



The Effect of Soil Water Characteristic Curve (SWCC) Parameters on Contaminant Transport in Homogeneous Earth Dams

Seyed Ali Asghari Pari¹ 

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Al Anbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: asghari pari@bkatu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 20, 2026

Revised: Feb. 28, 2026

Accepted: Apr. 25, 2026

Published online: May. 2026

Keywords:

*Homogeneous earth dam,
Contaminant transport,
Soil-Water Characteristic Curve
(SWCC),
Hydrodynamic dispersion
coefficient,
Geo-Studio CTRAN/W*

Contaminant transport in homogeneous earth dams is strongly influenced by the soil's hydraulic parameters, the most important of which is the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC). This research was conducted to investigate the impact of five key SWCC parameters—saturated volumetric water content (θ_s), residual volumetric water content (θ_r), the inverse of the air entry suction parameter (α), the pore size distribution parameter (n), and the shape parameter (m)—on contaminant transport in a homogeneous earth dam. Numerical modeling was performed using Geo-Studio 2024 software and the CTRAN/W module, and the influence of variations in each parameter on breakthrough time, concentration profile, and contaminant penetration depth was analyzed. The results indicated that an increase in θ_r and a decrease in n significantly reduce the time for the contaminant to reach the downstream side, whereas an increase in α and θ_s has the opposite effect and slows down the transport. Parameter m demonstrated a moderate effect on breakthrough time. Regression analysis also confirmed the high sensitivity of the model to parameters θ_r , θ_s , and n . This study emphasizes the importance of accurate calibration of SWCC parameters in modeling contaminant transport and assessing pollution risk in earth dams.

Cite this article: Asghari Pari, S.A., (2026) The Effect of Soil Water Characteristic Curve (SWCC) Parameters on Contaminant Transport in Homogeneous Earth Dams, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (3),531-547. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.409884.670088>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.409884.670088>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Contaminant transport in homogeneous earth dams is a critical environmental and geotechnical concern, significantly influenced by the soil's hydraulic properties. The Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) is the fundamental relationship governing moisture dynamics in unsaturated soils, thereby controlling key transport parameters such as unsaturated hydraulic conductivity and the hydrodynamic dispersion coefficient. Accurate prediction of contaminant breakthrough time and concentration profiles depends heavily on the precise calibration of SWCC parameters. This study investigates the sensitivity of contaminant transport in an earth dam to variations in the five key parameters of the van Genuchten SWCC model: saturated volumetric water content (θ_s), residual volumetric water content (θ_r), the inverse of the air entry suction parameter (α), the pore size distribution parameter (n), and the shape parameter (m).

Method

Numerical modeling was conducted using Geo-Studio 2024 software, coupling the SEEP/W module for steady-state seepage analysis and the CTRAN/W module for contaminant transport simulation. A homogeneous earth dam with a height of 12 meters and a reservoir water level at 10 meters was modeled. A constant contaminant source concentration (100 kg/m^3) was applied upstream. A systematic sensitivity analysis was performed by varying each of the five SWCC parameters individually while keeping others constant at baseline values ($\theta_r=0.1$, $\theta_s=0.45$, $\alpha=50$, $n=2$, $m=0.5$). The primary outputs analyzed were the contaminant concentration profile along the downstream slope at day 29, the concentration breakthrough curve at a critical downstream monitoring point (Point A) over 365 days, and the breakthrough time (defined as the time for the relative concentration to reach 10% of the source concentration).

Results

The results demonstrated a significant and varied impact of Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) parameters on contaminant transport dynamics. Among the parameters, residual water content (θ_r) and pore size distribution (n) exhibited the most pronounced effects. Increasing θ_r from 0.05 to 0.25 accelerated transport by enhancing moisture connectivity in fine pores, reducing breakthrough time from 19 to 15 days. The parameter n was identified as the most sensitive factor; increasing n from 1.5 to 4 drastically reduced breakthrough time from 24 to 0.3 days, leading to rapid and widespread contaminant propagation. In contrast, increasing the inverse air entry suction (α) delayed breakthrough from 2 to 25 days and resulted in a more concentrated contamination plume near the dam toe. Saturated water content (θ_s) unexpectedly increased breakthrough time from 11 to 20.5 days, while shape parameter (m) showed a moderate retarding effect. Pearson correlation analysis confirmed the sensitivity ranking as $\theta_r > \theta_s > n > \alpha > m$, with θ_r exhibiting the strongest negative correlation ($R^2 = 0.99$).

Conclusions

This study conclusively demonstrates the decisive role of SWCC parameters in modeling contaminant fate in earth dams. Parameters θ_r , n , and θ_s were identified as highly sensitive, requiring careful calibration for realistic risk assessment.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Data availability statement

The data of the present study can be accessed through a request from the authors.

Artificial Intelligence Declaration

The author confirms that no artificial intelligence tools have been used in any stage of this research.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical considerations

The author avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تأثیر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت-مکش خاک (SWCC) بر انتقال آلاینده در سدهای خاکی همگن

سید علی اصغری پری[✉]گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: asgharipari@bkatu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

انتقال آلاینده‌ها در سدهای خاکی همگن به شدت تحت تأثیر پارامترهای هیدرولیکی خاک قرار دارد که مهم‌ترین آن‌ها منحنی مشخصه رطوبت-مکش خاک (SWCC) است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پنج پارامتر کلیدی SWCC شامل رطوبت حجمی اشباع (θ_s)، رطوبت حجمی باقیمانده (θ_r)، پارامتر معکوس مکش ورود هوا (α)، پارامتر توزیع اندازه منافذ (n) و پارامتر شکل (m) بر انتقال آلاینده در یک سد خاکی همگن انجام شد. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Geo-Studio 2024 و ماژول‌های SEEP/W و CTRAN/W انجام گرفت و تأثیر تغییرات هر پارامتر بر زمان شکست، پروفیل غلظت و عمق نفوذ آلاینده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش θ_r و کاهش n به طور قابل توجهی زمان رسیدن آلاینده به پایین دست را کاهش می‌دهد، در حالی که افزایش α و θ_s اثر معکوس داشته و انتقال را کند می‌کند. پارامتر m تأثیر متوسطی بر زمان شکست نشان داد. تحلیل رگرسیونی نیز حساسیت بالای مدل به پارامترهای θ_r ، θ_s و n را تأیید کرد. این مطالعه بر اهمیت کالیبراسیون دقیق پارامترهای SWCC در مدل‌سازی انتقال آلاینده و ارزیابی ریسک آلودگی در سدهای خاکی تأکید می‌نماید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۵

تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

سد خاکی همگن،

انتقال آلاینده،

منحنی SWCC،

ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی،

CTRAN/W

استناد: اصغری پری؛ سیدعلی (۱۴۰۵) تأثیر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت-مکش خاک (SWCC) بر انتقال آلاینده در سدهای خاکی همگن، مجله تحقیقات

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.409884.670088>، ۵۷، (۳)، ۵۴۷-۵۳۱

آب و خاک ایران، ۵۷، (۳)، ۵۴۷-۵۳۱



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.409884.670088>

مقدمه

انتقال آلاینده در محیط‌های متخلخل یکی از مسائل کلیدی در ژئوتکنیک محیط‌زیست و مهندسی منابع آب است. در سازه‌های خاکی نظیر سدها، حرکت آب و مواد محلول در شرایط اشباع و غیراشباع می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کند. در پروژه‌های سدسازی، منشأ آلاینده بسته به نوع بهره‌برداری مخزن و کاربری حوضه آبریز متفاوت است. در سدهای مخزنی متعارف، ورود آلاینده‌ها عمدتاً ناشی از رواناب‌های سطحی حوضه آبریز است که می‌تواند حاوی نیترات و فسفات حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، فلزات سنگین نظیر سرب (Pb) و کادمیم (Cd)، و ترکیبات آلی محلول باشد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که انتقال مواد مغذی و فلزات سنگین در محیط‌های خاکی تحت تأثیر مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی و رطوبتی خاک قرار دارد و می‌تواند منجر به آلودگی منابع آب زیرزمینی پایین دست شود (Chen & Smith, 2022; Li et al., 2022). علاوه بر این، حضور ریزپلاستیک‌ها و آلاینده‌های نوظهور در رواناب‌های کشاورزی و شهری به‌عنوان یک چالش جدید زیست‌محیطی مطرح شده است که رفتار انتقال آن‌ها نیز تابع شرایط رطوبتی خاک است (Wang et al., 2023).

در مقابل، در سدهای باطله معدنی، ماهیت آلودگی معمولاً شدیدتر و ژئوشیمیایی تر بوده و شامل فلزات سنگین نظیر آرسنیک (As)، سرب (Pb) و کادمیم (Cd) و همچنین زه‌آب اسیدی معدن (Acid Mine Drainage, AMD) است. این زه‌آب به دلیل pH پایین و قدرت انحلال بالای فلزات، پتانسیل آلودگی گسترده‌ای در توده خاک و منابع آب زیرزمینی ایجاد می‌کند (Li et al., 2022). رفتار انتقال آلاینده در خاک تابع اندرکنش بین جریان آب و فرآیندهای جابجایی و پخش است که به‌طور کلاسیک با معادله انتقال-پخش (Advection-Dispersion Equation) توصیف می‌شود (Bear, 1972). در شرایط اشباع، ضرایب هدایت هیدرولیکی و پخشیدگی نسبتاً ثابت فرض می‌شوند؛ اما در ناحیه غیراشباع این ضرایب به‌شدت تابع مکش ماتریک و محتوای رطوبتی هستند و رفتار سیستم کاملاً غیرخطی می‌شود (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980). بنابراین پیش‌بینی دقیق انتقال آلاینده در سدهای خاکی مستلزم مدل‌سازی صحیح جریان غیراشباع است.

رابطه بین مکش و رطوبت خاک توسط منحنی مشخصه رطوبت-مکش خاک (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC) بیان می‌شود که یکی از بنیادی‌ترین مفاهیم در مکانیک خاک‌های غیراشباع است (Fredlund & Rahardjo, 1993). مدل پارامتری و ن‌گنوختن (van Genuchten, 1980) یکی از پرکاربردترین روابط تحلیلی برای توصیف SWCC است و پارامترهای آن شامل رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقیمانده (θ_r)، پارامتر معکوس مکش ورود هوا (α)، پارامتر توزیع اندازه منافذ (n) و پارامتر شکل (m) می‌باشند. این پارامترها علاوه بر تعیین شکل منحنی SWCC، در محاسبه هدایت هیدرولیکی غیراشباع از طریق مدل و ن‌گنوختن-معلم نیز نقش دارند (Mualem, 1976).

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییرات پارامترهای SWCC می‌تواند به‌طور مستقیم بر سرعت انتقال آلاینده اثر بگذارد. به‌عنوان مثال، پیگناتلو و زینگ (Pignatello and Xing, 1996) به‌طور تجربی نشان دادند که مکانیسم جذب ترکیبات آلی غیرقطبی به فاز جامد خاک، از یک رفتار خطی در شرایط اشباع به یک رفتار غیرخطی قوی در شرایط خشک‌تر تغییر می‌کند، پدیده‌ای که به‌طور مستقیم با تغییر کشش سطحی آب و دسترسی به سطوح جذب داخلی مرتبط است و توسط SWCC قابل تفسیر می‌باشد. سینگ و همکاران (Singh et al, 2018) گزارش کردند که بی‌توجهی به رفتار غیراشباع در سدهای خاکی می‌تواند منجر به برآورد نادرست غلظت در نقاط پایش شود. همچنین گوه و همکاران (Goh et al, 2014) اهمیت تعیین دقیق پارامترهای منحنی SWCC را در تحلیل‌های ژئوتکنیکی تأکید کرده‌اند. در مدل‌های عددی پیشرفته انتقال، نظیر HYDRUS، وابستگی غیرخطی هدایت هیدرولیکی و ضریب پخشیدگی به SWCC به‌طور صریح لحاظ می‌شود (Simunek & van Genuchten, 2008).

انتقال و انتشار آلاینده‌ها در بدنه سدهای خاکی یکی از چالش‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک و محیط‌زیست محسوب می‌شود. در بدنه سدهای خاکی، به‌ویژه در شیب پایین دست، بخش قابل توجهی از توده خاک در حالت غیراشباع قرار دارد. در این میان، منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWCC) به‌عنوان پارامتر کلیدی در تعیین رفتار هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع، نقش تعیین‌کننده‌ای در مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها ایفا می‌کند (Fredlund and Rahardjo, 1993). با وجود تفاوت در ماهیت شیمیایی آلاینده‌ها، مکانیسم فیزیکی انتقال محیط متخلخل—شامل جابجایی و پخش در شرایط اشباع و غیراشباع—در هر دو نوع سد مخزنی و باطله، تابع ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و روابط غیرخطی بین مکش و رطوبت است. از این رو، تحلیل دقیق رفتار غیراشباع و نقش پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت—

مکش خاک (SWCC) در پیش‌بینی انتقال آلاینده اهمیت اساسی دارد. با وجود این، بیشتر مطالعات پیشین بر تحلیل نشت اشباع یا بررسی کلی انتقال تمرکز داشته‌اند و تحلیل حساسیت سیستماتیک پارامترهای SWCC در محیط سد خاکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر پنج پارامتر کلیدی SWCC بر انتقال یک آلاینده محلول محافظه‌کار در بدنه یک سد خاکی همگن از طریق مدل‌سازی عددی کوپل جریان و انتقال است. تمرکز مطالعه بر ارزیابی تغییرات زمان شکست، عمق نفوذ و توزیع غلظت در پایین دست سد می‌باشد. با این حال، چارچوب مدل‌سازی ارائه‌شده قابلیت تعمیم به سدهای باطله معدنی را نیز دارد، مشروط بر آنکه واکنش‌های ژئوشیمیایی، فرآیندهای جذب-واحد و تغییرات شیمیایی ویژه آن محیط‌ها در مدل لحاظ شوند. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود کالیبراسیون پارامترهای هیدرولیکی و افزایش دقت ارزیابی ریسک زیست‌محیطی در طراحی و پایش سدهای خاکی کمک نماید.

مبانی نظری ارتباط SWCC و ضریب پخشیدگی $D(\theta)$

مدل ون گنوختن برای SWCC

مدل ون گنوختن (van Genuchten, 1980) یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین مدل‌های پارامتری برای توصیف منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWCC) است. این مدل یک رابطه تحلیلی ساده‌شده ولی قدرتمند ارائه می‌دهد که برازش خوبی با داده‌های آزمایشگاهی انواع مختلف خاک دارد و به طور گسترده در نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک و هیدرولوژی (مانند GeoStudio, HYDRUS) استفاده می‌شود. معادله اصلی ون گنوختن برای درصد رطوبت حجمی (θ) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (a|\psi|)^n]^m} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن

θ_s : رطوبت حجمی در حالت اشباع.

θ_r : رطوبت حجمی باقیمانده در مکش بسیار بالا.

ψ : مکش بافتی در خاک

α : پارامتر معکوس مکش ورود هوا ($\alpha \approx 1/\psi_a$)

n : پارامتر مرتبط با شیب منحنی و توزیع اندازه منافذ.

m : پارامتر شکل منحنی.

تفسیر فیزیکی پارامترهای مدل و تاثیر آنها بر منحنی SWCC در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- تفسیر فیزیکی پارامترهای مدل و تاثیر آنها بر منحنی SWCC

پارامتر	تفسیر فیزیکی	تأثیر بر شکل منحنی SWCC
θ_s	حداکثر رطوبتی که خاک می‌تواند در حالت اشباع نگه دارد. معادل تخلخل مؤثر.	تعیین‌کننده حد بالای منحنی.
θ_r	رطوبتی که در مکش‌های بسیار بالا (خاک بسیار خشک) در منافذ ریز به دام می‌افتد و به راحتی تخلیه نمی‌شود.	تعیین‌کننده حد پایین منحنی در ناحیه خشک.
α	معکوس تقریبی مقدار ورود هوا (AEV). هرچه α بزرگتر باشد، خاک زودتر شروع به تخلیه می‌کند (خاک درشت‌دانه).	جابجایی افقی منحنی. مقادیر بالاتر، منحنی را به سمت چپ (مکش‌های کمتر) منتقل می‌کند.
n	نشان‌دهنده یکنواختی توزیع اندازه منافذ. n بزرگتر نشان‌دهنده محدوده باریک‌تری از اندازه منافذ است.	کنترل شیب قسمت میانی منحنی. n بزرگتر یعنی شیب تندتر یا تخلیه در محدوده مکش باریک‌تر.
m	پارامتر شکل، معمولاً n مشتق می‌شود. رابطه $m = 1 - 1/n$ یک فرض رایج است.	بر تقارن منحنی تأثیر می‌گذارد.

برای تحلیل‌های هیدرولیکی (مانند محاسبه ضریب پخشیدگی)، به مشتق SWCC نیاز داریم که بصورت زیر محاسبه می‌شود

$$C(\psi) = d\theta/d\psi = \frac{-(\theta_s - \theta_r)mna^n|\psi|^{n-1}}{[1 + (a|\psi|)^n]^{m+1}} \quad \text{رابطه ۲}$$

این تابع ظرفیت آب‌گیری ویژه خاک را نشان می‌دهد و در معادله جریان غیراشباع و محاسبه پخشیدگی استفاده می‌شود. ون گنوختن

مدل خود را با مدل معلم (Mualem, 1976) برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(\theta)$ تلفیق کرد:

$$K(\theta) = K_s \theta^\ell [1 - (1 - \theta^{1/m})^m]^2 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن ℓ پارامتر پیوستگی منافذ است (اغلب ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود).

محاسبه تابع ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی ($D(\theta)$)

در CTRAN/W، ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی به عنوان تابعی از محتوای رطوبتی (θ) محاسبه می‌شود. این تابع از مشتق منحنی SWCC و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع استنتاج می‌شود. رابطه کلی برای ضریب پخشیدگی در حالت غیراشباع به صورت زیر است:

$$D(\theta) = D^0 \tau(\theta) + K(\theta) |dh/d\theta| \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن:

D^0 : ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد.

$\tau(\theta)$: تابعی است که معمولاً به صورت $\tau(\theta) = \theta^p$ در نظر گرفته می‌شود (مقدار p معمولاً حدود ۱).

$K(\theta)$: هدایت هیدرولیکی غیراشباع.

$|dh/d\theta|$: قدر مطلق مشتق پتانسیل فشار ماتریک (h) نسبت به رطوبت، که معادل معکوس ظرفیت آب ویژه ($C(\theta)$) است.

از آنجا که ψ تابعی از θ است، در محاسبات عددی، $|dh/d\theta| = 1/|C(\theta)|$ محاسبه می‌شود. بنابراین، تابع $D(\theta)$ در CTRAN/W

به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D(\theta) = D_0 \theta^p + \left[K_s \theta^\ell \left(1 - \left(1 - \theta^{1/m} \right)^m \right)^2 \right] \left(\frac{1}{C(\theta)} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

با جایگذاری روابط فوق در معادله اصلی $D(\theta)$ ، مشاهده می‌شود که این ضریب، تابعی پیچیده و بسیار غیرخطی از پارامترهای

SWCC است:

$$D(\theta) = \frac{K_s \cdot \theta \left[1 - \left(1 - \theta^{(1/m)} \right)^m \right]^2}{\alpha m n (\theta_s - \theta_r) \theta^{1/m} (1 - \theta^{1/m})^m} \quad \text{رابطه ۶}$$

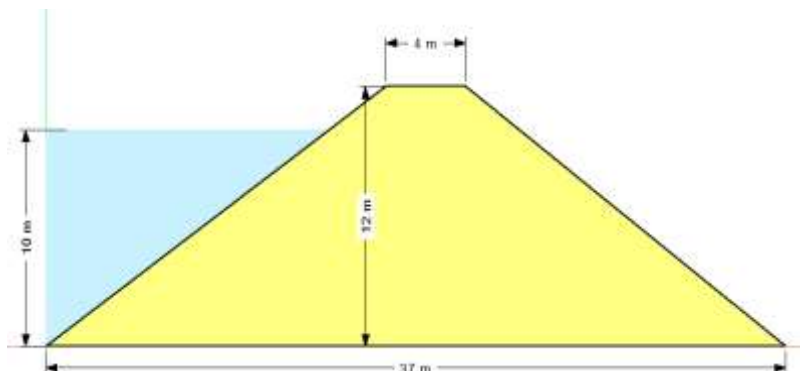
همانطور که مشاهده می‌شود، هر پنج پارامتر (θ_s , θ_r , α , n , m) SWCC مستقیماً در محاسبه $C(\theta)$ و $K(\theta)$ و در نتیجه در $D(\theta)$

دخیل هستند.

روش تحقیق: مدل‌سازی با GeoStudio 2024 – Module CTRAN/W

هندسه مدل و شرایط مرزی

یک سد خاکی همگن با ارتفاع ۱۲ متر و سطح آب مخزن در تراز ۱۰ متری در نظر گرفته شده است (شکل ۱). مقدار ضریب نفوذپذیری پایه مصالح برابر 10^{-5} متر بر ثانیه فرض شده است. این سد در ماژول SEEP/W برای تحلیل در حالت جریان پایدار آب مدل شد. خروجی این تحلیل (میدان پتانسیل و محتوای رطوبتی) به عنوان ورودی به ماژول CTRAN/W برای تحلیل انتقال آلاینده منتقل گردید. شرایط اولیه فاقد آلودگی فرض شده است و آلاینده از زمان صفر با غلظت ثابت در ناحیه بالادست و برابر ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. ذکر این نکته ضروری است که مدل، انتقال یک آلاینده محلول محافظه‌کار را شبیه‌سازی می‌کند. جذب، واکنش شیمیایی و تخریب در این مطالعه لحاظ نشده است. ماده اصلی تشکیل‌دهنده بدنه سد، خاکی با مشخصات مندرج در جدول ۲ می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف منحنی مشخصه رطوبتی خاک (SWCC)، سایر پارامترها در مقادیر ثابت ارائه شده در جدول ۲ نگه داشته می‌شوند.



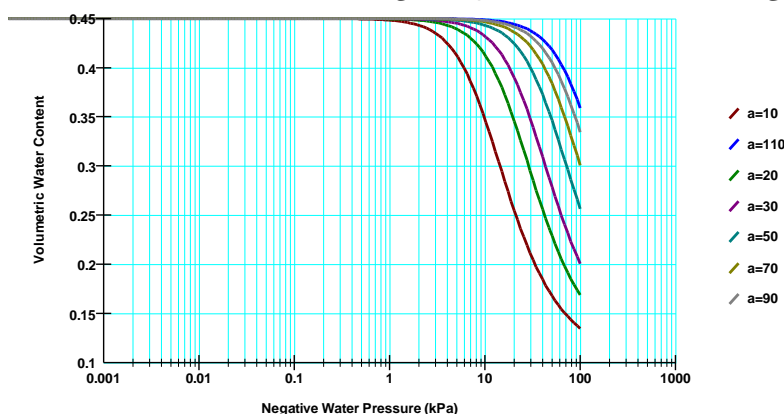
شکل ۱- پروفیل مقطع سد خاکی مورد بررسی

جدول ۲- پارامترهای پایه سد خاکی مورد مطالعه

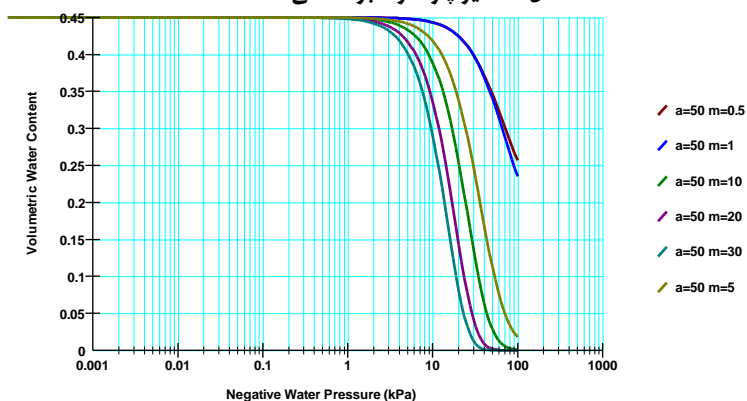
Name	Ks(m/s)	SWCC parameters				
		a	n	m	θ_s	θ_r
Dam material	10^{-5}	۵۰	۲	۰/۵	۰/۴۵	۰/۱

اثر پارامترهای منحنی SWCC

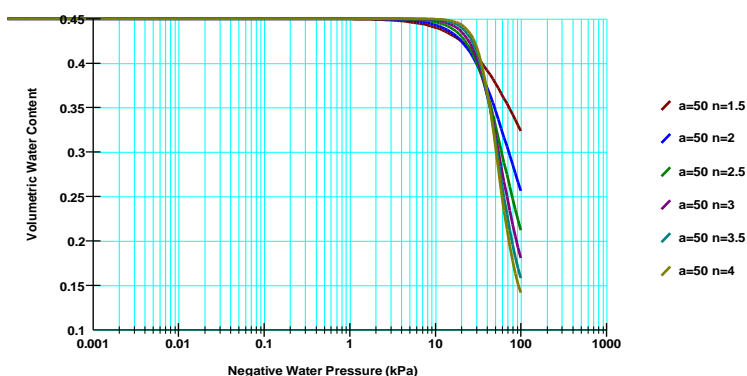
برای درک بهتر از پارامترهای منحنی SWCC، ابتدا بررسی تأثیر تغییر پارامترها بر شکل منحنی انجام شد. پارامتر a با مقادیر ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ تغییر داده می‌شود و تأثیر آن بر SWCC در شکل ۲ نشان داده شده است. برای پارامتر m، مقادیر ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تحلیل شده و تأثیرات مربوطه در شکل ۳ ارائه گردیده است. پارامتر n با مقادیر ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ مورد مطالعه قرار گرفته که در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. مقادیر محتوای رطوبتی اشباع (θ_s) برابر با ۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ برای ارزیابی تأثیر آن بر منحنی استفاده شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر محتوای رطوبتی مانده (θ_r) برابر با ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۲۵ برای ارزیابی تأثیر آن بر منحنی استفاده شده است که در شکل ۶ نشان داده شده است



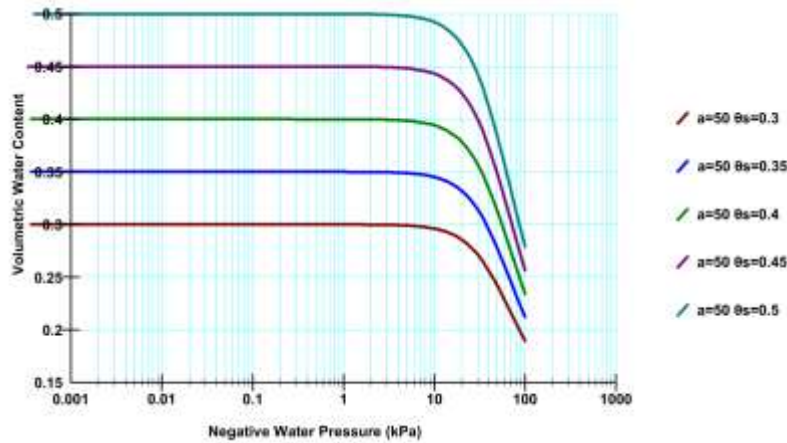
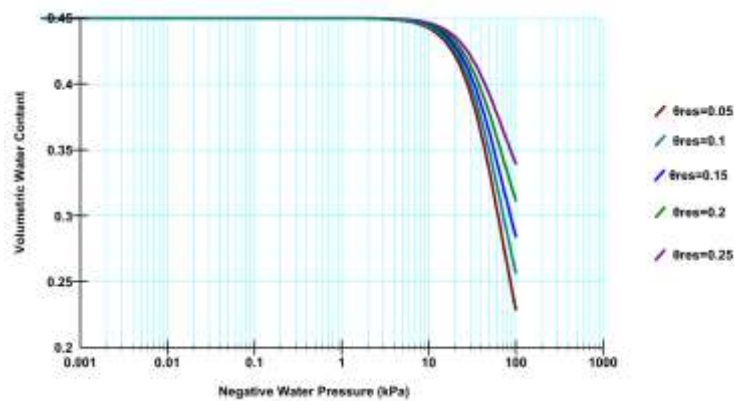
شکل ۲- تأثیر پارامتر a بر منحنی SWCC



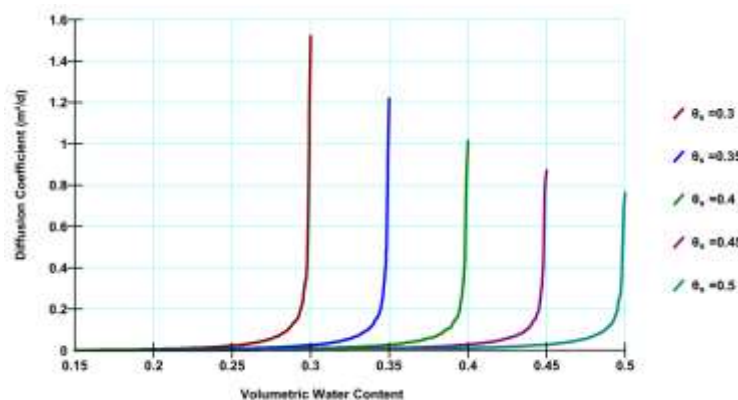
شکل ۳- تأثیر پارامتر m بر منحنی SWCC



شکل ۴- تأثیر پارامتر n بر منحنی SWCC


 شکل ۵- تاثیر پارامتر θ_s بر منحنی SWCC

 شکل ۶- تاثیر پارامتر θ_r بر منحنی SWCC

همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، پارامترهای منحنی SWCC بر تابع ضریب پخشیدگی $D(\theta)$ تاثیر می‌گذارند. برای درک این موضوع، تاثیر θ_s بعنوان نمونه بر تابع ضریب پخشیدگی در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش θ_s (از ۰٫۳ به ۰٫۵)، مقدار ضریب پخشیدگی در تمامی محدوده‌های رطوبتی افزایش می‌یابد. این موضوع اهمیت θ_s را در مدل‌سازی انتقال آلاینده برجسته می‌کند، زیرا $D(\theta)$ مستقیماً در معادله انتقال-پخش وارد می‌شود و افزایش آن می‌تواند سرعت انتشار آلاینده را افزایش دهد.

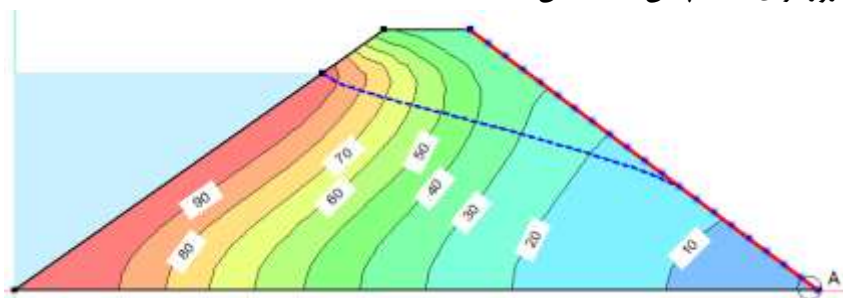

 شکل ۷- تاثیر پارامتر θ_s بر تابع $D(\theta)$

شاخص‌های ارزیابی

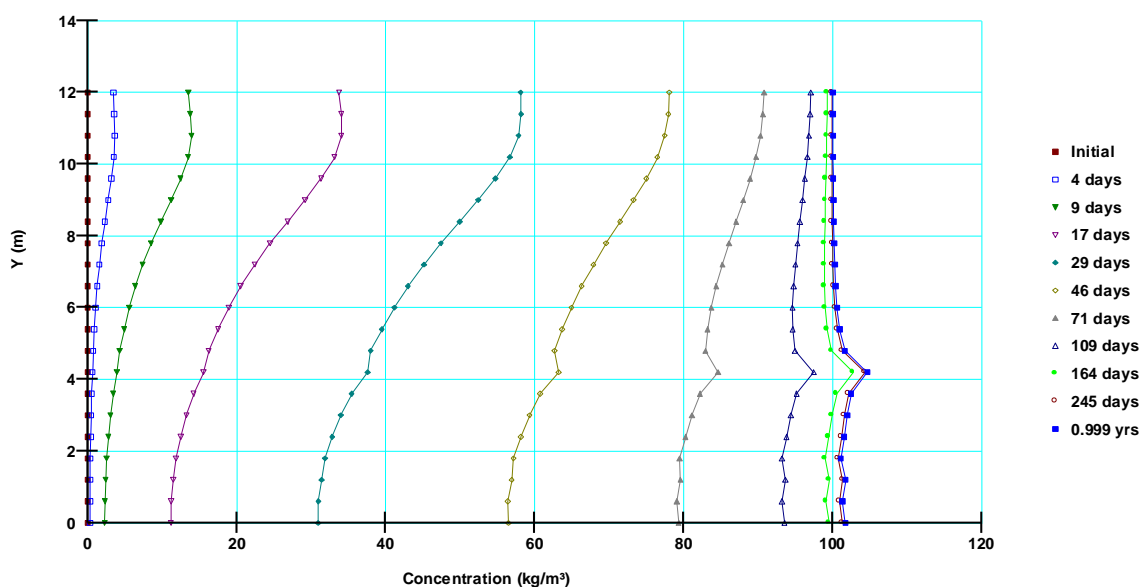
برای درک تاثیر پارامترهای مختلف منحنی SWCC بر نحوه انتقال آلاینده در سد خاکی ۳ ویژگی در سد مورد بررسی قرار گرفته است. اولین مورد تاثیر تغییرات هر پارامتر بر غلظت آلاینده در ارتفاع شیب پایین‌دست در یک روز مشخص (روز ۲۹ ام) می‌باشد. مورد دوم تاثیر تغییرات هر پارامتر بر غلظت آلاینده در نقطه انتهایی سد خاکی در طول ۳۶۵ روز بعد از شروع نشت بررسی شده است. و در نهایت زمان شکست (Breakthrough Time) که زمان رسیدن آلاینده به نقطه نظارتی در پایین‌دست است و معمولاً به عنوان زمان اولین رسیدن غلظت به آستانه مشخص (در این مقاله، ۱۰٪ غلظت منبع) تعریف می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج و بحث

بعد از تحلیل نشت در حالت جریان پایدار با استفاده از ماژول SEEP/W، نتیجه با استفاده از ماژول CTRAN/W مورد تحلیل انتقال آلاینده قرار گرفته است. شکل ۸ نحوه توزیع آلاینده در بدنه سد در روز ۲۹ ام پس از شروع پخش را نشان می‌دهد. شیب پایین دست و نقطه A بعنوان نقاط کلیدی در بررسی نتایج در شکل ۸ مشخص شده است. در شکل ۹ نتایج آنالیز انتقال آلاینده برای حالت مقادیر اصلی پارامترها و در طول ۳۶۵ روز برای شیب پایین دست نشان داده شده است.



شکل ۸- نتایج آنالیز انتقال آلاینده برای حالت مقادیر اصلی پارامترها (روز ۲۹)

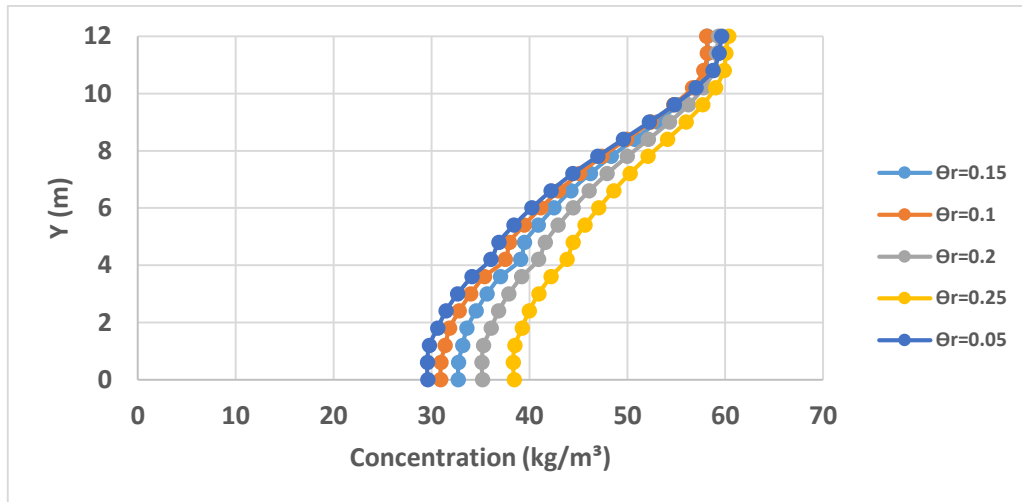


شکل ۹- نتایج آنالیز انتقال آلاینده برای حالت مقادیر اصلی پارامترها و در طول ۳۶۵ روز برای شیب پایین دست

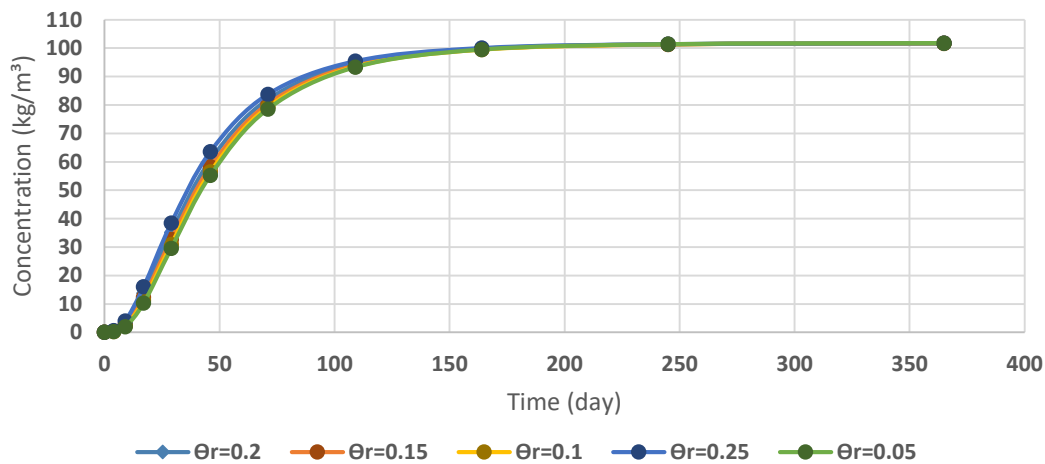
تأثیر پارامترها بر انتقال آلاینده

تأثیر θ_r (رطوبت باقیمانده)

نتایج تغییرات رطوبت باقیمانده بر نحوه انتقال آلاینده در شکل ۱۰ و ۱۱ و جدول ۳ آورده شده است. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش پارامتر θ_r (رطوبت حجمی باقیمانده) باعث تسریع نفوذ عمودی آلاینده در شیب پایین دست می‌شود. در روز ۲۹، با افزایش θ_r از ۰/۰۵ به ۰/۲۵، ارتفاع نفوذ آلاینده از حدود ۴ متر به بیش از ۱۰ متر افزایش یافته است. این پدیده احتمالاً به این دلیل رخ می‌دهد که وجود رطوبت باقیمانده بیشتر در منافذ ریز خاک، حتی در شرایط مکش بالا، پیوستگی فاز مایع و در نتیجه مسیرهای انتقال را بهبود بخشیده و حرکت آلاینده را در بخش غیراشباع تسهیل می‌کند. این یافته حساسیت بالای مدل به این پارامتر را تأیید می‌نماید. نتایج شکل ۱۱ و جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش θ_r از ۰/۰۵ به ۰/۲۵، زمان شکست از ۱۹ روز به ۱۵ روز کاهش می‌یابد. افزایش رطوبت باقیمانده، حجم آب قابل حرکت (و در نتیجه حامل آلاینده) را در شرایط خشک‌تر افزایش می‌دهد و ممکن است مسیرهای جریان را تسهیل کند، در نتیجه انتقال سریع‌تر رخ می‌دهد. شکل‌ها نیز افزایش غلظت در نقاط پایین دست را با افزایش θ_r تأیید می‌کنند.



شکل ۱۰- تاثیر تغییرات رطوبت باقیمانده بر غلظت آلاینده در ارتفاع شیب پایین دست (روز ۲۹ ام)



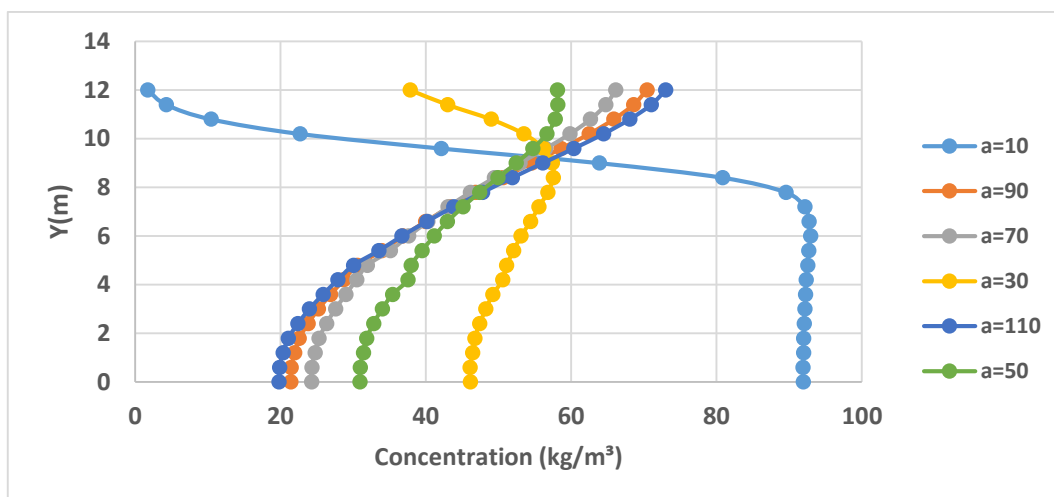
شکل ۱۱- تاثیر تغییرات رطوبت باقیمانده بر غلظت آلاینده در نقطه A

جدول ۳- تاثیر رطوبت باقیمانده بر زمان شکست

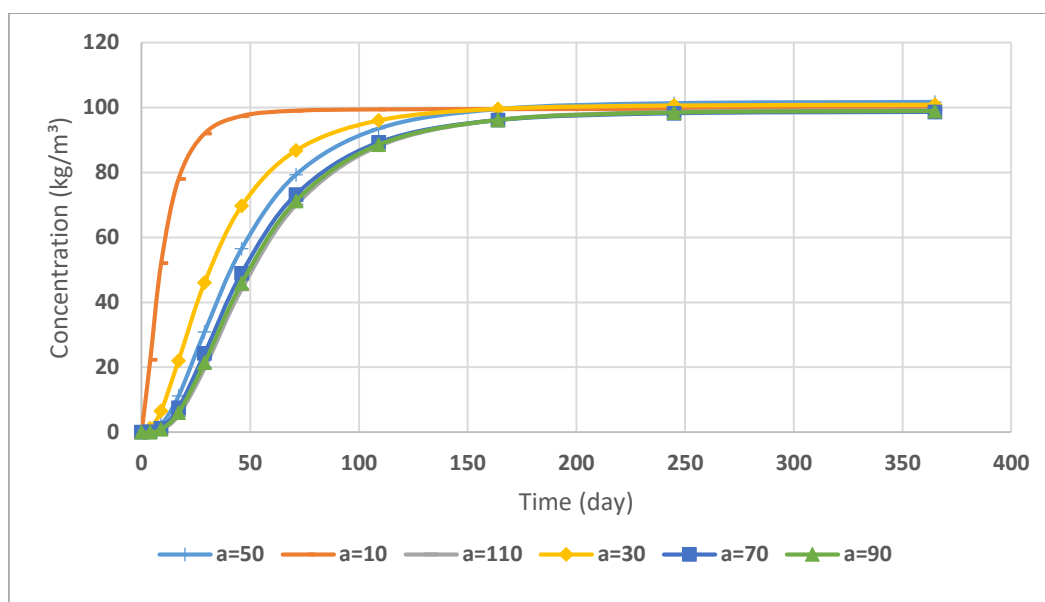
Parameter θ_r	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵
Breakthrough Time(day)	۱۹	۱۸	۱۷/۳	۱۶/۳	۱۵

تأثیر a (پارامتر معکوس مکش ورود هوا)

نتایج تغییرات پارامتر a بر نحوه انتقال آلاینده در شکل ۱۲ و ۱۳ و جدول ۴ آورده شده است. نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهد که افزایش پارامتر α (معکوس مکش ورود هوا) که نشان‌دهنده درشت‌دانه‌تر شدن بافت خاک است، اثر کاهنده قابل توجهی بر عمق نفوذ عمودی آلاینده در شیب پایین دست سد دارد. در روز ۲۹، برای α برابر ۱۰ (خاک ریزبافت) آلاینده تا نزدیک به ۱۴ متر (تقریباً تمام ارتفاع) نفوذ کرده و توزیع وسیعی دارد، در حالی که برای α برابر ۱۱۰ (خاک درشت‌بافت) آلاینده تنها تا حدود ۵ متر پیشروی کرده و غلظت آن در بخش‌های پایینی متمرکز است. این امر حاکی از آن است که خاک‌های درشت‌دانه با محدود کردن نفوذ عمقی، آلودگی متمرکزتری در پای دست ایجاد می‌کنند، در حالی که خاک‌های ریزدانه موجب انتشار گسترده‌تر آلاینده در بدنه سد می‌شوند. نتایج شکل ۱۳ و جدول ۴ نشان می‌دهد که با افزایش α از ۱۰ به ۱۱۰، زمان شکست به طور چشمگیری از ۲ روز به ۲۵ روز افزایش می‌یابد. α بالاتر نشان‌دهنده خاک درشت‌دانه‌تر با مکش ورود هوا کمتر است. در چنین حاکی، جریان آب (و آلاینده) سریع‌تر و بیشتر به صورت جریان ترجیحی در کانال‌های درشت اتفاق می‌افتد، اما در عین حال ناحیه غیراشباع وسیع‌تری ایجاد می‌شود که می‌تواند حرکت آلاینده را در بخش‌های ریزبافت کندتر کند. نتایج نشان می‌دهد اثر کندکنندگی غالب است.



شکل ۱۲- تأثیر تغییرات پارامتر a بر غلظت آلاینده در ارتفاع شیب پایین دست (روز ۲۹ ام)



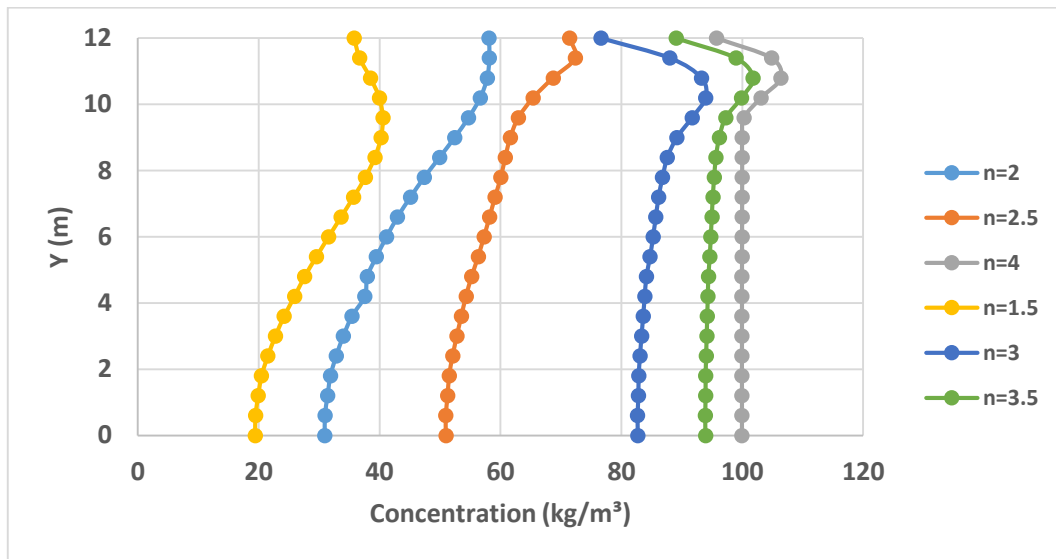
شکل ۱۳- تأثیر تغییرات پارامتر a بر غلظت آلاینده در نقطه A

جدول ۴- تأثیر پارامتر a بر زمان شکست

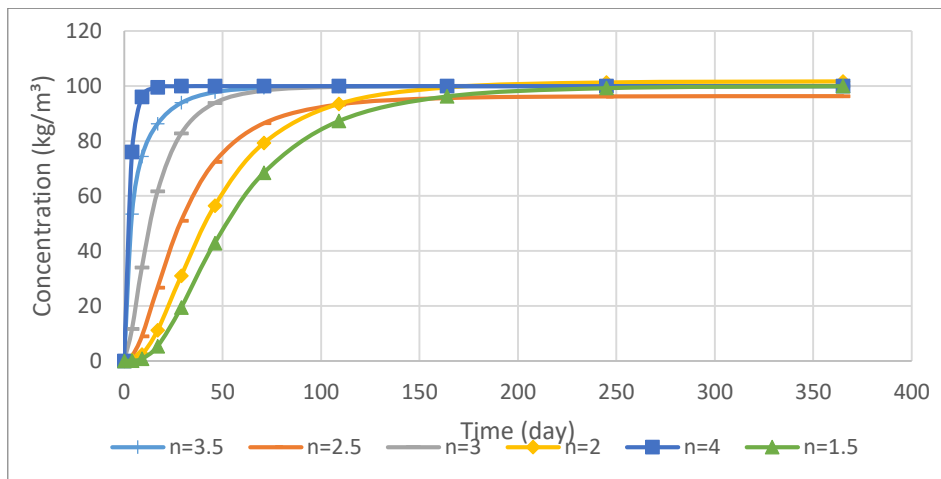
Parameter a	۱۰	۳۰	۵۰	۷۰	۹۰	۱۱۰
Breakthrough Time(day)	۲	۱۲	۱۸	۲۲	۲۴	۲۵

تأثیر n (پارامتر توزیع منافذ)

نتایج تغییرات پارامتر n بر نحوه انتقال آلاینده در شکل ۱۴ و ۱۵ و جدول ۵ آورده شده است. نتایج شکل ۱۴ نشان می‌دهد که پارامتر n (نشان‌دهنده یکنواختی توزیع منافذ) تأثیر تعیین‌کننده و بسیار شدیدی بر سرعت و عمق نفوذ آلاینده در بدنه سد دارد. با افزایش n از ۱/۵ به ۴، عمق نفوذ عمودی آلاینده در روز ۲۹ از حدود ۲ متر به طور چشمگیری به تقریباً ۱۲ متر (کل ارتفاع) افزایش می‌یابد. این بدان معناست که خاک‌های با n بالا (مانند ماسه‌های یکنواخت و درشت‌دانه) به دلیل افزایش سریع هدایت هیدرولیکی پس از نقطه ورود هوا، انتقال آلاینده را به شدت تسریع کرده و باعث انتشار گسترده و سریع آن در تمامی ارتفاع سد می‌شوند. در مقابل، خاک‌های با n پایین آلودگی را در نزدیکی قاعده سد متمرکز نگه می‌دارند. بررسی شکل ۱۵ و جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش n از ۱/۵ به ۴، زمان شکست به شدت از ۲۴ روز به ۰/۳ روز کاهش می‌یابد. n بالا مربوط به خاک با توزیع منافذ یکنواخت (اغلب درشت‌دانه) است. در این خاک‌ها، تخلیه رطوبت در محدوده مکشی باریک اتفاق می‌افتد و هدایت هیدرولیکی پس از نقطه ورود هوا به سرعت افزایش می‌یابد که منجر به انتقال بسیار سریع آلاینده می‌شود. این پارامتر از نظر عددی بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴-تأثیر تغییرات پارامتر n بر غلظت آلاینده در ارتفاع شیب پایین دست (روز ۲۹ ام)



شکل ۱۵-تأثیر تغییرات پارامتر n بر غلظت آلاینده در نقطه A

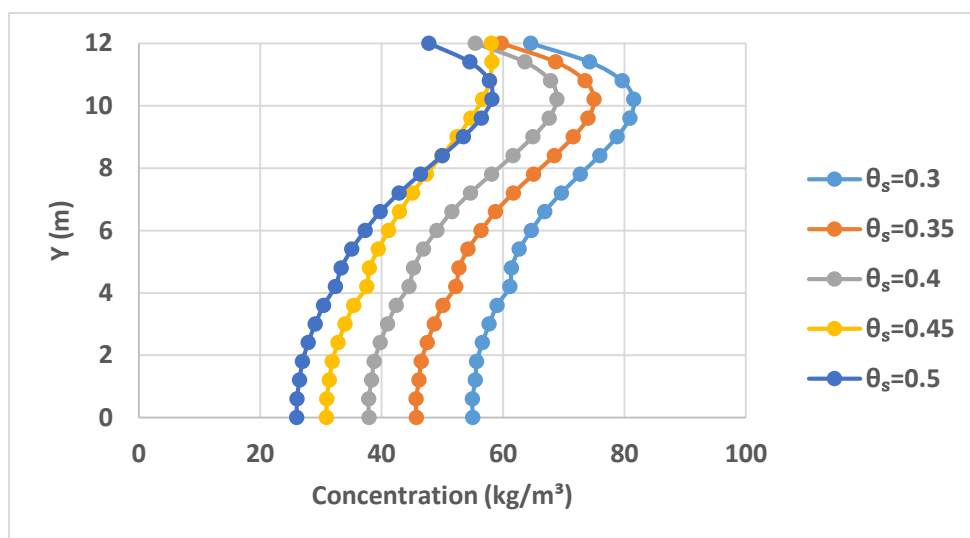
جدول ۵- تأثیر پارامتر n بر زمان شکست

Parameter n	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴
Breakthrough Time(day)	۲۴	۱۸	۱۰	۴	۰/۵	۰/۳

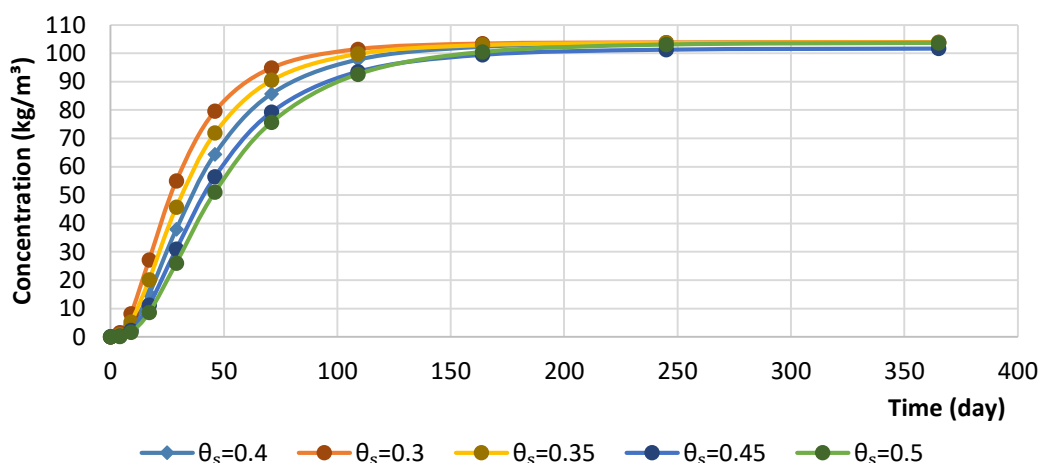
تأثیر θ_s (رطوبت اشباع)

نتایج تغییرات پارامتر θ_s بر نحوه انتقال آلاینده در شکل ۱۵ و ۱۶ و جدول ۶ آورده شده است. نتایج شکل ۱۶ نشان می‌دهد که افزایش پارامتر θ_s (رطوبت حجمی اشباع) نقش کاهنده در عمق نفوذ آلاینده در شیب پایین دست سد دارد. در روز ۲۹، برای خاک با $\theta_s=0.3$ (تخلخل مؤثر پایین)، آلاینده تا ارتفاع حدود ۱۰ متر نفوذ کرده است، در حالی که برای خاک با $\theta_s=0.5$ (تخلخل مؤثر بالا)، عمق نفوذ به حدود ۵ متر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، خاک‌هایی با ظرفیت نگهداری رطوبت اشباع بالاتر، اگرچه ممکن است ظرفیت انتقال بیشتری داشته باشند، اما در این شرایط خاص، با افزایش حجم آب قابل نگهداری و تأثیر بر پارامترهای هیدرولیکی مانند ظرفیت آب ویژه، باعث کندتر شدن پیشروی جبهه آلاینده و محدود شدن دامنه عمودی آلودگی می‌شوند. از طرفی بررسی شکل ۱۶ و جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش θ_s از ۰/۳ به ۰/۵، زمان شکست از ۱۱ روز به ۲۰/۵ روز افزایش می‌یابد. این ممکن است متناقض به نظر برسد، زیرا θ_s بالاتر تخلخل مؤثر بیشتر را نشان می‌دهد. با این حال، θ_s بالاتر همچنین باعث افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و کاهش سرعت پیشروی جبهه رطوبتی می‌شود. همچنین، در رابطه $D(\theta)$ ، θ_s بر ظرفیت آب ویژه $C(\theta)$ تأثیر می‌گذارد که می‌تواند اثر کندکنندگی داشته باشد.

شکل ۷ نیز افزایش $D(\theta)$ را با افزایش θ_s نشان می‌دهد، اما به نظر می‌رسد اثر کلی بر زمان انتقال کندکننده باشد.



شکل ۱۶- تأثیر تغییرات پارامتر θ_s بر غلظت آلاینده در ارتفاع شیب پایین دست (روز ۲۹ ام)



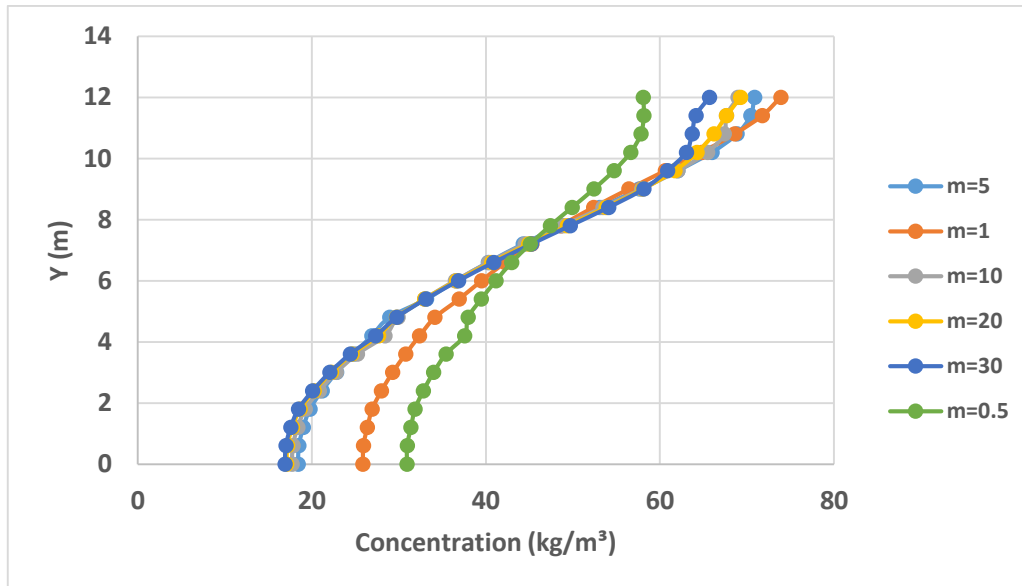
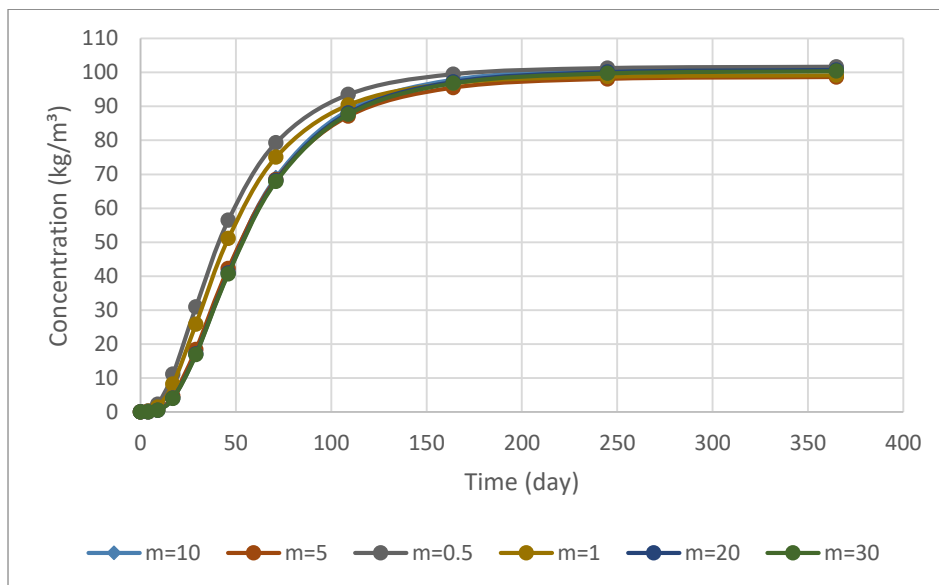
شکل ۱۷- تأثیر تغییرات پارامتر θ_s بر غلظت آلاینده در نقطه A

جدول ۶- تأثیر پارامتر θ_s بر زمان شکست

Parameter θ_s	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳
Breakthrough Time(day)	۲۰/۵	۱۸	۱۶	۱۳/۵	۱۱

تأثیر m (پارامتر شکل)

نتایج تغییرات پارامتر m بر نحوه انتقال آلاینده در شکل ۱۸ و ۱۹ و جدول ۷ آورده شده است. نتایج شکل ۱۸ نشان می‌دهد که افزایش پارامتر m (پارامتر شکل منحنی SWCC) تأثیر کاهنده ملایم تا متوسط بر عمق نفوذ عمودی آلاینده دارد. در روز ۲۹، با افزایش m از ۰/۵ به ۰/۳، ارتفاع نفوذ آلاینده از حدود ۱۲ متر به حدود ۸ متر کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که پارامتر m با تغییر شکل منحنی SWCC و تأثیر بر رابطه بین هدایت هیدرولیکی و رطوبت، سبب کند شدن نسبی پیشروی جبهه آلودگی می‌شود، اگرچه این اثر در مقایسه با پارامترهای n و θ_r کمتر چشمگیر است. بررسی شکل ۱۹ و جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش m از ۰/۵ به ۰/۳، زمان شکست از ۱۸ روز به ۲۷ روز افزایش می‌یابد. پارامتر m بر شکل منحنی و رابطه بین هدایت هیدرولیکی و رطوبت تأثیر می‌گذارد. افزایش m می‌تواند باعث شود هدایت هیدرولیکی در رطوبت‌های پایین‌تر، کمتر باشد که حرکت آلاینده را کند می‌کند.


 شکل ۱۸- تاثیر تغییرات پارامتر m بر غلظت آلاینده در ارتفاع شیب پایین دست (روز ۲۹ ام)

 شکل ۱۹- تاثیر تغییرات پارامتر m بر غلظت آلاینده در نقطه A

 جدول ۷- تاثیر پارامتر m بر زمان شکست

Parameter m	۰/۵	۱	۵	۱۰	۲۰	۳۰
Breakthrough Time(day)	۱۸	۲۱	۲۵	۲۶	۲۷	۲۷

تحلیل رگرسیونی و پارامترهای حساس

جهت بررسی میان همبستگی خطی زمان شکست با تغییرات هر یک از پارامترهای منحنی SWCC، آنالیز رگرسیون انجام شد که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. آنالیز حساسیت مبتنی بر نتایج CTRAN/W نشان داد θ_r قوی‌ترین پارامتر تأثیرگذار (با رابطه معکوس) بر زمان شکست است. مطابق با جدول ۳، با افزایش θ_r ، زمان شکست کاهش می‌یابد. این نشان‌دهنده یک همبستگی منفی قوی بین θ_r و زمان شکست است (یعنی با افزایش θ_r ، زمان کاهش می‌یابد). از سوی دیگر پارامتر m پایین‌ترین ضریب همبستگی را در بین پارامترها دارد. مطابق جدول ۷، با افزایش m ، زمان شکست افزایش می‌یابد (همبستگی مثبت) m . در مقایسه با دیگر پارامترها حساسیت کمتری دارد، اما تأثیر آن همچنان معنادار است. این تحلیل اصلاح‌شده نشان می‌دهد که رطوبت باقیمانده (θ_r)، که اغلب در مدل‌سازی کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، در این مطالعه به عنوان حساس‌ترین پارامتر شناسایی شده است. این یافته‌ای مهم برای دقت در اندازه‌گیری یا برآورد

این پارامتر در مطالعات مشابه است. صحت θ_s و n نیز همچنان از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردارند.

جدول ۸- ضرایب همبستگی پیرسون بین زمان شکست و پارامترها

parameter	θ_s	θ_r	m	n	a
R^2	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۶۱	۰/۹۴	۰/۸۸

بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت-مکش خاک (SWCC) تأثیر معناداری بر انتقال آلاینده در سدهای خاکی همگن دارند. مطابق با یافته‌های پژوهش‌های پیشین نظیر Goh et al (۲۰۱۴) و Singh et al (۲۰۱۸)، پارامترهای θ_r و n به عنوان حساسترین عوامل در تسریع انتقال آلاینده شناسایی شدند. افزایش θ_r با کاهش زمان شکست و افزایش عمق نفوذ آلاینده همراه بود که این پدیده با توجه به بهبود پیوستگی فاز مایع در منافذ ریز خاک، با نتایج Fredlund & Rahardjo (۱۹۹۳) همسو است. همچنین، تأثیر چشمگیر n بر کاهش زمان شکست، تأییدکننده مطالعات Zhang & Chen (۲۰۰۵) در خصوص نقش خاک‌های با توزیع منافذ یکنواخت در تسهیل انتقال سریع آلاینده است. از سوی دیگر، افزایش α (معکوس مکش ورود هوا) باعث کاهش سرعت انتقال شد که با یافته‌های Leong & Rahardjo (۱۹۹۷) در مورد رفتار خاک‌های درشت‌دانه و تأثیر آن بر ایجاد جریان‌های ترجیحی مطابقت دارد. نتایج مربوط به θ_s نشان داد که افزایش رطوبت اشباع اگرچه ممکن است با افزایش تخلخل همراه باشد، اما به دلیل تأثیر بر ظرفیت آب ویژه و کاهش سرعت پیشروی جبهه رطوبتی، نقش کاهنده در انتقال آلاینده ایفا می‌کند؛ نکته‌ای که در برخی پژوهش‌های پیشین کمتر مورد تأکید قرار گرفته بود. پارامتر m نیز کمترین حساسیت را نشان داد که با نتایج Simunek & van Genuchten (۲۰۰۸) همخوانی دارد.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود تلاش برای ارائه یک تحلیل جامع از اثر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت-مکش خاک (SWCC) بر انتقال آلاینده در سدهای خاکی همگن، پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی است که در تفسیر و تعمیم نتایج باید مدنظر قرار گیرند:

۱- فرض آلاینده محافظه‌کار

در این مطالعه، آلاینده به صورت یک ماده محلول محافظه‌کار (بدون جذب، واکنش شیمیایی، تجزیه زیستی یا رسوب‌گذاری) مدل‌سازی شده است. در شرایط واقعی، بسیاری از آلاینده‌ها دچار فرآیندهای جذب-واکنش، تخریب زیستی و واکنش‌های ژئوشیمیایی می‌شوند که می‌تواند سرعت و الگوی انتقال را به طور معناداری تغییر دهد. بنابراین، نتایج ارائه‌شده بیانگر رفتار پایه فیزیکی انتقال بوده و برای آلاینده‌های واکنش‌پذیر نیازمند توسعه مدل است.

۲- هندسه و مقیاس ثابت سد

تحلیل‌ها برای یک سد خاکی همگن با ارتفاع ۱۲ متر انجام شده است. هدف پژوهش، بررسی روند حساسیت پارامتری بوده است؛ با این حال، تغییر مقیاس هندسی، ارتفاع سد، شیب‌ها یا شرایط مرزی می‌تواند مقادیر مطلق زمان شکست را تغییر دهد. هرچند انتظار می‌رود روند نسبی حساسیت پارامترها حفظ شود.

۳- فرض همگنی مصالح

بدنه سد به صورت کاملاً همگن مدل‌سازی شده است. در عمل، سدهای خاکی معمولاً دارای هسته رسی، پوسته‌های درشت‌دانه، فیلترها و لایه‌های ناهمگن هستند. ناهمگنی و نایزوتروپی می‌تواند مسیرهای جریان ترجیحی ایجاد کرده و زمان رسیدن آلاینده را تغییر دهد.

۴- تحلیل جریان در حالت پایدار

میدان جریان بر اساس شرایط پایدار محاسبه شده است. در شرایط واقعی، نوسانات تراز مخزن، بارش، خشکسالی و تخلیه سریع می‌توانند میدان مکش و رطوبت را تغییر داده و رفتار انتقال را به صورت گذرا تحت تأثیر قرار دهند.

۵- عدم صحت‌سنجی آزمایشگاهی یا میدانی مستقیم

نتایج این پژوهش بر پایه مدل‌سازی عددی است و اگرچه روابط حاکم بر جریان و انتقال مبتنی بر معادلات کلاسیک و پذیرفته‌شده هستند، صحت‌سنجی مستقیم با داده‌های آزمایشگاهی یا پایش میدانی در این مطالعه انجام نشده است. اعتبارسنجی تجربی می‌تواند اطمینان



بیشتری نسبت به قابلیت پیش‌بینی مدل فراهم آورد.

۶- عدم بررسی پی سد

تمرکز پژوهش بر بدنه سد بوده است، زیرا ناحیه غیراشباع در بدنه گسترده‌تر است و نقش SWCC پرننگ‌تر می‌شود. با این حال، در برخی پروژه‌ها انتقال آلاینده از طریق پی سد می‌تواند اهمیت بیشتری داشته باشد و بررسی آن نیازمند تحلیل جداگانه است.

نتیجه گیری

این مطالعه به‌طور جامع نشان داد که پارامترهای منحنی مشخصه رطوبت - مکش خاک (SWCC) نقش تعیین‌کننده و حساسی در دینامیک انتقال آلاینده در سدهای خاکی همگن دارند. تحلیل حساسیت سیستماتیک با نرم‌افزار CTRAN/W نتایج زیر را به‌همراه داشت:

۱. تأثیر پارامترهای SWCC بر انتقال آلاینده:

رطوبت باقیمانده (θ_r) افزایش آن باعث کاهش زمان رسیدن آلاینده (زمان شکست) و افزایش عمق نفوذ عمودی آلاینده در شیب پایین‌دست می‌شود.

پارامتر معکوس مکش ورود هوا (α): افزایش α (خاک درشت‌دانه‌تر) به افزایش زمان شکست و محدود شدن عمق نفوذ آلاینده منجر می‌شود.

پارامتر توزیع منافذ (n): افزایش n (خاک یکنواخت‌تر/درشت‌دانه) باعث کاهش شدید زمان شکست و افزایش قابل توجه عمق نفوذ آلاینده می‌شود.

رطوبت اشباع (θ_s): افزایش θ_s زمان شکست را افزایش می‌دهد و نقش کاهنده در سرعت انتقال آلاینده دارد.

پارامتر شکل (m): افزایش m تأثیر متوسطی در افزایش زمان شکست دارد، اما حساسیت آن نسبت به سایر پارامترها کمتر است.

۲. رتبه‌بندی حساسیت پارامترها بر اساس تأثیر بر زمان شکست:

تحلیل حساسیت انجام‌شده بیانگر آن است که رفتار انتقال در ناحیه غیراشباع به شدت غیرخطی بوده و تغییرات کوچک در برخی پارامترها می‌تواند تغییرات چشمگیری در زمان شکست ایجاد کند. پارامترهای منحنی SWCC بر زمان رسیدن آلاینده به پایین‌دست (زمان شکست) تأثیر متفاوتی دارند. بر اساس ضرایب همبستگی پیرسون، حساسیت پارامترها به ترتیب $m > \alpha > n > \theta_s > \theta_r$ رتبه‌بندی شدند. در این میان، رطوبت باقیمانده (θ_r) حساس‌ترین پارامتر و پارامتر شکل (m) کم‌تأثیرترین عامل شناخته شد.

۳. توصیه‌های کاربردی

- اندازه‌گیری دقیق θ_r در آزمایشگاه ضروری است. این پارامتر بیشترین تأثیر را بر زمان رسیدن آلاینده نشان داد و استفاده از مقادیر تقریبی می‌تواند منجر به خطای قابل توجه در پیش‌بینی شود.

- در خاک‌های با n بالا (توزیع منافذ یکنواخت‌تر)، سیستم پایش پایین‌دست باید با فواصل زمانی کوتاه‌تر طراحی شود. زیرا در این شرایط انتقال آلاینده می‌تواند بسیار سریع‌تر از برآوردهای محافظه‌کارانه رخ دهد.

- افزایش θ_s در طراحی هسته رسی می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر کنترل ریسک در نظر گرفته شود. ظرفیت نگهداری رطوبت بالاتر می‌تواند موجب افزایش زمان شکست و کاهش سرعت پیشروی جبهه آلودگی گردد.

- مشابه ضریب اطمینان پایداری شیب، می‌توان ضریب اطمینان مبتنی بر زمان رسیدن آلاینده تعریف نمود تا طراحی سامانه‌های پایش و اقدامات کنترلی بر اساس سناریوی بدبینانه انجام شود.

- تکیه صرف بر هدایت هیدرولیکی اشباع برای ارزیابی انتقال آلاینده می‌تواند گمراه‌کننده باشد؛ پارامترهای SWCC باید به‌صورت نظام‌مند در مطالعات طراحی وارد شوند.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل انتقال آلاینده در سدهای خاکی باید از یک رویکرد صرفاً هیدرولیکی اشباع فراتر رفته و رفتار غیرخطی غیراشباع به‌طور کامل در فرآیند طراحی و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی لحاظ شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این تحقیق هیچ کمک مالی خاصی از سازمان های تأمین مالی در بخش های عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرد.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسنده تأیید می کند که در هیچ یک از مراحل انجام این پژوهش از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بیانیه دسترسی به داده ها

داده هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

REFERENCES

- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier Publishing Company.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Goh, S. G., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2014). Modification of axis-translation and vapor equilibrium techniques for SWCC measurement. *Geotechnical Testing Journal*, 37(1), 1-15.
- Leong, E. C., & Rahardjo, H. (1997). A review of soil-water characteristic curve equations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(12), 1106-1117.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Pignatello, J. J., & Xing, B. (1996). Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. *Environmental Science & Technology*, 30(1), 1-11.
- Simunek, J., & van Genuchten, M. Th. (2008). Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 782-797.
- Singh, R. M., & Datta, M. (2018). Contaminant transport modeling in earthen dams: A review. In *Geoenvironmental Practices and Sustainability* (pp. 1-15). Springer.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Zhang, L. M., & Chen, Q. (2005). Seepage failure of earth dams. In *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation* (pp. 27-48). Springer.
- Chen, Y., & Smith, P. (2022). Simulating pesticide leaching in agricultural soils using HYDRUS-1D: A case study of atrazine transport. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107991.
- Kumar, S., Gupta, A., & Singh, R. (2021). Experimental investigation of petroleum hydrocarbon transport in sandy soils under varying moisture conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 103889.
- Li, X., Li, Z., & Zhang, Y. (2022). Modeling heavy metal transport in saturated soils: A review of recent advances. *Environmental Modelling & Software*, 105456.
- Wang, J., Liu, H., & Chen, L. (2023). Transport of nanoplastics in agricultural soils: Effects of soil properties and natural organic matter. *Science of the Total Environment*, 163845.
- Zhang, Q., & Yang, W. (2023). Emerging technologies for controlling contaminant transport in soils: From nanomaterials to bioremediation. *Environmental Research*, 115672.