

بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در خاک‌های لایه‌ای مسطح و شیب دار

زهرا نوروزیان^۱، علی اشرف صدرالدینی^۲، امیرحسین ناظمی^۲، رضا دلیرحسن نیا^{۳*}

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۹

^۱ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه تبریز

^۲ - استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: delearhasannia@yahoo.com

چکیده

در پژوهش حاضر الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری با قطره‌چکان‌های زیر سطحی در خاک دو لایه و در دو حالت زمین مسطح و شیب‌دار از طریق انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای بررسی و اثرات شرایط شیب زمین و لایه‌ای بودن خاک به‌طور منفرد و توأم بر الگوی خیس‌شدگی خاک بررسی شد. مقایسه‌ها بین نیمرخ‌های رطوبتی مشاهداتی در خاک‌های مسطح و شیب‌دار، بیان‌گر این موضوع بود که با افزایش مدت آبیاری نیمرخ رطوبتی ایجاد شده در خاک‌های شیب‌دار با نیمرخ حاصل در خاک‌های مسطح تطابق بیشتری می‌یابد. نتایج گویای این موضوع بود که با افزایش مدت پخش آب اثر غیر همسان بودن خاک کاهش پیدا می‌کند. به دلیل بالا بودن هدایت هیدرولیکی لایه پایینی، با رسیدن رطوبت به مرز لایه‌ها جبهه رطوبتی دارای شکست گردیده، گسترش رطوبت در جهت عمودی بیشتر شده و شکل پیاز رطوبتی به صورت بیضی بود. از نرم‌افزار هایدروس دو بعدی برای شبیه‌سازی جبهه رطوبتی برای شرایط مشابه با آزمایش‌های صحرائی استفاده شد. به‌منظور برآورد دقت نرم‌افزار، فاصله شعاعی جبهه رطوبتی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از محل قطره‌چکان در زاویه‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. بر این اساس معیارهای جذر میانگین مربعات خطا $2/47$ سانتی‌متر، ضریب همبستگی $0/82$ و ضریب کارآیی مدل $0/24$ حاصل گردید. معیارهای مذکور در خاک دو لایه‌ای شیب دار نیز به ترتیب برابر $4/03$ سانتی‌متر، $0/75$ و $0/36$ محاسبه شد. در کل این نتایج قابلیت خوب نرم‌افزار هایدروس در شبیه‌سازی حرکت آب در شرایط مورد مطالعه تایید نمود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای زیر سطحی، الگوی خیس‌شدگی، خاک دولایه شیب‌دار، نرم‌افزار هایدروس

Experimental and Numerical Investigations of Soil Water Distribution under Subsurface Drip Irrigation in Level and Sloping Layered Soils

Z Norouzian¹, AA Sadraddini², AH Nazemi², R Delirhasannia^{3*}

Received: 19 May 2015

Accepted: 19 September 2016

¹ M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engr, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

² Prof., Dept. of Water Engr, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Assoc. Prof., Dept. of Water Engr, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding Author, e-mail: delearhasannia@yahoo.com

Abstract

In this research the wetting pattern of soil under subsurface drip irrigation was investigated through field experiments on two layered soil at the level and sloping lands, and the interaction and individual effects of the sloping and layered soil conditions on the wetting pattern were studied. Comparisons between observed soil moisture profiles in the level and sloping soils clarified that by increasing the application duration, the wetting patterns of the sloping soil showed more adaptation with that of the level soil. The results indicated that the effect of soil anisotropy was declined with increasing the water application duration. Due to high hydraulic conductivity value of the sublayer soil, the wetting front showed an inflection after reaching to the boundary of the two layers, so that the vertical expansion of pattern was increased and the wetting bulb transformed to an ellipse. The HYDRUS 2D software was applied to simulate the wetting patterns at the same conditions of filed experiments. The radial distance of the soil wetting fronts in the different angles from emitters were compared with corresponding simulations in order to evaluate the model accuracy. Results showed that HYDRUS simulations had a good agreement with observed data with Root Mean Squared Error (RMSE) value of 2.47 cm, correlation coefficient (r) value of 0.82 and model Coefficient of Efficiency (CE) value of 0.24 for the layered level soil. Also the values of these statistical criteria for sloping layered soil in the same order were 4.03 cm, 0.75 and 0.36 respectively. Generally, these results confirmed reliable ability of HYDRUS software for simulation of water movement in the studied conditions.

Keywords: HYDRUS 2D software, Sloping layered soil, Subsurface drip irrigation, Wetting pattern

مقدمه

مزایای این سیستم و بالا بودن راندمان آبیاری استفاده از این سیستم در کشور رو به گسترش است، با این حال هنوز طراحی‌ها و اجرای این روش با مشکلاتی مواجه است. استفاده گسترده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیر سطحی^۱ نیازمند شناخت ویژگی‌های انتقال آب و مواد محلول در خاک، مشخصه‌های پروفیل خاک و توزیع دقیق رطوبت در خاک اطراف قطره‌چکان‌ها است.

خرد آبیاری عبارت است از کاربرد تدریجی آب در سطح و زیر سطح خاک، که شامل چند روش مختلف از جمله سیستم‌های قطره‌ای سطحی، سیستم‌های قطره‌ای زیر سطحی، حبابی و مه پاش می‌باشد. این روش‌ها مزایایی دارند که آن‌ها را از سایر روش‌های آبیاری متمایز می‌سازند (لم و همکاران ۲۰۰۷). با توجه به

کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) با استفاده از نرم-افزار هایدروس توزیع آب اطراف قطره چکان را در یک خاک لوم رسی ارزیابی کردند. نتایج شبیه‌سازی با دو سری آزمایش انجام شده در آزمایشگاه و مزرعه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با قطره‌چکان‌های نصب شده در عمق‌های مختلف مقایسه شد. آنها به این نتیجه رسیدند که تناسب خوبی بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها وجود دارد. بن آشر و همکاران (۱۹۷۸) مدل‌های خطی و غیرخطی نفوذ را در منبع نقطه‌ای بررسی کرده و راه‌حل-های عددی و تحلیلی را برای حل این مدل‌ها ارائه نمودند. نتیجه تحقیقات آنان نشان داد که راه‌حل‌های عددی برآوردهای مناسب‌تری برای حالت‌های خیس شدگی و خشک شدگی ارائه می‌کنند. آنجلاکیس و همکاران (۱۹۹۳) توزیع رطوبت را در زمان‌های معینی از آغاز آبیاری در دو نوع خاک همگن شنی و لوم رسی بررسی کردند. در این تحقیق روش‌های عناصر محدود برای نفوذ آب از منبع نقطه‌ای، مدل نیم کره مؤثر و راه‌حل خطی با نتایج آزمایش مقایسه شدند. نتایج نشان داد که توزیع رطوبتی محاسبه شده توسط تمامی روش‌ها در خاک لوم رسی تطابق بهتری با داده‌های آزمایشی نسبت به خاک شنی دارند. کاظمی (۱۳۹۰) همپوشانی الگوهای خیس شدگی قطره چکان‌ها را در لترال‌های آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در فواصل مختلف قطره چکان‌ها به صورت عملی و شبیه سازی با نرم‌افزار هایدروس بررسی نمود و عنوان کرد نرم‌افزار مذکور دارای قابلیت کافی در شبیه سازی اینگونه آزمایش‌ها می‌باشد. مطالعات چندی نیز در خاک‌های دو لایه انجام پذیرفته است. خانجانی و دلیرحسن نیا (۱۳۹۳) الگوی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی تحت منبع خطی و در خاک دو لایه را با نرم‌افزار هایدروس شبیه سازی نموده و با نتایج آزمایش‌های عملی مقایسه نمود. آنان دقت بالای هایدروس در شبیه سازی‌ها را گزارش نمود. بینگ و همکاران (۲۰۱۰) از یک مدل گرین-آمپت ارتقا یافته که توسط روش باور (۱۹۶۶) ارائه شده است برای به دست

شیب زمین عامل تعیین‌کننده‌ای بر روی الگوی توزیع رطوبت در خاک است. همچنین در بسیاری از موارد، خاک طبیعی غیرهمگن و دارای لایه‌های متفاوتی از نظر بافت، ساختمان، چگالی، هدایت هیدرولیکی می‌باشد. تاکنون پژوهش‌های بسیاری بر روی الگوی رطوبتی حاصل از قطره‌چکان در خاک‌های همگن انجام یافته است. از جمله کندلوس و همکاران (۱۳۸۵) پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای را با استفاده از نرم‌افزار دو بعدی هایدروس شبیه‌سازی نموده و چنین بیان کردند که توسط این نرم‌افزار می‌توان جنبه‌های مختلف مدیریتی مانند فاصله لترال‌ها، دبی خروجی و عمق نصب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را برای شرایط مزرعه مورد نظر بررسی نمود و بهترین گزینه برای مقدار حجم آب کاربردی و فاصله لترال‌ها و نیز عمق نصب لترال را تعیین نمود. خان محمدی و بشارت (۱۳۹۲) تحقیقی را برای تخمین ابعاد جبهه رطوبتی حاصل از یک منبع نقطه-ای انجام دادند. بدین منظور برای تعیین قابلیت نرم‌افزار هایدروس دوبعدی آزمایشی را با روش آبیاری نوار قطره‌ای^۱ انجام داده و از توانایی این نرم‌افزار اطمینان حاصل کردند. با استفاده از نرم‌افزار هایدروس و با به-کارگیری قضیه π باکینگهام موفق به ارائه روابط ساده برای تخمین مقدار عمق و بیشینه قطر خیس‌شدگی خاک توسط هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، دبی قطره‌چکان و مدت زمان کارکرد شدند. مقایسه ابعاد جبهه رطوبتی با نتایج به دست آمده از روابط فوق نشان داد که می‌توان از این روابط برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی استفاده نمود. شوارتزمن و زار (۱۹۸۶) روشی را برای تعیین ابعاد خاک خیس شده اطراف یک قطره چکان ارائه دادند و صحت روش پیشنهادی را با استفاده از نتایج محاسبه شده و آزمایشی بررسی کردند. کوک و همکاران (۲۰۰۶) پیشروی جبهه رطوبتی را در سه نوع خاک مختلف بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از حل معادله فیلپ (۱۹۸۴) در اکثر موارد سازگاری خوبی با نتایج حاصل از حل عددی معادله ریچاردز دارد.

هدف از انجام این تحقیق بررسی‌های صحرایی و شبیه‌سازی عددی الگوی توزیع رطوبت تحت منبع نقطه-ای در خاک‌های دولایه‌ای شیب‌دار و مسطح و مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های عملی با شبیه‌سازی‌های عددی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۱- آزمایش‌های میدانی

به‌منظور بررسی اثر مدت زمان‌های مختلف آبیاری و همچنین تأثیر توام لایه‌ای و شیب‌دار بودن خاک بر روی پیشروی آب در خاک و همچنین مقایسه بین پیاز رطوبتی ایجاد شده در خاک دولایه مسطح و شیب‌دار آزمایش‌های صحرایی در اراضی تحقیقاتی کرکج متعلق به دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز به طول و عرض جغرافیایی ۳، ۴۶ و ۱، ۳۸، واقع در کیلومتر ۱۱ جاده تبریز به باسمنج انجام گردید. قطعه زمینی با خاک نسبتاً همگن به ابعاد ۵×۲/۵ متر انتخاب گردید. سپس برای ایجاد حالت دو لایه که در آن ضخامت لایه فوقانی و تحتانی به‌ترتیب حدود ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر باشد، خاک-برداری لازم انجام شد. نیمی از کف این قطعه به‌صورت شیب‌دار (با شیب ۱۰ درصد) و نیم دیگر آن به صورت مسطح ایجاد گردید (شکل ۱). سپس دو نوع خاک با بافت متفاوت تهیه شده (برای ایجاد دو لایه متفاوت) طوری در محل مورد نظر قرار گرفت که چگالی ظاهری آن در حد خاک طبیعی گردد. بافت خاک لایه بالایی لوم رسی-شنی و بافت خاک لایه زیرین لوم شنی بود که بافت لایه بالایی همان بافت خاک منطقه آزمایش و بافت لایه زیرین نیز با مخلوط خاک منطقه با مقدار کافی از ماسه شسته جهت بدست آوردن خاکی با نفوذپذیری بیشتر، تهیه شد.

اجزا و قطعات موردنیاز سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای انجام پژوهش حاضر شامل لوله‌های پلی‌اتیلن ۱۶، ۳۲ و ۶۴ میلی‌متری، پمپ سانتریفیوژ، فیلتر دیسکی، کنتور حجمی، شیر قطع و وصل جریان، شیر سماوری، فشارسنج و قطره‌چکان‌های داخل خط با دبی ۴ لیتر در ساعت بود.

آوردن نفوذ در یک ستون خاک به طول ۳۰۰ سانتی‌متر و با خاک ۵ لایه استفاده کردند و برای مقایسه نتایج به-دست آمده از این روش، نفوذ را توسط حالت اولیه روش گرین-آمپت و هایدروس یک بعدی نیز بررسی نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که توانایی مدل گرین-آمپت اولیه در پیش‌بینی پیشروی نفوذ بسیار ضعیف است ولی نتایج پیش‌بینی سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی توسط هایدروس یک بعدی توانایی خوب این نرم‌افزار را در پیش‌بینی نفوذ نشان داد. همچنین مدل گرین-آمپت ارتقا یافته توسط روش باور بسیار بهتر از دو روش فوق، سرعت نفوذ، نفوذ تجمعی و پیشروی جبهه رطوبتی را پیش‌بینی نمود. کورادینی و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل ساده را برای به‌دست آوردن نفوذ در خاک دو لایه‌ای که لایه بالایی بسیار نفوذپذیرتر از لایه پایینی بود ارائه کردند. مدل بکار رفته یک فرمول‌بندی جدید از مدل کورادینی و همکاران (۲۰۰۰) بود که شامل دو معادله دیفرانسیل ساده برای پیش‌بینی نفوذ آب در یک خاک دو لایه است. نتایج این تحقیق تنها به تخمین سرعت نفوذ در مواردی که لایه بالایی نفوذپذیرتر از لایه زیرین است، محدود می‌باشد. نتایج نشان داد که این مدل ساده پتانسیل خوبی در پیش‌بینی نفوذ در خاک‌های لایه‌ای در مقیاس مزرعه دارد. یو و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأثیر خاک‌های لایه‌ای را بر روی محصول‌دهی گیاه و مقدار استفاده آب و کود نیتروژن مورد مطالعه قرار دادند، سپس شرایط مزرعه را با استفاده از نرم‌افزار هایدروس پیش‌بینی نمودند و نتیجه گرفتند که هایدروس با کمترین خطا قادر به شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک‌های لایه‌ای می‌باشد. بررسی‌های محدودی نیز در خصوص خاک‌های شیب‌دار انجام گرفته است. حسینی (۱۳۸۹) نحوه توزیع رطوبت در اراضی با شیب‌های متفاوت را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که دقت هایدروس در شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در زمین‌های شیب‌دار کم است و پیشنهاداتی را جهت بهبود نتایج حاصل از نرم-افزار هایدروس ارائه کرد.

توزین می‌شود. از اختلاف بین جرم مرطوب و جرم خشک نمونه مقدار رطوبت وزنی نمونه به دست می‌آید. با توجه به مشخص بودن جرم مخصوص ظاهری خاک، و با ضرب کردن آن در رطوبت وزنی نمونه، مقدار رطوبت حجمی نمونه محاسبه می‌گردد (زرین کفش ۱۳۵۶).



شکل ۱- کف قطعه آزمایشی (نصف قطعه مسطح و نصف دیگر شیب‌دار).

شبکه لوله‌های اصلی، فرعی و قطره‌چکان‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری محدوده گسترش پیاز رطوبتی و نیز مقادیر رطوبت در زمان‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت پس از شروع آبیاری ترانشه‌هایی در محل نصب قطره‌چکان‌ها به صورت عمود بر لترال‌ها حفر گردید. سپس ضمن رسم جبهه رطوبتی خاک بر روی کاغذ شفاف، نیم‌رخ خاک شبکه‌بندی شد و نمونه‌هایی از خاک جهت تعیین مقدار رطوبت در مختصات متفاوتی از پیاز رطوبتی برداشته شد و بلافاصله توسط ترازوی دیجیتالی وزن گردید. نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش‌های لازم برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به آزمایشگاه منتقل گردید. هدایت هیدرولیکی خاک توسط آزمایش داری و در دو جهت شیب زمین و عمود بر سطح خاک تعیین شد. برای تعیین مقدار رطوبت در حد ظرفیت زراعی از روش ذکر شده توسط زرین کفش (۱۳۵۶) استفاده شد.

در روش مذکور آب بر روی خاک ریخته و تا حد شرایط ظرفیت مزرعه خیسانده می‌شود. سپس مقداری از خاک برداشته و پس از وزن کردن در داخل آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه خاک از داخل آون برداشته شده و



شکل ۲- شبکه لوله‌های اصلی، فرعی و قطره‌چکان‌های قطعه آزمایشی.

۲- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی عددی چگونگی توزیع رطوبت حاصل از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک دو لایه‌ی شیب‌دار و مسطح از نرم‌افزار هایدروس دوبعدی استفاده شد. هایدروس یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، گرما و املاح در خاک می‌باشد. این نرم‌افزار شامل حل عددی معادله ریچاردز در تلفیق با روابط ون-گنوختن برای بررسی حرکت آب در خاک و حل معادلات همرفت-انتشار^۱ برای بررسی حرکت گرما و املاح در خاک است. نرم‌افزار هایدروس از زیر مدل رزتا برای پیش‌بینی پارامترهای مورد استفاده در حل معادلات فوق استفاده می‌کند. مدل رزتا از پنج تابع انتقالی برای برآورد نگهداشت رطوبت، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع استفاده می‌کند که در این تحقیق با توجه به اطلاعات موجود از تابع چهارم که شامل درصد رس، شن و سیلت، چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و رطوبت حجمی در شرایط ظرفیت زراعی است، استفاده

نرم افزار هایدروس از روش عناصر محدود برای حل معادلات ریچاردز استفاده می کند (سیمونک و همکاران ۲۰۰۶). در تحقیق حاضر مش بندی نیم رخ خاک به صورت مثلثی در نظر گرفته شد. منبع تغذیه آب یعنی قطره چکان به صورت نیم دایره در عمق ۱۵ سانتی متری خاک برای نرم افزار تعریف شد. نرم افزار هایدروس با در نظر گرفتن ویژگی ها، شرایط اولیه و مرزی به شبیه سازی پیشروی آب در خاک اقدام می نماید. رطوبت حجمی اولیه لایه اول برابر ۱۵ درصد و رطوبت حجمی اولیه لایه دوم برابر ۱۲ درصد و همچنین هندسه محیط و شیب خاک (در قسمت غیرهمسان) به عنوان شرایط اولیه وارد نرم افزار گردید. در قسمت شرایط مرزی نیز شدت جریان ثابت با مقدار ۷/۳۸ سانتی متر در ساعت محاسبه و وارد نرم افزار شد.

۳- بررسی دقت شبیه سازی ها

به منظور مقایسه ابعاد پیشروی جبهه رطوبتی مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط نرم افزار هایدروس، از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) استفاده گردید. نحوه محاسبه هر یک از این آماره ها در روابط ۴ و ۵ بیان شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad [4]$$

$$r = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)} \quad [5]$$

در روابط فوق x_i و y_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده فواصل شعاعی جبهه رطوبتی از قطره چکان و n تعداد مشاهدات می باشد.

شد. ریچاردز (۱۹۳۱) برای حرکت آب در خاک غیراشباع، معادله ای را ارائه نمود که ترکیبی از معادله پیوستگی جریان و قانون داری می باشد. جریان آب در محیطی که درجه اشباع آن متغیر است با استفاده از حالت اصلاح شده معادله ریچاردز به صورت زیر بیان می شود (سیمونک و همکاران ۲۰۰۶):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} + K_{iz}^A \right) \right] \quad [1]$$

که در آن θ مقدار حجمی آب $[L^3 L^{-3}]$ ، h فشاری $[L]$ ، x_i مختصات مکانی $[L]$ ($i=1,2$) برای مدل دو بعدی و ($i=1,2,3$) برای مدل سه بعدی، t زمان $[T]$ ، K_{ij}^A مؤلفه های تانسور هدایت هیدرولیکی ناهم روندی بی بعد $[-]$ و K^A تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع $[LT^{-1}]$ می باشد، که توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$K(h, x_i) = K_s(x_i) K_r(h, x_i) \quad [2]$$

که در آن K_r هدایت هیدرولیکی نسبی $[L]$ و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع $[LT^{-1}]$ می باشد. تانسور ناهم روندی K_{ij}^A در رابطه ۱ برای بیان رابطه در یک محیط ناهم روند به کار برده می شود. در یک محیط هم روند، مؤلفه های قطری K_{ij}^A برابر با یک و مؤلفه های غیر قطری آن برابر با صفر می باشد (سیمونک و همکاران ۲۰۰۶).

در این مطالعه خاک از دو لایه تشکیل شده است که هر دو خاک هم روند فرض می شوند. در این صورت تانسور هم روندی بی بعد K^A به یک ماتریس واحد تبدیل خواهد شد. اگر معادله ۲ برای جریان صفحه ای در یک سطح عمودی به کار گرفته شود، $x_1 = x$ مختص محور افقی و $x_2 = z$ مختص محور عمودی خواهد بود و معادله به صورت زیر در می آید.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(K_{xz}^A \frac{\partial h}{\partial x} + K_{zz}^A \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(K_{xz}^A \frac{\partial h}{\partial z} + K_{zz}^A \right) \right] \quad [3]$$

رزتا استفاده گردید و خروجی‌های مدل در جدول ۳ ارایه شده است. با استفاده از مثلث بافت خاک USDA لایه بالایی لوم رسی-شنی و و بافت خاک لایه زیرین لوم شنی تعیین گردید.

۱- نتایج آزمایش‌های صحرایی

در خاک مسطح دولایه با فرض تقارن جریان در اطراف قطره‌چکان و در نتیجه تقارن پیماز رطوبتی حاصل، در زمان‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت از شروع آبیاری، تنها ربع حجم خیس شده حفر و نیمرخ توزیع رطوبت بر روی صفحات شفاف در مزرعه رسم و سپس با استفاده از داده‌های مستخرج از آن، شکل‌های مربوطه در نرم‌افزار اکسل رسم گردید (شکل ۳). قابل ذکر است که محل قرارگیری قطره‌چکان در عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک است.

جدول ۲- مقادیر مربوط به درصد هریک از اجزای بافت خاک.

مشخصه‌های فیزیکی	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)
لایه بالایی	۵۶/۶	۲۲/۲	۲۰/۲
لایه زیرین	۸۴/۱	۵/۱	۱۰/۸

جدول ۳- مقادیر مربوط به پارامترهای خروجی زیر مدل رزتا.

l	n	ضریب α	رطوبت	رطوبت	باقیمانده (%)
			اشباع (%)	رطوبت باقیمانده (%)	
۰/۵	۱/۵۵۳۳	۰/۰۳۵۶	۰/۴۰۰۶	۰/۰۵۹۷	لایه بالایی
۰/۵	۲/۰۱۰۷	۰/۰۳۷۱	۰/۳۷۹۷	۰/۰۵۷۶	لایه زیرین

با توجه به این‌که ممکن است معیارهای فوق به تنهایی برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی کفایت نکند، لذا از معیار دیگری به نام ضریب کارآیی مدل (CE) یا ضریب نش-ساتکلیف (سیواکومار و همکاران ۲۰۰۲) نیز استفاده شد که مقدار عددی آن از $-\infty$ تا یک متغیر است. هرچه مقدار CE به یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده دقیق‌تر بودن مدل است. مقدار CE از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad [6]$$

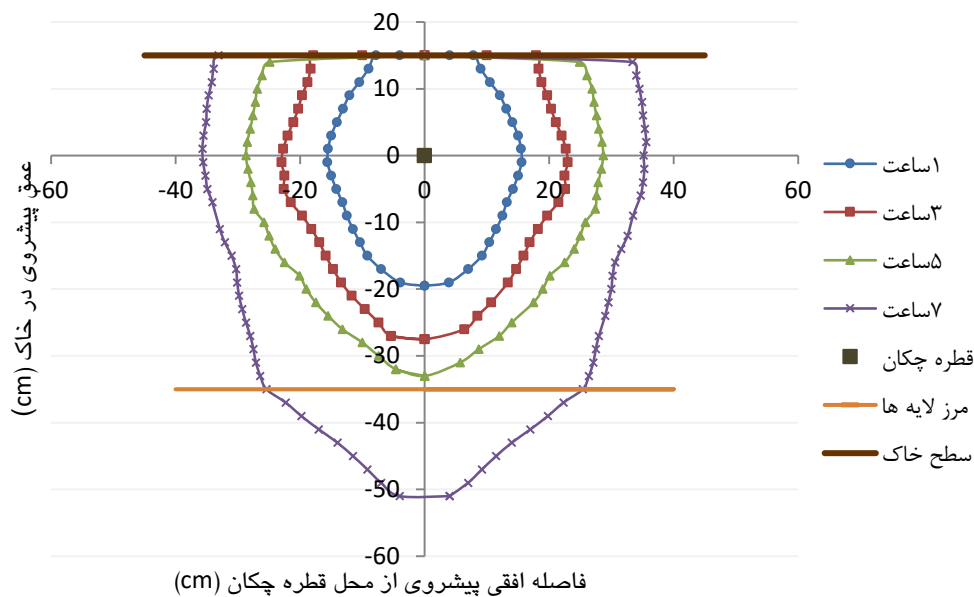
با راه‌اندازی سیستم آبیاری، پخش آب توسط قطره‌چکان‌های زیر سطحی بر روی زمین شیب‌دار و مسطح انجام شد. سپس نیمرخ جبهه رطوبتی بر روی کاغذ شفاف رسم گردید. با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها و نیمرخ‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار هایدروس، مقایسه نیمرخ‌های رطوبتی مشاهداتی و پیش‌بینی شده از طریق روابط مذکور انجام گرفت.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک.

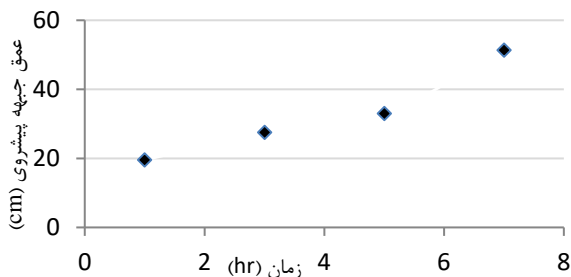
ویژگی	چگالی ظاهری (gr cm ⁻³)	رطوبت حجمی اولیه (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm hr ⁻¹)	رطوبت در فشار ۰/۳۳ بار (cm ³ cm ⁻³)
لایه بالایی	۱/۴۵	۱۵	۱/۹۲	۰/۱۷۸۳
لایه زیرین	۱/۵۶	۱۲	۱۱/۷	۰/۱۳۰۵

نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، آزمایش‌هایی به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک انجام پذیرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. مقادیر این جدول‌ها به عنوان ورودی مدل



شکل ۳- نیمرخ توزیع رطوبتی خاک در ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت پس از شروع آبیاری در خاک مسطح.



شکل ۴- پیشروی عمودی جبهه رطوبتی در خاکهای مسطح.

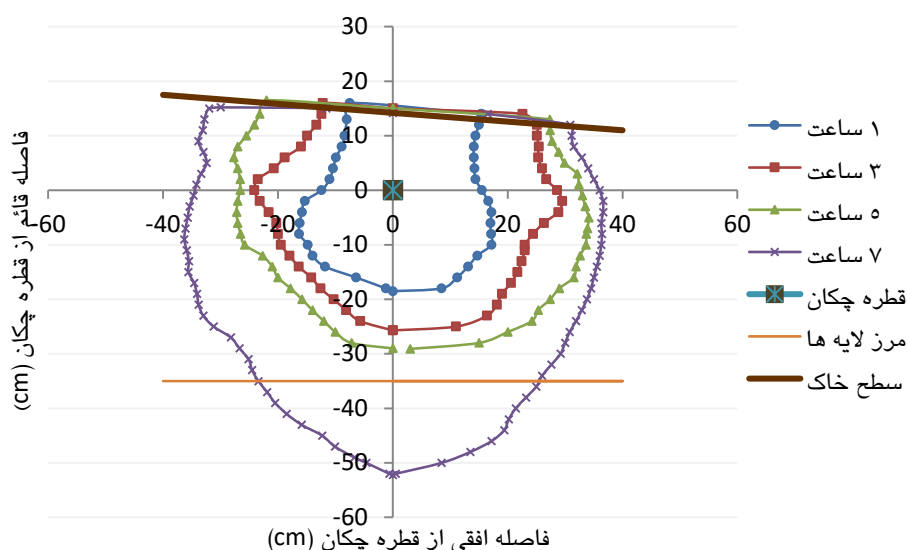
ساعت پس از شروع آبیاری بر روی صفحات شفاف و سپس در نرم افزار اکسل رسم گردید (شکل ۵). اما در این سری از آزمایش‌ها به دلیل نامتقارن بودن الگوی رطوبتی قطره‌چکان‌ها ترانشه در کل ناحیه خیس شده حفر گردید. همان طور که در شکل ۵ مشخص می‌باشد، به دلیل غیرهمروند بودن خاک (لایه‌ای بودن زمین و شیب‌دار بودن آن) شکل نیمرخ ایجاد شده به صورت بیضی بوده و همچنین تمایل به حرکت در جهت شیب دارد.

با توجه به این شکل در لایه بالایی گسترش جبهه رطوبتی به حالت کروی نزدیک است ولی با ورود آب به لایه پایینی حرکت آب در جهت عمودی به دلیل نفوذپذیری بالای آن بیشتر شده و شکستگی منحنی در عمق ۳۵- سانتی‌متری در زمان ۷ ساعت پس از شروع آبیاری به همین دلیل می‌باشد. با استفاده از نرم افزار اکسل ارتباط بین عمق پیشروی با زمان (شکل ۴) توسط رابطه نمائی با ضریب همبستگی ۰/۹۸ تعریف گردید.

$$y = 16 / 658 e^{0.1542t} \quad [7]$$

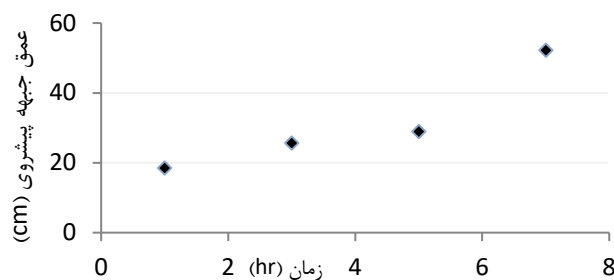
که در آن y عمق پیشروی جبهه رطوبتی در خاک بر حسب سانتی‌متر و t زمان از شروع آبیاری بر حسب ساعت می‌باشد.

در خاک شیب‌دار (با شیب ۱۰ درصد) نیز همانند خاک مسطح قطره‌چکان در عمق ۱۵ سانتی‌متری سطح خاک نصب شد و پیاپی رطوبتی در زمان‌های ۱، ۳، ۵ و ۷



شکل ۵- نیمرخ توزیع رطوبتی خاک در ۱، ۳، ۵ و ۷ ساعت پس از شروع آبیاری در خاک شیب‌دار (شیب ۱۰ درصد).

۲- نتایج شبیه‌سازی عددی ابعاد جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی توسط نرم‌افزار هایدروس برای شبیه‌سازی دو بعدی جریان، نیمرخ از خاک به عمق و عرض ۱۰۰ سانتی‌متر برای هر قطره-چکان به عنوان محدوده حل در نظر گرفته شد. سپس این محدوده با عناصر محدود مثلثی شکل شبکه‌بندی شد. شرایط اولیه به صورت درصد رطوبت حجمی برای هر لایه و شرایط مرزی در دیواره‌ها بدون جریان ورودی و خروجی و در محل قطره‌چکان با گزینه شار جریان ثابت تعریف شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توزیع رطوبت در خاک‌های مسطح و شیب‌دار در زمان ۷ ساعت پس از شروع آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است.

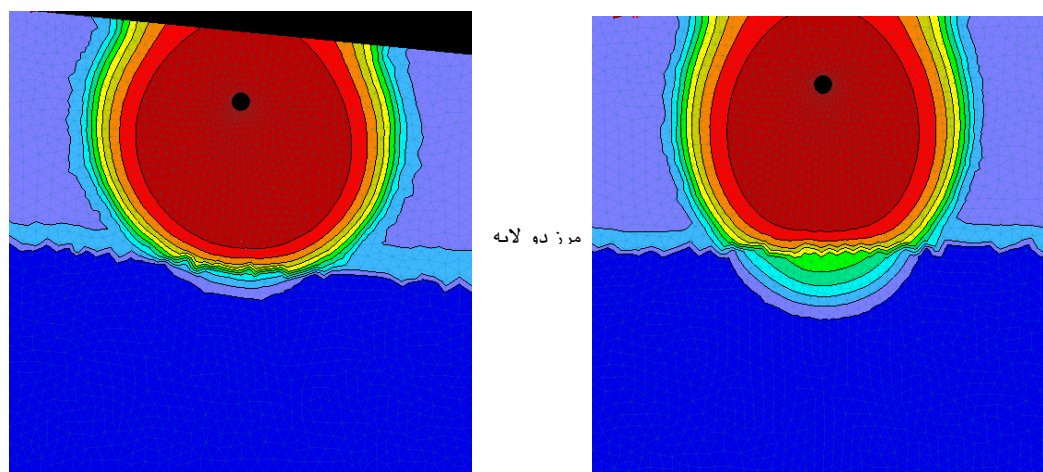


شکل ۶- پیشروی عمودی جبهه رطوبتی در خاک‌های شیب‌دار.

رابطه بین عمق پیشروی نسبت به زمان در این شرایط به صورت شکل ۶ و معادله مربوط به آن به صورت رابطه ۸ با ضریب همبستگی ۰/۹۶ استخراج گردید.

$$y = 15/258e^{0.1616t} \quad [8]$$

پارامترهای مورد استفاده در رابطه ۸ تعریفی مشابه رابطه ۷ دارند.

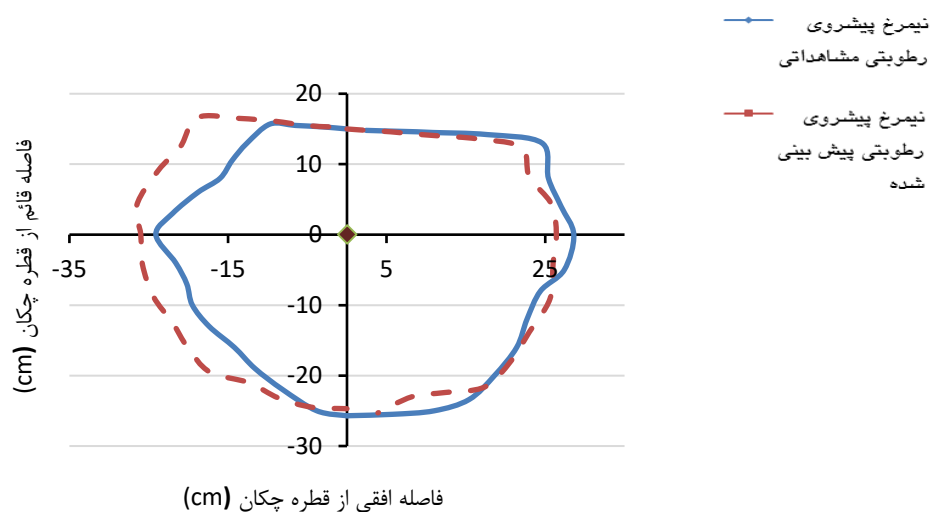


شکل ۷- توزیع رطوبت در خاک مسطح (سمت راست) و شیب‌دار (سمت چپ)، شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار هایدروس در زمان ۷ ساعت پس از شروع آبیاری.

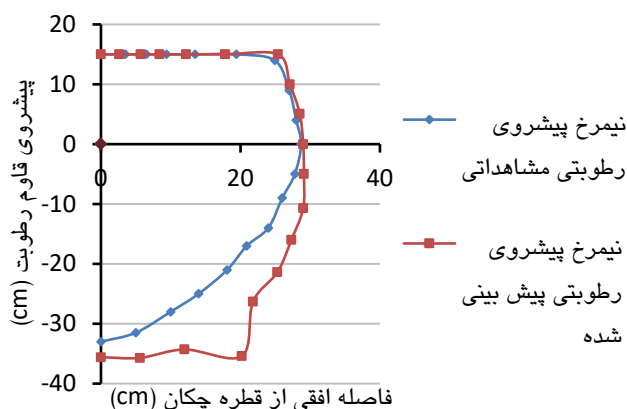
۳- ابعاد جبهه رطوبتی مشاهداتی و پیش‌بینی شده

منحنی‌های پیشروی جبهه رطوبتی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار هایدروس در صفحه‌ای عمود بر محور قطره‌چکان‌ها برای ساعات مختلف و خاک

مسطح و شیب‌دار رسم گردید، نمونه این منحنی‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب برای خاک شیب‌دار در زمان ۳ ساعت و برای خاک مسطح در زمان ۵ ساعت پس از شروع آزمایش ارائه شده‌اند.



شکل ۸- نیمرخ‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پیشروی جبهه رطوبتی در خاک شیب‌دار در زمان ۳ ساعت پس از شروع آبیاری.



شکل ۹- نیمرخ‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پیشروی جبهه رطوبتی در خاک مسطح در زمان ۵ ساعت پس از شروع آبیاری.

مقایسه فواصل شعاعی نیمرخ‌های توزیع رطوبت در خاک از قطره‌چکان (در جهت‌های یکسان) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در خاک مسطح و شیب‌دار به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- مقایسه آماری مقادیر فواصل شعاعی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از محل قطره‌چکان در زمان‌های مختلف در خاک مسطح.

مدت آزمایش (ساعت)	RMSE (cm)	r	CE
۱	۲/۲۴	۰/۴۹	-۱/۱۳
۳	۱/۹۱	۰/۸۸	۰/۷۰
۵	۴/۱۵	۰/۹۳	۰/۴۲
۷	۱/۶۰	۰/۹۹	۰/۹۸
میانگین	۲/۴۷	۰/۸۲	۰/۲۴

جدول ۵- مقایسه آماری مقادیر فواصل شعاعی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از محل قطره‌چکان در زمان‌های مختلف در خاک شیب‌دار (شیب ۱۰ درصد).

مدت آزمایش (ساعت)	RMSE (cm)	r	CE
۱	۴/۴۴	۰/۳۶	-۰/۵۹
۳	۲/۸۵	۰/۸۲	۰/۶۰
۵	۳/۹۴	۰/۹۰	۰/۵۹
۷	۴/۸۹	۰/۹۳	۰/۸۵
میانگین	۴/۰۳	۰/۷۵	۰/۳۶

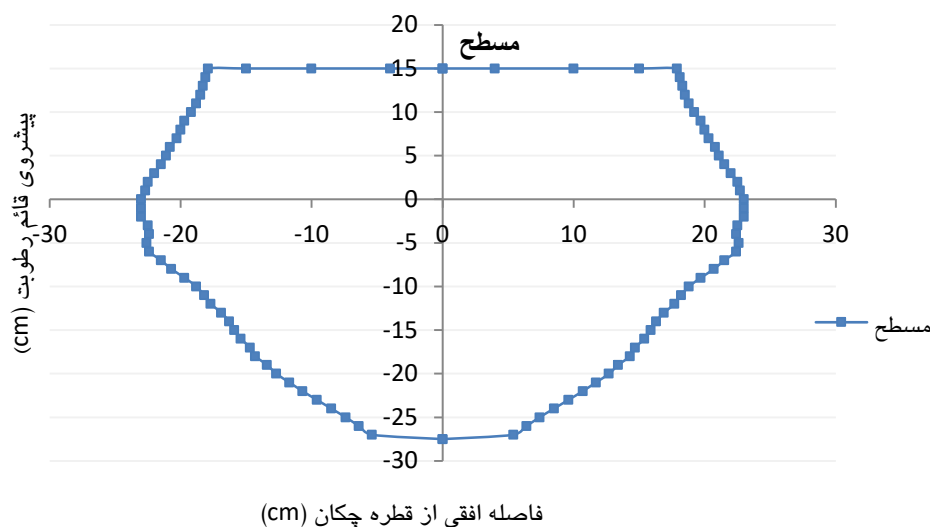
با توجه به معیارهای آماری فوق می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های مسطح و شیب‌دار با افزایش زمان آبیاری، دقت نرم‌افزار هایدروس در پیش‌بینی نیمرخ پیشروی رطوبت در خاک افزایش می‌یابد. در زمان‌های کمتر از ۳ ساعت مقادیر مشاهداتی از دقت قابل قبولی برخوردار نبودند. به‌نظر می‌رسد دلیل این امر آن است که در ساعات اولیه به‌دلیل کوچک بودن حجم خاک خیس شده، اختلاف بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها بیشتر

گرفت که در خاک‌های مسطح و شیب‌دار با افزایش زمان آبیاری، دقت نرم‌افزار هایدروس در پیش‌بینی نیمرخ پیشروی رطوبت در خاک افزایش می‌یابد. در زمان‌های

در زمینه بررسی دقت نرم‌افزار هایدروس در زمینه پیش-بینی جبهه رطوبتی حاصل از قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای، دقت بالای این نرم‌افزار را گزارش نمودند. یو و همکاران (۲۰۱۱) نیز توانایی هایدروس را در پیش‌بینی جبهه رطوبتی در خاک‌های لایه‌ای تایید کرده‌اند. این نتایج با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت دارد.

۴- ابعاد جبهه رطوبتی مشاهداتی در خاک مسطح و خاک شیب‌دار

برای مقایسه پیاز رطوبتی حاصل در خاک‌های مسطح و شیب‌دار نیم‌رخ‌های پیشروی جبهه رطوبتی در زمان‌های مختلف از شروع آبیاری رسم گردید. شکل ۱۰ نمونه‌ای از این مقایسه می‌باشد.



شکل ۱۰- نیم‌رخ‌های مشاهداتی پیشروی جبهه رطوبتی در خاک مسطح و شیب‌دار در زمان ۳ ساعت پس از شروع آبیاری.

گردید و بر اساس نتایج آزمایش‌های پژوهش حاضر بیشینه عرض خیس شدگی در خاک با شیب ۱۰ درصد نسبت به خاک مسطح در شرایط مورد آزمایش به طور متوسط ۸ درصد بیشتر بود.

۵- فاصله بهینه پیشنهاد شده برای قطر چکان‌ها

به‌منظور محاسبه فاصله بهینه قطر چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در خاک مسطح و شیب‌دار،

برجسته می‌شود و غیریکنواختی‌های موضعی قابل چشم‌پوشی نمی‌باشند. همچنین با توجه به مقادیر جدول-های ۴ و ۵ با افزایش مدت زمان آبیاری، دقت نرم‌افزار در پیش‌بینی جبهه رطوبتی بیشتر می‌شود، دلیل آن نیز این است که با گسترش نیم‌رخ رطوبتی در زمان‌های طولانی‌تر، غیر یکنواختی‌های موضعی سرشکن می‌شود. با توجه به معیارهای آماری فوق می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار هایدروس قابلیت بالایی در پیش‌بینی جبهه رطوبتی در خاک به ویژه در زمان‌های طولانی آبیاری دارد. حسینی (۱۳۸۹) به این نتیجه دست یافت که نرم-افزار هایدروس قابلیت کافی را برای پیش‌بینی جبهه رطوبتی در خاک‌های لایه‌ای را ندارد ولی نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های این تحقیق گویای عکس این مطلب می‌باشد. خان محمدی و بشارت (۱۳۹۲) در تحقیق خود

با توجه به نتایج به‌دست آمده، نیم‌رخ‌های پیشروی جبهه رطوبتی حاصل در خاک مسطح و شیب‌دار تا حدودی متفاوت از یکدیگر هستند و نیم‌رخ پیاز رطوبتی در خاک-های شیب‌دار نسبت به محور قطر چکان نامتقارن بوده و گرایش به حرکت بیشتر در جهت شیب دارد. در مورد گسترش عمودی جبهه رطوبتی تفاوت چندانی بین سطوح مسطح و شیب‌دار مشاهده نگردید. بیشینه عرض خیس شدگی در خاک شیب‌دار بیشتر از خاک مسطح مشاهده

مسطح و خاک‌های شیب‌دار ارایه شده است. بیشینه قطر خیس شده در اعماق مختلف (z) رخ داد که در ستون ۳ جدول ۶ آورده شده است.

$$s'_e = 0.18w \quad [9]$$

مقادیر بیشینه قطر خیس شدگی در زمان‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۲۴ ساعت پس از شروع آبیاری اندازه‌گیری سپس بر اساس رابطه کلر و بلیسنر (۱۹۹۰) فاصله بهینه قطره-چکان‌ها محاسبه گردید (رابطه ۹). نتایج حاصل از این محاسبات در جداول ۶ و ۷ به ترتیب برای خاک‌های

جدول ۶- بیشینه قطر خیس شدگی و فاصله بهینه قطره‌چکان‌ها در خاک مسطح.

زمان آبیاری	w (cm)	z (cm)	s'_e (cm)
۱ ساعت	۳۱/۴	۱۵	۲۵/۱۲
۳ ساعت	۴۶	۱۵	۳۶/۸
۵ ساعت	۵۷/۴	۱۵	۴۵/۹۲
۷ ساعت	۷۰/۴	۱۵	۵۶/۳۲
۲۴ ساعت	۹۲	۲۰	۷۳/۶

جدول ۷- بیشینه قطر خیس شدگی و فاصله بهینه قطره‌چکان‌ها در خاک شیب‌دار.

زمان آبیاری	w (cm)	z (cm)	s'_e (cm)
۱ ساعت	۳۳/۷	۲۳	۲۶/۹۶
۳ ساعت	۵۲/۷	۱۵	۴۲/۱۶
۵ ساعت	۶۱/۹	۲۰	۴۹/۵۲
۷ ساعت	۷۲/۷	۲۰	۵۸/۱۶
۲۴ ساعت	۹۴	۲۰	۷۵/۲

مربعات خطای ۲/۴۷ سانتی‌متر، ضریب تبیین ۰/۸۲ و ضریب کارایی مدل ۰/۲۴ در خاک مسطح و جذر میانگین مربعات خطای ۴/۰۳ سانتی‌متر، ضریب تبیین ۰/۷۵ و ضریب کارایی مدل ۰/۳۶ در خاک شیب‌دار تطابق قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی داشته و روش مناسبی جهت شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در این شرایط می‌باشد. مقایسه‌ها نشان داد که شبیه‌سازی پیاز رطوبتی ایجاد شده در خاک مسطح نسبت به خاک شیب‌دار به طور نسبی دارای دقت بالاتری است و نیمرخ‌های برآورد شده تطابق بیشتری با نیمرخ‌های مشاهداتی دارد. همچنین مقایسه بین نیمرخ مشاهداتی در خاک‌های مسطح و شیب‌دار که با استفاده از فواصل شعاعی انجام شد، بیان‌گر این موضوع بود که با افزایش ساعات آبیاری نیمرخ ایجاد شده در خاک‌های شیب‌دار با نیمرخ حاصل

با توجه به جدول‌های ۶ و ۷، فاصله بهینه قطره-چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک‌های مورد آزمایش بسته به ساعت آبیاری در خاک مسطح بین ۲۵ تا ۷۴ سانتی‌متر و در خاک شیب‌دار بین ۲۷ تا ۷۶ سانتی‌متر می‌تواند در نظر گرفته شود ولی معمولاً قطر خیس‌شدگی در کمترین حالت بعد از ۲۴ ساعت مد نظر می‌باشد. ارقام حاصل برای قطر خیس شدگی متفاوت از ارقام توصیه شده توسط کلر و بلیسنر (۱۹۹۰) برای خاک‌های با بافت‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که حل عددی معادله ریچاردز در تلفیق با روابط ون‌گنوختن که با استفاده از نرم‌افزار هایدروس به انجام رسیده، با داشتن جذر میانگین

توجه به اینکه معیارهای طراحی ارائه شده توسط کلر و بلیسنر (۱۹۹۰) یکی از منابع اصلی طراحان سیستم‌های آبیاری قطره‌ای است، لذا بر اساس نتایج حاصله از این تحقیق توصیه می‌شود که قطر خیس شدگی بجای استفاده از مقادیر توصیه شده در این منبع یا منابع دیگر، بر مبنای آزمایش‌های میدانی در هر ناحیه و نسبت به نوع خاک آن ناحیه تعیین گردد.

در خاک‌های مسطح تطابق بیشتری می‌یابد. به دلیل بالا بودن هدایت هیدرولیکی لایه پایینی، با رسیدن رطوبت به مرز لایه‌ها جبهه رطوبتی دارای شکستگی گردیده، گسترش رطوبت در جهت عمودی بیشتر شده و شکل پیاز رطوبتی به صورت بیضی کشیده درآمد. همچنین تفاوت چندانی در گسترش جبهه رطوبتی در جهت عمودی بین خاک مسطح و شیب‌دار مشاهده نشد. با

منابع مورد استفاده

- حسینی س ح، ۱۳۸۹. پیش‌روی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای اراضی شیب‌دار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- خانجانی س و دلیرحسن نیا ر، ۱۳۹۳. بررسی گسترش جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع خطی در خاک دو لایه. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۸، شماره ۲، صفحه‌های ۴۱۹ تا ۴۲۹.
- خان‌محمدی ن و بشارت س، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی جبهه رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با استفاده از HYDRUS-2D. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، جلد ۲، شماره ۴، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۷.
- زرین کفش م، ۱۳۵۶. خاکشناسی عملی، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۱۹۳ صفحه.
- کاظمی ه، ۱۳۹۰. بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- کندلوس م، لیاقت ع و عباسی ف. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از نرم‌افزار هایدروس. دومین کارگاه فنی خردآبیاری: چشم‌انداز و توسعه، کمیته ملی آبیاری و زهکشی، ۲ آذر، کرج.
- Angelakis AN, Rolston, DE, Kadir TN and Scott VH, 1993. Soil water distribution under trickle source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 119(3): 484-500.
- Bouwer H, 1966. Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. *Water Resources Research* 2: 729-738.
- Ben-Asher J, Lomen DO and Warrick, A, 1978. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of America Journal* 42: 3-6.
- Corradini C, Melone F and Smith RE, 2000. Modeling local infiltration for a two layered soil under complex rainfall patterns. *Journal of Hydrology* 237: 58-73.
- Corradini C, Morbidelli R, Flammini, A and Govindaraju, RS, 2011. A parameterized model for local infiltration in two-layered soils in a more permeable upper layer. *Journal of Hydrology* 396: 221-232.
- Cook FJ, Fitch, P, Thorburn, PJ, Charlesworth, PB and Bristow KL, 2006. Modeling trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental Modeling & Software* 21: 1353-1359.
- Kandelous MM and Simunek J, 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management* 97: 1070-1076.
- Keller J and Bliessner RD, 1990. *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New yourk, USA, 652 p.
- Lamm FR, Ayers JE and Nakayama FS, 2007. *Microirrigation for Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, the Netherland, 618 p.
- Philip RJ, 1984. Travel time from buried and surface infiltration point sources. *Water Resource Research* 20(7): 990-994.
- Richards LA, 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics* 1(5): 318- 333.

- Schwartzman M and Zur B, 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 112: 242-253.
- Simunek J, van Genuchten MT and Senja M, 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Technical manual, version 1.11, PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Sivakumar B, Jayawardena AW and Fernando KG, 2002. River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches. *Journal of Hydrology* 265: 11-24.
- Ying M, Feng Sh, Su D, Gao, G and Huo Z, 2010. Modeling water infiltration in a large layered Soil column with a modified Green-Ampt model and Hydrus-1D. *Computers and Electronics in Agriculture* 715: 540-547.
- Yu H, Hu KL, Wang H, Huang YF, Chen DL, Li BG and Li Y, 2011. Modeling of water and nitrogen utilization of layered soil profiles under a wheat-maize cropping system. *Mathematical and Computer Modeling* 58(3-4): 596-605