Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 107-130

https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.605210.1150

Assessment of the impact of wastewater effluent on groundwater resources in Cretaceous and Neogene formations (Sanandaj and Marivan Plains, Iran)

Ali Abbasi[1], Hossein Hassapour Darvishi[2*], Reza Shirin Abadi[3]

[1]PhD Student, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[2] Associate Professor, Department of Water Resources Management, Shahr-e Qods Branch, Islamic Azad University, Shahr-e Qods, Iran

[3] Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Corresponding Author's E-mail: hhassanpour@iau.ac.ir

Received**: 01 Oct. 2026** Accepted**: 28 Oct. 2026**
Revised**: 17 Oct. 2026** Published**: 25 Mar. 2025**

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This study compares Cretaceous and Neogene formations for natural wastewater treatment and protection of deep aquifers in Kurdistan, Iran. Field, laboratory, and hydrogeological data were integrated from downstream of Sanandaj and Marivan wastewater treatment plants. Effluent electrical conductivity was about 2430 µS/cm, while groundwater values reached 3836–3858 µS/cm. Groundwater pH ranged from 7.1 to 7.4, nitrate from 0.299 to 2.38 mg/L, and COD from 10 to 50 mg/L. Fecal coliform declined from >400 MPN/100 mL in effluent to zero in some springs. Tracer travel time was about 5 days in Cretaceous but >30 days in Neogene sediments. Fractures and secondary porosity in Cretaceous caused rapid pollutant transport, whereas the Neogene matrix provided greater adsorption, ion exchange, and natural attenuation. Therefore, Neogene sediments are safer and more suitable for artificial recharge and aquifer protection.

Keywords: Neogene; Cretaceous; Wastewater; Groundwater; Contaminant tracing; Marivan, Sanandaj

Introduction: Water scarcity and poor management have intensified pressure on freshwater resources, making wastewater reuse essential (Qadir et al., 2010). Soil aquifer treatment (SAT) improves effluent quality through physical, chemical, and biological processes in soil (Saroj and Kennedy, 2017; Pi and Wang, 2006). Its efficiency depends on sediment properties such as porosity, hydraulic conductivity, and microbial activity (Zarei et al., 2021). Fractured formations transmit pollutants rapidly, whereas porous media provide longer contact time and greater attenuation (Rahimi et al., 2020; Falahatkar et al., 2021). In Iran, Kurdistan Province offers a unique comparison because Sanandaj treatment plant discharges into Cretaceous calcareous and fractured sediments, while Marivan treatment plant discharges into Neogene alluvial and porous sediments (Hosseinpour et al., 2011). Previous studies have mainly examined wastewater reuse or groundwater quality separately (Al-Baji and Asgari, 2017; Anbari and Nouri, 2018), and a systematic comparison of Cretaceous and Neogene units for artificial recharge is lacking. This study therefore evaluates the quantitative and qualitative effects of treated municipal wastewater on groundwater in these two contrasting geological settings. It integrates field, laboratory, and hydrogeological data to identify the more suitable formation for sustainable effluent disposal and aquifer protection.

Methodology: The study was conducted downstream of Sanandaj and Marivan wastewater treatment plants, Kurdistan Province, Iran. Sanandaj is dominated by fractured Cretaceous limestone, marl, shale, and sandstone (Fig. 1), while Marivan comprises Neogene conglomerate, sandstone, silt, and clay (Fig. 3). Effluent transfer and discharge pathways are shown in Fig. 2. Basic data included geological maps, meteorological records, groundwater levels, and pre- and post-operation data. Sampling covered effluent, springs, and wells. Physical and chemical parameters included pH, EC, TDS, major ions, nitrate, phosphate, and heavy metals by ICP-MS; effluent chemistry and heavy metals are presented in Tables 2 and 3. Biological parameters (BOD, COD, fecal and total coliform) are summarized in Table 1. Hydraulic tests measured porosity, hydraulic conductivity, and infiltration rate, with

porosity and tracer travel time compared in Figs. 11 and 12. Double-ring infiltrometer and fluorescent tracer tests determined infiltration, flow direction, and travel time (Fig. 13). Groundwater hydrographs and spring discharge variations are shown in Figs. 4–6. Spatial nitrate and EC variations appear in Figs. 9 and 10, and hydrochemical types were determined using Piper and Stiff diagrams (Figs. 7 and 8). Data analysis included hydrographs, contour maps, removal efficiency, and comparative assessment.

Results and Discussion: Quantitative data showed that effluent increased aquifer recharge in both areas. In Sanandaj, Cretaceous springs such as Tapeh Rash, Goizkeh, and Kani Hoz increased in discharge or became perennial after 2009, even when rainfall decreased. In Marivan, observation wells and contour maps showed rising water levels in Darzian, Rikhalan, Barghaleh, and Kal, confirming indirect artificial recharge. Effluent electrical conductivity was about 2430 µS/cm, while spring and well values averaged 3836 and 3585 µS/cm, respectively. Groundwater pH ranged from 7.1 to 7.4. In Cretaceous sediments, rapid fracture flow caused chloride, sodium, and nitrate to increase near the release point, sometimes exceeding effluent concentrations. Arsenic and lithium also increased in Tapeh Rash spring, indicating limited heavy-metal removal. BOD, COD, and coliform decreased in some springs, but dissolved ions and metals remained a risk. In Neogene sediments, chloride and sodium decreased away from the discharge point, nitrate fell to about 12 mg/L compared with 30 mg/L in effluent, and COD dropped below 10 mg/L. Fecal coliform reached zero in most wells, and heavy metals remained mostly below drinking water standards. Effective porosity was about 20% in Neogene sediments but less than 5% in Cretaceous sediments. Hydraulic conductivity was 10^{-4}–10^{-3} m/s in Cretaceous and 10^{-6}–10^{-5} m/s in Neogene. Infiltration rate averaged 15 cm/h in Cretaceous and 2.5 cm/h in Neogene. Tracer travel time to 30 m depth was about 5 days in Cretaceous but more than 30 days in Neogene. Nitrate removal was about 50% in Neogene and nearly zero in Cretaceous. These results show that Neogene sediments provide longer contact time, adsorption, ion exchange, denitrification, and biological degradation, making them safer for artificial recharge and deep aquifer protection. Cretaceous sediments require tertiary treatment and advanced monitoring, preferably with deep injection wells.

Conclusion: This study compared Cretaceous and Neogene formations for natural treatment of municipal wastewater and protection of groundwater in Kurdistan, Iran. Both areas showed increased aquifer recharge after effluent infiltration, but their mechanisms and risks differed. Cretaceous sediments, with fractures and low matrix porosity, allowed rapid pollutant transport; chloride, sodium, nitrate, and some metals increased in nearby springs. Neogene sediments, with higher effective porosity, lower hydraulic conductivity, and clay layers, provided longer contact time and greater adsorption, ion exchange, denitrification, and biological degradation. Nitrate, COD, coliform, and heavy metals decreased significantly downstream of Marivan. Tracer travel time was about 5 days in Cretaceous but over 30 days in Neogene. Therefore, Neogene sediments downstream of Marivan are more suitable for sustainable artificial recharge, while Cretaceous sediments require tertiary treatment, deep injection wells, and continuous monitoring.

© 2025 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۱۳۰-۱۰۷
https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.605210.1150

ارزیابی تاثیر پساب فاضلاب بر منابع آب زیرزمینی در سازندهای کرتاسه و نئوژن (دشت‌های سنندج و مریوان، ایران)

علی عباسی[۱]، حسین حسن‌پور درویشی[۲*]، رضا شیرین آبادی[۳]

[۱]دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
[۲]دانشیار، گروه مدیریت منابع آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرقدس، ایران
[۳]دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: hhassanpour@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۶
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۵ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده: استفاده از ظرفیت پالایش طبیعی سازندهای زمین‌شناسی برای کاهش بار آلاینده‌های پساب، رویکردی مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی است. در این پژوهش، کارایی دو محیط زمین‌شناسی کرتاسه و نئوژن در کنترل مهاجرت آلاینده‌ها و بهبود کیفیت پساب نفوذی در دشت ریخلان مریوان بررسی شده است. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی پساب حدود ۲۴۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده، در حالی‌که میانگین آن در چشمه‌ها و چاه‌ها به‌ترتیب ۳۸۳۶ و ۳۵۸۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر گزارش شد . pH آب زیرزمینی بین ۷.۱ تا ۷.۴ و غلظت نیترات بین ۰.۲۹۹ تا ۲.۳۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر متغیر بود .COD از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در پساب به ۱۰ تا ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه‌های پایین‌دست کاهش یافت و کلیفرم مدفوعی نیز از بیش از ۴۰۰ MPN/100 میلی‌لیتر به صفر در برخی چشمه‌ها رسید. زمان رسیدن ردیاب در کرتاسه حدود ۵ روز و در نئوژن بیش از ۳۰ روز بود؛ بنابراین نئوژن از نظر تاخیر انتقال آلودگی حدود ۶ برابر ایمن‌تر ارزیابی شد. شکستگی‌ها و تخلخل ثانویه در کرتاسه موجب انتقال سریع‌تر آلاینده‌ها می‌شوند، در حالی که ساختار ماتریسی و هدایت هیدرولیکی پایین‌تر نئوژن، فرصت بیشتری برای جذب، تبادل یونی و کاهش طبیعی آلاینده‌ها فراهم می‌کند. در مجموع، نئوژن محیط مناسب‌تری برای پالایش طبیعی و حفاظت از آبخوان عمیق است.

کلیدواژه ها: نئوژن، کرتاسه، پساب، آب زیرزمینی، ردیابی آلاینده، مریوان، سنندج

۱- مقدمه

کمبود آب و تخریب محیط زیست، از بزرگ‌ترین چالش‌های جوامع بشری در قرن حاضر به شمار می‌رود. افزایش جمعیت، ارتقاء سطح رفاه، تغییرات اقلیمی و مدیریت نادرست منابع، فشار بر منابع آب شیرین را به‌طور فزاینده‌ای تشدید کرده است. در چنین شرایطی، تصفیه و بازچرخانی فاضلاب به‌عنوان یکی از راهکارهای اساسی در مدیریت پایدار منابع آب مطرح می‌شود. استفاده مجدد از پساب در بخش‌های کشاورزی، صنعت و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، ضمن تامین بخشی از نیاز آبی، از هدررفت منابع ارزشمند جلوگیری می‌کند. با این حال، دفع و استفاده مجدد از پساب

بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی محیط، می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری به دنبال داشته باشد.

تجربه جهانی نشان می‌دهد که سیستم‌های تغذیه مصنوعی آبخوان (SAT) با بهره‌گیری از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، کیفیت پساب را بهبود می‌بخشند. در این سیستم‌ها، عبور پساب از منطقه غیراشباع و آبخوان، منجر به حذف آلاینده‌های آلی، نیتروژن، فسفر، فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا می‌شود. با وجود این، کارایی این فرآیندها به‌شدت به ویژگی‌های رسوبات بستر وابسته است. رسوبات با تخلخل مناسب، سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی و فعالیت میکروبی، تصفیه طبیعی موثرتری ارائه می‌دهند؛ در حالی که رسوبات شکستگی‌دار با هدایت هیدرولیکی بالا، امکان انتقال سریع آلاینده‌ها به آبخوان‌های عمیق را فراهم می‌کنند.

در ایران، استان کردستان به دلیل وجود تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری سنندج و مریوان و تخلیه پساب آن‌ها در پهنه‌هایی با ویژگی‌های زمین‌شناسی متمایز، بستر مناسبی برای یک مطالعه مقایسه‌ای فراهم کرده است. تصفیه‌خانه سنندج از سال ۱۳۸۸ به بهره‌برداری رسیده و پساب آن در رسوبات کرتاسه (عمدتا آهکی و شکستگی‌دار) رهاسازی می‌شود. در نقطه مقابل، تصفیه‌خانه مریوان پساب خود را در رسوبات نئوژن (آبرفتی و متخلخل) دشت‌های زیربار و ریخالن تخلیه می‌کند. تفاوت بنیادین این دو واحد رسوبی از نظر تخلخل، هدایت هیدرولیکی، ساختار شکستگی، ظرفیت بافرینگ و فعالیت بیولوژیکی، پیامدهای کاملا متفاوتی را بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی رقم زده است.

مروری بر پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات صورت‌گرفته، عمدتا بر جنبه‌های کیفی یا کمی به‌صورت مجزا تمرکز داشته‌اند. در سطح داخلی، حسین‌پور و همکاران (۱۳۹۰) تاثیر فاضلاب خام و تصفیه‌شده را بر تغییرات شیمیایی خاک بررسی کردند؛ ناصری و همکاران (۱۳۹۱) و الباجی و عسگری (۱۳۹۶) به‌ترتیب کیفیت پساب تصفیه‌خانه‌های اردبیل و شهرکرد را برای مصارف کشاورزی ارزیابی نمودند و انبیر و نوری (۱۳۹۷) کیفیت پساب تصفیه‌خانه اکباتان را برای آبیاری فضای سبز مطالعه کردند. در سطح بین‌المللی نیز، Singhو همکاران (۲۰۱۲) اثر پساب بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های سنگین را بررسی کردند؛ Pi و) Wang ۲۰۰۶ (به بررسی میدانی فناوری تصفیه فاضلاب شهری برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی پرداختند؛ Al-Madahi و همکاران (۲۰۱۵) قابلیت استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری در الجزایر را مطالعه کردند و Saroj و همکاران (۲۰۱۷) سیستم SAT را به‌عنوان یک سیستم حذف چند آلاینده سازگار با محیط زیست معرفی نمودند.

با وجود این مطالعات، شکاف پژوهشی مهمی در زمینه مقایسه جامع و سیستماتیک اثرات کمی و کیفی پساب بر منابع آب زیرزمینی در دو واحد رسوبی مختلف (کرتاسه و نئوژن) وجود دارد. به‌ویژه اینکه تاکنون به‌طور مستند مشخص نشده است کدام یک از این دو واحد از نظر کارایی تغذیه مصنوعی و حفاظت از کیفیت آب زیرزمینی برتری دارند. همچنین، نقش ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی مانند تخلخل، هدایت هیدرولیکی، ساختار شکستگی و ظرفیت بافرینگ در سرنوشت آلاینده‌ها، نیازمند تحلیل مقایسه‌ای دقیق‌تری است. از این رو، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثرات کمی و کیفی پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری سنندج و مریوان بر منابع آب زیرزمینی با دید مقایسه‌ای بین رسوبات کرتاسه و نئوژن است. برای این منظور، داده‌های میدانی (آزمایش‌های نفوذ، ردیابی، نمونه‌برداری آب و پساب)، داده‌های آزمایشگاهی (جذب سطحی، تخلخل، هدایت هیدرولیکی) و مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی تلفیق شده‌اند. نوآوری این مطالعه، ارائه چارچوبی جامع برای مقایسه دو واحد رسوبی از منظر کمی و کیفی، تعیین سهم فرآیندهای تصفیه طبیعی و ارائه توصیه‌های مدیریتی برای انتخاب بستر مناسب تغذیه مصنوعی است.

۲- روششناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان کردستان، غرب ایران، شامل

دو محدوده مجزا در پایین‌دست تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری سنندج و مریوان است. این دو محدوده از نظر زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ویژگی‌های رسوبی تفاوت بنیادینی دارند و به‌عنوان بستر مقایسه‌ای رسوبات کرتاسه و نئوژن انتخاب شده‌اند.

محدوده سنندج

شهرستان سنندج مرکز استان کردستان با ارتفاع متوسط ۱۴۸۰ متر از سطح دریا و بارش سالانه حدود ۵۰۰ میلی‌متر، در زون ساختاری سنندج–سیرجان قرار دارد. زمین‌شناسی منطقه عمدتا شامل رسوبات کرتاسه (آهک‌های ضخیم‌لایه، مارن، شیل آهکی و ماسه‌سنگ) است که به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی شدید، شبکه گسترده‌ای از شکستگی‌ها و گسل‌ها در آن توسعه یافته است (شکل ۱). تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج از سال ۱۳۸۸ به بهره‌برداری رسیده و پساب خروجی آن با دبی متوسط حدود ۱۰۰ لیتر بر ثانیه، پس از انتقال به سد ژاوه، در رودخانه گاورود و اراضی کشاورزی پایین‌دست رهاسازی می‌شود (شکل ۲). این پساب در نهایت در رسوبات کرتاسه نفوذ کرده و آبخوان زیرزمینی منطقه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. موقعیت چشمه‌ها و چاه‌های مورد بررسی در این محدوده نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

محدوده مریوان

شهرستان مریوان در غرب استان کردستان و در مجاورت دریاچه زریبار واقع شده است. بارش سالانه این منطقه بیش از ۷۵۰ میلی‌متر و اقلیم آن مدیترانه‌ای مرطوب است. زمین‌شناسی محدوده پایین‌دست تصفیه‌خانه مریوان، عمدتا شامل رسوبات نئوژن (کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلت و رس) در دشت‌های زیربار و ریخالن است (شکل ۳). این رسوبات دارای تخلخل اولیه بالا، لایه‌بندی نسبتا منظم و افقی و ظرفیت جذب سطحی قابل توجه هستند. تصفیه‌خانه فاضلاب مریوان پساب خود را در دشت‌های مذکور تخلیه می‌کند و از این طریق بر منابع آب زیرزمینی منطقه اثر می‌گذارد.

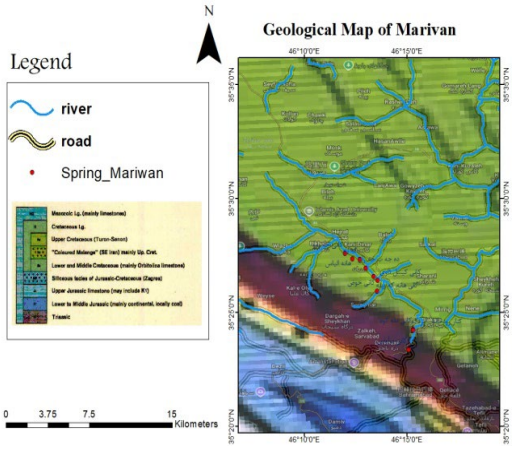


Fig. 1 geological map of sanandaj

شکل ۱ نقشه زمین شناسی سنندج

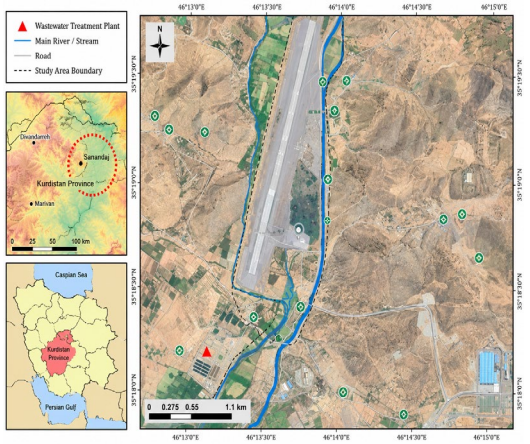


Fig. 2 Location of the Sanandaj Wastewater Treatment Plant, the Effluent Transfer Route to Zhaveh Dam, and Its Discharge Pathway into the Gavehroud River

شکل ۲ موقعیت تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج، محل انتقال پساب به سد ژاوه و مسیر رها سازی آن در رودخانه گاورود

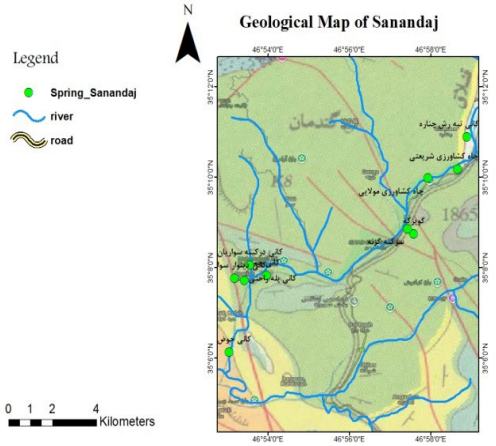


Fig. 3 geological map of Marivan

شکل ۳ نقشه زمین شناسی مریوان

۲-۲- داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل دو دسته اصلی داده‌های پایه و داده‌های میدانی–آزمایشگاهی است:

۱. داده‌های پایه: شامل نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، داده‌های هواشناسی (بارش سالانه و ماهانه) از ایستگاه‌های نزدیک به تصفیه‌خانه‌ها در یک دوره آماری ۲۰ تا ۲۸ ساله، داده‌های تراز آب زیرزمینی از شبکه پیزومتری و چاه‌های مشاهده‌ای (در محدوده مریوان شامل ۱۲ پیزومتر و ۱۹۴ حلقه چاه و در محدوده سنندج شامل ۵ دهنه چشمه و چندین چاه کشاورزی)، و داده‌های دبی چشمه‌های منطقه قبل و بعد از احداث تصفیه‌خانه‌ها.

۲. داده‌های میدانی-آزمایشگاهی: شامل نمونه‌برداری از پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها و منابع آب زیرزمینی (چشمه‌ها و چاه‌ها) در دو محدوده مورد مطالعه. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده عبارتند از: پارامترهای فیزیکی (pH، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول)، یون‌های اصلی (کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کربنات، نیترات و فسفات)، فلزات سنگین (آرسنیک، باریم، کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب، روی و غیره) با دستگاه ICP-MS، پارامترهای بیولوژیکی (BOD، COD و کلیفرم مدفوعی و کل) و پارامترهای هیدرولیکی (تخلخل، هدایت هیدرولیکی، نرخ نفوذ و زمان حرکت ردیاب). به عنوان نمونه، در جدول ۱ نتایج

۲-۳- روش تحقیق

روش تحقیق این پژوهش در قالب یک مطالعه مقایسه‌ای–تحلیلی و با تلفیق مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی انجام شده است. مراحل اجرایی پژوهش به شرح زیر است:

۱. مطالعات پایه و بازدید میدانی: در ابتدا با جمع‌آوری اطلاعات پایه شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، داده‌های اقلیمی و هیدروژئولوژیکی، محدوده‌های مورد مطالعه تعیین شد. سپس بازدیدهای میدانی متعددی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب سنندج و مریوان، مسیر انتقال و رهاسازی پساب، و ایستگاه‌های نمونه‌برداری (چشمه‌ها و چاه‌ها) انجام گرفت. در این بازدیدها، موقعیت دقیق ایستگاه‌ها با GPS ثبت و ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه بررسی شد.

- نمونه‌برداری و تحلیل آزمایشگاهی: نمونه‌برداری از پساب خروجی تصفیه‌خانه‌ها و منابع آب زیرزمینی در دو دوره زمانی (قبل و بعد از احداث تصفیه‌خانه) انجام شد.
- نمونه‌های آب در ظروف پلی‌اتیلن جمع‌آوری و پس از انتقال به آزمایشگاه، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مطابق با روش‌های استاندارد (APHA) اندازه‌گیری شد.

۲. غلظت فلزات سنگین با دستگاه ICP-MS تعیین گردید. پارامترهای بیولوژیکی شامل BOD، COD و کلیفرم با روش‌های استاندارد میکروبیولوژیکی سنجش شد.

جدول ۱ نتایج آنالیز بیولوژیکی

Table 1 Biological Analysis Results

Name	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	MPN/100
Pasab	18	50	400
Cheshmeh Tappeh Rash	5	18	16.1
Cheshmeh Sarkaneh	2	10	9.2
Cheshmeh Gowiz Keh	4	20	2.2
Cheshmeh Kani Howz	0	0	16.1
Cheshmeh Kani Cham	0	0	9.2
Cheshmeh Kani Chermo	0	0	16.1
Cheshmeh Haneh Elias	0	0	16.1
Cheshmeh Haneh Keh Vileh	0	0	16.1
Cheshmeh Kani Baravayi	0	0	16.1
Darzian Village Bridge Piezometer	2	10	0
Rikhlan Village Piezometer	9	40	16.1
Bar Qaleh Village Piezometer	5	20	16.1

۳. همچنین، آزمایش‌های تعیین تخلخل و هدایت هیدرولیکی بر روی نمونه‌های رسوبی کرتاسه و نئوژن در آزمایشگاه انجام گرفت.

- ترسیم نمودارهای پایپر و استیف برای تعیین تیپ هیدروشیمیایی آب زیرزمینی و پساب.

قایسه کمی و کیفی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در پساب و آب زیرزمینی در دو واحد رسوبی.

- محاسبه کارایی حذف آلاینده‌ها (نیترات، COD، BOD، کلیفرم و فلزات سنگین) در عبور از منطقه غیراشباع و اشباع.
- تحلیل مقایسه‌ای تخلخل، هدایت هیدرولیکی، نرخ نفوذ و زمان حرکت ردیاب بین رسوبات کرتاسه و نئوژن.
- ارزیابی توانایی سیستم SAT در تصفیه طبیعی پساب و ارائه توصیه‌های مدیریتی برای انتخاب بستر مناسب تغذیه مصنوعی.

۲-۴- تحلیل مقایسه‌ای و ارزیابی نهایی

برای مقایسه جامع دو واحد رسوبی، از شاخص‌های کمی و کیفی متعددی استفاده شد. شاخص‌های کمی شامل تخلخل موثر، هدایت هیدرولیکی، نرخ نفوذ میدانی و زمان حرکت ردیاب به آبخوان عمیق بودند. شاخص‌های کیفی شامل کارایی حذف نیترات، فسفر، فلزات سنگین، مواد آلی (BOD و COD) و کلیفرم‌ها در طول عبور پساب از منطقه غیراشباع بود. همچنین، پایداری ساختاری، پیش‌بینی‌پذیری رفتار هیدرودینامیکی و ریسک آلودگی آبخوان‌های عمیق به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری در انتخاب بستر بهینه تغذیه مصنوعی در نظر گرفته شد. در نهایت، با تلفیق نتایج میدانی، آزمایشگاهی و تحلیل‌های هیدروژئولوژیکی، چارچوبی علمی برای انتخاب مناسب‌ترین واحد زمین‌شناسی جهت دفع پایدار پساب تصفیه‌خانه‌های شهری در منطقه کردستان ارائه گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثرات کمی پساب بر منابع آب زیرزمینی

بررسی داده‌های کمی منابع آب زیرزمینی در دو محدوده مورد مطالعه نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه پساب تصفیه‌خانه‌ها بر رفتار هیدرولیکی آبخوان است. در محدوده سنندج (رسوبات کرتاسه)، هیدروگراف تغییرات دبی چشمه‌های پایین‌دست تصفیه‌خانه حاکی از آن است که پس از بهره‌برداری از تصفیه‌خانه در سال ۱۳۸۸، دبی برخی چشمه‌ها که پیش از آن به‌طور فصلی خشک می‌شدند، به‌طور دائمی افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، چشمه تپه‌رش که حتی در سال‌های پربارش نیز فاقد آبدهی بوده، پس از انتقال پساب به بند پایین‌دست در سال ۱۳۹۴ احیا شده است. همچنین، چشمه گویزکه (شکل ۵) و چشمه کانی حوض (شکل ۶) روند افزایشی دبی را نشان می‌دهند، در حالی که میزان بارش سالانه در همین دوره روند کاهشی داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش دبی چشمه‌ها عمدتا ناشی از نفوذ پساب به آبخوان و تغذیه مصنوعی غیرمستقیم است، نه افزایش بارش.

در محدوده مریوان (رسوبات نئوژن)، داده‌های تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای (شکل ۴) نشان‌دهنده روند صعودی سطح ایستابی در روستاهای درزیان، ریخالن، برقلعه و کال پس از احداث تصفیه‌خانه است. این افزایش تراز، به‌ویژه در فصول خشک که بارش موثر وجود ندارد، تاییدی بر نقش پساب در تغذیه آبخوان است. در مجموع، اثر کمی پساب بر منابع آب زیرزمینی در هر دو منطقه مثبت و قابل توجه است، اما مکانیزم آن در رسوبات کرتاسه (نفوذ سریع از شکستگی‌ها) با رسوبات نئوژن (نفوذ تدریجی در ماتریس متخلخل) متفاوت است.

۳-۲- اثرات کیفی پساب بر منابع آب زیرزمینی

کیفیت پساب خروجی

نتایج آنالیز پساب تصفیه‌خانه‌های سنندج و مریوان (جدول ۲) نشان می‌دهد که پساب خروجی دارای هدایت الکتریکی

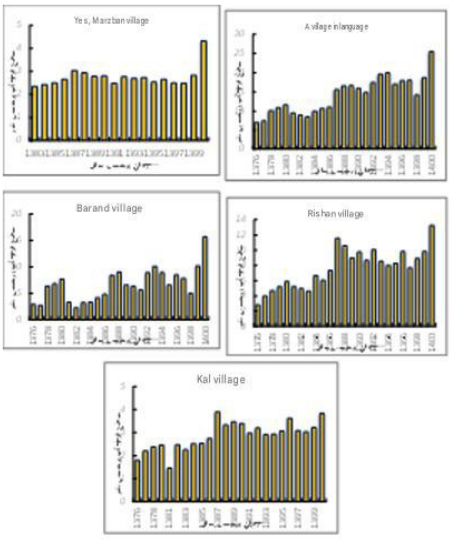


Fig. 4 Groundwater Level Data of Marivan Observation Wells

شکل ۴ داده‌های تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای مریوان

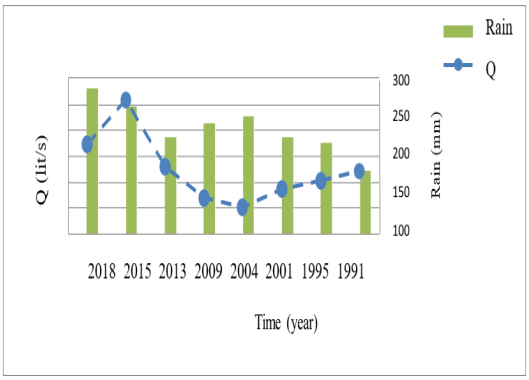


Fig. 5 Discharge Variations of the Goizkeh Spring

شکل ۵ تغییرات دبی چشمه گویزکه

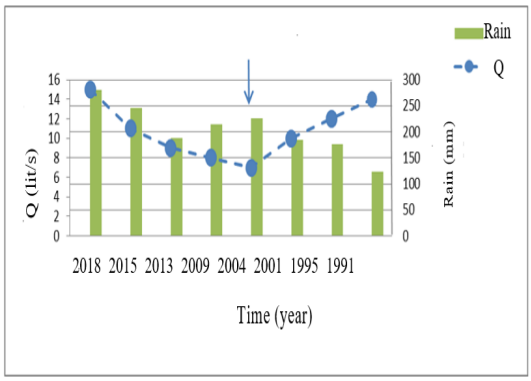


Fig. 6 Discharge Variations of the Kani-Howz Spring

شکل ۶ تغییرات دبی چشمه کانی حوض

متوسط ۳۸۳۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، pH در محدوده ۱/۷ تا ۴/۷، و غلظت یون‌های اصلی شامل کلر (۲/۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر)، سدیم (۹/۳۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر)، کلسیم (۵/۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) و سولفات (۲/۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) است. غلظت نیترات در پساب حدود ۵۳۲/۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و فسفات ۴۲۸/۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر اندازه‌گیری شده است. تیپ هیدروشیمیایی پساب بر اساس نمودار پایپر (شکل ۷) و استیف (شکل ۸) از نوع کلروره–سدیک است. آنالیز فلزات سنگین (جدول ۳) نشان می‌دهد که غلظت آرسنیک، باریم، کادمیم، کروم، مس، نیکل و سرب در پساب عمدتا (۲/۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) است. غلظت نیترات در پساب حدود ۵۳۲/۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر و فسفات ۴۲۸/۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر اندازه‌گیری شده است. تیپ هیدروشیمیایی پساب بر اساس نمودار پایپر (شکل ۷) و استیف (شکل ۸) از نوع کلروره–سدیک است. آنالیز فلزات سنگین (جدول ۳) نشان می‌دهد که غلظت آرسنیک، باریم، کادمیم، کروم، مس، نیکل و سرب در پساب عمدتا پایین‌تر از استانداردهای سازمان محیط زیست ایران برای استفاده مجدد در کشاورزی است، اما غلظت برخی عناصر مانند لیتیم و استرانسیم قابل توجه است. پارامترهای بیولوژیکی نشان‌دهنده BOD حدود ۱۸ میلی‌گرم بر لیتر، COD حدود ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و کلیفرم مدفوعی بالاتر از ۴۰۰ MPN/100mL است که لزوم تصفیه پیشرفته‌تر را آشکار می‌کند.

کیفیت آب زیرزمینی در محدوده سنندج (رسوبات کرتاسه)

در محدوده پایین‌دست تصفیه‌خانه سنندج، تغییرات کیفی آب زیرزمینی حاکی از نفوذ سریع و بدون فیلتراسیون موثر پساب است. مقادیر هدایت الکتریکی در چشمه‌های نزدیک به محل رهاسازی پساب (مانند تپه‌رش و هانه‌الیاس) به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و به مقادیر پساب نزدیک شده است (شکل ۹). غلظت کلر و سدیم نیز در همین چشمه‌ها بالاترین مقدار را دارد و با فاصله گرفتن از تصفیه‌خانه، روند

جدول ۲ نتایج آنالیز پساب خروجی از تصفیه خانه سنندج و مریوان

Table 2 Results of the Analysis of Effluent from the Sanandaj and Marivan Treatment Plants

Effluent		Effluent		Effluent	
EC	2430	As (ug/l)	5/52	BOD (mg/l)	18
pH	7/24	Ba (ug/l)	27/52	COD (mg/l)	50
HCO3 (meq/l)	1/6	Cr (ug/l)	4/78	MPN/100	<400
CL (meq/l)	8/21	Li (ug/l)	43/29		
SO4 (meq/l)	1/04	Mo (ug/l)	1/89		
NO3 (meq/l)	0/53	Ni (ug/l)	1/70		
PO4 (meq/l)	5/00	Rb (ug/l)	19/41		
Ca (meq/l)	2/82	Sr (mg/l)	1/52		
Mg (meq/l)	2/05	W (ug/l)	3/24		
Na (meq/l)	10/92				
K (meq/l)	0/44				

جدول ۳ فلزات سنگین در ایستگاههای انتخابی

Table 3 Heavy Metals in Selected Stations

Haneh-ye Elyas Spring	Sarkeneh Spring	Wastewater	Tappe Rush Spring	Malleh Kuh Spring	Standard	Element name
0/005	0/003	0/006	0/006	0/075	0/01	Arsenic (As)
0/002	0/005	0/005	0/004	0/001	0/05	Chrome (Cr)
0/005	0/005	0/002	0/001	0/004	0/07	Molybdenum (Mo)
0/001	0/001	0/002	0/001	0/001	0/02	Antimony (Sb)
0/025	0/017	0/029	0/042	0/060	0/7	Barium (Ba)
0/002	0/002	0/002	0/004	0/002	0/07	Nickel (Ni)
Disclosure threshold	Disclosure threshold	Disclosure threshold	Disclosure threshold	Disclosure threshold	0/01	(Pb) Lead

کاهشی نشان می‌دهد. این الگو با جهت جریان آب زیرزمینی و مسیر رهاسازی پساب کاملا مطابقت دارد. در مقابل، چشمه کانی حوض که حوضه آبگیر آن در ارتفاعات شمال‌غربی و دور از مسیر پساب قرار دارد، کمترین مقدار کلر و سدیم را نشان می‌دهد. غلظت نیترات در برخی چشمه‌ها (مانند سرکنه و کانی چرمو) به ۳۸/۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌رسد که بالاتر از پساب است (شکل ۱۰).

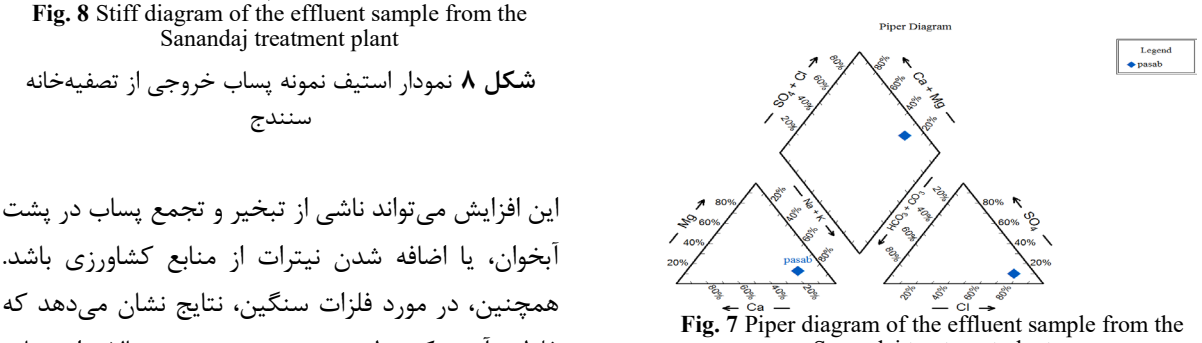


Fig. 7 Piper diagram of the effluent sample from the Sanandaj treatment plant

شکل ۷ دیاگرام پایپر نمونه پساب خروجی از تصفیه‌خانه سنندج

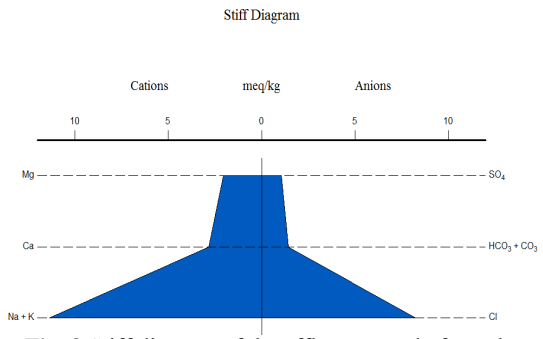


Fig. 8 Stiff diagram of the effluent sample from the Sanandaj treatment plant

شکل ۸ نمودار استیف نمونه پساب خروجی از تصفیه‌خانه سنندج

این افزایش می‌تواند ناشی از تبخیر و تجمع پساب در پشت آبخوان، یا اضافه شدن نیترات از منابع کشاورزی باشد. همچنین، در مورد فلزات سنگین، نتایج نشان می‌دهد که غلظت آرسنیک و لیتیم در چشمه تپه‌رش بالاتر از پساب است که احتمالا به دلیل فرآیندهای تبخیر، تبادل یونی یا

واکنش‌های شیمیایی در منطقه غیراشباع رخ داده است.

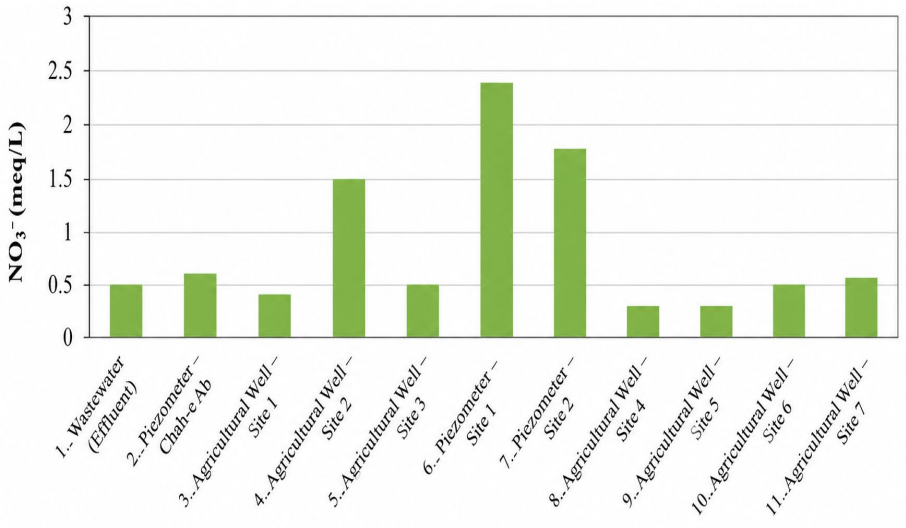


Fig. 9 Nitrate Variations in Selected Stations

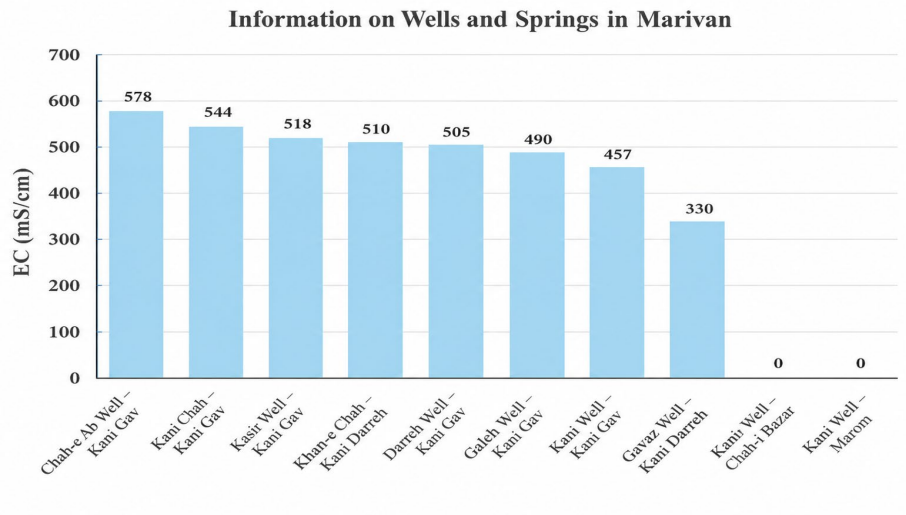


Fig. 10 EC Variations in Selected Stations

شکل ۱۰ تغییرات EC در ایستگاه‌های منتخب

این یافته نشان می‌دهد که عبور پساب از رسوبات کرتاسه نه‌تنها موجب حذف فلزات سنگین نمی‌شود، بلکه در مواردی غلظت آن‌ها را افزایش می‌دهد.

پارامترهای بیولوژیکی در محدوده سنندج کاهش چشمگیری را نشان می‌دهند. نتایج بیانگر آن است که BOD، COD و کلیفرم در چشمه تپه‌رش نسبت به پساب به‌شدت کاهش یافته و در مواردی به صفر رسیده است. این موضوع حاکی از کارایی نسبی سیستم SAT در حذف مواد آلی و بیماری‌زا در منطقه غیراشباع است. هرچند که این کارایی برای یون های محلول و فلزات سنگین بسیار محدود است.

کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مریوان (رسوبات نئوژن)

در محدوده پایین‌دست تصفیه‌خانه مریوان، روند تغییرات کیفی متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد که pH آب زیرزمینی در محدوده ۲/۷ تا ۲/۹ متغیر است و میانگین آن در چاه‌ها (۳۳/۷) کمی بالاتر از پساب (۲۶/۷) است. هدایت الکتریکی در چشمه‌های منطقه به‌طور میانگین ۳۵۸۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است که نسبت به پساب (۳۸۳۶) کاهش یافته است. غلظت کلر و سدیم نیز در چاه‌ها و چشمه‌های دور از محل تخلیه، به‌طور قابل توجهی کمتر از پساب است. این کاهش نشان‌دهنده نقش موثر ماتریس رسوبی نئوژن در جذب سطحی و تبادل یونی است.

مهم‌ترین یافته کیفی در محدوده مریوان، کاهش چشمگیر نیترات و COD است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت نیترات در چاه‌های پایین‌دست به‌طور میانگین ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر است که در مقایسه با پساب (حدود ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر) کاهش یافته است. همچنین نتایج کاهش COD به کمتر از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر را نشان می‌دهد. این کاهش عمدتا ناشی از فرآیند دنیتریفیکاسیون و تجزیه بیولوژیکی در شرایط احیایی محلی است که در رسوبات نئوژن فراهم می‌شود. غلظت فلزات سنگین در چاه‌های محدوده مریوان عمدتا پایین‌تر از استاندارد آب آشامیدنی است و تنها در برخی ایستگاه‌ها (مانند چشمه کانی چرمو) مقادیر جزئی افزایش نشان می‌دهد. کلیفرم مدفوعی نیز در بیشتر چاه‌ها به صفر رسیده است که بیانگر حذف موثر عوامل بیماری‌زا در طول عبور از رسوبات نئوژن است.

۳-۳- مقایسه رفتار رسوبات کرتاسه و نئوژن

تحلیل مقایسه‌ای ویژگی‌های هیدرولیکی و تصفیه‌ای دو واحد رسوبی، تفاوت‌های بنیادین آن‌ها را آشکار می‌کند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تخلخل موثر در رسوبات نئوژن حدود ٪۲۰ (میانگین ٪۲۵–۱۵) است، در حالی که این مقدار برای رسوبات کرتاسه کمتر از ٪۵ برآورد می‌شود. در مقابل، هدایت هیدرولیکی رسوبات کرتاسه به دلیل شبکه شکستگی‌ها بین 10^{-4} تا 10^{-3} متر بر ثانیه متغیر است، در حالی که در رسوبات نئوژن این مقدار بین 10^{-6} تا 10^{-5} متر بر ثانیه قرار دارد. نرخ نفوذ میدانی نیز در کرتاسه به‌طور متوسط ۱۵ سانتی‌متر بر ساعت و در نئوژن ۵/۲ سانتی‌متر بر ساعت اندازه‌گیری شده است.

این تفاوت‌ها پیامدهای مستقیمی بر سرنوشت آلاینده‌ها دارند. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که زمان حرکت ردیاب به عمق ۳۰ متری در رسوبات کرتاسه تنها ۵ روز است، در حالی که در رسوبات نئوژن این زمان به بیش از ۳۰ روز می‌رسد. به عبارت دیگر، نئوژن حدود ۶ برابر ایمن‌تر از کرتاسه عمل می‌کند. کارایی حذف نیترات نیز در نئوژن حدود ٪۵۰ و در کرتاسه تقریبا صفر گزارش شده است. شکل ۱۳ به‌صورت شماتیک تفاوت الگوی جریان در دو محیط را نشان می‌دهد: در کرتاسه، جریان عمدتا از طریق شکستگی‌های عمودی و به‌صورت غیردراسی (preferential flow) رخ می‌دهد که فرصت تماس کافی با ماتریس رسوبی را فراهم نمی‌کند، در حالی که در نئوژن، جریان به‌صورت دارسی و آرام در کل ماتریس توزیع می‌شود و زمان تماس طولانی‌تری برای واکنش‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی ایجاد می‌کند.

از منظر شیمیایی، رسوبات کرتاسه به دلیل غنای کربنات کلسیم، ظرفیت بافرینگ بالایی دارند و می‌توانند نوسانات pH را تعدیل کنند. اما این مزیت در شرایط دفع مداوم پساب اسیدی یا با بار آلی بالا، به تدریج تخلیه شده و ممکن است منجر به انحلال گسترده کربنات‌ها و تخریب ساختار شکستگی‌ها شود.

در مقابل، رسوبات نئوژن با pH خنثی تا کمی قلیایی (۷/۰–۸/۷)، شرایط مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های دنیتریفیکاتور فراهم می‌کنند و ظرفیت جذب سطحی بالاتری به دلیل حضور کانی‌های رسی (اسمکتیت و ایلیت) و مواد آلی خاکی دارند. سطح ویژه رسوبات نئوژن تا ۸۰

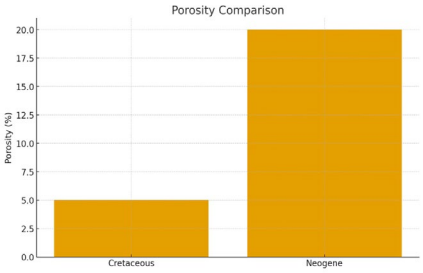


Fig. 11 Comparison of Porosity

شکل ۱۱ مقایسه تخلخل

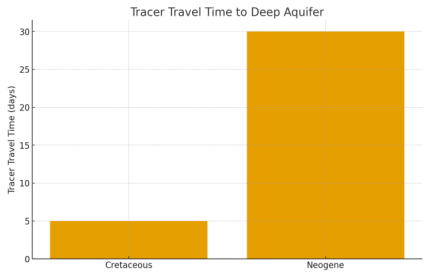


Fig. 12 Tracer Travel Time to Deep Aquifer

شکل ۱۲ زمان حرکت ردیاب به آبخوان عمیق

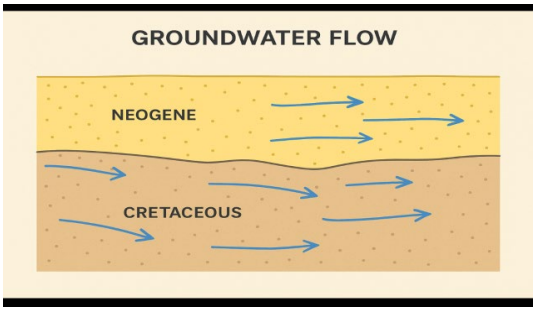


Fig. 13 Schematic of Water Flow Velocity in Cretaceous and Neogene Sediments

شکل ۱۳ شماتیک سرعت جریان آب در رسوبات کرتاسه و نئوژن

متر مربع بر گرم گزارش شده است، در حالی که این مقداربرای کرتاسه کمتر از ۵ متر مربع بر گرم است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که نئوژن در حذف آلاینده‌های آلی نوظهور (مانند داروهای ضد میکروبی و هورمون‌ها) و فلزات سنگین عملکرد بهتری داشته باشد.

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که انتخاب بستر زمین‌شناسی برای دفع و استفاده مجدد از پساب تصفیه‌خانه‌های شهری، نقشی تعیین‌کننده در حفاظت از منابع آب زیرزمینی دارد. در محدوده سنندج با رسوبات کرتاسه، اگرچه نفوذ سریع پساب موجب افزایش کمی آبخوان و احیای برخی چشمه‌ها شده است، اما این افزایش با خطر بالای انتقال آلاینده‌ها به آبخوان‌های عمیق همراه است. داده‌های کیفی نشان می‌دهد که کلر، سدیم و نیترات در چشمه‌های نزدیک به محل رهاسازی پساب به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در برخی موارد از غلظت پساب نیز فراتر رفته است. این امر ناشی از عدم تماس کافی پساب با ماتریس رسوبی و غالب بودن جریان شکستگی‌محور است.

بنابراین، رسوبات کرتاسه تنها در شرایطی قابل استفاده هستند که پساب کاملا تصفیه‌شده (درجه سه) باشد و سیستم‌های نظارتی پیشرفته برای پایش مداوم آلاینده‌ها فعال باشند. حتی در این صورت، استفاده از چاه‌های تزریقی عمیق به‌جای استخرهای نفوذ سطحی توصیه می‌شود.

در مقابل، رسوبات نئوژن در دشت‌های زیربار و ریخالن (محدوده مریوان) به دلیل تخلخل موثر بالا، هدایت هیدرولیکی کنترل‌شده، لایه‌بندی منظم و حضور لایه‌های رسی نفوذناپذیر، به‌عنوان یک سد طبیعی موثر عمل می‌کنند. نتایج کیفی نشان می‌دهد که غلظت نیترات، COD، کلیفرم و بسیاری از فلزات سنگین در چاه‌های پایین‌دست این منطقه به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. زمان ماندگاری طولانی‌تر پساب در ماتریس رسوبی، فرصت کافی برای جذب سطحی، تبادل یونی، دنیتریفیکاسیون و تجزیه بیولوژیکی فراهم می‌کند. از این‌رو، رسوبات نئوژن گزینه علمی، ایمن و پایدارتری برای تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب تصفیه‌شده هستند.

از دیدگاه اقتصادی–محیطی نیز، هزینه کل مالکیت سیستم‌های دفع پساب در رسوبات نئوژن در افق ۲۰ ساله حدود ٪۳۵ کمتر از کرتاسه برآورد شده است (سازمان آب و فاضلاب سنندج، ۱۴۰۱). این تفاوت عمدتا ناشی از کاهش هزینه‌های نظارتی، پایش آلاینده‌ها و ریسک‌های زیست‌محیطی در نئوژن است. در حالی که در کرتاسه، نیاز به نصب سنسورهای آنلاین، ردیاب‌های فلورسان و نمونه‌برداری دوره‌ای از چاه‌های عمیق، هزینه‌های عملیاتی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

در نهایت، این مطالعه تاکید می‌کند که در مدیریت منابع آب، «نفوذ سریع» لزوما معادل «کارایی بالا» نیست. معیار اصلی انتخاب بستر مناسب برای تغذیه مصنوعی، توانایی محیط در ارائه «تصفیه موثر و پایدار» است. رسوبات نئوژن با فراهم کردن زمان تماس کافی، سطح ویژه بالا و فعالیت بیولوژیکی گسترده، این معیار را برآورده می‌کنند، در حالی که رسوبات کرتاسه به دلیل ساختار شکستگی‌محور و رفتار غیرهمگون، ریسک‌های زیست‌محیطی قابل توجهی دارند. بنابراین، در سیاست‌گذاری‌های آبی منطقه کردستان،

اولویت باید به توسعه سیستم‌های تغذیه مصنوعی در دشت‌های با رسوبات نئوژن داده شود. این رویکرد نه‌تنها به حفظ کمیت منابع آب زیرزمینی کمک می‌کند، بلکه از سلامت اکوسیستم‌ها و جوامع محلی نیز محافظت می‌نماید.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی مقایسه‌ای اثرات کمی و کیفی پساب تصفیه‌خانه‌های سنندج و مریوان بر آب زیرزمینی، با تاکید بر تفاوت کرتاسه و نئوژن انجام شد. داده‌های میدانی، آزمایشگاهی و هیدروژئولوژیکی تلفیق شدند. از منظر کمی، پساب در هر دو منطقه موجب افزایش تغذیه آبخوان و احیای برخی چشمه‌ها شد؛ در کرتاسه نفوذ سریع از شکستگی‌ها و در نئوژن نفوذ تدریجی در ماتریس متخلخل رخ می‌دهد. از منظر کیفی، در کرتاسه نفوذ سریع بدون تماس کافی، انتقال آلاینده‌ها به آبخوان عمیق را در پی داشت و غلظت کلر، سدیم، نیترات و برخی فلزات سنگین در چشمه‌های نزدیک افزایش یافت. در نئوژن، به دلیل تخلخل موثر بالا، هدایت هیدرولیکی کنترل‌شده، سطح ویژه زیاد و لایه‌های رسی، کاهش چشمگیر نیترات، COD، کلیفرم و فلزات سنگین مشاهده شد. زمان حرکت ردیاب به عمق ۳۰ متری در کرتاسه ۵ روز و در نئوژن بیش از ۳۰ روز بود. تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که اگرچه کرتاسه نفوذپذیری بالاتری دارد، اما خطرات زیست‌محیطی آن بیشتر است. هزینه کل مالکیت سیستم دفع پساب در نئوژن در افق ۲۰ ساله حدود ٪۳۵ کمتر از کرتاسه برآورد شد. بنابراین، رسوبات نئوژن پایین‌دست مریوان گزینه مناسب‌تری برای دفع پایدار پساب هستند. در مقابل، کرتاسه تنها با پساب کاملا تصفیه‌شده (درجه سه) و سیستم‌های نظارتی پیشرفته قابل استفاده است. توصیه می‌شود اولویت به توسعه تغذیه مصنوعی در دشت‌های نئوژن داده شود و در صورت استفاده از کرتاسه، از چاه‌های تزریقی عمیق استفاده گردد.

5- List of Symbols

EC	Electrical conductivity
pH	Acidity / alkalinity
BOD	Biochemical oxygen demand
COD	Chemical oxygen demand
MPN	Most probable number
Eh	Redox potential
SAT	Soil aquifer treatment
ICP-MS	Inductively coupled plasma mass spectrometry
NO_3^-	Nitrate ion
N_2	Nitrogen gas
CO_2	Carbon dioxide

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to Dr. Hossein Hassanpour Darvishi and Dr. Reza Shirinabadi for their invaluable supervision, guidance, and continuous support throughout this research. We also extend our thanks to the Water and Wastewater Company of Kurdistan Province for providing the necessary data and facilitating access to the study areas. Special appreciation goes to the laboratory staff of Islamic Azad University, Tehran South Branch, for their assistance in sample analysis and data collection. Finally, we thank the anonymous reviewers for their constructive comments, which improved the quality of this paper.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, A.A. and H.H.D.; Methodology, A.A.; Software, H.H.D.; data analysis, A.A., H.H.D., R.Sh. and H.R.; Writing-Original Draft Preparation A.A. and R.Sh.; Writing-Review and Editing, H.H.D.; Supervision, H.H.D. and, R.Sh.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No external funding was received for this research

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The datasets generated and/or analyzed during the current study are not publicly available due to institutional restrictions but can be accessed with permission from the corresponding author.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Alavi, M. (2004) 'Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran', Journal of Geodynamics, 21(1), pp. 1–33. Available at: https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7.

Anbari, A. and Nouri, S. (2018) 'Feasibility study of using treated wastewater for irrigation in green space (Case study: Ekbatan wastewater treatment plant, Tehran)', Journal of Environmental Science and Technology, 20(4), pp. 15–26. [In Persian].

Al-Baji, A. and Asgari, H. (2017) 'Investigation of the possibility of using wastewater in agriculture (Case study: Shahrekord municipal wastewater treatment plant effluent)', Journal of Water and Wastewater, 28(4), pp. 115–124. [In Persian].

Al-Madahi, A., et al. (2015) 'Assessment of treated wastewater reuse for irrigation in Algeria', Desalination and Water Treatment, 55(6), pp. 1583–1590. Available at: https://doi.org/10.1080/19443994.2014.928796.

Falahatkar, S., Ghobadi, M.H. and Tahmasebipour, N. (2021) 'Tracer tests and vulnerability assessment of karstic aquifers in Kurdistan Province, Iran', Environmental Earth Sciences, 80(15), pp. 1–14. Available at: https://doi.org/10.1007/s12665-021-09988-2.

Ghobadi, M.H. and Maleki, M. (2022) 'Geochemical interactions between treated wastewater and carbonate vs. clastic aquifers in western Iran', Water, Air, & Soil Pollution, 233(4), pp. 1–16. Available at: https://doi.org/10.1007/s11270-022-05589-1.

Hosseinpour, A., et al. (2011) 'Investigation of chemical quality changes of raw and treated municipal wastewater during passage through soil columns', Journal of Water and Soil, 25(2), pp. 285–296. [In Persian].

Najafi, M., Rezaei, M. and Kholghi, M. (2019) 'Land subsidence and aquifer system compaction in Neogene alluvial plains of western Iran', Environmental Monitoring and Assessment, 191(11), pp. 1–12. Available at: https://doi.org/10.1007/s10661-019-7832-1.

Naseri, S., et al. (2012) 'Investigation of effluent quality of Ardabil wastewater treatment plant for reuse in agriculture', Journal of Health, 3(2), pp. 1–10. [In Persian].

Patil, A.V., Mankar, T.S. and Motegaonkar, S.S. (2017) 'Wastewater renovation using Soil Aquifer Treatment (SAT) system: Case study of Latur District (Marathwada)', International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(4), pp. 1–6.

Pi, Y.Z. and Wang, J.L. (2006) 'A field study of advanced municipal wastewater treatment technology for artificial groundwater recharge', Journal of Environmental Sciences, 18(6), pp. 1056–1060. Available at: https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60038-7.

Rahimi, B., Mahjouri, N. and Hadian, M. (2020) 'Artificial recharge of treated wastewater in fractured carbonate aquifers: A case study from Kurdistan, Iran', Water Resources Management, 34(12), pp. 4125–4140. Available at: https://doi.org/10.1007/s11269-020-02657-5.

Saroj, S.K. and Kennedy, M.D. (2017) 'Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse', International Biodeterioration & Biodegradation, 119, pp. 671–677. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.013.

Singh, R.P., et al. (2012) 'Effect of wastewater irrigation on physicochemical properties of heavy textured soil', Journal of Environmental Biology, 33(3), pp. 567–572.

Todd, D.K. (1923) Groundwater hydrology. New York: Wiley.

Zarei, M., Mohammadi, A.A. and Saeedi, R. (2021) 'Nitrate removal efficiency in different geological formations during wastewater infiltration: Laboratory and field studies', Journal of Environmental Health Science and Engineering, 19(1), pp. 789–798. Available at: https://doi.org/10.1007/s40201-021-00634-5.

Naseri, S. (2008) 'Health criteria and management of wastewater reuse projects', Journal of Water and Environmental, 34, pp. 13–25. [In Persian].

Oram, B. (2011) Calculating NSF Water Quality Index. Wilkes University Center for Environmental Quality GeoEnvironmental Sciences and Engineering Department.

Sánchez, E., et al. (2007) 'Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution', Ecological Indicators, 7(2), pp. 315–328. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.02.005.

Mariolakos, I. (2007) 'Water resources management in the framework of sustainable development', Desalination, 213(1–3), pp. 147–151. Available at: https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.062.

adir, M., et al. (2010) 'The challenges of wastewater irrigation in developing countries', Agricultural Water Management, 97(4), pp. 561–568. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004.

Fabiano, D.S.S., et al. (2008) 'Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies', Ecological Indicators, 8(5), pp. 476–484. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.05.002