

The Role of Soil Water Solutes Type on Changes in Evaporation Intensity from sandy and clayey soils

Mohammad Reza Shoaibi Nobariyan* and Mohammad Hossein Mohammadi¹

(Received: January 24-2025 ; Revised: April 10-2025 ; Accepted: May 18-2025)

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.

*: Corresponding author Email: Nobariyan.shoaib@ut.ac.ir

Abstract

The objective of this study is to investigate the effects of solutes and water quality on evaporation amount and rate in two sandy and clayey soils. Soil samples containing aggregates and sand particles with diameters ranging from 0.5 to 1 millimeter were collected. Six columns were prepared during the experiment; three columns were filled with sandy soil and three with aggregated soil, each measuring 60 cm in height and 15.5 cm in inner diameter. One reference column was filled with distilled water. A saturated calcium sulfate solution was added to two columns, a 0.01 molar calcium chloride solution was added to two other columns, and distilled water was added to the remaining two. The amount of water lost through evaporation was recorded every 8 to 12 hours by weighing the columns. After approximately 130 days, the columns were sectioned, allowing for the establishment of moisture and solute concentration profiles for each soil column. The results indicated that the first and second stages of evaporation were distinguishable in sandy soil, whereas in clayey soil (aggregated soil), only the first stage of evaporation occurred due to the gradual transfer of water and the continuous hydraulic connection from the surface to the water table. The presence and type of solutes affected the evaporation rate and moisture profile, reducing evaporation and increasing water retention in deeper soil layers. Hydraulic connectivity (calcium sulfate > calcium chloride > distilled water) and the resulting capillary rise of and supply of evaporated water from higher layers caused a greater evaporation rate in the calcium sulfate compared to the calcium chloride and distilled water treatments in both soil types. Additionally, the formation of a salt crust on the soil surface due to solutes disrupted the hydraulic connection with the surface, resulting in decreased evaporation rates and cumulative evaporation.

Keywords: Solute concentration profile, Gypsic soil, Irrigation water quality

How to cite this article: Shoaibi Nobariyan, M. and Mohammadi, M. 2025. The Role of Soil Water Solutes Type on Changes in Evaporation Intensity from sandy and clayey soils. *J. Water and Soil Sci.* 29(2):199-214. DOI: [10.47176/jwss.29.2.25783](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.25783)

Copyright © 2025 Shoaibi Nobariyan and Mohammadi. Published by Isfahan University of Technology.



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

نقش نوع املاح آب خاک بر تغییرات شدت تبخیر از دو خاک شنی و رسی

محمدرضا شعبی نوبریان*^{ID} و محمدحسین محمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸)

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Nobariyan.shoaib@ut.ac.ir

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر املاح و کیفیت آب روی مقدار و شدت تبخیر در فرایند تبخیر از دو خاک شنی و رسی (خاکدانه‌ای) است. بدین منظور نمونه‌های خاک رسی دارای رس (خاکدانه) و شن که اندازه قطر آنها ۰/۵-۱ میلی‌متر بودند، نمونه برداری شدند. طی آزمایش تعداد ۷ ستون خاک (با ارتفاع ۶۰ و قطر داخلی ۱۵/۵ سانتی‌متر) تهیه و ۶ ستون (۳ ستون شنی و ۳ ستون خاکدانه) از خاک پر شده و یک ستون مرجع نیز از آب مقطر پر شد. به دو ستون (شن و رس خاکدانه‌دار) محلول اشباع کلسیم سولفات (گچ اشباع)، دو ستون (شن و رس خاکدانه‌دار) محلول ۰/۰۱ مولار کلسیم کلراید و دو ستون (شن و رس خاکدانه‌دار) آب مقطر اضافه شد. مقدار آب حاصل از فرایند تبخیر در دوره‌های زمانی ۸ تا ۱۲ ساعته، با وزن کردن ستون‌ها ثبت می‌شدند. پس از حدود ۱۳۰ روز از شروع آزمایش و برش دادن ستون‌ها، پروفیل رطوبتی (تغییرات رطوبت به عمق) و غلظت املاح خاک ستون‌ها ترسیم شدند. نتایج مطالعه نشان داد که مرحله اول و دوم تبخیر در خاک شنی به‌طور واضح قابل تفکیک بوده؛ ولی در خاک رسی (خاکدانه) به‌دلیل انتقال تدریجی آب و اتصال هیدرولیکی و بدون وقفه آب از سطح عمق ایستابی، فقط مرحله اول تبخیر وجود داشته است. وجود و نوع املاح روی نرخ تبخیر و همچنین پروفیل رطوبتی تأثیر داشته و موجب کاهش تبخیر و افزایش نگهداشت آب در اعماق خاک می‌شوند. پیوستگی هیدرولیکی (کلسیم سولفات < کلسیم کلراید < آب مقطر) و در نتیجه خیز مویینه و تأمین آب بخار شده از لایه‌های بالاتر باعث شدت تبخیر بیشتر تیمار کلسیم سولفات نسبت به تیمار کلسیم کلراید و آب مقطر در هردو نوع خاک باشد. در شرایط وجود املاح، به‌دلیل ایجاد یک پوسته نمکی در سطح خاک، اتصال هیدرولیکی با سطح خاک قطع شده و در پی آن مقدار و شدت تبخیر کاهش و تبخیر تجمعی نیز کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پروفیل غلظت املاح، خاک گچی، کیفیت آب آبیاری

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

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

تبخیر آب فرایند مهمی در جهان است؛ به طوری که تقریباً ۲۵٪ از انرژی خورشیدی دریافت شده توسط زمین را مصرف کرده (۳۸) و ۶۰٪ آب در چرخه هیدرولوژیکی از مسیر تبخیر مستقیم از خاک و یا تعرق گیاهی عبور می کند (۱۹ و ۲۲). در نواحی خشک و نیمه خشک بخش عمده ای از رطوبت خاک در اثر تبخیر از خاک بدون پوشش هدر می رود. این هدررفت در زمانی که پوشش گیاهی روی سطح خاک وجود داشته باشد نیز وجود دارد و با توجه به شرایط آبیاری، نوع پوشش گیاهی و مرحله رشد گیاه به طور متوسط حدود ۳۵٪ از میزان کل تبخیر و تعرق از طریق تبخیر از سطح خاک انجام می شود (۱۲، ۱۶ و ۳۷). تبخیر از سطح خاک به طور مستقیم روی کارایی مصرف آب در مزرعه تأثیر داشته و کاهش آن منجر به افزایش کارایی مصرف آب می شود (۳، ۵ و ۱۰). با افزایش رطوبت سطح خاک در اثر بارندگی، آبیاری و یا انتقال آب از لایه های زیرین به سطح خاک، تبخیر از سطح خاک شروع و با افزایش رطوبت یا انرژی دریافتی توسط سطح افزایش می یابد. شدت تبخیر از سطح محیط متخلخل به خصوصیات محیط متخلخل و شرایط اقلیمی بستگی دارد (۸، ۱۳ و ۱۵). فرایند تبخیر از یک خاک خیس یا اشباع به سه مرحله کاملاً متمایز تقسیم می شود. این مراحل به فاصله جبهه رطوبتی از سطح خاک که با استفاده از تصویربرداری نوترونی به خوبی قابل تشخیص است، بستگی دارد (۳۲). به همین دلیل تشریح مورفولوژی و خصوصیات جبهه رطوبتی در درک تبخیر دارای اهمیت کلیدی است (۲۵، ۲۸ و ۳۳). در مرحله نخست آب مورد نیاز برای تبخیر بدون محدودیت تأمین شده و شدت تبخیر توسط عوامل اقلیمی و بیرونی کنترل می شود. در مرحله دوم شدت تبخیر آب از میزان تقاضای تبخیری کمتر شده و توسط محیط متخلخل محدود و کنترل می شود. نحوه تأثیر ویژگی های هیدرولیکی محیط متخلخل بر تبخیر به طور کمی تبیین شده است (۳۰). اخیراً پژوهشگران با مطالعه پیوستگی جریان موئینگی به وسیله توموگرافی X ray (۳۱) و نیز با استفاده از منحنی رطوبتی خاک، مفاهیم طول مشخصه

تبخیر را تعریف کرده و از آن برای تفکیک مرحله اول و دوم تبخیر استفاده کرده اند (۱۴) و در مرحله پایانی به دلیل خشکی خاک، شدت تبخیر کم و تقریباً ثابت شده و ممکن است زمان زیادی طول بکشد (۲۶ و ۲۹). علاوه بر ویژگی های هیدرولیکی خاک و شدت تأمین انرژی، شدت تبخیر به لایه بندی خاک در شرایط بافتی ناهمگن (۱ و ۲۰)، غلظت املاح آب خاک (۱۲، ۳۳ و ۳۴ و ۳۵)، نوع املاح (۶، ۱۸ و ۲۰)، زاویه استقرار ذرات خاک (۲۷)، حضور سورفکتانت ها در خاک یا محلول (۲۱)، ناهمگنی افقی خاک ها (۷ و ۸)، نحوه تأمین رطوبت لازم برای تبخیر در خاک های ناهمگن (۱۴) و نیز نحوه بستگی دارد. در این میان اثر نوع و غلظت املاح و چگونگی تأثیر آن ها بر تبخیر آب از خاک بسیار پیچیده بوده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. تأثیر حضور یون های متفاوت مانند سولفات و کلسیم بر ویژگی های تبخیر بررسی شده و رابطه بین میزان خشک شدن و ترکیب یونی محلول های در حال تبخیر و همچنین خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل نشان داده شده است. به طور کلی به نظر می رسد یک محلول یونی نسبت به یک مایع خالص با سرعت کمتری خشک می شود؛ زیرا کریستال های تشکیل شده در جداره های دیواره های خلل و فرج تمایل به جذب و نگهداری آب داشته و سطح تماس آب و هوا را که بیشتر تبخیر از آن رخ می دهد، کاهش می دهد (۲۶). بررسی رسوب محلول های سولفات سدیم و کلرید سدیم در محیط متخلخل شنی درک فیزیکی بهتری از اثر تبلور درون منفذی این دو نمک (ذندارایت و هالایت) حین خشک شدن محیط متخلخل فراهم آورده است (۴). مطالعه تأثیر کلوئیدها بر تبخیر از محیط متخلخل نشان داد که خشک کردن سوسپانسیون کلوئیدی در محیط متخلخل با انسداد منافذ توسط اتصالات کلوئیدی، متوسط نرخ تبخیر را کاهش داده و با افزایش غلظت اولیه ذرات سوسپانسیون تعداد اتصالات کلوئیدی و نواحی مسدود افزایش و در نتیجه تخلخل نهایی و تبخیر کاهش می یابد (۲۵). مطالعه تبخیر محلول نمکی (NaCl) در حضور

مفیدی از پویایی میزان آب در محیط خاک داده و سرعت جریان آب را به عنوان تابعی از زمان ترسیم می‌کند. این اطلاعات برای درک تأثیر منافذ درشت و پیوستگی آن‌ها و بر تبخیر آب خاک بسیار مهم هستند (۱۵). نتایج بسیاری از مطالعات مختلف روی تأثیر نوع و غلظت املاح بر تبخیر همخوانی نداشته و نیز این تأثیر در بسیاری از موارد همراه با تفکیک مراحل اول و دوم تبخیر و یا با مقایسه خاک‌های با بافت نبوده است. علاوه بر این، مکانیسم حضور املاح روی پویایی تبخیر به طور کامل درک نشده است که این امر باعث می‌شود پیش‌بینی تبخیر آب حاوی املاح در محیط‌های متخلخل، بدون لحاظ کردن پارامترهای مؤثر بر آن دشوار باشد (۲۴، ۳۳ و ۳۵). در حال حاضر مدل‌های معدودی به اثرهای املاح بر تبخیر از خاک پرداخته و این امر موجب ایجاد محدودیت در برآورد تبخیر در شرایط واقعی که عموماً محلول خاک دارای املاح است، می‌شود. علاوه بر آنکه برهم‌کنش توزیع اندازه منافذ خاک و رسوب املاح در آن‌ها و نحوه تأثیر آن بر تبخیر از خاک به خوبی شناخته نشده است؛ بنابراین اهداف این مطالعه عبارت‌اند از:

- ۱- بررسی فرایند تبخیر در حضور برخی املاح در مراحل اول و دوم تبخیر در دو خاک رسی و شنی که اندازه ذرات یکسان دارند، با این تفاوت که ذرات خاک رسی ثانویه (خاکدانه متخلخل) و ذرات خاک شنی اولیه (ذرات فاقد تخلخل) هستند. ۲- نقش املاح و نوع آن‌ها بر شدت تبخیر و توزیع غلظت آن‌ها در فرایند تبخیر و تعیین و توزیع پروفیل رطوبتی خاک دارای املاح متفاوت است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک خاک شنی و یک خاک رسی از استان گیلان و محدوده جنگل سد تاریک (زون ۳۹، ۳۷۲۱۵۳ متری شرقی و ۴۰۹۵۱۰۱ متری شمالی) به نحوی انتخاب شدند که خاک رسی دارای ساختمان بسیار قوی با خاکدانه‌های اسفنجی تا حد ممکن پایدار در آب باشد. هر دو خاک از الک یک میلی‌متری و الک نیم میلی‌متری عبور داده شدند و ذرات خاک

سورفکتانت‌ها نشان داد که با افزودن یک سورفکتانت کاتیونی یا غیریونی به محلول نمک، سرعت خشک‌شدن در ابتدا بدون تغییر است؛ اما می‌تواند در زمان‌های طولانی به دلیل تشکیل یک پوسته نمکی در سطح کاهش یابد و زمانی پوسته نمکی در سطح تشکیل می‌شود، زمان لازم برای خشک‌شدن افزایش می‌یابد (۲۳). تصویربرداری سه‌بعدی (X-Ray Computed Tomography) فرایند تبخیر نمک سدیم کلرید از محیط متخلخل شنی در مقیاس آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان داد که پس از تشکیل پوسته نمکی روی سطح خاک، تبخیر از زیر این پوسته انجام شده و همچنین وجود پوسته نمکی سبب می‌شود آب به صورت بخار (نه مایع) به سطح این پوسته رسیده، تبخیر صورت پذیرد و انفصال هیدرولیکی جریان آب به فرم مایع در سطح سبب کاهش سرعت تبخیر شود (۱۹). پژوهش‌های زیادی نشان داده است که پوسته نمک موجود در سطح خاک به عنوان یک لایه با انتشارپذیری کم عمل کرده و انتشار بخار به سمت هوای آزاد را کاهش می‌دهد. مشاهدات مشابهی برای انواع مختلف نمک، انواع خاک و شرایط مرطوب گزارش شده است (۲، ۹ و ۱۸). رسوب محلول خاک حین تبخیر روابط متقابل با انتقال و تبلور املاح دارد (۶ و ۱۷). در مراحل اولیه، نمک رسوب‌شده یک ساختار متخلخل در حال تکامل ایجاد می‌کند (شروع و تشکیل ساختار بلوری نمک) که بر سینتیک فرایند تبخیر تأثیر می‌گذارد (۷). رسوب نمک در سطح محیط متخلخل به طور کامل منافذ را مسدود نمی‌سازد؛ به طوری که تبخیر از طریق جریان آب از درون ساختار پوسته نمکی متخلخل تشکیل شده ادامه می‌یابد (۱۱ و ۳۵). استفاده طیفی از غلظت محلول‌های کلرید سدیم، کلرید کلسیم و یدید پتاسیم تحت شرایط مختلف محیطی نشان داد که بین تلفات تجمعی آب و رسوب املاح در سطح همبستگی قوی وجود داشته و نیز رابطه بین فشار بخار اشباع و غلظت نمک نقش اصلی در تغییرات تبخیر دارد (۳۳). تبخیر علاوه بر شرایط آب‌وهوایی، زبری سطح خاک، بافت و خواص هیدرولیکی خاک و نوع املاح به اندازه خاک و یا مقیاس مطالعه نیز بستگی دارد. مدل‌سازی جریان آب در خاک با استفاده از مدل HYDRUS 3D، اطلاعات سه‌بعدی

مابین دو الک که دارای قطر بین یک و نیم میلی متر بودند، برای ادامه آزمایش ها جدا شد.

بنابراین هر دو خاک دارای اندازه یکسان ولی خاک شنی حاوی ذرات اولیه و خاک رسی حاوی ذرات ثانویه با همان اندازه بودند. برای اندازه گیری تبخیر در خاک های مورد مطالعه، ستون هایی از جنس پی وی سی با قطر داخلی ۱۵/۵ و ارتفاع ۶۰ سانتی متر استفاده شدند. جدار خارجی ستون ها به وسیله عایق حرارتی پوشانده و کف ستون ها به وسیله گپ مسدود شده و یک شیر تخلیه در انتهای ستون ها تعبیه شد. به منظور بررسی تغییرات سطح ایستابی در طول آزمایش، تانسیمترهای دست ساز با استفاده از سفال های متخلخل (برای اطلاعات جامع از این سفال ها به منبع شماره ۲۱ مراجعه شود) ساخته شده و در انتهای ستون ها تعبیه شدند. به منظور تأمین آب و محلول مورد استفاده در این آزمایش، منبع های تغذیه (۵ لیتری) پلاستیکی تهیه شده و به وسیله شلنگ به شیر تغذیه وصل شدند. منبع تغذیه از آب مقطر و محلول های مورد استفاده شامل محلول سولفات کلسیم اشباع و محلول کلسیم کلراید ۰/۰۱ مولار بودند که به ستون های خاک اضافه شدند (شکل ۱). تغییرات دما و رطوبت نسبی به وسیله دستگاه دیجیتال (HTC-2) که قابلیت تعیین رطوبت نسبی هوا و دما را دارد، اندازه گیری شدند. پس از تهیه خاک های مورد استفاده و آماده شدن ستون ها، انتهای لوله ها به ضخامت یک سانتی متر به وسیله سنگریزه پر شده و سپس خاک ها به ستون های اصلی منتقل شدند. برای کمی سازی شرایط تقاضای تبخیری حاکم بر آزمایشگاه یک ستون با همان ابعاد ستون خاک فقط حاوی آب مقطر آزاد به عنوان مرجع شرایط تبخیر تهیه و در مجاورت ستون های خاک قرار داده شد. سه ستون شامل ذرات ثانویه (خاکدانه) و سه ستون شامل ذرات اولیه (شن) آماده شده و قبل از شروع آزمایش به وسیله منبع تغذیه متصل به شیر تخلیه به مدت ۲۴ ساعت از کف به شرح زیر اشباع شدند. بعد از تهیه محلول های لازم، به هر کدام از ستون های خاکدانه و شن به ترتیب آب

مقطر، محلول اشباع کلسیم سولفات (گچ) و محلول کلسیم کلراید ۰/۰۱ مولار تا اشباع کامل تزریق شدند. ستون های خاک در طول فرایند تبخیر در فواصل زمانی ۸ تا ۱۲ ساعته، توزین و مقدار کاهش جرم آن ها به همراه سطح آب ایستابی در هر ستون، دمای محیط آزمایش و رطوبت نسبی هوا نیز اندازه گیری شدند. برای تعیین پروفیل رطوبت و غلظت، پس از پایان آزمایش (ثابت شدن مقدار تبخیر)، ستون های خاک بریده شدند و تا عمق ده سانتی متری از هر ۱-۲ سانتی متری و از اعماق بیش از ۱۰ سانتی متری از هر پنج سانتی متر یک نمونه خاک برداشت شد. غلظت نمک های کلسیم سولفات (گچ) و کلسیم کلراید تعیین و رطوبت هر لایه با استفاده از روش مستقیم تعیین رطوبت (گرمخانه) تعیین شدند. نمودار سری های زمانی شدت تبخیر، پروفیل رطوبتی، عمق آب ایستابی، پروفیل غلظت برای همه نمونه های مورد آزمایش رسم شدند. منحنی رطوبتی خاک ها از طریق دستگاه های غشای فشاری، صفحات فشاری و جعبه شن اندازه گیری و مدل ونگنوختن (۳۹) بر داده های به دست آمده با استفاده از نرم افزار HYDRUS-1D (۳۶) برازش داده شد.

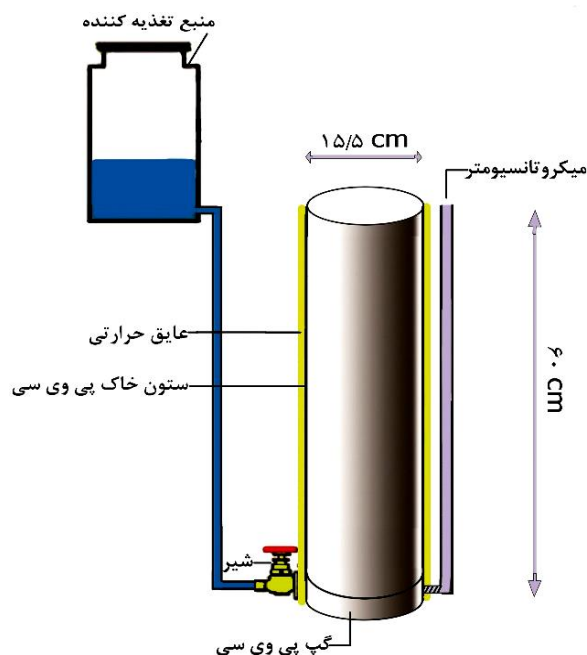
معادله ون گنوختن (۳۹)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha \Psi)^n \right]^{-m} \quad (1)$$

θ_r رطوبت باقیمانده در خاک (m^3/m^3)، θ_s مقدار رطوبت اشباع (m^3/m^3)، θ رطوبت موجود در خاک (m^3/m^3) در هر مکش، α معکوس مکش ورود هوا ($1/m$) به خاک و n و m پارامترهای تجربی هستند. ویژگی های هیدرولیکی دو خاک مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

نتایج و بحث

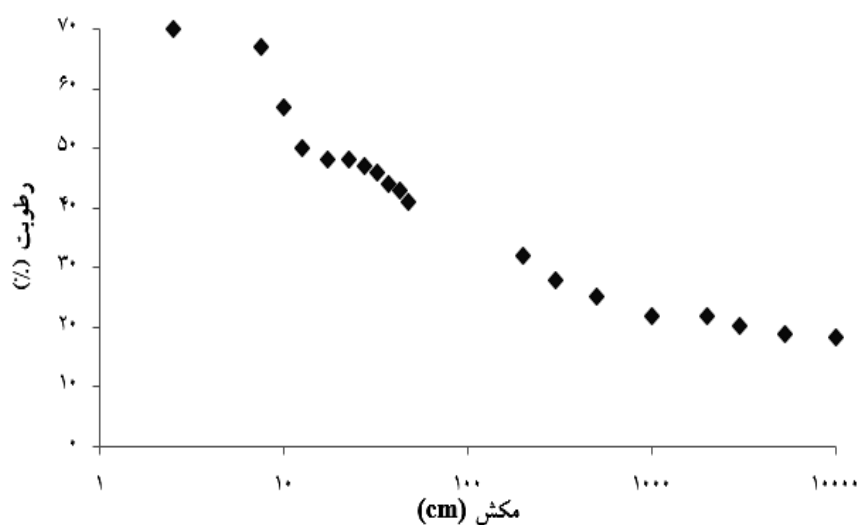
منحنی های رطوبتی دو خاک رسی و شنی در شکل ۲ و ۳ آمده است. میزان تخلخل کل خاک رسی (۰/۷) بیش از خاک شنی (۰/۳۸) بوده و همچنین منحنی رطوبتی خاک رسی به شکل دو نمایی بوده و ۲۰٪ از رطوبت حجمی در منافذ



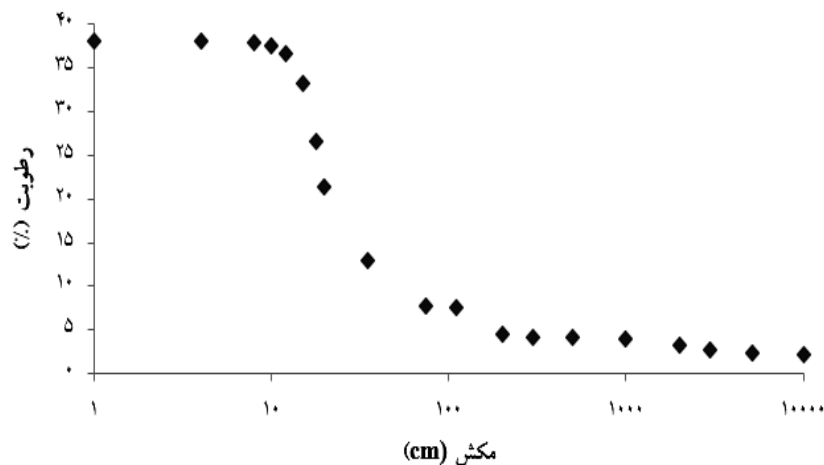
شکل ۱. شماتیک سیستم انجام مطالعه بررسی فرایند شدت تبخیر که در آن ۳ ستون حاوی خاک رسی خاکدانه‌دار (اشباع شده با آب مقطر، محلول کلسیم سولفات اشباع و کلسیم کلراید) و ۳ ستون حاوی خاک شنی (اشباع شده با آب مقطر، محلول کلسیم سولفات اشباع و کلسیم کلراید) است.

جدول ۱. پارامترهای حاصل از برازش مدل ونگنوختن بر منحنی‌های رطوبتی خاک‌ها

Θ_r (m^3/m^3)	Θ_s (m^3/m^3)	α (100/m)	n (-)	m (-)	K_s (m/day)	R^2	
۰/۱۲	۰/۷	۰/۱۶	۱۶/۴۷	۰/۷۸	۰/۱۵۸	۰/۹۹	خاک رسی
۰/۰۳	۰/۳۸	۰/۰۷	۱۲/۶۶	۰/۰۹	۷/۱۲	۰/۹۹	خاک شنی



شکل ۲. منحنی رطوبتی خاک رسی خاکدانه‌دار مورد استفاده در این آزمایش



شکل ۳. منحنی رطوبتی خاک شنی مورد استفاده در این آزمایش

۳ ستون خاک رسی از آب مرجع بیشتر بوده و این اختلاف برای خاک رسی حاوی آب مقطر تا ۳۰ روز پس از آزمایش نیز ادامه دارد. از طرفی تا ۷۰ روز پس از آزمایش، شدت تبخیر خاک رسی حاوی کلسیم سولفات تقریباً با تبخیر مرجع روند یکسانی را طی می‌کند.

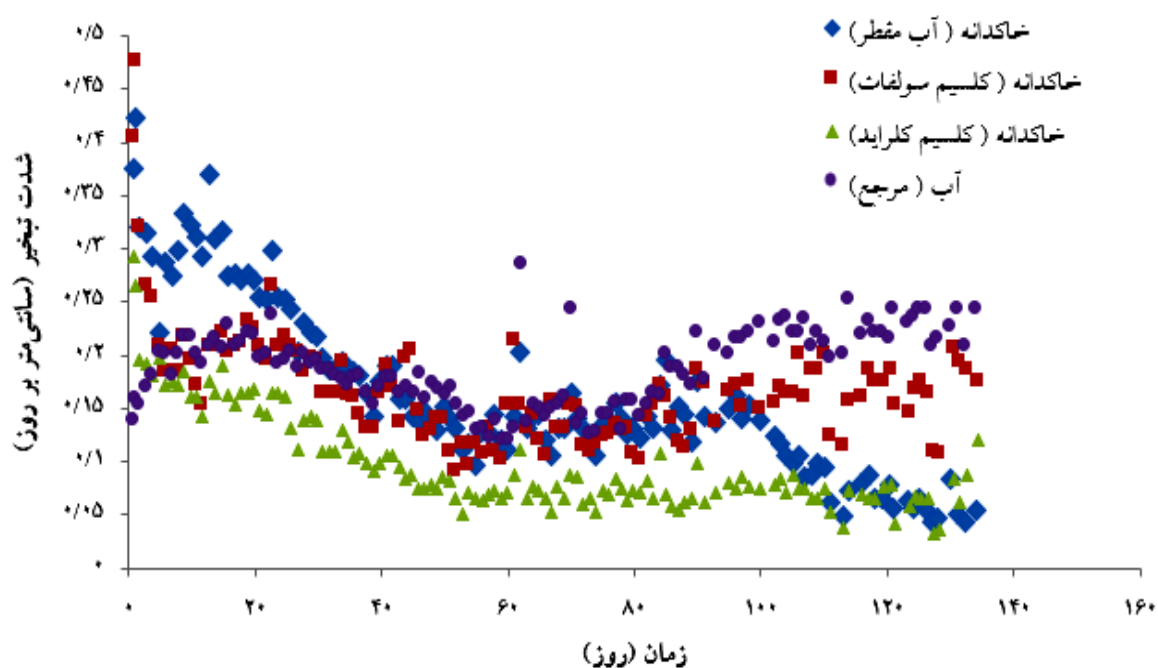
شکل ۶، تغییرات شدت تبخیر در طول زمان آزمایش در ستون‌های خاک شنی را نشان می‌دهد. به غیر از ۱۰ روز اول آزمایش، شدت تبخیر در ستون‌های خاک شنی از آب مرجع کمتر است. شکل ۷ نسبت شدت تبخیر به شدت تبخیر مرجع در طول زمان آزمایش در ستون‌های خاک شنی را نشان می‌دهد.

پروفیل رطوبتی اندازه‌گیری شده در دو خاک شنی و رسی پس از پایان آزمایش (۱۳۰ روز)، به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ آمده است. در همه تیمارهای خاک شنی، مقدار رطوبت خاک از سطح (حدود ۰/۵ درصد) تا عمق حدوداً ۷ سانتی‌متری (مقدار ۸-۷ درصد) به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. در اعماق بیش از ۸ سانتی‌متر، شیب پروفیل رطوبتی (تغییرات رطوبت نسبت به عمق) تا حدودی کاهش یافته و از بخش‌های میانی به بعد مجدداً افزایش می‌یابد. در خاک شنی شیب پروفیل رطوبتی (تغییرات رطوبت نسبت به عمق) در تیمار آب مقطر نسبت به تیمار کلسیم کلراید و در تیمار کلسیم کلراید نسبت به تیمار کلسیم سولفات بیشتر است. در همه تیمارهای خاک رسی خاکدانه‌دار مقدار رطوبت خاک از سطح (حدود ۰/۵ تا ۱ درصد) تا عمق

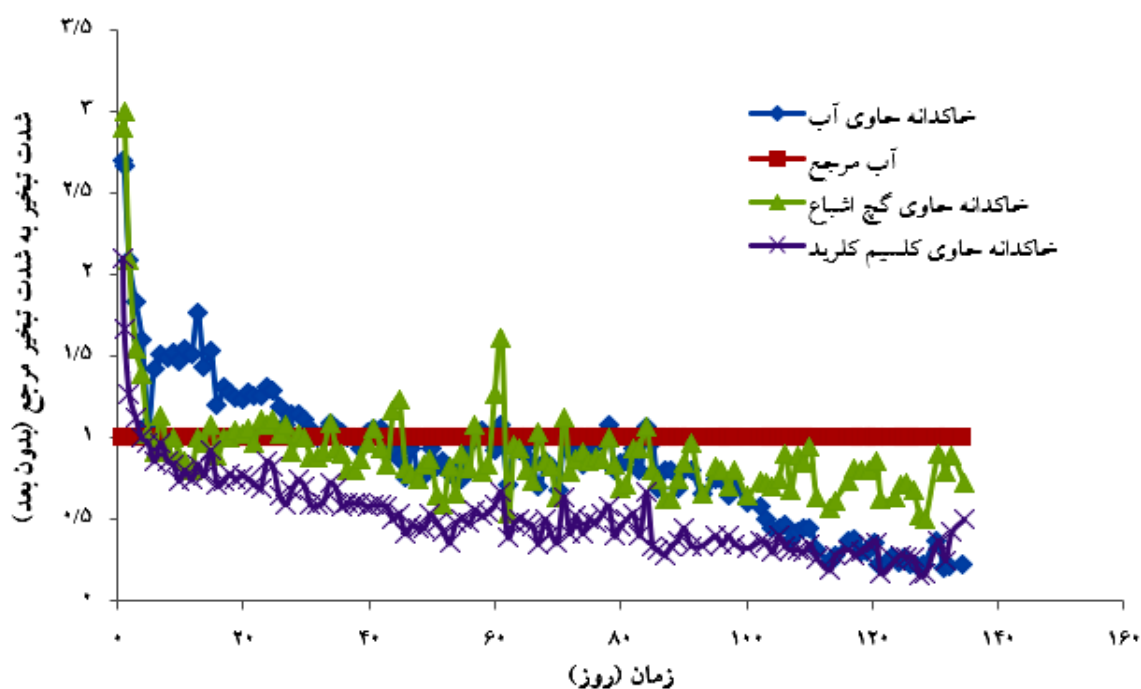
بین خاکدانه‌ها (مکش بین ۲۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) و ۵۰٪ دیگر رطوبت در منافذ داخل خاکدانه‌ها (مکش بین ۱۵ و ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر) نگه داری می‌شوند؛ بنابراین فرض اولیه مبنی بر اینکه خاک رسی با وجود داشتن اندازه ذرات برابر با خاک شنی، دارای مقدار و توزیع اندازه منافذ متفاوتی از خاک شنی است، تأیید می‌شود.

شکل ۴، تغییرات شدت تبخیر در طول زمان آزمایش در ستون‌های خاک رسی (خاکدانه) را نشان می‌دهد. شدت تبخیر در خاک رسی اشباع‌شده با کلسیم سولفات و آب مرجع تا حدود ۷۰ روز پس از آزمایش و به جز زمان‌های اولیه دارای روند تقریباً یکسانی (منحنی تقریباً موازی) بوده و پس از این زمان شدت تبخیر مرجع از شدت تبخیر از این خاک پیشی می‌گیرد. شدت تبخیر از خاک رسی حاوی آب مقطر تا ۲۵ روز پس از آزمایش نسبت به خاک حاوی کلسیم سولفات و کلسیم کلراید و حتی آب مرجع بیشتر بوده و از روز ۱۰۰ به بعد این شدت از تبخیر مرجع و خاک رسی حاوی کلسیم سولفات (گچ) کمتر می‌شود. شدت تبخیر در خاک رسی حاوی کلسیم کلراید نسبت به ۳ ستون دیگر در تمام مراحل آزمایش کمتر است. برای درک بهتر نسبت شدت تبخیر در تیمارهای مختلف، نسبت شدت تبخیر به شدت تبخیر مرجع در طول زمان آزمایش در ستون‌های خاک رسی (خاکدانه) در شکل ۵ آمده است.

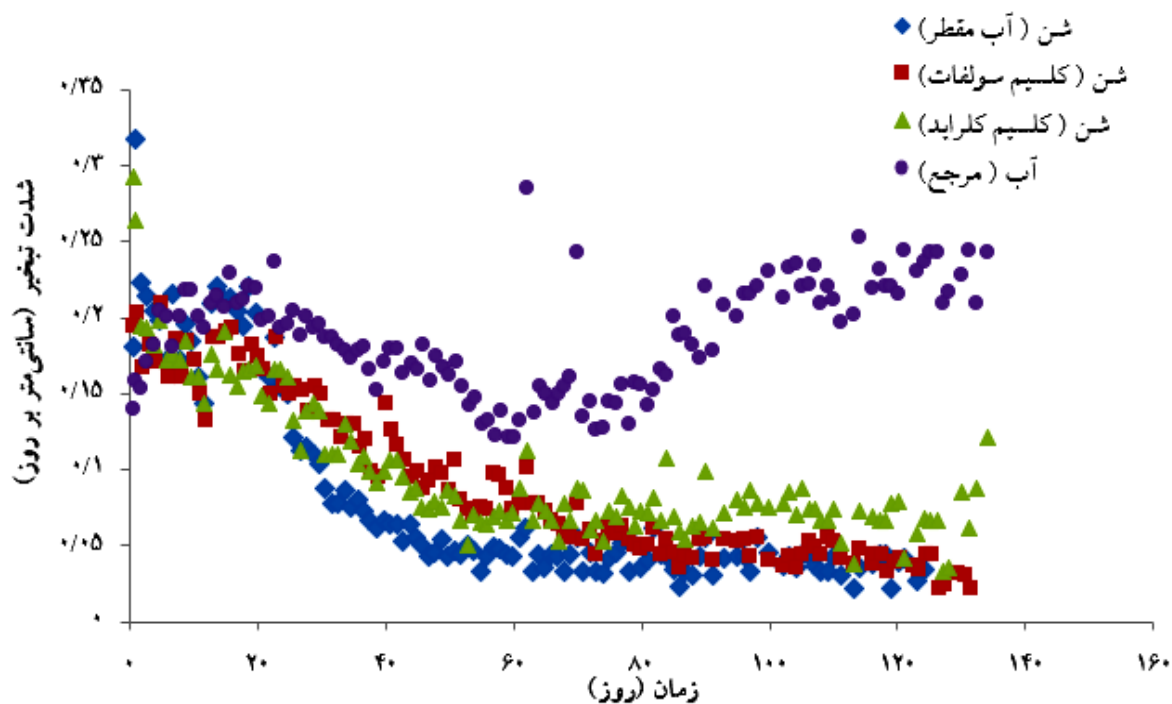
در زمان‌های کوتاه (کمتر از ۵ روز)، شدت تبخیر در هر



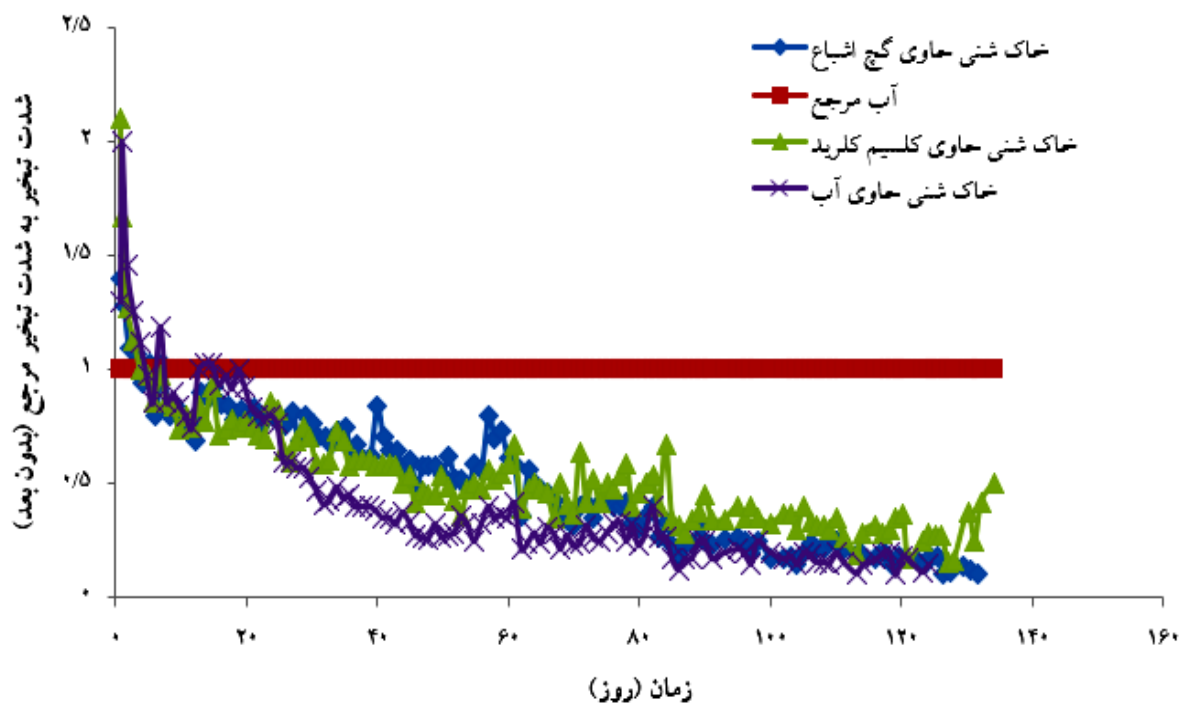
شکل ۴. تغییرات شدت تبخیر طی زمان ستون تبخیر مرجع و در ۳ ستون خاک رسی خاکدانه‌دار که با آب مقطر، محلول اشباع کلسیم سولفات (گچ) و محلول کلسیم کلراید ۰/۰۱ مولار اشباع شده‌اند.



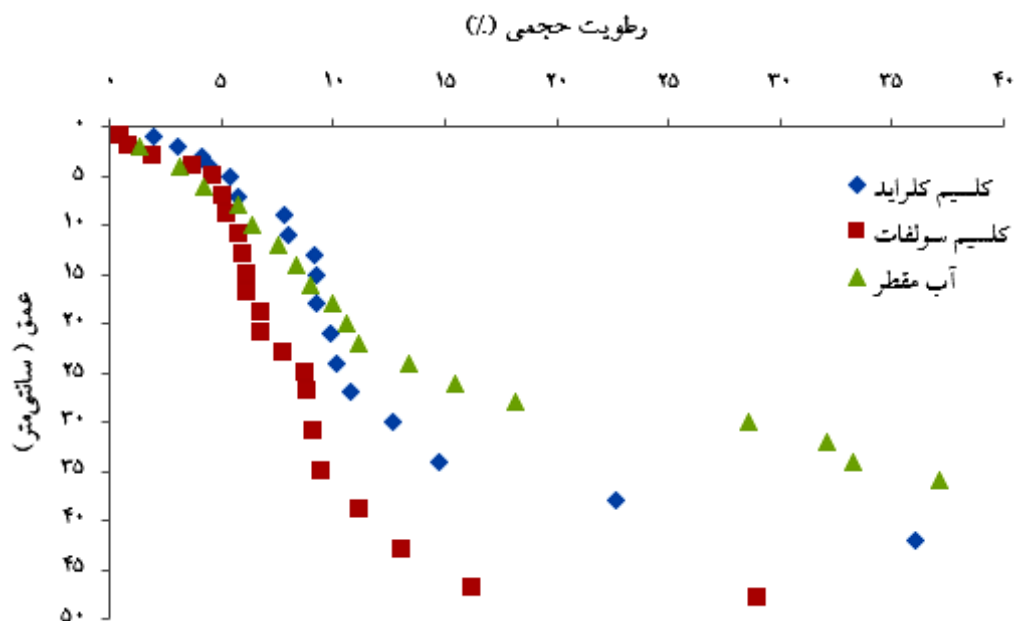
شکل ۵. نسبت شدت تبخیر در ستون‌های حاوی خاک رسی خاکدانه‌دار اشباع شده با آب مقطر، محلول اشباع کلسیم سولفات (گچ) و محلول کلسیم کلراید ۰/۰۱ مولار به تبخیر مرجع



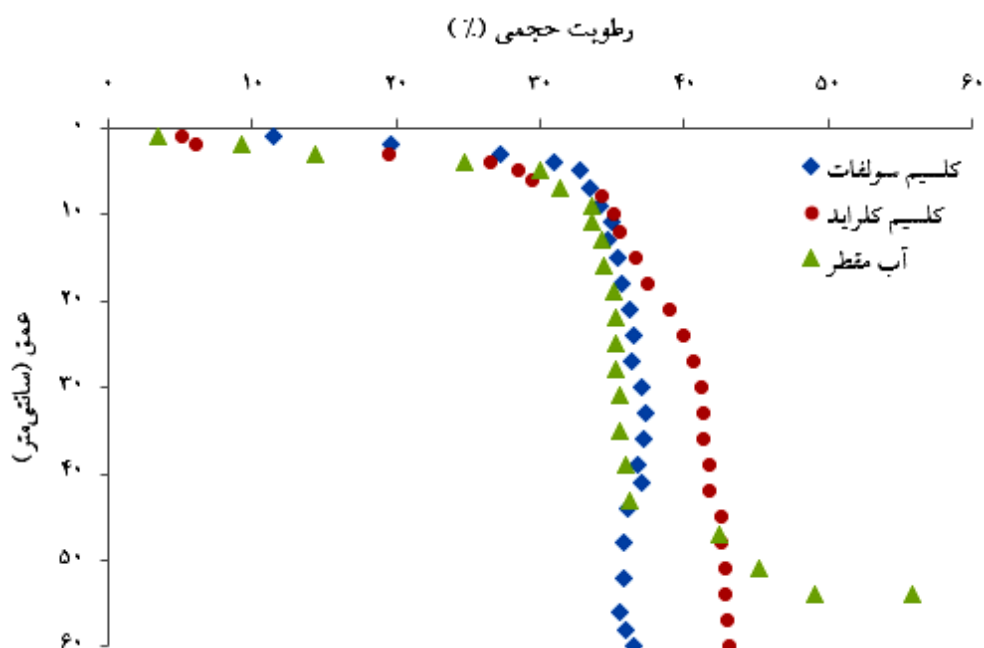
شکل ۶. تغییرات شدت تبخیر طی زمان ستون تبخیر مرجع و در ۳ ستون خاک شنی که با آب مقطر، محلول اشباع کلسیم سولفات (گچ) و محلول کلسیم کلراید ۰/۰۱ مولار اشباع شده‌اند.



شکل ۷. نسبت شدت تبخیر در ستون‌های حاوی خاک شنی اشباع شده با آب مقطر، محلول اشباع کلسیم سولفات (گچ) و محلول کلسیم کلراید ۰/۰۱ مولار به تبخیر مرجع



شکل ۸. تغییرات رطوبت خاک با عمق اندازه‌گیری شده در روز ۱۳۰ ام آزمایش برای خاک شنی اشباع شده با آب مقطر، کلسیم کلراید و کلسیم سولفات



شکل ۹. تغییرات رطوبت خاک با عمق اندازه‌گیری شده در روز ۱۳۰ ام آزمایش برای خاک رسی خاکدانه‌دار اشباع شده با آب مقطر، کلسیم کلراید و کلسیم سولفات

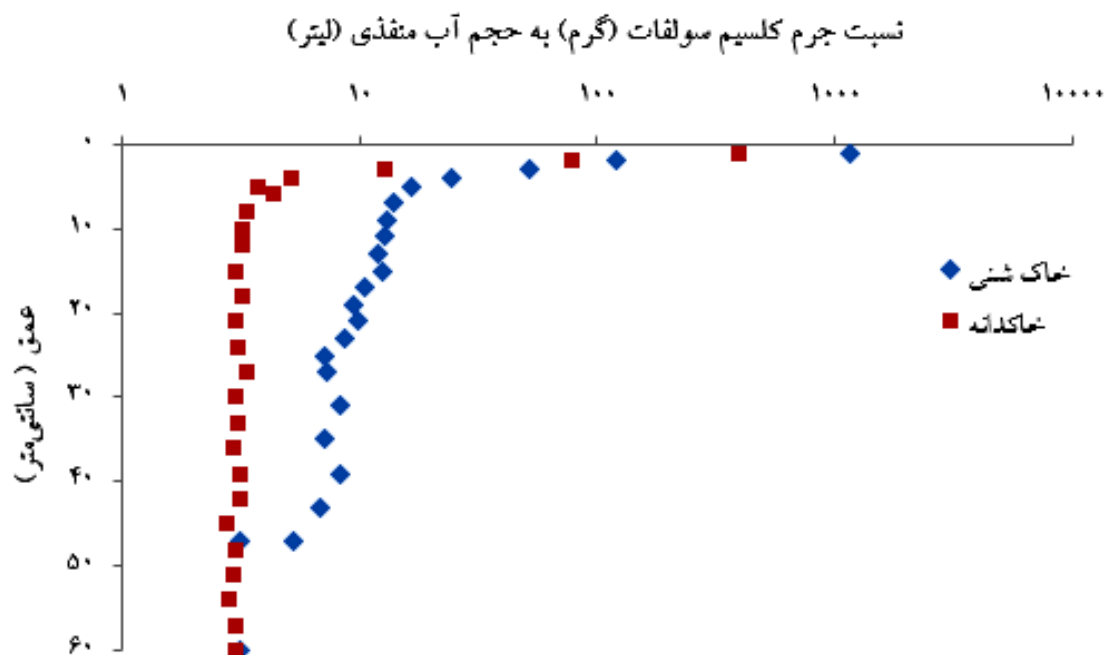
پروفیل رطوبتی (تغییرات رطوبت نسبت به عمق) افزایش یافته و محتوای رطوبت در خاک رسی دارای کلسیم کلراید نسبت به

حدوداً ۶ سانتی‌متری (مقدار ۲۶ تا ۲۸ درصد) به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. در اعماق بیش از ۷ سانتی‌متر، شیب

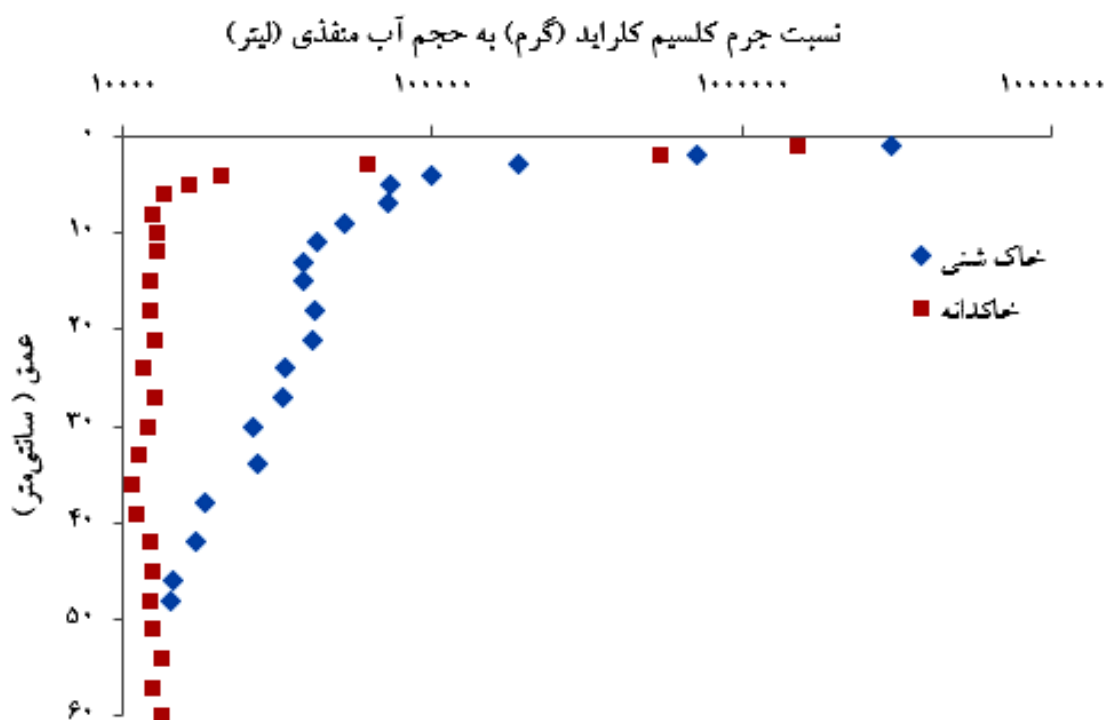
خاک‌های رسی حاوی آب مقطر و کلسیم سولفات بیشتر است. تغییرات نسبت مقدار کلسیم سولفات به‌ازای واحد مقدار آب در اعماق مختلف خاک ستون‌های شنی و رسی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقادیر بزرگ‌تر از حدود دو گرم بر لیتر (غلظت اشباع) این نسبت موید رسوب ناشی از تبخیر کلسیم سولفات بوده و هرچه این نسبت در یک ناحیه از خاک بیشتر باشد، بیانگر شدت تبخیر از آن ناحیه است. مقایسه پروفیل دو خاک نشان می‌دهد نسبت کلسیم سولفات به آب منفذی در خاک شنی بیشتر از خاک رسی بوده و به دلیل مقدار رطوبت کمتر خاک شنی (شکل ۸ و ۹) است. تغییرات ناگهانی این نسبت در سطح خاک نشان می‌دهد که در هر دو خاک عمق اصلی لایه تبخیر در تیمار کلسیم سولفات حدود ۵ سانتی‌متری سطح خاک است. در اعماق بیش از ۵ سانتی‌متر خاک رسی، مقدار کلسیم سولفات تقریباً ثابت و برابر با حد اشباع آن است. این امر نشان می‌دهد که لایه اصلی تبخیر (تبدیل آب به بخار) محدود به لایه ۵ سانتی‌متری بوده و در لایه‌های پایین‌تر تغلیظ و تبخیر انجام نشده است. به عبارت دیگر طی زمان، آب به فرم مایع از لایه‌های پایین با خیز مویینه به عمق ۵ سانتی‌متری و بالاتر رسیده و در آنجا بخار شده است. این امر می‌تواند موید اتصال هیدرولیکی مناسب بین آب منافذ در این خاک باشد. این پیوستگی هیدرولیکی مناسب منجر به شدت تبخیر بیشتر (شکل ۴) و نیز پروفیل رطوبتی همگن‌تر (شکل ۹) شده است. در خاک شنی برای اعماق بیش از ۵ سانتی‌متری تا عمق ۴۵ سانتی‌متری، مقدار کلسیم سولفات حدود ۵ برابر بیش از حد اشباع آن است. این امر نشان می‌دهد که لایه اصلی تبخیر (تبدیل آب به بخار) محدود به لایه ۵ سانتی‌متری نبوده و آب خاک لایه‌های پایین‌تر نیز در اثر تبخیر مستقیم تغلیظ شده است.

تغییرات عمق سطح ایستابی در طول آزمایش در خاک‌های رسی (خاکدانه‌دار) و شنی به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. عمق سطح ایستابی در تیمارهای مختلف خاک شنی (شکل ۱۳) تا روز ۴۰ ام آزمایش تقریباً

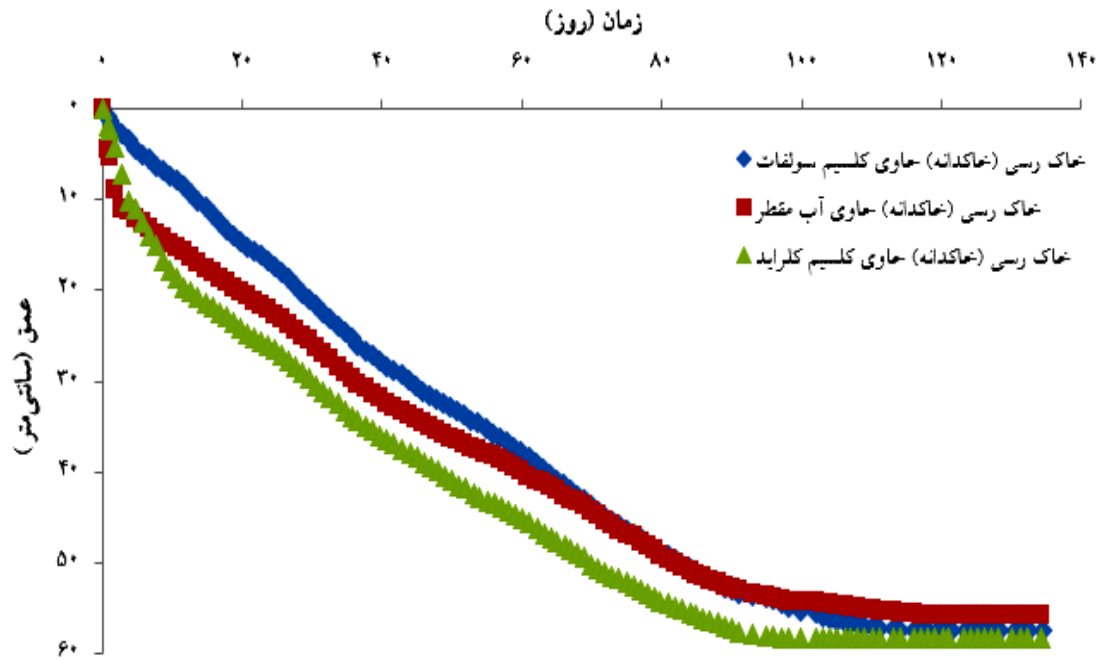
از یک الگوی یکسان پیروی کردند. به این ترتیب که از زمان شروع آزمایش تا حدود ۸-۷ روز پس از آن سطح ایستابی تیمارهای مختلف به‌سرعت تا عمق حدود ۲۵ سانتی‌متری پایین آمده و سپس تا روز ۴۰ ام آزمایش شیب ملایم‌تری به خود گرفته و بعد از آن تقریباً ثابت می‌شوند. شکل ۷ نشان می‌دهد که تا زمان حدود ۸-۷ روز پس از شروع آزمایش، شدت تبخیر از خاک شنی بیشتر از تبخیر مرجع است. این بیشتر بودن شدت تبخیر نسبت به تبخیر مرجع با انجام آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که عامل سطح ویژه ذرات خاک (سطح تبخیر بیشتر) نسبت به سطح مرجع تبخیر در ابتدای شروع آزمایش (روزهای اولیه) عامل اصلی این افزایش است. بعد از روز ۴۰ ام، سطح ایستابی تیمار کلسیم سولفات، پایین‌تر از تیمار کلسیم کلراید و آن هم پایین‌تر از آب مقطر بودند (شکل ۱۳). دلیل این امر می‌تواند ناشی از تأثیر املاح در ایجاد پیوستگی هیدرولیکی (کلسیم سولفات < کلسیم کلراید < آب مقطر) و در نتیجه خیز مویینه و تأمین آب بخار شده از لایه‌های بالاتر باشد. شدت تبخیر بیشتر از تیمار کلسیم سولفات نسبت به تیمار کلسیم کلراید و آب مقطر در شکل ۶ و ۷ قابل مشاهده است. شکل ۱۲ تغییرات عمق سطح ایستابی تیمارهای مختلف خاک رسی در طول آزمایش را نشان می‌دهد. به‌طور کلی به جز در زمان بسیار کوتاه، روند تغییرات عمق سطح ایستابی در تیمارهای مختلف تا روز ۸۰ ام آزمایش تقریباً یکسان بودند و از زمان شروع آزمایش تا حدود ۸۰ روز پس از آن به‌طور خطی تا عمق حدود ۵۵ سانتی‌متری کاهش یافته و بعد از آن تقریباً ثابت می‌شوند. در این دوره زمانی، سطح ایستابی تیمار کلسیم سولفات، بالاتر از تیمار آب مقطر و آن هم بالاتر از تیمار کلسیم کلراید بودند. شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد شدت تبخیر از تیمار کلسیم سولفات بیش از تیمار کلسیم کلراید و تیمار آب مقطر است. عموماً مقدار رطوبت لایه‌های مختلف در تیمار کلسیم کلراید بیش از تیمار کلسیم سولفات و آب مقطر است.



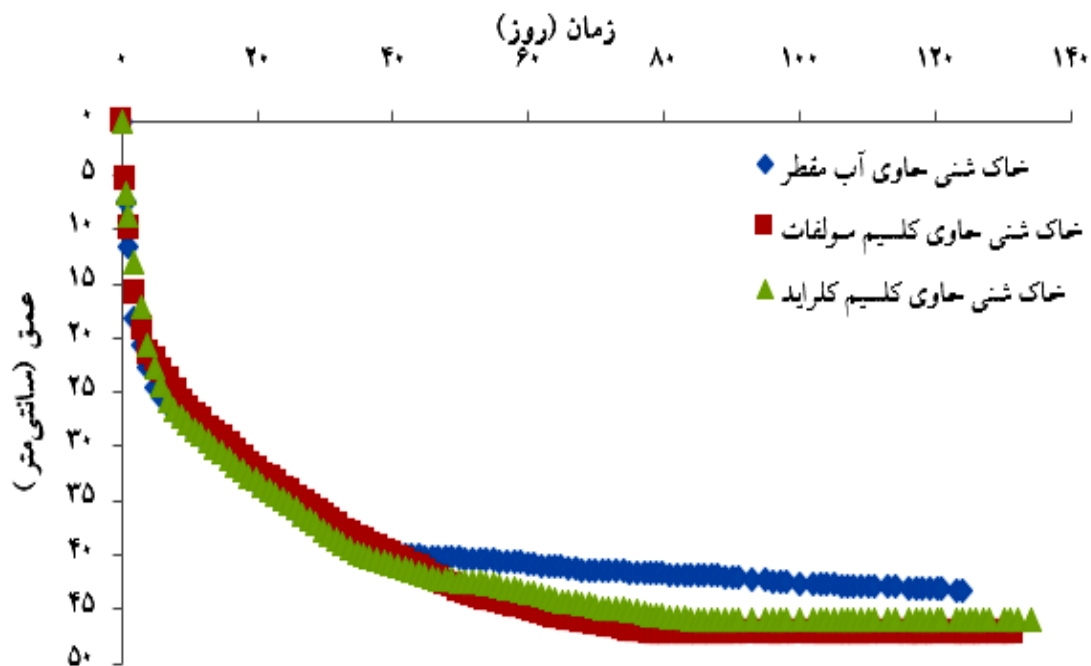
شکل ۱۰. تغییرات نسبت کلسیم سولفات (محلول یا رسوب) به مقدار آب منفذی در اعماق مختلف دو خاک رسی و شنی در زمان ۱۳۰ روز پس از شروع آزمایش



شکل ۱۱. تغییرات نسبت کلسیم کلراید (محلول یا رسوب) به مقدار آب منفذی در اعماق مختلف دو خاک رسی و شنی در زمان ۱۳۰ روز پس از شروع آزمایش



شکل ۱۲. تغییرات عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در طول آزمایش تبخیر در تمام ستون‌های خاک رسی خاکدانه‌دار



شکل ۱۳. تغییرات عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در طول آزمایش تبخیر در تمام ستون‌های خاک شنی

امر منجر به شدت تبخیر کمتر از این تیمار (شکل ۵) و نگهداری آب بیشتر در منافذ خاک در انتهای آزمایش شده است (شکل ۱۲).

به نظر می‌رسد با شروع تبخیر از تیمار کلسیم کلراید، غلظت نمک در منافذ به شدت افزایش یافته (شکل ۱۱) و بنابراین محلول غلیظ در برابر تبخیر مقاومت بیشتری داشته و همین

نتیجه گیری

این مطالعه با هدف بررسی نقش املاح بر فرایند تبخیر طراحی و اجرا شد. دو نوع خاک (رسی (خاکدانه) و شنی) با اندازه ذرات یکسان در ستون‌های خاک، با استفاده از منابع آب مقطر، کلسیم سولفات و کلسیم کلراید اشباع تغذیه شدند. در پایان آزمایش، منحنی شدت تبخیر به زمان، پروفیل رطوبتی و پروفیل غلظت املاح تعیین و ترسیم شد. نتایج مطالعه نشان داد که وجود املاح در خاک سبب کاهش شدت تبخیر و در پی آن تبخیر تجمعی گشته و نوع املاح نیز بر فرایند تبخیر مؤثر و محتوای رطوبت خاک در نتیجه کاهش تبخیر در خاک‌های حاوی املاح، بیشتر است. به عبارتی دیگر وجود املاح در خاک‌های مورد آزمایش، شدت تبخیر و در نتیجه مقدار تجمعی تبخیر را نسبت به خاک تغذیه شده با آب مقطر کاهش داد. از سویی دیگر نوع املاح موجود در خاک نیز روی فرایند تبخیر تأثیرگذار بوده است. وجود کلسیم سولفات به دلیل ایجاد پیوستگی منفذی، کاهش رطوبت در پروفیل خاک را موجب شده و کلسیم کلراید به دلیل حلالیت و تغلیظ آب خاک مقاومت بیشتری نسبت به تبخیر

داشته و شدت تبخیر را کاهش می‌دهد (۲۵ و ۳۴). از طرفی این کاهش شدت تبخیر می‌تواند به دلیل وجود پوسته نمکی در سطح خاک بوده که سبب کاهش یا قطع اتصال هیدرولیکی محلول خاک شده است. گفتنی است، این کاهش تبخیر سبب افزایش نگهداشت رطوبت و ذخیره رطوبتی در خاک و پروفیل خاک می‌شود (۲۶ و ۳۶). در خاک‌های دارای املاح، میزان تبخیر باید کمتر از مقدار واقعی (بدون املاح) تخمین زده شود و وجود پارامتری که نقش املاح را در معادلات تخمین تبخیر - تعرق نشان دهد، می‌تواند تا حدودی این نقیصه را برطرف کند. با توجه به طیف وسیع املاح موجود در خاک، تعمیم این نتایج برای خاک‌های شور و گچی تا حدود زیادی قابل توجه بوده؛ اما برای املاح دیگر نیاز به بررسی در دامنه گسترده تری از غلظت املاح است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی فرایند شدت تبخیر خاک در خاک‌های دست‌نخورده و با طیفی از غلظت‌های مختلف املاح آب خاک، در کلاس‌های بافتی خاک متنوع بررسی شود و نتایج حاصل از این پژوهش‌ها مقایسه و بررسی شود.

منابع مورد استفاده

References

- Assouline, S. and K. Narkis. 2019. Evaporation from multilayered heterogeneous bare soil profiles. *Water Resources Research* 55(7): 5770-5783. <https://doi.org/10.1029/2018WR023136>
- Bergstad, M., D. Or, P.J. Withers and N. Shokri. 2017. The influence of NaCl concentration on salt precipitation in heterogeneous porous media. *Water Resources Research* 53: 1702-1712. <https://doi.org/10.1002/2016WR020006>
- Byunghee, N., P. Bhanu, S. Venkatraman and P.T. Clement. 2024. Enhancing the evaporation method for accurately determining unsaturated soil properties in the wet range. *Journal of Hydrologic Engineering* 29(6): 04024038. <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6215>
- Derluyn, H., P. Vontobel, D. Mannes, D. Derome, E. Lehmann and J. Carmeliet. 2018. Saline water evaporation and crystallization-induced deformations in building stone: insights from high-resolution neutron radiography. *Transport Porous Media* 128: 895-913. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1151-x>
- Dashtian, H., N. Shokri and M. Sahimi. 2018. Pore-network model of evaporation-induced salt precipitation in porous media: The effect of correlations and heterogeneity. *Advances in Water Resources* 112: 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.12.004>
- Desarnaud, J., D. Bonn and N. Shahidzadeh. 2016. The pressure induced by salt crystallization in confinement. *Scientific Reports* 6(1): 30856. <https://doi.org/10.1038/srep30856>
- Desarnaud, J., H. Derluyn, L. Molari, S. de Miranda, V. Cnudde and N. Shahidzadeh. 2015. Drying of salt contaminated porous media: Effect of primary and secondary nucleation. *Journal of Applied Physics* 118(11): 114901. <https://doi.org/10.1063/1.4930292>
- Feng, W., T. Wang, F. Yang, R. Cen, H. Liao and Z. Qu. 2023. Effects of biochar on soil evaporation and moisture content and the associated mechanisms. *Environmental Sciences Europe* 35(1): 66.
- Fujimaki, H., T. Shimano, M. Inoue and K. Nakane. 2006. Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil. *Vadose Zone Journal* 5(4): 1246-1256. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0144>

10. Gao, H., C. Yan, Q. Liu, Z. Li, X. Yang and R. Qi. 2019. Exploring optimal soil mulching to enhance yield and water use efficiency in maize cropping in China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management* 225: 105741. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105741>
11. Gupta, H., P. Huinink, M. Prat, L. Pel and K. Kopinga. 2014. Paradoxical drying of a fired-clay brick due to salt crystallization. *Chemical Engineering Science* 109: 204-211. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.01.023>
12. Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press, San Diego.
13. Lehmann, P. and D. Or. 2009. Evaporation and capillary coupling across vertical textural contrasts in porous media. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 80(4): 046318. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.046318>
14. Lehmann, P., S. Assouline and D. Or. 2008. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 77(5): 056309. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.056309>
15. Leuther, F. and E. Diamantopoulos. 2024. Simulating bare soil evaporation for undisturbed soil cores—Using HYDRUS 3D simulation on X-ray μ CT determined soil macrostructures (Technical Note). *Vadose Zone Journal* 23(4): e20339. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20339>
16. Liu, C.M., X.Y. Zhang and Y.Q. Zhang. 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology* 11(2): 109-120.
17. Mejri, E., R. Bouhlila and R. Helmig. 2017. Heterogeneity effects on evaporation-induced halite and gypsum co-precipitation in porous media. *Transport in Porous Media* 118: 39–64. <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0846-8>
18. Nachshon, U. and N. Weisbrod. 2015. Beyond the salt crust: On combined evaporation and subflorescent salt precipitation in porous media. *Transport in Porous Media* 110(2): 295–310. <https://doi.org/10.1007/s11242-015-0514-9>
19. Nachshon, U., N. Weisbrod, R. Katzir and A. Nasser. 2018. NaCl crust architecture and its impact on evaporation: Three-dimensional insights. *Geophysical Research Letters* 45(12): 6100–6108. <https://doi.org/10.1029/2018GL078363>
20. Norouzi Rad, M., N. Shokri and M. Sahimi. 2013. Pore-scale dynamics of salt precipitation in drying porous media. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 88(3): 032404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.032404>
21. Meskini-Vishkaee, F., M.H. Mohammadi and M.R. Neyshabouri. 2018. Revisiting the wet and dry ends of soil integral water capacity using soil and plant properties. *Soil Research* 56(4): 331-345. <https://doi.org/10.1071/SR17025>
22. Oki, T. and S. Kanae. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790): 1068–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
23. Qazi, M.J., D. Bonn and N. Shahidzadeh. 2018. Drying of salt solutions from porous media: Effect of surfactants. *Transport in Porous Media* 128: 881-894. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1164-5>
24. Qin, F., A. Mazloomi Moqaddam, Q. Kang, D. Derome and J. Carmeliet. 2018. LBM simulation of self-assembly of clogging structures by evaporation of colloidal suspension in 2D porous media. *Transport in Porous Media* 128: 929-943. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1157-4>
25. Schlünder, E.-U. 1988. On the mechanism of the constant drying rate period and its relevance to diffusion controlled catalytic gas phase reactions. *Chemical Engineering Science* 43(10): 2685–2688. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(88\)80012-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(88)80012-5)
26. Seck, M.D., E. Keita, F. Yang and P. Coussot. 2018. Some observations on the impact of a low-solubility ionic solution on drying characteristics of a model porous medium. *Transport in Porous Media* 128: 915-928. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1169-0>
27. Sghaier, N. and M. Prat. 2009. Effect of efflorescence formation on drying kinetics of porous media. *Transport in Porous Media* 80: 441–454. <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9373-6>
28. Shahraeeni, E. and D. Or. 2012. Pore scale mechanisms for enhanced vapor transport through partially saturated porous media. *Water Resources Research* 48(5): W05511. <https://doi.org/10.1029/2011WR011036>
29. Shahraeeni, E., P. Lehmann and D. Or. 2012. Coupling of evaporative fluxes from drying porous surfaces with air boundary layer: Characteristics of evaporation from discrete pores. *Water Resources Research* 48(9): W09525. <https://doi.org/10.1029/2012WR011857>
30. Shokri, N., P. Lehmann and D. Or. 2010. Evaporation from layered porous media. *Journal of Geophysical Research* 115(B6): B06204. <https://doi.org/10.1029/2009JB000514>
31. Shokri, N., P. Lehmann, P. Vontobel and D. Or. 2008. Drying front and water content dynamics during evaporation from sand delineated by neutron radiography. *Water Resources Research* 44(6): W06418. <https://doi.org/10.1029/2007WR006385>

32. Shokri, N., M. Sahimi and D. Or. 2012. Morphology, propagation dynamics, and scaling characteristics of drying fronts in porous media. *Geophysical Research Letters* 39(9): L09401. <https://doi.org/10.1029/2012GL051506>
33. Shokri-Kuehni, S.M.S., M. Norouzi Rad, C. Webb and N. Shokri. 2017. Impact of type of salt and ambient conditions on saline water evaporation from porous media. *Advances in Water Resources* 105: 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.05.004>
34. Shokri-Kuehni, S.M.S., M. Sahimi and N. Shokri. 2022. A personal perspective on prediction of saline water evaporation from porous media. *Drying Technology* 40(4): 691–696. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1999256>
35. Shokri-Kuehni, S.M.S., T. Vetter, C. Webb and N. Shokri. 2017. New insights into saline water evaporation from porous media: Complex interaction between evaporation rates, precipitation, and surface temperature. *Geophysical Research Letters* 44(11): 5504–5510. <https://doi.org/10.1002/2017GL073337>
36. Simunek, J. and M.Th.Van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media (Version 1.0). IGWMC – TPS-70. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines.
37. Slavík, M. and M. Lanzendörfer. 2024. Evaporation from porous rock: Deciphering the importance of measuring the evaporation front depth. *Hydrology* 11(9): 133. <https://doi.org/10.3390/hydrology11090133>
38. Trenberth, K.E., J. Fasullo and J. Kiehl. 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90(3): 311–323. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>
39. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892-898.