

Evaluating the Clogging of Porous Media in Aquifer Storage and Recovery System Using Treated Wastewater

Morteza Moogoei¹ and Majid Kholghi^{2*}

1. PhD Candidate, Irrigation & Reclamation Eng. Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj.

2. Professor, Irrigation & Reclamation Eng. Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj.

* kholghi@ut.ac.ir

Received: 1 May 2022, Accepted: 25 July 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The permeability of porous media due to clogging of pores is one of the problems of aquifer storage and recovery (ASR) systems. The more pore clogging occurs when treated wastewater is used as water resources for ASR. In addition to physical clogging, the biological clogging also plays an important role in reducing the permeability and hydraulic conductivity of the porous media. In most of previous studies, the infiltration and clogging of the unsaturated zone have been evaluated by measuring the input-output flow from the soil columns. In this study, the permeability and hydraulic conductivity variations due to the passage of treated wastewater through the unsaturated and saturated zone have been evaluated simultaneously.

Methodology: The main goal of this study is the investigation of permeability and clogging variations in unsaturated-saturated zones in the aquifer storage and recovery system using the treated wastewater. For this study, an experimental model was designed with 2.5 m vertical height (unsaturated layer) and 12.5 m horizontal length (saturated layer). It was made with a PVC pipe with a diameter of 200 mm.

Results and discussion: The input-output flow rates had been measured for a period of 70 days. The reduction of inlet and outlet flow is due to physical and biological clogging of soil pores. The physical clogging usually occurs earlier and in the early parts of the model and then there is a gradual decrease of infiltration velocity and hydraulic conductivity. The rate of increase of biological clogging is slower than physical and with the growth of bacteria, its amount increases to a constant rate. Then, as the bacterial population decreases, the flow rate in the porous media increases and results in a temporary increase in permeability and outlet flow rate. The bacterial growth cycle in a closed environment consists of four stages. This growth pattern corresponds to the fluctuations of the discharge output from the end of the setup. In the first stage (lag phase) when the bacterial population is the smallest, the output discharge is maximum. Then, entering the second stage (log phase), the bacterial population increases up to the maximum. With this increase in growth, the output discharge is reduced to a minimum. After that, the bacterial population enters the third stage (stationary phase) and their population remains constant, and the output discharge in this stage is also almost constant. Then the growth of bacteria enters the fourth stage (death phase) and some of the bacteria die to regain balance and the output flow increases to an almost constant value. This bacterial growth cycle and discharge output continues. In fact, what causes biological

clogging is the activity of bacteria. The gases produced by their activity clogged some of the pores of the porous medium. The nitrate concentration decreases to some extent as the treated wastewater passes through the unsaturated soil. Then, as it continues to move in the saturation zone, its concentration decreases much more and at a distance of 7 meters from the beginning of the setup, its value reaches less than 0.5 mg / liter and this concentration is almost constant at the end of the path. The main reason for the large decrease in nitrate concentration is due to denitrification phenomenon. This is also hydraulically justified by the height of the water inside the piezometers along the flow path. The hydraulic head had many fluctuations in piezometers, which are largely proportional to the output flow fluctuations. The quantitative (inlet and outlet flow and pressure) and qualitative (nitrate concentration) measurements on the model indicate the types of clogging in the porous media.

Conclusion: The output flow of the experimental model after two days from the start of injection reached its maximum value of about 6.7 liters per day and after 6 days began to decrease to about 2.6-2.1 liters per day and had a variation of the same range for about 30 days. Then, its amount has been increased to 4.1 liters per day for 6 days and decreased to 2.1 liters per day in 70 days after the injection. The hydraulic conductivity of the soil also changes in proportion to the changes in the output flow. Before injecting the treated wastewater into the soil column, the amount was 1.32 meters per day and gradually decreased to 0.47 meters per day. The maximum and minimum soil permeability is 14.8 and 4.33 cm per day, respectively. After the injection of treated wastewater, over time, part of the pores of the porous medium is clogged for physical, chemical and biological reasons and reduces the permeability. This permeability reduction can initially be up to 70%, which is the simultaneous effect of three factors of physical, chemical and biological clogging, but with the entry of bacteria into the fourth phase, the effect of biological clogging decreases and the permeability increases so that the penetration rate is 35% less than its original value. If the clogging of the pores is physical, the reduction of permeability and hydraulic conductivity becomes almost permanent, but if the clogging is biological, the reduction of permeability and hydraulic conductivity is temporary. Therefore, a cycle of biological clogging changes in the treated wastewater injection system and using the dry and wet interval periods in accordance with this cycle, the performance of injection ponds can be significantly increased in terms of quantity and quality.

Keyword: permeability, hydraulic conductivity, clogging, laboratory, unsaturated and saturated zone, storage and recovery.



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, 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/>)

ارزیابی گرفتگی منفذهای محیط متخلخل در پروژه‌های ذخیره-احیاء آبخوان با استفاده از پساب

مرتضی موگویی^۱، مجید خلقی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۲- استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

* kholghi@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: سامانه ذخیره-احیاء آبخوان با استفاده از پساب، به رغم برتری که دارد بر توان آبگذر محیط‌های متخلخل ناشباع و اشباع تأثیر منفی می‌گذارد. بررسی این موضوع در قالب طرح پژوهشی کاربردی ذخیره-احیاء سفره‌آب زیرزمینی فشافویه انجام شد. مدل آزمایشگاهی به قطر ۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۲/۵ متر (محیط ناشباع) و طول ۱۲/۵ متر (محیط اشباع) در آزمایشگاه ساخته شد. جریان‌های ورودی خروجی و بار آبی در طول مسیر جریان به مدت ۷۰ روز اندازه‌گیری شد. در هفته اول میزان آب خروجی از ۶/۷ lit/day به ۲/۲ lit/day کاهش یافت و آنگاه میزان آن به مدت ۳۲ روز به‌طور نوسانی بین ۲/۶ تا ۲/۱ لیتر در روز متغیر بود. سپس طی ۵ روز میزان آن تا ۴/۱ lit/day افزایش یافت و دوباره پس از ۷ روز مقدار آن تا ۲/۱ lit/day کاهش یافت. کاهش میزان نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی و در پی آن دبی خروجی به دلیل گرفتگی منافذ خاک طی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است نتایج نشان داد گرفتگی در آغاز فیزیکی بوده و پس از آن با افزایش فعالیت باکتری‌ها و تولید گاز نیتروژن ناشی از فرایند نیترات زدایی گرفتگی منفذها بیشتر شده به‌گونه‌ای که میزان نفوذپذیری ۷۰ درصد نسبت به شرایط اولیه کمتر شد و سپس با کاهش فعالیت باکتری‌ها میزان نفوذپذیری افزایش یافت. بنابر این نتایج در مدیریت ذخیره-احیاء آبخوان به این نکته باید دقت شود که با توجه به چرخه تغییرات نفوذپذیری و انتخاب دوره آیش مناسب برنامه‌ریزی دقیقی برای تغذیه پساب در طول زمان در آبخوان انجام شود تا سامانه به‌طور پایدار در بلندمدت بتواند کارایی خود را حفظ کند.

کلید واژگان: مدل آزمایشگاهی، نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی، گرفتگی منافذ، ناحیه غیراشباع و اشباع.

۱- مقدمه

مطرح است. در خاک یک سری فعالیت‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی صورت می‌گیرد. با عبور فاضلاب از منطقه غیراشباع زمین (حداصل سطح آب زیرزمینی و سطح خاک) و ناحیه اشباع موجبات حذف قدری از آلودگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی فراهم شده و از غلظت آن‌ها کاسته می‌شود (Bouwer, 1994; Asano and Levine, 1996) که حذف این آلودگی‌ها کاهش نفوذپذیری را نیز به دنبال دارد. حذف آلودگی‌های فیزیکی به معنای رسوب این آلودگی‌ها است که باعث گرفتگی برخی از منفذها می‌شود همچنین در پی حذف آلودگی‌های زیستی و فعالیت باکتری‌های موجود باعث تولید گازهایی در

یکی از چالش‌های پروژه‌های ذخیره-احیاء آبخوان (ASR)، کاهش نفوذپذیری محیط متخلخل به دلیل گرفتگی منفذها است. بویژه هنگامی که از پساب در این پروژه‌ها استفاده می‌شود میزان گرفتگی منفذها بیشتر است و نفوذپذیری محیط کاهش شدیدتری دارد زیرا افزون بر گرفتگی فیزیکی گرفتگی زیستی نیز اتفاق می‌افتد که نقش زیادی در کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل دارد.

در تصفیه فاضلاب‌ها، خاک به‌عنوان یک سامانه پویا و زنده

محیط متخلخل به واسطه حرکت کلئیدها ارزیابی شد که نتایج کاهش ۶۵ درصدی نفوذپذیری را نشان داد و هنگامی که یک وقفه کوتاه در تغذیه اعمال شد میزان نفوذپذیری افزایش قابل توجهی یافت (Torkzaban et al., 2015). چرخه گرفتگی مندهای محیط متخلخل در پروژه تغذیه مصنوعی آبخوان به واسطه مواد جامد معلق و باکتری‌های موجود در آب تزریقی کاهش ۳۰ درصدی هدایت هیدرولیکی ستون‌های ماسه را نشان داد (Wang et al., 2020). همچنین نتایج بررسی‌ها و ارزیابی‌های آزمایشگاهی بر روی گرفتگی زیستی در استفاده از پساب‌های رادیواکتیوی کاهش بیش از ۷۲ درصدی هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل را نشان داد (Gui et al., 2018). در بررسی استفاده از سیلاب برای تغذیه آبخوان نتایج نشان داد برای ستون‌های با ماسه ریز میزان نفوذپذیری در ورودی و برای ستون‌های با ماسه درشت میزان نفوذپذیری درونی کاهش قابل توجهی داشت (Zhang et al., 2021). در یک ارزیابی گرفتگی مندهای محیط متخلخل در پروژه ذخیره - احیاء آبخوان با استفاده از پساب نتایج کاهش ۴۶ درصدی میزان نفوذپذیری به واسطه فعالیت ریزموجودها نشان داد (Gao et al., 2020). وجود عنصرهایی مانند $Al(III)$ و $Fe(III)$ در پساب یا آب تزریقی به سفره آب زیرزمینی باعث افزایش گرفتگی زیستی مندهای محیط متخلخل و کاهش هدایت هیدرولیکی در ناحیه اشباع می‌شود (Cui et al., 2018; Zhang et al., 2021). بررسی تغییرات نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در پروژه‌های ذخیره-احیاء آبخوان یکی از ارکان این سامانه است. در صورتی که از آب‌های با کیفیت پایین (پساب) برای سامانه ذخیره بازیافت آبخوان استفاده شود این نارسایی‌ها با شدت بیشتری رخ می‌دهد بنابراین پیش از تزریق به درون آبخوان باید در پایلوت یا آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گیرد و دبی ورودی به چاه یا حوضچه‌های تغذیه و همچنین دوره‌های آیش مشخص شود. در بررسی‌ها و ارزیابی‌های گذشته بیشتر نفوذ سطحی و گرفتگی ناحیه نااشباع به واسطه اندازه گیری جریان ورودی خروجی از ستون‌های خاک ارزیابی شده است

محیط متخلخل شده که این گازها باعث مسدود شدن برخی از مندها شده و کاهش هدایت هیدرولیکی را به دنبال دارد. پیش از تزریق پساب به درون سفره آب زیرزمینی افزون بر ویژگی‌های کیفی پساب و اثر متقابل آن با محیط متخلخل، برای تعیین دبی جریان ورودی به حوضچه‌های تزریق میزان نفوذپذیری محیط متخلخل در طول زمان باید مورد ارزیابی قرار گیرد تا علاوه بر تعیین دبی ورودی دوره‌های آیش مناسب نیز تعیین شود. گرفتگی منافذ محیط متخلخل افزون بر اینکه باعث کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی می‌شود، عمر سودمند سامانه‌های تغذیه آبخوان را نیز کاهش می‌دهد (Li et al., 2021). در یک پژوهش آزمایشگاهی در بولیوار استرالیا گرفتگی چاه‌های ذخیره - بازیافت آبخوان با ستون‌های خاک مورد آزمایش قرار گرفت و به بررسی گرفتگی فیزیکی و زیستی پرداخته شد که بیشتر گرفتگی از نوع فیزیکی بود و هدایت هیدرولیکی به یک میزان کمینه رسید و پس از آن کمی افزایش داشت و در نهایت به یک نرخ ثابت رسید (Rinck-Pfeiffer et al., 2013). در برخی منابع دلیل گرفتگی مندهای محیط متخلخل را ورود حباب‌های هوا به هنگام وارد شدن آب به داخل چاه تزریق گفته شده است (Olsthoorn 1982) همچنین در برخی منابع از میان عامل‌های مؤثر بر گرفتگی مندها محیط متخلخل تأثیر مواد آلی و تخلخل لایه‌های زیرین را بیشتر دانسته‌اند (Wang et al., 2021). ارزیابی ترکیبی گرفتگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی مندهای محیط متخلخل در پروژه مدیریت تغذیه آبخوان با استفاده از پساب کاهش هدایت هیدرولیکی و انتقال عامل‌های بیماری‌زا را نشان می‌دهد (Ramazanpour Esfahani et al., 2020) همچنین نتایج آزمایش‌های ستون خاک در شرایط یکسان نشان داد که بین فرایندهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی گرفتگی مندهای محیط متخلخل ارتباط وجود دارد و این فرایندها تشدیدکننده اثر همدیگر بر میزان کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی هستند (Rinck-Pfeiffer et al., 2000). در یک طرح مدیریت تغذیه آبخوان با استفاده از آزمایش ستون‌های خاک گرفتگی مندهای

آید. برای محیط متخلخل مورد بررسی جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی به ترتیب $1/37$ و $1/42$ گرم بر سانتی متر مکعب، تخلخل آن ۴۴ درصد و هدایت هیدرولیکی آن $1/32$ متر بر روز در آزمایشگاه به روش بار ثابت به دست آمد.

۲-۳- طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق برای بررسی‌ها و ارزیابی گرفتگی منفذهای محیط متخلخل و تغییرات نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی با عبور پساب از لایه‌های ناشباع و اشباع آبخوان، مدل تجربی برای شبیه‌سازی این شرایط طراحی و ساخته شد که در شکل ۱ قابل مشاهده است. مدل طراحی شده شامل $2/5$ متر ارتفاع قائم (ناحیه بالای سطح ایستایی در آبخوان) و $12/5$ متر طول افقی (ناحیه زیر سطح ایستایی در آبخوان) است که با لوله PVC به قطر ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شد. فاصله بین محل‌های نمونه‌برداری و محل پیزومترها روی شکل مشخص شده است. در مدل یادشده برای ایجاد تراز 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 $2/5$ متر درون آن قرار گرفت؛ که تراز آب درون آن قابل تنظیم است تا از این طریق جریان آب در ناحیه اشباع برقرار شود. 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 (مخزن‌ها مدرج هستند) روی آن تعبیه شد. در بالای قسمت قائم مدل که محل ورود پساب است برای ایجاد بار هیدرولیکی ثابت از یک شناور استفاده شد. محل‌های نمونه‌برداری و فاصله پیزومترهای نصب شده در شکل ۱ مشخص است. همچنین یک مخزن مدرج در انتهای مدل برای اندازه‌گیری روزانه جریان خروجی از انتهای مدل، تعبیه شد. با توجه به اینکه مدل یادشده در بیرون و هوای آزاد ساخته شده است، برای جلوگیری از برخورد نور خورشید با مدل، یک سایبان برای آن در نظر گرفته شد.

در صورتی که بخش عمده‌ای از گرفتگی می‌تواند به خاطر نفوذ درونی و در ناحیه اشباع رخ دهد. در این پژوهش نیز تغییرات نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل به واسطه‌ی گرفتگی منفذها با توجه به عبور پساب از ناحیه ناشباع و اشباع در هردو ناحیه به طور هم زمان ارزیابی شد و افزون بر اندازه‌گیری جریان‌های ورودی خروجی با نصب پیزومترهایی در طول ناحیه اشباع به بررسی گرفتگی منفذها در این ناحیه پرداخته شد که در ارزیابی‌های گذشته مورد توجه قرار نگرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منبع تأمین پساب

پساب مورد استفاده در این تحقیق خروجی تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران است. برای جلوگیری از تغییرات در کیفیت پساب در هنگام ذخیره در مخزن سعی شد در بازه‌های زمانی کوتاه پساب تعویض شود؛ که به طور متوسط 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 پیشین در مخزن تغذیه می‌شد؛ و در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری در طول انجام پروژه از پساب موجود در مخزن نیز نمونه‌برداری و برخی قراسنجه‌های آن اندازه‌گیری شد.

۲-۲- خصوصیات محیط متخلخل

پس از بررسی‌های دفتری و میدانی مکان‌هایی مختلف دشت فشافویه در جنوب تهران خاک یکی از مکان‌های مورد بررسی در منطقه حکیم‌آباد که تاحدودی در مرکز دشت است، انتخاب شد. در این ناحیه پس از برداشت خاک سطحی، یک دست بودن بافت خاک قابل مشاهده بود. نزدیک به ۲۰۰۰ کیلوگرم از این خاک زیرسطحی پس از عبور از الک با قطر سوراخ حدود ۷mm، برای ساخت مدل تجربی و انجام آزمایش‌ها، به آزمایشگاه منتقل شد. بر مبنای طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) خاک مورد استفاده شامل ۱۰ درصد رس، ۱۹ درصد سیلت و ۷۱ درصد شن است که بافت آن شنی لومی به شمار

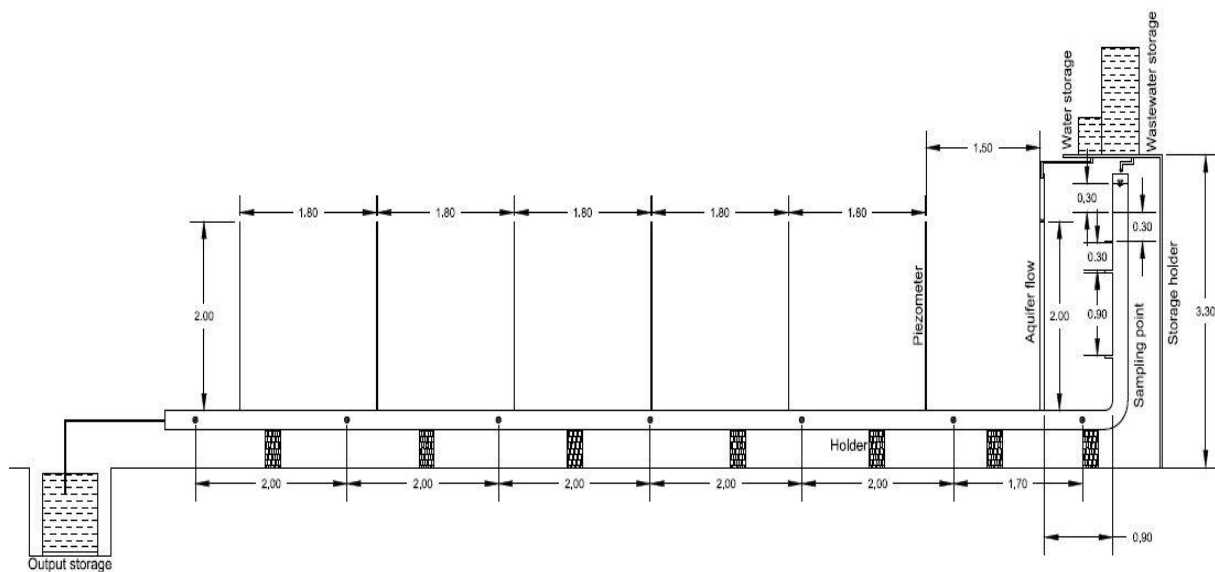


Fig.1 Designed setup of experimental model

شکل ۱ مدل تجربی طراحی شده

عبارت‌اند از: گرفتگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی (Jeong et al., 2018). گرفتگی فیزیکی به طور معمول زودتر و در قسمت‌های ابتدایی مدل (ورود پساب به خاک) اتفاق می‌افتد. پس از آن کاهش تدریجی در سرعت نفوذ و هدایت هیدرولیکی رخ می‌دهد. نرخ افزایش گرفتگی زیستی آرام‌تر است و با رشد باکتری‌ها میزان آن افزایش یافته تا به یک نرخ ثابتی می‌رسد سپس با کم شدن جمعیت باکتری‌ها (به دلیل کمبود مواد غذایی و گازهای موردنیاز و افزایش متابولیت‌های سمی)، جریان در محیط متخلخل بهبود می‌یابد که نتیجه آن افزایش موقت نفوذپذیری و افزایش دبی خروجی است. با فراهم شدن شرایط و افزایش مواد غذایی و کاهش متابولیت‌های سمی باکتری‌ها دوباره رشد کرده و فعالیت آن‌ها افزایش می‌یابد. این فرایند باعث افزایش گرفتگی و کاهش نفوذپذیری و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک و در پی آن کاهش دبی خروجی می‌شود.

شکل ۴ چرخه رشد باکتری‌ها در یک محیط بسته را نشان می‌دهد که شامل چهار مرحله است. این الگوی رشد با شکل ۳ که مربوط به دبی خروجی از انتهای مدل است همخوانی زیادی دارد. در مرحله اول (رشد تأخیری) که جمعیت باکتری‌ها کمترین شمار است و دبی خروجی حداکثر میزان را دارد. سپس با ورود به مرحله دوم (رشد

۳- نتایج و بحث

۳-۱- جریان‌های ورودی و خروجی

میزان پساب ورودی از قسمت قائم، جریان آب ورودی به بخش افقی و همچنین جریان خروجی از انتهای مدل روزانه اندازه‌گیری و ثبت شد. منحنی تجمعی هر کدام (برحسب لیتر) در برابر زمان (برحسب روز) در Fig. 2 Cumulative curve of inlet treated wastewater, aquifer water inlet and outlet water in time شکل ۲ ارائه شده است. منحنی‌های (a)، (b) و (c) به ترتیب مربوط به پساب ورودی از قسمت عمودی، جریان آب ورودی از ابتدای بخش افقی و جریان خروجی از انتهای مدل می‌باشند. با توجه به درپوش‌های تعبیه‌شده برای مخزن‌های ورودی و خروجی میزان تبخیر و بارش صفر است. همچنین منحنی دبی خروجی به صورت روزانه اندازه‌گیری شده که در شکل ۳ قابل مشاهده است. با توجه به این منحنی و شیب منحنی‌های شکل ۲ تغییرات جریان‌های ورودی و خروجی در روزهای مختلف را نشان می‌دهد.

کم شدن دبی ورودی و در پی آن کاهش دبی خروجی به دلیل گرفتگی منفذهای خاک است که سبب کاهش سرعت نفوذ و سرعت جریان در ستون خاک یا همان کاهش هدایت هیدرولیکی خاک شده است. گرفتگی منفذهای خاک می‌تواند شامل سه بخش باشد که

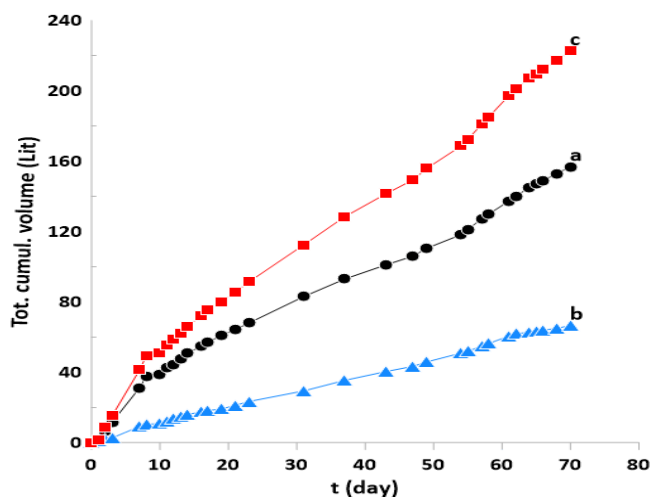


Fig. 2 Cumulative curve of inlet treated wastewater, aquifer water inlet and outlet water in time
 شکل ۲ منحنی تجمعی پساب ورودی، جریان آب آبخوان و آب خروجی در زمان

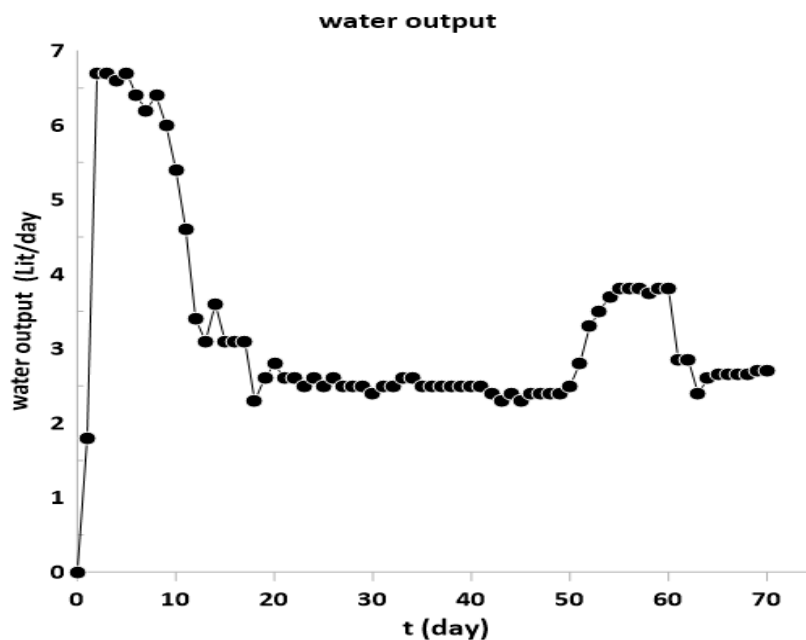


Fig. 3 Daily Output flow curve
 شکل ۳ منحنی روزانه دبی خروجی

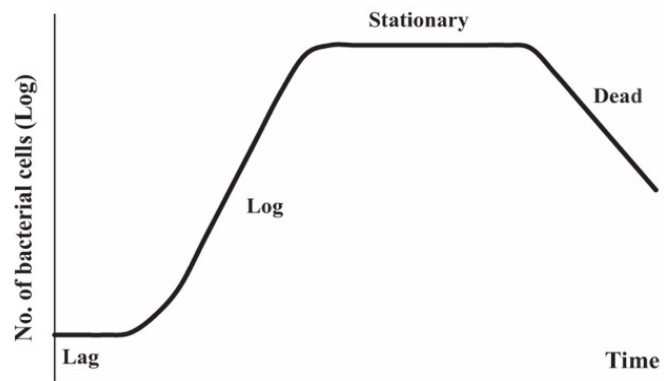


Fig. 4 Growth curve of bacteria in treated wastewater
 شکل ۴ منحنی رشد باکتری‌های موجود در پساب

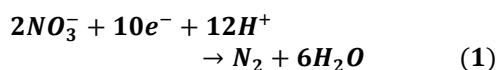
لگاریتمی) جمعیت باکتری‌ها افزایش می‌یابد تا به بیشترین شمار می‌رسد. با این افزایش رشد، دبی خروجی کاهش یافته تا به کمترین میزان رسید. پس از آن، جمعیت باکتری‌ها وارد مرحله سوم (فاز سکون) شده که در این مرحله تعداد مرگومیر و افزایش باکتری‌ها تاحدودی برابر است و جمعیت آن‌ها ثابت می‌ماند. با توجه به شکل ۳ مشخص است که دبی خروجی در این مرحله نیز میزان تاحدود ثابت دارد. در انتهای مرحله سوم گازهای موردنیاز کاهش یافته و متابولیت‌های سمی افزایش یافته و رشد باکتری‌ها وارد مرحله چهارم (فاز خودخوری یا مرگ) شده که رشد باکتری‌ها در این مرحله منفی است و بخشی از باکتری‌ها می‌میرند تا دوباره تعادل برقرار شود. با توجه به شکل ۳ مشخص است در این مرحله دبی خروجی افزایش یافته تا به یک میزان تاحدود ثابتی می‌رسد. و این چرخه تغییرات رشد باکتری‌ها و دبی خروجی ادامه دارد. دما و pH دو عامل مؤثر در کنترل رشد باکتری‌ها هستند که در طول انجام این پژوهش دما بین ۱۲ تا ۲۸ درجه سلسیوس و pH بین ۷/۱ تا ۷/۹ بوده است.

درواقع آنچه باعث گرفتگی زیستی می‌شود، فعالیت باکتری‌ها است. گازهای تولیدی ناشی از فعالیت آن‌ها باعث مسدود شدن برخی از خلل و فرج محیط متخلخل شده که نتیجه آن کاهش جریان‌های ورودی و خروجی می‌شود. هنگام باز کردن درپوش‌های محل‌های نمونه‌برداری بخشی از گازهای تولیدشده توسط فعالیت باکتری‌ها به همراه بخار آب با فشار خارج می‌شد که این موضوع نیز بیانگر فعالیت باکتری‌ها و تولید گاز است. از جهت دیگر تغییرات نیترات در طول مسیر حرکت جریان در محیط متخلخل این موضوع را اثبات می‌کند.

این تحقیق برای بررسی تغییرات غلظت نیترات طی حرکت جریان پساب در ناحیه غیراشباع و ناحیه اشباع در طول مسیر جریان طی روزهای ۱، ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ روز از آغاز تزریق میزان غلظت آن اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۵ آورده شده است. میزان غلظت نیترات طی انجام پروژه برای پساب بین ۱۸/۹۸ تا ۲۲/۱۸ میلی‌گرم در لیتر، برای آب آبخوان بین ۱۲/۸۴ تا ۱۶/۷۷ میلی‌گرم بر لیتر و برای عصاره اشباع خاک مقدار

آن ۶/۷۱ میلی‌گرم در لیتر است. میزان غلظت نیترات در پساب از خاک و آب آبخوان بیشتر است. با عبور پساب از خاک ناحیه نااشباع، غلظت نیترات تا حد زیادی کاهش می‌یابد و به کمتر از میزان آن در آب آبخوان می‌رسد. پس از عبور پساب از ناحیه نااشباع 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 باهم در ادامه حرکت در ناحیه اشباع غلظت نیترات کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در فاصله ۷ متری از ابتدای مدل میزان آن به یک دامنه به نسبت ثابت کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد. تا انتهای مسیر این مقدار غلظت تاحدودی ثابت است. در ۶۰ سانتی‌متری ابتدایی حرکت پساب در ناحیه غیراشباع تغییرات غلظت نیترات نوسان دارد اما از آن به بعد با یک شیب منفی تا نزدیک به قسمت اشباع میزان غلظت کاهش می‌یابد. شیب تغییرات غلظت در ناحیه نااشباع 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.

دلیل اصلی کاهش زیاد غلظت نیترات با عبور از ناحیه نااشباع و اشباع پدیده نیترات زدایی است. فرایند نیترات زدایی توسط باکتری‌هایی که به طور کلی ناخودپرور بوده و نسبت به باکتری‌های خودپرور که فرایند نیترات زایی را انجام می‌دهند، عمومی‌تر هستند، صورت می‌پذیرد. در این فرایند باکتری‌ها از نیترات به‌عنوان آخرین پذیرنده الکترون استفاده می‌کنند و در شرایط انوکسیک (بی‌اکسیژن)، نیترات تبدیل به گاز نیتروژن شده و از محیط خارج می‌شود. فرایند نیترات زدایی به‌صورت رابطه (۱) رخ می‌دهد. در این واکنش زیستی، نیترات به‌عنوان الکترون گیرنده و ماده آلی نیز به‌عنوان الکترون دهنده عمل می‌کند تا واکنش‌های اکسایش و کاهش تکمیل شود که در رابطه (۱) ملاحظه می‌شود.



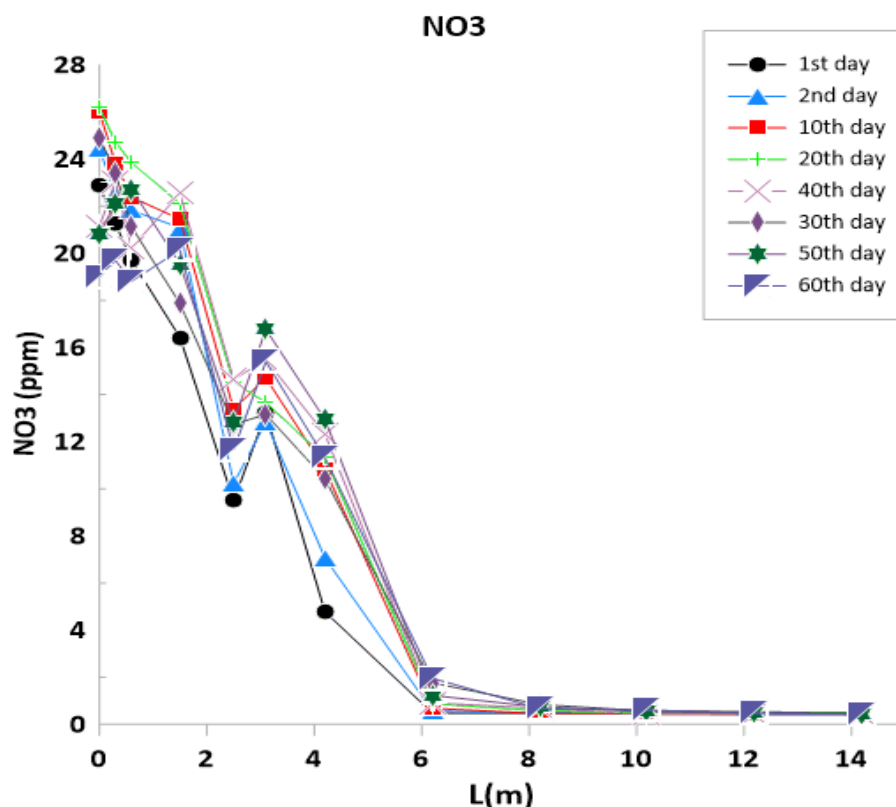


Fig. 5 Nitrate concentration variations in unsaturated and saturated zones

شکل ۵ تغییرات غلظت نیترات در ناحیه‌های غیراشباع و اشباع

۴- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری‌های کمی (جریان‌های ورودی خروجی و فشار) و کیفی (تغییرات غلظت نیترات) صورت گرفته در مدل تجربی، بیانگر انواع گرفتگی در محیط‌های متخلخل است و تاییدکننده هم دیگر هستند. دبی خروجی مدل پس از دو روز از آغاز تزریق به بیشترین میزان خود حدود ۶/۷ لیتر بر روز رسید و پس از ۶ روز آغاز به کم شدن کرد تا به حدود ۲/۶-۲/۱ لیتر بر روز رسید و حدود ۳۰ روز در همین رنج تغییرات داشت و پس از آن در مدت ۶ روز میزان آن افزایش یافت تا به میزان ۴/۱ لیتر بر روز رسید و آنگاه میزان آن کم شد تا در ۷۰ روز پس از آغاز تزریق میزان آن به ۲/۱ لیتر بر روز رسید. متناسب با تغییرات دبی خروجی هدایت هیدرولیکی خاک نیز تغییر می‌کند. پیش از تزریق پساب به ستون خاک مقدار آن ۱/۳۲ متر بر روز بود و رفته‌رفته میزان آن کم شد تا به میزان ۰/۴۷ متر بر روز رسید و همانند دبی در برخی روزها کم و زیاد می‌شد. این تغییرات هدایت هیدرولیکی به خاطر گرفتگی منافذهای خاک است که به خاطر تأثیر توأمان مواد معلق

دلیل این ادعا می‌تواند گاز خارج شده هنگام نمونه‌برداری باشد. این موضوع از نظر هیدرولیکی در شکل ۶ که بیانگر ارتفاع آب درون پیژومترها در طول مسیر جریان است نیز قابل توجیه است. بار آب در پیژومترها نوسانات زیادی داشت که این نوسانات تا حد زیادی متناسب نوسان‌های دبی خروجی است. با افزایش گرفتگی ارتفاع آب درون پیژومترها بالاتر می‌رود و اختلاف ارتفاع بین پیژومترهای وسطی باهم کمتر می‌شود ولی با خروجی مدل اختلاف ارتفاع بیشتر است. خط‌واصل بین این پیژومترها خط‌بار هیدرولیکی در مسیر جریان را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه گرفتگی فیزیکی بیشتر در ابتدای مسیر جریان (محل ورود پساب) رخ می‌دهد می‌بینیم که در شکل ۶ بین پیژومتر اول و دوم با محل ورود آب زیرزمینی اختلاف ارتفاع بیشتری وجود دارد؛ اما در ادامه مسیر گرفتگی بیشتر از نوع زیستی و شیمیایی است که میزان آن در روزهای مختلف متناسب با فعالیت باکتری‌های موجود در مسیر جریان است.

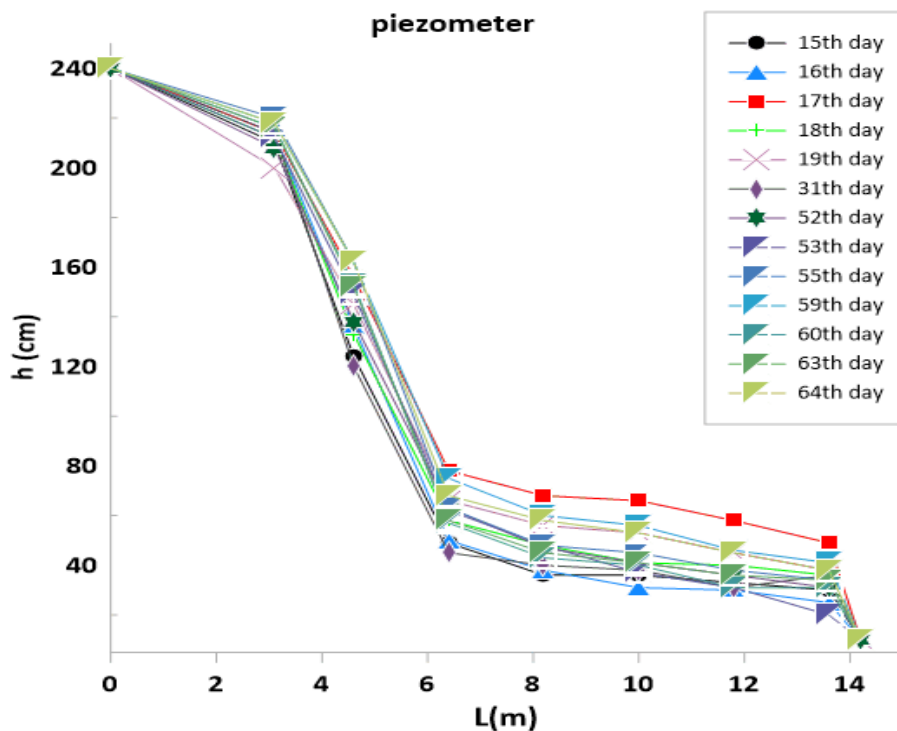


Fig. 6 Water level of piezometers on different days

شکل ۶ ارتفاع آب پیزومترها برای روزهای مختلف

متخلخل اشباع و ناشباع بیانگر میزان گرفتگی منفذهای محیط متخلخل است که این تغییرات می‌تواند موقت یا دائمی باشد. در صورتی که گرفتگی منفذها به خاطر رسوب‌های معلق موجود در پساب یا جابه‌جایی ریزدانه‌های موجود در محیط متخلخل باشد (گرفتگی فیزیکی) کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی تاحدودی دائمی می‌شود و به‌خودی‌خود قابل احیاء نیست مگر با انجام عملیات مکانیکی ولی در صورتی که گرفتگی به خاطر افزایش جمعیت باکتری‌ها و گازهای ناشی از فعالیت آن‌ها باشد (گرفتگی زیستی) کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی موقت است به این معنی که با ایجاد وقفه و یک دوره استراحت به سامانه تا حد زیادی اثرگذاری‌های گرفتگی زیستی برطرف شده و میزان نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی محیط مجدد افزایش می‌یابد. بنابراین با داشتن چرخه تغییرات گرفتگی زیستی برای پروژه‌های تزریق پساب و استفاده از دوره‌های آیش متناسب با این چرخه می‌توان کارکرد حوضچه‌های تزریق را از نظر کمی و کیفی افزایش چشم‌گیری داد.

درون پساب و رشد جمعیت باکتری‌ها و گازهای تولیدی ناشی از فعالیت آن‌ها به ویژه گاز نیتروژن در طول مسیر جریان است.

میزان نفوذپذیری خاک در بیشترین و کمترین میزان خود به ترتیب $14/8$ و $4/33$ سانتی‌متر بر روز است که این فراسنجه هم تغییراتی همانند تغییرات آب خروجی و هدایت هیدرولیکی دارد. پس از شروع تزریق پساب به درون سفره آب زیرزمینی باگذشت زمان بخشی از منفذهای محیط متخلخل به علت‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مسدود شده و باعث کاهش نفوذپذیری محیط می‌شود. این کاهش نفوذپذیری در آغاز می‌تواند تا ۷۰ درصد باشد که اثر همزمان سه عامل گرفتگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. با ورود باکتری‌ها به فاز چهارم رشد (فاز مرگ) تأثیر گرفتگی زیستی کاهش می‌یابد و میزان نفوذپذیری افزایش می‌یابد به گونه‌ای که میزان نفوذ ۳۵ درصد کمتر از میزان اولیه خود است که مشخص می‌کند بخش عمده‌ای از گرفتگی منفذهای محیط متخلخل از نوع زیستی و به خاطر فعالیت باکتری و تولید گاز از جمله گاز نیتروژن است.

تغییرات نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی محیط‌های

Water Science and Technology, 83(10), DOI: 10.2166/wst.2021.155.

Olsthoorn, T.N. (1982). Clogging of recharge wells: main subjects. KIWA-communications, KIWA. No. 7, 136p.

Ramazanpour Esfahani, A., Batelaan, O., Hutson, J.L., and Fallowfield, H.J. (2020). Combined physical, chemical and biological clogging of managed aquifer recharge and the effect of biofilm on virus transport behavior: A column study. Journal of Water Process Engineering, 33, 101115, DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.101115

Rinck-Pfeiffer, S., Dillon, P., Ragusa, S., Hutson, J., Fallowfield, H., Marsily, G. and Pavelic, P. (2013). Reclaimed Water for Aquifer Storage and Recovery: A Column Study of Well Clogging, In: Martin, R. (ed.) Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods (IAH Commission on Managing Aquifer Recharge), 26-33.

Rinck-Pfeiffer, S., Ragusa, S., Sztajn bok, P. and Vandeveld, T. (2000). Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells., Water Research, 34(7), 2110-2118, DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00356-5.

Torkzaban, S., Bradford, S.A., Vanderzalm J.L., Patterson, B.M., Harris, B. and Prommer, H. (2015). Colloid release and clogging in porous media: Effects of solution ionic strength and flow velocity, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 181, 161-171, Doi:10.1016/j.jconhyd.2015.06.005.

Wang, H., Sheng, L., and Xu, J. (2021). Clogging mechanisms of constructed wetlands: A critical review, Journal of Cleaner Production, 295, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126455.

Wang, H., Xin, J., Zheng, X. and Zheng, T. (2020). Clogging evolution in porous media under the coexistence of suspended particles and bacteria: Insights into the mechanisms and implications for groundwater recharge. Journal of Hydrology, 582, 124554. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124554

Zhang, H., Ye, X., and Du, X. (2021). Laws and Mechanism of the Fe (III) Clogging of Porous Media in Managed Aquifer Recharge. Water, 13(3), 284. DOI: 10.3390/w13030284.

۵- تقدیر و تشکر

این تحقیق بخشی از یک پروژه پژوهشی کاربردی بین دانشگاه تهران و شرکت آب منطقه‌ای تهران (قرارداد شماره ۱۵۵-۷۳-۳) می‌باشد. در اینجا، پژوهشگران پروژه از شرکت آب منطقه‌ای تهران برای تأمین مالی این پژوهش قدردانی می‌کنند. از سوی دیگر نیز از گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به خاطر در اختیار گذاشتن آزمایشگاه‌های تحقیقات آب، کیفیت آب و مکانیک خاک صمیمانه قدردانی می‌کنند.

۶-منبع‌ها

Asano, T. and Levine, A.D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. Water Science and Technology, 33(10-11), 1-14, DOI:10.1016/0273-1223(96)00401-5.

Bouwer, H. (1994). Irrigation and global water outlook. Agricultural Water Management, 25(3), 221-231.

Cui, X., Chen, C., Sun, S. and Crittenden, C. (2018). Acceleration of saturated porous media clogging and silicon dissolution due to low concentrations of Al (III) in the recharge of reclaimed water. Water Research, 143, 136-145, DOI: 10.1016/j.watres.2018.06.043.

Gaol, C.L., Ganzer, L., Mukherjee, S. and Alkan, H. (2020). Investigation of clogging in porous media induced by microorganisms using a microfluidic application. Environmental Science, Water Research & Technology, 7(2), 441-454, DOI: 10.1039/D0EW00766H.

Gui, R., Pan, X., Ding, D., X., Liu, Y. and Zhang, Z. (2018). Experimental Study on Bioclogging in Porous Media during the Radioactive Effluent Percolation. Advances in Civil Engineering, Article ID: 9671371, DOI:10.1155/2018/9671371.

Jeong, H.Y., Jun, S.-J., Cheon, J.-Y. and Park, M., (2018). A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery (ASR) applications. Geosciences Journal, 22(4), 667-679. DOI: 10.1007/s12303-017-0073-x.

Li, Y.-H., Peng, L.-L., Li, H.-B. and Liu, D.-Z., (2021). Clogging in subsurface wastewater infiltration beds: genesis, influencing factors, identification methods and remediation strategies.