نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، ص. ۴۲-۳۱

Water Management in Agriculture
Vol. 12, No. 2, Autumn and Winter 2026, 31-42

مقاله علمی -پژوهشی

بررسی تغییرات شوری خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در باغات پسته کرمان

محمدرضا امداد*[۱]، آرش تافته[۲] و آرش صباح[۳]

چکیده

سامانه آبیاری زیرسطحی در باغات رو به توسعه بوده و ضروری است تغییرات شوری خاک در منطقه توسعه ریشه در این روش آبیاری بررسی شود. سه باغ پسته دارای سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی آبیاری شده انتخاب و تغییرات شوری خاک با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی بررسی شد. شوری خاک در لایه قرارگیری لوله آبده حداقل و با دور شدن از قطره‌چکان، شوری افزایش یافت. در شوری‌های زیاد آب آبیاری (۸/۵ دسی‌زیمنس بر متر) الگوی تغییرات شوری خاک در لایه‌های سطحی خاک افزایش‌یافته و این افزایش بالاتر از حد آستانه تحمل درخت پسته است. در شوری‌های آب آبیاری کم (۲/۵ و ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر)، تغییرات شوری در لایه سطحی خاک چندان زیاد نبوده و موجب تجمع نمک نشده است. متوسط شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای تغییرات شوری خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل برابر ۱۷ درصد و بیانگر کارایی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است. به‌منظور جانمایی عمق کارگذاری لوله‌های آبده و قطره-چکان‌ها در این سامانه شناسایی تغییرات شوری خاک و نیز عمق توسعه ریشه ضروری بوده و پاسخگوی اثربخشی این سامانه بر بازده آبیاری، عملکرد و نهایتاً افزایش بهره‌وری آب کشاورزی است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات شوری خاک، شوری آب، شدت جریان، مدیریت آبیاری

مقدمه

نظر به اینکه هر ساله بر وسعت اراضی آبیاری تحت‌فشار با هدف ارتقاء بهره‌وری و کارایی مصرف آب افزوده می‌شود، اما شناخت مسائل، تنگناها و همچنین مزایای این روش‌ها، نقش شایانی در ارائه برنامه‌ریزی و ارتقاء مدیریت آبیاری دارد. اولین مرحله پس از معرفی هر روش آبیاری، لزوم تعیین اثربخشی آن و در ادامه تصمیم به توسعه آن روش است. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نوعی آبیاری قطره‌ای است که آب در ناحیه ریشه به‌صورت کنترل‌شده در اختیار درخت قرارگرفته و به همین دلیل در زمان استفاده از حجم معینی آب، کارایی بیشتر این روش در مقایسه با روش قطره‌ای سطحی، مورد انتظار است. بااین‌حال، برای اثربخشی این روش آبیاری در تولید و حفظ منابع آبی، نیاز به طراحی، اجرا و نگهداری مناسب از سامانه بوده و این موارد در شرایط محدودیت‌های کمی و کیفی منابع آب‌وخاک با چالش‌های بیشتری روبرو خواهد بود. ازجمله مزایای این روش کاهش تبخیر سطحی، رواناب و نفوذ عمقی، ارتقاء کارایی مصرف آب، کاهش علف‌های هرز، فواید زراعی مرتبط با عملیات کاشت شامل افزایش رشد گیاه و افزایش کمی و کیفی تولید است. همچنین تجمع نمک در حاشیه جبهه رطوبتی و عدم آبشویی نیمرخ خاک، گرفتگی قطره‌چکان‌ها، عدم امکان پایش رطوبت و شوری خاک،

[۱] دانشیار، دکتری، عضو هیئت علمی، بخش آبیاری، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (*- نویسنده مسئول: Email: emdadmr591@yahoo.com)
[۲] دانشیار، دکتری، عضو هیئت علمی، بخش آبیاری، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
[۳] مربی پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش و منابع طبیعی کرمان، کرمان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

الگوی خیسیده کوچک، جوانه‌زنی غیریکنواخت و هزینه سرمایه-گذاری زیاد اولیه در مقایسه با دیگر سامانه‌های آبیاری، ازجمله چالش‌ها و معایب این روش آبیاری گزارش شده است. از دیدگاه مدیریت بهینه مصرف آب، تضمین موفقیت توسعه این سامانه آبیاری در گرو شناخت و دانش بیشتر در روابط آب، خاک و گیاه است. پسته ازجمله مهم‌ترین محصولات کشاورزی و به‌عنوان یک محصول راهبردی جایگاه خاصی در بین تولیدات کشاورزی دارا است (اسلامی و همکاران، ۱۴۰۲).

در تحقیقات مختلف، تبخیر و تعرق درخت پسته بین ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر در طول فصل گزارش‌شده است. اگرچه برخی تحقیقات تبخیر و تعرق درخت بارده پسته را حدود ۹۱۰ میلی‌متر گزارش کرده‌اند (Steduto et al., 2012). نتایج بررسی مدیریت آبیاری سطحی و قطره‌ای در باغات پسته (رقم احمد آقایی) منطقه خشکه‌رود زرندیه ساوه نشان داد که میانگین دوساله عملکرد خشک درروش آبیاری سطحی و قطره‌ای به ترتیب برابر ۷۳۹ و ۹۲۷ کیلوگرم در هکتار، میانگین آب مصرفی ۶۳۷۵ و ۴۱۱۰ مترمکعب در هکتار و کارایی مصرف آب ۱۲۵ و ۱۹۰ گرم محصول خشک به ازای هر مترمکعب آب است (گنجی خرمدل و کیخایی، ۱۳۹۵).

بررسی دورهای مختلف آبیاری بر توزیع رطوبت، شوری و عملکرد درختان پسته ۱۵ ساله در خاک سیلتی‌لوم و با روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری با آب‌شور (با شوری ۴/۲ دسی‌زیمنس بر متر) در شرایط اقلیم بیابانی سیرجان نشان داد که کاربرد بیشتر آب مصرفی باعث تجمع کمتر نمک در منطقه توسعه ریشه شد. عملکرد محصول در تیمارهای آبیاری با دور ۳ و ۱۴ روز به ترتیب ۳/۳ و ۳/۷ کیلوگرم در هر درخت بود. دور آبیاری ۳ روز موجب کاهش ۴۰ درصدی پوکی و افزایش ۹۳ درصدی خندانی محصول شد. حجم آب مصرفی در تیمار با دور ۳ و ۱۵ روز به ترتیب ۱۳۲۹ و ۶۹۲ میلی‌متر و اختلاف معنی-داری در عملکرد دو تیمار مشاهده نشد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج بررسی سامانه آبیاری زیرسطحی در باغات پسته در کشکوئیه رفسنجان که شامل دو عمق کارگذاری ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر و سه سطح آب مصرفی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی با سه تکرار و در چهار سال بود، نشان داد که در اثر کاربرد آب آبیاری در تیمارهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی (به ترتیب به میزان ۲۰۵۰، ۳۰۶۵ و ۴۰۱۰ مترمکعب در هکتار در سال)، در هیچ‌یک از سال‌های انجام طرح اختلاف معنی‌داری در عملکرد درختان پسته مشاهده نشد (نقوی، ۱۳۹۵).

در شهرستان سروستان طی سال زراعی ۹۸-۹۷ پژوهشی باهدف مقایسه حجم آب و بهره‌وری آب آبیاری در بسترهای مختلف توزیع آب در روش آبیاری سطحی در یک باغ پسته رقم احمد آقایی اجرا شد. تیمارها شامل: روش غرقابی رایج با عرض نوار ۶ متر (تیمار شاهد)، نهر ایجاد شده در دو طرف ردیف درختان (نهرکن)، کاهش عرض نوار از طریق مرز ایجادشده در وسط ردیف درختان (مرزبند) و بستر سینه‌مرغی ایجاد شده در دو طرف ردیف درختان (کدول) بود. حجم آب آبیاری با توجه به دبی ورودی به هر تیمار و زمان قطع آبیاری بر اساس مدیریت اعمال شده باغدار در تیمارهای شاهد، مرزبند، کدول و نهرکن به ترتیب ۸۴۰۰، ۴۶۴۸، ۴۲۰۰ و ۳۰۸۰ مترمکعب در هکتار در طی سال زراعی به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در تمامی تیمارها، بهره‌وری آب آبیاری نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. میزان این افزایش در تیمارهای نهرکن، کدول و مرزبند نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۲۰، ۹۱ و ۶۲ درصد بود. درنهایت، تیمار نهرکن و سپس کدول با کاهش آب آبیاری به ترتیب به میزان ۶۳ و ۵۰ درصد و عدم معنی‌داری عملکرد نسبت به تیمار شاهد به‌عنوان بهترین تیمارهای آبیاری درختان پسته در باغ موردنظر پیشنهاد شدند (اسلامی و همکاران، ۱۴۰۲). بررسی عملکرد، حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب پسته در استان‌های خراسان رضوی، سمنان، کرمان و یزد نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار حجم آب کاربردی و شاخص بهره‌وری آب بود، درحالی‌که تفاوتی بین عملکرد آن‌ها مشاهده نشد. میانگین عملکرد، حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب آبیاری به ترتیب ۱۷۶۴ کیلوگرم در هکتار، ۸۰۵۷ مترمکعب در هکتار و ۰/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شد. همچنین گزارش شد که حجم آب کاربردی در غالب باغ‌های پسته کشور کمتر از نیاز خالص آبیاری بوده و متوسط عملکرد در مقایسه با سایر کشورها حدود ۵۰ درصد کمتر است (موسوی

فضل و همکاران، ۱۳۹۹). اعمال تنش در مرحله‌ای از رشد درخت پسته می‌تواند بدون کاهش عملکرد منجر به صرفه‌جویی آب آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک گردد (Memmi et al., 2016). در اعمال تیمارهای آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد آبیاری معمول منطقه در شهرستان انار استان کرمان گزارش شد که درصد خندانی، تعداد جوانه‌های زایشی در هر درخت و عملکرد در تیمارهای ۱۲۰، ۱۰۰ و ۸۰ درصد آبیاری معمول ازنظر آماری با یکدیگر اختلاف معنی‌دار نداشتند و با کاهش یا افزایش حجم آب آبیاری معمول منطقه به‌اندازه ۲۰ درصد هیچ تأثیری در درصد خندانی و تعداد جوانه‌های زایشی در هر درخت و نیز مقدار عملکرد پسته حاصل نشد. آبیاری با ۸۰ درصد مقدار معمول منطقه (۹۷۹ میلی‌متر در فصل رشد) به‌عنوان مناسب‌ترین تیمار کم‌آبیاری معرفی شد که می‌تواند کمترین تأثیر سوء را بر کمیت و کیفیت محصول پسته داشته باشد (اکبری و زندپارسا، ۱۳۹۶).

درختان پسته می‌توانند در شوری آب آبیاری برابر با ۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش محصول نداشته باشند ولی بین شوری‌های ۸ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش میزان محصول معنی‌دار می‌شود (Shamsi et al., 2022). حساس‌ترین دوره آبیاری گیاه، زمان گلدهی (فروردین‌ماه) و رشد مغز (تیرماه) است و مهم‌ترین آب برای خندان شدن مغزهای پسته آب شهریورماه یا آخرین آب قبل از رسیدن کامل محصول است. استفاده از آب با شوری بالاتر از ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر جهت آبیاری درخت پسته در مناطق پسته‌کاری کرمان گزارش شده است (اسلامی و نقوی، ۱۳۹۰).

مدل هایدروس ابزار مناسبی به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب و انتقال املاح و گرما در خاک در روش‌های مختلف آبیاری (خصوصاً در آبیاری قطره‌ای) است. مدل هایدروس دوبعدی معادله ریچاردز را در شرایط اشباع و غیراشباع خاک و با در نظر گرفتن جذب آب توسط ریشه گیاهان حل می‌کند (Simunek et al., 2008; Simunek et al., 2012). این مدل برای حل عددی معادله‌های حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ– مارکوارت استفاده می‌کند (لطیفی و همکاران، ۱۴۰۱). در شبیه‌سازی شوری خاک در ذرت با مدل هایدروس گزارش شد که تغییرات حرکت آب و املاح در خاک بستگی به سناریوهای مختلف آبیاری داشته و مدل هایدروس دوبعدی دقت بالایی در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در مدیریت‌های مختلف آبیاری داشته است (Jia et al., 2023). نتایج شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در شرایط مزرعه و دور آبیاری ثابت ۷، ۵ و ۳ روزه با مدل هایدورس نشان داد که دور آبیاری نقش بیشتری در انتقال آب و املاح در خاک‌های بافت سبک نسبت به خاک سنگین داشته است. همچنین گزارش شد که دورهای مختلف آبیاری برجذب آب گیاه و حجم آب زهکشی در باغات بادام تأثیر داشته و دور آبیاری کوتاه با حجم آب آبیاری کمتر برای دستیابی به راندمان آبشویی بیشتر توصیه شد (Yang et al, 2023).

مدل هایدروس دوبعدی در ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در شرایط مختلف مرزی و مدیریت‌های مختلف آبیاری از دقت بالایی برخوردار است (Devkota et al., 2022). مدل هایدروس به ورودی‌های متعددی برای شبیه‌سازی شوری خاک نیاز داشته و دقت در داده-های ورودی، موجب شبیه‌سازی دقیق‌تر می‌شود (Giang et al., 2023). در تحقیقی پاسخ درخت پسته به تغییرات شوری در سامانه آبیاری قطره‌ای‌سطحی بررسی و گزارش شد که مدل هایدروس در شبیه‌سازی تغییرات شوری از دقت و کارایی بالایی برخوردار است و کمترین میزان تجمع املاح در نزدیکی قطره‌چکان بوده و با دور شدن از قطره‌چکان شوری خاک افزایش یافت (عطایی و همکاران، ۱۳۹۷).

بر اساس آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱، کل مساحت باغات بارور پسته کشور حدود ۵۶۰۰۰۰ هکتار است. حدود ۵۰ درصد باغات بارور پسته کشور در استان کرمان قرار داشته که با توجه به تنوع مدیریت‌های مختلف آبیاری در سامانه قطره‌ای زیرسطحی در باغات و محدودیت کمی و کیفی منابع آب (شوری) و نیز عدم اطلاع کافی از تغییرات شوری در پروفیل خاک، لزوم بررسی تغییرات تجمع و توزیع نمک در این روش آبیاری از اهمیت شایانی برخوردار بوده و بررسی این موارد در

راستای ارائه راهکارهای مدیریتی به‌منظور مدیریت مصرف مناسب آب و افزایش عملکرد ضروری است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۰ در شهرستان سیرجان استان کرمان انجام شد. تعداد سه باغ پسته مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (دو ردیفه) با عمر حدود ۱۴ سال انتخاب شد. اطلاعات کلی باغ‌ها شامل مساحت باغ، تعداد و آرایش قطره‌چکان‌ها، عمق کارگذاری لوله‌ها، نوبت و ساعات آبیاری و متوسط عملکرد پسته (رقم احمدآقایی) جمع‌آوری شد (جدول ۱). در باغات منتخب فواصل درختان پسته در ردیف ۲ متر، فاصله ردیف درختان ۶ متر، سن درختان ۲۰ تا ۲۵ سال و لوله‌های آبیاری در عمق ۳۵ سانتی‌متری از سطح خاک قرار داشت.

نمونه‌برداری از خاک (در دو تکرار) به‌منظور اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و در دو نوبت ابتدا و انتهای فصل انجام شد. تغییرات شوری خاک در محدوده توسعه ریشه در باغات منتخب در طول فصل در دو نوبت (اردیبهشت و مردادماه) و در سه عمق (۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متر) در هر باغ اندازه‌گیری و بررسی شد. داده‌های اقلیمی موردنیاز از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سیرجان (ارتفاع از سطح دریا ۱۷۳۹ متر) و از آمار سال‌های ۱۳۹۸، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ برای تعیین تبخیر و تعرق استاندارد درخت پسته (محاسبه شده با مدل پنمن-مانتیث فائو) و از میانگین سه‌ساله آن‌ها به‌منظور به‌کارگیری در مدل استفاده شد. بر اساس نمونه‌برداری از خاک باغ‌های مورد نظر در لایه‌های مختلف (سه لایه تا عمق ۹۰ سانتی‌متر)، غالب بافت خاک باغ‌ها طبق مثلث بافتی خاک لوم‌شنی (سبک) است (شکل ۱).

جدول ۱- برخی مشخصات باغ‌های منتخب پسته

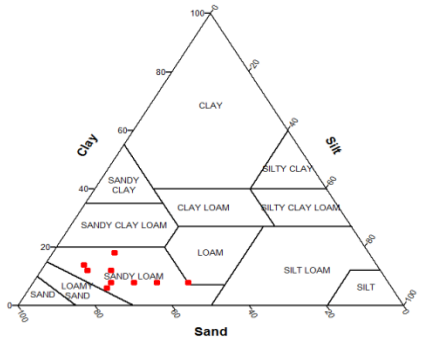
باغ	مساحت باغ هکتار	فواصل قطره‌چکان متر	تعداد قطره-چکان	دبی قطره-چکان لیتر بر ساعت	ساعت آبیاری	فواصل آبیاری روز	سن درختان بارده سال	متوسط عملکرد باغ تن در هکتار
۱	۳۵	۰/۵	۴	۴	۱۲	۱۵	۲۵	۰/۸
۲	۱۷	۰/۵	۴	۲	۲۰	۷	۲۵	۱/۲
۳	۶	۰/۵	۴	۴	۱۵	۱۴	۱۱	۰/۵

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک باغ‌ها

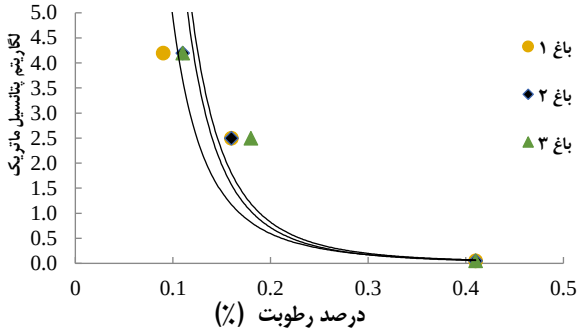
باغ	عمق سانتی‌متر	هدایت الکتریکی اندازه‌گیری نوبت دوم EC دسی زیمنس بر متر			هدایت الکتریکی اندازه‌گیری نوبت اول EC دسی زیمنس بر متر			F.C درصد	P.W.P درصد	pH
		تکرار اول	تکرار دوم	میانگین	تکرار اول	تکرار دوم	میانگین			
۱	۳۰-۰	۱۲/۲	۱۲	۱۲	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴/۸	۹/۳	۷/۹
	۶۰-۳۰	۱۱/۱	۱۰/۳	۱۰/۷	۱۲	۱۳/۴	۱۲/۷			۸
	۹۰-۶۰	۹/۱	۸/۱	۸/۶	۱۱/۳	۱۲	۱۱/۶			۸/۱
۲	۳۰-۰	۱/۸	۲	۲	۲/۷	۲/۶	۲/۷	۱۷/۱	۶/۹	۷/۹
	۶۰-۳۰	۱/۹	۲	۲	۲/۲	۲/۴	۲/۲			۷/۸
	۹۰-۶۰	۱/۵	۲	۱/۸	۲/۳	۲/۵	۲/۳			۷/۹
۳	۳۰-۰	۳/۹	۵/۲	۴/۶	۴/۶	۵	۴/۷	۱۹	۱۱/۲	۷/۹
	۶۰-۳۰	۲/۳	۳/۱	۲/۷	۳/۲	۳/۴	۳/۳			۷/۸
	۹۰-۶۰	۲/۳	۳/۲	۲/۸	۲/۵	۳/۲	۲/۹			۷/۹

جدول ۳- برخی ویژگی‌های کیفی آب آبیاری باغات منتخب

باغ	pH	HCO_3	Na	Ca	Mg	SAR	EC
		میلی‌گرم در لیتر					دسی زیمنس بر متر
۱	۷	۵۲۵	۱۷۳۷	۱۷۶	۱۱۵	۲۵	۹
۲	۷/۲	۱۳۴	۴۱۴	۱۲۰	۷۰	۷/۴	۲/۵
۳	۷/۲	۱۷۱	۵۱۸	۱۲۹	۱۲۲	۷/۸	۳/۵



شکل ۱- مثلث بافت خاک باغ‌های منتخب



شکل ۲- منحنی مشخصه رطوبتی خاک باغ‌های مورد نظر

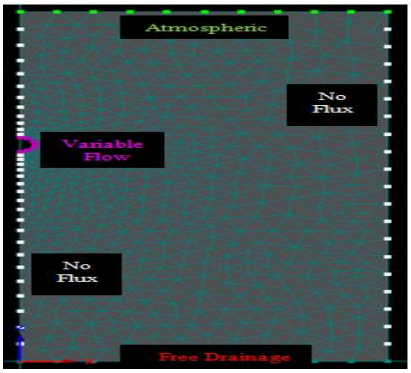
از داده‌های اندازه‌گیری شده نوبت اول برای واسنجی و از داده‌های نوبت دوم به‌منظور صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برخی پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز برای حل معادله ریچاردز طبق توابع ترکیبی معلم- وانگنوختن و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و شبکه عصبی مدل هایدروس تعیین شد (جدول۴). از نسبت دبی قطره‌چکان به شعاع خیس شده (سطح ورود آب) به‌منظور تعیین شدت‌جریان قطره‌چکان (flux) استفاده شد (Skaggs et al., 2004). شدت جریان از نسبت سرعت جریان خروجی قطره‌چکان بر سطح ورود آب در حدفاصل دو قطره‌چکان در آبیاری زیرسطحی تعیین شد (رابطه ۱).

$$q = 1000\ Q / (4.\pi.r^2) \qquad (۱)$$

که در آن q (شدت‌جریان برحسب سانتی‌متر بر ساعت)، Q، دبی قطره‌چکان (لیتر بر ساعت) و r شعاع قطره‌چکان (۲ سانتی متر) است (Provenzano, 2007). مقادیر شدت‌جریان برای باغ ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۳۱۸، ۱۵۹ و ۳۱۸ سانتی‌متر بر ساعت تعیین شد. به‌منظور استفاده و کاربرد مدل هایدروس، از شکل هندسی که عرض آن معادل نصف فواصل قطره‌چکان‌ها (به‌صورت متقارن) و عمق آن معادل حداکثر عمق ریشه درختان پسته (یک متر) برای شبیه‌سازی استفاده شد. توزیع افقی الگوی جذب آب توسط ریشه در این مدل بر اساس حداکثر عمق ریشه یکصد سانتی‌متر و با تمرکز غالب ریشه‌ها در عمق پنجاه سانتی‌متری از سطح تعریف شد تا نزدیک‌ترین حالت به شرایط واقعی هر باغ ایجاد شود. همچنین اطلاعات برنامه آبیاری (دور و عمق) به تفکیک هر باغ برای مدل تعریف شد. شبکه‌بندی با فواصل ۵ سانتی‌متر و تعداد ۹۸۵ گره در شبکه‌بندی برای مدل تعریف شد. سطح خاک به‌عنوان شرایط مرزی اتمسفری و عمق یکصد سانتی‌متری (حداکثر عمق ریشه) به‌عنوان شرایط مرزی زهکشی آزاد به مدل معرفی شد (شکل ۳). از شاخص آماری ریشه مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شد (رابطه ۲).

$$NRMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - P_i\right)^2\right)} / O_{ave} \qquad (۲)$$

که در آن O و P به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و شبیه سازی شده می‌باشند.



شکل ۳- شرایط مرزی در آبیاری زیرسطحی

نتایج و بحث

نتایج باغ ۱

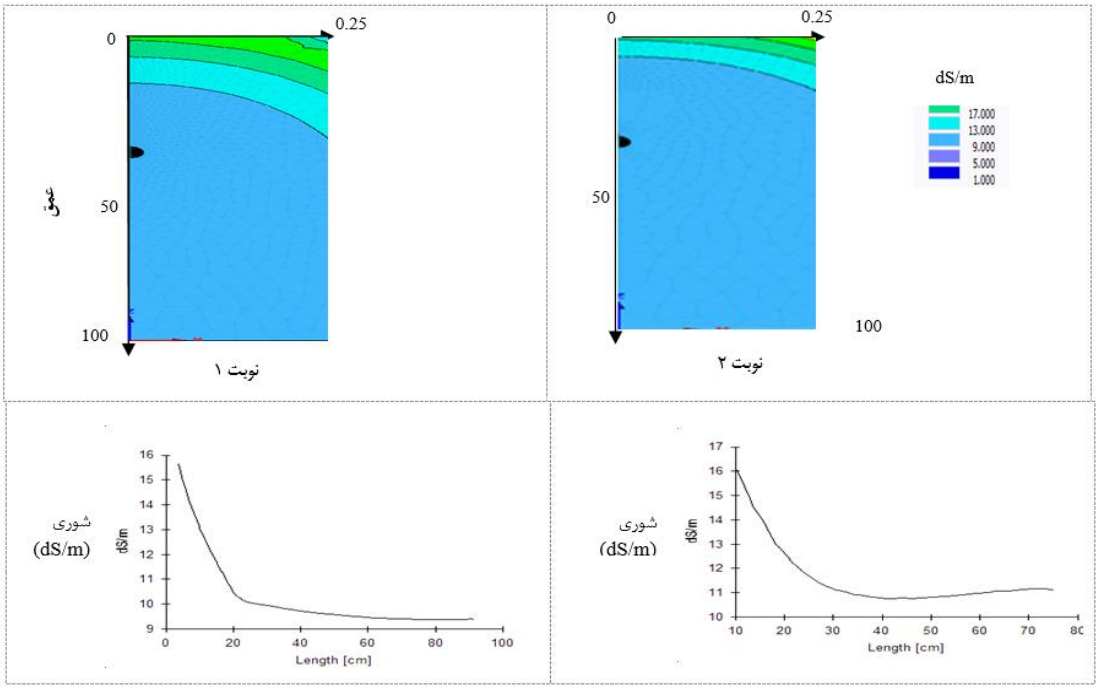
باغ پسته موردنظر با مساحت ۳۵ هکتار، درختان بارده ۲۵ ساله، متوسط عملکرد قابل‌دستیابی ۰/۸ تن در هکتار با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دو ردیفه و ۴ قطره‌چکان ۴ لیتر در ساعت (فواصل قطره‌چکان‌ها ۰/۵ متر) و به مدت ۱۲ ساعت آبیاری می‌شود. محدوده شوری اولیه خاک بین ۹ تا ۱۲ و متوسط شوری آب آبیاری ۸/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. مقادیر تبخیر تعرق واقعی (از رابطه دورنبوس و کاسام، ۱۹۷۹) و تبخیر تعرق استاندارد پسته (مدل پنمن مانتیث فائو) به ترتیب ۶۵۰ و ۷۵۶ میلی‌متر تعیین شد (Steduto et al., 2012). مقادیر شوری خاک اندازه‌گیری شده در لایه‌های مختلف با نتایج شبیه‌سازی‌شده آن با مدل هایدروس دوبعدی مورد مقایسه و ارزیابی واقع شد. شکل ۴ نتایج شوری خاک شبیه‌سازی شده با مدل هایدروس را به ترتیب در دو نوبت اول و دوم اندازه‌گیری (اردیبهشت و مردادماه) در عمق یکصد سانتی‌متری را ارائه می‌کند.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود شوری خاک در لایه قرارگیری لوله آبده و قطره‌چکان‌ها حداقل و با دور شدن از قطره‌چکان افزایش‌یافته و به‌عبارت‌دیگر شوری خاک از سطح به عمق کاهش می‌یابد. مقادیر متوسط شوری خاک در لایه فوقانی (سطح خاک تا عمق ۲۰ سانتی‌متر)، لایه میانی (۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) و لایه پایینی (۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر) در نوبت اول اندازه‌گیری به ترتیب ۱۴، ۱۰ و ۹/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. همچنین مقادیر متناظر شوری خاک اندازه‌گیری شده در لایه‌های مذکور در نوبت دوم اندازه‌گیری در لایه بالایی، میانی و پایینی به ترتیب ۱۵، ۱۱/۵ و ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر است. با توجه به اینکه آب آبیاری دارای شوری ۸/۵ دسی‌زیمنس بر متر بوده، بنابراین در لایه‌های مختلف خاک تجمع نمک وجود داشته که این تجمع از حد آستانه تحمل پسته (حدود ۸ دسی‌زیمنس بر متر) بیشتر بوده و موجب کاهش عملکرد می‌شود (Steduto et al., 2012). درختان پسته می‌توانند در شوری آب آبیاری برابر با ۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش محصول نداشته باشند ولی بین شوری‌های ۸ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش میزان محصول معنی‌دار می‌شود (Shamsi et al., 2022). با توجه به افزایش شوری خاک در لایه‌های مختلف ضروری است با آبشویی زمستانه، نیمرخ خاک آبشویی شده تا از تجمع نمک جلوگیری شود. شاخص میانگین مربعات خطای نرمال شده برای تغییرات شوری خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ۱۳ درصد بوده که بیانگر کارایی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک است.

جدول ٤- برخی ویژگی‌های فیزیکی و مقادیر پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک

بافت خاک	چگالی ظاهری Pb گرم بر سانتی‌متر مکعب	هدایت هیدرولیکی اشباع Ks سانتی‌متر بر روز	رطوبت باقی‌مانده r سانتی مترمکعب بر سانتی‌متر مکعب	رطوبت اشباع s سانتی مترمکعب بر سانتی‌متر مکعب	α	n
لوم‌شنی	۱/۶	۹۸	۰/۰۶۵	۰/۴۱	۰/۰۷۵	۱/۸۹

Bd: جرم مخصوص ظاهری خاک، Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع و θs،α، θr و n پارامترهای معادله وانگنوختن

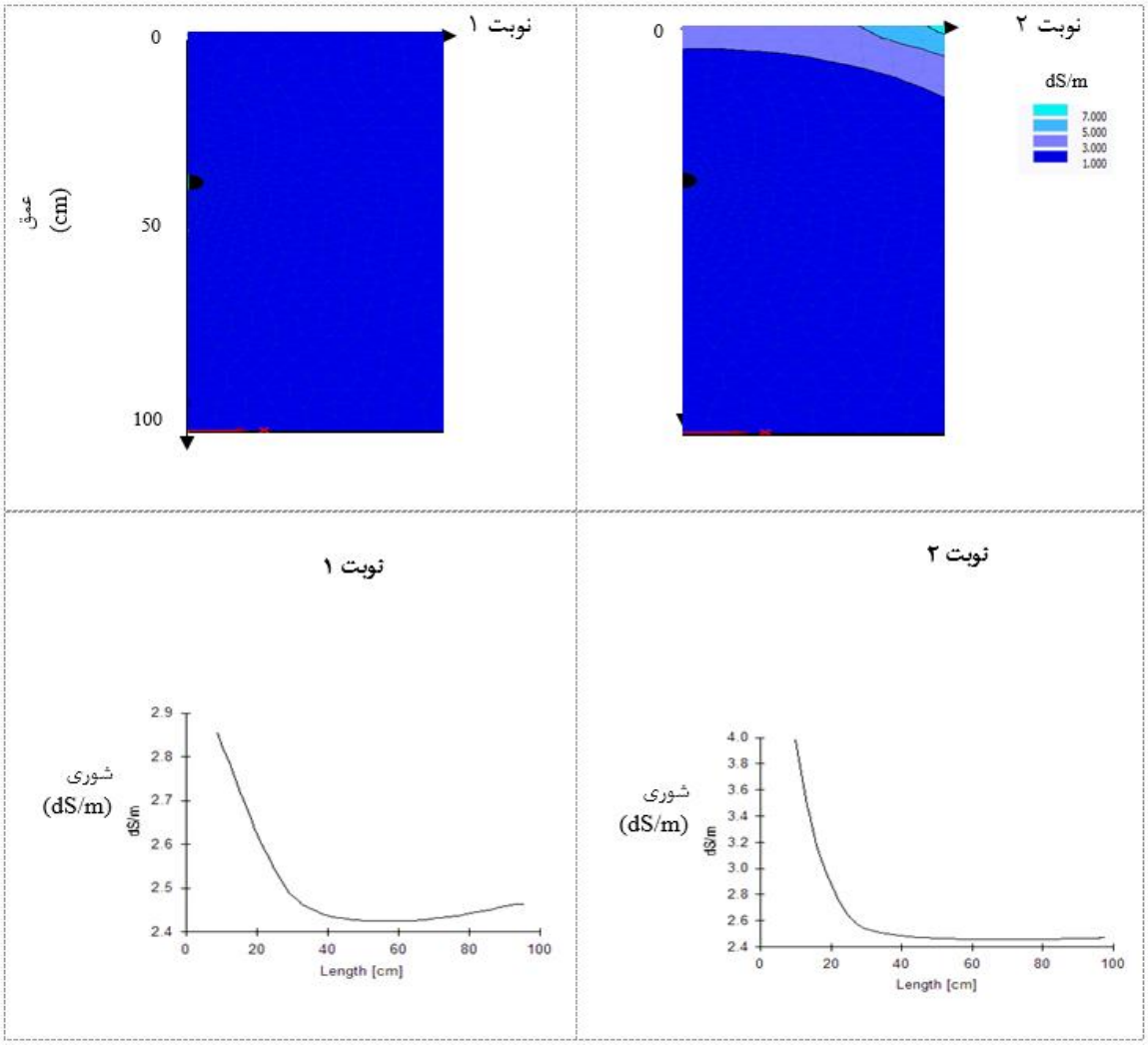


شکل ٤- تغییرات شوری خاک شبیه‌سازی‌شده در دو نوبت از فصل رشد پسته با مدل هایدروس دوبعدی

نتایج باغ ۲

باغ پسته موردنظر با مساحت ۱۷ هکتار و درختان بارده ۲۵ ساله، متوسط عملکرد ۱/۲ تن در هکتار با آبیاری قطره‌ای زیر-سطحی دو ردیفه و ۴ قطره‌چکان ۲ لیتر در ساعت (فواصل قطره‌چکان‌ها ۰/۵ متر) و به مدت ۲۰ ساعت آبیاری می‌شود. متوسط شوری خاک ۱/۵ تا ۳ و متوسط شوری آب آبیاری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. مقادیر تبخیر تعرق واقعی و استاندارد پسته به ترتیب ۷۱۸ و ۷۵۶ میلی‌متر تعیین شد. مقادیر شوری خاک اندازه‌گیری شده در لایه‌های مختلف با نتایج شبیه‌سازی-شده آن با مدل هایدروس مورد مقایسه و ارزیابی واقع شد. شکل ۵ نتایج شوری خاک شبیه‌سازی شده با مدل هایدروس را به ترتیب در دو نوبت اول و دوم اندازه‌گیری و در عمق یکصد سانتی‌متری را ارائه می‌کند.

مقادیر متوسط شوری خاک در لایه فوقانی (سطح خاک تا عمق ۲۰ سانتی‌متر)، لایه میانی (۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) و لایه پایینی (۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر) در نوبت اول اندازه‌گیری به ترتیب ۲/۷، ۲/۴ و ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. همچنین مقادیر متناظر شوری خاک اندازه‌گیری شده در لایه‌های مذکور در نوبت دوم اندازه‌گیری در لایه بالایی، میانی و پایینی به ترتیب ۳/۵، ۲/۶ و ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. آب آبیاری شوری پایینی داشته (۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر) و بنابراین در لایه‌های مختلف خاک تجمع نمک قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نشده و از نظر آبیاری محدودیتی برای رشد و عملکرد ندارد. شوری خاک در لایه قرارگیری لوله آبده و قطره‌چکان‌ها حداقل و با دور شدن از قطره‌چکان افزایش‌یافته و به‌عبارت‌دیگر شوری خاک از سطح به عمق کاهش می‌یابد. شاخص میانگین مربعات خطای نرمال شده برای تغییرات شوری خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ۲۰ درصد و بیانگر کارایی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک است.

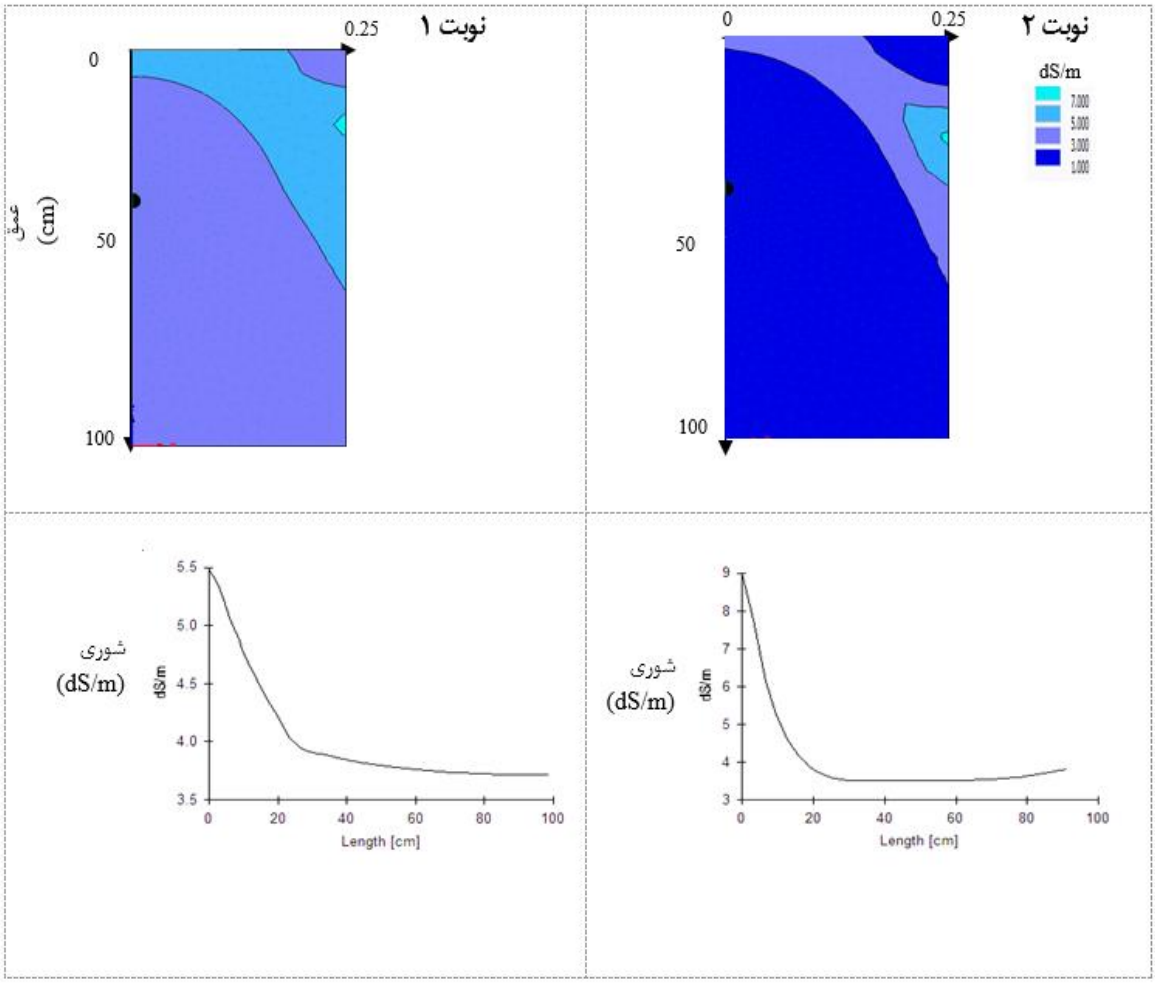


شکل ۵- تغییرات شوری خاک شبیه‌سازی‌شده در دو نوبت از فصل رشد پسته با مدل هایدروس دوبعدی

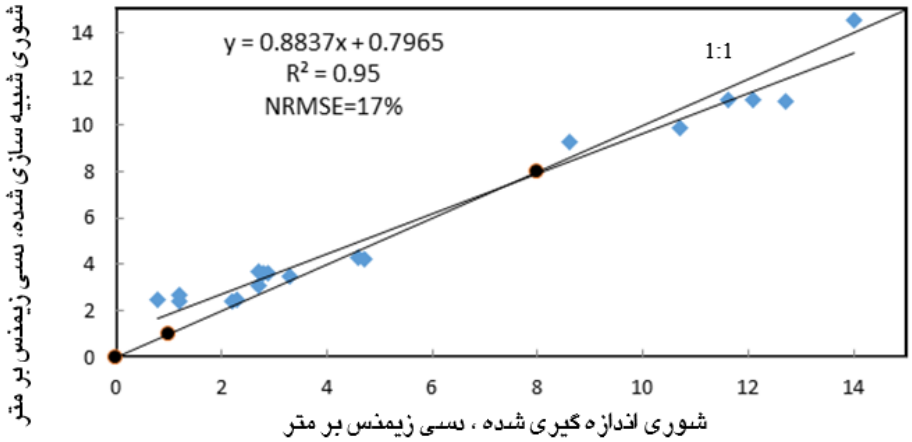
نتایج باغ ۳

باغ پسته موردنظر با مساحت ۶ هکتار و درختان بارده ۱۱ ساله، متوسط عملکرد ۰/۵ تن در هکتار با آبیاری قطره‌ای زیر-سطحی دو ردیفه و ۴ قطره‌چکان ۴ لیتر در ساعت (فواصل قطره‌چکان‌ها ۰/۵ متر) و به مدت ۱۵ ساعت آبیاری می‌شود. متوسط شوری خاک ۲ تا ۴ و متوسط شوری آب آبیاری ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر است. مقادیر تبخیر تعرق واقعی و استاندارد پسته به ترتیب ۶۷۹ و ۷۵۶ میلی‌متر تعیین شد. مقادیر شوری خاک اندازه‌گیری شده در لایه‌های مختلف با نتایج شبیه‌سازی-شده آن با مدل هایدروس مورد مقایسه و ارزیابی واقع شد. شکل ۵ نتایج شوری خاک شبیه‌سازی شده با مدل هایدروس را به ترتیب در دو نوبت اول و دوم اندازه‌گیری و در عمق یکصد سانتی‌متری ارائه می‌کند. شوری خاک در لایه قرارگیری لوله آبده و قطره‌چکان‌ها حداقل و با دور شدن از قطره‌چکان افزایش‌یافته و به‌عبارت‌دیگر شوری خاک از سطح به عمق کاهش می‌یابد. مقادیر متوسط شوری خاک در لایه فوقانی (سطح خاک تا عمق ۲۰ سانتی‌متر)، لایه میانی (۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) و لایه پایینی (۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر) در نوبت اول اندازه‌گیری به ترتیب ۴/۶، ۲/۷ و ۲/۸ دسی‌زیمنس بر متر است. همچنین مقادیر متناظر شوری خاک اندازه‌گیری شده در لایه‌های

مذکور در نوبت دوم اندازه‌گیری در لایه بالایی، میانی و پایینی به ترتیب ۴/۷، ۳/۳ و ۲/۹ دسی‌زیمنس بر متر است. با توجه به افزایش شوری خاک در لایه‌های سطحی خاک ضروری است هرساله با آبشویی زمستانه و با آب باکیفیت مناسب‌تر (با شوری کمتر)، نیمرخ خاک آبشویی شده تا از تجمع نمک در سطح خاک جلوگیری شود. شاخص میانگین مربعات خطای نرمال شده شوری خاک ۱۷ درصد و بیانگر کارایی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک است. شکل ۷ به‌طور تجمیعی نتایج مقادیر شبیه-سازی و اندازه‌گیری شده شوری خاک باغ‌ها را در سه عمق مختلف و در تمامی باغ‌ها ارائه می‌کند. شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده تغییرات شوری اندازه‌گیری و شبیه-سازی‌شده خاک حدود ۱۷ درصد بوده (NRMSE) که بیانگر دقت و کارایی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک باغات بوده و می‌تواند با دقت مناسبی شوری خاک را شبیه‌سازی نماید.



شکل ٦- تغییرات شوری خاک شبیه‌سازی‌شده در دو نوبت از فصل رشد پسته با مدل هایدروس دوبعدی



شکل ۷ -تغییرات شوری خاک شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با خط یک به یک

نتیجه‌گیری

در شوری‌های زیاد آب آبیاری (۸/۵ دسی‌زیمنس بر متر) الگوی تغییرات شوری خاک در لایه‌های سطحی خاک افزایش یافته و این افزایش بالاتر از حد آستانه تحمل درخت پسته (۸ دسی‌زیمنس بر متر) است؛ بنابراین ضروری است به‌منظور جلوگیری از تجمع نمک در لایه سطحی خاک، در انتهای فصل زمستان آبشویی با آب با شوری کمتر جهت شستشوی املاح در نظر گرفته شود. در شوری‌های آب آبیاری کم (۲/۵ و ۳/۵ دسی-زیمنس بر متر)، تغییرات شوری در لایه سطحی خاک چندان زیاد نبوده که موجب تجمع و افزایش غلظت نمک شود، ولیکن در صورت امکان، آبشویی در پایان فصل زمستان به‌منظور جلوگیری از تجمع نمک در لایه سطحی خاک توصیه می‌شود. در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و در کلیه باغ‌های موردنظر، شوری خاک در لایه قرارگیری لوله آبده و قطره‌چکان‌ها حداقل و با دور شدن از قطره‌چکان، شوری افزایش می‌یابد. نتایج تجمیعی شاخص مربعات خطای نرمال (NRMSE) تغییرات شوری خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل (۱۷ درصد)، بیانگر کارایی و دقت مدل در شبیه‌سازی شوری خاک در آبیاری قطره-ای زیرسطحی است. شناسایی تغییرات شوری لایه‌های خاک و نیز عمق توسعه ریشه برای جانمایی عمق کارگذاری لوله‌های آبده و قطره‌چکان‌ها در این سامانه ضروری بوده و می‌تواند پاسخگوی اثربخشی این سامانه بر بازده آبیاری، عملکرد و نهایتاً افزایش بهره‌وری آب کشاورزی باشد.

منابع

آمارنامه کشاورزی. ۱۴۰۱. (جلد سوم، محصولات باغبانی و گلخانه‌ای). مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات وزارت جهاد کشاورزی.

اسلامی، ا.، شاکر، م. و جوکار، ا. ۱۴۰۲. تأثیر مدیریت آبیاری در شرایط باغدار بر بهره‌وری آب آبیاری درختان پسته. نشریه مدیریت آب در کشاورزی دوره ۱۰(۱): ۱-۱۴.

اکبری، ا. و زندپارسا، ش.۱۳۹۶. تأثیر سطوح مختلف آب آبیاری بر رشد و عملکرد درخت پسته در شهرستان انار استان کرمان. علوم و مهندسی آبیاری.۴۰(۳):۱۳۶-۱۲۳.

سیفی، ا.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانیج، ح. و ترابی، م. ۱۳۹۳. تأثیر دور آبیاری بر توزیع رطوبت و شوری در باغ‌های پسته تحت شرایط آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (مطالعه موردی: شهرستان سیرجان استان کرمان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۸): ۷۸۶-۷۹۹.

عطایی، ع.، نیشابوری، م.ر.، اکبری، م.، زارع حقی، د. و عنابی میلانی، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هایدروس دوبعدی برای تعیین توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی درختان پسته .پژوهش آب در کشاورزی. 32(4):595-581 . doi: 10.22092/jwra.2019.118528

گنجی خرمدل، ن. و کیخایی، ف. ۱۳۹۵. مقایسه تغییرات رشد و عملکرد محصول درختان بارور پسته در گذار از آبیاری

سطحی به آبیاری قطره‌ای در ساوه. نشریه پژوهش آب در کشاورزی.۳۰(۱): ۴۹-۳۹

لطیفی، م.، سلطانی، م. و رمضانی اعتدالی، ه .1401 . برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح خاک به روش حل معکوس با استفاده از HYDRUS-2D (مطالعه موردی: زهکش حائل دشت قزوین) .علوم و مهندسی آبیاری. doi:10.22055/jise.2021.36752.1962 .99-115:(1)45

موسوی فضل، س. ح.، رحیمیان، م. ح.، کوهی، ن. ریاحی، ح.، کرامتی، م.، عباسی، ف. و باغانی، ج. ۱۳۹۹. ارزیابی حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب در کانون‌های اصلی تولید پسته کشور (استان‌های کرمان، خراسان رضوی، یزد و سمنان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران.۶(۱۴): ۲۲۵۶-۲۲۴۴

نقوی، ه. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر عمق کارگزاری و میزان آب آبیاری به روش قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد و غلظت عناصر در برگ درختان پسته. مجله مهندس آب و آبیاری.۷(۲۶):۱۵۸-۱۴۲

Devkota, K.P., Devkota, M., Rezaei, M., and Oosterbaan, R. 2022. Managing salinity for sustainable agricultural production in salt-affected soils of irrigated drylands. Agric. Systems. 198: 103390. doi: 10.1016/j.agsy.2022.103390.

Eslami, A. and Naghavi, H. 2012. Study in the possibility of using brackish water in the subsurface drip irrigation system in the Pistachio orchard fertilizer channel. 90/538. [In Persian]. https://jast.modares.ac.ir/files/jast/user_files_749497/akramseifi-A-10-48744-1-029e850.pdf

Jia, Yanhui, Wei Gao, Xiulu Sun, and Yayang Feng. 2023. Simulation of Soil Water and Salt Balance in Three Water -Saving Irrigation Technologies with HYDRUS-2D. Agronomy, 13, 1, 164. https://doi.org /10.3390/ agronomy13010164.

Memmi, H., Gijón, M.C., Couceiro, J.F. and Pérez-López, D. 2016. Water stress thresholds for regulated deficit irrigation in pistachio trees: Rootstock influence and effects on yield quality. Agricultural Water Management, 164: 58-72. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.006.

Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133: 342-349. DOI:10.1061/ASCE0733-94372007133:4342.

Simunek, J., Van Genuchten, M.T and Sejna. M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone Journal. 7: 587-600. DOI:10.2136/vzj2007.0077

Simunek, J., Van Genuchten, M.T and Sejna, M. 2012. The HYDRUS software package for simulating twoand three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, version 1, 241.

Shamsi, S., Kamali A., and Hasheminejhad, Y. 2022. An approach to predict soil salinity changes in irrigated pistachio orchards. Dryland Soil Research. 1(1): 1-10. https://doi.org/10.47176/jsssi.01.01.1007

Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J., Shouse, P.J. Comparison of Hydrus-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2004. 130: 304–310. DOI:10.1061/(ASCE) 0733-9437 (2004) 130: 4(304)

Steduto, P., Theodore, C., Hsiao, E. Fereres & D. Raes, 2012. FAO Irrigation and Drainage, No: 66.

Yang, T., Cherchian, S., Xinmin, L., Shahrokhnia, H., Minghao, M., Simůnek, J., Laosheng, W. 2023. Effect of water application methods on salinity leaching efficiency in different textured soils based on laboratory measurements and model simulations, Agricultural Water Management. 281:1-13. DOI:10.2139/ssrn.4160738 .

Water Management in Agriculture
Vol. 12, No. 2, Autumn and Winter 2026, 31-42

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، ص. ۴۲-۳۱

Assessment of Soil Salinity Dynamics under Subsurface Drip Irrigation System in Pistachio Orchards of Kerman

M. R. Emdad[1*], A. Tafteh[2] and, A. Sabbah[3]

Abstract

Subsurface drip irrigation system are increasingly being adopted in orchards, making it essential to evaluate soil salinity dynamics within the root-zone development area. Three pistachio orchards with subsurface drip irrigation systems were selected, and soil salinity changes were investigated using the two-dimensional Hydrus 2D model. Soil salinity was lowest at the depth of the emitter line and increased with distance from the dripper. Under high irrigation water salinity (8.5 dS/m) soil salinity in the surface layers increased, exceeding the salinity tolerance threshold of pistachio trees. In contrast, under low irrigation water salinity (2.5 and 3.5 dS/m), salinity variations in the surface soil layers were limited and did not result in salt accumulation. The mean normalized root mean square error (NRMSE) between measured and simulated soil salinity values was 17%, indicating satisfactory performance of the model in simulating soil salinity under subsurface drip irrigation. To optimize the placement depth of emitter lines and drippers in this system, identifying soil salinity patterns and root development depth is essential. Such assessments are critical for evaluating the effectiveness of subsurface drip irrigation on irrigation efficiency, crop yield, and ultimately the enhancement of agricultural water productivity.

Keywords: Ddischarge Rate, Irrigation Management, Soil Salinity Dynamics, Water Salinity

[1] Associate professor of Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (Corresponding Author Email: emdadmr591@yahoo.com)
[2] Associate professor of Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
[3] Research instructor, soil and water research department, Kerman Research, Education and Natural Resources Center, Kerman, Iran
Received :10 Dec 2024
Accepted: 14 Jan 2024