نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۸، مرداد - شهریور ۱۴۰۳، ص. ۵۰۱-۴۸۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 18, Aug.-Sep. 2024, p. 489-501

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی اثر زئولیت بر حجم آب زهکشی و تبخیر از سطح یک خاک لومی شنی

معصومه شادان[۱]، جواد بهمنش [۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

چکیده

در این تحقیق اثر زئولیت بر تبخیر از سطح خاک و حجم زه‌آب خروجی در خاک لوم شنی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از مدل HYDRUS-2D جهت شبیه‌سازی تبخیر و زه‌آب استفاده و داده‌های مورد نیاز با انجام آزمایش‌های گلدانی جمع‌آوری گردید. تیمارهای مورد مطالعه شامل چهار سطح (صفر، ۵ و ۱۰ و ۱۵ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک) بود. ۴ دور آبیاری براساس رطوبت سهل‌الوصل صورت گرفت و مقادیر رطوبت خاک قبل و بعد آبیاری، با استفاده از رطوبت‌سنج در جهت عمقی و شعاعی اندازه‌گیری و به مدت ۴۵ روز ثبت گردید. مقدار اولیه تبخیر و حجم زه‌آب به ترتیب با استفاده از معادله بیلان آبی و اندازه‌گیری زه‌آب خروجی از گلدان در هر مرحله مشخص شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار زئولیت مقادیر تبخیر از سطح خاک و حجم زه‌آب در تیمار ۱۵ گرم زئولیت نسبت به شاهد به‌ترتیب٪ ۱۷/۱۱ و ٪۲۰/۶ درصد کاهش یافت. ضریب تعیین (R^2) برای شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D با در محدوده ۰/۹۰ تا ۰/۹۳ متغیر بود. مقدار ضریب کارایی مدل (EF) که نشان دهنده کیفیت و چگونگی برازش داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد نیز برای تبخیر بین ۰/۵۹ تا ۰/۹۸ و برای حجم زه‌آب بین ۰/۸۶ تا ۰/۹۲ متغیر بود که نشان دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر، حجم زه‌آب، زئولیت، نرم افزار HYDRUS-2D

مقدمه

کمبود روزافزون منابع آبی که منجر به کاهش سهم کشاورزی و سرازیر شدن این منابع به بخش‌های دیگر مثل شرب و صنعت می‌شود باعث عدم استفاده از منابع موجود با راندمان حداکثر می‌گردد. یکی از راهکارهای موجود برای کاهش مصرف آب استفاده از مواد سوپرجاذب رطوبت جهت جلوگیری از اتلاف و افزایش راندمان آبیاری است (Armandpisheh et al., 2009). به منظور کاهش اثرات زیست محیطی استفاده از نیتروژن، زئولیت می‌تواند بازده مصرف نیتروژن را به حداکثر برساند. در ضمن استفاده از زئولیت باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب شده و این می‌تواند راندمان مصرف آب را افزایش و در نتیجه آبیاری خاک کاهش می‌یابد (Hatfield and Prueger, 2004; Szatanik-Kloc et al., 2021). بنابراین روش‌های کاهش حجم زه‌آب و تبخیر آب از خاک از اهمیت ویژه‌ای در جهت کاهش مصرف آب و حفظ رطوبت خاک برخوردار است تا فرصت بیشتری برای استفاده از آب برای گیاه فراهم شود (Choudhary et al., 1995; Torres, 2016).

استفاده از پلیمرها باعث افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت آب در خاک و کاهش تبخیر می‌شود (Mumpton, 1999;Jakkula and Wani, 2018). زئولیت‌ها ترکیبات معدنی طبیعی یا مصنوعی هستند که در یک ساختار کریستالی سه‌بعدی با شبکه‌ای باز و بسیار متخلخل که باعث افزایش سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شوند (Jarosz et al., 2022; McGilloway et al., 2003). با توجه به ویژگی‌های زئولیت استفاده از آن‌ها، با کاربرد متعدد در زمینه‌های مختلف کشاورزی به دلیل سازگاری بیشتر با محیط زیست و بهبود خواص خاک به سرعت در حال افزایش است (Golamhoseni et al., 1392; Sangeetha and Baskar, 2016).

در دهه‌های گذشته، تحقیقات مختلفی برای بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش نگهداری آب، کاهش مصرف آب و شستشوی مواد مغذی به آب‌های زیرزمینی متمرکز شده است (Montemurro and Diacono, 2010; Resasco et al., 2021؛ Soudejani et al., 2019). در خاک‌های شنی، افزودن مواد آلی می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی را با کاهش فضاهای بزرگ، آب و سرعت شستشوی مواد مغذی تغییر دهد (Blanco-Canqui and Lal, 2009) و در نتیجه ظرفیت نگهداری آب در آن خاک‌ها افزایش می‌یابد. لذا بهبود ساختار

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

خاک باعث افزایش مقدار رطوبت و مواد غذایی و در نتیجه افزایش تولید محصول خواهد شد (Samreen et al., 2017). زئولیت‌ها بدلیل تخلخل بالا و ساختار قفسه‌مانندشان قادرند بیش از ۶۰ درصد وزنی خود، آب را نگهداری کنند. مولکول‌های آب می‌توانند بدون اینکه باعث خرابی در ساختار زئولیت شوند تبخیر شده و مجددا جذب شوند. آب ذخیره شده در شبکه به‌تدریج جذب گیاه می‌شود. بنابراین از زئولیت‌ها به عنوان یک مخزن مطمئن آب برای دوره‌های خشکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از زئولیت می‌تواند رطوبت خاک را برای مدت بیشتری حفظ و در اختیار گیاه قرار دهد (Szerement et al., 2014; Colombani et al., 2014).

مدل HYDRUS-2D که توسط سیمیونک و همکاران (Simunek et al., 1999) ارائه شده است، یک مدل تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل جریان آب، انتقال املاح و گرما در شرایط دو بعدی بوده و قادر به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس می‌باشد. در این مدل برای حل عددی معادلات حاکم، از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ-مارکوارت استفاده شده است (Marquardt, 1963). مدل HYDRUS درمطالعات فراوان آزمایشگاهی و مزرعه‌ای برای شبیه‌سازی رطوبت و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Siyal and Skaggs, 2009). مطالعات بسیاری از نرم‌افزار HYDRUS برای بررسی تاثیر زئولیت بر پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده شده است. در میان آن‌ها تعدادی از محققین در بررسی شبیه‌سازی تاثیر زئولیت بر رطوبت از مدل HYDRUS (Ibrahim and Alghamdi, 2021; Soudejani et al., 2020; Colombani al., 2014; Piñón-Villarreal et al., 2017) و تاثیر زئولیت بر پارامترهای انتقال املاح در خاک‌های مختلف (Fooladi Dorhani and Sepaskhah, 2023; Mazloomi and Jalali, 2019) استفاده کرده‌اند.

شادوکس در مطالعه‌ای بیان کرد که خاک خاک ترکیب شده با زئولیت میزان نگهداشت رطوبت را ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش داده است و رطوبت خاک را در شرایط خشکسالی ۴/۰-۸/۱ و در شرایط طبیعی ۱۵-۵ درصد افزایش داده است همچنین با توجه به شرایط خاک، مقدار تبخیر به بافت خاک، مقدار رطوبت اولیه، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت نگهداشت آب، وضعیت زه‌آب و بستگی دارد (Shaddox, 2004).

آل‌بوسعیدی و همکاران در پژوهشی زئولیت را در آبیاری زیر سطحی به‌کار برده و ایشان گزارش کردند که کاربرد زئولیت به طور قابل توجهی ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش داده و رشد گیاه را بهبود می‌بخشد. همچنین آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که، استفاده از زئولیت همراه با آبیاری زیرسطحی ممکن است شرایط مطلوبی را برای تولید محصولات زراعی در مناطق کم آب و تحت محیط‌های گرم فراهم کند (AL-Busaidi, et al., 2011). تورز در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر زئولیت بر منحنی مشخصه رطوبتی و کنترل شوری پرداخت. مطالعات او نشان داد که زئولیت در مقایسه با خاک‌های تیمار نشده در آزمایشگاه و همچنین آزمایش‌های بیرونی، می‌تواند میزان آب ذخیره‌شده در خاک را افزایش دهد (Torres, 2016). شهرکی و همکاران تأثیر مواد اصلاح‌کننده شامل سوپرجاذب بلور آب، ورمی‌کمپوست و بقایای جو را بر میزان تبخیر و رطوبت خاک در شرایط گلخانه بررسی نمودند و نتیجه گرفتند اختلاف معنی‌داری بین سه مواد اصلاح‌کننده در میزان تبخیر وجود نداشت (شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵).

بهزادفر و همکاران در تحقیقی تأثیر میزان و زمان کاربرد زئولیت را بر کنترل تولید رواناب و اتلاف خاک تحت چرخه‌ی انجماد و ذوب بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که استفاده از زئولیت به عنوان یک اصلاحی معدنی برای کنترل فرسایش خاک در مراتع شیب‌دار و تخریب شده که خاک سطحی در معرض بارندگی و رواناب است موثر می‌باشد (Behzadfar et al., 2017). در تحقیق حیدریان تقدیسی و همکاران نشان داد که افزایش سطح زئولیت باعث افزایش درصد رطوبت اشباع خاک می‌شود.آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که خاک‌های سبک توانایی ذخیره و نگهداری رطوبت کمی داشته و اضافه کردن سوپرجاذب (زئولیت) به خاک علاوه بر این که ظرفیت نگهداری آب در این خاک‌ها را افزایش میدهد از میزان تبخیر آب در خاک کاسته خواهد شد (Heydarian Taghdisi et al., 2018).

امانی دشتکی و همکاران تاثیر ورمی‌کولایت، بنتونیت و زئولیت بر میزان تبخیر و منحنی مشخصه رطوبتی خاک را بررسی کردند. یافته-های نتایج آنان نشان داد که در بین سه ماده مورد بررسی بیشترین میزان کاهش در تبخیر از خاک مربوط به بنتونیت می‌باشد. دو اصلاح‌کننده ورمی‌کولیت و زئولیت نیز تبخیر را بصورت معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد کاهش داده ولی نسبت به هم تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. نتایج میزان رطوبت خاک در تیمارها برعکس نتایج تبخیر بود. در تیمارهایی که میزان تبخیر کمتر بود رطوبت خاک افزایش یافته بود. با توجه به تاثیر معنی‌دار سه اصلاح‌کننده مورد بررسی بر میزان رطوبت خاک، منحنی رطوبتی خاک نیز در تیمارهای مورد بررسی نسبت به شاهد دچار تغییر شده بودند. ایشان خاطر نشان کردند که بیشترین مقدار تاثیر بر کاهش تبخیر و افزایش رطوبت خاک، مربوط به بنتونیت ۲ درصد بود. بنابراین آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که می‌توان این ماده را برای کاهش تبخیر از خاک با بافت لومی توصیه نمود (امانی دشتکی و همکاران، ۱۴۰۰).

در مطالعه‌ای دیگر، یاری زاده و همکاران تاثیر زئولیت بر افزایش مقدار تبخیر در حوضچه‌های تبخیری بررسی کردند. ایشان گزارش کردند که در صورت استفاده از مقادیر متفاوت زئولیت از ۴۳/۸ تا

۵۱۵/۱ گرم در هر مترمربع حوضچه‌های تبخیری همراه با آب معمولی، مقدار تبخیر از ۴ تا ۲۲ درصد نسبت به شرایط عدم استفاده از زئولیت افزایش می‌یابد. ایشان دلیل این امر را در افزایش انرژی جذب شده خورشیدی در اثر استفاده از رئولیت برشمردند. همچنین آن‌ها تأثیر شوری آب بر مقدار تبخیر در شرایط استفاده از زئولیت را بررسی کردند که مشخص شد مقدار افزایش تبخیر در صورت استفاده از آب‌شور و مقدار مشخصی از زئولیت، نسبت به آب معمولی کاهش می‌یابد (یاری‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی قضاوی و همکاران زئولیت را در سطوح مختلف به خاک‌هایی با بافت لومی و شنی اضافه نمودند. آنان گزارش کردند که زئولیت باعث افزایش رطوبت وزنی و نگهداشت رطوبت در خاک‌ها شده و مقدار رطوبت وزنی و نگهداشت رطوبت با افزایش سطح زئولیت در خاک‌های مختلف افزایش می‌یابد (Ghazavi et al., 2019.).

سودی‌جانی و همکاران کمپوست زباله شهری را با درصد مختلف شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ براساس وزن تر کمپوست به خاک شن لومی اضافه نمودند. همزمان ایشان از زئولیت طبیعی و اصلاح‌شده با منیزیم استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که با افزودن کمپوست زباله شهری و زئولیت نگهداشت آب توسط خاک بهبود می‌یابد. تیمارهای مورد بررسی شامل: خاک اصلاح نشده (Ctrl)، خاک اصلاح‌شده با کمپوست بدون زئولیت (SC) و اصلاح خاک با کمپوست‌های حاوی زئولیت طبیعی و منیزیم (SCNZ و SCMZ) بودند. پارامترهای حجم آب زه‌آب (DW) و مقدار رطوبت خاک پس از هر بار آبیاری (۹ بار آبیاری) اندازه‌گیری شد. نتایج آن‌ها نشان داد که، مدل HYDRUS-1D میزان حجم آب زه‌آب را به خوبی شبیه‌سازی نموده است.همچنین در تحقیق ایشان مقدار رطوبت شبیه‌سازی‌شده از نظر آماری با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از سنسور رطوبت خاک (SM150) مطابقت داشت و شاخص‌های آماری نشان‌دهنده تطابق نزدیک بین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مدل بود. همچنین نتایج نشان داد که که تیمار اصلاح خاک با کمپوست (SCNZ و SCMZ) باعث کاهش مقدار هدایت هیدرولیکی و مقدار حجم آب زه‌آب شده است (Soudejani, et al., 2020). شادان و همکاران در مطالعه‌ای تاثیر زئولیت بر جذب نیترات در شرایط کشت گلخانه‌ای بررسی کردند. گزارش کردند که با افزایش سطح زئولیت کلینوپتیلولایت در خاک لوم شنی باعث افزایش جذب نیترات توسط محصول خیار می‌شود (Shadan et al., 2020).

در تحقیقی دیگر ابراهیم و آل‌قمدی به بررسی تأثیر اندازه ذرات زئولیت کلینوپتیلولیت طبیعی (CZ) بر مقدار رطوبت (WC) و خواص هیدرولیکی یک خاک شن لومی و شبیه‌سازی با استفاده از مدل HYDRUS-1D پرداختند. تیمارهای این تحقیق شامل سه اندازه ذرات ماکرو و نانو زئولیت کلینوپتیلولایت (۲۰، ۲ و ۰,۲ میکرومتر) با میزان ۱ درصد به خاک اضافه کردند. ستون‌ها ۹ ماه تحت ۱۴ چرخه، مرطوب/خشک قرار دادند. آنها گزارش کردند که، مقدار آب قابل دسترس و نگهداشت آب در خاک به ترتیب بین (۱۴/۷–۳/۶)٪ و (۱۰/۵–۶/۸) ٪ افزایش یافت. تغییرات در نرخ نفوذ و هدایت هیدرولیکی تنها با کوچکترین اندازه ذراتCZ، با کاهش ۲۵٫۶٪ و ۱۹٫۳٪ نسبت به شاهد، از نظر آماری معنی‌دار بود. نتایج آنان نشان داد که مدل HYDRUS-1D به طور دقیق مقدار رطوبت و ظرفیت نگهداشت آب در خاک شبیه‌سازی کرده است. نتایج آنها همچنین نشان داد که در خاک‌های با بافت سبک، استفاده از CZ در اندازه نانوذرات بسیار ریز ظرفیت نگهداشت آب درخاک را افزایش می‌دهند (Ibrahim and Alghamdi, 2021).

در تحقیقی بیلوس و همکاران اثرات افزودن مواد معدنی مصنوعی (زئولیت) بر خواص هیدروفیزیکی خاک و رشد آفتابگردان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که افزودن زئولیت باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و کاهش ظرفیت زهکشی می‌شود. آنان گزارش کردند که تیمارهای با غلظت بالای زئولیت مصنوعی (۵٪ و ۱۰٪) رشد آفتابگردان را به شدت کاهش می‌دهند در حالی که غلظت زئولیت بین ۱ تا ۲٪ باعث کاهش جزئی رشد می‌شود (Belviso et al., 2022).

Szerement et al., 2014 تأثیر زئولیت را بر میزان نفوذ خاک، Jakkula et al., 2018 تاثیر زئولیت بر روی هدایت هیدرولیکی اشباع شده‌ی خاک، Ravali et al., 2020 تاثیر زئولیت بر محتوای آب خاک و ظرفیت نگهداری آب، تاثیر ترکیبی از زئولیت سنتز شده از خاکستر بادی و نوعی محرک زیستی را برای بهبود ذخیره آب و بهبود کشت اسفناج (Castronuovo et al. 2023)، تاثیر زئولیت به عنوان یک ماده جاذب برای تصفیه آب و حذب عناصر سدیم و بور در آب های کشاورزی (Núñez-Gómez et al., 2024) مورد بررسی قرار دادند.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثرات استفاده از مقادیر مختلف زئولیت بر تبخیر از سطح خاک و حجم زه‌آب در یک خاک سبک بافت در کشت گلدانی و شبیه‌سازی پارامترهای مذکور با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر بر روی گلدان‌های پلاستیکی ۱۰ کیلویی (به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و قطر بالایی ۲۲ و قطر پایینی ۱۸ سانتی‌متر) انجام شد. با ایجاد سوراخ در کف گلدان‌ها عملاً ساختاری شبیه لایسیمتر ایجاد و سپس با قرار دادن یک ظرف درب‌دار در زیر گلدان‌ها و با استفاده از ظرف مدرج مقدار آب خروجی از کف گلدان‌ها بعد از هر آبیاری اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

کف گلدان یک لایه شن به ضخامت ۲ سانتی‌متر به عنوان

زهکش ریخته شد. سپس گلدان‌ها روی سکوی ۲۰ سانتی‌متری از کف زمین قرار گرفتند. زئولیت کلینوپتیلولایت در چهار سطح (بدون زئولیت، ۵ و ۱۰ و ۱۵ گرم زئولیت در هر کیلوگرم خاک) اضافه و با خاک مخلوط شد. جرم ویژه ظاهری خاک به روش سیلندر (Balk and Hartg, 1986)، بافت خاک به‌روش الک کردن و هیدرومتری (Huluka and Miller, 2014) و هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) با استفاده از EC متر و pH متر و رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی به وسیله صفحات فشاری (Hillel, 1998) اندازه‌گیری شدند. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در (جدول ۱) آمده است. زئولیت مورد استفاده در این تحقیق از نوع زئولیت کلینوپتیلولایت از معدن زئولیت آبگرم در استان سمنان تهیه شد. با استفاده از دستگاه آسیاب میله‌ای، زئولیت آسیاب شده و در اندازه ذرات ۰/۱۸۰–۰/۰۷۵ میلی‌متر با استفاده از الک، جداسازی شد (Abedi Koupai et al., 2010). خصوصیات زئولیت مورد استفاده در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیائی خاک منطقه مورد مطالعه

عمق خاک (سانتیمتر)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته (-)	بافت خاک	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی مترمکعب)
۳۰ – ۰	۰/۸۵۰	۷/۶۷	لوم شنی	۱/۴۳

جدول۲- تجزیه شیمیایی زئولیت مورد استفاده

ظرفیت تبادل کاتیونی	کلر	دی‌فرو تری اکسید	منیزیم اکسید	تیتانیوم آکسید	پتاسیم اکسید	سیلیسیم اکسید	دی آمونیوم تری آکسید	سدیم اکسید	کلسیم اکسید	*افت حرارتی
(میلی‌اکی والان در گرم)	(میلی‌گرم در لیتر)	درصد								
۲/۶	۱۶۰۰	۰/۹–۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱	۶۸/۵	۱۱	۳/۸	۰/۶	۱۲–۱۰

در این آزمایش رطوبت خاک در تیمارها نیز به‌وسیله دستگاه رطوبت‌سنج Wet sensor (Delta-T, made in England) (متحرک بوده و قابل جابجایی از یک گلدان به گلدان دیگر دارد) بصورت روزانه در فاصله افقی ۱۱ سانتی‌متری و فاصله عمودی ۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. این دستگاه شامل سه میله حسگر است که برای گرفتن قرائت، به‌صورت مستقیم وارد خاک می‌شوند (شکل ۱).

زمان آبیاری نیز براساس رطوبت خاک در گلدان شاهد و با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد:

$$D = \frac{(\theta_{fc}-\theta_{pwp})}{100} D_{rz} \times MAD \qquad (۱)$$

که در آن: θ_{fc} رطوبت ظرفیت زراعی (L^3L^{-3})، θ_{pwp} رطوبت در نقطه پژمردگی (L^3L^{-3})، D عمق آب سهل الوصول (L)، D_{rz} عمق خاک داخل گلدان و MAD کمبود مجاز رطوبتی می‌باشد.

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی رطوبت در خاک از مدل HYDRUS 2D که بر مبنای حل عددی معادله ریچاردز می‌باشد استفاده شد (Simunek et al., 2006).

مدل واقعی تعریف شده به HYDRUS-2D

به دلیل تقارن نیمه راست و چپ پروفیل رطوبتی خاک در شرایط واقعی، شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی با مدل تنها برای نیمه راست صورت گرفته و سپس با شرایط واقعی مقایسه شد. در این تحقیق به منظور تعریف محیط شبیه‌سازی دوبعدی در مدل HYDRUS-2D، گلدانی به عرض بالایی ۱۱ سانتی‌متر و عرض پایینی ۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر (عمق خاک داخل گلدان) تعریف شد.

دور آبیاری ۱۴ روز به‌عنوان متوسط فاصله آبیاری براساس (رطوبت‌سهل‌الوصول) در مجموع ۴ مرحله آبیاری انجام شد که در هر نوبت آبیاری به صورت منظم در بالای گلدان‌ها ارتفاع آب متغیر برای آبیاری برقرار گردید. به این منظور، یک مخزن آب برای تامین آبیاری مورد نیاز بر روی پایه‌ای در ارتفاع ۲ متری بالاتر از گلدان‌ها قرار داده شد.

شکل ۱- نمای شماتیکی گلدان در آزمایشگاه و استفاده از Wet sensor برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و اندازه‌گیری حجم زه‌آب توسط ظرف دربدار

مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های شبیه‌سازی است که جریان آب و املاح را در یک یا دو و یا سه‌بعدی در شرایط اشباع و غیر اشباع شبیه‌سازی می‌کند. این مدل حرکت دو و سه‌بعدی آب در خاک را با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق از فرم دوبعدی آن استفاده شد که با فرض همسان و یکنواخت، حرکت دوبعدی به صورت معادله ۲ ارائه می‌گردد (Celia et al., 1990):

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}+K(h)\right] \qquad (۲)$$

که در آن: θ درصد رطوبت حجمی خاک (L^3L^{-3})، h بار فشارآب در خاک (L) ، x و z مختصات مکانی افقی و عمودی (L)، t زمان (T) ، K(h) هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک () (LT^{-1}) می‌باشد. با توجه به انتخاب حرکت آب در قسمت ابتدایی نرم‌افزار، ژئومتری شامل عمق خاک داخل گلدان معادل ۲۲ سانتی‌متر، ستون خاک به صورت قائم و تعداد لایه خاک برابر یک لایه وارد شد. مدل انتخاب شده برای خصوصیات هیدرولیکی خاک، مدل ون‌گنوختن-معلم استفاده گردید. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از رابطه ون-گنوختن به‌دست آمد (Van Genuchten, 1991) که به‌صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\frac{\theta_s+\theta_r}{(1+\alpha h^n)^m} & h<0\\ \theta_s & h\geq 0\end{cases} \qquad (۳)$$

$$K(h)=K_sS_e^{\,l}\left[1-(1-S_e^{\,1/m})^m\right]^2 \qquad (۴)$$

که در آن:

$$S_e=\frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\quad ,\ m=1-\frac{1}{n},\quad n>1 \qquad (۵)$$

در این روابط پارامترهای هیدرولکی مستقل θ_r، θ_s، K_s، α و n وجود دارد که به ترتیب رطوبت باقیمانده ($L^3\ L^{-3}$)، رطوبت اشباع ($L^3\ L^{-3}$)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (LT^{-1})، معکوس مکش ورود هوا (L^{-1})، و شاخص توزیع خلل و فرج (-) بوده Se اشباع نسبی و l در تابع هدایت هیدرولیکی، پارامتر اتصال خلل و فرج می‌باشدکه توسط (Mualem, 1976) به عنوان متوسطی از اغلب خاک‌ها ۰/۵ تخمین زده شده است. به منظور حل عددی معادله ریچاردز در HYDRUS 2D تعیین دقیق پارامترهای مذکور ضروری می‌باشد. مقدار اولیه پارامترهای مدل از قبیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل: پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، رطوبت باقی مانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s) در مدل ون گنوختن معلم، با استفاده از اطلاعات تجزیه مکانیکی خاک (بافت خاک) و اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری با استفاده از نرم‌افزار RETC برآورد گردیدند.

شبیه‌سازی در مدل HYDRUS با حل عددی معادلات حاکم بر جریان آب براساس انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای موجود در این معادلات و همچنین تعیین شرایط اولیه و مرزی مناسب انجام می‌شود (Crevoisier et al., 2008). به طور کلی فرآیند واسنجی مدل به بخش واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای ون‌گنوختن- معلم) انجام شد. برای واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، پارامترهای شکل (n و α)، رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s) می‌باشند.

جهت اندازه‌گیری مقدار تبخیر در گلدان‌ها، ساده‌ترین شکل تعادل آب در خاک که از رابطه توازن بین مقدار آب ورودی و خروجی آب می‌باشد، که در این تحقیق مقدار آب آبیاری و مقدار آب زهکش شده از گلدان‌ها اندازه‌گیری شد و در معادله بیلان مورد استفاده قرار گرفت که معادله بیلان آبی به شکل رابطه ۵ است (Hillel , 2004).

$$E_s=I-\sum(\Delta\theta)\,d-D \qquad (۶)$$

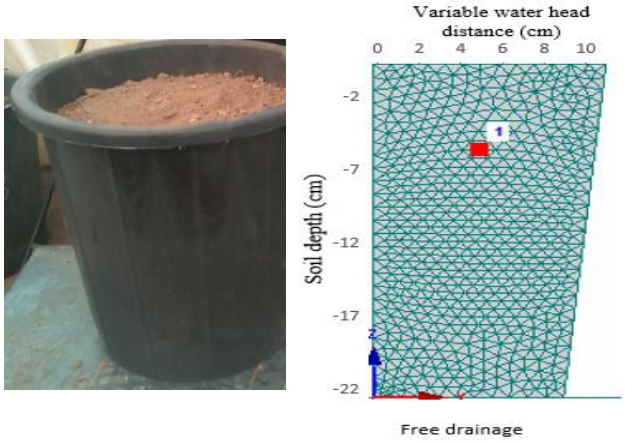
که در آن، Es، تبخیراز سطح خاک (میلیمتر)، I، مقدار آب آبیاری

(میلیمتر)،و $\Delta\theta$ تغییرات رطوبت در نیمرخ خاک (میلیمتر)، d عمق مربوط به لایه رطوبت (میلیمتر) و D عمق آب‌زهکش شده (میلیمتر) میباشد. با توجه به اینکه این تحقیق در آزمایشگاه و درگلدان انجام گرفت و بدون گیاه بود، تعرق برابر با صفر و مقدار بارندگی و رواناب هم صفر در نظر گرفته شد.

شرایط اولیه و مرزی برای جریان آب

شرایط اولیه توزیع آب در خاک عبارت بود از مقدار رطوبت موجود در خاک قبل از اعمال آبیاری در چند نقطه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج Wet سنسور برای لایه (۰ تا ۲۵ سانتی‌متری از خاک) قبل از آزمایش در آزمایشگاه اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها در مدل قرار داده شد. و بدین‌سان شرط اولیه رطوبت به مدل معرفی شد. برای اندازه‌گیری رطوبت در نقطه مورد نظر سنسورهای دستگاه رطوبت‌سنج درون خاک قرار داده شد و رطوبت قرائت گردید. براساس (شکل ۲) پروفیل خاک به شبکه شطرنجی در نظر گرفته شد و قرائت‌ها در مدل در فاصله افقی ۵ سانتی‌متر و فاصله عمودی ۵ سانتی‌متر بلافاصله بعد از هر آبیاری به‌مدت ۴۵ روز ثبت گردید.

شرط مرزی بالادست در زمان آبیاری بصورت بارآبی متغیر در نظر گرفته شد. انتهای مدل نیز شرط بصورت زهآب آزاد در نظر گرفته شد. زیرا این نوع شرط مرزی برای اغلب ستون‌های خاک در شرایط آزمایشگاهی و برای حالتی که از پایین با هوا و فشار صفر در تماس می‌باشند استفاده می‌شود.



شکل ۲- شماتیکی از مدل فیزیکی

شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل HYDRUS -2D

برای ارزیابی کارایی مدل از شاخص‌های ارزیابی ضریب کارایی مدل (EF) (Efficiency coefficient of the model)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده NRMSE (normalized root mean square error) (Adeboye and Alatise. 2007) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) و ضریب تبیین (R^2) برای مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی رطوبت خاک استفاده گردید (Yahaya et al., 2012).

$$EF=1-\frac{\sum_i^n(P_i-O_i)^2}{\sum_i^n(O_i-\bar{O})^2} \quad (۷)$$

$$NRMSE=\frac{RMSE*100}{\bar{O}} \quad (۸)$$

$$CRM=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}\right] \quad (۹)$$

$$R^2=1-\frac{\sum_i^n(P_i-O_i)^2}{\sum_i^n(O_i-O_i)^2} \quad (۱۰)$$

در این روابط:

P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر مشاهداتی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی، و n تعداد نمونه‌های به کار رفته مورد بررسی می‌باشد.

ضریب نش بین بینهایت تا یک متغیر است که عملکرد مدل براساس جدول (۳) تعیین می‌گردد (WMO-NO.1072).

جدول ۳- تعیین عملکرد مدل بر اساس ضریب نش

عملکرد	مقدار ضریب نش
خیلی خوب	>۰/۷۵
خوب	۰/۷۵ تا ۰/۶۵
مطلوب	۰/۶۵ تا ۰/۵۰
نامطلوب	<۰/۵۰

شبیه‌سازی با NRMSE کمتر از ۱۰٪ عالی در نظر گرفته می‌شود، اگر NRMSE بزرگتر از ۱۰ و کمتر از ۳۰٪ باشد، منصفانه و اگر NRMSE بیشتر از ۳۰٪ باشد ضعیف است (Fox, 1981; Jorgensen et al., 1986; Greenwood et al., 1985 ;).

مقادیر شاخص CRM میزان توانایی مدل در برآورد مقادیر نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مقادیر منفی CRM بیانگر تمایل مدل به بیش برآورد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. هر چه مقدار

CRM به صفر نزدیکتر باشد، اثر شبیه‌سازی بهتر خواهد بود و مقادیر مثبت شاخص CRM نشان از کمبود برآورد مدل و مقادیر منفی آن نشان از بیش برآورد مدل دارد (Loague and Green, 1991). شاخص R^2 نشان می‌دهد مقادیر شبیه‌سازی شده چه میان با مقادیر واقعی انطباق دارند.

نتایج و بحث

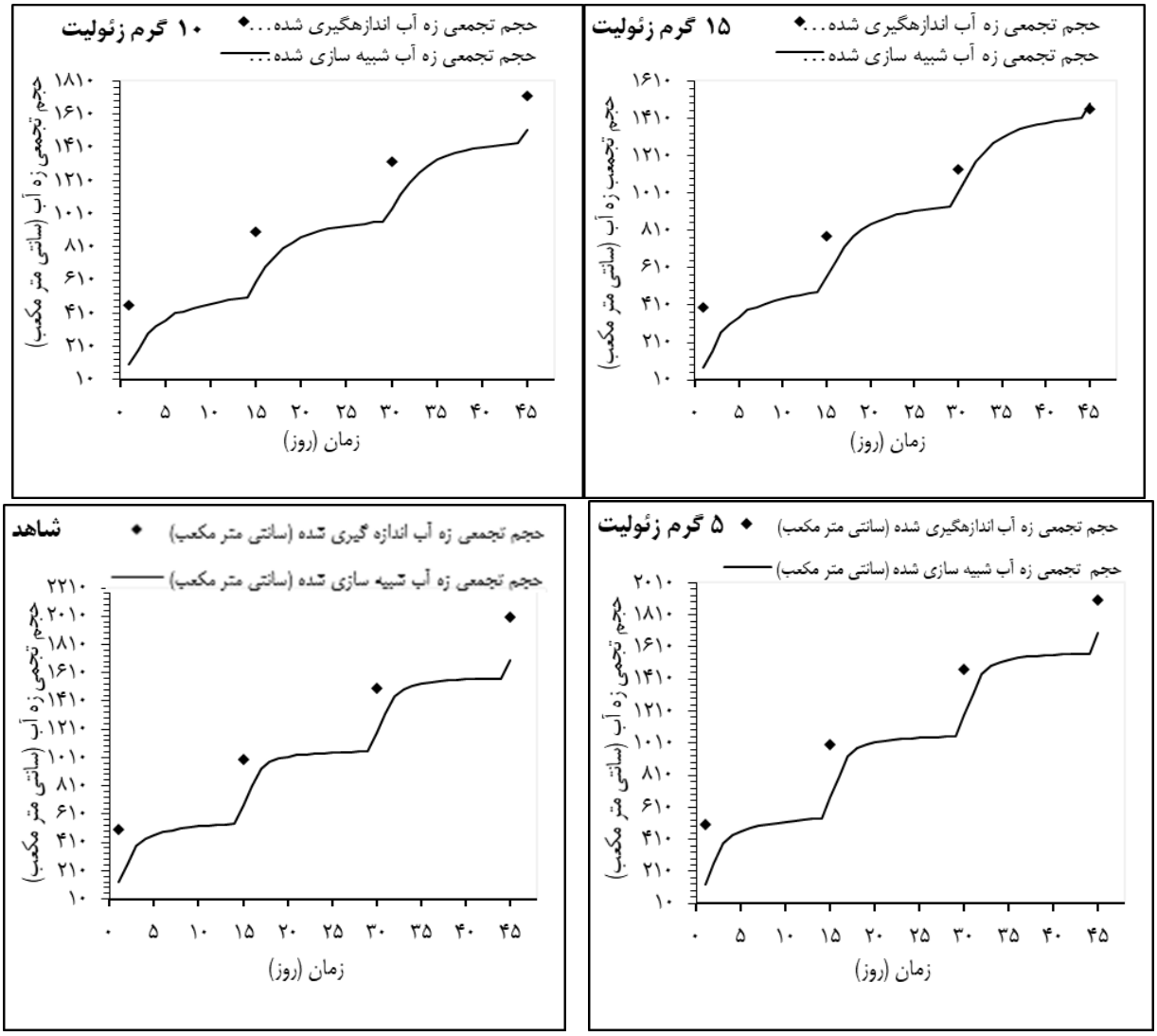
شبیه‌سازی زه‌آب تجمعی با HYDRUS-2D

مقدار حجم زه‌آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در طول دوره آزمایش‌ها برای ۴ دوره آبیاری به فاصله زمانی ۱۴ روز در شکل ۳ ارائه شده است. حجم آب آبیاری برای همه تیمارهای زئولیت مورد مطالعه یکسان بود. در حقیقت، شکل ۳ تغییر حجم زه‌آب شبیه‌سازی شده با نرم افزار HYDRUS-2D و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد بطوریکه خاک شاهد دارای بیشترین مقدار زه‌آب بوده و این یعنی اینکه خاک شاهد حجم زیادی از آب را به‌صورت زهکش از دست می‌دهد و نگه‌داشت آب در آن کم است. بعد از خاک شاهد، تیمار نوع دوم (خاک دارای زئولیت ۵ گرم)، تیمار سوم (خاک دارای زئولیت ۱۰ گرم) و تیمار چهارم (۱۵ گرم زئولیت) دارای روند نزولی زهکش هستند و همان‌طور که مشخص است زهکشی آب در تیمار ۱۵ گرم زئولیت کمتر است. در حقیقت اضافه نمودن زئولیت به خاک باعث کاهش زهکش نسبت به خاک شاهد شده است. حجم زه‌آب در تیمار ۱۵ گرم زئولیت در ۴ دور آبیاری ۰/۲۵ درصد کمتر از شاهد بود. در همین تیمار، مقدار حجم زه‌آب در آبیاری چهارم نسبت به آبیاری اول۰/۲۰ درصد کاهش یافت که نتایج این تحقیقات با مطالعات (Soudejani et al., 2020; Shadan et al., 2020) مطابقت داشت که اثر زئولیت باعث کاهش آب زه‌آب شده است. همچنین در این زمینه (Ghazavi, 2015) نتایج مشابهی به دست آورده و اعلام کرد که کاهش قابل ملاحظه‌ای در حجم زهکش بعد از کاربرد ارزیابی تاثیر سوپر جاذب زئولیت مشاهده شده است. در حقیقت نتایج نشان می‌دهد که خاک‌های سبک توانایی ذخیره و نگهداری رطوبت کمی داشته و اضافه کردن سوپرجاذب (زئولیت) به خاک ظرفیت نگهداری آب در آن خاک‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین مقدار حجم زه‌آب خروجی با کاربرد زئولیت در خاک لوم‌شنی کاهش یافت که این کاهش به‌دنبال افزایش نگهداشت آب به‌واسطه وجود زئولیت در خاک اتفاق می‌افتد. به این ترتیب کاربرد زئولیت در خاک سبک، مشکل عدم نگهداشت آب را برطرف می‌کند. نتایج اخیر با نتایج (Comegna et al., 2021; van Genuchten et al., 1991) کاملا مطابقت دارد. در حالت کلی در مدل‌سازی نمی‌توان تمامی شرایط واقعی مسئله را در مدل پیاده‌سازی نمود لذا اختلافی که مدل با حالت واقعی از خود نشان می‌دهد به‌علت در نظر گرفته نشدن تمام شرایط واقعی است. مدل‌سازی تحقیق حاضر نیز استثنا از این واقعیت نبوده و این امر می‌تواند ناشی از وضعیت بهینه‌سازی پارامترهای ون-گنوختن باشد.

شبیه‌سازی تبخیر تجمعی با HYDRUS-2D

شکل ۴ تغییرات مقدار تبخیر تجمعی شبیه‌سازی شده و اندازه-گیری شده را در طول دوره ۴۵ روزه مورد مطالعه برای چهار سطح مختلف زئولیت مورد بررسی نشان می‌دهد. شکل ۴ نشان می‌دهد، تیمار ۱۵ گرم زئولیت کمترین تبخیر را نسبت به تیمار شاهد در تمام طول دوره زمانی مورد مطالعه داشته است. مقدار تبخیر در تیمارهای مختلف (شکل ۴) نشان داد که کمترین میزان تبخیر مربوط به خاک مخلوط با ۱۵ گرم زئولیت و به میزان ۱۷ درصد کمتر از شاهد می باشد. در ۴ مرحله دور آبیاری با افزایش سطح زئولیت در خاک، مقدار تبخیر کاهش یافته که این کاهش نسبت به تیمار شاهد در تیمارهای خاک مخلوط با زئولیت ۱۵ گرم بیشترین است.کاهش تبخیر با افزایش میزان زئولیت با توجه به پژوهش مومپتن به دلیل تخلخل بالای ساختار کریستالی این ماده بوده و زئولیت‌ها میتوانند تا ۶۰٪ وزن خود آب را حفظ کنند . این نتایج با نتایج (Mumpton, 1989; Szatanik-Kloc et al. 2021) مطابقت دارد. در حقیقت زئولیت ضمن بالابردن ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های سبک می‌تواند با جذب سریع آب و حفظ آن، فواصل آبیاری را افزایش دهد. نتایج حاضر با مطالعات (Bernardi et al., 2013; Noviello et al. 2021) مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار افزایش ظرفیت نگهداری آب بستگی به میزان مصرف زئولیت و شرایط فیزیکی خاک دارد.

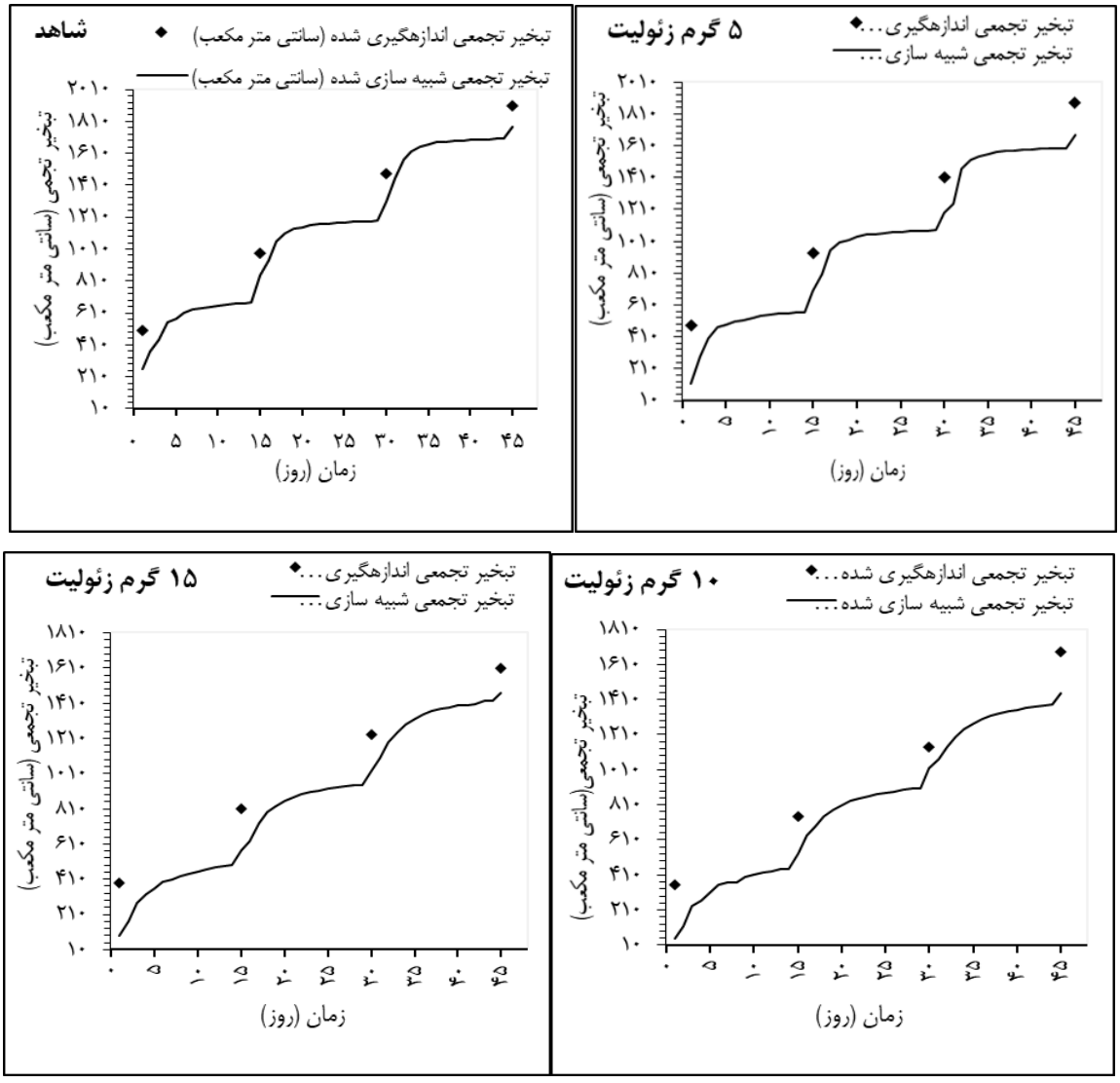
با مقایسه مقادیر تبخیر تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف زئولیت نشان داد که HYDRUS-2D مقدار تبخیر در تیمار ۱۰ گرم زئولیت را بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری، شبیه‌سازی نمود. بطور کلی، در روزهای ابتدایی آزمایش که رطوبت در نیمرخ خاک بالا بود، نرخ تبخیر زیاد بوده است و رطوبت کافی برای تبخیر در خاک وجود داشت. در نتیجه، شدت تبخیر در روزهای ابتدایی آزمایش در مراحل ۱ در تمام تیمارها نسبت به مرحله ۴ بیشتر است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با گذشت زمان و کاهش رطوبت خاک، گرادیان مکش افزایش یافته و فرآیند خیز موئینگی از سطح خاک شروع می‌شود. از این به بعد، شرایط آزمایشگاه (دما، رطوبت و....) تعیین‌کننده مقدار تبخیر می‌باشند. نتایج تحقیق حاضر با مطالعات (Xiubin and Zhanbin, 2001; Szatanik-Kloc et al., 2021 و امانی دشتکی و همکاران، ۱۴۰۰) مطابقت داشت.



شکل ۳- حجم زهآب تجمعی اندازهگیری شده در مقابل شبیهسازی شده برای تیمارهای مختلف زئولیت

ارزیابی مدل HYDRUS-2D برای زهآب

مقادیر ضرایب واسنجی برای تبخیر از سطح خاک و حجم زهآب در خروجی گلدانها در چهار تیمار مذکور در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. همانگونه که در جدول۳ مشخص است، مقدار خطای NRMSE در شبیهسازی زهآب بهترتیب در تیمار برای عدم مصرف زئولیت در برابر ۱۱/۶ درصد، ۵ گرم زئولیت برابر ۱۱/۵ درصد، ۱۰ گرم زئولیت برابر ۱۳/۶ و ۱۵ گرم زئولیت برابر ۱۹/۱ میباشد که براساس این آماره، مدلسازی زهآب توسط HYDRUS-2D متوسط میباشد . مقدار بالای R^2 نتایج نشاندهنده قدرت نرم افزار هایدروس دوبعدی در برآورد زهآب در تیمارهای مختلف خاک میباشد. مقدار آماره CRM برای تیمارهای (صفر، ۵ و ۱۰ گرم زئولیت) منفی بهدست آمد که نشان داد، نرمافزار تمایل به بیش برآورد دارد. برای تیمار ۱۵ گرم زئولیت مقدار مثبت نشان داد که نرمافزار تمایل به کم برآورد دارد و زهآب را بیشتر از مقادیر اندازهگیری شده پیشبینی میکند. مقدار کارایی مدل EF که نشاندهنده کیفیت و چگونگی برازش دادههای مشاهدهای و برآورد شده میباشد بین ۰/۸۶ تا ۰/۹۳ متغیر بود.که با توجه به جدول ۳ کارایی مدل خیلی مطلوب میباشد. نتایج تحقیق حاضر با مطالعات (Nazari et al., 2021; Sun et al., 2023; Besharat and Tavani, 2016; Soudejani et al., 2020; Simunek et al., 2011؛ Ibrahim and Alghamdi, 2021) مطابقت داشت. با توجه به شاخصهای آماری مذکور مدل در برآورد زهآب در تمام تیمارها عملکرد خوبی داشته است.



شکل ۴- مقدار تبخیر تجمعی اندازه‌گیری شده در مقابل شبیه‌سازی شده برای تیمارهای مختلف زئولیت

جدول ۳- نتایج آماری حجم زه‌آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف زئولیت

سطح زئولیت (گرم در هر کیلوگرم خاک)	EF	CRM	R^2	NRMSE (%)
صفر	۰/۹۲	−۰/۰۲	۰/۹۳	۱۱/۶
۵	۰/۹۳	−/۰۱۸	۰/۹۳	۱۱/۵
۱۰	۰/۹۰	−۰/۰۴	۰/۹۱	۱۳/۶
۱۵	۰/۸۶	۰/۰۷	۰/۹۱	۱۹/۱

ارزیابی مدل HYDRUS-2D برای تبخیر:

نتایج آماری مقدار تبخیر در چهار تیمار مذکور در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول ۴، مقدار خطای NRMSE در برآورد مقدار تبخیر در تیمارهای عدم مصرف زئولیت در محدوده (۱۴/۸ درصد) می‌باشد که براساس این آماره، مدلسازی تبخیر توسط HYDRUS متوسط می‌باشد. برای تیمارهای ۵ و ۱۰ گرم زئولیت به‌ترتیب (۲۴/۶–۲۳/۸ درصد) می‌باشد که براساس این آماره، مدلسازی تبخیر توسط نرم‌افزار بین ۲۰ و ۳۰ ٪ منصفانه در نظر گرفته می‌شود برای تیمار ۱۰ گرم زئولیت در محدوده (۴۰/۷ درصد) به دست آمد که با توجه به این آماره نرم افزار تبخیر در این تیمار

ضعیف برآورد کرده است. نتایج بالای تغییرات R^2 نشان‌دهنده قدرت برآورد نرم افزار هایدروس دوبعدی در برآورد تبخیر در تیمارهای مختلف خاک می‌باشد. مقدار آماره CRM برای تمام تیمارها مثبت نشان داد که نرمافزار تمایل به کم برآورد تبخیر شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری شده دارد. مقدار کارایی مدل EF بین ۰/۵۹ تا ۰/۹۸ متغیر بود که براساس رفرنس (WMONO.1072) برای تیمار شاهد عملکرد مدل خیلی خوب و تیمار ۵ گرم زئولیت عملکرد مطلوب و تیمار ۱۰ گرم زئولیت عملکرد مطلوب و تیمار ۱۵ گرم زئولیت عملکرد خیلی مطلوب داشته که در جدول ۴ ارئه شده است. در جدول ۴ نتیجه مدل‌سازی تبخیر برای تیمارهای مختلف نشان داده شده است. در این مورد، تیمار ۱۰ گرم زئولیت نسبت به بقیه تیمارها عملکرد بهتری نداشت. که نتایج تحقیقات حاضر با (Colombani et al., 2014) مطابقت داشت. با توجه به شاخص ضریب کارایی مدل نرم‌افزار در برآورد تیمار ۱۰ گرم زئولیت نسبت به تیمارهای دیگر عملکرد مطلوب داشته است.

جدول ۴- نتایج آماری حجم تبخیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف زئولیت

سطح زئولیت (گرم در هر کیلوگرم خاک)	EF	CRM	R^2	NRMSE (%)
صفر	۰/۹۸	۰/۰۱	۰/۹۲	۱۴/۸
۵	۰/۷۵	۰/۱۷	۰/۹۱	۲۴/۶
۱۰	۰/۵۹	۰/۲۷	۰/۹۰	۴۰/۷
۱۵	۰/۷۸	۰/۰۱۶	۰/۹۰	۲۳/۸

نتیجه‌گیری

کنترل تبخیر از سطح خاک و کاهش تلفات آب آبیاری در مزارع مؤثرترین راه برای افزایش بهره‌وری آب و حفظ منابع آب شیرین است. تبخیر از خاک باعث هدررفت حجم بسیار بالایی از آب آبیاری در مزارع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک میشود. یافتن راهکارهای که هزینه و دائمی برای کنترل و کاهش تبخیر از خاک که باعث ایجاد آلودگی در خاک نیز نشوند، کمک شایانی به بخش کشاورزی در این مناطق خواهد کرد. استفاده از زئولیت می‌تواند یک راهکار مناسب باشد. اصلاح ساختمان خاک و کمک به حفظ مواد غذایی در خاک، میتوانند تبخیر از خاک را نیز کاهش میدهند. یافته-های این پژوهش نشان داد که زئولیت مقدار تبخیر و حجم زه‌آب در تیمارهای (۵، ۱۰ و ۱۵ گرم زئولیت) نسبت به شاهد کاهش داده‌اند. بیشترین مقدار کاهش تبخیر مربوط به ۱۵ گرم زئولیت در ۴ دوره مرحله آبیاری بود. . با توجه به شاخص ضریب کارایی مدل (EF) مدل در برآورد تبخیر در تیمار ۱۰ گرم زئولیت کارایی مطلوب و برای زه‌آب در تمام تیمارها کارایی خیلی مطلوب داشته است. با توجه به شاخص-های آماری ذکر شده در این تحقیق مدل برای شبیه‌سازی زه‌آب عملکرد عالی داشته است و برای تبخیر مطلوب می‌باشد. با توجه به اینکه استفاده از مقادیر بالای مواد اصلاحی در خاک علاوه بر افزایش هزینه‌ها و سخت بودن اجرا، ممکن است ساختمان خاک را نیز به-صورت نامطلوبی تغییر دهد، استفاده از زئولیت جهت کنترل و کاهش تبخیر از خاک به بدلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد از قبیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، جذب انتخابی کاتیون‌ها، نگهداشت آب، آزادسازی کنترل شده آنها، فراوانی معادن و ذخایر زئولیتی ایران توصیه می‌شود.

منابع

امانی دشتکی، ا.، قاسمی، ا.، نوری، م. و متقیان، ح. ۱۴۰۰. تاثیر ورمی‌کولیت، بنتونیت و زئولیت بر میزان تبخیر و منحنی رطوبتی خاک. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۲ (۲): ۸۳-۱۰۱.

شادان، م.، بهمنش، ج.، بشارت، س. و آزاد، ن. ۱۳۹۹. کاهش آبشویی نیترات در سیستم آبیاری قطره ای و کشت گلخانه ای خیار با استفاده از زئولیت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۵): ۱۷۳۹-۱۷۴۹.

شهرکی، ف.، امامی، ج.، فتوت، ا. و آستارایی، ع. ۱۳۹۵. بررسی تاثیر اصلاح کننده بر میزان تبخیر و رطوبت خاک در شرایط گلخانه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران.۱۰ (۲): ۲۵۱-۲۶۱.

عابدی کوپایی، ج.، موسوی، ف. و معتمدی، آ. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر کاربرد زئولیت کلینوپتیلولایت در کاهش آبشویی کود اوره از خاک. مجله آب و فاضلاب. ۲۴ (۳): ۵۱-۵۷.

یاری‌زاده، غ.، امیری تکلدانی، ا. و لیاقت، ع. ۱۳۹۸. تأثیر استفاده از زئولیت بر افزایش مقدار تبخیر در حوضچه‌های تبخیری، تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰ (۸): ۱۸۷۱-۱۸۸۳.

Adeboye, O. B. and Alatise, M. O. 2007. Performance of probability distributions and plotting positions in estimating the flood of river Osun at Apoje Sub-basin, Nigeria. Agricultural Engineering International: CIGR Journal.

AL-Busaidi, A., Yamamoto, T., Tanigawa, T. and Rahman, H. A. 2011. Use of zeolite to alleviate

Research. 36(2): 31-40.

Fox, D. G. 1981. Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance, woods hole, Mass., 8–11 September 1980. Bulletin of the American Meteorological Society. 62(5): 599-609.

Ghazavi, R., Omidvar, A. and Jeyhouni Naini, H. 2019. Investigation of the effect of zeolite on the coefficients of soil moisture curve models in sandy and loamy textures, Journal of Soil and Water Sciences. 23: 3. (In Persian).

Greenwood, D. J., Neeteson, J. J. and Draycott, A. 1985. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. Plant and Soil. 85: 185-203.

Hatfield, J. L., and Prueger, J. H. 2004. Nitrogen over-use, under-use, and efficiency. In Proceedings of the 4th International Crop Science Congress (Vol. 26).

Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. São Diego.

Hillel, D. 2004. Encyclopedia of Soils in the Environment. (No Title).

Huluka, G. and Miller, R. 2014. Particle size determination by hydrometer method. Southern Cooperative Series Bulletin. 419: 180-184.

Ibrahim, H. M. and Alghamdi, A. G. 2021. Effect of the particle size of clinoptilolite zeolite on water content and soil water storage in a loamy sand soil. Water.13 (5): p 607.

Jakkula, V. S. and Wani, S. P. 2018. Zeolites: Potential soil amendments for improving nutrient and water use efficiency and agriculture productivity. Scientific Reviews & Chemical Communications. 8(1): 1-15.

Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K. and Mierzwa-Hersztek, M. 2022. The use of zeolites as an addition to fertilisers A review. Catena. 213: 106125.

Jørgensen, S. E., Kamp-Nielsen, L., Christensen, T., Windolf-Nielsen, J. and Westergaard, B. 1986. Validation of a prognosis based upon a eutrophication model. Ecological Modelling. 32(1-3): 165-182.

Li, J., Liu, Z., Jiang, C., Li, Y., Li, H. and Xia, J. 2021. Optimization design of key parameters for bioretention cells with mixed filter media via HYDRUS-1D model and regression analysis. Ecological Engineering. 164: 106206.

Loague, K. and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of contaminant hydrology. 7(1-2): 51-73.

Marquardt, D. W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the

water stress on subsurface drip irrigated barley under hot environments. Irrigation and drainage. 60(4): 473-480.

Armandpisheh, O., Irannejad, H., Allahdadi, I., Amiri, R., Ebadi, A. G. and Koliaei, A. A. 2009. Application of zeolite in drought stress on vigority of canola seed (Zarfam Cultivar). American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. 5: 832-837.

Behzadfar, M., Sadeghi, S. H., Khanjani, M. J. and Hazbavi, Z. 2017. Effects of rates and time of zeolite application on controlling runoff generation and soil loss from a soil subjected to a freeze-thaw cycle. International Soil and Water Conservation Research. 5(2): 95-101.

Belviso, C., Satriani, A., Lovelli, S., Comegna, A., Coppola, A., Dragonetti, G., and Rivelli, A. R. 2022. Impact of zeolite from coal fly ash on soil hydrophysical properties and plant growth. Agriculture. 12(3): 356.

Besharat, S. and Mollaee Tavani, S. 2016. Simulation of soil water profile in surface and subsurface drip irrigation systems by HYDRUS-2D. Journal of Water and Soil Conservation. 23(2): 225-238.

Blake, G. R. and Hartge, K. H. 1986. Bulk density. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods. 5: 363-375.

Blanco-Canqui, H. and Lal, R. 2009. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. Critical reviews in plant science. 28(3): 139-163.

Celia, M. A., Bouloutas, E. T. and Zarba, R. L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. Water resources research. 26(7): 1483-1496.

Colombani, N., Mastrocicco, M., Di Giuseppe, D., Faccini, B. and Coltorti, M. 2014. Variation of the hydraulic properties and solute transport mechanisms in a silty-clay soil amended with natural zeolites. Catena, 123, 195-204.

Colombani, N., Mastrocicco, M., Di Giuseppe, D., Faccini, B., and Coltorti, M. 2015. Batch and column experiments on nutrient leaching in soils amended with Italian natural zeolitites. Catena. 127: 64-71.

Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, J. C. and Ruelle, P. 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. Agricultural water management. 95(4): 354-366.

Fooladi Dorhani, M. and Sepaskhah, A. R. 2023. Estimation of zeolite application effect on solute transport parameters at different soils using HYDRUS-1D model. Iran Agricultural

Agricultural Reviews. 37(2): 101-108.

Shaddox, T., 2004. Investigation of soil amendments for use in golf course putting green construction. Soil and Water Science. 136 p.

Šimůnek, J., Šejna, M. and Van Genuchten, M. T. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Version 2.0. US Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Siyal, A. A. and Skaggs, T. H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. Agricultural water management. 96(6): 893-904.

Soudejani, H. T., Kazemian, H., Inglezakis, V. J. and Zorpas, A. A. 2019. Application of zeolites in organic waste composting: A review. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 22: 101396.

Soudejani, H. T., Shayannejad, M., Kazemian, H., Heidarpour, M. and Rutherford, M. 2020. Effect of co-composting municipal solid waste with Mg-modified zeolite on soil water balance components using HYDRUS-1D. Computers and Electronics in Agriculture. 176: 105637.

Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Adamczuk, A. and Józefaciuk, G. 2021. Effect of low zeolite doses on plants and soil physicochemical properties. Materials. 14(10): 2617.

Szerement, J., Ambrożewicz-Nita, A., Kędziora, K. and Piasek, J. 2014. Use of zeolite in agriculture and environmental protection. A short review. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. (781): 172-177.

Taghdisi Heydarian, S. Z., Khorassani, R. and Emami, H. 2018. The Effect of Zeolite, Manure and Vermicompost on Growth and Micronutrients Uptake by Corn. Water and Soil. 32(4): 763-778.

Torres, M. 2016. Using Zeolite for Soil Moisture Retention and Salinity Control.

Van Genuchten, M. V., Leij, F. J. and Yates, S. R. 1991.The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.

Word Meteorological Organization 2011. Manual on Flood Forecasting and Warning. (WMONO.1072).

Yahaya, A., Ing, T. C., Lee, G. M., Yahaya, N., Boon, Y., Hashim, S. and Jesus, S. K. C. I. (2012). The impact of workplace bullying on work performance. Archives Des Sciences. 65(4): 18-28.

society for Industrial and Applied Mathematics. 11(2): 431-441.

Mazloomi, F. and Jalali, M. 2019. Effects of vermiculite, nanoclay and zeolite on ammonium transport through saturated sandy loam soil: Column experiments and modeling approaches. Catena, 176: 170-180.

McGilloway, R. L., Weaver, R. W., Ming, D. W. and Gruener, J. E. 2003. Nitrification in a zeoponic substrate. Plant and soil. 256: 371-378.

Montemurro, F., Vitti, C., Diacono, M., Canali, S., Tittarelli, F. and Ferri, D. 2010. A three-year field anaerobic digestates application: effects on fodder crops performance and soil properties. Fresenius Environmental Bulletin. 19(9b): 2087-2093.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research. 12(3): 513-522.

Mumpton, F. A. 1999. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. Proceedings of the National Academy of Sciences. 96(7): 3463-3470.

Noviello, M., Gattullo, C. E., Faccia, M., Paradiso, V. M. and Gambacorta, G. 2021. Application of natural and synthetic zeolites in the oenological field. Food Research International. 150: 110737.

Núñez-Gómez, D., Legua, P., Lidón, V., Conesa, A., Martínez-Nicolás, J. J. and Melgarejo, P. 2024. Evaluation of Agricultural Soil-Improving Zeolite for Improving Irrigation Water Quality. Applied Sciences. 14(1): 418.

Piñón-Villarreal, A. R., Bawazir, A. S., Shukla, M. K., Samani, Z. A. and King, J. P. 2017. Modeling Capillary Rise in Clinoptilolite Zeolite and Riparian Soils to Sustain Vegetation in Water-Scarce Areas. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 143(11): 04017044.

Ravali, C., Rao, K. J., Anjaiah, T. and Suresh, K. 2020. Effect of zeolite on soil physical and physico-chemical properties. Multilogic in Science. 10: 776-781.

Resasco, D. E., Crossley, S. P., Wang, B. and White, J. L. 2021. Interaction of water with zeolites: a review. Catalysis Reviews. 63(2): 302-362.

Samreen, T., Shah, H. U., Ullah, S. and Javid, M. 2017. Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mungbeans plant (Vigna radiata). Arabian Journal of Chemistry. 10, S1802-S1807.

Sangeetha, C. and Baskar, P. 2016. Zeolite and its potential uses in agriculture: A critical review.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 18, Aug.-Sep. 2024, p. 489-501

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۸، مرداد - شهریور ۱۴۰۳، ص. ۵۰۱-۴۸۹

Investigating the Effect of Zeolite on the Volume of Water Drainge and Evaporation from the Surface of a Sandy Loam Soil

M. Shadan[1], J. Behmanesh[2*]

Recived: May.12, 2024 Accepted: Jul.23, 2024

Abstract

Zeolites have been developed to utilize in agricultural sector due to their high water holding capacity and cation exchange. In this research, the effect of zeolite on evaporation from the soil surface and volume of drainage water in sandy loam soil was investigated. For this purpose, the HYDRUS-2D model was used to simulate evaporation and drainage and the required data was collected by conducting pot experiments. The studied treatments included four levels including zero, 5, 10, and 15 grams of zeolite gr kg^{-1} of soil. Four irrigation frequency were done on bases of readily soil moisture and the soil moisture values before and after irrigation events were measured using the Wet sensor in the depth and radial directions and recorded for 45 days. The initial amounts of evaporation and the volume of drainage water were determined by using the water balance equation and measuring the drainage water output, respectably from the pot at each stage. The results showed that increasing in the amount of zeolite cause to decry the amount of evaporation from the soil surface and the volume of drainage water in the treatment of 15 grams of zeolite by 17.11% and 20.6%, respectively. The coefficient of determination (R^2) for HYDRUS-2D model simulation varied between 0.90 and 0.93. The value of the efficiency factor (EF) of the model, which shows the quality and the fitting of the observed and estimated data, is between 0.59 and 0.98 for evaporation and between 0.86 and 0.92 for the drainage water volume. These results show the high efficiency of the model in simulating the mentioned parameters.

Keywords: Drainage Volume, Evaporation, HYDRUS-2D Software, Zeolite

[1] - Ph.D. student of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
[2] - Proffessor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email :j.behmanesh@urmia.ac.ir)