



ISSN 2251-7480

اثر آبگریزی لایه سطحی خاک بر میزان تبخیر از سه خاک با بافت متفاوت

شهرام شاه‌محمدی کالاق^{۱*} و حسین بیرامی^۲

^{۱*} استادیار؛ گروه علوم و مهندسی آب؛ واحد تبریز؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ تبریز؛ ایران

^{۲*} نویسنده مسئول مکاتبات: shahmohammadi_sh@iaut.ac.ir

^۲ استادیار؛ مرکز ملی تحقیقات شوری؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ یزد؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۳

چکیده

کاهش تلفات آبیاری در اثر تبخیر سطحی با استفاده از آبگریزی در خاک سطحی می‌تواند کمک قابل توجهی در حفظ آب در شرایط کنونی که کشورمان دچار کمبود آب است، داشته باشد. در پژوهش حاضر، اثر ایجاد لایه آبگریز در خاک سطحی به صورت لایه مالچ ضد تبخیر در سه خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، خاک‌ها به صورت مصنوعی در چهار غلظت متفاوت و به روش زمان نفوذ قطره آب برای حصول چهار درجه مختلف آبگریزی با اسید استتاریک آبگریز شدند و اثر آن به صورت لایه سه سانتی‌متری آبگریز سطحی بر میزان تبخیر از لایسیمیترهای کوچک (با ارتفاع و قطر ۳۰ سانتی‌متر) استقرار یافته در خاک بررسی گردید. آزمایش‌ها در مزرعه‌ای در اطراف شهرستان مرند (با مختصات جغرافیایی ۱۶/۸۷° شمالی و ۳۸° ۲۵' ۳۰" شرقی) در تابستان ۱۳۹۵ انجام گرفت. آزمایش‌ها در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با پنج تیمار درجه آبگریزی و در سه تکرار اجرا شد که پس از تجزیه و تحلیل آن توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون دانکن (سطح احتمال ۵ درصد)، مقایسه میانگین بین میزان تبخیر در درجه‌های آبگریزی مختلف برای هر سه خاک انجام شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار مقدار تبخیر در هر سه خاک دارای لایه سطحی آبگریز بود. همچنین افزایش درجه آبگریزی باعث کاهش بیش‌تر تبخیر سطحی گردید. بیش‌ترین میزان کاهش تبخیر با افزایش درجه آبگریزی نسبت به تیمار شاهد (با درجه آبگریزی صفر) در خاک‌های لوم شنی، لوم و لوم رسی به ترتیب ۷۸/۳، ۴۲/۲ و ۳۰/۱ درصد بود.

کلید واژه‌ها: آبگریزی خاک؛ آبیاری، اسید استتاریک؛ تبخیر سطحی

مقدمه

آب سبز (باران) و ۷۰ درصد آن از طریق آب آبیاری صورت می‌پذیرد. از نظر میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف، در ایران نیز همانند سایر کشورها، بخش قابل توجهی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی استفاده می‌شود (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). عمده‌ترین مصرف آب در جهان به بخش کشاورزی تعلق دارد. در ایران نیز از ۹۳ میلیارد مترمکعب کل آب

براساس آمارهای موجود، در حال حاضر بخش قابل توجهی (حدود ۷۰ درصد) از آب شیرین جهان، شامل آب رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آبخوانهای زیرزمینی، به مصرف کشاورزی می‌رسد. از طرفی کل میزان تبخیر و تعرق از اراضی فاریاب، برابر ۲۲۰۰ میلیارد مترمکعب (معادل ۲ درصد بارش) برآورد می‌شود که ۳۰ درصد آن از طریق

Doerr؛ DeBano, 2000؛ Dekker and Jungerius, 1990) Liyanage and Mao *et al.*, 2016؛ *et al.*, 2000 (Leelamanie, 2016). آبریزی خاک به صورت موضعی به علت نشت مواد نفتی و روغنی و آتش‌سوزی نیز ایجاد می‌شود. اخیراً مشاهده شده که آبیاری متوالی با استفاده از آب فاضلاب می‌تواند به توسعه آبریزی خاک به علت مواد آلی محلول در آب فاضلاب بیانجامد (Arye *et al.*, 2011). آبریزی خاک‌ها یک ویژگی مؤثر بر رشد گیاهان، هیدرولوژی سطحی، زیرسطحی و فرسایش خاک می‌باشد (Jarvis *et al.*, 2008؛ Krueger *et al.*, 2016). مطالعات بی‌شماری در مورد وقوع و اثرات هیدرولوژیکی آن منتشر شده است. آبریزی در خاک باعث تغییر خصوصیات و رفتارهای خاک می‌شود (Diamantopoulos *et al.*, 2013؛ Mao *et al.*, 2015؛ Bughici and Wallach, 2016). تغییر در خاصیت موئینگی^۳ منافذ خاک به‌عنوان نیروی انتقال آب، می‌تواند نفوذ آب و تبخیر از خاک را به‌ویژه در خاک‌های اشباع، تحت تأثیر قرار دهد (DeBano, 1975, 1981). مواد آبریز با کاهش نیروی موئینگی که برای حرکت آب به سطح خاک نیاز هستند، موجب کاهش تبخیر می‌شوند، بنابراین بسیاری از مواد مالچی که دارای خاصیت آبریز هستند برای حفظ آب می‌توانند به خاک اضافه گردند (Letey, 1962؛ DeBano, 1981؛ Bachmann *et al.*, 2001). تحقیقات Arye و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که آبریزی می‌تواند بر روی انتقال رطوبت در خاک به صورت موئینگی به سطح خاک تأثیرگذار باشد. بنابراین انتظار می‌رود لایه آبریز سطحی مانع انتقال رطوبت به سطح خاک شده و با حذف شرط تأمین آب به سطح تبخیر، موجب کاهش تبخیر از خاک و کاهش اتلاف آب گردد. Hallett (۲۰۰۸) نیز گزارش نمود که مواد خیس کننده (آبدوست) برعکس مواد آبریز میزان نفوذ، نگهداری آب و تبخیر را افزایش می‌دهند. او بیان نمود که

مصرفی حدود ۸۳ میلیارد مترمکعب مورد استفاده بخش کشاورزی می‌باشد (حیدری و همکاران، ۱۳۸۵). عباسی و همکاران (۱۳۹۴) میانگین حجم مصرف آب در بخش کشاورزی برای دوره‌های پنجاه و هفت ساله را به ترتیب برابر 67 ± 18 و 75 ± 5 میلیارد مترمکعب بیان کردند. بیشتر وسعت کشور پهناور ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. در این میان تبخیر و تعرق از جمله پارامترهای اقلیمی است که این اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک را بیش از پیش تحت تأثیر خود قرار داده است. تبخیر از سطح خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش مهمی در چرخه هیدرولوژی در طبیعت دارد. در این نواحی، بخش قابل توجه آبی که وارد خاک می‌شود، از طریق تبخیر از سطح خاک به جو برمی‌گردد. همچنین در مناطقی که سطح ایستابی در آن‌ها بالا است به سبب تبخیر از سطح خاک، تجمع املاح در نیمرخ خاک نیز به وقوع می‌پیوندد. در نتیجه کاهش میزان تبخیر سطحی خاک، بدیهی‌ترین راه کاهش تلفات آب بخصوص در بخش کشاورزی به نظر می‌رسد که در این راستا آبریزی خاک به‌عنوان یکی از روش‌های متداول علمی پیشنهاد شده است (Arye؛ Bachmann *et al.*, 2001؛ DeBano, 1975, 1981؛ *et al.*, 2011).

خاک آبریز^۱ خاکی است که وقتی قطره‌ای از آب روی سطح آن قرار گیرد، سریعاً خیس نمی‌شود (Doerr *et al.*, 2000؛ بیرامی، ۱۳۹۳؛ Burguet *et al.*, 2016). آبریزی^۲ زمانی رخ می‌دهد که زاویه تماس آب با سطح ذرات خاک بیشتر از ۹۰ درجه باشد. در طی تجزیه مواد آلی این ترکیبات ذرات خاک را پوشانده و خاک به شکل آبریز درمی‌آید. ماهیت ترکیبات آلی به‌وجود آورنده آبریزی گزارش شده در مطالعات شامل، مواد مومی مربوط به گیاهان و پوست آن‌ها، آلکان‌ها، اسیدهای چرب و نمک‌های آن‌ها، استرها، فیتان‌ها و استرول‌ها می‌باشند

¹ Water repellent soil

² Water repellency

³ Capillarity

مفیدی به‌ویژه در دوره‌های تنش رطوبتی شدید در تابستان یا فصول کم‌بارش داشته باشد.

ذوالفقاری و حاج‌عباسی (۱۳۸۷) تاثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آبریزی خاک در مراتع فریدون شهر و جنگل‌های لردگان را بررسی نموده و اظهار داشتند در مورد خاک‌های دارای لایه آبریز سطحی (۵ سانتی‌متر) عملیات کشت و کار و شخم که در اثر تغییر کاربری اراضی انجام می‌گیرد باعث قرار گرفتن خاک‌های تحتانی که قابلیت مرطوب شدن را داشتند در سطح خاک شده و سبب کاهش آبریزی خاک‌ها گردید. همچنین عملیات شخم سبب قرار گرفتن مواد آلی دارای خاصیت آبریزی در معرض فعالیت‌های بیولوژیکی شده و منجر به کاهش خاصیت آبریزی شد. البته در مورد خاک‌هایی که عمق لایه آبریز تا عمق بیشتر از لایه شخم ادامه دارد عملیات کشت زرع نمی‌تواند تاثیر زیادی بر آبریزی خاک داشته باشد.

نورمهند و طباطبائی (۱۳۹۳) میزان رطوبت خاک‌های آبریز شده در اثر کاربرد پساب فاضلاب بررسی و با خاک غیر آبریز (آبدوست) در خاک مزرعه سلطانیه فولادشهر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد با افزایش عمق در هر دو مزرعه میزان رطوبت افزایش یافت که علت آن کاهش تبخیر از خاک سطحی می‌باشد. همچنین تغییرات رطوبت خاک در مزرعه آبریز کمتر از آبدوست بود. بنابراین آبریزی در خاک سبب کاهش تبخیر از سطح خاک و در نتیجه حفظ رطوبت در لایه‌های زیرین شد. ناظم السادات (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای اثر افزودن لجن فاضلاب بر آبریزی و تأثیر آن بر تبخیر از سطح خاک را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که لجن فاضلاب باعث کاهش تبخیر از سطح خاک شد، به طوری که تیمار آبدوست با میزان ۲۲/۷۹ میلی‌متر بیش‌ترین تبخیر و تیمار با آبریزی شدید با میزان ۱۰/۹۷ میلی‌متر کم‌ترین میزان تبخیر را دارا بود، که دلیل آن

یک لایه آبریز در سطح خاک می‌تواند یک مانع موئینگی ایجاد نموده و بدین‌صورت تبخیر را کاهش دهد.

اثر آبریزی در اکوسیستم‌های طبیعی به‌خوبی شناخته شده نیست. بیان شده است که لایه‌های خاک آبریز می‌تواند به گیاهان دارای ریشه عمیق اجازه جذب آب بیشتری نسبت به تلفات تبخیر دهند (Robinson *et al.*, 2010؛ Goebel *et al.*, 2011؛ Lozano *et al.*, 2013)، با این حال تحقیقات معدودی در کمی‌سازی این اثرات وجود دارد (Hallett, 2008؛ Kettridge *et al.*, 2014). ویژگی‌های غیرخیس‌شوندگی یا آبریزی می‌تواند موجب کاهش تلفات تبخیر توسط اثر گذاری بر هندسه سطح تماس مایع-گاز به‌ویژه در نواحی اشباع (Bachmann *et al.*, 2001) و با کاهش سرعت انتقال آب به لایه‌های سطحی خاک توسط صعود موئینگی شود (DeBano, 1981؛ Bachmann *et al.*, 2001).

پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده کاهش شدید تلفات تبخیر در رطوبت یکسان در خاک‌های آبریز نسبت به خاک‌های غیرآبریز می‌باشد (Shokri *et al.*, 2009). برخی شواهد نشان می‌دهد که سرعت جریان بخار و پخشیدگی می‌تواند در خاک‌های آبریز به‌شدت کاهش یابد (Davis *et al.*, 2014).

Rye و Smettem (۲۰۱۷) بیان نمودند که الگوهای خیسیدگی ناشی از آبریزی خاک قادر به انتقال ترجیحی آب به عمق خاک بوده و موجب کاهش ذخیره آب در لایه‌های بالایی که در معرض شدید تلفات تبخیر است، می‌گردد. با وجود اینکه این اثر در مطالعات گذشته تشریح شده است، اما اهمیت این اثر در شرایط مزرعه‌ای مبهم باقی مانده است. آنان همچنین اثر خاک آبریز بر روی جریان ترجیحی و تبخیر از ستون‌های خاک حاوی خاک آبریز را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان‌دهنده کاهش ۴۰ تا ۸۰ درصدی تلفات تبخیر در دوره ۴ روز بود که حاکی از اثر معنی‌دار لایه سطحی آبریز در کاهش مقدار خالص تلفات آب ناشی از تبخیر بوده و این عامل می‌تواند اثرات

می‌تواند کاهش نیروهای مویینگی خاک و در نتیجه نرسیدن آب به سطح خاک باشد.

مطالعات متعددی در مورد استفاده از انواع مالچ‌ها در کاهش تبخیر انجام گرفته است اما برای بررسی استفاده از حالت آبگریز خاک سطحی (ایجاد شده به صورت مصنوعی) به صورت مالچ در کاهش تبخیر و کاهش تلفات آب مطالعات چندانی صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق با ایجاد یک لایه باریک آبگریز به عنوان مالچ در سطح خاک، مقدار تبخیر سطحی در خاک‌هایی با بافت‌های متفاوت مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به این‌که ماده آبگریز استفاده شده جهت آبگریز نمودن نمونه‌ها (اسید استئاریک)، جزء اسیدهای آلی موجود در خاک بوده و به مرور زمان در طول فصل تجزیه می‌گردد میزان ماندگاری درجه آبگریزی نیز به مدت سه ماه پس از شروع آزمایش بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

برای بررسی تأثیر لایه باریک خاک آبگریز به عنوان مالچ بر کاهش تبخیر سطحی و کاهش تلفات آب، سه خاک با بافت‌های لوم رسی (از اطراف شهرستان کلبر با موقعیت جغرافیایی عرض شمالی $36^{\circ}30'38''$ و طول شرقی $75^{\circ}02'46''$)، لوم (از غرب شهرستان تبریز با موقعیت جغرافیایی $28^{\circ}05'59''$ شمالی و $36^{\circ}38'12''$ شرقی) و لوم شنی (از ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز با موقعیت جغرافیایی $21^{\circ}50'38''$ شمالی و $77^{\circ}40'23''$ شرقی) نمونه برداری شد.

بخشی از این خاک‌ها با استفاده از غلظت‌های متفاوتی از اسید استئاریک^۱ با توجه به کلاس‌بندی آبگریزی Dekker و Ritsema (۱۹۹۴) در چهار درجه آبگریز شد (جدول ۱). آزمون زمان نفوذ قطره آب (WDPT) بیش‌ترین کاربرد را در بررسی آبگریزی خاک‌ها دارد (DeBano, 1981; Dekker and Ritsema, 1994). در این

شیوه قطره کوچکی از آب توسط یک پی‌پت روی سطح خاک هواخشک رها می‌شود و زمان جذب آن توسط خاک یا نفوذ آن بر حسب ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. هرچه زمان باقی‌ماندن قطره روی خاک بیشتر باشد، آبگریزی بیشتر است. یک خاک زمانی آبگریز است که WDPT بیشتر از پنج ثانیه باشد (Dekker and Ritsema, 1994). با توجه به اینکه در هر خاکی با کلاس بافت و ویژگی‌های متفاوت، برای رسیدن به درجه مشخصی از آبگریزی، مقدار متفاوتی از ماده آبگریز نیاز است، این عمل با آزمون و خطا در هر یک از خاک‌ها با اضافه نمودن مقادیر متفاوت اسید استئاریک انجام یافت (بیرامی و همکاران، ۱۳۹۴ a, b).

برای ایجاد درجه‌های مختلف آبگریزی از غلظت‌های متفاوت استئاریک اسید استفاده شد. با توجه به حلالیت بسیار کم اسید استئاریک در آب (Leelamanie et al., 2008)، از استون^۲ به عنوان حلال در اضافه نمودن اسید استئاریک به خاک استفاده شد. ابتدا مقدار اسید استئاریک لازم جهت رسیدن به درجه‌های آبگریزی متفاوت به صورت تجربی تعیین شد. به این ترتیب که محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت اسید استئاریک (در دامنه وسیع) تهیه و به مقدار مشخصی از هر خاک اضافه شد. پس از تبخیر کامل استون پس از حدود یک هفته و خشک شدن خاک، زمان نفوذ قطره آب^۳ (WDPT) برای هر یک از این خاک‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با توجه به کلاس‌بندی درجه آبگریزی Dekker و Ritsema (۱۹۹۴)، برای هر یک از سه خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی، چهار غلظت اسید استئاریک برای ایجاد چهار درجه مختلف آبگریزی انتخاب شد. جهت آبگریز شدن یکنواخت خاک‌ها، حجم محلول اسید استئاریک تا مرحله اشباع شدن خاک‌ها اضافه گردید. تیمار شاهد در این آزمایش‌ها، خاک با درجه آبگریزی صفر یا خاک بدون آبگریزی بود (بیرامی، ۱۳۹۳).

^۲ Acetone

^۳ Water drop penetration time

^۱ Stearic acid

جدول ۱. درجات آبگریزی بر اساس روش آزمون زمان نفوذ قطره آب (Dikker and Ritsema, 1994)

| زمان نفوذ قطره آب (WDPT) (ثانیه) | درجه آبگریزی |
|----------------------------------|-------------------|
| < ۵ | بدون آبگریزی |
| ۵-۶۰ | آبگریزی جزئی |
| ۶۰-۶۰۰ | آبگریزی زیاد |
| ۶۰۰-۳۶۰۰ | آبگریزی شدید |
| > ۳۶۰۰ | آبگریزی خیلی شدید |

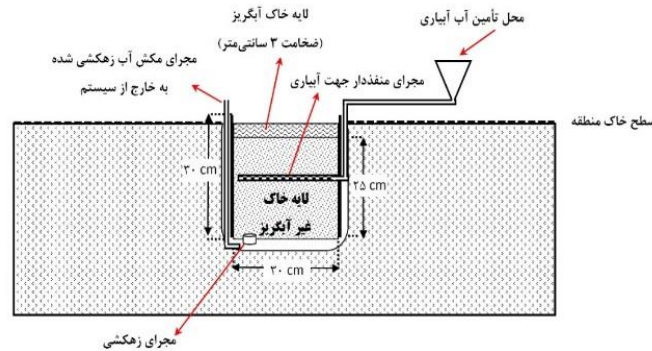
پس از آبیاری، هر دو روز یکبار مقدار تبخیر آب از هر لایسیمتر به روش وزنی اندازه‌گیری و ثبت گردید. بدین‌صورت که در روز اول با آبیاری توسط لوله پلی‌اتیلنی قرارگرفته درون لایسیمترها، رطوبت خاک مورد نظر تا حد رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای رسانده شد. پس از گذشت دو روز مقدار کاهش وزن لایسیمتر اندازه‌گیری شده و بر اساس آن مقدار تبخیر به‌دست آمد. سپس مجدداً با استفاده از لوله پلی‌اتیلنی آبیاری برای رساندن مقدار رطوبت خاک درون لایسیمتر به حد ظرفیت مزرعه‌ای انجام شد تا کاهش رطوبت مانع کاهش تبخیر نگردد. این عمل هر دو روز یکبار انجام یافت. درنهایت پس از اتمام آزمایش (۲۰ روز) مقدار تبخیر در لایسیمترهای با لایه آبگریز و لایسیمترهای شاهد در هر سه خاک محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار تلفات آب در هر یک از خاک‌ها و با لایه‌های با درجه آبگریزی متفاوت محاسبه و درصد کاهش تبخیر در هر یک از تیمارها به‌دست آمد.

آزمایش‌های فوق در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با پنج تیمار درجه آبگریزی و در سه تکرار اجرا شد که پس از تجزیه و تحلیل آن توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون دانکن (سطح احتمال ۵ درصد)، مقایسه میانگین بین میزان تبخیر در درجه‌های آبگریزی مختلف برای هر سه خاک انجام شد. در قسمت دوم تحقیق، با توجه به این‌که ماده آبگریز استفاده شده جهت آبگریز نمودن نمونه‌ها جزء اسیدهای آلی موجود در خاک بوده و به مرور زمان در طول فصل تجزیه می‌گردد میزان ماندگاری درجه آبگریزی نیز بررسی شد.

پس از ایجاد درجه‌های مختلف آبگریزی در هر یک از سه خاک مورد نظر، برای بررسی میزان تبخیر، خاک‌ها درون لایسیمترهای کوچک (با ارتفاع و قطر ۳۰ سانتی‌متر) پر شدند، به‌این‌ترتیب که تا ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری این لایسیمترها خاک با چگالی ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب پر شده و سپس یکسری لوله پلی‌اتیلنی دارای منافذ ریز برای آبیاری زیرسطحی درون این خاک قرار داده شد (شکل ۱). روی لایه ۲۵ سانتی‌متری هریک از خاک‌ها سه سانتی‌متر از خاک آبگریز تهیه شده (با چگالی ظاهری $g\ cm^{-3}$ ۱/۴) اضافه شد.

در تیمار شاهد سه سانتی‌متر بالای نیز از خاک بدون آبگریزی در روی ۲۵ سانتی‌متر خاک اولیه اضافه گردید. سپس لایسیمترها در درون خاک منطقه آزمایش قرار داده شد (شکل ۱). در این نوع لایسیمتر مقدار تبخیر برحسب تغییرات وزن لایسیمتر در شرایطی که رطوبت در حالت ظرفیت مزرعه باشد محاسبه گردید. میزان آب زه‌کش شده از لایسیمترها (در صورت وقوع) نیز از طریق ظروفی که در زیر آن‌ها قرار داده شده بود، جمع‌آوری و توسط ظروف مدرج اندازه‌گیری گردید. برای هر خاک و در هر درجه آبگریزی سه لایسیمتر (سه تکرار) درون خاک قرار داده شد.

برای انجام آزمایش‌های تبخیر در شرایط اقلیمی یکسان در هر سه خاک، تمامی لایسیمترها پس از آماده‌سازی درون خاک مزرعه‌ای در اطراف شهرستان مرند (مختصات جغرافیایی $38^{\circ}25'16.87''$ شمالی و $45^{\circ}47'30.30''$ شرقی) استقرار یافتند.



شکل ۱. طرح شماتیک لایسیمتر کار گذاشته شده در سطح مزرعه

آهک بالایی هستند. از نظر شوری هر سه خاک با EC پایین فاقد مشکل شوری می‌باشند.

جدول ۳ مقدار اسید استتاریک مورد نیاز جهت رسیدن به درجه‌های آبگریزی مورد نظر در سه خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای ایجاد درجه‌های آبگریزی یکسان، خاک لوم شنی کم‌ترین و خاک لوم رسی بیش‌ترین مقدار از اسید استتاریک را نیاز دارند دلیل این اثر می‌تواند ناشی از افزایش سطح ویژه با ریزتر شدن بافت خاک باشد.

مقادیر میانگین تبخیر سطحی (حاصل از سه تکرار) از لایسیمترهای دارای لایه آبگریز سطحی در درجه‌های مختلف (صفر تا ۴) در خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی در دوره‌های دو روزه (به مدت ۲۰ روز) به‌ترتیب در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است.

بدین منظور در فواصل زمانی ۱۵ روز مقدار آبگریزی لایه سطحی هر یک از خاک‌ها با روش WDPT مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. این اندازه‌گیری به مدت ۳ ماه انجام شد تا علاوه بر هدف بالا، درجه‌ای از آبگریزی نیز به‌دست آید که در پایان فصل کم‌آبی (تابستان) که بارش خیلی کمی در منطقه وجود دارد، لایه آبگریز از بین برود تا در فصل بارندگی پاییز و زمستان مانع از نفوذ آب به درون خاک نشده و باعث ایجاد رواناب و فرسایش نگردد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های عمومی خاک‌های مورد آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که دو خاک لوم و لوم رسی ماده آلی نسبتاً بالایی دارند. از نظر مقدار آهک نیز خاک لوم و لوم رسی دارای مقدار

جدول ۲. خصوصیات عمومی خاک‌های مورد آزمایش

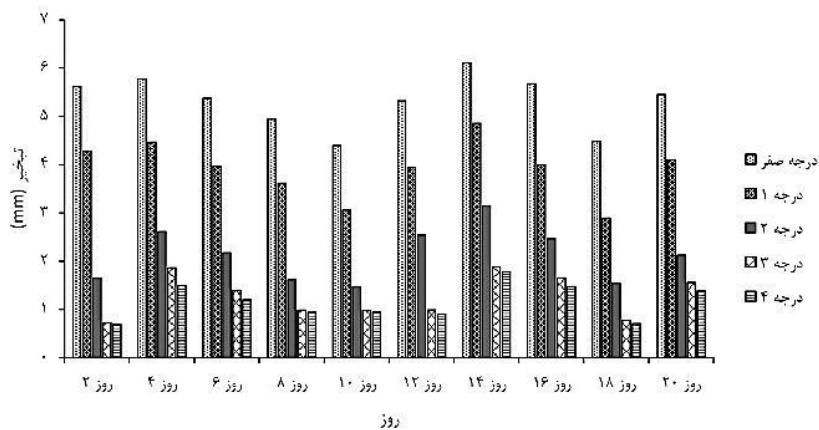
| لوم رسی | لوم | لوم شنی | خصوصیت |
|---------|------|---------|---------------------------------------|
| ۳۰ | ۲۳٫۷ | ۱۰٫۸ | رس (%) |
| ۳۹ | ۴۲٫۴ | ۲۵٫۵ | سیلت (%) |
| ۳۱ | ۳۳٫۹ | ۶۳٫۷ | شن (%) |
| ۲۶ | ۲۰ | ۱۵ | رطوبت FC (معادل مکش ۳۰ KPa) درصد وزنی |
| ۰٫۷۸ | ۱٫۷ | ۱٫۸۸ | EC عصاره اشباع (dS m ⁻¹) |
| ۷٫۶ | ۷٫۷ | ۸٫۲ | pH گل اشباع |
| ۱۹ | ۲۰٫۱ | ۵٫۴ | کربنات کلسیم معادل (%) |
| ۳٫۹۴ | ۲٫۸۸ | ۱٫۳۱ | ماده آلی (%) |

جدول ۳. مقدار اسید استتاریک مورد نیاز برآورد شده با آزمون WDPT جهت ایجاد درجه‌های مشخص آبگریزی در سه خاک

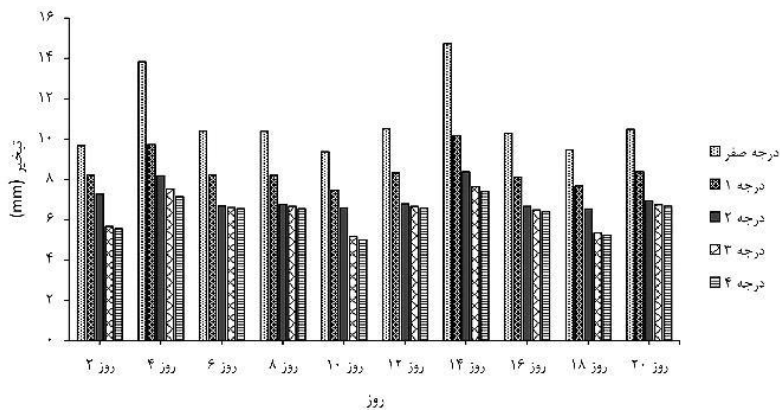
| مقدار اسید استتاریک مورد نیاز (g kg ⁻¹ soil) | | | درجه آبگریزی |
|---|---------|-------------|-----------------------|
| خاک لوم رسی | خاک لوم | خاک لوم شنی | |
| صفر | صفر | صفر | ۰ (بدون آبگریزی) |
| ۱۳/۶ | ۱۱ | ۷/۶ | ۱ (آبگریزی جزئی) |
| ۱۴/۳ | ۱۱/۷۵ | ۸/۷ | ۲ (آبگریزی زیاد) |
| ۱۵/۲ | ۱۲/۵ | ۹/۵ | ۳ (آبگریزی شدید) |
| ۱۹/۸ | ۱۶/۶ | ۱۴/۱ | ۴ (آبگریزی خیلی شدید) |

سه خاک در روز ۱۴ آزمایش دیده شد که برای خاک‌های لوم شنی، لوم و لوم رسی به ترتیب برابر با ۱۴/۳۳، ۶/۱۱ و ۱۸/۸۶ میلی‌متر در تیمار شاهد بود. در این روز مقدار تبخیر در بالاترین درجه آبگریزی (درجه ۴) برای این خاک‌ها به ترتیب برابر ۱/۷۸، ۷/۳۹ و ۱۳/۲۴ میلی‌متر بود.

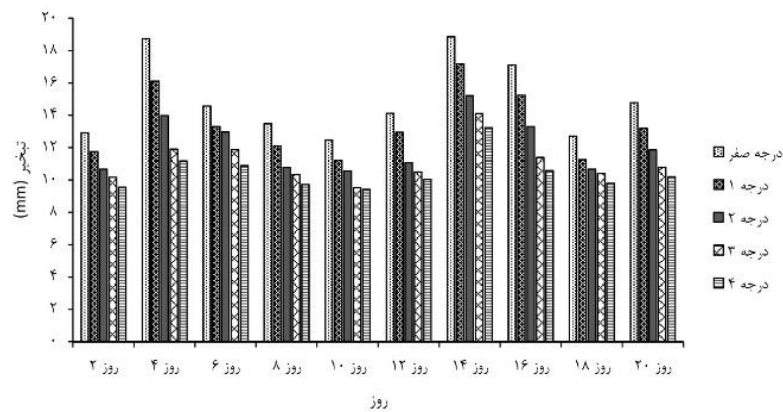
چنانچه در این شکل‌ها مشهود است، با افزایش درجه آبگریزی لایه سطحی در لایسیمترها میزان تبخیر سطحی کاهش یافته است. Bachmann و همکاران (۲۰۰۱) و Hallett (۲۰۰۸) نیز اثر کاهش آبگریزی بر میزان تبخیر را گزارش نموده‌اند. بیش‌ترین مقدار تبخیر انجام یافته در هر



شکل ۲. میزان تبخیر از خاک لوم شنی در درجه‌های مختلف آبگریزی در روزهای مختلف



شکل ۳. میزان تبخیر از خاک لوم در درجه‌های مختلف آبگریزی در روزهای مختلف



شکل ۴. میزان تبخیر از خاک لوم رسی در درجه‌های مختلف آبریزی در روزهای مختلف

بودن تبخیر در خاک لوم رسی به علت اثر موئینگی قوی‌تر و تأمین بهتر رطوبت به سطح تبخیر (سطح خاک) در این خاک می‌باشد. در خاک‌های لوم و لوم شنی به علت کاهش تأمین رطوبت به سطح خاک در شرایط یکسان اقلیمی به ترتیب مقادیر تبخیر سطحی کمتری مشهود است. همچنین در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که بر اساس شرایط تبخیری اتمسفر میزان تبخیر متفاوتی از هریک از لایسیترها در روزهای متفاوت دوره آزمایشی روی داده است.

میزان کاهش تبخیر در لایسیتراهای با لایه آبریز در درجه‌های مختلف نسبت به لایسیترا شاهد یا آبریزی درجه صفر در خاک‌هایی با بافت متفاوت در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق این جدول درصد کاهش تبخیر در خاک لوم شنی بیشتر از خاک لوم و لوم رسی است. در خاک لوم شنی بیشینه درصد کاهش تبخیر برابر ۷۸٫۳ درصد است درحالی‌که در خاک‌های لوم و لوم رسی این مقدار به ترتیب برابر با ۴۲٫۲ و ۳۰٫۱ درصد است.

جدول ۴. میانگین درصد کاهش تبخیر در لایسیتراهای دارای لایه سطحی با درجه‌های آبریزی مختلف نسبت به تیمار بدون آبریزی (شاهد)

در خاک‌های مورد آزمایش

| درجه آبریزی | کاهش تبخیر (%) | |
|-------------|----------------|---------|
| | لوم | لوم رسی |
| ۱ | ۲۶٫۳ | ۱۰٫۳ |
| ۲ | ۵۹٫۸ | ۱۹٫۱ |
| ۳ | ۷۵٫۹ | ۲۵٫۹ |
| ۴ | ۷۸٫۳ | ۳۰٫۱ |

همان‌گونه که در شکل‌های ۲ تا ۴ دیده می‌شود، کم‌ترین مقدار تبخیر مشاهده شده در دوره آزمایشی در سه خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی در روز ۱۰ اتفاق افتاد که برای تیمار شاهد در خاک‌های مذکور به ترتیب برابر ۴/۳۹، ۹/۳۸ و ۱۲/۴۷ میلی‌متر بود. در این روز مقدار تبخیر در بالاترین درجه آبریزی (درجه ۴) برای این خاک‌ها به ترتیب ۰/۹۴، ۵/۰۱ و ۹/۴۱ میلی‌متر بود. با افزایش درجه آبریزی خاصیت موئینگی لایه سطحی در انتقال رطوبت به سطح تبخیر کاهش یافته و میزان تبخیر می‌یابد (Hallett, 2008; Bachmann *et al.*, 2001; ناظم السادات، ۱۳۹۳).

مقایسه شکل‌های ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که در بین سه خاک مورد آزمایش بیش‌ترین تبخیر صورت گرفته از خاک لوم رسی بوده و سپس خاک‌های لوم و لوم شنی از نظر مقدار تبخیر در درجات بعدی قرار دارند. قربانیان و همکاران (۱۳۹۳) نیز در تحقیق خود مشاهده نمودند که بافت خاک بر میزان تبخیر مؤثر بوده و در خاک‌های ریزبافت‌تر مقدار تبخیر بیشتری گزارش نمودند. دلیل بیشتر

جدول ۵. جدول تجزیه واریانس تأثیر درجه آبگریزی بر مقدار تبخیر سطحی از خاک لوم شنی

| خاک | منابع تغییرات | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | آماره F |
|---------|---------------|--------------|------------|----------------|---------|
| لوم شنی | تیمار | ۳۹۱,۰۲۱ | ۴ | ۹۷,۷۵۵** | ۳۹۸,۱۸۲ |
| | خطا | ۳۵,۵۹۸ | ۱۴۵ | ۰,۲۴۶ | |
| | کل | ۴۲۶,۶۱۹ | ۱۴۹ | | |
| لوم | تیمار | ۴۳۹,۸۰۶ | ۴ | ۱۰۹,۹۵۱** | ۱۰۰,۷۳۵ |
| | خطا | ۱۵۸,۲۶۷ | ۱۴۵ | ۱,۰۹۱ | |
| | کل | ۵۹۸,۰۷۳ | ۱۴۹ | | |
| لوم رسی | تیمار | ۳۹۶,۴۸۳ | ۴ | ۹۹,۱۲۱** | ۳۳,۴۲۱ |
| | خطا | ۴۳۰,۰۴۲ | ۱۴۵ | ۲,۹۶۶ | |
| | کل | ۸۲۶,۵۲۵ | ۱۴۹ | | |

** نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

و موئینگی خاک شده و در نهایت تبخیر از خاک را کاهش دهد.

مقایسه میانگین تبخیر از خاک‌های مورد آزمایش در درجه‌های مختلف آبگریزی در جدول ۶ آمده است. مقادیر جدول مذکور نشان می‌دهد میانگین تبخیر از لایسیمترهایی با لایه سطحی با آبگریزی متفاوت، دارای اختلاف معنی‌دار (در سطح ۵ درصد) بوده و افزایش درجه آبگریزی موجب کاهش میانگین تبخیر از لایسیمترها در خاک‌های لوم شنی، لوم و لوم رسی شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود تفاوت بین میانگین تبخیر در درجه‌های آبگریزی ۳ و ۴ در این خاک‌ها معنی‌دار (سطح ۵ درصد) نیست، یعنی میزان افزایش آبگریزی لایه سطحی موجب تفاوت معنی‌داری در کاهش تبخیر در تیمار با لایه آبگریز درجه ۴ نسبت به تیمار با لایه آبگریزی درجه ۳ نشده است. بررسی ماندگاری آب‌گیری با اندازه‌گیری مقدار زمان نفوذ قطره آب (WDPT) در تیمارهای مختلف پس از اتمام آزمایش‌های اندازه‌گیری تبخیر سطحی در خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی نشان داد که با گذشت زمان، مقدار WDPT یا آبگریزی خاک کاهش یافته و خاک‌ها به درجه‌های پایین‌تر آبگریزی رسیدند (جدول ۷).

طبق نظر Bachmann و همکاران (۲۰۰۱) مقدار متفاوت تبخیر از خاک می‌تواند علاوه بر آبگریزی تحت تأثیر عوامل دیگری مانند تخلخل، توزیع اندازه ذرات و منافذ باشد. همچنین با افزایش درجه آبگریزی درصد کاهش تبخیر، افزایش می‌یابد اما مقدار این افزایش با افزایش درجه آبگریزی به تدریج کمتر می‌شود.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر درجه آبگریزی بر مقدار تبخیر سطحی از خاک‌های لوم شنی، لوم و لوم رسی در جدول ۵ آورده شده است. جدول ۵ نشان‌دهنده اثر معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) لایه سطحی آبگریز در مقدار تبخیر از لایسیمترها در خاک لوم شنی، لوم، لوم رسی می‌باشد. اثر لایه آبگریز سطحی در کاهش تبخیر می‌تواند ناشی از کاهش نیروهای موئینگی خاک و در نتیجه نرسیدن آب به سطح خاک باشد (Hallett, 2008; ناظم السادات، ۱۳۹۳). این عامل مانع از رسیدن آب به سطح تبخیر می‌گردد و در یکی از شرایط لازمه تداوم تبخیر که تأمین یا انتقال رطوبت به سطح تبخیر (خاک) است، اختلال ایجاد می‌کند. ناظم السادات (۱۳۹۳) نیز در تحقیق خود در مورد اثر آبگریزی ناشی از مصرف آب فاضلاب در آبیاری، این دلیل را گزارش نموده است. DeBano (۱۹۸۱) و Bachmann و همکاران (۲۰۰۱) گزارش نمود که مواد آبگریز با پوشش ذرات خاک موجب کاهش خیس‌کنندگی

جدول ۶. مقایسه میانگین میزان تبخیر از خاک‌های متفاوت در درجه‌های مختلف آبریزی



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال پنجم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۵

| درجه آبریزی | میانگین تبخیر | | |
|-------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | لوم شنی | لوم | لوم رسی |
| صفر | ۵,۳۱۷ ^a | ۱۰,۹۱۴ ^a | ۱۴,۹۷۷ ^a |
| ۱ | ۳,۹۲۰ ^b | ۸,۴۵۵ ^b | ۱۳,۴۳۶ ^b |
| ۲ | ۲,۱۳۹ ^c | ۷,۰۸۶ ^c | ۱۲,۱۱۲ ^c |
| ۳ | ۱,۲۸۲ ^d | ۶,۴۵۴ ^d | ۱۱,۱۰۶ ^d |
| ۴ | ۱,۱۵۴ ^d | ۶,۳۰۹ ^d | ۱۰,۴۶۵ ^d |

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

داد. درحالی‌که این خاک در درجه آبریزی ۴ پس از ۶۰ روز هنوز مقداری از آبریزی خود را حفظ کرده است، هرچند که دیگر دارای آبریزی درجه ۴ نیست و با توجه به کلاس‌بندی آبریزی Dekker و Ritsema (۱۹۹۴) به آبریزی درجه ۲ رسیده است (جدول ۱).

دلیل این کاهش مقدار آبریزی ناشی از تجزیه اسید استتاریک با گذشت زمان در اثر عوامل طبیعی می‌باشد. همچنین ماندگاری آبریزی در درجه‌های پایین‌تر آبریزی، کمتر از درجه‌های بالاتر آبریزی می‌باشد. به‌عنوان مثال در خاک لوم شنی خاک با آبریزی درجه ۲، پس از ۶۰ روز خاصیت یا اثر آبریزی خود را از دست

جدول ۷. زمان نفوذ قطره آب (WDPT) (ثانیه) در درجه‌های مختلف آبریزی پس از اتمام آزمایش‌های تبخیر در خاک‌های مختلف

| خاک | درجه آبریزی | زمان (روز) | | | | | |
|---------|-------------|------------|------|------|-----|-----|----|
| | | ۰ | ۱۵ | ۳۰ | ۴۵ | ۶۰ | ۷۵ |
| لوم شنی | صفر | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ |
| | ۱ | ۱۹ | ۱۹ | ۱۷ | ۱۲ | <۵ | <۵ |
| | ۲ | ۲۱۰ | ۲۰۰ | ۱۳۰ | ۵۰ | <۵ | <۵ |
| | ۳ | ۱۶۵۰ | ۱۵۹۰ | ۷۸۰ | ۱۴۰ | ۴۰ | <۵ |
| | ۴ | >۳۶۰۰ | ۲۰۸۰ | ۹۸۰ | ۳۵۰ | ۸۰ | <۵ |
| لوم | صفر | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ |
| | ۱ | ۲۱ | ۲۰ | ۱۸ | ۱۵ | ۱۱ | <۵ |
| | ۲ | ۱۵۰ | ۱۲۰ | ۸۰ | ۴۰ | ۱۳ | <۵ |
| | ۳ | ۱۴۱۵ | ۱۱۱۰ | ۶۴۰ | ۲۷۰ | ۶۵ | <۵ |
| | ۴ | >۳۶۰۰ | ۲۴۰۰ | ۱۱۲۰ | ۶۱۰ | ۱۳۰ | ۲۸ |
| لوم رسی | صفر | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ | <۵ |
| | ۱ | ۱۸ | ۱۸ | ۱۶ | ۱۳ | <۵ | <۵ |

| | | | | | | | |
|----|----|-----|-----|------|------|-------|---|
| <۵ | <۵ | ۲۱ | ۵۰ | ۹۰ | ۱۳۰ | ۱۴۰ | ۲ |
| <۵ | <۵ | ۵۰ | ۲۶۰ | ۷۸۰ | ۱۱۴۰ | ۱۳۹۰ | ۳ |
| <۵ | ۳۱ | ۱۵۰ | ۵۴۰ | ۱۳۰۰ | ۲۷۰۰ | >۳۶۰۰ | ۴ |

لوم و لوم شنی از نظر مقدار تبخیر در درجات بعدی قرار داشتند. دلیل بیشتر بودن تبخیر در خاک لوم رسی به علت اثر موئینگی قوی تر و تأمین بهتر رطوبت به سطح تبخیر (سطح خاک) در این خاک می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات مشابه انجام گرفته هم‌خوانی داشت. با توجه به تجزیه اسید استتاریک در طول فصل، ماندگاری آبگریزی در درجات مختلف آبگریزی متفاوت بود و در درجه‌های پایین‌تر، خاک آبگریزی خود را در حدود ۲ ماه از دست داد، اما در درجات آبگریزی بالاتر ماندگاری حالت آبگریزی تا ۳ ماه نیز مشاهده شد. مقایسه ماندگاری آبگریزی بین سه خاک نشان می‌دهد که کاهش مقدار آبگریزی در اثر گذشت زمان در خاک لوم شنی سریع‌تر صورت گرفته و در خاک‌های لوم و لوم رسی دیرتر اتفاق افتاده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از مقدار کمتر اسید استتاریک در این خاک و شرایط مطلوب‌تر تهویه‌ای برای تجزیه سریع‌تر آن باشد. در کنار قابلیت‌های بالای لایه آبگریزی بر کاهش میزان تبخیر و صرفه اقتصادی از نظر هزینه مواد مورد استفاده در این روش، بایستی به اثرات زیست محیطی ماده آلی استفاده شده به عنوان آبگریز، تغییر خصوصیات و رفتارهای خاک از قبیل کاهش سرعت نفوذ و ایجاد رواناب، ایجاد مسیرهای جریان ترجیحی نیز به‌عنوان محدودیت‌های آن توجه داشت.

سپاسگزاری

این مقاله از طرح تحقیقاتی که با بودجه پژوهشی و حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز به انجام رسیده، استخراج شده است. نویسندگان مقاله از پشتیبانی و راهنمایی‌های مسئولین محترم پژوهشی دانشگاه کمال تشکر را دارند.

مقایسه ماندگاری آبگریزی بین سه خاک نشان می‌دهد که کاهش مقدار آبگریزی در اثر گذشت زمان در خاک لوم شنی سریع‌تر صورت گرفته و در خاک‌های لوم و لوم رسی دیرتر اتفاق افتاده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از مقدار کمتر اسید استتاریک در این خاک (مطابق جدول ۳) و شرایط مطلوب‌تر تهویه‌ای برای تجزیه سریع‌تر آن باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اثر آبگریزی لایه سطحی خاک با چهار درجه مختلف آبگریزی بر میزان تبخیر از سه خاک بافت درشت (لوم شنی)، متوسط (لوم) و ریز (لوم رسی) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، خاک‌ها به‌صورت مصنوعی در چهار غلظت متفاوت از اسید استتاریک و به روش زمان نفوذ قطره آب برای حصول چهار درجه مختلف آبگریزی آبگریز شدند. نتایج کلی تحقیق بیان‌گر کاهش معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) مقدار تبخیر سطحی با حضور لایه باریک آبگریز از خاک‌هایی با بافت مختلف بود و افزایش درجه آبگریزی لایه سطحی موجب کاهش بیشتر میزان تبخیر از خاک و کاهش تلفات ناشی از آب شد، با این وجود این افزایش رفته‌رفته بین دو درجه آبگریزی متوالی کاهش یافت. همچنین بیش‌ترین درصد کاهش تبخیر در تیمارهای با لایه آبگریز نسبت به تیمار شاهد (درجه صفر آبگریزی) در خاک لوم شنی دیده شد و در خاک‌های لوم و لوم رسی مقدار درصد کاهش تبخیر در درجات بعدی قرار داشت. میزان تبخیر از لایسمترها با درجه آبگریزی متفاوت در روزهای متفاوت دوره آزمایش بر اساس قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر مقدار متفاوتی بود. در بین سه خاک مورد آزمایش بیش‌ترین تبخیر صورت گرفته از خاک لوم رسی بوده و خاک‌های

فهرست منابع

- بیرامی، ح. ۱۳۹۳. اثر آبریزی بر شاخص‌های جریان ترجیحی و پارامترهای انتقال بروماید در خاک. رساله دکتری. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- بیرامی، ح.، نیشابوری، م.ر.، ناظمی، ا.ح. و عباسی، ف. ۱۳۹۴a. تأثیر آبریزی خاک بر مشخصات نفوذ در دو خاک لوم رسی و لوم شنی. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۲): ۱۷۷-۱۹۹.
- بیرامی، ح.، نیشابوری، م.ر.، عباسی، ف. و ناظمی، ا.ح. ۱۳۹۴b. تأثیر آبریزی خاک بر منحنی نگهداری رطوبت و شاخص کیفیت فیزیکی در دو خاک با بافت متفاوت. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵(۴/۱): ۱۷-۲۶.
- حیدری، ن.، اسلامی، ا.، قدمی فیروزآبادی، ع. و کانونی، ا. ۱۳۸۵. کارایی محصولات زراعی مناطق مختلف کشور. اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی.
- ذوالفقاری، ع.ا. و حاج‌عباسی، م.ع. ۱۳۸۷. تأثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آبریزی خاک در مراتع فریدون شهر و جنگل‌های لردگان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲(۲): ۲۶۲-۲۵۱.
- عباسی، ف.، ناصری، ا.، سهراب، ف.، باغانی، ج.، عباسی، ن. و اکبری، م. ۱۳۹۴. ارتقای بهره‌وری مصرف آب. نشریه ۳۴/۹۴ مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- قربانیان، م.، لیاقت، ع. و نوری، ح. ۱۳۹۳. بررسی اثر تراکم و بافت خاک بر تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی ذرت علوفه‌ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۲): ۴۵۳-۴۶۳.
- ناظم السادات، ن. ۱۳۹۳. تأثیر استفاده از لجن فاضلاب بر آب‌گریزی و تبخیر از سطح خاک در دو بافت مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.
- نورمهند، ن. و طباطبائی، س.ح. ۱۳۹۳. تأثیر آب‌گریزی ناشی از کاربرد پساب فاضلاب بر میزان رطوبت خاک، اولین همایش ملی محیط‌زیست، دانشگاه پیام نور واحد دهقان.
- Arye, G., Tarchitzky, J. and Chen, Y. 2011. Treated wastewater effects on water repellency and soil hydraulic properties of soil aquifer treatment infiltration basins. *Journal of Hydrology*, 397: 136-145.
- Bachmann, J., Horton, R. and van der Ploeg, R.R. 2001. Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1599-1607.
- Bughici, T. and Wallach, R. 2016. Formation of soil-water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern. *Geoderma*, 262: 1-11.
- Burguet, m. Taguas, E.V., Cerdà, A. and Gómez, J.A. 2016. Soil water repellency assessment in olive groves in Southern and Eastern Spain. *Catena*, 147: 187-195.
- Davis, D.D., Horton, R., Heitman, J.L. and Ren, T. 2014. Effects of hydrophobic layers on evaporation from porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:125-132.
- DeBano, L.F. 1975. Infiltration, evaporation and water movement as related to water repellency. In: *Soil Conditioners, Symposium Proceedings, Experimental Methods and Uses of Soil Conditioners* (Moldenhauer, W.C., Program Chairman), 15-16 November 1973. Las Vegas, NV. Soil Science Society of America Special Publication Series 7, Madison, WI, pp. 155-163 (186p).
- DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. USDA Forest Service General Technical Report PS W-46, 21p.
- DeBano, L.F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.* 231-232: 4-32.
- Dekker, L.W. and Jungerius, P.D. 1990. Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena*, Supplement. 18: 173-183.
- Dekker, L.W. and Ritsema, C.J. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resour Res.*, 30: 2507-2517.
- Diamantopoulos, E., Durner, W., Reszkowska, A. and Bachmann, J. 2013. Effect of soil water repellency on soil hydraulic properties estimated under dynamic conditions. *Journal of Hydrology*, 486: 175-186.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. and Walsh R.P.D. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Sci Rev.*, 51: 33-65.

- Goebel, M.O., Bachmann, J., Reichstein, M., Janssens, I.A. and Guggenberger, G. 2011. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events? *Glob. Chang. Biol.* 17:2640–2656.
- Hallett, P.D. 2008. A brief overview of the causes, impacts, and amelioration of soil water repellency. *Soil and Water Resources*, 3: S21–S29.
- Jarvis, N., Etana, A. and Stagnitti, F. 2008. Water repellency, near-saturated infiltration and preferential solute transport in a macroporous clay soil. *Geoderma*, 143: 223–230.
- Kettridge, N., Humphrey, R.E., Smith, J.E., Lukenbach, M.C., Devito, K.J., Petrone, R.M. and Waddington, J.M. 2014. Burned and unburned peat water repellency: implications for peatland evaporation following wildfire. *J. Hydrol.* 513:335–341.
- Krueger, J., Böttcher, J., Schmunk, C. and Bachmann, J. 2016. Soil water repellency and chemical soil properties in a beech forest soil — spatial variability and interrelations. *Geoderma*, 271: 50-62.
- Leelamanie, D.A.L., Karube, J. and Yoshida, A. 2008. Characterizing water repellency indices: Contact angle and water drop penetration time of hydrophobized sand. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54: 179–187.
- Liyanage, T.D.P. and Leelamanie, D.A.L. 2016. Influence of organic manure amendments on water repellency, water entry value, and water retention of soil samples from a tropical Ultisol. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(2): 160-166.
- Letey, J., Osborn, J. and Pelishek, R.E. 1962. The influence of the water-solid contact angle on water movement in soil. *Bulletin International Association Scientific Hydrology*, 3: 75–81.
- Lozano, E., Jiménez-Pinilla, P., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Bárcenas, G.M., González- Pérez, J.A., García-Orenes, F., Torres, M.P. and Mataix-Beneyto, J. 2013. Biological and chemical factors controlling the patchy distribution of soil water repellency among plant species in a Mediterranean semiarid forest. *Geoderma* 207:212–220.
- Mao, J., Nierop, K.G.J., Rietkerk, M. and Dekker, S.C. 2015. Predicting soil water repellency using hydrophobic organic compounds and their vegetation origin. *Soil*, 1: 411-425.
- Mao, J., Nierop, K.G.J., Rietkerk, M., Sinninghe Damsté, J.S. and Dekker, S.C. 2016. The influence of vegetation on soil water repellency-markers and soil hydrophobicity. *Science of the total environment*, 566-567: 608-620.
- Rye, C. and Smettem, K. 2017. The effect of water repellent soil surface layers on preferential flow and bare soil evaporation. *Geoderma*, 289: 142–149.
- Robinson, D.A., Lebron, I., Rye, R.J. and Jones, S.B. 2010. Soil water repellency: a method of soil moisture sequestration in Pinyon–Juniper woodland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 624–634.
- Shokri, N., Lehmann, P. and Or, D. 2009. Characteristics of evaporation from partially wettable porous media. *Water Resour. Res.* 45(2).