

بررسی تاثیر دو عمق نصب قطره چکان با دبی های یکسان بر توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره ای زیر سطحی و شبیه سازی آن با مدل HYDRUS-2D

مسعود افشار جهانشاهی^۱، حمید زارع ایبانه^{۲*}، هرمزد نقوی^۳، امیر اسلامی^۴

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول

تاریخ دریافت: ۱۴/۰۱/۹۱

تاریخ پذیرش: ۲۵/۰۷/۹۱

چکیده

آبیاری قطره ای زیر سطحی امروزه به عنوان یکی از مهم ترین و پیشرفته ترین روش های آبیاری در کشاورزی مطرح است. در آبیاری قطره ای زیر سطحی آب در حجم و فشار کم در اختیار گیاه قرار می گیرد و آب توسط نیروی ماتریک خاک جابجا می شود. همین عوامل موجب کاهش تلفات و در نتیجه بالا رفتن کارایی مصرف آب می شوند. البته باید توجه داشت عدم توجه به طراحی صحیح و مدیریت نامناسب این گونه سیستم های آبیاری، موجب کاهش راندمان کاربرد آب در آنها می شود. به منظور بررسی توزیع رطوبت و تعیین عمق نصب بهینه در سیستم آبیاری قطره ای زیر سطحی طرحی با قطره چکانی با دبی دو لیتر بر ساعت، دو عمق کارگذاری لوله ها (۳۰ و ۴۵ سانتی متر) و چهار لایه عمقی قرائت رطوبت (۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی متر) در یک خاک زراعی در مرکز تحقیقات کشاورزی کرمان انجام گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی رطوبت توسط مدل HYDRUS-2D، با نتایج حاصل از آزمایشات صحرائی مقایسه گردید. برای عمق نصب ۳۰ سانتی متر میانگین مقادیر میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۰۰۶۵ و ۰/۹۹۲ به دست آمد. برای عمق نصب ۴۵ سانتی متر نیز میانگین مقدار RMSE، ۰/۰۰۸۵ و ضریب همبستگی، ۰/۹۷۷ به دست آمد، که توانایی بالای مدل را در شبیه سازی توزیع رطوبت در سیستم آبیاری قطره ای زیر سطحی نشان می داد. مقایسه ضریب همبستگی هر دو عمق در قالب مدل خطی برازش یافته در هر دو حالت نیز بیان گر دقت برآوردهای بالاتر عمق نصب ۳۰ سانتی متر نسبت به ۴۵ سانتی متر بود. همچنین عمق نصب ۳۰ سانتی متری به عنوان عمق نصب بهینه انتخاب گردید.

واژه های کلیدی: آبیاری قطره ای زیر سطحی، پیاز رطوبتی، شبیه سازی، مدل HYDRUS-2D.

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان، masoudafshar6568@yahoo.com
^۲ دانشیار رشته آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۰۹۱۸۸۱۸۳۴۴۱ (* نویسنده مسئول - zareabyaneh@gmail.com)
^۳ عضو هیات علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان
^۴ عضو هیات علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان

مقدمه

سیستم‌های آبیاری زیرسطحی به خاطر قرار ندادن آب در معرض تبخیر و رساندن مستقیم آن به منطقه توسعه ریشه‌های گیاه صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در میزان آب مصرفی داشته و موجب افزایش راندمان آبیاری می‌گردند (دستورانی و همکاران، ۱۳۸۷). بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد این روش آبیاری به دلیل دسترسی سریع‌تر ریشه به آب و مواد غذایی از مزایای قابل توجهی برخوردار است (سیاری و همکاران، ۱۳۸۶). با این حال اگر این سیستم به‌خوبی طراحی و مدیریت نشود نه تنها موجب افزایش راندمان کاربرد آب نمی‌گردد، بلکه ممکن است تلفات آب و اتلاف سرمایه را در پی داشته باشد. برای رسیدن به این هدف آگاهی از الگوی توزیع رطوبت در خاک‌های مختلف و تعیین عمق بهینه نصب لوله‌های آبد از ضروریات طراحی صحیح این نوع روش آبیاری است. شناخت و توصیف الگوی توزیع زمانی و مکانی رطوبت در سطح مزرعه بسیار دشوار و نیازمند استفاده از ابزارهای جدید است. یکی از آسان‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های تعیین ابعاد جبهه رطوبتی و الگوی توزیع رطوبت در خاک، استفاده از مدل‌های تحلیلی، تجربی و عددی شبیه‌سازی می‌باشد. مدل Hydrus-2D یکی از مدل‌های توانمند در امر شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما می‌باشد که بر پایه حل عددی معادله ریچاردز عمل می‌کند (اژدری، ۱۳۸۷). این مدل در سال ۱۹۹۸ توسط آزمایشگاه شوری خاک آمریکا^۱ ارائه گردید و تاکنون نسخه‌های اصلاحی آن در قالب مدل Hydrus یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در اختیار محققین قرار گرفته است (اژدری، ۱۳۸۷). سیمونک و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده از داده‌های مشاهداتی جریان آب و املاح نشان دادند که مدل Hydrus-2D توصیف خوبی از داده‌ها دارد. در تحقیقی دیگر تاثیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از یک منبع خطی بر خصوصیات دینامیکی خاک توسط المالگو و دیامانتوپولوس (۲۰۰۹) با مدل Hydrus-2D بررسی و شبیه‌سازی گردید. نتایج آنان تاییدی بر کارایی روش آبیاری زیرسطحی در کاهش تبخیر از سطح خاک و

سهولت دسترسی ریشه به رطوبت بود. توانایی مدل Hydrus-2D در شبیه‌سازی رطوبت جابجا شده و آبشویی نیترات خاک در مطالعه سیلوا و همکاران (۲۰۰۵) بررسی شد. نتایج مطالعه آنان موید آن بود که مدل فوق به‌خوبی ارتباط بین آبشویی نیترات با خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها در کاربری‌های متفاوت را تفسیر می‌نماید. در پژوهش انجام شده توسط هانسن و همکاران (۲۰۰۶) کارایی مدل Hydrus-2D در یک سیستم کود-آبیاری قطره‌ای آمونیوم - اوره- نیترات مورد بررسی قرار گرفت. گزارش آنان حاکی از توانایی بالای شبیه‌سازی مدل در بحث حرکت نیتروژن و نیترات در انواع سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی برای انواع خاک‌ها بود. گزارش‌های جدیدتر نیز حاکی از مناسب بودن نتایج شبیه‌سازی حرکت رطوبت در خاک تحت آبیاری با یک سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با مدل Hydrus-2D است (ملایی کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰). در گزارش پاتل و راجپوت (۲۰۰۸) توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در یک مزرعه پیاز در هندوستان توسط مدل Hydrus-2D شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل Hydrus-2D می‌تواند برای طراحی یک سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با بهترین راندمان کاربرد آب و کمترین میزان زه‌آب استفاده شود. برخی محققین مدل Hydrus-2D را در شرایط اشباع نیز به کار گرفته‌اند. در این راستا در تحقیق صورت گرفته توسط اسپگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ میزان نفوذ و مقدار جریان عمقی آب در یک خاک شیب‌دار اشباع مدل‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. آنان در گزارش خود به توانمندی مدل Hydrus-2D در شبیه‌سازی حرکت آب در شرایط اشباع ادعان نمودند. قابلیت مدل Hydrus-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در مزرعه گیاه ترب تحت سیستم آبیاری قطره‌ای نشان داد که تکرار آبیاری ۴۸ ساعته می‌تواند میزان رطوبت ناحیه ریشه را در حد ظرفیت مزرعه حفظ و جریان عمودی را کند نماید (اژدری، ۱۳۸۷). نتایج تحقیق میل‌هول و همکاران (۲۰۱۱) در برآورد میزان تبخیر و تفرق واقعی گیاه و پیش‌بینی محصول ذرت تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی توسط دو مدل Hydrus-2D و مدل پابلوت گیاهی (CMP) نشان داد که Hydrus-2D تخمین کمتری از

¹ US salinity laboratory

برای ایجاد فشار لازم برای عملیات آبیاری در ابتدای خط اصلی فشار ۲ اتمسفر از طریق لوله آب شهر تامین شد. به منظور ایجاد شرایط یکسان در طول عملیات آبیاری، فشار سیستم آبیاری در زمان‌های مختلف با فشارسنج دستی کنترل شد. ابتدای هر خط فرعی شیر کنترل جریان نصب شد تا در مواقع لزوم از آن‌ها استفاده شود. عملیات آبیاری به فاصله چهار روز، به مدت چهار ساعت در هر نوبت آبیاری صورت گرفت. رطوبت‌سنجی با دستگاه رطوبت‌سنج مدل تراپیم (TRIME-FM-2) ساخت شرکت IMKO انجام شد. این دستگاه رطوبت حجمی خاک را در لایه مدنظر به روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی^۱ (TDR) و براساس میزان ثابت دی‌الکتریک خاک برآورد می‌نماید (تاپ و همکاران، ۱۹۸۰). در این راستا برای هر قطره‌چکان یک لوله تراپیم به عمق ۱۲۰ سانتی‌متر در داخل خاک نصب گردید تا با قرار گرفتن سنسور دستگاه در لایه مورد نظر میزان رطوبت به دست آید. لوله‌های تراپیم با آرایش زیگزاکی در دو طرف خط فرعی پراکنده بودند. قبل از به کارگیری دستگاه رطوبت‌سنج نسبت به واسنجی آن براساس داده‌های اندازه‌گیری وزنی رطوبت خاک اقدام گردید.

در این تحقیق توزیع زمانی و مکانی رطوبت با استفاده از مدل Hydrus-2D در دو امتداد افقی و عمودی خاک بررسی شد. این مدل حاصل حل عددی ناحیه جریان براساس رابطه ریچاردز (رابطه ۱) است (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] - S(z) \quad (1)$$

که در آن:

θ : رطوبت حجمی [L^3L^{-3}]

t: زمان [T]

$K(h)$: هدایت آبی غیراشباع [LT^{-1}]

h: مکش ماتریک [L]

S: جذب آب توسط ریشه [$L^3L^{-3}T^{-1}$]

x: مختصات افقی [L]

z: مختصات عمودی [L]

مقدار واقعی تبخیر و تعرق ارائه می‌دهد. با توجه به بررسی منابع انجام شده هدف از این مطالعه ارزیابی توانایی مدل Hydrus-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است. این مطالعه مبتنی بر تعیین عمق بهینه نصب قطره‌چکان‌ها در یک سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی براساس نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری می‌باشد.

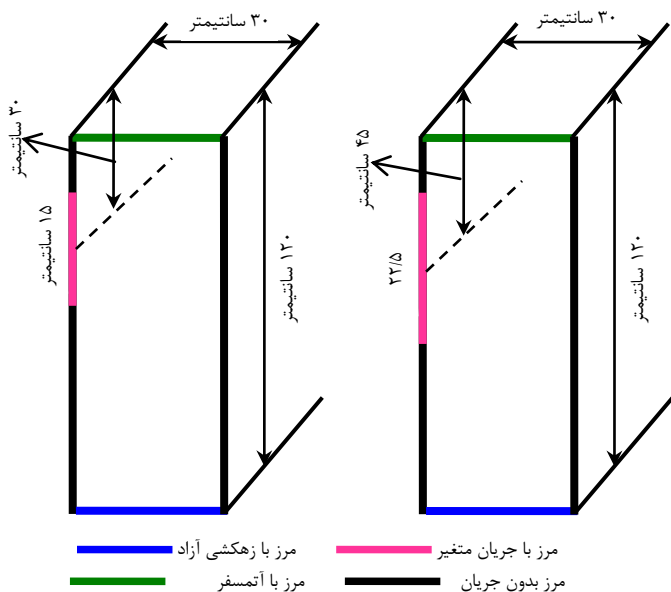
مواد و روش‌ها

در این پژوهش که در زمین‌های مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان صورت گرفت از یک سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده شد. برای این منظور یک سیستم آبیاری زیرسطحی در زمینی به مساحت ۲۰*۲۰ متر طراحی و اجرا گردید. قبل از طراحی سیستم آبیاری و به منظور اطلاع از ویژگی‌های خاک زراعی، پروفیلی به عمق ۲ متر و ابعاد ۱/۵*۱ متر در گوشه شمال‌غربی زمین حفر شد. سپس چهار نمونه خاک از لایه‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر برداشت و به آزمایشگاه فیزیک خاک مرکز ارسال گردید. برای هر نمونه مشخصات فیزیکی خاک شامل: بافت خاک براساس درصد ذرات خاک، چگالی ظاهری خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع آن اندازه‌گیری شد. درصد ذرات خاک به روش هیدرومتری، چگالی ظاهری خاک به کمک استوانه فلزی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش آزمایشگاهی بار ثابت به دست آمد. سپس اقدام به اجرای سیستم آبیاری شامل یک خط لوله اصلی در مرکز قطعه زراعی به طول ۲۰ متر در عمق ۳۰ سانتی‌متری زیر خاک شد. لوله اصلی از جنس پلی‌اتیلن چهار اتمسفر با قطر ۶۳ میلی‌متر و ضخامت جدار ۲ میلی‌متر بود. در اجرای کامل سیستم آبیاری از دو لوله فرعی با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۶ متر به صورت عمود بر لوله اصلی استفاده شد. لوله فرعی اول در ۵ متری از ابتدای لوله اصلی، در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک و لوله فرعی دوم در انتهای لوله اصلی، در عمق ۴۵ سانتی‌متری سطح زمین قرار گرفت. بر روی هر یک از لوله‌های فرعی ۶ عدد قطره‌چکان در خط با آبدهی ۲ لیتر بر ساعت قرار گرفت.

¹ Time domain reflectometry

برای حل نهایی معادله ریچاردز (معادله ۱) لازم بود تا شرایط اولیه و شرایط مرزی برای مدل تعریف گردد. شرایط اولیه شامل اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از آبیاری و لحاظ آن در مدل بود که برای هر لایه از خاک تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد.

شرایط مرزی شامل وجود یک جریان ثابت در طول مدت آبیاری در محل قطره‌چکان به مدل معرفی شد. در سطح زمین مرز با جریان آتمسفر بود. در مرز تحتانی شرایط زهکشی آزاد و مرزهای بدون جریان در دو طرف ستون خاک حاکم بود. در شکل (۱) شماتیکی از مرزهای جریان نشان داده شده است.



شکل (۱): مدل واقعی تعریف شده به Hydrus-2D

عملیات واسنجی مدل Hydrus-2D با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری میدانی و مقادیر برآورد شده تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متر به صورت دستی و با قضاوت مهندسی صورت گرفت. داده‌های اندازه‌گیری مقادیر رطوبت حجمی خاک به تفکیک چهار لایه بود که از دستگاه رطوبت‌سنج قرائت شد و مبنای مقایسات مقادیر رطوبت برآورد شده از مدل قرار گرفت. در این تحقیق توانایی مدل براساس

مدل Hydrus-2D معادله ۱ را با به کارگیری روش خطی عناصر محدود^۱ نوع گالرکین^۲ حل می‌کند. این معادله در حالت غیراشباع دارای سه متغیر پتانسیل ماتریک، رطوبت و هدایت هیدرولیکی است. لذا برای حل آن از معادله منحنی رطوبتی ون‌گنوختن (معادله ۲) و معادله هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک (مدل معلوم) (معادله ۳) کمک گرفته شد.

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (2)$$

$$K(\psi) = K_s Se' \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

که در آن:

Se : درجه اشباع نسبی خاک

θ_s : رطوبت اشباع

θ_r : رطوبت باقی‌مانده

α, n, m و λ : پارامترهای تجربی هستند.

K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

برای به‌دست آوردن پارامترهای معادله (۲)، از مدل ROSETTA که یکی از زیربرنامه‌های مدل Hydrus-2D است و براساس شبکه عصبی عمل می‌نماید استفاده گردید. برای اجرای مدل ROSETTA، مشخصات فیزیکی خاک مانند درصد ذرات تشکیل دهنده، چگالی ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع به‌عنوان ورودی داده شد. سپس مقادیر پارامترهای منحنی رطوبتی α, n, m ، درصد رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع به‌دست آمد. در این تحقیق مقدار فاکتور اعوجاج^۳ بنا به پیشنهاد ون‌گنوختن عدد ثابت ۰/۵ لحاظ گردید (زارع ابیانه، ۱۳۸۵).

^۱ Finit element

^۲ Galerkin

^۳ Tortosity factor

جدول (۱): مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد آزمایش

هدایت هیدرولیکی اشباع (cmd^{-1})	چگالی ظاهری (gcm^{-3})	بافت خاک	درصد ذرات			لایه (cm)
			رس	سیلت	شن	
۲۰/۵۲	۱/۵۴	لوم	۱۵	۳۰	۵۵	۰-۳۰
۱۸/۹۴	۱/۵۷	لوم	۱۵	۳۲	۵۳	۳۰-۶۰
۱۶/۸۹	۱/۵۳	لوم	۱۶	۳۳	۵۲	۶۰-۹۰
۱۴/۵	۱/۵۶	لوم	۱۷	۳۳	۵۱	-۱۲۰
۱۷/۷	۱/۵۵	-	۱۵/۷	۳۲	۵۲/۷	میانگین

همان‌گونه که از جدول (۱) ملاحظه می‌گردد بافت خاک تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری لوم شنی است. به طوری که میانگین درصد ذرات شن ۵۲/۵۷ درصد، سیلت ۳۲ درصد و رس ۱۵/۷۵ درصد است. به همین ترتیب میانگین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ۱۷/۷۱ سانتی‌متر بر روز به دست آمد. طبق نتایج جدول (۱) حداکثر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی معادل ۲۰/۵۲ سانتی‌متر بر روز بود و با افزایش عمق خاک مقدار آن به ۱۴/۵ سانتی‌متر بر روز کاهش یافت. علت کاهش هدایت هیدرولیکی می‌تواند ناشی از افزایش مقادیر رس و سیلت خاک نسبت به عمق خاک و کاهش درصد ذرات شن باشد. نتایج واسنجی دستگاه رطوبت‌سنج نسبت به مقادیر متناظر حاصل از اندازه‌گیری وزنی نمونه‌های رطوبتی خاک براساس ضریب همبستگی ۰/۹۹ نشان‌دهنده دقت مناسب دستگاه رطوبت‌سنج بود.

جدول (۲) نتایج پارامترهای هیدرولیکی تولید شده خاک، توسط مدل ROSETTA را با اطمینان در سطح ۹۵ درصد آماری نشان می‌دهد. این جدول ضرایب محاسبه شده برای معادله ون‌گنوختن شامل α و n ، θ_r و θ_s را نشان می‌دهد.

مقایسات کمی آماره‌های اختلاف میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) و میانگین خطای مطلق^۲ (MAE) برحسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی متر مکعب با هدف کمینه شدن خطا و معیار ضریب تعیین (R2) مطابق روابط زیر صورت گرفت:

$$RMSE = \left(\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{N} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{N} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{[\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2} \quad (7)$$

که در آن‌ها:

P_i : مقادیر پیش‌بینی (شبیه‌سازی)

\bar{P} : متوسط مقادیر شبیه‌سازی

O_i : مقادیر اندازه‌گیری

\bar{O} : متوسط مقادیر اندازه‌گیری

N : تعداد داده‌هاست.

پس از مرحله واسنجی، نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت در زمان‌های مختلف قبل و بعد از عملیات آبیاری، تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متری در قالب نمودارهای ترسیمی هم مقایسه شدند.

نتایج و بحث:

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد به منظور اجرای مدل Hydrus-2D لازم بود تا خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه اندازه‌گیری شود. جدول (۱) نتایج برخی خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

¹ Root Mean Square Error

² Mean absolute error

جدول (۲): پارامترهای هیدرولیکی خاک تولید شده توسط مدل ROSETTA

k_s	θ_s	θ_r	α	n	لایه
$cm d^{-1}$	$cm^3 cm^{-3}$		--	--	cm
۲۱/۹۴	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۰۲	۱/۴	۰-۳۰
۲۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۰۱۷	۱/۴۲	۳۰-۶۰
۱۷/۸۹	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۰۱۷	۱/۴۳	۶۰-۹۰
۱۶/۰۲	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۰۱۶	۱/۴۳	۹۰-۱۲۰
۱۹/۰۵	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۰۱۷۵	۱/۴۲	میانگین

مقادیر آماره‌های خطاسنجی برای دو فاصله افقی محل قطره‌چکان و ۳۰ سانتی‌متری آن است. مراحل فوق تا انطباق نتایج رطوبت شبیه‌سازی بر رطوبت اندازه‌گیری با دقت قابل قبول تکرار شد. در جدول (۳) خلاصه‌ای از معیارهای خطا برای واسنجی مدل به صورت میانگینی از چهار لایه ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر آمده است.

مقایسه مقدار هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) از جدول (۲) با مقادیر K_s از جدول (۱) و کاهش آن با توجه به افزایش مقدار رس خاک در لایه‌های زیرین، دقت مدل ROSETTA را نشان می‌دهد. لذا از مقادیر جدول فوق در شبیه‌سازی رطوبت خاک در مدل Hydrus-2D استفاده شد. بدین ترتیب عمل واسنجی با لحاظ پارامترهای هیدرولیکی خاک و اعمال آن در مدل، انجام و نتایج حاصل از آن با مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رطوبت‌سنج مقایسه گردید. مقایسات به صورت میانگینی از چهار لایه خاک برای دو عمق نصب قطره‌چکان (۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری) خاک انجام شد. نتایج هر عمق نصب شامل

جدول (۳): آماره‌های خطاسنجی برای مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی

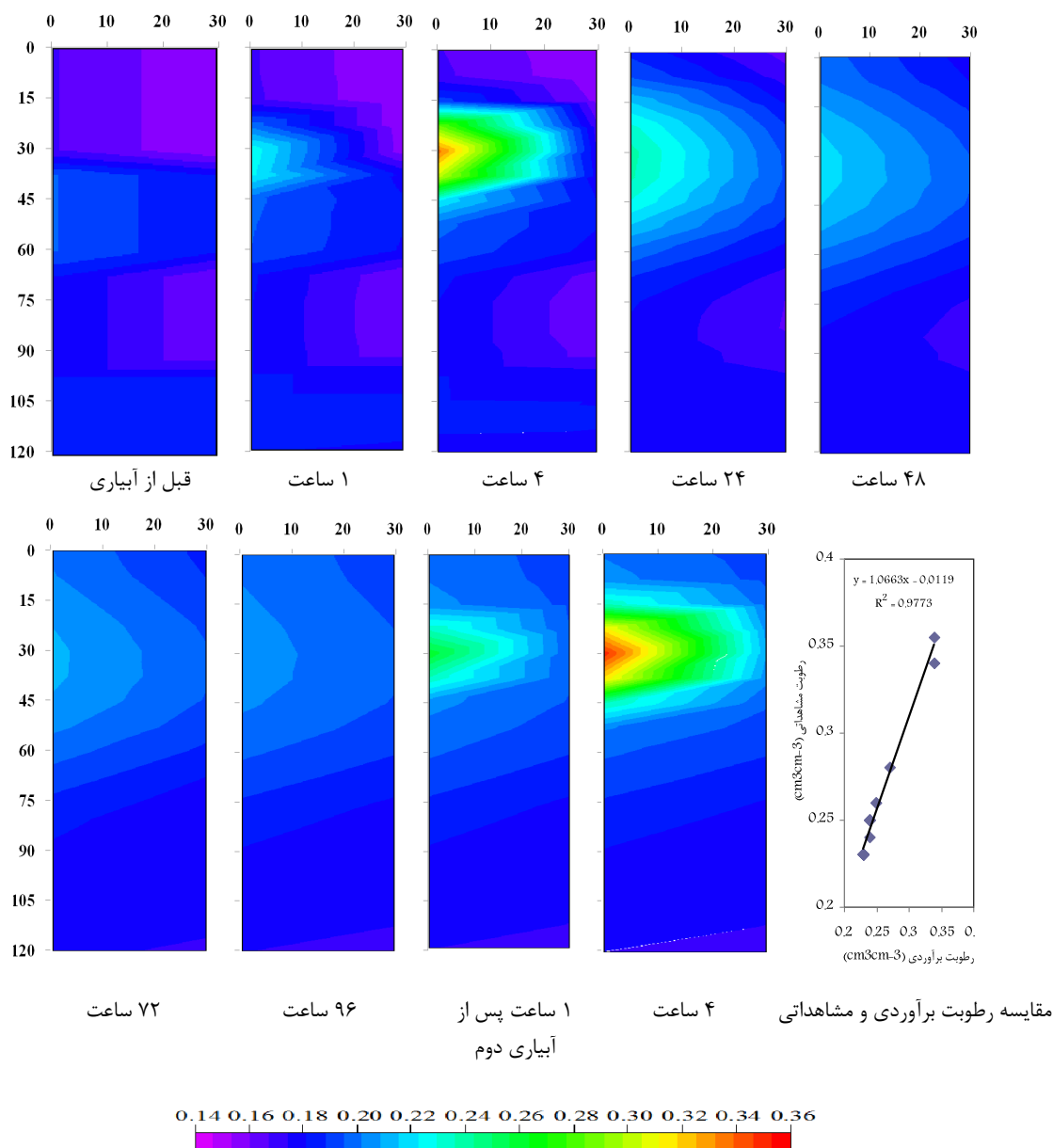
R	MAE ($cm^3 cm^{-3}$)	RMSE ($cm^3 cm^{-3}$)	نقاط مشاهداتی (افقی)	عمق نصب (عمودی)
۰/۹۸۸	4×10^{-3}	7×10^{-3}	محل قطره‌چکان	۳۰ سانتی- متر
۰/۹۹۵	$4/5 \times 10^{-3}$	6×10^{-3}	۳۰ سانتی‌متری قطره‌چکان	
۰/۹۹۲	$4/25 \times 10^{-3}$	$6/5 \times 10^{-3}$	میانگین	
۰/۹۵۶	8×10^{-3}	12×10^{-3}	محل قطره‌چکان	۴۵ سانتی- متر
۰/۹۹۷	$3/5 \times 10^{-3}$	5×10^{-3}	۳۰ سانتی‌متری قطره‌چکان	
۰/۹۷۷	$5/75 \times 10^{-3}$	$8/5 \times 10^{-3}$	میانگین	

لیکن در مجموع مقدار خطای مدل Hydrus-2D در برآورد رطوبت خاک کمتر از ۰/۸۵ درصد و مقدار ضریب همبستگی برآوردهای مدل بیش از ۰/۹۷ است. به نظر می‌رسد لایه ۰-۶۰ سانتی‌متر به دلیل فعالیت‌های کشاورزی، عملیات تهیه زمین و بیشتر بودن مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع از

به طوری که از جدول (۳) ملاحظه می‌گردد مقدار خطای اندازه‌گیری در هر دو عمق نصب (۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر) در محل قطره‌چکان بیشتر از ۳۰ سانتی‌متری آن است. هم‌چنین میانگین مقدار خطا در عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر کمتر از میانگین خطا در عمق نصب ۴۵ سانتی‌متری است.

حاصل از اجرای مدل Hydrus-2D در برآورد توزیع رطوبت در پروفیل خاک به صورت افقی و عمودی برای دبی قطره‌چکان ۲ لیتر بر ساعت و عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. در این شکل نحوه توزیع رطوبت از زمان قبل از آبیاری تا ۹۶ ساعت پس از آبیاری و دو مرحله پس از آبیاری دوم آورده شده است.

وضعیت فیزیکی بهتری برخوردار می‌باشد و به همین دلیل برآوردهای مدل به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. همان‌گونه که مقادیر عددی جدول (۳) نشان می‌دهد، مقدار خطای شبیه‌سازی کم و نشان از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت دارد. بنابراین می‌توان با اطمینان، نتایج مدل را در منطقه مورد نظر به کار برد. شکل (۲) نتایج



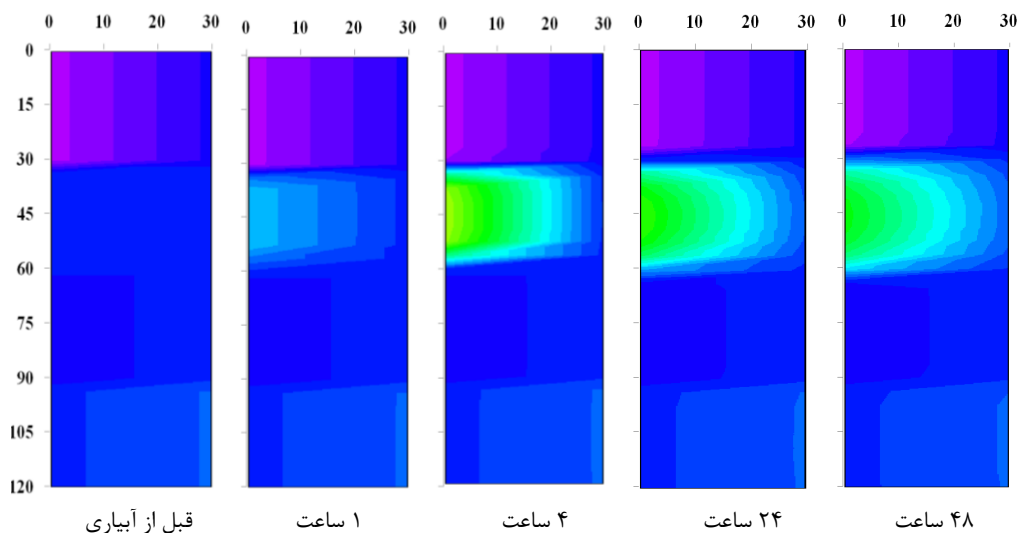
شکل (۲): شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک برای قطره‌چکان ۲ لیتر بر ساعت، نصب شده در عمق ۳۰ سانتی متری

همچنین مقایسه رطوبت توزیعی در ۴ ساعت پس از آبیاری اول و دوم، نشان می‌دهد بیشترین تغییرات رطوبت در سطح افقی از محل توزیع آب از قطره‌چکان است و در بخش عمقی تغییرات توزیع رطوبت کمتر است (شکل ۲). این امر کارایی بالای آبیاری زیرسطحی در صعود کمتر آب تحت تاثیر فرآیند تبخیر را اثبات می‌کند. گزارشات آیز و همکاران (۲۰۰۰)، پاتل و راجپوت (۲۰۰۸)، ملایی کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) و دستورانی و همکاران (۱۳۸۶) نیز موید این امر می‌باشد. ضمن آن که شکل (۲) نشان می‌دهد توزیع رطوبت از محل قطره‌چکان بیشتر در جهت افق بوده است و حتی این توزیع با تکرار آبیاری دوم نیز در جهت افقی بیشتر گسترش یافته است.

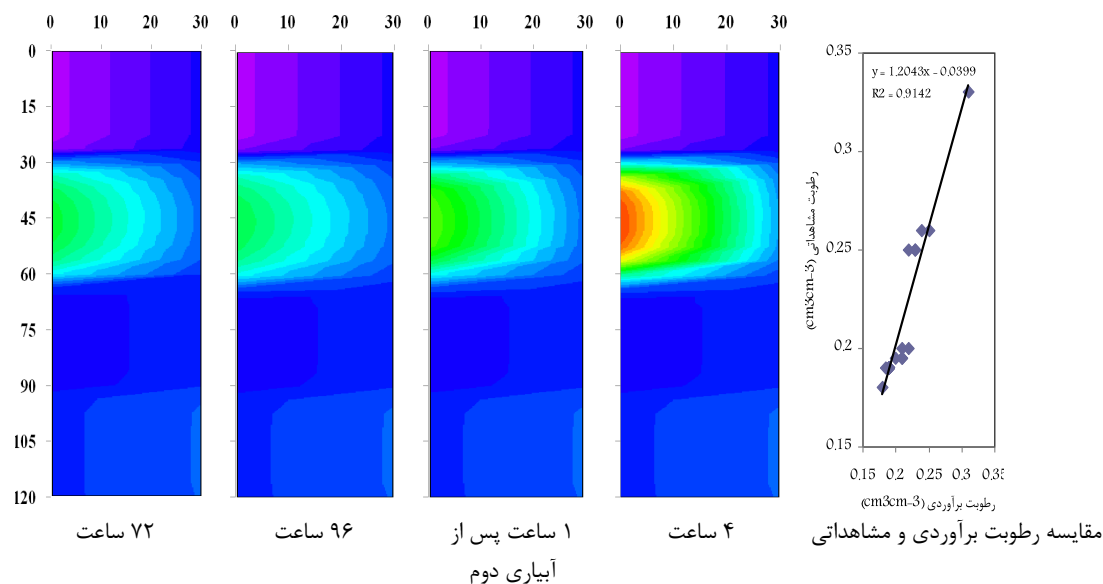
تغییرات افقی رطوبت یکنواخت بوده است، به طوری که تغییرات افزایش رطوبت در فواصل افقی از محل قطره‌چکان در حدود دو درصد است. به طور کلی تغییرات رطوبت در اطراف پیاز رطوبتی قطره‌چکان که توسط مدل نشان داده شده است نشان از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در سیستم آبیاری زیرسطحی دارد. توانمندی مدل Hydrus-2D در تحقیقات پاتل و راجپوت (۲۰۰۸)، المالگلو و دیامانتوپولوس (۲۰۰۹) و ملایی کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) گزارش شده است.

شکل (۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی توزیع رطوبت با مدل Hydrus-2D برای قطره‌چکانی با دبی دو لیتر بر ساعت که در عمق ۴۵ سانتی‌متری از سطح خاک ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود بیشترین میزان تغییرات رطوبت در محل قطره‌چکان بوده و از ۱۸ درصد در آغاز آبیاری به ۳۳ درصد در پایان آبیاری اول و ۳۵ درصد پس از آبیاری دوم رسیده است. در این شکل مشاهده می‌شود پیاز رطوبتی در ۴ ساعت پس از آبیاری دوم نسبت به مدت مشابه پس از آبیاری اول از گستردگی بیشتری برخوردار است. گسترش مکانی پیاز رطوبتی در آبیاری دوم می‌تواند ناشی از رطوبت‌های ذخیره شده در آبیاری اول باشد. گسترش افقی توزیع رطوبت در ۴ ساعت پس از آبیاری مرحله اول در حدود ۲۵ سانتی‌متر و گسترش عمقی آن حدود ۱۶ سانتی‌متر است. در حالی که گسترش افقی و عمودی رطوبت توزیعی در ۴ ساعت پس از آبیاری دوم به ترتیب بیش از ۳۰ و ۷۴ سانتی‌متر است. به نظر می‌رسد در آبیاری اول به دلیل خشکی خاک گسترش رطوبت کمتر است، لیکن با گذشت زمان و با مرطوب شدن خاک پیاز رطوبتی گسترش می‌یابد. در تحقیقی مشابه در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته از مدل Hydrus-2D در توجیه کمتر بودن نفوذ عمقی در جریان موجی، به پیشروی آب در طول شیار با مرطوب شدن و کاهش تراوایی خاک ابتدای شیار اشاره شده است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۰). هم‌چنین از رگرسیون خطی حاصل از این اشکال کاملاً پیداست که مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده آن توسط مدل، اختلاف چشم‌گیری ندارند. ضرایب همبستگی (R) بالا در این نمودارها بیان‌گر همین مطلب می‌باشد.



شکل (۳): شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک برای قطره‌چکان ۲ لیتر بر ساعت، نصب شده در عمق ۴۵ سانتی متری



ادامه شکل (۳): شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک برای قطره‌چکان ۲ لیتر بر ساعت، نصب شده در عمق ۴۵ سانتی متری

گسترش عمودی جبهه رطوبتی موجب گسترش توزیع افقی رطوبت شده و یکسانی رطوبت در لایه‌های افقی خاک شده است. عدم توزیع عمقی رطوبت می‌تواند به دلیل وجود درصد رس بیشتر و هدایت هیدرولیکی کمتر (جدول ۱) در این لایه باشد. هر چند عدم توزیع عمودی رطوبت در عملیات آبیاری به‌منظور حفظ رطوبت در محل قطره‌چکان خوب است. بر طبق نتایج ملایی کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) و سیاری و

با توجه به شکل (۳) مشخص است که اثرات توزیع رطوبت در سطح خاک به دلیل عمق نصب بیشتر قطره‌چکان مشهود نمی‌باشد. همچنین عدم تغییرات محسوس رطوبت در فواصل افقی از محل قطره‌چکان در عمق ۴۵ سانتی متری نسبت به شکل (۲)، نشان از بهینه بودن عمق نصب ۳۰ سانتی متر دارد. این نتیجه با گزارشات ارون و همکاران (۱۹۹۸) و پاتل و راجپوت (۲۰۰۸) تطابق کامل داشت. عدم

شیب خط به ۱ و عرض از مبدا به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل است. لذا می‌توان اظهار داشت دقت مدل در برآورد رطوبت عمق ۳۰ سانتی متری به مراتب بیش از عمق ۴۵ سانتی‌متری است.

نتیجه‌گیری

برای مقایسه رطوبت توزیعی در دو عمق نصب قطره‌چکان ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر، با استفاده از مدل‌سازی آبیاری زیرسطحی با مدل Hydrus-2D انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که توزیع رطوبت در عمق نصب ۴۵ سانتی‌متر قطره‌چکان بیشتر افقی است و گسترش عمودی آن در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر کمتر است. وجود درصد رس بیشتر در لایه دوم و فشار آب خروجی از قطره‌چکان در گسترش افقی رطوبت بی‌تاثیر نمی‌باشد، در حالی که در لایه اول درصد رس خاک کمتر است و ذخیره گرمایی بیشتر خاک در لایه اول در گسترش عمودی رطوبت تاثیر داشته است. همچنین دقت مدل در عمق ۳۰ سانتی‌متر بیش از عمق ۴۵ سانتی‌متر است. بیشتر بودن دقت مدل در عمق ۳۰ سانتی‌متر می‌تواند به دلیل بهتر بودن وضعیت خاک این ناحیه باشد. در مجموع نتایج نشان داد عملکرد روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی از کارایی مناسب برخوردار است و هدررفت عمقی آب کم می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل‌سازی Hydrus-2D نشان داد، این مدل قادر به شبیه‌سازی عملکرد سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در اعماق مختلف می‌باشد. لذا برای انتخاب عمق بهینه نصب قطره‌چکان به‌کارگیری مدل Hydrus-2D قابل توجیه است.

نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داد که اگر سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌طور مناسب طراحی، اجرا و مدیریت شود رطوبت به‌خوبی در پیاز رطوبتی قطره‌چکان و در نتیجه منطقه توسعه ریشه گیاه توزیع شده و در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. همچنین توزیع رطوبت در این سیستم به شدت تحت تاثیر شرایط هیدرولیکی و فیزیکی خاک می‌باشد. هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت باقی‌مانده، رطوبت اولیه، بافت خاک و چگالی ظاهری خاک از جمله این

همکاران (۱۳۸۶) نیز عدم نفوذ عمقی و خروج رطوبت از منطقه ریشه از مزایای مهم سیستم‌های آبیاری قطره‌ای می‌باشد. لیکن این امر موجب عدم توزیع ریشه به لایه‌های عمیق‌تر، عدم استفاده از رطوبت خاک در لایه‌های دیگر و عدم پایداری درختان و بوته‌ها در خاک می‌شود.

در تایید نتایج شکل (۲) می‌توان به نتایج شکل (۳) اشاره نمود که این شکل نیز مشابه شکل قبلی گسترش افقی رطوبت را در مقابل گسترش قائم نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان اظهار داشت که خاک از نظر رطوبتی به شرایط اشباع نرسیده است. مقدار رطوبت اشباع خاک در حدود ۳۹ درصد است که بیشترین میزان رطوبت اندازه‌گیری شده مربوط به ۴ ساعت پس از آبیاری دوم است که رطوبت به ۳۶ درصد رسیده است. احتمالاً تکرار آبیاری‌ها در زمان‌های بعدی می‌تواند موجب افزایش رطوبت در فواصل افقی و گسترش عمودی آن شود. در صورت اشباع شدن خاک، آب تحت تاثیر نیروی ثقل گسترش عمودی خواهد یافت و نیروی ماتریک خاک عمل نخواهد نمود. از دلایل دیگر گسترش افقی رطوبت می‌وان به جهت خروجی قطره‌چکان اشاره کرد که به صورت افقی در خاک نصب شده است و بخشی از توسعه افقی رطوبت مرهون وجود سرعت جریان خروجی از قطره‌چکان است. شاید اگر قطره‌چکان به صورت عمودی نصب می‌شد وضعیت گسترش رطوبت بیشتر به سمت پایین بود. زیرا علاوه بر سرعت جریان آب، نیروی ثقل هم در توسعه عمودی رطوبت به طور موثرتری عمل می‌نمود. به علاوه مقایسه شکل (۲) و (۳) تاثیر گرمای لایه ۰-۳۰ را نسبت به لایه ۰-۴۵ در جهت عملکرد صعود کاپیلاریته نشان می‌دهد. در شکل (۲) به دلیل نزدیک بودن قطره‌چکان به سطح در شکل‌های ۲۴ تا ۹۶ ساعت پس از آبیاری رطوبت در جهت عمودی رو به سطح زمین نیز توسعه داشته است که در شکل به وضوح آشکار است. از طرفی مقایسه دو مدل خطی برازش داده شده به مقادیر مشاهداتی رطوبت در مقابل مقادیر برآوردی در قالب مدل $y=ax+b$ نیز نشان می‌دهد شیب خط (a) برازش یافته در شکل (۲) به مقدار ۱ نزدیک‌تر است. ضمن آن که عرض از مبدا (b) شکل (۲) نیز در مقایسه با عرض از مبدا شکل (۳) به صفر نزدیک‌تر است. زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند که نزدیک بودن

ورودی‌ها و اعمال برخی شرایط طبیعی مانند پدیده پسماند، تغییرات دمایی و حرکت کاپیلاری که معمولا در مدل در نظر گرفته نمی‌شوند، دقت مدل را افزایش داد. از مدل Hydrus-2D همچنین می‌توان برای طراحی سیستم‌های آبیاری زیرسطحی و بهینه نمودن راندمان کاربرد آب در آن‌ها استفاده نمود، منوط بر اینکه مدل به‌خوبی کالیبره شده باشد.

شرایط می‌باشند. نفوذ عمقی در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بسیار کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همچنین با تعیین عمق نصب مناسب، صعود آب به سطح خاک تحت تاثیر تبخیر و فشار ماتریک به حداقل می‌رسد. نتایج حاصل از واسنجی، شبیه‌سازی و محاسبه آماره‌های خطاسنجی نشان داد که مدل Hydrus-2D توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در پروفیل خاک تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارد. هر چند می‌توان با افزایش دقت

منابع

۱. ازدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۵، شماره ۱، ص ۲۶-۴۰.
۲. دستورانی، م.ت.، م.ع. صادق‌زاده و م. حشمتی. ۱۳۸۷. بررسی کارایی آبیاری زیرسطحی در میزان رشد و تولید درختان پسته. مجله علوم و صنایع کشاورزی، ویژه آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۱، ص ۳۶-۴۷.
۳. زارع ابیانه، ح. ۱۳۸۵. دینامیک انتقال جرم در خاک‌های مطبق و غیرمطبق. پایان‌نامه دکتری، گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۴. زارع ابیانه، ح.، م. بیات‌ورکشی، ص. معروفی و ر. امیری چایجان. ۱۳۸۹. ارزیابی سیستم‌های هوشمند عصبی در کاهش پارامترهای تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع. مجله علمی پژوهشی آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره ۳، ص ۲۹۵-۳۰۵.
۵. سیاری، ن.، ب. قهرمان و ک. داوری. ۱۳۸۶. بررسی توزیع رطوبت خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) در باغ‌های پسته (مطالعه موردی: اراضی رفسنجان با آب‌های شور). پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی، جلد ۷، شماره ۳، ص ۶۵-۷۷.
۶. مرادمند، ر. ۱۳۶۵. بررسی شرایط آب و هوایی و اقلیمی استان کرمان. نشریه شماره ۱۶ اداره خاکشناسی و حاصلخیزی خاک کرمان.
۷. مزیدی، م.، ع. معروف‌پور و ب. بهرام‌نژاد. ۱۳۸۸. بررسی دقت مدل‌های انعکاس‌سنجی حوزه زمانی برای برآورد رطوبت. مجله پژوهش آب ایران، سال ۳، شماره ۵، ص ۴۱-۵۲.
۸. میرزایی، ع.، ا. ع. اشرف صدرالدینی و ا.ح. ناظمی. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی آبیاری موجی و مقایسه آن با جریان پیوسته. مجله مهندسی منابع آب ایران، سال چهارم، ص ۷۵-۸۵.
9. Ayars, J.E., R.A. Schoneman, F. Dale, B. Meso and P. Shouse. 2001. Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water. *Agricultural Water Management*, 47:243-264.
10. Elmaloglou, S. and E. Diamantopoulos. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural Water Management*, 96:1587-1595.
11. Essig, E.T., C. Corradini, R. Morbidelli and R.S. Govindaraju. 2009. Infiltration and deep flow over sloping surface: Comparison of numerical and experimental result. *J. of Hydrology*, 374: 30-42.
12. Hanson, B.R., J. Simunek and J.W. Hopmans. 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management*, 86:102-113.

13. Kandelous, M.M. and J. Simunek. 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.
14. Mailhol, J.C., P. Ruellea, S. Walserb, N. Schützeb and D. Dejeana. 2011. Analysis of AET and yield predictions under surface and buried drip irrigation systems using the Crop Model Pilote and Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 98:1033-1044.
15. Oron, C.J., Y. Demalach, L. Gillerman, I. David and V.P. Raco. 1999. Improved saline water under subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 39(1): 19-33.
16. Patel, N. and T.B.S. Rajput. 2007. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agricultural Water Management*, 88:209-223.
17. Patel, N. and T.B.S. Rajput. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management*, 95:1335-1345.
18. Silva, R.G., S.M. Holub, E.E. Jorgensen and A.N.M. Ashanuzzaman. 2005. Indicators of nitrate leaching loss under different land use of clayey and sandy soils in southeastern Oklahoma. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109:346-359.
19. Simunek, J., M. Sejna and M.Th. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 2.0. US Salinity Laboratory, Riverside, California. 226pp.
20. Skaggs, T.H., T.J. Trout, J. Simunek and P.J. Shouse. 2004. Comparison of Hydrus-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4):304-310.
21. Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research Journal*, 16:574-582.
22. Van Genuchten, M.Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, U. S. Salinity Lab. Riverside, C.A.

Assessment of influence of installation depth of emitter with same discharges on moisture distribution in subsurface drip irrigation system and simulation with HYDRUS-2D model

M. Afshar Jahanshahi¹, H. Zare Abyaneh^{2*}, H. Naghavi³, A. Eslami⁴

Abstract

Subsurface drip irrigation is now considered as one of the most advanced methods of irrigation in agriculture. In subsurface drip irrigation will be given water to plant in low volume and pressure and will be moved by the force of the soil matric. These factors reduce losses and increase water use efficiency as a result. It should be noted that lack of proper and improper management of these irrigation systems, which reduces their efficiency in water use. To investigate the distribution of moisture content and depth of subsurface drip irrigation system installed and optimized flow design with 2 ls^{-1} emitter discharge, the depth of installation tubes (30 and 45 cm) and four layers deep moisture readings (0-30, 30-60, 60-90 and 90-120 cm) in a farming soil at the agriculture researches center of Kerman. The results of the simulation of moisture by the HYDRUS-2D model were compared with results from field experiments. Average of Root Mean Square Error (RMSE) and correlation coefficient (r) values were obtained respectively 0.0065 and 0.992 for Installation depth of 30 cm. Average of RMSE and r values were obtained respectively 0.0085 and 0.977 for Installation depth of 45 cm, which showed the model capable in simulating the distribution of moisture in the subsurface drip irrigation system. Comparison of correlation coefficient in both of depths in the linear model fitted in both cases were indicated higher accurately of estimates of 30 cm to 45 cm Installation depth. Also the installation depth of 30 cm was selected as the optimal installation depth.

Keywords: Subsurface drip irrigation, Wetting pattern, Simulatio.

1 MSc of Irrigation and Drainage Eng., Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan.

2 Associate Professor of Irrigation and Drainage Eng., Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan.

3 Scientist. Kerman Agriculture and Natural Resources Research Center.

4 Scientist. Kerman Agriculture and Natural Resources Research Center