Archive of SID

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۲۸۸-۲۷۷

اثر شیب بر پیاز رطوبتی خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D

زینب حیدری*[۱]، معصومه فراستی،[۲و۳] رسول قبادیان[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳. استادیار دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبد، ایران
۴. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

چکیده

هدف این تحقیق، بررسی اثر شیب بر الگوی خیس‌شدهٔ خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل هایدروس دوبعدی است. آزمایش‌ها برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، درون جعبهٔ پلکسی گلاس پرشده از خاک لوم رسی سیلتی، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه رازی کرمانشاه انجام شد. به‌منظور بررسی اثر شیب روی ابعاد پیاز رطوبتی، آزمایش‌ها با قطره‌چکان دارای دبی ثابت ۴ لیتر در ساعت در شیب‌های ۰، ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد با زمان آبیاری ۲ ساعت و در سه تکرار انجام شد. آزمایش‌ها برای تعیین حداکثر قطر و عمق الگوی رطوبتی در زمان‌های مختلف، بعد از شروع آبیاری، به ازای هر شیب انجام گرفت و درنهایت به مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل هایدروس دوبعدی پرداخته شد. نتایج نشان داد مدل هایدروس دوبعدی، روند تغییرات الگوی رطوبتی را در طول مدت مطالعه مشابه داده‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه شبیه‌سازی کرده است. حداکثر مقدار خطای به‌دست‌آمده از هایدروس دوبعدی در حداکثر عمق و عرض خیس‌شده، به‌ترتیب بین ۱/۴۴ و ۳/۴ درصد بوده است. با افزایش شیب میزان حداکثر خطا افزایش یافته و توانایی مدل در شبیه‌سازی الگوی رطوبتی کاهش می‌یابد. سپس با افزایش شیب، الگوی رطوبتی به سمت پایین‌دست گسترده شده است.

کلیدواژه‌ها: اراضی شیب‌دار، الگوی رطوبتی، عرض خیس‌شده، عمق خیس‌شده، معادلهٔ ریچاردز.

*نویسنده مسئول

Email: farasati2760@gmail.comm

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

آبیاری قطره‌ای از روش‌هایی است که به‌منظور کاهش مصرف آب و افزایش بازده مصرف در مناطق خشک و نیمه‌خشک به کار برده می‌شود. کاهش تبخیر از سطح، نبود رواناب سطحی و کنترل نفوذ عمقی از عواملی است که سبب کاهش مصرف آب و در نتیجه، افزایش بازده آبیاری در این روش می‌شود. مقدار آبی که به‌وسیلهٔ آبیاری در سطح خاک فرو می‌رود، ممکن است به دلیل مدیریت ضعیف آبیاری به‌طور مستقیم در منطقهٔ ریشه تخلیه نشود. این مشکل در اراضی شیب‌دار حادتر است. بیشتر زمین های کشاورزی تحت کشت در اکثر مناطق دنیا، دارای شیب بیش از ۵ درصد هستند (۳). بنابراین، به‌منظور توزیع یکنواخت آب آبیاری در منطقهٔ ریشه قبل از اجرای سیستم، نیاز به دانستن الگوی خیس‌شدهٔ نیم‌رخ خاک است. از عوامل مؤثر بر آن دبی قطره‌چکان‌ها، حجم آب کاربردی، زمان آبیاری، شیب زمین، بافت، ساختمان و رطوبت اولیهٔ خاک است. الگوی خیس‌شدهٔ خاک را می‌توان به‌طور مستقیم اندازه‌گیری یا با استفاده از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی کرد. به دلیل زمان‌بر و پرهزینه‌بودن برآورد الگوی هندسی خیس‌شده، از مدل‌های کامپیوتری برای شبیه‌سازی نحوهٔ توزیع رطوبت در خاک استفاده می‌شود.

در تحقیقی مدل‌های هایدروس دوبعدی[1] و سیپ[2] را در برآورد پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد مدل هایدروس دوبعدی با متوسط ضریب تعیین بیشتر (به‌ترتیب ۸۹ و ۶۹ درصد) و میانگین ریشهٔ مربعات خطای کمتر (به‌ترتیب ۱/۶۹ و ۴/۰۲ سانتی‌متر) در شبیه‌سازی ابعاد خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی عملکرد بهتری دارد (۴).

در تحقیقی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک را با مدل هایدروس دوبعدی/ سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که مدل، توانایی بسیاری در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک دارد (۲). در تحقیق دیگری، الگوی توزیع رطوبتی خاک در دبی، حجم آبیاری و فاصله‌های مختلف قطره‌چکان بررسی شد و شبیه‌سازی با مدل هایدروس انجام گرفت. نتایج نشان داد داده‌های شبیه‌سازی بسیار نزدیک به داده‌های مشاهداتی است (۱۰).

در تحقیقی از نرم‌افزار هایدروس برای ارزیابی توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده شد. نتایج نشان داد که بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، تطابق خوبی وجود دارد (۷). در تحقیقی تأثیر شیب زمین، دبی قطره‌چکان و زمان آبیاری روی الگوی رطوبتی بررسی شد. نتایج نشان داد که در اکثر موارد بر اثر شیب، پیاز رطوبتی به پایین‌دست کشیده شده است. با اندازه‌گیری ابعاد پیاز رطوبتی و اندازه‌گیری رطوبت دو رابطهٔ تجربی برای تخمین فاصلهٔ مناسب قطره‌چکان نسبت‌به گیاه ارائه شده است (۶).

نتایج تحقیق دیگری با بررسی توزیع رطوبت در اراضی شیب‌دار نشان داد در دامنه‌های شیب‌دار هنگام آبیاری، مؤلفهٔ افقی جریان که به‌صورت سطحی یا زیرسطحی حادث می‌شود، غالب است و مؤلفهٔ عمودی با افزایش شیب کاهش می‌یابد (۶). در تحقیقی، روابطی تحلیلی برای جریان پایدار در مرزهای شیب‌دار ارائه شد. در روابطی که برای منبع نقطه‌ای در سطح و زیر خاک ارائه شد، فرض شد که گسترش رطوبت در جهت نیروی ثقل انجام می‌گیرد (۸). هدف از این پژوهش، بررسی اثر شیب‌های مختلف بر الگوی توزیع رطوبت در خاک تحت آبیاری قطره ای سطحی، ارزیابی توانایی مدل هایدروس دوبعدی در شبیه‌سازی رطوبت و توزیع مجدد آب در خاک در اراضی شیب‌دار و مسطح است.

1. Hydrus-2D
2. SEEP/W

www.SID.ir

Archive of SID

مواد و روش‌ها

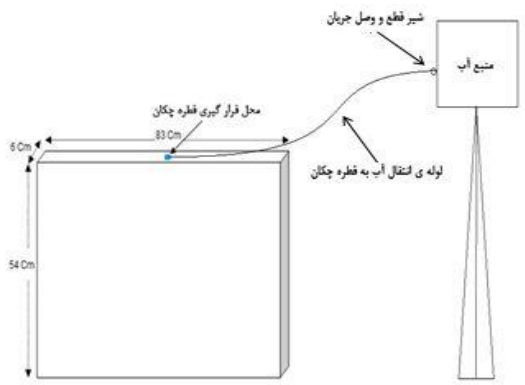
عملیات آزمایشگاهی بر روی خاکی با بافت لوم رسی سیلتی در محل دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه رازی، واقع در استان کرمانشاه، به مختصات ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقهٔ عرض شمالی و ۲۴ و ۴۵ درجه تا ۳۰ و ۴۸ درجهٔ طول شرقی با ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا انجام گرفت. بافت خاک استفاده‌شده نیمه‌سنگین بود و به روش هیدرومتری و چگالی ظاهری به روش استوانه تعیین شد. نتایج خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک درون مدل

عمق خاک (cm)	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	بافت خاک	رطوبت حجمی در نقطهٔ ظرفیت زراعی θ_{fc}	رطوبت حجمی در نقطهٔ پژمردگی دائم θ_{pwp}	چگالی ظاهری (gr/cm^3)
۴۵	۱۴/۲۸	۵۲	۳۳/۷۲	لوم رسی سیلتی	۰/۳۶	۰/۲۱	۱/۳۴

به‌منظور ارزیابی مدل هایدروس دوبعدی از مدل فیزیکی که شامل جعبه‌ای با دیوارهٔ شفاف (جنس پلکسی گلاس) به ابعاد ۸۳، ۶ و ۵۴ سانتی‌متر (طول، عرض، ارتفاع) بود، در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه رازی کرمانشاه استفاده شد (شکل ۱). از یک مخزن آب با ارتفاع ثابت (حدوداً ۲ متر) به‌عنوان منبع آب و تأمین‌کنندهٔ دبی ثابت، لولهٔ انتقال آب به قطره‌چکان و در نهایت، قطره‌چکان با دبی ۴ لیتر بر ساعت استفاده شد. آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شد. شیب‌های ۰، ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد اعمال شد. زمان آبیاری برای هر آزمایش ثابت و ۲ ساعت بود. اندازه‌گیری‌های پیشروی جبههٔ رطوبت تا ۲۴ ساعت پس از قطع جریان انجام شد. با توجه به اینکه توزیع رطوبت در مدل فیزیکی و نرم‌افزار هایدروس دوبعدی در نظر گرفته شد، با درنظرگرفتن فاصلهٔ قطره‌چکان‌ها در مزرعه (۱۰۰ سانتی‌متر) و ۶ سانتی‌متر ضخامت مدل، دبی اعمال‌شده به خاک به‌صورت رابطهٔ ۱ تعیین گردید:

$$q\left(\frac{li}{hr}\right)=\frac{۴\left(\frac{li}{hr}\right)*۶\ cm}{۱۰۰cm}=۰/۲۴\left(\frac{li}{hr}\right) \qquad (۱)$$



شکل ۱. نمای کامل مدل و محل قرارگیری قطره‌چکان

شرح مدل هایدروس دوبعدی

هایدروس دوبعدی/ سه‌بعدی نوعی مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت دو و سه‌بعدی آب، املاح و گرما در خاک‌های اشباع و غیراشباع است که در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. این مدل شامل حل عددی معادلهٔ ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال– انتشار برای حرکت املاح و گرما در خاک است.

www.SID.ir

Archive of SID

در مدل هایدروس دوبعدی، حرکت آب در خاک با استفاده از حل عددی معادلهٔ ریچاردز شبیه‌سازی شده است که با فرض خاک همگن و یکنواخت به‌صورت رابطهٔ ۲ ارائه می‌شود:

(۲)

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

که در آن θ رطوبت حجمی ($L^{3}L^{-3}$)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (L)، t زمان (T)، x مختصات افقی (L)، z مختصات عمودی (L) و k هدایت آبی (LT^{-1}) است. مشخصات هیدرولیکی خاک به‌صورت رابطهٔ ۳ تا ۵ تعیین شد (۱۱):

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{\left(1+|\alpha h|^{n}\right)^{m}} & h<0\\ \theta_s & h\geq 0\end{cases} \qquad (۳)$$

$$K(h)=K_s Se^{l}\left[1-\left(1-Se^{\frac{1}{m}}\right)^{m}\right]^{2} \qquad (۴)$$

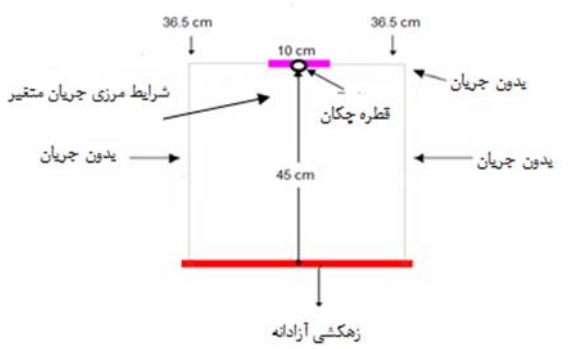
$$Se=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\ ,\quad m=1-\frac{1}{n}\ \ for\ n>1 \qquad (۵)$$

که در آن S_e اشباع نسبی، θ_s رطوبت حجمی اشباع، θ_r رطوبت باقی‌مانده در پروفیل خاک، K_s هدایت آبی اشباع و n و m پارامترهای تجربی است. شدت جریانی که در مدت آبیاری به مدل هایدروس دوبعدی وارد شد، از رابطهٔ ۶ به دست آمد که در آن منبع تغذیه به‌صورت خطی و به طول ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

$$q\left(\text{cm}/\text{min}\right)=\frac{\text{flow rate}}{\text{surface area}} \qquad (۶)$$

شرایط اولیه و مرزی تعریف‌شده برای مدل

تبخیر و تعرق در سطح خاک ناچیز فرض شد؛ بنابراین، سطح خاک بدون جریان و فقط در محل قطره‌چکان جریان متغیر در نظر گرفته شد. همچنین دیواره‌های مدل در طول و بعد از آبیاری بدون جریان و در کف مدل، زهکشی آزاد تعریف شد (شکل ۲).



شکل ۲. مدل تعریف‌شده برای هایدروس دوبعدی

پارامترهای هیدرولیکی خاک

مدل هایدروس برای مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک در معادلهٔ ون گنوختن– معلم در محدودهٔ مجاز برای بافت خاک لوم رسی سیلتی واسنجی شد. برای واسنجی این مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش مربوط به دبی ۴ لیتر بر ساعت و شیب صفر استفاده شد. بدین ترتیب که از تمامی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه شامل درصد ذرات تشکیل‌دهندهٔ خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک و رطوبت اولیه استفاده شد (جدول ۱). با استفاده از اطلاعات، داده‌های ورودی مورد نیاز تهیه و واسنجی انجام شد. واسنجی مدل به دو روش انجام شد: در روش اول با استفاده از حل معکوس، مقادیر بهینهٔ همهٔ پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آمد و شبیه‌سازی با این پارامترها انجام شد. در روش دیگر، با پارامترهایی که مدل رزتا پیش‌بینی کرده بود و تغییر آن‌ها در محدودهٔ مجاز داده‌شده توسط مدل، شبیه‌سازی به روش سعی و خطا انجام شد.

هر بار پس از شبیه‌سازی، بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ الگوی رطوبتی شبیه‌سازی شده در زمان‌های

www.SID.ir

Archive of SID

مختلف اندازه‌گیری شد و به‌وسیلهٔ پارامترهای آماری ریشه مربعات خطا،[1] ضریب تبیین[2] و ضریب جرم باقی‌مانده،[3] با بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ به‌دست‌آمده از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و در نتیجه، بهترین پارامترهای هیدرولیکی به دست آمد. بدین ترتیب، مدل هایدروس دوبعدی برای شبیه‌سازی الگوی رطوبتی در این بافت خاک واسنجی شد. برای انجام صحت‌سنجی، با استفاده از پارامترهای حاصل از واسنجی، برای سایر آزمایش‌ها شبیه‌سازی انجام شد تا مشخص شود که دقت مدل در شبیه‌سازی دبی‌ها و شیب‌های مختلف چگونه است.

در جدول ۲، میزان پارامترهای تخمین زده شده آورده شده است که در آن θ_s رطوبت حجمی اشباع، θ_r رطوبت باقی‌مانده در پروفیل خاک، Ks هدایت آبی اشباع، n پارامترهای تجربی مربوط به شکل و α عکس مکش ورود هوا به خاک است.

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی تخمین زده شده توسط مدل روزتا

Ks (cm/hr)	θs	θr	n	α
۰/۰۱۰۳	۰/۴۷	۰/۰۸۷	۱/۵	۰/۰۰۸۷

میزان انحراف از محور قطره‌چکان

با توجه به اینکه پیاز رطوبتی در اراضی شیب‌دار، حالت بیضی به خود گرفته است و مرکز آن از محور قطره‌چکان منحرف می‌شود، میزان این انحراف با استفاده از میانگین‌گیری وزنی (رابطهٔ ۷) و با استفاده از معادلهٔ تجربی که شریف‌نیا و همکاران (۶) به دست آورده‌اند (رابطهٔ ۸) محاسبه شد:

$$L = \frac{\sum(l_i - a_i)}{\sum a_i} \qquad (۷)$$

که در آن، L انحراف مرکز بیضی از محور قطره‌چکان در راستای شیب (cm)، Li فاصلهٔ محور قطره‌چکان تا مرکز بیضی در هر مقطع (cm) و ai قطر بزرگ بیضی (در مقطع موازی شیب) (cm) است.

$$L = R_S.*Sin۲\alpha \qquad (۸)$$

که در آن، L انحراف مرکز بیضی از محور قطره‌چکان در راستای شیب (cm)، R_S، شعاع خیس‌شدگی سطح در شیب صفر، α زاویهٔ سطح شیب‌دار با افق (α =arc tan(s)).

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل هایدروس دوبعدی

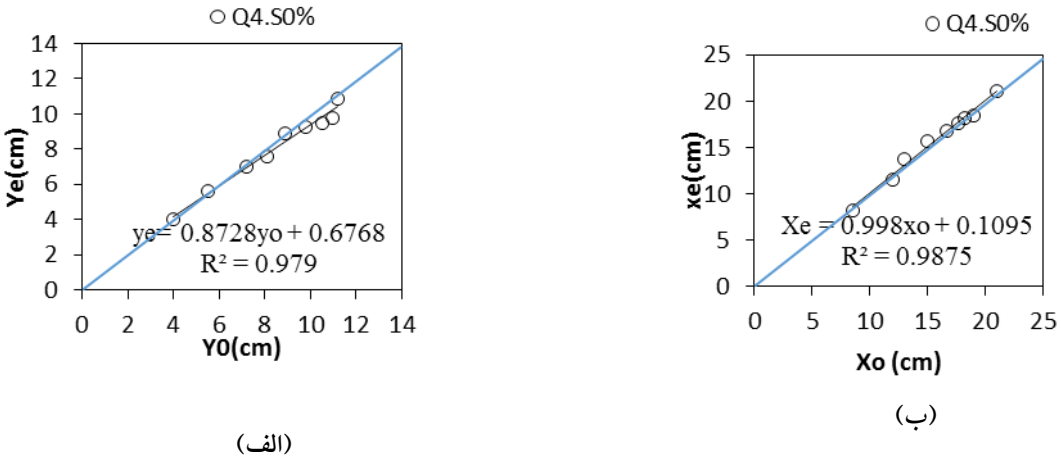
مدل هایدروس دوبعدی برای مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل ون گنوختن– معلم در محدودهٔ مجاز برای بافت خاک لوم رسی سیلتی و شیب صفر واسنجی شد. برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش شیب صفر و پارامترهای هیدرولیکی واسنجی‌شده توسط مدل رزتا استفاده شد. بیشترین عمق و عرض خیس‌شده در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد و نتایج شبیه‌سازی الگوی رطوبتی در شیب صفر توسط مدل هایدروس دوبعدی با آن مقایسه شد. نتایج این مقایسه در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۳، محورهای افقی، Yo و Xo به‌ترتیب بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده و محورهای عمودی، Ye و Xe بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده توسط مدل هایدروس دوبعدی هستند. در این شکل، نمودارهای میزان هم‌بستگی بین مقادیر بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌شده آورده شده است.

1. CRM
2. R2
3. RMSE

www.SID.ir

Archive of SID



(الف) (ب)

شکل ۳. مقایسهٔ (الف) تغییرات عمق و (ب) بیشترین عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده

مطابق شکل، میزان ضریب هم‌بستگی بین عمق‌های خیس‌شده ۹۷ درصد است. این ضریب در عرض‌های خیس‌شده ۹۸ درصد است که نشان می‌دهد هم‌بستگی فراوانی میان داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده وجود دارد. همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد که میزان هم‌بستگی بین داده‌های عرض خیس‌شده بیشتر از هم‌بستگی بین داده‌های عمق خیس‌شده است و مدل، عرض جبههٔ خیس‌شده را با دقت بیشتری برآورد کرده است. مقادیر پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل هایدروس دوبعدی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج سایر محققان (۵) مطابقت داشته است.

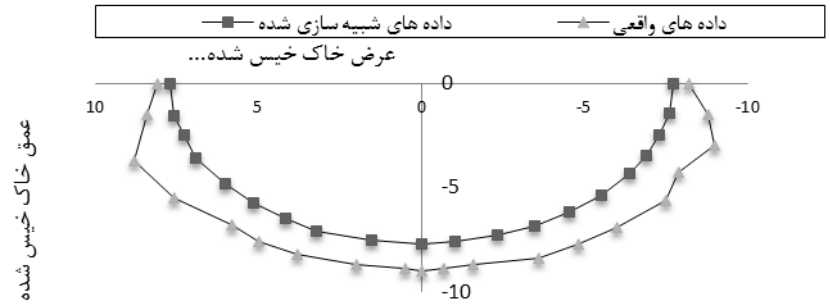
جدول ۳. پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای مقادیر عمق و عرض خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای شیب صفر درصد

	ضریب جرم باقی‌مانده	ریشهٔ مربعات خطا	ضریب تعیین (٪)
بیشترین عمق خیس‌شده	۰/۰۴	۰/۸۹	۹۷
بیشترین عرض خیس‌شده	۰/۰۰۴	۰/۴۲	۹۸

ضریب جرم باقی‌مانده بین بیشترین عمق و عرض اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده، مقداری مثبت است. همچنین عمق و عرض‌های شبیه‌سازی‌شده، کمتر از عمق و عرض‌های اندازه‌گیری برآورد شده است. به‌طور کلی، با توجه به مقادیر ریشهٔ مربعات خطا و ضریب جرم باقی‌مانده، خطای به‌دست‌آمده بسیار اندک است و نشان‌دهندهٔ دقت مدل هایدروس دوبعدی در شبیه‌سازی الگوی رطوبتی و واسنجی مناسب مدل است. شکل ۴، گستردگی الگوی رطوبتی را برای داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و داده‌های اندازه‌گیری‌شده در شیب صفر نشان می‌دهد.

www.SID.ir

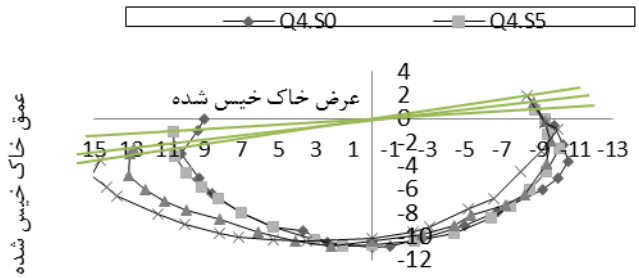
Archive of SID



شکل ۴. مقایسه و گستردگی پیاز رطوبتی در شیب صفر برای داده‌های مشاهداتی و داده‌های به‌دست‌آمده از مدل هایدروس دوبعدی

در شکل ۴، محور عمودی عمق خاک خیس‌شده و محور افقی عرض خاک خیس‌شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴، پیاز رطوبتی در شیب صفر، حالت دایره‌ای و متقارن دارد و مدل هایدروس دوبعدی تقریباً توانسته است تغییرات الگوی رطوبتی را نشان دهد؛ اما این مدل مقادیر را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. شکل ۵، گستردگی پیاز رطوبتی را در شیب‌های مختلف برای دبی ۴ لیتر بر ساعت نشان می‌دهد که محور عمودی عمق خاک خیس‌شده و محور افقی عرض خاک خیس‌شده است.

با توجه به شکل ۵، آبی که بر اثر آبیاری نفوذ کرده است، در جهت عمودی و افقی گسترش یافته است. نیروهای مکش و ثقل سبب نفوذ آب به داخل خاک شده است. نیروی مکش نیز سبب گستردگی رطوبت در داخل خاک شده و نیروی ثقل این رطوبت را به سمت پایین هدایت کرده است. در اراضی شیب‌دار، رطوبت در جهت شیب به سمت پایین‌دست گسترده شده است و از مساحت الگوی خیس‌شده در بالادست شیب کاسته شده و شکل الگوی رطوبتی تقریباً به شکل بیضی بود که با نتایج سایر محققان مطابقت داشته است (۵،۳). محققان دیگر نیز این کاهش خیس‌شدگی در بالادست و افزایش آن را در پایین دست شیب را گزارش کرده‌اند (۹،۵،۳). اما در اراضی مسطح، پیاز رطوبتی حالت متقارن داشت و رطوبت در بالادست و پایین‌دست به یک اندازه گسترده شد. به همین دلیل، شکل پیاز رطوبتی در اراضی مسطح به شکل دایره بوده است (شکل ۵). همچنین نتایج نشان داد حداکثر عمق خیس‌شده در اراضی مسطح، بر محور قطره‌چکان منطبق است؛ اما با افزایش شیب، حداکثر عمق خیس‌شده روی محور قطره‌چکان کاهش اندکی یافت که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (۶،۳).



شکل ۵. مقایسه و گستردگی پیاز رطوبتی در شیب‌های مختلف برای دبی ۴ لیتر بر ساعت

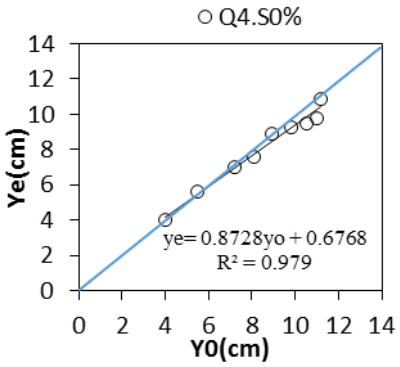
www.SID.ir

Archive of SID

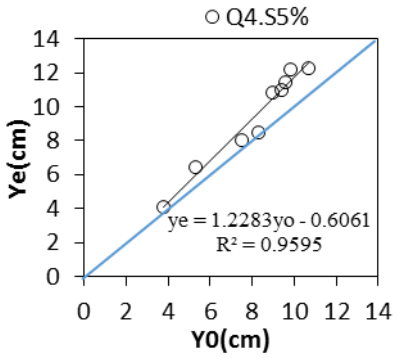
در جدول ۴، درصد مساحت پیاز رطوبتی در پایین‌دست و بالادست آمده است. بر اساس این جدول، الگوی رطوبتی در اراضی شیب‌دار، مساحت بیشتری را نسبت‌به اراضی مسطح پوشش می‌دهد و در اراضی شیب‌دار مساحت بیشتر در قسمت پایین‌دست قرار گرفته است. این نتیجه با نتایج سایر مطالعات مطابقت داشته است (۱). علامت منفی نشان‌دهندهٔ کاهش مساحت و علامت مثبت نشان‌دهندهٔ افزایش مساحت در شیب‌های مختلف نسبت‌به شیب مسطح است. شکل‌های ۶ و ۷، نتایج مقایسهٔ بیشترین عمق و قطر خیس‌شده در شیب‌های مختلف را برای داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی نشان می‌دهند.

جدول ۴. درصد افزایش و کاهش مساحت الگوی خیس‌شده در پایین‌دست و بالادست شیب‌های مختلف و زمان آبیاری ۲ ساعت

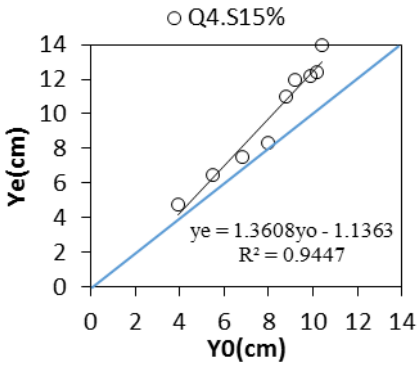
		شیب ۵٪	شیب ۱۵٪	شیب ۲۵٪
دبی ۴ لیتر بر ساعت	پایین دست	۵	۱۱	۲۱
و زمان آبیاری ۲ ساعت	بالا دست	-۹	-۱۹	-۳۲



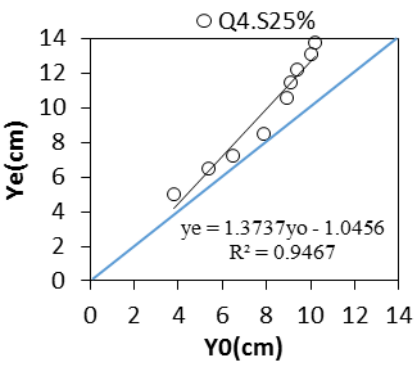
(الف) شیب صفر



(ب) شیب ۵٪



(ج) شیب ۱۵٪



(د) شیب ۲۵٪

شکل ۶. مقایسهٔ بیشترین عمق خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شیب‌های مختلف، ۲۴ ساعت پس از قطع آبیاری

www.SID.ir

Archive of SID

در شکل ۶، محورهای عمودی (Ye)، بیان‌کنندهٔ بیشترین عمق خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده توسط مدل هایدروس دوبعدی و محورهای افقی (Yo) بیان‌کنندهٔ بیشترین عمق خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده هستند. با توجه به این شکل، ضریب هم‌بستگی بین عمق‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌شده، بیش از ۹۴ درصد است که هم‌بستگی فراوان بین داده‌ها را نشان می‌دهد. در شیب صفر، بیشترین ضریب هم‌بستگی حدود ۹۷ درصد به دست آمد که نشان‌دهندهٔ بیشترین میزان هم‌بستگی بین عمق‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شیب صفر است. با افزایش شیب، میزان هم‌بستگی کمتر شده است.

مقایسهٔ بیشترین عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شیب‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل، محورهای عمودی (Xe)، بیان‌کنندهٔ بیشترین عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده توسط مدل هایدروس دوبعدی و محورهای افقی (Xo)، بیان‌کنندهٔ بیشترین عرض خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده هستند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ضریب هم‌بستگی بین عرض‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری‌شده، بیش از ۹۰ درصد است که هم‌بستگی فراوان بین داده‌ها را نشان می‌دهد. در شیب صفر و ۵ درصد، ضریب هم‌بستگی بیشتر از شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد است که نشان می‌دهد مدل در شیب‌های کمتر، بهتر عرض خیس‌شده را شبیه‌سازی کرده است.

جدول ۵، میزان پارامترهای آماری بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده را برای شیب‌های مختلف در دبی ۴ لیتر بر ساعت و ۲۴ ساعت پس از آبیاری نشان می‌دهد.

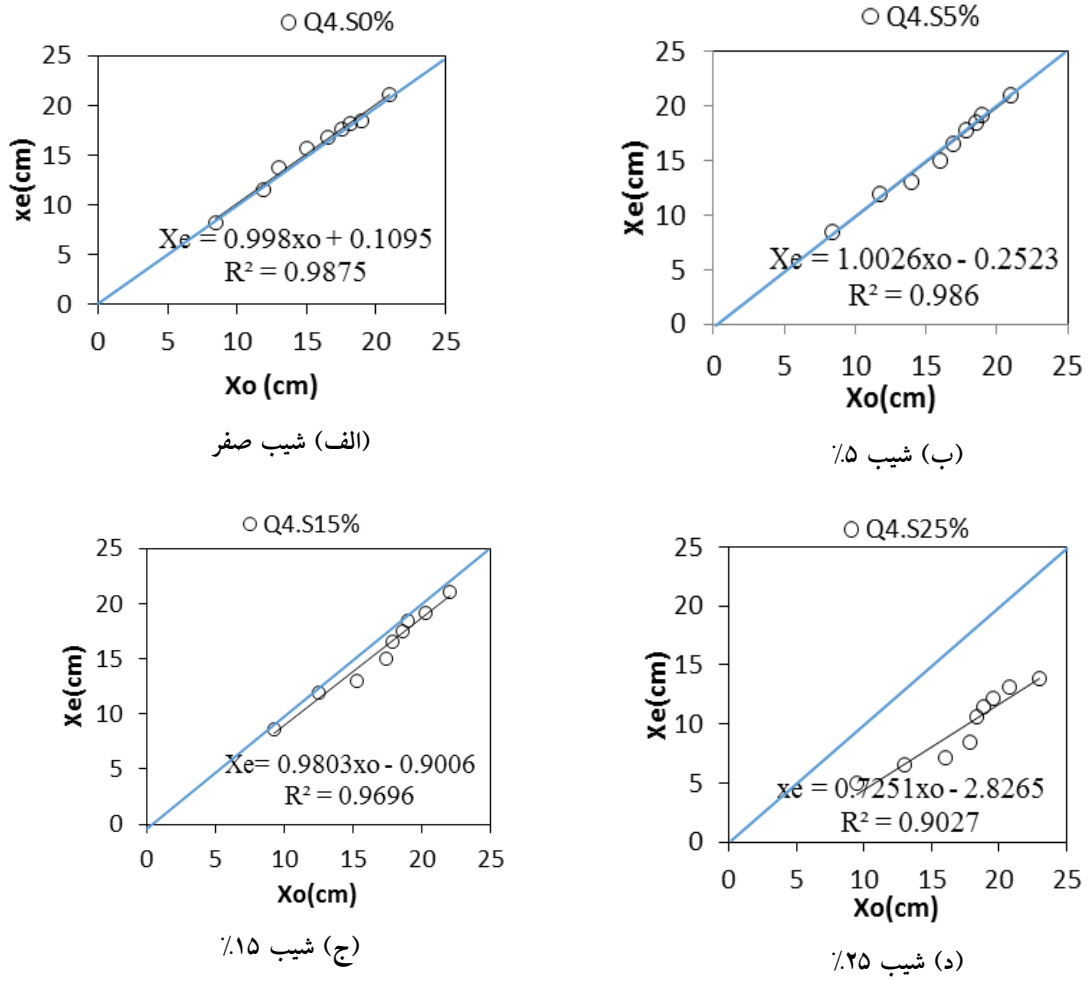
با توجه به جدول ۵، میزان ضریب هم‌بستگیِ بیشترین عرضِ خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شیب‌های صفر، ۵ و ۱۵ درصد، ۹۸ درصد شده است. این ضریب در شیب ۲۵ درصد، ۹۰ درصد به دست آمد. میزان خطاها نیز در شیب‌های صفر و ۵ درصد کمتر از میزان خطا در شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد به دست آمد. مقایسهٔ بیشترین عمق خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده نیز نشان داد که میزان ضریب هم‌بستگی در شیب صفر، بیشترین مقدار و ۹۷ درصد است و در سایر شیب‌ها در محدوده ۹۴ تا ۹۵ درصد. میزان خطاها نیز در شیب‌های صفر و ۵ درصد، کمتر از مقدار خطا در شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد بود.

جدول ۵. پارامترهای آماری محاسبه‌شده برای مقادیر بیشترین عمق و عرض خیس‌شدهٔ اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای شیب‌های مختلف

	بیشترین عمق خیس‌شده			بیشترین عرض خیس‌شده		
	ضریب جرم باقی‌مانده	ریشهٔ میانگین مربعات خطا	ضریب تعیین (درصد)	ضریب جرم باقی‌مانده	ریشهٔ میانگین مربعات خطا	ضریب تعیین (درصد)
Q4.S0	۰/۰۴	۰/۸۹	۹۷	۰/۰۰۴	۰/۴۲	۹۸
Q4.S5	−۰/۱۵	۱/۴۵	۹۵	۰/۰۱	۰/۴۹	۹۸
Q4.S15	−۰/۲۲	۱/۸۸	۹۴	۰/۰۷	۱/۳۹	۹۸
Q4.S25	−۰/۲۴	۲/۱۷	۹۴	۰/۰۹	۱/۸۵	۹۰

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. مقایسهٔ بیشترین عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شیب‌های مختلف، ۲۴ ساعت پس از قطع آبیاری

با توجه به نتایج جدول ۵، مدل در زمین‌های مسطح و کم‌شیب، پیش‌بینی بهتری از الگوی رطوبتی داشت. نیز با توجه به مقادیر منفی ضریب جرم باقی‌مانده در عمق خیس‌شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل عمق‌های خیس‌شده را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. همچنین با توجه به مقادیر مثبت ضریب جرم باقی‌مانده در عرض‌های خیس‌شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل، عرض‌های خیس‌شده را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. پس به‌طور کلی می‌توان گفت مدل هایدروس دوبعدی، توانایی بسیاری در شبیه‌سازی الگوی رطوبتی در حین آبیاری و در زمان توزیع مجدد رطوبت در اراضی مسطح و شیب‌دار دارد.

میزان انحراف از محور قطره‌چکان

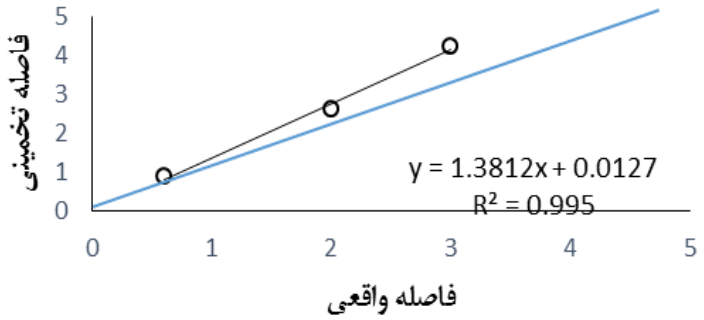
میزان انحراف از محور قطره‌چکان با استفاده از میانگین‌گیری وزنی و با استفاده از معادلهٔ تجربی شریف‌نیا و همکاران محاسبه شد. مقادیر به‌دست‌آمدهٔ انحراف از محور قطره‌چکان اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده توسط فرمول شریف‌نیا و همکاران در جدول ۶ ارائه شده است. برای مقایسهٔ این مقادیر از ضریب هم‌بستگی استفاده شد که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶. مقادیر انحراف از محور قطره‌چکان اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده توسط فرمول شریف‌نیا برای شیب‌های مختلف

دبی (li/hr)۴	L فرمول تخمین‌زده‌شده با	Lاندازه‌گیری‌شده
شیب ۲۵	۴/۲۳۵	۳
شیب ۱۵	۲/۶۴	۲
شیب ۵	۰/۸۹۷	۰/۶



شکل ۸. مقایسهٔ فاصلهٔ واقعی و فاصلهٔ تخمین‌زده‌شده از محور قطره‌چکان با معادلهٔ تجربی شریف‌نیا و همکاران

شکل ۸، مقایسهٔ فاصلهٔ اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده را با معادلهٔ تجربی شریف‌نیا و همکاران از محور قطره‌چکان در اراضی شیب‌دار نشان می‌دهد. محور افقی، فاصلهٔ اندازه‌گیری‌شده و محور عمودی، فاصلهٔ تخمین‌زده‌شده از محور قطره‌چکان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ضریب هم‌بستگی ۹۹/۵ درصد به دست آمده است. این نتیجه، نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی خوب بین مقادیر تخمین‌زده‌شده از معادله و مقادیر اندازه‌گیری‌شده است و با تحقیقات سایر محققان مطابقت دارد (۹). همچنین با توجه به مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا و ضریب جرم باقی‌مانده که به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۰۵۶- به دست آمد، میزان خطا ناچیز است و به دلیل منفی‌بودن مقدار ضریب جرم باقی‌مانده، مقادیر برآوردی توسط فرمول بیشتر از مقادیر واقعی به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توانایی مدل هایدروس دوبعدی به‌منظور شبیه‌سازی الگوی رطوبتی بررسی و مشخص شد این مدل توانایی بسیاری در شبیه‌سازی الگوی رطوبتی در اراضی شیب‌دار و مسطح دارد. اما، نتایج شبیه‌سازی روی سطح شیب‌دار نشان داد با افزایش شیب (۵ درصد، ۱۵ درصد و ۲۵ درصد) از توانایی شبیه‌سازی مدل کاسته می‌شود. ممکن است این کاهش به این دلیل باشد که واسنجی مدل، در شرایط بدون شیب صورت گرفته است.

در ادامه باید گفت میزان ضریب هم‌بستگی بیشترین عرض خیس‌شدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در شیب‌های صفر، ۵ و ۱۵ درصد، برابر ۹۸ درصد بود؛ ولی در شیب ۲۵ درصد، به ۹۰ درصد کاهش یافت. میزان خطاها نیز در شیب‌های صفر و ۵ درصد کمتر از میزان خطا در شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد به دست آمد.

www.SID.ir

Archive of SID

بـر اسـاس مقایسـهٔ بیشـترین عمـق خـیس‌شـدهٔ شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده، میزان ضریب هم‌بسـتگی در شیب صفر بیشترین مقدار و برابر ۹۷ درصد و در سـایر شیب‌ها در محدوده ۹۴ تـا ۹۵ درصـد بـوده اسـت. میـزان خطاها نیز در شیب‌های صـفر و ۵ درصـد کمتـر از مقـدار خطا در شیب‌های ۱۵ و ۲۵ درصد بـود. مقایسـهٔ عـرض و عمق خیس‌شده مقادیر شبیه‌سازی‌شده و انـدازه‌گیـری‌شـده نشان می‌دهد میـزان ضـریب هـم‌بسـتگی بـین عمـق‌هـای خیس‌شده ۹۷ درصد و در عرض‌های خیس‌شده ۹۸ درصـد است. این مقادیر، نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی فراوان میان داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده است. همچنین بـر اسـاس نتایج، با افزایش شیب، گسـتردگی جبهـهٔ رطـوبتی بـه دلیـل وجود نیروی ثقل، در پایین‌دست بیشتر شـد و در بالادسـت گستردگی پیاز رطوبتی نسبت‌به حالت بـدون شـیب کـاهش پیدا کرد. این الگوی رطوبتی در اراضـی مسـطح بـه‌صـورت دایره‌ای، متقارن و در امتداد قائم بود. با افزایش شیب، عمـق نفوذ کاهش و گستردگی در جهت شیب ادامه یافت.

منابع

۱. خـانمحمـدی ن، علیـزاده ا و انصـاری چ (۱۳۹۲) شبیه‌سازی حرکـت آب و توزیـع رطوبـت در آبیـاری قطـره‌ای بـا اسـتفاده از هایـدروس دوبعـدی. علـوم کشاورزی و تکنولوژی. (۴)۲:۲۷-۱۵

۲. خـرمیم، علیـزاده ا، انصـاری چ (۱۳۹۲) شـبیه‌سـازی حرکت آب و توزیع رطوبـت تحـت سیسـتم آبیـاری قطره‌ای. دانشگاه فردوسی. مشهد. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد ۱۴۷ صفحه.

۳. محمدی ع و بیگلویی م ح و خالدیانم ر و مریدنژاد ع و رجبـی ج (۱۳۹۲) بررسـی ابعـاد پیـاز رطـوبتی در اراضی شیبدار. مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منـابع طبیعی (۶۶)۱۷: ۱۲۰-۱۰۹

۴. شریف نیا ر، میرزایی ف، و لیاقـت ا (۱۳۹۱) بررسـی مساحت خیس شده و حجـم خـیس‌شـده در آبیـاری قطـره‌ای در زمـین‌هـای شـیبدار. آبیـاری و زهکشـی. (۲)۴:۱۹۲-۱۸۲

۵. قربانیـانم، منجـزی م س، ابراهیمیـان چ، و لیاقـت ا (۱۳۹۳) ارزیـابی مـدل‌هـای HYDRUS-2D و SEEP/W بـه‌منظـور تخمـین جبهـهٔ رطـوبتی آبیـاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. مجلهٔ آب و خاک. علوم کشاورزی و تکنولوژی. (۱)۲۸: ۱۷۹-۱۸۹.

6. Hovver J (1985) Evalution of flow pathway in a sloping soil cross section. American Society Agricultural and Biology.28(5):1471-1475.

7. Maziar M, and Kandelous JS (2010) Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation systemunder field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. Journal of Agricultural Water Management. 97(7): 1070-1076.

8. Philip J, and Knight JK(1997) Steady infiltration flow with sloping boundaries. Water Resource Research. 33(8): 1833-1841.

9. Sharifbayanalhagh MH(1997)Moisture distribution in the soil profile of the point source at inclined surfaces. MS Thesis, Faculty of Agriculture, University of Technology.

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

11. Van Genuchten M. TH (1980) Aclosed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, soil science society of America Journal, 44(5):892-898.

www.SID.ir