



Investigating the Simultaneous Effects of Salinity, Moisture, and Soil Texture on Heat Transfer Dynamics in an Unsaturated Porous Medium

Mohadeseh Abdi¹ | Masoomeh Delbari² | Fariborz Abbasi³ | Peyman Afrasiab⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran, Email:

mohade3_abdi@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran,

Email: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

3. Department of Irrigation and Drainage, Agriculture Engineering Research Institute (AERI), Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: F.abbasi@areeo.ac.ir

4. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran, Email:

p_afrasiab@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 30, 2025

Revised: Oct. 2, 2025

Accepted: Oct. 11, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

**Multiphase soil environment,
Particle size,
Moisture retention curve,
Matric suction,
Soil thermal conductivity.**

ABSTRACT

Heat transfer in porous media is a complex nonlinear process due to interactions among solid, liquid, and gas phases. In soils, this process is characterized by thermal conductivity (λ), a critical parameter with significant applications in civil and environmental engineering, soil science, agriculture, and water resources. Previous research has established the influence of factors such as soil texture, moisture content, density, and salinity on λ . Given the increasing water scarcity and soil salinity in arid regions, understanding the behavior of λ 's under combined moisture and salinity stress is essential. This study investigated the effects of moisture content, salinity, and matric suction on the thermal conductivity of two soil textures (loam and sandy-loam) from the drought-affected Sistan Plain. Soil water retention curves were modeled using the van Genuchten equation. Thermal conductivity was measured across a suction range (1 to 1500 kPa) and various moisture at levels during both wetting and drying cycles. The results demonstrated that soil thermal conductivity behavior in response to moisture and suction changes cannot be described by a simple function. Instead, the interaction between salinity, particle geometry, moisture level, and the soil moisture path (hysteresis) is determinant factors in λ 's performance at any given state. These findings are crucial for accurately modeling soil heat transfer and for designing efficient water resource management, irrigation, and drainage systems in arid and saline environments.

Cite this article: Abdi, M., Delbari, M., Abbasi, F., Afrasiab, P., (2026) Investigating the Simultaneous Effects of Salinity, Moisture, and Soil Texture on Heat Transfer Dynamics in an Unsaturated Porous Medium , *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11),3181-3195. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403150.670013>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403150.670013>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Heat transfer in unsaturated porous media is a complex, nonlinear process critical to numerous engineering and environmental applications, from geothermal systems to agricultural water management. Soil thermal conductivity (λ) is the key property governing this process. While the influence of factors like soil texture, moisture content, and density on λ is well-documented, the role of salinity—particularly under the combined stress of drought and salinization prevalent in arid regions like Iran—remains less understood and often contradictory in the literature. This study aims to comprehensively investigate the simultaneous effects of matric suction, moisture content, and salinity levels on the thermal conductivity of two dominant soil textures (loam and sandy-loam) from the drought-affected Sistan Plain. The research seeks to address a critical knowledge gap by analyzing how the interaction of these factors, alongside wetting and drying paths, influences heat dynamics, providing essential data for improving thermal models in saline, arid environments.

Materials and Methods

A comprehensive experimental study was conducted on soils from the Sistan Plain. Undisturbed and disturbed soil samples were collected from two dominant soil textures: loam and sandy-loam. Samples were prepared with three levels of salinity (approximately 2, 4, and 6 dS/m). Standard methods were employed to characterize the physical and chemical properties of the soils, including particle size distribution (hydrometer method), bulk density, organic matter content (Walkley-Black method), pH, and electrical conductivity (EC). The soil water retention curves (SWRCs) for both drying and wetting paths were determined using a combination of a sandbox apparatus (for low suction ranges from 0 to 100 cm) and pressure plate extractors (for higher suction ranges up to 15,000 cm). The van Genuchten model was fitted to the SWRC data. Thermal conductivity (λ) was measured directly using a KD2 Pro thermal properties analyzer (Decagon Devices, USA). Measurements were taken at various matric suction levels (equivalent to a water pressure range of 1 to 70 cm) during both the drying and wetting processes, allowing for the analysis of hysteresis effects. The experimental design facilitated a detailed examination of the interplay between soil texture, salinity, moisture path, and suction on thermal conductivity.

Results

The results revealed a complex, non-linear relationship between thermal conductivity and the studied parameters. Key findings include:

Interactive Effects: The behavior of λ could not be described by a simple function of moisture or suction alone. Instead, it was determined by the complex interactions between salinity, particle geometry, moisture level, and the moisture path (hysteresis).

Effect of Salinity: The influence of salinity was highly dependent on soil texture. In loam soil, increased salinity generally led to a decrease in λ , particularly during the wetting path. In contrast, sandy-loam soil showed a more variable response; medium salinity sometimes increased λ (potentially due to salt crystallization improving particle contact), while higher salinity levels could reduce it.

Hysteresis Effect: A clear hysteresis was observed in the λ -moisture-suction relationships. The values and patterns of λ differed significantly between the drying and wetting paths for both soil types, emphasizing that the hydraulic history of the soil is a crucial factor.

Texture Dependence: Sandy-loam soil exhibited greater stability and less pronounced changes in λ with varying salinity compared to the more sensitive loam soil. This is attributed to the coarser pore geometry and lower specific surface area of the sandy-loam, making its thermal properties less susceptible to changes induced by salt concentration.

Conclusion

This study demonstrates that soil thermal conductivity in saline, unsaturated soils is governed by a dynamic interplay between salinity, moisture content, matric suction, and soil texture, all mediated by the moisture path. The findings move beyond simplistic models and highlight that predictive models for heat transfer in arid, saline environments must incorporate these interactions to be accurate. The results have direct practical implications for improving the design and management of agricultural systems (e.g., irrigation and drainage), geothermal systems, and environmental modeling in regions facing water scarcity and soil salinization. Future work should employ advanced multi-scale modeling approaches to further elucidate the mechanisms behind these complex interactions.

Author contribution:

M.A. (PhD Student) conducted the investigation, performed the experiments, curated the data, and wrote

the original draft. M.D. (Supervisor) conceived the research idea, acquired funding, supervised the project, and reviewed & edited the manuscript. F.A. and P.A. (Advisors) contributed to the methodology, validation, and reviewing & editing of the manuscript

Data availability statement:

Data are available on request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

بررسی تأثیر همزمان شوری، رطوبت و بافت خاک بر پویایی انتقال حرارت در محیط متخلخل غیراشباع

محدثه عبدی^۱، معصومه دلبری^۲✉، فریبرز عباسی^۳، پیمان افراسیاب^۴۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران، رایانامه: mohade3_abdi@yahoo.com۲. نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران، رایانامه: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

۳. بخش آبیاری و زهکشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، رایانامه:

f.abbasi@areeo.ac.ir۴. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران، رایانامه: p_afraasiab@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

انتقال حرارت در محیط متخلخل به دلیل برهم کنش های خاص میان فازهای جامد، مایع و گاز فرآیندی غیرخطی و دشوار برای توصیف است. برای بیان این پدیده در خاک از ویژگی هدایت حرارتی (استفاده می شود. هدایت حرارتی به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در شاخه های مختلف مهندسی مانند مهندسی عمران، محیط زیست، خاک شناسی، کشاورزی و مهندسی آب اهمیت کاربردی ویژه دارد. اثر عوامل مختلفی همچون بافت خاک، میزان رطوبت، چگالی و سطح شوری بر این ویژگی در مطالعات پیشین به وضوح نشان داده شده است. با توجه به تنش های کم آبی و افزایش شوری خاک در مناطق خشک، بررسی رفتار هدایت حرارتی در این شرایط تحت تاثیر تغییرات رطوبت و شوری ضروری به نظر می رسد. در این پژوهش، اثر رطوبت، شوری و مکش ماتریک بر هدایت حرارتی دو خاک لومی و شنی-لومی در دشت سیستان بررسی شد. نمونه های خاک از نواحی دچار خشکسالی و تنش کم آبی برداشت گردید. پس از انجام اندازه گیری های اولیه، هدایت حرارتی در سطوح مختلف مکش (۱ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) و رطوبت، طی دو فرآیند تر شدن و خشک شدن اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که رفتار هدایت حرارتی خاک نسبت به تغییرات رطوبت و مکش قابل توصیف با یک تابع ساده نیست، بلکه برهم کنش های شوری، هندسه ذرات، سطح رطوبت و مسیر رطوبتی خاک تعیین کننده عملکرد هدایت حرارتی در هر مرحله است. یافته های این پژوهش می تواند در مدل سازی انتقال حرارت خاک، مدیریت منابع آب و طراحی سامانه های آبیاری و زهکشی در مناطق خشک و شور مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۹

تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۴

واژه های کلیدی:

محیط خاکی چندفازی،

اندازه ذرات،

منحنی رطوبتی،

مکش ماتریک،

هدایت حرارتی خاک.

استناد: عبدی؛ محدثه، دلبری؛ معصومه، عباسی؛ فریبرز، افراسیاب؛ پیمان، (۱۴۰۴) بررسی تأثیر همزمان شوری، رطوبت و بافت خاک بر پویایی انتقال حرارت در محیط متخلخل غیراشباع، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۱۱)، ۳۱۹۵-۳۱۸۱ <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403150.670013>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403150.670013>

مقدمه

فرآیندهای انتقال حرارت و جرم در محیط‌های متخلخل مانند خاک، به‌طور قابل توجهی به هدایت حرارتی وابسته‌اند (Wang and Vanapalli, 2025). هدایت حرارتی موثر خاک (λ_{eff}) بیانگر توانایی خاک در انتقال گرما در راستای گرادیان دما است و یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی-حرارتی به‌شمار می‌رود. این ویژگی در پیش‌بینی و تحلیل فرآیندهای مرتبط با انتقال حرارت و تغییرات دمای خاک در حوزه‌هایی همچون علوم زمین، فیزیک خاک، مهندسی عمران، محیط زیست، کشاورزی و مدل‌سازی عددی کاربرد گسترده‌ای دارد (Liu et al., 2022; Al-Shammary et al., 2022; Kojima et al., 2021; Yu et al., 2021; Yan et al., 2021; Wu et al., 2015; He et al., 2018). کاربردهای هدایت حرارتی از سامانه‌های حرارتی، سرامیک‌ها، دفن پسماندهای هسته‌ای و جداسازی دی‌اکسید کربن (CO_2) تا فرآیندهای زیستی مانند جذب آب توسط ریشه و رشد گیاه گسترش می‌یابد (Song et al., 2024; Liu et al., 2024; Xue et al., 2023; Quintard, 2016a; Quintard, 2016b; Dec et al., 2009). مهم‌ترین ویژگی حرارتی خاک محسوب می‌شود که سرعت انتقال انرژی گرمایی در خاک را کنترل می‌کند (Malek et al., 2021). مقدار آن تحت تأثیر دو دسته عوامل شامل ویژگی‌های ذاتی خاک مانند توزیع اندازه ذرات و کانی‌شناسی (Campbell et al., 1994) و ویژگی‌های پویا شامل رطوبت (θ)، دما، تخلخل (ϕ) و ساختار خاک (Abu-Hamdeh and Reeder, 2000) قرار دارد. بنابراین، بررسی هدایت حرارتی تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و با در نظر گرفتن عواملی مانند رطوبت، درجه اشباع، چگالی ظاهری، تخلخل، بافت، دما، ماده آلی و شوری خاک، اهمیت زیادی دارد (Wang et al., 2019; An et al., 2026).

در میان این عوامل، رطوبت نقش حیاتی و تعیین‌کننده‌ای دارد (Fu et al., 2025; He et al., 2020a; Yan et al., 2019; He et al., 2017). به همین دلیل، مدل‌های متعددی از نوع $\lambda(\theta)$ برای تخمین هدایت حرارتی خاک‌های غیراشباع توسعه یافته‌اند (Fu et al., 2023). از آنجا که هدایت حرارتی خاک عمدتاً به ذرات جامد و توزیع اندازه منافذ وابسته است و این منافذ در سطوح مختلف رطوبت به صورت متغیر با آب و هوا پر می‌شوند، انتظار می‌رود رابطه هدایت حرارتی و رطوبت رفتاری غیرخطی داشته باشد. از سوی دیگر، توزیع ذرات و منافذ خاک غالباً از یک تابع سیگموئیدی پیروی می‌کند (Sepaskhah and Mazaheri-Tehrani, 2025; Xiong et al., 2023; Sepaskhah and Boersma, 1979; de Vries, 1963). بنابراین، می‌توان تابع هدایت حرارتی خاک (λ) را به عنوان تابعی از رطوبت خاک (θ) توسط یک مدل سیگموئیدی توصیف کرد (Sepaskhah and Mazaheri-Tehrani, 2025; Xiong et al., 2023; Sepaskhah and Boersma, 1979; de Vries, 1963).

برای مدل‌سازی دقیق‌تر پدیده‌های فیزیکی و مکانیکی در خاک‌های غیراشباع، شناسایی رابطه بین مکش ماتریک و رطوبت آب در خاک ضروری است. منحنی مشخصه رطوبتی خاک^۲ (SWRC) ابزاری پذیرفته‌شده در تحلیل رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌های غیراشباع محسوب می‌شود و در بررسی نفوذپذیری، انتقال املاح، تغییر حجم، هدایت حرارتی و مقاومت برشی کاربرد دارد (Capparelli and Spolverino, 2020; Sreedeeep and Singh, 2011; Fredlund and Xing, 1994). از تجهیزات مختلف مانند دستگاه صفحات فشاری و دستگاه جعبه شن (Sandbox) متناسب با دامنه مکش استفاده می‌گردد. در تحقیقات انجام شده، برای مکش‌های کمتر از ۰/۱ بار (یا ۱۰۰ سانتی‌متر آب) شامل مقادیری مانند ۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر استفاده از دستگاه جعبه شن و در مکش‌های بالاتر از ۱۰۰ سانتی‌متر مانند ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر استفاده از دستگاه صفحات فشاری (Lin et al., ۲۰۲۴; Pan et al., ۲۰۱۷) توصیه شده است. همچنین، برای مکش‌های بالا از دستگاه صفحات فشاری در ترسیم منحنی رطوبتی و تعیین دو نقطه کلیدی رطوبتی خاک، یعنی ظرفیت زراعی (F.C.) و نقطه پژمردگی دائم (P.W.P.) کاربرد دارد. رطوبت و بافت از عوامل مؤثر بر خواص حرارتی خاک هستند و به‌طور ویژه، میزان رطوبت و تغییرات آن نقش مهمی در نوسانات دمایی خاک دارد (An et al., 2026). مطالعات زیادی به بررسی ارتباط بین پارامترهای هیدرولیکی و هدایت حرارتی خاک پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، Lu et al., (۲۰۱۹) از روش پالس حرارتی، ارتباط مکش و هدایت حرارتی را در ۱۸ نوع خاک با بافت، چگالی ظاهری و رطوبت‌های مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد رفتار هدایت حرارتی خاک در مکش‌های مختلف متفاوت است. همچنین، He et al., (2020b) عملکرد ۳۸ مدل هدایت حرارتی نرمال شده را بررسی و چهار مدل برتر را معرفی کردند. Wang et al.,

1 Effective soil thermal conductivity

2 Soil water retention curve

3 Field Capacity

4 Permanent Wilting Point



(۲۰۲۰) با مطالعه روی ۶۲ نمونه ماسه مختلف، مدل‌های برآورد هدایت حرارتی را تحلیل و مدل‌های Chen (۲۰۰۸) و Zhang (۲۰۱۶) را به عنوان بهترین گزینه‌ها معرفی کردند. He et al. (2020a) روش نوینی برای پیش‌بینی هدایت حرارتی در سطوح مختلف مکش ماتریک ارائه کردند که ویژگی‌های ساختاری خاک، نظیر هندسه منافذ، را در مدل وارد می‌کند.

در ادامه، مطالعات بیشتر نشان داده‌اند که هدایت گرمایی خاک می‌تواند تحت تأثیر عواملی همچون تخلخل خاک، درجه اشباع و حالت تنش قرار گیرد و در این شرایط پسماند رطوبتی طی چرخه‌های تر شدن و خشک شدن مشاهده شده است (Tai et al., 2020). مدل‌های جدیدی مانند تقریب محیط مؤثر مبتنی بر نفوذ (P-EMA) برای توصیف رابطه بین هدایت گرمایی خاک و نگهداشت آب توسعه یافته‌اند که همبستگی قوی با خصوصیات هیدرولیکی خاک نشان می‌دهند (Fu et al., 2023). به علاوه، توسعه مدل‌هایی مانند مدل سیگموئیدال مبتنی بر معادلات لجستیک، شبیه‌سازی جریان گرما و آب در خاک‌ها را بهبود بخشیده و دقت خوبی در محدوده‌ای از بافت‌های خاک نشان می‌دهند (Sepaskhah and Mazaheri-Tehrani, 2024). این مدل‌ها در تعیین دقیق هدایت گرمایی خاک برای بافت‌ها و سطوح مختلف رطوبت کمک می‌کنند (Xiong et al., 2023). در مجموع، این تحولات تعاملی پیچیده بین ویژگی‌های خاک، رطوبت و هدایت گرمایی را برجسته می‌سازند که در آن پسماند نقش مهمی در تأثیرگذاری بر این روابط ایفا می‌کند. در این راستا، تحولات اخیر در حوزه هدایت گرمایی خاک بر پالایش مدل‌ها برای پیش‌بینی بهتر رابطه بین هدایت گرمایی خاک (λ) و رطوبت (θ) متمرکز شده است. Fu et al., 2023 مدل تقریب محیط مؤثر مبتنی بر نفوذ (P-EMA) را معرفی کردند که پارامترهایی مانند رطوبت بحرانی (θ_c) را که همبستگی قوی با خصوصیات هیدرولیکی خاک دارد، در بر می‌گیرد. این مدل با استفاده از مجموعه داده‌های خاک‌های مختلف اعتبارسنجی شد و کارایی آن در تخمین λ بر اساس منحنی‌های نگهداشت آب خاک (SWRC) نشان داده شد. Sepaskhah and Mazaheri-Tehrani, 2024 یک مدل سیگموئیدال مبتنی بر معادله لجستیک برای پیش‌بینی λ در محدوده کامل رطوبتی و بافت‌های خاک توسعه دادند. این مدل که با دقت بالا اعتبارسنجی شد، در پیش‌بینی λ از سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشت و آن را به ابزاری ارزشمند برای شبیه‌سازی جریان گرما و آب در خاک‌ها تبدیل کرد. Xiong et al., 2023 مدل دیگری را پیشنهاد کردند که λ را نسبت به درجه اشباع توصیف می‌کند و از یک تابع درجه دوم برای گسترش مدل فراتر از محدودیت‌های هدایت گرمایی خاک خشک و اشباع شده استفاده می‌کند. این مدل با سایر مدل‌های پرکاربرد مقایسه شد و تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده در انواع مختلف خاک نشان داد.

از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی (Alrbai et al., 2023)، چرخه‌های خشکسالی و تنش آبی را به ویژه در مناطق خشک مانند ایران تشدید کرده است. رطوبت و شوری خاک از عوامل کلیدی در ارزیابی کیفیت خاک محسوب می‌شوند (Dong et al., 2025). کاهش رطوبت و افزایش تبخیر در خاک‌های شور منجر به تجمع نمک و افت شدید کیفیت خاک می‌شود (Gran et al., 2011). با وجود اهمیت شوری در شرایط تنش آبی، مطالعات اندکی به اثر آن بر هدایت حرارتی پرداخته‌اند و نتایج موجود نیز متناقض‌اند. به عنوان مثال، van Rooyen and Winterkorn (۱۹۵۹) گزارش کردند که در رطوبت بالا، شوری اثر اندکی دارد، اما در رطوبت پایین موجب افزایش هدایت حرارتی می‌شود. در مقابل، Mochizuki et al. (۱۹۹۸) نشان دادند که در خاک‌های شنی، افزایش شوری، هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد، حال آنکه در خاک‌های رسی تأثیر چندانی ندارد. Mazirov and Makarychev (۲۰۰۲) نیز در روسیه گزارش کردند که در رطوبت نزدیک ظرفیت زراعی، خاک‌های شور هدایت حرارتی کمتری نسبت به خاک‌های غیرشور دارند. Tikhonravova (۲۰۰۷) بیان کرد که در خاک لومی، انتشار حرارتی تابع هر دو عامل شوری و رطوبت است و با افزایش شوری، هدایت حرارتی تا حد اشباع افزایش می‌یابد. در پژوهش دیگری، BenAli et al. (۲۰۲۱) نشان دادند که حتی تغییرات اندک رطوبت در حضور شوری می‌تواند اثر چشمگیری بر خواص حرارتی خاک لوم شنی داشته باشد و مدلی تجربی برای تخمین آن ارائه کردند. به طور کلی، اگرچه رطوبت در تمامی بافت‌ها باعث افزایش هدایت حرارتی می‌شود، اثر شوری پیچیده و گاه غیرخطی است (Malek et al., 2021; Kolawole et al., 2024). برای نمونه، در خاک سیلت-رس افزایش شوری هدایت حرارتی را افزایش داده، اما در خاک شن ریز بیشینه هدایت حرارتی در سطح شوری متوسط مشاهده شده و در سطوح بالاتر کاهش یافته است. این امر بیانگر آن است که تأثیر شوری بر هدایت حرارتی وابسته به میزان رطوبت و نوع خاک است. اما هیچکدام از این پژوهش‌ها به بررسی رفتار هدایت حرارتی تحت تأثیر هم‌زمان رطوبت و شوری در بافت‌های خاک مختلف در شرایط پسماند رطوبتی و مقایسه حالت تر شدن و خشک شدن نپرداخته‌اند.

با توجه به موارد یادشده، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات هم‌زمان شوری، مکش ماتریک و چرخه‌های خشک شدن - تر شدن بر هدایت حرارتی خاک‌های منطقه سیستان انجام شد. منطقه سیستان به عنوان یکی از خشک‌ترین و بحرانی‌ترین نواحی کشور از نظر منابع آبی، به دلیل تبخیر بالا، شوری قابل توجه خاک و نوسانات شدید رطوبتی، محیطی منحصر به فرد برای مطالعه‌ی رفتار حرارتی خاک

به‌شمار می‌رود. در این منطقه، چرخه‌های مکرر تر و خشک شدن در کنار شوری خاک، موجب تغییرات پیچیده‌ای در ساختار منفذی و تماس بین ذرات می‌شود که می‌تواند بر مسیرهای انتقال حرارت در خاک اثر چشمگیری داشته باشد. در این پژوهش، دو بافت غالب منطقه، شامل خاک‌های لوم و لومی-شنی، به‌عنوان نماینده‌ی شرایط واقعی سیستان مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل رفتار حرارتی این خاک‌ها در مواجهه با شوری و تغییرات رطوبتی، نه‌تنها درک فیزیکی فرآیندهای انتقال حرارت در خاک‌های شور و خشک را بهبود می‌بخشد، بلکه می‌تواند در کالبراسیون مدل‌های حرارتی، پیش‌بینی رفتار دمایی خاک، و برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت حرارتی خاک‌های شور نیز مؤثر باشد. بنابراین، بررسی رفتار هدایت حرارتی در شرایط واقعی اقلیمی و شوری منطقه سیستان، گامی ضروری برای توسعه مدل‌های دقیق‌تر و بومی‌سازی شده انتقال حرارت در خاک‌های خشک ایران محسوب می‌شود و می‌تواند در مدیریت پایدار منابع آب و خاک این منطقه بحرانی نقش مؤثری ایفا کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در منطقه سیستان، به عنوان یکی از نواحی خشک کشور، انجام شد. برای این منظور، با استفاده از نقشه‌های بافت خاک منطقه، نمونه‌برداری از نقاط مورد نظر برای عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک از دو نوع بافت لومی و لومی-شنی (بافت‌های غالب دشت سیستان) صورت گرفت. نمونه‌ها در سه سطح شوری حدود دو، چهار و شش دسی‌زیمنس بر متر برداشت شدند. عملیات نمونه برداری از نقاط مشخص شده به‌صورت دست‌خورده و دست‌نخورده و در سه تکرار انجام و سپس نمونه‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حرارتی به آزمایشگاه منتقل شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل درصد اجزای بافت (شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری (ρ_b)، چگالی حقیقی (ρ_p)، ماده آلی، pH و هدایت الکتریکی (EC) به‌ترتیب با استفاده از روش‌های هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، روش کلوخه (Grossman and Reinsch, 2002)، روش پیکنومتر (Gee and Bauder, 1986)، روش والکلی-بلک (Walkley and Black, 1996)، دستگاه pH متر و دستگاه EC متر اندازه‌گیری شدند. تخلخل خاک (ϕ) نیز براساس رابطه بین چگالی ظاهری (ρ_b) و چگالی حقیقی (ρ_p) از معادله زیر محاسبه شد:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad \text{رابطه ۱}$$

تعیین منحنی رطوبتی خشک شدن/تر شدن

در این پژوهش از دستگاه جعبه شن به‌عنوان ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های دست‌نخورده خاک در بازه‌ی رطوبتی اشباع تا مکش ۱۰۰ سانتی‌متر استفاده شد. در این روش، با اعمال مکش‌های ۰ تا ۱/۰ بار بر روی نمونه‌های اشباع، میزان آب خارج‌شده از خاک اندازه‌گیری و رطوبت وزنی متناظر با هر مکش محاسبه می‌شود. این دستگاه امکان ترسیم شاخه‌های تر شدن و خشک شدن منحنی مشخصه رطوبتی خاک را در مکش‌های پایین فراهم می‌کند. در این مطالعه نیز از جعبه شن برای تعیین منحنی رطوبتی خاک‌های لوم و لومی-شنی در سه سطح شوری دو، چهار و شش دسی‌زیمنس بر متر و در بازه‌ی مکش ۱ تا ۷۰ سانتی‌متر استفاده شد.

اندازه‌گیری هدایت حرارتی خاک

مقادیر هدایت حرارتی خاک همزمان با اندازه‌گیری شاخه‌های خشک شدن و تر شدن منحنی رطوبتی و پس از خارج نمودن نمونه‌ها از دستگاه‌های مربوطه تعیین شد. اندازه‌گیری‌ها به صورت مستقیم و با استفاده از دستگاه KD2 pro ساخت شرکت METER Group (که سابقاً به نام Decagon Devices Company شناخته شده است) مطابق دستورالعمل راهنمای اپراتور (Manual, 2016) انجام شد. پروب این دستگاه شامل یک سوزن فلزی است که درون نمونه خاک قرار داده می‌شود. دستگاه پس از اعمال یک پالس حرارتی کوتاه مدت، گرمای تولید شده را به محیط اطراف سوزن منتقل کرده و تغییرات دمای سوزن را ثبت می‌کند. سرعت تغییر دما بیانگر میزان هدایت حرارتی نمونه است؛ به گونه‌ای که تغییر سریع‌تر دما، نشان‌دهنده هدایت حرارتی بالاتر است. برای محاسبه هدایت حرارتی، دستگاه از حل معادله کلی انتقال حرارت برای منبع خطی با توان ثابت استفاده می‌کند. نتایج اندازه‌گیری در دستگاه به صورت دیجیتالی ثبت شده و در واحد وات بر متر کلین ($W M^{-1} K^{-1}$) گزارش شد (Manual, 2016).



نتایج و بحث

در این پژوهش، پس از تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی اولیه نمونه‌های خاک (جدول ۱)، تأثیر سطوح مختلف شوری بر رفتار منحنی رطوبتی، تغییرات هدایت حرارتی خاک تحت شرایط مختلف مکش و همچنین رابطه بین هدایت حرارتی و رطوبت خاک به طور جامع مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک

نمونه	اندازه ذرات خاک (%)				بافت خاک	EC (dS/m)	pH	چگالی حقیقی (gr/cm ³)	چگالی ظاهری (gr/cm ³)	مواد آلی (%)	تخلخل (%)
	شن %	سیلت %	رس %								
شوری ۲	۱۸/۷	۳۴	۴۷/۳		لوم	۲/۱۱	۸/۸۵	۲/۶۸	۱/۷۹	۱/۳۵۸	۳۳
شوری ۴	۱۸/۷	۳۴	۴۷/۳		لوم	۴/۷۲	۸/۷۰	۲/۹۴	۱/۹۶	۱/۱۹۳	۳۳
شوری ۶	۲۰/۷	۴۶	۳۳/۳		لوم	۶/۷۶	۸/۴۵	۲/۶۲	۱/۹۵	۱/۲۷۸	۲۵
شوری ۲	۵۷	۳۲	۱۱		لومی-شنی	۲/۷۰	۸/۵۱	۲/۵۹	۱/۶۵	۱/۲۷۷	۳۶
شوری ۴	۶۸	۲۷	۵		لومی-شنی	۴/۰۶	۸/۵۰	۲/۶۲	۱/۶۷	۱/۴۴۵	۳۶
شوری ۶	۷۲	۲۵	۳		لومی-شنی	۵/۵۹	۸/۵۷	۲/۴۴	۱/۶۱	۱/۱۴۳	۳۴

طبق اطلاعات جدول (۱)، دو نوع خاک شامل لومی و لومی-شنی در سه سطح شوری تقریبی (۲، ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر) مورد مطالعه قرار گرفتند. میانگین مقادیر pH، چگالی حقیقی، چگالی ظاهری، ماده آلی و تخلخل در خاک لومی به ترتیب برابر با ۸/۶۶، ۲/۷۴، ۱/۹۶، ۱/۳۵۸ و ۳۳٪ بر سانتی‌مترمکعب، ۱/۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۱/۲۸ درصد، و ۳۱ درصد، و در خاک لومی-شنی به ترتیب برابر با ۸/۵۲، ۲/۵۵، ۱/۶۴، ۱/۲۷۷ و ۳۶٪ بر سانتی‌مترمکعب، ۱/۶۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۱/۲۹ درصد، و ۳۶ درصد بود. نتایج نشان داد که هر دو خاک دارای ماهیت قلیایی هستند. مقدار pH در خاک لومی (۸/۶۶) اندکی بالاتر از خاک لومی-شنی (۸/۵۲) است. چگالی حقیقی خاک لومی (۲/۷۴ gr/cm³) بیشتر از خاک لومی-شنی (۲/۵۵ gr/cm³) است که می‌تواند ناشی از درصد بالاتر ذرات ریز (سیلت و رس) در خاک لومی باشد. همچنین، چگالی ظاهری بالاتر خاک لومی (۱/۹) در برابر ۱/۶۴ gr/cm³ نشان دهنده تراکم بیشتر و به تبع آن تخلخل کمتر این خاک نسبت به خاک لومی-شنی است. محتوای ماده آلی در هر دو خاک تقریباً مشابه (۱/۳ درصد) و فاقد تفاوت قابل توجه بود که نشان می‌دهد در این محدوده بافت و شوری، اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان ماده آلی مشاهده نمی‌شود. در مقابل، تخلخل بیشتر خاک لومی-شنی (۳۶٪) در مقایسه با خاک لومی (۳۱٪) به درصد بالاتر ذرات درشت‌تر (ماسه) نسبت داده می‌شود که موجب افزایش فضای خالی بین ذرات می‌شود.

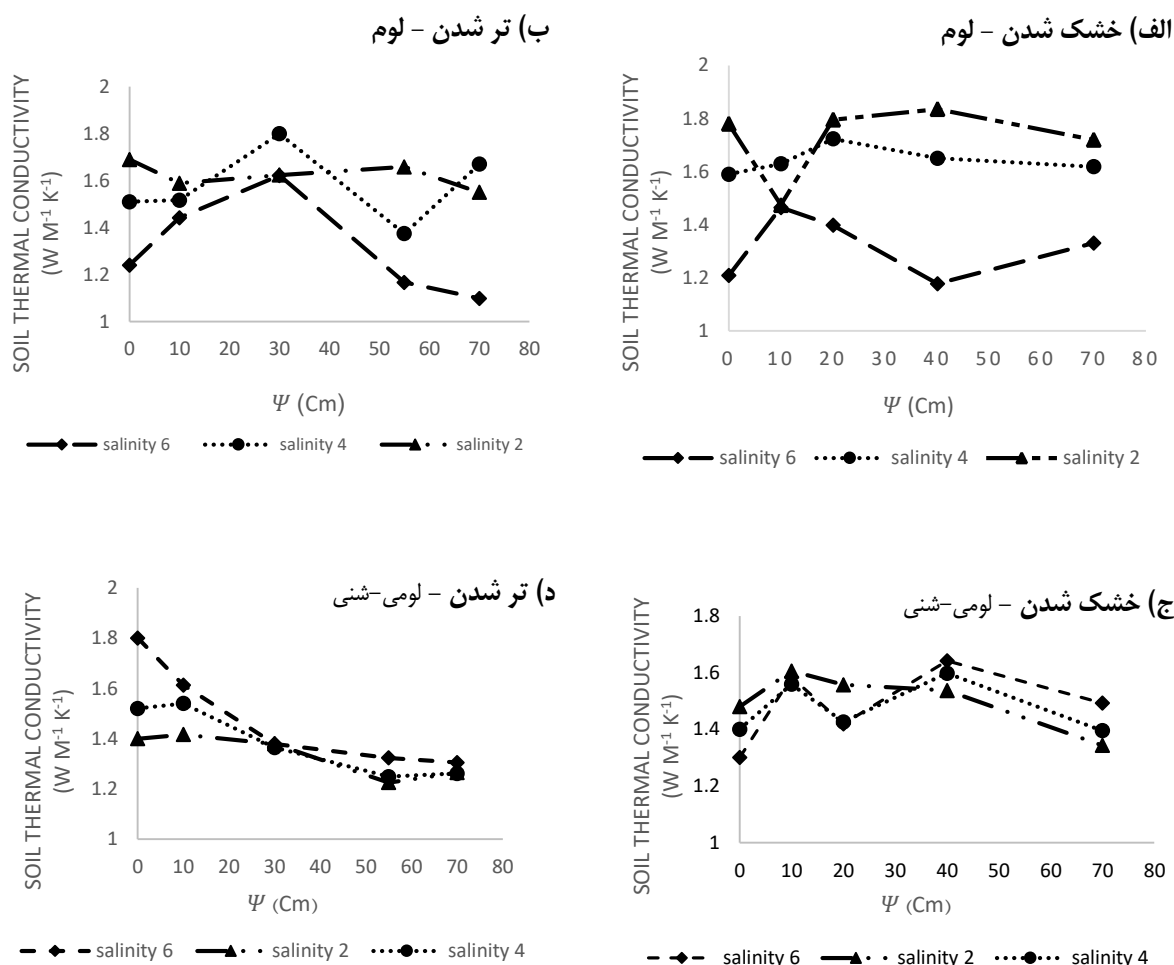
تحلیل رابطه هدایت حرارتی و مکش ماتریک خاک تحت تاثیر شوری

در این پژوهش، برای دو نوع خاک لومی و لومی-شنی، تغییرات هدایت حرارتی در سطوح مختلف مکش و تحت تأثیر شوری مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۲). هدف از این تحلیل، مقایسه رفتار حرارتی این دو بافت و شناسایی اثرات متقابل مکش و شوری بر روند تغییرات هدایت حرارتی بود.

جدول ۲- مقادیر هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده برای دو خاک لوم و لومی-شنی در شرایط مکش ۰ تا ۷۰ تحت تاثیر سه سطح شوری

مکش ماتریک (cm)	منحنی رطوبتی	هدایت حرارتی (W M ⁻¹ K ⁻¹)					
		بافت لوم			بافت لومی-شنی		
		شوری ۲	شوری ۴	شوری ۶	شوری ۲	شوری ۴	شوری ۶
۰	خشک شدن	۱/۷۸۰	۱/۵۹۰	۱/۲۰۸	۱/۴۸۰	۱/۴۰۰	۱/۳۰۰
۱۰		۱/۴۷۴	۱/۶۲۹	۱/۴۶۴	۱/۶۰۶	۱/۵۹۹	۱/۵۸۴
۲۰		۱/۷۹۶	۱/۷۲۳	۱/۳۹۸	۱/۵۵۷	۱/۳۷۰	۱/۴۱۹
۴۰		۱/۸۳۵	۱/۶۵۰	۱/۱۷۷	۱/۵۲۷	۱/۳۰۸	۱/۶۴۲
۷۰		۱/۷۲۰	۱/۶۱۸	۱/۳۳۱	۱/۳۴۳	۱/۲۱۳	۱/۴۹۳
۰	تر شدن	۱/۶۹۰	۱/۵۱۰	۱/۲۴۰	۱/۴۰۰	۱/۵۲۰	۱/۸۰۰
۱۰		۱/۵۸۸	۱/۵۱۷	۱/۴۴۱	۱/۴۱۷	۱/۲۴۰	۱/۶۱۳
۳۰		۱/۶۲۴	۱/۸۰۰	۱/۶۲۲	۱/۳۷۹	۱/۲۶۵	۱/۳۸۰
۵۵		۱/۶۵۹	۱/۳۷۴	۱/۱۶۶	۱/۲۲۶	۱/۲۲۲	۱/۳۲۳
۷۰		۱/۵۵۰	۱/۶۷۰	۱/۰۹۸	۱/۲۶۵	۱/۱۶۲	۱/۳۰۵

مطابق نتایج جدول (۲)، تغییرات هدایت حرارتی در پاسخ به مکش‌های مختلف در هر نمونه رفتاری غیرخطی و نوسانی نشان داد. به‌طوریکه در برخی مراحل روند تغییرات به صورت صعودی یا نزولی آغاز شد، اما در ادامه جهت تغییرات معکوس شد. علاوه بر این، تغییر سطوح شوری در مکش‌های مشابه نیز الگوهای متفاوت و غیریکنواختی ایجاد کرد. این نوسان‌ها در خاک لومی-شنی، به‌ویژه در حالت تر شدن، به مراتب آشکارتر و متمایزتر از سایر شرایط مشاهده شد. برای تحلیل دقیق‌تر، تغییرات هدایت حرارتی نسبت به مکش در سه سطح شوری، در قالب نمودار شکل (۱) رسم شد و نتایج حاصل برای هر دو بافت خاک در حالت‌های تر شدن و خشک شدن مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.



شکل ۱- تغییرات هدایت حرارتی خاک در پاسخ به مکش‌های مختلف رطوبتی تا مکش ۷۰ سانتی‌متر در: (الف) خاک لوم در حالت خشک شدن، (ب) خاک لوم در حالت تر شدن، (ج) خاک لومی-شن در حالت خشک شدن، (د) خاک لومی شن در حالت تر شدن.

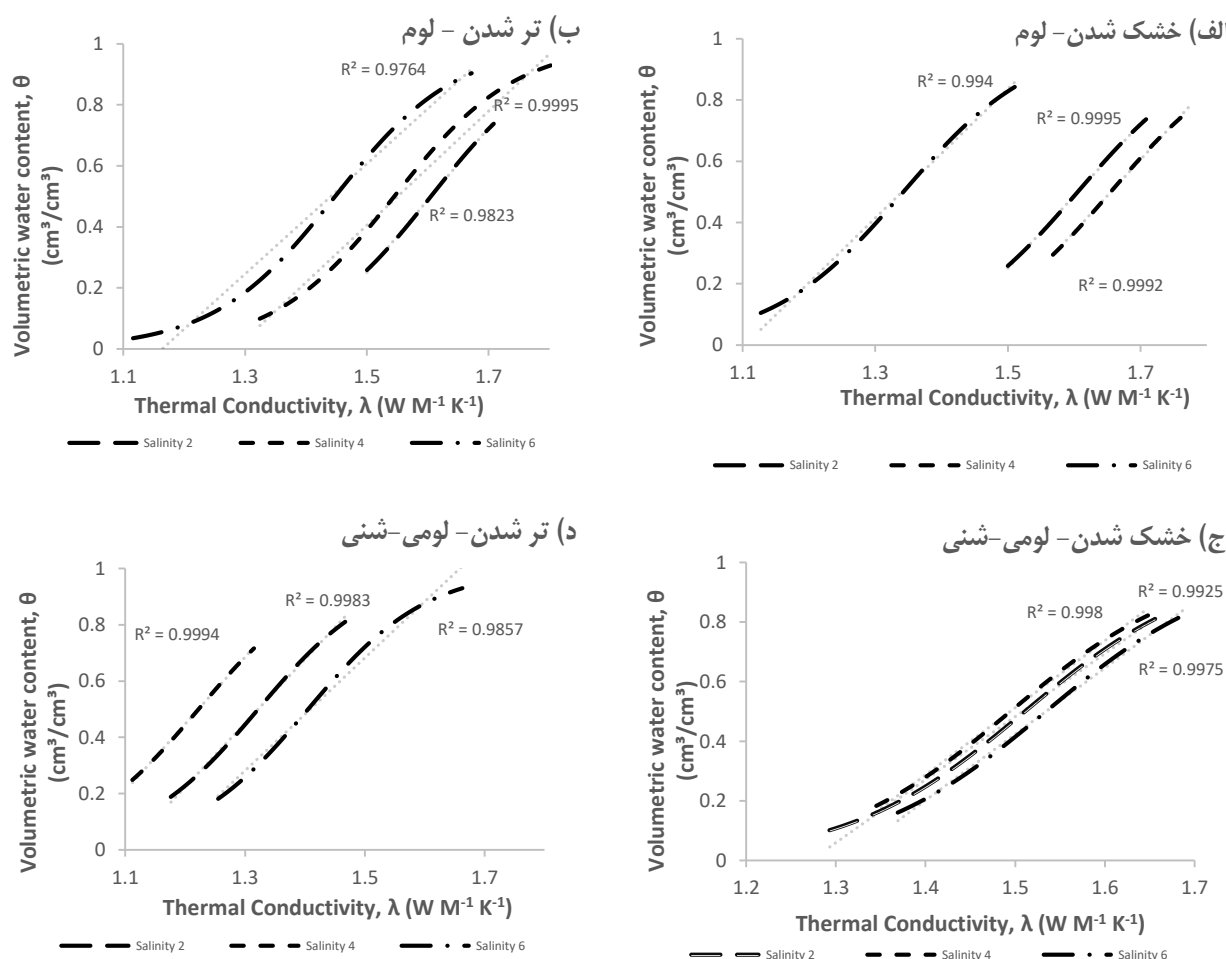
نتایج شکل (۱) نشان داد که رفتار هدایت حرارتی در محدوده مکش ۰ تا ۷۰ سانتی‌متر به صورت غیریکنواخت و نوسانی است. این الگو ناشی از ترکیب پیچیده‌ای از مکانیزم‌های مختلف است که در سطوح مختلف رطوبت و شوری تغییر کرده و بر مسیرهای انتقال حرارت اثر می‌گذارند. در مکش‌های نزدیک به صفر، اغلب منافذ خاک کاملاً از آب پر می‌شوند. از آنجا که هدایت حرارتی آب به طور قابل توجهی بیشتر از هوا ولی کمتر از ذرات معدنی خاک است، لایه‌های آب میان ذرات جامد مانع از تماس مستقیم ذرات شده و مانند یک عایق حرارتی نسبی عمل می‌کند. در نتیجه، با وجود هدایت حرارتی بالا در این شرایط، مقدار آن به حداکثر مطلق نمی‌رسد. در مکش‌های میانی و رطوبت متوسط، با تخلیه بخشی از آب از منافذ درشت، تماس مستقیم ذرات جامد افزایش می‌یابد. در عین حال، همچنان آب در منافذ ریز باقی می‌ماند که هدایت حرارتی آن از هوا بیشتر است. بنابراین در این محدوده، به دلیل ترکیب تماس بهتر ذرات جامد نسبت حالت مکش‌های نزدیک به صفر و بسته به میزان آب موجود در منافذ خاک، هدایت حرارتی عموماً روندی صعودی دارد. با این حال، الگوی تغییرات بسته به بافت خاک، سطح شوری و مسیر رطوبتی (تر شدن یا خشک شدن) متفاوت است. به‌طور مثال، در خاک لومی در هر دو مسیر رطوبتی

و در سطوح شوری چهار و شش دسی زیمنس بر متر، روند مذکور مشاهده شد؛ اما در سطح شوری دو، هدایت حرارتی از مکش صفر تا ناحیه میانی ابتدا کاهشی و سپس افزایشی بود. در خاک لومی-شنی نیز، در حالت تر شدن و سطح شوری شش، روند تغییرات به صورت کاملاً نزولی مشاهده گردید. در مکش‌های بالا و رطوبت‌های پایین جایگزینی آب با هوا در منافذ، به دلیل هدایت حرارتی کمتر هوا نسبت به آب، موجب کاهش متناوب هدایت حرارتی و حرکت آن به سمت حداقل مقادیر شد. به طور کلی، تفاوت هدایت حرارتی در سه سطح شوری در خاک لومی-شنی، به ویژه در مکش‌های پایین، بسیار اندک و مقادیر به یکدیگر نزدیک بود. این همگرایی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های بافت درشت تر و ظرفیت تبادل کاتیونی پایین تر خاک لومی-شنی باشد. در چنین خاکی، منافذ بزرگ تر کمتر تحت تأثیر پدیده‌های ریزمقیاس ناشی از شوری قرار گرفته و تغییرات هدایت حرارتی عمدتاً تابعی از میزان رطوبت کلی خاک است (Zhang et al., 2024; Nikolaev et al., 2013).

به‌طور کلی، همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، تغییرات هدایت حرارتی علاوه بر مکش ماتریک و میزان رطوبت، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر سطح شوری و مسیر رطوبتی (ترشدن-خشک شدن) قرار دارد. افزایش شوری با کاهش تنش سطحی آب و احتمالاً تغییر در ضخامت لایه‌های دوگانه پیرامون ذرات رس، توزیع آب در منافذ ریز و به تبع آن هدایت حرارتی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Abuel-Naga et al., 2008; Guo and (Bill) Yu, 2017).

تحلیل رابطه هدایت حرارتی و رطوبت خاک تحت تأثیر شوری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی و مقایسه اثر سطوح مختلف شوری بر رابطه میان رطوبت و هدایت حرارتی در خاک‌های لومی و لومی-شنی، از یک تابع لوجستیک سیگموئیدی استفاده گردید. نتایج برازش این مدل در دو مسیر تر شدن و خشک شدن برای هر دو بافت خاک در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲ - مقایسه‌ای تأثیر مقادیر شوری بر روابط میان رطوبت و هدایت حرارتی برای خاک‌های لوم و لومی-شنی در حالت تر شدن و خشک شدن

مطابق شکل (۲)، رابطه میان رطوبت و هدایت حرارتی مستقیم است؛ به طوری که با افزایش رطوبت، هدایت حرارتی نیز افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این روند، پر شدن فضاهای خالی خاک با آب است. در واقع، با افزایش رطوبت، فاز گازی خاک جای خود را به فاز مایع می‌دهد و هرچه این جایگزینی کامل‌تر شود، به علت رسانندگی حرارتی بالاتر آب نسبت به هوا، مقاومت حرارتی کاهش یافته و مسیرهای انتقال حرارت با کارایی بیشتری شکل می‌گیرند. بنابراین، در شرایط رطوبت بالاتر، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش‌های An et al., (۲۰۲۶)، Pan et al., (۲۰۲۴)، Kolawole et al., (۲۰۲۴)، Wang et al., (۲۰۲۴)، Malek et al., (۲۰۲۱)، Ben et al., (۲۰۲۱) و Tikhonravova (۲۰۰۷) نیز این اثر غالب رطوبت بر هدایت حرارتی خاک را تأیید کرده‌اند. با این حال، بررسی تأثیر شوری نشان می‌دهد که رفتار خاک پیچیدگی بیشتری دارد.

در این مطالعه، تأثیر شوری در مسیر ترشدن برای دو بافت خاک لومی و لومی‌شنی بر رابطه هدایت حرارتی-رطوبت به‌ترتیب در شکل‌های ۲-ب و ۲-د نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود، با افزایش شوری در یک دامنه رطوبتی مشابه، هدایت حرارتی خاک لومی کاهش یافته و منحنی‌های هدایت حرارتی-رطوبت به سمت مقادیر پایین‌تر انتقال می‌یابند. به‌طوری‌که با افزایش شوری از سطح شوری دو به سطح شوری چهار، هدایت حرارتی در رطوبت‌های پایین (ناحیه رطوبتی در محدوده‌ی مایل به سمت حالت خشک) و رطوبت‌های بالا (ناحیه رطوبتی در محدوده‌ی مایل به سمت حالت اشباع) به‌ترتیب ۱۱/۷ و ۸/۲ درصد کاهش یافت. افزایش شوری از سطح شوری چهار به سطح شوری شش این روند کاهشی را تشدید کرد؛ به‌طوری‌که در رطوبت پایین ۱۵/۷ درصد و در رطوبت بالا ۹/۶ درصد کاهش مشاهده شد. این تغییرات در هر دو سطح رطوبتی نسبت به تغییر شوری از سطح شوری دو به سطح شوری چهار بزرگ‌تر بودند. در خاک لومی-شنی، برخلاف خاک لومی، رفتار منحنی‌های هدایت حرارتی-رطوبت یکنواخت نبوده و به‌صورت نوسانات کاهشی-افزایشی ظاهر شد (شکل ۲-د). در این بافت، افزایش شوری از سطح شوری دو به سطح شوری چهار موجب کاهش هدایت حرارتی شد؛ به طوری که در رطوبت‌های پایین و بالا به‌ترتیب ۵/۴ و ۱۰/۳ درصد کاهش ثبت شد. با این حال، افزایش شوری از سطح شوری چهار به سطح شوری شش منجر به افزایش هدایت حرارتی در همان دامنه رطوبتی شد؛ به‌طوری‌که در رطوبت پایین ۱۲/۸ درصد و در رطوبت بالا ۲۶/۴ درصد افزایش مشاهده شد. در نتیجه، افزایش شوری تا سطح شوری شش در خاک لومی‌شنی باعث افزایش قابل توجه هدایت حرارتی شد، به‌گونه‌ای که منحنی مربوط به سطح شوری شش حتی بالاتر از منحنی سطح شوری دو قرار گرفت.

از آنجا که رفتار رطوبتی خاک در مسیر ترشدن و خشک‌شدن یکسان نیست، اثر شوری در شرایط خشک‌شدن نیز برای دو بافت خاک بررسی شد (شکل‌های ۲-الف و ۲-ج). در خاک لومی، برخلاف حالت ترشدن، تغییرات هدایت حرارتی-رطوبت نوسانی بود؛ ابتدا افزایش و سپس کاهش مشاهده شد. به‌طوری‌که با افزایش شوری از سطح شوری دو به سطح شوری چهار، هدایت حرارتی در رطوبت‌های پایین و بالا به‌ترتیب ۴/۵ و ۳/۷ درصد افزایش یافت. اما با افزایش بیشتر شوری از سطح شوری چهار به سطح شوری شش، منحنی هدایت حرارتی به سمت مقادیر پایین جابه‌جا شد؛ به طوری که در رطوبت پایین ۲۸/۱ درصد و در رطوبت بالا ۱۴/۶ درصد کاهش ثبت شد. در خاک لومی‌شنی، رفتار هدایت حرارتی-رطوبت در شرایط خشک‌شدن مشابه مسیر ترشدن بود، اما دامنه تغییرات بسیار محدودتر بود. با افزایش شوری از سطح شوری دو به سطح شوری چهار، تغییرات هدایت حرارتی در رطوبت‌های پایین و بالا کمتر از ۰/۵ درصد بود و با افزایش شوری از سطح شوری چهار به سطح شوری شش، هدایت حرارتی در رطوبت پایین و بالا به‌ترتیب تنها ۱/۷ و ۲/۶ درصد تغییر نشان داد. این مقادیر کمترین تغییرات در تمامی شرایط بررسی‌شده در این پژوهش به شمار می‌آیند و پایداری خاک لومی-شنی در برابر شوری را نشان می‌دهند.

در خاک لومی، افزایش شوری عمدتاً منجر به کاهش هدایت حرارتی در شرایط ترشدن شد؛ در حالی که در شرایط خشک‌شدن، رفتار هدایت حرارتی نوسانی (افزایشی-کاهشی) بود. این موضوع نشان‌دهنده حساسیت بالای خاک لومی به تغییرات شوری، به‌ویژه در رطوبت‌های پایین، است. در مقابل، در خاک لومی‌شنی، تغییرات هدایت حرارتی تحت تأثیر شوری در حالت ترشدن نوسانی و در حالت خشک‌شدن بسیار محدود و کم‌دامنه بود. به بیان دیگر، خاک لومی‌شنی پایداری بیشتری در برابر تغییرات شوری نشان داد و تنها در سطوح بالای شوری افزایش قابل توجهی در هدایت حرارتی مشاهده شد. علاوه‌براین، رفتار نوسانی (افزایشی-کاهشی) نمودارهای شکل (۲) برخلاف نتایج Tikhonravova (۲۰۰۷) و Ben Ali et al., (۲۰۲۱) که افزایش شوری و رطوبت را عامل افزایش هدایت حرارتی معرفی نموده‌اند، مشابه نتایج Malek et al., (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که رابطه شوری با هدایت حرارتی پیچیده و غیرخطی است. نتایج این پژوهش همچنین با یافته‌های Kolawole et al., (۲۰۲۴) همخوانی دارد و بر غیرخطی بودن تأثیر شوری تأکید می‌کند.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که اثر شوری بر هدایت حرارتی خاک، مشابه یافته‌های Malek et al., (۲۰۲۱) و Kolawole et al.,



(۲۰۲۴)، به نوع بافت و اندازه ذرات خاک وابسته است. علاوه بر بافت، مسیر رطوبتی (ترشدن یا خشک شدن) نیز عاملی مهم و موثر در رفتار هدایت حرارتی است. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از ویژگی‌های فیزیکی دو بافت است: خاک لومی به دلیل درصد بالاتر ذرات ریز و سطح ویژه بیشتر، مستعد تغییر ساختار و آرایش حفرات در اثر افزایش غلظت نمک بوده و انتقال حرارت در آن بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در مقابل، در خاک لومی‌شنی به دلیل غلبه فضای متخلخل درشت و تماس‌های محدود بین ذرات، اثر شوری بر مسیرهای هدایت حرارتی کمتر محسوس است. مطالعات، (۲۰۲۴) Kolawole et al., (۲۰۲۱) Malek et al., (۲۰۲۱) Ben Ali et al., (۲۰۲۱) Tikhonravova, (۲۰۰۷) نیز تایید کردند که شوری می‌تواند بر هدایت حرارتی اثرگذار باشد، اما اغلب این اثر را تحت تأثیر میزان رطوبت بیان نموده‌اند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن سطوح مختلف شوری و بازه‌های رطوبتی نزدیک، مشاهده شد که تغییرات هدایت حرارتی به نوع مسیر رطوبتی و بافت خاک وابسته بوده و رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی جامع اثرات همزمان شوری، مکش ماتریک و چرخه‌های تر-خشک بر هدایت حرارتی خاک در دو بافت غالب خاک (لوم و لومی‌شنی) در منطقه خشک سیستان پرداخت. یافته‌ها نشان دهنده وجود یک رابطه پیچیده و غیرخطی میان هدایت حرارتی خاک و تعامل پارامترهای شوری، رطوبت و اندازه ذرات است. یافته‌های کلیدی این پژوهش نشان می‌دهد که شوری تأثیر قابل توجهی بر هدایت حرارتی خاک دارد، اما این اثر به بافت خاک وابسته است. در خاک لومی، افزایش شوری عمدتاً باعث کاهش هدایت حرارتی به‌ویژه در شرایط تر، شد که حساسیت این خاک به شیمی آب منفذی و برهم‌کنش‌های دولایه‌ای را برجسته می‌سازد. در مقابل، خاک لوم شنی پاسخ متغیرتری نشان داد؛ شوری کم تا متوسط در برخی موارد باعث افزایش هدایت حرارتی شد که احتمالاً ناشی از بهبود تماس بین ذرات در اثر تبلور نمک است. با این حال، سطوح بالای شوری مجدداً توانایی کاهش هدایت حرارتی را دارد. این موضوع بر نقش حیاتی بافت خاک و هندسه منافذ خاک در تعدیل اثرات شوری بر هدایت حرارتی و جریان رطوبت تأکید می‌کند. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که هدایت حرارتی در خاک‌های شور تابعی ساده از رطوبت خاک به‌تنهایی نیست، بلکه نتیجه تعاملی پویا میان شوری، بافت خاک و مسیر رطوبت است. این مطالعه بینش‌های ارزشمندی برای بهبود مدل‌های گرمایی و هدایت حرارتی در محیط‌های خشک و شور فراهم می‌کند و بر ضرورت در نظر گرفتن شوری و پیشینه هیدرولیکی خاک در پیش‌بینی رفتار گرمایی خاک برای کاربردهای کشاورزی، مدیریت محیطی و مهندسی تأکید دارد. با توجه به پیچیدگی رفتار حرارتی خاک، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از رویکردهای چندرشته‌ای و مدلسازی پیشرفته برای توصیف شرایط گرمایی خاک استفاده شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-6621 انجام شد که بدینوسیله از آن تشکر و قدردانی می‌شود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., & Bouazza, A. (2008). Thermal Conductivity Evolution of Saturated Clay under Consolidation Process. *International Journal of Geomechanics*, 8(2), 114–122. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2008\)8:2\(114\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2008)8:2(114))
- Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil science society of America Journal*, 64(4), 1285-1290. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441285x>.
- Alrbai, M., Ahmad, A. D., Al-Dahidi, S., Abubaker, A. M., Al-Ghussain, L., Alahmer, A., & Akafuah, N. K. (2023). Performance and sensitivity analysis of raw biogas combustion under homogenous charge compression ignition conditions. *Energy*, 283, 128486. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128486>.
- Al-Shammary, A. A. G., Caballero-Calvo, A., Jebur, H. A., Khalbas, M. I., & Fernández-Gálvez, J. (2022). A novel heat-pulse probe for measuring soil thermal conductivity: Field test under different tillage practices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107414. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107414>.
- An, J. B., Kim, T. Y., Chong, S. H., & Cho, G. C. (2026). Effect of soil type on effective soil thermal conductivity for the full range of water saturation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 254,

127677. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127677>
- Ben Ali, A. R., Yang, H., & Shukla, M. (2021). Brackish groundwater and reverse osmosis concentrate influence soil physical and thermal properties and pecan evapotranspiration. *Soil Science Society of America Journal*, 85(5), 1519-1533. <https://doi.org/10.1002/saj2.20281>
- Campbell, G. S., Jungbauer Jr, J. D., Bidlake, W. R., & Hungerford, R. D. (1994). Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil science*, 158(5), 307-313.
- Capparelli, G., & Spolverino, G. (2020). An empirical approach for modeling hysteresis behavior of pyroclastic soils. *Hydrology*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.3390/hydrology7010014>.
- Chen, S. X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and mass transfer*, 44(10), 1241-1246. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0357-1>
- Dec, D., Dörner, J., & Horn, R. (2009). Effect of soil management on their thermal properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, 9(1), 26-39. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912009000100003>
- Dong, L., Wang, W., Che, T., Wang, Y., Huang, X., Zhang, S., ... & Feng, J. (2025). Simultaneous retrieval of soil moisture and salinity in arid and semiarid regions using Sentinel-1 data and a revised dielectric model for salty soil. *Agricultural Water Management*, 312, 109410. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109410>.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>.
- Fu, Y., Horton, R., & Heitman, J. (2025). Neural network estimation of thermal conductivity across full saturation for various soil types. *Computers and Electronics in Agriculture*, 235, 110321. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110321>.
- Fu, Y., Ghanbarian, B., Horton, R., & Heitman, J. (2024). New insights into the correlation between soil thermal conductivity and water retention in unsaturated soils. *Vadose Zone Journal*, 23(1), e20297. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20297>
- Fu, Y., Ghanbarian, B., Horton, R., & Heitman, J. (2023). Robust calibration and evaluation of a percolation-based effective-medium approximation model for thermal conductivity of unsaturated soils. *Geoderma*, 438, 116631. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116631>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Gran, M., Carrera, J., Massana, J., Saaltink, M. W., Olivella, S., Ayora, C., & Lloret, A. (2011). Dynamics of water vapor flux and water separation processes during evaporation from a salty dry soil. *Journal of Hydrology*, 396(3-4), 215-220. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.011>.
- Grossman, R. B. and Reinsch, T.G. (2002). Bulk density and linear extensibility in: *methods of soil analysis part 4. Physical methods*. Dane, J. H. and G. C. Topp (Eds) *soil science soc. Am.* Book series no. 5. ASA and SSA Madison, WI, pp: 201 –228
- Guo, Y., & (Bill) Yu, X. (2017). Characterizing the surface charge of clay minerals with Atomic Force Microscope (AFM). *AIMS Materials Science*, 4(3), 582–593. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2017.3.582>
- He, H., Dyck, M., & Lv, J. (2020a). A new model for predicting soil thermal conductivity from matric potential. *Journal of Hydrology*, 589, 125167. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125167>.
- He, H., Noborio, K., Johansen, Ø., Dyck, M. F., & Lv, J. (2020b). Normalized concept for modelling effective soil thermal conductivity from dryness to saturation. *European Journal of Soil Science*, 71(1), 27-43. <https://doi.org/10.1111/ejss.12820>
- He, H., Dyck, M. F., Horton, R., Li, M., Jin, H., & Si, B. (2018). Distributed temperature sensing for soil physical measurements and its similarity to heat pulse method. *Advances in agronomy*, 148, 173-230. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.003>.
- He, H., Zhao, Y., Dyck, M. F., Si, B., Jin, H., Lv, J., & Wang, J. (2017). A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity. *Acta Geotechnica*, 12(6), 1281-1300. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0563-z>.
- Kojima, Y., Kawashima, T., Noborio, K., Kamiya, K., & Horton, R. (2021). A dual-probe heat pulse-based sensor that simultaneously determines soil thermal properties, soil water content and soil water matric potential. *Computers and Electronics in Agriculture*, 188, 106331. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106331>
- Kolawole, O., Rehmatullah, S., & Shah, V. (2024). Evaluating soil thermal conductivity for buried infrastructure: Impact of water salinity, mineral composition, and moisture content on heat transfer. *Progress in Engineering Science*, 1(2-3), 100014. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100014>



- Lin, Y., Zhang, X., Ling, X., Kuang, C., Yu, A., & Hu, L. (2024). Experimental study of downstream local heat flux of pool fires under relatively strong cross flows. *International Journal of Thermal Sciences*, 196, 108710. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108710>
- Liu, X., Wang, Y., Liang, Y., & Li, J. (2024). CFD analysis of leakage and diffusion characteristics in the buried hydrogen-blended natural gas pipeline. *International Journal of Hydrogen Energy*, 60, 354-368. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.092>.
- Liu, Y., Li, H., Zheng, Z., Niu, A., Liu, S., Li, W., ... & Ma, H. (2022). Rosa rugosa polysaccharide induces autophagy-mediated apoptosis in human cervical cancer cells via the PI3K/AKT/mTOR pathway. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212, 257-274. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.023>.
- Lu, S., Lu, Y., Peng, W., Ju, Z., & Ren, T. (2019). A generalized relationship between thermal conductivity and matric suction of soils. *Geoderma*, 337, 491-497. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.057>
- Malek, K., Malek, K., & Khanmohammadi, F. (2021). Response of soil thermal conductivity to various soil properties. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 127, 105516. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105516>
- Manual, O. S. (2016). KD2 Pro Thermal Properties Analyzer.
- Mazirov, M. A., & Makarychev, S. V. (2002). Thermophysical Characterization of the Altai and Western Tien Shan Soil Cover.
- Mochizuki, H., Miyazaki, T., & Nakano, M. (1998). The effect of salts on thermal conductivity of Toyoura sand. Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering (Japan), (198).
- Nikolaev, I. V., Rosen, M. A., & Leong, W. H. (2013). Experimental Investigation of Soil Thermal Conductivity Over a Wide Temperature Range. *International Journal of Thermophysics*, 34(6), 1110-1129. <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1456-5>
- Pan, M., Huang, Q., Feng, R., & Hang, G. (2017). Estimation of hydraulic and thermal parameters in saturated layered porous media based on heat tracing method. *J. Hydraul. Eng*, 48(10).
- Quintard, M. (2016a). Introduction to heat and mass transport in porous media.
- Quintard, M. (2016b). Heat Transfer in Composite Materials and Porous Media: Multiple-Scale Aspects and Effective Properties. *Heat Transfer in Polymer Composite Materials: Forming Processes*, 175-201.
- Saxena, V. (2025). Water quality, air pollution, and climate change: investigating the environmental impacts of industrialization and urbanization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(2), 73. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07702-4>.
- Sepaskhah, A.R., Mazaheri-Tehrani, M. (2024). A sigmoidal model for predicting soil thermal conductivity-water content function in room temperature. *Sci Rep* 14, 17272. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68455-y>.
- Song, X., Vanapalli, S. K., & Ren, J. (2024). Prediction of thermal conductivity of frozen soils from basic soil properties using ensemble learning methods. *Geoderma*, 450, 117053. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117053>
- Sreedeeep, S., & Singh, D. N. (2011). Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement. *International Journal of Geomechanics*, 11(2), 99-104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000022](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000022)
- Tai, P., Zhou, C., Zhou, Y., & Cui, S. (2020). Thermal conductivity of Toyoura sand at various moisture and stress conditions. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 205, p. 04010). EDP Sciences.
- Tikhonravova, P. I. (2007). Effect of the water content on the thermal diffusivity of clay loams with different degrees of salinization in the Transvolga region. *Eurasian Soil Science*, 40(1), 47-50. <https://doi.org/10.1134/S1064229307010073>
- Van Rooyen, M., & Winterkorn, H. F. (1959). Structural and textural influences on thermal conductivity of soils.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, H., & Vanapalli, S. K. (2025). A new model for predicting thermal conductivity of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 247(12715), 3. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127153>.
- Wang, J., He, H., Dyck, M., & Lv, J. (2020). A review and evaluation of predictive models for thermal conductivity of sands at full water content range. *Energies*, 13(5), 1083.

<https://doi.org/10.3390/en13051083>

- Wang, Z., Zhang, N., Ding, J., Li, Q., & Xu, J. (2020). Thermal conductivity of sands treated with microbially induced calcite precipitation (MICP) and model prediction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147, 118899. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118899>
- Wu, R., Tinjum, J. M., & Likos, W. J. (2015). Coupled thermal conductivity dryout curve and soil–water characteristic curve in modeling of shallow horizontal geothermal ground loops. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(2), 193-205. <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9811-2>.
- Xiong, K., Feng, Y., Jin, H., Liang, S., Yu, K., Kuang, X., & Wan, L. (2023). A new model to predict soil thermal conductivity. *Scientific Reports*, 13(1), 10684. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37413-5>
- Xue, W., Wang, Y., Chen, Z., & Liu, H. (2023). An integrated model with stable numerical methods for fractured underground gas storage. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136268>.
- Yan, X., Duan, Z., & Sun, Q. (2021). Influences of water and salt contents on the thermal conductivity of loess. *Environmental Earth Sciences*, 80(2), 52. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09335-2>
- Yan, H., He, H., Dyck, M., Jin, H., Li, M., Si, B., & Lv, J. (2019). A generalized model for estimating effective soil thermal conductivity based on the Kasubuchi algorithm. *Geoderma*, 353, 227-242. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.031>
- Yu, X., Zheng, G., Zhou, H., & Chai, J. (2021). Influence of geosynthetic reinforcement on the progressive failure of rigid columns under an embankment load. *Acta Geotechnica*, 16(9), 3005-3012. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01160-6>
- Zhang, X., Wang, T., Zuo, Y., & Han, Q. (2024). Salinity Effects on Soil Structure and Hydraulic Properties: Implications for Pedotransfer Functions in Coastal Areas. *Land*, 13(12), 2077. <https://doi.org/10.3390/land13122077>
- Zhang, N., Yu, X., Pradhan, A., & Puppala, A. J. (2017). A new generalized soil thermal conductivity model for sand–kaolin clay mixtures using thermo-time domain reflectometry probe test. *Acta geotechnica*, 12(4), 739-752. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0506-0>
- Zhao, Y., Wen, T., Shao, L., Chen, R., Sun, X., Huang, L., & Chen, X. (2020). Predicting hysteresis loops of the soil water characteristic curve from initial drying. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1642-1649. <https://doi.org/10.1002/saj2.20125>