



Identification of Hydrocarbon-Contaminated Areas in Groundwater and Determination of Potential Leak Sources

Abdorreza Vaezihir¹, ✉ Zahra Mohammadi² Vahideh Naderi Yengejeh³ Mehri Tabarmayeh⁴

1. Professor in Hydrogeology, Department of Earth Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2. M.Sc. in Hydrogeology, Department of Earth Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3. M.Sc. in Hydrogeology, Department of Earth Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4. Postdoctoral Researcher in Hydrogeology, Department of Earth Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

✉ Corresponding Author: Vaezihir@yahoo.com

Received:
08 April 2025

Accepted:
19 August 2025

Published:
22 September 2025

Keywords:

Groundwater,
Hydrocarbon Pollution,
LNAPL,
Oil Compounds Leakage,
Pollution Plume.

Extended abstract

Introduction

Nowadays, due to industrial human activities, the contamination of water resources, particularly groundwater, by various types of pollutants has become one of the most significant environmental issues worldwide. The impacts of such contamination, especially in industrial areas, may gradually manifest and adversely affect human health, economic activities, and agriculture (Hassanzadeh, 2011). After being released into the subsurface, a portion of these pollutants is adsorbed by sediments, some remain in the unsaturated zone, and the remainder enters the groundwater, referred to as NAPLs (Non-Aqueous Phase Liquids). Groundwater contaminants are classified into two categories based on their density relative to water: LNAPLs (Light Non-Aqueous Phase Liquids) and DNAPLs (Dense Non-Aqueous Phase Liquids).

Among the most hazardous petroleum-related contaminants are the BTEX compounds (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes), which can infiltrate groundwater through various pathways. Considering the critical importance of assessing groundwater quality, extensive studies have been conducted worldwide, including in Iran, to evaluate groundwater quality and identify potential pollution sources.

Cite this article: Vaezihir, A., Mohammadi, Z., Naderi Yengejeh, V. & Tabarmayeh, M. (2025). Identification of Hydrocarbon-Contaminated Areas in Groundwater and Determination of Potential Leak Sources. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (1), 181-200. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.9197.1108>.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

For instance, Alden et al. (2023) investigated the challenges in assessing and remediating petroleum hydrocarbon-contaminated sites (PHCs), particularly in the presence of NAPLs. Vaezihir et al. (2019) studied the extent and origin of contamination in well No. 7 at the Shazand Petrochemical Complex. In their study, seven locations were selected for monitoring well drilling, and samples were collected from these wells for further analysis.

Materials and Methods

In the study area, to assess groundwater quality and identify petroleum-contaminated sites, the thickness of the LNAPL phase in each well was initially measured using an Oil-Water Interface Meter. Subsequently, groundwater sampling was conducted in the existing monitoring wells in the area (65 wells), as well as in six agricultural wells and a rural drinking water well located near the refinery, over four sampling campaigns from September 2022 to November 2023. Groundwater samples were collected in 120 mL glass bottles and stabilized by the addition of sodium azide (NaN_3). The bottle caps were sealed with PTFE tape, and the samples were immediately transported to the laboratory at 4 °C, following the procedures outlined in APHA (2017) standards.

Results and Discussion

By evaluating the contamination status across the refinery area, conducting field investigations, and examining the monitoring wells, three wells were identified as contaminated with insoluble LNAPLs. According to the analysis of samples collected in September 2022, 22 wells within the study area were found unsuitable for drinking purposes based on EPA standards.

Based on petroleum sample analyses, comparison of fingerprint profiles, calculation of the Xylenes to Ethylbenzene ratio (X/E), and consideration of the groundwater flow direction in the study area, the contaminated sites were classified into eight contamination plumes, and the source of leakage for each plume was determined (Table 1).

Another aspect addressed in this study was the evaluation of contamination in the rural drinking water and agricultural wells adjacent to the refinery. Initial sampling indicated no detectable hydrocarbon contamination in these wells. Due to the significance of this issue, a second round of sampling was conducted, which confirmed the absence of contamination in these wells as well.

Table 1: Identified pollution plumes in the study area and the source of contamination leaks

Type of Contaminant	Contaminant Concentration (PPb)	Contaminated Wells	Benzene Concentration at the source	Source	Plume Number
Benzene	717.7 1699	RB48 RB49	13788	Tank 2026	Plume Number 1
Benzene	75 900	RB61 RB62	1811.6	Samp sw62	Plume Number 2
Benzene	472 649	RB53 RB54	96538.5	Samp SW 54	Plume Number 3
Benzene	1275 989.8 587.3	RB75 RB122 RB124	1608.7	Tank 2080	Plume Number 4
Benzene	86 783	RB79 RB81	5711.2	Samp SW81	Plume Number 5
Benzene	480 150.8	RB13 RB8	1682.5	Samp SW2072A	Plume Number 6
Benzene	26778.3	RB41	26778	Samp SW2089	Plume Number 7
Benzene	11 218	RB22 RB23	-	Tank 2007, 2008, 2009	Plume Number 8

Conclusion

The findings of this study indicate that the groundwater in the refinery area is contaminated with petroleum compounds, particularly Benzene and LNAPLs. Although the rural drinking water and agricultural wells showed no signs of contamination, the proximity of some contaminated wells to the refinery boundary poses a potential threat to drinking water and agricultural resources in the future.

The investigations suggest that the primary source of contamination is associated with the refinery's OSW system (Oil Sewage Water transfer system). Furthermore, the Xylenes to Ethylbenzene ratio (X/E) can serve as a useful tracer indicator for identifying the contamination source. Immediate remediation of the OSW system and initiation of aquifer cleanup in critical areas are recommended to prevent further spread of contamination and mitigate associated environmental and social impacts.



شناسایی منشأ نشت آلودگی هیدروکربنی و ارزیابی تأثیر آن بر کیفیت آب زیرزمینی در نزدیکی یک پالایشگاه

عبدالرضا واعظی هیر^۱ | زهرا محمدی^۲ | وحیده نادری ینگجه^۳ | مهری تبرمایه^۴

۱. استاد هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲. کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳. کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۴. پژوهشگر پسا دکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Vaezihir@yahoo.com

چکیده

نشت ترکیبات نفتی و هیدروکربنی از واحدهای صنعتی پالایشگاهی می‌تواند منابع آب زیرزمینی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی میزان آلودگی، منشأ نشت و تأثیر احتمالی آن بر کیفیت آب شرب روستای مجاور یکی از پالایشگاه‌های کشور انجام شد. نمونه‌برداری از چاه‌های پایش در محدوده پالایشگاه، تأسیسات پخش و خطوط لوله، و همچنین چاه‌های کشاورزی روستا صورت گرفت. به کمک دستگاه نفت‌سنج، پارامترهایی مانند ضخامت آلودگی با ترکیبات نفتی سبک (LNAPL) و سطح ایستابی در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری گردید. علاوه بر این، نمونه‌برداری از چاه‌ها در چهار مرحله انجام شد و نمونه‌ها برای آنالیز نفتی مورد بررسی قرار گرفتند؛ در نتیجه، مقادیر ترکیبات نفتی محلول در آب زیرزمینی، از جمله بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن جهت بررسی و مطالعه تعیین شدند. نتایج نشان داد چاه‌های شرب و کشاورزی روستا فاقد آلودگی هیدروکربنی‌اند، اما در محدوده پالایشگاه، سه چاه دارای آلودگی LNAPL و ۲۲ چاه دیگر دارای بنزن محلول بودند. بیشترین ضخامت LNAPL به میزان یک متر در چاه RB41 و بالاترین غلظت بنزن برابر با ۱۷۰۰ میکروگرم بر لیتر در چاه RB49 شناسایی شد. بیشترین آلودگی در بخش شمال‌غربی پالایشگاه متمرکز بوده و منشأ ۵ مورد از ۸ ابرآلودگی، سامپ‌های مرتبط با سیستم انتقال پساب صنعتی شناسایی گردید. بر این اساس، نقص در سیستم انتقال پساب (OSW) عامل اصلی نشت شناخته شد و اجرای اقدامات اصلاحی فوری در این سیستم جهت کاهش پیامدهای زیست‌محیطی ضروری است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی،
ابرآلودگی،
آلودگی هیدروکربنی،
LNAPL و نشت ترکیبات
نفتی.

مقدمه

امروزه با گسترش زندگی صنعتی، آلودگی منابع آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، توسط انواع آلاینده‌ها به یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی در سراسر جهان تبدیل شده است. آب‌های زیرزمینی که حدود ۳۰ درصد از ذخایر آب شیرین زمین را تشکیل می‌دهند، منبع اصلی آب آشامیدنی برای نزدیک به نیمی از جمعیت جهان و تأمین‌کننده حدود ۴۰ درصد از آب مورد نیاز بخش کشاورزی هستند (Mirzavand, 2025). این منابع به دلیل جریان آهسته و ویژگی‌های خاص هیدرودینامیکی خود، همراه با نفوذپذیری متغیر و زمان بازیابی طولانی، بیش از سایر منابع آب در معرض آلودگی قرار دارند. این مسئله در نواحی نیمه‌خشک و خشک، به دلیل بهره‌برداری‌های بیش از حد و فعالیت‌های انسانی به‌ویژه در سه دهه اخیر منجر به کاهش چشمگیر ذخیره و افت کیفیت آب‌های زیرزمینی شده است (Mehrabinejad, 2025). کاهش کیفیت آب زیرزمینی و آلودگی آن، به‌ویژه در مناطق صنعتی، اغلب به صورت تدریجی بروز می‌کند و می‌تواند سلامت انسان‌ها، فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی را به‌طور گسترده‌ای تحت تأثیر قرار دهد (Hassanzadeh, 2011). بنابراین، شناسایی، پاک‌سازی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی، خصوصاً در مناطق صنعتی که تحت فشار شدید فعالیت‌های انسانی‌اند، از اهمیت به سزایی برخوردار است.

آلاینده‌های نفتی یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی این منابع با ارزش هستند که پس از عبور از منطقه غیراشباع، با رسیدن به منطقه اشباع و آب زیرزمینی، با سرعت بیشتری توسط فرآیندهای انحلال، انتقال (همرفت)، انتشار و پراکنش گسترش می‌یابند و ابر آلودگی (plume) ایجاد شده می‌تواند منطقه وسیعی را آلوده سازد. آلودگی نفتی می‌تواند در طی مراحل اکتشاف، تولید، ذخیره، مصرف و انتقال وارد محیط شود. متداول‌ترین منابع

رها سازی کنترل نشده‌ی آلاینده‌های خطرناک در محیط‌های آبی شامل نشت از میادین نفتی، خطوط انتقال، رها شدن ناگهانی و اتفاقی به دلیل ترکیدن یا شکستن مخازن ذخیره مواد نفتی و خطوط انتقال، تصادف وسایل نقلیه و تانکرهای نفت کش، نشت از پمپ بنزین‌ها، لندفیل‌ها، شبکه‌های زهکشی شهری و همچنین ورود فاضلاب‌های آلوده به مواد نفتی است. بخشی از این آلاینده‌ها پس از نشت به زمین، توسط رسوبات جذب می‌شوند و بخشی هم در منطقه غیراشباع باقی می‌مانند و مابقی وارد سطح آب زیرزمینی می‌شوند که به آن‌ها NAPL گفته می‌شود. آلاینده‌هایی که به آب زیرزمینی رسیده باشند با توجه به چگالی آن‌ها نسبت به آب، به دو بخش LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquid) و DNAPL (Dense None Aqueous Phase Liquid) طبقه بندی می‌شوند.

از خطرناک‌ترین آلاینده‌های نفتی، ترکیبات BTEX (بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن‌ها) هستند و از راه‌های مختلف به آب زیرزمینی نفوذ پیدا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین این مسیرها، نشت از مخازن ذخیره‌سازی است که برای نگهداری سوخت‌ها و مواد شیمیایی به کار می‌روند. این مخازن به‌مرور زمان ممکن است دچار خوردگی و نشت شده و در نتیجه سوخت‌ها و مواد شیمیایی حاوی BTEX به خاک و سپس به آب‌های زیرزمینی نفوذ کنند.

باتوجه به اهمیت بالای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی، مطالعات گسترده‌ای در جهت ارزیابی کیفیت و تعیین منشأ آلودگی‌های احتمالی در ایران و جهان انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: روی و همکاران (Roy et al., 2016) از مدل عددی جهت پیش بینی رفتار متان در هنگام مهاجرت از یک چاه هیدروکربنی از کار افتاده نشتی به یک آبخوان کم‌عمق، استفاده کرده‌اند. این مطالعه در دو آبخوان محبوس و آبخوان آزاد انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان

مدل‌های مفهومی سایت، ارزیابی تکنولوژی‌های پاکسازی و نظارت بر عملکرد آنها دارد.

ناصری و همکاران (Naseri et al., 2011) جهت تعیین مناطق دارای آلودگی در آب زیرزمینی منطقه ری اقدام به نمونه برداری از ۳۳ منبع آب زیرزمینی و سنجش نمونه‌ها کرده‌اند. براساس نتایج حاصله بخش جنوبی محدوده مورد مطالعه در اثر مجاورت با حوضچه‌های تبخیر پالایشگاه حاوی غلظت بالایی از ترکیبات آروماتیک هستند و همچنین مخازن رو زمینی و زیرزمینی، مواد نفتی و شیمیایی و آب شویی خاک‌های سطحی نیز، از منابع آلودگی آب زیرزمینی می‌باشد که باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها شده است. کاهه و همکاران (Kaheh et al., 2022) طی مطالعه‌ای در محدوده ساری-نکا به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با هدف بررسی قابلیت استفاده در کشاورزی پرداخته است. در این پژوهش، ۶۵ نمونه آب چاه کشاورزی مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت و شاخص‌های کیفی همچون کلر، هدایت الکتریکی، pH و RSC بررسی شدند. نتایج نشان داد که بیش از ۹۰ درصد نمونه‌ها بر اساس شاخص ویلکوکس در کلاس‌های S2-C3 و S1-C3 قرار دارند. پورابراهیم و همکاران (Pour Ebrahim et al., 2018) در پژوهشی به بررسی تأثیر صنایع نفتی محدوده دشت شازند بر تغییرات مکانی کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک زمین آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداخته‌اند و روند تغییرات مکانی غلظت پارامترهای کیفی را بررسی کرده‌اند. همچنین واعظی هیر و همکاران (Vaezihir et al., 2019) در مطالعه‌ای میزان گسترش ابر آلودگی و منشأ آن را در چاه شماره ۷ پتروشیمی شازند مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به‌منظور نمونه برداری و انجام مطالعات، ۷ نقطه جهت حفاری چاه‌های پایش تعیین نموده و پس از حفاری چاه‌های پایش، نمونه برداری از آن‌ها صورت پذیرفته است. نتایج آنالیز نمونه‌های تهیه شده نشان داد

می‌دهند که با نرخ نشت یکسان، ستون متان در آبخوان آزاد وسعت کمتری دارد. هیلدنبرانند و همکاران (Hildenbrand et al., 2016) در مطالعه خود، کیفیت آب چاه‌ها را در منطقه‌ای با افزایش فعالیت‌های نفت و گاز غیرمتعارف در تگزاس طی ۱۳ ماه بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که برخی ترکیبات آب ثابت می‌مانند، اما ترکیباتی مانند کربن آلی، pH، اتانول و برومید تغییرات قابل توجهی داشتند. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های نفت و گاز غیرمتعارف بر کیفیت آب زیرزمینی می‌باشند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) در مطالعه‌ای با استفاده از روش‌های SOM-K-means و PCA، به بررسی شیمی آب زیرزمینی در منطقه یانان چین پرداختند که شامل سایت‌های نفتی و زمین‌های کشاورزی است. در این مطالعه چهار گروه آب زیرزمینی شناسایی شد: (۱) آلوده به نفت، (۲) کمی آلوده به نفت، (۳) کمترین آلودگی و (۴) آلوده به نیترات. آلودگی نفتی در دره رودخانه‌ای با بهره‌برداری طولانی‌مدت نفتی و آلودگی نیترات به‌علت فعالیت‌های کشاورزی شناسایی شد. در مطالعه دیگری آلدن و همکاران (Alden et al., 2023) چالش‌های موجود در ارزیابی و پاکسازی سایت‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، به‌ویژه (PHC) در حضور (NAPL)، را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که نشت NAPL ممکن است برای سال‌ها نادیده گرفته شود و پاکسازی آن زمان‌بر و پرهزینه باشد، همچنین برای ارزیابی شرایط زیرسطحی و شناسایی استراتژی پاکسازی مناسب، تحقیقات زیست‌محیطی ضروری است. این تحقیق روش‌های مختلف ارزیابی و پاکسازی را برای حل چالش‌های مرتبط با جریان چند فاز، تقسیم‌بندی NAPL، تجزیه‌زیستی، و کنترل‌های هیدروژئولوژیکی مورد بررسی قرار داده است و بیان می‌کند که موفقیت در پاکسازی بستگی به توسعه

انجام می‌شود. هدف این تحقیق، شناخت بیشتر وضعیت آبخوان و آلودگی آن و ارائه پیشنهادات لازم برای جلوگیری از تحمیل خطرات بیشتر بر روی آبخوان است.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی با مساحت ۶ کیلومتر مربع در محدوده یکی از پالایشگاه‌های کشور واقع شده است و بر اساس طبقه‌بندی دومارتن و سیلیانیف، به‌ترتیب دارای اقلیم مدیترانه‌ای فرا سرد و اقلیم نیمه خشک شدید است. همچنین، این منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، جزو مناطق معتدل خشک با تابستان‌های نسبتاً گرم و خشک و زمستان‌های یخبندان و بارش برف است. بر اساس گزارش هواشناسی سازمان هواشناسی (۲۰۱۸)، متوسط بارندگی سالانه بلندمدت منطقه (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶) برابر ۲۵۱/۴ میلی‌متر است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری توسط اشتوکلین (۱۹۶۸) منطقه مورد بررسی در پهنه ساندج - سیرجان جای دارد و آبخوان واقع در این دشت در واحد Qc قرار می‌گیرد. واحد Qc با مساحت ۱۸۷/۳ کیلومتر مربع دربرگیرنده بخش‌هایی است که هم‌اکنون به مناطق کشاورزی تبدیل شده‌اند. ضخامت آبرفت‌های قدیمی در این دشت حداقل ۵۰ متر و حداکثر تا ۱۰۰ متر می‌رسد و به‌صورت همگن عمده سنگ کف آبرفت‌های عهد حاضر با ضخامت متغیر بین ۱۰ تا ۱۲۰ متر را تشکیل می‌دهد. عمده این آبرفت‌ها در عمق و لایه‌های اشباع از عناصر دانه متوسط و دانه درشت همراه با درصد محدودی از سیلت تشکیل شده و دارای نفوذپذیری مناسبی برای تشکیل آبخوان می‌باشند.

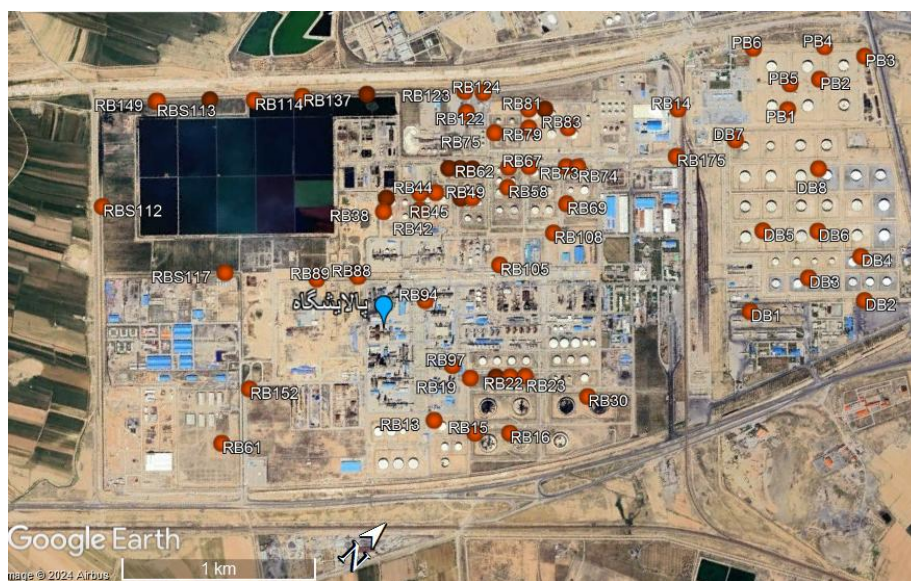
نمونه‌برداری و آنالیز

که آلودگی از نوع بنزین بوده و با بررسی جهت جریان در منطقه مورد مطالعه، نتیجه گرفتند که نشت از خط لوله ۱۲ اینچ ملایر-همدان می‌باشد. در پژوهش دیگری خدایی و همکاران (Khodaei et al., 2021) به بررسی منشأ آلودگی نفتی آب‌های زیرزمینی در محدوده صنعتی ری پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر این است که پنج هاله آلودگی اصلی در منطقه وجود دارد. برای شناسایی آلودگی، روش تقطیر برای فرآورده‌های نفتی یک‌نوعی و کروماتوگرافی گازی-جرمی برای آلودگی‌های ترکیبی و متعدد مناسب است. عمده منابع نشت شناسایی شده از خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی مدفون در زیرزمین بود. ناصری و همکاران (Naseri et al., 2024) طی مطالعه‌ای در جنوب شهر تهران با استفاده از روش آنالیز ایزوتوپی ویژه ترکیب (CSIA) و تکنیک‌های انگشت نگاری نفت، به شناسایی منابع آلودگی نفتی در آب‌های زیرزمینی و بررسی فرآیندهای میرایی طبیعی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان دادند که نشت‌های فعال از فرآورده‌های نفتی مانند بنزین معمولی، بنزین سوپر، دیزل و سوخت هوایی در مناطق مختلف وجود دارد و استفاده همزمان از تکنیک‌های CSIA و انگشت نگاری به‌همراه تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی برای شناسایی دقیق منبع آلودگی ضروری است، چرا که تنها اتکا به یک روش به‌تنهایی کافی نیست.

محدوده مطالعاتی در این پژوهش در مجاورت یکی از پالایشگاه‌های کشور قرار دارد، که در سال‌های اخیر ادعاهایی مبنی بر مشاهده آلودگی در چاه‌های آب شرب روستاهای نزدیک به این پالایشگاه مطرح شده است. لذا با توجه به اهمیت این موضوع و الزامات زیست‌محیطی، همچنین مسئله آب شرب روستایی که در معرض خطر قرار گرفته، این پژوهش به‌منظور شناسایی مناطق آلوده آبخوان در محدوده پالایشگاه و تعیین منابع نشت احتمالی، و همچنین تعیین نوع و غلظت ترکیبات آلاینده

به صورت هدفمند بر روی این چاه‌ها، مخازن مجاور و سامپ‌های اطراف آن‌ها متمرکز گردید تا منبع احتمالی نشت آلودگی شناسایی شود. همچنین، جهت افزایش دقت در شناسایی منشأ، کلیه نمونه‌برداری‌ها با در نظر گرفتن جهت جریان آب زیرزمینی منطقه اجرا شد. نمونه‌های آب زیرزمینی در ظروف شیشه‌ای با حجم ۱۲۰ میلی‌لیتر جمع‌آوری شدند. به منظور جلوگیری از رشد میکروبی و تجزیه ترکیبات آلی فرار، به هر نمونه مقدار مشخصی سدیم آزاید (NaN_3) افزوده شد. پس از آن، دهانه ظروف با نوار تفلون آب‌بندی گردید تا از تبخیر یا آلودگی ثانویه جلوگیری شود. نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت، در دمای پایین (تقریباً ۴ درجه سلسیوس) نگهداری و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه منتقل شدند. این فرآیند مطابق با دستورالعمل‌های ارائه‌شده در استاندارد (APHA, 2017) انجام گرفت.

در محدوده مورد مطالعه به منظور ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و شناسایی نقاط آلوده به مواد نفتی در ابتدا با استفاده از دستگاه Oil water interface meter (مدل H.OIL؛ کشور سازنده کانادا) که دارای دقت ۱ میلی‌متر است، عمق سطح ایستابی و ضخامت فاز LNAPL در هر کدام از چاه‌ها اندازه‌گیری گردید و سپس، از چاه‌های پایش موجود در محدوده پالایشگاه، شرکت پخش و خط لوله انتقال نفت (مجموعاً ۶۵ حلقه چاه) و همچنین شش حلقه چاه کشاورزی و چاه آب شرب روستایی که در نزدیکی این پالایشگاه واقع شده است، طی چهار مرحله از شهریور ۱۴۰۱ تا آبان ۱۴۰۲ نمونه برداری جهت بررسی آلودگی نفتی صورت گرفت (شکل ۱). نمونه‌برداری اولیه از کلیه چاه‌های پایش موجود در منطقه انجام شد تا تصویر جامعی از وضعیت آلودگی به دست آید. در مراحل بعدی، با شناسایی چاه‌های آلوده به مواد نفتی، فرآیند نمونه‌برداری



شکل ۱. موقعیت چاه‌های پایش در منطقه مورد مطالعه

Fig 1. The Location of Monitoring Wells in The Study Area

ابتدا، ۲۰ سی‌سی از نمونه آب جمع‌آوری شده با استفاده از پیپت مدرج برداشته و به ظرف مخصوص سپتومدار از جنس استیل ضد زنگ منتقل شد. سپس، ۱ گرم سدیم کلرید و ۱ سی‌سی از حلال دی‌کلرومتان به محلول آبی

در آزمایشگاه برای استخراج کامل و دقیق ترکیبات نفتی موجود در نمونه‌های آب، از حلال دی‌کلرومتان (CH_2Cl_2) استفاده شد. مراحل آنالیز با دستگاه کروماتوگرافی / طیف‌سنجی جرمی (GC/MS) به شرح زیر انجام گردید:

سانتی‌گراد انتقال یافت. در نهایت، حجم یک میکرولیتر از محلول استخراج‌شده به‌منظور اندازه‌گیری‌های مواد نفتی به دستگاه GC/MS تزریق گردید. نتایج حاصل از آنالیز نمونه برداری صورت گرفته در شهریور ماه ۱۴۰۱، در جدول (۱) ارائه شده است. روش استخراج و آنالیز ترکیبات نفتی در این مطالعه بر اساس اصول و مراحل کلی مندرج در EPA Method 625.1 طراحی و اجرا شده است (EPA, 2016).

اضافه گردید. مخلوط حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی هم زده شد و پس از آن، برای ۱۰ دقیقه در یک محیط تاریک و خنک قرار گرفت. در این مرحله، محلول تحت سانتریفیوژ قرار گرفت و با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۴ دقیقه چرخانده شد. فاز آلی استخراج شده، که محلول زیرین سانتریفیوژ می‌باشد، به‌کمک پیپت پاستور به ویال‌های کوچک شیشه‌ای ویژه کروماتوگرافی منتقل شد. سپس، این محلول استخراج‌شده پس از حذف آب به‌کمک نمک سولفات سدیم به دمای منفی ۱۸ درجه

جدول ۱. نتایج آنالیز نمونه‌های آب زیرزمینی برای تعیین غلظت مواد نفتی (شهریور ۱۴۰۱)

Table 1. Results of groundwater sample analysis to determine petroleum concentration (September 2022)

نام نمونه Sample name	بنزن Benzene	تولون Toluene	زایلن‌ها Xylenes	اتیل بنزن Ethylbenzene	تری متیل بنزن Trimethylbenzene	MTBE	PAHs	هیدروکربن‌های زنجیر خطی Aliphatic hydrocarbons	
								TPHs	
RB14	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB16	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB30	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB45	67.5	32.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB124	587.3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB19	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB40	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB42	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB38	1	ND	4.3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB58	46	20.5	77	46.1	ND	ND	ND	ND	ND
RB61	75	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB62	900	82	40	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB67	2.3	ND	6.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB69	0.8	ND	8.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB73	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB74	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB97	1.82	ND	18.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB105	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB79	86	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB81	783	11.7	13.3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB82	2.45	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB83	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB88	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB108	21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

RB114	95	ND	203.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB122	989.8	11.3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB123	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB137	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB138	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB149	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB150	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.14	ND	ND
RB152	ND	ND	ND	ND	ND	ND	11.25	ND	11.25
RB175	4.1	ND	ND	ND	ND	ND	11.75	ND	11.75
RB94	26.3	104	73	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB89	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.4	ND	1.4
RB75	1275	198	31	7	ND	ND	ND	ND	ND
RB54	649	320	141	57	ND	ND	ND	ND	ND
RB53	472	318	301.2	127	ND	ND	ND	ND	ND
RB52	294.2	499	2105.6	1376	ND	ND	ND	ND	ND
RB49	1699	3068	634	133	ND	ND	ND	ND	ND
RB48	717.7	692	447	94.3	47.5	ND	ND	ND	ND
RB44	21	0.3	7.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB23	218	129.5	130	22	ND	ND	ND	ND	ND
RB22	11	ND	12.7	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB13	480	45	40	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB8	150	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB11	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB3	ND	ND	22	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PB6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB1	3.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
DB7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
W6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
WSH	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

TPHs= Total petroleum hydrocarbon, ND=not detect 1µg/Li=1ppb=0.001ppm

نتایج و بحث

پایش سطح ایستابی و بررسی تغییرات LNAPL

به منظور ارزیابی سطح ایستابی، عمق آب زیرزمینی در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا آبان ۱۴۰۲ طی ۸ مرحله در چاه‌های پایش محدوده پالایشگاه، شرکت پخش و خط لوله با استفاده از دستگاه Oil Water Interface Meter

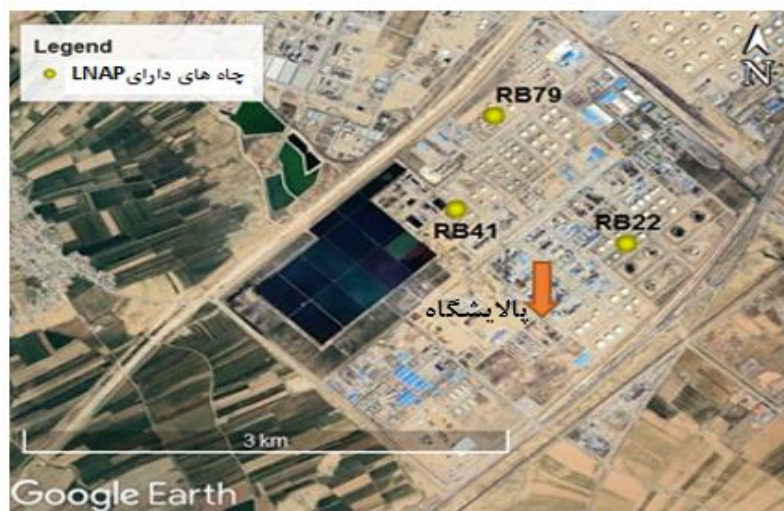
اندازه گیری شده است. باتوجه به مطالعات انجام شده در منطقه مورد مطالعه، سه حلقه چاه در محدوده پالایشگاه با آلودگی از نوع LNAPL شناسایی شده است (شکل ۲). ضخامت LNAPL در چاه RB41 یک متر و در چاه‌های RB79 و RB22 به ترتیب ۵ و ۸ سانتی‌متر اندازه گیری شده است (جدول ۲).

جدول ۲. میزان ضخامت Lnapl در چاه‌های Rb22,79,41
Table 2. Lnapl Thickness in Wells Rb22, 79, 41

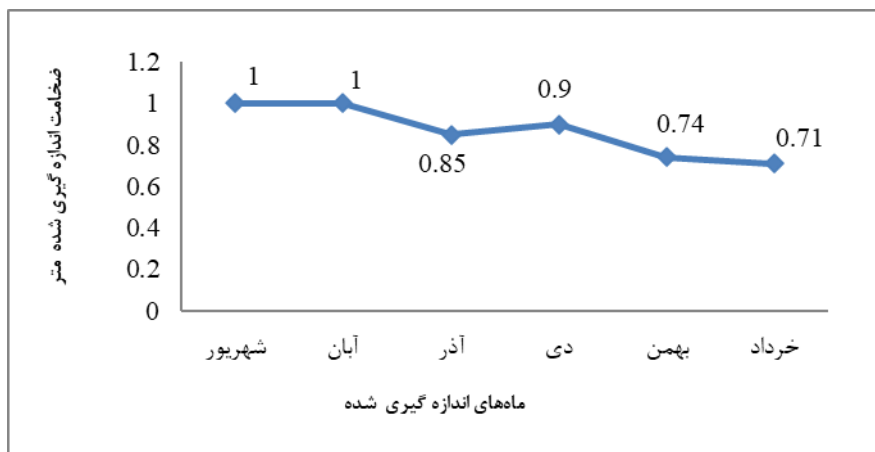
نام چاه Well Number	فاز Lnapl Lnapl Phase	شماره ابرآلودگی Plume Number
Rb 41	100 Cm	7
Rb 79	5 Cm	5
Rb 22	8 Cm	9

سطح آزاد آب مشاهده شده و در نتیجه، ضخامت LNAPL افزایش یافته است. لازم به ذکر است به دلیل مشکل فنی پیش آمده در این چاه، اندازه گیری سطح تراز یا نمونه برداری از این چاه بعد از خرداد ماه سال ۱۴۰۲ میسر نشد.

شکل ۳، نوسانات ضخامت LNAPL را در چاه RB41 نشان می‌دهد، کاهش ضخامت LNAPL می‌تواند ناشی از افزایش بارندگی‌های فصلی و در نتیجه بالا آمدن سطح آب زیرزمینی باشد که منجر به جابه‌جایی یا پراکندگی لایه‌ی آلاینده در محیط متخلخل می‌گردد. در دی ماه با کاهش بارش و افت سطح آب زیرزمینی، مجدداً تجمع آلاینده در



شکل ۲. موقعیت چاه‌های دارای LNAPL
Figure 2. Location of Wells With LNAPL



شکل ۳. ضخامت LNAPL در چاه RB41 از شهریور ۱۴۰۱ تا خرداد ۱۴۰۲

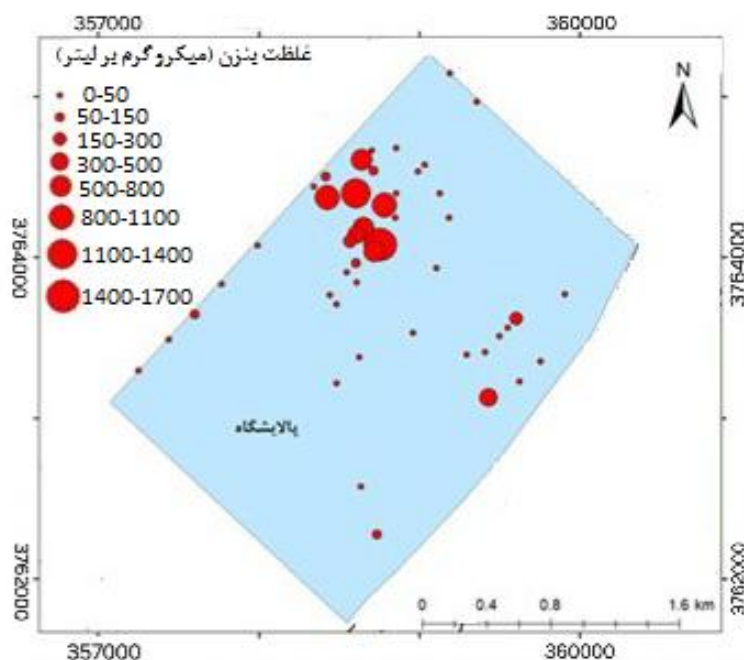
Figure 3. LNAPL Thickness in Well RB41 From September 2022 to June 2023

این‌رو، برای مصارف شرب نامناسب تلقی می‌شوند. بیشترین غلظت بنزن در چاه RB49 اندازه‌گیری شده است که برابر با ۱۷۰۰ میکروگرم بر لیتر می‌باشد. در محدوده مورد مطالعه در حدود ۳۰ درصد از کل چاه‌های پایش آلوده به بنزن شناسایی شده‌اند. همچنین، غلظت تولوئن نیز فقط در همین چاه (RB49) از حد مجاز ۱۰۰۰ میکروگرم بر لیتر فراتر رفته و مقدار آن برابر با ۳۰۶۸ میکروگرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. تمام نمونه‌ها از نظر غلظت اتیل‌بنزن برای مصارف کشاورزی و شرب مناسب بوده‌اند، به جز چاه RB52 که غلظت اتیل‌بنزن در آن برابر با ۱۳۷۶ میکروگرم بر لیتر بوده و از حد مجاز شرب یعنی ۷۰۰ میکروگرم بر لیتر بیشتر است. همچنین نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها نشان داد که هیچ‌کدام از چاه‌های مورد بررسی دارای غلظت زایلین بالاتر از حد مجاز استاندارد EPA برای آب شرب، یعنی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر (۱۰,۰۰۰ میکروگرم بر لیتر) نبوده‌اند (EPA, 1991). همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان آلودگی بنزن مربوط به چاه‌های واقع در بخش شمال‌غربی پالایشگاه است، که نشان‌دهنده تمرکز قابل‌توجه آلاینده در این ناحیه می‌باشد.

وجود فاز آزاد نفتی سبک (LNAPL) به ضخامت حدود یک متر در چاه RB41، نشان‌دهنده آن است که این چاه در مجاورت یک منبع فعال یا باقی‌مانده از آلودگی قرار دارد. حتی در شرایطی که نشت اولیه متوقف شده باشد، فاز آزاد نفتی باقی‌مانده، می‌تواند از طریق فرآیند انحلال (dissolution) به‌مرور ترکیبات آلی فرار را وارد فاز آبی کرده و به گسترش پلوم آلودگی کمک کند (Parker et al., 2018). LNAPL در تماس با آب زیرزمینی به‌صورت یک منبع ثانویه عمل می‌کند و با آزادسازی تدریجی ترکیبات محلول مانند بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلین‌ها (BTEX)، باعث تداوم آلودگی در آبخوان می‌شود. این پدیده که به آن ماندگاری ناحیه منبع (source zone longevity) گفته می‌شود، یکی از دلایل اصلی پایداری آلودگی در آبخوان‌ها حتی سال‌ها پس از نشت اولیه است (Roy and Smith, 1994).

بررسی کیفی نمونه‌ها برای مصارف مختلف

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز نمونه‌های برداشت‌شده در شهریور ۱۴۰۱، تعداد ۲۲ حلقه چاه در محدوده مطالعاتی دارای غلظت بنزن بالاتر از حد مجاز تعیین‌شده توسط EPA (۵ میکروگرم بر لیتر) بوده‌اند و از



شکل ۴. پراکندگی غلظت بنزن در چاه‌های نمونه برداری شده (میکروگرم بر لیتر)

Figure 4. Benzene Concentration Distribution in Sampled Wells (Micrograms Per Liter)

تعیین منشأ و ابرهای آلودگی

از آنجا که گسترش آلودگی‌های نفتی در آبخوان به صورت ابر آلودگی (Plume) می‌باشد، با تعویق پاکسازی آلودگی‌ها ممکن است به نواحی گسترده‌تری پراکنده شوند و میزان غلظت آلودگی افزایش یابد و در نهایت باعث بروز مشکلات جدی بهداشتی و زیست‌محیطی شود. با توجه به اهمیت این مسئله در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی و رسم منحنی‌های هم میزان، جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه مشخص گردید. با در نظر گرفتن جهت جریان عمومی آب زیرزمینی (که از سمت مناطق صنعتی به طرف روستا می‌باشد)، خصوصیات هیدرولیکی آبخوان و بررسی نتایج آنالیز نمونه‌ها، ابرهای آلودگی شناسایی شده و در شکل ۵ ارائه گردیده است. پس از تعیین ابرهای آلودگی، با توجه به اینکه تطابق ترکیبات شاخص چاه‌ها، همخوانی کروماتوگرام (Fingerprint) حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی، و محاسبه نسبت زایلن به اتیل‌بنزن (X/E) از جمله پارامترهای کلیدی در شناسایی ابرهای آلودگی و منشأ نشت آن‌ها می‌باشد، فرآیند شناسایی و تعیین منشأ

ابرهای آلودگی با استفاده از این پارامترها آغاز گردید. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها اطلاعات مهمی را ارائه می‌دهد، به طوریکه شباهت نسبت X/E بین دو نمونه، می‌تواند نشان‌دهنده منبع آلودگی مشترک برای آن‌ها باشد (Mackay and Shiu, 2006). شاخص مورد استفاده دیگر جهت تعیین ابرهای آلودگی و منشأ نشت آن‌ها، مقایسه Finger Print نمونه‌ها می‌باشد. فینگرپرینت هیدروکربنی به ترکیب شیمیایی خاص و ویژگی‌های ایزوتوپی هیدروکربن‌ها در نمونه‌های آبی یا نفتی گفته می‌شود که برای شناسایی منابع آلودگی استفاده می‌شود (Schwarzenbach et al., ۲۰۱۶). براساس نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه‌های نفتی، مقایسه Finger Print نمونه‌ها، محاسبه نسبت زایلن به اتیل‌بنزن (X/E) و در نظر گرفتن جهت جریان در منطقه مورد مطالعه، نقاط آلوده شناسایی شده، در قالب ۸ ابر آلودگی تقسیم بندی شده است (شکل ۵)، که هر کدام به تفصیل در ادامه شرح داده شده و خلاصه‌ای از مشخصات آن‌ها در جدول ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۵. ابرهای آلودگی شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه

Figure 5. Identified pollution plumes in the study area

عدد ۳/۸ است که قرابت این نسبت‌ها وجه اشتراک مهم دیگری است که می‌تواند نشان دهنده این باشد که به احتمال زیاد مخزن ۲۰۲۶ منشأ آلودگی پلوم شماره ۱ می‌باشد.

ابر آلودگی شماره ۲ (شامل چاه‌های 61, RB62)

این دو چاه با عدم وجود تولوئن، زایلن و اتیل بنزن به صورت مشترک در ترکیبات شاخص و همچنین محاسبه‌ی عدد یکسان ۴۰ حاصل از فرمول (X/E) ابر آلودگی شماره ۲ را تشکیل می‌دهند. برای این ابر آلودگی دو منشأ احتمالی نشت یعنی مخزن ۲۰۳۴ و سامپ SW62 در نظر گرفته شده است. این پلوم در ترکیبات شاخص خود دارای مقدار قابل توجهی بنزن است که با مقایسه نزدیک‌ترین مخزن به این پلوم یعنی تانک ۲۰۳۴ هیچ‌گونه بنزی در ترکیبات شاخص این مخزن شناسایی نشده است، همچنین با مقایسه نسبت X/E عدد ۳/۹ برای مخزن به‌دست آمد که با عدد به‌دست آمده برای پلوم

ابر آلودگی شماره ۱ (شامل چاه‌های 49, RB48)

با مقایسه نتایج آنالیز حاصل از نمونه برداری انجام یافته از دو چاه RB48, RB49، قرابت بالایی بین ترکیبات شاخص آن‌ها (ترکیبات BTEX) مشاهده شد که غلظت هر چهار پارامتر بنزن، تولوئن، زایلن و اتیل بنزن دارای نزدیکی قابل توجهی در این دو چاه هستند. با محاسبه نسبت زایلن به اتیل بنزن (X/E) عدد یکسان ۴/۷ برای هر دو چاه به‌دست آمده است که نشان دهنده هم منشأ بودن دو آلودگی بوده و ابر آلودگی شماره ۱ را تشکیل می‌دهند. برای تعیین منشأ نشت این ابر آلودگی ۲ فرض مطرح است. فرض اول بر این اساس است که مخزن ۲۰۲۶ منشأ آلودگی پلوم شماره ۱ باشد. دو چاه RB48 و RB49 در لیست ترکیبات شاخص خود دارای مقدار قابل توجهی بنزن، اتیل بنزن و زایلن هستند که این ترکیبات با مخزن ۲۰۲۶ متناسب است. همچنین داشتن اتیل بنزن با غلظت کمتر وجه اشتراک مهمی محسوب می‌شود. نسبت X/E محاسبه شده برای این پلوم عدد ۴/۷ و برای مخزن ۲۰۲۶

ابر آلودگی شماره ۴ (شامل چاه‌های RB75, RB122, RB124)

سه چاه RB75, RB122, RB124 دارای قرابت نزدیک در ترکیبات شاخص (BTEX) هستند. میزان بنزن در این سه چاه تقریباً برابر است و یک وجه اشتراک مهم نداشتن اتیل بنزن در هر سه مورد از این چاه‌های ذکر شده است؛ همچنین به دلیل نداشتن اتیل بنزن در ترکیبات این ۳ چاه امکان محاسبه‌ی نسبت (X/E) وجود نداشت. فرض اول برای شناسایی منشأ نشت آلودگی این پلوم سامپ sw75 در نظر گرفته شده است، عدم وجود زایلن، اتیل بنزن و تولوئن در ترکیبات شاخص پلوم آلودگی شماره ۴ مغایر با میزان غلظت همین پارامترها در سامپ است به طوریکه سامپ دارای مقادیر قابل توجهی از زایلن، اتیل بنزن و تولوئن می‌باشد، از این رو سامپ sw75 نمی‌تواند منشأ نشت این پلوم تعیین گردد. فرض دوم مخزن ۲۰۸۰ در نظر گرفته شده است. با مقایسه پارامترهای زایلن، اتیل بنزن و تولوئن در لیست ترکیبات شاخص مخزن ۲۰۸۰ می‌توان نتیجه گرفت غلظت این پارامترها با پلوم آلودگی شماره ۴ دارای تناسب است. در نتیجه به احتمال زیاد مخزن ۲۰۸۰ می‌تواند منشأ آلودگی پلوم شماره ۴ باشد.

ابر آلودگی شماره ۵ (شامل چاه‌های RB79, RB81)

این دو چاه در نداشتن مقادیر تولوئن، زایلن و اتیل بنزن در لیست ترکیبات شاخص خود، وجه اشتراک دارند؛ همچنین مقادیر بنزن نزدیک به هم در این دو چاه پایش حائز اهمیت است. برای تعیین منشأ نشت این ابر آلودگی نیز دو فرض مطرح شده است. فرض اول بر این اساس است که مخزن 2059C و 2059D منشأ آلودگی پلوم شماره ۵ باشد. در لیست ترکیبات شاخص این پلوم پارامترهای تولوئن، زایلن و اتیل بنزن شناسایی نشده است اما این پارامترها به‌وفور در ترکیبات شاخص مربوط به این مخازن شناسایی شده است. از این رو این مخازن

(۴۰) فاصله زیادی دارد. از این رو مخزن ۲۰۳۴ نمی‌تواند منشأ آلودگی این پلوم در نظر گرفته شود. نزدیک‌ترین سامپ به این پلوم sw62 است که با مقایسه ترکیبات شاخص بین این سامپ با پلوم شماره ۲ تناسب بیشتری در میزان بنزن یافت شد علاوه بر این نسبت X/E برای این سامپ عدد ۳۵/۱ است که همین نسبت با عدد اندازه‌گیری شده برای پلوم (۴۰)، قرابت بالایی را نشان می‌دهد که صحت این فرضیه را تایید می‌کند.

ابر آلودگی شماره ۳ (شامل چاه‌های RB53, RB54)

شباهت زیادی بین ترکیبات شاخص این دو چاه مشاهده گردید به طوریکه هر دو چاه تقریباً دارای مقادیر یکسانی از چهار پارامتر BTEX بوده و با استفاده از فرمول (X/E) نسبت این عدد برای RB53 برابر با ۲/۳ و برای RB54 این عدد ۲/۴ محاسبه شد که قرابت انکارناپذیری را نشان می‌دهد. بنابراین این دو چاه با هم ابر آلودگی شماره ۳ را تشکیل می‌دهند. برای این پلوم نیز دو منشأ نشت احتمالی مورد بررسی قرار گرفته است، مخزن ۲۰۳۱ و سامپ SW 54. در ترکیبات شاخص این پلوم آلودگی مقدار قابل توجهی بنزن وجود دارد که دارای عدم همخوانی با ترکیبات نزدیک‌ترین مخزن یعنی ۲۰۳۱ است. این مخزن دارای ترکیبات REG.GASOLIN می‌باشد که فاقد بنزن است، بنابراین این فرضیه را به‌طور قطعی رد می‌کند. با محاسبه نسبت X/E برای مخزن ۲۰۳۱، عدد ۳/۷ محاسبه شد که با عدد محاسبه شده برای پلوم (۲/۴) دارای فاصله‌ی نسبی است. سامپ SW 54 در لیست ترکیبات شاخص خود دارای بنزن است که با ترکیبات پلوم شماره ۳ دارای همخوانی می‌باشد. همچنین نسبت X/E برای این سامپ عدد ۲/۷ محاسبه شده است که با عدد به‌دست برای پلوم (۲/۴) دارای همخوانی قابل توجهی است که می‌توان نتیجه گرفت به احتمال زیاد این سامپ می‌تواند منشأ آلودگی پلوم شماره ۳ باشد.

می‌شود. فرض چهارم بر این اساس تعریف شده است که سامپ‌های SW2072A, 2072B منشأ آلودگی پلوم شماره ۶ باشند. هر دوی این سامپ‌ها از نظر ترکیبات شاخص قرابت و هماهنگی زیادی با پلوم دارند به طوریکه غلظت بنزن شناسایی شده در پلوم آلودگی با این سامپ‌ها متناسب است که همین موضوع صحت این فرضیه را تایید می‌کند.

ابر آلودگی شماره ۷ (RB41)

چاه RB41 از نظر ضخامت LNAPL و همچنین آنالیز ترکیبات شاخص از آلوده‌ترین چاه‌های پایش پالایشگاه می‌باشد و به‌تنهایی ابر آلودگی شماره ۷ را تشکیل می‌دهد. سه فرض برای تعیین منشأ نشت آلودگی برای این پلوم مطرح شده است. در فرض اول سامپ S2088BN منشأ آلودگی پلوم شماره ۷ در نظر گرفته شده است. با توجه به‌شکل (۷ الف) که گراف مربوط به سامپ S2088BN را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود که عمده‌ی هیدروکربن‌هایی که در گراف Fingerprint قابل مشاهده است از نوع هیدروکربن‌های سنگین هستند درحالی‌که در گراف Fingerprint مربوط به چاه RB41 که در شکل (۶) آمده است، عمده‌ی هیدروکربن‌ها از نوع سبک هستند بنابراین احتمال اینکه منشأ آلودگی از سامپ S2088BN باشد بسیار ضعیف است. فرض دوم بر این اساس است که سامپ SW2089 منشأ آلودگی پلوم شماره ۷ باشد. با مقایسه ترکیبات شاخص این سامپ، هماهنگی قابل توجهی با ترکیبات پلوم مشاهده شد به طوریکه هر دوی آنها در عدم داشتن بنزن مشترک بودند همچنین با مقایسه‌ی گراف Fingerprint مربوط به سامپ SW2089 که در شکل (۷ ب) آمده است، می‌توان به وضوح هماهنگی بین این گراف با گراف مربوط به چاه RB41 را مشاهده نمود. به‌طوری‌که در هر دوی این گراف‌ها هیدروکربن‌ها از نوع سبک هستند و در لحظات اول ظاهر

نمی‌توانند منشأ نشت پلوم مورد مطالعه در نظر گرفته شوند. در فرض دوم سامپ SW81 منشأ آلودگی پلوم شماره ۵ در نظر گرفته شده است. میزان غلظت ترکیبات شاخص این سامپ با پلوم متناسب است به‌طوری‌که غلظت پارامترهای تولوئن، زایلن و اتیل بنزن در این سامپ، نسبت به مخازن، کمتر شناسایی شده است؛ همین طور غلظت بنزن نیز با پلوم شماره ۵ هماهنگ است که در ادامه این مورد با Overhaul و بازبینی مخازن بهتر مشخص می‌شود.

ابر آلودگی شماره ۶ (RB13, RB8)

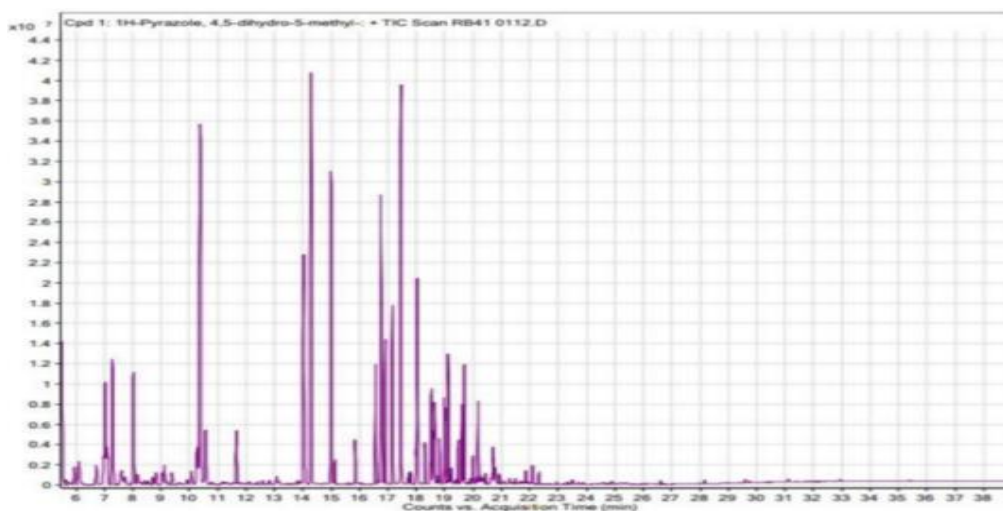
مقادیر تولوئن، زایلن و اتیل بنزن در این دو چاه تقریباً صفر ارزیابی شده و قرابت در میزان بنزن بین این دو مورد قابل توجه است از این رو دو چاه RB13, RB8 پلوم آلودگی شماره ۶ را تشکیل می‌دهند. فرض اول برای منشأ نشت این پلوم، مخزن 2073B در نظر گرفته شده است. این فرض به‌دلیل عدم مطابقت در میزان غلظت بنزن در ترکیبات شاخص مربوط به پلوم و مخزن رد می‌شود چراکه با توجه به نتایج آنالیز نمونه‌ی آب زیرزمینی مربوط به ابر آلودگی، غلظت بالایی از بنزن شناسایی شده است در حالی‌که در ترکیبات مخزن، بنزن شناسایی نشده است. فرض دوم بر این اساس است که مخزن 2075 منشأ آلودگی پلوم شماره ۶ باشد، با مقایسه میزان غلظت بنزن بین این مخزن و پلوم به نظر می‌رسد متناسب با هم هستند، ولی با مقایسه تولوئن، زایلن و اتیل بنزن در لیست ترکیبات پلوم و مخزن این فرضیه به‌طور قطع رد می‌شود به‌طوری‌که پلوم آلودگی در ترکیبات شاخص خود تولوئن، زایلن و اتیل بنزن ندارد ولی در مخزن این پارامترها با غلظت بالا حضور دارند. فرض سوم سامپ SW 13 را منشأ آلودگی پلوم شماره ۶ در نظر گرفته است. عدم وجود بنزن در ترکیبات شاخص سامپ ۱۳ مغایر با غلظت بنزن در پلوم است از این رو این فرضیه نیز رد

آنالیز آزمایشگاه می‌توان نتیجه گرفت این دو چاه مربوط به یک منشأ آلودگی هستند. این دو چاه در نزدیکی مخازن ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ قرار گرفته‌اند که هر سه این مخازن حاوی H.S.R.G می‌باشند. چاه RB22 دارای آلودگی از نوع LNAPL نیز می‌باشد که نمونه تهیه شده از فاز LNAPL این چاه، از نظر ویژگی‌های ظاهری و بو قرابت بالایی با محتویات مخازن هم‌جوار دارد که می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که آلودگی این پلوم از مخازن ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ سرچشمه گرفته است.

شده‌اند. برای اطمینان بیشتر نسبت X/E نیز محاسبه شد که عدد ۲/۶ برای سامپ و عدد ۳ برای چاه به‌دست آمد که همین مورد صحت این فرضیه را تقویت کرده است.

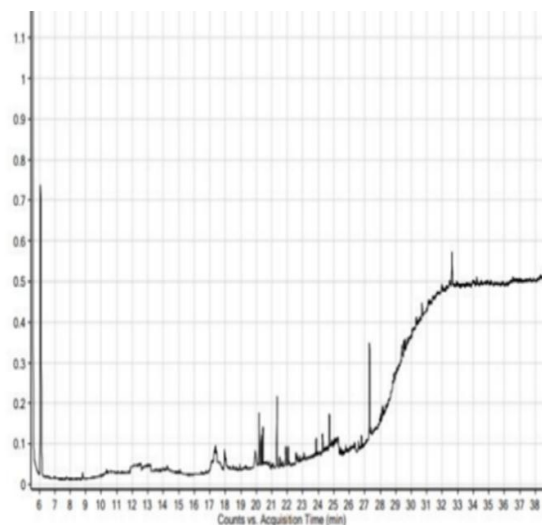
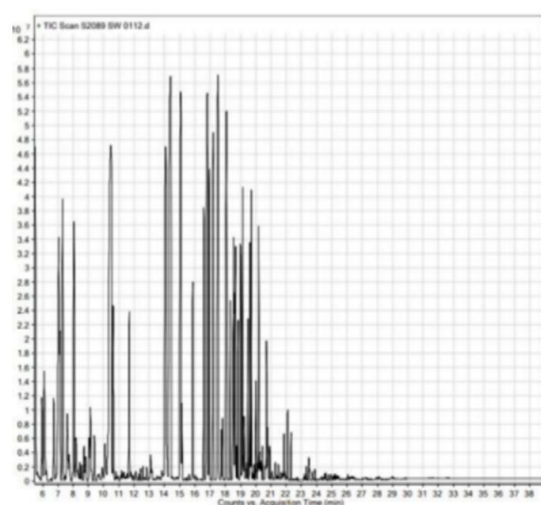
ابر آلودگی شماره ۸ (RB23, RB22)

بر اساس آخرین نتایج از نمونه برداری انجام شده از آب زیرزمینی مربوط به چاه RB22 و RB23، این دو چاه از نظر ترکیبات شاخص نفتی مشابه هستند به‌طوری‌که در هیچ‌کدام از آنها اتیل بنزن شناسایی نشده است و با مقایسه غلظت ترکیبات شاخص به‌دست آمده از نتایج



شکل ۶. گراف Fingerprint مربوط به چاه ۴۱ RB

Fig 6. Fingerprint Graph For Well RB41



شکل ۷. گراف Fingerprint مربوط به سامپ الف) S2088BN ب) S2089

Fig 7. Fingerprint Graph For Sump a) S2088BN and b) S2089

جدول ۳. ابرهای آلودگی شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه و منشأ نشت آلودگی

Table 3. Identified Pollution Plumes in The Study Area and The Source of Contamination Leaks

غلظت بنزن در منشأ Benzene Concentration At The Source	منشأ نشت Source	نوع آلودگی Type Of Contaminant	غلظت آلودگی (Ppb) Contaminant Concentration (Ppb)	چاه‌های آلوده Contaminated Wells	شماره پلوم Plume Number
13788	مخزن TK 2026 Tank 2026	بنزن Benzene	717.7 1699	RB48 RB49	ابر آلودگی شماره ۱ Plume Number 1
1811.6	سامپ Sw62 Samp Sw62	بنزن Benzene	75 900	RB61 RB62	ابر آلودگی شماره ۲ Plume Number 2
96538.5	سامپ Sw54 Samp Sw 54	بنزن Benzene	472 649	RB53 RB54	ابر آلودگی شماره ۳ Plume Number 3
1608.7	مخزن TK2080 Tank 2080	بنزن Benzene	1275 989.8 587.3	RB75 RB122 RB124	ابر آلودگی شماره ۴ Plume Number 4
5711.2	سامپ SW81 Samp SW81	بنزن Benzene	86 783	RB79 RB81	ابر آلودگی شماره ۵ Plume Number 5
1682.5	سامپ SW2072A Samp SW2072A	بنزن Benzene	480 150.8	RB13 RB8	ابر آلودگی شماره ۶ Plume Number 6
26778	سامپ SW2089 Samp SW2089	بنزن Benzene	26778.3	RB41	ابر آلودگی شماره ۷ Plume Number 7
-	مخازن 2008.2007 2009 Tank 2008.2007 2009	بنزن Benzene	11 218	RB22 RB23	ابر آلودگی شماره ۸ Plume Number 8

برداری به‌گونه‌ای صورت گرفته که این چاه‌ها در نزدیک‌ترین فاصله به بخش صنعتی (پالایشگاه و پتروشیمی) قرار داشته باشند (شکل ۸).

بررسی آلودگی چاه‌های روستای نزدیک پالایشگاه
به‌منظور بررسی آلودگی چاه‌های موجود در روستایی که در نزدیکی این پالایشگاه واقع شده است، ۷ نمونه جهت آنالیز مواد هیدروکربنی تهیه گردید. انتخاب چاه‌های نمونه



شکل ۸. موقعیت چاه‌های کشاورزی آب شرب روستای واقع در نزدیکی پالایشگاه

Fig 8. Location of Agricultural and Drinking Water Wells in The Village Located in The Refinery

هیدروژئولوژیکی، امکان تحلیل دقیق‌تر و اطمینان بالاتری را در شناسایی منشأ نشت آلاینده‌ها فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده‌ی آلودگی قابل توجه آب زیرزمینی در محدوده‌ی پالایشگاه به ترکیبات نفتی، به‌ویژه بنزن و LNAPL است. شناسایی حدود ۳۰ درصد از چاه‌ها آلوده به بنزن و حدود ۵ درصد آلوده به LNAPL در قالب هشت ابر آلودگی، بیانگر گستردگی و شدت این آلودگی‌هاست. اگرچه در نمونه‌برداری از نزدیک‌ترین روستا و چاه‌های کشاورزی مجاور اثری از آلودگی نفتی مشاهده نشد، اما نزدیکی برخی چاه‌های آلوده به مرز پالایشگاه، تهدیدی برای منابع آب شرب و کشاورزی در آینده به‌شمار می‌رود. بررسی‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد که منشأ حدود ۶۰ درصد از آلودگی‌ها به سیستم OSW پالایشگاه و سامپ‌های مرتبط به آن بازمی‌گردد، که حاکی از ضعف در طراحی یا نگهداری زیرساخت‌های دفع پساب است. همچنین شناسایی نسبت زایلن به اتیل‌بنزن به‌عنوان شاخصی مؤثر برای ردیابی منشأ آلودگی، می‌تواند در پایش‌های آتی و تعیین منشأ آلودگی‌ها به کار گرفته شود. بر این اساس، اصلاح فوری سیستم OSW با اولویت نواحی آلوده و همچنین آغاز پاکسازی آبخوان از بخش شمال‌غربی پالایشگاه به‌عنوان نقطه‌ی بحرانی توصیه می‌شود. عدم مداخله به‌موقع، می‌تواند منجر به گسترش آلودگی به مناطق خارج از پالایشگاه و بروز تنش‌های اجتماعی و زیست‌محیطی گردد.

منابع

Alden, D. F., García-Rincón, J., Rivett, M. O., Wealthall, G. P., & Thomson, N. R. (2023). Complexities of petroleum hydrocarbon contaminated sites. In *Advances in the characterisation and remediation of sites contaminated with petroleum hydrocarbons* (pp. 1–20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34447-3_1

براساس نتایج آنالیز نمونه‌های تهیه شده و مقایسه آن با استاندارد EPA، چاه‌های W1 تا W6 هیچ‌گونه آلودگی نفتی را نشان نمی‌دهند و برای شرب مناسب می‌باشند. در صورت مشاهده آلودگی در چاه‌های W1 تا W6، با توجه به‌جهت جریان در دشت (که از سمت مناطق صنعتی به‌طرف روستا می‌باشد)، احتمال آلودگی در چاه آب شرب روستا نیز وجود داشت اما باتوجه به اینکه این چاه‌ها هیچ‌گونه آلودگی نفتی را نشان نمی‌دهند، مشاهده آلودگی در چاه آب شرب نیز غیر قابل تصور است. نتایج آنالیزها نیز هیچ‌گونه آلودگی نفتی را در نمونه تهیه شده از چاه آب شرب این روستا را نشان نمی‌دهد. به‌دلیل اهمیت بالای موضوع آلودگی آب شرب این روستا، باتوجه به اینکه که نتایج سری اول آنالیزهای هیچ‌گونه آلودگی نفتی را ثبت نکردند، بار دیگر در آبان ۱۴۰۱ نمونه‌گیری مجدد از چاه آب شرب و سایر چاه‌های این روستا صورت گرفت. نتایج آنالیز نمونه‌های سری دوم نیز نشان می‌دهند که چاه‌های روستای نام‌برده فاقد هرگونه آلودگی نفتی می‌باشند. موارد فوق بیانگر این است که ابرهای آلودگی شناسایی شده از محدوده پالایشگاه خارج نشده‌اند.

در این مطالعه، به‌منظور تعیین منشأ آلودگی‌های هیدروکربنی، از رویکرد تطبیقی مشابه با مطالعه واعظی هیر و همکاران (Vaezihir et al., 2022) در پالایشگاه بندرعباس بهره گرفته شد. در هر دو تحقیق، تحلیل الگوهای کروماتوگرافی (Fingerprint) و مقایسه ترکیبات آلی موجود در نمونه‌ها به‌عنوان ابزارهایی کلیدی در ردیابی منبع آلودگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این تفاوت که در مطالعه حاضر، رویکردی چندبعدی اتخاذ شده است که علاوه بر تطبیق ترکیبات شیمیایی و الگوهای کروماتوگرافی، شامل بررسی جهت جریان آب زیرزمینی و نسبت‌های تشخیصی مانند زایلن به اتیل‌بنزن نیز می‌باشد. این ترکیب از شاخص‌های شیمیایی و

78. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9007.1102> (In Persian)
- Naseri, H., Shahsavari, A. A., Khodaei, K., & Nikpeyma, Y. (2024). Application of CSIA technique in distinguishing sources of petroleum contamination in groundwater and evidence for natural attenuation potential in the aquifer. *Environmental Sciences Quarterly*. <https://doi.org/10.48308/envs.2024.1406> (In Persian)
- Naseri, H., Madbari, S., & Falsafi, F. (2011). Groundwater pollution caused by petroleum contaminants in the industrial zone of Rey (South Tehran). *Journal of Basic Sciences (Islamic Azad University)*, 21(81), 11–22. <https://sid.ir/paper/70257/fa> (In Persian)
- Parker, B. L., Chapman, S. W., & Guilbeault, M. A. (2008). Plume persistence caused by back diffusion from thin clay layers in a sand aquifer following TCE source-zone hydraulic isolation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 102(1–2), 86–104. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.07.003>
- Pour Ebrahim, Sh., Hadipour, M., Mardian, M., & Ansari, E. (2018). Spatial analysis of petroleum contamination spread in groundwater resources using geostatistical analysis in Shazand Plain. *Geographical Information (Sepehr)*, 27(108), 35–44. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.34614> (In Persian)
- Roy, J. W., & Smith, J. E. (1994). Behavior of volatile hydrocarbons in the unsaturated zone following gasoline spills. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 13(3), 455–462. <https://doi.org/10.1002/etc.5620130316>
- Roy, N., Molson, J., Lemieux, J. M., Van Stempvoort, D., & Nowamooz, A. (2016). Three-dimensional numerical simulations of methane gas migration from decommissioned hydrocarbon production wells into shallow aquifers. *Water Resources Research*, 52(7), 5598–5618. <https://doi.org/10.1002/2016WR018686>
- Schwarzenbach, R. P., Egl, T., & Hofstetter, T. B. (2016). *Environmental organic chemistry* (3rd ed.). Wiley.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1991). National primary drinking water regulations: Consumer factsheets on benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes. <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/index-21.html>
- American Public Health Association. (1926). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 6). American public health association.
- Boumaiza, S., & Mohamed, C. (2018). Understanding apparent thickness of LNAPL in monitoring wells: Influence of water table fluctuations. In *Proceedings of GeoEdmonton 2018*. <https://members.cgs.ca/conferences/GeoEdmonton/papers/geo2018Paper232.pdf>
- Hassanzadeh, R., Abbasnejad, A., & Hamzeh, M. A. (2011). Assessment of groundwater pollution in Kerman urban areas. *Journal of Environmental Studies*, 36(56), 101–110. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10258620.1389.36.56.6.5> (In Persian)
- Hildenbrand, Z. L., Carlton, D. J., Fontenot, B. E., Meik, J. M., Thacker, J. R., Wachal, D. J., Loaiciga, H. A., Hudak, P. F., Schug, K. A., & Korlie, S. K. (2016). Temporal variation in groundwater quality in the Permian Basin of Texas, a region of increasing unconventional oil and gas development. *Science of the Total Environment*, 569–570, 1608–1618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.144>
- Kaheh, M. S., Kardan Moghaddam, H., Ramezani, M. R., & Javadi, S. (2023). Evaluation of groundwater quality of aquifer based on agricultural consumption (case study: Sari aquifer). *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(4), 89–97. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2019.1736.1009> (In Persian)
- Khodaei, K., Tabani, H., Shahsavari, A., Qureshi, S. H., Boosalik, Z., Rezazadeh, B., & Mokhtari, M. (2021). Separation of oil pollution plumes of groundwater in the industrial area of South Tehran. *Journal of Water and Environmental Engineering*, 7(4), e259994. <https://doi.org/10.22034/jwee.2021.259994.4.1475> (In Persian)
- Mackay, D., Shiu, W. Y., & Lee, S. C. (2006). *Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals*. CRC press.
- Mehrabinejad, A., Kalantari, N., Alijani, F., Mousavi, F., & Mohammadi, H. (2025). Nitrate pollution of the Izeh urban aquifer: Health risks and local management. *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(2), 203–220. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9299.1111> (In Persian)
- Mirzavand, M., Sadatinejad, S. J., & Kardan Moghaddam, H. (2025). Assessment of groundwater quality affected by saltwater intrusion and theoretical mixing ratio calculation of saline and fresh groundwater. *Journal of Aquifer and Qanat* Title, 5(2), 63–

of pollution in well number 7 of the Shazand Petrochemical Complex (Master's thesis). Department of Earth Sciences, University of Tabriz. (In Persian)

Zhang, H., Han, X., Wang, G., Mao, H., Chen, X., Zhou, L., Huang, D., Zhang, F., & Yan, X. (2023). Spatial distribution and driving factors of groundwater chemistry and pollution in an oil production region in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 875, 162635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162635>.

U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Method 625.1: Base/Neutrals and Acids by GC/MS. Washington, DC: U.S.

EPA. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/method_625-1_2016.pdf

Vaezihir, A., Mohammadzadeh, M., Bakhtiari, S., & Nematollahi, R. (2022). Identification of LNAPL petroleum pollutants in the aquifer of Bandar Abbas refinery. *Human and Environment Quarterly*, 59, 141–158. <https://sid.ir/paper/1042890/fa> (In Persian)

Vaezi, A., Hajipour, M., & Safari, F. (2019). *Determination of characteristics, extent, and source*