

## شبیه سازی الگوی توزیع رطوبت و تبخیر در آبیاری قطره ای زیر سطحی در یک خاک شنی

شهرام کریمی گوغری<sup>۱\*</sup>، محسن ایران دوست<sup>۲</sup>، محدثه حسینی نیا<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۹

### چکیده

علاقه به استفاده از سامانه های آبیاری زیر فشار به دلیل کمبود منابع آب و بالا بودن بازدهی مصرف آب در این سامانه ها، در سالهای اخیر به صورت فزاینده ای افزایش یافته است. از جمله این روشها، که اخیراً در مناطق خشک ایران جهت آبیاری باغهای پسته مورد استفاده قرار می گیرد، سامانه ی آبیاری قطره ای زیر سطحی است. طراحی و مدیریت صحیح این سامانه ها مستلزم آگاهی از نحوه توزیع رطوبت در خاک است. در این تحقیق کارایی شبیه عددی HYDRUS-2D، که قادر به شبیه سازی حرکت آب، املاح، و گرما در شرایط اشباع و غیر اشباع می باشد، جهت شبیه سازی توزیع رطوبت در خاک در زمانهای مختلف زیر قطره چکان زیر سطحی واقع در عمق ۳۰ سانتی متری در مزرعه ای با خاک شنی، بررسی شده است. همچنین، تأثیر متغیرهای مختلف از جمله مقادیر متفاوت بده (۲ و ۴ لیتر در ساعت) و کاربرد خاکپوش ( خاکپوش پلاستیک) بر الگوی رطوبت نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که شبیه توانسته است روند تغییرات را مشابه آنچه در نیمرخ خاک رخ داده شبیه سازی کند ( $R^2=0/92$ )، البته با حداکثر خطای  $RMSE=0.0192$  به ازای ۲۴ ساعت پس از پایان آبیاری. همچنین، افزایش در مقدار بده به ازاء یک حجم ثابت آب آبیاری نه تنها باعث افزایش توزیع رطوبت در خاک نشد، بلکه به دلیل کاهش ابعاد ناحیه ی رطوبتی منجر به کاهش فاصله لوله فرعی و بالا رفتن هزینه نصب سامانه گردید. وجود پوشش پلاستیکی به عنوان خاکپوش، با توجه به نوع بافت خاک منطقه توانست با ثابت نگه داشتن تغییرات رطوبت و کاهش اختلاف مکش در لایه های سطحی و عمقی مانع از هدر رفتن آب از طریق تبخیر گردد.

**واژه های کلیدی:** الگوی رطوبت، آبیاری قطره ای زیر سطحی، HYDRUS-2D، بده، خاکپوش.

-۱

-۲

-۳

\*- نویسنده مسئول:

## مقدمه

همراه با توسعه‌ی اقتصادی و اجتماعی در نواحی خشک، و افزایش نیاز به منابع آبی جدید، نیاز به سامانه‌های به روز با قابلیت افزایش بازدهی مصرف آب نیز فزونی می‌یابد (ابوزید و همکاران، ۱۹۹۷). دانش و فن آبیاری قطره‌ای می‌تواند با مهار کردن وسیع بر اندازه آب آبیاری، کودها، و آفت‌کشها، به تعدیل این چالش کمک کند (اسکگر و همکاران، ۲۰۰۴). یکی از سامانه‌های به روز، آبیاری قطره‌ای، که در بسیاری از نقاط جهان برای آبیاری فراورده‌های کشاورزی متفاوت استفاده می‌شود، سامانه‌ی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است (subsurface drip irrigation system, SDIS). آبیاری قطره‌ای با قطره‌چکانهای مدفون در زیر سطح خاک به واسطه‌ی کاهش رطوبت در سطح تلفات بالقوه‌ی آب را در سامانه‌ی آبیاری کاهش می‌دهد. با استفاده از این سامانه‌ها کشاورزان می‌توانند به بازدهی مصرف آب بالاتر، کاهش به خطر افتادن کیفیت آب، امکان بیشتر در استفاده از آبهای با کیفیت پایینتر، و افزایش یکنواختی آب کاربردی دست یابند (المالکلو و دیامنتوپولوز، ۲۰۰۹). طراحی درست این سامانه‌ها نیاز به اطلاعات کافی از نحوه‌ی توزیع جریان آب در خاک به صورت افقی و عمودی دارد. این نوع اطلاعات در تعیین ژرفا نصب لوله‌های آبد، فاصله‌ی آنها از یکدیگر، قطر روزنه‌ی قطره‌چکانها، و چگونگی تنظیم شدت جریان خروجی از گسیلنده‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند (آکار و همکاران، ۲۰۰۹). از آنجا که انجام آزمایش برای تشخیص شکل توزیع رطوبت در داخل خاک بسیار سخت و وقت گیر می‌باشد، استفاده از شبیه‌های تحلیلی، که با داشتن عوامل آبی خاک و معادلات حرکت آب در آن می‌توانند تخمین قابل قبولی را از توزیع رطوبت در خاک ارائه دهند، به وسیله‌ی محققین زیادی توصیه شده است. آسولین (۲۰۰۲) در بررسی تاثیر سه اندازه‌ی بدهی قطره‌چکانها بر جنبه‌های مختلف برنامه‌ی آب در آبیاری قطره‌ای در مزرعه آزمایشی بت‌داگان فلسطین اشغالی با خاک شنی - متوسط به تطابق بین مشاهدات و شبیه سازی انجام شده با کاربرد نرم افزار HYDRUS-2D اشاره کرد. کوت و همکاران (۲۰۰۳) معتقدند که برای شبیه‌سازی الگوی رطوبتی و انتقال املاح

قطره‌چکانهای زیرسطحی، تحلیل جریان در جزء حجمی منفرد کافی است. تشابه بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با کاربرد نرم افزار HYDRUS-2D نیز بر این نکته اشاره دارد که در طراحی صحیح سامانه‌ی آبیاری و انتخاب روش مناسب در مدیریت کود آبیاری باید ویژگیهای آبی خاک و انتقال املاح را مد نظر قرار داد، و شبیه HYDRUS می‌تواند نرم‌افزاری مفید جهت تخمین این فراسنجه‌ها باشد. اسکگر و همکاران (۲۰۰۴)، با به‌کارگیری سه بدهی مختلف آب و قرار دادن قطره‌چکان در ژرفا ۶ سانتیمتری در خاک مزرعه‌ای با بافت شنی متوسط به ارزیابی دقت شبیه‌سازیهی HYDRUS-2D، در نفوذ و توزیع مجدد آب در خاک پرداختند. آنها نیز معتقدند که شبیه HYDRUS-2D در بررسی توزیع رطوبت در خاک تطابق بالایی را با واقعیت دارد. لازاروییچ و همکاران (۲۰۰۵) معتقدند که مقدار آب خروجی از روزنه‌ی قطره‌چکانهای زیرسطحی از عوامل زیادی مانند فشار در روزنه، اندازه و هندسه‌ی مجرا و ویژگیهای آبی خاک اطراف آن تاثیر می‌پذیرد. لذا در این تحقیق با به‌کارگیری شبیه عددی HYDRUS-2D، و سه مقدار بده در دو نوع خاک واقعه در مزرعه آراوای فلسطین اشغالی به فراهم کردن شرایطی که می‌توانند این فرایندها را با در نظر گرفتن ویژگیهای منبع توصیف کند، پرداختند. در نهایت آنها بر مطابقت بالای بین میزان فشار اندازه‌گیری شده در بررسیهای آزمایشگاهی و شبیه مزبور اشاره کردند. کوت و همکاران (۲۰۰۶) جهت بررسی الگوی رطوبتی خاک با استفاده از سه بافت خاک، دو نوع قطره چکان سطحی و زیرسطحی، و راه حل عددی HYDRUS-2D و تحلیلی فیلپ دریافتند که هر دو روش مذکور تخمین قابل قبولی را از جنبه‌ی رطوبتی عرضه می‌دارند، اما روش عددی HYDRUS-2D توانایی سریعتری جهت تعیین شکل جنبه رطوبتی داشت. پروانزانو (۲۰۰۷) به بررسی الگوی توزیع رطوبت به‌وسیله‌ی سامانه‌ی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک شنی متوسط با استفاده از شبیه HYDRUS-2D پرداخت. وی بر تناسب بالای نرم‌افزار عددی HYDRUS-2D جهت شبیه‌سازی فرایند نفوذ اطراف قطره‌چکان در مدت آبیاری اشاره کرد. پاتل و راجیپوت (۲۰۰۸) به ارزیابی

۳۷ C° و ۱ C°- می باشد میانگینهای بارش و تبخیر بالقوه‌ی سالانه نیز به ترتیب ۱۳۸ و ۳۰۵۰ میلی‌متر است. خاک منطقه مورد مطالعه شنی، شامل ۸۲/۳ درصد شن، ۷/۷ درصد لای و ۱۰ درصد رس بود. برای تعیین ساختمان خاک از ژرفاهای ۱۵-۰، ۳۰-۱۵، ۴۵-۳۰، ۶۰-۴۵، ۷۵-۶۰، ۹۰-۱۰۵ سانتی متر نمونه برداری صورت گرفت. مقادیر درصدهای شن، لای و رس در تمام لایه‌های مزبور تقریباً یکسان بود و هیچ غیر یکنواختی در آنها مشاهده نشد. منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک نیز با کاربرد دستگاه صفحات فشاری و اندازه‌گیری رطوبت در مکشهای ۰/۱ تا ۱۵ بار به دست آمد (جدول ۱). چگالی ظاهری خاک در چندین محل در ژرفا ۳۰ سانتی متری با استفاده از نمونه بردار خاک با قطر داخلی ۳ سانتی متر تعیین گردید. از میانگین ۱/۴۷ گرم بر سانتی متر مکعب جهت تبدیل درصد رطوبت وزنی به درصد رطوبت حجمی استفاده شد.

جهت اجرای سامانه‌ی آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و قرارگیری قطره‌چکانها در ژرفا ۳۰ سانتی متر از سطح خاک، نهرهایی تا ژرفا ۳۰ سانتی متر و طول تقریبی ۱۰ متر برای خواباندن لوله‌ها حفاری شد. فاصله‌ی قطره‌چکانها ۱ متر در نظر گرفته شد و روی نهرها با خاک حاصل از حفاری پر گردید. چهار آزمایش آبیاری قطره‌ای زیر سطحی شامل ۲ آزمایش با قطره‌چکان با بدهی ۲ لیتر بر ساعت با خاکپوش و بدون آن، و ۲ آزمایش با قطره‌چکان با بدهی ۴ لیتر بر ساعت با خاکپوش و بدون آن صورت گرفت. که جهت تنظیم اندازه بدهی در طی هر آبیاری، خاک دو طرف قطره‌چکان حفاری، و اندازه‌های بدهی حجمی با استفاده از ظرف مدرج با دقت ۱۰ سانتی‌متر مکعب مشخص شد. این اندازه‌گیریها اندازه بدهی ۲ و ۴ لیتر بر ساعت را برای قطره‌چکانهای مذکور تأیید کردند. از خاکپوش پلاستیکی نیز جهت بررسی تأثیر میزان تبخیر بر الگوی رطوبت در سطح خاک استفاده شد. از آبی با  $EC=0/750 \text{ ds/cm}$  و  $pH=7/5$  جهت آبیاری استفاده شد؛ سایر فراسنجهای کیفی آب در جدول شماره ۲ ارائه گردیده‌اند. جهت تعیین درصد رطوبت حجمی خاک از دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR) (نمونه‌ی تراپیم- افام، عرضه شده به وسیله‌ی شرکت آمیکو) استفاده

نرم‌افزار HYDRUS-2D جهت شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با به‌کارگیری ۶ ژرفا متفاوت کارگذاری قطره‌چکانها و سه سطح آبیاری پرداختند. ایشان اظهار داشتند که توزیع رطوبت خاک در بررسیهای صحرائی و شبیه‌سازی در مراحل مختلف رشد توافق نزدیکی داشت، و اختلافها به‌صورت آماری ناچیز بودند. سیال و اسگگز (۲۰۰۹) به بررسی الگوی پخش آب ایجاد شده با لوله‌های سفالی به‌ازاء چهار ارتفاع فشار متفاوت در مزرعه آزمایشی واقع در پاکستان پرداختند. در مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار HYDRUS-2D با سه مقیاس آماری نتایج مشابهی به‌دست آوردند که بیانگر کارایی خوب شبیه در تخمین الگوی رطوبتی می باشد. کندلوس و سیمیونک (۲۰۱۰b) به ارزیابی توانایی سه شبیه تحلیلی WetUp، عددی HYDRUS-2D، تجربی کندلوس و همکاران (۲۰۰۸) در تخمین ابعاد ناحیه خیس شده زیر سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خاک متوسط-رسی پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که HYDRUS-2D پیشگوییهای بهتری را از توزیع رطوبت در اطراف قطره‌چکانها ارائه می‌کند، و دقت بالاتری نسبت به دیگر شبیه‌های ارزیابی شده دارد.

تحقیقات فوق نشان می‌دهند که نرم‌افزار HYDRUS-2D توانایی خوبی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای دارد ولی تاثیر همزمان پدیده‌ی تبخیر بر این توزیع رطوبت با کاربرد شبیه مذکور بررسی نشده است. هدف از این تحقیق، بررسی توانایی نرم‌افزار HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک از یک منبع نقطه‌ای مدفون شده با به‌کارگیری بدهیهای مختلف و تأثیر خاکپوش بر الگوی توزیع رطوبت، می‌باشد.

### مواد و روشها

تحقیق حاضر در مزرعه‌ای واقع در شهر کرمان که فاقد پوشش گیاهی است، انجام شد. این مکان در مختصات  $30/28^{\circ} \text{ N}$  و  $57/07^{\circ} \text{ E}$  و ارتفاع تقریبی ۱۷۹۰ متر از سطح دریا واقع شده و دارای اقلیم گرم و خشک با تابستانهای گرم و زمستانهای سرد و خشک می باشد. میانگین بیشترین و کمترین دما در طول سال به ترتیب

جهت عمودی از  $\theta = 0.04$  در سطح خاک تا  $\theta = 0.12$  در انتهای نیمرخ خاک به صورت خطی در نظر گرفته شد. در مدت آبیاری، شرایط مرزی جریان متغیر برای قطره چکان استفاده شد که در پایان هر رویداد آبیاری، مرز لوله شرایط مرزی جریان صفر را می پذیرد. برای بقیه ی قسمت مرز چپ و مرزهای راست و پایین هم هنگام آبیاری و هم بعد از آبیاری شرایط مرزی جریان صفر استفاده شد. از آن جا که دامنه ی جریان محاسباتی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده بود، مرزها بر جریان آب در دامنه تاثیری نمی گذارند. مرز پایینی بیانگر زهکشی آزاد و همچنین، مرز بالایی منعکس کننده اندازه تبخیر از سطح خاک ( حالت بدون خاکپوش) و شرایط مرزی جریان صفر ( وجود خاکپوش در سطح خاک) می باشد. جهت تخمین فراسنجهای آبی خاک از روش حل معکوس در HYDRUS-2D استفاده شد. برای این منظور از درصدهای رطوبت، که به صورت وزنی با کاربرد متی نمونه برداری در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ سانتی متر از قطره چکان و ۷ ژرفا متفاوت از قطره چکان واقع در ژرفا ۳۰ سانتی متری برداشت شده بود، جهت اجرای تحلیل معکوس استفاده گردید؛ مقادیر این فراسنجهها در جدول ۳ نشان داده شده اند.

شد. لوله های هادی دستگاه مطابق دستور العمل شرکت سازنده (دستورالعمل تخصصی دستگاه، ۱۹۹۸) در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ سانتی متر از قطره چکانها و تا ژرفا ۱۰۵ سانتی متری از سطح خاک نصب شدند. همچنین، قبل از انجام آزمایش منحنی واسنجی دستگاه در چندین نقطه بطور تصادفی از مزرعه آزمایشی با استفاده از نمونه های وزنی ترسیم شد. بر این اساس مقادیر درصدهای رطوبت حجمی در زمانهای ۱/۵-۳-۴/۵-۶ بر ساعت هنگام آبیاری، و به مدت ۴ روز بعد از اتمام آن، برداشت شدند. در این تحقیق از نرم افزار HYDRUS-2D جهت شبیه سازی استفاده شد. جهت شبیه سازی توزیع رطوبت، مستطیلی با عرض ۶۰ سانتی متر و ژرفا ۱۵۰ سانتی متر به عنوان محدوده ی توزیع رطوبت، و نیم دایره ای به شعاع ۱ سانتی متر به نمایندگی از قطره چکان واقع شده در ژرفا ۳۰ سانتی متری از سطح خاک به شبیه معرفی گردیدند. همچنین، با فرض این که الگوی رطوبت ایجاد شده در دو طرف قطره چکان متقارن است، فقط سمت راست نیمرخ شبیه سازی می شود. توزیع درصد رطوبت اولیه بر اساس درصد رطوبت نمونه ها قبل از انجام آبیاری تخمین زده شد. درصد حجمی رطوبت اولیه در جهت افقی یکنواخت و در

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه ی مورد مطالعه

EC (ds/m)	pH	نسبت جذبی سدیم (SAR)	نقطه ی پژمردگی ( درصد حجمی)	ظرفیت مزرعه ( درصد حجمی)	شن ( درصد)	لای ( درصد)	رس ( درصد)	عمق ( سانتیمتر)
۱/۷۲	۸/۰۷	۷/۰۳	۶/۶	۱۳/۲	۸۲	۸	۱۰	۰-۱۵
۳/۲۵	۷/۹۷	۷/۵	۷/۰۱	۱۵/۷۱	۸۲	۸	۱۰	۱۵-۳۰
۴/۲	۷/۸۵	۸/۶۲	۶/۴۸	۱۳/۹۶	۸۴	۶	۱۰	۳۰-۴۵
۵/۳	۷/۴۵	۸/۰۵	۶/۲۷	۱۵/۵۴	۸۴	۶	۱۰	۴۵-۶۰
۷/۳	۷/۳۰	۱۱/۱۵	۷/۲۵	۱۸/۱۲	۸۰	۱۰	۱۰	۶۰-۷۵
۶/۶۶	۷/۱۵	۱۱/۸۵	۷/۸۵	۱۷/۳۵	۸۰	۶	۱۴	۷۵-۹۰
۶/۱۵	۷/۱۴	۱۰/۸۷	۶/۵۳	۱۴/۱۵	۸۴	۱۰	۶	۹۰-۱۰۵

جدول ۲- نتایج آزمایش کیفی آب آبیاری

EC (ds/cm)	pH	کاتیونها (mg/lit)			آنیونها (mg/lit)			SAR	TDS (mg/lit)	طبقه بندی آب آبیاری	
		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>				B <sup>-</sup>
۰/۷۵	۷/۵	۱۲/۵	۳۰/۰۸	۱۵۰/۴۵	۱۸۰/۵۴	۱۲۶/۷۵	۱۱۰/۰۵	۰/۵	۵/۲۱	۴۸۰	C2-S1

جدول ۳- فراسنجهای آبی تخمین زده شده از روش حل معکوس.

	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	L
Inverse solution	۰/۰۳۱۴	۰/۳	۰/۰۲۳	۲	۳۰	۰/۵

### نتایج و بحث

#### مقایسه‌ی رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی

#### شده با کاربرد نرم افزار HYDRUS-2D

شکل‌های ۱ و ۲ توزیع‌های درصد رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را برای زمانهای ۱/۵-۶ ساعت هنگام آبیاری، و ۲۴ و ۹۶ ساعت پس از پایان آبیاری به ازاء بده ۲ لیتر در ساعت نشان می‌دهند.

در شکل ۱ روند تغییرات درصد رطوبت به ازاء زمانهای مختلف و در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰ سانتی‌متری از قطره‌چکان نشان داده شده است، در حالی که شکل ۲ برش عرضی انتخابی را در نیمرخ خاک، و در ژرفاهای ۱۵، ۴۵ سانتی‌متری از قطره‌چکان، نشان می‌دهد. از شکل‌های رسم شده در فواصل و زمانهای مختلف می‌توان دریافت که برازش خوبی بین درصدهای رطوبت پیش بینی شده و مشاهداتی وجود دارد؛ ژرفا و عرض ناحیه‌ی مرطوب تخمین زده شده به وسیله‌ی شبیه با واقعیت مطابقت دارد، که شکل‌های عرضی و ژرفای رسم شده نیز بیانگر این تطابق می‌باشند.

جهت مقایسه کمی بین درصدهای رطوبت پیش بینی شده و مشاهداتی، سه فراسنج آماری  $R^2$ , ME, RMSE مطابق جدول ۴ برای زمانهای مختلف محاسبه گردیدند. مقادیر ME در جدول ۴ نشان می‌دهند که HYDRUS-2D مقادیر درصد رطوبت را هنگام آبیاری و در ساعت بعد از آبیاری اندکی حد بالا تخمین زده است. مقادیر RMSE نیز از  $cm^3/cm^3$  (۰/۰۰۸۴-۰/۰۰۹۱)

میزان انطباق شبیه‌سازیهای HYDRUS-2D با داده‌های اندازه‌گیری شده با سه فراسنج آماری خطای میانگین (ME)، خطای متوسط مجذور مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بیان شد این فراسنجهای به‌وسیله‌ی ویل موت (۱۹۸۲) به صورت زیر تعریف شده‌اند:

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

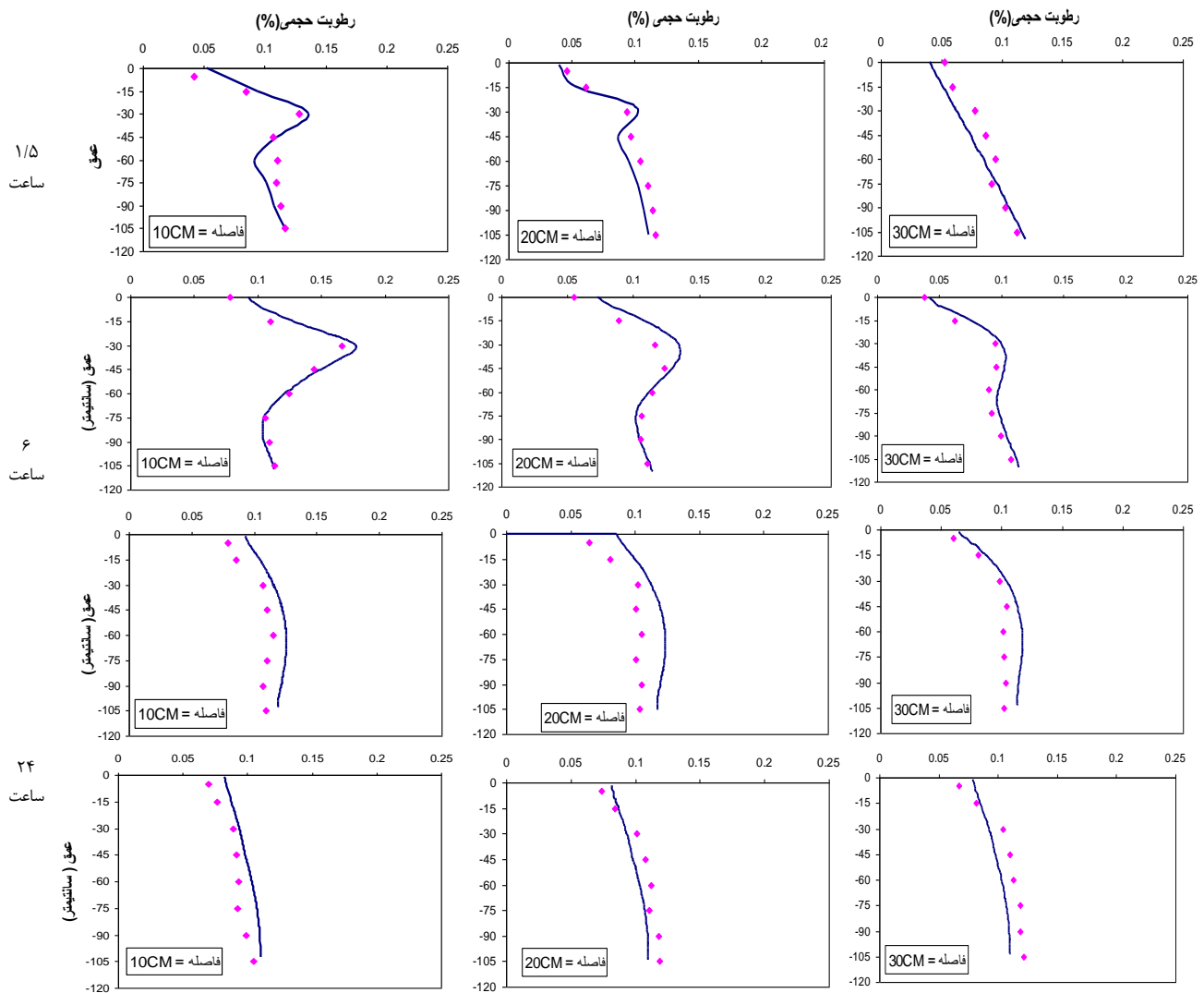
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

که در آن: N کل داده‌ها یا اطلاعات،  $P_i$  آمین نقطه‌ی داده شبیه‌سازی شده،  $O_i$  آمین داده‌های مشاهداتی، و  $\bar{O}$  میانگین داده‌های مشاهده شده می‌باشند. اندازه مثبت یا منفی ME به ترتیب دلالت بر تخمین حد بالا و حد پایین شبیه نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌کند.

دقت شبیه سازیها برای همه ی زمانها رضایت بخش بود. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) محاسبه شده برای تمام زمانها نیز بر برآزش خوب شبیه با مشاهدات تاکید کرد.

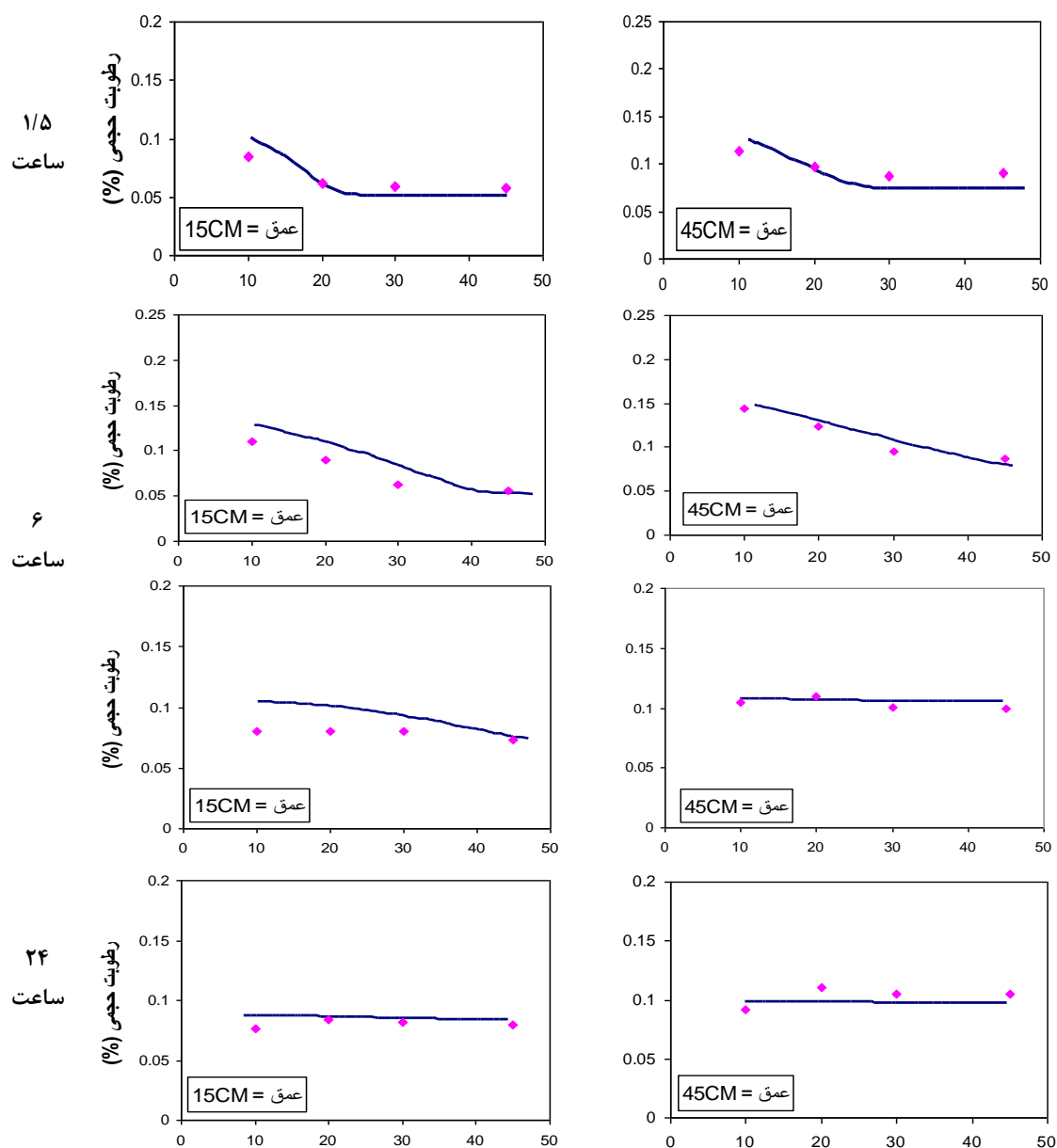
برای نمونه ها هنگام آبیاری ، و از  $0.192 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  - برای نمونه ها در روزهای بعد از آبیاری، تغییر می کند. که این اعداد، با اعداد به دست آمده از نتایج کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) مقایسه شد و نشان داد که



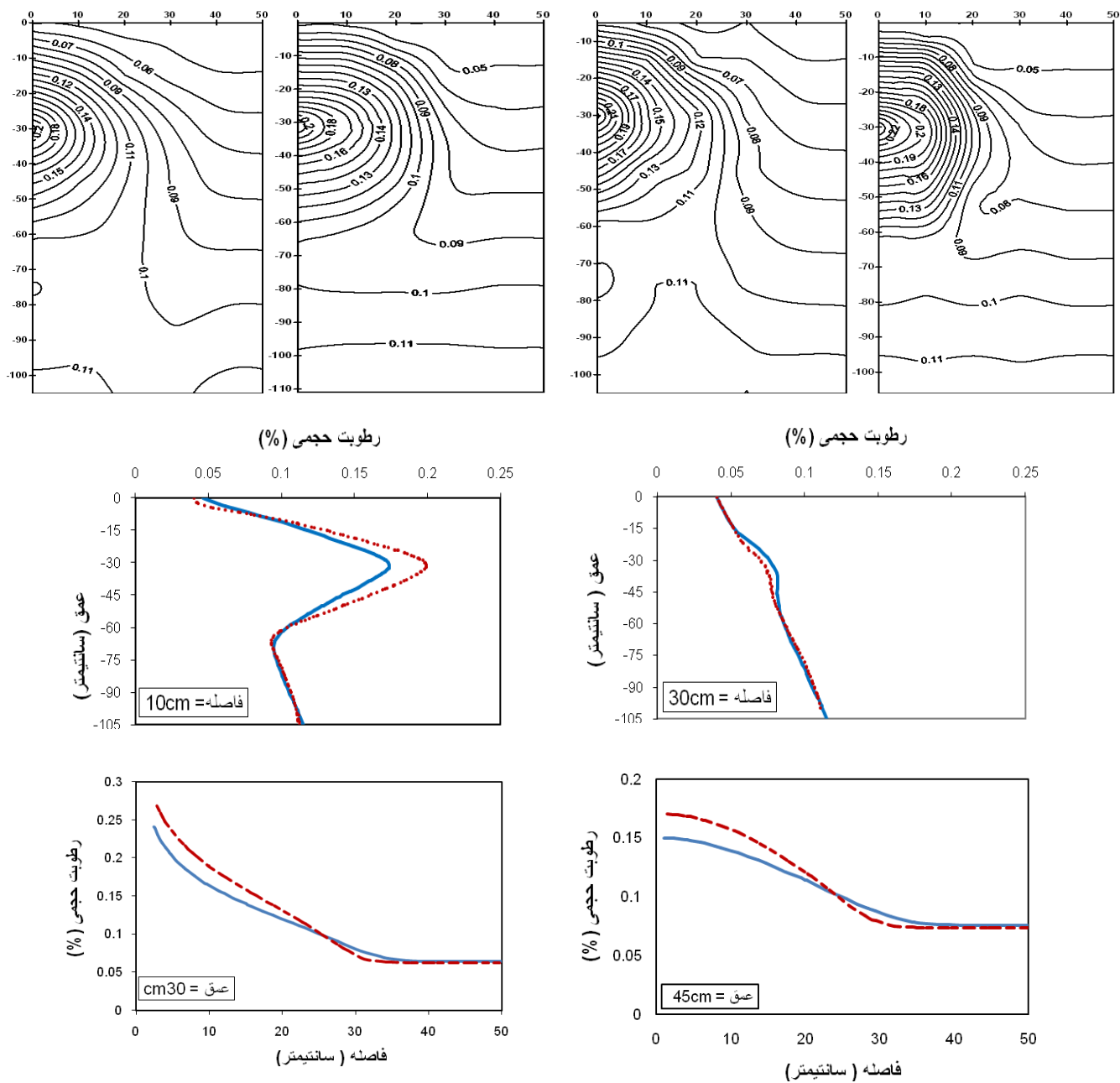
شکل ۱- مقایسه ی درصد های رطوبت شبیه سازی شده و مشاهداتی در زمانهای ۱/۵ و ۶ ساعت هنگام آبیاری ، و ۲۴ و ۹۶ ساعت بعد از آبیاری (• مقادیر مشاهداتی، — مقادیر شبیه سازی شده).

جدول ۴- تحلیل آماری مقایسه ی اعداد اندازه گیری و شبیه سازی شده.

زمان (hr)	RMSE	ME	$R^2$
۱/۵	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۱۲	۰/۹۲
۶	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۵۴	۰/۹۴
۲۴	۰/۰۱۹۲	۰/۰۱۸۱	۰/۸۲
۹۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸۵	۰/۹۳



شکل ۲- مقایسه ی درصد های رطوبت شبیه سازی و مشاهداتی در عمقهای ۱۵ و ۴۵ سانتیمتری، و در زمانهای ۱/۵ و ۶ ساعت هنگام آبیاری، و ۲۴ و ۹۶ ساعت بعد از آبیاری (♦ مقادیر مشاهداتی، — مقادیر شبیه سازی شده)



شکل ۳- مقایسه ی تاثیر بده بر الگوی رطوبت در فواصل ۱۰ و ۳۰ سانتیمتری از قطره چکان و ۳۰ و ۴۵ سانتیمتری از سطح خاک ( - - - بده ی ۴ لیتر بر ساعت، — بده ی ۲ لیتر بر ساعت)



ژرفای خیس شدگی در زیر قطره چکان به ترتیب ۳۵ و ۳۱ سانتی متر، و ارتفاع گسترش رطوبت در بالای قطره چکان نیز به ترتیب ۲۲ و ۲۰ سانتی متر می باشد.

این داده‌ها با نتایج به دست آمده از مطالعات المالوگلو و دیامنتو (۲۰۰۹) و همچنین کوت و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت داشت، اما با داده‌های به دست آمده از یافته‌های برسلر (۱۹۷۸) مبنی بر این که افزایش در بده خروجی منتج به افزایش مؤلفه‌ی عمودی ناحیه‌ی خیس شده می‌گردد، هماهنگ نیست. این تفاوت ممکن است مربوط به بده‌ی به کار رفته به وسیله‌ی آنها (دامنه وسیعی از بده‌ی بین ۲۰-۴ لیتر بر ساعت) و ویژگی‌های آبی خاک باشد؛ بنابراین، گسترش افقی رطوبت به ازاء بده‌ی کمتر ممکن است منجر به افزایش فاصله لوله‌های فرعی از یکدیگر و کمتر شدن هزینه نصب سامانه گردد. اما این نتیجه اشاره بر یک پیامد ممکن بر الگوی تجمع املاح بین ردیف‌های کشت دارد، که می‌تواند بر الگوی به کار رفته برای شستشوی املاح نیز تاثیر گذار باشد.

بر این اساس، تعیین فاصله‌ی قطره‌چکانها و ژرفا کارگذاری لوله‌های فرعی بدون در نظر گرفتن الگوی توزیع رطوبت ایجاد شده اطراف قطره چکانها به ازاء بده‌ی مورد نظر، منطقی نیست.

### تأثیر میزان تبخیر بر الگوی رطوبت

تأثیر کاربرد خاکپوش پلاستیکی در سطح خاک بر کاهش اندازه تلفات آب از طریق تبخیر، و همچنین توزیع رطوبت در خاک در سه زمان (انتهای آبیاری، ۲۴ و ۹۶ ساعت پس از پایان آبیاری) در شکل ۴ نشان داده شده است. بر پایه‌ی مشاهده‌ها، مقدار تلفات آب از طریق تبخیر در انتهای زمان آبیاری بسیار اندک بود، و تأثیر خاکپوش بر توزیع رطوبت در این زمان ناچیز بود. اما با گذشت زمان ۲۴ تا ۹۶ ساعت از پایان آبیاری، تبخیر از سطح خاک رطوبت را تا ژرفا ۳۰ سانتی متری تحت تاثیر قرار می داد، که این روند تغییرات از سطح خاک به پایین حالت نزولی به خود می گیرد. نتایج حاصل از آزمایشهای صحرایی با تخمینهای نرم افزار HYDRUS-2D جهت بررسی توانایی آن در شبیه سازی توزیع رطوبت، با در نظر گرفتن وجود تبخیر از سطح خاک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۴). از شکل ۴ واضح است که میزان رطوبت

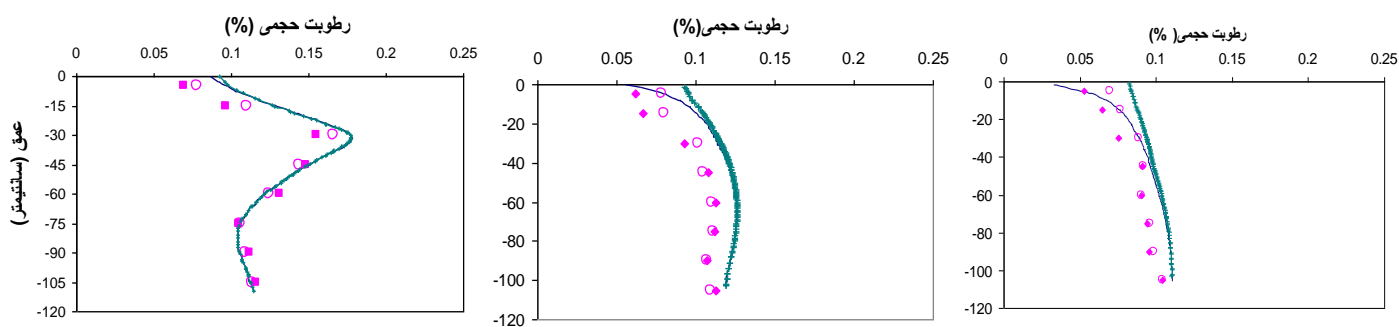
### تأثیر میزان خروجی قطره چکان بر الگوی رطوبت

توزیع‌های درصد رطوبت و نقشه‌های خطوط تراز برای دو قطره‌چکان با بده‌های ۲ و ۴ لیتر بر ساعت در شکل ۳ داده شده‌اند. جهت به کمیت در آوردن تأثیر مقدار خروجی قطره چکان بر الگوهای رطوبتی، شکل ۳ درصد رطوبت را به صورت تابعی از فاصله‌ی شعاعی در ژرفای ۳۰ و ۴۵ سانتی متر، و تابعی از فاصله‌ی عمودی در فواصل ۱۰ و ۳۰ سانتی متری از قطره چکان به ازاء حجم ثابت ۶ لیتر به دست می‌دهد.

تفاوت‌های اصلی در توزیع دو بعدی شبیه‌سازی شده از درصد رطوبت در پایان آب آبیاری برای هر دو بده مربوط به میزان گسترش ناحیه رطوبتی ایجاد شده می‌باشد. افزایش بده فقط بر درصد رطوبت نقاط نزدیک به قطره‌چکان افزود و باعث ایجاد ناحیه‌ی تقریباً اشباعی در اطراف قطره چکان گردید؛ این در حالی است که درصد رطوبت این نقاط با کاهش بده کاستی یافته و ناحیه‌ی اشباع در اطراف قطره چکان به ازاء این مقدار بده به وجود نیامده است. از سوی، طبق رابطه  $V=Qt$ ، وقتی که از اندازه ثابت آب آبیاری استفاده می شود اندازه  $V$  ثابت است و بنابراین باید اندازه  $Qt$  نیز ثابت بماند. با کاهش بده‌ی قطره چکان ( $Q$ ) برای ثابت ماندن حجم باید زمان ( $T$ ) افزایش یابد. بر این اساس، قطره چکان با بده‌ی ۴ لیتر بر ساعت باید حجم آبیاری ۶ لیتر را در زمان کوتاه ۱/۵ ساعت به خاک تحویل دهد؛ در نتیجه، آب نمی‌تواند با سرعتی بسنده به خاک مجاور نفوذ کند؛ بنابراین، اطراف قطره چکان جمع شده و ناحیه‌ی تقریباً اشباعی را ایجاد می‌کند. این در حالی است که قطره چکان با بده‌ی کمتر همان اندازه آب را در بازه‌ی زمانی بیشتر ۳ ساعت به خاک تحویل می‌دهد، بنابراین، به خوبی در خاک نفوذ کرده و اجازه‌ی پخش عمودی و افقی رطوبت در منطقه‌ی خیس شده داده می‌شود، البته با درصد رطوبت پایینتر. بنابراین، زمانی که میزان خروجی کاهش می‌یابد، گسترش جبهه رطوبت در تمامی جهات فزونی می‌گیرد. این مطلب در نمودارهای موجود در شکل ۳ نیز مشهود است، به طوری که در حجم ثابت ۶ لیتر، شعاع خیس شدگی به‌ازاء بده‌ی ۲ و ۴ لیتر به ترتیب ۳۶ و ۳۴ سانتی‌متر،

رطوبت در خاک به دلیل آبیاری چند روز قبل افزایش یافته بود، مشهودتر است. رطوبت به صورت یکنواخت در خاک انتشار یافته، و اگر سطح خاک بدون پوشش باشد، به دلیل اختلاف مکش ایجاد شده در سطح، و عمق کارگزاری قطره چکانها که بیشترین رطوبت را دارا می باشند، مقادیر قابل توجهی از رطوبت به سمت بالا و سطح خاک حرکت کرده و به صورت تبخیر از ناحیه ریشه خارج می گردد. بنابراین کاربرد خاکپوش پلاستیکی بر سطح خاک می تواند موجب نگهداشت رطوبت و توزیع یکنواخت تر رطوبت گردد.

خاک برآورد شده با کاربرد شبیه مشابه شرایط واقعی حاکم در مزرعه در دو حالت خاکپوش و بدون آن (با تبخیر و بدون تبخیر) می باشد. شبیه نیز همانند شرایط موجود در مزرعه، بر میزان هدر رفت رطوبت از سطح خاک تا عمق ۳۰ سانتی متری، در شرایطی که سطح خاک بدون پوشش می باشد، اشاره دارد. توزیع مجدد رطوبت منجر به حرکت رطوبت در جهات مختلف در خاک می گردد، که این حرکت به سطح خاک نیز قابل توجه است، لذا، در خاکهای درشت بافت نیز مقادیری از رطوبت موجود در خاک به سمت سطح خاک حرکت کرده و بخار می گردد. این مطلب در روزهای ابتدایی پس از آبیاری، که درصد



شکل ۴ - مقایسه ی تاثیر خاکپوش بر الگوی رطوبت به ازاء کاربرد بده ی ۲ لیتر بر ساعت (شبیه با خاکپوش +، مشاهده بدون خاکپوش ■، مشاهده با خاکپوش ○. مدل بدون مالچ —)

کاهش سرعت حرکت آب در خاک شد. درحالی که کاهش بده (بده ی ۲ لیتر بر ساعت) علاوه بر این که ناحیه ی مرطوب بزرگتری را در اطراف قطره چکان ایجاد می کند، منجر به توزیع یکنواخت تر رطوبت در خاک می گردد، که با افزایش فاصله ی لوله های فرعی کمک به کاهش هزینه های نصب سامانه خواهد کرد.

تاثیر وجود خاکپوش در سطح خاک در حین آبیاری بر الگوی توزیع رطوبت در خاک بسیار ناچیز است، اما پس از آبیاری می تواند هدر رفتن رطوبت موجود را حداقل تا عمق ۳۰ سانتی متری از سطح خاک، بکاهد. خاکپوش با ثابت نگه داشتن تغییرات رطوبت در لایه های سطحی، کاهش اختلاف توان نقاط را بین سطح و ژرفا خاک موجب می گردد.

## نتیجه گیری

در این تحقیق دقت شبیه سازی نرم افزار HYDRUS-2D در برآورد حرکت و توزیع رطوبت تحت سامانه ی آبیاری قطره ای زیر سطحی در یک خاک شنی ارزیابی شد. همچنین، چگونگی تأثیر فراسنجهای مختلف، همچون مقادیر آبدهی قطره چکانها و کاربرد خاکپوش به عنوان متغیرهای تاثیر گذار بر الگوی رطوبتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که:

- ۱- توزیع رطوبت پیش بینی شده با کاربرد نرم افزار HYDRUS-2D برازش خوبی با داده های اندازه گیری شده در شرایط مزرعه دارد ( $R^2=0.92$ ).
- ۲- افزایش آبدهی قطره چکانها (۴ لیتر بر ساعت) منجر به ایجاد ناحیه ی تقریباً اشباعی در اطراف قطره چکان، و

**References:**

1. Abouzeid, G., Watanabe, K., Ashour, M., Ali, N. and Mohamed, A. 1997. Two-dimensional radial flow pattern under trickle irrigation subjected to evaporation. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*. 41:61-66.
2. Acar, B., Topak, R. and Mikailsoy, F. 2009. Effect of applied water and discharge rate on wetted soil volume in loam or clay-loam soil from an irrigated trickle source. *African Journal of Agricultural Research*. 4: 049-054.
3. Assouline, S. 2002. The effects of micro drip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *J. S.S.A.* 66:1630-1636.
4. Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *J. Irrig. Sci.* 1: 3-17.
5. Cook, F.J., Fitch, P., Thorburn, P.J., Charlesworth, P.B. and Bristow, K.L. 2006. Modeling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental modeling & software*. 21: 1353-1359.
6. Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.L. and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *J. Irrig. Sci.* 22: 143-156.
7. Elmaloglou, S.r. and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line source. *J. Agri. water Manag.* 96: 1587-1595.
8. IMKO Company. 1998. User's Manual, moisture measuring systems for soil science. 1-24.
9. Kandelous, M.M. and Simunek, J. 2010a. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *J. Agri. water Manag.* 97: 1070-1076.
10. Kandelous, M.M. and Simunek, J. 2010b. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *J. Irrig. Sci.* 97:1070-1076.
11. Lazarovitch, N., Simunek, J. and Shani, V. 2005. System-dependent boundary condition for water flow from subsurface source. *J. Soil. Soc. Am.* 69: 46-50.
12. Patel, N., and Rujput, T.B.S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *J. Agri. water Manag.* 95: 1335-1349.
13. Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D Simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *J. Irrig. and Drain.* 133: 342-349.
14. Simunek, J., Van Genuchten, M.T. and Sejna, M. 2008. Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages. *Numerical Modeling of Hydrodynamics for Water Resources-Garcia-Navarro & Playan.* 95-115.
15. Simunek, J., Sejna, M. and Van Genuchten, M.T. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0. Rep. IGCWMC-TPS-53, p 251, Int. Ground Water Model. Cent., Colo. Sch. of Mines, Golden, CO.
16. Siyal, A.A. and Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulation soil wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *J. Agri. Water Manag.* 96: 893-904.
17. Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J. and Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip

irrigation with experimental  
observations. J. Irri. Drain. Eng. 4:  
304-310.

18. Willmott, C.J. 1982. Some comments  
on the evaluation of model  
performance, Bull. Am. Meteorol.  
Soc. 63:1309-1313.