مختلف، به ترتیب به عنوان اعماق بالا و پایین نفت به نرم افزار معرفی شدند. سپس مدل (Aquifer) برای لایه نفت موجود در بالای سطح ایستایی ساخته شد و حجم لایه نفتی برای هر دوره محاسبه گردید (شکل ۴). با توجه به معلوم بودن مقدار برداشت واقعی نفت از کل محدوده در هر دوره، می‌توان میزان نفت‌دهی ویژه را از رابطه ۲ محاسبه نمود که برابر با ۰/۰۰۹۹ می‌باشد. در این رابطه  $OS_y$  نفت دهی ویژه،  $V_r$  برابر با میانگین حجم برداشت واقعی (حجم مشاهده‌ای) از لایه نفتی در طول فاصله زمانی شهریور ۱۳۹۵ تا مهر ۱۳۹۶ و  $V_t$  برابر با ماکزیمم حجم لایه نفتی (حجم محاسبه‌ای) محاسبه شده توسط rockwork مربوط به آبان ماه ۱۳۹۵ می‌باشد (جدول ۱). همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار نفت‌دهی ویژه در هر دوره پایین است که از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به محدود بودن برداشت فقط از ضخامت لایه نفتی، جنس خاک (رس سیلتی) محدوده، اهتمام بر عدم برداشت آب زیرزمینی جهت جلوگیری از فرونشست

در این رابطه،  $T_n(b_n)$  قابلیت انتقال LNAPL،  $\rho_r$  نسبت چگالی آب-LNAPL ( $\rho_r = \rho_n / \rho_w$ )،  $\mu_r$  نسبت ویسکوزیته آب-LNAPL ( $\mu_r = \mu_n / \mu_w$ )،  $K_{ws}(z)$  هدایت هیدرولیکی اشباع آب،  $k_{rn}(S_w S_n)$  نفوذپذیری نسبی LNAPL،  $z_{nw}$  ماکزیمم ارتفاع LNAPL،  $z_{max}$  ارتفاع فصل مشترک آب-LNAPL در چاه مشاهده ای می‌باشد. برای محاسبه قابلیت انتقال LNAPL، از مدل (LNAPL LDRM Distribution and Recovery Model) برای هر چاه بطور جداگانه استفاده شده است. ورودی‌های مورد نیاز برای مدل LDRM شامل چگالی‌های جرمی آب و LNAPL، کشش‌های سطحی آب-LNAPL، LNAPL-هوا و آب-هوا، ویسکوزیته‌های آب و LNAPL، پارامترهای ونگنوختن، تخمینی از اشباع پسماند LNAPL یا LNAPL F-factor، تخلخل، هدایت هیدرولیکی اشباع آب و شعاع بازیافت LNAPL می‌باشند. از ورودی‌ها، حجم ویژه قابل استحصال (Rn) و حجم کل LNAPL (Dn) و مقادیر قابلیت انتقال LNAPL و همچنین نرخ‌های حجمی LNAPL بدست می‌آیند. مدل LDRM همچنین حجم‌های ویژه کل و قابل استحصال و نرخ‌های حجمی LNAPL به درون چاه‌ها را با فرض شعاع بازیافت معین پیش‌بینی می‌کند. در این مطالعه چون برداشت فقط از حجم LNAPL شناور بر روی سطح ایستایی صورت می‌گیرد، بنابراین حداقل شعاع بازیافت ۳ متر برای هر چاه منظور گردید و سپس اقدام به محاسبه

و پایین بودن نرخ‌های برداشت جهت جلوگیری از مسدود شدن منافذ لوله جدار چاه‌ها اشاره نمود.



شکل ۳- مدل‌سازی لایه LNAPL در محدوده مورد مطالعه توسط Rockwork

Fig. 3. Modeling of the LNAPL layer in the study area by Rockwork

جدول ۱- مقادیر حجم‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای با استفاده از مدل Rockwork و مقدار نفت‌دهی ویژه محاسبه‌ای برای دوره‌های زمانی مختلف در منطقه مورد مطالعه

Table 1. Observed and calculated volume values using the Rockwork model and calculated specific oil yield for different time periods in the study area

تاریخ	حجم برداشت واقعی (مشاهده‌ای-متر مکعب)	حجم لایه نفتی مدل‌شده (محاسبه‌ای-متر مکعب)	ضریب نفت دهی ویژه
شهریور ۱۳۹۵	3030.39	226183	0.01
آبان ۱۳۹۵	2301.79	261033	0.008
مرداد ۱۳۹۶	2342.41	128222	0.01
مهر ۱۳۹۶	2719.64	200450	0.01
	Mean volume= 2598.5	Maximum volume= 261033	0.0099

و LNAPL، کشش‌های سطحی آب-LNAPL،  
و LNAPL-هوا و آب-هوا، ویسکوزیته‌های آب  
و LNAPL، پارامترهای ونگنوختن، تخمینی از اشباع

برای محاسبه قابلیت انتقال LNAPL، از مدل  
LDRM استفاده شده است. ورودی‌های مورد نیاز  
برای مدل LDRM شامل چگالی‌های جرمی آب

آوردن ارتفاع سطح ایستابی (ارتفاع سطح آب با فشار اتمسفریک) درون چاه‌ها، از رابطه لنهارد و پارکر (۱) استفاده شده است. پارامترهای ونگنوختن  $\alpha$  و  $n$  در محدوده به ترتیب برابر با ۰/۹۸ و ۱/۱۴ در نظر گرفته شدند (Ebrahimi et al., 2019). برای تخمین اشباع پسماند LNAPL، از مقدار LNAPL F-factor برابر با ۰/۵۶ برای خاک‌های ریزدانه (API, 2007) استفاده شد. بعلاوه کشش‌های سطحی نیز از مقادیر API (2007) استفاده گردید.

داده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه محدود هستند، اما برای تخمین حجم‌های ویژه کل و قابل استحصال LNAPL و همچنین مقادیر قابلیت انتقال LNAPL کافی هستند. در مورد چاه‌های موجود در گستره مطالعاتی، داده‌های مربوط به حجم-های بازیافت و اندازه‌گیری‌های ارتفاع فصول مشترک هوا-LNAPL و LNAPL-آب برای تقریباً ۸ ماه در اختیار بود که برای این منظور مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه حاضر مدل ابتدا برای ۶ چاه اجرا و نتایج مربوط به حجم‌های بازیافت محاسبه‌ای با حجم‌های برداشت واقعی یا مشاهده‌ای مقایسه شدند. جدول‌های (۲) و (۳) پارامترهای ورودی و نتایج تئوری خروجی را برای یکی از چاه‌ها (چاه ۱۰۱) نشان می‌دهد. نتایج تئوری شامل حجم ویژه نفت سیار موجود در اطراف چاه، حجم قابل استحصال و قابلیت انتقال LNAPL ( $T_n$ ) می‌باشد. شکل (۴) انطباق سازگار و خوب بین حجم‌های بازیافت مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای ۶ چاه مذکور را نشان می‌دهد.

پسماند LNAPL یا LNAPL F-factor، تخلخل، هدایت هیدرولیکی اشباع آب و شعاع تسخیر یا بازیافت LNAPL می‌باشند. از ورودی‌ها، حجم‌های ویژه قابل استحصال و کل LNAPL و مقادیر قابلیت انتقال LNAPL و همچنین نرخ‌های حجمی LNAPL به درون چاه بدست می‌آید.

تخمین‌ها از خصوصیات زیرسطحی منطقه مورد مطالعه به طور اساسی با تمرکز بر روی خصوصیات مکانیکی نسبت به خصوصیات هیدرولوژیکی استوار است. اندازه‌گیری‌های مهم انجام شده که می‌توان برای تخمین حجم‌های ویژه کل و قابل استحصال LNAPL و همچنین قابلیت‌های انتقال LNAPL، استفاده نمود شامل اندازه‌گیری‌های چگالی، آنالیز اندازه دانه‌ها، تخلخل و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. همانطور که گفته شد LNAPL به طور اساسی از نوع بنزین و یا ترکیبی از بنزین و سایر فرآورده‌ها با متوسط چگالی ۰/۸۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. با توجه به نمونه‌های زیرسطحی تهیه شده از محل چاه‌های مشاهده‌ای، خاک در گستره مطالعاتی ریزدانه و با توزیع نسبتاً یکنواخت در کل محدوده می‌باشد. اندازه‌گیری‌های هدایت هیدرولیکی اشباع آب، توسط روش پمپاژ آب و برای چند نقطه در منطقه مورد مطالعه موجود می‌باشد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها توسط مدل جریان آب زیرزمینی (GMS)، به تخمین‌های نقطه‌ای هدایت هیدرولیکی انجامید بطوری‌که در این مرحله، برای هر چاه از هدایت هیدرولیکی برآورد شده توسط مدل GMS استفاده شده است. همچنین برای بدست

جدول ۲- داده های بازیافت LNAPL اندازه گیری شده از چاه CW-101

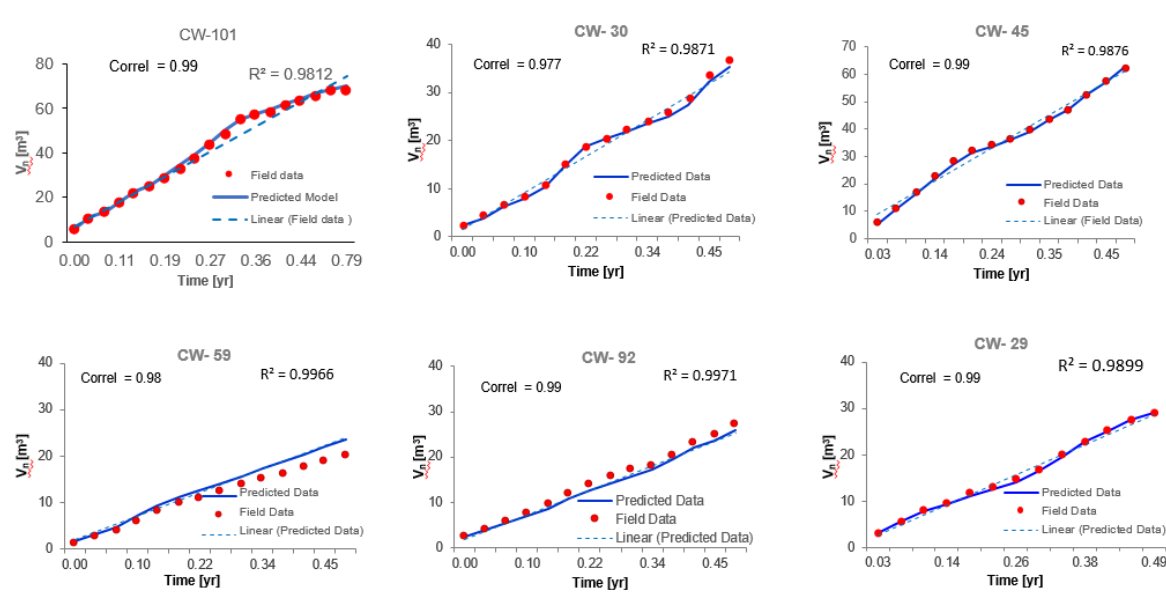
Table 2. LNAPL recovery data measured from well CW-101

زمان (سال)	حجم LNAPL (m <sup>3</sup> )
0.03	5.15
0.05	10.30
0.08	12.87
0.11	15.53
0.14	18.11
0.16	20.59
0.19	25.65
0.22	30.41
0.25	35.43
0.27	40.59
0.30	45.75
0.33	50.91
0.36	53.29
0.38	55.87
0.41	58.44
0.44	61.02
0.47	63.59
0.62	65.52
0.79	68.02

جدول ۳- مقادیر پارمترهای استفاده شده در مدل LDRM برای چاه CW-101

Table 3. Values of parameters used in LDRM model for Cw-101 well

2.98	ماکزیم ضخامت LNAPL (m)
1021.21	ارتفاع سطح زمین (m)
1005.12	ارتفاع سطح آب زیرزمینی (m)
0	شیب عمودی آب
0.809	چگالی LNAPL (gm/cc)
2.3	ویسکوزیتی LNAPL (cp)
58	کشش سطحی آب / هوا (dyne/cm)
26	کشش سطحی هوا / LNAPL (dyne/cm)
23	کشش سطحی آب / LNAPL (dyne/cm)
Fuel oil	نوع نفت
0.35	تخلخل
0.4	هدایت هیدرولیکی (m/d)
1.14	پارامتر ونگنوختن "n" (-)
0.98	پارامتر ونگنوختن "a" بر حسب (1/m)
0.19	درجه اشباع باقیمانده آب
F-factor = 0.56	درجه اشباع باقیمانده LNAPL



شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای حجم‌های بازیافت LNAPL مشاهده‌ای و محاسبه‌ای با استفاده از خصوصیات ویژه هر چاه توسط مدل LDRM برای ۶ چاه در منطقه مطالعاتی

Fig. 4. Comparison chart of observed and calculated LNAPL recovery volumes using the special properties of each well by the LDRM model for 6 wells in the study area.

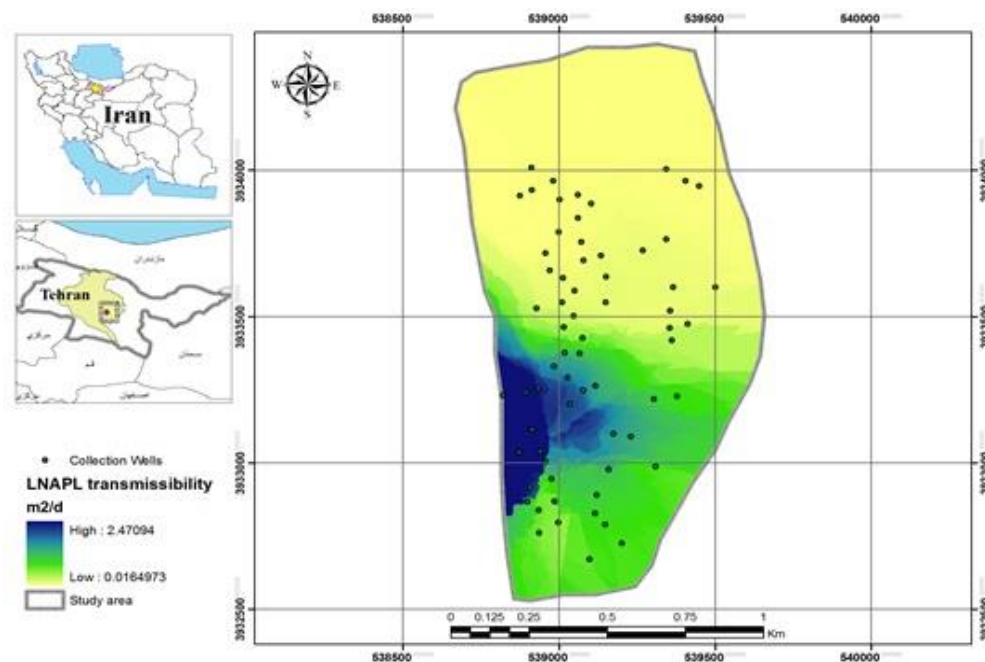
حجم نفت سیار (Mobil LNAPL) و حجم قابل استحصال نفت (Recoverable Volume) می‌باشد. همانطور که گفته شد این نتایج به صورت حجم ویژه می‌باشد و برای بدست آوردن حجم واقعی باید مساحت توزیع LNAPL در اطراف هر چاه محاسبه گردد. در این مطالعه برای تمام چاه‌ها این محاسبات انجام شد و حجم نفت سیار و حجم قابل استحصال نفت بدست آمد. سپس با معرفی این مقادیر به نرم افزار GIS نقشه‌های آنها برای کل محدوده تهیه گردید شکل های ۷ و ۸ به ترتیب نقشه حجم نفت سیار و حجم قابل استحصال را نشان می‌دهد.

با توجه به برآورد ضرایب هیدرودینامیکی در محدوده، می‌توان محل چاه‌های بهینه را برای استحصال حجم آلودگی پیشنهاد نمود. برای این منظور از هم‌پوشانی سه لایه اطلاعاتی در محیط GIS

سپس مدل برای بقیه چاه‌ها (۷۵ چاه) با در نظر گرفتن خصوصیات ویژه هر چاه اجرا شد. به طور کلی فرض بر این است که همان تخلخل، پارامترهای ونگنختن و مقادیر کشش‌های سطحی سیال می‌تواند برای چاه‌های دیگر نیز در گستره مورد مطالعه استفاده شود زیرا آنالیز اندازه دانه‌ها در کل منطقه مورد مطالعه تقریباً یکنواخت است. نتایج Tn بدست آمده برای چاه‌ها به نرم افزار GIS معرفی و نقشه آن برای کل محدوده تهیه شد. شکل ۵ نقشه قابلیت انتقال برای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که از نقشه مشخص است توزیع قابلیت انتقال از ۰/۰۱ تا ۲/۴۷ متر مربع بر روز می‌باشد و نواحی با بیشترین مقدار قابلیت انتقال منطبق بر چاه‌هایی است که بیشترین ضخامت نفت (شکل ۶) را دارند. از جمله مهمترین نتایج اجرای مدل میزان

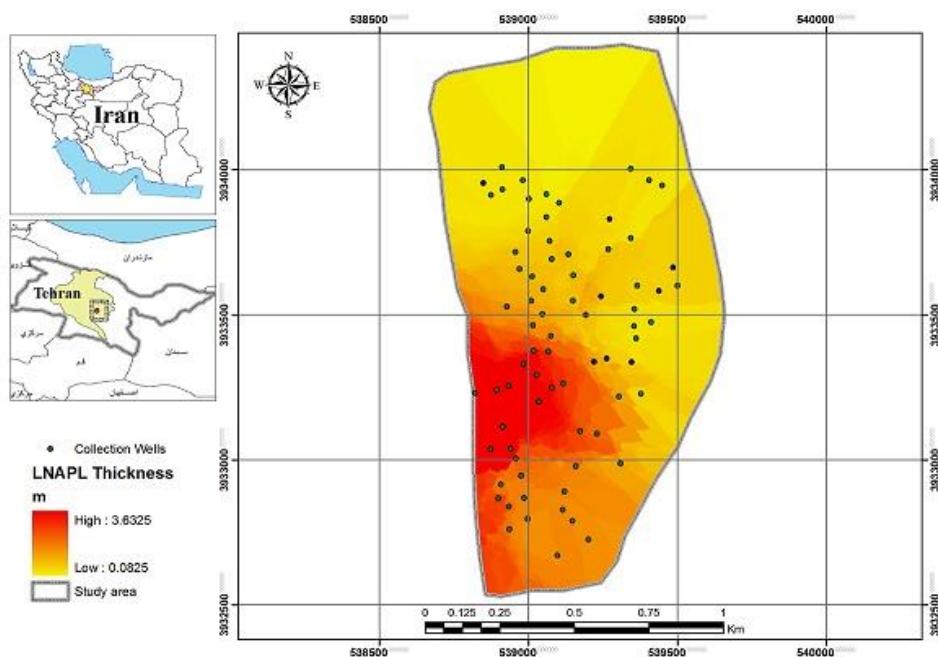
نفت و کمترین وزن به لایه حجم قابل استحصال داده شده است. برای هم‌پوشانی لایه‌ها از تابع Raster Calculator گردید و نتیجه حاصل از هم‌پوشانی مطابق شکل ۱۰ می‌باشد. در این نقشه محل چاه‌های بهینه برای استحصال مشخص شده است.

استفاده گردید. لایه‌های اطلاعاتی شامل ضخامت، ضریب قابلیت انتقال و حجم قابل استحصال LNAPL می‌باشند. سپس بر اساس میزان اهمیت هر لایه، وزنی بین ۱ تا ۵ به هر یک اختصاص داده شد (شکل ۹). در اینجا بیشترین وزن به لایه ضخامت



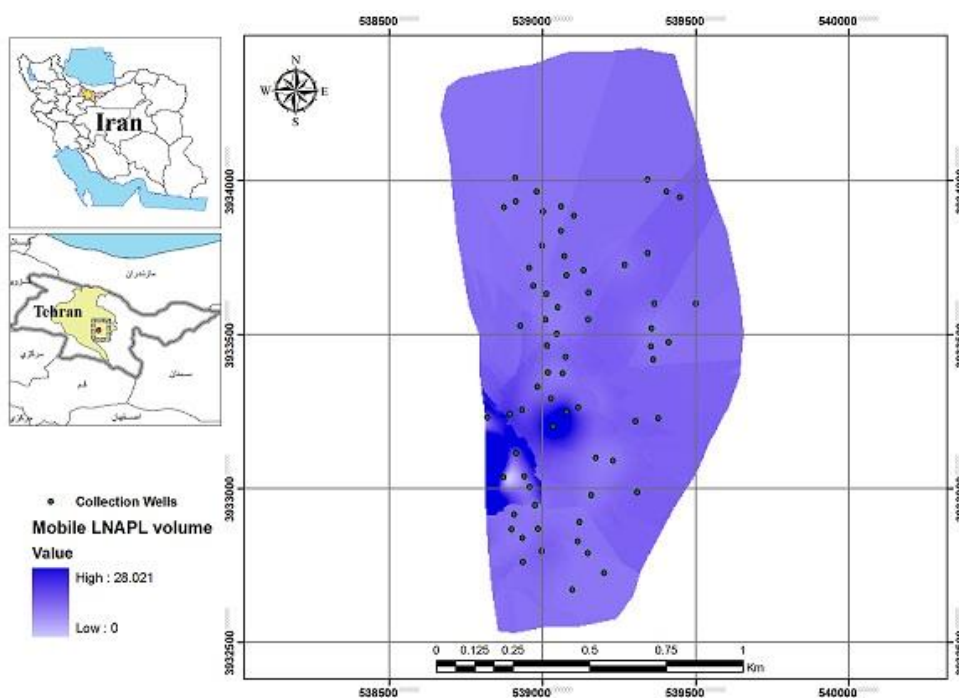
شکل ۵- نقشه ضریب قابلیت انتقال در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل LDRM

Fig. 5. LNAPL transmissivities coefficient map in the study area using the LDRM model



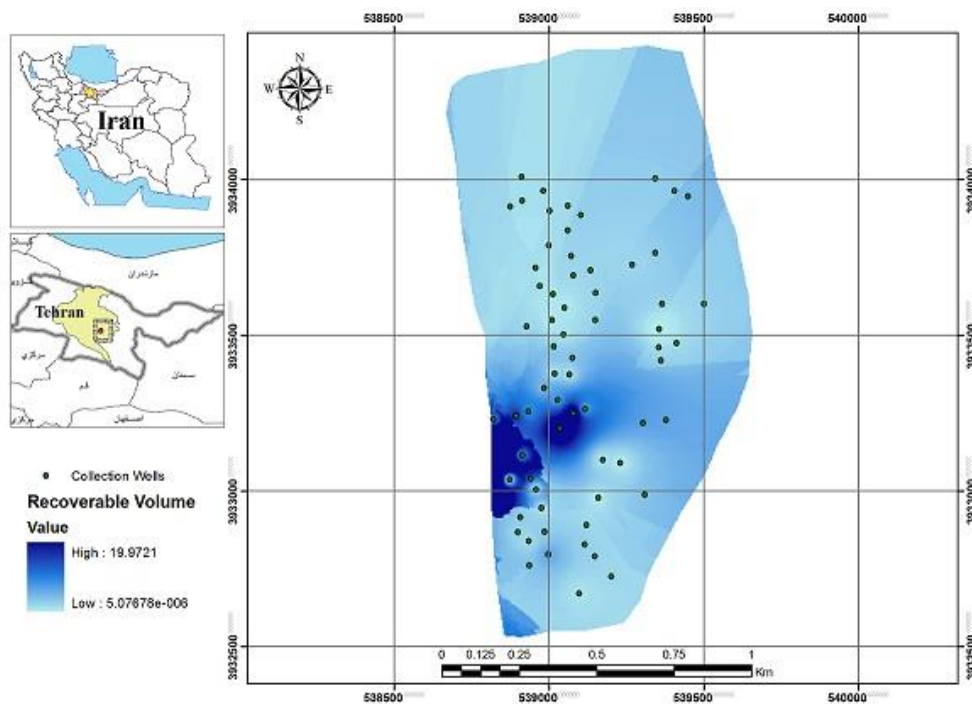
شکل ۶- نقشه ضخامت لایه LNAPL در منطقه مورد مطالعه

Fig. 6. LNAPL thickness map in the study area

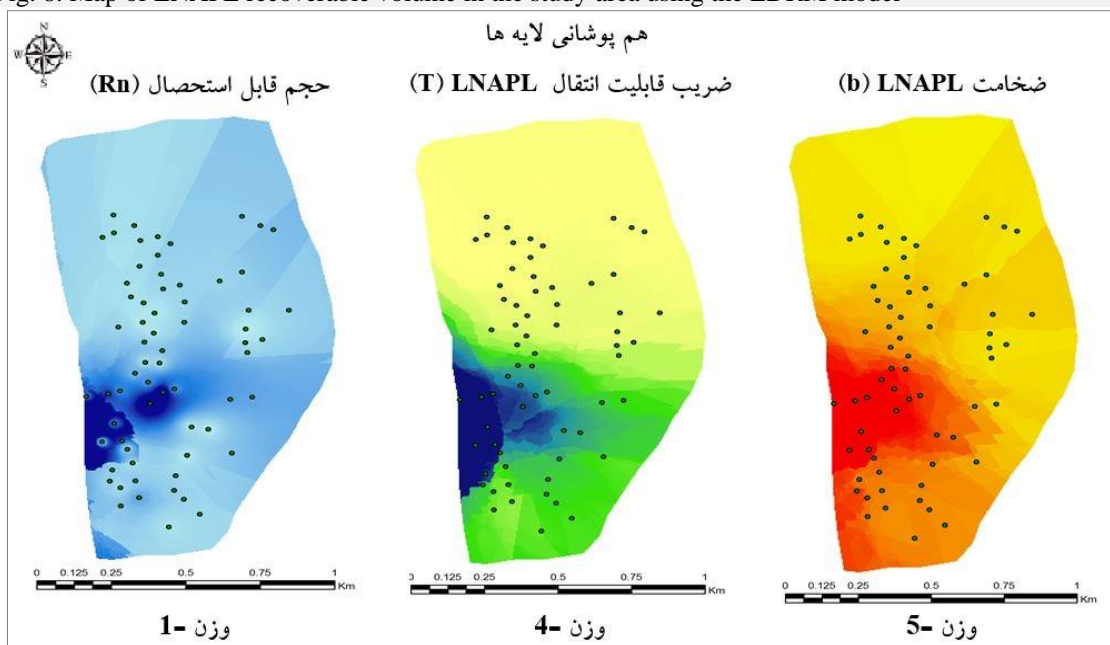


شکل ۷- نقشه حجم Mobile LNAPL در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل LDRM

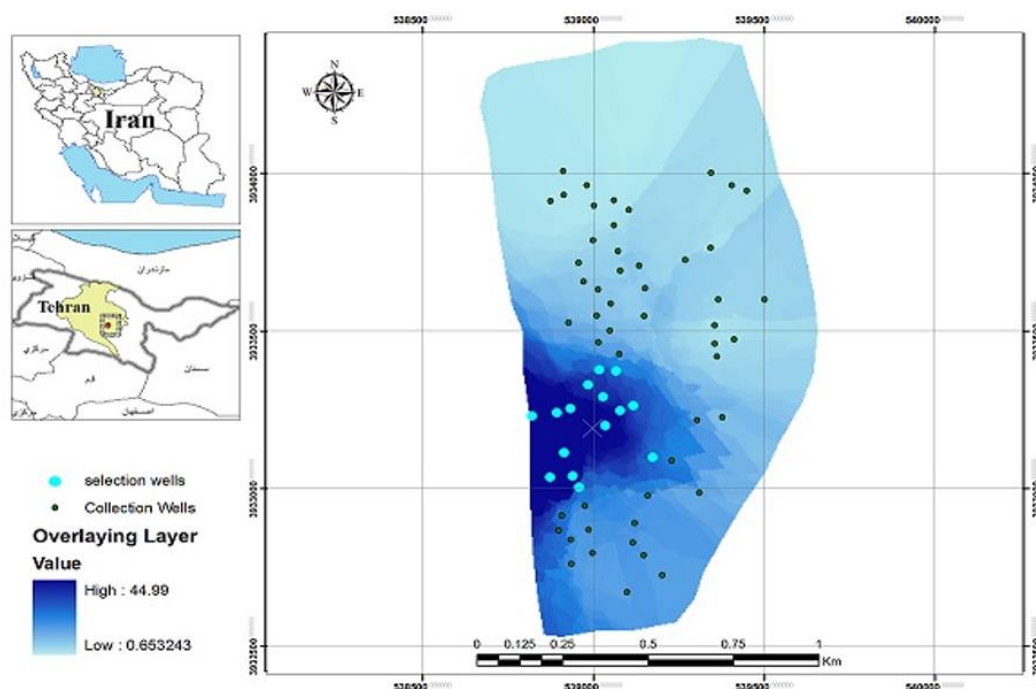
Fig. 7. Mobile LNAPL volume map in the study area using the LDRM model



شکل ۸- نقشه حجم قابل استحصال LNAPL در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل LDRM  
 Fig. 8. Map of LNAPL recoverable volume in the study area using the LDRM model



شکل ۹- نقشه های استفاده شده برای انتخاب چاه‌های بازیافت LNAPL  
 Fig. 9. Maps used to select LNAPL recovery wells



شکل ۱۰- نقشه حاصل از هم‌پوشانی و محل چاه‌های انتخابی برای بازیافت LNAPL در منطقه مورد مطالعه

Fig. 10. The map obtained from the overlap and the location of selected wells for LNAPL recovery in the study area

انتقال LNAPL، از مدل LDRM استفاده شد. مقدار قابلیت انتقال بدست آمده برای محدوده، از ۰/۰۱ تا ۲/۴۷ متر مربع بر روز برآورد گردید. با توجه به تهیه نقشه‌های ضخامت نفت، ضریب قابلیت انتقال و نقشه حجم قابل بازیافت نفت، از هم‌پوشانی هر سه نقشه استفاده نموده و محل‌هایی بهینه برای استحصال LNAPL معرفی گردید.

### قدردانی

در پایان لازم است از مساعدت و همکاری جهاد- دانشگاهی دانشگاه شهید بهشتی تهران و سایر مراکز در خصوص جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های مربوطه نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه برای یافتن ضرایب هیدروپنماتیکی LNAPL جهت یافتن بهترین محل چاه استحصال صورت گرفته است. ضرایب هیدروپنماتیکی شامل ضریب آبدی ویژه، قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی LNAPL است. در این مطالعه، با توجه به برداشت آلودگی LNAPL از آبخوان بجای ضریب آبدی از ضریب نفت‌دهی ویژه استفاده شد. برای شبیه‌سازی حجم لایه نفتی و محاسبه میزان حجم آن از مدل rockwork استفاده شد. سپس بر اساس حجم بدست آمده نفت‌دهی ویژه محاسبه شد که برابر با ۰/۰۰۹ می‌باشد. با توجه به جنس خاک محدوده (رس سیلتی) و همین‌طور نوع سیال (LNAPL)، مقدار بدست آمده می‌تواند منطقی باشد. برای محاسبه قابلیت

## References

- Abedi Koupai, J., Gholabchian, M., 2015. Estimation of Hydrodynamic Parameters of Groundwater Resources in Kouhpayeh- Segzi Watershed Using Modflow. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 19 (72) 281-292. In Persian.
- Maleki, R., Karmi, G., Davali Ardjani, F., Hosseini, H. and Asadian, F., 2010. Optimization of hydrodynamic coefficients of Shahroud Plain using GMS model, 4th Iran Water Resources Management Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran.
- Abriola, L.M., Pinder, G.F., 1985. A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds, 2, Numerical simulation. *Water Resources Research*, 21: 19-26.
- API (American Petroleum Institute), 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model (LDRM). Volume 1: Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. API Publ. No. 4760. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- Asghari Moghaddam, A., Allaf Najib, M., 2006. Hydrogeologic characteristics of the alluvial tuff aquifer of northern Sahand Mountain slopes, Tabriz, Iran. *Hydrogeology Journal* 14(7): 1319–1329.
- Baehr, A.L., Corapcioglu, M.Y., 1987. A compositional multiphase model for groundwater contamination by petroleum products, 2, Numerical solution. *Water Resources Research*, 23: 201-214.
- Batani, S. M., Mortazavi-Naeini, M., Ataie-Ashtiani, B., Jeng, D, S., Khanbilvardi, R., 2015. Evaluation of methods for estimating aquifer hydraulic parameters. *Applied Soft Computing* 28, 541–549.
- Chesnaux, R., Rafini, S., Elliott, A-P., 2012. A numerical investigation to illustrate the consequences of hydraulic connections between granular and fractured-rock aquifers”, *Hydrogeology Journal* 20(8): 1669–1680.
- Dokou, Z., Karatzas, G.P., 2013. Multi-objective optimization for free-phase LNAPL recovery using evolutionary computation algorithms. *Hydrological Sciences Journal*, 58: 671-685.
- Don, N.C., Araki, H., Yamanishi, H. and Koga, K., 2005. Simulation of groundwater flow and environmental effects resulting from pumping. *Environmental Geology*. 47:361-374.
- Ebrahimi, F., Lenhard, R.J., Nakhaei, M., Nassery, H.R., 2019. An approach to optimize the location of LNAPL recovery wells using the concept of a LNAPL specific yield. *Environ Sci Pollut Res.* pp 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06052-7>.
- Ebrahimi, F., Nakhaei, M., Nassery, H.R., Khodaei, K., Kisi, O., 2019. Light non-aqueous phase liquids simulation using artificial intelligence models: Esmaeilabad aquifer case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 8: 245-254.
- El Harrouni, K. D., Ouazar, G.A., Walters, A.H.D., Cheng., 1996. Groundwater optimization and parameter estimation by genetic algorithm and dual reciprocity boundary element method”, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 18: 287–296.
- Elsheikh, A.E.M., Elsayed Zeielabdein, K.A., Babikir, I.A.A., 2009. Groundwater balance in the Khor Arbaat basin, Red Sea State, eastern Sudan. *Hydrogeology Journal* 17(8): 2075–2082.
- Ghafoori Kharanagh, S., 2012. Selection of suitable method to estimate the aquifer hydrodynamic coefficients”, M.Sc. thesis, University of Tehran.
- Jalludin, M., Razack, M., 2004. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeology Journal* 12(2): 159–170.
- Jha, M. k., Kumar, A., Nanda, G., Bhatt, G., 2006. Evaluation of traditional and non-traditional optimization techniques for determining well parameters from step-drawdown test data”, *J. Hydrol. Eng.* 11: 617–630.
- Kaluarachchi, J.J., Parker, J.C., 1989. An efficient finite element method for modeling multiphase flow in porous media. *Water Resources Research*, 25: 43-54.

- Kresic, N., 2007. Hydrogeology and groundwater modeling, 2ed. CRC Press. 830pp.
- Kuppusamy, T., Sheng, J., Parker, J.C., Lenhard, R.J., et al., 1987. Finite element analysis of multiphase immiscible flow through soils. *Water Resources Research*, 23: 625-631.
- Lenhard, R.J., Rayner, J.L., Davis, G.B., et al., 2017. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology*, 205: 1-11.
- Li, Y., A.B.C. Hilton., 2006. An algorithm for groundwater long-term monitoring spatial optimization by analogy to Ant Colony Optimization for TSP, in: *World Environmental and Water Resource Congress*, pp. 1-6.
- Lingireddy, S., 1998. Aquifer parameter estimation using genetic algorithms and neural networks, *Civil Eng. Environ. Syst.* 15: 125-144.
- Mirabbasi, R. and Rahnama, M.B., 2008. The impact of construction of Tangooye dam on the groundwater resources by simulation of Sirjan plain aquifer using Modflow software. *Iranian Water Research Journal*. 1(1):1-9.
- Mokhtari, H., Espahbod, H., 2009. The investigation of hydrodynamic parameters potentiality of the Varamin plain regarding the variation of salinity gradient. *Journal of Geoscience*. 4(2) 27-47.
- Nasimi, A, Mohammadi, Z., 2015. Evaluation of methods for determination of hydrodynamic coefficients of aquifer based on pumping test in Fars province, *Journal of Water and Soil Science*. 25 (2/4) 201-215.
- Pruess, K., Battistelli, A., 2005. TMVOC, A Numerical Simulator for Three-Phase Non-isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Variably Saturated Heterogeneous Media. Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3n95k4nm>
- Qin, X., Huang, G., Yu, H., et al., 2009a. Enhancing remediation of LNAPL recovery through a response-surface-based optimization approach. *Journal of Environmental Engineering*, 135: 999-1008.
- Qin, X.S., Huang, G.H., He, L., et al., 2009b. Simulation and optimization technologies for petroleum waste management and remediation process control. *Journal of Environmental Management*, 90: 54-76.
- Rajesh, M., Kashyap, D., Hari Prasad, K. S., 2010. Estimation of unconfined aquifer parameters by genetic algorithms”, *Hydrol. Sci. J*, 55: 403-413.
- Rohallahi, A., 2011. Estimation of hydrodynamic coefficients of free aquifers using genetic algorithm optimization method”, M.Sc. thesis, Faculty of Agriculture, Water Engineering Department, Birjand University.
- Samuel, M., Jha, M., 2003. Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique”, *J. Irrigat. Drain. Eng.* 129: 348-359.
- Sookhak Lari, K., Johnson, C.D., Rayner, J.L., Davis, G.B., et al., 2018. Field-scale multi-phase LNAPL remediation: Validating a new computational framework against sequential field pilot trials. *Journal of Hazardous Materials*, 345: 87-96.
- Sookhak Lari, K., Rayner, J. L., & Davis, G. B., et al., 2019. Toward optimizing LNAPL remediation. *Water Resources Research*, <https://doi.org/10.1029/2018WR023380>.
- Thorley, M., Callander, P., 2005. Christchurch city groundwater model”, *Environment Canterbury report*, U05/53. pp: 10.
- Yitbarek Baye, A., Razack, M., Ayenew, T., Zemedagegnehu E., 2013. Estimating transmissivity using empirical and geostatistical methods in the volcanic aquifers of Upper Awash Basin central Ethiopia”, *Environmental Earth Sciences*, 69 (6)1791-1802.