

Temporal and Spatial Variations in Permeability and Efficiency of Artificial Recharge Basins Under Sediment-Laden Flow Conditions (Laboratory Study)

Ali Akbarian Khalilabad, Hojat Karami* and Sayed Farhad Mousavi¹

(Received: February 14-2025 ; Revised: July 19-2025 ; Accepted: July 30-2025)

1. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

*: Corresponding author, Email: Hkarami@semnan.ac.ir

Abstract

The reduction of soil permeability due to the sedimentation of suspended particles is a significant challenge to the efficient operation of artificial recharge systems. In this study, the effects of sediment concentration (0.5, 2, and 4 g/L), soil particle size, and vertical distribution on clogging processes were investigated using laboratory soil column experiments. The results showed a two-phase decrease in permeability: a rapid initial drop caused by the blockage of coarse pores during the first 10 minutes, followed by a second phase where the system reached a relative equilibrium. Higher sediment concentrations led to a faster decline and lower equilibrium values of permeability. Fine-grained soils, despite having lower initial permeability, demonstrated greater resistance to clogging, while coarse-grained soils experienced more severe reductions. Vertical analysis indicated that the most significant permeability loss occurred at a depth of 40-50 cm, while deeper layers showed increased permeability due to the limited penetration of suspended particles. These findings can inform the selection of appropriate materials, the design of subsurface layers in recharge basins, the prediction of system lifespan, and the regulation of sediment load in inflows to enhance the efficiency and sustainability of artificial recharge systems.

Keywords: Groundwater, Constant head permeability test, Clogging, Laboratory modeling

How to cite this article: Akbarian Khalilabad, A., Karami, H. and Mousavi, S. F. 2025. Temporal and Spatial Variations in Permeability and Efficiency of Artificial Recharge Basins Under Sediment-Laden Flow Conditions (Laboratory Study). *J. Water and Soil Sci.* 29(3): 131-144. DOI: [10.47176/jwss.29.3.34127](https://doi.org/10.47176/jwss.29.3.34127)

Copyright © 2025 Akbarian Khalilabad et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی تغییرات زمانی و مکانی نفوذپذیری و بازده حوضچه‌های تغذیه مصنوعی در شرایط جریان‌های رسوبی (مطالعه آزمایشگاهی)

علی اکبریان خلیل‌آباد، حجت کرمی*  و سیدفرهاد موسوی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۸)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Hkarami@semnan.ac.ir

چکیده

کاهش نفوذپذیری خاک در اثر ته‌نشینی ذرات معلق، یکی از موانع اصلی در عملکرد بهینه سامانه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به شمار می‌رود. در این پژوهش، تأثیر غلظت رسوبات (۰/۵، ۲ و ۴ گرم بر لیتر)، اندازه ذرات خاک و توزیع عمقی بر فرایند انسداد در ستون‌های آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که کاهش نفوذپذیری در دو مرحله رخ می‌دهد: در مرحله اول با افت اولیه سریع به دلیل انسداد منافذ درشت در ۱۰ دقیقه نخست، و مرحله دوم که در آن سیستم به تعادل نسبی می‌رسد. افزایش غلظت رسوبات موجب افت سریع‌تر و رسیدن به مقادیر تعادلی کمتر شد. خاک‌های ریزدانه با وجود نفوذپذیری اولیه کمتر، پایداری عملکرد بیشتری در برابر انسداد نشان دادند؛ در حالی که خاک‌های درشت‌دانه، کاهش شدیدتری را تجربه کردند. همچنین تحلیل عمقی نشان داد بیشترین افت نفوذپذیری در عمق ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر رخ داده و در عمق‌های کمتر به دلیل کاهش تراکم ذرات معلق، مقدار نفوذپذیری افزایش یافته است. این یافته‌ها می‌توانند در انتخاب مصالح، طراحی لایه‌های زیرین حوضچه، پیش‌بینی عمر مفید سامانه و تنظیم بار رسوبی ورودی برای افزایش بهره‌وری سامانه‌های تغذیه مصنوعی کاربرد داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آزمایش بار ثابت، انسداد، مدل‌سازی آزمایشگاهی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

یکی از روش‌های مؤثر در حفظ منابع آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌هاست. این روش شامل انتقال آب‌های سطحی به لایه‌های زیرزمینی از طریق حوضچه‌های تغذیه، کانال‌های نفوذی یا تزریق مستقیم است. این تکنیک می‌تواند به جبران کاهش سطح آب زیرزمینی، کاهش اثرهای خشکسالی و تأمین پایدار آب کمک کند. با این حال، یکی از مشکلات عمده در اجرای این روش، انسداد تدریجی منافذ خاک به دلیل ورود رسوبات معلق به بستر آبخوان و کاهش ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل است. انسداد می‌تواند به مرور زمان باعث کاهش کارایی سیستم‌های تغذیه مصنوعی شود (۳ و ۱۱).

تجمع رسوبات در حوضچه‌های تغذیه مصنوعی باعث کاهش سرعت نفوذ آب به لایه‌های زیرزمینی شده و نیاز به نگهداری و لایروبی مداوم را افزایش می‌دهد. این مسئله هزینه‌های اجرایی پروژه‌های تغذیه مصنوعی را افزایش داده و بهره‌وری آن‌ها را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، مطالعه و بررسی دقیق عوامل تأثیرگذار بر نفوذپذیری خاک در شرایط تغذیه مصنوعی، از جمله غلظت رسوبات، اندازه ذرات خاک، سرعت جریان و عمق نفوذ رسوبات برای بهینه‌سازی این سیستم‌ها ضروری است (۲ و ۹).

کاهش نفوذپذیری ناشی از رسوبات معلق، یکی از چالش‌های اصلی در عملکرد سیستم‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به شمار می‌رود و تاکنون مطالعات متعددی با هدف بررسی مکانیزم‌های انسداد در محیط‌های متخلخل انجام شده است. احفیر و همکاران (۱) با استفاده از آزمایش‌های ستونی، به بررسی انتقال و رسوب‌گذاری ذرات معلق در محیط‌های متخلخل اشباع پرداختند و تأثیر عوامل هیدرودینامیکی مانند دبی و توزیع اندازه ذرات را بر نرخ رسوب بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افزایش نیروی جریان می‌تواند مانع از رسوب‌گذاری مؤثر شود؛ اما همچنان پدیده انسداد در نرخ‌های مختلف جریان دیده می‌شود (۴ و ۱۲).

در مطالعات دیگر، ساختار و ترکیب خاک نیز به عنوان عامل مهم در تغییر نفوذپذیری شناخته شده‌اند. گوتیرز و والجو (۸)

نشان دادند که افزایش درصد و اندازه ذرات درشت در مخلوط‌های خاکی، هدایت هیدرولیکی را به طور محسوسی کاهش می‌دهد. همچنین دو و همکاران (۶ و ۷) با انجام آزمایش‌های متعدد، سه نوع انسداد را شناسایی کردند: انسداد سطحی، داخلی و ترکیبی که هر یک ویژگی‌های متفاوتی در موقعیت و نرخ افت هدایت هیدرولیکی دارند. آن‌ها تأکید کردند که نسبت اندازه ذرات معلق به قطر منافذ محیط، تعیین‌کننده اصلی نوع انسداد است و سرعت جریان نیز می‌تواند شدت آن را تعدیل کند.

در همین راستا، چو و همکاران (۵) با طراحی آزمایش‌های دقیق ستونی و شبیه‌سازی عددی نشان دادند که انسداد فیزیکی ناشی از ذرات معلق بیشتر در لایه‌های سطحی خاک رخ می‌دهد و با افزایش عمق، شدت گرفتگی کاهش می‌یابد. مدل عددی آن‌ها توانست به خوبی روند کاهش هدایت هیدرولیکی در طول زمان و عمق را بازسازی کند و نقش توزیع عمقی گرفتگی را برجسته سازد.

با وجود این تلاش‌ها، بیشتر مطالعات پیشین به بررسی جداگانه اثر رسوبات یا ویژگی‌های خاک پرداخته‌اند و کمتر به تعامل هم‌زمان عوامل مختلف مانند غلظت رسوب، دانه‌بندی خاک و توزیع عمقی انسداد در شرایط نزدیک به واقعیت محیطی توجه کرده‌اند. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به شبیه‌سازی آزمایشگاهی رفتار حوضچه‌های تغذیه مصنوعی در شرایط رسوبی پرداخته و تلاش کرده است با بهره‌گیری از داده‌های واقعی سیلاب‌ها، تأثیر هم‌زمان متغیرهای کلیدی بر روند انسداد و تغییرات نفوذپذیری را ارزیابی کند. این رویکرد می‌تواند به ارائه راهکارهای عملی در طراحی، بهره‌برداری و نگهداری حوضچه‌های تغذیه مصنوعی کمک شایانی کند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، طراحی شرایط آزمایشگاهی با هدف شبیه‌سازی تغذیه مصنوعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران انجام شد. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی، ویژگی‌های

رسوبات و شرایط هیدرولوژیکی مورد استفاده، بر پایه داده‌های میدانی استخراج شده از حوضچه‌های فعال در مناطق سمنان و سرخه تنظیم شد (شکل ۱). این مناطق به دلیل بهره‌برداری مداوم از حوضچه‌های تغذیه مصنوعی و قرار داشتن در اقلیم خشک، نمونه‌های مناسبی برای بازنمایی شرایط واقعی عملکرد سیستم‌های نفوذی هستند. انتخاب داده‌های محیطی از این مناطق، امکان بازسازی نسبتاً دقیق رفتار سامانه‌های تغذیه مصنوعی در مقیاس آزمایشگاهی را فراهم کرد، بدون اینکه مستقیماً وارد تحلیل میدانی یا مقایسه عملکردی حوضچه‌های خاص شویم.

مواد مورد استفاده در آزمایش

خاک

در این پژوهش، برای انجام آزمایش‌ها و شبیه‌سازی شرایط تغذیه مصنوعی، از خاک به عنوان یکی از مواد اصلی استفاده شده است. در مرحله اول تلاش شد تا از خاک یک منطقه واقعی که دارای حوضچه‌های تغذیه مصنوعی بود، برای آزمایش‌ها استفاده شود. اما آزمایش‌های اولیه در آزمایشگاه نشان داد که متراکم شدن زیاد این نوع خاک در ستون‌های آزمایشی، آن را برای ادامه مطالعه نامناسب می‌سازد؛ بنابراین، از دو مدل خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی متفاوت استفاده شد. این انتخاب به دلیل بافت مناسب این خاک‌ها برای آزمایش‌های ستونی و سهولت در تهیه آنها بوده است. دو نوع خاک ماسه‌ای مورد استفاده دارای دانه‌بندی با D_{50} برابر با ۱ میلی‌متر و ۰/۱۸ میلی‌متر هستند (شکل‌های ۲ و ۳). استفاده از این دو مدل خاک ماسه‌ای امکان بررسی دقیق تأثیر دانه‌بندی و بافت خاک بر فرایند نفوذپذیری و رسوب‌گذاری را فراهم می‌کند. این داده‌ها به تحلیل بهتر عملکرد سامانه‌های تغذیه مصنوعی و ارائه راهکارهای عملی برای بهینه‌سازی آنها کمک می‌کند.

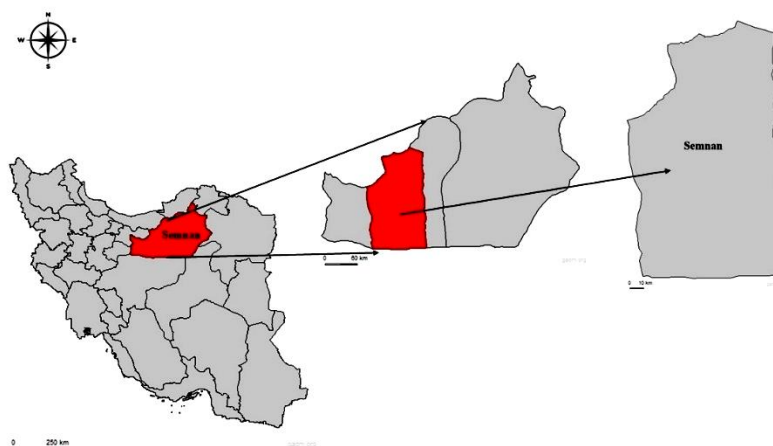
آب و رسوب

در این مطالعه، از آب لوله‌کشی شهری به عنوان منبع آب ورودی استفاده شد. با وجود اینکه آنالیز کامل شیمیایی و فیزیکی روی

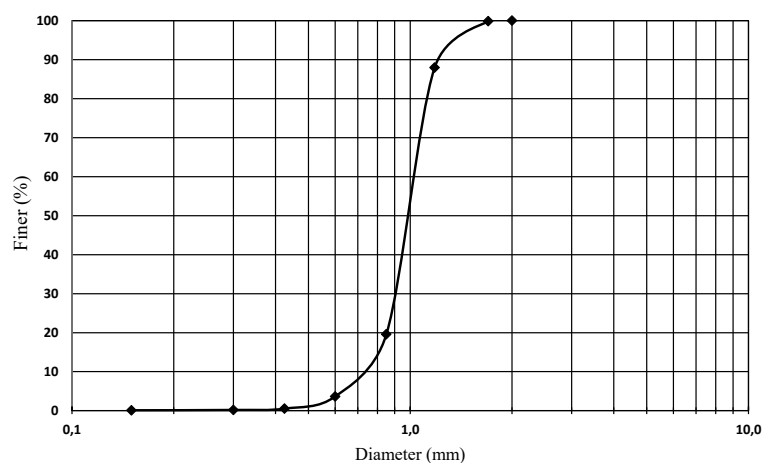
این آب انجام نشد، انتخاب آن به دلیل یکنواختی نسبی کیفیت و نبود مواد معلق زیاد بوده است. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی نقش بافت خاک در نفوذپذیری و رسوب‌گذاری بوده و استفاده از آب نسبتاً تمیز، امکان کنترل بهتر متغیرهای تأثیرگذار را فراهم کرده است. با این حال، انجام آزمایش‌های تکمیلی با آب‌های دارای بار رسوبی واقعی در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود. برای تعیین غلظت رسوب در آب، از داده‌های مربوط به آب منطقه که از رودخانه‌های محل در زمان سیلاب جمع‌آوری شده بودند، بهره گرفته شد. سه غلظت مختلف برای این پژوهش در نظر گرفته شد که شامل بیشینه، میانگین و کمینه غلظت‌های رسوب بود. این رویکرد این امکان را داد که تأثیرات مختلف غلظت‌های رسوب روی فرایند تغذیه مصنوعی و رفتار خاک بررسی شود. استفاده از این روش کمک کرد تا نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود و درک بهتری از تأثیرات رسوب‌گذاری بر عملکرد حوضچه‌های تغذیه مصنوعی به دست آید.

فرایند انجام آزمایش

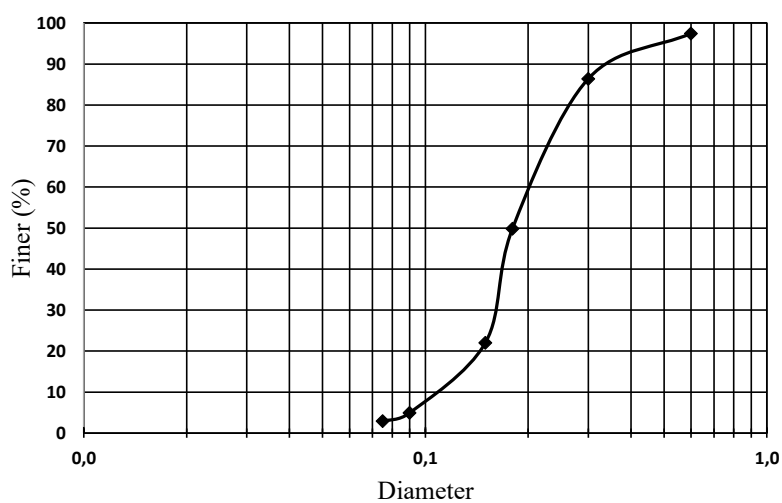
در این مطالعه، آزمایش هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از ستون‌هایی که با دقت طراحی و آماده‌سازی شده بودند، انجام شد. برای ساخت ستون‌های آزمایشی از لوله‌های پلیکا با قطر ۱۱ سانتی‌متر و طول ۹۰ سانتی‌متر استفاده شد. این لوله‌ها به دلیل وزن سبک، قیمت مناسب و دسترسی آسان، انتخاب مناسبی برای انجام آزمایش محسوب شدند. ستون‌ها روی پایه‌های فلزی مستقر شدند که ۳۰ سانتی‌متر از سطح زمین ارتفاع داشتند. در انتهای هر ستون، از توری‌هایی با مش ریز استفاده شد تا از خروج ذرات ریز خاک جلوگیری شود و تا حد امکان بافت خاک در طول آزمایش حفظ شود. با این حال، باید توجه داشت که به دلیل عبور آب از بالا به پایین، احتمال جابه‌جایی و ته‌نشینی ذرات ریزتر خاک در بخش‌های پایینی ستون وجود دارد. این پدیده ممکن است منجر به تغییر نسبی در توزیع دانه‌بندی و در نتیجه تغییر موضعی در نفوذپذیری در



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهرستان سمنان واقع در استان سمنان



شکل ۲. نمودار دانه بندی خاک با متوسط اندازه ذرات ۱ میلی متر



شکل ۳. نمودار دانه بندی خاک با متوسط اندازه ذرات ۰/۱۸ میلی متر

در خاک اشباع ایجاد کرد. جدول ۱ نشان‌دهنده طراحی آزمایش‌های مرتبط با بررسی هدایت هیدرولیکی خاک است. در این جدول، ترکیب‌های مختلفی از دو نوع خاک با اندازه ذرات مشخص و سه غلظت متفاوت رسوب مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نام‌گذاری آزمایش‌ها به گونه‌ای است که نوع خاک و غلظت رسوب به‌وضوح مشخص باشد. برای افزایش دقت داده‌ها و اطمینان از صحت نتایج، تمامی آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شدند. تکرارها امکان کاهش اثر خطاهای احتمالی و بهبود کیفیت محاسبات را فراهم کردند. این فرایند موجب شد میانگین‌گیری از داده‌ها دقیق‌تر انجام شود و انحراف استاندارد محاسبات کاهش یابد.

محاسبات ضریب هدایت هیدرولیکی

در این پژوهش، به‌منظور تعیین ضریب نفوذپذیری نمونه‌های خاک، از آزمایش بار ثابت مطابق اصول جریان در محیط‌های متخلخل استفاده شد. جریان آب با هد ثابت از درون ستون‌های آزمایشی عبور داده شد و حجم جریان عبوری در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از پارامترهای هندسی ستون و اختلاف هد، ضریب نفوذپذیری به روش تجربی محاسبه شد. به‌منظور اطمینان از برقراری شرایط جریان داری، نرخ جریان و شیب هیدرولیکی تحت کنترل قرار داشتند تا از بروز جریان‌های غیرخطی جلوگیری شود. جزئیات روابط مورد استفاده در این آزمایش مطابق منابع استاندارد مکانیک سیالات و خاک ارائه شده‌اند.

$$V = \frac{\Delta h}{L} k \quad (1)$$

در این معادله، V سرعت ظاهری جریان (متر بر ثانیه)، K ضریب نفوذپذیری خاک (متر بر ثانیه)، Δh اختلاف هد هیدرولیکی (متر) و L طول نمونه خاک در مسیر جریان (متر) است.

$$K = \frac{QL}{A\Delta ht} \quad (2)$$

در این معادله، Q حجم جریان عبوری از نمونه خاک (مترمکعب)، L طول نمونه (متر)، A سطح مقطع نمونه خاک (مترمربع)، Δh اختلاف هد هیدرولیکی (متر) و t مدت‌زمان عبور جریان (ثانیه) است.

بخش‌های مختلف ستون شده باشد. این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر قابل طرح است و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، با استفاده از آنالیز دانه‌بندی قبل و بعد از آزمایش در نقاط مختلف ستون، میزان این تغییرات به‌صورت کمی ارزیابی شود. ستون‌ها با خاک ماسه‌ای پر شدند؛ به‌طوری که ارتفاع نهایی خاک داخل هر ستون به ۷۰ سانتی‌متر رسید. خاک به‌صورت لایه‌لایه در ستون قرار داده شد و در هنگام پر کردن ستون‌های آزمایش، خاک در لایه‌هایی با ضخامت حدودی مشخص ریخته و با چکش پلاستیکی به‌صورت ملایم و یکنواخت فشرده شد. هرچند اندازه‌گیری مستقیم چگالی ظاهری در طول ستون انجام نشد؛ اما تلاش شد تا با استفاده از وزن مساوی خاک در هر لایه و تعداد ضربات یکنواخت، شرایطی مشابه و تکرارپذیر برای تمامی نمونه‌ها فراهم شود. با این حال، برای دقت بیشتر پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده اندازه‌گیری مستقیم چگالی ظاهری پس از کوبش هر لایه انجام شود. پس از فشرده‌سازی کامل خاک، ستون‌ها به‌طور تدریجی با آب اشباع شدند. این اشباع‌سازی از پایین به بالا انجام گرفت تا هوا از میان ذرات خاک خارج شود. فرایند هواگیری با دقت بسیار انجام شد؛ زیرا وجود حباب‌های هوا در خاک می‌تواند هدایت هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار داده و نتایج آزمایش را نامعتبر کند. برای اندازه‌گیری فشار آب در طول ستون، هفت پیزومتر در فواصل ۱۰ سانتی‌متری روی بدنه ستون نصب شدند. این پیزومترها امکان پایش دقیق تغییرات فشار را در بخش‌های مختلف خاک فراهم کردند. در انتهای ستون، پس از آخرین پیزومتر، یک روزنه برای خروج آب زهکشی شده تعبیه شد. آب خروجی از این روزنه از طریق شلنگ به یک مخزن مدرج هدایت شد تا حجم آب با دقت اندازه‌گیری شود. درنهایت، تمامی سیستم‌های مرتبط شامل مکانیزم‌های اشباع‌سازی، هواگیری پیزومترها و عملکرد زهکشی بررسی شدند تا از صحت عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شود. پس از اطمینان از آماده‌سازی کامل ستون‌ها، آزمایش هدایت هیدرولیکی روی آن‌ها آغاز شد. این آماده‌سازی دقیق، داده‌هایی با دقت زیاد برای تحلیل هدایت هیدرولیکی خاک فراهم کرد و پایه‌ای قوی برای بررسی رفتار آب

جدول ۱. نام و مشخصات آزمایش‌ها

نام آزمایش	D ₁ C _{0.1}	D ₁ C ₂	D ₁ C ₄	D _{0.18} C _{0.1}	D _{0.18} C ₂	D _{0.18} C ₄
قطر ذره (mm)	۱	۱	۱	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸
غلظت رسوب (gr/lit)	۰/۱	۲	۴	۰/۱	۲	۴



شکل ۴. نمای کلی دستگاه آزمایشی و تجهیزات مرتبط با انجام آزمایش‌ها در محل آزمایشگاه

تحلیل ابعادی

در این پژوهش، به منظور بررسی روابط بین متغیرهای مؤثر و توسعه مدل بی‌بعد برای تعمیم‌پذیری نتایج آزمایشگاهی، از روش تحلیل ابعادی استفاده شد. این تحلیل با بهره‌گیری از اصل پی - باکینگهام، امکان کاهش تعداد متغیرهای مستقل و استخراج پارامترهای بی‌بعد مؤثر در فرایند نفوذپذیری و رسوب‌گذاری را فراهم کرد. جزئیات فرایند تحلیل و پارامترهای بی‌بعد استخراج شده در ادامه ارائه شده‌اند. بدین منظور بر اساس شکل ۷ ضریب نفوذپذیری تابعی از پارامترهای چگالی آب (ρ)، گرانشی آب (μ)، قطر متوسط ذرات خاک (D_{50})، شتاب گرانش زمین (g)، قطر ستون آزمایش (D)، طول ستون آزمایش (L)، دبی خروجی از ستون آزمایش (Q)، بازه زمانی اندازه‌گیری (T) و غلظت رسوبات مخزن (C) به شرح معادله ۳ است:

$$k = f(\rho, \mu, D_{50}, g, D, L, Q, T, C, t) \quad (3)$$

بر اساس تئوری پی - باکینگهام از آنجایی که تعداد کل پارامترها ده عدد بوده و پارامترهای تکراری برابر سه است،

از این رو تعداد کل پارامترهای بی‌بعد هفت عدد خواهد شد. با انتخاب پارامترهای دبی خروجی از ستون آزمایش (Q)، چگالی آب (ρ) و قطر ستون آزمایش (D) به عنوان پارامترهای تکراری، پارامترهای بی‌بعد به صورت معادله ۴ به دست آمد:

$$\frac{k}{Q/D^2} = f_1\left(\text{Re}, \text{Fr}, \frac{C}{\rho}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{L}{D}, \frac{t}{T}\right) \quad (4)$$

در این معادله، Re معرف عدد رینولدز و Fr معرف عدد فرود هستند. با توجه به شرایط حاکم بر آزمایش می‌توان از این دو پارامتر صرف نظر کرد. از طرفی با توجه به اینکه طول و قطر ستون آزمایش ثابت است؛ از این رو می‌توان از اثر L/D صرف نظر کرد؛ بنابراین معادله ۴ به صورت معادله ۵ تغییر می‌یابد.

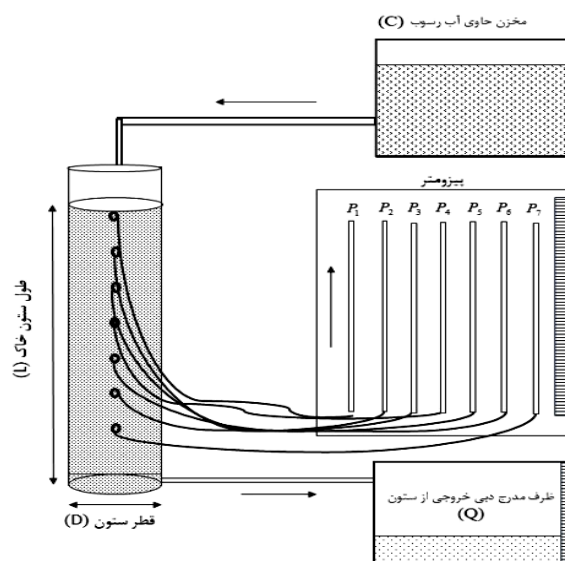
$$\frac{k}{Q/D^2} = f_1\left(\frac{C}{\rho}, \frac{D_{50}}{D}, \frac{t}{T}\right) \quad (5)$$

محدوده پارامترهای معادله در جدول ۲ ارائه شده است.

در معادله ۶ فرم ساده‌شده معادله ۵ ارائه می‌شود.

$$K_n = f_1(C_n, D_n, T_n) \quad (6)$$

در این رابطه، K_n معادل $k/(Q/D^2)$ ، C_n معادل C/ρ ، D_n معادل D_{50}/D و T_n معادل t/T است.



شکل ۵. شماتیک دستگاه و فرایند آزمایش

جدول ۲. محدوده مقدار پارامترهای بی بعد معادله (۵)

محدوده		پارامتر
پیشینه	کمینه	
۰/۰۰۶۵۱۶	۰/۰۰۱۱۷۵	$\frac{K}{Q/D^2}$
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۱	$\frac{C}{\rho}$
۰/۰۰۹۰۹۱	۰/۰۰۱۶۳۶	$\frac{D_{50}}{D}$
۱	۰/۰۵	$\frac{t}{T}$

نتایج و بحث

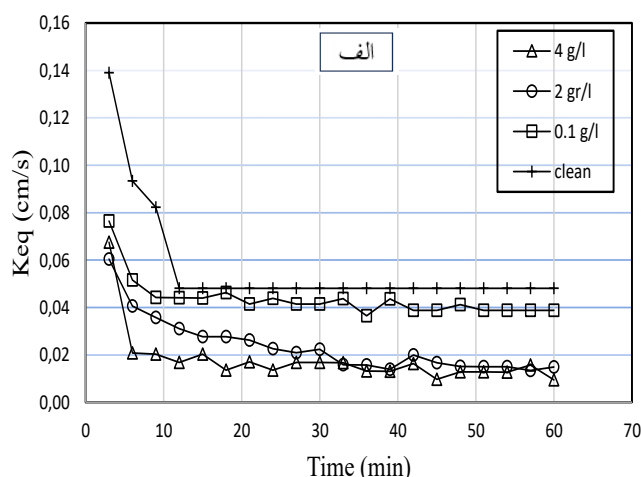
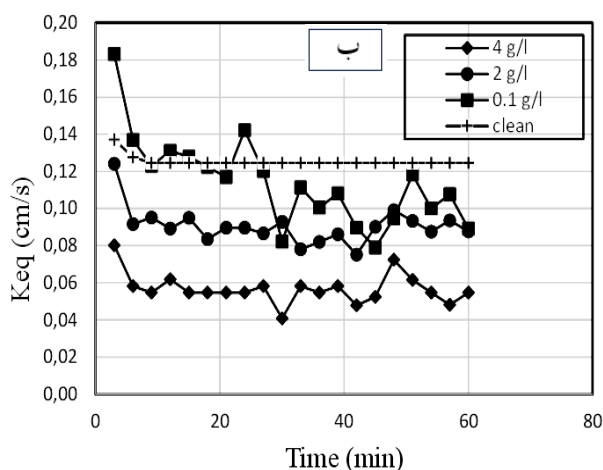
تأثیر زمان و غلظت

نمودار ارائه شده در شکل ۶-الف روند کاهش نفوذپذیری معادل (Keq) را طی ۶۰ دقیقه آزمایش نشان می دهند. این تغییرات شامل دو مرحله اصلی است: کاهش سریع اولیه (۰ تا ۱۰ دقیقه) و رسیدن به یک حالت پایدار (۱۰ تا ۶۰ دقیقه). در مرحله ابتدایی، نفوذپذیری به سرعت از مقدار اولیه (۰/۰۶ تا ۰/۰۸ سانتی متر بر ثانیه) به بازه ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ سانتی متر بر ثانیه کاهش می یابد که این کاهش عمدتاً به دلیل اشباع سریع منافذ خاک و

ورود رسوبات اولیه رخ می دهد. نمودار شکل ۶-الف که آزمایش پایه بدون رسوب را هم نمایش می دهد، روند مشابهی را نشان می دهد، با این تفاوت که مقدار اولیه Keq در این آزمایش ۰/۱۴ سانتی متر بر ثانیه بوده و پس از ۱۰ دقیقه به ۰/۰۴ سانتی متر بر ثانیه می رسد. در مرحله بعدی (۱۰ تا ۶۰ دقیقه)، نفوذپذیری به مقدار تقریباً ثابتی در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ سانتی متر بر ثانیه می رسد و تغییرات آن در یک بازه محدود به صورت نوسانی ادامه می یابد. این رفتار نشان دهنده رسیدن خاک به تعادل نسبی و تأثیر ویژگی های ساختاری مانند توزیع

منافذ و درصد ریزدانه‌ها بر نفوذپذیری است. نمودار شکل ۶-ب روند تغییرات نفوذپذیری معادل (Keq) را طی ۶۰ دقیقه آزمایش نشان می‌دهند. در بازه ابتدایی (۰ تا ۱۰ دقیقه)، مقدار Keq از بیشینه اولیه ۰/۰۸ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش یافته و به ۰/۰۵ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد که نشان‌دهنده تنظیم اولیه جریان در سیستم است. پس از این مرحله، نمودار وارد فاز نوسانی می‌شود، به طوری که مقدار Keq در برخی لحظات (مانند دقیقه ۲۰ و ۵۰) به حدود ۰/۰۶ سانتی‌متر بر ثانیه افزایش یافته و در برخی دیگر (مانند دقیقه ۳۰ و ۴۰) به ۰/۰۴۵ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این نوسانات از دقیقه ۱۰ به بعد ادامه داشته و نشان‌دهنده رسیدن سیستم به یک تعادل نسبی است. در مقابل، نمودار شکل ۶-الف که به آزمایش بدون رسوب و حالت پایه خاک مربوط است، روند متفاوتی را نشان می‌دهد. در این آزمایش، مقدار اولیه Keq برابر ۰/۱۴ سانتی‌متر بر ثانیه بوده و طی ۱۰ دقیقه نخست به ۰/۱۲ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. از دقیقه ۱۰ به بعد، مقدار Keq در حدود ۰/۱۲ سانتی‌متر بر ثانیه ثابت باقی می‌ماند و تغییرات قابل توجهی مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده تعادل سریع‌تر و پایدارتر سیستم نسبت به آزمایش‌های دارای رسوب است. به طور کلی، در آزمایش‌های دارای رسوب، تعادل همراه با نوسانات مشخصی رخ می‌دهد؛ درحالی که در آزمایش بدون رسوب، تعادل سیستم سریع‌تر برقرار شده و مقدار نفوذپذیری پایدارتر باقی می‌ماند. نمودار شکل ۶-الف تأثیر غلظت‌های مختلف رسوبات (۰/۱، ۲، و ۴ گرم بر لیتر) و همچنین آب تمیز را بر ضریب نفوذپذیری خاک (Keq) در طول زمان نشان می‌دهد. در حالت آب تمیز، مقدار Keq در طول زمان ثابت باقی می‌ماند که نشان می‌دهد در غیاب رسوبات، ساختار منافذ خاک تغییر نکرده و انسدادی رخ نمی‌دهد. در غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر، کاهش قابل توجه Keq در ۱۰ دقیقه ابتدایی به دلیل رسوب‌گذاری ذرات معلق اتفاق می‌افتد، اما پس از آن مقدار نفوذپذیری به تعادلی نسبتاً ثابت می‌رسد. در غلظت ۲ گرم بر لیتر، کاهش نفوذپذیری شدیدتر از غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر است و پس از انسداد اولیه، مقدار تعادل

در سطح پایین‌تری قرار دارد. در غلظت ۴ گرم بر لیتر، بیشترین کاهش نفوذپذیری در ۱۰ دقیقه نخست مشاهده می‌شود و مقدار Keq در نهایت به پایین‌ترین سطح تعادلی در میان نمونه‌ها می‌رسد که نشان‌دهنده اثر قابل توجه رسوبات بر انسداد منافذ خاک است. به طور کلی، با افزایش غلظت رسوبات، کاهش اولیه ضریب نفوذپذیری سریع‌تر و مقدار تعادلی پایین‌تر می‌شود، اما زمان رسیدن به تعادل برای همه نمونه‌ها تقریباً مشابه (حدود ۱۰ دقیقه) است. نمودار شکل ۶-ب تغییرات ضریب نفوذپذیری (Keq) را برای چهار حالت مختلف شامل آب تمیز و آب حاوی رسوبات با غلظت‌های ۰/۱، ۲، و ۴ گرم بر لیتر نشان می‌دهد. در ابتدای آزمایش (۰ تا ۱۰ دقیقه)، مقدار نفوذپذیری برای همه نمونه‌ها زیاد است؛ زیرا مسیرهای متخلخل خاک باز بوده و هنوز انسدادی رخ نداده است. با گذشت زمان، کاهش قابل توجهی در نمونه‌های دارای رسوب دیده می‌شود که ناشی از رسوب‌گذاری ذرات معلق و انسداد منافذ خاک است و این کاهش در نمونه با ۴ گرم بر لیتر بیشترین شدت را دارد. در مرحله تعادلی (پس از ۱۰ دقیقه)، مقدار Keq برای هر نمونه در یک مقدار مشخص ثابت می‌شود. برای آب تمیز، ضریب نفوذپذیری ثابت و در بیشترین مقدار باقی می‌ماند؛ زیرا هیچ انسدادی در منافذ رخ نمی‌دهد، اما در نمونه‌های حاوی رسوب، مقدار Keq کاهش یافته و مقدار تعادلی آن متناسب با غلظت رسوبات کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر تعادلی نشان می‌دهد که افزایش غلظت رسوبات باعث کاهش بیشتر ضریب نفوذپذیری تعادلی می‌شود؛ به طوری که در نمونه ۴ گرم بر لیتر، کمترین مقدار نفوذپذیری دیده می‌شود. پس از رسیدن به تعادل، نوسانات کوچکی در مقادیر Keq برای نمونه‌های ۲ و ۴ گرم بر لیتر دیده می‌شود که احتمالاً ناشی از بازآرایی ذرات رسوب‌کرده یا تغییرات جزئی در جریان داخل منافذ خاک است. در نتیجه، با افزایش غلظت رسوبات، ضریب نفوذپذیری سریع‌تر کاهش می‌یابد و مقدار تعادلی آن پایین‌تر است؛ اما زمان رسیدن به تعادل برای همه نمونه‌ها تقریباً یکسان (حدود ۱۰ دقیقه) باقی می‌ماند.



شکل ۶. الف) تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک (Keq) در حضور غلظت‌های مختلف رسوب و آب تمیز در طول زمان $D_{0.18}$ ، ب) تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک (Keq) در حضور غلظت‌های مختلف رسوب و آب تمیز در طول زمان D_1

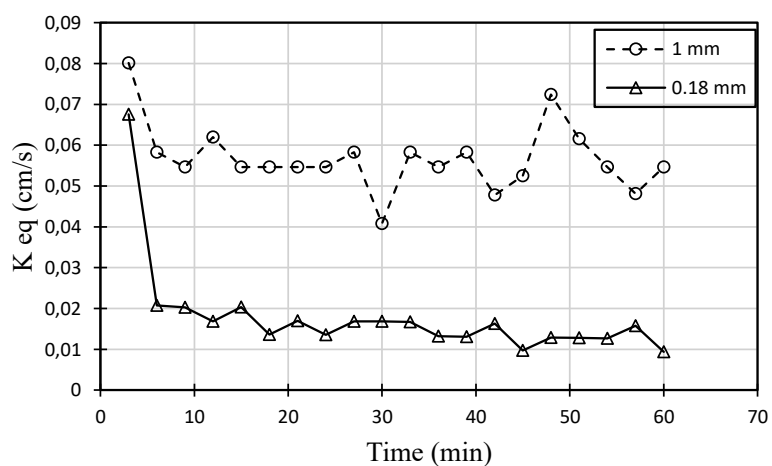
تأثیر دانه‌بندی

نمودار شکل‌های ۷-۹ اثر اندازه ذرات خاک بر ضریب نفوذپذیری (Keq) را برای دو نوع خاک با اندازه‌های ۰/۱۸ میلی‌متر (ریزدانه) و ۱ میلی‌متر (درشت‌دانه) بررسی کرده‌اند. در خاک ریزدانه، نفوذپذیری اولیه کمتر از خاک درشت‌دانه بوده، کاهش نفوذپذیری تدریجی‌تر رخ داده و پس از ۱۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. همچنین رفتار پایدارتر و نوسانات کمتری دارد که برای کاربردهای با جریان یکنواخت مناسب است. در خاک درشت‌دانه، نفوذپذیری اولیه بیشتر است؛ زیرا منافذ بزرگ‌تری دارد، اما کاهش نفوذپذیری شدیدتر و تعادل با نوسانات بیشتری همراه است که احتمال جابجایی موقتی ذرات و تغییر ساختار منافذ را افزایش می‌دهد. در آزمایش پایه بدون رسوب که کاهش نفوذپذیری ناشی از رسوبات حذف شده و رفتار خاک تنها بر اساس ویژگی‌های ذاتی آن بررسی شده است. خاک درشت‌دانه با نفوذپذیری اولیه ۰/۱۴ سانتی‌متر بر ثانیه جریان پایدارتری داشته و در طول آزمایش تغییر محسوسی نشان نداده است؛ درحالی‌که خاک ریزدانه با نفوذپذیری اولیه ۰/۰۶ سانتی‌متر بر ثانیه تغییرات ناچیزی را تجربه کرده و پس از ۱۰ دقیقه به تعادل رسیده است. درنتیجه، خاک‌های درشت‌دانه

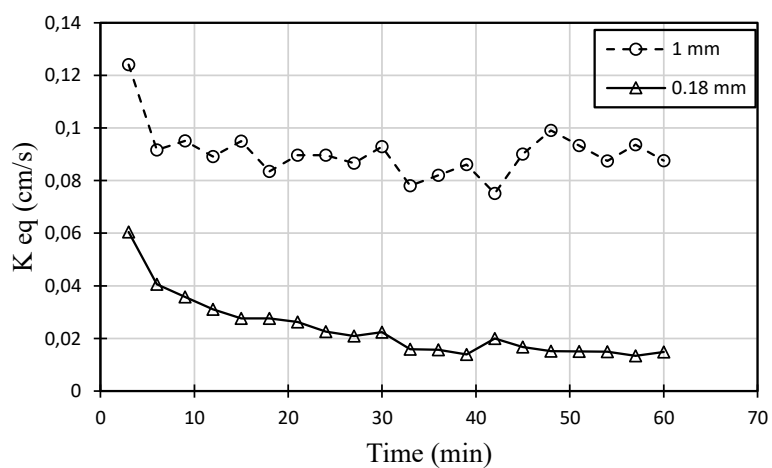
نفوذپذیری بیشتر ولی نوسانات بیشتری دارند؛ درحالی‌که خاک‌های ریزدانه نفوذپذیری کمتر ولی پایداری بیشتری نشان می‌دهند و در نبود رسوبات، تغییرات ضریب نفوذپذیری فقط به ویژگی‌های ذاتی خاک بستگی دارد.

عمق پیشروی رسوب

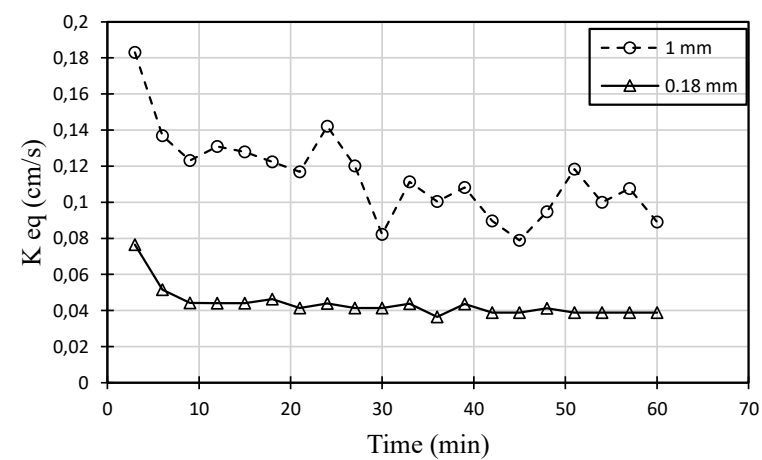
نتایج بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد که در ابتدای آزمایش (۳ دقیقه)، لایه‌های سطحی بیشترین نفوذپذیری را داشته و اختلاف قابل توجهی بین عمق‌های مختلف وجود دارد که ناشی از باز بودن منافذ خاک و حضور کم رسوبات است؛ درحالی‌که لایه‌های عمیق‌تر به دلیل تراکم بیشتر، نفوذپذیری کمتری دارند. در زمان ۳۰ دقیقه، کاهش چشمگیری در تمامی لایه‌ها رخ می‌دهد و بیشترین کاهش در لایه‌های میانی (۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) دیده می‌شود که نشان‌دهنده انسداد بیشتر در این ناحیه است؛ درحالی‌که لایه‌های عمیق‌تر کاهش تدریجی‌تری را تجربه می‌کنند. در زمان ۶۰ دقیقه، مقدار ضریب نفوذپذیری در تمامی عمق‌ها به یک حالت تعادلی می‌رسد و تفاوت بین لایه‌ها کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در لایه‌های سطحی مقدار نفوذپذیری همچنان بیشتر از سایر نواحی



شکل ۷. تغییرات ضریب نفوذپذیری در خاک با اندازه ذرات متفاوت در طول زمان (C₄)



شکل ۸. تغییرات ضریب نفوذپذیری در خاک با اندازه ذرات متفاوت در طول زمان (C₂)



شکل ۹. تغییرات ضریب نفوذپذیری در خاک با اندازه ذرات متفاوت در طول زمان (C_{0.1})

کردند. با این حال، در پژوهش حاضر دیده شد که افت نفوذپذیری در نمونه‌های خاک ریزدانه نسبت به نمونه‌های مشابه در مطالعات پیشین کندتر بوده است که می‌تواند ناشی از ساختار متراکم‌تر و پایداری بیشتر این خاک‌ها باشد. همچنین، نتایج مربوط به توزیع عمقی گرفتگی با یافته‌های چو و همکاران (۵) مطابقت دارد. آنها نیز بیشترین افت هدایت هیدرولیکی را در عمق ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر گزارش کردند. تفاوت در نرخ رسیدن به تعادل نفوذپذیری در مطالعه حاضر نسبت به مطالعه دو و همکاران (۶) می‌تواند ناشی از غلظت‌های بیشتر رسوبات و ویژگی‌های فیزیکی خاک استفاده‌شده در آزمایش‌های ما باشد. به‌طور کلی، مقایسه با مطالعات قبلی نشان می‌دهد که ساختار خاک، نوع ذرات و نحوه ورود جریان از عوامل کلیدی در تفاوت رفتار هیدرولیکی سیستم‌های تغذیه مصنوعی هستند و ضرورت بررسی هم‌زمان این پارامترها را در طراحی مدل‌های فیزیکی تقویت می‌کند.

رابطه تجربی ضریب نفوذپذیری

در این پژوهش، به‌منظور ارائه رابطه تجربی از داده‌های آزمایشگاهی از افزونه solver در نرم‌افزار Excel استفاده شد. روش استفاده از این افزونه به‌صورت سعی و خطا بوده و پس از تعیین نوع رابطه ضرایب آن تعیین می‌شوند. برای این منظور ۸۰ درصد از داده‌ها (۹۶ عدد) برای آموزش و ۲۰ درصد از داده‌ها (۲۴ عدد) به‌صورت تصادفی برای آزمون انتخاب شدند. به‌منظور ارزیابی رابطه برازش‌داده‌شده از معیارهای ارزیابی ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد. یک مدل زمانی قابل قبول در نظر گرفته می‌شود که ضریب تعیین نزدیک به عدد یک و خطای جذر میانگین مربعات به عدد صفر میل کند؛ بنابراین، چندجمله‌ای درجه دوم (معادله ۷) به‌منظور پیش‌بینی ضریب نفوذپذیری خاک در پژوهش حاضر ارائه شد.

$$K_n = \alpha_1 + \alpha_2 C_n D_n T_n + \alpha_3 C_n^2 T_n + \alpha_4 C_n D_n + \alpha_5 C_n^2 + \alpha_6 C_n^2 D_n + \alpha_7 C_n T_n \quad (7)$$

است؛ اما کاهش محسوسی نسبت به زمان اولیه داشته و در لایه‌های عمیق تغییرات محدودتری دیده می‌شود. همچنین، نوسانات ضریب نفوذپذیری در لایه‌های سطحی بیشتر است که احتمالاً ناشی از تغییرات در توزیع رسوبات و جابه‌جایی ذرات معلق در جریان آب است. این نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای آزمایش (۳ دقیقه)، بیشترین مقدار نفوذپذیری در لایه‌های سطحی (۲۰-۱۰ سانتی‌متر) دیده شده و با افزایش عمق، به‌دلیل تراکم بیشتر خاک، نفوذپذیری کاهش یافته است. در ۳۰ دقیقه، با ورود رسوبات و انسداد تدریجی منافذ خاک، کاهش قابل‌توجهی در لایه‌های سطحی رخ داده؛ درحالی‌که تغییرات در لایه‌های میانی (۵۰-۳۰ سانتی‌متر) ملایم‌تر بوده است. در ۶۰ دقیقه، ضریب نفوذپذیری به وضعیت پایدار نزدیک شده و کمترین مقدار آن در لایه‌های سطحی دیده می‌شود؛ درحالی‌که تغییرات در لایه‌های عمیق‌تر (۷۰-۶۰ سانتی‌متر) ناچیز بوده است که نشان‌دهنده پیشروی تدریجی رسوبات از سطح به عمق است. همچنین، بررسی تغییرات عمقی نشان می‌دهد که تا عمق ۳۰ سانتی‌متری نفوذپذیری ثابت بوده؛ اما در ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر کاهش محسوسی رخ داده که احتمالاً به‌دلیل انسداد بیشتر منافذ خاک است. از عمق ۵۰ سانتی‌متری به بعد، نفوذپذیری مجدداً افزایش یافته که ناشی از کاهش تجمع رسوبات در این نواحی است. علاوه بر این، تحلیل شیب‌های نمودار نشان می‌دهد که در ۳ دقیقه اولیه، در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر شکستگی اولیه‌ای در نمودار دیده شده که نشان‌دهنده آغاز فرایند رسوب‌گذاری است. در ۳۰ دقیقه، کاهش شیب در این عمق بیانگر افزایش مقاومت خاک در برابر نفوذ آب بوده و در ۶۰ دقیقه، کاهش ناگهانی نفوذپذیری در عمق ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر نشان‌دهنده رسیدن خاک به حد اشباع و توقف قابل‌توجه نفوذ آب به‌دلیل انسداد شدید منافذ است.

یافته‌های این پژوهش از نظر روند کاهش نفوذپذیری با نتایج احفیر و همکاران (۱) همخوانی دارد که کاهش اولیه شدید در اثر ورود ذرات معلق و انسداد منافذ درشت را گزارش

جدول ۳. مقادیر ضرایب ثابت ۷ و معیارهای خطا برای آموزش و آزمون

تابع	موارد
K_n	
۰/۰۰۴۳۱۶	a_1
۷۲/۸۷۵۰۲	a_2
۶۲۳/۰۵۳۱	a_3
۳۱۲/۷۹۹۲	a_4
۱۹۵/۱۸۵۷	a_5
-۱۲۳۴۰۵/۱	a_6
-۲/۸۰۳۰۶	a_7
۰/۸۴۸۸	R^2
۰/۰۰۰۶۰۸	RMSE
۰/۸۳۶۸	R^2
۰/۰۰۰۶۳۷	RMSE

ضرایب ثابت

معیارهای خطا برای آموزش

معیارهای خطا برای آزمون

دانه‌بندی مناسب برای خاک محل و تعیین فواصل زمانی مناسب برای نگهداری و لایروبی حوضچه‌ها به کار گرفته شوند.

همچنین، تعیین عمق مؤثر پیش‌روی رسوب (حدود ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) نشان می‌دهد که کنترل رسوبات در این عمق کلیدی می‌تواند نقش مهمی در حفظ ظرفیت نفوذی سامانه ایفا کند. این نتایج، چارچوبی علمی برای توسعه مدل‌های عددی پیش‌بینی رسوب‌گذاری و طراحی پایدار سازه‌های تغذیه مصنوعی فراهم می‌کند.

با توجه به محدودیت استفاده از آب لوله‌کشی و مدل‌سازی آزمایشگاهی ساده‌شده، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از آب‌های سطحی با ترکیبات واقعی‌تر و اندازه‌گیری دقیق‌تر توزیع رسوبات در عمق استفاده شود تا تعمیم‌پذیری نتایج افزایش یابد.

در جدول ۳ مقادیر ضرایب معادله ۷ و همچنین مقادیر معیارهای خطای محاسبه‌شده برای حالت آموزش و آزمون نشان داده شده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرایند رسوب‌گذاری نقش قابل توجهی در کاهش ضریب نفوذپذیری خاک دارد و این کاهش، تحت تأثیر ترکیبی از غلظت رسوبات، دانه‌بندی خاک و عمق نفوذ ذرات ریز در لایه‌های بالایی خاک اتفاق می‌افتد. شناسایی دو مرحله مجزا در روند کاهش نفوذپذیری (افت سریع اولیه و پایداری ثانویه) نشان‌دهنده رفتار دینامیکی خاک در مواجهه با آب حاوی مواد معلق است. از منظر کاربردی، این یافته‌ها می‌تواند در طراحی بهینه حوضچه‌های تغذیه مصنوعی، انتخاب

References

منابع مورد استفاده

1. Ahfir, N. D., H. Q. Wang, A. Benamar, A. Alem, N. Massei and J. P. Dupont. 2007. Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: Hydrodynamic effect. *Hydrogeology Journal* 15(4): 659–668. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0131-3>
2. Babaei, E. 2019. Experimental study of qualitative parameters of effluent passing through a porous medium for artificial recharge. Master thesis, Semnan University, Semnan, I.R. Iran.
3. Bagheri, M. 2000. Effects of wastewater and irrigation systems on some physical, chemical properties, and soil contamination under the cultivation of various crops. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
4. Behnia, A. 1988. Qanat Construction and Maintenance. University Publication Center, Tehran, Iran.
5. Chu, T., Y. Yang, Y. Lu, X. Du and X. Ye. 2019. Clogging process by suspended solids during groundwater artificial recharge: Evidence from lab simulations and numerical modelling. *Hydrological Processes* 33(25): 3226–3235. <https://doi.org/10.1002/hyp.13553>
6. Du, X., Y. Fang, Z. Wang, J. Hou and X. Ye. 2014. The prediction methods for potential suspended solids clogging types during managed aquifer recharge. *Water (Switzerland)* 6(4): 961–975. <https://doi.org/10.3390/w6040961>
7. Du, X., X. Ye and X. Zhang. 2018. Clogging of saturated porous media by silt-sized suspended solids under varying physical conditions during managed aquifer recharge. *Hydrological Processes* 32(14): 2254–2262. <https://doi.org/10.1002/hyp.13162>
8. Gutierrez, J. J. and L. E. Vallejo. 2013. Laboratory experiments on the hydraulic conductivity of sands with dispersed rock particles. *Geotechnical and Geological Engineering* 31(4): 1405–1410.
9. Rezaei, V. 1998. Study on the possibility of restoring the initial infiltration rate of artificial recharge projects by dredging infiltration facilities. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
10. Sanchez, P. 1986. Effect of flooding on soil physical properties. (Translated by B. Ferdows). *Zeytoon Journal* 54–57 (in Farsi).
11. Sayahi, M. 2015. Reuse of urban wastewater in groundwater aquifer recharge. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
12. Tavakoli, M. J. 1983. Preliminary report on water resources of Darzu-Saiban Plain. Fars Regional Water Authority, Ministry of Energy, Iran.