Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Treated wastewater quality improvement through the unsaturated and saturated zones in an aquifer storage and recovery system (laboratory scale)

Morteza Moogooei[1], Majid Kholghi[2]✉, Abdolhossein Hoorfar[3], Abdolmajid Liaghat[4]

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: morteza.moogooei68@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: kholghi@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hoorfar@ut.ac.ir
4. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: aliaghat@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 5, 2022

Revised: Nov. 3, 2022

Accepted: June. 10, 2023

Published online: March. 2024

Keywords:
Treated wastewater,
Aquifer,
Decline,
Storage,
Laboratory.

ABSTRACT

The groundwater level decline has caused an environmental issue in most of the Iranian aquifers. In this regard, aquifer storage and recovery (ASR) system can be used as a solution. On the other hand, the huge volume of treated wastewater in big cities can be used as a water source for aquifer storage purpose. In this study, the treated wastewater, soil and groundwater quality have been investigated through the unsaturated-saturated porous media. An experimental model, as L-shaped, has been designed using PVC pipe material with a diameter of 200 mm and a length of 15 m (2.5 m vertical and 12.5 m horizontal). The wastewater used in this research was obtained from the outlet of the sewage treatment plant in the south of Tehran. In order to avoid changes in the quality of wastewater during storage in the tank, it was tried to a regular change the treated wastewater in short intervals. After the initial investigations, a zone situated in center of in the Feshafuye plain, has been selected for treated wastewater injection. Then the required soil for laboratory setup has been collected for tis area. In this regard, firstly, the surface layer soil was removed, then the subsurface soil was transferred to the laboratory for the experimental setup. The required inflow water for this setup was taken from the aquifer of the same area and was changed regularly in order to establish the maximum real conditions. During this study, treated wastewater have been sampled and analyzed at 12 points along the flow path for 60 days. The results showed that the nitrate concentration decreased to less than 0.5 ppm after 7 m and microbial pollutants, total coliform and E. coli had been removed in a 100-cc sample after 6 m. In terms of salinity, the treated wastewater and soil quality have been improved from an EC of 4 to 3.3 dS/m. The BOD and COD have decreased by 81% and 87%, respectively. Due to improvement of treated wastewater quality through the unsaturated- saturated porous media, the ASR system can be implemented as a solution to prevent the groundwater level decline.

Cite this article: Moogooei, M., Kholghi, M., Hoorfar, A., & Liaghat, A. (2024) Treated wastewater quality improvement through the unsaturated and saturated zones in an aquifer storage and recovery system (laboratory scale), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (1), 131-143. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.346883.669338

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.346883.669338

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بررسی بهبود کیفی پساب درگذر از محیط‌های غیراشباع و اشباع در سیستم ذخیره-احیاء آبخوان (مقیاس آزمایشگاهی)

مرتضی موگویی[۱] ، مجید خلقی[۲]✉ ، عبدالحسین هورفر[۳]، عبدالمجید لیاقت[۴]

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: morteza.moogooei68@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: kholghi@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hoorfar@ut.ac.ir
۴. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aliaghat@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲۰
تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
آزمایشگاه،
پساب،
غیراشباع،
اشباع،
ذخیره-احیاء آبخوان.

چکیده

افت تراز سطح آب زیرزمینی در اکثر آبخوان‌های کشور باعث وقوع مسئله محیطزیستی شده است. در این مسیر رویکرد ذخیره-احیاء آبخوان‌ها با استفاده از پساب می‌تواند راهکار مناسبی برای احیاء سفره‌های آب زیرزمینی بحرانی باشد. در این راستا، در این پژوهش برهم‌کنش پساب، خاک و آب آبخوان ازنظر کیفی، با عبور پساب از نواحی غیراشباع و اشباع مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، مدل آزمایشگاهی به شکل L، از جنس لوله PVC به قطر ۲۰۰ میلی متر و طول ۱۵ متر (۲/۵ متر قائم برای ناحیه غیراشباع و ۱۲/۵ متر افقی برای ناحیه اشباع)، ساخته شد. سپس در ۱۲ نقطه در طول مسیر جریان، برخی از آلاینده‌های موجود در پساب به مدت ۶۰ روز اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد غلظت نیترات پس از طی مسافت ۷متر به کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر رسید و آلاینده‌های میکروبی (کلی فرم و اشریشیاکلی) پس از ۶ متر در نمونه ۱۰۰ سی‌سی حذف شده‌اند. ازنظر شوری، پساب باعث بهبود کیفیت آب‌وخاک شد و هدایت الکتریکی آن از حدود ۴ به ۳/۳ dS/m کاهش یافت. BOD و COD به ترتیب ۸۱ و ۸۷ درصد کاهش داشتند. با توجه به بهبود کیفیت پساب درگذر از محیط‌های غیراشباع و اشباع، می‌توان سامانه ذخیره-احیاء را طوری اجرا کرد که پساب، ابتدا از محیط غیراشباع عبور کرده و سپس به آبخوان برسد.

استناد: موگویی؛ مرتضی، خلقی؛ مجید، هورفر؛ عبدالحسین، لیاقت؛ عبدالمجید، (۱۴۰۳) بررسی بهبود کیفی پساب درگذر از محیط‌های غیراشباع و اشباع در سیستم ذخیره-احیاء آبخوان (مقیاس آزمایشگاهی) ، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۱)، ۱۴۳-۱۳۱. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.346883.669338
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.346883.669338

مقدمه

با توجه به تولید پیوسته فاضلاب‌های شهری در طول سال و به‌منظور ممانعت از آلودگی محیط‌زیست و جلوگیری از به هدر رفتن این آب‌ها، یکی از بهترین روش‌های قابل توصیه، به‌کارگیری پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای سیستم ذخیره–احیاء آبخوان[۱](ASR) در مناطقی است که خصوصیات آبخوان و تراز آب زیرزمینی، شرایط لازم برای این امر را میسر می‌سازد. در چنین مواقعی امکان افزایش ذخیره آب در آبخوان و سپس بهره‌برداری از آن حاصل گردیده که می‌تواند برای کشاورزی و خدمات مورد استفاده قرار گیرد (خلقی و همکاران، ۱۳۹۶).

امروزه کاربرد پساب برای سیستم ذخیره–احیاء آبخوان و تغذیه مصنوعی در بسیاری از کشورهای جهان ازجمله استرالیا، ایالات‌متحده آمریکا، کانادا، فرانسه، آلمان، مکزیک، برزیل، مصر، مراکش، اردن، عربستان سعودی، قطر، چین و ...رایج است (Ollivier et al., 2013; Pavelic et al., 2005). در کشور ایران نیز در سال‌های اخیر، به دلیل محدودیت منابع آب، افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی، صنایع و کشاورزی و همچنین توسعه و اجرای طرح‌های متعدد جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، کاربرد پساب در اراضی کشاورزی اهمیت ویژه‌ای یافته و در اولویت‌های برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب قرار دارد. اما ذخیره‌سازی پساب در پشت سدها مسائل زیست‌محیطی زیادی به همراه خواهد داشت. یک راهکار مناسب برای ذخیره‌سازی پساب ذخیره‌سازی در آبخوان است و برداشت از آن در مکان و زمان مناسب که علاوه بر کم‌هزینه بودن کیفیت پساب نیز بهبود می‌یابد.

به منظور بهبود کیفیت پساب پس از عبور از محیط متخلخل انجام شده است. بررسی روی و مس موجود در رواناب سطحی با عبور از ستون خاک، حاکی از حذف حدود ۴۰ تا۵۰٪ برای روی و ۷۵٪ برای مس را نشان می‌دهد (Olsthoorn, 1982). نتایج بررسی آزمایشگاهی تغییر غلظت برخی پارامترهای آب طی پروژه دخیره–احیاء آبخوان ماسه‌سنگی شروود۲ در انگلستان نشان داد پس از ۱۵ روز تزریق غلظت نیترات، فسفر، سدیم، سولفات کاهش‌یافته ولی غلظت منیزیم، پتاسیم و فلزات سنگین همچون Mn, Ni, Zn, As, Co, Mo, Ba, U افزایش‌یافته است که می‌تواند به خاطر انحلال باشد(Nandha et al., 2013). با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بزرگ مقیاس به قطر ۳ متر و ارتفاع ۴/۵ متر در مدت‌زمان ۱۸ ماه به بررسی تغییرات شیمیایی پساب با عبور از این ستون خاک پرداخته شد. نتایج نشان داد مقدار شوری، پتاسیم، کلر، فسفر، ماده آلی و نیترات کل و برخی فلزات سنگین مثل آهن، لیتیم و آرسنیک کاهش پیدا کرده و برخی پارامترها همچون نیکل، منگنز، در ابتدا کاهش و سپس افزایش یافتند و برخی دیگر تغییرات کمی داشته‌اند. البته مقدار کلسیم و بور افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشت (Ollivier et al., 2013). در یک پژوهش آزمایشگاهی گزارش کردند که ماده آلی خاک قادر به رسوب فلزات سنگین در خاک است (Madrid et al., 2007). در چند مطالعه نیز هیچ تغییری در غلظت فلزات سنگین با عبور از خاک هنگام آبیاری در استفاده از پساب برای کشاورزی دیده نشد (Smith et al., 1996; Xu et al., 2010). نتایج یک پژوهش بر روی چهار سایت ذخیره–احیاء آبخوان در جنوب استرالیا نشان می‌دهد پس از طی ۱۴سال این سیستم هنوز قابلیت کاهش ۹۰ تا ۹۹ درصد اشریشیاکلی(E.coli) موجود در آب تزریقی را در تمام سایت‌ها دارد(Page et al., 2015). عناصر کمیاب مانند بور، آرسنیک و سلنیم موجود در پساب صنعتی را با استفاده از ستون‌های خاکی به قطر ۶ و طول۳۰ سانتیمتر در مدت ۱۴۰ روز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج کاهش بیش از ۹۰ درصدی بور و ۵۰درصدی سلنیم را نشان داد، درحالی‌که غلظت آرسنیک در زه آب خروجی افزایش داشت (Paredez et al., 2017). در برزیل حوضچه‌های تغذیه مصنوعی با پساب در یک آبخوان را با استفاده از ستون‌های خاک دست‌نخورده به قطر ۱۰و طول ۶۰ سانتیمتر مورد ارزیابی قراردادند. نتایج کاهش بیش از ۶۰ درصدی مواد آلی، جامدات معلق و نیتروژن را نشان داد(Coutinho et al., 2018).

در یک مطالعه تغذیه آبخوان با پساب را با آزمایش ستون‌های خاک شبیه‌سازی کردند و جذب فلزات سنگین نیکل، روی و مس توسط خاک را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج حذف ۸۷ درصدی تا ۹۸ درصدی این فلزات را نشان داد (Rekha et al., 2020). در مطالعه حذف کربن عالی قابل جذب طی پروژه ذخیره احیاء آبخوان در دماهای ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد نتایج نشان داد، در شرایط هوازی و دمای ۳۰ درجه بالاترین نرخ جذف با حدود ۹۹/۸ درصد، اتفاق می‌افتد(Nguyen et al., 2020). در مطالعه بررسی حذف و انتقال ویروس ها و آلودگی‌های میکربی طی پروژه ذخیره احیاء آبخوان، مشخص شد، در چرخه‌های خشک و مرطوب میزان حذف بیشتری صورت می‌گیرد(Morrison et al., 2020) . در پژوهشی دیگر آبیاری با پساب را با ستون‌های خاک به ارتفاع ۱۱۰ سانتیمتری مورد ارزیابی قراردادند که نتایج تجمع نمک، نیتروژن، فسفر، کلی فرم و مواد آلی در ۳۰سانتیمتر سطحی خاک را نشان داد(Liu et al., 2021). در پژوهشی

---

۱ - Aquifer Storage and Recovery

۲ - Sherwood

کاتیون‌های موجود در پساب مورد استفاده برای آبیاری را مورد ارزیابی قراردادند که نتایج تأثیرات منفی بر ساختار خاک را نشان داد (Liang et al, 2021). ارزیابی عبور پساب از ناحیه غیراشباع نشان داد پس از طی مسافت ۳ متر میزان BOD وCOD بیشتر از ۸۳ درصد کاهش داشتند(Amin et al, 2021). در یک پروژه ذخیره–احیاء آبخوان از سیلاب حاصل از بارندگی استفاده شد که با توجه به خاصیت پالایندگی خاک، آلودگی‌های آن رفع و به داخل آبخوان هدایت گردید(Grinshpan et al., 2021). برخی داروهای شیمیایی موجود در فاضلاب با سه نمونه خاک مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج نشان می‌دهد در خاک با رس بیشتر جذب مواد شیمیایی بیشتر صورت می‌گیرد. همچنین میزان جذب در مقیاس واقعی بیشتر از مدل آزمایشگاهی بود(Garduño et al., 2021). در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به منظور شبیه‌سازی فیزیکی شرایط حوضچه‌های تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب، از لوله‌های PVC به قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ سانتی‌متر استفاده کردند. لوله‌ها از خاک لوم شنی پر شد. نتایج حاصل از عبور پساب از این ستون‌های خاک حاکی از کارایی بالای ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل، در حذف مقادیر COD،BOD5، کلی فرم، کلی فرم مدفوعی و فسفر با میانگین ۸۴/۷، ۷۷، ۹۹/۵، ۹۹/۷ و ۷۹/۹ درصد و کارایی کم همه ستون‌ها در حذف نیترات هست (جوانی و همکاران، ۱۳۹۲). در تحقیقی دیگر آلودگی نیترات توسط ۳ ستون خاک مورد بررسی قرار گرفت به گونه ای که سه لایه خاک آبخوان به ضخامت ۲۰، ۲۰ و ۱۰ متر توسط ستون‌هایی به ارتفاع ۲، ۲ و ۱ متر شبیه سازی شد همچنین اثر یک لایه زئولیت در ستون اول ارزیابی شد در این تحقیق دو استراتژی تزریق پیوسته به مدت ۲۰ روز و تزریق ناپیوسته به مدت ۴۰وز به گونه ای که ۲۴ساعت تزریق ۲۴ساعت خشکی در نظر گرفته شد که نتایج نشان داد لایه دوم با خاک سنگین تر ۵۴,۵ درصد کارآمدتر در حذف نیترات است و زئولیت تاثیری بر حذف نیترات ندارد همچنین استراتژی تزریق ناپیوسته موثر تر از تزریق پیوسته در حذف نیترات است به گونه ای که نسبت به تزریق دائم در لایه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۵۷، ۸۴ و ۱۲۲ درصد بیشتر حذف نیترات صورت گرفت(Mazaheri et al.,2019).

در مطالعات گذشته حذف آلاینده‌های موجود در فاضلاب و پساب با عبور از محیط‌های متخلخل طبیعی و مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است که برخی از این مطالعات برای استفاده مستقیم از پساب در کشاورزی و برخی جهت تغذیه مصنوعی آبخوان بوده است. معمولا در این پژوهش‌ها ارزیابی تاثیر محیط غیراشباع بر روی پساب با ستون‌های خاک به ارتفاع ۳۰ سانتیمتر تا ۳ متر، انجام شده است. بررسی توانایی محیط‌های متخلخل اشباع و غیراشباع در تغییر کیفیت پساب (فاضلاب‌های تصفیه‌شده) در سامانه ذخیره–احیاء آبخوان اهمیت زیادی دارد. از انجایی که ناحیه غیراشباع و ناحیه اشباع آبخوان هر کدام عملکرد متفاوتی در بهبود کیفیت پساب نفوذیافته دارند. در این پژوهش مدل آزمایشگاهی میتواند به طور هم زمان ناحیه غیر اشباع و اشباع آبخوان را شبیه‌سازی کند و تغییرات کیفیت پساب را ابتدا در ناحیه غیر اشباع و سپس در ناحیه اشباع مورد ارزیابی قرار دهد که طبق شناخت ما درمطالعات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منبع تأمین پساب

پساب مورد استفاده در این تحقیق از خروجی تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران تامین شده است. برای جلوگیری از تغییرات در کیفیت پساب در هنگام ذخیره در مخزن سعی شد در بازه‌های زمانی کوتاه پساب تعویض شود؛ که تقریباً هر دو هفته یک‌بار از محل خروجی تصفیه‌خانه پساب برای انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه مرکزی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران منتقل و جایگزین پساب قبلی در مخزن تغذیه می‌شد؛ و در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری در طول انجام پروژه از پساب موجود در مخزن نیز نمونه‌برداری و آنالیز می شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول (۱) ارائه‌شده است.

جدول ۱- پارامترهای اندازه‌گیری در پساب مورداستفاده

Row	Parameter	Unit	Min	Max	Average
۱	pH	-	۹۴/۷	۷۶/۷	۸۴/۷
۲	EC	dS/m	۷۶/۱	۲۷/۱	۳۷/۱
۳	N-NO3	mg/L	۱۸/۲۶	۹۶/۱۸	۱۷/۲۳
۴	BOD5	mg/L	۵/۱۶	۵/۱۳	۱/۱۵
۵	COD	mg/L	۳۲/۳۴	۹۹/۲۰	۵۲/۲۷
۶	Coliform	MPN/100mL	۷۸	۴۸	۶۸
۷	E.coli	MPN/100mL	۱۸	۱۱	۱۴

خصوصیات محیط متخلخل

پس از بررسی‌های دفتری و صحرائی، محدوده‌ای به عنوان ناحیه تزریق در دشت فشافویه تعیین گردید و از این محدوده در منطقه حکیم‌آباد که تقریباً در مرکز دشت است، خاک آزمایش، انتخاب گردید. ابتدا تا حد زیادی خاک لایه سطحی برداشت شد، سپس خاک زیرسطحی آن پس از عبور از الک با قطر سوراخ تقریباً 7mm برای ساخت مدل و انجام آزمایش‌ها (به میزان تقریباً ۲۰۰۰ کیلوگرم) به آزمایشگاه منتقل شد.

بر اساس طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا[۱] (USDA) خاک مورداستفاده شامل ۱۰درصد رس، ۱۹ درصد سیلت و ۷۱ درصد شن است که بافت آن شنی لومی محسوب می‌شود. برای محیط متخلخل مورد بررسی وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص حقیقی به ترتیب ۱/۳۷ و ۲/۴۲ گرم بر سانتی مترمکعب در آزمایشگاه اندازه گیری شد. سپس با توجه به رابطه آن‌ها با تخلخل، مقدار تخلخل آن ۴۴ درصد به دست آمد و همچنین هدایت هیدرولیکی آن ۱/۳۲ متر بر روز از روش بار ثابت در آزمایشگاه به دست آمد.

در این پروژه قبل از شروع آزمایش‌های خاک مورد استفاده در آزمایشگاه آنالیز شد و برخی پارامترهای شیمیایی مدنظر در آن اندازه‌گیری شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول(۲) آورده شده است.

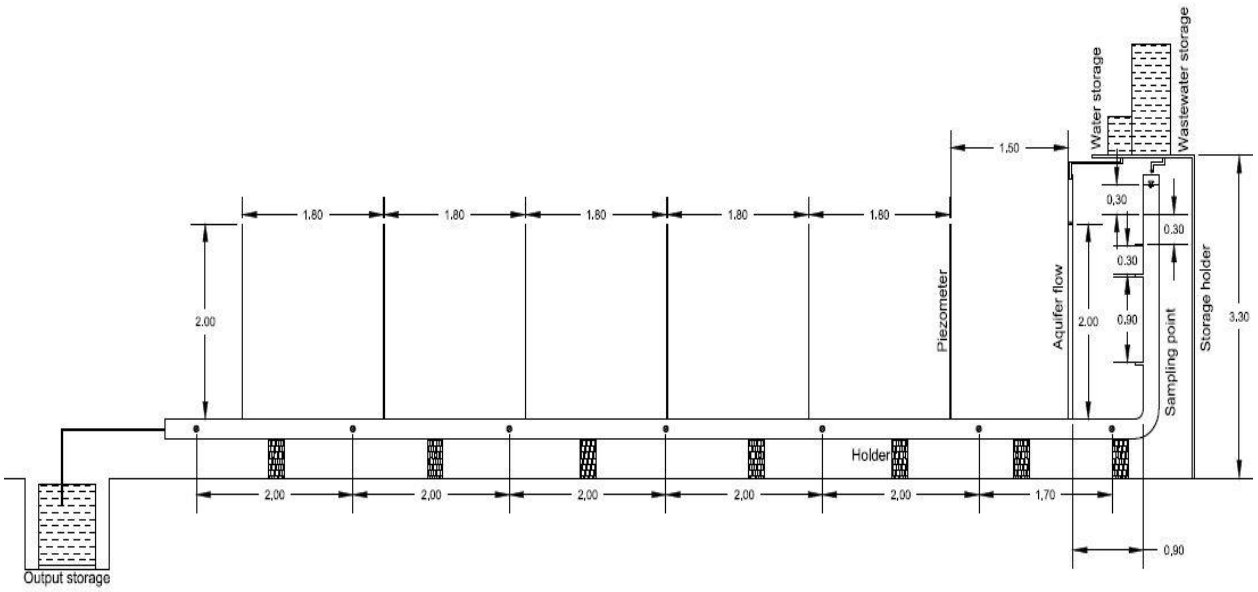
جدول (۲)پارامترهای شیمیایی موجود در خاک

Row	Parameter	Unit	Amount	Row	Parameter	Unit	Amount
۱	pH	-	۵۱/۷	۴	N-NO3	mg/L	۷/۶
۲	EC	dS/m	۲۹/۳	۵	Cd	mg/L	۰
۳	SAR	(meq/L)^0.5	۶/۴	۶	Pb	mg/L	۰

طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش برای مطالعه تغییر کیفیت پساب با عبور از لایه‌های غیراشباع و اشباع، مدل فیزیکی برای شبیه‌سازی این شرایط طراحی و ساخته شد که در شکل(۱) قابل‌مشاهده است. مدل طراحی‌شده شامل ۲/۵ متر ارتفاع قائم و ۱۲/۵ متر طول افقی به ترتیب برای شبیه‌سازی ناحیه غیراشباع و اشباع است که با لوله PVC قطر ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شد. فاصله بین نقاط نمونه‌برداری و محل پیزومترها روی شکل مشخص‌شده است. در مدل مذکور برای ایجاد جریان آب زیرزمینی در فاصله یک متری از قسمت قائم و روی قسمت افقی یک سوراخی به قطر ۶ سانتیمتر ایجاد شد و لوله‌ای به همین قطر و به ارتفاع ۲/۵ متر درون آن قرار گرفت؛ که تراز آب درون آن قابل تنظیم است. برای محل تزریق پساب و آب آبخوان یک سکو در بالای قسمت قائم در نظر گرفته شد و یک مخزن ۲۰۰ لیتری برای پساب و یک مخزن ۶۰ لیتری برای آب روی آن تعبیه شد. در بالای قسمت قائم مدل که محل ورود پساب است برای ایجاد یک هد ثابت از یک شناور استفاده شد.

[۱]- United States Department of Agriculture



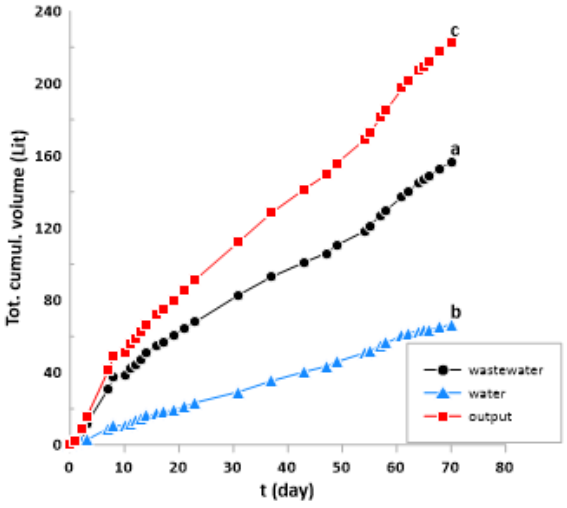
شکل ۱- مدل طراحی‌شده

برای نمونه‌برداری از نقاط مشخص‌شده در طول مدل به تعداد نقاط موردنظر لوله‌هایی به قطر ۲ و طول ۳۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد که ۱۹ سانتیمتر آن از یک سمت با مته شماره ۳ به‌صورت مشبک سوراخ شود و با یکپارچه طوری مانند دور آن پوشیده شد تا به هنگام قراردادن در داخل لوله اصلی خاک وارد آن نشود و چوب‌پنبه‌هایی برای درپوش این لوله‌ها در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

جریان ورودی و خروجی

یکی از پارامترهای کمی اندازه گیری شده که اهمیت داشت میزان جریان ورود و خروجی بود که به تفکیک میزان پساب ورودی، جریان آب ورودی و جریان خروجی از انتهای مدل روزانه اندازه‌گیری و ثبت شد. منحنی تجمعی هرکدام (برحسب لیتر) در مقابل زمان (برحسب روز) در شکل(۲) آمده است. منحنی‌های (a)، (b) و (c) به ترتیب مربوط به پساب ورودی از قسمت عمودی، جریان آب ورودی از ابتدای قسمت افقی و جریان خروجی از انتهای مدل می‌باشند. با توجه به درپوش‌های تعبیه‌شده برای مخزن‌های ورودی و خروجی، میزان تبخیر صفر است. شیب منحنی‌های ورودی خروجی جریان، تغییرات دبی خروجی در روزهای مختلف را نشان می‌دهد.

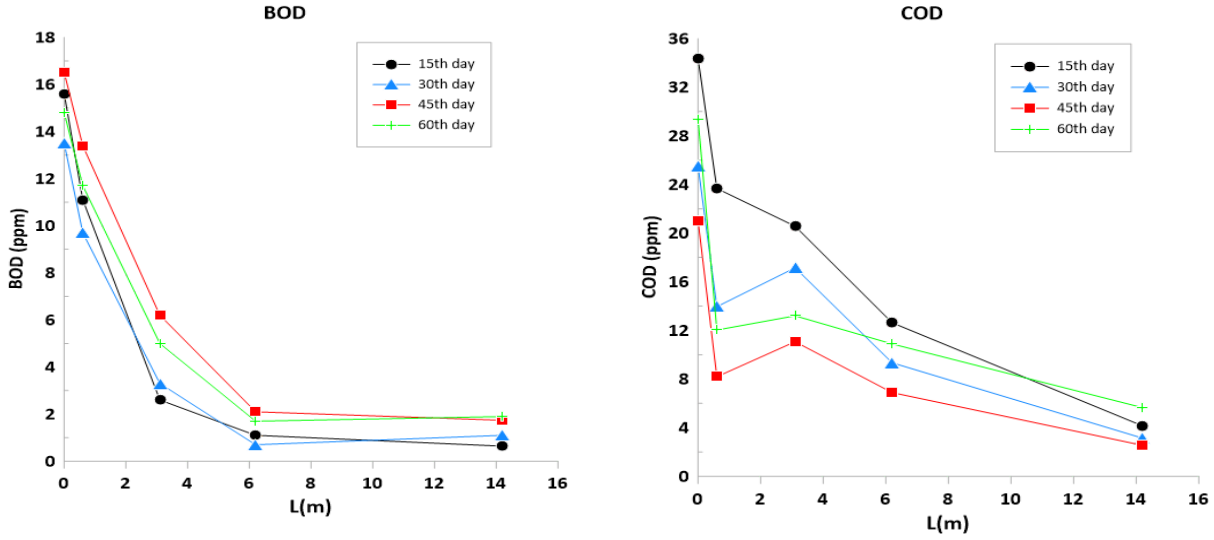


شکل ۲- منحنی تجمعی جریان‌های ورودی و خروجی

بررسی تغییرات کیفیت پساب با عبور از محیط متخلخل

BOD و COD

مقدار اولیه BOD و COD موجود در پساب به ترتیب در تمام دوره‌ها تقریباً بین ۱۴ تا ۱۷ mg/L و ۲۰ تا ۳۵ mg/L بوده است که نشان از آلودگی نسبی پساب دارد. برای بررسی تغییرات آن‌ها در روزهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز از شروع به کار مدل در طول مسیر جریان در هر دو ناحیه غیراشباع و اشباع از نقاط نمونه‌برداری، نمونه‌گیری آب انجام گردید و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. نتایج این آنالیز حاکی از کاهش شدید مقدار BOD و COD در عبور از ناحیه غیراشباع و اشباع است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌کنید پس از گذشت ۶۰ روز از نفوذ پساب هم چنان توانایی خاک برای کاهش مقدار این دو پارامتر زیاد است و تفاوت اندکی با توان خاک برای حذف این پارامترها در ۱۵ روز اول دارد. کاهش مقدار BOD وCOD در طول مسیر جریان نشان از بهبود کیفیت آب از لحاظ بیولوژیکی دارد. کاهش مقدار BOD در ناحیه غیراشباع بسیار بیشتر است. مقدار آن در ناحیه اشباع در هر چهار دوره نمونه‌برداری پس از کاهش تا کمتر از ۲ mg/L به یک مقدار ثابت رسید که این می‌تواند به خاطر مقدار کم آن باشد. مقدار COD در تمام دوره‌های نمونه‌برداری در انتهای مدل به کمتر از ۶ mg/L رسیده است، که این نشان از توانایی زیاد این محیط متخلخل در حذف آلاینده‌هایی که نیاز به اکسیژن برای اکسید شدن دارند است.

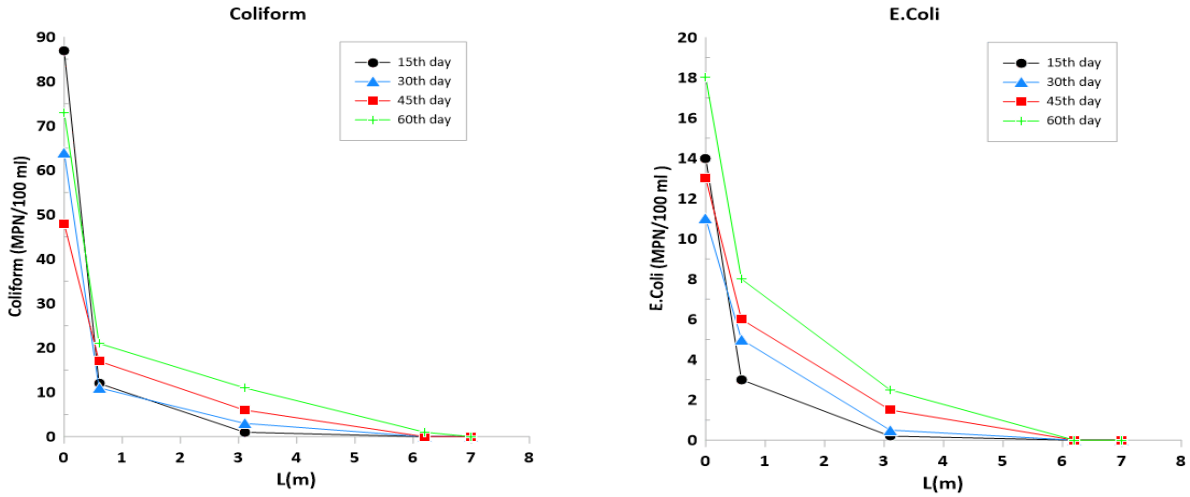


شکل ۳- منحنی تغییرات BOD و COD در طول ناحیه غیراشباع و اشباع

آلودگی‌های میکروبی

برای بررسی انتقال آلاینده‌های میکروبی، جذب و حذف آن‌ها در این پژوهش باکتری‌هایی نظیر کلی فرم و اشریشیاکلی در پساب ورودی و در طول مسیر جریان در هر دو ناحیه غیراشباع و اشباع اندازه‌گیری شدند که نتایج آن در شکل (۳) قابل‌مشاهده است.

کلی فرم به گروهی از باکتری‌های خانواده انتروباکتریاسه گفته می‌شود که اغلب بیماری‌زا هستند این گروه باکتری و باکتری اشریشاکلی (اشریشیاکلی یکی از باکتری‌های گروه کلی فرم است که نسبت به سایر باکتری‌های این گروه بیماری‌زاتر است) در روزهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و۶۰ روز از شروع به کار مدل اندازه‌گیری شدند. تعداد این باکتری‌ها در ۱۰۰ میلی‌لیتر در تمام دوره‌های نمونه‌برداری برای کلی فرم بین ۴۸ تا ۸۷ و برای اشریاشیاکلی بین ۱۳ تا ۱۸ است. با عبور پساب از ناحیه غیراشباع تعداد این باکتری‌ها به‌شدت کاهش یافت و در تمام دوره‌ها به کمتر از ۵ رسید و با ادامه حرکت پساب در ناحیه اشباع تعداد این باکتری‌ها در ۱۰۰ میلی‌لیتر به صفر رسید. باگذشت زمان تعداد باکتری‌ها بیشتر روبه‌جلو حرکت کردند ولی پس از ۶۰ روز از زمان تزریق در فاصله ۶ متری از محل تزریق تعداد آن‌ها به صفر می‌رسد. هم چنان در نمونه خروجی از انتهای مدل این باکتری‌ها یافت نشد.



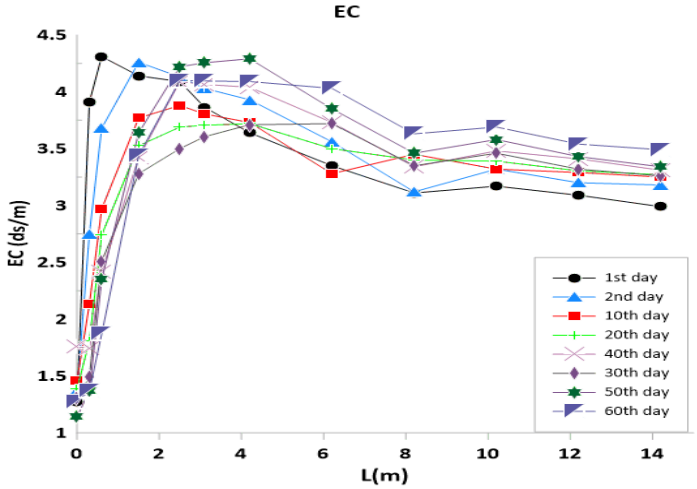
شکل ٤- تغییرات باکتری‌های کلی فرم و اشریشاکلی پساب با عبور از ناحیه غیراشباع و اشباع

کاهش آلاینده‌های میکروبی در طول مسیر جریان می‌تواند به خاطر حذف فیزیکی توسط ذرات خاک و به فعالیت ذاتی خود میکروارگانیسم‌ها نسبت داد. زمان زنده ماندن این میکروب‌های بیماری‌زا در محیط خاک و آبخوان از اهمیت زیادی برخوردار است.

شوری (EC)

برای بررسی تأثیر متقابل شوری پساب، آب آبخوان و محیط متخلخل برهم در روزهای ۱، ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ روز از شروع به کار مدل در طول مسیر جریان نمونه‌برداری و آنالیز شد که نتایج آن در شکل(۵) قابل‌مشاهده است. با عبور پساب از ناحیه غیراشباع به دلیل بیشتر بودن مقدار شوری خاک نسبت به پساب مقدار شوری جریان عبوری رفته‌رفته در طول مسیر حرکت بیشتر می‌شود تا در محل تداخل با آب آبخوان در ناحیه اشباع به حداکثر مقدار خود می‌رسد. پس از ترکیب کامل پساب با آب آبخوان در این ناحیه مقدار شوری ناحیه اشباع را تا حدودی کاهش می‌دهد و در طی ادامه حرکت در ناحیه اشباع مقدار شوری با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد. از روی منحنی‌های تغییرات شوری در طول مسیر در ناحیه غیراشباع مشاهده می‌شود که باگذشت زمان مقدار شوری در این ناحیه کاهش می‌یابد که این می‌تواند به خاطر شستشوی این ناحیه توسط پساب باشد که باگذشت زمان نمک از این ناحیه شسته شده و به پایین‌تر انتقال‌یافته است.

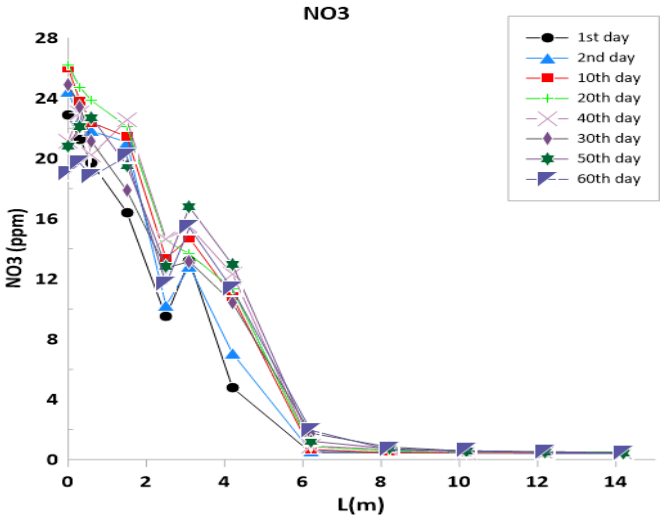
برخلاف ناحیه غیراشباع، در ناحیه اشباع با گذشت زمان مقدار شوری افزایش‌یافته اما همچنان مقدار آن از شوری آب آبخوان کمتر است و شیب تغییرات آن به‌گونه‌ای است که نشان از کاهش شوری در طول مسیر جریان دارد و مشخص است که اگر طول مدل تجربی بیشتر بود یعنی مسافت بیشتری طی می‌شد مقدار شوری در خروجی کاهش بیشتری داشت. ملاحظه می‌شود که پس از گذشت ۶۰ روز از تزریق پساب نرخ تغییرات شوری همچنان نزولی است و تزریق پساب باعث بهبود کیفیت خاک و آب آبخوان ازنظر شوری شده است.



شکل ٥- تغییرات EC در طول ناحیه غیراشباع و اشباع

نیترات

مقدار غلظت نیترات طی انجام پروژه برای پساب بین ۱۸/۹۸ تا ۲۲/۱۸ میلی‌گرم در لیتر، برای آب آبخوان بین ۱۲/۸۴تا ۱۶/۷۷میلی‌گرم بر لیتر و برای عصاره اشباع خاک مقدار آن ۶/۷۱ میلی‌گرم در لیتر است. غلظت نیترات در پساب از خاک و آب آبخوان بیشتر است. با عبور پساب از خاک ناحیه غیراشباع، غلظت نیترات تا حد زیادی کاهش می‌یابد و به کمتر از مقدار آن در آب آبخوان می‌رسد. پس از عبور پساب از ناحیه غیراشباع و رسیدن به مرز ناحیه اشباع در این محل با آب آبخوان ترکیب می‌شود و غلظت نیترات در این نقطه افزایش می‌یابد. پس از ترکیب شدن با هم در ادامه حرکت در ناحیه اشباع غلظت نیترات کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که در فاصله ۷ متری از ابتدای مدل مقدار آن به یک دامنه تقریباً ثابت کمتر از ۵/. میلی‌گرم در لیتر می‌رسد؛ و تا انتهای مسیر این مقدار غلظت تقریباً ثابت است. در ۶۰ سانتیمتری ابتدایی حرکت پساب در ناحیه غیراشباع تغییرات غلظت نوسان دارد اما از آن به بعد با یک شیب منفی تا نزدیک به قسمت اشباع مقدار غلظت کاهش می‌یابد. شیب تغییرات غلظت در ناحیه غیراشباع بیشتر از ناحیه اشباع است. ملاحظه می‌شود که با عبور پساب از ناحیه غیراشباع و اشباع کیفیت پساب و آب آبخوان تا حد خیلی زیادی بهبود می‌یابد (شکل ۶).



شکل ٦- تغییرات غلظت نیترات در طول ناحیه غیراشباع و اشباع

این نکته که چرا غلظت نیترات با عبور از ناحیه غیراشباع تا حد زیادی کاهش می‌یابد و عین این اتفاق در محیط اشباع نیز رخ می دهد تا به حد صفر می‌رسد را می‌توان به علت پدیده دنیتریفیکاسیون دانست. در تحقیقات مشابه که به بررسی عوامل بیولوژیکی بر تجزیه نیترات پرداخته اند این موضوع را اثبات می کند که وجود مواد الی و ترکیبات کربن دار و همچنین شرایط دمایی و pH مناسب تشدید کننده تجزیه نیترات است (Tanmoy et al., 2022; Li et al., 2022; Lin et al., 2021; Hamdan et al., 2017; Calderer et al., 2014). دلیل این ادعا می‌تواند گاز جمع شده در زهکش‌های نمونه‌برداری باشد. چراکه به هنگام باز کردن درپوش زهکش‌ها برای نمونه‌برداری یک گاز با شدت زیاد بیرون می‌آمد؛ و شدت خروج این گاز در قسمت‌های میانی مدل بیشتر بود.

نتایج این مطالعه با سایر تحقیقات در زمینه استفاده از پساب برای ذخیره احیاء آبخوان یا استفاده مستقیم برای آبیاری مشابهت‌ها و تفاوت‌هایی دارد. از جمله شباهت‌های موجود می‌توان به کاهش بار آلودگی‌ها و کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشاره کرد اما تفاوت‌هایی که با سایر پژوهش‌ها دارد این است که از لحاظ شکل مدل شباهت بیشتری به یک المان از آبخوان دارد و لایه غیر اشباع و اشباع آبخوان را در نظر گرفته به گونه ای که قسمت افقی مدل نقش لایه آبدار آبخوان را دارد و جریان دائمی از آب آبخوان در آن برقرار است در صورتی که در مطالعات پیشین فقط لایه غیر اشباع مورد بررسی قرار میگرفت. همچنین در این مطالعه مشاهده می‌شود که میزان نفوذ پذیری و هدایت هیدرولیکی دارای نوسان هست و روندی سینوسی دارند، در حالی که در مطالعات پیشین فقط نشان دهنده روند کاهشی است. که دلیل ان بخاطر این است که در سایر مطالعات شکل و ابعاد مدل به گونه ای بوده که بیشتر گرفتگی فیزیکی اتفاق می افتاده و گرفتگی فیزیکی نیز با یک روند کاهشی اتفاق می‌افتد و معمولا برگشتی ندارد اما در این پژوهش شکل و ابعاد مدل به گونه‌ای است که اعلاوه بر گرفتگی فیزیکی، گرفتگی بیولوزیکی نیز رخ می‌دهد و از انجایی که گرفتگی بیولوژیکی تحت تاثیر شرایط محیطی کم

و زیاد می شود باعث ایجاد تغییرات سینوسی در نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی شده است. همچنین از دیگر تفاوت‌ها می‌توان به این اشاره کرد که با توجه به طول زیاد مسیر حرکت جریان در ناحیه افقی مدل شرایط هوازی و بی هوازی در بخش‌های ابتدایی، میانی و انتهایی مدل به صورت متناوب رخ می‌دهد و این عامل باعث شده است نیترات موجود توسط باکتری‌های هوازی و بی هوازی تقریبا حذف گردد این در حالی است که در سایر پژوهش‌ها به دلیل کوتاهی مسیر حرکت شرایط بی هوازی فراهم نگردیده بنابر این در آن مطالعات تصفیه نیترات کنتر انجام شده است.

نتیجه‌گیری

در سه دهه اخیر با توجه به افزایش نیاز آبی، سفره‌های آب زیرزمینی در اثر برداشت شدید در اکثر کشورهای دنیا و بخصوص درمناطق خشک، در وضعیت بحرانی از نظر افت سطح آب و کاهش کیفی آن قرار گرفته اند. در بعضی از کشورها با تحقیق، مطالعه و اجرای رویکرد ذخیره (پساب)–احیاء آبخوان به نتایج مطلوبی رسیده اند. در کشور ما پساب خروجی از تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری تا مرحله ۲ تصفیه می‌شوند. در این تحقیق به منظور بهبود بیشتر کیفیت پساب قبل از ورود به آبخوان، پژوهشی مبنی بر عبور پساب از لایه غیراشباع (بطور قائم) و سپس اشباع (بطور افقی) در مقیاس آزمایشگاهی (با در نظر گرفتن آب و خاک و پساب دشت فشافویه در جنوب تهران) انجام گردید تا توان این دو محیط در بهبود کیفیت پساب مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که باگذشت ۶۰ روز از شروع به کار مدل تجربی، محیط غیراشابع و اشباع خاک کار آیی خوبی جهت بهبود کیفیت پساب خروجی را نشان داد. بین نوبت‌های نمونه‌گیری در یک نقطه نمونه‌گیری تغییر زیادی وجود ندارد. نتایج به‌دست‌آمده برای هریک از پارامترهای اندازه‌گیری شده به صورت زیر ارائه می‌گردد:

بررسی تغییرات BOD و COD موجود در پساب نشان می‌دهد که مقدار این دو پارامتر به‌شدت کاهش‌یافته به‌گونه‌ای که در ناحیه اشباع مقدار BOD در تمام دوره‌ها به کمتر از ۲ mg/L رسیده که این مقدار در آب‌ها به‌طور طبیعی وجود دارد. لایه غیراشباع عملکرد خوبی در حذف این پارامترها داشت. پس از کاهش مقدار COD در ناحیه غیراشباع مقدار آن به کمتر از مقدار این پارامتر در آب آبخوان رسید و در مرز دولایه پس از ترکیب پساب با آب آبخوان مقدار COD کمی افزایش یافت ولی سپس در طول مسیر کاهش یافت که مقدار آن در خروجی برای تمام دوره‌ها به کمتر از ۶ mg/L رسید که مقدار قابل‌قبولی است و شیب تغییرات در طی حرکت در خاک به‌گونه‌ای است که اگر طول مدل بیشتر باشد مقدار این پارامتر همچنان کاهش می‌یابد.

پارامترهای میکروبی نظیر کلی فرم و اشریشیا کلی با عبور از ناحیه غیراشباع مقدار آن‌ها به‌شدت کاهش یافت و با طی مسافتی در ناحیه اشباع مدل (حدود سه متر) مقدار هردو پارامتر برای تمام دوره‌های نمونه‌برداری به صفر رسید که نشان از عملکرد خوب محیط متخلخل جهت حذف پارامترهای میکروبی است. فرایندهای جذب و فعالیت خود میکروارگانیسم‌ها سبب کاهش این پارامتر در طول مسیر می‌تواند باشد.

ازنظر شوری تزریق پساب باعث بهبود کیفیت خاک در ناحیه غیراشباع و باعث بهبود کیفیت آب آبخوان در ناحیه اشباع‌شده است و باگذشت ۶۰ روز از تزریق این روند همچنان ادامه داشت و هر چه زمان بیشتری از تزریق پساب می‌گذرد کیفیت خاک در ناحیه غیراشباع بیشتر بهبود می‌یابد و مقدار شوری در ناحیه اشباع باگذشت زمان افزایش‌یافته است. ولی همچنان مقدار آن در طول مسیر کمتر از شوری آب آبخوان است.

غلظت نیترات پساب با عبور از ناحیه غیراشباع تا حد زیادی کاهش یافت و در ادامه باعث بهبود کیفیت آب آبخوان گردید به‌طوری‌که بعد از فاصله ۷ متری از ابتدای مدل مقدار آن به صفر نزدیک شد. این کاهش شدید غلظت به خاطر دنیتریفیکاسیون است که در طول مسیر اتفاق می‌افتد و گاز نیتروژن تولیدی در محل‌های نمونه‌برداری جمع می‌شد و به هنگام نمونه‌برداری خارج می‌گردید. بنابراین مشاهده می‌شود که برای بهبود کیفیت پساب و آب آبخوان ازنظر غلظت نیترات این سامانه تا حد زیادی موفق عمل کرده است.

با توجه به نتایج، سامانه ذخیره–احیاء آبخوان را باید به‌گونه‌ای اجرا کرد که در آنجا پدیده دنیتریفیکاسون انجام گیرد تا ضمن بهبود کیفیت پساب در طول مسیر حرکت، آب آبخوان نیز کیفیت مطلوب‌تری پیدا کند. یکی از عامل‌های تشدیدکننده دنیتریفیکاسیون، دما است. به این علت که شرایط دمایی مناسب باعث افزایش جمعیت باکتری‌های انجام دهنده فعالیت دنیتریفیکاسیون می‌شود. شرایط تأثیرگذار بر دنیتریفیکاسیون عبارتند از شرایط بی‌هوازی، وجود مواد آلی (جهت الکترون دهی) و کنترل pH در رنج ۷–۸/۵ که بیشترین مقدار آن در pH برابر با ۷ است. با فراهم کردن این شرایط در پروژه‌های ذخیره–احیاء سفره‌های آب زیرزمینی می‌توان تا حد زیادی کیفیت پساب و

آب آبخوان را بهبود بخشید.

با توجه به دستاوردهای این پژوهش، در اجرای سامانه ذخیره–احیاء سفره‌های آب زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود پساب بطور مستقیم وارد آبخوان نشود بطوری که ابتدا وارد محیط غیراشباع و سپس وارد محیط اشباع و آبخوان دشت گردد تا از حداکثر توان خودپالائی این دومحیط استفاده شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

جوانی، عبدلمجید لیاقت و حسن اوغلو (۱۳۹۲)، بررسی میزان آلاینده های آلی و میکربی در عبور از پروفیل خاک در بهره برداری از تغذیه مصنوعی، مجله تحقیقات آب و خاک دانشگاه تهران، 431-422 ,(2) 27.

خلقی، مجید.، موگوئی، مرتضی.، پوزن، ابوالفضل و باقری، مهدی. (۱۳۹۶)، گزارش نهائی پروژه ذخیره – احیاء سفره آب زیرزمینی در دشت فشافویه حد فاصل بین رباط کریم و انیس آباد، ۱۵۲ صفحه، شرکت آب منطقه ای تهران و معاونت پژوهشی دانشگاه تهران.

REFERENCES

Amin, H., Gad, A., El-Rawy, M., Abdelghany, U., & Sadeek, R. (2021). Assessment of wastewater contaminant concentration through the vadose zone in a soil aquifer treatment system. *Applied Ecology and Environmetal Research, 19*(3), 2385-2403 .

Calderer, M., Martí, V., De Pablo, J., Guivernau, M., Prenafeta-Boldú, F. X., & Viñas, M. (2014). Effects of enhanced denitrification on hydrodynamics and microbial community structure in a soil column system. *Chemosphere*, 111, 112-119.

Coutinho, J .V., Almeida, C. d. N., Silva, E. B. d., Stefan, C., Athayde Júnior, G. B., Gadelha, C. L. M., & Walter, F. (2018). Managed aquifer recharge: study of undisturbed soil column tests on the infiltration and treatment capacity using effluent of wastewater stabilization pond. *RBRH*, 23 .

Grinshpan, M., Furman, A., Dahlke, H. E., Raveh, E., & Weisbrod, N. (2021). From managed aquifer recharge to soil aquifer treatment on agricultural soils: Concepts and challenges. A*gricultural Water Management*, 255, 106991.

Garduño-Jiménez, A. L., Durán-Álvarez, J. C., Cortés-Lagunes, R. S., Barrett, D. A., & Gomes, R. L. (2022). Translating wastewater reuse for irrigation from OECD guideline: Tramadol sorption and desorption in soil-water matrices. *Chemosphere*, 135031.

Hamdan, N., Kavazanjian Jr, E., Rittmann, B. E., & Karatas, I. (2017). Carbonate mineral precipitation for soil improvement through microbial denitrification. *Geomicrobiology journal*, *34*(2), 139-146.

Javani, H., Liaghat, A., Hassangholi, A. (2013). Assessing the rate of transfer of inorganic and biological contaminants present in the wastewater to the soil profile as a result of artificial recharge operations. J*ournal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)*, 27 (2), 422-431(In Persian).

Kholghi, M. Moogooei, M. Poozan, A. Bagheri, M (2017) Management of aquifer storage and recovery in Fashafouye plain from Robatkarim to Anisabad. *Technical report*, 152p (In Persian).

Li, R., Zhang, Y., & Guan, M. (2022). Investigation into pyrite autotrophic denitrification with different mineral properties. *Water Research*, *221*, 118763.

Liang, X., Rengasamy, P., Smernik, R., & Mosley, L. M. (2021). Does the high potassium content in recycled winery wastewater used for irrigation pose risks to soil structural stability? *Agricultural Water Management*, *243*, 1064 .۲۲

Lin, W., Lin, W., Cheng, X., Chen, G., & Ersan, Y. C. (2021). Microbially induced desaturation and carbonate precipitation through denitrification: a review. *Applied Sciences*, *11*(17), 7842.

Liu, C., Liu, F., Andersen, M. N., Wang, G., Wu, K., Zhao, Q., & Ye, Z. (2021). Domestic wastewater infiltration process in desert sandy soil and its irrigation prospect analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *208*, 111419 .

Madrid, F., Lopez, R., & Cabrera, F. (2007). Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *119*(3), 249-256 .

Morrison, C. M., Betancourt, W. Q., Quintanar, D. R., Lopez, G. U., Pepper, I. L., & Gerba, C. P. (2020). Potential indicators of virus transport and removal during soil aquifer treatment of treated wastewater

effluent. *Water research*, 177, 115812.

Mazaheri, F., & Mozaffari, J. (2019). Experimental study of wastewater artificial recharge and its effect on nitrate concentrations. *Journal of Water Process Engineering*, *31*, 100862.

Nandha, M., Holden, B., Jefferson, B., Jeffrey, P., & Le Corre, K. (2013). The Relationship between Source and Recovered Water Quality during Storage in a Sherwood Sandstone Aquifer .

Nguyen, H. T., Kim, Y., Choi, J. W., Cho, K., & Jeong, S. (2020). Assimilable organic carbon removal strategy for aquifer storage and recovery applications. *Environmental Research*, 191, 110033.

Ollivier, P., Surdyk, N., Azaroual, M., Besnard, K., Casanova, J., & Rampnoux, N. (2013). Linking water quality changes to geochemical processes occurring in a reactive soil column during treated wastewater infiltration using a large-scale pilot experiment: Insights into Mn behavior. *Chemical Geology*, *356*, 109-125 .

Olsthoorn, T. N. (1982). Clogging of recharge wells: main subjects. In *KIWA-communications* (Vol. 72): KIWA.

Page, D., Vanderzalm, J., Barry, K., Torkzaban, S., Gonzalez, D., & Dillon, P. (2015). E. coli and turbidity attenuation during urban stormwater recycling via aquifer storage and recovery in a brackish limestone aquifer. *Ecological Engineering*, *84*, 427-434 .

Paredez, J. M., Mladenov, N., Galkaduwa, M. B., Hettiarachchi, G. M., Kluitenberg, G. J., & Hutchinson, S. L. (2017). A soil column study to evaluate treatment of trace elements from saline industrial wastewater. *Water Science and Technology*, *76*(10), 2698-2709 .

Pavelic, P., Nicholson, B. C., Dillon, P. J., & Barry, K. E. (2005). Fate of disinfection by-products in groundwater during aquifer storage and recovery with reclaimed water. *Journal of contaminant hydrology*, *77*(4), 351-373 .

Rekha, K., & Lokeshappa, B. (2020). Comparative studies on removal of heavy metals from electroplating wastewater through soil aquifer treatment (SAT) in conjunction with adsorbents. *Water Science and Technology*, *82*(10), 2148-2 .۱۵۸

Smith, C., Hopmans, P., & Cook, F. (1996). Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia. *Environmental Pollution*, *94*(3), 317-323 .

Tanmoy, D. S., Bezares-Cruz, J. C., & LeFevre, G. H. (2022). The use of recycled materials in a biofilter to polish anammox wastewater treatment plant effluent. *Chemosphere*, *296*, 134058.

Xu, J., Wu, L., Chang, A. C., & Zhang, Y. (2010). Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment. *Journal of hazardous materials*, *183*(1), 780-786 .

Treated wastewater quality improvement through the unsaturated and saturated zones in an aquifer storage and recovery system (laboratory scale)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A large amount of treated wastewater is annually produced in greater cities of the world. On the other hand, groundwater overexploitation in most countries, especially in arid and semi-arid zones, causes a huge rate of groundwater drawdown and its quality. In such conditions, the aquifer recovery and storage (ASR) approach can be proposed. As it is done in most wastewater treatment plants, stage 2 is implemented, in this research, the ability of porous media to increase the quality of effluent in the ASR system is investigated. An experimental model in laboratory scale is designed and set up to evaluate the variation in the quality of the effluent in both its unsaturated and saturated zones, which according to our knowledge has not been addressed in previous studies.

Methods and Materials

The treated wastewater, soil and aquifer water of the region, which are used for the experimental model, have been collected and analyzed in the chemical laboratory. The designed experimental model has a vertical height of 2.5 meters and a horizontal length of 12.5 meters, respectively, to simulate the unsaturated and saturated zones, which was made with a PVC pipe with a diameter of 200 mm. In the mentioned model, a hole with a diameter of 6 cm was created at a distance of one meter from the vertical part and on the horizontal part, and a pipe of the same diameter and a height of 2.5 meters was placed inside it; in which the water level can be adjusted. For the treated wastewater and aquifer water injection site, a platform was considered at the top of the vertical part, and a 200-liter tank for wastewater and a 60-liter tank for water were installed on it. A float was used to create a fixed head at the top of the vertical part of the model, where the effluent enters.

Results and Discussion

The results show that after 60 days, the unsaturated-saturated zones showed a good effect to improve the treated wastewater quality. The BOD and COD of the treated wastewater shows a significant decrease, the BOD value has reached less than 2 mg/L in all periods, which is natural in ground water. The unsaturated zone performed well in removing these parameters. Microbial parameters such as Escherichia coli and Escherichia coli, after passing through the unsaturated zone, their value decreased drastically. The amount of salinity of the injected treated wastewater improves the quality of the soil in the unsaturated zone and improves the quality of the aquifer water in the saturated zone. After 60 days of injection, this process continued, and the more time causes more unsaturated quality improvement. The amount of salinity in the saturated zone has increased over time. But its amount is still lower than the salinity of the aquifer water along the way. After passing through the unsaturated zone, the nitrate concentration of the treated wastewater decreased to a great extent and also improved the water quality of the aquifer, so that after a distance of 7 meters from the beginning of the setup, its value was close to zero.

Conclusion

The groundwater level decline and a large volume of treated wastewater in the metropolises are two important issues in different countries of the world, especially in arid and semi-arid regions. In this regard, the aquifer-storage and recovery approach can be a good solution to manage these two problems. In this research, the ability of unsaturated and saturated porous media to increase the quality of wastewater injected into the aquifer has been investigated in a laboratory experimental model. According to the results, a significant increase in the quality of treated wastewater passing through unsaturated and saturated porous media, shows the high efficiency of this system. So, we propose to use our successful method in the ASR project.

Keywords: Treated wastewater, Aquifer, Decline, Storage, Laboratory.