

## شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D

### \*خلیل اژدری

استادیار گروه مهندسی آب و خاک دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۸۵/۹/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۱/۲۴

### چکیده

آبیاری قطره‌ای مؤثرترین روش آبیاری سبزیجات می‌باشد. تحقیق حاضر برای بررسی نحوه توزیع رطوبت به صورت عمودی و افقی در ناحیه ریشه گیاه ترب و مشخص کردن مقدار آبخوبی عمقی از طریق مدل کردن محیط ناحیه ریشه صورت گرفت. در این تحقیق داده‌های حاصل از تجزیه‌های آزمایشگاهی و صحرایی در اجرای برنامه مدل HYDRUS-2D استفاده شد. این مدل دارای توانایی شبیه‌سازی بالایی است. نتایج حاصل از مدل فوق نشان داد که با انتخاب دور مناسب آبیاری (۴۸ ساعت در این تحقیق) و آبدهی مناسب قطره‌چکان، در تمام طول فصل زراعی رطوبت خاک در ناحیه ریشه در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته شده و کاهش آن در طول ۴۸ ساعت تدریجی بوده و رطوبت لازم برای گیاه در حد مطلوب نگه داشته می‌شود. نتایج مربوط به نفوذ عمقی آب نشان داد که میزان آب خارج شده از مرز انتهایی محدوده مدل شده که به‌عنوان مرز زهکشی آزاد می‌باشد در مقایسه با کل حجم آب به‌کار رفته در دوران رشد گیاه بسیار کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشد و مقدار آن ۰/۰۵ درصد بوده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، آبیاری قطره‌ای، HYDRUS-2D

### مقدمه

مرطوب ساخته، در صورتی که سیستم درست طراحی شود به خارج از آن زهکشی نمی‌کند. طراحی درست این سیستم نیاز به اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک به صورت افقی و عمودی دارد این نوع اطلاعات در انتخاب اندازه قطره‌چکان مؤثر بوده و در چگونگی تنظیم شدت جریان خروجی از آن نقش مهمی دارد. همچنین این نوع اطلاعات در به حداقل رساندن میزان نفوذ عمقی سیستم تأثیر می‌گذارد. لوبانا و ناردا (۱۹۹۸) نشان داده است که انتخاب درست تعداد قطره‌چکان تابعی است از بافت و ساختمان خاک، دبی قطره‌چکان و مقدار آب پخش شده در خاک. جیوشینگ و

آبیاری قطره‌ای مؤثرترین روش آبیاری برای سبزیجات و باغات می‌باشد. این روش امروزه در همه نقاط جهان به‌خاطر مزایای خاص خود مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر این روش آبیاری به صورت درست طراحی و اجرا شود مقدار آب مورد نیاز گیاه را به موقع و در حد کافی در ناحیه ریشه گیاهی ذخیره نموده و از هدر رفتن آن جلوگیری می‌کند. در این روش آب خروجی از قطره‌چکان فقط ناحیه مربوط به محیط فعالیت ریشه را

\* - مسئول مکاتبه: azhdary 2005@yahoo.com

نتیجه رسید که برای طراحی درست یک سیستم کود آبیاری و آبیاری قطره‌ای اطلاع از پارامترهای هیدرولیکی خاک بسیار ضروری است و شناسایی این پارامترها از طریق مدل‌های رایانه‌ای پیشرفته مثل HYDRUS-2D درجه اطمینان مطالعات را بالا می‌برد. روول و همکاران (۱۹۹۷) بیان کردند که مدل‌های توسعه یافته شرایط دینامیکی آبیاری قطره‌ای را با در نظر گرفتن مرزهای ساده شبیه‌سازی می‌نمایند.

هدف از این تحقیق بررسی الگوی توزیع آب در سیستم کود آبیاری در زمان‌های مختلف پس از آبیاری به روش مدل‌سازی است که در آن جریان آب توسط قطره‌چکان‌های سیستم آبیاری قطره‌ای صورت می‌گیرد. همچنین هدف دیگر برآورد میزان آب نشت یافته از این سیستم به خارج از ناحیه ریشه گیاه توسط مدل HYDRUS-2D می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

مزرعه آزمایشی این تحقیق که گیاه ترب در آن کشت شد بخشی از مزرعه انستیتو تحقیقات کشاورزی پوسا (هند) می‌باشد که دارای عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۷۷ درجه و ۸ دقیقه، ۴۵ ثانیه تا ۷۷ درجه و ۱۰ دقیقه و ۲۴ ثانیه شرقی است. این تحقیق در سال ۲۰۰۵ در زمینی به وسعت ۱۳۲ مترمربع صورت گرفت. در مزرعه مربوطه، گیاه ترب وارپته پوسا به فاصله ۱۵ در ۳۰ سانتی‌متر کاشته شد و هر دو ردیف گیاه را یک لترال سیستم قطره‌ای آبیاری می‌کرد. شکل ۱ مزرعه مورد نظر را با سیستم آبیاری قطره‌ای نشان می‌دهد. مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است. حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم توسط دستگاه صفحات فشاری (۵ بار و ۱۵ بار) اندازه‌گیری شد. دستگاه ۵ بار مقدار مکش را بین ۰/۱ تا ۵ بار اندازه‌گیری کرد و حد ظرفیت مزرعه در ۰/۳۳ بار اندازه‌گیری گردید. همچنین،

همکاران (۲۰۰۳) گزارش داده‌اند که حرکت آب در اثر یک منبع نقطه‌ای (قطره‌چکان) به نفوذپذیری خاک و شدت جریان بستگی دارد. پیترو و همکاران (۲۰۰۳) به این نتیجه رسیدند که در آبیاری قطره‌ای برای بهبود بازده مصرف آب و ماده‌غذایی بایستی بین فاصله قطره‌چکان‌ها، شدت جریان، مشخصات رطوبتی خاک و مدت زمان آبیاری هم‌خوانی مناسب وجود داشته باشد. روحی و همکاران (۲۰۰۶) با تنظیم برنامه آبیاری گیاه گلا دیول توسط آبیاری قطره‌ای به این نتیجه رسیدند که استفاده از این سیستم مناسب است اما داشتن اطلاعات مربوط به الگوی توزیع آب در خاک در اثر این سیستم ضروری است. متین و همکاران (۲۰۰۶) نیز روی گیاه لفل به چنین نتیجه‌ای رسیده‌اند.

کوت و همکاران (۲۰۰۳) یافتند که معیارهای طراحی مشخص که بتواند سیستم‌های آبیاری قطره‌ای را در ارتباط با خواص هیدرولیکی خاک مدیریت نماید وجود ندارد. برای ارائه الگوهای مدیریت مناسب در مزرعه و برای تحقیق در مورد نحوه توزیع جریان آب و ماده‌غذایی در خاک بدون مدل‌سازی محیط فعالیت ریشه آزمایش‌های وسیع مزرعه‌ای با خاک‌های متفاوت و شدت جریان‌های متفاوت قطره‌چکان جوابگو نبوده، کار وقت‌گیر و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. اگر چنانچه مدل کالیبره شده‌ای در این مورد بکار گرفته شود از اتلاف وقت و سرمایه جلوگیری خواهد کرد.

سینگ و همکاران (۲۰۰۶) با شبیه‌سازی حرکت آب توزیع شده از قطره‌چکان‌های زیرزمینی به این نتیجه رسیدند که بدون مدل‌سازی محیط اطراف قطره‌چکان، اطلاعات به‌دست آمده از نحوه توزیع رطوبت در خاک برای مدیریت سیستم آبیاری کافی نیست. روفائل و همکاران (۲۰۰۶) با مقایسه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرزمینی با به‌کارگیری آب شور و شیرین گزارش داده‌اند که استفاده از مدل‌های رایانه‌ای در اخذ نتایج درست حرکت آب در خاک بسیار مؤثر می‌باشد. اژدری (۲۰۰۵) با مدل‌سازی در سیستم کود آبیاری با کشت پیاز به این

جریان محلول را در محیط متخلخل حل می‌کند. معادله جریان بخشی به نام ترم جذب آب توسط گیاه می‌باشد. این مدل معادله حرکت املاح را در حالت غیرخطی و غیرتعادلی برای فازهای جامد و مایع حل می‌کند همچنین، مدل فوق برای تشابه‌سازی حرکت آب و املاح در حالت غیراشباع، نیمه‌اشباع و اشباع کامل در محیط متخلخل به‌کار می‌رود. این مدل می‌تواند جریان آب و املاح را در یک صفحه افقی و عمودی و به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نماید.

مدل مذکور در حل معادله جریان و انتقال املاح شرایط مرزی مناسبی را در ارتباط با اتمسفر و بخش زهکش در نظر می‌گیرد.

جریان دوبعدی آب در محیط متخلخل که از طریق قطره‌چکان آبیاری قطره‌ای توزیع می‌گردد توسط معادله ریچاردز بیان شده است که فرم تغییر شکل یافته آن به‌صورت زیر است:

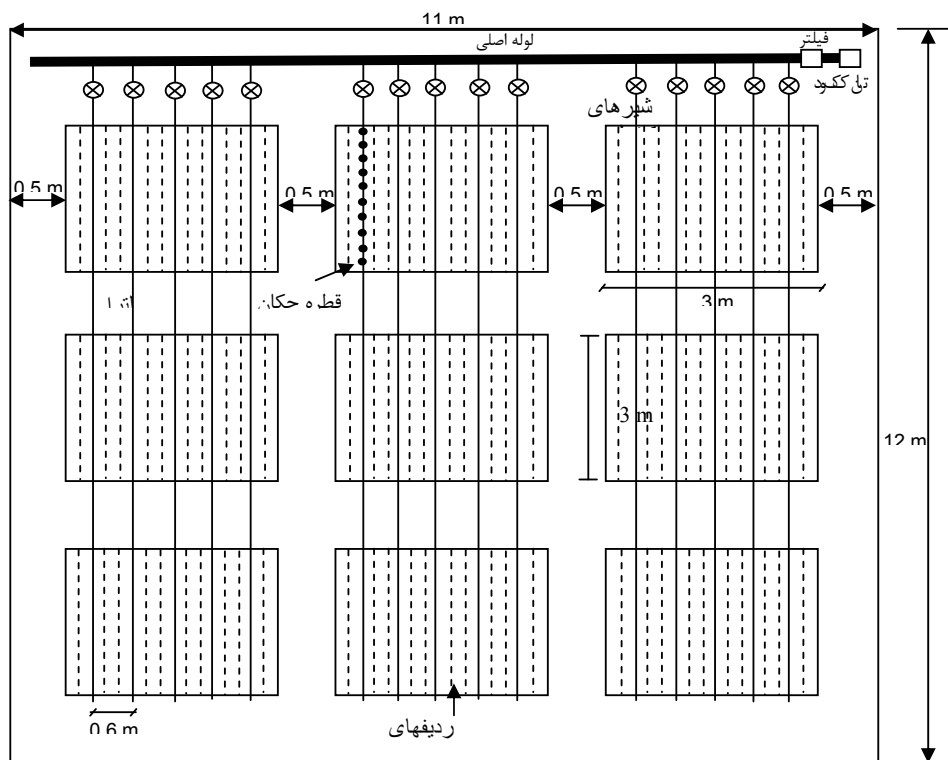
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ K(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right\} + \frac{K(h)}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right\}$$

ضریب نفوذپذیری به روش بار ثابت و بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین گردید.

دبی قطره‌چکان‌های سیستم آبیاری قطره‌ای در این تحقیق ۴ لیتر در ساعت بود و دور آبیاری باتوجه به شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه و گیاه مورد نظر و با اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک و در نظر گرفتن ظرفیت مزرعه ۴۸ ساعت انتخاب شد.

اقلیم منطقه نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد با متوسط درجه حرارت سالانه ۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد در این منطقه ماه‌های می و ژوئن گرمترین و ماه ژانویه سردترین ماه سال می‌باشد که متوسط درجه حرارت آن ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارندگی این منطقه ۷۱۰ میلی‌متر در سال می‌باشد که ۷۵ درصد آن در فواصل زمانی بین ماه‌های ژوئن تا سپتامبر صورت می‌گیرد.

**شرح مدل HYDRUS-2D:** این مدل یک مدل عناصر محدود است که معادله ریچاردز را برای جریان آب به‌صورت اشباع در محیط متخلخل و همچنین معادله



شکل ۱- شمایی از مزرعه تحقیقاتی با سیستم آبیاری قطره‌ای.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد آزمایش.

عمق (سانتی‌متر)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	بافت خاک	ضریب نفوذپذیری (سانتی‌متر در ساعت)	جرم مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	FC (درصدحجم)	PWP (درصدحجم)
۰-۱۵	۲۰	۱۲	۶۸	لوم رسی شنی	۱/۲۴	۱/۵۸	۲۱/۰۳	۸/۱۱
۱۵-۳۰	۲۲	۱۰	۶۸	لوم رسی شنی	۱/۴۲	۱/۶۰	۲۳/۵۰	۹/۲۵
۳۰-۴۵	۲۳	۲۱	۵۶	لوم رسی شنی	۰/۹	۱/۶۰	۲۳/۵۵	۱۰/۱۶

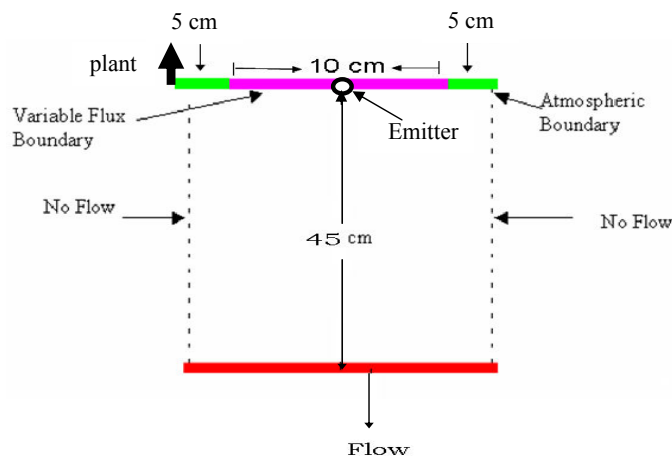
تحقیق مدل واقعی تعریف شده به صورت شکل ۲ می‌باشد. این شکل محدوده مدل شده را نشان می‌دهد که عبارت است از استوانه‌ای به شعاع ۱۵ سانتی‌متر و به ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر که منبع جریان در ۱۰ سانتی‌متری وسط قاعده آن قرار گرفته است و به صورت یکنواخت عمل می‌کند. در این محدوده فرض بر این است که از جوانب جریان صورت نگرفته و مرز انتهایی مرز زهکشی آزاد می‌باشد.

شرایط اولیه و شرایط مرزی تعریف شده به مدل: شرایط اولیه توزیع آب در خاک عبارت بود از: مقدار آب موجود در خاک قبل از اعمال اولین آبیاری در زمین که برای لایه‌های مختلف مقدار آن اندازه‌گیری و محاسبه گردید. در این خصوص ۳ لایه با میزان رطوبت متفاوت مطابق با شرایط موجود به صورت ۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۵۴ سانتی‌متر به مدل معرفی شد. یک نوع شرط مرزی جریان با به‌کارگیری حجم ثابت آب ورودی از طریق قطره چکان واقع در مرکز محدوده مدل شده تعریف گردید، به طوری که در زمان‌های غیرآبیاری مقدار دبی

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی،  $h$  ارتفاع فشاری آب،  $t$  زمان،  $r$  فاصله شعاعی از محل قطره‌چکان،  $Z$  مختصات عمودی و  $k$  ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌باشد. این مدل معادله فوق را با به‌کارگیری روش خطی عناصر محدود نوع Galerkin به صورت عددی حل می‌کند. جزئیات کامل این مدل در منوال تخصصی مربوط به این مدل آمده است (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹).

هدف اصلی از این تحقیق مطالعه جریان آب در اثر سیستم آبیاری قطره‌ای در لایه‌های مختلف خاک در یک مزرعه تحت کشت گیاه ترب بوده است و این مطالعه بر مبنای تجزیه و تحلیل‌های ناشی از نتایج اجرای مدل HYDRUS-2D صورت گرفت که شکل‌های ۵ تا ۹ نمونه‌ای از نتایج اجرای مدل فقط برای مدت یک هفته با سه بار آبیاری قطره‌ای می‌باشد. در مطالعات مدل‌سازی تعریف مدل واقعی برای یک نرم‌افزار شبیه‌ساز مثل مدل فوق بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

مدل واقعی تعریف شده به HYDRUS-2D در این



شکل ۲- مدل واقعی تعریف شده برای HYDRUS-2D

اجرای HYDRUS-2D ضروری می‌باشد. در این جدول  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده خاک و  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک و  $n$  و  $\alpha$  ضرایب مربوط به توابع هیدرولیکی خاک هستند که مستقیماً توسط شبکه عصبی تخمین زده می‌شوند و  $K_s$  ضریب نفوذپذیری خاک در حالت اشباع می‌باشد.

در این تحقیق تبخیر و تعرق براساس روش طشتک تبخیر با داشتن ضرایب محلی طشتک محاسبه گردید. یکی از مشخصات این مدل آن است که به میزان تبخیر و تعرق محیط گیاهی به صورت جداگانه نیاز دارد. تفکیک تبخیر و تعرق براساس روش فدس و همکاران (۱۹۷۸)، گدرین (۱۹۷۷) و ریتچی (۱۹۷۲) انجام شد. در این تحقیق مقدار تعرق بر مبنای مدل به کار گرفته شده توسط افراد فوق از مقدار تبخیر و تعرق جدا گردید. جدول ۳ شرایط مرزی زمانی متغیر را برای مدل HYDRUS-2D نشان می‌دهد. این جدول برای مدت یک هفته می‌باشد که سه بار آبیاری در آن صورت گرفته است.

قطره‌چکان صفر در نظر گرفته شد و مدل HYDRUS-2D شرط مرزی زمانی متغیری را نیز نیاز دارد که طبق برنامه اجرای آبیاری قطره‌ای به صورت یک روز در میان این جدول زمانی به مدل معرفی گردید. شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است. طرف راست و چپ محیط مدل شده مرزهای بدون جریان هستند زیرا قطره‌چکان‌ها نسبت به این مرز تقارن دارند و محدوده اثر قطره‌چکان‌ها تا این مرز می‌باشد، سطح خاک به عنوان مرز ورود آب و مرز انتهای به عنوان مرز زهکشی یا نفوذ عمقی در نظر گرفته شده است.

**پارامترهای هیدرولیکی خاک:** پارامترهای هیدرولیکی خاک که برای HYDRUS-2D مورد نیاز می‌باشد در جدول ۲ آمده است. این پارامترها توسط مدل ROSETTA تعیین شده‌اند که خود مدلی است واقع شده در داخل HYDRUS-2D و براساس شبکه عصبی کار می‌کند و پس از اخذ داده‌های مربوط به بافت خاک، درصد ذرات دانه‌بندی، درصد رطوبت در حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم، پارامترهای هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند. مقدار عددی این پارامترها برای

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی خاک تولید شده توسط مدل HYDRUS-2D

لايه های خاک	n	$\alpha$	$\theta_s$	$\theta_r$	$K_s$ (cm/h)
۱	۱/۴۲۰۲	۰/۰۰۷۹	۰/۳۷۴۱	۰/۰۴۰۴	۱/۰۹
۲	۱/۴۷۳۶	۰/۰۰۵۹	۰/۳۷۴۹	۰/۰۳۹۵	۰/۷
۳	۱/۵۲۵۲	۰/۰۰۴۸	۰/۳۶۰۶	۰/۰۳۳۷	۱/۳۹

جدول ۳- شرایط مرزی زمانی متغیر داده شده به مدل برای مدت یک هفته.

زمان (ساعت)	بارندگی (سانتی متر بر ساعت)	تبخیر (سانتی متر بر ساعت)	تعرق (سانتی متر بر ساعت)	بار هیدرولیکی خاک (سانتی متر)	شدت جریان توزیع شده (سانتی متر بر ساعت)
۰/۱۶۶	۰	۰/۰۰۴۱۹	۰/۰۰۰۰۶۳	۱۰۰۰۰	-۱/۲۷
۰/۳۳	۰	۰/۰۰۴۱۹	۰/۰۰۰۰۶۳	۱۰۰۰۰	-۱/۲۷
۴۸	۰	۰/۰۰۴۴۳	۰/۰۰۰۰۶۷	۱۰۰۰۰	۰
۴۸/۳۳	۰	۰/۰۰۱۹۷	۰/۰۰۰۰۳۰	۱۰۰۰۰	-۱/۲۷
۹۶	۰	۰/۰۰۲۷۱	۰/۰۰۰۰۴۱	۱۰۰۰۰	۰
۹۶/۳۳	۰	۰/۰۰۳۹۴	۰/۰۰۰۰۶۰	۱۰۰۰۰	-۱/۲۷
۱۶۸	۰	۰/۰۰۵۱۷	۰/۰۰۰۰۷۸	۱۰۰۰۰	۰

رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل می‌باشد و تفاوت زیادی بین آنها مشاهده نمی‌شود. از این شکل پیداست که حداقل میزان رطوبت در هر دو مورد نزدیک مقدار رطوبت در حد ظرفیت مزرعه می‌باشد. رطوبت خاک در اعماق مختلف به‌روش وزنی تعیین گردید. ضرایب همبستگی  $R^2$  مربوط به رطوبت به‌دست آمده از مدل و مقادیر آزمایش عملی بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۸ بوده است. برای اطمینان از نتایج اجرای مدل خطای متوسط مجذور مربعات RMSE نیز محاسبه گردید تا توانایی شبیه‌سازی مدل مشخص گردد. مقادیر RMSE برای دو نقطه محل قطره‌چکان و ۱۵ سانتی‌متری آن در جدول ۴ آمده است. مقادیر این جدول نشان می‌دهد که خطای حاصله بسیار پایین بوده و نشان از توانایی بالای مدل جهت انجام شبیه‌سازی می‌باشد.

پس از کالیبراسیون مدل، نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در زمان‌های مختلف بعد از آبیاری مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۵ نمونه‌ای از نتایج این قسمت را نشان می‌دهد. در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر از سطح خاک مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت در فواصل زمانی ۴، ۲۴ و ۴۸ ساعت بعد از آبیاری مشابه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل می‌باشد (جدول ۵). این مدل جهت تشابه‌سازی توزیع آب در خاک از طریق سیستم کود آبیاری مدل مناسبی می‌باشد.

ستون آخر این جدول جریان ثابتی است که به مدل معرفی گردیده و بیان‌کننده بخش شدت جریان سطحی به شعاع ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد و علامت منفی به مفهوم حرکت آب در محیط مدل شده می‌باشد و صفر در این ستون به مفهوم نبودن جریان (زمان‌های غیرآبیاری) می‌باشد. لازم به یاد آوری است مدل غلظت املاح توزیع شده را به‌صورت میلی‌گرم در میلی‌لیتر می‌پذیرد و بار هیدرولیکی را با توجه به اطلاعات قبلی خود تخمین می‌زند.

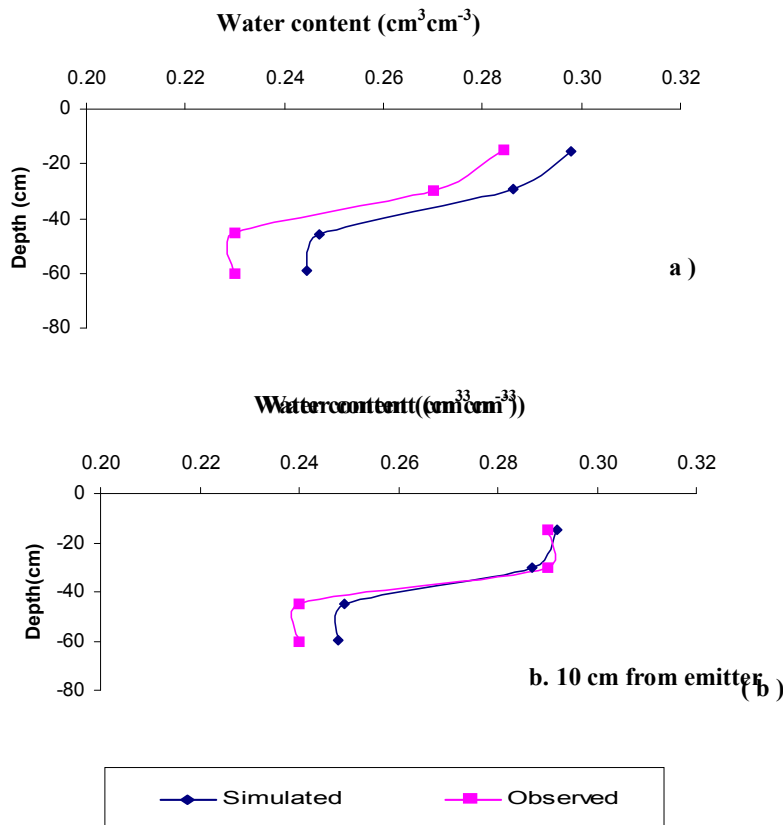
**کالیبره کردن مدل HYDRUS-2D:** این مدل برای آنالیز جریان آب در ناحیه ریشه گیاه ترب کالیبره گردید و با مقادیر رطوبت موجود در خاک که از طریق اندازه‌گیری‌های عملی به‌دست آمده بود مورد مقایسه قرار گرفت. برای کالیبره کردن مدل بیشتر از داده‌های مربوط به آزمایش‌های صحرائی و یا آزمایشگاهی و در اندکی از موارد از منابع معتبر استفاده گردید. مدل برای مقادیر ضریب نفوذپذیری مربوط به لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۴۵ سانتی‌متری کالیبره گردید. نتایج حاصل از کالیبره شدن مدل نشان داد که این مدل براساس ضرایب نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در لایه‌های مختلف خاک جواب‌های منطقی می‌دهد. نتایج کالیبراسیون مدل برای توزیع جریان آب در ناحیه اطراف ریشه گیاه در شکل ۳ نشان می‌دهد مقادیر مشاهداتی بسیار نزدیک به مقادیر

جدول ۴- RMSE محاسبه شده برای مقادیر آب خاک مشاهداتی و شبیه‌سازی شده.

نقاط مشاهداتی	RMSE (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
محل قطره‌چکان	۰/۰۱۷
۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان	۰/۰۱۵

جدول ۵- مقایسه مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده (درصد حجمی) با مقدار شبیه‌سازی شده بعد از عملیات کالیبراسیون در محل قطره‌چکان.

عمق (سانتی‌متر)	زمان بعد از آبیاری (ساعت)					
	۴		۲۴		۴۸	
	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی
۱۰	۲۴/۴	۲۴/۸	۲۶/۹	۲۷/۶	۳۰/۷	۳۰/۲
۲۰	۲۳/۵	۲۳/۷	۲۵/۴	۲۵/۱	۲۷/۱	۲۷/۶
۳۰	۲۲/۱	۲۲/۴	۲۲/۷	۲۳/۶	۲۵/۰	۲۴/۸
۴۰	۲۰/۵	۲۰/۰	۲۰/۸	۲۱/۴	۲۲/۲	۲۲/۳

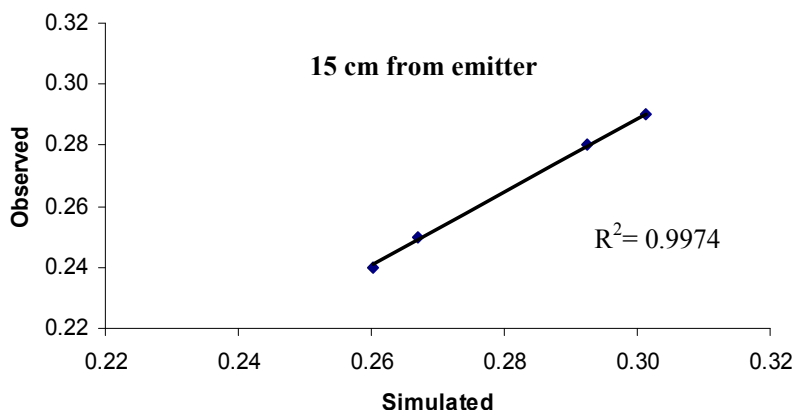


شکل ۳- مقایسه تغییرات رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نسبت به عمق خاک (الف) در راستای محل قطره‌چکان، (ب) در راستای فاصله ۱۰ سانتی‌متری از قطره‌چکان.

در این تحقیق این پارامتر توسط مدل HYDRUS-2D به‌طور دقیق محاسبه گردیده است. این مدل مجموع حجم آب خارج شده از طریق مرز زهکشی آزاد (مرز انتهایی) را محاسبه نموده و برای مدت زمان مشخصی مثلاً یک ماه یا کل دوره رشد گیاه آن را به‌صورت جدول در اختیار می‌گذارد. آنالیز حاصل از داده‌های مدل برای این قسمت از تحقیق نشان داد که از مجموع ۱۷۰ لیتر آب جریان یافته توسط یک قطره‌چکان در طول دوره رشد گیاه تنها ۹۰ سانتی‌مترمکعب یعنی ۰/۰۵ درصد آن در خاک لوم رسی شنی به خارج از ناحیه ریشه نفوذ عمقی نموده و از دسترس گیاه خارج شده است. این رقم نشان‌دهنده مقدار ناچیز نفوذ عمقی بوده و عملاً قابل چشم‌پوشی است.

**صحت‌سنجی مدل:** بعد از انجام کالیبراسیون مدل، جهت اطمینان از نتایج آن و اعتبار بخشیدن به نتایج مدل عملیات صحت‌سنجی انجام گرفت. در این عملیات برنامه مدل برای مدت زمان طولانی معادل کل دوره رشد گیاه (۱۲۰ روز) اجرا گردید. نمونه‌ای از نتایج این قسمت در شکل ۴ نشان می‌دهد که این مدل برای مدت زمان‌های طولانی نیز شبیه‌سازی توزیع آب را در خاک به‌طور مناسب انجام می‌دهد.

**نفوذ عمقی:** یکی از موضوع‌های مهمی که در طراحی یک سیستم آبیاری قطره‌ای باید به آن توجه نمود اطلاع از میزان نفوذ آب به خارج از ناحیه ریشه گیاه می‌باشد که عملاً به‌عنوان آب زهکشی محسوب شده و از ناحیه ریشه خارج می‌گردد. محاسبه دقیق این پارامتر ساده نبوده و از اهمیت خاصی برخوردار است.



شکل ۴- مقایسه مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده با مقدار شبیه‌سازی شده (درصد حجمی) ۱۲۰ روز پس از کاشت گیاه در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری خاک.

می‌دهد توزیع رطوبت آب در خاک به‌صورت افقی یکنواخت بوده و حداکثر مقدار آن ۲۸ درصد حجمی در سطح خاک می‌باشد و به ازای عمق روند کاهشی داشته است.

شکل ۵ - ب الگوی توزیع آب را در خاک نیم ساعت بعد از اولین آبیاری که از طریق قطره‌چکانی با شدت ۴ لیتر بر ساعت وارد خاک گردیده، نشان می‌دهد که حداکثر مقدار رطوبت در این فاصله زمانی در سطح خاک بوده و رطوبت موجود بیشتر قسمتی از ناحیه اول (۵ سانتی‌متر عمق) را تحت تأثیر قرار داده و رطوبت را به بیشتر از ۳۵ درصد حجمی رسانده است. مقیاس این شکل نشان می‌دهد که اثر اولین آبیاری پس از نیم ساعت هنوز بیشتر از ۱۵ سانتی‌متر عمق خاک را تحت تأثیر قرار نداده و در عمق ۱۵ سانتی‌متری تغییرات کمی از رطوبت دیده می‌شود.

شکل ۶- ب نشان‌دهنده‌ی وضعیت توزیع رطوبت ۲ ساعت بعد از آبیاری می‌باشد. الگوی توزیع رطوبت در این زمان بیان‌کننده‌ی کاهش رطوبت در سطح خاک و افزایش تدریجی آن در لایه‌های پایین می‌باشد به‌طوری‌که ۲۴ ساعت بعد از آبیاری سطح خاک از نظر رطوبتی کاهش محسوسی داشته و لایه‌های پایین کاملاً روند افزایشی داشته‌اند. نکته حائز اهمیت در شکل ۶-الف این است که روند افزایش رطوبت از سطح خاک به طرف

## نتایج و بحث

نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق توسط مدل رایانه‌ای HYDRUS-2D آنالیز گردیده است. این مدل دارای توانایی بسیار بالای شبیه‌سازی جریان آب و مواد محلول در آب می‌باشد نمونه‌ای از این شبیه‌سازی‌ها برای جریان آب در شکل‌های ۵ تا ۹ آمده است. هر کدام از این شکل‌ها از دو قسمت بخش رنگی و معمولی تشکیل شده‌اند. قسمت رنگی هر شکل نتیجه حاصل از اجرای مدل برای فاصله زمانی مشخص است که آن زمان برای مدل تعریف گردیده است. به‌عنوان مثال شکل ۵ (قسمت رنگی) نشان‌دهنده‌ی محدوده مدل‌سازی شده است که دارای ۴۵ سانتی‌متر عمق و ۱۵ سانتی‌متر عرض می‌باشد. این محدوده مربوط به محیط فعالیت کشت گیاه ترب بوده که از سه لایه ۱۵ سانتی‌متر تشکیل گردیده است، ۱۵ سانتی‌متر اول به‌عنوان محیط فعالیت ریشه ۱۵ سانتی‌متر بعدی لایه واسط و ۱۵ سانتی‌متر آخر ناحیه زهکشی است. گیاه مربوط در فاصله ۱۵ سانتی‌متری قطره‌چکان در سطح خاک قرار گرفته است. این شکل نشان‌دهنده‌ی شرایط اولیه تعریف شده برای مدل می‌باشد که مطابق با مقدار آب موجود قبل از اجرای اولین آبیاری برای گیاه موردنظر می‌باشد. همان‌طور که این شکل نشان



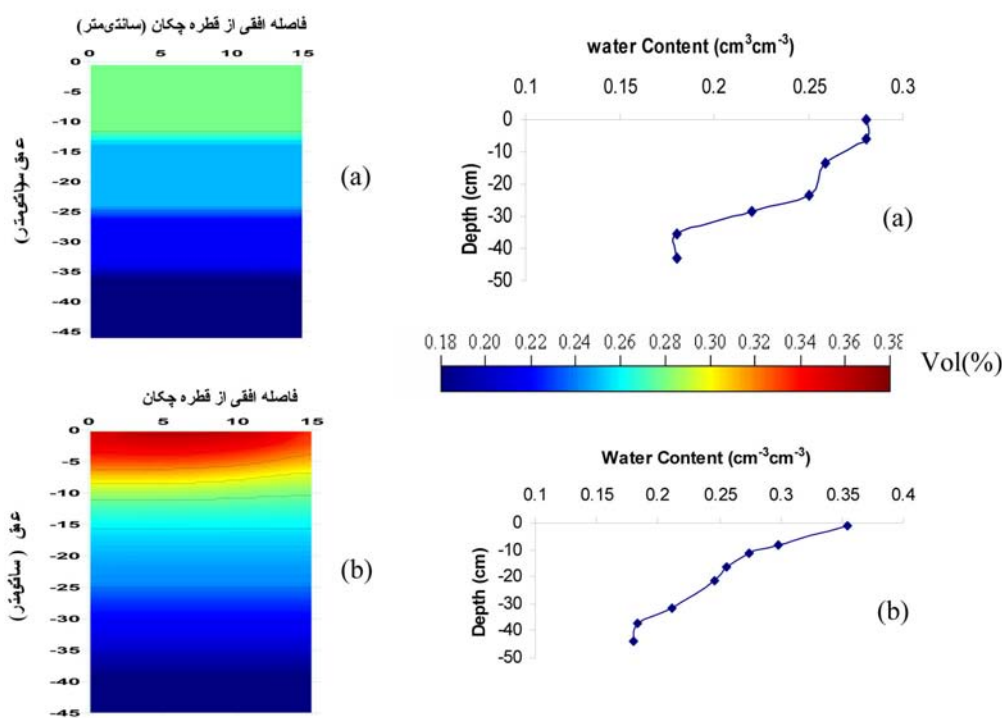
کشت نیشکر با آبیاری قطره‌ای و با به‌کارگیری مدل HYDRUS-2D به نتایج مشابهی رسیده‌اند.

شکل ۸ روند کاهش رطوبت را ۲ ساعت و ۴۸ ساعت بعد از آبیاری دوم نشان می‌دهد که مشابه کاهش رطوبت پس از آبیاری اول می‌باشد و این تشابه حاکی از یکنواخت عمل نمودن قطره‌چکان و سیستم آبیاری در سیکل‌های ۴۸ ساعته می‌باشد. شکل ۹ وضعیت رطوبت را پس از یک هفته از شروع آبیاری اول نشان می‌دهد که در انتهای هفته رطوبت در سطح و لایه‌های پایینی کاملاً کاهش یافته و نیاز به آبیاری مجدد است. اژدری و همکاران (۲۰۰۵) به نتایج مشابهی در کشت گیاه پیاز و مدل‌سازی حرکت آب در خاک رسیدند.

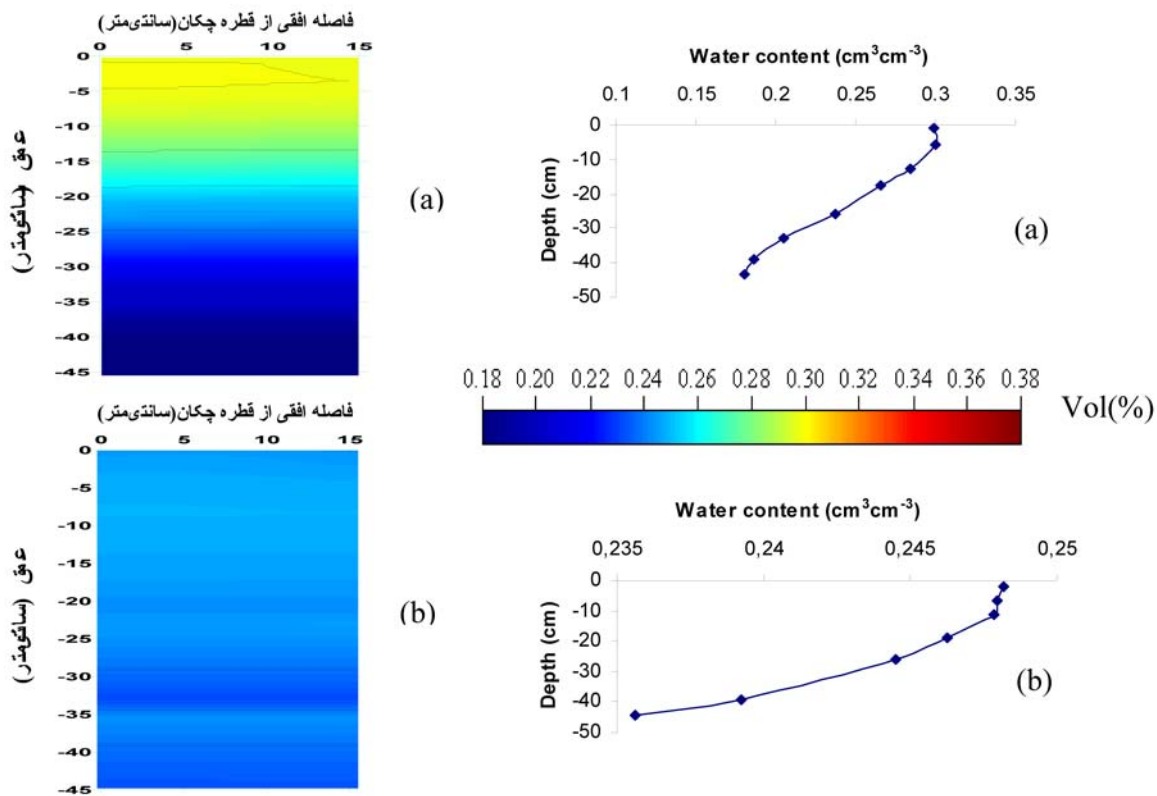
نتایج حاصل از کالیبراسیون و اعتبارسازی مدل نشان داد که مدل جهت شبیه‌سازی نحوه حرکت آب در خاک به‌ویژه در سیستم آبیاری قطره‌ای به‌شرطی که داده‌های مورد نیاز آن به‌درستی انتخاب شوند مدل مناسبی می‌باشد. کوت و همکاران (۲۰۰۳) و اژدری (۲۰۰۵) به نتایج مشابهی رسیدند.

پایین تدریجی است و مقدار آن به‌صورت جریان زیاد آب که منجر به زهکشی عمقی شود، نمی‌باشد. که افزایش رطوبت از بالا به پایین به‌صورت افقی یکنواخت و پس از ۲۴ ساعت در کل عمق ۰-۴۵ سانتی‌متر رطوبت بیش از حد ظرفیت مزرعه است و این نشان‌دهنده توزیع مناسب رطوبت از طریق قطره چکان مربوط می‌باشد.

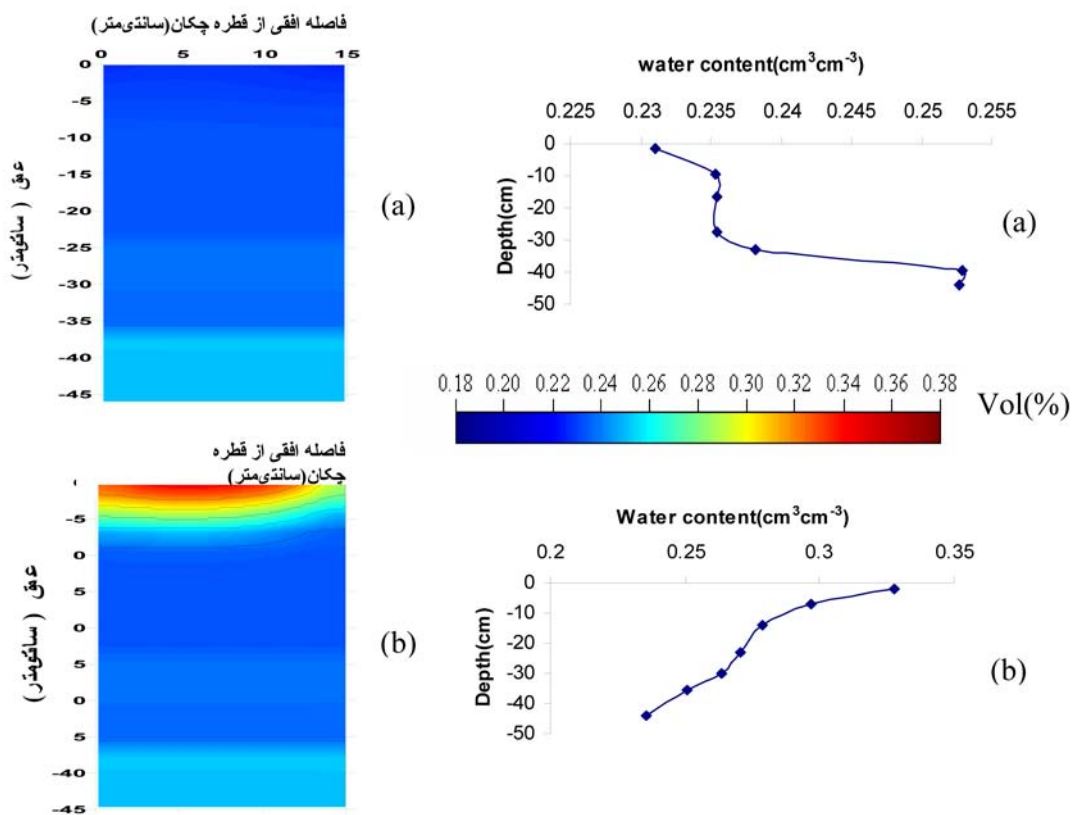
شکل ۷- الف روند حرکت رطوبت را پس از ۴۸ ساعت نشان می‌دهد. تغییر جهت کاهش رطوبت در این شکل حاکی از پایین آمدن رطوبت در لایه‌های بالایی به میزان قابل توجه می‌باشد و براساس مقیاس اسپکترن رنگی در لایه‌های پایینی نیز بعد از ۴۸ ساعت میزان رطوبت زیاد نیست در نتیجه نیاز به آبیاری دیگری دارد و پس از آبیاری دوم وضعیت شکل ۷- ب را نشان می‌دهد که دوباره افزایش رطوبت در لایه‌های سطحی تا بیش از ۳۰ درصد حجمی و تغییر جهت روند کاهش آن را دربرمی‌دارد. همچنین در این شکل در محل قطره‌چکان پس از ۳۰ دقیقه از شروع آبیاری دوم میزان رطوبت به حداکثر مقدار خود رسیده و به تدریج لایه‌های پایین‌تر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کوت و همکاران (۲۰۰۳) در



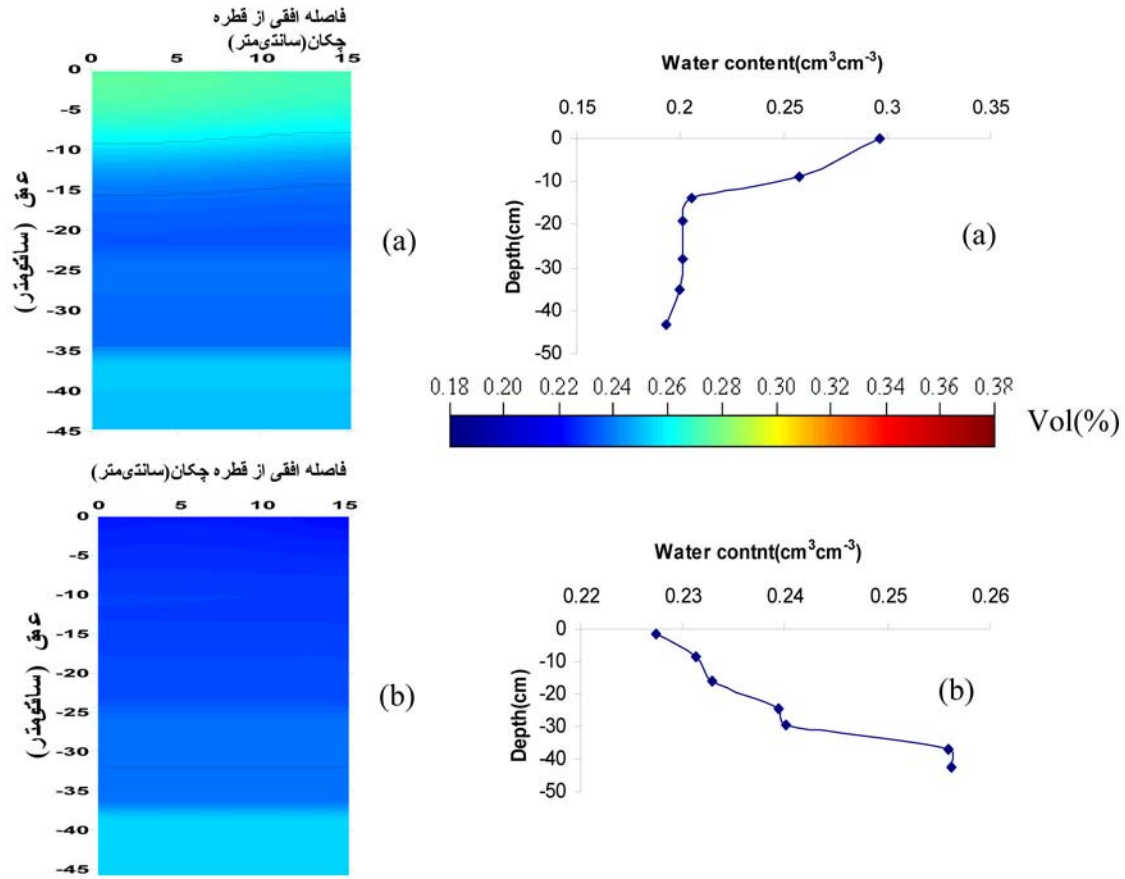
شکل ۵- شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک، الف- قبل از شروع آبیاری، ب- ۳۰ دقیقه بعد از شروع آبیاری.



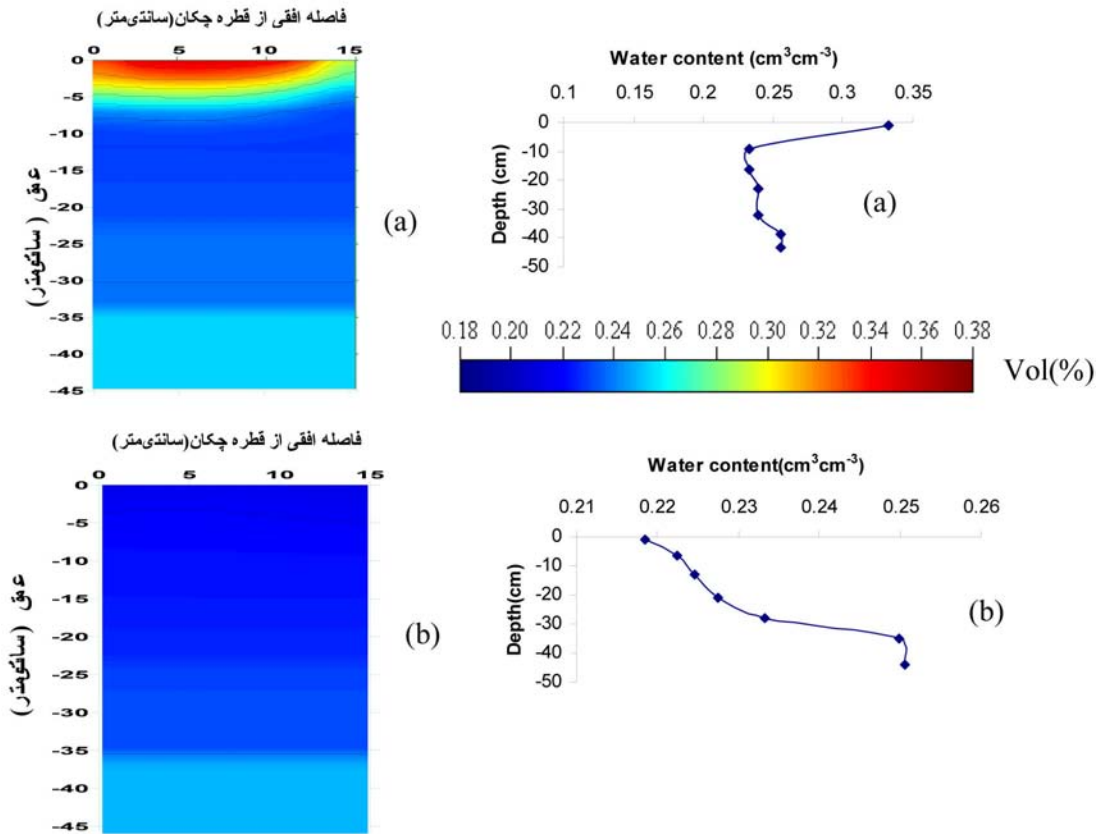
شکل ۶- شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک الف- ۲ ساعت بعد از آبیاری ب- ۲۴ ساعت بعد از آبیاری.



شکل ۷- شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک الف- ۴۸ ساعت بعد از آبیاری ب- ۳۰ دقیقه بعد از دومین آبیاری.



شکل ۸- شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک الف- ۲ ساعت بعد از دومین آبیاری ب- ۴۸ ساعت بعد از دومین آبیاری.



شکل ۹- شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک الف- ۳۰ دقیقه بعد از سومین آبیاری ب- یک هفته بعد از شروع اولین آبیاری.

## نتیجه گیری

برای تحقیق در مورد نحوه توزیع آب به صورت افقی و عمودی در محیط ریشه گیاه ترب و برآورد دقیق نفوذ عمقی آب در یک سیستم آبیاری قطره‌ای آزمایش‌های متعددی در یک مزرعه تحقیقاتی به عمل آمد. داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی این طرح که مربوط به برآورد میزان رطوبت در لایه‌های مختلف خاک و در نقاط مختلف از محل قطره‌چکان و فواصل افقی دیگر بود تجزیه و تحلیل گردید و برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک از مدل HYDRUS-2D استفاده شد. این مدل ابتدا برای داده‌های به دست آمده کالیبره شد و نتیجه کالیبراسیون این بود که مدل فوق برای آنالیز و شبیه‌سازی توزیع جریان آب در ناحیه ریشه مناسب می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که تکرار آبیاری هر ۴۸ ساعت یکبار می‌تواند میزان رطوبت در ناحیه ریشه را در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته، جریان عمودی را کند نموده و نهایتاً میزان نفوذ عمقی را به حداقل برساند. میزان آب خارج شده از ناحیه ریشه براساس تحلیل مدل فوق حاکی از این است که حجم آب زهکشی شده از مرز انتهایی که به عنوان مرز زهکشی آزاد به مدل معرفی شده بود نسبت به کل حجم آب داده شده به گیاه در یک دوره مشخص بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

شکل‌های ۵ تا ۹ که نشان‌دهنده‌ی نتیجه اجرای مدل HYDRUS-2D برای تحلیل یک هفته‌ای توزیع رطوبت در اطراف قطره چکان و گیاه می‌باشند بیانگر یک موضوع بسیار مهم است و آن این که توزیع رطوبت در محیط انتخاب شده چه تأثیری روی میزان نشت آب زهکشی شده به خارج از این محیط داشته است. تحلیل حجم آب خارج شده از ناحیه ریشه نشان‌دهنده این موضوع است که بیش از ۹۹ درصد آب توزیع شده در خاک با سیستم آبیاری قطره‌ای در این طرح در ناحیه انتخابی (محدوده فعالیت ریشه از سطح خاک تا ۳۰ سانتی‌متر عمق) توزیع گردیده و کمتر از ۱ درصد آن به صورت عمقی افت بوده است. بدیهی است چنین نتیجه‌ای زمانی به دست می‌آید که مقدار آب مورد نیاز گیاه، زمان توزیع و شیوه توزیع آب به درستی تشخیص داده شود و به صحیح‌ترین روش توزیع گردد. برای رسیدن به این هدف لازم است از روش مدل‌سازی استفاده و پارامترهای هیدرولیکی خاک درست تخمین زده شوند. با داشتن اطلاعات کافی از نحوه توزیع رطوبت در خاک در اثر سیستم آبیاری قطره‌ای و استفاده از نتایج مدل می‌توان طراحی و توسعه این سیستم‌ها را به صحیح‌ترین وجه مدیریت نمود. اسکاگ و همکاران (۲۰۰۴) نیز به چنین نتیجه‌ای رسیدند.

## منابع

1. Ajdary, Kh., Singh, D.K., Singh, A.K., and Khanna, M. 2005. Simulation of water distribution under drip irrigation using HYDRUS-2D. P221-233, vol. 2 In: Mathur, G.N. and A.S. Chawla(eds), proceedings of the XII World water congress, New Delhi, India.
2. Ajdary, Kh. 2005. Modeling of water and nitrogen movement under drip fertigation. Ph.D Thesis. Division of Agricultural Engineering, Indian Agricultural research Institute, New Delhi, India.
3. Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. J. Irrig. Sci. 22: 143-156
4. Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield PUDOE, Wageningen, Simulation Monographs, 189 p.
5. Goudriaan, J. 1977. Crop micrometeorology. a simulation study. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 299 p.
6. Jiusheng, L.I., Jianjun, Z., and Ren, L.I. 2003. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. J. Irrig. Sci. 22 : 19-30.
7. Lubana, S.P.P., and Narda, N.K. 1998. Soil water dynamics model for trickle irrigated tomatoes. J. Agricultural Water Management. 37: 145-161.
8. Metin, S.S., Yazar, A., and Eker, S. 2006. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. J. Agricultural Water Management. 81: 115-131.

9. Peter, J.T., Ian, K.D., Ian, M.B., Craig, P.B., Mike, A.S., and Brian, A.K. 2003. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. *J. Irrig. Sci.* 22: 201-209.
10. Ritchie, J.T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *J. Water Resour. Res.* 8:1204–1213.
11. Revol, P., Clothier, B.E., Mailhol, J.C., Vachaud, G., and Vauclin, M. 1997. Infiltration from a source point source and drip irrigation 2. an approximate time –dependent solution for wet-front position. *J. Water Resour. Res.* 33(8): 1869-1874.
12. Roupahel, Y., Mariateresa, C., Elvira, R., Alberto, B., and Giuseppe, C. 2006. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions. *J. Agricultural Water Management.* 82: 99-117.
13. Ruhi, B., Karaguzel, O., Aydinsakir, K., and Buyuktas, D. 2006. The effects of drip irrigation on flowering and flower quality of glasshouse gladiolus plant. *J. Agricultural Water Management.* 81: 132-144.
14. Simunek, J., Sejna, M., and Van, G.M.Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. U. S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service U.S. Department of Agriculture Riverside, California, 226p.
15. Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Singh, D.K., Sikarwar, H.S., Sahoo, R.N., and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *J. Agricultural Water Management.* 83:130-134.
16. Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J., and Shouse, J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* ASCE.130( 4): 1-7.

---

---

## **Simulation of moisture distribution in soil under drip irrigation system using HYDRUS-2D model**

**\*Kh. Azhdary**

Assistant Prof., Dept. water and soil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran

---

---

### **Abstract**

Drip irrigation system is the efficient method of vegetable crop irrigation. This investigation is made to study water distribution horizontally and vertically in the root zone of radish crop. This study is also about leaching water below the root zone with using the modeling approach in the crop root zone. In this research laboratory and field data are used by HYDRUS-2D model. It is a high capability simulation model. Results of modeling indicated that with choice of suitable irrigation cycle (48 hour here) and emitter discharge, soil moisture is maintained at field capacity level during the whole cropping season and it decreases very slowly and supplies the required moisture for the crop. The results of water leaching and infiltration showed that leaching water below the root zone from drainage boundary compared to the total volume of water applied for the whole growing season is very low. Volume of drainage water is 0.05% of the total water used which is negligible.

**Keywords:** Simulation; Drip irrigation; HYDRUS-2D.

---

\*- Corresponding Author; Email: azhdary2005@yahoo.com