شبیه‌سازی ابعاد الگوی رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرزمینی با مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی

محسن قره شیخ‌بیات، محمدرضا خالدیان[1]*، محمدحسن بیگلویی و پریسا شاهین‌رخسار

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه گیلان.

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوزه آبی دریای خزر.

khaledian@guilan.ac.ir

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان.

biglou@guilan.ac.ir

مربی پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان

pshahinrokhsar@yahoo.com

چکیده

امروزه استفاده از آبیاری قطره‌ای برای محصولاتی که به‌صورت ردیفی کشت می‌شوند رایج است. یکی از انواع آبیاری قطره‌ای، تیپ زیرزمینی می‌باشد. به‌منظور طراحی و مدیریت سامانه آبیاری قطره‌ای دانستن ابعاد خیس‌شدگی ضروری‌ست. با توجه به داشتن هزینه بالا و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز توصیه می‌شود.در همین راستا پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی سه مدل تجربی کندلوس و همکاران، تحلیلی WetUp و عددی HYDRUS-2D در آبیاری تیپ زیرزمینی با منبع خطی صورت گرفت. آبیاری در سه حجم 10، 15 و 20 لیتر در یک متر طول تیپ و سه عمق نصب تیپ 10، 20 و 30 سانتی‌متر در سه تکرار انجام شد. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده به‌وسیله هر سه مدل با شاخص‌های RMSE، nRMSE، CRM و MAE انجام شد. برای ابعاد خیس‌شدگی افقی مقدار RMSE برای مدل کندلوس و همکاران و مدل HYDRUS-2D به‌ترتیب 0/051 و 0/066 متر و برای خیس‌شدگی عمودی به‌ترتیب 0/052 و 0/078 متر بدست آمد. برای خیس‌شدگی افقی مقدار nRMSE برای مدل کندلوس و همکاران و مدل HYDRUS-2D به‌ترتیب 15/46 و 19/71 درصد به‌دست آمد که هر دو در رده خوب قرار گرفتند و برای خیس‌شدگی عمودی به‌ترتیب 15/99 و 23/74 درصد به‌دست آمد که به‌ترتیب در رده خوب و متوسط قرار گرفتند. آماره‌های بدست آمده برای مدل WetUp قابل قبول نبود. در خیس‌شدگی افقی و عمودی، شاخص CRM و MAE برای مدل کندلوس و همکاران کمترین مقدار را داشتند. در مجموع مدل کندلوس و همکاران بهترین برآورد را داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های شبیه‌ساز، خاک سیلتی‌رسی، مدل تجربی کندلوس.

---

[1] - آدرس نویسنده مسئول : رشت، گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.

* - دریافت : دی 1392 و پذیرش : مرداد 1394.

مقدمه

امروزه آبیاری قطره‌ای در جهان کاربرد زیادی دارد. استفاده زیاد از این روش آبیاری به‌دلیل بازدهی بالای آن است (کمپ، 1998). نوعی از آبیاری قطره‌ای، آبیاری زیرزمینی است که از این روش برای اولین بار در سال 1959 در کالیفرنیا استفاده شد (کمپ و همکاران، 2000). سوارز و همکاران (2000) گزارش دادند که این روش آب را مستقیما در اختیار ریشه قرار داده و باعث کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود. رُبرت و همکاران (2008) اعلام کردند که بسیاری از مطالعات، عملکرد بهتر تیپ را نسبت به قطره‌چکان‌ها تأیید کرده است. طراحی سامانه تیپ باید به‌صورتی انجام گیرد که آب در محیط توسعه ریشه به‌طور یکنواخت توزیع شود. تاکنون مدل‌های زیادی برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی توسط محققان معرفی شده است. اولین مدل تجربی برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای به‌وسیله شوارتزمن و زور (1986) ارائه شد.

در مدل شوارتزمن و زور شکل هندسی پیاز رطوبتی به نوع خاک، مقدار آب مصرفی و دبی قطره‌چکان نسبت داده شد. رابطه تجربی دیگری توسط چوو (1994) ارائه شده که در آن با درنظر گرفتن رابطه گرین-آمپت، الگوی خیس‌شدگی حاصل از قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای سطحی با دبی ثابت را شبیه‌سازی می‌کند. مدل تجربی سینگ و همکاران (2006)، براساس تجزیه و تحلیل آماری از مشاهدات مختلف واقعی طی آزمایش‌های گوناگون بدست آمده و مدل تجربی ملک و تروی‌پترز (2011) با ارائه مدلی که بر پایه روش‌های غیرخطی استوار است به برآورد عرض و عمق ناحیه خیس‌شده پرداختند. مدل‌های تحلیلی عموما با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل برای دستیابی به یک جواب دقیق و مشخص توسعه داده شده‌اند. کوک و همکاران (2003) با ارائه یک مدل تحلیلی که معادلات را بر اساس معادله فیلیپ (1984) به شکل کاملا تحلیلی حل می‌کند گامی جدید را در حل معادلات مربوط به روابط آب و خاک در آبیاری قطره‌ای برداشتند. کندلوس و سیمونک (2010) برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرزمینی به ارزیابی شبیه‌سازی مدل عددی HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، 1999)، مدل تحلیلی WetUp (کوک و همکاران، 2003)، مدل تجربی شوارتزمن و زور (1986)، مدل تجربی امین و اخمج (2006) و مدل تجربی کندلوس و همکاران (1387) پرداختند و برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها و داده‌های مشاهده شده با یکدیگر از شاخص متوسط خطای مطلق استفاده کردند. متوسط خطای مطلق در حالت‌های مختلف برای مدل HYDRUS-2D بین 0/87 تا 10/43 سانتی‌متر، برای مدل WetUp بین 1 تا 58/1 سانتی‌متر و برای مدل‌های تجربی بین 1/34 تا 12/24 سانتی‌متر بود.

در تحقیق پوریزدان‌خواه و خالدیان (1391) بررسی عملکرد مدل HYDRUS-2D با اعمال تغییرات زمانی هدایت هیدرولیکی خاک مدنظر قرار گرفته و عنوان شد که با درنظر گرفتن تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا از 0/061 به $0/022\ cm^3.cm^{-3}$ کاهش و ضریب کارایی مدل از 8% به 88% افزایش داشته است. معمولا بیشتر شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی روابط آب و خاک با مدل‌های متنوع در محیط آزمایشگاهی بوده (عباسی و تاجیک، 1386) و طبیعتا مدلی می‌تواند بیش‌ترین درجه صحت را به خود اختصاص دهد که بتواند در عمل داده‌های به‌دست آمده در شرایط مزرعه‌ای را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. بیشتر محققان در سراسر جهان در زمینه کارایی مدل HYDRUS-2D در زمینه شبیه‌سازی روابط آب و خاک در خاک‌های سبک، متوسط و نسبتا سنگین نتایج قابل قبولی کسب کرده‌اند (امین و اخمج، 2006؛ کوک و همکاران، 2003 و کندلوس و سیمونک، 2010). با توجه به تحقیقات انجام شده تاکنون به کارایی مدل HYDRUS-2D در شرایط مزرعه‌ای با خاک‌های دارای بافت سنگین و ناهمگن کمتر پرداخته شده است.

پژوهش پیش‌رو با هدف مقایسه کارایی سه مدل تجربی کندلوس و همکاران (1387)، تحلیلی WetUp (کوک و همکاران، 2003) و عددی HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، 1999) در برآورد گسترش افقی و عمودی الگوی خیس‌شدگی خاک تحت آبیاری قطره‌ای زیرزمینی با منبع خطی (تیپ) در خاک با بافت سیلتی‌رسی و ناهمگن در شرایط مزرعه‌ای در شهرستان رشت انجام شد. تعیین یک مدل مناسب برای طراحی و مدیریت سامانه آبیاری قطره‌ای در منطقه مورد مطالعه ضمن بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سبب افزایش بهره‌وری آب خواهد شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در تابستان 1391 در شهرستان رشت در زمینی به مساحت 90 متر مربع با شیب صفر انجام شد. فاصله لاترال‌ها (تیپ‌ها) روی مانی‌فلد 1/5 متر و طول هر تیپ یک متر بود. در هر مانی‌فلد بعد از نصب شیر یک‌طرفه، کنتور و فشارسنج قرار گرفت. در هر مانی-فلد به‌ترتیب سه لاترال ابتدایی در عمق 10 سانتی‌متری، سه لاترال وسطی در عمق 20 سانتی‌متری و سه لاترال انتهایی در عمق 30 سانتی‌متری نیم‌رخ خاک نصب شد.قبل از نصب در یک فشار ثابت دبی لاترال ابتدایی، وسط و انتهایی اندازه‌گیری و بعد از اطمینان از یکسان بودن هر سه دبی، سامانه آبیاری نصب شد. حدود 48 ساعت بعد از اتمام هر آبیاری ترانشه‌ای عمود بر جهت لاترال‌ها در محل آبیاری شده حفر شد و قسمت‌های اطراف هر تیپ با کاردک صاف شد و سپس ابعاد خیس‌شدگی خاک اندازه‌گیری شد.

مدل تجربی کندلوس و همکاران

کندلوس و همکاران (1387) روی مدل‌سازی تجربی ابعاد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرزمینی با منبع نقطه‌ای تحقیقی را انجام دادند. بعد از بررسی پارامترهای حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی اشباع و دبی قطره‌چکان در یک خاک لوم‌رسی، یک رابطه برای گسترش افقی خیس‌شدگی رابطه (1) و دو رابطه برای گسترش عمودی خیس‌شدگی رابطه (2)، جهت عمودی در زیر قطره‌چکان و رابطه (3) ، جهت عمودی در بالای قطره‌چکان) با استفاده از آنالیز ابعادی مشابه روش سینگ و همکاران (2006) ارائه کردند.

$$W = 4.244(V_w)^{0.626}\left(\frac{K_s}{Q}\right)^{0.026} \quad (1)$$

$$Z_- = 0.66(V_w)^{0.333}\left(\frac{K_s}{Q}\right)^{-0.167} \quad (2)$$

$$Z_+ = 0.72(V_w)^{0.344}\left(\frac{K_s}{Q}\right)^{-0.156} \quad (3)$$

در روابط (1) تا (3)، W، Z_- و Z_+ به‌ترتیب گسترش خیس‌شدگی افقی، عمودی در زیر و بالای قطره-چکان (m)، V_W حجم آب کاربردی نفوذ یافته (m^3)، Q دبی قطره‌چکان ($m^3.s^{-1}$) و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($m.s^{-1}$) می‌باشد.

مدل تحلیلی WetUp

مدل تحلیلی WetUp (کوک و همکاران، 2003) بسته‌ای نرم‌افزاری است که با زبان QBasic نوشته شده و به‌صورت ساده شکل تقریبی (محیط) پیاز رطوبتی را بر اساس معادله فیلیپ (1984) شبیه‌سازی می‌کند. این مدل مجهز به یک شبیه‌ساز گرافیکی بوده و قابلیت نشان دادن الگوی رطوبتی خیس‌شده برای دبی و زمان آبیاری مدنظر را در آن واحد دارد. در این مدل الگوی رطوبتی به صورت بیضی سر بریده در نظر گرفته شده و برای منبع نقطه‌ای سطحی و زیرسطحی مورد استفاده قرار می-گیرد.در خاک‌های متوسط و سبک این بیضی کشیده‌تر و در خاک‌های سنگین پهن‌تر و شبیه به دایره سربریده است.داده‌های ورودی به این مدل بسیار کم بوده و در عمل نمی‌توان پارامترهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده به-صورت آزمایشگاهی و مزرعه‌ای را برای هر بافت خاک به مدل معرفی کرد. معادله ارائه شده در رابطه (4) نشان داده شده است.

$$T(R,\emptyset)=\frac{\exp\left(2R\sin^2\frac{1}{2}\emptyset\right)}{2\cos^2\frac{1}{2}\emptyset}\times\left\{R^2-R+\left[Ln\left(\cos\frac{1}{2}\emptyset\right)-R\,si\sin^2\frac{1}{2}\emptyset+\frac{1}{2}\right]Ln\left(\frac{\exp\left(2R\sin^2\frac{1}{2}\emptyset\right)-\cos^2\frac{1}{2}\emptyset}{\sin^2\frac{1}{2}\emptyset}\right)-\frac{1}{2}\left[L\left(\sec^2\frac{1}{2}\emptyset\right)exp\left[2R\sin^2\frac{1}{2}\emptyset\right]-L\left(\sec^2\frac{1}{2}\emptyset\right)\right]\right\}\quad 0<\emptyset<\pi \qquad (4)$$

در رابطه (4)، R و $\emptyset$ مختصات قطبی کروی هستند که در این صورت فاصله افقی منبع تا مرز خیس شده (S) و فاصله عمودی منبع تا مرز خیس شده (Z) به‌ترتیب برابر $R\sin\emptyset$ و $R\cos\emptyset$ با بعد واحد طول (L) می‌باشند. $R=\frac{\alpha_\omega}{2}$ و α_ω عکس ارتفاع مویینگی ماکروسکوپی با بعد (L^{-1}) است.

مدل عددی HYDRUS-2D

مدل عددی HYDRUS-2D بسته‌ای نرم‌افزاری است که با بهره‌گیری از حل عددی معادله دو بعدی ریچاردز (1931) به‌عنوان مبنای محاسبات به شبیه‌سازی روابط آب و خاک می‌پردازد رابطه (5). شبیه‌سازی معکوس برای برآورد برخی از پارامترهای هیدرولیکی خاک و شبیه‌سازی انتقال املاح و انتقال گرما در محیط‌های اشباع و غیراشباع در حالت‌های مختلف از توانایی‌های دیگر مدل می‌باشد (سیمونک و همکاران، 1999).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial z}+K(h)\right)-S(h,x,z) \qquad (5)$$

که در آن:

θ معادل رطوبت حجمی خاک، t مدت زمان، h برابر با پتانسیل فشاری آب (رطوبت) موجود در خاک، x و z به ترتیب محور افقی و عمودی (به سمت راست و بالا جهت مثبت نمودار)، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی خاک مورد نظر و تابع $S(h,x,z)$ تابعی است که جذب آب توسط ریشه گیاهان را که در مدل HYDRUS-2D براساس روش‌های فدس و S-Shape (فدس و همکاران، 1978) هست، برآورد می‌کند. برای بدست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌توان از معادله‌های مختلف استفاده کرد که در این تحقیق از معادله ون‌گنوختن (1980) استفاده شد.

تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک سطحی با روش بیرکن

در روش نفوذسنجی بیرکن از یک تک استوانه ساده استفاده شد. یک نمونه‌ی خاک به‌منظور تعیین منحنی دانه‌بندی خاک و رطوبت اولیه برداشت شد. رطوبت اولیه خاک به روش وزنی تعیین گردید. جرم مخصوص ظاهری خاک نیز تعیین شد. سپس استوانه در سطح خاک قرار داده شد و برای جلوگیری از نفوذ جانبی تا عمق حدود یک سانتی‌متر در خاک سطحی کوبیده شد (هاورکمپ و همکاران، 1994). زمانی که نخستین حجم آب اضافه شده به‌طور کامل در خاک نفوذ کرد، دومین حجم مشخص آب به استوانه اضافه و زمان لازم یادداشت شد (زمان تجمعی).

این کار برای حدود 12-8 سری حجم معین آب تکرار و نفوذ تجمعی یادداشت شد. به دلیل قابل دسترس نبودن نرم‌افزار BEST (لاساباتر و همکاران، 2006) که برای استخراج خصوصیات هیدرولیکی خاک با توجه به نتایج آزمایش بیرکن مورد استفاده قرار می‌گیرد، براساس الگوریتم مورد استفاده آن، سه برنامه در محیط برنامه‌نویسی فرترن نوشته شد که برای استخراج هدایت هیدرولیکی اشباع از آن‌ها استفاده شد، شایان ذکر است که کارایی این برنامه‌ها کاملاً مشابه نرم‌افزار BEST است (پوریزدان‌خواه، 1391). به‌منظور استخراج هدایت هیدرولیکی سری داده‌های جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل، توزیع اندازه‌ی ذرات، شعاع حلقه، زمان و ارتفاع تجمعی نفوذ به فرمت txt به برنامه‌های توسعه داده شده، معرفی شد. در این تحقیق، شعاع استوانه 9/75 سانتی‌متر بود و تعیین توزیع اندازه‌ی ذرات خاک بر اساس روش هیدرومتری بود.

روش حل معکوس و بدست آوردن پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک در مدل ون‌گنوختن

برای برآورد پارامتر هدایت هیدرولیکی، خاک به سه لایه 0-20، 20-40 و 40-60 سانتی‌متر تقسیم شد.برآورد هدایت هیدرولیکی لایه اول با روش بیرکن صورت گرفت. به دلیل اینکه روش بیرکن (هاورکمپ و همکاران، 1994) قادر به برآورد هدایت هیدرولیکی در عمق بیش از 20 سانتی‌متر نبود برای برآورد هدایت هیدرولیکی لایه‌های پایینی و پارامترهای هیدرولیکی مربوطه از روش حل معکوس در مدل HYDRUS-2D و برای حل عددی معادلات حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین وبرای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ-مارکوارت (سیمونک و همکاران، 1999) استفاده شد. در این روش باید نقاط را با رعایت ضرایب وزن‌دهی به عنوان نقطه کنترل به مدل معرفی کرد. برای مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت اشباع به ترتیب ضرایب وزن‌دهی یک و 10 درنظر گرفته و به مدل معرفی شد. صرفا برای معرفی مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی در روش حل معکوس از تخمین مدل Rosetta استفاده شد. جرم مخصوص ظاهری برای لایه اول، دوم و سوم به‌ترتیب مقادیر 1/58، 1/59 و 1/6 گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری و پارامتر l برای مدل ون‌گنوختن بر اساس پیشنهاد ون‌گنوختن (1980) و به نقل از عباسی (1386) 0/5 فرض شد. نتایج به‌دست آمده برای پارامترهای هیدرولیکی در جدول (1) نشان داده شده است. در واقع قبلا محل اجرای آزمایش شالی‌زار بوده (حدود 10 سال پیش) و سپس حدود 20 سانتی‌متر روی آن خاک‌ریزی شده و کفه شخم یا هاردپن که در لایه سوم قرار دارد به وضوح بیانگر وجود شالی‌زار بوده است که دارای هدایت هیدرولیکی پایینی می‌باشد.

جدول1- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن - معلم

لایه‌ای خاک (cm)	l (-)	n-Mualem (-)	α (cm^{-1})	K_s ($cm.day^{-1}$)	θ_r ($cm^3.cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3.cm^{-3}$)
لایه اول (0-20)	0/5	1/380	0/04130	3/528	0/0523	0/5026
لایه دوم (20-40)	0/5	1/740	0/0116	2/77	0/015	0/4698
لایه سوم (40-60)	0/5	1/246	0/0166	0/0044	0/0658	0/491

θ_s و θ_r به‌ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقی‌مانده، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، α عکس ارتفاع موئینه در مدل ون‌گنوختن، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک و l پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است.

جدول 2- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده گسترش افقی خیس‌شدگی

	MAE	CRM	nRMSE(%)	RMSE(m)
مقایسه گسترش افقی اندازه‌گیری شده با مدل کندلوس و همکاران	0.0394	0.1161	15.4635	0.0518
مقایسه گسترش افقی اندازه‌گیری شده با مدل WetUp	0.1711	-0.5099	51.9413	0.1742
مقایسه گسترش افقی اندازه‌گیری شده با مدل HYDRUS-2D	0.0577	0.1721	19.7179	0.0661

لازم به ذکر است که در قسمت عمودی برای هر سه مدل قسمت خیس‌شدگی در بالا و پایین مکان نصب تیپ باهم جمع شده است و با یک عدد گزارش شده است. برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل‌ها، از شاخص‌های آماری ریشه متوسط مربعات خطا رابطه (6)، ریشه نرمال شده مربعات خطا یا درصد خطا رابطه (7)، ضریب جرم باقی‌مانده رابطه (8) و میانگین خطای مطلق رابطه (9) استفاده شد. آماره RMSE میزان تفاوت بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و هر چه این شاخص کمتر باشد نشانه شبیه‌سازی بهتر مدل می‌باشد. آماره MAE انحراف از خطا را نشان داده و طبیعی‌ست که هر چه مقدار آن به صفر نزدیک باشد بهتر است. روابط مربوط به RMSE، nRMSE، CRM و MAE به‌ترتیب در روابط (6) تا (9) ارائه شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(S_k - O_k)^2}{n}} \quad (9)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (10)$$

$$CRM = \frac{[\sum_{k=1}^{n} O_k - \sum_{k=1}^{n} S_k]}{\sum_{k=1}^{n} O_k} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{(S_k - O_k)}{n} \quad (12)$$

که در آن:

$\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، O_k مقدار اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف نیم‌رخ خاک، S_k مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده در نقاط متناظر و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده گسترش افقی خیس‌شدگی

نتایج حاصل از مقایسه گسترش افقی خیس‌شدگی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در جدول (2) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کم‌ترین مقدار RMSE برای مدل کندلوس و همکاران (1387) و بیش‌ترین مقدار آن برای مدل WetUp به‌دست آمد. در بررسی‌های جامیسون و همکاران (1991) و بنایان و هوگنبوم (2009) محدوده صفر تا 10 درصد برای آماره nRMSE کارایی عالی، محدوده 10 تا 20 درصد کارایی خوب، محدوده 20 تا 30 درصد کارایی متوسط و بیشتر از 30 درصد کارایی ضعیف و غیرقابل قبول مدل مورد بررسی گزارش شده است. آماره nRMSE برای مدل کندلوس و همکاران (1387) و HYDRUS-2D در رده خوب و برای مدل WetUp در رده ضعیف قرار گرفت.آماره CRM برای هر سه مدل مقدار زیادی را نشان داد (البته در بین سه مدل، مدل کندلوس و همکاران (1387) و HYDRUS-2D بهتر بودند). کمترین مقدار MAE مربوط به مدل کندلوس و همکاران (1387) و بیشترین مقدار آن مربوط به مدل WetUp بود. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج کندلوس و سیمونک (2010) و کوک و همکاران (2003) مطابقت داشت.در شکل (1) (الف، ب و ج) که مربوط به مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده گسترش افقی خیس‌شدگی به‌ترتیب در سطح آبیاری 10، 15 و 20 لیتر می‌باشد، محور افقی گسترش افقی خیس‌شدگی (رطوبت) بر حسب متر و محور عمودی عمق نصب نوار آبیاری (تیپ) بر حسب متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هیچ یک از سطوح آبیاری شکل (1)، گسترش افقی شبیه‌سازی شده توسط مدل WetUp با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌خوانی خوبی ندارد.

کارایی ضعیف مدل WetUp به علت عدم معرفی کامل شرایط اولیه (به علت ساختار مدل)، سه لایه بودن خاک (که برای مدل قابل معرفی نبود) و عدم وجود روش حل معکوس در این مدل بود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که هر چه داده‌های ورودی به یک مدل شبیه‌ساز بیشتر (موثرتر در توصیف وضعیت هیدرولیکی خاک) باشد می‌توان انتظار مدل تصویر بهتری از مساله داشته باشد و شبیه‌سازی با دقت بهتری انجام شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مدل تحلیلی WetUp برای تخمین ابعاد جبهه‌ی رطوبتی در خاک سیلتی‌رسی منطقه مورد مطالعه مناسب نمی‌باشد.

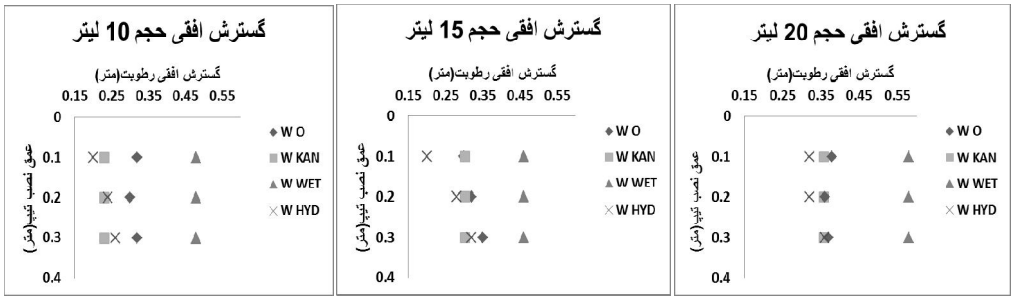
باید دقت نمود که مدل WetUp یک مدل تحلیلی است، در مدل‌های تحلیلی یکسری فرضیات ساده کننده اختیار می‌شود تا بتوان معادله حرکت آب در خاک را حل نمود که لزوما منطبق بر واقعیت نیستند لذا بالاجبار دقت مدل پایین می‌آید. از طرفی مدل برای یک خاک همگن توسعه داده شده در صورتی که خاک محل آزمایش دارای سه لایه با خصوصیات هیدرولیکی متفاوت است. این مدل برای تخمین ابعاد خیس‌شدگی از بانک اطلاعاتی خود که برای زمان‌های آبیاری مشخص، دبی‌های مشخص، رطوبت اولیه‌های مشخص و موقعیت قطره‌چکان تهیه شده است استفاده می‌کند و صرفا پس از دریافت اطلاعات از کاربر با درون‌یابی مقادیر موجود در

بانک اطلاعاتی خود اقدام به ارائه گزارش می‌کند و طبیعی است که دقت مدل پایین بیاید. از طرفی این بانک اطلاعاتی مخصوص خاک‌های استرالیا بوده که از دو مطالعه کلپ و هورنبرگر (1978) و وربورگ و همکاران (2001) استخراج شده است که ظاهرا تطابق خوبی با شرایط خاک منطقه مورد مطالعه ندارد. به‌طور مثال رطوبت اولیه خاک در این مدل با سه حالت توصیفی و نه کمی دریافت می‌شود: خشک، مرطوب و خیلی مرطوب.در صورتی‌که در مدل HYDRUS-2D رطوبت دقیق خاک وارد می‌شود. لذا شرایط اولیه خاک را نمی-توان به‌طور دقیق برای مدل WetUp تعریف کرد و با این شرایط نباید انتظار جواب‌های دقیق داشت.

گسترش افقی شبیه‌سازی شده توسط مدل کندلوس و همکاران (1387) و مدل HYDRUS-2D با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌خوانی قابل قبولی دارد. مدل HYDRUS-2D یک مدل عددی است که با ورودی زیادی که دارد به‌خوبی می‌توان شرایط خاک را برای مدل توصیف کرد، برخلاف مدل WetUp که دارای ورودی-های محدودی است. از طرفی در مدل HYDRUS-2D به‌خوبی می‌توان سه لایه متفاوت خاک را به مدل معرفی کرده و شرایط هیدرولیکی هر لایه را تعریف کرد. در مورد مدل کندلوس و همکاران (1387) می‌توان گفت که شرایط خاکی که مدل در آن توسعه یافته تا حدود زیادی شبیه شرایط خاک مزرعه محل آزمایش بوده است. خاک محل آزمایش سیلتی‌رسی بوده و برای مدل کندلوس لوم-رسی بوده است.

دبی کاربردی شبیه به هم بوده است و جرم مخصوص ظاهری خاک محل آزمایش از 1/58 تا 1/6 گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و برای مدل کندلوس و همکاران (1387) 1/55 گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است. از طرفی مدل کندلوس و همکاران (1387) به‌گونه-ای توسعه یافته که می‌توان خصوصیات هیدرولیکی خاک را در قالب هدایت هیدرولیکی اشباع به مدل معرفی نمود لذا مدل تصویری مناسب از وضعیت هیدرولیکی خاک دارد و باتوجه به اینکه سایر خصوصیات خاک و سامانه‌ی آبیاری تقریبا شبیه هم هستند لذا جواب‌های مدل به واقعیت نزدیک خواهد بود. هرچند مطابقت مناسب جواب‌های مدل و داده‌های مشاهده‌ای مطالعه حاضر به معنای تایید نهایی مدل و توصیه آن برای سایر نقاط نیست چرا که مدل‌های تجربی برای مناطقی که در آن توسعه داده شده‌اند یا مناطق مشابه مناسب هستند. بنابراین برای منطقه مورد مطالعه می‌توان مدل کندلوس و همکاران (1387) را توصیه کرد چرا که داده‌های ورودی کمی دارد و دقت نتایج نیز مناسب است. مدل HYDRUS-2D هرچند جواب‌های مناسبی دارد ولی تامین داده‌های ورودی آن گاها دشوار است و اکثر طراحان و مدیران سامانه‌ی آبیاری قطره‌ای ترجیح می‌دهند که از روابط ساده نظیر کندلوس و همکاران (1387) استفاده کنند تا مدل پیچیده‌ای نظیر HYDRUS-2D. در حالی‌که محققان مدل‌های پیچیده و سطح بالایی نظیر HYDRUS-2D را برای تحقیقات می‌پسندند.

در تمامی سطوح آبیاری شکل (1) در دو عمق نصب نوار 20 و 30 سانتی‌متر مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل کندلوس و همکاران (1387) و مدل HYDRUS-2D هم‌خوانی خوبی داشته است اما در عمق نصب نوار 10 سانتی‌متر مقدار شبیه‌سازی شده مدل کندلوس و همکاران (1387) با مقدار اندازه‌گیری‌شده در دو سطح 10 و 15 لیتر (به ترتیب شکل 2-الف و ج) هم‌خوانی بهتری را نسبت به مدل HYDRUS-2D داشت. شاید این تطابق بهتر به این دلیل باشد که با افزایش عمق کارگذاری شرایط خاک با شرایطی که در بانک اطلاعاتی مدل کندلوس و همکاران (1387) وجود دارد هم‌خوانی بیشتری داشته است و شاید تصادفی باشد.



(ج) (ب) (الف)

شکل 1- نمودار گسترش افقی خیس‌شدگی در سطح آبیاری الف) 10 لیتر، ب) 15 لیتر و ج) 20 لیتر ؛ W O مقادیر اندازه‌گیری شده، W KAN مقادیرشبیه‌سازی مدل کندلوس و همکاران، W WET مقادیرشبیه‌سازی مدل WetUp، W HYD مقادیرشبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D

مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده گسترش عمودی خیس‌شدگی

نتایج حاصل از مقایسه مقادیر گسترش عمودی خیس‌شدگی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در جدول (3) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کم‌ترین مقدار RMSE برای مدل کندلوس و همکاران (1387) و بیش‌ترین مقدار آن برای مدل WetUp به‌دست آمد. آماره nRMSE برای مدل کندلوس و همکاران (1387) و HYDRUS-2D به ترتیب در رده خوب و متوسط و برای مدل WetUp در رده ضعیف قرار گرفت.آماره CRM برای هر سه مدل زیاد بود. کم‌ترین MAE مربوط به مدل کندلوس و همکاران (1387) و بعد از آن برای مدل HYDRUS-2D به‌دست آمد و بیش‌ترین مقدار آن با مدل WetUp به‌دست آمد که قابل قبول نبود. با توجه به نتایج مندرج در جدول (3) در مجموع بهترین عملکرد در شبیه‌سازی گسترش افقی خیس‌شدگی را مدل کندلوس و همکاران (1387) داشته است و بعد از آن نیز شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D دارای عملکرد نسبتا خوبی بوده و قابل قبول می‌باشد. البته مقادیر آماره‌ها در شبیه‌سازی گسترش عمودی خیس‌شدگی در مجموع هر کدام بیشتر از مقادیر آماره‌های شبیه‌سازی شده برای گسترش افقی (مندرج در جدول 2) به‌دست آمد. مدل WetUp در شبیه‌سازی گسترش افقی خیس‌شدگی در خاک سیلتی‌رسی منطقه مورد بررسی تحت آبیاری قطره‌ای زیرزمینی (تیپ) عملکرد قابل قبولی نداشته است هر چند که مقادیر آماره‌ها در شبیه‌سازی گسترش عمودی خیس‌شدگی در مجموع هر کدام کم‌تر از مقادیر آماره‌های شبیه‌سازی شده برای فاصله افقی مندرج در جدول (2) به‌دست آمد.

جدول 3- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده گسترش عمودی خیس‌شدگی

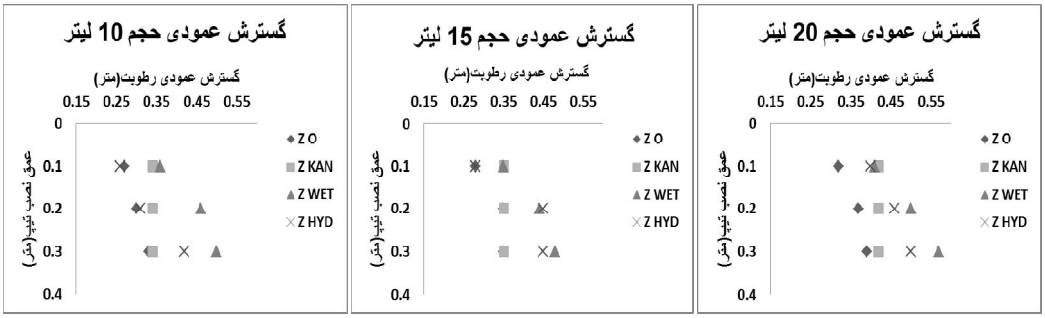
	MAE	CRM	nRMSE(%)	RMSE(m)
مقایسه گسترش عمودی اندازه‌گیری شده با مدل کندلوس و همکاران	0.0413	-0.1256	15.9985	0.0526
مقایسه گسترش عمودی اندازه‌گیری شده با مدل WetUp	0.1233	-0.375	39.2401	0.1290
مقایسه گسترش عمودی اندازه‌گیری شده با مدل HYDRUS-2D	0.0655	-0.1925	23.7473	0.0781

در شکل (2)(الف، ب و ج) که مربوط به مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده گسترش عمودی خیس‌شدگی به‌ترتیب در سطح آبیاری 10، 15 و 20 لیتر می‌باشد، محور افقی گسترش افقی خیس‌شدگی (رطوبت) بر حسب متر و محور عمودی عمق نصب نوار آبیاری (تیپ) بر حسب متر می‌باشد. در شبیه‌سازی گسترش عمودی توسط مدل WetUp در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده به‌جز سطح آبیاری 20 لیتر با عمق نصب نوار 10 سانتی‌متر (شکل 2-ج) در بقیه موارد هم‌خوانی خوبی نداشته است. شاید این شرایط با شرایطی که در بانک اطلاعاتی مدل WetUp وجود دارد هم‌خوانی بیشتری دارد و شاید تصادفی باشد و یا افزایش حجم آبیاری سبب یکنواختی

بیشتری در شرایط هیدرولیکی خاک شده است. در سطح آبیاری 10 لیتر (شکل 2-الف) در عمق نصب نوار 10 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D، در عمق نصب نوار 20 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه‌سازی شده توسط هر دو مدل HYDRUS-2D و مدل کندلوس و همکاران (1387) و در عمق نصب نوار 30 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه-سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D هم‌خوانی قابل قبولی را با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند (براساس شکل 2-الف و دوری نزدیکی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین آماره‌های محاسبه شده).

در سطح آبیاری 15 لیتر شکل(2-ب) در عمق نصب نوار 10 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D و در عمق نصب نوار 20 و 30 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه‌سازی شده توسط مدل کندلوس و همکاران (1387) هم‌خوانی بهتری را با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. در سطح آبیاری 20 لیتر (شکل 2-ج) و در عمق نصب نوار 10 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D، و در عمق نصب نوار 20 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه-سازی شده توسط کندلوس و همکاران (1387) و مدل HYDRUS-2D هم‌خوانی تقریبا خوب و در عمق نصب نوار 30 سانتی‌متر گسترش عمودی شبیه‌سازی شده توسط مدل کندلوس و همکاران (1387) با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌خوانی خوبی داشتند. این امر شاید به دلیل تطابق بهتر شرایط تحقیق حاضر و آزمایش کندلوس و همکاران (1387) باشد هرچند چون تفاوت چشم‌گیر نیست، شاید دلیل خاصی نتوان برای آن ذکر کرد و این تفاوت تصادفی باشد.

کندلوس و سیمونک (2010) در مقایسه‌ای بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرزمینی در اعماق مختلف نصب قطره‌چکان توسط سه مدل کندلوس و همکاران (1387)، مدل HYDRUS-2D و مدل WetUp در خاک سیلتی‌رسی پرداختند و اعلام کردند که در آبیاری اول در تمام دبی-های در نظر گرفته شده مدل WetUp مقادیر بیشتری از گسترش خیس‌شدگی را شبیه‌سازی کرد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج کندلوس و سیمونک (2010) مطابقت داشت.



شکل 2- نمودار گسترش عمودی خیس‌شدگی در سطح آبیاری الف) 10 لیتر، ب) 15 لیتر و ج) 20 لیتر ؛ Z O مقادیر اندازه‌گیری شده، Z KAN مقادیرشبیه‌سازی مدل کندلوس و همکاران، Z WET مقادیرشبیه‌سازی مدل WetUp و Z HYD مقادیرشبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D

نتیجه‌گیری کلی

در مجموع برای شبیه‌سازی گسترش افقی و عمودی خیس‌شدگی در منطقه مورد مطالعه بهترین عملکرد برای مدل کندلوس و همکاران (1387) بود. با توجه به آماره‌های به‌دست آمده نتایج شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D قابل قبول ارزیابی شد. با توجه به مقادیر آماره nRMES (در هر دو جهت افقی و عمودی بیشتر از 30 درصد بود) مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل WetUp اختلاف زیادی با مقادیر مشاهده شده داشت که در رده ضعیف قرار گرفت. کارایی ضعیف مدل

WetUp به علت عدم امکان معرفی کامل شرایط اولیه (به علت ساختار مدل)، سه لایه بودن خاک (که برای مدل قابل معرفی نبود) و عدم وجود روش حل معکوس در این مدل از دلایلی بود که مدل تحلیلی WetUp در شبیه-سازی و برآورد گسترش افقی و عمودی خیس‌شدگی عملکرد خوب و قابل قبولی را نداشت. در مجموع می-توان نتیجه گرفت که هر چه داده‌های ورودی به یک مدل شبیه‌ساز بیشتر باشد می‌توان انتظار شبیه‌سازی با دقت متفاوت‌تری را از مدل داشت. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مدل تحلیلی WetUp برای تخمین ابعاد جبهه رطوبتی در خاک سیلتی‌رسی منطقه مناسب نمی‌باشد. در نهایت پیشنهاد می‌شود برای سطوح آبیاری بیشتر و اعماق نصب تیپ متفاوت این بررسی صورت گیرد. برای انجام مدیریت آبیاری بهتر و طراحی مناسب سامانه در خاک‌های مشابه پیشنهاد می‌شود که کارشناسان و کشاورزان قبل از انتخاب سطح آبیاری مشخص، از مدل تجربی کندلوس و همکاران و یا مدل عددی HYDRUS-2D برای تخمین اولیه گسترش ابعاد رطوبتی با توجه به الگوی توسعه ریشه گیاه استفاده کنند.

فهرست منابع

1. پوریزدان‌خواه، ه. و م. ر. خالدیان. 1391. بهبود کارایی مدل *HYDRUS-2D* در اثر اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 26، شماره 6، صفحه: 1449-1440.
2. عباسی، ف. 1386. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. 250 صفحه.
3. عباسی، ف. و ف. تاجیک. 1386. برآورد همزمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال 11، شماره 1، صفحه: 122-111.
4. کندلوس، م.، ع. لیاقت و ف. عباسی. 1387. تخمین الگوی رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از روش‌های بی‌بعد. *مجله علوم کشاورزی*، جلد 39، شماره 2، صفحه: 378-371.
5. Amin, M. S. M and A. I. M. Ekhmaj. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator, 7th International micro irrigation congress. Sep. 10–16. Kuala Lumpur, Malaysia.
6. Bannayan, M and G. Hoogenboom. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*. 111:290–302.
7. Camp, C. R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. Transactions of the American Society and Agriculture Engineering, 41(5): 1353-1367.
8. Camp, C. R., F. R. Lamm, R. G. Evans and C. J. Phene. 2000. Subsurface drip irrigation-past, present, and future. In Proc. 4th Decennial National Irrigation Sump. Nov. 14-16. Phoenix, AZ, USA.
9. Chu, S. T. 1994. Green-Ampt analysis of wetting patterns for surface emitter. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 120(2):414-421.
10. Cook, F. J., P. J. Thorburm, P. Fitch and K. L. Bristow. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrigation Science*. 22:129-134.
11. Feddes, R. A., P. J. Kowalik and H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield, John Wiley & Sons, New York.
12. Haverkamp, R., P.J. Ross, K.R.J. Smetten and J.Y. Parlange. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resource Research*. 30(11): 2931- 2935.

13. Jamieson, P. D., J. R. Porter and D. R. Wilson. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*. 27:337–350.
14. Kandelous, M. M., A. Liaghat, and F. Abbasi. 2008. Estimation of soilmoisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensionalanalysis method. *JournalAgricalture Science*. 39(2):371–378 (in Farsi).
15. Kandelous, M. M and J. Simunek. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*. 28:435–444.
16. Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Soria-Ugalde J.M., Cuenca R., Braud I., and Haverkamp R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. Soil Science Society of America Journal, 70: 521–532.
17. Malek, K and R. Troy Peters. 2011. Wetting pattern models for drip irrigation: New empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 137(8):530–536.
18. Philip, J. R. 1984. Steady infiltration from spherical cavities. *Soil Science Society of America Journal*. 48:724-729.
19. Pouryazdankhah, H. and M. R. Khaledian. 2013. Improving model efficiency of HYDRUS-2D by considering temporal variability in soil hydraulic properties. *Journal of Water and Soil*. 26(6):1440-1449 (in Farsi).
20. Radcliffe, D.E. and J. Simunek. 2010. Soil physics with HYDRUS modeling and applications. *CRC press. Taylor and Francis Group*, 373 pages.
21. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics, 1:318–333.
22. Roberts, T. L., S. A. White, A. W. Warrick and T. L. Thompson. 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 95:669–677.
23. Schwartzman, M and B. Zur. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 112:242–253.
24. Simunek, J., M. Sejna and M. Th. Van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
25. Singh. D. K., T. B. S. Rajput., H. S. Sikarwar, R. N. Sahoo and T. Ahmad. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agriculture Water Management*. 83:130–134.
26. Suarez, E., C. Y. Choi, P. M. Waller and D. M. Kope. 2000. Comparison of subsurface drip irrigation and sprinkler irrigation for grass turf in Arizona. *American Society of Agricultural Engineering*. 43(3):631-640.
27. Van Genuchten, M. T. 1980. A closed from equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*. 44:792:898.
28. Clapp RB, Hornberger GM. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. Water Resource Research. 14: 601-604.
29. Verburg K, Bridge BJ, Bristow KL, Keating BA. 2001. Properties of selected soils in the Gooburrum-Moore Park area of Bundaberg. Technical Report 09/01, Csiro Land and Water, Canberra, Australia.