

Simulation of Soil Moisture and Salinity Changes Using HYDRUS-2D Software with Perforated PVC Pipes in Pistachio Orchards in Kerman Province

H. Shirani, H. Nejat, I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. Javad Hosseinifard, and S. Sadr* 

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan University, Iran. Shirani@vru.ac.ir

MSc Graduated, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan. Iran. Hesam.nejat@gmail.com

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan University, Iran. esfandiarpour@vru.ac.ir

Assistant prof., of Irrigation and Drainage, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. n-sedaghati@pri.ir

Associate prof., of Soil Science, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute,

Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. hosseinifard@pri.ir

Assistant prof., of Soil Science, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. sadr@pnu.ac.ir

Received: December 2024 and Accepted: September 2025

Abstract

This study evaluated the performance of a low-pressure subsurface irrigation system using perforated PVC pipes in pistachio orchards of Anar County (Kerman Province), focusing on soil moisture and salinity distribution. The HYDRUS-2D numerical model was applied to simulate two-dimensional water and solute movement in the soil. Treatments were based on a factorial combination of four design parameters, each at two levels: channel depth (40 and 60 cm), pipe diameter (110 and 160 mm), hole spacing on perforated PVC pipes (15 and 25 cm), and hole diameter (9 and 12 mm). Model evaluation based on the NRMSE index confirmed the HYDRUS-2D model's strong ability to simulate both moisture and solute distribution in the system. Simulation results revealed that treatments with 60 cm channel depth, 110 mm pipe diameter, 9 mm hole diameter, and 15 or 25 cm hole spacing (T₁₅ and T₁₆) achieved the most favorable salinity distribution by reducing salt accumulation in the root zone. Furthermore, treatments with 160 mm pipe diameter, 12 mm hole diameter, 60 cm channel depth, and 15 or 25 cm hole spacing on perforated PVC pipes (T₉ and T₁₀) showed superior moisture distribution compared to other treatments. These configurations provided the best overall performance in terms of moisture and salinity distribution under subsurface irrigation using perforated PVC pipes. In contrast, treatment T₄ (40 cm channel depth, 160 mm pipe diameter, 9 mm hole diameter, 25 cm hole spacing) demonstrated the poorest performance regarding uniform water distribution and salinity control. Based on these findings, it is recommended that subsurface irrigation systems for pistachio orchards adopt the identified optimal design parameters, tailored to local soil and environmental conditions.

Keywords: Solute movement, Leaching, Soil moisture distribution pattern, Irrigation management

* - Corresponding Author's email: sadr@pnu.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367832.1064>

شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک به وسیله نرم‌افزار HYDRUS-2D با

لوله‌های PVC سوراخ‌دار در باغ‌های پسته استان کرمان

حسین شیرانی، حسام نجات، عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی‌فرد و

سمیه صدر*

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران. Shirani@vru.ac.ir

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران. Hesam.nejat@gmail.com

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران. esfandiarpour@vru.ac.ir

استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

n-sedaghati@pri.ir

دانشیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

hosseinifard@pri.ir

استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

sadr@pnu.ac.ir

دریافت: آذر ۱۴۰۳ و پذیرش: شهریور ۴۰۴

چکیده

به منظور شبیه‌سازی دوبعدی حرکت آب و املاح در خاک، با استفاده از مدل عددی HYDRUS-2D، عملکرد سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های PVC سوراخ‌دار در باغ‌های پسته شهرستان انار (استان کرمان) بررسی شد. تیمارهای آزمایشی از ترکیب چهار فاکتور هر کدام در دو سطح شامل عمق کانال (۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر)، قطر لوله (۱۱۰ و ۱۶۰ میلی‌متر)، فاصله سوراخ روی لوله (۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر) و قطر سوراخ‌های روی لوله (۹ و ۱۲ میلی‌متر) بود. مقدار شاخص ارزیابی NRMSE نشان داد که مدل HYDRUS-2D توانایی خوبی در شبیه‌سازی توزیع رطوبت و غلظت املاح در این سامانه دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تیمار عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۱۰ میلی‌متر، قطر شکاف ۹ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌ها ۱۵ سانتی‌متر (تیمارهای T₁₅ و T₁₆)، بهترین توزیع شوری را در خاک ایجاد کرد و با کاهش تجمع شوری در ناحیه ریشه نسبت به سایر تیمارها برتری داشت. همچنین، تیمارهای با قطر لوله ۱۶ سانتی‌متر، قطر شکاف ۱۲ میلی‌متر، عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر و فاصله سوراخ ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر (T₉ و T₁₀) توزیع رطوبت مناسب‌تری نسبت به بقیه تیمارها داشت و ترکیب مورد استفاده این خصوصیات طراحی سیستم نتایج بهتری از نظر توزیع شوری و رطوبت در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله های PVC سوراخ‌دار نشان داد. در مقابل، تیمار T₄ (عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ نه میلی‌متر، فاصله سوراخ‌ها ۲۵ سانتی‌متر) عملکرد ضعیف‌تری از نظر یکنواختی توزیع رطوبت و کنترل شوری نشان داد. پیشنهاد می‌شود در طراحی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی پسته، پارامترهای بهینه شناسایی‌شده در این مطالعه، با توجه به شرایط منطقه، مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: حرکت املاح، آبشویی، الگوی توزیع رطوبت، مدیریت آبیاری

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: sadr@pnu.ac.ir



مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات ارزآور کشاورزی محسوب شده و به‌عنوان یک محصول راهبردی جایگاه خاصی را در بین تولیدات کشاورزی دارا است. این محصول در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌صورت باغ‌های تجاری (به‌ویژه در ۴۰ سال اخیر) کشت شده است. با توجه به روند رو به رشد ایجاد باغ‌های پسته در شرق و مرکز ایران، مصرف بهینه آب برای این گیاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در دهه‌های اخیر، شور شدن خاک به‌عنوان تهدیدی برای امنیت غذایی جهانی و بهره‌وری کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناخته شده است (آل‌تابال و الزبون، ۲۰۲۱). این فرآیند با فعالیت‌هایی مانند مدیریت اشتباه آبیاری تسریع می‌شود (نینگ و همکاران، ۲۰۲۰). از این‌رو، استفاده بهینه از منابع آب به‌عنوان محور اصلی توسعه بایستی مورد توجه قرار گیرد. یکی از سامانه‌های آبیاری که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است (سیفی و صداقتی، ۱۳۹۹). استفاده از لوله‌های PVC سوراخ‌دار به‌عنوان یک روش آبیاری زیرسطحی، روشی جدید است که تقریباً از حدود سال ۱۳۸۹ در باغ‌های پسته استان کرمان (شهرستان انار) مورد استفاده قرار گرفته است (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۸). صداقتی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که تغییر روش آبیاری از غرقابی به آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار در باغ‌های پسته، تقریباً تمام صفات کمی و کیفی محصول را تحت تأثیر قرار داد؛ به‌گونه‌ای که باعث افزایش ۰/۸ تا ۱/۶ کیلوگرمی وزن محصول خشک هر درخت (افزایش ۴۵۷ تا ۹۱۴ کیلوگرمی محصول در هکتار)، کاهش ۱/۷ تا ۴/۲۵ درصدی پوکی، افزایش ۳/۵ تا ۶ درصدی خندانی، کاهش ۱/۳ تا ۲ واحدی در انس (افزایش اندازه میوه پسته) و افزایش ۴۱/۴ تا ۶۱/۶ درصدی بهره‌وری مصرف آب گردید. ضمن اینکه میزان مصرف آب نسبت به آبیاری غرقابی تا ۲۵ درصد کاهش یافت.

لذا طراحی صحیح سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌گونه‌ای که آب در محیط ریشه به‌طور یکنواخت و به‌اندازه کافی توزیع گردد، ضروری است. در نتیجه، شناخت الگوی خیس شدن خاک و حرکت آن، نقش مهمی در تصمیم‌گیری عمق و فاصله لوله‌های قطره‌چکان‌دار، طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و بهبود کارایی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارد (فول و همکاران، ۲۰۱۲). در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در رابطه با جبهه رطوبتی و توزیع شوری زیر یک قطره‌چکان صورت گرفته و مدل‌های عددی، ریاضی و تجربی مختلفی برای شبیه‌سازی الگوی خیس‌شدگی خاک، ابعاد جبهه رطوبتی و توزیع شوری برای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارائه شده است (باجپای و کاوشالم، ۲۰۲۰). مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت دوئیدی آب، املاح و گرما در یک محیط متخلخل (مانند خاک) محسوب می‌شود (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۴۰۱).

حسینی و همکاران (۱۴۰۲) به‌منظور شبیه‌سازی حرکت آب و شوری در آبیاری قطره‌ای نواری در کشت ذرت از مدل HYDRUS-2D استفاده کردند. شاخص‌های آماری NRMSE و RMSE نشان از شبیه‌سازی عالی مدل بوده است. نتایج این مطالعه نشان داد که HYDRUS-2D توانایی بالایی در شبیه‌سازی حرکت آب در محیط‌های متخلخل دارد و در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک بهتر از توزیع شوری عمل کرده است.

شینی دشتگل و همکاران (۱۴۰۰) برای بررسی توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی چگونگی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با توجه به عمق قرارگیری لوله‌ها (۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر) با فاصله ۶۰ سانتی‌متر روی لوله‌های آبد، توانایی مدل را در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در عمق ۲۰ سانتی‌متر، خوب و در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر، متوسط ارزیابی کردند.

حیدری و همکاران (۱۳۹۷) به‌منظور بررسی اثر دبی قطره‌چکان بر الگوی خیس شده در روش آبیاری

می‌گذارد. همچنین، بافت خاک به دلیل ارتباط با هدایت هیدرولیکی خاک و تأثیر بر نگهداری آب خاک، اثر بیشتری بر هندسه ناحیه خیسیدگی خاک داشت. به‌طورکلی، گسترش افقی این ناحیه، در خاک‌های با بافت ریز و یا در لایه‌های با بافت ریزتر موجود در خاک‌های لایه‌ای، بیشتر بود.

با مدل کردن آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه نتایج حاصل با مدل تحلیلی و عددی HYDRUS-2D مشاهده شد که روند تغییرات دبی بر الگوی رطوبتی و نفوذ عمقی تأثیرگذار بود؛ اما بر مقدار تبخیر و تعرق تأثیری نداشت. همچنین، نشان داد که تأثیر خصوصیات هیدرولیکی خاک برای هندسه خیس شده توسط قطره‌چکان تأثیرگذار است (المالوگلو و دیامانتوپولو، ۲۰۰۹).

تافته و امداد (۱۴۰۳) به‌منظور ارائه مدیریت مناسب آبیاری برای دستیابی به عملکرد قابل قبول و شبیه‌سازی شوری خاک، سه باغ پسته که نماینده غالب باغ‌های منطقه دامغان بوده و با آبیاری قطره‌ای سطحی آبیاری می‌شدند را انتخاب کردند. مدیریت آبیاری و تغییرات شوری خاک در این باغ‌ها با استفاده از مدل HYDRUS-2D، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان شوری در نزدیکی قطره‌چکان‌ها کمتر بوده و با دور شدن از آن‌ها افزایش یافت. با توجه به اینکه دوره معمول آبیاری این باغ‌ها در محدوده ۱۰ تا ۱۵ روز و زمان آبیاری حدود ۱۲ ساعت (میانگین تبخیر و تعرق استاندارد و عملکرد به ترتیب ۶۳۵ میلی‌متر و ۱/۷ تن در ساعت) بود، مشخص شد که با سناریوی سیکل آبیاری حدود ۲۰ روز و زمان آبیاری حدود ۸ تا ۱۰ ساعت عملکرد مشابهی به دست خواهد آمد و کاهش مصرف آب حدود ۳۰ درصد نسبت به شرایط معمول اتفاق خواهد افتاد. دهقانی سانچ و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه پسته تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D پرداختند. تیمارهای پژوهش شامل سه رژیم آبیاری منطبق

قطره‌ای با مدل HYDRUS-2D از یک مدل فیزیکی از جنس پالکسی گلاس، پر شده با خاک لوم رسی سیلتی و قطره‌چکان‌های تنظیم‌شونده دستی با آبدهی دو، چهار، شش و هشت لیتر در ساعت استفاده کردند. ایشان از بررسی نتایج ارائه‌شده توسط مدل و الگوهای مشاهداتی ثبت‌شده به این نتیجه رسیدند که هرچه داده‌های ورودی به Rosetta بیشتر باشد، نتایج ارائه‌شده توسط مدل به الگوهای مشاهداتی شبیه‌تر خواهد بود و همچنین اعلام داشتند که مدل HYDRUS-2D در دبی‌های کمتر با دقت بیشتری عمل کرده است.

خلیلی و همکاران (۱۳۹۵) مدل HYDRUS-2D را به‌منظور تعیین پروفیل رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط لایسیمتری در خاک لوم با دو عمق نصب ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر و دبی قطره‌چکان برابر ۵/۳ لیتر در ساعت بر لوله‌های لترال با فاصله ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از یکدیگر مورد بررسی قرار داده و اعلام داشتند که نتایج نشان از برازش خوب بین داده‌های برآورد شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. به‌علاوه، به دلیل تشکیل پروفیل رطوبتی پیوسته که نشان‌دهنده مناسب بودن فاصله قطره‌چکان‌ها از یکدیگر است، رطوبت کمتر در نزدیکی سطح خاک با عمق ۵۰ سانتی‌متر و فاصله ۷۵ سانتی‌متری قطره‌چکان‌ها از یکدیگر اتفاق افتاد که به‌عنوان عمق و فاصله بهینه معرفی گردید.

سیال و اسکگز (۲۰۰۹) به بررسی الگوهای خیسیدگی خاک شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار HYDRUS-2D در یک سامانه آبیاری زیرسطحی پرداختند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های محتوای آب خاک، تطابق قابل قبولی $R^2 = 0.98$ با داده‌های مشاهداتی داشت. این پژوهشگران همچنین اثرات پارامترهای مختلف طراحی سامانه آبیاری مذکور را بر الگوی مرطوب‌شدن خاک توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی و مطالعه نمودند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش فشار سامانه باعث افزایش محیط ناحیه خیس‌شده گردید. به‌علاوه، آن‌ها نتیجه گرفتند که عمق نصب لوله‌ها تأثیر قابل توجهی بر میزان اتلاف آب و تبخیر

بر مدیریت زارع (I_1)، نیاز آبی (I_2) و نیاز آبی و آبشویی (I_3)، سه عمق نمونه‌برداری ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر و در زمان قبل و بعد از آبیاری بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در منطقه ریشه گیاه، درصد رطوبت حجمی مشاهداتی و برآوردشده، نسبتاً به هم نزدیک بودند و حاکی از آن بود که این مدل قادر به شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه پسته است و این توانایی را دارد که شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره آبیاری و تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری و در اعماق مختلف خاک با دقت بالایی تخمین بزند. روند برآورد مدل در توزیع افقی و عمودی رطوبت نسبت به مقادیر مشاهده‌ای، حالت بیش‌برآورد داشت. ارزیابی‌های آماری نیز با توجه به شاخص‌های ضریب تبیین بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۰ و RMSE بین ۲/۲۳ تا ۴/۰۱، حاکی از دقت خوب مدل عددی HYDRUS-2D و توانایی خوب آن در پیش‌بینی مقدار رطوبت در شرایط مزرعه‌ای بود.

با توجه به توانایی خوب مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع آب خاک و نیز نقش مهم آن در تصمیم‌گیری عمق و فاصله لوله‌های قطره چکاندار طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و با در نظر گرفتن اهمیت سامانه قطره‌ای زیرسطحی و کارایی خوب این سامانه آبیاری در شرایط کمبود آب در مقایسه با دیگر روش‌های آبیاری، در این تحقیق با استفاده از این مدل به شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC در اراضی پسته‌کاری پرداخته شده است.

روش بررسی

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در قطعه باغی به مساحت تقریبی دو هکتار در شهرستان انار (استان کرمان) اجرا شد. در انتخاب باغ سعی شد تا شرایط غالب باغ‌های منطقه از نظر وضعیت رشد درختان و نحوه مدیریت باغی (تغذیه، مبارزه با آفات و بیماری‌ها، هرس و ...) در نظر گرفته شود. رقم مورد مطالعه، رقم اکبری با دور آبیاری ۲۴ روز انتخاب گردید. قبل از اجرای پروژه، خصوصیات فیزیکی و

شیمیایی آب و خاک محل اجرای پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، خصوصیات شیمیایی آب قطعه آزمایشی در جدول ۱ و خصوصیات شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

نکته قابل ذکر در جدول ۲ این است که معمولاً در شرایط مزرعه‌ای، تمام آب بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم (آب قابل دسترس)، به سهولت قابل استفاده نبوده و بسته به نوع گیاه، بین ۳۰ تا ۷۵ درصد آن می‌تواند بدون صرف انرژی، جذب گیاه شود که به آن رطوبت سهل‌الوصول (RAW) می‌گویند (علیزاده، ۱۳۹۱). بنابراین با توجه به مقاومت بالای گیاه پسته به شرایط خشکی، برای محاسبه RAW، مقدار حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD)، معادل ۷۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای اجرای طرح از لوله‌های زیرسطحی پی‌وی‌سی استفاده گردید. در این سامانه، آب از منبع تأمین آب آبیاری (چاه یا استخر ذخیره آب)، با استفاده از سامانه پمپاژ، در لوله‌های تحت فشار تا ابتدای قطعات باغ منتقل شده و سپس توسط شیرفلکه‌ها یا دربندهای مخصوص به داخل حوضچه تقسیم آب می‌ریزد. بنابراین در این قسمت از سامانه آبیاری، آب از حالت تحت فشار خارج می‌گردد و توسط نیروی ثقل و بر اساس شیب زمین، در داخل لوله‌های آبد به حرکت در می‌آید. در داخل هر حوضچه، لوله‌های آبد به تعداد آن‌ها بستگی به ابعاد حوضچه، قطر لوله‌های آبد و دبی سامانه آبیاری دارد، وظیفه انتقال آب به زیر خاک و محدوده ریشه درختان را بر عهده دارند. انتهای لوله‌های آبد نیز باز بوده و توسط یک زانویی به یک لوله عمودی (هواکش) متصل می‌گردد. این هواکش علاوه بر تخلیه هوای داخل لوله و سهولت جریان آب داخل آن، باعث می‌شود که جریان در لوله از حالت تحت فشار خارج‌شده و تنها در هنگامی که لوله‌ها پر از آب شوند، کمی تحت فشار قرار می‌گیرند. به همین دلیل هم به این سامانه آبیاری، کم‌فشار اطلاق می‌گردد (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۸). شکل ۱، نمای کلی از یک سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های پی‌وی‌سی را نشان می‌دهد که در آن سه ردیف

درخت با شش خط لوله و از طریق یک حوضچه، آبیاری می‌شوند.

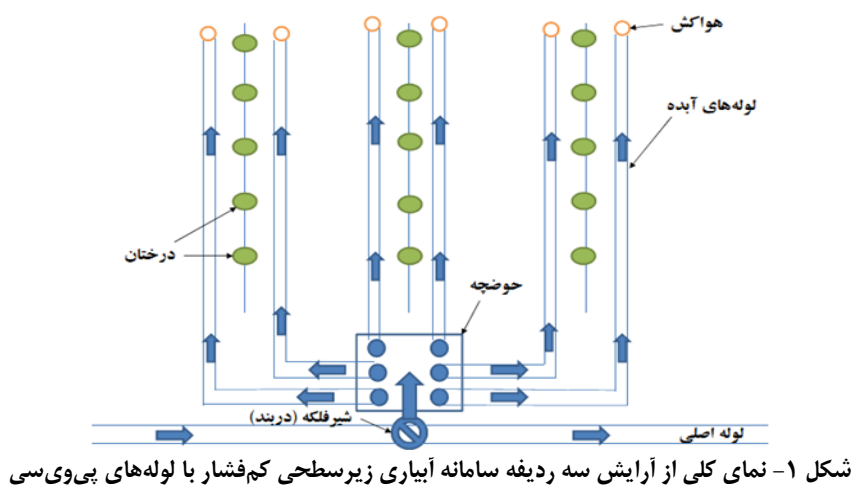
جدول ۱- نتایج تجزیه آب آبیاری مورد استفاده در آزمایش

نسبت جذب سدیم SAR	سدیم Na^+	منیزیم Mg^{+2}	کلسیم Ca^{+2}	کلر Cl^-	بیکربنات HCO_3^-	سولفات SO_4^{-2}	اسیدیته pH	قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری EC_w (dS/m)
7.62	45.11	40.0	30.0	107.5	3.2	4.3	7.4	11.5

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای پروژه در شروع آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cnt)			علامت اختصاری Abbreviation symbol	خصوصیت خاک Soil characteristics
80-120	40-80	0-40		
8.72	4.55	5.12	EC_e (dS/m)	قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع
8.05	8.11	8.3	pH	اسیدیته
31.5	9	12	Ca^{2+} (meq/l)	کلسیم
25	11	12.5	Mg^{2+} (meq/l)	منیزیم
30.5	25	26.5	Na^+ (meq/l)	سدیم
5.74	7.91	7.57	SAR (meq/l)0.5	نسبت جذبی سدیم
320	264	260	K^+ (mg/kg)	پتاسیم
30.04	27.97	28.98	P (mg/kg)	فسفر
20	10	12	Silt (%)	سیلت
21	9	11	Clay (%)	رس
59	81	77	Sand (%)	شن
لوم رسی شنی	شن لومی	لوم شنی	Soil Texture	بافت خاک
1.27	1.35	1.3	pb (gr/cm3)	وزن مخصوص ظاهری
35	31	33	FC (%)	رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی
11	9	10	PWP (%)	رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم
24	22	23	TAW (%)	کل رطوبت حجمی قابل استفاده خاک
18	16.5	17.25	RAW (%)	کل رطوبت حجمی سهل الوصول خاک*

*این پارامتر با در نظر گرفتن ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) از کل آب قابل استفاده به‌دست آمده است



مرکز سایه‌انداز (فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از تنه درختان)، در دو طرف و در عمق‌های کانال مورد نظر (۴۰ و ۶۰

برای این پژوهش، لوله‌های با قطرهای ۱۱ و ۱۶ سانتی‌متر استفاده شده است. لوله‌های پی‌وی‌سی تقریباً در

سانتی‌متر) از سطح خاک کارگذاری شدند. بر روی لوله‌های پی‌وی‌سی، سوراخ‌هایی به قطرهای مورد نظر (۹ و ۱۲ میلی‌متر) به‌صورت کمی مورب در قسمت زیرین لوله و به فواصل تیمارهای آزمایشی (۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر) تعبیه شده است. در تمام تیمارها، به فاصله هر ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر (بسته به فاصله سوراخ‌های مورب اصلی) یک سوراخ در کف لوله‌ها به‌منظور تخلیه کامل آب از لوله‌ها تعبیه گردید. برای کاهش خطرات انسداد سوراخ‌ها به‌وسیله ذرات خاک و نیز جلوگیری از شست‌وشوی خاک در هنگام آبیاری، یک لایه سنگریزه (با قطر ذرات ۶ تا ۱۲ میلی‌متر) به ضخامت تقریبی ۱۰ سانتی‌متر دور تا دور لوله‌ها (غیر از بالای لوله‌ها) به‌صورت فیلتر قرار گرفت. بنابراین، با توجه به ضخامت ۱۰ سانتی‌متری فیلتر، عمق نصب لوله‌ها ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر بود (شکل ۲). حجم آبیاری برای همه تیمارها ثابت در نظر گرفته شد و بر اساس دبی آب خروجی از چاه و وسعت کرت محاسبه گردید. طول لوله ۵۰ و شیب منطقه ۰/۱ درصد بوده و عرض کانال برای همه تیمارها برابر با ۳۵ سانتی‌متر بوده است.

از آنجاکه بر اساس سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، نیاز خالص آبیاری درختان پسته در روش آبیاری غرقابی در شهرستان انار، ۵۱۱۲ مترمکعب در هکتار در طول هشت ماه فصل رشد است. برای انجام آبیاری بر اساس این حجم آب، ابتدا با توجه به تعداد نوبت آبیاری در طول فصل رشد (۱۰ نوبت)، حجم آب آبیاری در هر نوبت در هکتار (۵۰۰ مترمکعب) تعیین گردید. سپس با توجه به سطح آبیاری مربوط به هر حوضچه، حجم آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری برای یک حوضچه مشخص شد. در نهایت نیز با توجه به حجم آب مورد نیاز و دبی آب ورودی به هر حوضچه، مدت زمان آبیاری هر حوضچه در هر نوبت آبیاری، مشخص گردید و بر این اساس تخصیص آب به کرت‌ها انجام گرفت. لازم به ذکر است که آبتوی زمستانه در دو نوبت آبیاری و با حجم تقریبی ۱۵۰۰ مترمکعب در هکتار در هر نوبت آبیاری (در مجموع ۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار در زمستان) انجام گردید.



شکل ۲- نحوه اجرا و کارگذاری لوله‌ها در مزرعه

در مجموع، این پژوهش شامل ۱۶ تیمار آزمایشی شد که مشخصات هر تیمار در جدول ۳ آمده است. برای بررسی اثر پارامترهای طراحی سامانه بر وضعیت توزیع رطوبت در خاک، اندازه‌گیری رطوبت خاک با انجام نمونه‌برداری در اعماق مختلف خاک (عمق‌های صفر، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر) و نیز فواصل مختلف نسبت به درخت شامل کنار درخت (فاصله صفر)، محل استقرار خط لوله

(فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از ردیف درختان) و کنار پشته بین ردیف‌های درختان (فاصله ۲۴۰ سانتی‌متری از ردیف درختان) انجام شده است. در خصوص شوری خاک نیز نمونه‌برداری در عمق‌های مزبور در دو زمان مهرماه (قبل از آبتوی زمستانه) و اسفندماه (بعد از آبتوی زمستانه) انجام شده است.

جدول ۳- مشخصات تیمارهای آبیاری زیرسطحی بر اساس پارامترهای طراحی چهارگانه در نظر گرفته شده برای پژوهش

سطح هر فاکتور Level of each factor				تیمار آبیاری Irrigation treatment
فاصله سوراخ‌های روی لوله (میلی‌متر) Distance between holes on the pipe (mm)	قطر سوراخ روی لوله (میلی‌متر) Diameter of hole on the pipe (mm)	قطر لوله (میلی‌متر) Pipe diameter (mm)	عمق کانال (سانتی‌متر) Channel depth (cm)	
15	12	160	40	T ₁
25	12	160	40	T ₂
15	9	160	40	T ₃
25	9	160	40	T ₄
15	12	110	40	T ₅
25	12	110	40	T ₆
15	9	110	40	T ₇
25	9	110	40	T ₈
15	12	160	60	T ₉
25	12	160	60	T ₁₀
15	9	160	60	T ₁₁
25	9	160	60	T ₁₂
15	12	110	60	T ₁₃
25	12	110	60	T ₁₄
15	9	110	60	T ₁₅
25	9	110	60	T ₁₆

مدل HYDRUS-2D

این پارامترها برای اجرای مدل HYDRUS-2D ضروری

است (میرزایی و ناظمی، ۱۳۹۰).

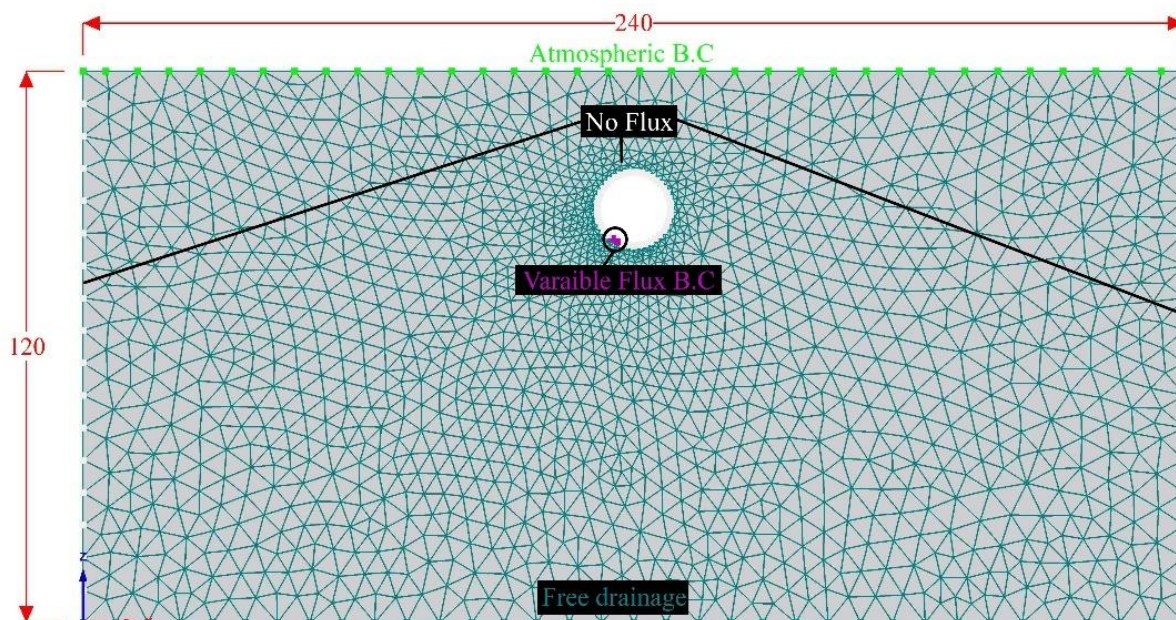
حل معکوس این مدل در بسیاری از مطالعه‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و تخمین پارامترها به کار رفته و نتایج آن نسبتاً رضایت‌بخش بوده است (برونتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ برونتی و همکاران، ۲۰۱۸؛ اوتوینو و همکاران، ۲۰۱۸). جوزی و همکاران (۱۴۰۰) به منظور شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D توزیع رطوبت خاک تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری را با سه روش حل معکوس با داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی، حل معکوس با داده‌های رطوبت خاک پس از آبیاری و Rosetta مدل‌سازی کرده و مشاهده نمودند که روش اول از دقت بیشتری در برآورد داده‌ها برخوردار است.

برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتق جزئی که معادله ریچارد و انتقال انتشار از آن حیث می‌باشند، نیاز به شرایط مرزی و اولیه است. شرط مرزی با توجه به شرایط واقعی آزمایش شده باید تعریف شود. با توجه به شرایط انجام آزمایش که تشریح گردید، مرز بالا به دلیل تبخیر و تعریق از سطح خاک شرط مرزی اتمسفر یک انتخاب شد

مدلی تحت ویندوز، برای شبیه‌سازی حرکت آب، گرما و املاح، جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در محیط‌های متخلخل دوبعدی و سه بعدی است. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان در محیط های اشباع از معادله‌های ریچاردز و برای شبیه‌سازی انتقال املاح و گرما از معادله‌های انتقال- انتشار استفاده می‌کند (سیمونک و همکاران، ۲۰۱۱). یکی از ویژگی‌های این مدل، تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح به روش حل معکوس است. این مدل برای حل عددی معادله‌های حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین (Galerkin) و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ-مارکواردت (Levenberg-Marquardt) استفاده می‌کند. پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل Rosetta (مدل داخلی HYDRUS) و بر اساس شبکه عصبی مصنوعی کار می‌کند، تعیین می‌شوند. به دیگر سخن، با وارد کردن داده‌های بافت خاک، درصد دانه‌بندی خاک، درصد رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق مدل اخیر برآورد می‌شوند. لازم به ذکر است که در اختیار داشتن مقدار عددی

سیستم زیرسطحی کم‌فشار است طول شکاف‌های هر تیمار به‌عنوان مرز ورودی جریان آب در نظر گرفته شد که در مدل HYDRUS به‌صورت شار متغیر معرفی گردید. شرایط مرزی جریان آب برای یکی از تیمارها در شکل ۳ قابل مشاهده است.

که معادل شرط مرزی نوع سوم به‌دلیل مشخص بودن نرخ تبخیر یا بارش است. در سمت راست و چپ هندسه جریان، مرز بدون جریان در نظر گرفته شد و مرز پایین به‌دلیل حرکت آزادانه آب به‌صورت زهکشی آزاد اعمال گردید. با توجه به ماهیت آزمایش که آبیاری به‌وسیله



شکل ۳- شرایط مرزی جریان آب اعمال‌شده در تیمار اول

که در آن‌ها: $\bar{p}$, $\bar{O}$, $\bar{O}$, $\bar{p}$ و i به‌ترتیب مقادیر برآورد شده، متوسط مقادیر برآورد شده، مقادیر اندازه‌گیری‌شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری‌شده، تعداد داده‌ها و شماره هر یک از داده‌ها است. هرچه میزان شاخص RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مبین این مطلب است که مدل در پیش‌بینی داده‌های مورد نظر موفق‌تر بوده است و این دو شاخص نشان‌دهنده دقت مدل در پیش‌بینی داده‌ها هستند. چنانچه مقدار شاخص NRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد نشان دهنده پیش‌بینی عالی مدل است و چنانچه این شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل و در صورتی که مقدار آن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد نشان از عملکرد متوسط مدل دارد. مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد نشان دهنده شبیه‌سازی ضعیف مدل است (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱؛ بنایان و هوگنبوم، ۲۰۰۹).

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل با مقایسه نتایج حاصل از مدل و داده‌های مشاهداتی صورت گرفت. برای مقایسه بین داده‌ها، از میانگین خطا (ME)، ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شده است (روابط ۱ تا ۴).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \right] \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (3)$$

$$NRMSE\% = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (4)$$

یافته‌ها

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت و شوری در سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس نتایج الگوی توزیع رطوبت و شوری در این سامانه‌ها به وسیله خروجی مدل HYDRUS-2D ارائه می‌شود.

شبیه‌سازی هیدرولیکی

شبیه‌سازی هیدرولیکی شامل یافتن ضرایب ثابت منحنی مشخصه خاک و سپس مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است.

حدس اولیه ضرایب برای حل معکوس

برای حل معکوس و یافتن ضرایب ثابت (شامل رطوبت اشباع (θ_s) ، رطوبت باقی‌مانده (θ_r) ، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) ، n و α در معادله ون‌گنوختن) نیاز به فرض اولیه برای بهینه‌سازی است که از مدل Rosetta استفاده شد که نرم‌افزار HYDRUS-2D با مدل Rosetta Lite به صورت دینامیک مرتبط شده است. برای این منظور، مقادیر شن، رس و سیلت (برحسب درصد) و مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم (جدول ۲) به نرم‌افزار Rosetta داده شده و مقدار اولیه ضرایب (جدول ۴) به دست آمد. پس از یافتن فرض اولیه برای ضرایب ثابت، ابتدا مدل با استفاده از داده‌های برداشت‌شده قبل و بعد از آبیاری واسنجی و صحت‌سنجی شده و سپس مدل شوری و رطوبت ارزیابی شده است.

جدول ۴- مقادیر ثابت اندازه‌گیری شده

پارامتر	رطوبت اشباع	ضرایب ثابت معادله ون‌گنوختن	رطوبت باقی‌مانده	هدایت هیدرولیکی اشباع
	θ_s ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	n (-)	α (cm^{-1})	θ_r ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
مقدار	0.433	1.6011	0.0037	0.396
				K_s ($\text{cm}.\text{day}^{-1}$)
				1.45

واسنجی و صحت سنجی مدل

به دلیل این که تعداد داده‌های برداشت‌شده یک تیمار برای واسنجی و صحت‌سنجی کافی نبود، لذا واسنجی با یک تیمار و صحت‌سنجی با تیمار مشابه با آن انجام شده است. بدین صورت که با تیمارهایی که فاصله شکاف روی لوله ۱۵ سانتی‌متر بوده واسنجی و با تیمارهایی که فاصله شکاف روی لوله ۲۵ سانتی‌متر بود، صحت‌سنجی انجام شده است. در جدول ۵، ضرایب واسنجی شده به همراه شاخص‌های ارزیابی در مرحله واسنجی برای تیمارهای مختلف آورده شده است. مقدار ضریب R^2 در همه تیمارهای واسنجی بیشتر از ۰/۹۱ است که نشان از

همبستگی مناسب مقادیر شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده دارد. همچنین، بیشترین مقدار ضریب NRMSE برابر با ۲۱/۸۲ درصد محاسبه شد که در محدوده شبیه‌سازی قابل قبول قرار می‌گیرد (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱). با توجه به شاخص NRMSE بهترین عملکرد مدل در شبیه‌سازی رطوبت در مرحله واسنجی مربوط به تیمار T₉ (قطر لوله ۱۶ سانتی‌متر، طول شکاف ۱۲ میلی‌متر، عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر و فاصله شکاف روی لوله ۱۵ سانتی‌متر) با NRMSE برابر با ۱۱/۰۱ درصد به دست آمد. مقادیر مثبت شاخص ME نشان‌دهنده بیش برآورد و مقادیر منفی نشان‌دهنده کم برآورد است. با توجه به جدول ۵، مقادیر ناچیزی بیش برآورد در مدل به دست آمد.

جدول ۵- پارامترهای هیدرولیکی بهینه‌شده و شاخص‌های ارزیابی در تیمارهای مختلف

شاخص‌های آماری Statistical indices				پارامترهای هیدرولیکی بهینه‌شده Optimized hydraulic parameters					تیمار
NRMSE	RMSE	ME	R ²	K _s	n	α	θ_s	θ_r	
ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین خطا	ضریب تبیین	هدایت هیدرولیکی اشباع	ضرایب ثابت معادله ون گنوختن	رطوبت اشباع	رطوبت باقی‌مانده		
%	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)		(cm.day ⁻¹)	(-)	(cm ⁻¹)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)	
14.75	0.03	0.000	0.93	3.29	2.54	0.003	0.49	0.02	T ₁
12.64	0.03	0.004	0.96	4.35	2.58	0.005	0.58	0.062	T ₃
19.34	0.04	0.004	0.94	1.34	0.02	0.005	0.46	89E-06	T ₅
21.82	0.03	0.023	0.91	1.95	1.79	0.004	0.41	7.7E-05	T ₇
11.01	0.03	0.001	0.95	2.73	2.80	0.004	0.61	0.024	T ₉
16.93	0.03	0.017	0.94	0.71	2.36	0.004	0.41	0.0005	T ₁₁
18.32	0.04	0.001	0.92	2.67	2.26	0.004	0.53	0.0001	T ₁₃
13.79	0.03	0.014	0.92	1.81	1.71	0.004	0.42	0.00009	T ₁₅

شد و در غالب تیمارها مقدار NRMSE در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد بوده که نتایج خوبی را نشان می‌دهد (بنیان و هوگنبوم، ۲۰۰۹). از آنجاکه آزمایش‌ها در شرایط طبیعی باغ و تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام گرفته و نه در شرایط کنترل شده، مقادیر NRMSE قابل قبول است (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱).

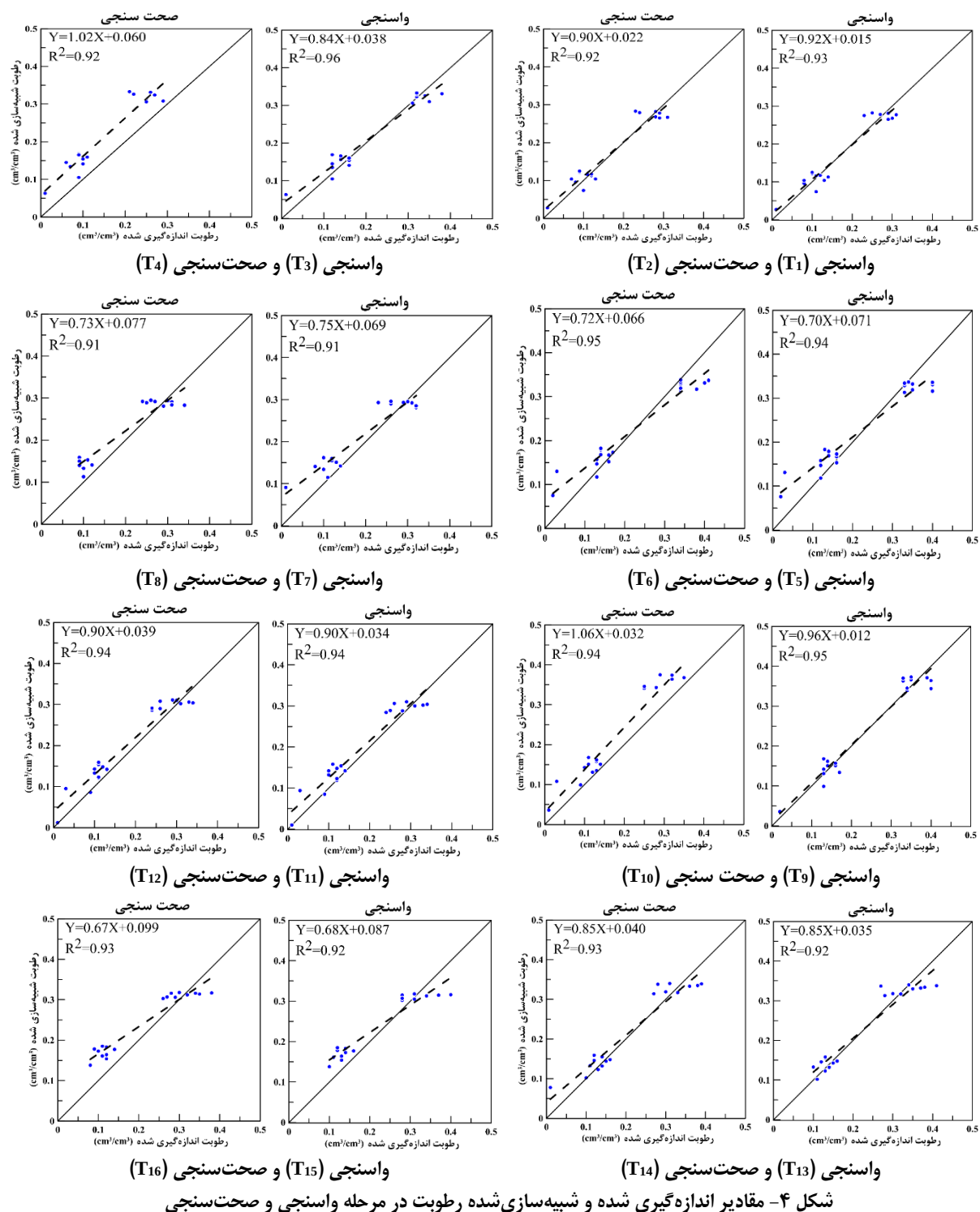
پس از انجام واسنجی برای اطمینان از درستی پارامترهای بهینه‌شده و نتایج مدل، اقدام به صحت‌سنجی مدل گردید. برای این منظور، ضرایب هیدرولیکی به‌دست آمده از مرحله قبل در مدل HYDRUS وارد شده و مدل با شرایط تیمار دیگر مقایسه می‌گردد. در جدول ۶، نتایج شاخص‌های ارزیابی مرحله صحت‌سنجی آورده شده است. بیشترین مقدار NRMSE برابر با ۲۷/۷۰ درصد محاسبه

جدول ۶- شاخص‌های ارزیابی مرحله صحت‌سنجی

T ₁₆	T ₁₄	T ₁₂	T ₁₀	T ₈	T ₆	T ₄	T ₂	شاخص‌های ارزیابی
0.93	0.93	0.94	0.94	0.91	0.94	0.92	0.92	
0.05	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	
23.6	15.1	18.8	27.7	21.8	17.9	25.6	16.2	
0.030	0.007	0.022	0.043	0.024	0.001	0.062	0.01	شاخص‌های ارزیابی
								R ²
								RMSE(cm ³ .cm ⁻³)
								NRMSE (%)
								ME (cm ³ .cm ⁻³)

۲۰۲۳). این موضوع در تحقیقات تافته و امداد (۱۴۰۳) در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی نیز گزارش شده است. در بررسی ایشان، به‌طور متوسط، NRMSE شوری خاک در باغ‌های منتخب حدود ۱۸ درصد، شاخص توافق ۹۴ درصد و بازده مدل ۷۸ درصد بود که نشان‌دهنده کارایی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی شوری خاک است.

نمودارهای یک‌به‌یک مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت در شکل ۴ در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی آورده شده است. با توجه به شکل‌ها، مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی رطوبت را در سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار دارد (موریانو و همکاران،



شبیه‌سازی حرکت آب و املاح

شبیه‌سازی شوری شامل یافتن ضرایب ثابت مؤثر در حرکت املاح شامل، ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی است. واسنجی شبیه‌سازی حرکت آب و املاح هم به‌طور هم‌زمان و هم به‌طور جداگانه انجام می‌شود. حسن تخمین هم‌زمان پارامترهای شوری و حرکت آب در این

است که تأثیر متقابل آن‌ها روی هم دیده‌شده و از معایب آن نیز این است که تعداد محدودی از پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح باید انتخاب شوند (عباسی، ۱۳۹۴). در این پژوهش، ابتدا پارامترهای هیدرولیکی بهینه شدند و سپس با استفاده از داده‌های شوری که در فصل زمستان قبل و بعد از آبیاری برداشت شده بودند، مدل

به‌صورت معکوس شده و پارامترهای ثابت انتقال املاح به‌دست آمدند. به‌دلیل این‌که داده‌های شوری در فصل زمستان برداشت‌شده بود و آبشویی به‌صورت غرقابی و سطحی انجام‌شده بود، لذا تیمارهای مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی با توجه به قطر لوله و عمق کانال انتخاب شدند. به‌طوری‌که با تیمارهای T_1 ، T_5 ، T_9 و T_{13} واسنجی انجام‌شده و با تیمارهای بعدی هر تیمار واسنجی، صحت‌سنجی انجام شده است. دلیل این امر جلوگیری از پیچیدگی مدل و مقایسه با تعداد داده‌های بیشتر بوده تا عدم قطعیت کاهش یابد. از آنجاکه مدل HYDRUS برای ارزیابی به شوری محلول خاک نیاز دارد، با توجه به اینکه داده‌های شوری گزارش شده به‌صورت عصاره اشباع بود، با استفاده از رابطه (۵) به شوری محلول خاک تبدیل شد (عطایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ سیمپونک و همکاران، ۲۰۱۲).

$$EC_w = \frac{\theta_s EC_e}{\theta} \quad (5)$$

که در این معادله EC_w ، قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک، θ_s ، رطوبت اشباع، EC_e ، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع و θ رطوبت خاک است.

با توجه به اینکه داده‌برداری شوری در فصل غیر از زمان آبیاری انجام شده بود، بعد از اطمینان از نتایج مدل هیدرولیکی، مدل برای شرایط زمان داده‌برداری شوری (فصل‌های پاییز و زمستان)، اجرا شد و مقادیر رطوبت در زمان و نقاط داده‌برداری شوری از مدل استخراج گردیده و در رابطه فوق قرار داده شد. مقدار فرض اولیه برای ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی به‌ترتیب ۱۰ درصد طول مسیر و ۱۰ درصد انتشارپذیری طولی است (عباسی، ۱۳۹۴). لذا مقدار ضریب انتشارپذیری طولی (DL) برابر با ۲۴ سانتی‌متر و ضریب انتشارپذیری عرضی (DT) برابر ۲/۴ سانتی‌متر لحاظ گردید. در جدول ۷، مقادیر پارامترهای بهینه‌شده به همراه شاخص‌های ارزیابی در مرحله واسنجی آورده شده است. کمترین مقدار ضریب خطای به‌دست آمده (NRMSE) برابر با ۲/۴۸ درصد است که در محدوده شبیه‌سازی خیلی خوب قرار می‌گیرد.

جدول ۷- پارامترهای بهینه‌شده انتقال املاح و نتایج شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های آماری Statistical indicators				پارامترهای انتقال املاح بهینه‌شده Optimized solute transport parameters		تیمار
ME (dS.m ⁻¹)	NRMSE (%)	RMSE (dS.m ⁻¹)	R ²	ضریب انتشارپذیری عرضی (Dr) (cm)	ضریب انتشارپذیری طولی (DL) (cm)	
0.02	9.25	1.28	0.88	0.73	16.13	T ₁
0.08	2.48	0.33	0.97	0.02	44.69	T ₅
-0.39	9.63	1.36	0.68	5.00	28.42	T ₉
-0.09	2.75	0.38	.97	4.26	33.87	T ₁₃

است. با توجه به شاخص‌های ارزیابی، مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی شوری در سامانه آبیاری کم‌فشار زیرسطحی را دارد و می‌توان به نتایج حاصل از آن اعتماد نمود.

مشابه با مدل هیدرولیکی ساخته‌شده، پس از واسنجی مدل شوری، ضرایب به‌دست آمده در تیمارهای دیگر قرار گرفته و صحت‌سنجی مدل انجام شد. نتایج ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی در جدول ۸ ارائه شده

جدول ۸- شاخص‌های ارزیابی در مرحله صحت‌سنجی

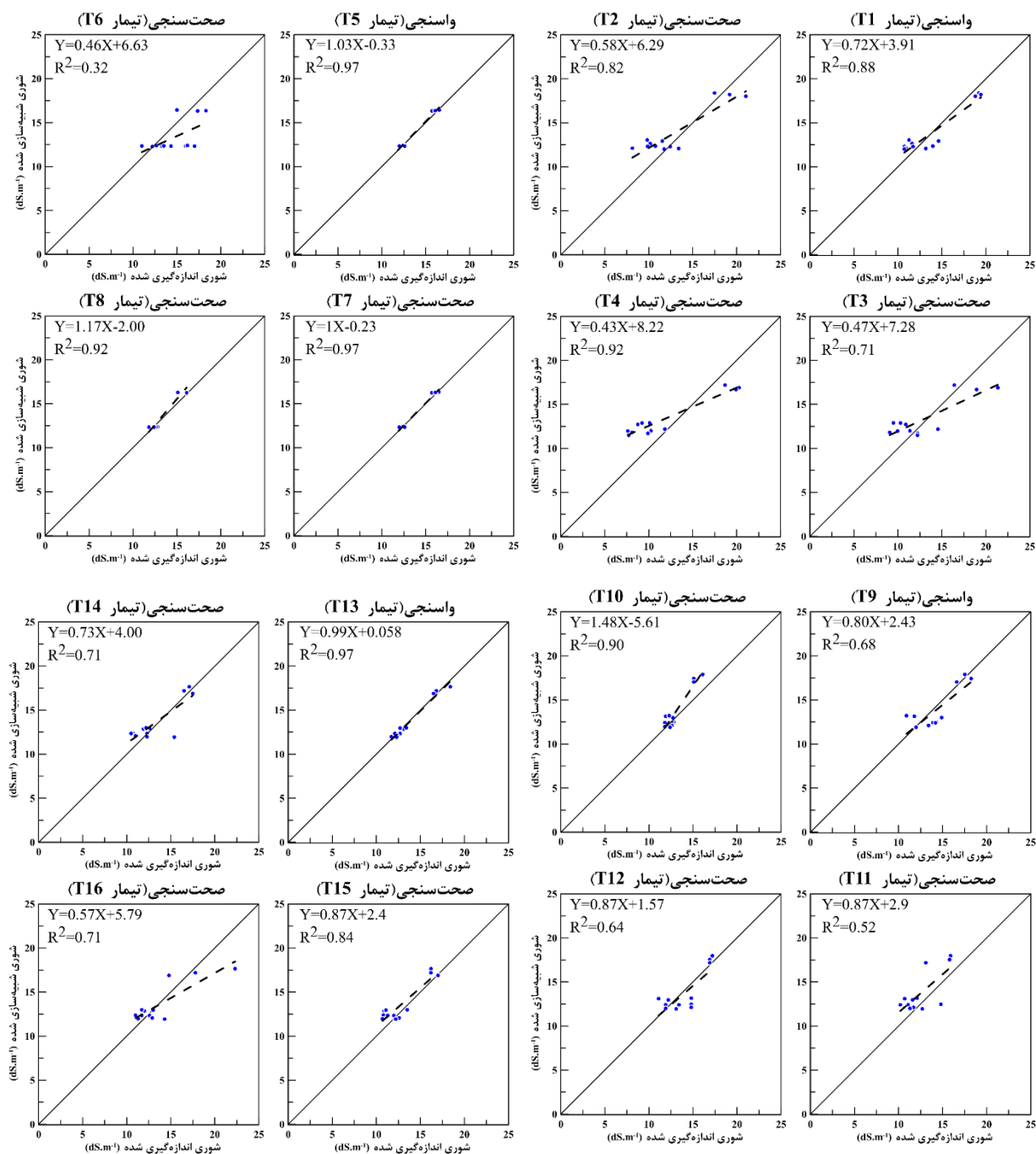
شاخص‌های آماری Statistical indicators				تیمار
ME (dS.m ⁻¹)	NRMSE (%)	RMSE (dS.m ⁻¹)	R ²	
0.89	16.55	2.15	0.81	T ₂
0.30	17.91	2.34	0.71	T ₃
1.50	25.96	3.08	0.92	T ₄
-1.39	15.77	2.32	0.32	T ₆
0.04	2.36	0.31	0.97	T ₇
0.22	4.53	0.59	0.92	T ₈
0.65	8.81	1.15	0.90	T ₁₀
0.19	15.58	1.96	0.52	T ₁₁
0.31	9.97	1.4	0.64	T ₁₂
0.30	1.23	1.36	0.71	T ₁₄
0.76	9.06	1.17	0.84	T ₁₅
-0.15	12.89	1.78	0.71	T ₁₆

بررسی الگوی توزیع شوری و رطوبت

پس از اطمینان از ارزیابی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی رطوبت و شوری برای سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ‌دار، خروجی‌های مد نظر از مدل دریافت شد. در شکل ۶، توزیع شوری در تیمارهای آبیاری T₁ تا T₁₆ ارائه شده است. برای تولید این شکل‌ها، فاصله زمانی بین یک رویداد آبیاری تا قبل از شروع رویداد آبیاری بعدی شبیه‌سازی شده است. شکل بالایی نشان‌دهنده توزیع غلظت خاک در زمان اتمام آبیاری و شکل پایینی نشان‌دهنده توزیع غلظت خاک در ۲۴ روز بعد و قبل از شروع آبیاری بعدی است. غلظت نمایش داده شده در این شکل‌ها غلظت محلول خاک است. لذا قبل از شروع آبیاری بعدی، به دلیل تبخیر از سطح خاک و جذب آب توسط ریشه، در حوالی ریشه گیاه که جذب آب بیشینه است، غلظت افزایش یافته است.

نمودارهای یک به یک مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شوری در شکل ۵ در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی آورده شده است. با توجه به شکل‌ها، مقادیر شبیه‌سازی‌شده شوری همبستگی نسبتاً خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

به‌طورکلی، در ارزیابی مدل هیدرولیکی بهترین نتیجه مربوط به تیمار T₉ (قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ ۱۲ میلی‌متر، عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر و فاصله سوراخ ۱۵ سانتی‌متر روی لوله) با NRMSE برابر ۱۱/۰۱ درصد بود. همچنین در ارزیابی مدل شوری، بهترین عملکرد مدل مربوط به تیمار T₇ (قطر لوله ۱۱۰ سانتی‌متر، قطر سوراخ ۹ میلی‌متر، عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر و فاصله سوراخ ۱۵ سانتی‌متر روی لوله) با NRMSE برابر ۲/۳۷ درصد به‌دست آمد.



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شوری

۱۲ میلی‌متر به نه میلی‌متر (افزایش فلاکس ورودی) ناحیه دارای غلظت ۲۰-۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، به سمت سطح خاک حرکت کرده و شوری و غلظت نیم‌رخ خاک کاهش پیدا کرده است.

بین تیمارهای T₅ تا T₈ که قطر لوله و عمق یکسانی دارند، فلاکس ورودی از زیاد به کم به‌ترتیب مربوط به تیمارهای T₅، T₇، T₆ و T₈ است. با افزایش

بررسی الگوی توزیع شوری در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ‌دار پس از اطمینان به مقدار فاصله بین سوراخ‌ها و قطر سوراخ‌ها تأثیر مستقیم بر فلاکس ورودی دارد و در نتیجه بر توزیع غلظت در خاک نیز تأثیر مستقیم دارد. در تیمارهای T₁ تا T₄ عمق کارگذاری یکسان است. با مقایسه توزیع غلظت در این چهار تیمار، مشخص می‌شود که با کاهش قطر سوراخ‌ها از

فلاکس ورودی، مقدار نمک ورودی به خاک افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش فلاکس ورودی باعث می‌شود که املاح به سمت پایین نیم‌رخ خاک حرکت کنند. لذا افزایش فلاکس ورودی و مقدار نمک تأثیر دوگانه بر توزیع شوری در نیم‌رخ خاک دارد. در تیمار T7 ناحیه شوری ۱۵-۲۰ دسی‌زیمنس بر متر در انتهای دوره شبیه‌سازی از نظر عمودی و افقی توسعه کمتری پیدا کرده است. لذا بین چهار تیمار مذکور مقدار نمک در نیم‌رخ خاک کمتر است.

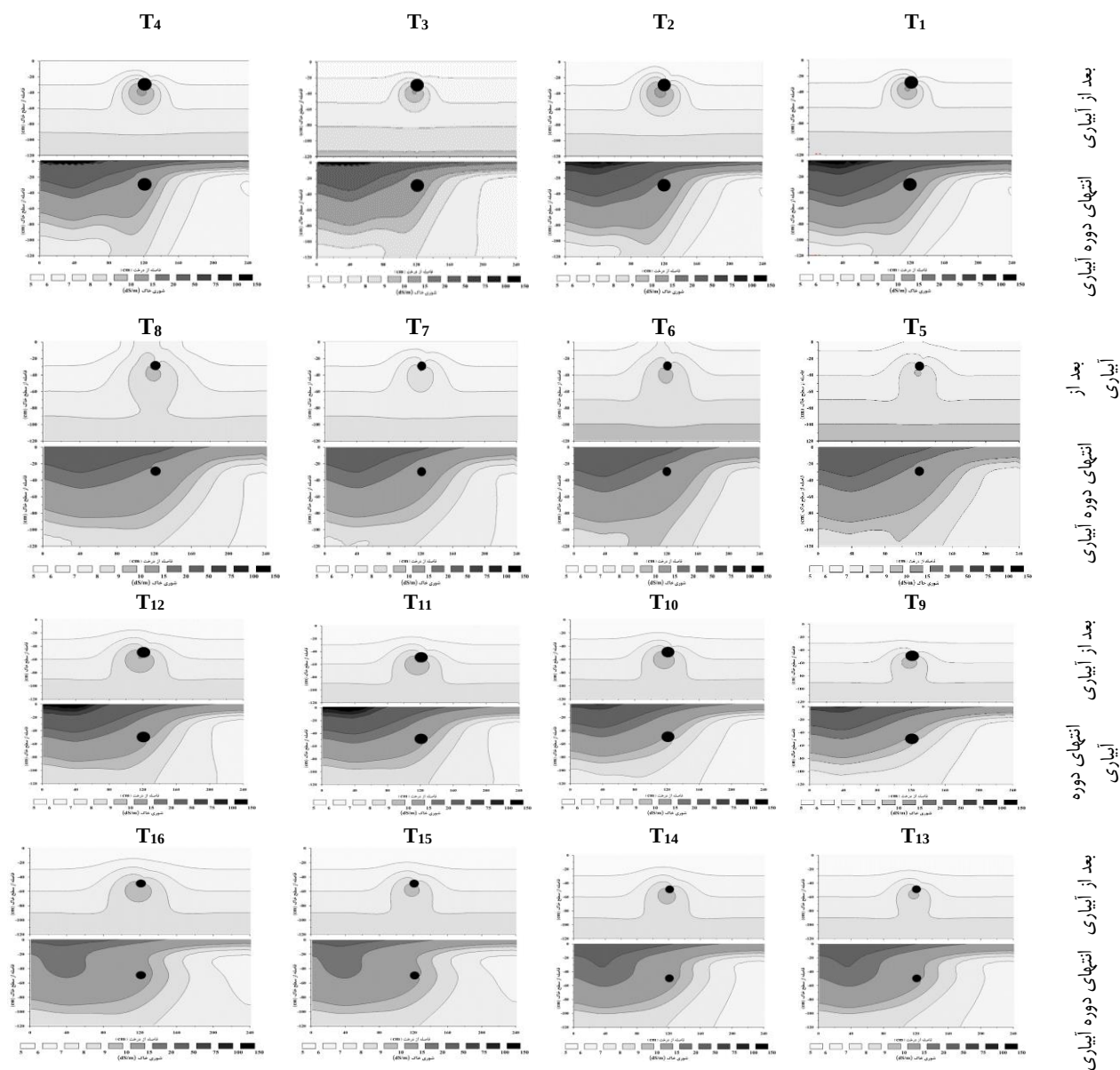
در تیمارهای بعدی (T9 تا T16) عمق کانال از ۴۰ سانتی‌متر به ۶۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد که باعث تغییر در الگوی توزیع شوری می‌گردد. بارزترین تفاوت بین تیمارهای T9 تا T16 با تیمارهای T1 تا T8 این است که در هشت تیمار سری دوم، بعد از اتمام آبیاری، نمک ورودی بر سطح خاک تأثیر نگذاشته و شوری سطح خاک افزایش نیافته است. در صورتی که در هشت تیمار اول، جبهه شوری بر غلظت سطح خاک تأثیر گذاشته است. غلظت سطحی خاک در اطراف درخت در تیمارهای T11 و T12 از دو تیمار T9 و T10 بیشتر شده است که به دلیل افزایش فلاکس ورودی است. همچنین این دو تیمار از نظر عمودی و افقی نیز توسعه بیشتری دارند و افزایش غلظت ناحیه پایین نیم‌رخ خاک از دو تیمار T9 و T10 بیشتر است. به‌طور کلی، بین چهار تیمار T9، T10، T11 و T12، تیمار T9 پراکنش شوری کمتری نسبت به سه تیمار دیگر دارد.

تحلیل توزیع شوری (شکل ۶) نشان می‌دهد که عمق نصب لوله نقش کلیدی در جابه‌جایی املاح دارد؛ تیمارهای با عمق ۶۰ سانتی‌متر (T9 تا T16) در مقایسه با عمق ۴۰ سانتی‌متر (T1 تا T8) تمایل داشتند نمک را در لایه‌های عمقی‌تر متمرکز کنند و از تجمع شوری در سطح و ناحیه‌ی فعال ریشه جلوگیری نمایند. همچنین پارامترهای طراحی مانند قطر و فاصله‌ی سوراخ‌ها بر فلاکس محلی و در نتیجه الگوی شوری تأثیر می‌گذارند؛ در شرایط ثابت فشار، افزایش اندازه‌ی شکاف‌ها معمولاً جریان هر شکاف

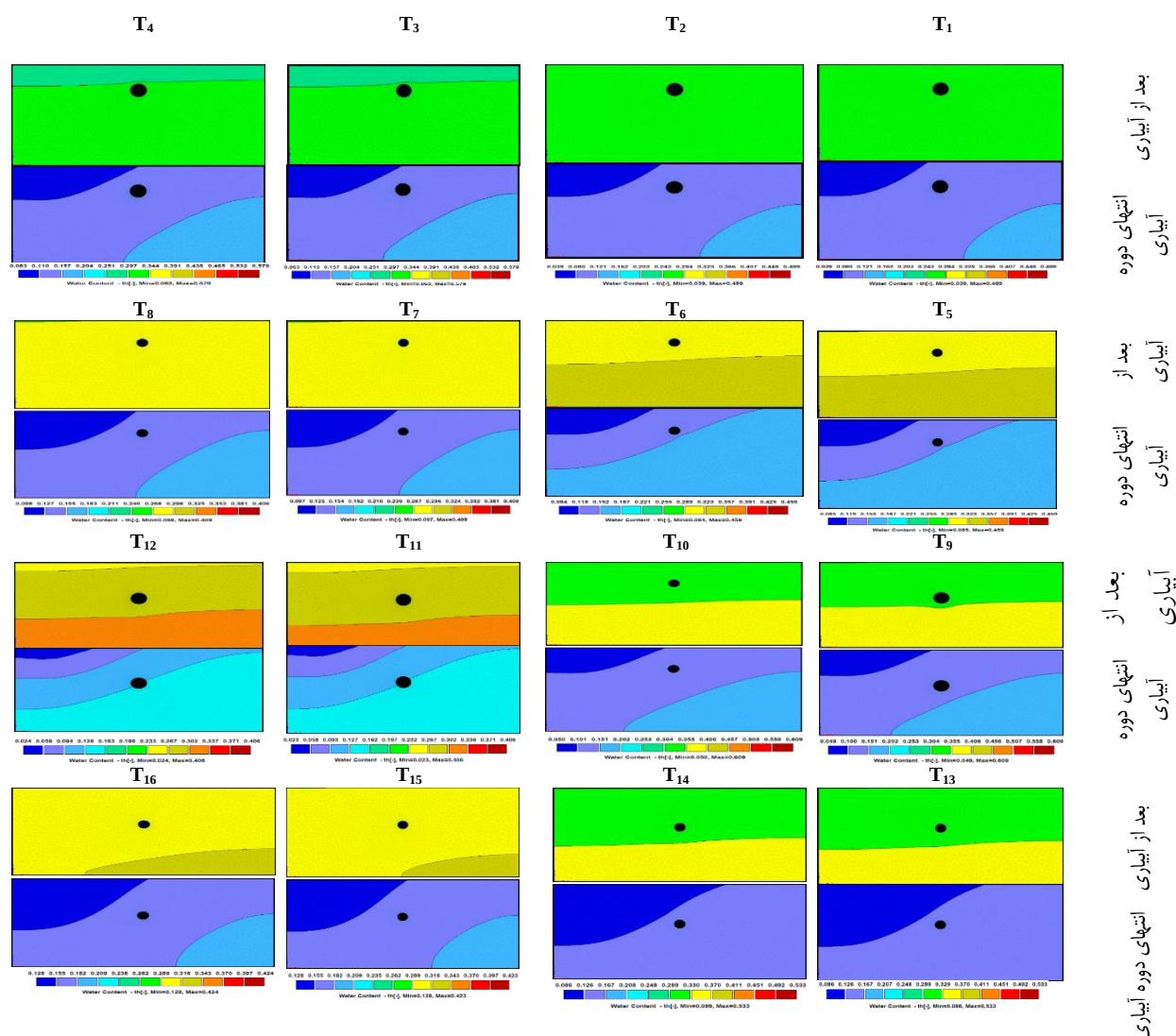
را افزایش می‌دهد و این امر می‌تواند هم منجر به ورود نمک بیشتر به پروفیل و هم به تسهیل انتقال عمقی نمک شود؛ بنابراین اثر نهایی روی شوری ناحیه‌ی ریشه تابعی از توازن بین «نمک وارد شده» و «انتقال عمقی» است. بر اساس شاخص‌های مقایسه‌ای استخراج‌شده، ترکیب‌های T15 و T16 عملکرد مطلوب‌تری در کاهش شوری ناحیه‌ی ریشه نشان دادند.

در شکل ۷، توزیع رطوبت در تیمارهای آبیاری T1 تا T16 ارائه شده است. برای تولید این شکل‌ها نیز، فاصله زمانی بین یک رویداد آبیاری تا قبل از شروع رویداد آبیاری بعدی شبیه‌سازی شده است. شکل بالایی نشان‌دهنده توزیع رطوبت خاک در زمان اتمام آبیاری و شکل پایینی نشان‌دهنده توزیع رطوبت خاک در ۲۴ روز بعد و قبل از شروع آبیاری بعدی است. در این شکل‌ها نیز مانند شکل‌های بالا، نقاط تیره‌ی نشان داده شده، محل نصب لوله‌های سوراخ‌دار است.

نتایج نشان می‌دهد که در تیمارهای T1 و T2 حجم آب پس از آبیاری، ۲۴ تا ۲۸ درصد مشاهده می‌شود و این در حالی است که در انتهای دوره آبیاری در محدوده اطراف سوراخ‌های آبدۀ که در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از درخت قرار دارند رطوبت از ۸ تا ۱۲ درصد مشاهده می‌شود. در تیمارهای T3 و T4 که تفاوت آن‌ها با دو تیمار اول (T1 و T2) در قطر سوراخ کوچک‌تر است، مشاهده می‌شود که رطوبت پس از آبیاری در زیر ناحیه سوراخ‌های آبدۀ که ۲۹ تا ۳۴ درصد رسیده است و در بالای سوراخ‌های آبدۀ ۲۵ تا ۲۹ درصد رطوبت در خاک را نشان می‌دهد که وضعیت مناسب‌تری است. این امر می‌تواند به دلیل فلاکس ورودی بالاتر آب به دلیل قطر کمتر سوراخ آبدۀ باشد. در این تیمارها در انتهای دور آبیاری رطوبت در اطراف سوراخ‌های آبدۀ تا حدود ۱۲ درصد و در اعماق بیشتر در حدود ۱۶ تا ۲۰ درصد می‌رسد.



شکل ۶- توزیع شوری در تیمار مختلف بعد از آبیاری و انتهای دوره آبیاری تیمارهای T₁ تا T₁₆



شکل ۷- توزیع رطوبت در تیمار مختلف بعد از آبیاری و انتهای دوره آبیاری تیمارهای (T1 تا T16)

بزرگتر باشد، باعث بالاتر رفتن رطوبت خاک پس از آبیاری می‌شود؛ اما در انتهای دور آبیاری تأثیری در میزان رطوبت ندارد. در تیمارهای T9 و T10 پس از آبیاری، رطوبت به ۳۰ تا ۴۰ درصد در خاک می‌رسد و در انتهای دور آبیاری محدوده رطوبت خاک از ۱۰ درصد در اطراف سوراخ‌های آبد به ۲۰ درصد در حدود ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری خاک را نشان می‌دهد. در تیمارهای T11 و T12 علی‌رغم تنوع رنگی که در توزیع رطوبت نشان داده می‌شود پس از آبیاری میزان رطوبت از ۲۶ تا ۳۳ درصد و در انتهای دور آبیاری محدوده رطوبت در زیر سوراخ‌های آبد به ۱۲ تا ۱۶ درصد را نشان می‌دهد. در تیمارهای T13 و T14 محدوده رطوبت پس از آبیاری از حدود ۲۸ تا ۳۸ درصد و

در تیمارهای T5 تا T8 عمق کانال مشابه چهار تیمار قبل است؛ اما قطر لوله آبد از ۱۶۰ به ۱۱۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است. در تیمارهای T5 و T6 رطوبت خاک در ناحیه بالای سوراخ‌های آبد پس از آبیاری، به ۲۸ تا ۳۲ درصد و در زیر آن تا ۳۵ درصد نیز افزایش پیدا می‌کند و در انتهای دوره آبیاری رطوبت در زیر سوراخ‌های آبد به واقع محدوده تراکم ریشه ۱۲ تا ۱۸ درصد را نشان می‌دهد. در تیمارهای T7 و T8 رطوبت پس از آبیاری در هر دو حدود ۲۶ تا ۲۹ درصد است. در انتهای دور آبیاری در حدود ۱۲ تا ۱۸ درصد را نشان می‌دهد که در مقایسه با تیمارهای T5 و T6 که خصوصیات طراحی بسیار نزدیکی دارند به نظر می‌رسد که هرچه قطر سوراخ‌های روی لوله

نزدیکی ریشه جلوگیری کرده‌اند. این موضوع در تیمارهای T₁₅ و T₁₆ به‌وضوح مشهود بود.

در خصوص تأثیر قطر سوراخ‌ها بر توزیع رطوبت، نتایج حکم به برتری قطر سوراخ ۱۲ mm میلی‌متر داد. در خصوص فاصله سوراخ‌های روی لوله‌ها، به نظر می‌رسد که برتری قابل‌توجهی بین فاصله سوراخ ۱۵ cm بر فاصله ۲۵ cm وجود ندارد. صداقتی و همکاران (۱۴۰۳) اشاره کردند که نحوه ترکیب قطر سوراخ‌ها و فاصله آن‌ها از یکدیگر اهمیت زیادی در طراحی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های PVC دارد. نتایج ایشان نشان داد که در صورتی که قطر سوراخ ۹ mm باشد، حتماً باید فاصله سوراخ کمتر (۱۵ cm) در نظر گرفته شود. درحالی‌که برای قطر سوراخ ۱۲ mm، امکان افزایش فاصله سوراخ‌ها تا ۲۵ cm نیز است.

در زمینه تأثیر قطر لوله‌ها بر توزیع نمک در خاک، نتایج نشان داد که احتمالاً به دلیل تأثیر بر افزایش فلاکس ورودی آب به خاک در ناحیه اطراف سوراخ‌های آبد، تیمارهایی که بهترین توزیع شوری را در خاک نشان دادند دارای قطر لوله ۱۱۰ سانتی‌متر بودند. با افزایش فلاکس ورودی، سرعت نفوذ آب در پروفیل خاک افزایش یافته و آب توان بیشتری برای انتقال عمقی املاح دارد. این فرایند بخصوص در آبیاری‌های زیرسطحی می‌تواند باعث تشکیل یک جبهه مرطوب فعال و پیوسته شود و منجر به کاهش غلظت نمک در ناحیه ریشه و تجمع آن در لایه‌های عمقی تر می‌شود (تافته و امداد، ۱۴۰۳).

در رابطه با تأثیر قطر لوله‌ها بر توزیع رطوبت، نتایج نشان داد که تیمارهای منتخب (T₉ و T₁₀) دارای قطر لوله ۱۶۰ سانتی‌متر بودند این نتایج با نتایج مطالعات صداقتی و همکاران (۱۳۹۸) نیز مطابقت دارد؛ اما مشاهده می‌شود که تفاوت بین این دو تیمار بر رطوبت خاک در انتهای دور آبیاری نسبت به تیمارهای T₁₃ و T₁₄ که قطر لوله ۱۱۰ سانتی‌متر دارند بسیار اندک است. لذا با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی اجرای سیستم آبیاری زیرسطحی و اینکه هزینه خرید لوله‌های ۱۶۰ میلی‌متری به‌مراتب بیشتر

در انتهای دوره آبیاری ۱۲ تا ۲۰ درصد را نشان می‌دهد این توزیع رطوبت برای تیمارهای T₁₅ و T₁₆ در حدود ۲۸ تا ۳۴ درصد پس از آبیاری و ۱۵ تا ۲۰ درصد در انتهای دوره آبیاری است. بر اساس این نتایج به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی توزیع رطوبت نشان می‌دهد که تیمارهای T₉ و T₁₀ و با فاصله اندک از آن‌ها تیمارهای T₁₃ و T₁₄ بهترین توزیع رطوبت را در اطراف سوراخ‌های آبد که در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از درخت قرار دارند را ایجاد می‌کند.

صداقتی و همکاران (۱۴۰۳)، عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۱۰ میلی‌متر، قطر سوراخ‌های روی لوله ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌های ۱۵ یا ۲۵ میلی‌متر را به‌عنوان بهترین فاکتورهای طراحی برای افزایش شاخص‌های رشدی و شاخص‌های کمی و کیفی محصول معرفی کردند (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ که با نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه تطابق دارد.

بحث

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ‌دار نشان داد که طراحی صحیح پارامترهای سامانه آبیاری تأثیر چشمگیری بر توزیع رطوبت و شوری در خاک دارد. یکی از عوامل کلیدی در این پژوهش، عمق کارگذاری لوله‌ها بود. نتایج نشان داد که افزایش عمق کارگذاری لوله‌ها از ۴۰ به ۶۰ سانتی‌متر منجر به پایداری بیشتر رطوبت در ناحیه توسعه ریشه، کاهش تبخیر سطحی و کاهش انتقال املاح به سطح خاک شد. این نتایج با یافته‌های خلیلی و همکاران (۱۳۹۵) و سیال و اسکگرز (۲۰۰۹) مطابقت دارد که نشان دادند عمق بیشتر لوله‌ها منجر به شکل‌گیری جبهه رطوبتی یکنواخت‌تر و کاهش تلفات سطحی می‌شود.

از سوی دیگر، قطر سوراخ‌ها و فاصله آن‌ها بر فلاکس ورودی و نحوه پخش آب و نمک در خاک تأثیرگذار بودند. نتایج نشان داد که تیمارهای دارای قطر سوراخ کمتر (نه میلی‌متر) و فاصله کمتر (۱۵ سانتی‌متر)، با ایجاد جریان متمرکزتر آب به‌واسطه افزایش فلاکس ورودی آب به خاک در ناحیه اطراف سوراخ‌ها، از انباشت نمک در

از لوله‌های با قطر ۱۱۰ میلی‌متر است، بنابراین انتخاب قطر لوله ۱۱۰ میلی‌متر منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

همچنین لازم به ذکر است که مدل HYDRUS-2D در شرایط واقعی منطقه انار، توانست با ضریب تبیین بیش از ۰/۹ و NRMSE کمتر از ۲۰ درصد، هم توزیع رطوبت و هم شوری را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند؛ که این موضوع تطابق خوبی با یافته‌های مطالعات مشابه (مانند تافته و امداد، ۱۴۰۳؛ حسینی و همکاران، ۱۴۰۲) دارد.

از جنبه مدیریتی، پیشنهاد می‌شود برای باغ‌های پسته در مناطق با شرایط مشابه منطقه انار، از لوله‌هایی با قطر ۱۱۰ میلی‌متر، عمق نصب ۶۰ سانتی‌متر، سوراخ‌هایی با قطر نه میلی‌متر و فاصله ۱۵ سانتی‌متر استفاده گردد. این ترکیب نه تنها باعث افزایش ذخیره رطوبت در ناحیه ریشه می‌شود، بلکه با هدایت املاح به لایه‌های پایین‌تر خاک، در کنترل تجمع نمک در ناحیه ریشه نیز مؤثر است.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های عددی مانند HYDRUS-2D در طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی به‌ویژه در محصولات حساس به شوری، نقش بسیار مؤثری در افزایش راندمان آب و پایداری تولید دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش علاوه بر تأیید نقش مثبت و مؤثر مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی شوری و

رطوبت در منطقه مورد مطالعه، به ارائه بهترین پارامتر طراحی سیستم آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ دار که در این مطالعه بررسی شده است می‌پردازد. لازم به ذکر است که اعداد و ارقام بدست‌آمده در این پروژه تحقیقاتی برای فاکتورهای طراحی این سیستم آبیاری، اعداد مطلق و ثابتی نبوده و لازم است با در نظر گرفتن این نتایج، برای هر باغ با توجه به بافت خاک، طول و فاصله ردیف درختان، دبی آب آبیاری، شیب زمین و ... این پارامترها بهینه‌سازی گردند اما بر اساس شرایط آب‌و‌خاک منطقه مورد مطالعه، بهترین عمق کانال قرارگیری لوله‌های PVC، ۶۰ سانتی‌متر و بهترین قطر سوراخ روی لوله آبدار نه میلی‌متر معرفی می‌گردد. قطر لوله آبدار برای کنترل شوری بهتر است ۱۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود و در صورتی که مشکل شوری مطرح نباشد و تنها استفاده بهینه از آب مد نظر باشد و البته با قبول تفاوت مبلغ تأمین بودجه، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر توصیه می‌گردد. فاصله بین سوراخ‌ها در محدوده مقادیر مطالعه شده در این پژوهش تفاوت قابل توجهی را نشان نداد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. تافته، آرش، و امداد، محمدرضا، ۱۴۰۳. استفاده از مدل Hydrus 2D در ارائه برنامه مناسب آبیاری باغات و شبیه‌سازی شوری خاک (مطالعه موردی باغات پسته سمنان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۵(۱)، صص. ۳۷-۵۴. 10.22125/IWE.2024.446730.1795
۲. دهقانی سانج، حسین، حاجی آقا بزرگی، حمیدرضا، کنعانی، الهه، و دهقانی سانج، غزل، ۱۳۹۸. کاربرد مدل Hydrus-2D در بررسی تغییرات رطوبت خاک زیر درختان پسته با سیستم قطره‌ای زیرسطحی. مجله آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۳(۶)، صص. ۱۵۳۸-۱۵۴۹. 20.1001.1.20087942.1398.13.6.1.7
۳. جوزی، مهدی، مهدوی مقدم، نرجس، و زارع ابیانه، حمید، ۱۴۰۰. شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با مدل HYDRUS-2D. مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۲(۱)، صص. ۲۴۱-۲۵۶.

۴. حسینی، سیدتقی، رمضان‌اعتمادی، هادی، کاویانی، عباس، سلطانی، مسعود، و نظری، بیژن، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی حرکت آب و شوری در آبیاری قطره‌ای نواری در کشت ذرت با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D. نشریه دانش آب‌و خاک. ۳۳(۴)، صص. ۵۵-۷۰. 10.22034/ws.2021.47124.2425
۵. حیدری، زینب، فراستی، معصومه، و قبادیان، رسول، ۱۳۹۷. بررسی اثر دبی بر الگوی خیس شده تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۴)، صص. ۱۳۲-۱۴۴.
۶. خلیلی، مژده، اکبری، مهدی، هزارجریبی، ابوطالب، ذاکری‌نیا، مهدی، عباسی، فریرز، و کولانیان، علی، ۱۳۹۵. مدل کردن نیم‌رخ رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از HYDRUS-2D، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۰(۲)، صص. ۱۳۶-۱۴۴.
۷. رمضان‌اعتمادی، هادی، کریمی، شیما، و فخار، محدثه‌السادات، ۱۴۰۱. شبیه‌سازی اثر پوشش بر توزیع رطوبت و املاح خاک با استفاده از دو مدل HYDRUS-2D و AquaCrop. هیدروژئولوژی، ۷(۱)، صص. ۱-۱۰. 10.22034/HYDRO.2022.12702
۸. سیفی، اکرم، و صداقتی، ناصر، ۱۳۹۹. ارزیابی اولویت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و لوله‌های کم‌فشار PVC سوراخ‌دار در باغ‌های پسته استان کرمان مبتنی بر مدل تصمیم‌گیری بهینه‌سازی غیرخطی. علوم و فناوری پسته، ۵(۱)، صص. ۲۱-۴۴.
۹. شینی دشتگل، علی، کرمان‌نژاد، جلیل، حمودی، مجید، و قنبری عدیوی، الهام. ۱۴۰۰. بررسی چگونگی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه داده‌ها با نتایج HYDRUS 2D. دانش آب‌و خاک، ۳۱(۲)، صص. ۱۰۳-۱۱۵. 10.22034/WS.2021.12155
۱۰. صداقتی، ناصر، ۱۴۰۳. تعیین بهترین پارامترهای طراحی سیستم آبیاری زیرسطحی با استفاده از لوله‌های پی‌وی سی در باغ‌های پسته. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. شماره فروست سامانه فیپاک: ۶۵۶۳۵.
۱۱. صداقتی، ناصر، حسینی فرد، سیدجواد، و عبدالهی عزت‌آبادی، محمد، ۱۳۹۳. بررسی امکان تغییر سیستم آبیاری سطحی غرقابی و زیرسطحی با لوله‌های PVC در باغ‌های پسته. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی پژوهشگاه پسته رفسنجان، ۲۶ صفحه.
۱۲. صداقتی، ناصر، حسینی فرد، سیدجواد، عبدالهی عزت‌آبادی، محمد، محمدی محمدآبادی، اکبر، و نیکوئی دستجردی، محمدرضا. ۱۳۹۸. اثر تغییر سیستم آبیاری از روش سطحی (غرقابی) به زیرسطحی با لوله‌های پی وی‌سی (PVC) بر شوری خاک، رشد و عملکرد درختان پسته. علوم و فناوری پسته، ۴(۸)، صص. ۲۸-۴۲.
۱۳. عباسی، فریرز. ۱۳۹۴. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
۱۴. عطایی، علی، نیشابوری، محمدرضا، اکبری، مهدی، آگدرنژاد، اصلان، و اسدی، صفورا، ۱۳۹۹. کاربرد معیارهای PAW و IWC در مدیریت آبیاری و نقش آن بر توزیع شوری خاک و جذب آب گیاه. تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۵۱(۱۱)، صص. ۲۷۷۳-۲۷۸۶. 10.22059/IJSWR.2020.305248.668657
۱۵. میرزایی، علی‌اصغر، و ناظمی، امیرحسین. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی حرکت شوری در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱(۳)، صص. ۵۹-۷۰.
16. Al-Tabbal, J. and Al-Zboon, K.K., 2021. Impact of boric acid and saline water irrigation on germination and seedling establishment of wheat. *Irrigation and Drainage*, 70(5), pp. 1183-1192. <https://doi.org/10.1002/ird.2603>

17. Autovino, D., Rallo, G. and Provenzano, G., 2018. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with hydrus-2d model performance and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 203, pp. 225-235. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.015>**
18. Bajpai, A. and Kaushal, A., 2020. Soil moisture distribution under trickle irrigation: A review. *Water Supply*, 20(3), pp. 761-772. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.005>
19. Bannayan M and Hoogenboom G., 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*, 111, pp. 290-302. **<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.01.007>**
20. Brunetti, G., Šimůnek, J. and Piro, P., 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology*, 540, pp. 1146-1161.
21. Brunetti, G., Porti, M. and Piro, P., 2018. Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate. *Applied Energy*, 221, pp. 204-219. **<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.030>**
22. Elmaloglou, S. and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural water management*, 96(11), 1587-1595. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.010>**
23. Jamieson, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), pp. 337-350. **[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)**
24. Morianou, G., Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2023. A Review of HYDRUS 2D/3D Applications for Simulations of Water Dynamics, Root Uptake and Solute Transport in Tree Crops under Drip Irrigation. *Water*, 15(4), pp. 741.
25. Ning, S., Zhou, B., Wang, Q., and Tao, W., 2020. Evaluation of irrigation water salinity and leaching fraction on the water productivity for crops. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(1), pp. 170-177. **[10.25165/j.ijabe.20201301.5047](https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.5047)**
26. Phull, A.M. and Babar, M.M., 2012. Simulation of soil wetting pattern of subsurface drip irrigation system. In Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC (Vol. 16, p. 2012).
27. Šimůnek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M., 2011. User Manual. *SpringerReference*. 322 p.
28. Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T., and Šejna, M., 2012. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical manual.
29. 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), pp. 893–904. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.013>**
30. Skaggs, T.H., Trout, T.J., Šimůnek, J. and Shouse, P.J., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), pp. 304–310. 10.1061/ (ASCE) 0733-9437(2004)130:4(304)