Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2025, Vol. 15(2): 237 - 253

Research Article

The role of Atmospheric Washout in the transfer of Volatile Hydrocarbon contaminants(VOC) to Soil and Groundwater in the Assaluyeh Region

Mohadeseh Parvinisani[1], Abdorreza Vaezihi[1]*, Seyed Jafar Esmat Saatlou[2], Faezeh Nayeb[1]

1-Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz
2- Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

Keywords: *Soil contamination, VOCs, Groundwater, Atmospheric Washout, Assaluyeh Petrochemical Industry,*

1-Introduction

Environmental contamination is a significant concern that affects human health, ecosystems, and natural resources. Industrial contamination has significantly increased in recent years, posing severe environmental challenges, particularly in Iran. Soil and groundwater play a crucial role in economic, social, and environmental sustainability, yet they are highly susceptible to contamination due to anthropogenic activities.

Numerous studies have demonstrated that industrial emissions, particularly VOCs and PAHs, have a significant impact on soil and groundwater quality. For example, Gupta et al. (2020) analyzed BTEX concentrations in soil from five sites in Kanpur, India, and found that vehicular emissions and industrial activities were the primary sources. Similarly, groundwater quality assessments have identified industrial pollution as a major risk factor for sustainable development (Ravindra et al., 2019). VOCs have been recognized as key groundwater contaminants worldwide, with billions of dollars spent on their assessment and remediation since the 1970s (Pankow & Cherry, 1996).

One of the primary challenges is the high mobility of VOCs, which enables them to infiltrate groundwater as Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPLs) or Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs), facilitating their deep penetration and gradual dissolution (Lerner et al., 2003). Studies by Nambi et al. (2017) in Chennai, India, have demonstrated that oil spills initially infiltrate the soil, accumulate in the capillary fringe, and subsequently reach groundwater. Additionally, Zhang and Chen (2017) highlighted that PAHs undergo dry and wet deposition after being released into the atmosphere, leading to their accumulation in soil organic matter.

2-Materials and methods

A systematic approach was implemented to assess potential contamination in a petrochemical site lacking exploratory wells. Six exploratory wells were drilled in a triangular pattern to ensure maximum coverage of high-risk areas, including locations near storage tanks, industrial flares, and operational units. VOC measurements in unsaturated zones were conducted using portable gas chromatography (GC) devices, while soil samples were analyzed to determine hydrocarbon composition and texture.

The study also considered atmospheric washout as a key mechanism in the transport of contaminants. Given the industrial nature of the region, with multiple flares continuously releasing contaminants, wet and dry deposition processes were investigated to determine their role in soil and groundwater contamination.

* Corresponding author: vaezihir@yahoo.com
DOI: 10.22055/aag.2025.49189.2502
Received: 2025-03-07
Accepted: 2025-08-06

ISSN: 2717-0764

3-Results and discussions

Analysis of soil samples indicated significant hydrocarbon contamination in S10 (0–30 cm depth), with benzene concentrations exceeding groundwater protection limits. Other samples contained varying levels of aliphatic hydrocarbons, PAHs, and BTEX compounds. The highest Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) concentration was recorded in S6 at depths of 0–30 cm.

Atmospheric washout was identified as a major factor influencing hydrocarbon transport.

Aliphatic hydrocarbons accumulate in soil through dry and wet deposition processes.

PAHs were primarily transported via particle washout, where rainfall washed out airborne particles containing PAHs and deposited them into the soil.

BTEX compounds were transferred from the atmosphere to the soil through vapor washout, wherein these volatile compounds dissolved in raindrops and infiltrated the soil.

Groundwater samples from exploratory well EN-SP-005, located downstream of the petrochemical facility, revealed hydrocarbon contamination, while other wells remained uncontaminated. This finding suggests that atmospheric washout, combined with the soil's permeability, facilitated pollutant migration into deeper layers, eventually reaching the groundwater table.

Additionally, seasonal rainfall played a significant role in diluting contaminants in surface soil. However, in areas with high permeability, pollutants may have infiltrated deeper layers, posing a long-term risk of contamination. Variations in pH and electrical conductivity (EC) among the wells further indicated potential industrial influences on groundwater chemistry.

4-Conclusion

The findings of this study indicate that atmospheric washout is a crucial process in transferring hydrocarbon pollutants from air to soil and groundwater in the Assaluyeh petrochemical zone. The detection of high benzene concentrations in soil, the presence of hydrocarbons in groundwater downstream of industrial sites, and the influence of precipitation on the mobility of contaminants highlight the significance of atmospheric deposition mechanisms.

Dry and wet deposition contributed to the accumulation of aliphatic hydrocarbons in soil.

PAHs were transported through particle washout, leading to their deposition in the topsoil.

BTEX compounds migrated via vapor washout, thereby increasing soil contamination and potential risks to groundwater.

5-References

Gupta, A., Jha, A.K., Singh, A.K., Rajput, P., Gupta, T., 2020. Distribution of BTEX in Soils of an Urban Area: Kanpur Region, India .Journal of Energy and Environmental Sustainability 9, 61-66. DOI: 10.47469/JEES.2020.v09.100099

Ravindra, K., Thind, P. S., Mor, S., Singh, T., Mor, S.,2019. Evaluation of groundwater contamination in Chandigarh: Source identification and health risk assessment. Environmental Pollution 255, 113062. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113062.

Pankow, J.F., Cherry, J.A., 1996. Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: History, behavior, and remediation 362. Portland, OR: Waterloo Press.

Lerner, D.N., Kueper, B.H., Wealthall, G.P., Smith, J. W.N., Leharne, S.A., 2003. An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface.

Nambi, I.M., Rajasekhar, B., Loganathan, V., RaviKrishna, R., 2017. An assessment of subsurface contamination of an urban coastal aquifer due to oil spill. Environmental monitoring and assessment 189, 1-17 .https://doi.org/10.1007/s10661-017-5833-6.

Zhang, P., Chen, Y., 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: A review. Science of the Total Environment 605, 1011-1020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.247.

ISSN: 2717-0764

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Parvinisani, M., Vaezihi, A., Esmat Saatlou, J., Nayeb, F,. 2025. The role of Atmospheric Washout in the transfer of Volatile Hydrocarbon contaminants(VOC) to Soil and Groundwater in the Assaluyeh Region. Adv. Appl. Geol. 15 (2), 237-253.
DOI: 10.22055/aag.2025.49189.2502
https://aag.scu.ac.ir/article_20301.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

نقش شستشوی اتمسفری در انتقال آلاینده‌های هیدروکربنی فرار(VOC) به خاک و آب‌زیرزمینی در منطقه عسلویه

محدثه پروینی ثانی
گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
عبالرضا واعظی
گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
سیدجعفر عصمت ساعدلو
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
فائزه نایب
گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
vaezihir@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵

چکیده
آلودگی آب زیرزمینی و خاک با ترکیبات هیدروکربنی و ترکیبات آلی فرار (VOCs) یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم در صنایع پتروشیمی است. در این مطالعه، برای ارزیابی آلودگی‌های محتمل در یک مجتمع پتروشیمی واقع در عسلویه، رویکردی جامع شامل طراحی، حفاری، تجهیز چاه‌های اکتشافی و نمونه‌برداری از آب زیرزمینی و خاک اجرا شد. شش حلقه چاه با آرایش مثلثی در مناطق پرریسک نزدیک به مخازن، فلرها و سایر نقاط حساس حفاری و تجهیز شدند. نمونه‌برداری‌های انجام‌شده با رعایت اصول کنترل تغییرات شیمیایی، به تحلیل غلظت هیدروکربن‌ها و VOCها اختصاص یافت. نتایج نشان داد که غلظت بنزن در نمونه‌ی خاک S10، بالاتر از حد استانداردهای حفاظت از آب زیرزمینی است. همچنین، ترکیبات BTEX و PAH در برخی نمونه‌ها شناسایی شدند که به‌طور عمده به اثرات شستشوی اتمسفری و انتشار آلاینده‌ها از فلرهای صنعتی مرتبط هستند. پایش VOCها در چاه‌های اکتشافی با استفاده از دستگاه پرتابل نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر قابل‌توجهی از این ترکیبات هستند. بررسی نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داد که آلودگی هیدروکربنی تنها در یک چاه پایین‌دست پتروشیمی مشاهده شده است. داده‌های میدانی و تحلیل‌ها نشان دادند که شستشوی اتمسفری ناشی از بارش‌های فصلی به کاهش غلظت آلاینده‌ها در خاک کمک می‌کند. این نتایج، اهمیت پایش مستمر آلاینده‌های VOC و هیدروکربنی در مناطق صنعتی را برجسته کرده و نقش بارش‌های فصلی و الگوهای اقلیمی خاص در کاهش آلودگی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: *آلودگی خاک، VOC، آب زیرزمینی، شستشوی اتمسفری، پتروشیمی عسلویه.*

۱-مقدمه

آلودگی یکی از مسائل مهم در حوزه سلامت انسان، محیط زیست و سایر موجودات زنده محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، آلودگی صنعتی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در کشورهایی مانند ایران به یکی از چالش‌های زیست‌محیطی جدی تبدیل شده است (Monfared Estahbanati et al., 2016). منابع خاک و آب‌های زیرزمینی به دلیل نقش کلیدی خود در توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Nasiri et al., 2023). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که انتشار آلاینده‌های صنعتی به‌ویژه ترکیبات آلی فرار (VOCs) و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، کیفیت آب و خاک را در مناطق صنعتی به شدت تحت تأثیر قرار داده است. آنالیز غلظت BTEX در خاک، از پنج سایت مختلف در شهر کانپور هند توسط Gupta و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که این ترکیبات عمدتاً از طریق انتشار دود خودروها و فعالیت‌های صنعتی وارد محیط شده‌اند. به‌طور مشابه، کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز تحت تأثیر آلودگی‌های صنعتی قرار دارد و به‌عنوان یک عامل مهم در توسعه پایدار

کشورها شناخته می‌شود (Ravindra et al., 2019). آلودگی آب‌های زیرزمینی شامل تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی آن است که منجر به ناسازگاری با استانداردهای لازم برای مصارف صنعتی، کشاورزی و انسانی می‌شود (Khalefah et al., 2024).

ترکیبات آلی فرار (VOCs) یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی گسترده آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان محسوب می‌شوند. از دهه ۱۹۷۰ میلادی تاکنون، میلیاردها دلار برای بررسی و کنترل این آلاینده‌ها هزینه شده است (Pankow and Cherry, 1996). یکی از دلایل اصلی این چالش، قابلیت جابه‌جایی بالای VOCها در فازهای غیرآبی سبک (LNAPL) و سنگین (DNAPL) است که به آن‌ها امکان نفوذ به عمق آبخوان و انحلال تدریجی در آب زیرزمینی را می‌دهد (Lerner et al., 2003). Zhu و همکاران (۲۰۲۵) در بررسی گسترده‌ای روی خاک ۶۳ شهرک صنعتی شیمیایی در چین، نشان دادند که ترکیبات آلی فرّار (VOCs)، در خاک به‌طور قابل توجهی تجمع یافته و منابع اصلی آن‌ها فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی بوده است. برخی از منابع آلودگی ممکن است ابتدا به خاک محدود شده و به مرور زمان، تحت تأثیر آب‌های نفوذی، به آب‌های زیرزمینی راه یابند، در نتیجه خطر آلودگی بلندمدت ایجاد کنند (Rivett et al., 2011). Gupta و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی رفتار آلاینده‌های نفتی در محیط زیرسطحی، نشان دادند که PAHs پس از نشت به خاک، با تشکیل سامانه‌های چندفازی در ناحیه نیمه‌اشباع، وارد فاز محلول شده و تحت تأثیر نوسانات سطح آب زیرزمینی به سمت پایین حرکت می‌کنند؛ این فرآیند نقش کلیدی در گسترش آلودگی در سامانه خاک–آب دارد.

مطالعات متعددی در سطح جهان به بررسی منشأ آلودگی‌های هیدروکربنی در آب و خاک پرداخته‌اند. Du و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی پالایشگاهی تعطیل‌شده، نشان دادند که ترکیبات PAH با وزن مولکولی پایین تا متوسط، ناشی از نشت نفت و احتراق زغال‌سنگ، در مرز خاک و آب زیرزمینی تجمع یافته و نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌تواند مهاجرت این آلاینده‌ها را تشدید کند. پژوهش Nambi و همکاران (۲۰۱۷) در Chennai هند نشان داد که نشت مواد نفتی ابتدا به خاک نفوذ کرده و سپس وارد منطقه مویینگی و در نهایت به سطح آب زیرزمینی می‌شود. در این فرآیند، ترکیبات هیدروکربنی از طریق جریان آب زیرزمینی منتقل شده و از طریق چاه‌های اکتشافی قابل ردیابی هستند. از سوی دیگر، تحقیق Zhang و Chen (۲۰۱۷) نشان داد که ترکیبات PAHs پس از انتشار در جو، می‌توانند از طریق رسوب‌گذاری خشک و تر وارد خاک شده و به ماده آلی خاک جذب شوند. Li و Duan (۲۰۲۳) با بررسی شستشوی تر PAHs در جنوب چین نشان دادند که غلظت این آلاینده‌ها در روزهای بارش سبک زمستان افزایش می‌یابد و در سال‌هایی با بارندگی کمتر، تجمع بیشتری در آب باران رخ می‌دهد؛ منابع اصلی آلودگی شامل سوخت زغال‌سنگ، فرآورده‌های نفتی و ترافیک شناسایی شد. بنابراین، پایش آب‌های زیرزمینی و بررسی منشأ احتمالی آلودگی‌های محیطی نیازمند حفر چاه‌های اکتشافی و پایش مستمر منابع آب زیرزمینی است. در همین راستا، Khodaie و همکاران (۲۰۲۱) با حفاری چاه‌های اکتشافی و انجام تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی و کروماتوگرافی، منشأهای نشت مواد نفتی به آب زیرزمینی منطقه صنعتی ری را شناسایی و تفکیک کردند. Vaezihir و Mohammad zadeh (۲۰۲۲) در پالایشگاه بندرعباس، با بررسی ۱۴۳ چاه پایش و حفاری ۶ چاه جدید، عمق آب زیرزمینی، ضخامت آلودگی نفتی و منشأ نشت آلاینده‌ها را تعیین کردند.

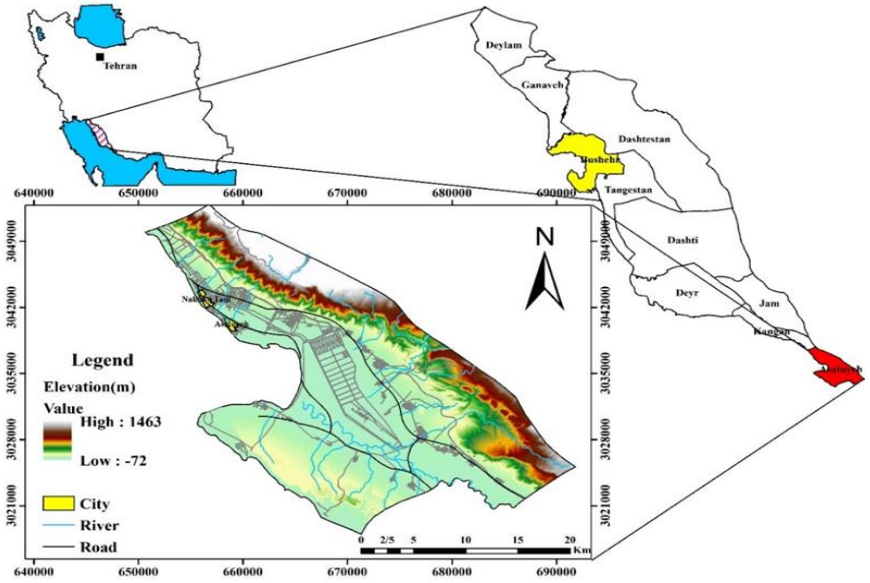
ماهیت صنعتی منطقه مورد مطالعه و حضور فلرهای متعدد در واحدهای صنعتی، احتمال آلودگی‌های ناشی از شستشوی اتمسفری را نیز مطرح می‌کند. ترکیبات آلی فرار (VOCs) و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، از مهم‌ترین آلاینده‌هایی هستند که در مناطق صنعتی با غلظت بالا مشاهده می‌شوند. انتشار این آلاینده‌ها نه‌تنها کیفیت هوا را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق فرآیندهای رسوب‌گذاری خشک و شستشوی اتمسفری وارد خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود. در منطقه عسلویه، انتشار گسترده گازهای آلاینده از واحدهای پالایش گاز و پتروشیمی به یک نگرانی زیست‌محیطی جدی تبدیل شده است. این مجتمع صنعتی، با تعداد زیادی فلر مستقر در کوهپایه‌های شمالی، بزرگ‌ترین منبع انتشار این گازها محسوب می‌شود (JICA, 2014). بر اساس گزارش JICA (۲۰۱۴)، مقدار سالانه انتشار گاز فلر از واحدهای پتروشیمی عسلویه ۲۰۱,۰۰۰ تن در سال تخمین زده شده است. این حجم گسترده از آلاینده‌ها می‌تواند از طریق فرآیندهای شستشوی اتمسفری، شامل شستشوی ذره‌ای و گازی، به سطح زمین

منتقل شود. Dickhut & Gustafson (۱۹۹۵) با بررسی نمونه‌های جوی و بارندگی در منطقه خلیج چساپیک، نشان دادند که شستشوی اتمسفری یکی از فرآیندهای کلیدی در انتقال PAHs به سطح زمین است. این مطالعه نشان داد که شستشوی ذره‌ای (Particle Washout) کارایی بالاتری نسبت به شستشوی گازی (Vapor Washout) دارد و کارایی این فرآیندها به شدت بارندگی، دما و ثابت هنری ترکیبات وابسته است. در همین راستا، Nasrabadi و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی غلظت هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) در ذرات معلق هوا، گرد و غبار خیابانی و رسوبات معلق رودخانه‌ای در شهرهای تهران (ایران) و توبینگن (آلمان)، تأثیر فرآیندهای رقیق‌سازی بر میزان PAHs در محیط‌های شهری را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که غلظت PAHs در ذرات معلق هوا در هر دو شهر بالا بود (۵۰۰mg/kg ~)، اما در گرد و غبار خیابانی و رسوبات معلق، این مقدار حدود ۱۰۰ برابر کاهش یافت.

با توجه به عدم وجود چاه‌های پایش آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات دقیقی درباره ویژگی‌های آبخوان و میزان آلودگی‌های احتمالی در دسترس نیست. بنابراین، طراحی و اجرای یک شبکه پایش اولیه به‌منظور بررسی وضعیت آبخوان و پایش آلودگی‌های احتمالی، در اولویت این تحقیق قرار دارد. با توجه به آلودگی شدید جوی در منطقه عسلویه، این پژوهش از نظر انتخاب محل مطالعه و بررسی مکانیسم انتقال آلودگی از هوا به خاک و آب زیرزمینی، دارای نوآوری در سطح ملی است.

۲-منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب ایران و در یکی از مجتمع‌های پتروشیمی واقع در شهرستان عسلویه در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس قرار دارد.



شکل۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه (نایب، ۱۴۰۳)

Fig. 1. Map of the Study Area Location

۳-وضعیت هواشناسی منطقه

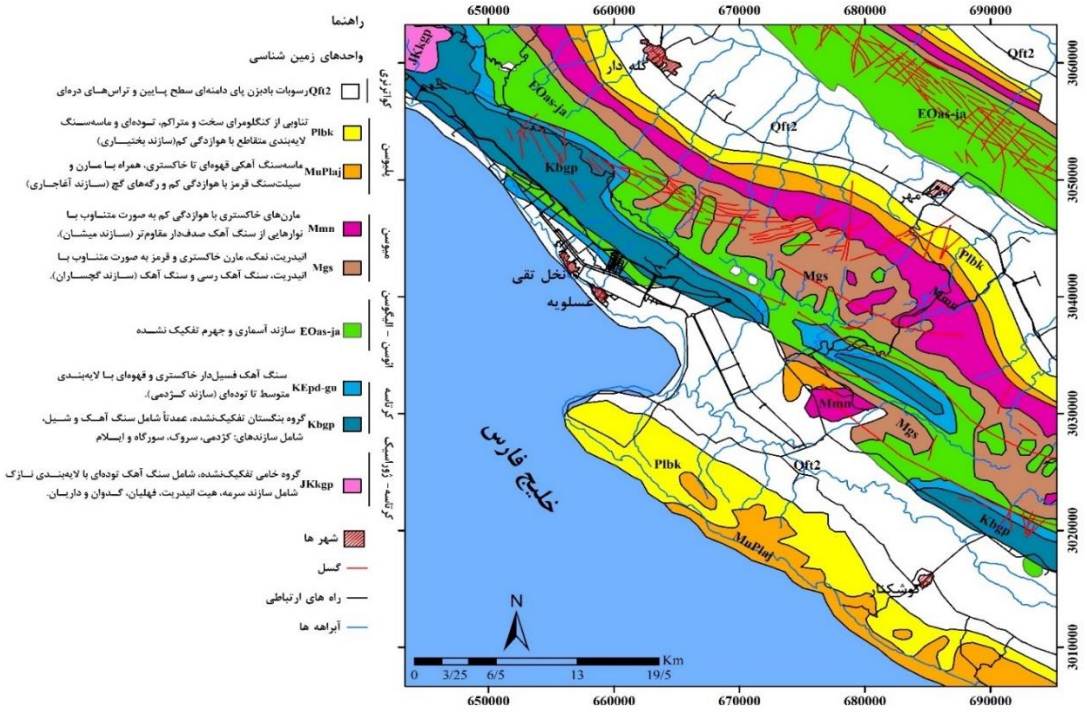
آب و هوای عسلویه تحت تأثیر توده‌های مدیترانه‌ای و سودانی قرار دارد که باعث بارش‌های فصلی از آبان تا اردیبهشت و در تابستان وزش بادهای گرم پدیده شرجی را ایجاد می‌کند. بارندگی سالیانه شهرستان عسلویه طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ بین ۵۷ تا ۴۰۶ میلیمتر متغیر بوده و میانگین بارش سالیانه ۱۶۹/۷ میلیمتر است که کمتر از میانگین کشور می‌باشد، بیشترین بارش در دی ماه و کمترین در شهریور و خرداد ماه می باشد. بررسی دمای ماهانه در ایستگاه عسلویه نشان می‌دهد حداکثر مطلق دما در تیرماه به ۵۰ درجه و کمینه مطلق دما در دی‌ماه به ۶/۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. تبخیر و تعرق، به‌عنوان بخشی کلیدی از چرخه هیدرولوژی، تحت تأثیر دما، رطوبت، باد و تابش قرار دارد و با تشتک‌های تبخیر در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. تبخیر و تعرق

پتانسیل که به شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد، از سال ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد بیشترین میزان در خرداد و کمترین در آذر ثبت شده است. در منطقه‌ی مورد مطالعه، جهت غالب وزش بادها به شمال شرق با زوایای ۹۰ تا ۱۲۰ درجه نسبت به شمال است. اقلیم منطقه عسلویه با استفاده از روش آمبرژه و بر اساس ویژگی‌های آب و هوایی ارزیابی و تعیین شده است. بر اساس این تقسیم بندی محدوده مطالعاتی دارای طبقه‌بندی اقلیمی بیابانی گرم شدید می‌باشد.

۴-زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در پهنه ساختاری زاگرس قرار دارد و از نظر زمین‌شناسی، تاقدیس عسلویه برجسته‌ترین ساختار آن به شمار می‌آید. در این پژوهش، نقشه زمین‌شناسی منطقه با استفاده از نقشه‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ شیرینو (منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی در سال ۱۳۸۴) و بساتین (ارائه شده توسط شرکت ملی نفت ایران در سال ۱۳۸۶) تهیه شده است. قدیمی‌ترین لایه‌های چینه‌شناسی این منطقه شامل گروه خامی و سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان هستند که در بخش جنوبی تاقدیس عسلویه آشکار شده اند. سازند سورمه از دولومیت‌های ضخیم و تیره تشکیل شده و سازند هیث شامل انیدریت، ژیپس و دولومیت‌های متناوب با لایه‌های آهکی است. بخش تبخیری سازند هیث نسبتاً سست و فرسایش‌پذیر و بخش کربناته آن مقاوم‌تر است. همبری این سازندها با هم به‌صورت هم‌شیب و ناپیوسته است. گروه دهرم، شامل سازندهای دالان، کنگان و فراقان، با ضخامت یک کیلومتر به‌عنوان سنگ مخزن ذخایر گازی عمل می‌کند. بر روی آن سازند دشتک (۵۵۰ متر) و سپس سازند نیریز بر روی سازند دشتک (۴۰ متر) قرار دارند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۶). منطقه مورد مطالعه در این پژوهش واقع در دامنه های سطح پایین رسوبات بادبزنی وتراس های دره ای می‌باشد.

منطقه از منظر تکتونیک در زون زاگرس چین خورده قرار دارد و رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک و ترشیری به طور هم شیب روی هم قرار گرفته‌اند. تاقدیس عسلویه یک تاقدیس مرکب با میل به سوی جنوب غرب است که هسته آن را سازند سورمه تشکیل می‌دهد. یال جنوبی آن توسط گسله پیشانی کوهستان بریده شده و در یال شمالی آن دره‌های ژرفی به دلیل فرسایش ایجاد شده است.



شکل۲- نقشه زمین شناسی محدوده ی مورد مطالعه بر گرفته از نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ شیرینو (نایب،۱۴۰۳)

Fig. 2.Geological map of the study area, adapted from the 1:100,000 Shirinoo map



شکل۳- تصویر ماهواره ای از تاقدیس و دشت عسلویه
Fig. 3. Satellite image of the anticline and Assaluyeh plain.

۵-هیدروژئولوژی محدوده مطالعاتی

در منطقه مطالعاتی آبخوان‌ها از نفوذ نزولات جوی و رواناب‌های سطحی تغذیه می‌شوند. منابع اصلی آب زیرزمینی شامل آبخوان‌های کارستی و دشتی است که کیفیت آب در شمال دشت (سازندهای آسماری و بنگستان) بهتر از بخش میانی است. سازندهای منطقه شامل آسماری، جهرم، کنگلومرای بختیاری هستند که بر کیفیت و کمیت آبخوان‌ها تأثیر دارند. مناطق شیرینو، ده نو و چاه مبارک با آبخوان‌های کارستی، آب باکیفیت‌تری دارند. در عمق‌های پایین‌تر، سازندهای مارنی و گسل‌ها باعث شوری آب می‌شوند. در بخش کوهستانی منطقه، امکان تشکیل آبخوان در سنگ آهک‌ها وجود دارد، اما توسعه پدیده‌های انحلالی در آنها متفاوت است. آهک‌های آسماری-جهرم شرایط بهتری دارند، در حالی که لایه‌های ناتراوا در سازندهای مختلف مانع پیوستگی آبخوان‌ها شده و موجب ایجاد آبخوان‌های مجزا می‌شوند. همچنین، آب‌های زیرزمینی در دامنه‌های شمالی و جنوبی تاقدیس‌ها به سمت شمال و جنوب جریان پیدا می‌کنند و به دلیل کم بودن بارش و زیاد بودن تبخیر، آبخوان‌های کارستی در دامنه‌های جنوبی کوه‌های عسلویه تشکیل نمی‌شوند. آبخوان های منطقه‌ی مورد مطالعه شامل آبخوان کارستی شیرینو – بیدخون، آبخوان کارستی ده نو - چاه مبارک و آبخوان دشت عسلویه که شامل سه آبخوان شیرینو، دره نایبند و نخل تقی میباشد. منطقه‌ی مورد مطالعه واقع در بخش آبخوان نخل تقی می‌باشد. در بخش نخل تقی، تاقدیس چاه مبارک از شمال دره نایبند به سمت شمال غربی گسترش یافته و تا زیر آبرفت‌ها ادامه دارد. سازند میشان در نوار ساحلی جنوب بیدخون به‌عنوان سد طبیعی عمل کرده و جریان آب‌های زیرزمینی را متوقف می‌کند. این امر باعث می‌شود بخشی از آب به سطح بیاید، که بخشی تبخیر و بخشی دیگر زهکشی می‌شود و در نتیجه یک خور به طول تقریبی ۴ کیلومتر شکل می‌گیرد.

۶-مواد و روش ها

آلودگی آب زیرزمینی و خاک با ترکیبات هیدروکربنی و ترکیبات آلی فرار (VOCs) یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است که ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در صنایع پتروشیمی، می‌باشد. برای ارزیابی آلودگی‌های محتمل در یک منطقه صنعتی فاقد چاه‌های اکتشافی، رویکردی جامع

طراحی و اجرا شد که شامل مراحل طراحی، حفاری، تجهیز چاه‌ها، انجام آنالیزهای در محل و نمونه‌برداری از آب زیرزمینی و خاک می‌باشد.

در مرحله اول، شش حلقه چاه اکتشافی با آرایش مثلثی طراحی شدند تا پوشش حداکثری مناطق پرریسک، از جمله نقاط نزدیک به مخازن، فلرهای صنعتی و سایر مناطق حساس پتروشیمی، تضمین شود. این چاه‌ها در موقعیت‌های استراتژیک حفاری و تجهیز شدند تا امکان نمونه‌برداری از آب زیرزمینی برای تحلیل غلظت هیدروکربن‌ها و انجام آنالیزهای در محل از جمله اندازه‌گیری pH، EC و ترکیبات آلی فرار (VOCs) از زون غیراشباع فراهم شود. لازم به ذکر است، خاک‌های سایت مورد مطالعه، به‌ویژه در تراس‌های نزدیک به دریا، به دلیل اینکه ناشی از استحصال از دریا می باشند، دارای خاک دست‌ریز با تخلخل بالا بوده و در طول فرآیند حفاری، به دلیل همین ویژگی خاک، ریزش دیواره چاه مکررا ایجاد گردید.

برای جلوگیری از تغییرات در ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و توقف رشد میکروارگانیسم‌ها، به تمامی نمونه‌های برداشت‌شده برای آنالیز مواد نفتی محلول ۱۰ درصد سدیم آزاید به میزان ۰/۵ میلی‌لیتر اضافه شد. اندازه‌گیری VOCها در زون غیراشباع نیز به کمک دستگاه پرتابل VOC به‌صورت مستقیم در محل انجام گرفت تا نتایج دقیق از نوع و میزان انتشار آلاینده‌ها حاصل شود. پایش ترکیبات آلی فرار (VOC) در چاه‌های سایت، از ۶ چاه پایش حفر شده انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها در این مرحله با استفاده از دستگاه و شیلنگ متصل به آن، بلافاصله پس از برداشتن درپوش چاه و تثبیت عدد خوانش دستگاه، صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که پیش از هر بار اندازه‌گیری، صفحه خوانش صفر می‌گردید و در صورت نیاز، سر پروب نیز تمیز می‌گردد تا دقت نتایج تضمین شود. جهت بررسی وجود لایه‌های مایع فاز غیرآبی سبک (LNAPL) در آب زیرزمینی، از دستگاه Oil Water Meter Interface استفاده شد، اما هیچ‌گونه لایه‌ای از LNAPL در چاه‌های مورد بررسی مشاهده نشد.

نمونه‌برداری از خاک نیز به‌صورت موازی و به دو منظور انجام شد: ۱) آنالیز دانه‌بندی و تعیین بافت خاک برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک و تأثیر آن بر انتقال آلاینده‌ها؛ ۲) تحلیل آلودگی‌های هیدروکربنی. نمونه‌های خاک برای آنالیز بافت از ترانشه‌های موجود در سایت و با توجه به حداکثر عمق آن‌ها جمع‌آوری شدند. در هر مرحله، نمونه‌برداری به میزان تقریبی یک کیلوگرم انجام شده و نمونه‌ها در پلاستیک‌های مخصوص نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شده و در آزمایشگاه، بافت خاک به روش هیدرومتری دو زمانه تعیین شد.

برای بررسی دقیق ترکیبات هیدروکربنی، نمونه‌های آب و خاک با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) مورد آنالیز قرار گرفتند. به دلیل وجود فلرهای متعدد در منطقه و تأثیر آن‌ها بر انتشار آلاینده‌ها، شستشوی اتمسفری نیز به‌عنوان یک عامل مؤثر در انتقال آلودگی‌ها به خاک و آب زیرزمینی مدنظر قرار گرفت و تحلیل‌های مرتبط بر پایه داده‌های محلی انجام شد.این فرآیندها با طراحی و اجرای هماهنگ، امکان ارزیابی دقیق منابع و شدت آلودگی‌ها در این منطقه صنعتی را فراهم آورد.

۷-تحلیل و نتایج

۷ ـ ۱ـ بررسی آلودگی منطقه غیراشباع

هدف این بررسی تعیین نوع و میزان پراکندگی آلاینده‌های آلی در خاک محدوده مطالعاتی است. برای شناسایی نوع و غلظت آلاینده‌های موجود در خاک، از دستگاه کروماتوگرافی گازی با دتکتور جرمی (GC/MASS) مطابق با دستورالعمل سازمان حفاظت محیط زیست (۱۳۸۸) استفاده شده است. همچنین برای تعیین حد مجاز آلاینده‌ها، از استانداردهای ارائه‌شده توسط این سازمان بهره گرفته شد. نتایج کلی این آنالیز در جدول(۱) آورده شده است.

نتایج آنالیز ها باتوجه به جدول (۱) ، حاکی از وجود آلودگی در نمونه S10 (0-30cm) که می‌باشد که شامل ترکیبات بنزن، تولوئن و هیدروکربن‌های زنجیری می‌باشد. غلظت بنزن دراین نمونه بالاتر از حد استاندارد آلودگی خاک مربوط به زیر گروه حفاظت از آب زیرزمینی (سازمان حفاظت محیط زیست ایران) می‌باشد (استاندار بنزن خاک ۱۱میکروگرم برکیلوگرم می‌باشد). در بقیه نمونه ها هیدروکربن های زنجیری شناسایی شد به غیر از نمونه S7(90-110 cm) که مربوط به واحد الفین می‌باشد. میزان TPH در ایستگاه S6 در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر بیشترین مقدارمیباشد. آلاینده PAH فقط در نمونه های S6(0-30 cm) وS1(0-30 cm) مشاهده گردید. غلظت آلیفاتیک در همه نمونه‌ها بجز S3 وS2 (30-60 cm) مشاهده شد. بیشترین غلظت این آلاینده در S1(30-60cm) با مقدار ۶۰۲/۱ میباشد. زایلن فقط در نمونه S4 مشاهده شد.

براساس نتایج آنالیزهای خاک، نمونه‌های S4 و S10 به ترتیب حاوی مقادیر ۹۰۷ و ۴۴۱/۵ میکروگرم بر کیلوگرم از ترکیبات BTEX (بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن) هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر شناسایی‌شده این آلاینده‌ها در خاک، زیر حد استانداردهای تعیین‌شده برای آلودگی‌های خاک قرار دارند. با توجه به این مسئله، می‌توان نتیجه گرفت که منبع اصلی این آلاینده‌ها، فرآیندهای شستشوی جوی ناشی از فعالیت‌های صنعتی در منطقه بوده است که نشان‌دهنده تأثیر آلودگی‌های جوی بر کیفیت خاک می باشد.

شستشوی اتمسفری یکی از فرآیندهای مهم در انتقال و کاهش غلظت آلاینده‌های هیدروکربنی از جو به خاک است که نقش ویژه‌ای در مناطق صنعتی مانند مجتمع‌های پتروشیمی ایفا می‌کند. این فرآیند به شدت تحت تأثیر ثابت هنری است که نشان‌دهنده تمایل ترکیبات به حل شدن در آب یا باقی‌ماندن در فاز گازی است. در منطقه مطالعاتی، ترکیباتی مانند هیدروکربن‌های چند حلقه‌ای (PAHs) ، از جو شسته می‌شوند که این امر منجر به انتقال این ترکیبات به سطح خاک می‌شود و به کاهش غلظت آلاینده‌های هیدروکربنی در جو کمک کند. بر اساس گزارش JICA (۲۰۱۴)، غلظت بنزن در هوای منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ بین ۴ تا ۱۱/۵ میکروگرم بر متر مکعب متغیر بوده است. این موضوع نشان‌دهنده سطح بالای انتشار بنزن از منابع صنعتی در این منطقه است. در منطقه مورد مطالعه، غلظت بنزن در خاک برابر با ۹۶ میکروگرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شده است، تغلیظ بنزن در خاک منطقه مطالعه‌شده نتیجه انتشار مداوم این آلاینده از صنایع پتروشیمی، انتقال آن از جو به زمین از طریق شستشوی اتمسفری می‌باشد.

ترکیبات آلیفاتیک که از انتشار مستقیم صنایع پتروشیمی وارد جو می‌شوند، از طریق رسوب‌گذاری خشک و تر در خاک تجمع پیدا می‌کنند. در این فرآیند، این ترکیبات یا مستقیماً در خاک ته‌نشین شده (رسوب‌گذاری خشک) یا در قطرات باران حل شده و همراه با بارندگی به خاک منتقل می‌شوند (رسوب‌گذاری تر). هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) که اغلب در فاز ذره‌ای جو حضور دارند، طی شستشوی ذره‌ای (Particle Washout) همراه با باران به خاک وارد شده و به دلیل ماهیت آب‌گریز خود به مواد آلی خاک متصل می‌شوند. همچنین، ترکیبات آلی فرار (BTEX) که به‌صورت گاز در جو پراکنده هستند، از طریق شستشوی گازی (Vapor Washout) در قطرات باران حل شده و به خاک منتقل می‌شوند.

با توجه به موقعیت جغرافیایی و صنعتی منطقه مورد مطالعه، بارش‌های فصلی در بهار نقش مهمی در شستشوی اتمسفری و انتقال آلاینده‌ها به خاک دارند. اگرچه تجمع کوتاه‌مدت این ترکیبات در سطح خاک محتمل است، شستشوی مکرر ناشی از باران‌های فصلی منجر به انتقال آلاینده‌ها به لایه‌های زیرین خاک یا کاهش غلظت آن‌ها به زیر حد استاندارد می‌شود. داده‌های میدانی نشان می‌دهند که در شرایطی که غلظت آلاینده‌ها زیر حد استاندارد است، نزولات جوی یکی از عوامل اصلی در پراکندگی و کاهش سطح آلودگی در خاک می‌باشند.

علاوه بر این، تغییرات دمایی و اقلیمی منطقه بر فرآیند شستشوی اتمسفری تأثیرگذار است. در فصول گرم‌تر، افزایش تبخیر و الگوهای بارشی متغیر نقش مستقیمی در پراکندگی ذرات آلاینده و افزایش کارایی شستشو دارد. این امر به ویژه در مناطقی با فعالیت صنعتی بالا، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به همین دلیل، وضعیت خاک‌هایی که غلظت آلاینده‌های هیدروکربنی در آن‌ها زیر حد استاندارد است به تأثیر مثبت شستشوی اتمسفری، بارندگی‌های فصلی و الگوهای اقلیمی خاص منطقه نسبت داده شده است.

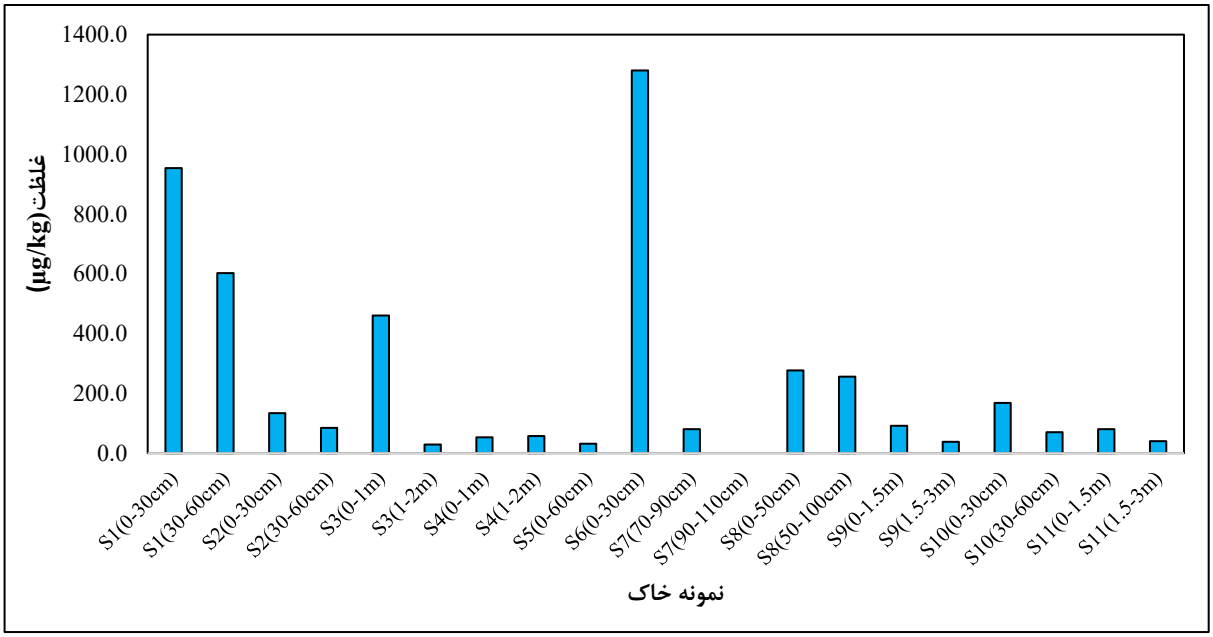
در ادامه نمونه های خاک از نظر بافت مورد آنالیزقرار گرفتند جدول(۲). پس از مشخص شدن درصد رس، لوم و ماسه ی موجود در خاک ها دیاگرام مربوط به طبقه بندی خاک رسم شد (شکل۶).

جدول ۱- نتایج آنالیز آلاینده های هیدروکربنی در خاک برحسب میکروگرم برکیلوگرم

Table 1. Results of hydrocarbon pollutant analysis in soil (µg/kg

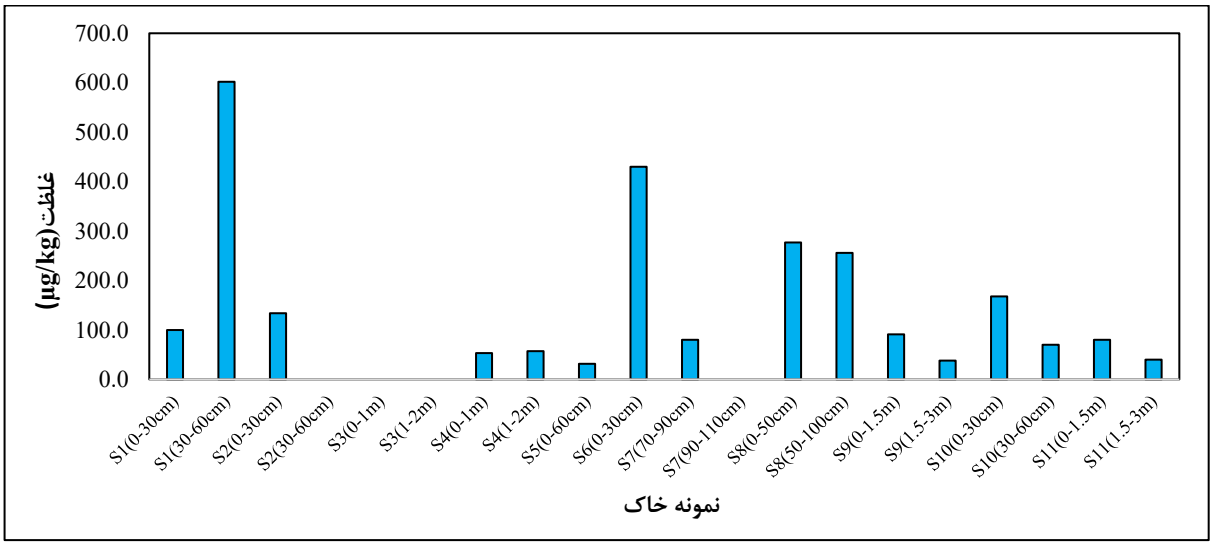
TPH	PAHs	Aliphatic	Xylene	Toluene	Benzene	Sample
602.1	ND	602.1	ND	ND	ND	S1(30-60cm)
84.8	ND	ND	ND	ND	ND	S2(30-60cm)
953.5	853.5	100	ND	ND	ND	S1(0-30cm)
133.8	ND	133.8	ND	ND	ND	S2(0-30cm)
31.5	ND	31.5	ND	ND	ND	S5(0-60cm)
1279.9	849.9	430	ND	ND	ND	S6(0-30cm)
460.5	ND	ND	ND	ND	ND	S3(0-1m)
53.2	ND	53.2	452	ND	ND	S4(0-1m)
28.9	ND	ND	ND	ND	ND	S3(1-2m)
57.2	ND	57.2	455	ND	ND	S4(1-2m)
80	ND	80	ND	ND	ND	S7(70-90cm)
ND	ND	ND	ND	ND	ND	S7(90-110cm)
277	ND	277	ND	ND	ND	S8(0-50cm)
256	ND	256	ND	ND	ND	S8(50-100cm)
91.3	ND	91.3	ND	ND	ND	S9(0-1.5m)
38	ND	38	ND	ND	ND	S9(1.5-3m)
168	ND	168	ND	345.5	96	S10(0-30cm)
70	ND	70	ND	ND	ND	S10(30-60cm)
80	ND	80	ND	ND	ND	S11(0-1.5m)
40	ND	40	ND	ND	ND	S11(1.5-3m)

*N/D. Not detected



شکل ۴- غلظت TPH اندازه گیری شده در نمونه های خاک منطقه

Fig. 4. TPH concentration in soil samples from the area.



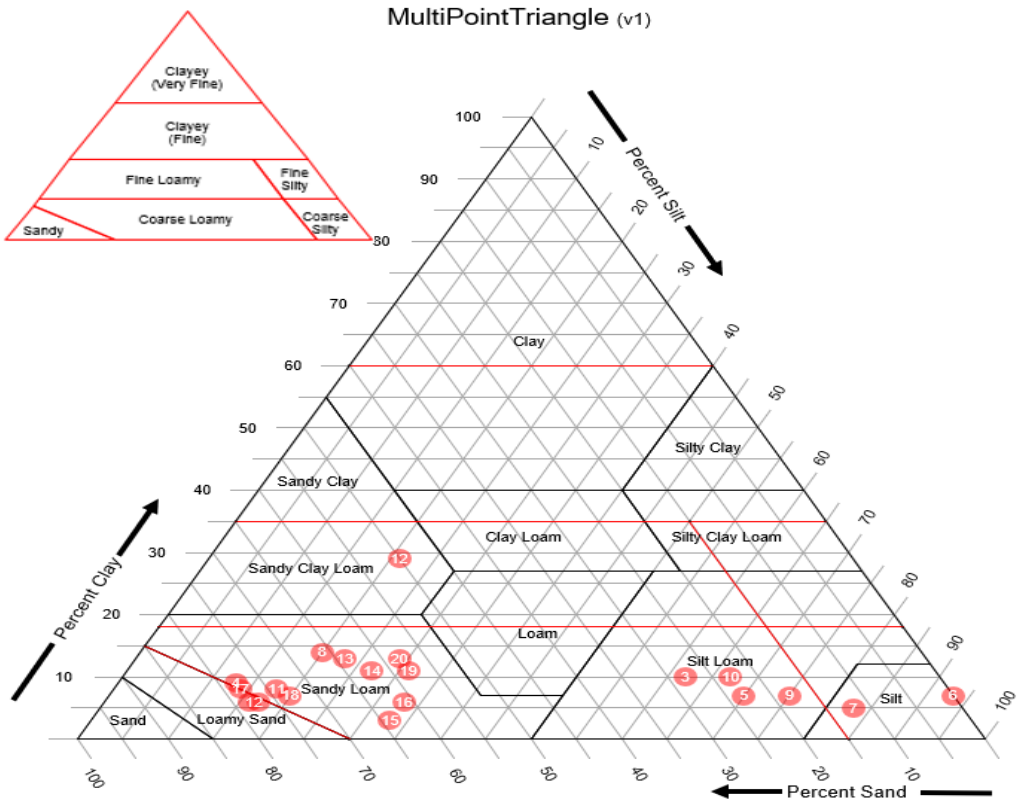
شکل۵-غلظت ترکیبات آلیفاتیک اندازه گیری شده نمونه های تهیه شده از خاک منطقه مورد مطالعه

Fig. 5. concentration of Aliphatic compounds in soil samples from the study area.

جدول ۲- نتایج آنالیز نمونه های خاک از نظر بافت

Table 2. Results of soil texture analysis

Texture	Silt%	Clay%	Sand%	Sample
Loamy sand	16	6	78	S1(0-30cm)
Loamy sand	17	6	77	S1(30-60cm)
Loam-Silt	62	10	28	S2(0-30cm)
Sandy Loam	13	9	78	S2(30-60cm)
Loam-Silt	70	7	23	S3(0-1m)
Silt	93	7	0	S3(1-2m)
Silt	83	5	12	S4(0-1m)
Sandy Loam	20	14	66	S4(1-2m)
Loam-Silt	75	7	18	S5(0-60cm)
Loam-Silt	67	10	23	S6(0-30cm)
Loamy Sand	18	8	74	S7(70-90cm)
Sandy Clay Loam	21	29	50	S7(90-110cm)
Sandy Loam	23	13	64	S8(0-50cm)
Sandy Loam	28	11	62	S8(50-100cm)
Sandy Loam	33	3	64	S9(0-150cm)
Sandy Loam	33	6	61	S9(150-300cm)
Sandy Loam	13	8	78	S10(0-30cm)
Sandy Loam	20	7	73	S10(30-60cm)
Sandy Loam	31	11	58	S11(0-150cm)
Sandy Loam	28	13	58	S11(150-300cm)



شکل۶- دیاگرام بافت خاک

Fig. 6. Soil texture diagram

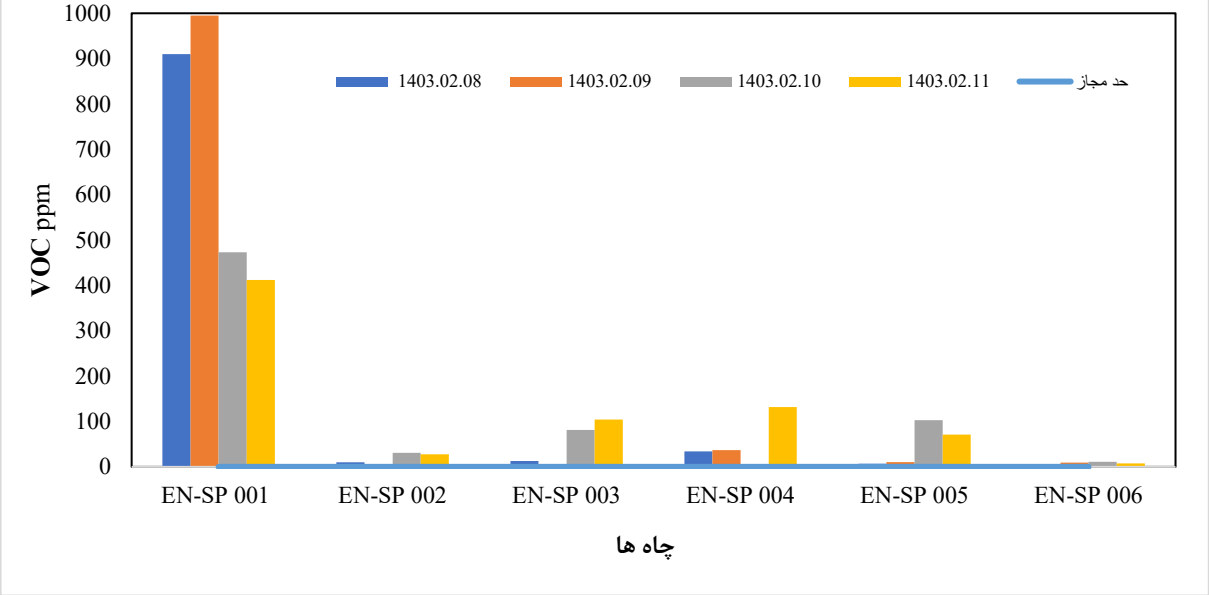
خاک‌های با بافت‌های مختلف مانند ماسه‌های دانه‌درشت، به دلیل تخلخل بالا، اجازه می‌دهند آلاینده‌ها به سرعت در آب زیرزمینی نفوذ کنند. در مقابل، خاک‌های رسی با تخلخل پایین، به عنوان یک مانع طبیعی عمل کرده و نفوذ آلاینده‌ها را به شدت محدود می‌کنند. به طور کلی، نفوذپذیری خاک با اندازه دانه‌های آن تغییر می‌کند؛ به این صورت که هرچه خاک دانه‌درشت‌تر باشد، میزان نفوذ و سرعت انتشار آلاینده‌ها بیشتر خواهد بود، در حالی که در خاک‌های ریزدانه‌تر، این فرآیندها کندتر و محدودتر هستند.

pH وEC خاک در عصاره اشباع با نسبت ۱ به ۲ خاک به آب مقطر اندازه گیری شد (Rhoades, 1996). طبق نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه های خاک، pH همه‌ی نمونه های خاکی به جز دو مورد در محدوده ۷/۴-۷/۸ می باشند و جزء خاک های قلیایی ضعیف محسوب میشوند. pH نمونه های خاکی ایستگاه S4 در عمق ۰ تا ۱ متری با میزان ۸/۴۳ نسبتا قلیایی و در عمق ۱تا ۲ متری با میزان ۷/۲۱ خنثی می‌باشد.

طبق نتیجه حاصل بیشترین مقدار EC خاک ۰/۰۷ می باشد که مربوط به ایستگاه (S6) است و کمترین مقدار آن مربوط به ایستگاه S4 با اندازه ۰/۰۰۲ دسی زیمنس بر متر می باشد.

نتایج آزمایش خاک حاکی از این هست که خاک منطقه مورد نظر، جزء خاک های قلیایی ضعیف بوده و درجه شوری آن در حد نرمال می باشد و در طبقه بندی خاک ها در گروه خاک های معمولی قرار می گیرد. البته لازم بذکر است که علیرغم استفاده از ساحل و استحصال خشکی از خلیج فارس برای زیربنای این مجموعه، نتایج آنالیز EC حاکی از کیفیت خوب خاک پتروشیمی است. این امر بدلیل استفاده ازخاک معمولی برای استحصال میباشد.

نتایج اندازه گیری مقدار VOC از ۶ چاه طی یک دوره پایش در اردیبهشت ۱۴۰۳ اندازه گیری گردید. همچنین نمودار ذیل نمایانگر میزان غلظت VOC اندازه گیری شده و پراکندگی این عناصر در سایت می‌باشد.



شکل۷- نمودار میزان VOC و مقایسه با حد مجاز ۰/۰۵ ppm براساس استاندارد محیط زیست

Fig. 7 .VOC levels and comparison with the 0.05 ppm limit based on environmental standards

طبق این نمودار تمامی نمونه ها از نظر میزان غلظت VOC آلوده می‌باشد با توجه به اینکه در منابع مختلف مقادیر متفاوتی برای میزان آلایندگی VOC اعلام شده است (بیشتر آنها زیر ۰/۱ ppmبودند) و میزان دقیقی برای حد مجاز آن اعلام نشده و از سوی دیگر مقدار VOC اندازه گیری شده شامل مجموع گازهای فرار است و گازهای فرار BTEX از نظر آلایندگی بیشترین اهمیت را در این پژوهش دارند لذا حد مجاز VOC بر طبق حد مجاز بنزن در نظر گرفته شده است بر اساس اعلام معاونت محیط زیست ایران (دفتر آب و خاک، ۱۳۸۸)، در زمینهای تجاری با pH>7 حد مجاز بنزن ۰/۰۵ppm، حد مجاز تولوئن ۰/۲ppm ، حد مجاز اتیل بنزن ۰/۲ppm، حد مجاز زایلن ۲۰ppm میباشد.

۷ ـ ۲ـ بررسی آلودگی منطقه اشباع

نتایج آنالیز مواد هیدروکربنی در هریک از چاه های نمونه برداری شده در جدول۳ آورده شده است. نتایج آنالیزها نیز حاکی از وجود آلودگی هیدروکربنی فقط در نمونه چاه EN_SP_005 میباشد. این چاه در پایین دست پتروشیمی واقع شده است. در بقیه نمونه‌ها هیچگونه آلودگی هیدروکربنی مشاهده نگردید. طبق استاندارد EPA بیشترین حد مجاز برای PAH، ۰/۲ میکروگرم برلیتر می‌باشد.

جدول ۳- غلظت هیدروکربن های موجود در نمونه ها آب زیرزمینی بر حسب میکروگرم بر لیتر

Table 3.Concentration of hydrocarbons in Groundwater samples (µg/L).

هیدروکربن زنجیری	PAH	TPH	Well ID
N/D	N/D	N/D	EN-SP-001
N/D	N/D	N/D	EN-SP-002
N/D	N/D	N/D	EN-SP-003
N/D	N/D	N/D	EN-SP-004
26	22	48	EN-SP-005
N/D	N/D	N/D	EN-SP-006

*N/D. Not detected

مقادیر مجاز تعریف شده توسط استاندارد EPA

وجود آلودگی هیدروکربنی در چاه EN-SP-005 در زون اشباع با توجه به نبود منشا آلودگی نقطه‌ای، نشان‌دهنده تأثیر فرآیند شستشوی اتمسفری بر انتقال آلاینده‌ها به آب زیرزمینی است. در محیط‌های صنعتی، ترکیبات هیدروکربنی و آلی فرار که از فلرها و فرآیندهای پالایشگاهی وارد جو می‌شوند، تحت تأثیر نزولات جوی شسته شده و به سطح خاک انتقال می‌یابند. در مناطقی با خاک‌های نفوذپذیر، این ترکیبات پس از ورود به لایه‌های سطحی، امکان نفوذ به عمق خاک و در نهایت رسیدن به آبخوان را دارند. نتایج نمونه‌برداری نشان داد که در سایر چاه‌های حفر شده، آلودگی هیدروکربنی شناسایی نشده است، اما در چاه EN-SP-005 که در پایین‌دست پتروشیمی قرار دارد، بر اساس استاندارد WHO غلظت ترکیبات هیدروکربنی زنجیری و PAHs بالاتر از حد مجاز بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بارش‌های فصلی به‌عنوان یک عامل مهم در توزیع و نفوذ آلاینده‌های هیدروکربنی در منطقه عمل کرده و به انتقال این ترکیبات از سطوح آلوده به آب زیرزمینی کمک می‌کنند.

نتایج اندازه‌گیری‌های pH و EC در هر شش حلقه چاه حفاری شده در جدول (۴) آورده شده است. مقدار pH طبیعی آب زیرزمینی معمولا بین ۶/۵ تا ۸/۵ است . انحراف از این محدوده می‌تواند نشان دهنده ورود آلاینده هایی مانند اسیدها، بازها یا ترکیبات آلی و معدنی باشد. به عنوان مثال، در مناطق صنعتی، نشتی مواد شیمیایی مانند اسیدها، بازها یا ترکیبات قلیایی می تواند pH آب زیرزمینی را کاهش یا افزایش دهد. استفاده از مواد کاستیک در واحد های عملیاتی خطر افزایش شدید pH را به همراه دارد که احتمال ایجاد اختلال در تعادل شیمیایی آبخوان را افزایش میدهد و به گسترش آلودگی های دیگر منجر شود.

هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی، که یکی از پارامترهای کلیدی در بررسی‌های میدانی شش چاه اکتشافی بود، اطلاعات مهمی درباره زمان ماندگاری و ویژگی‌های آبخوان ارائه می‌دهد. بر اساس اندازه‌گیری‌ها، کمترین مقدار EC در شرق محدوده مطالعاتی چاه EN-SP-001 مشاهده شد که در بازه ۳۹۵ تا ۶۹۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر قرار دارد. این مقدار در مرکز محدوده چاه EN-SP-003 روند افزایشی داشته و به ۴۰۹۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر رسیده است. در جنوب چاه EN-SP-006 و غرب منطقه، شامل چاه‌های EN-SP-004 وEN-SP-005، مقدار EC به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این افزایش احتمالاً به دلیل حضور املاح شور مانند سدیم و کلر است که ممکن است ناشی از ورود آب شور یا تأثیرات آلودگی نفتی باشد. این داده‌ها نمایانگر اثرات فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آب زیرزمینی و ویژگی‌های شیمیایی آن است.

جدول۴- مقادیر اندازه‌گیری شده pH و EC از شش حلقه چاه حفاری شده
Table 4.pH and EC values from six excavated wells.

Well ID	pH	EC(µS/cm)
EN-SP 001	10.39	395
EN-SP 002	9.69	695
EN-SP 003	8.03	4090
EN-SP 004	7	25900
EN-SP 005	7.16	24600
EN-SP 006	9.21	3370

۸-نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز بافت خاک، خاک‌های منطقه عمدتاً از نوع لومی شنی هستند که نشان‌دهنده ترکیب غالب ماسه، سیلت و رس در مقادیر مشخص است. خاک‌های منطقه مورد بررسی بر اساس نتایج آنالیز بافت خاک، به‌ویژه در تراس‌های ساحلی، به دلیل استحصال از دریا، عمدتاً از نوع لومی شنی با نفوذپذیری بالا هستند. این ویژگی‌های زمین‌شناسی، آبخوان ساحلی و به‌تبع آن خلیج فارس را در معرض آلودگی زیرسطحی قرار داده است. بنابراین، تمرکز بر مناطق ساحلی و

اجرای برنامه‌های پایش مستمر آلودگی‌ها به‌عنوان یک اولویت زیست‌محیطی ضروری است.

تحلیل داده‌های حاصل از نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها نشان داد که غلظت آلاینده‌های خاک در مناطق حساس، مانند مجاورت فلرها (مشعل‌ها)، مخازن و واحد های عملیاتی بالاتر بوده و تحت تأثیر فرآیندهای محیطی همچون بارش‌های فصلی و شست‌وشوی اتمسفری قرار دارند. با در نظر گرفتن حداکثر غلظت بنزن در هوای منطقه مورد مطالعه که ۱۱/۵ میکروگرم بر متر مکعب بود بنابراین تائید می‌شود منشا آلودگی بنزن شناسایی شده در خاک ناشی از فرایند شستشوی اتمسفری می‌باشد.

بر اساس نتایج نمونه‌برداری و تحلیل‌های انجام‌شده از آب زیرزمینی، شواهدی از آلودگی قابل‌توجه مرتبط با آلاینده‌های هیدروکربنی در منطقه مشاهده نشد، به‌جز در چاه EN-SP-005 که آلوده به هیدروکربن‌های زنجیری با غلظت ۲۶ میکروگرم بر لیتر و ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) با غلظت ۲۲ میکروگرم بر لیتر شناسایی شد. این آلودگی‌های ثبت‌شده ناشی از اثرات شستشوی اتمسفری هستندکه به مرور زمان آلاینده‌ها از خاک شسته شده و به آب‌زیزمینی نفوذ پیدا کرده است. همچنین، افزایش میزان pH در سه چاه EN-SP-001، EN-SP-002 و EN-SP-006 به‌عنوان یک موضوع قابل‌توجه مطرح است که با ورود ترکیبات قلیایی مانند مواد کاستیک مورد استفاده در فرآیندهای صنعتی مرتبط است.

مراجع

Al-Suwaiyan, M.S., Bashir, K., Aiban, S.A., Ishaq, A.M., 2002. Analytical model to quantify crude oil spill volume in sandy layered aquifers. Journal of Environmental Engineering 128(4), 320-326. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:4(320)

Chen, K. F., Kao, C. M., Chen, C.W., Surampalli, R.Y., Lee, M.S., 2010. Control of Petroleum-Hydrocarbon Contaminated Groundwater by Intrinsic and Enhanced Bioremediation. Journal of Environmental Sciences 22(6), 864–871.https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60190-X.

Du, M., Li, M., Liu, W., Shi, M., Li, X., Xing, X., Qi, S., 2025. Field and Laboratory Study on the Distribution, Fate, and Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Loess Porous Medium at a Refinery Polluted Site: Understanding the Soil–Groundwater Interface. Organic Geochemistry 200, 104902. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2024.104902.

Dickhut, R.M., Gustafson, K.E., 1995. Atmospheric Washout of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Southern Chesapeake Bay Region. Environmental Science & Technology 29(6), 1518–1525. https://doi.org/10.1021/es00006a013.

Esmaeili, M., Nikpour, Y., 2015. Investigation and measurement of PCB, PAH, and heavy metal compounds in the waters of the Persian Gulf in the Assaluyeh and Bandar Abbas region. M.Sc. Thesis, Department of Marine Chemistry, Faculty of Marine and Oceanic Sciences, Khorramshahr University of Marine Science and Technology.

Gupta, A., Jha, A.K., Singh, A.K., Rajput, P., Gupta, T., 2020. Distribution of BTEX in Soils of an Urban Area: Kanpur Region, India. Journal of Energy and Environmental Sustainability 9, 61-66. DOI: 10.47469/JEES.2020.v09.100099

Gupta, P.K., Goel, M., Gupta, S.K., Bhargava, R.N., 2022. Fate, transport, and bioremediation of PAHs in experimental domain: An overview of current status and future prospects. Advances in remediation techniques for polluted soils and groundwater, 125-139. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823830-1.00017-1.

Jamali Dizaji, M., 2022. Numerical modeling of groundwater flow and pollutant transport in the Assaluyeh aquifer. M.Sc. Thesis, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, University of Tehran.

Japan International Cooperation Agency (JICA). 2014. The project for strengthening environmental management in petroleum industry in Persian Gulf and its coastal area. Islamic Republic of Iran, Ministry of Petroleum, Health, Safety and Environmental Department.

Khalefah, A.R.M., Omran, I.I., Al-Waily, M.J.,2024. Environmental Impact of Petroleum Refinery Effluent on Groundwater Pollution: A Case Study of Maysan Refinery, Iraq. Salud, Ciencia y Tecnología-Serie de Conferencias 3, 844-844.

Khodaei, K., Tabani, H., Shahsavari, A., Ghorashi, S., Boslik, Z., Rezazadeh, B., Mokhtari, M., 2021. Separation of petroleum pollution halos in groundwater in the industrial area of southern Tehran.

Lerner, D.N., Kueper, B.H., Wealthall, G.P., Smith, J. W.N., Leharne, S.A., 2003. An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface.

Li, Y., Duan, X.,2024. Wet deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in a remote area of Central South China from 2014 to 2017. Atmospheric Science Letters 25(3), e1201. https://doi.org/10.1002/asl.1201

Monfared Estahbanati, M., Hasanlu, M., Rousta, H., 2016. Investigation of air pollution and identification of suitable areas for vegetation expansion using spatial data (Case study: Assaluyeh County). National Geomatics Conference.

Nambi, I.M., Rajasekhar, B., Loganathan, V., RaviKrishna, R., 2017. An assessment of subsurface contamination of an urban coastal aquifer due to oil spill. Environmental monitoring and assessment 189, 1-17. https://doi.org/10.1007/s10661-017-5833-6.

Nasiri, S., Vaezihir, A., Ahmadishali, J., 2023. Designing soil contamination monitoring network in petroleum refineries by XGBoost weighting and geostatistical facility allocation methods. Environmental Science and Pollution Research 30(56), 118377-118395. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30452-5.

Nasrabadi, T., Ruegner, H., Schwientek, M., Ghadiri, A., Hashemi, S.H., Grathwohl, P., 2022. Dilution of PAHs loadings of particulate matter in air, dust and rivers in urban areas: A comparative study (Tehran megacity, Iran and city of Tübingen, SW-Germany). Science of the Total Environment 806, 151268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151268

Nayeb, F., 2024. Investigation of the Assaluyeh coastal aquifer in the Arya Sasol petrochemical zone and assessment of hydrocarbon contamination risk. M.Sc. Thesis, Department of Earth Sciences, University of Tabriz.

Pankow, J.F., Cherry, J.A., 1996. Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: History, behavior, and remediation 362. Portland, OR: Waterloo Press.

Ravindra, K., Thind, P. S., Mor, S., Singh, T., Mor, S.,2019. Evaluation of groundwater contamination in Chandigarh: Source identification and health risk assessment. Environmental Pollution 255, 113062. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113062.

Rhoades, C., Binkley, D.,1996. Factors influencing decline in soil pH in Hawaiian Eucalyptus and Albizia plantations. Forest Ecology and Management 80(1-3), 47-56. https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03646-6.

Rivett, M.O., Wealthall, G.P., Dearden, R.A., McAlary, T.A., 2011. Review of unsaturated-zone transport and attenuation of volatile organic compound (VOC) plumes leached from shallow source zones. Journal of Contaminant Hydrology 123(3-4), 130-156. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.12.013.

Taghavi, A., Najafi, M., Etemad Saeid, N., Sedigh, M., 2017. Deformation history in the old Fars foreland, southeastern Zagros Fold-and-Thrust Belt. Journal of Earth Sciences 1.

Vaezi Hir, A., Mohammadzadeh, M.,2022. Identification of LNAPL petroleum pollutants in the Bandar Abbas refinery aquifer. Journal of Human and Environment, 59, Winter 2022.

Zhu, H., Chen, Y., Ruan, Z., Wang, H., Liu, D., Zhao, M., 2025. Comprehensive characterization of volatile organic compounds in Chinese chemical industry park soils: Spatial variation, source identification, and health risk assessment. Journal of Environmental Sciences 155, 48-59. DOI

10.1016/j.jes.2024.06.035.

Zhang, P., Chen, Y.,2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: A review. Science of the Total Environment 605, 1011-1020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.247.