نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۳، ص. ۱۸۹-۱۷۹

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 1, Mar.-Apr. 2014, p. 179-189

ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در برآورد پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای ثقلی سطحی و زیرسطحی

محمد قربانیان[1*]- محمدصادق منجزی[2]- حامد ابراهیمیان[3]- عبدالمجید لیاقت[4]

تاریخ دریافت:۱۳۹۲/۵/۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۱۱/۲۶

چکیده

مدل‌های عددی و تحلیلی زیادی برای برآورد توزیع رطوبت در خاک به منظور افزایش بازدهی مصرف آب در سامانه آبیاری قطره ای توسعه یافته است. حل دقیق معادله معروف حرکت آب در خاک (معادله ریچاردز) که در بسیاری از این مدل‌ها استفاده گردیده منجر به برآورد دقیق‌تر پیاز رطوبتی می‌شود. هدف این تحقیق ارزیابی روش‌های تفاضلات و اجزای محدود در حل عددی معادله ریچادرز در حرکت آب در اطراف قطره چکان از طریق مقایسه مدل‌های عددی HYDRUS-2D و SEEP/W می‌باشد. آزمایشات برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای بررسی پیشروی جبهه رطوبت درون یک جعبه پلکسی گلاس پر شده از خاک سیلتی لوم در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب دانشگاه تهران انجام شد. پیشروی جبهه رطوبت در زمان‌های مختلف روی صفحه شفاف پلکسی گلاس ترسیم شد. ابعاد جبهه رطوبتی در اطراف قطره‌چکان را برای دو دبی ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت و دو فشار پایین ۱/۵ و ۲/۲ متر (به ترتیب معادل دبی ۴/۵ و ۶/۳ لیتر برساعت) اندازه‌گیری شد. مقایسه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی HYDRUS-2D و SEEP/W نشان داد که مدل HYDRUS-2D (روش حل تفاضلات محدود) با متوسط ضریب تبیین بالاتر (به ترتیب ۸۹ و ۶۹ درصد) و میانگین ریشه مربعات خطا کمتر (به ترتیب ۱/۶۹ و ۴/۰۲ سانتی‌متر) در شبیه‌سازی ابعاد خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی دارای عملکرد بهتری بود.

واژه‌های کلیدی : جبهه رطوبتی، دبی، قطره چکان، مدل‌های شبیه‌سازی

مقدمه

سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و مخصوصا آبیاری قطره‌ای از کاراترین روش‌های آبیاری هستند که در شرایط رایج و روبه گسترش کمبود آب می توانند از جمله گزینه‌های برتر در مناطق خشک و نیمه خشک باشند (۳). قطر، حجم و توزیع خیس‌شدگی خاک در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مدیریت آبیاری نیازمند تعیین یا پیش‌بینی دقیق حجم خاک مرطوب شده اطرف ریشه گیاه است، چرا که آبیاری بیش از اندازه در این روش منجر به خارج شدن آب و املاح از ناحیه ریشه گیاه و کاهش راندمان آبیاری می‌شود. به دلیل اینکه تعیین حجم خاک مرطوب شده مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد، محققان با ارائه معادلات و مدل‌های فیزیکی و عددی متنوع، سعی در پیش بینی پیشروی جبهه رطوبتی نموده‌اند.

میرزایی و همکاران (۴) با استفاده از یک مدل فیزیکی، ابعاد پیاز رطوبتی و گسترش آن در زمانهای مختلف در آبیاری قطره‌ای را بررسی کردند و روابطی با دخالت عوامل فیزیکی موثر در حجم خاک مرطوب شده در زیر منبع تغذیه و با استفاده از قضیه باکینگهام و آنالیز ابعادی برای نمونه سازی جبهه رطوبتی بدست آوردند. پروانک بروجنی (۲) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی جبهه رطوبتی را برای خاک لومی‌شنی و چهار دبی ۲، ۴، ۸ و ۱۲ لیتر بر ساعت شبیه سازی کرد. نتایج مقایسه داده‌های مشاهداتی با شبیه سازی قابلیت بسیار خوبی (ضریب تبیین ۰/۹۹۵و میانگین ریشه خطا ۰/۲۹) را برای این برنامه‌ی رایانه‌ای نشان داد. اژدری (۱) در تحقیقی بااستفاده از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی، مدلHYDRUS-2D را ارزیابی نمود. نتایج حاصل از مدل فوق نشان داد که با انتخاب دور مناسب (۴۸ ساعت در این تحقیق) و آبدهی مناسب قطره‌چکان، در تمام طول

۳،۲،۱ و ۴- به ترتیب دانشجو کارشناسی‌ارشد، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، استادیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران
(* - نویسنده مسئول: Email: ghorbanian110@ut.ac.ir)

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 به عنوان مرز زهکشی آزاد می‌باشد در مقایسه با کل حجم آب به‌کار رفته در دوران رشد گیاه بسیار کم و قابل چشم‌پوشی بوده و مقدار آن ۰/۰۵ درصد می‌باشد. سایل و همکاران (۹) به بررسی قابلیت مدل HYDRUS(2D/3D) در پیش‌بینی الگوی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پرداختند. این محققین لوله‌های سفالی به طول ۴۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر در اعماق ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در خاک‌های لومی‌شنی، سیلتی و لوم‌رسی‌شنی در شرایط مزرعه نصب کردند. مدل HYDRUS(2D/3D) به خوبی (ضریب تبیین بیش از ۰/۹۷ و میانگین ریشه مربعات خطا کمتر از ۰/۰۱۴ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌متر مکعب بود) قادر به شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود. پراونزانو (۷) نشان داد که مدل HYDRUS-2D دارای عملکرد مطلوبی در شبیه‌سازی پتانسیل ماتریک خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در یک خاک لوم شنی با عمق نصب ۱۰ سانتیمتر قطره‌چکان بود. ملایی کندلوس و سیمونک (۶) مدلهای عددی، تحلیلی و تجربی پیش بینی الگوی خیس شدگی خاک را مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D به جز نوبت دوم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و دبی۶/۱۶ لیتر بر ساعت درآبیاری قطره‌ای سطحی نتایج رضایت بخشی می‌دهد ولی این مدل نسبت به بقیه مدل‌ها نیاز به پارامترهای ورودی زیادی دارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل تحلیلی WetUp برای شبیه سازی خیلی مفید نیست و متوسط خطای مطلق آن به ۵۸/۱ سانتی‌متر هم می‌رسد. مدل‌های تجربی هم نتایج رضایت بخشی می‌دهند اما این مدل‌ها عمومیت نداشته و فقط در شرایط آزمایش قابل استفاده می‌باشند. شان و همکاران (۸) آزمایش‌های مزرعه‌ای را روی نحوه توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای انجام دادند و سپس به شبیه‌سازی نحوه توزیع رطوبت با مدل HYDRUS و ارزیابی این مدل پرداختند. نتایج این تحقیق روی خاک‌های لوم، سیلتی و لومی‌شنی و در دبی‌های ۱/۸، ۲/۲، ۲/۴ و ۳ لیتر بر ساعت و با حجم آب ۸، ۱۰ و ۱۲ لیتر نشان داد که پیش‌بینی‌های مدل HYDRUS با داده‌های مشاهداتی همبستگی خوبی دارد به طوری که حداقل میزان ضریب تبیین ۰/۸۶ و میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) در پیش‌بینی میزان رطوبت و حرکت جبهه رطوبتی به ترتیب کمتر از ۱/۷ درصد و ۶/۹ سانتی‌متر به دست آمد.

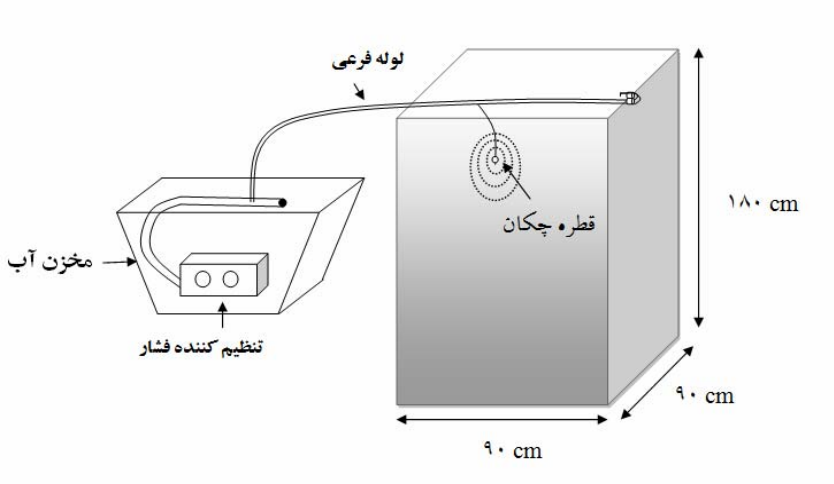
بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تعیین دقیق جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای موجب مصرف بهینه آب، انرژی و افزایش بهره‌وری آب از طریق کاهش تلفات آب می‌شود. روش‌ها و معادلات متعددی جهت تعیین جبهه رطوبتی ارائه شده که حل دقیق‌تر این معادلات می‌تواند به تعیین دقیق مقدار و زمان آبیاری و یک برنامه آبیاری قطره‌ای مطلوب منجر شود. هدف از این تحقیق ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های اجزای محدود و تفاضلات محدود در حل عددی معادله ریچاردز در اطراف قطره‌چکان از طریق مقایسه مدل‌های دوبعدی SEEP/W و HYDRUS-2D در شبیه‌سازی جریان زیرسطحی آب در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی برای فشارهای پایین ۱/۵ و ۲/۲ متر (به ترتیب معادل دبی ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت) و پیش‌بینی ابعاد و تغییرات مکانی و زمانی شکل پیاز رطوبتی در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی بود. همچنین در این تحقیق قابلیت مدل SEEP/W در آبیاری قطره‌ای که در تحقیقات کمتر مورد توجه قرار گرفته است- بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی

به منظور ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W از یک مدل فیزیکی که شامل جعبه‌ای با دیواره شفاف (پلکسی گلاس) و به ابعاد ۱/۸، ۰/۹ و ۰/۹ متر بود، در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران استفاده گردید. از میز هیدرولیکی مجهز به تنظیم کننده فشار به عنوان منبع آب و تأمین کننده دبی ثابت در زمان‌های آبیاری استفاده شد. برای انتقال آب به این جعبه که محتوی خاک سیلتی‌لوم (با ۲۲ درصد رس، ۵۸ درصد سیلت و۲۰ درصد شن) بود از لوله‌ای فرعی به قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شد. قطره‌چکان‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع اسپاگتی با قطر خارجی ۲/۵ میلی‌متر و به طول۶۰ سانتی‌متر بودند. جهت بررسی پیشروی جبهه رطوبتی (در دو بعد عمق و عرض) قطره‌چکان‌ها با حداقل دبی مورد نیاز برای آبیاری قطره‌ای (۴ لیتر بر ساعت) و در فشار کمتر از ۱/۵ متر، مماس بر صفحه پلکسی نصب شدند (شکل ۱). لازم به ذکر است که قبل از استفاده از قطره چکان‌ها در پلکسی، یکنواختی پخش برای ۲۵ قطره-چکان به فاصله نصب ۱/۵ متر و در سه فشار ۱/۱، ۱/۵ و ۲ متر در زمینی کاملا هموار اندازه‌گیری شد که بیشترین یکنواختی پخش (۰/۹۶) در فشار ۱/۵ متر بدست آمد.

جبهه رطوبتی برای دبی‌های ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت در دو حالت نصب قطره‌چکان روی سطح خاک (DI) و نصب قطره‌چکان در عمق ۲۰ سانتی‌متری (SDI) مورد بررسی قرار گرفت. مدت زمان آبیاری برای هر یک از دبی‌های ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت به ترتیب ۲۲/۵ و ۱۶ دقیقه بود. همچنین اندازه‌گیری‌های پیشروی جبهه رطوبت تا ۲ ساعت پس از قطع جریان انجام شد.



شکل ۱- شمای مدل فیزیکی

پروفیل جبهه رطوبتی برای دبی ۴/۵ لیتر بر ساعت در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۲/۵ و ۱۴۲/۵ دقیقه و برای دبی ۶/۳ لیتر برساعت در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۶ و ۱۳۶ دقیقه روی دیواره شفاف جعبه توسط ماژیک رسم شد و سپس ابعاد جبهه رطوبتی به وسیله نرم افزار Grapher 7 اندازه‌گیری شدند.

مدل HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت دو بعدی آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمیونک و همکاران (۱۰) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. این مدل شامل حل عددی رابطه ریچاردز[1] به روش تفاضلات محدود (Finite Difference Method)، برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال– انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است. این مدل قادر به شبیه سازی در شرایط اشباع و غیر اشباع در حالت افقی، عمودی و شعاعی بوده و توانایی تخمین خصوصیات فیزیکی خاک به روش معکوس را دارد.

معادله ریچاردز با فرض خاک همروند و یکنواخت و حرکت دو بعدی آب در خاک به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

که در آن θ رطوبت حجمی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، t زمان (دقیقه)، K هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر دقیقه)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (سانتی‌متر) وx و z به ترتیب مختصات افقی و عمودی می‌باشد.

مدل SEEP/W

مدل SEEP/W یکی از نرم افزارهای بسته نرم افزاریGeoStudio می‌باشدکه توسط شرکت GeoSlope از کشور کانادا در سال ۲۰۰۱ توسعه یافته است. اساس این نرم‌افزار بر پایه روش اجزای محدود (Finite Element Method) بوده و کاربردهای آن در مدل‌سازی جریان آب و همچنین توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل مانند خاک است. رابطه دیفرانسیل حاکم بر جریان اشباع و غیر اشباع در مدل SEEP/W همانند مدل HYDRUS-2D، رابطه ریچاردز می‌باشد.

در هر دو مدل HYDRUS-2D و SEEP/W پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل Rosetta که در داخل مدل ها قرار گرفته استفاده می گردد. در مدل Rosetta از رابطه ون‌گنوختن و همکاران (۱۱) که در زیر آمده است استفاده شده است:

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

$$K(h) = K_s \times S_e{}^{l} \times \left(1 - \left(1 - S_e{}^{1/m}\right)^m\right)^2 \quad (۳)$$

که در آن θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع (L^3L^{-3})، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (LT^{-1}) و α و n ثابت‌های تجربی به ترتیب (L^{-1}) و بدون بعد و $m = 1 - 1/n$ است و S_e درجه اشباع مؤثر است. مقدار l برای اکثر خاک‌ها برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

1- Richards

جدول ۱- نتایج خروجی مدل Rosetta (ورودی اولیه هردو مدل)

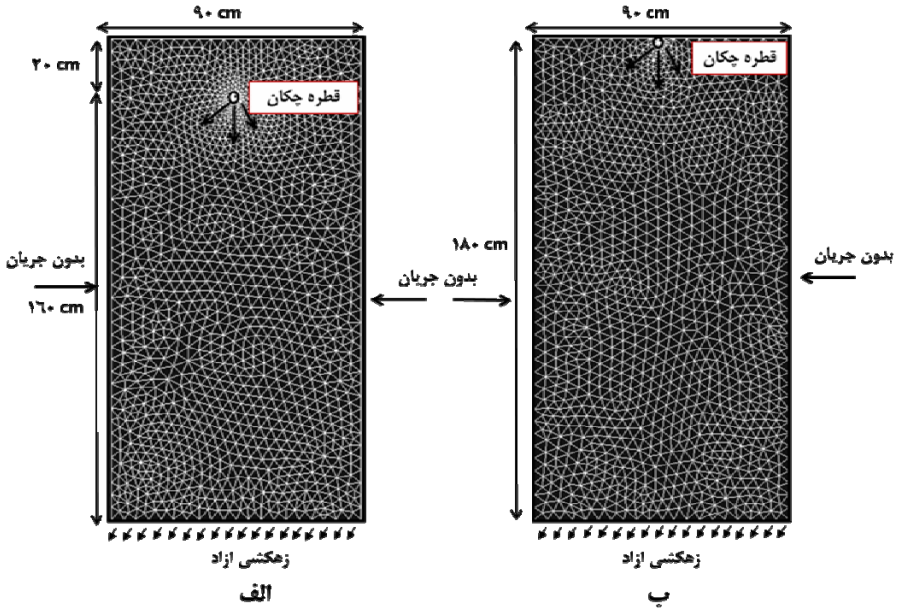
θ_r (cm^3cm^{-3})	θ_S (cm^3cm^{-3})	α (cm^{-1})	n	L	K_s (cms^{-1})
۰/۰۷۲	۰/۴۳	۰/۵۳	۱/۶۱	۰/۵	۱/۳۸

نتایج حاصل از مدل Rosetta با توجه به مشخصات خاک مورد آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.

پذیرش انواع شرایط مرزی (فشار، دبی، نشت به صورت نقطه‌ای و خطی)، پذیرش انواع مختلف توابع هدایت آب و منحنی رطوبتی برای خاک‌های غیرهمگن و ایزوتوپ، استفاده از عناصر محدود نامتناهی برای حذف اثر مرزهای نامحدود بر فرایند شبیه‌سازی، امکان محاسبه مقدار دبی نشت، سرعت و فشار در هر مقطع دلخواه و در هر جهت ازمهمترین قابلیت‌های هر دو مدل شبیه‌سازی است که استفاده از آنها را در تحلیل مسائل حرکت آب در خاک تسهیل می‌نماید. توضیح بیشتر در مورد تفاوت دو مدل اینکه اساس کار در روش اجزای محدود با حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی می‌باشد. در حالی که روش تفاضلات محدود معادله دیفرانسیل همزمان با یک سری معادلات جبری خطی جایگزین می شود. تفاضلات محدود بر این اصل استوار است که مشتقات تابع در یک نقطه را می توان با عبارتی جبری جایگزین کرد که شامل مقدار تابع در آن نقطه و چندین نقطه همجوار است. اساس این روش برای حل معادلات استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است.

شرایط مرزی و اولیه در مدل‌های شبیه‌سازی

مطابق با ابعاد مدل فیزیکی آزمایشگاهی، شکل هندسی با در نظر گرفتن عمق نصب قطره‌چکان در هر دو مدل ایجاد شد (شکل ۲). به دلیل اینکه خاک داخل مدل فیزیکی قبل از شروع آزمایش نسبتاً خشک (در هوای آزاد) بود رطوبت حجمی اولیه خاک برابر ۷/۵ درصد (کمی‌بیش از رطوبت باقیمانده که توسط برنامه Rosetta تخمین زده شده بود) در نظر گرفته شد.کناره‌های راست و چپ مدل فیزیکی، شرط مرزی بدون جریان، محل قطره‌چکان شرط مرزی جریان متغیر و پایین ستون خاک به صورت شرط زهکشی آزاد در هر دو مدل شبیه‌سازی تعریف گردید (شکل ۲).



شکل ۲ - شمای موقعیت قطره‌چکان و شرایط مرزی در مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W (الف) قطره‌چکان در سطح خاک ب) قطره‌چکان در عمق ۲۰ سانتی‌متری از خاک)

ارزیابی مدل‌ها

به منظور تحلیل نتایج، جبهه رطوبتی برای آبیاری قطره‌ای سطحی به صورت نیم بیضی و در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به صورت بیضی نامتقارن (به دلیل بیشتر بودن حرکت رو به پایین) در نظر گرفته شد. حرکت جبهه رطوبتی در آبیاری سطحی به حرکت عرضی رطوبت (R) و حرکت عمودی رطوبت (Y) تقسیم شده و برای آبیاری زیرسطحی حرکت عرضی رطوبت (R) و حرکت عمودی رطوبت به دلیل نیروی ثقل حرکت عمودی رو به پایین (-Y) و حرکت عمودی رو به بالا (+Y) تقسیم شد. R بیانگر نصف عرض خیس شده یا نصف حرکت عرضی رطوبت است. برای مقایسه داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده پیشروی جبهه رطوبتی و برآورد خطای مدل‌ها برای دو دبی ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت در طول آبیاری و پس از توزیع مجدد رطوبت در خاک، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{N}} \quad (۴)$$

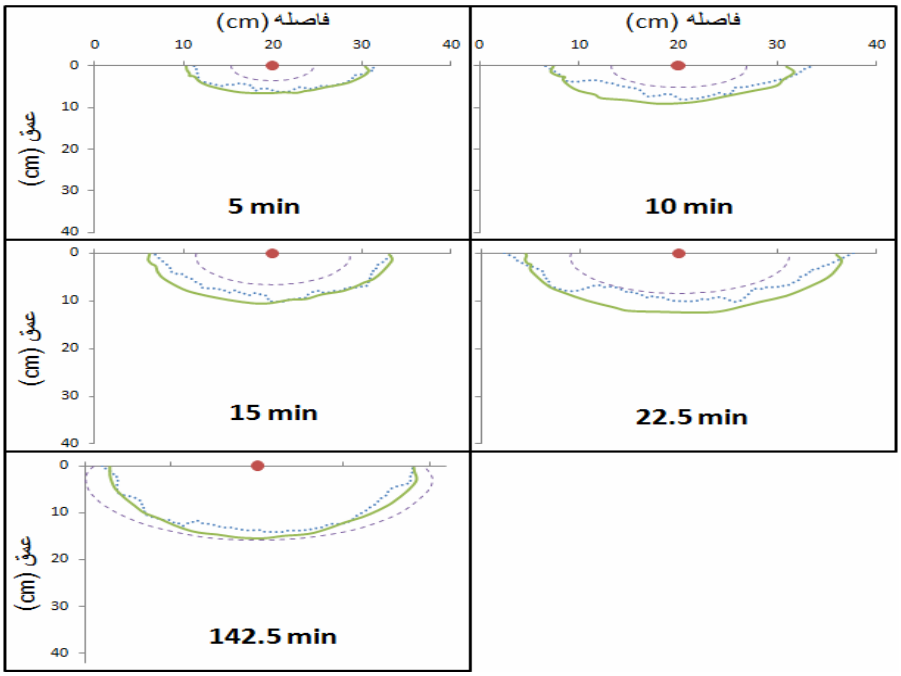
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۵)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۶)$$

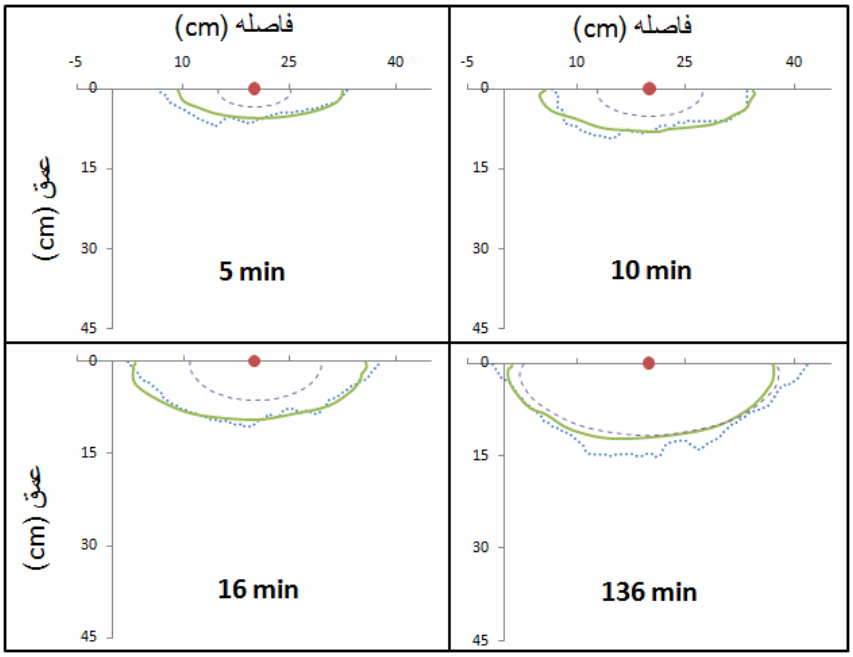
که در آن O_i مقدار اندازه‌گیری، P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و N تعداد داده‌ها است. RMSE (بر حسب سانتی‌متر) هر چه به صفر نزدیکتر باشد نشان‌گر خطای کمتر مدل در پیش‌بینی است. ضریب تبیین بین صفر تا یک است که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد همبستگی نتایج مدل با نتایج اندازه‌گیری شده بیشتر است و CRM نشانگر تمایل مدل به بیش برآورد یا کم برآورد در پیش‌بینی‌ها نسبت به داده‌های واقعی است. هر چه مقدار منفی یا مثبت آن بیشتر باشد، به ترتیب میزان بیش برآورد یا کم برآورد مدل بیشتر است.

نتایج و بحث

برای ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W نتایج آزمایش‌ها و نتایج ارائه شده توسط مدل‌ها، برای پیشروی‌های جبهه رطوبت در حالت‌ها و حجم‌های مختلف آبیاری با یکدیگر مقایسه شدند.



شکل۳- پیشروی جبهه رطوبت در آبیاری قطره‌ای ثقلی سطحی با دبی ٤/٥ لیتر بر ساعت (داده‌های مشاهداتی خط ممتد، مدل SEEP/W خط چین و مدل HYUDRS-2D نقطه چین)



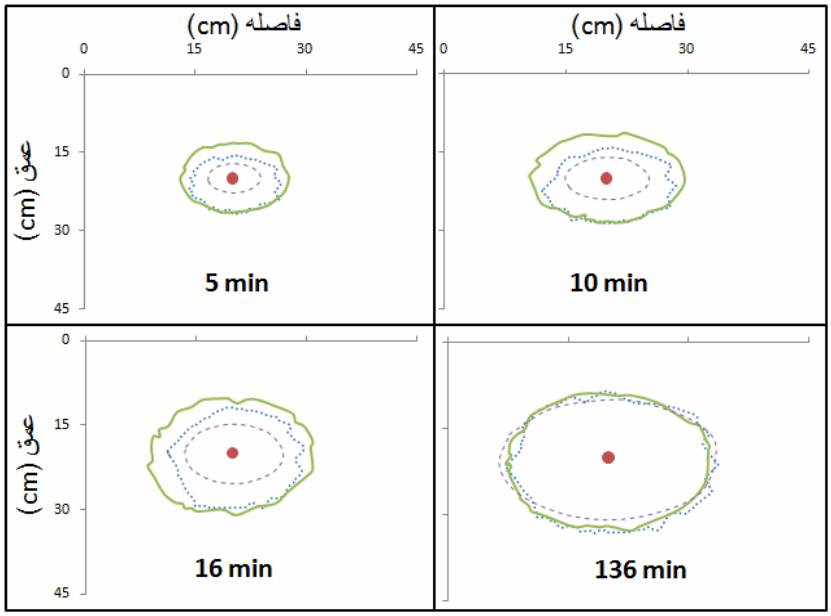
شکل ٤- پیشروی جبهه رطوبت در آبیاری قطره‌ای ثقلی سطحی با دبی ٦/٣ لیتر بر ساعت (داده‌های مشاهداتی خط ممتد، مدل SEEP/W خط چین و مدل HYUDRS-2D نقطه چین)

شکل ۳ الگوی توزیع رطوبت در خاک برای آبیاری قطره‌ای سطحی زمانی که دبی قطره‌چکان ۴/۵ لیتر بر ساعت بود، را نشان می‌دهد.

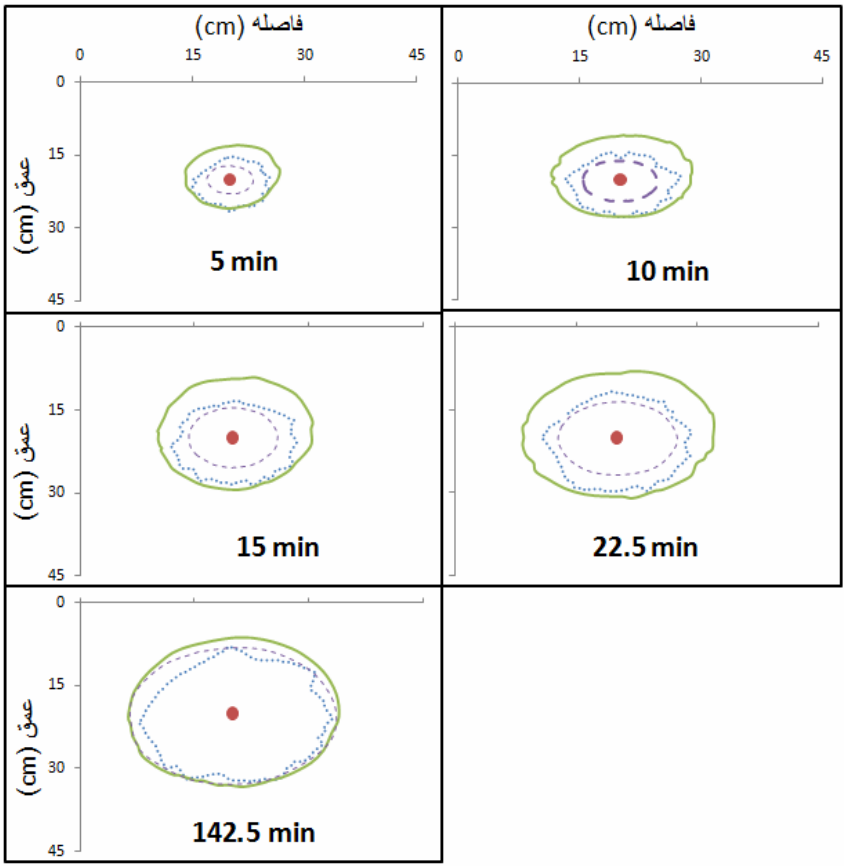
نتایج این شکل نشان می‌دهد که در طول آبیاری هر دو مدل HYDRUS-2D و SEEP/W مقادیر کمتری برای پیشروی جبهه رطوبت نسبت به مدل فیزیکی پیش‌بینی کردند. با توجه به اینکه در هر دو مدل معادله ریچاردز به کار رفته است، علت این کم برآورد ممکن است در فرضیات معادله ریچاردز نهفته باشد. به عنوان مثال، در این معادله جریان آب در داخل منافذ بزرگ (macropores) یا به اصطلاح جریان ترجیحی در نظر گرفته نمی‌شود که موجب کم برآورد هر دو مدل می‌گردد. مقایسه دو مدل نشان می‌دهد که مدل SEEP/W در طول آبیاری جبهه رطوبتی را کمتر از مقدار واقعی و مدتی بعد از قطع آبیاری (۲۲/۵ دقیقه زمان قطع) بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کند در صورتی که مدل HYDRUS-2D همواره کم برآورد دارد البته هم در طول آبیاری و هم پس از آن مدل HYDRUS-2D مقادیر دقیق‌تری را نسبت به مدل SEEP/W برآورد نمود (شکل ۳).

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که در دبی ۶/۳ لیتر بر ساعت هم مدل HYDRUS-2D پیشروی جبهه رطوبت را در طول آبیاری مقادیر دقیق‌تری نسبت به مدل SEEP/W برآورد نمود (شکل ۴). همچنین در زمان پس از آبیاری به علت خشک فرض نمودن خاک و بالا بودن مکش ماتریک پیشروی جبهه رطوبت در دو مدل HYDRUS-2D و SEEP/W تقریباً بیشتر از مدل فیزیکی بود. مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که با افزایش دبی از ۴/۵ به ۶/۳ لیتر بر ساعت مدل SEEP/W همواره کم برآورد داشت اما در مدل HYDRUS-2D با افزایش دبی مقدار جبهه رطوبتی بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شد. بنابراین در صورت استفاده از مدل HYDRUS-2D در تخمین فاصله بهینه قطره چکان‌ها در دبی‌های کم، بایستی فاصله‌ها بیشتر از مقداری که بر اساس حرکت رطوبت در خاک در نظر گرفته می‌شود، به کار برده شود در حالیکه با افزایش دبی این فاصله باید کمتر در نظر گرفته شود تا اثر کم برآورد یا بیش برآورد مدل‌ها تعدیل گردد.

شکل‌های ۵ و ۶ الگوی توزیع رطوبت آب در خاک برای روش آبیاری قطره‌ای ثقلی زیرسطحی زمانیکه دبی قطره‌چکان ۴/۵ و۶/۳ لیتر بر ساعت بود، را نشان می‌دهد. نتایج این شکل هر دو مدل HYDRUS-2D و SEEP/W پیشروی رطوبت را در طول آبیاری مقادیر کمتر و پس از آن، مقادیر دقیق‌تری نسبت به واقعیت پیش بینی شد. علت این امر می‌تواند وجود جریان ترجیحی در خاک باشد که در معادله ریچاردز در نظر گرفته نمی‌شود. نتایج هر دو شکل نشان می‌دهد که در آبیاری زیرسطحی به دلیل نیروی ثقل، حرکت رو به پایین رطوبت بیش از حرکت رو به بالا بود.



شکل ۵- پیشروی جبهه رطوبت در آبیاری قطره‌ای ثقلی زیر سطحی با دبی ٤/٥ لیتر بر ساعت (داده‌های مشاهداتی خط ممتد، مدل SEEP/W خط چین و مدل HYUDRS-2D نقطه چین)



شکل٦- پیشروی جبهه رطوبت درآبیاری قطره‌ای ثقلی زیرسطحی با دبی ٦/٣ لیتر بر ساعت (داده‌های مشاهداتی خط ممتد، مدل SEEP/W خط چین و مدل HYUDRS-2D نقطه چین)

جدول ۲- مقادیر ضریب تبیین و ریشه متوسط مربعات خطا و ضریب توده باقیمانده بین مقادیر شبیه سازی و مشاهداتی پیشروی رطوبت در دبی ٤/٥ لیتر بر ساعت تا ۲ ساعت پس از قطع جریان

روش آبیاری	نوع حرکت	مدل شبیه سازی	R^2	RMSE (cm)	CRM
آبیاری قطره‌ای سطحی	R	HYDRUS-2D	۰/۹۰	۱/۵	۰/۰۰
		SEEP/W	۰/۶۲	۴/۸	۰/۳۰
	Y	HYDRUS-2D	۰/۹۳	۱/۲	۰/۰۷
		SEEP/W	۰/۷۸	۳/۱	۰/۲۷
آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (قطره‌چکان در عمق ۲۰ سانتی‌متری)	R	HYDRUS-2D	۰/۹۷	۱/۸	۰/۱۷
		SEEP/W	۰/۷۷	۳/۳	۰/۳۳
	Y+	HYDRUS-2D	۰/۸۷	۳/۰	۰/۳۰
		SEEP/W	۰/۷۰	۴/۴	۰/۴۴
	Y-	HYDRUS-2D	۰/۸۳	۱/۱	۰/۰۱
		SEEP/W	۰/۸۱	۳/۱	۰/۳۴

تحلیل نتایج دو مدل در برآورد جبهه رطوبت

در شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D، مقادیر RMSE و CRM برای دبی ۴/۵ لیتر برساعت به ترتیب بین ۱/۱۵ تا ۳/۰۲ سانتی‌متر و صفر تا ۰/۳۰ بدست آمد (جدول ۲). این مقادیر و همچنین مقادیر ضرایب تبیین نشان می‌دهد که مدل فوق دقت خوبی در شبیه‌سازی پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی داشت. این نتایج با نتایج تحقیقات ملایی کندلوس و همکاران (۶)، شان و همکاران (۸) و سایل و همکاران (۹) مطابقت خوبی داشت. اما مدل SEEP/W نسبت به مدل HYDRUS-2D دقت کمتری در برآورد پیاز رطوبتی خاک داشت به طوریکه مقدار RMSE آن به حدود ۵ سانتی‌متر هم رسید (جدول ۲). هر دو مدل SEEP/W وHYDRUS-2D تمایل به کم برآوردن حرکت رطوبت در طول آبیاری داشتند ولی میزان این تمایل در مدل SEEP/W بیشتر بود (جدول ۲).

همچنین نتایج جدول ۲ نشان می دهد که دقت هر دو مدل در شبیه سازی حرکت عمودی رطوبت بیشتر از دقت مدل‌ها در پیش بینی حرکت افقی رطوبت درآبیاری قطره‌ای سطحی با دبی ۴/۵ لیتر بر ساعت بود. بنابراین در تدوین برنامه آبیاری قطره‌ای سطحی براساس خروجی این مدل‌ها تکیه بر تعیین زمان بندی آبیاری می‌تواند دقیق تر از تکیه بر فاصله قطره‌چکان‌ها و لترال‌ها باشد. مقایسه نتایج دو مدل برای آبیاری سطحی و زیر سطحی نشان داد که در آبیاری زیر سطحی با دبی ۴/۵ لیتر بر ساعت، دقت مدل HYDRUS-2D به ترتیب در حرکت افقی رطوبت، حرکت عمودی رو به پایین و حرکت عمودی رو به بالای رطوبت نسبت به آبیاری سطحی کاهش یافت در حالیکه مدل SEEP/W جبهه رطوبتی در حرکت رو به پایین رطوبت نسبت به حرکت افقی و حرکت روبه بالا را با دقت بیشتری برآورد کرد (جدول ۲). مدل HYDRUS-2D (روش تفاضلات محدود) در آبیاری زیر سطحی هم دقت بیشتری نسبت به مدل SEEP/W (روش اجزاء محدود) داشت.

نتایج ارزیابی برآورد دو مدل در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبت برای دبی ۶/۳ لیتر بر ساعت در جدول ۳ آمده است. مقادیر RMSE و CRM برای مدل HYDRUS-2D به ترتیب بین ۰/۹ تا ۲/۶ سانتی‌متر و ۰/۲۱- تا ۰/۲۱ و برای مدل SEEP/W به ترتیب از ۲/۲ تا ۶/۵ سانتی‌متر و ۰/۰۹ تا ۰/۴۳ بدست آمدند و این نشان می‌دهد که در دبی‌های بیشتر هم، مدل HYDRUS-2D دقت بیشتری نسبت به مدل SEEP/W درشبیه‌سازی پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی داشت. روند تغییرات CRM نشان داد که در مدل HYDRUS-2D با افزایش دبی از ۴/۵ به ۶/۳ لیتر بر ساعت تمایل به بیش برآورد در برخی موارد (حرکت افقی و عمودی در آبیاری قطره‌ای سطحی و حرکت رو به بالای رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی) داشت درحالیکه مدل SEEP/W همچنان تمایل به کم برآورد میزان حرکت رطوبت در خاک داشت (جدول۳). بنابراین در تدوین طرح و برنامه آبیاری قطره‌ای سطحی باید فاصله‌ها کمتر از مقدار تخمینی بر اساس خروجی مدل HYDRUS-2D باشد یا اینکه زمان آبیاری بیشتر در نظر گرفته شود.

مقایسه نتایج جدول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که دقت مدل HYDRUS-2D با افزایش دبی از ۴/۵ به ۶/۳ لیتر بر ساعت در آبیاری قطره‌ای سطحی کاهش ولی در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی افزایش یافت ولی دقت مدل برای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی و در دبی‌های ۴/۵ و ۶/۳ لیتر بر ساعت قابل قبول می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر ضریب تبیین و ریشه متوسط مربعات خطا و ضریب توده باقیمانده بین مقادیر شبیه سازی و مشاهداتی پیشروی رطوبت در دبی ۶/۳ لیتر بر ساعت تا ۲ ساعت پس از قطع جریان

روش آبیاری	نوع حرکت	مدل شبیه سازی	R^2	RMSE (cm)	CRM
آبیاری قطره‌ای سطحی	R	HYDRUS-2D	۰/۷۸	۲/۶	-۰/۱۴
		SEEP/W	۰/۶۴	۵/۷	۰/۳۷
	Y	HYDRUS-2D	۰/۹۸	۱/۷	-۰/۲۱
		SEEP/W	۰/۸۶	۲/۲	۰/۲۶
آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (قطره چکان در عمق ۲۰ سانتی‌متری)	R	HYDRUS-2D	۰/۹۳	۱/۱	۰/۰۹
		SEEP/W	۰/۶۶	۳/۴	۰/۳۱
	Y+	HYDRUS-2D	۰/۸۱	۲/۰	۰/۲۱
		SEEP/W	۰/۶۴	۳/۷	۰/۴۳
	Y-	HYDRUS-2D	۰/۹۰	۰/۹	-۰/۰۳
		SEEP/W	۰/۴۳	۶/۵	۰/۰۹

نتیجه‌گیری

حل دقیق رابطه حرکت آب در خاک (معادله ریچادرز) منجر به پیش بینی دقیق‌تر نحوه توزیع رطوبت در خاک می شود. در این تحقیق به منظور مقایسه روش‌های تفاضلات و اجزای محدود در حل معادله ریچادرز در توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان، عملکرد مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در تخمین پیشروی جبهه رطوبتی در اطراف قطره‌چکان با کمک داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مقایسه مدل‌ها بیانگر این است که هر دو مدل در طول آبیاری مقادیر کمتری نسبت به شرایط آزمایشگاهی برآورد کردند که یکی از دلایل آن عدم در نظر گرفتن جریان ترجیحی در معادله ریچادرز برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک می باشد. بیشترین مقدار RMSE، CRM و کمترین مقدار ضریب تبیین در دبی ۴/۵ لیتر بر ساعت برای مدل HYDRUS-2D (۳ سانتی‌متر، ۰/۳ و ۰/۸۷) در حرکت رو به بالای رطوبت در آبیاری زیر سطحی و برای مدل SEEP/W (۴/۸ سانتی‌متر، ۰/۴۴ و ۰/۶۲) در حرکت افقی رطوبت در آبیاری سطحی و حرکت رو به بالای آبیاری زیر سطحی حاصل شد. این مقادیر برای دبی ۶/۳ لیتر بر ساعت و مدل HYDRUS-2D (۲/۶ سانتی‌متر، ۰/۲۱ و ۰/۷۸) در حرکت افقی رطوبت در آبیاری سطحی و حرکت عمودی رطوبت در آبیاری زیر سطحی و در مدل SEEP/W (۶/۵ سانتی‌متر، ۰/۴۳ و ۰/۴۳) در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و حرکت رو به بالا و پایین رطوبت بدست آمد. به طور کلی نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، مدل HYDRUS-2D با بهره‌گیری از روش تفاضلات محدود در حل معادله ریچاردز نسبت به مدل SEEP/W که از روش اجزای محدود در حل این معادله استفاده می‌کند، مقادیر دقیق‌تری را پیش‌بینی کرد. بنابراین با استفاده از مدل HYDRUS-2D می‌توان جنبه‌های مختلف مدیریتی از قبیل فاصله لترال‌ها، دبی خروجی و عمق نصب (در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی) را برای شرایط مزرعه مورد نظر اعمال کرد تا بهترین گزینه برای مقدار حجم آب کاربردی و فاصله لترال‌ها و نیز عمق نصب قطره‌چکان‌ها (در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی) را پیدا نمود.

منابع

۱- اژدری خ. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۱).

۲- پروانک بروجنی ک. ۱۳۸۵. شبیه سازی الگوی خیسشدگی منطقه ریشه گیاهانِ تحت آبیاری قطره‌ای با استفاده ازتکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله علمیو ترویجی گیاه و زیست بوم.

۳- فروغی ف. و قائمی ع.ا. ۱۳۸۴. تعیین عمق بهینه آب آبیاری گندم بر اساس خط مشی های مختلف مدیریتی در آبیاری بارانی عقربه ای. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۹(۲):۱-۱۵.

۴- میرزایی ف.، لیاقت ع.، سهرابی ت. و امید م.ح. ۱۳۸۴. نمونه سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای نواری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۶(۲۳): ۵۳-۵۹.

5- Geo-slope Ltd .2001. Seep/W for finite element seepage analysis: user's guide. Calgary: Geo-slope Ltd.

6- MolaeiKandelous M and Simunek J. (2010). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. Irrigation Science 28:435–444

7- Provenzano G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 133(4): 342–349.

8- Shan Y., Wang Q. and Wang Ch. 2011. Simulated and measured soil wetting patterns for overlap zone under double points sources of drip irrigation. African Journal of Biotechnology. 10(63):13744-13755.

9- Siyal A.A. and Skaggs T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. Agricultural Water Management. 96, 893−904.

10- Šimůnek J., Sejna M. and Van Genuchten M.Th. 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, IGWMCTPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.

11- Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulicconductivity of unsaturated soils. Soil Science American Journal. 44, 892−898.

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 1, Mar.-Apr. 2014, p. 179-189

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۳، ص. ۱۸۹-۱۷۹

Evaluation of HYDRUS-2D and SEEP/W Models to Estimate Wetting Front for Surface and Subsurface Gravity Drip Irrigation

M. Ghorbanian[1*] - M. S. Monjezi[2] - H. Ebrahimian[3] - A. Liaghat4

Received:28-07-2013
Accepted:15-02-2014

Abstract

Many numerical and analytical models have been developed for estimation of soil water distribution in order to increase water use efficiency in drip irrigation. Accurate solution of well-known soil water equation, Richard's equation, in these models cause more accurate estimation of soil wetting front. The purpose of this study was to evaluate finite difference and finite element methods to numerical solution of Richard's equation for simulating soil water flow around dripper via comparing HYDRUS-2D and SEEP/W numerical models. Experiments were carried out to collect required data to investigate the advance of moisture front inside a Plexiglas box filled with a silt loam soil in central laboratory of water researches in University of Tehran. Wetting front advance at different time intervals were plotted on the transparent Plexiglas box walls. The wetting front around the emitters, for pressures 1.5 and 2.2 meters (equivalent to 4.5 and 6.3 liters per hour, respectively), were measured. Comparison of two simulation models, HYDRUS-2DandSEEP/W, showed that HYDRUS-2D model (finite difference solution method) with higher determination coefficient and lower root mean square error coefficient had better performance to simulate wetted area dimensions for both surface and subsurface drip irrigation.

Keywords: Emitter, Discharge, Simulation models, Wetting front

1, 2, 3 ,4- M.Sc. Student, Former M.Sc. Student, Asistant Professor and Professsor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Respectively
(*-Corresponding Author Email: ghorbanian110@ut.ac.ir)