نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۴، مهر – آبان ۱۳۹۲، ص. ۷۰۲-۶۹۲

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.4, Sept.-Oct. 2013, p. 692-702

# شبیه‌سازی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک در آبیاری قطره‌ای توسط مدل Hydrus 2D/3D

مرضیه خرمی[1*]- امین علیزاده[2]- حسین انصاری[3]

تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۷/۲۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۲/۸

## چکیده

با توجه به افزایش تمایل کشاورزان به استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای به دلیل داشتن راندمان بالاتر، لزوم شناخت عوامل و پارامترهای تاثیرگذار بر این سیستم‌ها به منظور بالابردن راندمان آن‌ها مشخص می‌گردد. تحقیق حاضر برای بررسی چگونگی حرکت آب در خاک و توزیع مجدد رطوبت در خاک در محل ایستگاه هواشناسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفته است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از تجزیه‌های آزمایشگاهی و صحرایی مدل Hydrus 2D/3D اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در بازه زمانی ۴۸ ساعته با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور توانایی بالایی در شبیه‌سازی میزان رطوبت در خاک دارد. تحلیل خطای برآورد مدل با به کارگیری پارامترهای آماری حداکثر خطا (ME)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) تشریح شد. بر اساس نتایج بدست آمده میزان RMSEدر درصد رطوبت حجمی خاک برای تمام بازه‌های زمانی و در تمام دبی‌ها کمتر از ۱۰ درصد بوده که نشان از قدرت بالای مدل در شبیه‌سازی دارد. بیشترین میزان حداکثر خطا ۵ درصد حجمی رطوبت و میانگین مطلق خطا ۲/۰۵ درصد حجمی رطوبت بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری قطره‌ای، رطوبت خاک، شبیه‌سازی، Hydrus 2D/3D

## مقدمه

با توجه به کاهش منابع آب شیرین در جهان و بالا رفتن اهمیت و ارزش آب، روش‌های مختلفی برای استفاده بهتر آب در بخش کشاورزی توسعه پیدا کرد که از این جمله روش‌ها، روش‌های آبیاری قطره‌ای است. آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالا و امکان آبیاری در شرایط محیطی مختلف و برای اکثر گیاهان در بیشتر نقاط جهان مورد استقبال قرار گرفته است. اما این سیستم آبیاری نیز مانند دیگر روش‌ها، برای حصول راندمان مورد نظر نیازمند شناخت دقیق پارامترهای موثر بر آن است. از جمله مهمترین پارامترهای تاثیر گذار بر این سیستم آبیاری، نحوه توزیع رطوبت در خاک و در واقع شکل پیاز رطوبتی است. با توجه به این امر که شکل پیاز رطوبتی تحت تاثیر عوامل زیادی چون بافت خاک، شدت پخش آب، زمان آبیاری و شیب زمین می‌باشد، برای هر سیستم آبیاری قطره‌ای و در هر بافت خاک چگونگی توزیع آب در خاک ممکن است متفاوت باشد. اندازه‌گیری این پارامتر نیز فرایندی زمان‌بر و پر هزینه است. استفاده از مدل‌های کامپیوتری در صورت حصول اطمینان از صحت نتایج آن‌ها راه حلی مناسب در این زمینه است. مولایی کندلوس و همکاران (۴ و ۵) مطالعات جامعی را بر روی نرم‌افزار Hydrus-2D انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ذکر شده حرکت آب در اطراف قطره‌چکان در یک خاک لومی رسی شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری ابعاد پیاز رطوبتی و مقدار رطوبت خاک در شرایط آزمایشگاهی و در شرایط مزرعه مقایسه شد. مقدار RMSE برای موقعیت‌های متفاوت قرارگیری قطره‌چکان بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۴۵ رطوبت حجمی خاک و ۰/۹۸ تا ۴/۳۶ سانتی‌متر پیشروی رطوبت در خاک متفاوت بوده است. براساس نتایج حاصل از این پژوهش شبیه‌سازی رطوبت و پیشروی پیاز رطوبتی خاک توسط نرم‌افزار Hydrus-2D خوب ارزیابی شده است. یکی از اهداف مهم سیستم‌های آبیاری تحت فشار به خصوص سیستم آبیاری قطره‌ای جلوگیری از نفوذ عمقی و خارج شدن آب از ناحیه ریشه گیاه است. اژدری (۱) مطالعه‌ای را روی یک مزرعه ترب که تحت آبیاری قطره‌ای بوده، انجام داد. در این پژوهش از مدل شبیه‌ساز کامپیوتری Hydrus-2D استفاده شد و نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای با نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل ذکر شده مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل مورد نظر نشان داد که با انتخاب دور آبیاری

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: khorami.ma@gmail.com)

مناسب و آبدهی مناسب قطره‌چکان، در تمام طول فصل زراعی رطوبت خاک در ناحیه ریشه در حد ظرفیت مزرعه نگه‌داشته شده و کاهش آن در طول ۴۸ ساعت تدریجی بوده و رطوبت لازم برای گیاه در حد مطلوب نگه‌داشته می‌شود. سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی به دلیل فراهم کردن آب مورد نیاز گیاه در ناحیه ریشه و خشک نگه داشتن سطح خاک در طول آبیاری، در بسیاری از نقاط خشک و نیمه خشک دنیا مورد توجه قرارگرفته است. پاتل و همکاران (۶) مطالعه‌ای را بر روی یک سیستم آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز انجام دادند. هدف اصلی این پژوهش کاربرد مدل Hydrus-2D در شبیه‌سازی رطوبت خاک بوده است. نتایج حاصل از توزیع رطوبت در خاک توسط مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و تفاوت آماری معنی داری ندارند. ایشان براساس نتایج حاصل از این تحقیق، استفاده از این مدل را برای طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیر سطحی برای به حداقل رساندن میزان نفوذ عمقی در خاک توصیه کردند. حسینی‌نیا و همکاران (۳) در یک پژوهش میدانی اثر کاربرد دبی‌های مختلف و حجم‌های متفاوت آبیاری را بر الگوی پخش رطوبت در سیستم آبیاری قطره‌ای بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش با نرم‌افزار Hydrus-2D نیز شبیه‌سازی شد و نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. براساس نتایج حاصل از مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مشخص شد که نرم‌افزار یاد شده از توانایی بالایی برای شبیه‌سازی برخوردار است و ابعاد پیاز رطوبتی و میزان رطوبت خاک را با دقت بالایی نسبت به اعداد اندازه‌گیری شده برآورد کرده است.

هدف از انجام این پژوهش ارزیابی مدل Hydrus 2D/3Dدر شبیه‌سازی رطوبت و بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی توزیع مجدد آب در خاک تحت آبیاری قطره‌ای است که در پژوهش‌های پیشین کمتر به این موضوع پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

آزمایشات میدانی بر روی خاکی با بافت لوم در محل ایستگاه هواشناسی دانشگاه فردوسی مشهد با مختصات ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ۵۹ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی انجام گرفت. آزمایشات لازم برای تعیین مشخصات خاک در آزمایشگاه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتری و چگالی ظاهری به روش کلوخه تعیین گردید. برای اطمینان از یکنواختی خاک در جهت عمودی، از سه عمق مختلف ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰- ۶۰ سانتی‌متری نمونه برداری توسط آگر انجام گرفت. بافت و چگالی ظاهری برای سه عمق ذکر شده به صورت جداگانه اندازه‌گیری شد. نتایج خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

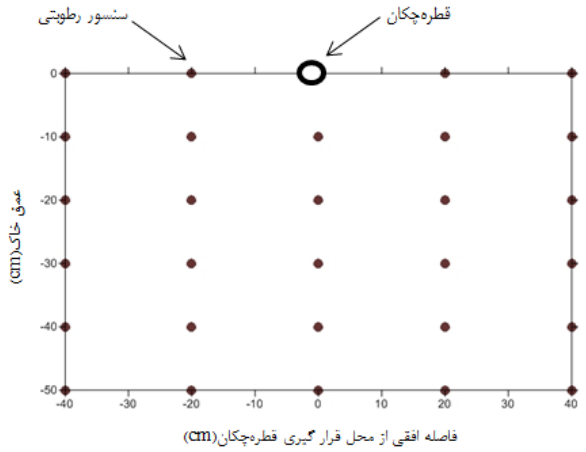
برای انجام داده برداری‌ها، یک سیستم کوچک آبیاری قطره‌ای شامل منبع آب با ارتفاع ثابت و مشخص به منظور ایجاد دبی مورد نظر، لوله انتقال آب به قطره‌چکان و نهایتا دریپر با دبی مورد نظر اجرا گردید. در این پژوهش میزان رطوبت خاک تحت آبیاری با سه دبی ۲، ۴ و ۸ لیتر بر ساعت اندازه‌گیری شد (حجم کل آب داده شده به خاک برای هر سه دبی یکسان و برابر با ۱۲ لیتر بوده است) و دقت مدل Hydrus 2D/3D در شبیه‌سازی در این شرایط ارزیابی گردید. برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت در نقاط مختلف خاک از ( سنسور رطوبتی REC_P55 استفاده شد. این سنسور توسط دکتر انصاری – مهندس حسن‌پور در دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده و در گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی کالیبره گردیده (اطلاعات بیشتر روی سایت دانشگاه فردوسی قرار دارد). سنسورها استوانه‌ای شکل و به ارتفاع ۸ و شعاع ۱/۵ سانتی‌متر است. تعداد ۳۰ سنسور در فواصل مختلف از قطره‌چکان و اعماق مختلف خاک نصب شد. جهت قرار دادن سنسورها در اعماق مورد نظر ابتدا ۵ حفره به شعاع ۱۰ و عمق ۵۰ سانتی‌متر در خاک توسط آگر حفر گردید. سپس سنسورها به صورت افقی در عمق مورد نظر قرار داده شد و داخل حفره‌ها مجددا پر شد. به منظور نشت خاک و ایجاد تراکم یکنواخت در کل خاک قبل از شروع آبیاری قطره‌ای یک آبیاری سنگین انجام گرفت. شکل ۱ محل قرار گیری سنسورهای رطوبتی و موقعیت قطره‌چکان را نشان می‌دهد.

### واسنجی سنسورهای رطوبتی

به منظور اطمینان از یکنواختی ساخت ۳۰ سنسور مورد استفاده در این طرح و جلوگیری از خطای احتمالی ناشی از عدم یکنواختی ساخت، هر کدام از سنسورها به طور جداگانه قبل از شروع آزمایش و قرارگیری در محل مورد نظر واسنجی گردید.

**جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک منطقه مورد آزمایش**

| عمق خاک (cm) | درصد شن | درصد سیلت | درصد رس | بافت خاک | درصد رطوبت حجمی خاک در FC | درصد رطوبت حجمی خاک در PWP | چگالی ظاهری ($gr/cm^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰-۰ | ۴۰ | ۳۸ | ۲۲ | لوم | ۱۸ | ۸ | ۱/۳۲ |
| ۴۰-۲۰ | ۴۴ | ۳۷ | ۱۹ | لوم | ۱۷ | ۹ | ۱/۴۵ |
| ۶۰-۴۰ | ۴۲ | ۳۶ | ۲۲ | لوم | ۱۹ | ۶ | ۱/۵۸ |




**شکل ۱- محل قرار گیری سنسورهای رطوبتی در خاک**

بدین منظور هر سنسور در یک گلدان حاوی خاک (از محل انجام آزمایش) قرار داده شد. ابتدا به مدت ۴۸ ساعت اجازه داده شد تا هر گلدان به حالت اشباع کامل برسد، سپس بعد از شروع تبخیر و کاهش رطوبت، وزن گلدان و عدد قرائت شده از هر سنسور به صورت متناظر برداشت می‌شد تا از صحت داده‌های هر سنسور اطمینان حاصل گردد.

## شرح مدل Hydrus 2D/3D

مدل Hydrus 2D/3D یک مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت دو بعدی یا سه بعدی آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران (۱۹۹۹) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال-انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است که معادلات مربوط به روش عناصر محدود Galerkin حل گردیده‌اند. مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیر اشباع در حالت افقی، عمودی و شعاعی بوده و توانایی تخمین خصوصیات فیزیکی خاک به روش معکوس را نیز دارد (۸).

در مدل Hydrus 2D/3Dحرکت دو بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی شده است که با فرض خاک همروند و یکنواخت به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[k(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] \qquad (۱)$$

که در آن $\theta$ رطوبت حجمی ($L^3L^{-3}$)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (L)، tزمان (T)، x مختصات افقی (L)، zمختصات عمودی (L) و K هدایت آبی ($LT^{-1}$) می‌باشند. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل وان گنوختن_معلم (۱۹۸۰) تعریف شده است:

$$\theta(k) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

$$K(h) = K_s S_e^{1} \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m\right]^2 \qquad (۳)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \qquad m = 1 - 1/n \qquad (۴)$$

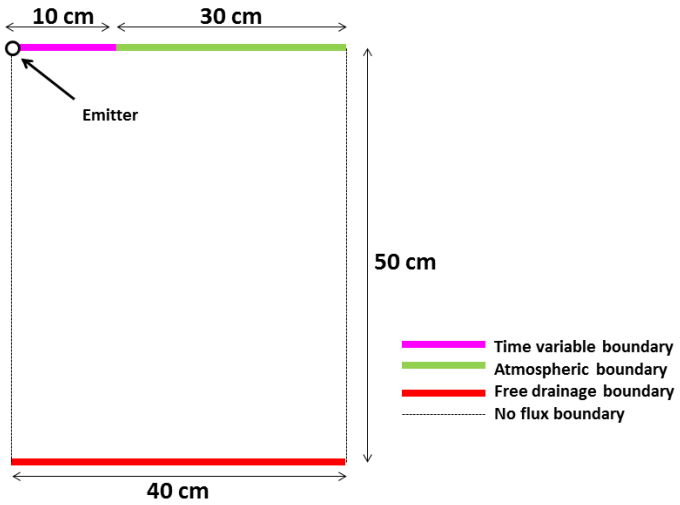
که در آن $S_e$ اشباع نسبی، $\theta_s$ رطوبت حجمی اشباع خاک، $\theta_r$ رطوبت باقیمانده در پروفیل خاک، $K_s$ هدایت آبی اشباع و n و $\alpha$ پارامترهای تجربی می‌باشند.

## مدل واقعی تعریف شده به Hydrus 2D/3D

به دلیل تقارن زیاد نیمه راست و چپ پروفیل رطوبتی خاک در شرایط واقعی، شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی با مدل تنها برای نیمه راست صورت گرفته و سپس با شرایط واقعی مقایسه شد. محیط شبیه‌سازی شده در مدل محدوده‌ای به عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است که تغذیه توسط قطره‌چکان از بالای محدوده شبیه‌سازی شده انجام می‌پذیرد.

## شرایط اولیه و شرایط مرزی تعریف شده برای مدل

شرایط اولیه توزیع آب در خاک عبارت بود از مقدار آب موجود در خاک قبل از اعمال آبیاری در اعماق مختلف که توسط سنسورهای موجود در خاک اندازه‌گیری شد. رطوبت اولیه در عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک ماکزیمم و در سطح خاک به دلیل تبخیر از سطح حداقل مقدار خود برخوردار بود که در شرایط اولیه تعریف شده به مدل، رطوبت به صورت خطی از سطح خاک به سمت عمق افزایش پیدا می‌کند. شرایط مرزی تعریف شده برای مدل به این صورت بود که در انتهایی محدوده شبیه‌سازی شده زهکشی آزاد، سطح خاک به عنوان مرز ورود آب و تماس با اتمسفر و طرف راست و چپ محیط مدل شده مرزهای بدون جریان تعریف شده‌اند.




**شکل ۲-محدوده شبیه سازی شده برای مدل**

یک نوع شرط مرزی زمانی متغییر جریان ( Time variable boundary condition) واقع در سطح خاک تعریف گردید که در طول زمان آبیاری با قطره‌چکان شدت جریان ورودی آب به خاک بر اساس دبی قطره‌چکان برای آن در نظر گرفته می‌شد و در زمان‌های غیر آبیاری مقدار دبی قطره‌چکان صفر در نظر گرفته می‌شد.

### پارامترهای هیدرولیکی خاک

پارامترهای هیدرولیکی خاک که برای مدل Hydrus 2D/3D تعیین شده‌اند در جدول ۲ آمده است. این پارامترها توسط مدل ROSETTA تعیین شده‌اند که این مدل در دل مدل Hydrus 2D/3D قرار داده شده است و بر اساس شبکه عصبی کار می‌کند. ورودی‌های مورد نیاز این مدل بافت خاک، درصد ذرات دانه‌بندی، درصد رطوبت در حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم است که با ورود داده‌های مورد نیاز قادر است پارامترهای هیدرولیکی خاک را تخمین بزند. مقدار عددی این پارامترها برای اجرای مدل Hydrus 2D/3D ضروری می‌باشد. در این جدول $\theta_s$رطوبت حجمی اشباع خاک، $\theta_r$ رطوبت باقیمانده در پروفیل خاک، $K_s$ هدایت آبی اشباع و n و $\alpha$ پارامترهای تجربی می‌باشند.

**جدول ۲-پارامترهای هیدرولیکی خاک تولید شده توسط مدل Hydrus 2D/3D**

| $K_s$(cm/hr) | $\theta_r$ | $\theta_s$ | $\alpha$ | n |
|---|---|---|---|---|
| ۱/۰۴ | ۷/۸ | ۴۳ | ۰/۰۳۶ | ۱/۵۴ |

### شاخص‌های ارزیابی مدل

در ارزیابی و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده رطوبت خاک، از شاخص‌های آماری RMSE, MAE و MEاستفاده شد. مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده را از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. MAE متوسط مطلق خطا بوده و می‌تواند بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل را مشخص نماید. مقدار زیاد ME نشان‌دهنده وقوع حداکثر خطا در مدل است.

### واسنجی مدل Hydrus 2D/3D

مدل برای مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک در معادله وان گنوختن معلم در محدوده مجاز برای بافت خاک لوم (۲)، واسنجی شد. برای واسنجی مدل Hydrus 2D/3D در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، از داده‌های بدست آمده از آبیاری با قطره‌چکان ۴ لیتر بر ساعت استفاده شد. بدین ترتیب که از کلیه پارامترهای اندازه‌گیری شده در مزرعه شامل درصد ذرات تشکیل دهنده خاک، چگالی ظاهری خاک و رطوبت اولیه استفاده شد. با استفاده از اطلاعات موجود، داده‌های ورودی مورد نیاز تهیه و واسنجی انجام شد. نتایج مدل بعد از واسنجی پارامترهای فوق در آبیاری با قطره‌چکان ۴ لیتر بر ساعت در شکل ۳ نشان دهنده همبستگی خوب نتایج بدست آمده با نتایج شبیه‌سازی شده پس از واسنجی مدل است.

پارامترهایRMSE، MAE، MEو $R^2$ محاسبه گردید تا توانایی شبیه‌سازی مدل مشخص گردد. مقادیر پارامترهای محاسبه شده در دو نقطه محل قطره‌چکان و ۲۰ سانتی‌متری آن در جدول ۳ آمده است.

مقادیر جدول نشان می‌دهد که خطای حاصله بسیار پایین بوده و نشان از واسنجی مناسب مدل جهت انجام شبیه‌سازی می‌باشد (مقادیر ME و MAE بر حسب درصد رطوبت حجمی خاک است).

## نتایج و بحث

چگونگی حرکت آب و توزیع مجدد آن در خاک تحت آبیاری با یک منبع نقطه‌ای توسط مدل Hydrus2D/3D شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که این مدل دارای توانایی بالایی در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک و توزیع مجدد آب در خاک در بازه زمانی ۴۸ ساعته دارد. شکل ۴ شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در بازه‌های زمانی مختلف را توسط مدل برای قطره‌چکان ۲ لیتر بر ساعت نشان می‌دهد. رنگهای متفاوت نشان‌دهنده‌ی میزان رطوبت حجمی متفاوت در خاک است. شکل (a)-۴ درصد رطوبت حجمی خاک را بلافاصله بعد از آبیاری نشان می‌دهد، شکل (b)-۴ رطوبت خاک بعد از گذشت ۲۴ ساعت و نهایتا در شکل (c)-۴ درصد رطوبت حجمی خاک با گذشت ۴۸ ساعت بعد از آبیاری را نشان می‌دهد. شکل ۵ میزان رطوبت اندازه‌گیری شده در مزرعه را برای شرایط یکسان و در بازه‌های زمانی مشابه نشان می‌دهد. همان‌طور که از اشکال ۴ و ۵ مشخص است میزان رطوبت شبیه‌سازی شده در خاک با میزان رطوبت اندازه‌گیری شده تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

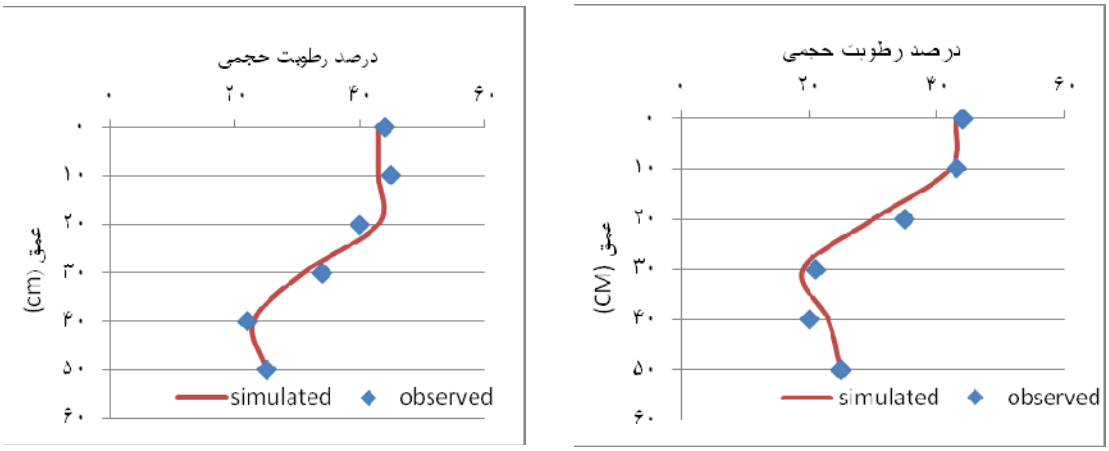
به منظور صحت سنجی مدل Hydrus 2D/3D، نتایج شبیه‌سازی میزان رطوبت در پروفیل خاک با نتایج اندازه‌گیری شده برای دبی ۸ لیتر بر ساعت برای زمان‌های مختلف بعد از آبیاری و در جهت‌های متفاوت خاک مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۶ تا ۱۱ روند شبیه‌سازی رطوبت خاک را با مقدار اندازه‌گیری شده آن در مزرعه برای قطره‌چکان ۸ لیتر بر ساعت را نشان می‌دهند.

شکل۶ روند تغییرات رطوبت را در جهت عمودی در خاک نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است میزان رطوبت شبیه‌سازی شده به میزان رطوبت اندازه‌گیری شده در خاک بسیار نزدیک است و تا عمق حدود ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک میزان رطوبت در حدود ۴۳ درصد می‌باشد.

با افزایش عمق از ۲۰ سانتی‌متر تا ۴۰ سانتی‌متری سطح خاک، میزان رطوبت در اثر کندی حرکت آب به سمت عمق کاهش می‌یابد. از عمق ۴۰ سانتی‌متری (که رطوبت در این ناحیه تحت تاثیر آبیاری با قطره‌چکان قرار نگرفته است) رطوبت با افزایش عمق افزایش پیدا کرده است (شرایط اولیه‌ای که برای مدل تعریف شده است). تطابق نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بسیار رضایت بخش است. در ادامه تحلیل نتایج توسط پارامترهای آماری ارائه خواهد شد.

شکل ۷ روند تغییرات رطوبت حجمی خاک در جهت افقی (کاهش رطوبت خاک را با دور شدن از محل قطره‌چکان) در سطح خاک را نشان می‌دهد. صحت نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل Hydrus 2D/3D در فاصله ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری از قطره‌چکان خوب و قابل قبول می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده حد فاصل ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری قطره‌چکان تطابق خوبی ندارد. یکی از دلایل اصلی این تفاوت عدم وجود حسگر رطوبتی در این فاصله است.



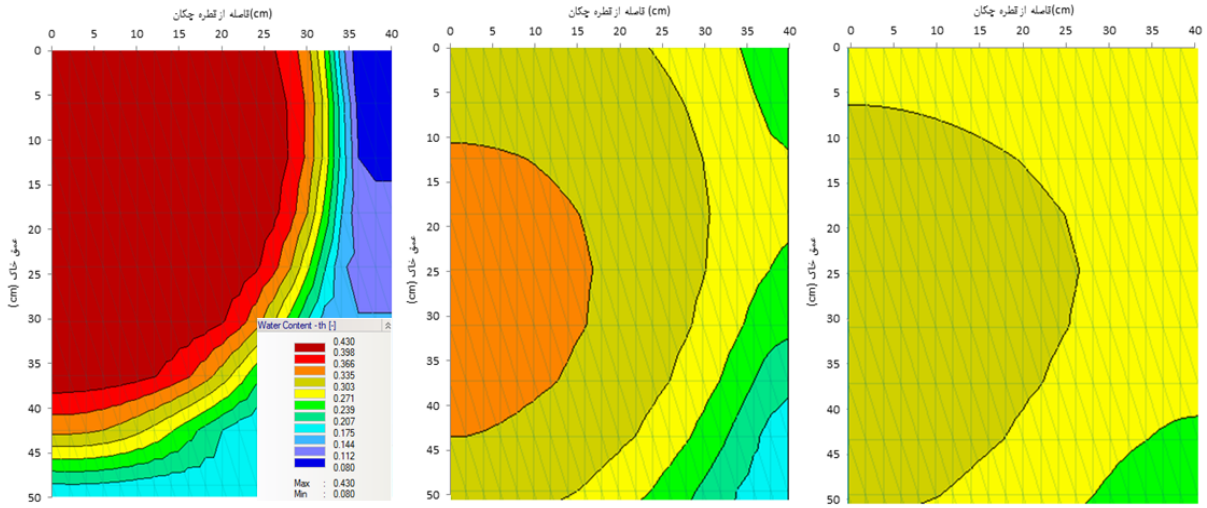

a-میزان رطوبت خاک در فاصله 20cm از قطره‌چکان

b-میزان رطوبت خاک محل قطره‌چکان

**شکل۳- رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بعد از واسنجی مدل برای قطره‌چکان ٤ لیتر بر ساعت**

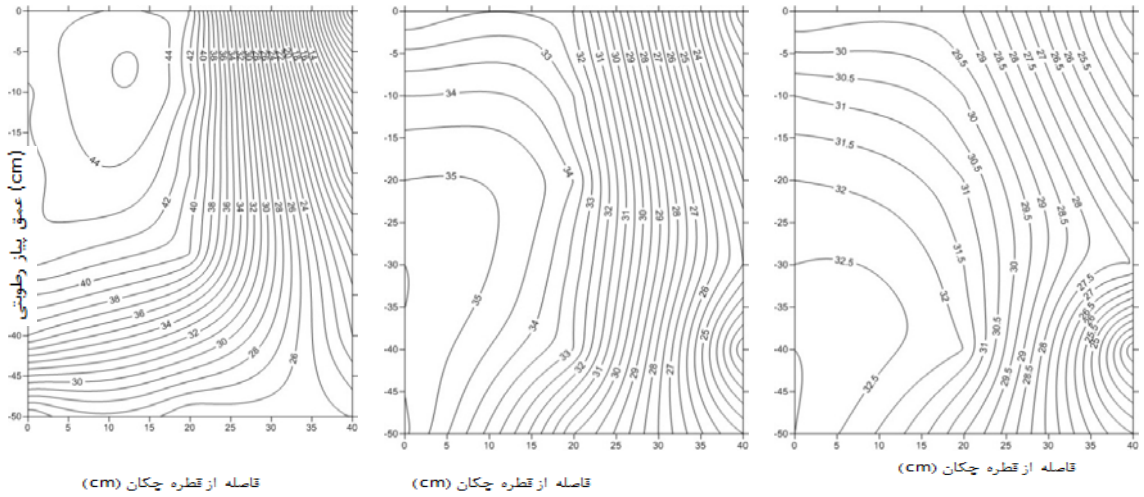
**جدول ۳- پارامترهای آماری محاسبه شده برای مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده**

| نقاط مشاهداتی | ME | MAE | RMSE (%) | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| محل قطره‌چکان | ۳ | ۱/۷ | ۶/۲ | ۰/۹۴ |
| ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان | ۵ | ۲ | ۹ | ۰/۹۵ |




(a) (b) (c)

**شکل٤ - شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک تحت آبیاری با دبی ۲ لیتر بر ساعت. درصد رطوبت حجمی خاک (a) بعد از آبیاری، (b) ۲٤ساعت بعد از آبیاری، (c) ٤٨ ساعت بعد از آبیاری**



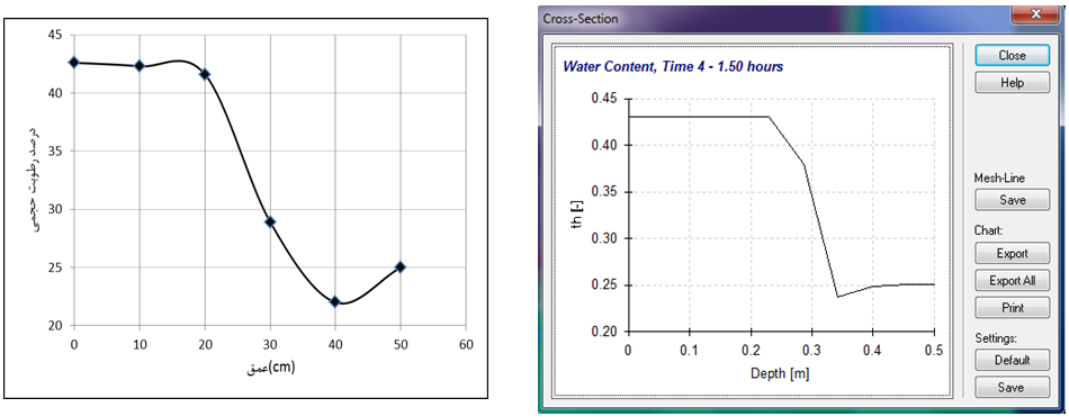

(a) (b) (c)

**شکل٥- میزان رطوبت اندازه‌گیری شده در خاک توسط سنسورهای رطوبتی تحت آبیاری با دبی ۲ لیتر بر ساعت. درصد رطوبت حجمی خاک (a) بعد از آبیاری، (b) ۲٤ساعت بعد از آبیاری، (c) ٤٨ ساعت بعد از آبیاری**

نتایج شبیه‌سازی شده برای فاصله ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری از قطره‌چکان (که مستقیما داده‌ی اندازه‌گیری توسط حسگر رطوبتی ثبت شده است) از دقت بالایی برخوردار است. اما به دلیل نبود داده اندازه‌گیری در این فاصله، هنگام رسم نمودار این دو نقطه تقریبا به صورت خطی به یکدیگر متصل شده اند که این عامل اصلی بروز خطای ایجاد شده است.

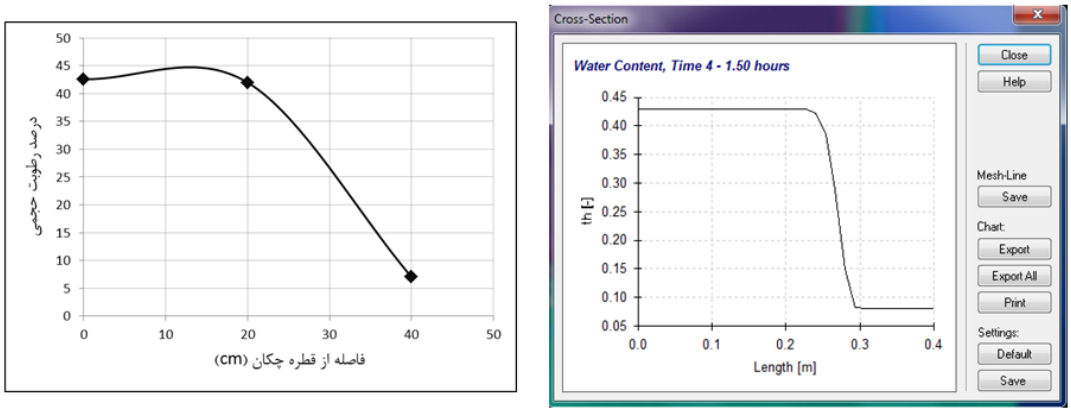
شکل‌های۸تا ۱۱نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده رطوبت در پروفیل خاک را در توزیع مجدد آب در خاک نشان می‌دهند.

همانطور که در نمودارها مشخص است مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی توزیع مجدد آب در خاک و چگونگی حرکت آب در هر دو جهت افقی و عمودی داشته است و گذشت زمان در توزیع مجدد آب در خاک تاثیری بر دقت شبیه‌سازی مدل نداشته و مدل Hydrus 2D/3D قادر است در تمام بازه‌های زمانی بعد از آبیاری با دقت بالایی میزان رطوبت را در این بافت خاک شبیه‌سازی کند که می‌توان از این مدل به منظور برنامه ریزی زمان آبیاری نیز بهره گرفت.




(b) (a)

**شکل٦- درصد رطوبت حجمی در جهت عمودی در راستای قرارگیری قطره‌چکان، بعد از آبیاری. (a) شبیه‌سازی، (b)اندازه‌گیری**




(b) (a)

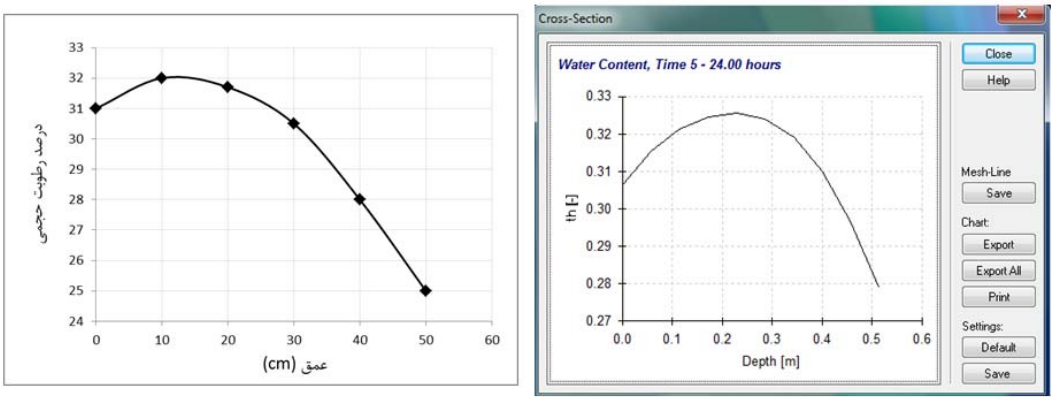
**شکل ۷- درصد رطوبت حجمی در جهت افقی در سطح خاک، بعد از آبیاری، (a) شبیه‌سازی شده، (b)اندازه‌گیری شده**

شکل ۱۱ رطوبت خاک را در جهت افقی در سطح خاک ۴۸ ساعت بعد از اتمام آبیاری نشان می‌دهد. تفاوت ایجاد شده بین دو منحنی رسم شده با نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به دلیل عدم وجود حسگر رطوبتی در حد فاصل ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری است که این امر باعث افزایش شیب منحنی رسم شده برای داده‌های اندازه‌گیری‌شده می‌گردد.

## نتایج پارامترهای آماری صحت سنجی مدل

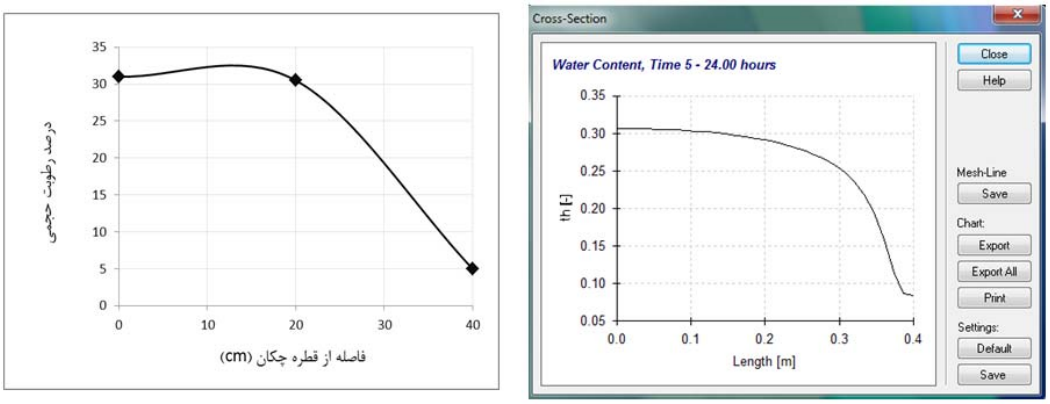
برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در سه بازه‌ی زمانی مشخص، از سه پارامتر آماری RMSE، MAE و ME استفاده شد. مقدار هر یک از این پارمترها در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ذکر شده برای MAE و ME بر حسب درصد رطوبت حجمی خاک است.

طبق تعریف میزان RMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان دهنده این است که قدرت مدل در شبیه‌سازی عالی بوده است (۷)، مقدار این پارامتر برای تمام بازه‌های زمانی و برای هر سه دبی آزمایشی کمتر از ۱۰ درصد بوده است که این نشان دهنده قدرت بالای مدل در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک است. میانگین مطلق خطا در بیشترین حالت خود به ۲/۰۵ درصد رطوبت حجمی خاک می‌رسد که این مقدار در این بازه شبیه‌سازی رطوبت خاک قابل چشم پوشی است. بیشترین مقدار تفاوت در مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت حجمی خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان بعد از آبیاری و در جهت عمودی خاک رخ داده که این مقدار حدود ۵ درصد رطوبت حجمی خاک است.



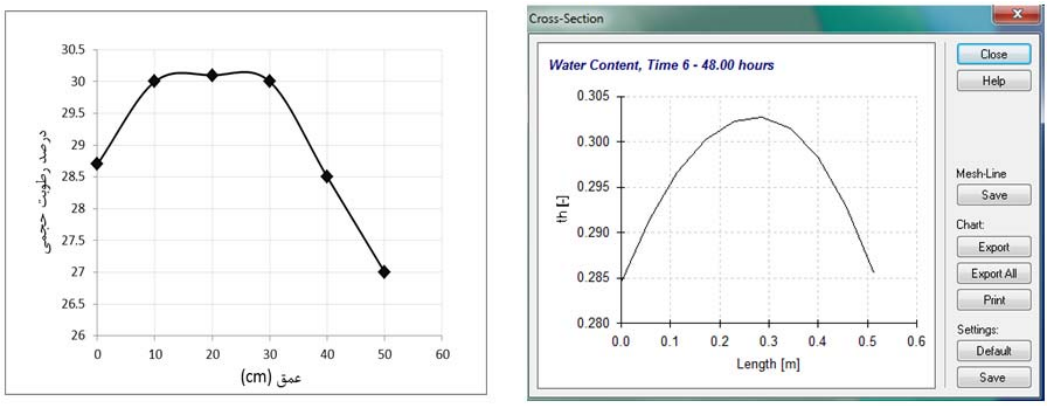

(b) (a)

**شکل۸- درصد رطوبت حجمی در جهت عمودی در راستای قرارگیری قطره‌چکان ۲٤ ساعت بعد از آبیاری، (a)شبیه‌سازی شده، (b) اندازه‌گیری شده**




(b) (a)

**شکل۹- درصد رطوبت حجمی در جهت افقی در سطح خاک،۲٤ ساعت بعد از آبیاری، (a) شبیه‌سازی شده، (b) اندازه‌گیری شده**

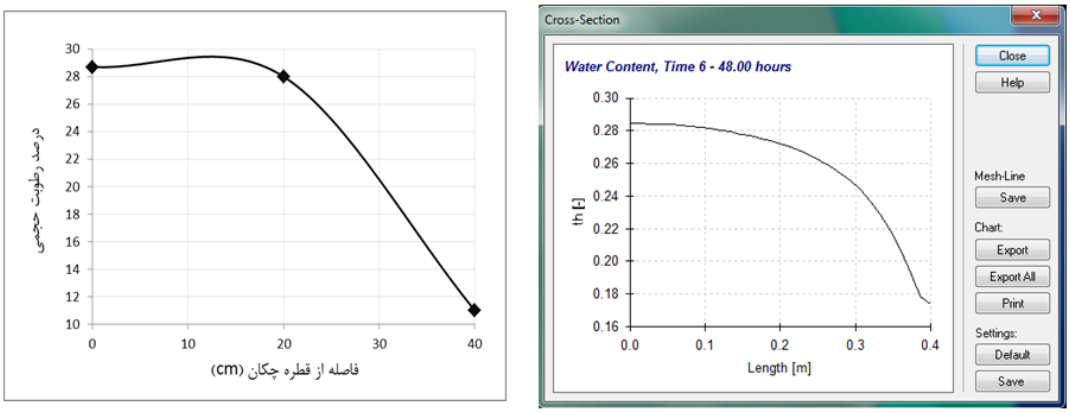



(b) (a)

**شکل ۱۰- درصد رطوبت حجمی در جهت عمودی در راستای قرارگیری قطره‌چکان ٤۸ ساعت بعد از آبیاری، (a) شبیه‌سازی شده، (b)اندازه‌گیری شده**

جدول٤- پارامترهای آماری محاسبه شده برای شبیه‌سازی رطوبت در خاک برای دبی‌های مختلف

| | ۲ لیتر بر ساعت | | | ٤ لیتر بر ساعت | | | ۸ لیتر بر ساعت | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | بعد از آبیاری | ٢٤ساعت بعد از آبیاری | ٤٨ساعت بعد از آبیاری | بعد از آبیاری | ٢٤ساعت بعد از آبیاری | ٤٨ساعت بعد از آبیاری | بعد از آبیاری | ٢٤ساعت بعد از آبیاری | ٤٨ساعت بعد از آبیاری |
| RMSE(%) | ۵ | ۷/۶ | ۶/۹ | ۵/۵ | ۵/۲ | ۲/۸ | ۵/۶ | ۷/۵ | ۹/۵ |
| MAE | ۰/۹۵ | ۱/۴۵ | ۱/۲۲ | ۱/۴۵ | ۱/۱۳ | ۰/۷۱ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۲/۰۵ |
| ME | ۲ | ۴ | ۵ | ۴/۸ | ۲ | ۱ | ۳/۵ | ۳ | ۳/۵ |




(b) (a)

**شکل ۱۱- درصد رطوبت حجمی در جهت افقی در سطح خاک، ٤٨ ساعت بعد از آبیاری، (a) شبیه‌سازی، (b) اندازه‌گیری شده**

به طور کلی نتایج حاصل از صحت سنجی مدل نشان داد که مدل Hydrus 2D/3D توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک بعد از آبیاری و همچنین در شرایط توزیع مجدد رطوبت خاک را داراست و نتایج حاصل از شبیه‌سازی میزان رطوبت در پروفیل خاک قابل اطمینان می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش دقت مدل Hydrus 2D/3D در شبیه‌سازی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مدل توسط داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه واسنجی شد و سپس نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری شده در مزرعه مقایسه شد. براساس نتایج بدست آمده مشخص شد که مدل مذکور توانایی بالایی در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک داشته و قادر است شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره‌ی آبیاری نیز با دقت بالایی تخمین بزند و گذشت زمان تاثیری بر دقت شبیه‌سازی مدل ندارد. همچنین توانایی مدل در شبیه‌سازی تحت دبی‌های ورودی متفاوت نیز یکسان بود. توصیه می‌شود از این مدل برای شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک و توزیع مجدد آب در خاک پیش از طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای به منظور افزایش راندمان این سیستم‌ها استفاده گردد.

## منابع


۱- اژدری خ. ۱۳۸۷. شبیه سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل Hydrus-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵(۱). فروردین- اردیبهشت.

۲- بای‌بوردی م. ۱۳۸۵. فیزیک خاک. چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران.

۳- حسینی‌نیا م.، کریمی گوغری ش.، نقوی ه. و ایراندوست م. ۱۳۸۹. تاثیر کاربرد دبی‌های مختلف بر الگوی پخش آب در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. اولین کنفرانس بین‌المللی مدلسازی گیاه، آب، خاک و هوا. ۲۳ و ۲۴ آبان. کرمان.

4- 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: 1080-1076.
5- Kandelous M., and Simunek J. 2010b. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Irrig. Sci. 28 :435-444.
6- Patel N., and Rajput T.B.S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. Agricultural Water Management 95(2008): 1335-1349.
7- Rinaldy M., Losavio N. and Flagella Z. 2003. Evaluation of OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. Agricultural Systems. 78: 17-30.
8- Simunek J., Van Genuckten M.Th., and Sejna M. 2006. The Hydrus Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably – Saturated Media. Technical Manual.

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.4, Sept.-Oct. 2013, p. 692-702

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۴، مهر – آبان ۱۳۹۲، ص. ۷۰۲-۶۹۲

# Simulation of Water Movement and Moisture Redistribution under Drip Irrigation Systems Using Hydrus 2D/3D

**M. Khorami[1*]- A. Alizadeh[2]- H. Ansari[3]**

Received: 17-10-2012
Accepted: 28-04-2013

## Abstract

Increased use of drip irrigation systems in the country and farmer's tendency to use more efficient irrigation systems, has caused need to know about parameters and factors that affect irrigation efficiency. This Study was done to examine how water moves in the soil and soil moisturere distribution at Weather Station of Ferdowsi University of Mashhad. Inthisstudy, Hydrus 2D/3D Model performed by using data from laboratory and field analysis. Thes imulation results of soil moistureina 48 hour period were compared with the results offield measurements. The results showed that the model is very capable in simulating moisture contentin thesoil. Statisticalerroranalysiswas described to estimate model parameters using Maximumerror (ME), Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE). Based on the results of RMSE parameter in volume tricsoil moisture, forallintervals and all discharges RMSE was less than 10 percent that it shows that model hashigh ability in simulation. Maximum Error was up to 5% of and Mean Absolute Error was up to 2.05 % of volumetric moisture content.

**Keywords**: Drip irrigation, Hydrus 2D/3D, Simulation, Soil Moisture

1,2,3-M.Sc. Student, Professor and Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agricultre, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(*- Corresponding Author Email: khorami.ma@gmail.com)