



Changes in Soil Evaporation Intensity in Sandy and Sandy Clay Loam Soils as Affected by Inoculation with *Bacillus velezensis*

Zahra Karimzadeh^{a*}, Mohammad Hossein Mohammadi^{a*} , and Hossein Besharati^b

^a Department of Soil Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

^b Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

November 12, 2025

Revised

December 27, 2025

Accepted

January 10, 2026

Published online

March 16, 2026

Keywords

bare-soil Evaporation,
inverse modeling,
poly-gamma-glutamic acid,
soil hydraulic properties

*Corresponding author's email

mhmohmad@ut.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: Direct evaporation from bare soil is a major pathway of “green water” loss in arid and semi-arid regions, and reducing it can improve agricultural water use efficiency. In this study, the effect of inoculating the γ -PGA-producing plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus velezensis* on evaporation intensity and key hydraulic indicators was evaluated in two contrasting soil textures: sand and sandy clay loam. A complementary objective was to use HYDRUS-1D inverse modelling as an analytical tool to estimate effective hydraulic parameters and interpret shifts in evaporation regime after inoculation.

Materials and Methods: A column experiment was conducted using PVC cylinders (15 cm height, 4.5 cm internal diameter) packed with a sandy soil (S) and a sandy clay loam (SCL). Treatments consisted of a distilled-water control (C) and two inoculum levels, with volumetric suspension-to-water ratios of 1:5 and 1:10, corresponding to approximately 8×10^8 and 4×10^8 CFU mL⁻¹, respectively. Columns were saturated from the bottom with the assigned solution and then exposed to laboratory evaporation for 10–11 days, while daily mass loss was recorded and converted to cumulative evaporation. The cumulative evaporation time series for each column were used in HYDRUS-1D (Richards equation with van Genuchten–Mualem functions) to inversely estimate θ_r , θ_s , α , n , and K_s . From the fitted parameters, dynamic soil–water indicators such as characteristic evaporation length (L_c), matric potential at field capacity (Ψ_{FC}), characteristic time to reach field capacity (t_{FC}) and an effective mean unsaturated hydraulic conductivity (k_m) were derived to diagnose the mechanisms underlying evaporation changes.

Results: Bacterial inoculation suppressed cumulative evaporation in both textures, with markedly larger effects in the sand: after 11 days, S-B1:5 and S-B1:10 reduced evaporation by 40.5% and 54.4% versus S-C (3.12 cm \rightarrow 1.85 cm and 1.42 cm), while SCL-B1:5 and SCL-B1:10 achieved 6.9% and 12.1% reductions versus SCL-C (3.62 cm \rightarrow 3.38 and 3.19 cm). HYDRUS-1D reproduced dynamics with high fidelity ($R^2 = 0.996$ – 0.999 ; low bias/error), enabling robust parameter inference. In the sand, inoculation transformed evaporation from step-like capillarity control into smoother diffusion-dominated trends via near-surface γ -PGA biofilm, disrupting capillary continuity. Metrics confirmed this: L_c decreased (26.5 \rightarrow 17.6 \rightarrow 15.4 cm), t_{FC} increased (0.32 \rightarrow 0.40 \rightarrow 0.52 days), and Ψ_{FC} declined (36.2 \rightarrow 21.4 \rightarrow 19.7 cm). SCL showed modest but evident effects, with higher inoculum reducing L_c (~18 cm) and extending t_{FC} (~4.5 days). The 1:10 inoculum often outperformed 1:5, indicating self-limitation at higher densities constraining γ -PGA efficacy. γ -PGA biofilms reshape hydraulic networks, shifting coarse sands from capillary-to diffusion-limited evaporation, which was captured by VGM parameters and dynamic indicators ($L_c \downarrow$, $t_{FC} \uparrow$). Coarser textures yielded greater gains, aligning with capillary theory.

Conclusion: In conclusion, the results support the potential of *Bacillus velezensis* inoculation as a “bioengineering” strategy to suppress bare-soil evaporation, particularly in coarse-textured soils where green-water conservation is most critical. The observed non-monotonic response to inoculum level highlights the need to optimise dosage with respect to soil texture and target process. Given the laboratory column scale of this proof-of-concept, field-scale validation and explicit quantification of γ -PGA/EPS production are recommended to refine the mechanistic interpretation and to develop practical guidelines for the use of *B. velezensis* in water-limited cropping systems.

Cite this article: Karimzadeh, Z., Mohammadi, M.H., Besharati, H., 2026. Changes in Soil Evaporation Intensity in Sandy and Sandy Clay Loam Soils as Affected by Inoculation with *Bacillus velezensis*. Research Article, *Journal of Soil Research*, 39 (4), pp 437-453.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371357.799>

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.areeo.ir/>



تغییرات شدت تبخیر از خاک شنی و لوم رسی شنی در اثر باکتری باسیلوس ولزنسیس

زهرا کریمزاده^۱، محمدحسین محمدی^{۱*} و حسین بشارتی^۲

^۱ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^۲ مؤسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این پژوهش اثر تلقیح باکتری <i>Bacillus velezensis</i> تولیدکننده پلیمر γ -PGA، بر شدت تبخیر از دو خاک با بافت‌های شنی و لومی رسی شنی، به صورت آزمایشگاهی، بررسی گردید. آزمایش‌ها در ستون‌های PVC با سه تیمار شامل، شاهد (آب)، تلقیح نسبت ۱:۵ و ۱:۱۰ سوسپانسیون به آب با جمعیت‌های 4×10^8 و 8×10^8 (CFU ⁻¹ mL) اجرا شد و میزان تبخیر از خاک طی ۱۰ الی ۱۱ روز با وزن کردن روزانه پایش شد. شبیه‌سازی با نرم‌افزار HYDRUS-1D انجام و پارامترهای هیدرولیکی به همراه شاخص‌های دینامیک آب خاک، شامل؛ مکش و رطوبت ظرفیت زراعی و طول مشخصه تبخیر با استفاده از حل معکوس برآورد شد. نتایج نشان داد که تلقیح باکتری، تبخیر تجمعی را در هر دو خاک کاهش داد و این اثر در خاک شنی بیشتر از لوم‌رسی شنی بود. در اثر تلقیح خاک با باکتری باسیلوس ولزنسیس، میانگین وزنی هدایت هیدرولیکی و طول مشخصه تبخیر (LC) و پتانسیل ماتریک بحرانی ظرفیت مزرعه (ΨFC) کاهش و زمان مشخصه رسیدن به ظرفیت مزرعه (tFC) افزایش یافت. تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نیز با تراکم جمعیت باکتری تلقیح‌شده غیرخطی بود و کارایی غلظت پایین‌تر باکتری در کاهش تبخیر در برخی شرایط بیشتر بود که احتمال خودمهارگری در تراکم‌های بالاتر را نشان می‌دهد. این یافته‌ها ظرفیت مهندسی زیستی برای مهار تبخیر و بهبود آب سبز در خاک‌های درشت‌دانه را تأیید کرد. توصیه می‌شود مطالعات آینده اعتبارسنجی مزرعه‌ای و تعیین دوز بهینه را مورد بررسی قرار دهند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵	
واژه‌های کلیدی پلی‌گاما گلوتامیک اسید، تبخیر، خواص هیدرولیکی خاک، مدل‌سازی معکوس	
* ایمیل نویسنده مسئول mhmohmad@ut.ac.ir	

استناد: کریمزاده، ز.، محمدی، م.ح.، بشارتی، ح.، ۱۴۰۴. تغییرات شدت تبخیر از خاک شنی و لوم رسی شنی در اثر باکتری باسیلوس ولزنسیس. مقاله

پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۴) ۳۹، ص ۴۳۷-۴۵۳.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.371357.799>



مقدمه

در عصر حاضر تأمین امنیت آبی و غذایی و توسعه پایدار کشاورزی با چالش‌های پیچیده و چندوجهی از جمله کمبود منابع آبی شیرین و تخریب وسیع خاک مواجه است؛ به طوری که رشد جمعیت جهانی و افزایش مصرف محصولات کشاورزی فشار بی‌سابقه‌ای بر تولید مواد غذایی و مدیریت محدود منابع آب وارد نموده است (de Souza et al., 2021; Bangira, 2018; Moradi et al., 2021). این معضل در مناطق خشک و نیمه‌خشک شدت بیشتری دارد، جایی که کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده عمده منابع آبی، نیازمند بهینه‌سازی مصرف و کاهش اتلاف آب است (Diallo et al., 2024; Sharma et al., 2025). در این زمینه، مفهوم «آب سبز» یعنی رطوبت ذخیره‌شده در خاک به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب قابل‌دستیابی مطرح شده است و به همین دلیل دانش و فناوری‌هایی که توان خاک را در حفظ و انتقال مؤثر این آب افزایش می‌دهند، از اهمیت بالایی برخوردارند (Rockström et al., 2009; Sposito, 2013). در این میان، بخش قابل‌توجهی از آب سبز پیش از آن‌که در اختیار گیاه قرار گیرد، در مسیرهای مختلف از سامانه خاک-گیاه-اتمسفر اتلاف می‌شود که تبخیر مستقیم از سطح خاک یکی از مهم‌ترین آن‌هاست (Stewart and Peterson, 2015). تبخیر از سطح خاک می‌تواند بیش از نیمی از کل آب ورودی به خاک را قبل از جذب توسط ریشه‌ها به اتمسفر بازگرداند (Zheng et al., 2018). فرآیند تبخیر از خاک به‌صورت دو مرحله‌ای عمل می‌کند (Hillel, 2003; Assouline and Or, 2013). در مرحله اول که عمدتاً تحت کنترل انرژی خورشیدی و تقاضای اتمسفری است، آب لازم برای تبخیر بدون محدودیت تأمین شده و نرخ تبخیر تقریباً ثابت است. در مرحله دوم که پس از خشک شدن لایه سطحی خاک آغاز می‌شود، شدت تبخیر با گذشت زمان کاهش می‌یابد. تغییرات شدت تبخیر به توانایی خاک در انتقال مویینه‌ای آب از لایه‌های زیرین به سطح و انتقال بخار و الگوی خشک شدن در عمق‌های مختلف پروفیل وابسته است؛ بنابراین خشک شدن صرفاً به یک لایه بسیار سطحی محدود نمی‌شود (Chenu et al., 1993; Carminati et al., 2010). در این مرحله، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌ویژه توزیع اندازه ذرات و منافذ، نقش کلیدی در حفظ پیوستگی جریان آب ایفا می‌کنند (Assouline and Or, 2013; Zheng et al., 2018). در پی تبخیر آب، خاک‌های با بافت درشت به دلیل داشتن منافذ بزرگ و نیروی مویینی ضعیف، سریع‌تر خشک شده و زودتر وارد مرحله دوم می‌شوند؛ اما خاک‌های رسی با بافت ریز و منافذ کوچک، پیوستگی جریان آب را برای مدت طولانی‌تری حفظ کرده و در

زمان‌های طولانی تبخیر جمعی بیشتری دارند (Zheng et al., 2018). به طور کلی هر عاملی مانند تفاوت اندازه کوچکترین بزرگترین منفذ و نحوه قرار گرفتن آب در منافذ که بر پیوستگی جریان آب و یا به عبارت دیگر اتصال هیدرولیکی آب منافذ مختلف تأثیر بگذارد، تأثیر مستقیمی بر شدت تبخیر آب از خاک و بهبود نگهداشت آب در خاک دارد. (Assouline and Or, 2013; Mekonnen and Hoekstra, 2011).

یکی از رویکردهای نوین در مهندسی زیستی خاک، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR)^۱ است که با ترشح پلیمرهای خارج‌سلولی (EPS)^۲، علاوه بر تحریک رشد گیاه، ساختار خاک را نیز اصلاح و ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهند (Glick, 2012). EPSها، پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و آب دوستی هستند که می‌توانند با ایجاد پل‌های بین ذرات خاک، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و در پی آن افزایش تخلخل درشت، خاصیت نگهداری آب خاک را بهبود بخشند (Rosenzweig et al., 2012; Zheng et al., 2018). علاوه بر این، EPS- در حالت خشک می‌توانند با ایجاد آب‌گریزی در سطح ذرات خاک و نیز تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آب مانند گرانبوی و کشش سطحی، قابلیت هدایت هیدرولیکی غیراشباع را کاهش داده و شدت تبخیر را تغییر دهند (Felde et al., 2018; Lei et al., 2025). در این میان *Bacillus velezensis* به‌عنوان یک باکتری محرک رشد گیاه شناخته می‌شود (Glick, 2012)، سویه‌های این گونه توانایی تولید بیوپلیمرهای متنوع از جمله EPS و γ -PGA را دارند (Moghannem et al., 2018; Guo et al., 2025). همچنین، باکتری *Bacillus velezensis* به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گونه‌های PGPR، توانایی تولید پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر پلی گاما گلوتامیک اسید (γ -PGA^۳) را دارد (Guo et al., 2025). این پلیمر با خواص آبدوستی بالا و ویژگی ژل‌مانند، اتصال هیدرولیکی بین منافذ خاک را بهبود می‌بخشد و ظرفیت نگهداری و انتقال آب را در خاک‌های شنی و رسی افزایش می‌دهد (Lehmann et al., 2008; Chamizo et al., 2013). مطالعات نشان داده‌اند که تلقیح خاک با سویه‌های *Bacillus-velezensis* موجب افزایش مقدار آب خاک، بهبود تشکیل خاکدانه‌ها و کاهش تبخیر جمعی می‌شود (Zheng et al., 2018; Lei et al., 2025). نقش مهمی در تعدیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بازی می‌کند؛ اما درک کامل سازوکار آن در اقلیم‌ها و بافت‌های مختلف خاک نیازمند مطالعات بیشتری است (Guo et al., 2018). مشکلات زیادی در کمی‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های تیمار شده با γ -PGA وجود دارد؛ به‌ویژه پارامترهای تبیین‌کننده ویژگی‌های هیدرولیکی و معیارهای

^۳Poly-gamma-glutamic acid^۱Plant Growth-Promoting Rhizobacteria^۲Extracellular Polymeric Substances

دستیابی به دانه‌بندی کنترل شده (شن متوسط تا درشت)، خاک شنی با دقت بالا از الک‌های ۱ میلی‌متر و ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شد. پس از آماده‌سازی، ستون‌های آزمایشگاهی - PVC با قطر داخلی ۴/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر که انتهای آن‌ها بسته و مجهز به یک شیر زهکش بود، با نمونه‌های خاک پر شدند (شکل ۱). همچنین جرم مخصوص ظاهری در همه ستون‌ها به شرح زیر یکسان گردید. خاک به صورت لایه‌لایه در ستون‌های PVC ریخته شد و هر لایه با جرم مشخص و کوبش یکنواخت تا رسیدن به چگالی ظاهری هدف متراکم گردید تا بدین ترتیب جرم مخصوص ظاهری در تمامی تیمارها و تکرارها در یک بازه ثابت ایجاد شود. اندازه‌گیری منحنی رطوبتی در نمونه‌های بدون تیمار باکتریایی (شاهد) انجام شد. برای اندازه‌گیری مکش ماتریک تا ۱۰۰ سانتی‌متر آب از دستگاه جعبه شنی، برای مکش‌های تا ۳۰۰۰ سانتی‌متر آب از دستگاه صفحات فشاری و برای مکش‌های تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر آب از دستگاه غشای فشاری استفاده شد. این اندازه‌گیری‌ها برای هر نمونه خاک شاهد در سه تکرار انجام شد. برای برازش منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده بر داده‌های به دست آمده از معادله ون‌گنوختن-معلم (رابطه ۱) (Van Genuchten, 1980) و نرم‌افزار RETC نسخه 6.02 استفاده شد (van Genuchten et al., 1991).

رابطه (۱)

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

θ_r رطوبت باقیمانده خاک (cm^3/cm^3)، θ_s رطوبت اشباع خاک (cm^3/cm^3)، h مکش ماتریک خاک (cm)، α پارامتر دارای بعد معکوس طول (cm^{-1}) است که به‌طور تقریبی با عکس مکش ورود هوا آب مرتبط است و n -پارامتر شکل منحنی است که شیب و کشیدگی بخش گذار منحنی نگهداشت آب را کنترل می‌کند. جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این دو خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soils

مقدار رس	مقدار سیلت	مقدار شن	کربنات کلسیم	ماده آلی	pH	بافت خاک
Clay	Silt (0.05-0.002mm)	Sand-	Calcium carbonate	Organic matter	(-)	Soil texture
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	(-)	
32.8	45.6	921.6	0	0	6.9	شنی Sandy Soil
272.8	146.5	580.7	16.89	58.5	8.04	لوم رسی شنی Sandy Clay Loam soil

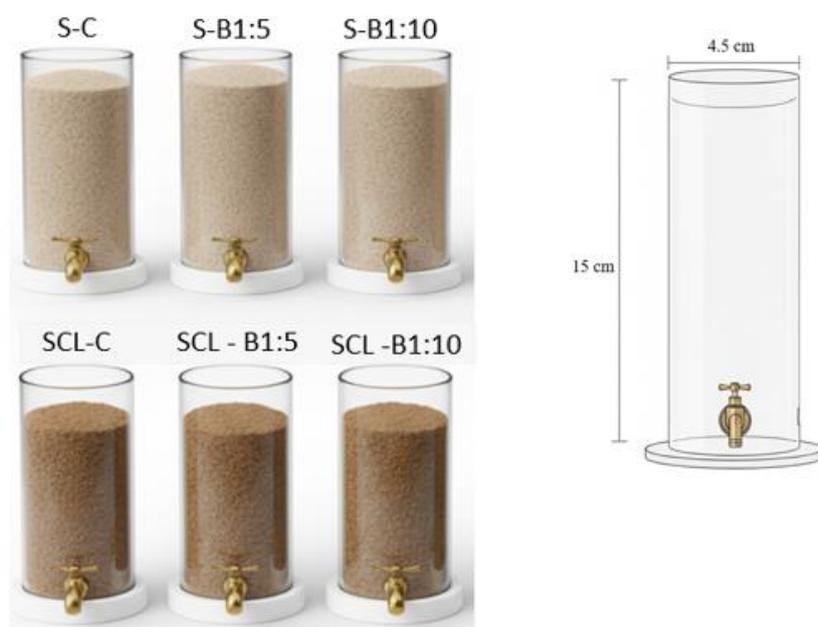
پویایی آب خاک در اثر تلقیح با *B. velezensis* بررسی نشده است (Šimůnek et al., 2008; Kaniz et al., 2023). علاوه بر این، مدل‌سازی تبخیر از خاک‌های اصلاح‌شده با پلیمرهای بیولوژیکی با HYDRUS-1D و روش معکوس پارامترها نیازمند مطالعات بیشتر است (Rosenzweig et al., 2012; Dettmann et al., 2019). در حالی که مطالعات قبلی یا اثر PGPR مانند *B. subtilis* را بر تبخیر ارزیابی کرده‌اند (Zheng et al., 2018) یا تولید γ -PGA توسط *B. velezensis* را گزارش کرده‌اند (Moghannem et al., 2018; Guo et al., 2025)، این مطالعه برای اثر یک سویه *B. velezensis* (SAM96) تولیدکننده γ -PGA را بر تبخیر خاک لخت و پارامترهای هیدرولیکی با واسنجی معکوس توسط HYDRUS-1D در دو بافت متفاوت (شنی و لوم رسی شنی) ارزیابی می‌کند. پژوهش حاضر به ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پلی‌گاما گلوتامیک اسید تولیدشده توسط *Bacillus velezensis* بر تبخیر از خاک می‌پردازد. اهداف اصلی این مطالعه عبارتند از: (۱) بررسی تأثیر تلقیح *Bacillus velezensis* بر شدت تبخیر و پارامترهای هیدرولیکی در دو بافت شنی و لوم رسی و (۲) به‌کارگیری مدل‌سازی معکوس با نرم‌افزار HYDRUS-1D به‌عنوان ابزار تحلیلی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی برای تشریح تغییرات رژیم تبخیر.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در دو بافت خاک، خاک شنی و خاک لوم رس شنی انجام شد. پس از نمونه‌برداری خاک از مزرعه، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و در دمای اتاق به‌صورت هوا خشک آماده شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایه، شامل بافت خاک، کربنات کلسیم، pH و کربن آلی، با استفاده از روش‌های رایج تجزیه خاک تعیین گردیدند (جدول ۱) (Sparks, 1998; Dane and Topp, 2020). برای اطمینان از همگنی و حذف مواد درشت، نمونه‌های خاک الک شدند؛ به طوری که خاک لوم رس شنی از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. به منظور ایجاد یکنواختی بالا و

برای انجام آزمایش تبخیر از مجموع شش ستون PVC با ابعاد ذکر شده و به ترتیب زیر استفاده شد: سه ستون با خاک شنی (S) و سه ستون با خاک لوم رسی شنی (SCL) پر شدند. تیمارهای آزمایشی شامل نوع خاک و جمعیت مایه تلقیح بودند (جدول ۲). ستون‌ها از پایین با استفاده از آب مقطر یا سوسپانسیون باکتریایی مربوطه به آرامی اشباع شدند. در طی اشباع‌سازی از پایین، جریان صعودی پایدار به مدت ۲۴ ساعت برقرار بود، به طوری که آب از تمام ارتفاع ستون عبور کرده و هوای محبوس را جایگزین نمود. ستون‌های خاک بلافاصله بعد از اشباع توزین شده و در محیط آزمایشگاه و در معرض تبخیر قرار گرفتند. میزان تبخیر برای هر ستون از طریق اندازه‌گیری کاهش وزن با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم در طول ۱۱ روز انجام شد-کاهش جرم ستون‌ها در هر روز به ارتفاع معادل ستون آب (سانتی‌متر) تبدیل شد و سری زمانی تبخیر تجمعی حاصل، به‌عنوان داده ورودی برای مدل‌سازی معکوس در HYDRUS-1D به کار رفت. همچنین مقدار دما و رطوبت نسبی هوای آزمایشگاه نیز ثبت گردید. شکل ۱، شمای کلی سیستم آزمایشی را نشان می‌دهد.

در این پژوهش باکتری *Bacillus velezensis* سویه SAM96 از موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. این سویه در محیط کشت شیب‌دار نوترینت آگار در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. برای آماده‌سازی مایه تلقیح، یک کلونی منفرد به ۱۰۰ میلی‌لیتر نوترینت برات استریل منتقل شد و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و با سرعت چرخش ۱۵۰ دور در دقیقه انکوبه گردید. جمعیت اولیه سوسپانسیون باکتریایی برابر با 5×10^9 CFU/ml بود که به منظور کاهش غلظت، رقیق‌سازی انجام شد. به این منظور، بخشی از سوسپانسیون اولیه به نسبت ۱:۱۰ رقیق و جمعیت نهایی آن به 4×10^8 CFU/ml تنظیم شد و بخش دیگری به نسبت ۱:۵ رقیق و جمعیت نهایی آن به 8×10^8 CFU/ml تنظیم گردید. شمارش جمعیت باکتری با استفاده از روش شمارش مستقیم در پلیت حاوی نوترینت آگار اندازه‌گیری شد (Shi et al., 2025). سوسپانسیون‌های تازه به صورت روزانه تهیه شده و بلافاصله برای اعمال در ستون‌های خاک استفاده شدند.



شکل ۱- نمای کلی از ستون‌های تبخیر مورد استفاده در آزمایش، شامل دو بافت خاک شنی (S) و لوم رسی شنی (SCL) با سه تیمار: آب مقطر بدون باکتری (C) و تلقیح باکتریایی *Bacillus velezensis* با نسبت حجمی سوسپانسیون باکتریایی به آب ۱:۵ با جمعیت 8×10^8 CFU mL^{-1} و نسبت ۱:۱۰ (B1:10) با جمعیت 4×10^8 CFU mL^{-1} در ستون‌های PVC با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۴٫۵ سانتی‌متر.

Figure 1. Overview of the evaporation columns used in the experiment, including two soil textures, sand (S) and sandy clay loam (SCL), with three treatments: distilled water without bacteria (C) and bacterial inoculation with *Bacillus velezensis* at volumetric suspension-to-water ratios of 1:5 (B1:5; 8×10^8 CFU mL^{-1}) and 1:10 (B1:10; 4×10^8 CFU mL^{-1}), in PVC columns with a height of 15 cm and an internal diameter of 4.5 cm.

جدول ۲- طرح تیمارهای آزمایشی اعمال شده بر ستون‌های تبخیر از خاک
Table 2. Experimental treatments applied to the soil evaporation columns

کد تیمار Treatment code	جمعیت باکتری Bacterial-population(CFU/ml)	نام تیمار Treatment name
S-C	0-	خاک شنی با آب خالص Sandy soil with distilled water
S-B1:5	8×10^8 -	خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵ Sandy soil with bacterial inoculation 1:5
S-B1:10	4×10^8 -	خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰ Sandy soil with bacterial inoculation 1:10
SCL-C	0-	خاک لوم رسی شنی با آب خالص Sandy clay loam soil with distilled water
SCL - B1:5	8×10^8 -	خاک لوم رسی شنی تلقیح باکتریایی ۱:۵ Sandy clay loam soil with bacterial inoculation 1:5
SCL -B1:10	4×10^8	خاک لوم رسی شنی تلقیح باکتریایی ۱:۱۰ Sandy clay loam soil with bacterial inoculation 1:10

به منظور تحلیل ساز و کار تبخیر از خاک تلقیح شده، پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده ($\theta_s, \theta_r, \alpha, n, K_s$) برای محاسبه شاخص‌های دینامیک برهم‌کنش آب و خاک طول مشخصه تبخیر (LC) و پتانسیل ماتریک بحرانی ظرفیت مزرعه ($-\psi_{FC}$)، با استفاده از روابط ارائه شده توسط Lehmann و همکاران (۲۰۰۸)، Or و Assouline (۲۰۱۴) استفاده شدند.

$$LC = \frac{1}{\alpha(n-1)} \left(\frac{2n-1}{n} \right)^{\frac{2n-1}{n}} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{\frac{1-n}{n}} \quad (1)$$

$$\psi_{FC} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{\frac{(1-2n)}{n}} \quad (2)$$

اشباع مؤثر متناظر S در ظرفیت زراعی (S_{FC}) از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$S_{FC} = \left[1 + \left\{ \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(1-2n)} \right\}^{\frac{(1-n)}{n}} \right] \quad (3)$$

آب قابل زهکشی در ظرفیت زراعی، Q_{FC} ، به صورت زیر تعیین گردید:

$$Q_{FC} = z(\theta_s - \theta_r)(1 - S_{FC}) \quad (4)$$

که در آن z (m) عمق خاک است. زمان مشخصه برای رسیدن به ظرفیت زراعی (τ_{FC}) به صورت نسبت آب قابل زهکشی به هدایت هیدرولیکی متناظر، q_{FC} ، تعریف شد:

$$\tau_{FC} = \frac{Q_{FC}}{q_{FC}} \quad (5)$$

مدل‌سازی حرکت آب در ستون‌های خاک با حل عددی معادله یک‌بعدی ریچاردز در نرم‌افزار HYDRUS-1D و با استفاده از مدل ون‌گنوختن معلم صورت گرفت. این پژوهش، به‌عنوان یک مطالعه اثبات مفهوم^۴ در مقیاس ستون، از طرح تحقیق فرآیندگرا با ستون‌های تک‌نمونه‌ای برای هر تیمار بهره گرفت (Schindler et al., 2010). در این راستا، داده‌های سینتیک تبخیر تجمعی هر ستون به صورت مجزا به عنوان داده‌های مشاهده‌شده در نرم‌افزار HYDRUS-1D استفاده شدند (Shoaibi Nobariyan et al., 2025). ابزار تحلیلی اصلی، حل معکوس^۵ معادله ریچاردز است که امکان می‌دهد تا پارامترهای هیدرولیکی منحنی مشخصه آب و هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($\theta_r, \theta_s, \alpha, n$) برای هر تیمار و استنجی و استخراج شوند. تبخیر ابتدا بر مبنای داده‌های منحنی رطوبتی خاک شاهد کالیبره شد. عملکرد مدل شاهد در شبیه‌سازی تبخیر تجمعی با استفاده از معیارهای آماری ضریب تبیین ($-R^2$)^۶، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۷، میانگین خطا (ME)^۸، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)^۹ و میانگین سوگیری (MBE)^{۱۰}- مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اعتبار مدل در شبیه‌سازی فرآیند تبخیر در خاک شاهد، کالیبراسیون و شبیه‌سازی برای چهار تیمار خاک تیمار شده با باکتری به صورت حل معکوس بر اساس داده‌های تبخیر تجمعی اندازه‌گیری شده انجام شد تا پارامترهای منحنی رطوبتی ($\theta_s, \theta_r, \alpha, n, K_s$) برای خاک‌های تیمار شده به دست آیند (Šimůnek et al., 1980).

⁸Mean Error

⁹Mean Absolute Error

¹⁰Mean Bias Error

⁴proof- of- concept

⁵Inverse Solution

⁶Coefficient of Determination

⁷Root Mean Square Error

جزئیات محاسبات توسط Assouline و Or (۲۰۱۴) ارائه شده است.

نتایج و بحث

تبخیر تجمعی در طول دوره ۱۰ روزه برای نمونه‌های خاک با بافت‌های شنی و لوم رسی شنی در تیمارهای تلقیح باکتریایی و شاهد در شکل ۲ ارائه شده است. در همه تیمارها و هر دو بافت خاک، تبخیر تجمعی با گذشت زمان روندی صعودی و غیرخطی دارد که مطابق با الگوی کلاسیک تبخیر از خاک است و غیرخطی دارد که مطابق با الگوی کلاسیک تبخیر از خاک است (Philip, 1957; Epplein et al., 2011). این الگو معمولاً شامل سه فاز متمایز است: فاز اولیه با نرخ تبخیر ثابت، فاز دوم با نرخ تبخیر کاهشی و فاز نهایی که تبخیر در آن کم و تا حدودی ثابت بوده و توسط انتشار بخار کنترل می‌شود (Philip, 1957; Epplein et al., 2011).

معیار دینامیک ظرفیت مزرعه (FC) برآورد گردید. برای این منظور، زمان مشخصه رسیدن به ظرفیت مزرعه (t_{FC}) به گونه‌ای تعریف شد که در آن شدت زهکشی (Q) طی یک دوره ۲۴ ساعته متوالی به کمتر از $1.0/0.01$ cm کاهش یابد. برای نمایش دقیق‌تر شرایط غیراشباع، «هدایت هیدرولیکی مؤثر میانگین» (K_m) از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

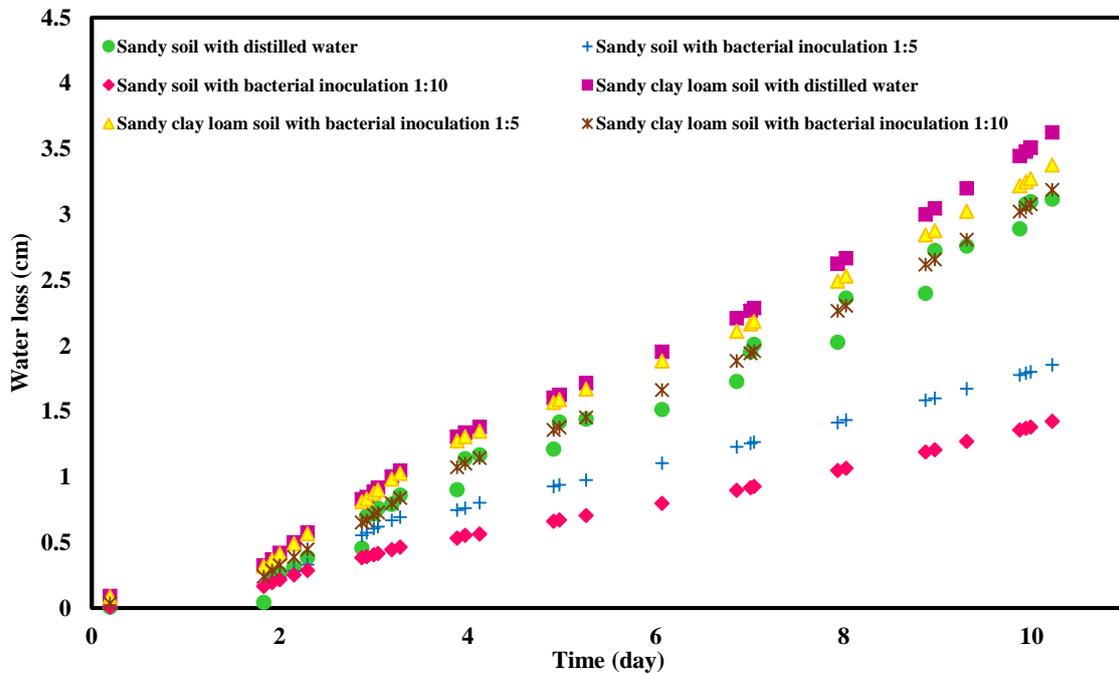
$$K_m = \frac{\int_0^1 SK(S)dS}{\int_0^1 SdS} \quad (6)$$

در نهایت، زمان دینامیک رسیدن به ظرفیت مزرعه (t_{FC}) با استفاده از نسبت حجم آب زهکشی‌پذیر تا زمان t_{FC} به هدایت هیدرولیکی متناظر تعیین گردید (Assouline and Or, 2014).

$$t_{FC} = -\frac{Q_\infty}{K_m} \ln\left(\frac{K(S_{FC})}{K_m}\right) \quad (7)$$

که در آن Q_∞ نمایانگر ذخیره‌ی اولیه‌ی آب قابل زهکشی در پروفیل خاک است.

$$Q_\infty = z(\theta_s - \theta_r) \quad (8)$$



شکل ۲- تبخیر تجمعی (سانتی متر) در طول زمان (روز) برای نمونه‌های خاک با بافت‌های مختلف (شن و لوم رسی شنی) تحت تأثیر تلقیح باکتری و آب خالص مقادیر نهایی تبخیر تجمعی در انتهای دوره آزمایش برای هر تیمار نشان داده شده است.

Figure 2. Cumulative evaporation (cm) over time (days) for soils with two textures, sand (S) and sandy clay loam (SCL), subjected to distilled water (control) and bacterial inoculation treatments. Final cumulative evaporation at the end of the experimental period is indicated for each treatment.

تیمار شاهد منجر به کاهش تبخیر تجمعی در طول دوره آزمایش شد؛ بطوری‌که در خاک شنی، تبخیر تجمعی پس از ۱۰ روز در تیمار شاهد (بدون باکتری) برابر با $3/12$ سانتی متر بود. این مقدار در تیمارهای تلقیح‌شده با باکتری به ترتیب در تیمارهای ۱:۱۰ و ۱:۵ به $1/42$ و $1/85$ سانتی متر کاهش یافت. در خاک لوم رسی شنی نیز، تبخیر تجمعی در تیمار شاهد $3/62$ سانتی متر و در تیمارهای تلقیح‌شده با غلظت‌های ۱:۱۰ و ۱:۵ به ترتیب $3/19$ و

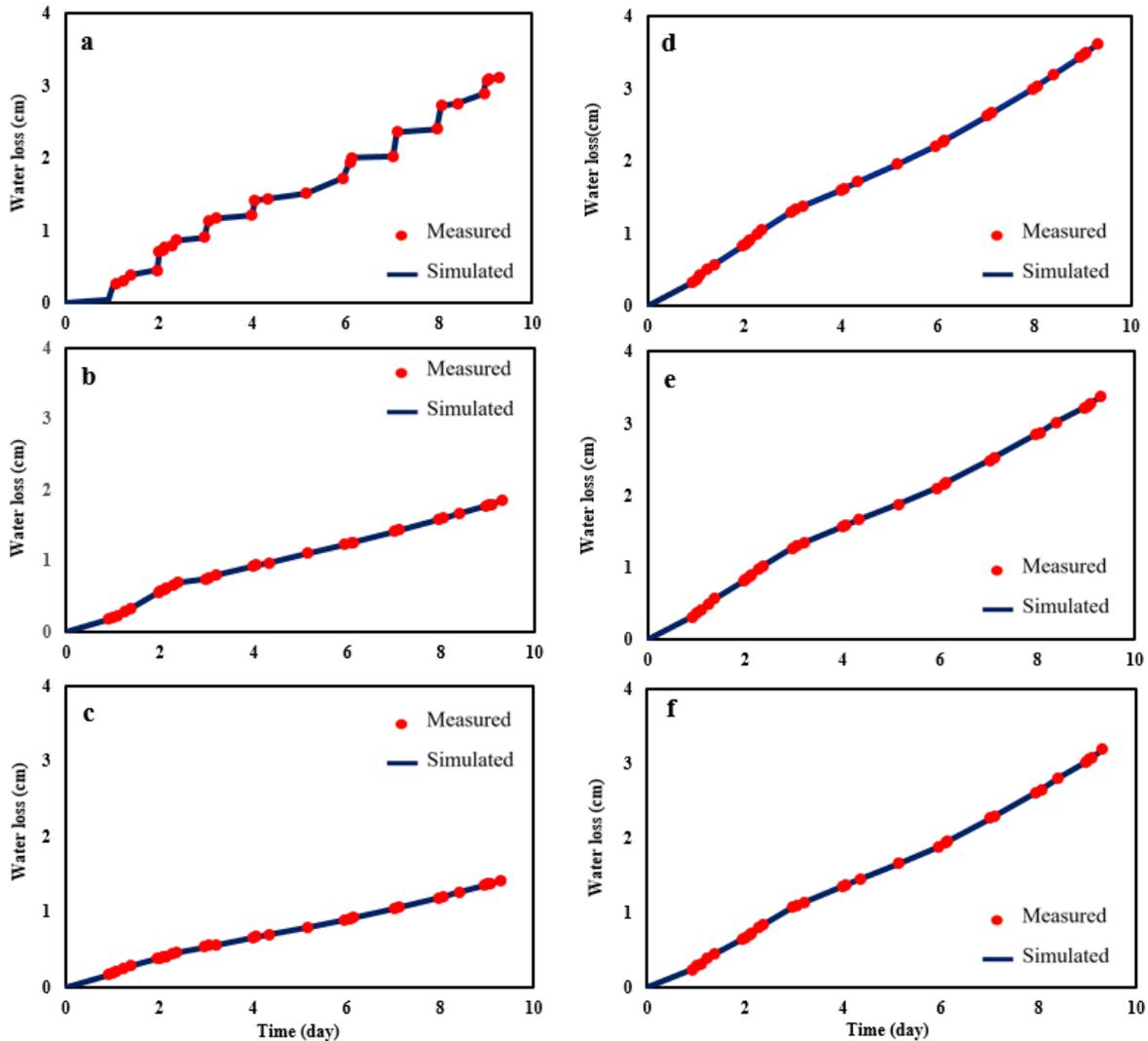
مقادیر تبخیر تجمعی در طول دوره آزمایش در (شکل ۲) نشان داده شده و مقادیر آنها در انتهای آزمایش برای هر تیمار در (جدول ۳) آمده است. تفاوت‌های مشاهده‌شده در شدت و الگوی تبخیر تجمعی (شکل ۲) را نمی‌توان صرفاً به تقاضای اتمسفری یا دسترسی آب نسبت داد، زیرا تمام ستون‌ها تحت شرایط جوی یکسان، اشباع اولیه همگن و دوره تبخیر ثابت آزمایش شدند. در هر دو خاک تیمار تلقیح باکتریایی در مقایسه با

تولید بیوپلیمرهای فعال باکتری شده و یا تشکیل فیلمی با استحکام مکانیکی کمتر را در پی داشته باشد (Cromwick et al., 2013; Birrer et al., 1994; Zhu et al., 2013). برعکس، در غلظت‌های پایین‌تر، تولید γ -PGA و EPS با کارایی بالاتری همراه است، و منجر به تشکیل فیلم بیوپلیمری مناسبی می‌شود. این امر اهمیت بهینه‌سازی غلظت تلقیح را بر اساس بافت هدف - نشان می‌دهد. کاهش تبخیر مشاهده شده می‌تواند ناشی از تشکیل این فیلم بیوپلیمری باشد که خصوصیات هیدرولیکی خاک را تعدیل می‌کند. در این مطالعه مقدار تولید EPS توسط SAM96 اندازه‌گیری نشد، ولی سایر مطالعات ظرفیت سویه‌های دیگر *Bacillus velezensis* در تولید EPS (۶/۷-۱/۴ g/l) و γ -PGA (۸۲/۴-۸۰/۷) را تأیید می‌کنند (Moghannem et al., 2018; Guo et al., 2025). شکل ۳ (f - a) - تغییرات تبخیر تجمعی اندازه‌گیری شده (نقاط قرمز) و تبخیر شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار HYDRUS-1D (خطوط آبی) را در طول ۱۰ روز برای دو بافت خاک (شنی ولوم رسی شنی) تحت سه سطح تیمار (شاهد آب خالص، تلقیح باکتریایی با نسبت ۵، و تلقیح با نسبت ۱۰) و (جدول ۳) برخی آماره‌های این شبیه‌سازی را نشان می‌دهند.

۳/۳۸ سانتی‌متر بود. در تیمارهای بدون باکتری، خاک لوم رسی شنی تبخیر تجمعی بیشتری نسبت به خاک شنی نشان داد. در خاک شنی به دلیل وجود منافذ درشت، پیوستگی هیدرولیکی سریع‌تر از بین رفته و سطح خاک زودتر خشک می‌شود (Malik et al., 1987). خاک لوم رسی دارای منافذ ریزتر با توزیع گسترده‌تری است که موجب حفظ پیوستگی موئینگی برای مدت طولانی‌تر می‌شود (Malik et al., 1987-); در نتیجه انتقال آب از عمق به سطح در این خاک استمرار داشته و موجب اتلاف بیشتر آب نسبت به خاک شنی می‌گردد (Lehmann, 2008).

تغییرات تبخیر تجمعی با جمعیت باکتری در هر دو بافت خاک نشان داد که غلظت پایین‌تر تلقیح (B1:10) اثربخشی بیشتری در کاهش تبخیر (کاهش ۱۲/۰۶ درصد در خاک لوم رسی شنی و ۵۴/۳۶ درصد در خاک شنی) نسبت به غلظت بالاتر (B1:5) با کاهش به ترتیب ۶/۸۵-درصد و ۴۰/۵۳ درصد دارد. این تغییرات که در هر دو بافت مشاهده می‌شود، ممکن است ناشی از رفتار غلظت وابسته غیرمونوتونیک^{۱۱} نسبت به تلقیح باشد- در شرایط چگالی سلولی بالا، محدودیت شدید مواد مغذی یا اکسیژن، و همچنین تجمع محصولات جانبی متابولیک سمی (مانند اسیدهای آلی) در ریز محیط، می‌تواند منجر به کاهش کارایی

¹¹non - monotonic



شکل ۳- مقایسه تبخیر تجمعی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار HYDRUS-1D در دو خاک شنی (S) و لوم رسی شنی (SCL) تحت تیمارهای مختلف: (الف) خاک شنی با آب مقطر (شاهد)، (ب) خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، (ج) خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰، (د) خاک لوم رسی شنی با آب مقطر (شاهد)، (ه) خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، (و) خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰.

Figure 3. Comparison-of measured and HYDRUS-1D-simulated cumulative evaporation-for two soil textures, sand (S) and sandy clay loam (SCL), under-different treatments: (a) sand with distilled water (control), (b) sand with inoculation 1:5, (c) sand with-inoculation 1:10, (d) sandy clay loam-with distilled water (control), (e) sandy clay loam with-inoculation 1:5, and (f) sandy clay loam-with-inoculation 1:10.

به سطح و کاهش موقت نرخ تبخیر تا زمان تأمین مجدد رطوبت است (Shokri and Or, 2013; Assouline and Or, 2013). با وجود پیچیدگی فرآیند مدل HYDRUS-1D، توانسته است این الگو را به خوبی شبیه‌سازی کند. در تیمارهای S-B1:5 و S-B1:10، شکل منحنی تبخیر در خاک شنی به‌ویژه در S-B1:10، به‌طور چشمگیری تغییر کرده و روندی نزدیک به خطی، به خود گرفته است. این رفتار با نقش فیلم سطحی حاصل از فعالیت باکتری‌ها به‌عنوان یک مقاومت نسبتاً ثابت در برابر خروج رطوبت و غلبه تدریجی کنترل انتشار بخار بر کنترل موئینگی قابل تبیین است (Zheng et al., 2018; Gutierrez et al., 2022) (جدول ۳).

همخوانی بین داده‌های اندازه‌گیری شده در (شکل ۳) و شبیه‌سازی شده تبخیر تجمعی توسط نرم‌افزار HYDRUS-1D را نشان می‌دهد. میانگین مقادیر R^2 به عنوان شاخصی از دقت برازش، MBE به عنوان معیاری برای سوگیری سیستماتیک و میانگین ME، MAE و RMSE به عنوان شاخص خطای شبیه‌سازی به ترتیب برابر با ۰/۹۹۷، ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵۱ و ۰/۰۲۴ بوده مؤید دقت مناسب در تبیین تبخیر آب از خاک است. در تیمار خاک شنی با آب خالص (S-C)، منحنی تبخیر، الگوی پله‌ای با تناوب روزانه نشان می‌دهد؛ به طوری که تبخیر در روز بالا و در شب ناچیز است. این رفتار ناشی از انتقال سریع آب موئینگی

بر عهده گرفته است (Lehmann et al., 2008). در خاک لوم رسی شنی، تلقیح خاک تغییر چندانی در فرم منحنی تبخیر ایجاد نکرد و این موضوع بر وابستگی کارایی بهسازی زیستی به ویژگی‌های بافتی و نقش پررنگ‌تر آن در خاک‌های با بافت متوسط تا سنگین دلالت دارد (Kogbara et al., 2015; Haghollahi et al., 2016).

در نتیجه، نوسانات روزانه کاهش‌یافته و تبخیر در طول زمان یکنواخت‌تر شده است (Gutierrez et al., 2022). این تغییر در شکل منحنی نشان می‌دهد که به دلیل تشکیل لایه‌ای با نفوذپذیری کمتر در سطح یا ناحیه فوقانی خاک شرایط هیدرولیکی ناحیه نزدیک سطح در خاک شنی بر اثر تلقیح باکتری به‌گونه‌ای اصلاح شده که انتقال بخار، سهم بیشتری نسبت به جریان موئین

جدول ۳- شاخص‌های آماری عملکرد مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی تبخیر تجمعی برای تیمارهای مختلف

Table 3. Statistical performance indicators of the HYDRUS-1D model for simulating cumulative evaporation under different treatments

MBE%	RMSE(cm)	MAE(cm)	ME(cm)	R ²	Treatment code کد تیمار
0.052	0.01	0.007	0.007	0.998	S-C
0.002	0.04	0.032	0.005	0.996	S-B1:5
0.002	0.024	0.197	0.019	0.997	S-B1:10
0.004	0.002	0.001	0.068	0.996	SCL-C
0.002	0.008	0.006	0.002	0.998	SCL-B1:5
0.003	0.051	0.065	0.019	0.999	SCL-B1:10
0.01	0.024	0.051	0.02	0.997	میانگین

S-C: خاک شنی با آب خالص، S-B1:5: خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، S-B1:10: خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰، SCL-C: خاک لوم رسی شنی با آب خالص، SCL-B1:5: خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، SCL-B1:10: خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰. ضریب تبیین (R²)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین سوگیری (MBE)

S-C: Sandy soil with distilled water, S-B1:5: Sandy soil with bacterial inoculation 1:5, S-B1:10: Sandy soil with bacterial inoculation 1:10, SCL-C: Sandy clay loam soil with distilled water, SCL-B1:5: Sandy clay loam soil with bacterial inoculation 1:5, SCL-B1:10: Sandy clay loam soil with bacterial inoculation 1:10. R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; MAE: mean absolute error; MBE: mean bias error.

مقادیر ویژگی‌های هیدرولیکی و نیز شکل منحنی‌های رطوبتی برآورد شده برای تیمارهای مختلف به ترتیب در (جدول ۴) و (شکل ۴) ارائه شده است.

جدول ۴- داده‌های تبخیر تجمعی تیمارهای مختلف در خاک‌های شنی و لوم رسی شنی و پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن-معلم برآورد شده با استفاده از روش حل معکوس

Table 4. Cumulative evaporation data and van Genuchten-Mualem hydraulic parameters-estimated by inverse modeling for sandy and sandy clay loam soils under different treatments

Ks cm/day	n	α (cm ⁻¹)	θ _s (cm ³ /cm ³)	θ _r (cm ³ /cm ³)	تغییرات تبخیر نسبت به تیمار	تبخیر تجمعی پس	کد تیمار
					کنترل	از یازده روز (cm) Cumulative evaporation after 11 days (cm)	
63.36	3.4	0.05	0.38	0.04	0	3.12	S-C
144	2.68	0.1	0.43	0.045	-40.53	1.85	S-B1:5
144	3	0.1	0.42	0.04	-54.36	1.42	S-B1:10
14.4	2.59	0.042	0.46	0.075	0	3.62	SCL-C
24.91	1.49	0.05	0.49	0.01	-6.85	3.38	SCL-B1:5
99.36	1.94	0.15	0.43	0.01	-12.06	3.19	SCL-B1:10

S-C: خاک شنی با آب خالص، S-B1:5: خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، S-B1:10: خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰، SCL-C: خاک لوم رسی شنی با آب خالص، SCL-B1:5: خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، SCL-B1:10: خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰

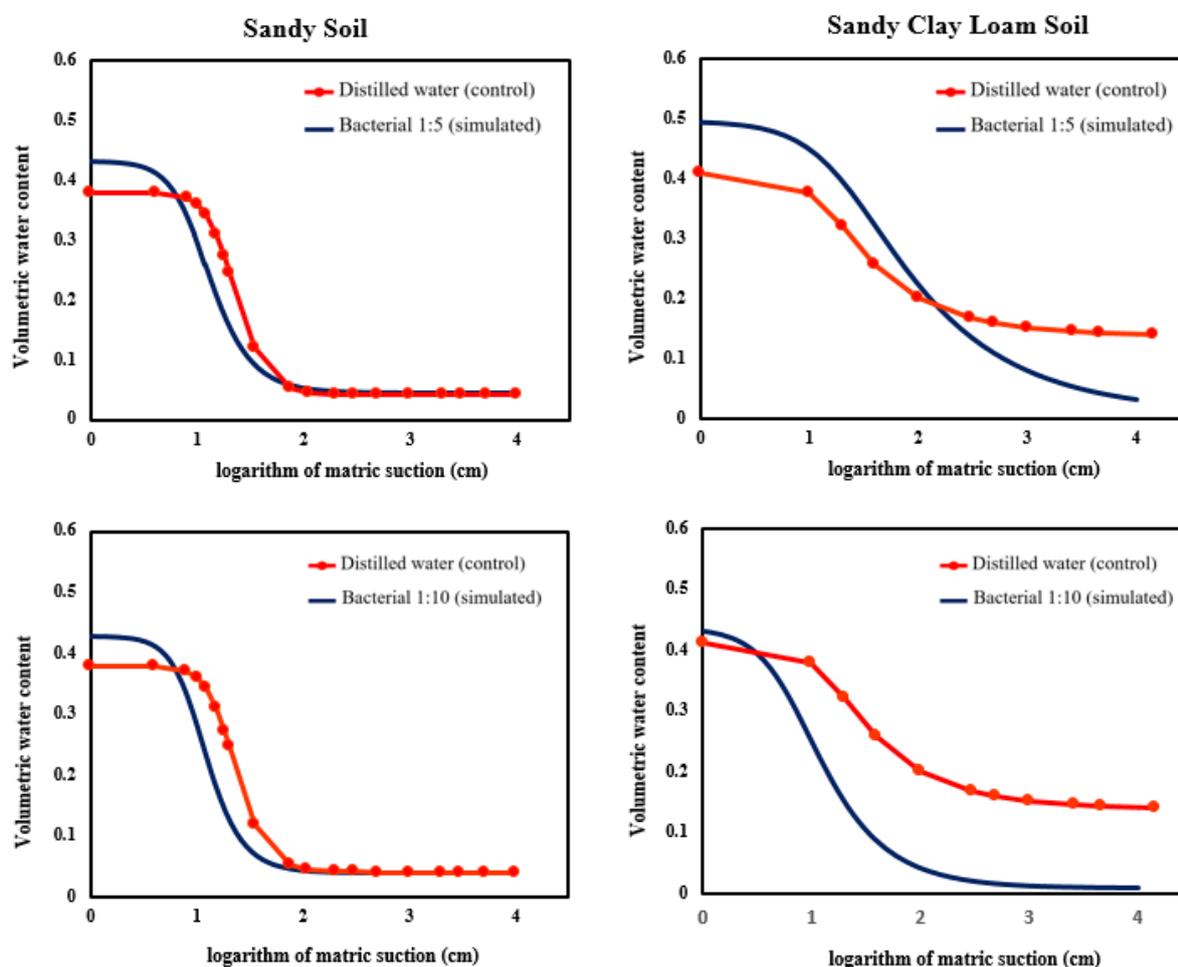
S-C: Sandy soil with distilled water, S-B1:5: Sandy soil with bacterial inoculation 1:5, S-B1:10: Sandy soil with bacterial inoculation 1:10, SCL-C: Sandy clay loam soil with distilled water, SCL-B1:5: Sandy clay loam soil with bacterial inoculation 1:5, SCL-B1:10: Sandy clay loam soil with bacterial inoculation 1:10

ساختار منفذی و نحوه تبخیر آب از خاک بوده می‌تواند مؤید افزایش خروج باشد، کاهش تبخیر در این تیمار نشان می‌دهد که احتمالاً تشکیل یک لایه سطحی با مقاومت هیدرولیکی زیاد که شار بخار را محدود کرده و پیوستگی موئینی بین سطح و زیر سطح را مختل می‌کند، نقش غالب را در کنترل تبخیر بر عهده

نرم‌افزار HYDRUS-1D با فراخوانی دینامیک تبخیر در خاک‌های تلقیح‌شده با باکتری، پارامترهای هیدرولیکی θ_r، θ_s و α برای هر تیمار برآورد نموده وضعیت جدید انتقال آب را در پی هر تغییر در ریزساختار و شبکه تخلخل خاک بازتاب می‌دهد (Šimůnek et al., 2008). در بافت شنی، افزایش α و کاهش n بیانگر دگرگونی

در خاک شنی شاهد (S-C)، منحنی تبخیر تجمعی الگوی پله‌ای و گسسته‌ای را نشان می‌دهد که با رژیم تبخیر تحت کنترل انتقال موئینگی، شامل دوره‌های فعال و غیرفعال، سازگار است (Shokri and Or, 2013; Assouline and Or, 2013; Lehmann and Or, 2009). در مقابل، در تیمارهای تلقیح شده S-B1:10 و S-B1:5، منحنی‌های تبخیر صاف‌تر و یکنواخت‌تر شده‌اند که بیانگر تضعیف نقش انتقال موئینگی و غالب شدن کنترل انتشار بخار از خلال لایه سطحی تغییر یافته است؛ این تغییر با تشکیل پوسته/بیوفیلم سطحی که پیوستگی موئینگی را مختل و به‌عنوان مانع انتشار عمل می‌کند، هم‌خوانی دارد (Lehmann et al., 2008; Lehmann and Or, 2009).

دارد (Wang et al., 2013). ولی پارامترهای برآورد شده از حل معکوس HYDRUS-1D پاسخ مؤثر کل ستون را بازتاب می‌دهند؛ به‌عبارت دیگر، سهم ناحیه سطحی و توده زیرسطحی در این پارامترها به‌صورت تجمعی وارد می‌شود و به‌طور جداگانه قابل تفکیک نیست. از آن‌جا که در این پژوهش نه اندازه‌گیری لایه‌ای رطوبت انجام شده و نه لایه سطحی به‌طور صریح در مدل تعریف شده است، امکان برآورد مستقل مقاومت هیدرولیکی پوسته سطحی وجود ندارد و نتایج صرفاً در سطح «پارامترهای مؤثر کل پروفیل» تفسیر می‌شوند، برخی مطالعات دیگر نشان داده‌اند که تفکیک کمی مقاومت سطحی نیازمند داده‌ها و مدل‌سازی لایه‌های مختلف خاک است (Iden et al., 2021).



شکل ۴- مقایسه منحنی‌های مشخصه آب-خاک (SWCC) شبیه‌سازی شده با HYDRUS-1D برای ارزیابی اثر تلقیح باکتریایی (نسبت‌های ۱:۵ و ۱:۱۰) در مقایسه با تیمار شاهد (آب مقطر) در دو بافت خاک شنی و لوم رسی شنی.

Figure 4. Comparison of soil water characteristic curves (SWCCs) simulated with HYDRUS-1D to evaluate the effect of bacterial inoculation (ratios 1:5 and 1:10) relative to the control-(distilled water) for two soil textures: sand and sandy clay loam.

به طور کلی (شکل ۴) نشان می‌دهد که تلقیح خاک بدون تغییر در بافت، سبب تغییر الگوی پاسخ نگهداری آب و انتقال آن شده و منحنی رطوبتی متناسب با سطح تیمار، جابه‌جا کرده است.

جدول ۵- خلاصه پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن-معلم و معیارهای ظرفیت مزرعه دینامیک تحت تیمارهای مختلف در دو بافت خاک

Table 5. Summary of van Genuchten-Mualem-hydraulic parameters and dynamic field capacity criteria for two soil textures under different treatments

t_{FC} day	Q_{∞} cm	k_m cm/day	τ_{FC} day	Q_{FC} cm	Ψ_{FC} cm	L_c cm	ks cm/day	کد تیمار Treatment code
0.323	5.1	8.43	0.276	3.98	36.23	26.5	63.36	S-C
0.397	5.775	9.19	0.876	4.28	21.37	17.6	144	S-B1:5
0.524	5.7	10.15	1.087	4.34	19.65	15.35	144	S-B1:10
2.349	5.775	6.01	8.133	4.24	52.33	43.75	14.4	SCL-C
3.838	7.2	1.59	1.023	3.83	87.67	85.85	24.91	SCL-B1:5
4.515	6.3	1.84	0.6	4.13	19.55	18.11	99.36	SCL-B1:10

S-C: خاک شنی با آب خالص، S-B1:5: خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، S-B1:10: خاک شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰، SCL-C: خاک لوم رسی شنی با آب خالص، SCL-B1:5: خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۵، SCL-B1:10: خاک لوم رسی شنی با تلقیح باکتریایی ۱:۱۰، ks: هدایت هیدرولیکی اشباع، L_c : طول مشخصه تبخیر- Ψ_{FC} : پتانسیل ماتریک در ظرفیت مزرعه، Q_{FC} : مقدار آب زهکشی شده در زمان رسیدن به ظرفیت مزرعه- t_{FC} : زمان مشخصه رسیدن به ظرفیت مزرعه، k_m : میانگین وزنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، Q_{∞} : مقدار آب زهکشی شده نهایی یا Q در زمان نامحدود، τ_{FC} : زمان مشخصه رسیدن به ظرفیت مزرعه

S-C: sandy soil with distilled water (control), S-B1:5: sandy soil with bacterial inoculation at a 1:5 inoculum ratio, S-B1:10: sandy soil with bacterial inoculation at a 1:10 inoculum ratio, SCL-C: sandy clay loam soil with distilled water (control), SCL-B1:5: sandy clay loam soil with bacterial inoculation at a 1:5 inoculum ratio, SCL-B1:10: sandy clay loam soil with bacterial inoculation at a 1:10 inoculum ratio, ks: saturated hydraulic conductivity, L_c : characteristic evaporation length, Ψ_{FC} : matric potential at field capacity, Q_{FC} : drained water amount at the time of reaching field capacity, t_{FC} : characteristic time to reach field capacity; k_m : weighted mean unsaturated hydraulic conductivity; Q_{∞} : asymptotic drained water (Q at infinite time).

شدن جریان زهکشی در ستون خاک است (Streltsova, 1972). در واقع خاک برای رسیدن به شرایط تعادل رطوبتی زمان بیشتری نیاز دارد (Tran et al., 2020). در خاک لوم‌رسی شنی، روند تغییرات نظم کمتری دارد. مقدار L_c از ۴۳/۷۵ در نمونه شاهد به ۱۸/۱۱ سانتی‌متر در تیمار B1:10 کاهش یافت، اما تغییرات Ψ_{FC} الگوی نوسانی نشان داد؛ از ۵۲/۳۳ در نمونه شاهد به ۸۷/۶۷ در B1:5 افزایش یافت و سپس به ۱۹/۵۵ در B1:10 کاهش یافت. این نوسان در پتانسیل آب در نقطه ظرفیت مزرعه می‌تواند بیانگر پیچیده‌تر شدن رفتارهای هیدرولیکی خاک‌های تیمار شده باشد (Dennis and Turner, 1998; Barrientos-Sanhueza et al., 2022). در این خاک نیز تیمار با باکتری موجب افزایش t_{FC} تا حدود ۴/۵ روز گردید. جمع‌بندی نتایج حاکی از آن است که تلقیح باکتریایی به طور معناداری دینامیک انتقال آب در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تأثیر که از طریق تغییرات در پارامترهای طول مشخصه تبخیر (L_c)، پتانسیل آب در ظرفیت زراعی (Ψ_{FC}) و زمان رسیدن به ظرفیت زراعی (t_{FC}) ارزیابی بوده بسته به بافت خاک متغیر است. شبیه‌سازی‌ها با HYDRUS-1D نشان داد که در طول بخش عمده‌ای از دوره آزمایش، پتانسیل ماتریک در عمق پروفیل در بازه‌ای مرطوب باقی‌مانده است، به طوری که تبخیر به طور اصلی توسط شرایط سطحی و تقاضای اتمسفر کنترل می‌شود و کمبود آب در عمق عامل محدودکننده غالب نبوده است.

هر چند پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده برای تبیین کمی تغییرات حاصل از اعمال تیمار استفاده می‌شود اما جمع‌بندی آنها در قالب شاخص‌هایی مانند طول مشخصه تبخیر (L_c)، پتانسیل ماتریک در ظرفیت مزرعه- Ψ_{FC} و زمان رسیدن به ظرفیت مزرعه (t_{FC}) می‌تواند مستقیم وضعیت رطوبتی و رفتار دینامیک آب در خاک را پس از تلقیح باکتریایی توصیف کند. جدول ۵ نشان می‌دهد در خاک شنی، افزایش سطح تلقیح از B1:5 تا B1:10 باعث کاهش L_c از ۱۷/۶ به ۱۵/۳۵ سانتی‌متر شده و بیانگر افت توانایی نیروهای موئینگی در انتقال آب به سمت سطح خاک است که منشأ آن می‌تواند تشکیل فیلم‌های پلیمری و انسداد بخشی از ماکروپورها بر اثر تولید γ -PGA باشد (Gao et al., 2018)؛ زیرا فرآیند بیوپلیمری شدن با محدودسازی مسیرهای موئینگی، تبخیر سطحی را کنترل کرده و باعث کوتاه‌تر شدن دامنه تأثیر جبهه تبخیر می‌شود (Kim et al., 2019). هم‌زمان، پتانسیل ماتریک در ظرفیت مزرعه Ψ_{FC} در همین تیمارها از ۳۶/۲۳ به ۱۹/۶۵ سانتی‌متر کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده جابه‌جایی منحنی مشخصه آب-خاک به سمت رطوبت‌های کمتر است؛ وضعیتی که در آن خاک تیمار شده در مکش‌های بالاتر، آب کمتری را نگه می‌دارد. در مقابل، تلقیح خاک باعث شد زمان مشخصه رسیدن به ظرفیت مزرعه (t_{FC}) از ۰/۳۹۷ روز در تیمار شاهد به ۰/۵۲۴ روز در سطح B1:10-افزایش یابد که بیانگر کندتر

ظرفیت نگهداری آب در توده خاک است (Kaniz et al., 2023; Assouline and Or, 2014). با این حال، به دلیل عدم اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های فیزیکی سطح خاک (مانند آزمون‌های تصویربرداری یا مکانیکی)، وجود و ماهیت لایه سطحی صرفاً بر پایه شواهد هیدرولیکی استنباط شده و نیازمند بررسی‌های تجربی در آینده است.

باید تأکید شود که نتایج و استنتاج‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش صرفاً در مقیاس آزمایشگاهی کنونی و تحت شرایط کنترل‌شده (نوع خاک‌های شنی و لوم رسی شنی، اندازه ستون‌های آزمایش و غلظت‌های باکتری استفاده‌شده) معتبر هستند. تغییر در هر یک از پارامترهای آزمایشگاهی، از جمله تغییر مقیاس از آزمایشگاهی به مزرعه‌ای، تغییر نوع بافت خاک تغییر اندازه ستون‌های آزمایشی، یا تغییر غلظت و نژاد باکتری می‌تواند منجر به نتایج متفاوتی شود. از این رو، تعمیم دقیق این یافته‌ها به شرایط مزرعه‌ای و اکوسیستم‌های مختلف نیازمند مطالعات تکمیلی است. به طور کلی، این پژوهش به‌عنوان یک مطالعه اثبات مفهومی در مقیاس ستون نشان داد که تلقیح *Bacillus velezensis* می‌تواند از طریق سازوکارهای فیزیکی و میکروبی مؤثر، موجب کاهش چشمگیر تبخیر از خاک‌های شنی و تا حدودی از خاک‌های لوم‌رسی شنی شود. شاخص‌های هیدرودینامیکی مورد استفاده در این مطالعه از جمله L_c ، Ψ_{fc} ، Q_{fc} ، t_{fc} و Q_{∞} و km همگی توسط HYDRUS-YD و حل معکوس برآورد شده‌اند و بنابراین، تحلیل‌های ارائه‌شده از نظر مفهومی به مدل وابسته‌اند و «مستقل از مدل‌سازی» تلقی نمی‌شوند. نقش HYDRUS-YD ایجاد پیوندی سازگار بین داده‌های تبخیر تجربی و تفسیر ساز و کار تغییرات آن بر اساس خصوصیات هیدرولیکی خاک است. یکی از محدودیت‌های مهم این پژوهش، عدم پایش مستقیم حرکت و استقرار *Bacillus velezensis* و پلیمرهای آن در طول ستون در حین اشباع‌سازی از پایین است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از ردیاب‌های میکروبی/فلورسنت یا روش‌های تصویربرداری پیشرفته برای مشخص کردن پروفیل عمقی و دینامیک حرکت باکتری‌ها استفاده شود.

بر این اساس، کاهش تبخیر در تیمارهای تلقیح‌شده عمدتاً به تغییر ویژگی‌های هیدرولیکی ناحیه نزدیک سطح، از جمله کاهش طول مشخصه تبخیر (Lc) و افزایش مقاومت موئینگی ناشی از تشکیل لایه‌های بیوفیلم و پلیمرهای برون‌سلولی، نسبت داده می‌شود (Volk et al., 2016).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر تلقیح باکتری *Bacillus velezensis* بر تبخیر از سطح دو نمونه کوچک ستون خاک شنی و لوم رسی شنی و مدل‌سازی تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-ID انجام شد. نتایج نشان داد تلقیح خاک با این باکتری منجر به کاهش تبخیر تجمعی ده روزه به میزان ۵۴/۳۶ درصد و ۱۲/۰۶ درصد به ترتیب نسبت به تیمار شاهد گردید. این تغییر می‌تواند ناشی از تشکیل یک پوسته سطحی سیمانی‌شده با مقاومت هیدرولیکی بالا ناشی از تولید PGA- γ که به طور مؤثر پیوستگی منافذ موئینه را مختل می‌نماید، باشد (Gao et al., 2024). به‌طور خاص، پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی با ایجاد یک لایه با مقاومت هیدرولیکی بالا نزدیک سطح خاک، اتصال هیدرولیکی را مختل کرده و رژیم تبخیری را از حالت موئینگی محور به حالت انتشار بخار تغییر می‌دهند (Lehmann و همکاران، ۲۰۰۸). این تغییر رژیم خصوصاً در خاک‌های شنی بیشتر نمایان است که تحت شرایط بدون تلقیح کاملاً به تداوم موئینگی وابسته‌اند. با وجود تفسیر فوق، باید در نظر داشت که بخشی از تغییر در الگوی تبخیر می‌تواند ناشی از تفاوت‌های رئولوژیکی و شیمیایی محلول تلقیح نسبت به آب خالص باشد؛ در این مطالعه تمرکز بر اثر ترکیبی باکتری و پلیمرهای آن بوده و تفکیک کمی نقش دقیق محیط کشت و گرانروی محلول به‌عنوان یک محدودیت مطرح است که نیازمند کنترل‌های اختصاصی در پژوهش‌های آتی است. تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده مبین تبخیر، نشان داد تلقیح خاک شنی با باکتری موجب کاهش پتانسیل ماتریک در ظرفیت مزرعه (Ψ_{fc}) و افزایش زمان مشخصه رسیدن به ظرفیت مزرعه (tfc) می‌گردد که بیانگر کاهش سرعت خروج آب و افزایش

References

1. Reassouline, S. and Or, D. 2013. 'Conceptual and parametric representation of soil hydraulic properties: A review'. *Vadose Zone Journal*, 12(4), vzj2013-07. doi:10.2136/vzj2013.07.0121
2. Assouline, S. and Or, D. 2014. 'The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics'. *Water Resources Research*, 50(6), pp. 4787–4802. doi:10.1002/2014WR015475
3. B Kogbara, R., Ayotamuno, M. J., Worlu, D. C. and Fubara-Manuel, I. 2015. 'A case study of petroleum degradation in different soil textural classes'. *Recent Patents on Biotechnology*, 9(2), pp. 108–115. doi:10.2174/2211550105666151110203337
4. Bangira, C. 2018. 'Food security as a water grand challenge'. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 165(1), pp. 59–66. doi:10.1111/j.1936-704X.2018.03293.x
5. Barrientos-Sanhueza, C., Cargnino-Cisternas, D., Díaz-Barrera, A. and Cuneo, I. F. 2022. 'Bacterial alginate-based hydrogel reduces hydro-mechanical soil-related problems in agriculture facing climate change'. *Polymers*, 14(5), 922. doi:10.3390/polym14050922
6. Birrer, G. A., Cromwick, A. M. and Gross, R. A. 1994. 'γ-Poly(glutamic acid) formation by *Bacillus licheniformis* 9945a: physiological and biochemical studies'. *International Journal of Biological Macromolecules*, 16(5), pp. 265–275. doi:10.1016/0141-8130(94)90032-9
7. Carles Brangari, A., Sanchez-Vila, X., Freixa, A., M. Romani, A., Rubol, S. and Fernández-García, D., 2017. A mechanistic model (BCC-PSSICO) to predict changes in the hydraulic properties for bio-amended variably saturated soils. *Water Resources Research*, 53(1), pp.93-109. <https://doi.org/10.1002/2015WR018517>.
8. Carminati, A., Moradi, A. B., Vetterlein, D., Vontobel, P., Lehmann, E., Weller, U., Vogel, H. J. and Oswald, S. E. 2010. 'Dynamics of soil water content in the rhizosphere'. *Plant and Soil*, 332(1), pp. 163–176. doi:10.1007/s11104-010-0283-8
9. Chamizo, S., Cantón, Y., Domingo, F. and Belnap, J. 2013. 'Evaporative losses from soils covered by physical and different types of biological soil crusts'. *Hydrological Processes*, 27(3), pp. 324–332. doi:10.1002/hyp.8421
10. Chenu, C. 1993. 'Clay—or sand—polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure'. *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships*, pp. 143–156. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-81490-6.50016-9
11. Cromwick, A. M., Birrer, G. A. and Gross, R. A. 1996. 'Effects of pH and aeration on γ-poly (glutamic acid) formation by *Bacillus licheniformis* in controlled batch fermentor cultures'. *Biotechnology and Bioengineering*, 50(2), pp. 222–227. doi:10.1002/(SICI)1097-0290(19960420)50:2<222::AID-BIT10>3.0.CO;2-P
12. Czarnes, S., Hallett, P. D., Bengough, A. G. and Young, I. M. 2000. 'Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport'. *European Journal of Soil Science*, 51(3), pp. 435–443. doi:10.1046/j.1365-2389.2000.00327.x
13. Dane, J. H. and Topp, C. G. (eds.) 2020. *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. John Wiley & Sons.
14. de Souza, M., Koo-Oshima, S., Kahil, T., Wada, Y., Qadir, M., Jewitt, G., Cudennec, C., Uhlenbrook, S. and Zhang, L., 2021. Food and agriculture.
15. Dennis, M. L. and Turner, J. P. 1998. 'Hydraulic conductivity of compacted soil treated with biofilm'. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2), pp. 120–127. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:2(120)
16. Dettmann, U., Bechtold, M., Viohl, T., Piayda, A., Sokolowsky, L. and Tiemeyer, B. 2019. 'Evaporation experiments for the determination of hydraulic properties of peat and other organic soils: An evaluation of methods based on a large dataset'. *Journal of Hydrology*, 575, pp. 933–944. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.088
17. Diallo, M.C.A., Santos, R.C., Gomes, E.P., Machado, C.A.C., Dias, C.R.A., Dos Santos, E.C., Padilha, G.A.C., Belarmino, M.D., Galiasso, M., Riffel, A.S. and Da Silva, E.A.S., 2024. Challenges of smart irrigation implementation in water optimization and agricultural sustainability. *Contribuciones A Las Ciencias Sociales*, 17(13), p.E13723. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-270>
18. Epplein, M., Zheng, Y., Zheng, W., Chen, Z., Gu, K., Penson, D., Lu, W. and Shu, X. O. 2011. 'Quality of life after breast cancer diagnosis and survival'. *Journal of Clinical Oncology*, 29(4), pp. 406–412. doi:10.1200/JCO.2010.30.6951
19. Felde, V. J., Drahorad, S. L., Felix-Henningsen, P. and Hoon, S. R. 2018. 'Ongoing oversanding induces biological soil crust layering: A new approach for biological soil crust structure elucidation determined from high resolution penetration resistance

- data'. *Geoderma*, 313, pp. 250–264. doi:10.1016/j.geoderma.2017.11.022
20. Gao, S., Zhang, X., Wang, S., Fu, Y., Li, W., Dong, Y., Li, Y. and Dai, Z. 2024. 'Multifactorial analysis of the effect of applied gamma-polyglutamic acid on soil infiltration characteristics'. *Polymers*, 16(20), 2890. doi:10.3390/polym16202890
21. Giovanna, D., Soumiya, C., Francesca, M., Valentina, R., Redouane, C. A., Oqbit, W. A. and Sara, B. 2024. 'Inoculating plant growth-promoting bacteria: Effects on soil hydraulic properties and tomato root development under water stress conditions'. *Agriculture and Food Sciences Research*, 11(1), pp. 15–29. doi:10.20448/aesr.v11i1.5359
22. Glick, B. R. 2012. 'Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications'. *Scientifica*, 2012(1), 963401. doi:10.6064/2012/963401
23. Guo, Y. S., Furrer, J. M., Kadilak, A. L., Hinestroza, H. F., Gage, D. J., Cho, Y. K. and Shor, L. M. 2018. 'Bacterial extracellular polymeric substances amplify water content variability at the pore scale'. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 93. doi:10.3389/fenvs.2018.00093
24. Gutierrez, M. M., Cameron-Harp, M. V., Chakraborty, P. P., Stallbaumer-Cyr, E. M., Morrow, J. A., Hansen, R. R. and Derby, M. M. 2022. 'Investigating a microbial approach to water conservation: Effects of *Bacillus subtilis* and surfactin on evaporation dynamics in loam and sandy loam soils'. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 959591. doi:10.3389/fsufs.2022.959591
25. Hillel, D. 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier.
26. Hodson, T. O. 2022. 'Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not'. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2022, pp. 1–10. doi:10.5194/gmd-15-5481-2022
27. Iden, S. C., Blöcher, J. R., Diamantopoulos, E. and Durner, W. 2021. 'Capillary, film, and vapor flow in transient bare soil evaporation (1): Identifiability analysis of hydraulic conductivity in the medium to dry moisture range'. *Water Resources Research*, 57(5), e2020WR028513. doi:10.1029/2020WR028513
28. Kaniz, F., Zheng, W., Bais, H. and Jin, Y. 2023. 'Plant growth-promoting rhizobacteria mediate soil hydro-physical properties: An investigation with *Bacillus subtilis* and its mutants'. *Vadose Zone Journal*, 22(5), e20274. doi:10.1002/vzj2.20274
29. Kim, D. O., Rokoni, A., Kaneelil, P., Cui, C., Han, L. H. and Sun, Y. 2019. 'Role of surfactant in evaporation and deposition of bisolvent biopolymer droplets'. *Langmuir*, 35(39), pp. 12773–12781. doi:10.1021/acs.langmuir.9b01705
30. Lehmann, P. and Or, D. 2009. 'Evaporation and capillary coupling across vertical textural contrasts in porous media'. *Physical Review E*, 80(4), 046318. doi:10.1103/PhysRevE.80.046318
31. Lehmann, P., Assouline, S. and Or, D. 2008. 'Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media'. *Physical Review E*, 77(5), 056309. doi:10.1103/PhysRevE.77.056309
32. Lehmann, P., Merlin, O., Gentine, P. and Or, D. 2018. 'Soil texture effects on surface resistance to bare-soil evaporation'. *Geophysical Research Letters*, 45(19), pp. 10398–10406. doi:10.1029/2018GL078803
33. Lei, Q., Tao, W., Yang, F., Liu, J., Xi, Z., Wang, Q. and Deng, M. 2025. 'Effects of coupled application of magnetoelectric activated water and amendments on photosynthetic physiological characteristics and yield of maize in arid regions'. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1497806. doi:10.3389/fpls.2024.1497806
34. Malik, R. S., Butter, B. S., Anlauf, R. and Richter, J. 1987. 'Water penetration into soils with different textures and initial moisture contents'. *Soil Science*, 144(6), pp. 389–393.
35. Moghannem, S.A., Farag, M.M., Shehab, A.M. and Azab, M.S., 2018. Exopolysaccharide production from *Bacillus velezensis* KY471306 using statistical experimental design. *brazilian journal of microbiology*, 49(3), pp.452-462. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.05.012>
36. Moradi, R., Haghverdi, A. and Farzam, M. 2021. 'Sustainable water management in agriculture: A review of challenges and opportunities'. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125026.
37. Muñoz-Castelblanco, J. A., Pereira, J. M., Delage, P. and Cui, Y. J. 2012. 'The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France'. *Géotechnique*, 62(2), pp. 95–106. doi:10.1680/GEOT.9.P.084
38. Orr, H. K. 1960. 'Soil porosity and bulk density on grazed and protected Kentucky bluegrass range in the Black Hills'. *Journal of Range Management*, 13(2), pp. 80–86. doi:10.2307/3895129
39. Philip, J. R. 1957. 'Evaporation, and moisture and heat fields in the soil'. *Journal of Atmospheric Sciences*, 14(4), pp. 354–366. doi:10.1175/1520-0469(1957)014<0354:EAMAHF>2.0.CO;2

40. Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S. and Gerten, D. 2009. 'Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change'. *Water Resources Research*, 45(7), W00A12. doi:10.1029/2007WR006767
41. Rosenzweig, R., Shavit, U. and Furman, A. 2012. 'Water retention curves of biofilm-affected soils using xanthan as an analogue'. *Soil Science Society of America Journal*, 76(1), pp. 61–69. doi:10.2136/sssaj2011.0155
42. Rothfuss, Y., Merz, S., Vanderborght, J., Hermes, N., Weuthen, A., Pohlmeier, A., Vereecken, H. and Brüggemann, N. 2015. 'Long-term and high-frequency non-destructive monitoring of water stable isotope profiles in an evaporating soil column'. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), pp. 4067–4080. doi:10.5194/hess-19-4067-2015
43. Schindler, U., Durner, W., von Unold, G. and Müller, L. 2010. 'Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: Extending the measurement range'. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), pp. 1071–1083. doi:10.2136/sssaj2008.0358
44. Sharma, S., Yost, M.A. and Reeve, J.R., 2025. Roles of Organic Agriculture for Water Optimization in Arid and Semi-Arid Regions. *Sustainability*, 17(12), p.5452. <https://doi.org/10.3390/su17125452>
45. Shi, Y., Feng, X., Sun, Z., Zhang, B. and Li, C. 2025. 'Issues on microbial soil remediation: a case of Cd detoxification by Bacillus strains for alleviating heavy metal stress in crop plants'. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1665354. doi:10.3389/fmicb.2025.1665354
46. Shoaibi Nobariyan, M. R. and Mohammadi, M. H. 2025. 'The role of soil water solutes type on changes in evaporation intensity from sandy and clayey soils'. *Journal of Water and Soil Science (Isfahan University of Technology)*, 29(2), pp. 199–214. (in Persian)
47. Shokri, N. and Or, D. 2013. 'Drying patterns of porous media containing wettability contrasts'. *Journal of Colloid and Interface Science*, 391, pp. 135–141.
48. Šimůnek, J., Köhne, J. M., Kodešová, R. and Šejna, M. 2008. 'Simulating non-equilibrium movement of water, solutes, and particles using HYDRUS: A review of recent applications'. *Soil and Water Research*, 3(1), pp. S42–S51.
49. Sparks, D. L. (ed.) 1998. Soil Physical Chemistry. CRC Press.
50. Streltsova, T. D. 1972. 'Unconfined aquifer and slow drainage'. *Journal of Hydrology*, 16(2), pp. 117–124. doi:10.1016/0022-1694(72)90117-5
51. Tran, T. P., Cho, G. C. and Ilhan, C. 2020. 'Water retention characteristics of biopolymer hydrogel containing sandy soils'. Hue University Journal of Science: *Earth Science and Environment*, 129(4A). doi:10.26459/hueuni-jese.v129i4a.5652
52. van Genuchten, M. T. 1980. 'A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils'. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892–898. doi:10.2136/sssaj1980.0361599500440005002x
53. Van Genuchten, M.T., Leij, F.J. and Yates, S.R., 1992. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
54. Volk, E., Iden, S.C., Furman, A., Durner, W. and Rosenzweig, R., 2016. Biofilm effect on soil hydraulic properties: Experimental investigation using soil-grown real biofilm. *Water Resources Research*, 52(8), pp.5813–5828. <https://doi.org/10.1002/2016WR018866>.
55. Wang, Y., Ma, J., Zhang, Y., Zhao, M. and Edmunds, W. M. 2013. 'A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated porous media'. *Water Resources Research*, 49(8), pp. 5021–5028. doi:10.1002/wrcr.20390
56. Zhao, Y., Wang, H., Song, B., Xue, P., Zhang, W., Peth, S., Hill, R. L. and Horn, R. 2023. 'Characterizing uncertainty in process-based hydraulic modeling, exemplified in a semiarid Inner Mongolia steppe'. *Geoderma*, 440, 116713. doi:10.1016/j.geoderma.2023.116713
57. Zheng, W., Zeng, S., Bais, H., LaManna, J. M., Hussey, D. S., Jacobson, D. L. and Jin, Y. 2018. 'Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) reduce evaporation and increase soil water retention'. *Water Resources Research*, 54(5), pp. 3673–3687. doi:10.1029/2018WR022656
58. Zhu, F., Cai, J., Wu, X., Huang, J., Huang, L., Zhu, J., Zheng, Q., Cen, P. and Xu, Z. 2013. 'The main byproducts and metabolic flux profiling of γ -PGA-producing strain *B. subtilis* ZJU-7 under different pH values'. *Journal of Biotechnology*, 164(1), pp. 67–74. doi:10.1016/j.jbiotec.2012.12.009