

Research Article**The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions
(Case study: West of Sistan)****Mansor Jahantigh^{1✉}, Moien Jahantigh²**

1. Department of Soil Conservation and Water Management, Sistan Agriculture and edition Natural Resources Research Center (AREEO) Zabol, Iran.
2. Department of Soil Conservation and Water Management, Sistan Agriculture and edition Natural Resources Research Center (AREEO) Zabol, Iran.

(✉ Corresponding Author: mjahantigh2000@yahoo.com)**ARTICLE INFO****Received:** 21 September 2025**Revised:** 3 November 2025**Accepted:** 3 December 2025**Available Online:** 10 February 2026**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Jahantigh, M., & Jahantogh, M (2026). The effect of sediment depth in recharging earthen dam reservoirs on particle size distribution and permeability changes in arid regions (Case study: West of Sistan). V.26, No.100, P: 56-74

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370760.1631>**Extended Abstract****Introduction**

Currently, water shortage is one of the challenges that has affected many regions, especially arid areas, due to population growth and irrational and unscientific use of water. So that excessive use of water from wells, the groundwater level has been lowered significantly, resulting in a decrease in the water flow of aqueducts and wells, and even the loss of some of these water resources. In order to solve the problem of water scarcity for various purposes such as providing agricultural water resources, permeability water into the groundwater table, increasing the vegetation cover, improving the environment, etc., earthen dams have been constructed in some susceptible areas, including arid regions. However, sedimentation in the reservoirs of these structures and subsequent disruption of the rate of infiltration into the ground is one of the problems that the construction of such dams brings. On the other hand, the factors that disrupt the infiltration of water into the groundwater table are sedimentation in the reservoirs of these earthen dams, which in some places turn into evaporation ponds due to the accumulation of sediment inside their reservoirs. Sedimentation of materials inside dam reservoirs is the result of sedimentation of materials carried by tributaries and reduces their permeability capacity. The intensity of this sedimentation process depends on the roughness of the watershed, its use, soil types, and the intensity and duration of rainfall. The type and location of the reservoir, as well as the hydrological regime of the river, also play an important role in this regard. So that their capacity may be reduced by up to 80 percent and cause the reservoir to lose its water storage function. In addition to the fact that these sediments play an effective role in reducing the volume of reservoirs, another important aspect is their pollution. The chemical composition of the sediments depends on the type of soils in the watershed, their agricultural use, and also the type of industry in the region. Considering that Sistan is one of the regions facing a water crisis and that numerous earthen dams have been constructed in its western highlands, there is a need to investigate the performance of these structures regarding their permeability status with the witness area so that, if necessary, reforms can be made for their optimal exploitation. Therefore, this research was conducted in the reservoirs of dams constructed in the western highlands of Sistan.

Methodology

To carry out this experiment, five earthen dams in the region, which were constructed in the 1970s, were selected and the amount of aging infiltration from the reservoir of these constructed dams and the control area was measured at different depths based on the standard **double** cylinder method at different times. By sampling the soil of the studied treatments, the physical properties of the soil samples were also determined.

Results and Discussion

The results showed that the infiltration rate in the control area was on average 1.2 times higher than the reservoir of the constructed dams, which showed a significant difference at the one percent level. In addition, the cumulative infiltration of the control area was also higher than that of the dam reservoirs and was statistically significant at the 5% level ($p \leq 0.05$). In examining the effect of accumulated sediments on soil particle size distribution, the findings showed that the percentage of clay, silt, and sand in the soil of earthen dam reservoirs had a significant difference compared to the control area at sampling depths ($p \leq 0.05$). The percentage of clay and silt increased by 14.2 and 3.2 times, respectively, compared to the control area, which consequently caused a change in soil texture from sandy class (control area) to clay loam in the earthen dam reservoir. Changes in the weighted average diameter (MWD) index in the studied treatments also indicated an 18-fold decrease in this index in the earthen dam reservoir compared to the control area. The results of multiple regression analysis to determine the most important factors affecting soil permeability also indicated that the percentage of sand accounted for 96% of the changes in soil permeability in the studied treatments.

Conclusions

The construction of an earthen dam increases the recharge of underground aquifers, which has a favorable effect on the water supply of wells and aqueducts, which in turn plays an effective role in increasing employment generation, improving the living conditions of watershed residents, and reducing their socio-economic problems. However, due to the lack of proper management of the sediments accumulated in the reservoirs of these dams, after several floods entered the reservoirs of these dams, their permeability has decreased significantly, and after a few years of water withdrawal, their reservoirs have become evaporation ponds, and a large part of the water entering these reservoirs evaporates and becomes unavailable without being used. The results of this study also showed that with the accumulation of sediments resulting from the entry of floods into these areas and the change in the physical properties and stability indices of soil aggregates, the permeability of these areas has decreased significantly. In addition, with the accumulation of sediments in the reservoirs of dams and their rising levels, their overflows are easily destroyed, which has led to the intensification of water erosion in the studied areas.

Keywords: Artificial infiltration, Flood, Sediment, Soil physical properties, Water penetration into the soil.

Acknowledgement

The authors would like to thank all participants of the present study.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article .Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

Authors have read and agreed to the published version of the manuscript. Authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

نوع مقاله: پژوهشی

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک (مطالعه موردی: غرب سیستان)

منصور جهان تیغ^۱✉، معین جهان تیغ^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری خاک بندهای احداثی در غرب منطقه سیستان اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل سن بند (۱۸ و ۲۲ سال بعد از ساخت)، عمق برداشت (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) و سطوح برداشت (پای بند، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) بودند. با استفاده از روش استوانه مضاعف میزان نفوذپذیری و با نمونه‌برداری از عمق‌های خاک برخی ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های برداشتی در تیمارهای مورد مطالعه و منطقه شاهد تعیین شد. نتایج تحقیق نشان داد که میزان سرعت نفوذ در عمق‌های مختلف برداشت رسوب اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهد و کمترین و بیشترین میزان نفوذپذیری به ترتیب مربوط به افق سطحی و عمق ۳۰ سانتی‌متری رسوبات برداشت شده است (به ترتیب ۱/۵۲ و ۲/۳۴ سانتی‌متر بر ساعت). در بررسی اثر رسوبات تجمع یافته بر توزیع اندازه ذرات خاک، یافته‌ها نشان داد که درصد رس، سیلت و شن در خاک مخازن بندهای خاکی تفاوت معنی‌داری نسبت به منطقه شاهد در عمق‌های نمونه‌برداری دارد، به‌طوری‌که درصد رس و سیلت به ترتیب ۱۴/۲ و ۳/۲ برابر نسبت به منطقه شاهد افزایش یافته است که به تبع آن باعث تغییر بافت خاک از کلاس شنی (منطقه شاهد) به لومی رسی در مخزن بندهای خاکی شده است. تغییرات شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در تیمارهای مورد مطالعه نیز بیانگر کاهش محسوس این شاخص در مخازن بندهای خاکی نسبت به منطقه شاهد بود. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون چندگانه به‌منظور تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نفوذپذیری خاک نیز بیانگر آن است که مقادیر شن ۹۶ درصد تغییرات نفوذپذیری خاک را در تیمارهای مورد مطالعه توجیه می‌کند. بر اساس نتایج این تحقیق، تجمع رسوبات در مخازن بندهای احداثی با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شاخص پایداری خاکدانه باعث کاهش نفوذپذیری خاک این مخازن شده است که بهره‌برداری از این رسوبات ضمن افزایش کارایی این بندهای خاکی بستری مناسب برای اصلاح زمین‌های سنگلاخی و سنگریزه‌ای پایین دست فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تغذیه مصنوعی، رسوب، سیلاب، نفوذ آب در خاک، ویژگی‌های فیزیکی خاک

مقدمه

بهره‌برداری از سیلاب‌های فصلی به عنوان منبع مهم آب سطحی بسیار مهم است. از این‌رو برای کنترل این سیلاب‌ها راهکارهای سازه‌ای مانند احداث بندهای خاکی به دلیل صرفه اقتصادی و نیز قابلیت مدیریت رواناب‌های فصلی به‌منظور ذخیره و تغذیه آبخوان‌ها همواره در مناطق خشک به‌کار گرفته شده است. این سازه‌های هیدرولوژیکی که با هدف کنترل

کمبود آب و خشکسالی‌های متوالی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در مناطق خشک است که با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت منابع آبی، سبب تشدید بحران کم‌آبی در این مناطق شده است (Jahantigh & Jahantigh, 2024). با وجود محدودیت منابع آبی در مناطق خشک،

^۱ دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل. (نویسنده مسئول: Email: mjahantigh2000@yahoo.com)

^۲ استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل.

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک

همکاران (Samadi-Boroujeni *et al.*, 2012) با بررسی ویژگی‌های فیزیکی رسوبات مخزن سد دز نشان دادند که رسوبات تجمع یافته عمدتاً متراکم و از نظر دانه‌بندی به‌طور میانگین شامل ۳۶ درصد رس، ۵۷ درصد سیلت، ۶ درصد ماسه و ۱ درصد شن و جرم مخصوص ظاهری آنها نیز برابر با ۱/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. بالاس و همکاران (Ballas *et al.*, 2018) در پژوهشی با هدف بررسی خواص تکتونیکی رسوبات مخازن بندهای سنگی و بتنی در تانزانیا دریافتند که رسوبات انباشت شده به‌طور عمده شامل ذرات ریزدانه و متراکم هستند که نسبت به رسوبات منطقه شاهد وزن مخصوص بالایی دارند و به دلیل چسبندگی ذرات ریزدانه و کاهش خلل و فرج، نفوذپذیری آنها اندک است. نتایج مطالعات کوز و همکاران (Kos' *et al.*, 2021) در بررسی عملکرد مخازن بندها در لهستان بیانگر آن است که تجمع رسوبات ریزدانه توسط جریان‌های سیلابی ضمن کاهش ظرفیت ذخیره مخزن باعث تشکیل لایه‌ای متراکم در لایه سطحی خاک و کاهش میزان نفوذپذیری خاک شد. آسیایی و همکاران (Asiaei *et al.*, 2021) در بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد لتیان با آزمایش‌های متداوم مکانیک خاک از جمله دانه‌بندی، پایداری خاکدانه، وزن مخصوص و سه محوری برای تعیین پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاک گزارش می‌دهد که بیش از ۸۹ درصد رسوبات در مخزن سد شامل رس و سیلت است و جرم مخصوص ظاهری خشک این رسوبات برابر با ۱/۱۲۸ گرم بر مترمکعب و مقادیر چسبندگی این رسوبات حدود ۲ برابر بیشتر از مقادیر چسبندگی خاک منطقه شاهد است. از آنجا که رواناب‌های فصلی دارای بار رسوبی بالایی هستند تجمع آنها در مخازن بندهای خاکی و حوضچه‌های تغذیه‌ای سبب بسته شدن خلل و فرج خاک و در نهایت کاهش شدید نفوذ آب در خاک می‌شود. در این خصوص نتایج مطالعات بیات و بصیرپور (Bayat & basir-por, 2009) در بررسی تأثیر مواد رسوبی در تقلیل نفوذپذیری حوضچه‌ها و مخازن طرح‌های تغذیه مصنوعی شهرستان اصفهان با اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری در عمق‌های مختلف رسوبات نشان می‌دهد در یک دوره ۱۰ تا ۱۵ ساله تجمع رسوبات باعث مسدود شدن خلل و فرج خاک و در نتیجه

و ذخیره سیلاب‌های فصلی و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها کاربرد دارد نقش بسزایی در حفاظت آب و خاک و احیای پوشش گیاهی در مناطق خشک دارد (Zhang Sojka *et al.*, 2013; Augustyniak *et al.*, 2020; *et al.*, 2020). عملکرد بندهای خاکی با تحت تأثیر قرار دادن سرعت و ظرفیت حمل رسوبات در جریان‌های رودخانه‌ای، باعث ترسیب حجم قابل توجهی از رسوبات در مخزن این بندها و در نتیجه کاهش حجم ذخیره آنها می‌شود (Madeyski *et al.*, 2008; Polski, 2006; Ballas *et al.*, 2018). از این رو، یکی از بارزترین دغدغه‌های موجود در زمینه مدیریت و نگهداری این بندهای خاکی رسوبگذاری و کاهش حجم مخازن این سازه‌های آبی است که تخصیص آب را برای موارد گوناگونی مانند کشاورزی، شرب و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی با چالش‌های متعدد همراه می‌کند (Soleimani & Khani, 2019). ترسیب در مخازن بندها نتیجه فرسایش لایه سطحی خاک در مناطق بالا دست است که مواد رسوبی بر اثر جریان‌های رودخانه‌ای به پایین دست انتقال می‌یابد. به‌طور کلی میزان رسوبدهی در مناطق بالا دست به سطح ناهمواری حوضه آبخیز، کاربری اراضی، نوع خاک و شدت و مدت بارندگی بستگی دارد (Kos' *et al.*, 2021). این موضوع با توجه به کاهش پوشش گیاهی و خاک مستعد به فرسایش در مناطق خشک باعث افزایش میزان رسوبدهی می‌شود که ضرورت مدیریت و نگهداری این بندهای خاکی در این مناطق را دوچندان می‌کند. علاوه بر آن، سن و موقعیت مکانی بندهای خاکی و تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ای نیز بر میزان رسوبگذاری و کارایی این بندهای خاکی بسیار تأثیر می‌گذارد، به‌طوری‌که تأثیر توأم این عوامل ممکن است تا ۸۰ درصد عملکرد این بندها را برای ذخیره‌کردن و تغذیه آبخوان‌ها کاهش دهد (Batuca *et al.*, 2000). از جمله محدودیت‌هایی احداث بندهای خاکی، ترسیب حجم قابل توجهی از رسوبات در مخازن این بندها است که باعث کاهش میزان نفوذ آب، تبخیر آب و خروج از دسترس این منابع آبی مهم در مناطق خشک می‌شود.

در بررسی ویژگی‌های فیزیکی رسوبات مخازن بندهای ذخیره و تغذیه‌ای آبخوان مطالعات متعددی صورت گرفته است که به برخی پژوهش‌ها در این زمینه اشاره می‌شود. بروجنی و

مدیریت بندهای احداثی برای بهره‌برداری از رواناب‌های فصلی در مناطق خشک بسیار اهمیت دارد.

منطقه سیستان از جمله مناطق خشک و بحرانی کشور به‌شمار می‌رود که طی خشکسالی‌های اخیر و از طرفی محدود بودن منابع آبی در این منطقه با بحران بی‌آبی شدید همراه بوده است. با توجه به احداث بندهای خاکی متعدد در مسیر رودخانه‌های اصلی در غرب منطقه سیستان، رسوبات سیلابی در مخازن این بندها باعث کاهش میزان نفوذپذیری آب در خاک شده است و اینکه آیا این کاهش نفوذ مشکل ساز بوده است یا نه پرسشی است که این پژوهش درصدد پاسخ دادن به آن است. از این رو هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر رسوبات بر ویژگی‌های خاک و تغییرات نفوذپذیری آن در مخزن بندهای احداثی در غرب منطقه سیستان است.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

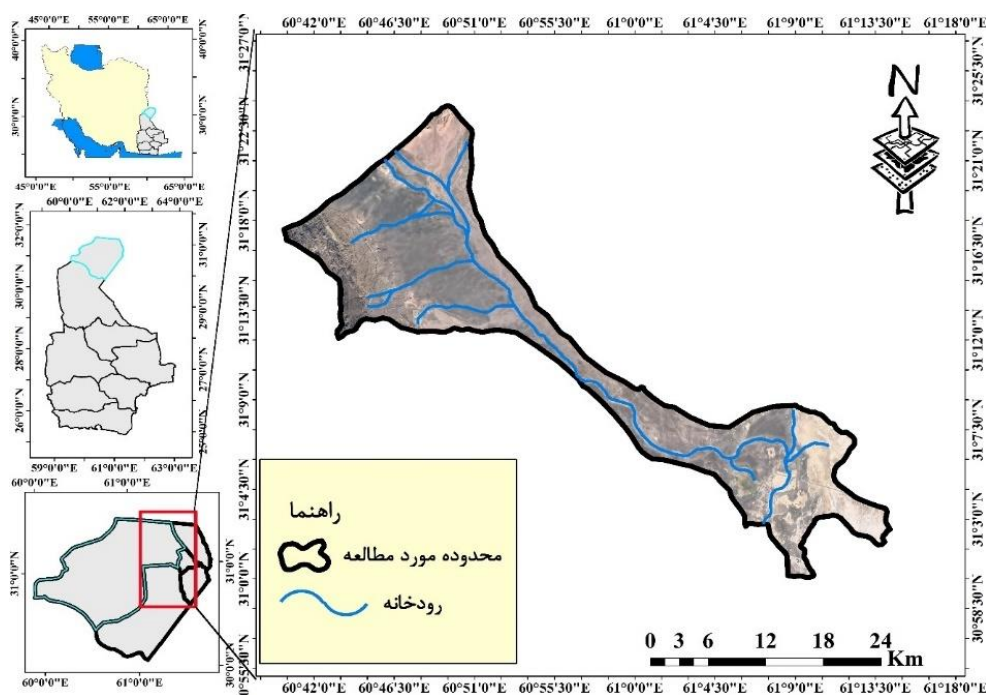
منطقه مورد مطالعه در شمال استان سیستان و بلوچستان و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری غرب شهرستان زابل و حدود ۱۰ کیلومتری جنوب بندان از توابع خراسان جنوبی با مختصات جغرافیایی ۶۰ درجه، ۴۵ دقیقه و ۴ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۴۵ دقیقه و ۱۳ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۱ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۱۷ دقیقه و ۱۵ ثانیه عرض شمالی و در ارتفاع حدود ۹۲۰ متر از سطح دریا قرار دارد شکل (۱). از لحاظ اقلیمی، این محدوده گرم و خشک است. میانگین بارندگی سالانه این منطقه حدود ۶۰ میلی‌متر ولی در ارتفاعات به ۸۰ میلی‌متر می‌رسد که بخش عمده آن در فصل زمستان باریده می‌شود. میانگین دمای سالانه منطقه ۱۸ درجه سانتی‌گراد است که در فصل تابستان بیشینه آن به ۴۸ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد. این ناحیه به دلیل بالابودن دما و از طرفی وزش بادهای شدید در تابستان، تبخیر و تعرق بالایی نیز دارد، به‌طوری‌که متوسط سالانه آن حدود ۵ متر است که بخش عمده‌ای از آن در ماه‌های بحرانی (خرداد، تیر و مرداد) سال اتفاق می‌افتد. رطوبت نسبی این منطقه کم است و متوسط سالانه آن به حدود ۲۸ درصد می‌رسد. از مهم‌ترین ویژگی‌های آب و هوایی این منطقه وزش باد است که به بادهای ۱۲۰ روزه

کاهش ۴۰ تا ۸۰ درصد از میزان نفوذپذیری مخازن حوضچه‌های احداثی شده است. در پژوهشی دیگر، سلیمی و همکاران (Salimi et al., 2014) تغییرات میزان نفوذپذیری بستر حوضچه‌های تغذیه را در حوضه آبخیز معین‌آباد شهرستان فسا بررسی کردند و نشان دادند که به دلیل ورود رسوبات در حد ماسه ریز و رس به مخازن این حوضچه‌ها، بعد از گذشت حدود یک دهه میزان نفوذپذیری این مخازن ۵۰ درصد کاهش یافته است که چنین وضعیتی نقش مؤثری در کاهش تغذیه آب به سفره‌های زیرزمینی و در مقابل تشدید فرسایش خاک شده است. خیر اندیش و همکاران (Khayrandish et al., 2015) در بررسی بندهای احداثی در دم‌تنگ داراب با نمونه‌برداری از مواد رسوبی در عمق‌های مختلف و تعیین اندازه ذرات دریافتند که رسوبات مخزن این بندها در مقایسه با مناطق حاشیه آبراهه بافت ریزدانه و متراکم دارد که با گذشت زمان باعث کاهش ۵۰ درصد از میزان نفوذپذیری این مخازن شده است. نتایج مطالعات ماستی و همکاران (Masetti et al., 2016) در بررسی تاثیر بار رسوبی سیلاب‌های فصلی روی حوضچه‌های تغذیه‌ای در لیون فرانسه نشان داد که در صورت نفوذ نیافتن بار معلق سیلاب به پروفیل خاک، میزان نفوذ در حوضچه تغذیه بیش از ۵ برابر میزان نفوذ به صورت طبیعی است. این محققان تغذیه در حالت طبیعی حوضچه‌های مورد مطالعه را در حدود ۱ متر بر ساعت گزارش داده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، شمس - ناطری و همکاران (Shams-Nateri et al., 2019) در بررسی تغییرات سرعت نفوذ در حوضچه‌های تغذیه‌ای در شهریار استان تهران با استفاده از روش استوانه مضاعف در عمق‌های مختلف برداشت رسوب دریافتند که میانگین نفوذپذیری در عرصه‌های مجاور مخزن تغذیه مصنوعی در حدود ۲۹/۵ و ۳۰/۲ سانتی‌متر بر ساعت متغیر است در حالی که با تجمع رسوبات در مخازن حوضچه‌های تغذیه‌ای به ۵/۷ تا ۱۸/۶ سانتی‌متر بر ساعت کاهش یافته است. آنان همچنین عمق برداشت رسوبات تا ۲۰ سانتی‌متر را به‌طور معنی‌دار باعث افزایش میزان نفوذپذیری آب در خاک گزارش داده‌اند. بررسی منابع گویای این موضوع است که رسوبات تجمع یافته در مخازن بندهای احداثی با تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک نقش مؤثری بر کاهش میزان نفوذپذیری آب در خاک دارد که توجه به این آن به منظور

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک

لایه‌هایی از آهک ماسه‌دار تشکیل می‌دهد که در برخی از مکان‌ها فسیل‌های با سن ژوراسیک نیز نمایان است. در این منطقه، نهشته‌های کواترنری شامل طبقات مارنی-گچی و آبرفت‌های قدیمی و جوان نیز دیده می‌شود (Safari et al., 2021).

سیستان معروف است و از اواسط خرداد ماه شروع می‌شود و تا اوایل مهرماه ادامه دارد. پوشش گیاهی این منطقه را گز، تاغ، خارشتر ارمک، نی، اسپند و تعداد محدودی دیگر گیاهان نواحی خشک تشکیل می‌دهد. از لحاظ زمین‌شناسی قدیمی‌ترین واحد شناخته شده در منطقه را ترکیبی از مارن‌های صورتی تا زرد رنگ، باشیل‌های خاکستری تیره و ماسه سنگ همراه با میان



شکل ۱- موقعیت محل پژوهش در منطقه سیستان، استان و کشور

Fig. 1- Geographical location of the research site in province and in the country

دیواره بند، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد طول رسوب بند در سه عمق سطح رسوب (صفر)، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر از رسوب سطحی) تا نقاط نمونه‌برداری بیانگر شرایط نفوذپذیری کل مخزن بند خاکی باشد. برای تعیین شرایط طبیعی نفوذ در هریک از بندهای احداثی دو منطقه شاهد در مجاور مخزن بند اصلاحی انتخاب شد که به لحاظ بافت خاک و ساختار زمین شناسی دارای شرایط یکسانی بودند. تیمارهای مورد مطالعه شامل سن بند (۱۸ و ۲۲ سال ساخت)، عمق برداشت (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) و سطوح برداشت (پای بند، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) است که به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار اجرا شد. برای اندازه‌گیری میزان نفوذ و سرعت نفوذ، از استوانه مضاعف به قطر ۳۰ و ۶۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر

روش پژوهش

برای اجرای این پژوهش در ابتدا با بررسی نقشه موقعیت مکانی بندهای احداثی در منطقه سیستان پنج بند خاکی انتخاب و از این بندها بازدید شد. سن بندهای خاکی مورد مطالعه ۱۸ (۳ بند خاکی) و ۲۲ (۲ بند خاکی) سال است که روی رودخانه‌های اصلی احداث شده است. برای نمونه‌برداری از مخزن بندهای خاکی، با توجه به متفاوت بودن توزیع اندازه ذرات رسوبی در مخزن بندهای احداثی که نقش موثری بر میزان نفوذپذیری خاک دارد، مطابق با مطالعات برخی از محققان مانند جعفری و همکاران (Jafari et al., 2024) و شمس-ناطری و همکاران (Shams-Nateri et al., 2019) طول مخازن بندهای اصلاحی به چهار بخش تقسیم شد (پای

شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) براساس معادله ۱ استفاده شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n}{k} \right) X_i W_i \quad (1)$$

در این معادله: MWD = میانگین وزنی قطر ذرات خاک X_i ، (mm) = متوسط قطر خاکدانه‌ها باقی‌مانده بر روی هر الک i (میانگین قطر سوراخ‌های الک بالایی و پایینی)، W_i = مقدار نسبی خاکدانه‌های با قطر X_i و n = تعداد الک‌ها و نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک مورد استفاده است. در ادامه؛ برای تعیین وزن مخصوص ظاهری از روش کلوخه و برای تعیین درصد رطوبت اشباع خاک با اندازه‌گیری اختلاف وزن گل اشباع و گل خشک شده در آون بر اساس معادله (۲) استفاده شد.

$$SP = (W_{moist} - W_{dry} / W_{dry}) \times 100 \quad (2)$$

داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳ تجزیه و تحلیل شدند. بدین منظور با بررسی نرمال بودن داده‌ها برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. به‌منظور بررسی مؤثرترین متغیرهای فیزیکی خاک بر میزان نفوذپذیری خاک از رگرسیون چندگانه استفاده شد (Pichand, 2017; Vahabzadeh Kebria et al., 2016).

و فلز با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. تمام مراحل اندازه‌گیری میزان نفوذ بر اساس نشریه شماره ۲۴۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۰) با عنوان "استاندارد دستورالعمل اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در خاک با روش استوانه مضاعف" صورت گرفت. برای شروع کار، ابتدا حلقه کوچک ۱۵-۱۰ سانتی‌متر با ضربات چکش داخل خاک فرو برده شد و حلقه بزرگ‌تر به‌صورت متحدالمرکز و فواصل بین آنها ۱۵ سانتی‌متر در داخل زمین تعبیه شد. در ادامه با استفاده از اشل مدرج ارتفاع آب در فواصل بین حلقه‌ها در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰، ۱۲۰ دقیقه و تا زمان ثابت شدن سرعت نفوذ آب اندازه‌گیری شد. نفوذپذیری سطحی خاک بر اساس جدول (۱) طبقه‌بندی شد. به‌منظور تعیین بافت خاک نیز با نمونه‌برداری از رسوب تجمع یافته در مخزن بند و منطقه شاهد بافت خاک بر اساس روش هیدرومتری و الک استفاده شد. علاوه بر بافت خاک، پایداری خاکدانه نیز به عنوان یکی از شاخص‌های فیزیکی خاک نقش موثری بر خلل و فرج و میزان نفوذپذیری آب در خاک دارد (Saadat et al., 2019). از این رو در این تحقیق برای بررسی پایداری خاکدانه‌های رسوبات در مخزن بندهای خاکی از

جدول ۱- طبقه‌بندی نفوذپذیری سطحی خاک

Table 1- Classification of soil surface permeability

سرعت نفوذ (سانتی‌متر در ساعت)	طبقه سرعت نفوذ
Penetration speed (cm/h)	Penetration rate class
More than 25.4	خیلی سریع Very fast
25.4-12.7	سریع Fast
12.7-6.33	کمی سریع A little fast
6.33-2	متوسط Average
2-0.5	کمی آهسته A little slow
0.5-0.127	آهسته Slow
Less than 0.127	خیلی آهسته Very slow

شمس - ناطری و همکاران، ۱۳۹۸

نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی خاک

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول (۲) ارائه شده است. توزیع اندازه ذرات در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر بیانگر تغییرات محسوس مقادیر درصد شن، سیلت و رس در تیمارهای مورد مطالعه است که به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) را در سطح پنج درصد نشان می‌دهد. در بررسی تغییرات درصد سیلت و رس، یافته‌ها گویایی این موضوع است که بیشترین درصد این متغیرها مربوط به مخزن بندهای خاکی است که به‌طور محسوس بیشتر است تا در منطقه شاهد. با توجه به نتایج، توزیع اندازه ذرات در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز مشابه لایه سطحی تغییرات محسوسی را نشان داد و ذرات سیلت و رس در مخازن بندهای خاکی به‌طور معنی‌دار بیشتر بود تا در منطقه شاهد. با توجه به منحنی دانه‌بندی نمونه‌های برداشتی دامنه تغییرات اندازه ذرات در منطقه شاهد در محدوده ۱/۶۸ تا ۰/۰۳۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد درحالی‌که اندازه ذرات در بندهای خاکی در محدوده ۰/۰۷۴ تا ۰/۰۳۲ میلی‌متر متغیر بود. با تعیین بافت خاک نمونه‌های برداشتی، یافته‌ها نشان داد که بافت خاک در منطقه شاهد به‌طور عمده در کلاس شنی-لومی و شنی طبقه‌بندی می‌شود درحالی‌که بافت خاک در مخزن بندهای احداثی در کلاس لومی-رسی تا رسی قرار دارد شکل (۲). محمودآبادی و مظاهری (Mazaheri, 2012) و محمودآبادی (Mahmoodabadi) می‌گویند تفاوت در اندازه ذرات با تغییر در دانه‌بندی پروفیل خاک ضمن تغییر بافت خاک میزان رطوبت اولیه و رطوبت اشباع خاک در اعماق مختلف را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به نتایج مقایسه تغییرات رطوبت اشباع خاک و رطوبت اولیه در عمق‌های مختلف مخزن بندهای احداثی نیز متفاوت و به لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) است به‌طوری‌که افزایش ذرات ریزدانه در مخزن بندهای خاکی باعث افزایش ۲ برابری رطوبت اولیه نسبت به منطقه شاهد در لایه سطحی و زیرسطحی شده است. این شرایط بنا به نظر غجه پور و همکاران (Ghojehpour et al., 2020) باعث کاهش اندازه خلل و فرج خاک و وزن مخصوص ظاهری می‌شود که با تغییر شرایط هیدرولیکی خاک

میزان نفوذپذیری خاک را تقلیل می‌دهد. از طرفی، با افزایش درصد شن و وزن مخصوص میزان منافذ و خلل فرج نیز افزایش می‌یابد که به‌طور مستقیم باعث افزایش میزان نفوذپذیری خاک می‌شود. در بررسی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) نتایج بررسی‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) در توزیع اندازه ذرات خاکدانه‌ها در مخزن بندهای احداثی و منطقه شاهد وجود دارد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر برابر با ۱/۲۱ و ۰/۰۳۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که به ترتیب مربوط به منطقه شاهد و مخزن بندهای خاکی بود شکل (۳). مقایسه تغییرات این شاخص در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز بیانگر تفاوت معنی‌دار این شاخص در تیمارهای مورد مطالعه بوده است. براساس نتایج به دست آمده، افزایش ذرات ریزدانه در مخزن بندهای خاکی ضمن تغییر بافت خاک باعث کاهش اندازه خلل و فرج خاک شده است. نتایج به دست آمده با یافته‌های تافته و همکاران (Taftah et al., 2020)، گاکوماتوس و همکاران (Giakoumatos et al., 2025) و هیل و بچم (Hill & Beecham, 2018) مبنی بر تأثیر توزیع اندازه ذرات خاکدانه‌ها بر میزان نفوذپذیری خاک همخوانی دارد.

بررسی نفوذپذیری مخزن بندهای خاکی

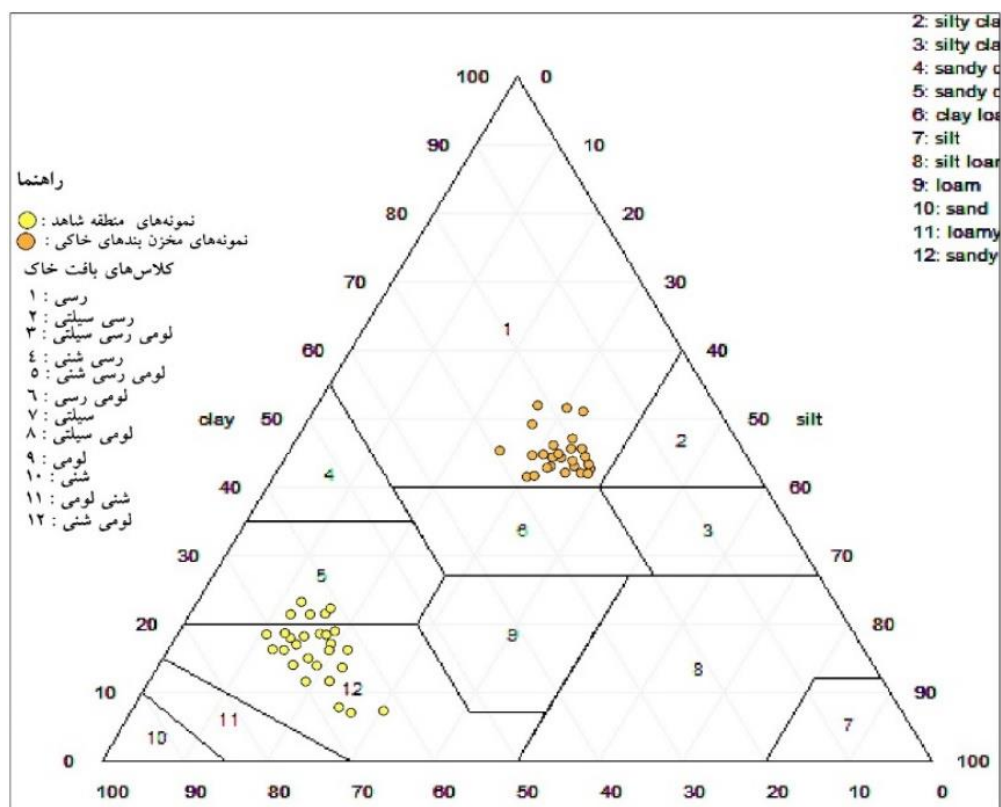
اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری خاک سطحی در قرائت‌های زمانی مختلف نشان داد که میانگین سرعت نفوذ در پای دیواره بندهای خاکی برابر با ۱/۹۶ سانتی‌متر در ساعت است که براساس طبقه‌بندی صورت گرفته در کلاس نفوذپذیری کمی آهسته قرار دارد شکل (۴) و جدول (۳). متوسط نفوذ تجمعی پای دیواره بندهای مورد مطالعه در مدت زمان آزمایش (۲۱۳ دقیقه) برابر با ۱۰/۸ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. با بررسی تغییرات نفوذپذیری خاک در سطوح مکانی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد مخزن بندهای خاکی نتایج بیانگر آن است که میزان نفوذپذیری در این سطوح مکانی در کلاس نفوذپذیری کمی آهسته قرار دارد. درحالی‌که نفوذپذیری خاک در منطقه شاهد در کلاس نفوذپذیری متوسط قرار دارد و میانگین سرعت نفوذ و میزان نفوذ تجمعی خاک سطحی در این منطقه به

ترتیب ۱/۳ و ۱/۶ برابر بیشتر است تا در مخزن بندهای خاکی مورد مطالعه. با ترسیم منحنی نفوذپایه برای بندهای مورد مطالعه شکل (۵ و ۶) نتایج بیانگر آن است که میزان نفوذپذیری خاک با شروع آزمایش روند صعودی و با گذشت اندک زمان روند نزولی داشته است. در مطالعات محمود آبادی و مظاهری (Mahmoodabadi & Mazaheri, 2012) این روند به دلیل ورود آب به ترکی‌های سطحی موجود در رسوبات و پرشدن منافذ و همچنین نفوذ آب به لایه‌های زیرسطحی گزارش شده است. علیزاده (Alizadeh, 2005) بر اهمیت ایجاد پتانسیل ماتریک قوی بین ذرات ریزدانه در خاک‌های سنگین تاکید کرده است که با توجه به بافت ریزدانه (کلاس لومی-رسی تا رسی) در مخزن بندهای خاکی توجه به این موضوع بر افزایش شدت نفوذ خاک با اهمیت است. در مطالعات پیشرو و همکاران (Pishro et al., 2021)، رزاقی و رضایی (Razzaghi & Rezaie, 2017) و محمودی آبادی و مظاهری (Mahmoodabadi & Mazaheri, 2012) می‌گویند رفتار هیدرولیکی خاک متأثر از تغییر اندازه ذرات در لایه‌های مختلف است که به‌طور مستقیم میزان نفوذپذیری خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج به دست آمده از این تحقیق با گفته‌های این محققان همخوانی دارد.

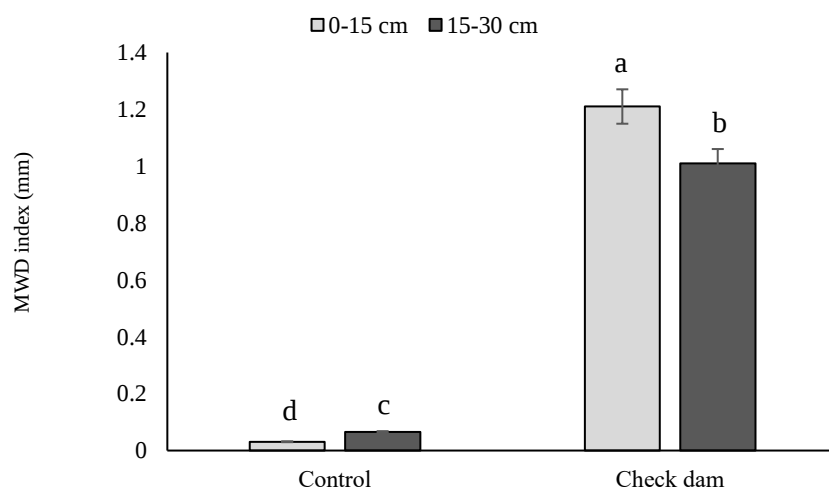
جدول ۲- مقایسه میانگین (اشتباه معیار $\pm$ میانگین) برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در تیمارهای مورد مطالعهTable 2 - Comparison of the mean (standard error $\pm$ mean) of some soil physical properties in the studied treatments

معنی‌داری	مقدار F	منطقه شاهد	مخزن بند خاکی	محل برداشت collection site	متغیر در عمق‌های مختلف (cm)
Significant level	F value	Witness area	Dam reservoir		Variable at different depths (cm)
0.000	59.91	80.1 (1.2 $\pm$) ^a	12.1 (1.2 $\pm$) ^d	عمق ۰-۱۵ Depth 0-15	شن (%) sand
0.000	7.3	18.1 (1.2 $\pm$) ^d	32.1 (1.2 $\pm$) ^c		سیلت (%) silt
0.000	24.7	3.9 (2.2 $\pm$) ^e	55.9 (1.2 $\pm$) ^a		رس (%) clay
0.000	4.3	5.3 (1.2 $\pm$) ^b	11.9 (1.2 $\pm$) ^a		رطوبت اولیه (%) Initial Soil Moisture (%)
0.000	31.1	34.1 (1.1 $\pm$) ^a	23.1 (1.2 $\pm$) ^b		رطوبت اشباع (%) Saturated percentage (%)
0.021	31.1	1.5 (0.1 $\pm$) ^a	1.21 (0.1 $\pm$) ^b		وزن مخصوص (gr.cm ⁻³) Bulk Density
0.000	36.11	64.1 (1.2 $\pm$) ^b	18 (1.2 $\pm$) ^{cd}	عمق ۱۵-۳۰ Depth 15-30	شن (%) sand
0.000	11.31	20.1 (1.2 $\pm$) ^c	42.1 (1.1 $\pm$) ^b		سیلت (%) silt
0.000	9.21	14.9 (1.2 $\pm$) ^d	39.9 (1.2 $\pm$) ^{bc}		رس (%) clay
0.000	3.7	6.1 (1.2 $\pm$) ^b	10.9 (1.2 $\pm$) ^a		رطوبت اولیه (%) Initial Soil Moisture (%)
0.000	28.1	35.1 (1.2 $\pm$) ^a	22.1 (1.1 $\pm$) ^b		رطوبت اشباع (%) Saturated percentage (%)
0.047	2.1	1.46 (0.2 $\pm$) ^a	1.22 (0.1 $\pm$) ^b		وزن مخصوص (gr.cm ⁻³) Bulk Density

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک



شکل ۲- تعیین بافت خاک نمونه‌های برداشت شده در محدوده مورد مطالعه
Fig. 2- Determination of soil texture of samples taken in the study area



شکل ۳- مقایسه میانگین شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در مخزن بندهای خاکی و منطقه شاهد
Fig. 3 - Comparison of the average weighted average diameter (MWD) index in the earthen dam reservoir and the control area



ب- اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری مخزن بند در پای بند
B-Measuring the permeability of the dam reservoir at the next of the dam



الف- اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری مخزن بند در منطقه شاهد
A-Measuring the permeability of the dam reservoir in the test area

شکل ۴- اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری مخزن بند و منطقه شاهد

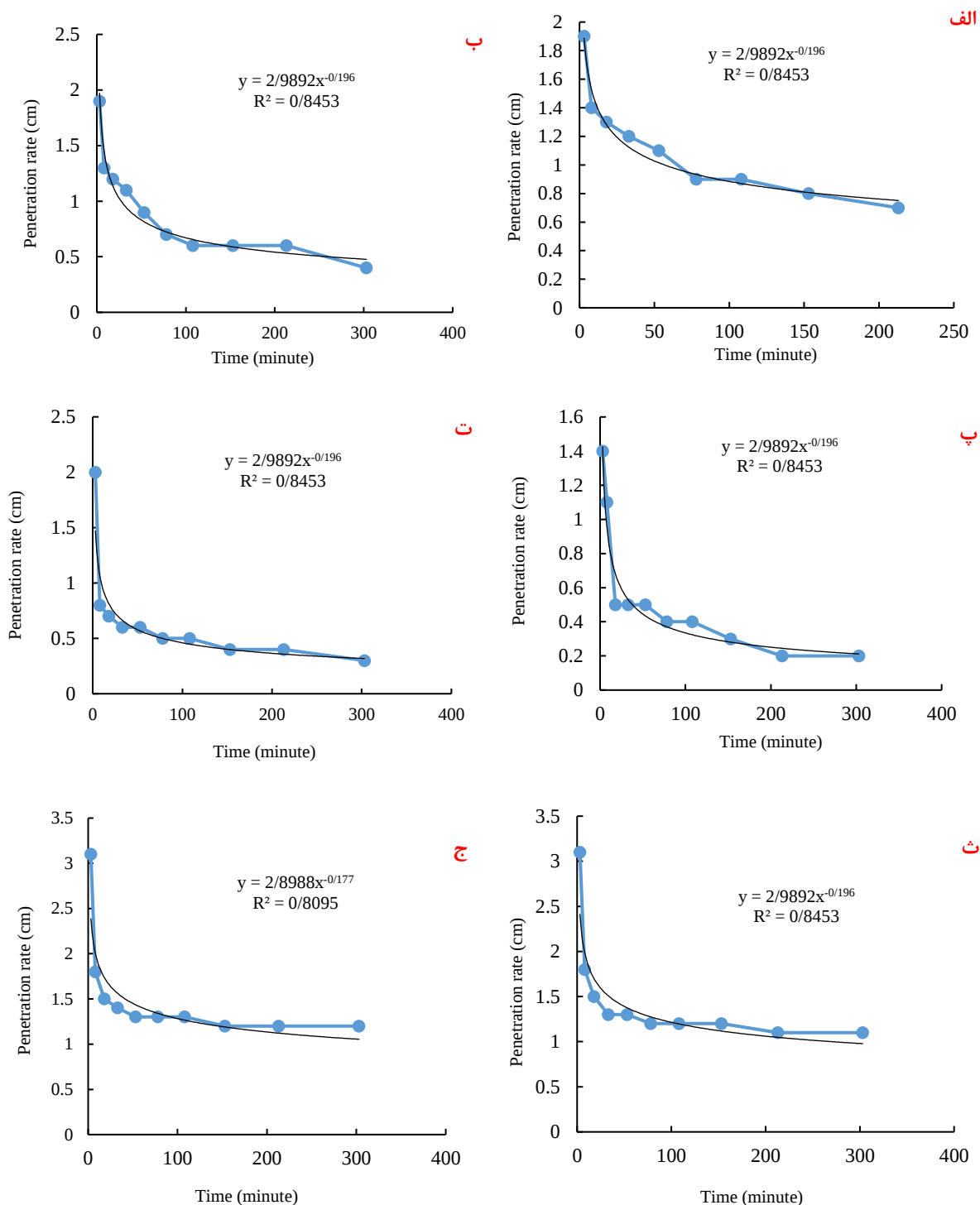
Fig. 4 - Measurement of the permeability of the dam reservoir and the control area

جدول ۳- ویژگی‌های نفوذ (سانتی‌متر بر ساعت) در سطح رسوب مخازن بندهای مورد آزمایش

Table 3 - Infiltration characteristics (cm) in the sediment surface of the reservoirs of the tested dams

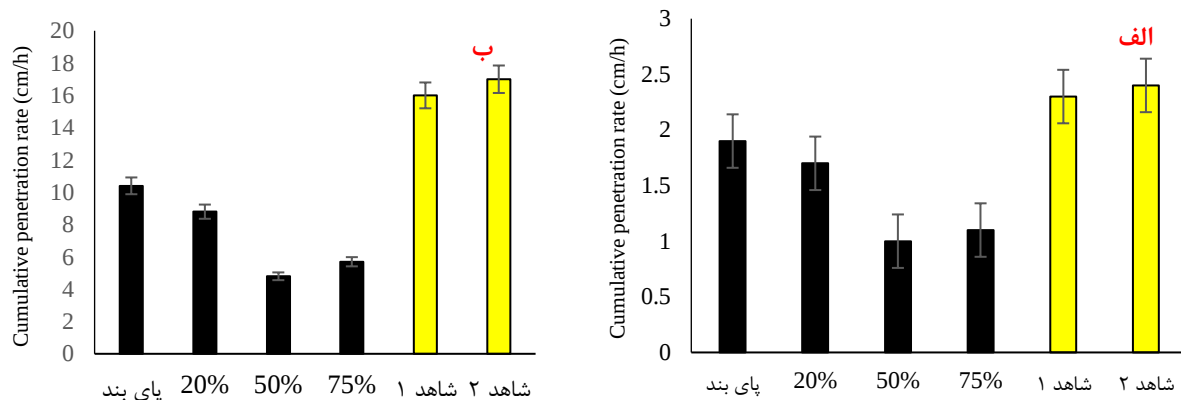
شماره بند	محل برداشت	پای دیواره	۲۵ درصد طول	۵۰ درصد طول	۷۵ درصد طول	شاهد ۱	شاهد ۲
Number of dam	Test site	Next to dam	25% Sediment length	50% Sediment length	75% Sediment length	Control area 1	Control area 2
۱	میانگین سرعت نفوذ	1.9	1.7	1	1.1	2.3	2.4
	Average penetration speed						
۲	نفوذ تجمعی	10.4	9.3	4.8	5.7	16	17
	Ccumulative influence						
۳	میانگین سرعت نفوذ	2	1.9	1.4	1.2	2.4	2.5
	Average penetration speed						
۴	نفوذ تجمعی	11	10.45	7.7	6.6	17	17.7
	Ccumulative influence						
۵	میانگین سرعت نفوذ	1.7	1.8	1.5	1.2	2.4	2.3
	Average penetration speed						
۶	نفوذ تجمعی	9.3	9.9	8.2	6.6	17	16.3
	Ccumulative influence						
۷	میانگین سرعت نفوذ	2.1	1.6	1.2	1.4	2.5	2.7
	Average penetration speed						
۸	نفوذ تجمعی	11.5	8.7	6.6	7.7	17.7	19.1
	Ccumulative influence						
۹	میانگین سرعت نفوذ	2.1	1.8	1.4	1.5	2.6	2.7
	Average penetration speed						
۱۰	نفوذ تجمعی	11.8	9.3	7.1	9.9	18.1	18.4
	Ccumulative influence						

تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک



شکل ۵- منحنی نفوذ پایه در سطوح مختلف مخزن بند خاکی شماره ۱ و منطقه شاهد (الف: منحنی نفوذ پایه در پای دیواره بند، ب: منحنی نفوذ پایه در ۲۵ درصد طول بند، پ: منحنی نفوذ پایه در ۵۰ درصد طول بند، ت: منحنی نفوذ پایه در ۷۵ درصد طول بند، ث: منحنی نفوذ پایه در شاهد ۱ و ج: منحنی نفوذ پایه در شاهد ۲)

Fig. 5 - Base penetration curve at different levels of earthen dam reservoir No. 1 and the control area (A: Base penetration curve at the foot of the dam wall, B: Base penetration curve at the bottom of the dam wall) C: Base penetration curve at 50% of the dam length, D: Base penetration curve at 75% of the dam length, E: Base penetration curve in control 1 and C: Base penetration curve in control 2)



شکل ۶ - مقایسه میانگین سرعت نفوذ (الف) و میزان نفوذ تجمعی (ب) در بندهای خاکی و منطقه شاهد

Fig. 6 - Comparison of average infiltration rate (a) and cumulative infiltration rate (b) in earthen dams and the control area

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر بند خاکی، عمق و محل برداشت بر میزان نفوذپذیری خاک

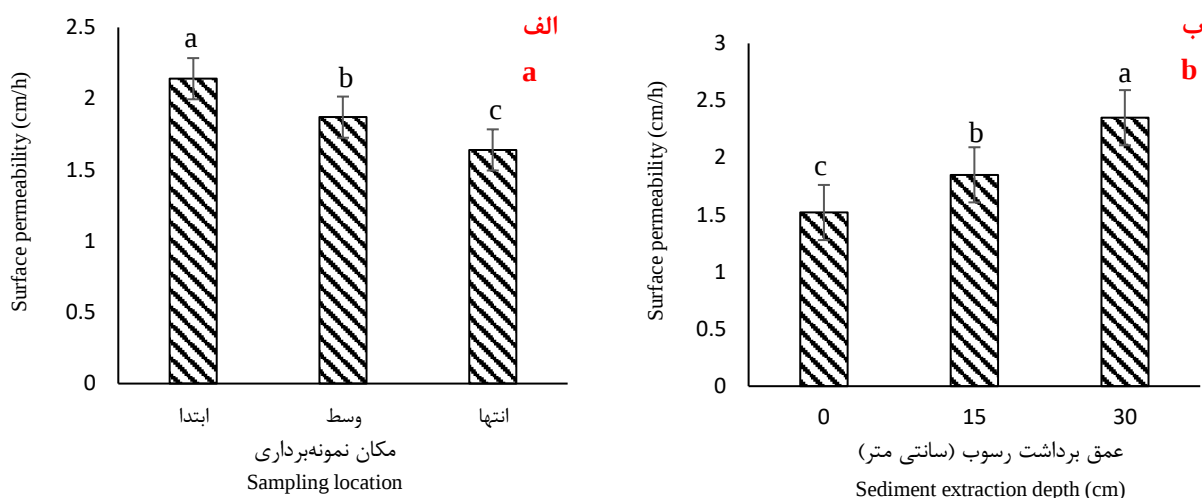
Table 4- Analysis of variance of the effect of soil barrier, depth and harvesting location on soil permeability

میانگین مربعات (Mean squares)	درجه آزادی (df)	منبع تغییر
نفوذپذیری خاک (Soil infiltration)		
307.434 ^{ns}	3	تکرار (Repeat)
2.506 *	1	سال احداث (Construction year)
0.873 *	2	عمق برداشت (Sampling depth)
2.635 *	3	محل برداشت (Sampling area)
0.132 *	2	عمق برداشت (Sampling depth) × سال احداث (Construction year)
0.072 *	3	سطوح برداشت (Sampling area) × سال احداث (Construction year)
0.081 *	6	محل برداشت (Sampling area) × عمق برداشت (Sampling depth)
0.012 **	6	سطوح برداشت (Sampling area) × عمق برداشت (Sampling depth) × سال احداث (Construction year)
	72	خطا (Error)

نفوذپذیری سطحی خاک، یافته‌ها بیانگر آن است که در ابتدای مخزن بندهای احداثی میزان نفوذپذیری به ترتیب ۱۳ و ۲۴ درصد بیشتر است تا در سطوح میانی و انتهایی شکل (۷). اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک در شرایط برداشت رسوب از عمق‌های مختلف بیانگر آن است که کمترین (برابر با ۱/۵۲ سانتی‌متر بر ساعت) و بیشترین (۲/۳۴ سانتی‌متر بر ساعت) میزان نفوذپذیری به ترتیب مربوط به افق سطحی و عمق ۳۰ سانتی‌متری مخزن بندهای خاکی است که در سطح ۵ درصد اختلاف آماری را نشان می‌دهد به طوری که با برداشت لایه‌های رسوب از سطح مخازن در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر میزان نفوذپذیری به ترتیب ۲۲ و ۳۶ درصد افزایش یافته است.

تجزیه واریانس داده‌های نفوذپذیری خاک بیانگر آن است که اثر سال ساخت بند خاکی، عمق و سطوح مکان بر میزان نفوذپذیری خاک در سطح یک درصد معنی‌دار است جدول (۴). اثر متقابل این متغیرها نیز بر میزان نفوذپذیری خاک به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری ($p \leq 0.05$) را نشان می‌دهد. در بررسی اثر سن بندهای خاکی این موضوع روشن است که رسوبات انباشت شده در بندهای با قدمت بیشتر (۲۲ سال ساخت) به دلیل دفعات بیشتر آبیاری مخزن و به تبع آن ترسیب ذرات در آن میزان نفوذپذیری آنها به طور محسوس کمتر است تا در بندهایی با قدمت کمتر (۱۸ سال ساخت) که در مطالعات مصطفایی و همکاران (Mostafaei et al., 2016) به اهمیت این موضوع اذعان شده است. در بررسی تغییرات

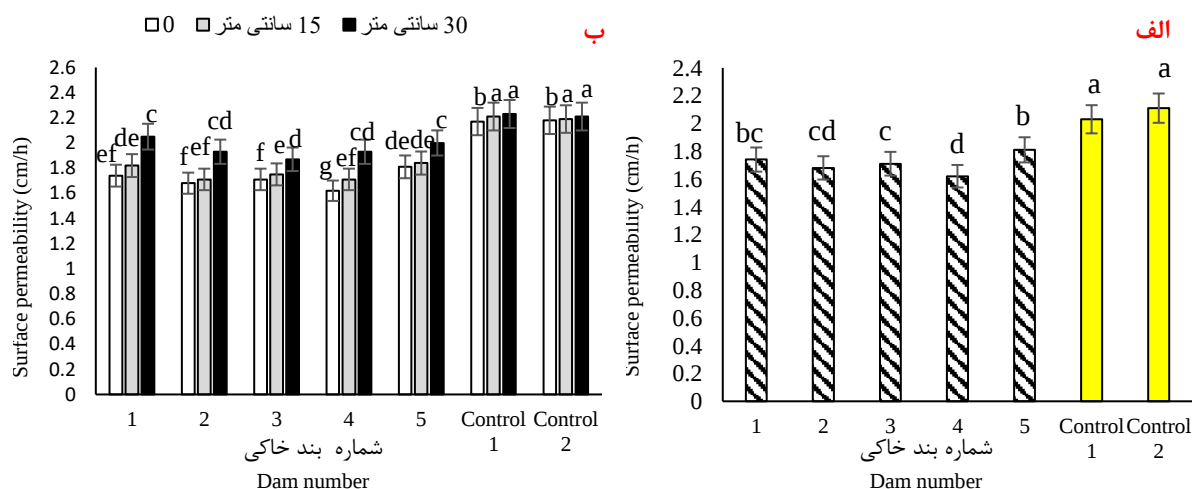
تأثیر عمق رسوبات مخازن بندهای خاکی تغذیه‌ای بر توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری در مناطق خشک



شکل ۷- مقایسه میانگین تغییرات نفوذپذیری خاک در سطوح (الف) و عمق‌های مختلف (ب) برداشتی از مخزن بندهای خاکی
Fig. 7 - Comparison of average soil permeability changes at different levels (a) and depths (b) taken from the earthen dam reservoir

شکل (۸، الف و ب) نشان می‌دهد که تغییرات نفوذپذیری در بین بندهای مورد مطالعه و عمق‌های مختلف برداشت رسوب به لحاظ آماری معنی‌دار ($p \leq 0.05$) است به طوری که نفوذپذیری سطحی در مخزن بندهای احداثی با کاهش ۱/۲ برابری نسبت به منطقه شاهد همراه بوده است. در مخزن بندهای خاکی با برداشت رسوبات از عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر میزان نفوذپذیری نسبت به لایه سطحی به ترتیب ۵ و ۲۶ درصد افزایش یافته و سرعت نفوذپذیری از کلاس نفوذپذیری آهسته به طبقه کمی آهسته تغییر یافته است. این موضوع با پژوهش‌های توتونچی و همکاران (Totonchi *et al.*, 2013) و شمس - ناطری و همکاران (Shams-Nateri *et al.*, 2013) همخوانی دارد که می‌گویند برداشت و لایروبی ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک بستر مخزن حوضچه‌های تغذیه‌ای بر سرعت نفوذپذیری خاک موثر است. این در حالی است که در منطقه شاهد با افزایش عمق، تغییرات محسوسی در میزان نفوذپذیری خاک مشاهده نشد و کلاس نفوذپذیری در عمق‌های مختلف در سطح نفوذپذیری متوسط قرار دارد. با توجه به عملکرد بندهای خاکی، چنانچه حد بالای نفوذپذیری متوسط را معیار نامطلوب بودن نفوذپذیری خاک سطحی در نظر بگیریم همه بندهای خاکی احداث شده در شرایط نامطلوب قرار می‌گیرند.

شکل (۸، الف و ب) نشان می‌دهد که تغییرات نفوذپذیری در بین بندهای مورد مطالعه و عمق‌های مختلف برداشت رسوب به لحاظ آماری معنی‌دار ($p \leq 0.05$) است به طوری که نفوذپذیری سطحی در مخزن بندهای احداثی با کاهش ۱/۲ برابری نسبت به منطقه شاهد همراه بوده است. در مخزن بندهای خاکی با برداشت رسوبات از عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر میزان نفوذپذیری نسبت به لایه سطحی به ترتیب ۵ و ۲۶ درصد افزایش یافته و سرعت نفوذپذیری از کلاس نفوذپذیری آهسته به طبقه کمی آهسته تغییر یافته است. این موضوع با پژوهش‌های توتونچی و همکاران (Totonchi *et al.*, 2013) و شمس - ناطری و همکاران (Shams-Nateri *et al.*, 2013) همخوانی دارد که می‌گویند برداشت و لایروبی ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک بستر مخزن حوضچه‌های تغذیه‌ای بر سرعت نفوذپذیری خاک موثر است. این در حالی است که در منطقه شاهد با افزایش عمق، تغییرات محسوسی در میزان نفوذپذیری خاک مشاهده نشد و کلاس نفوذپذیری در عمق‌های مختلف در سطح نفوذپذیری متوسط قرار دارد. با توجه به عملکرد بندهای خاکی، چنانچه حد بالای نفوذپذیری متوسط را معیار نامطلوب بودن نفوذپذیری خاک سطحی در نظر بگیریم همه بندهای خاکی احداث شده در شرایط نامطلوب قرار می‌گیرند.



شکل ۸ - مقایسه تغییرات نفوذپذیری سطحی منطقه شاهد و بندهای خاکی (الف) و عمق‌های مختلف برداشت (ب) مورد مطالعه
Fig 8 - Comparison of changes in surface permeability of the control area and the studied earth dams (a) and different extraction depths (b).

نقش ویژگی‌های خاک بر نفوذپذیری

افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها میزان نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. ارتباط مثبت درصد شن و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دال بر این موضوع است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان شن ۹۶ درصد تغییرات نفوذپذیری سطحی را در تیمارهای مورد مطالعه توجیه می‌کند جدول (۶). نتایج معادله رگرسیونی برآورد شده مطابق معادله (۳) است.

$$Y = -1.466 + 0.12 \text{ Sand (\%)} - 0.034 \text{ Silt (\%)} - 0.029 \text{ Clay (\%)} + 1.803 \text{ MWD}$$

که در آن: Y = میزان نفوذپذیری سطحی خاک، Sand = شن (%، Silt = سیلت (%، Clay = رس (%، و MWD = شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌هاست. بر اساس مدل رگرسیونی به دست آمده، متغیرهای درصد شن و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در جهت مثبت بر میزان نفوذپذیری سطحی خاک مؤثرند.

به منظور تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نفوذپذیری خاک، از رگرسیون چندگانه خطی و روش گام به گام استفاده شد. بدین منظور میزان نفوذپذیری سطحی خاک به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله درصد شن، سیلت، رس و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به عنوان متغیر مستقل وارد مدل رگرسیونی شد جدول (۵). نتایج نشان می‌دهد متغیرهای درصد شن و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ارتباط مثبتی با میزان نفوذپذیری خاک دارند. در مقابل، ارتباط هر دو متغیر درصد سیلت و رس با میزان نفوذپذیری خاک منفی بوده است. از آنجا که نفوذپذیری خاک متأثر از توزیع اندازه خلل و فرج و به هم پیوستگی آن‌ها در پروفیل خاک است تفاوت در اندازه ذرات باعث تغییر در دانه‌بندی پروفیل خاک و در نتیجه توزیع ناهمگن خلل و فرج خاک می‌شود (Kutylek, 2004). از این رو، با افزایش ذرات درشت دانه و به تبع آن

جدول ۵ - ضریب‌های مدل رگرسیونی نفوذپذیری سطحی در تیمارها با مؤلفه‌های ویژگی‌های فیزیکی خاک (درصد شن، سیلت، رس و شاخص MWD)

Table 5 - Model Coefficients of regression analysis of surface permeability in treatments with soil physical properties (percentage of sand, silt, clay and MWD index)

مدل Model	ضریب‌های استاندارد نشده Unstandardized Coefficients		ضریب‌های استاندارد شده Standardized Coefficients	آزمون تی t	معنی‌داری Sig
	B	انحراف معیار Std. Error	بتا Beta		
Sand	0.12	0.53	0.983	2.156	0.01
Silt	- 0.034	0.13	-1.083	-2.61	0.042
Clay	- 0.029	0.21	-1.012	-1.379	0.026
MWD	1.803	0.45	0.651	2.98	0.07

جدول ۶- نتایج تجزیه رگرسیون گام به گام میزان نفوذپذیری سطحی در تیمارها با مؤلفه‌های ویژگی‌های فیزیکی خاک (درصد شن، سیلت، رس و شاخص MWD)

Table 6 - Results of stepwise regression analysis of surface permeability in treatments with soil physical properties (percentage of sand, silt, clay and MWD index)

مراحل رگرسیون گام به گام Step-by-step regression steps	
1	
1.46	عدد ثابت Constant number
18.8	درصد شن Sand (%)
0.962	ضریب تبیین R ^۲ Coefficient of explanation R ^۲

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد افزایش ذرات ریزدانه در مخزن بندهای خاکی ضمن تغییر بافت خاک باعث کاهش محسوس نفوذپذیری بندهای احداثی در غرب منطقه سیستان شده است. سرعت نفوذپذیری خاک سطحی همه بندهای خاکی در کلاس نفوذپذیری آهسته قرار گرفته است و به لحاظ نفوذپذیری این بندها در شرایط نامطلوب قرار دارند و حجم آب ذخیره شده در آنها با توجه به بالا بودن میزان تبخیر در منطقه (بیش از ۵ متر در سال) از دسترس خارج می‌شود. با برداشت رسوبات در عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر تاثیر چشم‌گیری بر میزان نفوذپذیری خاک این بندهای احداثی مشاهده شد که ضرورت مدیریت رسوبات در مخازن این بندهای خاکی را دو چندان می‌نماید. تجمع رسوبات در مخازن بندها علاوه بر کاهش نفوذپذیری خاک باعث کاهش عمر مفید مخزن بندهای خاکی می‌گردد که با توجه به بحران بی‌آبی در منطقه سیستان نیازمند بررسی عملکرد دیگر بندهای احداثی در این منطقه به‌منظور اتخاذ برنامه‌های مدیریتی لازم برای نگهداری این سازه‌های مکانیکی است. یکی از رویکردهای مناسب برای بهره‌برداری اصولی از این بندهای خاکی، برداشت رسوبات سیلابی است که بستری مناسب برای اصلاح زمین‌های سنگلاخی و سنگریزه‌ای پایین دست فراهم می‌کند. این کار ضمن کاهش حجم رسوبات بندهای خاکی امکان توسعه فعالیت‌های کشاورزی و در نتیجه اشتغال‌زایی را برای ساکنان مناطق پایین دست میسر می‌سازد که می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آتی در این منطقه باشد.

منابع

- Alizadeh, A. (2005). Soil physics. *Mashhad*, Emam reza university.
- Asiaei, O., Karimaei Tabarestani, M., Soltani, A., & Payan, M. (2021). Study on Geotechnical Properties of Sediment Deposited in Latian Dam Reservoir Using Field Measurements. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(9), 2457-2470
- Augustyniak, R., Grochowska, J., Łopata, M. Parszuto, K., & Tandyrak, R. (2020). Characteristics of bottom sediments in polish lakes with different trophic status. In *Polish River Basins and Lakes—Part I. The Handbook of Environmental Chemistry*; Korzeniewska, E., Harnisz, M., Eds.; Springer: Cham, Switzerland. 1-86.
- Ballas, G., Garziglia, S., Sultan, N., Pelleter, E., Toucanne, S., Marsset, T., Riboulot, V., & Ker, S. (2018).

تشکر و قدردانی

از همکاران محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، به‌خصوص آقای دکتر محمود طباطبایی و آقای دکتر نارویی از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان که برای اجرای این پژوهش با نویسندگان مساعدت کرده‌اند سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان مقاله نسخه منتشر شده آنرا خوانده و با آن موافقت کرده‌اند. هر دو نویسنده بطور مساوی در مفهوم‌سازی مقاله و نگارش پیش‌نویس‌های اولیه و بعدی آن مشارکت داشته‌اند.

- Influence of early diagenesis on geotechnical properties of clay sediments (Romania, Black Sea). *Engineering Geology*. 240. 175–188.
- Banihabib, M.E., Iranpour, M. (2012). Effect of some soil physical and chemical properties on permeability in field conditions. *Irrigation and Water Engineering*. 2(4). 14-25.
- Baran, A., Tarnawski, M., Kaczmarek, M. (2011). Assessment of agricultural utilization of bottom sediments from the Besko reservoir. *Czasopismo Techniczne*. 108. 3–11.
- Batucu, G.D., & Jordaan, M.J. (2000). *Silting and Desilting of Reservoirs*; A.A. Balkema: Rotterdam, The Netherlands.
- Bayat, P., & basir-por, A. (2009). Investigating the effects of sedimentary materials on reducing the permeability of ponds and reservoirs of artificial recharge schemes and strategies to combat this phenomenon. *Second National Water Conference*. Islamic Azad University.
- Becker, A., Bucher, F., Davenport, C.A., & Flisch, A. (2004). Geotechnical characteristics of post-glacial organic sediments in Lake Bergsee, southern Black Forest, Germany. *Engineering geology*. 2004, 74, 91–102.
- Dz.U. (2014). Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów. 1923. Available online:
- Fonseca, R.M., & Barriga, F.(1998). Fyfe, W.S. Reversing desertification by using same reservoir sediments as agriculture soils. *Episodes*. 21. 218–224.
- Jafari, A., Nazarnejad, H., Najafi, S., & Asadzadeh, F. (2024). Sediment Particle Size Distribution behind the Check Dams of the Lashkaran Watershed, Salmas, West Azerbaijan. *J Watershed Manage Res*, 15(2), 65-76.
- Jahantigh, M., & Jahantigh, M. (2024). Effect of Check Dam on Sediment controlling and increasing the area of agricultural lands (A Case study Narun Khash sub-watershed). *Journal of Rainwater Catchment Systems*. 12 (3), 1-8.
- Giakoumatos, S.D., Siontorou, C., & Sidiras, D. (2025). Sedimentation simulation model testing for silty soil water infiltration after Hortonian overland flow. *Advances in Water Resources*. 105020.
- Ghojehpour, E., Jalali, V.R., Jafari, A., & Mahmoudabadi, M. (2020). Copula function and its application to estimate sand and bulk density of soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(1). 47-64.
- Hill, K. D. & Beecham, S. (2018). The Effect of Particle Size on Sediment Accumulation in Permeable Pavements. *Water*. 10(4), 403.
- Madeyski, M., Michalec, B., & Tarnawski, M. (2008). Silting of Small Water Reservoirs and Quality of Sediments. (In Polish: Zamulanie Małych Zbiorników Wodnych i Jakość Osadów Dennyh); *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich (Infrastructure And Ecology Of Rural Areas)*; Polska Akademia Nauk: Kraków, Poland. 11.
- Pichand, M. (2017). The effect of grassland conversion to the other agricultural uses on some soil Physicochemical properties (case study: watershed basin of Amameh). *Natural Ecosystems of Iran*. 8(1), 99-122.
- Pishro, F., Bakhtiari, M., & Shehni Karamzadeh, N. (2021). Experimental Investigation of Grading, Shape Factor and Compaction Effects on Anisotropic Permeability of Coarse Grain Solis. *Water and Soil Science*. 31(1), 1-14.
- Polski, K. (2006). *Normalizacyjny. PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania Geotechniczne. Oznaczanie i Klasyfikowanie Gruntów. Część 2: Zasady Klasyfikowania*; Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Poland.

- Khani, A., & Soleimani, F. (2019). The effect of sediment height on recharge reduction in short recharge dams, 8th National Conference on Rainwater Catchment Surface Systems, Mashhad.
- Khayrandish, H., Pishdad, S., & Esmaeilpour, Y. (2015). Qualitative and quantitative assessment of check-dams effectiveness for flood sediment deposition (case study : Dam-tang watershed, Darab). *Quarterly journal of Environmental erosion research*. 2 (15), 1-14.
- Kos', K., Gruchot, A., & Zawisza, E. (2021). Bottom Sediments from a Dam Reservoir as a Core in Embankments—Filtration and Stability: A Case Study. *Sustainability*. 13, 1221.
- Kutylek, M. (2004). Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res*, 79: 175-184.
- Mahmoodabadi, M., & Mazaheri, M.R. (2012). Effect of some soil physical and chemical properties on permeability in field conditions. *Irrigation and Water Sciences and Engineering*, 2(8), 14-25.
- Masetti, M., Pedretti, D., Sorichetta, D., Stevenazzi, S., & Bacci, F. (2016). Impact of a Storm-Water Infiltration Basin on the Recharge Dynamics in a Highly Permeable Aquifer, *Water Resources Management*. 1, 149-165.
- Mostafaei, A., Kalantari, N., Zarkesh, M.K. (2016). Assessing the success of floodwater spreading projects using a fuzzy approach. *Water Science Technology*. 74(8). 1980-1991.
- National Management and Planning Organization, Publication No. 243. (2001). Standard Instructions for Measuring Water Infiltration Rate in Soil by Double Cylinder Method, *National Management and Planning Organization press*. 1-48.
- Razzaghi, F., & Rezaie, N. (2017). Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures.
- Shams-Nateri, E., Fazloul, R., & Emadi, A.R. (2019). Investigation of Soil Surface Permeability Changes in Artificial Recharge Networks (Case Study: Artificial Recharge Network of Shahriar Plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2). 367-377.
- Saadat, S., Esmaelnejad, L., Rezaei, H., Mirkhani, R., & Seyedmohammadi, J. (2019). Comparing aggregate stability tests as one of the soil physical quality indicators. *Water and Soil*. 33(2). 289-303.
- Safari, M., Manouchehri-Niya, M., & Nakhaee, M. (2021). Geological, mineralogical, and fluid inclusion studies of the Bandan-Neyghan ore district, South Khorasan Province, Iran. *Advanced Applied Geology*. 11(2). 225-237.
- Salimi, L., Adelpor, A., & Abass-zadeh, M. (2014). Investigating the impact of artificial nutrition projects on soil permeability. The first national desert conference, SeP. 15. Yazd. Iran.
- Samadi-boroojeni, H., Fathimoghadam, M., & Zalaghi, E. (2012). Survey Physical Properties of the Always Submerged Sediments in Dez Dam Reservoir Using the Field Data and the Empirical Methods Application. *Irrigation Sciences and Engineering*, 36(1), 57-67.
- Sojka, M., Siepak, M., & Gnojka, E. (2013). Assessment of heavy metal concentration in bottom sediments of Stare Miasto pre-dam reservoir on the Powa River. (In Polish: Ocena zawartości metali ciężkich w osadach dennych wstępnej części zbiornika retencyjnego Stare Miasto na rzece Powie). *Annul. Set Environ. Prot. Rocznik Ochrona Środowiska*. 15. 1916-1928.
- Szara, M., Baran, A., Klimkowicz-Pawlas, A., & Tarnawski, M. (2020). Ecotoxicological characteristics and]cological risk assessment of trace elements in the bottom sediments of the Rożnów reservoir (Poland). *Ecotoxicology*, 29. 45-57.
- Szal, D., & Gruca-Rokosz, R. (2020). Anaerobic oxidation of methane in freshwater sediments of Rzeszów reservoir. *Water*. 12. 398.
- Tafteh, A., Ghalebi, S., & Mallah, S. (2020). Evaluating Automatic Detector of Wetting Front for Monitoring Water Movement in Soil. *Environment and Water Engineering*. 6(1). 1-12.

- Totonchi, A., Brhamnd, N., Khandashti, M.R., & Homauon, R. (2013). Study and investigation of the effect of the type of coating and the concentration of suspended particles on the phenomenon of surface pore blockage in the bed of artificial feeding ponds, The First National Conference on Agricultural Engineering and Management, Environment and Sustainable Natural Resources. Dec.21. Hamedan University, Iran.
- Vahabzadeh Kebria, G., Reiahi, M.R., & Roshun, S.H. (2016). Investigation of land use change on physicochemical characteristics and soil erosion in Kaftargar basin of Behshahr. *Environmental Erosion Research Journal*. 6(2). 75-88.
- Wiśniowska-Kielian, B., & Niemiec, M. (2007). Effect of bottom sediment addition to the substratum on the quality of produced maize biomass. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*. 14, 581–589.
- Zhang, Y., Zhang, X., Bi, Z., Yu, Y., Shi, P., Ren, L., & Shan, Z. (2020). The impact of land use changes and erosion process on heavy metal distribution in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*. 718. 137305.