

The Effects of Dripper Installation Depth on Increasing the Maize Root Water Uptake Efficiency for Three Various Soil Textures

MASOUD SOLTANI^{1*}, HOSSEIN RABBANIHA², MOHADESE SADAT FAKHAR¹

1. Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Dec. 16, 2020- Revised: Jan. 29, 2021- Accepted: Feb. 3, 2021)

ABSTRACT

Sustainable agriculture at arid and semi-arid areas depends on optimized usage of fresh water resources. Evaporation from soil surface and deep percolation categorized as unuseful losses at irrigation, so their reduction could increase the root water uptake efficiency and yield production. Subsurface drip irrigation could provide this situation. Proper depth for installing dripper is the place that reduces soil surface evaporation and deep percolation. The objective of this study was to investigate the effects of various dripper installation depth on soil water content distribution and root water uptake and to choose the proper depth. For this purpose, HYDRUS-2D software was used to investigate the effect of three factors on non-beneficial losses and consumed water in drip irrigation, numerically. These factors were soil texture (loam, clay loam and sandy loam), installation depth (0, 10, 15 and 20 Cm) and dripper discharge (1, 2, 4 and 8 l.h⁻¹). The results showed, although increasing the installation depth could reduce cumulative evaporation up to 40%, but the best installation depth was 15 Cm with discharge rate of 1 l.h⁻¹, according to the amount of deep percolation and consumed water. The effect of soil texture was more than the effect of installation depth on the amount of irrigation water, so that the amount of irrigation water in 2 l.h⁻¹ discharge rate was 2.9, 3.1 and 4.6 m³.m⁻¹ for loam, clay loam and sandy loam soil texture, respectively. Also, for clay loam texture, dripper discharge had the highest effect on root water uptake and the installation depth had the lowest effect on soil surface evaporation.

Keywords: Subsurface Irrigation, Maximum Root Water Uptake, Optimum Installation Depth, Loam, Clay Loam and Sandy Loam.

تأثیر عمق کارگذاری قطره‌چکان بر افزایش راندمان جذب ریشه گیاه ذرت در سه نوع بافت خاک

مسعود سلطانی^{۱*}، حسین ربانی‌ها^۲، محدثه السادات فخارا^۱

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵)

چکیده

کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه خشک در گرو استفاده بهینه از منابع آبی با کیفیت بالا می‌باشد. تبخیر از سطح خاک و نفوذ عمقی از جمله تلفات غیرمفید در آبیاری هستند که کاهش آن‌ها می‌تواند راندمان جذب آب توسط ریشه و به تبع آن میزان تولید محصول را افزایش دهد. اجرای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دستیابی به این هدف را مقدور می‌سازد. عمق نصب بهینه قطره‌چکان در آبیاری زیرسطحی، مکانی است که نه تنها مقدار تبخیر از سطح خاک را کاهش می‌دهد، بلکه نفوذ عمقی نیز افزایش پیدا نکند. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات توزیع رطوبت خاک و جذب آب توسط ریشه در عمق‌های مختلف کارگذاری قطره‌چکان و انتخاب عمق ایده‌آل می‌باشد. برای این منظور با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار HYDRUS-2D، سه عامل موثر در میزان تلفات غیرمفید و آب مصرفی در آبیاری قطره‌ای شامل بافت خاک (لوم رسی، لوم و لوم شنی)، عمق کارگذاری قطره‌چکان (۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر) و دبی قطره‌چکان (۱، ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت) به صورت حل عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در بافت لوم شنی با افزایش عمق کارگذاری مقدار تبخیر جمعی تا ۴۰٪ می‌تواند کاهش پیدا کند ولی با توجه به مقدار نفوذ عمقی و آب مصرفی، بهترین عمق کارگذاری در ۱۵ سانتی متری و با دبی ۱ لیتر بر ساعت بدست آمد. تأثیر بافت خاک بر مقدار آب آبیاری بیشتر از تأثیر عمق نصب قطره‌چکان بود به طوری که در دبی ۲ لیتر بر ساعت مقدار آب آبیاری در سه بافت خاک لوم، لوم رسی و لوم شنی به ترتیب برابر با ۲/۹، ۳/۱ و ۴/۶ مترمکعب بر متر بود. همچنین در بافت لوم رسی تغییر دبی و عمق کارگذاری، بیشترین و کمترین تأثیر را به ترتیب بر روی مقدار جذب آب ریشه و تبخیر از سطح خاک داشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرسطحی، حداکثر جذب آب ریشه، عمق بهینه نصب، لوم، لوم رسی و لوم شنی.

مقدمه

سامانه‌ها، مستلزم آگاهی از الگوی توزیع آب در خاک می‌باشد. اگر الگوی توزیع رطوبت در خاک با الگوی توزیع ریشه مطابقت داشته باشد، نفوذ عمقی و تبخیر از سطح را به حداقل می‌رسد (Subbaiah, 2013). علاوه بر این الگوی خیس شدن به نوع بافت خاک و محل قرارگیری قطره‌چکان‌ها بستگی دارد. برای خاک‌های یکنواخت و همگن، الگوی خیس شدن زمانی که قطره‌چکان به ترتیب در سطح خاک یا در زیر سطح قرار داشته باشد، نیمه بیضوی یا بیضوی است. به طور کلی الگوی توزیع آب زیر قطره‌چکان در خاک ریز بافت به صورت نشت جانبی توسعه پیدا می‌کند به طوری که پیاز رطوبتی به حالت بیضی افقی شبیه می‌باشد. در بافت خاک متوسط به صورت بیضی قائم و در خاک با بافت سبک به صورت بیضی کشیده یا به اصطلاح به هویج رطوبتی شباهت دارد. الگوی جذب آب توسط ریشه گیاه به صورت ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ درصد فرض می‌شود که هر کدام مربوط به ۲۵ درصد عمق توسعه ریشه است (Hansen et al., 1980; Ayers

امروزه، به دلیل رشد جمعیت، تقاضای روزافزون به توسعه کشاورزی و نیاز آبی افزایش یافته است، در حالی که منابع آبی در دسترس نسبت به گذشته کمتر شده و تامین آن نیز سخت‌تر شده است. بر همین اساس، با توجه به اینکه بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب محسوب می‌شود، در صورت نبود راه کار مناسب و اثر بخش، جوامع کشاورزی با تنگناهای خاصی روبه‌رو خواهند شد (Pazira, 2012). استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار، همراه با مدیریت مناسب، سبب افزایش بهره‌وری آب در این مناطق می‌شود. آبیاری قطره‌ای اغلب به دلیل کارایی بالا در مصرف آب و کاهش تلفات ناشی از بادبردگی، تبخیر سطحی و نفوذ عمقی، نسبت به سایر روش‌های آبیاری ترجیح داده می‌شود (Rajput and Neelam, 2006). سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به طور فزاینده‌ای در مناطق خشک با منابع آبی محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. طراحی مناسب این

مدل‌های Kandelous and Simunek J (2010b). *et al.*, 2017). عددی، تحلیلی و تجربی پیش‌بینی الگوی خیس‌شدگی خاک را مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند که نتایج نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D از نتایج رضایت بخشی برخوردار بوده است همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل WetUp برای شبیه‌سازی مناسب نبوده و متوسط خطای آن به ۵۸/۱ سانتی‌متر می‌رسد. همینطور در پژوهشی Ghorbanian *et al.*, 2014 مدل SEEP/W و HYDRUS-2D را در برآورد پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مورد مقایسه قرار دادند که ابعاد جبهه رطوبتی در اطراف قطره‌چکان را برای دو دبی ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت انجام شد که نتایج مدل‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که مدل HYDRUS-2D با ضریب تبیین میانگین ۰/۷۹ و میانگین ریشه مربعات خطا کمتر در شبیه‌سازی، دارای عملکرد بهتری نسبت به SEEP/W بوده است. مدل HYDRUS و بسته نرم افزاری همراه با آن به صورت یک، دو و سه بعدی قابلیت شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و حرارت را در محیط متخلخل اشباع و غیر اشباع دارد. از این رو در پژوهش‌های بسیاری از مدل HYDRUS استفاده شده است (Simunek *et al.*, 2012). جهت انتخاب ابعاد و الگوی مناسب بین قطره‌چکان‌ها در آزمایشگاه آبیاری کشور مالزی پژوهشی را انجام دادند که در آن از دو نوع بافت خاک شنی و رسی استفاده شده است. آن‌ها یک مدل تجربی برای تخمین پیشروی و جبهه رطوبتی ایجاد کردند که نتایج حاصل از مدل با نتایج واقعی مقایسه شد و مدل پیشنهادی الگوی خیس‌شدگی از دقت و نتایج قابل قبولی برخوردار بود (Al-Ogaidi *et al.*, 2016). در تحقیقات بسیاری عملکرد مدل HYDRUS در شبیه‌سازی مرطوب‌شدگی ناحیه زیر آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی تأیید شده است (Kandelous and Simunek, 2010b; Cote *et al.*, 2003; Liga and Slack, 2004; Siyal and Skaggs, 2009). در تحقیقی انتقال املاح و رطوبت در ناحیه ریشه در خاک رسی با استفاده از مدل HYDRUS شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از مقایسه مدل‌سازی با مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد همبستگی خوبی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد (Kandelous and Simunek, 2010a). در پژوهشی دیگر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میزان رطوبت خاک در حوزه تحقیقاتی پانولا در تگزاس ایالات متحده را در اعماق مختلف بین سطح خاک و بستر خاک و در مکان‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D مقایسه کردند، نتایج نشان داد همبستگی زیادی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از نرم‌افزار وجود داشت Tromp-van Meerveld and McDonnell (2006). همچنین ارزیابی عملکرد

(and Westcot, 1985; Majumdar, 2001). در تحقیقی نشان داده شد که با تنظیم تناوب آبیاری می‌توان الگوی خیس شده اطراف محیط قطره چکان را کنترل کرد و با افزایش تناوب آبیاری، آب بیشتری به سمت سطح خاک حرکت می‌کند (Phene *et al.*, 1987). در تحقیقی Kilic (2018a) به منظور توصیف الگوی خیس‌شدگی به صورت تحلیلی و با استفاده از یک روش جدید، همزمان به صورت حالت سه بعدی انجام شد. در این فرآیند برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک که برای آبیاری مهم بودند تعیین شد، همچنین الگوی خیس‌شدگی و اجزای آن در زمان واقعی مشاهده شد و مقادیر آن با فواصل زمانی ۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. الگوی خیس‌شدگی مطابق با موقعیت مکانی و زمانی آن در خاک تحلیل شد و پارامترهای الگوی خیس‌شدگی به صورت تابعی از زمان توصیف شد. سپس مدل‌ها با داده‌های حاصل از آزمایش، برای نقاط مختلف زمانی در طول برنامه آبیاری اجرا شدند، مدل‌های سطح مقطع الگوی خیس‌شدگی و تغییر آن در بعد مکانی و زمانی را تخمین زدند و در نهایت مشخص شد که الگوی خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای را می‌توان با رویکرد سهمی‌درجه ۲، با دقت خوبی توصیف کرد (Kilic, 2018b). آزمایشات مزرعه‌ای برای تعیین مدیریت صحیح آبیاری لازم است، اما به دلیل محدودیت‌های اجرایی آزمایش‌های مزرعه‌ای، از جمله هزینه زیاد و زمان‌بر بودن، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی حرکت آب در خاک توصیه می‌شود. علاوه بر این، استفاده از مدل‌ها امکان بررسی سناریوهای مختلف و زیادی با ایجاد شرایط گوناگون فراهم می‌آورد. عملکرد مدل باید در شرایط مختلف ارزیابی شود و در صورت تأیید می‌توان از آن برای طراحی و مدیریت سامانه آبیاری استفاده کرد (Skaggs *et al.*, 2004). طراحی بهینه سامانه آبیاری قطره‌ای مستلزم آگاهی از الگوی توزیع آب در اطراف قطره‌چکان، نحوه توزیع ریشه گیاه و به حداقل رساندن خیس‌شدگی سطح خاک و نفوذ عمقی می‌باشد. (Cote *et al.*, 2003; Subbaiah, 2013). لذا با توجه به همین موارد پژوهش‌های مختلفی در زمینه‌های فیزیکی، آزمایشگاهی و مزرعه‌ای انجام شده، (Provenzano, 2007) در مزرعه‌ای الگوی خیس‌شدگی در اطراف قطره‌چکان را در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را با استفاده از مدل HYDRUS-2D ارزیابی نمود این پژوهش در خاک لوم‌شنی انجام شد و نتایج حاصل از آن نشان داد که در طول آبیاری این مدل به نحو مطلوبی فرآیند نفوذپذیری اطراف قطره‌چکان را شبیه‌سازی می‌کند. حرکت آب در خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد HYDRUS-2D برای بررسی پارامترهای طراحی و مدیریت سامانه آبیاری بهترین عملکرد را دارد (Cai *et al.*

در اطراف قطره‌چکان بکار رفته در آبیاری زیرسطحی بوده است. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی و بررسی عددی تاثیر دبی و عمق کارگذاری قطره‌چکان بر روی جذب آب، تبخیر از سطح خاک، نفوذ عمقی و مقدار آب آبیاری با استفاده از تکنیک آبیاری دقیق^۱ در مدل HYDRUS-2D است. همچنین تاثیر هر یک از عوامل، در سه بافت خاک مختلف مورد بررسی قرار گرفت، تا با مقایسه نتایج بدست آمده، عمق مناسب کارگذاری قطره‌چکان در هر یک از بافت‌های خاک مورد بررسی، براساس دبی آن تعیین گردد. هدف دیگر این تحقیق کاهش تعداد سناریوهایی است، که باید در آینده به‌صورت میدانی مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که اجرای میدانی تمام سناریوهای مورد بررسی در این تحقیق زمان‌بر و هزینه‌بردار است، نتایج این تحقیق کمک می‌کند تا فقط تعداد محدودی از آن‌ها به‌صورت میدانی، مورد ارزیابی قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق با استفاده از داده‌های تبخیر تعرق گیاه ذرت در منطقه قزوین و با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار HYDRUS-2D انجام شده است. عوامل مورد بررسی شامل سه نوع بافت خاک (لوم رسی، لوم و لوم شنی)، پنج عمق کارگذاری قطره‌چکان (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر) و چهار دبی (۱، ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت) می‌باشند. در مجموع ۶۰ سناریو مختلف اجرا و نتایج آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

استان قزوین درحوزه‌ی مرکزی ایران در مختصات بین ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۰ دقیقه‌ی طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه‌ی عرض شمالی قرار گرفته است. ارتفاع ۱۳۰۴ متر بالاتر از سطح دریا از نظر اقلیمی جزء مناطق نیمه خشک و خشک سرد قرار دارد (Hedayati Dezfuli and Kakavand, 2012). متوسط بارش سالانه آن ۳۱۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد است.

در این پژوهش برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه و جدا سازی تبخیر پتانسیل و تعرق پتانسیل از نرم افزار AquaCrop با به کارگیری داده‌های هواشناسی ۳۰ ساله ایستگاه سینوپتیک قزوین، استفاده شد. این نرم افزار یک مدل گیاهی است که مقادیر تبخیر و تعرق را با گام‌های زمانی مختلف اعم از روزانه و ماهانه محاسبه می‌کند (Steduto et al., 2009). نرم‌افزار Aqua Crop با استفاده از ضریب محصول پایه برای معرفی گیاه

مدل HYDRUS-3D را برای شبیه سازی رطوبت خاک در شرایط مزرعه‌ای در جنوب کشور فرانسه برای گیاه ذرت مورد بررسی قرار داده شده که نتایج حاصل از آن نشان دهنده عملکرد بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک بود (Honari et al., 2018).

در پژوهشی که برای بررسی توزیع رطوبت خاک در آبیاری سطحی و زیرسطحی برای گیاه پسته با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D انجام شد، نتایج نشان داد میزان جذب آب ریشه در آبیاری زیرسطحی به میزان قابل توجهی بیشتر از آبیاری سطحی است (Ataee et al., 2019). در تحقیقی دیگر در شهرستان شهریار استان تهران شبیه‌سازی جریان رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای را با نتایج حاصل از نرم‌افزار HYDRUS مقایسه کرد و نتایج نشان داد خروجی نرم‌افزار تطابق بالایی با داده‌های واقعی داشته است (Skaggs et al., 2004). در پژوهشی در کشور چین با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در خاکی از نوع لوم سیلتی تحت کشت گندم با سامانه آبیاری زیرسطحی با عمق ۲۵ سانتی-متر در چهار عمق مختلف و طی ۱۱۸۰ ساعت از شروع کشت و در شش نوبت آبیاری، انتقال رطوبت را به کمک مدل HYDRUS-2D در آزمایشگاه فیزیک خاک شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد مدل برای شبیه‌سازی در شرایط پژوهش، دقت کافی دارد و بر همین اساس، سناریوهایی را تحت شرایط خاک ناهمگن، آبیاری-های متوالی، نیاز تبخیری بالا و توزیع ثابت ریشه طی ۴۹ روز شبیه‌سازی نمودند. توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رطوبت تحت آبیاری زیرسطحی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای در عمق‌های مختلف خاک لوم رسی ارزیابی شد (Wang et al., 2013). عمق نصب قطره‌چکان زیرسطحی در مدل آزمایشگاهی ۳۰ سانتی‌متر و در مزرعه ۵، ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر بود. نتایج این پژوهش نشان داد مدل HYDRUS-2D توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی رطوبت قطره‌چکان زیرسطحی دارد و همین‌طور دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت در عمق‌های بیشتر کارگذاری، بالاتر بود (Kandelous and Simunek, 2010b). در پژوهشی با استفاده از HYDRUS-2D شبیه‌سازی الگوی توزیع آب برای بافت خاک لوم شنی در محصول گوجه‌فرنگی بررسی شد و نتایج نشان داد که دقت این مدل در شبیه‌سازی صورت گرفته بالا است (Badni et al., 2018). در تحقیقی (Saefuddin et al., 2019) آزمایشات میدانی را با استفاده از یک لوله قطره‌چکان حلقه‌ای شکل بر روی گیاهان گوجه‌فرنگی و توت‌فرنگی، آبیاری زیرسطحی انجام دادند نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از HYDRUS-2D نشان داد که این نرم‌افزار یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل حرکت آب

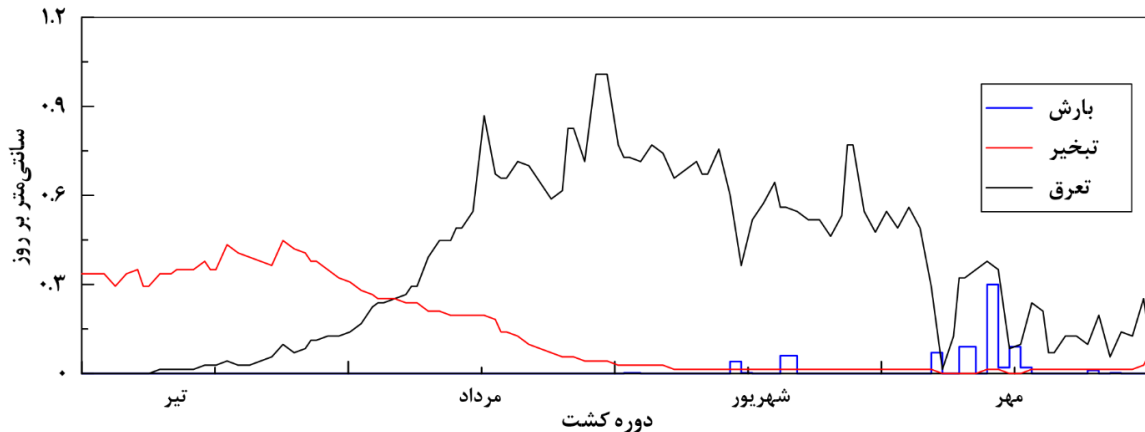
تبخیر تعرق مرجع از روش پنمن مانیتیت فائو و حاصل ضرب آن در مقادیر ضریب گیاهی پایه و ضریب تبخیر از خاک محاسبه می‌کند که عبارت آن به شرح زیر است (Steduto et al., 2009):

$$ET_c = (k_{cb} + k_e) ET_o \quad (\text{رابطه ۲})$$

(K_{cb}) و ضریب تبخیر آب خاک (K_e) تبخیر از سطح خاک را محاسبه می‌کند.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (\text{رابطه ۱})$$

Aqua Crop مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل را با محاسبه



شکل ۱- مقادیر بارش، تبخیر و تعرق در طول مدت شبیه‌سازی

مختصات مکانی $[L]$ ، t زمان $[T]$ ، K_{ij}^A مؤلفه‌های بی‌بعد تانسور غیرهمگنی K^A خاک و K هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک $[L.T^{-1}]$. S حجم آب تخلیه-تغذیه‌شده در واحد زمان از یک واحد حجم خاک است (Simunek et al., 2012).

منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شده در این پژوهش مدل ارائه شده توسط Van Genuchten (1980) است که یک رابطه تجربی بوده و به علت شکل ساده و کاربرد مؤثر آن در حل‌های عددی رایج‌ترین مدل رطوبتی خاک می‌باشد. همچنین مدل (Mualem, 1976) برای بیان تابع هدایت هیدرولیکی استفاده شده است:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^m)^m)^2 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن‌ها Se درجه مؤثر اشباع یا کاهش مقدار آب است $[L^3 / L^3]$ ، θ_r و θ_s حجم آب باقی‌مانده و اشباع هستند

، α یک پارامتر تجربی است $[L^{-1}]$ که رابطه معکوس با مقدار ورودی هوا دارد $[LT^{-1}]$. n و m ثابت‌های تجربی هستند که بر شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک تأثیر می‌گذارد $[-]$ که

نرم‌افزار HYDRUS-2D

نرم افزار شبیه‌ساز تحت ویندوز و پرتفردار برای تجزیه و تحلیل جریان آب، انتقال املاح و گرما در شرایط دو بعدی است و قادر به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح به روش مدل-سازی معکوس است. این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع در حالت افقی، عمودی و شعاعی است و در بسیاری از پژوهش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک، بهینه‌سازی و برآورد معکوس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن تاحدی رضایت بخش بوده است (Simunek et al., 2012).

مدل‌سازی جریان آب

در این پژوهش پیاز رطوبتی ایجاد شده توسط قطره‌چکان به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شد و برای تعیین میزان نفوذ عمقی، تبخیر از سطح خاک و جذب آب توسط ریشه، از نرم‌افزار HYDRUS-2D استفاده شد. در این مدل برای تخمین مقدار رطوبت برای یک خاک همگن و همروند از معادله ریچاردز استفاده می‌شود که معادله آندر صفحه xz در مختصات کارترتین به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_i} K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن: θ محتوای رطوبت حجمی $[L^3.L^{-3}]$ ، h ارتفاع معادل فشار $[L]$ ، S عبارت تخلیه یا تغذیه $[T^{-1}]$ ، X_i ($i=1,2,\dots$)

در این پژوهش سه نوع خاک لومرسی، لوم و لوم‌شنی مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین ضرایب معادله منحنی مشخصه رطوبتی هر سه بافت خاک از مقادیر پیش فرض نرم افزار HYDRUS در مدل ROSETTA استفاده گردید (جدول ۱).

مقدار m توسط $m = 1 - \frac{1}{n}$ محدود می‌شود، پارامتر (l) برای بسیاری از خاک‌ها حدود ۰/۵ است و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع است.

جدول ۱- پارامتر هیدرولیکی بافت‌های مختلف خاک بر اساس نتایج تخمین مدل ROSETTA

I	K_s	n	α	θ_s	θ_r	بافت خاک
(-)	($\text{cm}\cdot\text{day}^{-1}$)	(-)	(cm^{-1})	($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	
۰/۵	۶/۲۴	۱/۳۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱	۰/۰۹۵	لوم رسی
۰/۵	۲۴/۹۶	۱/۵۶	۰/۰۳۶	۰/۴۳	۰/۰۷۸	لوم
۰/۵	۱۰۶/۱	۱/۸۹	۰/۰۷۵	۰/۴۱	۰/۰۶۵	لوم شنی

که در آن h مکش خاک، h_1 مقدار مکش آستانه شروع جذب آب، h_2 مقدار مکش حد آستانه جذب پتانسیل، h_3 مقدار مکش حد آستانه کاهش جذب نسبت به پتانسیل و h_4 مقدار مکشی که جذب آب در آن متوقف می‌شود. ضرایب مربوط به گیاه ذرت با توجه به Wesseling (1991) انتخاب گردید (جدول ۲). عمق توسعه ریشه گیاه ۱ متر و عرض آن ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بیشترین شدت جذب آب نیز در ۶۰ سانتی‌متر اول ریشه لحاظ شد (شکل ۲) (Honari et al., 2018). همچنین فرض شده که زمین تحت کشت به صورت جوی و پشته و فاصله ردیف‌های کشت ۷۵ سانتی‌متر است که در این تحقیق نصف آن یعنی ۳۷/۵ سانتی‌متر شبیه‌سازی شد (شکل ۳). همچنین برای بررسی نفوذ عمقی، عمق خاک مورد شبیه‌سازی ۵۰ سانتی‌متر زیر ناحیه ریشه در نظر گرفته شد.

همچنین برای شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه از مدل Feddes et al., (1978) استفاده شد.

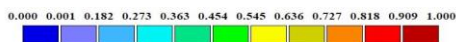
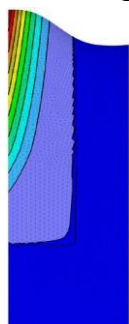
(رابطه ۷)
 $S(h) = \alpha(h)S_p$
 که در آن S_p مقدار جذب پتانسیل، α ضریب کاهش جذب به دلیل تغییرات مکش خاک و S مقدار جذب آب است. مقدار جذب آب با توجه به ضرایب هر گیاه به صورت شکل (۲) نشان داده می‌شود. ضریب کاهش جذب آب با توجه به رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h - h_4}{h_3 - h_4}, & h_3 > h > h_4 \\ 1 & h_2 \geq h \geq h_3 \\ \frac{h - h_1}{h_2 - h_1}, & h_1 > h > h_2 \\ 0, & h \leq h_4 \text{ or } h \geq h_1 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۸})$$

جدول ۲- ضرایب محاسبه ضریب کاهش جذب آب رابطه فوس برای گیاه ذرت

پارامتر	h_1	h_2	h_3	h_4
مقدار مکش (سانتی‌متر)	-۱۵	-۳۰	-۳۲۵ و -۶۰۰	-۸۰۰۰

به ۲۵۰- سانتی‌متر برسد آبیاری با مقدار فلاکسی که از قبل مشخص شده، شروع می‌شود و تا مدت زمان مشخص که یک پارامتر مدیریتی است ادامه می‌یابد.



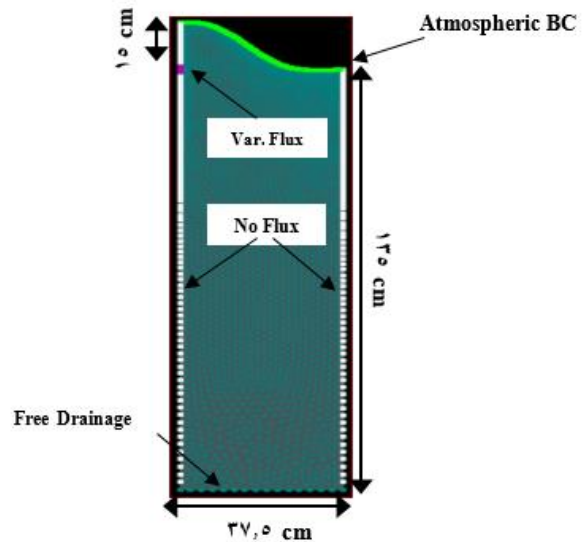
شکل ۲- توزیع ریشه ذرت و مقدار جذب آب از خاک در مدل HYDRUS-2D

شرایط اولیه و مرزی آبیاری با استفاده از تکنیک آبیاری دقیق، که در نرم‌افزار HYDRUS تحت عنوان Triggered Irrigation در دسترس است، انجام شد. در این روش، آبیاری بر اساس فشار آستانه در یک نقطه‌ی مشاهداتی که کاربر مشخص می‌کند، انجام می‌شود. برای اعمال آبیاری می‌توان از بار فشاری مثبت بر روی سطح خاک (مانند آبیاری کرتی) و یا نرخ آبیاری (مانند شدت آبیاری یا دبی قطره چکان) بهره گرفت. به منظور اعمال آبیاری با استفاده از قطره چکان و به میزان آب مورد نیاز گیاه، می‌توان از این تکنیک استفاده کرد. مقدار فشار آستانه برای شروع آبیاری بین مکش h_2 و h_3 در جدول (۲) و برابر با ۲۵۰- س.م. در نظر گرفته شد. در بیان دیگر، هنگامی که مقدار ماتریکس خاک در ناحیه ریشه

افزایش دبی قطره‌چکان، اثر مثبت کاهش تبخیر از سطح خاک کمتر شده است. در بافت خاک لوم رسی، افزایش عمق کارگذاری تأثیر معنی داری در کاهش تبخیر تجمعی از سطح خاک نداشت. اگرچه با افزایش عمق کارگذاری در تمام دبی‌های مورد بررسی، تبخیر تجمعی کاهش پیدا کرد (حدود ۱/۵٪) ولی برخلاف دو بافت خاک دیگر، افزایش دبی قطره‌چکان تأثیری بر روی کاهش آن نداشت. علت این موضوع وجود خلل و فرج ریز در بافت لوم رسی می‌باشد. خلل و فرج ریز در خاک به دلیل پتانسیل مکش بیشتر باعث افزایش سطح در جبهه رطوبتی خاک می‌گردد. در حقیقت در دو بافت خاک لوم و لوم شنی، افزایش دبی قطره‌چکان موجب نشت جانبی و افزایش سطح خیس‌شدگی شده بود ولی در بافت خاک لوم رسی، خلل و فرج ریز همان تأثیر را در جبهه رطوبتی دارد. به همین دلیل در خاک‌های ریز دانه، جبهه رطوبتی به شکل کشیده افقی یا به اصطلاح پیاز رطوبتی ولی در خاک با خلل و فرج درشت‌تر، جبهه رطوبتی به شکل کشیده عمودی یا به اصطلاح هویج رطوبتی به وجود می‌آید. بنابراین می‌توان اینطور بیان کرد که در بافت‌های خاک لوم‌شنی و لوم، افزایش عمق کارگذاری قطره‌چکان موجب کاهش تلفات تبخیر از سطح خاک می‌گردد ولی در بافت خاک لوم‌رسی نمی‌توان چنین انتظاری را داشت. در خاک‌های سنگین ارتفاع صعود مویبندی و تبع آن عمق لایه تبخیر نسبت به بافت خاک سبک و متوسط بیشتر است، بنابراین در بافت خاک لوم رسی افزایش عمق کارگذاری قطره‌چکان تأثیر بسزایی در کاهش تبخیر از سطح خاک نداشته و در تمام سناریوها، میزان تبخیر با نرخ ثابت و نزدیک به پتانسیل تبخیر از سطح خاک اتفاق افتاده است.

بررسی پارامتر نفوذ عمقی در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد، افزایش دبی قطره‌چکان در هر سه بافت خاک، منجر به افزایش نفوذ عمقی شده است. درحالی‌که افزایش عمق کارگذاری قطره‌چکان فقط در دو بافت خاک لوم و لوم رسی باعث افزایش نفوذ عمقی شده و در بافت خاک لوم شنی، نفوذ عمقی، تحت تأثیر عمق کارگذاری قطره‌چکان قرار نگرفته است. دلیل این موضوع، وجود خلل و فرج درشت در بافت خاک لوم شنی می‌باشد. جبهه رطوبتی در بافت خاک لوم شنی به صورت کشیده عمودی می‌باشد، به همین دلیل افزایش عمق کارگذاری قطره‌چکان، اگرچه در دبی‌های کم (۱ و ۲ لیتر بر ساعت) باعث افزایش محدود در نفوذ عمقی شده است ولی در دبی‌های بالا (۴ و ۸ لیتر بر ساعت) هیچ تأثیری بر روی نفوذ عمقی نداشت است. در واقع در خاک لوم شنی، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به مراتب بیشتر از دو بافت خاک دیگر است. استفاده از قطره‌چکان‌هایی با دبی بالا در این شرایط، منجر به نفوذ عمقی زیاد می‌شود حتی

دبی‌های مورد بررسی شامل ۱، ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت بودند و عمق‌های مختلف کارگذاری قطره‌چکان شامل ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. شرایط مرزی منتخب در مرز پایین معادل زهکشی آزاد، مرز بالا یا سطح خاک معادل اتمسفریک (برای اعمال تبخیر، تفرق و بارش) و فلاکس متغیر، برای آبیاری دقیق به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شد.



شکل ۳- شرایط مرزی در یکی از سناریوها (عمق ۱۵ سانتی‌متر)

نتایج و بحث

برای تعیین عمق مناسب کارگذاری قطره‌چکان بر اساس مقادیر تبخیر از سطح خاک، نفوذ عمقی، مقدار آب مصرفی و نسبت آب جذب شده به جذب پتانسیل، ۶۰ سناریوی مختلف اجرا و مورد بررسی قرار گرفت. سناریوها شامل سه پارامتر عمق کارگذاری (۴ سطح)، دبی قطره‌چکان (۴ سطح) و بافت خاک (۳ سطح) بودند. به طور کلی نتایج نشان داد، افزایش عمق کارگذاری قطره‌چکان باعث کاهش تبخیر تجمعی از سطح خاک در تمام دبی‌ها می‌شود. با افزایش دبی قطره‌چکان، اثر مثبت افزایش عمق کارگذاری بر روی کاهش تبخیر از سطح خاک، کمتر شده است. دلیل این موضوع افزایش سطح خیس‌شدگی در دبی‌های بالاتر می‌باشد. در واقع با افزایش دبی قطره‌چکان، جبهه رطوبتی به صورت نشت جانبی، افزایش سطح داشته و همین موضوع باعث افزایش تبخیر از سطح خاک می‌گردد. به طوری‌که در بافت لوم شنی افزایش عمق کارگذاری از سطح خاک به عمق ۲۰ سانتی‌متری، باعث کاهش ۴۰٪ تبخیر تجمعی برای قطره‌چکان با دبی ۱ لیتر بر ساعت شده است. در حالی‌که برای قطره‌چکان با دبی ۸ لیتر بر ساعت، این مقدار ۱۴٪ بوده است. همچنین در بافت خاک لوم، این مقدار برای قطره‌چکان با دبی ۱ و ۸ لیتر بر ساعت به ترتیب برابر با ۱۵٪ و ۷٪ بدست آمد. در واقع در بافت خاک لوم نیز با

اگر قطره چکان را در سطح خاک قرار دهیم.

مقایسه نتایج مقدار آب مصرفی و نسبت جذب آب به جذب پتانسیل نشان می‌دهد، به‌طور کلی افزایش دبی قطره چکان منجر به افزایش آب مصرفی و کاهش جذب آب نسبت به جذب پتانسیل، در هر سه بافت خاک می‌شود. افزایش عمق کارگذاری قطره چکان در بافت خاک لوم رسی منجر به کاهش مصرف آب شده ولی در دو بافت خاک دیگر تأثیر معنی‌داری نداشت. از طرف دیگر در بافت لوم رسی با افزایش دبی قطره چکان، نسبت جذب آب به جذب پتانسیل به شدت کاهش پیدا می‌کند. در واقع بافت لوم رسی نسبت به دو بافت دیگر بیشتر تحت تأثیر افزایش دبی قطره چکان قرار می‌گیرد و دبی‌های بالا باعث افزایش نفوذ عمقی و آب مصرفی شده، در حالی که نسبت آب جذب شده به پتانسیل جذب نیز کاهش پیدا کرده است. بنابراین در بافت خاک لوم رسی استفاده از قطره چکان‌هایی با دبی پایین‌تر ولی ساعات کارکرد بیشتر توصیه می‌گردد.

بیشترین نسبت آب جذب شده در دبی ۱ لیتر بر ساعت و سطح خاک اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار نسبت جذب $0/962$ و کمترین آن $0/606$ به ترتیب در دبی و عمق ۱ لیتر بر ساعت در سطح خاک، و ۸ لیتر بر ساعت در عمق ۲۰ سانتی‌متر تعیین گردید. دلیل پایین بودن نسبت آب جذب شده به جذب پتانسیل در بافت خاک لوم رسی در دبی ۸ لیتر بر ساعت، بالا بودن مقدار فشار آب در خاک نسبت به دو بافت دیگر است. همان‌طور که در جدول (۲) بیان شد، ریشه گیاه ذرت در مکش‌های نزدیک به صفر (رطوبت بالا) جذب کمتری دارد. در شرایط یکسان از نظر رطوبتی، خاک لوم رسی مقدار فشار آب بالاتری نسبت به دو بافت خاک دیگر دارد، همین موضوع باعث کاهش جذب آب توسط ریشه گیاه در دبی‌های بالا می‌شود.

در هر دبی نیز با توجه به شکل (۴) می‌توان بیان کرد نفوذ عمقی روند افزایشی داشته ولی آب مصرفی روند یکسانی نداشته است. بیشترین مقدار نفوذ عمقی مربوط به دبی ۸ لیتر بر ساعت در عمق ۲۰ و ۱۵ سانتی‌متر و کمترین مقدار، در دبی ۱ لیتر بر ساعت و حالتی که قطره چکان روی سطح خاک باشد، اتفاق افتاده است.

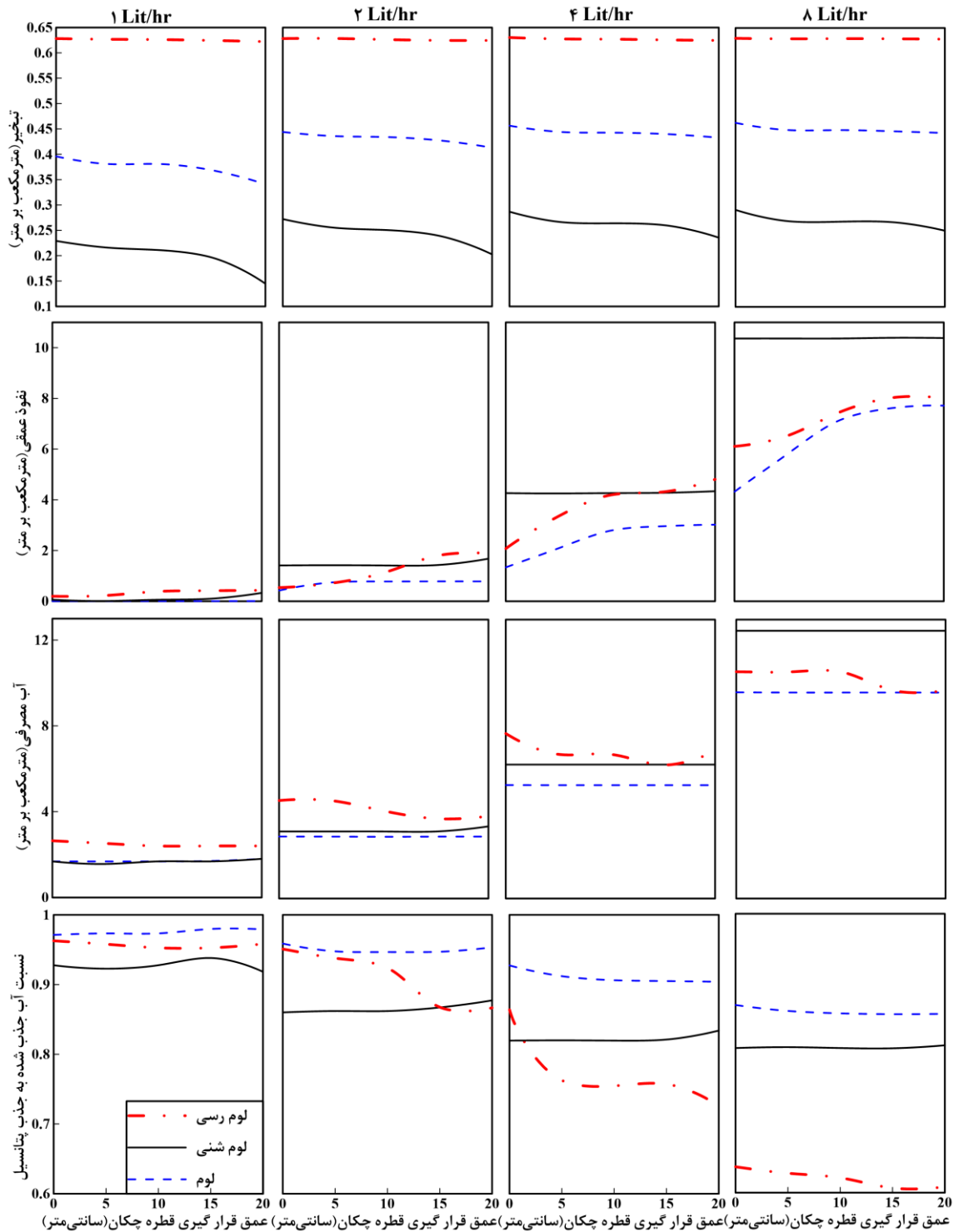
در بافت لوم که منافذ بزرگتری نسبت به بافت لوم رسی دارد، روند تغییرات متفاوت است. در سناریوهای بررسی شده با افزایش دبی، تبخیر از سطح خاک افزایش یافته است. بیشترین مقدار تبخیر جمعی در دبی ۸ لیتر بر ساعت و در حالتی که قطره چکان روی سطح خاک قرار دارد و کمترین مقدار تبخیر جمعی

در دبی ۱ لیتر بر ساعت و در عمق ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با $0/46$ و $0/34$ مترمکعب در واحد عرض اتفاق افتاده است. در یک دبی مشخص نیز بر خلاف بافت لوم رسی، مقدار تبخیر یکسان نیست و با افزایش عمق کارگذاری قطره چکان تبخیر کاهش پیدا کرده است.

نسبت جذب آب واقعی به تعرق پتانسیل، با افزایش دبی در بافت لوم کاهش یافته است (شکل ۴). بیشترین نسبت جذب آب در دبی ۱ لیتر بر ساعت در عمق‌های ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و کمترین مقدار آن در دبی ۸ لیتر بر ساعت و عمق‌های ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۹۸ و ۸۶ درصد می‌باشد. مقدار آب مصرفی با افزایش دبی افزایش یافته است چرا که در هر بار آبیاری، مقدار آب بیشتری داده می‌شود. از طرفی در هر دبی با افزایش عمق کارگذاری قطره چکان، مقدار آب آبیاری تغییری نکرده است. فقط در دبی ۱ لیتر بر ساعت، با افزایش عمق از ۱۰ به ۲۰ سانتی‌متر، مقدار آب آبیاری ۷ درصد افزایش یافته است. نفوذ عمقی محاسبه شده توسط نرم‌افزار در بافت لوم، با افزایش دبی و عمق، در دبی‌های ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت افزایش یافته است ولی در دبی ۱ لیتر بر ساعت، چون مقدار آب ورودی کم است، تغییر عمق، باعث افزایش یا کاهش نفوذ عمقی نشده است. بیشترین نفوذ عمقی در دبی ۸ لیتر بر ساعت و عمق ۲۰ سانتی‌متر اتفاق افتاده است.

نفوذ عمقی و آب مصرفی با افزایش دبی، زیاد شده ولی عمق کارگذاری قطره چکان، تأثیر زیادی نداشته است. نرخ تغییرات آب مصرفی نسبت به عمق با افزایش دبی کاهش یافته است، به طوری که در دبی یک لیتر بر ساعت با افزایش عمق کارگذاری قطره چکان، $13/33\%$ آب مصرفی افزایش یافته که این مقدار در دبی ۲، ۴ و ۸ به ترتیب ۷ و $0/03$ و صفر درصد می‌باشد.

تغییرات جذب آب، مشابه دو بافت دیگر است و با افزایش دبی کاهش یافته است. بیشترین مقدار نسبت جذب آب در دبی یک لیتر بر ساعت و عمق ۱۵ سانتی‌متر و کمترین آن در دبی ۸ لیتر بر ساعت و عمق ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۹۴ و ۸۱ درصد جذب پتانسیل است. تبخیر جمعی نیز در بافت لوم‌شنی با دبی رابطه مستقیم و با عمق رابطه عکس دارد. بیشترین مقدار تبخیر در دبی ۸ لیتر بر ساعت و حالتی که قطره چکان روی سطح خاک قرار بگیرد و کمترین مقدار آن، در دبی ۱ لیتر بر ساعت و عمق ۲۰ سانتی‌متر بدست آمد.



شکل ۴- نتایج حاصل از مدل سازی در اعماق و دبی های مختلف در بافت های لومرسی، لوم و لوم شنی

عمق کارگذاری قطره چکان تأثیر معناداری بر روی کاهش تبخیر از سطح خاک ندارد، در حالی که در دو بافت دیگر مقدار تلفات تبخیر به طور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده است. کمترین مقدار تغییرات در آب جذب شده مربوط به بافت لوم، برابر با ۱۲ درصد است و در بافت لومرسی و لوم شنی به ترتیب ۳۷ و ۱۴ درصد است. بافت لوم به دلیل این که نسبت به دو بافت دیگر ترکیب میانه ای از خلل و فرج ریز و درشت را دارد، نسبت به

واکنش تبخیر به افزایش عمق در بافت های مختلف به دلیل اندازه منافذ و نیروی موئینه متفاوت است به طوری که در بافت لوم شنی و لوم با افزایش اندازه منافذ، جریان رو به بالا کاهش و به تبع آن با افزایش عمق کارگذاری، مقدار تبخیر نیز کاهش می یابد. در بافت لوم شنی بین حداقل و حداکثر تبخیر ۵۰ درصد و در بافت لوم ۲۶ درصد اختلاف وجود دارد که این مقدار در بافت لومرسی تنها ۲ درصد است. در واقع در بافت لومرسی، افزایش

کرمان، دو عمق ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر آزمایش گردید و عمق ۳۰ سانتی‌متر به عنوان عمق بهینه در بافت لوم گزارش گردید (Afshar jahanshahi et al., 2013). دلیل تفاوت در نتایج پژوهش‌ها این است که عوامل زیادی مانند نوع محصول، نرخ تبخیر پتانسیل، دبی قطره چکان و عوامل دیگر بر روی عمق بهینه نصب تاثیر گذار می‌باشند.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عمق کارگذاری قطره‌چکان با دبی‌های مختلف و در سه بافت خاک لوم رسی، لوم و لوم شنی، نشان داد به طور کلی در خاک با بافت سنگین‌تر عمیق‌تر کردن محل قطره‌چکان تاثیری بر روی کاهش تبخیر از سطح خاک نداشت. در حالی که در دو بافت خاک لوم و لوم شنی عمیق‌تر کردن محل قطره‌چکان باعث کاهش تبخیر از سطح خاک می‌گردد که مقدار آن در بافت لوم شنی تا ۱۷ درصد کاهش تبخیر از سطح خاک بود. نسبت آب جذب شده به پتانسیل آب جذب شده توسط ریشه گیاه ذرت، با افزایش دبی قطره‌چکان، کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر بیشترین میزان جذب آب توسط ریشه در قطره‌چکان‌های با دبی کم بدست آمد. همچنین با افزایش دبی قطره‌چکان، عمیق‌تر کردن محل نصب باعث کاهش بیشتر جذب آب می‌گردد. در واقع این طور می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در دبی‌های زیاد، نباید عمق کارگذاری را عمیق‌تر کرد. حساسیت نفوذ عمقی به عمق کارگذاری قطره‌چکان در دبی‌های مختلف، با سنگین شدن خاک افزایش می‌یابد. به بیان دیگر در بافت لوم‌رسی عامل حساس و اثر گذار که نقش مهمی در مدیریت و تصمیم‌گیری سیستم آبیاری دارد، مقدار جذب آب و نفوذ عمقی است که در دبی و عمق‌های مختلف تغییرات قابل توجه دارند. در بافت لومی و لوم‌شنی نفوذ عمقی، تبخیر و نسبت جذب آب بیشترین تغییرات نسبت به شرایط مختلف را از خود نشان دادند. با توجه به نتایج این پژوهش توصیه می‌گردد در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، عمق کارگذاری قطره‌چکان با در نظر گرفتن مدیریت مناسب در بکارگیری محل قطره‌چکان، زمان آبیاری و با توجه به نوع خاک لحاظ گردد. این امر می‌تواند صرفه-جویی قابل ملاحظه‌ای در مصرف آب داشته باشد، خصوصاً در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند و کمک اقتصادی شایانی برای کشاورزان داشته باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Afshar jahanshahi, M., zareabyaneh, H., Naghavi, H., Eslami, A. (2013). Assessment of influence of installation depth of emitter with same discharges

تغییرات دبی و عمق قطره چکان حساسیت کمتری نشان داده است.

به طور کلی می‌توان این گونه اظهار کرد که عملکرد سیستم آبیاری در حالتی مطلوب است، که میزان آب آبیاری، نفوذ عمقی و مقدار تبخیر به حداقل و میزان آب جذب شده توسط ریشه به مقدار پتانسیل جذب آب نزدیک باشد. مقایسه تیمارهای مختلف در این تحقیق نشان داد که در خاک با بافت سنگین‌تر، مقدار تغییرات تبخیر به واسطه تغییر عمق و دبی کمتر می‌شود به طوری که در بافت‌های لوم‌شنی، لوم و لوم‌رسی به ترتیب ۵۰، ۲۶ و ۲ درصد اختلاف، بین مقدار بیشینه و کمینه تبخیر وجود دارد. همچنین در بافت لوم و لوم‌شنی با افزایش عمق مقدار تبخیر کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش عمق از ۱۵ به ۲۰ سانتی‌متر، ۶ و ۱۷/۵ درصد به ترتیب در بافت‌های لوم و لوم‌شنی مقدار تبخیر کاهش می‌یابد. مقدار آب جذب شده در بافت لوم کمترین حساسیت به تغییرات عمق و دبی را نشان داد که به علت اندازه منافذ متوسط آن نسبت به دو بافت لوم‌رسی و لوم‌شنی است. در بافت لوم‌رسی در دبی ۱ لیتر بر ساعت نسبت آب جذب شده نسبت به تغییرات عمق، تغییر چندانی نداشته ولی مقدار جذب آب در حالتی که قطره چکان روی سطح خاک است نسبت به جذب آب در حالتی که در عمق ۲۰ سانتی‌متر قرار دارد، برای دبی‌های ۲ و ۴ لیتر بر ساعت، به ترتیب ۹ و ۱۴ درصد کاهش یافت.

بررسی و مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات مشابه انجام شده توسط (Moradi Kashkooli et al., 2016) که عمق بهینه نصب قطره‌چکان را در آبیاری انگور مورد بررسی قرار دادند، مطابقت داشت. نتایج آن‌ها نشان دارد در خاک لوم شنی عمق بهینه نصب از نظر توزیع املاح در حدود ۲۵ سانتی‌متری از سطح خاک قرار دارد. همچنین در پژوهشی دیگر (Nazari et al., 2020) دریافتند که حدود ۸۱٪ جذب آب ریشه در عمق ۵۰-۰ سانتی-متری اتفاق می‌افتد که با نتایج بدست آمده از این پژوهش نیز مطابقت دارد. در پژوهش دیگری (Arbat et al., 2020) عمق نصب بهینه در سه نوع بافت خاک لوم‌شنی، لوم و رس سیلتی برای محصول برنج ۱۵ سانتی‌متر عنوان شد که در این عمق مقدار جذب آب بیشینه و نفوذ عمقی حداقل می‌شود. همچنین پژوهش دیگری عمق نصب بهینه قطره چکان در بافت لوم‌شنی را ۲۰ سانتی‌متر بیان نمود (Ghazouani et al., 2015). در تحقیقی دیگر بر روی عمق نصب بهینه در مرکز تحقیقات کشاورزی

on moisture distribution in subsurface drip irrigation system and simulation with HYDRUS-2D model. *Irrigation and Water Engineering*.

- 3(2), 101-113.
- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Rowshon, M. K., & Abdullah, A. F. (2016). Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176, 203-213.
- Arbat, G., Cuff, S., Duran-Ros, M., Pinsach, J., Puig-Bargués, J., Pujol, J., & Ramírez de Cartagena, F. (2020). Modeling Approaches for Determining Dripline Depth and Irrigation Frequency of Subsurface Drip Irrigated Rice on Different Soil Textures. *Water*, 12(6), 1724.
- Ataee, A., Neyshaboori, M., Akbari, M., Zare hagh, D. and Onnabi Milani, A. (2019). Evaluation of HYDROUS-2D Model for Determination of Soil Moisture Distribution under Surface and Sub-Surface Drip Irrigation of Pistachio Trees. *Water Research in Agriculture*, 32(4), 581 - 595.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture. Irrigation and drainage paper No. 29, FAO, Rome.
- Badni, N., Hamoudi, S., Alazba, P., and Elnesr, M.N. (2018). Simulations of Soil Moisture Distribution Patterns Between Two Simultaneously-Working Surface Drippers Using Hydrus-2D/3D Model. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(2), 586-595.
- Cai, Y., Wu, P., Zhang, L., Zhu, D., Chen, J., Wu, S and Zhaoa, X. (2017). Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. *Agric. Water Manag.* 192: 244–256.
- Cote, C.M., Birstow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J and Thorburn, P.J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22 (3–4): 143–156.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). *Water uptake by plant roots. Simulation of field water use and crop yield.* 16-30. New York: Wiley
- Ghorbanian, M, Monjezi, M.S, Ebrahimian, H, Liaghat. (2014). Evaluation of HYDRUS-2D and SEEP/W Models to Estimate Wetting Front for Surface and Subsurface Gravity Drip Irrigation. *Jornal of water and Soil.* Vol.28, No. 1, 179-189.
- Ghazouani, H., M'hamdi, B. D., Autovino, D., Haj, A. M. B., Rallo, G., Provenzano, G., & Boujelben, A. (2015). Optimizing subsurface dripline installation depth with Hydrus 2D/3D to improve irrigation water use efficiency in the central Tunisia. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 6(4), 402.
- Hansen, V.E., Israelsen, O.W. and Stringham, G.E. (1980) *Irrigation principles and practices*, (4th ed.). New York: Wiley.
- Hedayati Dezfuli, A. and Kakavand, R. (2012). Climatic zoning of Qazvin province. *Newar Magazine*, 36(76), pp. 66-59. (In Farsi)
- Honari, M. Ashrafzadeh, A. Khaledian, M. Vazifedoust, M. and Mailhol, J.C. (2018). Comparison of HYDRUS-3D Soil Moisture Simulations of Subsurface Drip Irrigation with Experimental Observations in the South of France. *Irrigation and Drainage Engineering*, 143(7), pp. 04017014 (1-8).
- Kandelous, M. and Simunek, J. (2010a). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97(7), 1070-1076.
- Kandelous, M. M., & Šimůnek, J. (2010b). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435-444.
- Kilic, M., (2018a). Analytical description of the wetting pattern in a drip irrigation system by a new method, simultaneous double parabola design. I: method. In: 1st International Congress on Agricultural Structures and Irrigation. Antalya, Turkey. pp. 365–375.
- Kilic, M., (2018b). Analytical description of the wetting pattern in a drip irrigation system by a new method, simultaneous double parabola design. II: application. In: 1st International Congress on Agricultural Structures and Irrigation. Antalya, Turkey. pp. 376–385.
- Liga, M., and Slack, D. (2004). A design model for subsurface drip irrigation in Arizona. Dep Agri Biosys, Arizona from <http://wsp.arizona.edu/sites/wsp.arizona.edu/files/uawater/documents/Fellowship200304/liga.pdf>
- Majumdar, D. K. (2001). *Irrigation water management: principles and practice.* PHI Learning Pvt. Ltd.
- Moradi Kashkooli, S., Hashemi, S., Khashei suiki, A., Shahidi, A. (2016). Simulation of movement of water and solutes in soil by HYDRUS model to determine the suitable depth of dripper. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(1), 94-103.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3), 513–522.
- Nazari, A., Besharat, S., Zaynalzadeh, K. and Mohammadi, A. (2020). Measurement and simulation of water flow and root uptake in soil under apple drip subsurface irrigation system. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage.* 13(6), 1819-1806. (In Farsi)
- Pazira, A. (2012). Conservation of physical resources for agriculture production, soil and water. *National Committee of Irrigation and Drainage.* 268p. (In Farsi)
- Phene, C.J., Davis, K.R., Hutmacher, R.B. and McCormick, R.L. (1987). Advantages of subsurface drip irrigation for processing tomatoes. *Acta Horti.* 200,101–113.
- Provenzano, G. (2007). Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133: 342–349. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(342).
- Rajput, T.B.S., and Neelam, P. (2006). Water and nitrate movement in drip-irrigation onion under fertigation and irrigation treatments. *Agricultural Water Management*, 79, 293-311. www.SID.ir

- Saefuddin, R., Saito, H and Simunek, J. (2019). Experimental and numerical evaluation of a ring shaped emitter for subsurface irrigation, *Agric. Water Manag.* 211: 111-122.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T., & 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*.
- 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, 669–677.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J. and Shouse, P.J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J Irrig Drain Eng* 130,304–310.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water. *I. Concepts. Agron. J*, 101,426–437.
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrig. Sci.*31(3):225-258. Doi:10,1007/s-00271-011-0309x.
- Tromp-van Meerveld, H.J.; McDonnell, J.J. (2006). On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. *Adv. Water Resour*, 29, 293–310. [CrossRef]
- Van Genuchten M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc Am J*, 44, 892–898
- Wang, J., Gong, S., Xu, D., Juan, S., and Mu, J. (2013). Numerical simulations and validation of water flow and heat transport in a subsurface drip irrigation system using hdrus-2D., *Irrigation and Drainage*, 62: 97-106.
- Wesseling, J.G. (1991). Meerjarige simulaties van grondwateronttrekking voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen en gewassen met het model SWATRE. Wageningen: Winand Staring Centre. SC-DLO report. 152:40.