

ارزیابی مدل دو بعدی نفوذ واریک برای شرایط آبیاری جویچه‌ای

مهدی پناهی^۱ - سید مجید میرلطیفی^{۲*} - فریبرز عباسی^۳

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۰/۶/۲۷

چکیده

به منظور توصیف و ارزیابی دقیق‌تر عملکرد آبیاری در مدل‌های آبیاری سطحی در نظر گرفتن نفوذ به صورت دو بعدی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، مدل واریک به منظور تعیین نفوذ دو بعدی جویچه با در نظر گرفتن اثرات لبه، ارزیابی و ضرایب تجربی آن تعیین شد. در این ارتباط دو سری آزمایش نفوذ در یک خاک لوم رسی انجام گردید. سری اول شامل ۵ آزمایش با دبی ورودی ۰/۳ تا ۰/۸ لیتر بر ثانیه در جویچه‌های انتها باز به شکل سهمی، به طول ۱۱۰ متر، عرض ۷۵ سانتی‌متر و شیب عمومی ۰/۰۰۸ متر بر متر و سری دوم با استفاده از استوانه مضاعف انجام شد. نتایج نفوذ استوانه مضاعف در ارزیابی مدل واریک استفاده شد. دبی هر جویچه با استفاده از فلووم WSC و نفوذ با استفاده از روش ورودی- خروجی اندازه‌گیری شد. با حداقل سازی شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) ضرایب تجربی مدل تعیین شدند. مقادیر ۰/۶۲ و ۱/۱۵ به ترتیب برای دو ضریب تجربی W^*/W و γ تعیین شد. پس از ارزیابی مدل، میانگین خطای مطلق نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده ۵/۹ درصد و مجذور میانگین مربعات خطای آن ۰/۰۳۱ متر به دست آمد. نتایج نشان داد اثر لبه با زمان رابطه خطی دارد و با افزایش زمان مقدار آن افزایش می‌یابد. تحلیل حساسیت نشان داد که مدل کمترین حساسیت را به رطوبت اولیه خاک و عمق آب در داخل جویچه و بیشترین حساسیت را به رطوبت اشباع و محیط خیس شده دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، مدل دو بعدی نفوذ، مدل واریک، اثر لبه

مقدمه

بعدی نشان می‌دهد (۲ و ۱۲). برخی از مدل‌های نفوذ دو بعدی آب در خاک برای جویچه‌ها بر اساس معادله گرین و امپت توسط فوک و چاینگ (۶)، سینگ و همکاران (۲۲) و انسیز مدینا و همکاران (۵) قبلاً آرایه شده‌اند. در این مدل‌ها سطح مقطع جویچه مستطیلی و نفوذ جویچه به صورت ترکیبی از نفوذ عمودی و افقی در نظر گرفته شده است.

برخی دیگر از مطالعات، حل تحلیلی یا نیمه تحلیلی معادله ریچاردز را به کار برده‌اند (۱۱، ۱۷، ۱۸ و ۳۰). در مدل نیمه تحلیلی FURINF (۳۰)، نفوذ تجمعی دو بعدی سرتاسر محیط خیس شده به صورت مجموع وزنی مقادیر یک بعدی محاسبه می‌شود. در این روش ضرایب وزنی برای در نظر گرفتن اثر عمق جریان در سرتاسر محیط خیس شده استفاده شدند. نتایج این روش برای سه نوع خاک مختلف با مدل دو بعدی HYDRUS-2D مقایسه و مطابقت خوبی با نتایج آن داشت و نتیجه‌گیری شد که در نظر گرفتن نفوذ در سرتاسر محیط خیس شده به صورت نفوذ دو بعدی، نتایج بهتری را در برآورد نفوذ آب در جویچه آرایه خواهد داد (۳۰).

مدل‌های جامع‌تر، حل صریح معادله ریچاردز به شیوه عددی

تخمین صحیح مقدار آبی که وارد خاک می‌شود یکی از عوامل مورد نیاز برای طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری جویچه‌ای است (۹). در آبیاری جویچه‌ای آب به دو صورت عمودی از کف جویچه و به صورت جانبی از کناره‌های جویچه وارد خاک می‌شود. در جویچه‌ها بیش از ۶۰ درصد کل آب نفوذ یافته به داخل خاک از نواحی کناری جویچه‌ها صورت می‌گیرد (۲۳). این نشان‌دهنده اهمیت نفوذ دو بعدی در آبیاری جویچه‌ای است. باتیستا و همکاران (۳) ضمن بررسی نسخه جدید مدل آبیاری سطحی WINSRFR، برای حصول به نتایج دقیق‌تر در آبیاری جویچه‌ای، برآورد نفوذ را به صورت دو بعدی پیشنهاد نمودند. مطالعات گذشته در زمینه نفوذ دو بعدی آب در آبیاری جویچه‌ای اهمیت عمق جریان را در نفوذ دو

۱- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*- نویسنده مسئول: (Email: mirlat_m@modares.ac.ir)

۳- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی، کرج

تجربی مدل دو بعدی نفوذ واریک و سپس اعتبارسنجی آن انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این پژوهش در سال ۱۳۸۹ در ایستگاه موسسه تحقیقات خاک و آب انجام شد. در جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک خلاصه شده است. ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت، درصد شن، سیلت، رس، رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقیمانده (θ_r) و چگالی ظاهری خاک (ρ_b) در آزمایشگاه اندازه‌گیری و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد مطالعه شامل هدایت هیدرولیکی خاک (K_s)، معکوس مقدار مکش در نقطه ورود هوا (α) و شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک (n) در مدل وان گنوختن-معلم با استفاده از نرم‌افزار ROSETTA (۱۶) با استفاده از درصد شن، سیلت و رس خاک برآورد شد. جهت برداشت اطلاعات، دو سری آزمایش نفوذ انجام شد. سری اول شامل ۵ آزمایش با دبی ورودی ۰/۳ تا ۰/۸ لیتر بر ثانیه در جویچه‌های انتها باز به شکل سهمی، به طول ۱۱۰ متر، عرض ۷۵ سانتی‌متر و شیب عمومی ۰/۰۰۸ متر بر متر و سری دوم اندازه‌گیری نفوذ عمودی با استفاده از استوانه مضاعف در دو تکرار بود. استوانه‌های داخلی و خارجی به ترتیب به قطرهای ۳۰ و ۶۰ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بودند که به اندازه ۵ سانتی‌متر در خاک کوبیده شدند. عمق اولیه آب در استوانه داخلی ۱۰ سانتی‌متر بود و افت سطح آب با زمان اندازه‌گیری شد.

برای هر بافت و ساختمان خاک بود (۱۴، ۱۵، ۲۵ و ۳۱). روش‌های مبتنی بر حل عددی معادله ریچاردز راه حل‌های جامعی را برای در نظر گرفتن شرایط هندسی جویچه، ویژگی‌های خاک، رطوبت و مکش اولیه خاک ارائه می‌نمایند. نتایج این روش‌ها نه تنها شدت نفوذ، بلکه توزیع مجدد رطوبت را ارائه می‌نماید. مزیت دیگر این مدل‌ها، امکان تلفیق آنها با مدل‌های انتقال املاح می‌باشد (۱ و ۴). واریک و همکاران (۲۹) برای محاسبه نفوذ آب در داخل جویچه‌ها یک مدل دو بعدی نفوذ را معرفی و آن را توسعه دادند. در این مدل نفوذ، یک اثر لبه برای لحاظ کردن اثر نفوذ جانبی محاسبه و به نفوذ عمودی اضافه می‌گردد. این مدل به دلیل پیچیدگی کمتر نسبت به معادله ریچاردز و روش‌های نیمه تحلیلی و امکان تلفیق آن با مدل‌های ریاضی آبیاری سطحی و مدل‌های کودآبیاری، امکان برآورد نفوذ دو بعدی در آبیاری جویچه‌ای را فراهم می‌آورد. تابع این مدل اساس فیزیکی داشته و به همین دلیل مشکلات معادلات تجربی را ندارد. معادلات تجربی، مقدار آب نفوذ یافته را تنها به عنوان تابعی از فرصت زمان نفوذ برآورد می‌نمایند و عدم لحاظ تاثیر عوامل مختلفی مانند رطوبت اولیه خاک، شکل سطح مقطع جویچه، عمق جریان آب، دبی ورودی به جویچه و محیط خیس شده جویچه از نقایص و مشکلات این معادلات است (۲۴).

به دلیل وجود شرایط دو بعدی نفوذ آب در جویچه‌ها، در نظر گرفتن نفوذ به صورت دو بعدی در مدل‌های آبیاری و کودآبیاری سطحی برای توصیف و ارزیابی بهتر عملکرد آبیاری اهمیت زیادی دارد. مدل واریک که به صورت یک تابع ریاضی بیان می‌شود به راحتی با مدل‌های ریاضی آبیاری سطحی و مدل‌های کودآبیاری قابل تلفیق است. لذا این مطالعه با هدف ارزیابی و تعیین ضرایب

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک محل آزمایش‌ها

عمق (cm)	n (-)	α (cm ⁻¹)	ρ_b (gcm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	K_s (mm.h ⁻¹)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک
۰-۲۵	۱/۴۴	۰/۰۱۱	۱/۵	۰/۴۴	۰/۰۸	۴/۲	۳۰	۳۹	۳۱	لوم رسی
۲۵-۵۰	۱/۴۵	۰/۰۱۰	۱/۵	۰/۴۵	۰/۰۸	۴/۹	۲۵	۴۲	۳۳	لوم رسی

جدول ۲- مشخصات داده‌های مزرعه‌ای در آزمایش‌های جویچه

پارامتر	علامت	واحد	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵
دبی ورودی	Q_0	Lit s ⁻¹	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۰/۸
ضریب مانینگ	n	-	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
زمان قطع جریان	t_{co}	min	۲۴۰	۲۳۰	۲۶۰	۲۶۰	۳۶۰
پارامترهای هیدرولیکی سطح مقطع	ρ_1	-	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
	ρ_2	-	۲/۷۶	۲/۷۶	۲/۷۶	۲/۷۶	۲/۷۶

^{0.5} می‌باشد. قابلیت جذب آب (S_0) با معادله زیر برآورد می‌شود (۲۸ و ۳۰):

$$S_0 = [2K_s(\theta_s - \theta_n)(h_0 - h_f)]^{0.5} \quad (3)$$

که در آن، θ_s = رطوبت اشباع خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، h_0 = عمق آب در جویچه (m)، h_f = مکش خاک در جبهه رطوبتی (m)، K_s = هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. مقدار h_f از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$h_f = \int_{h_n}^0 \frac{K(h)dh}{K_s} \quad (4)$$

که در آن، h = مکش خاک (m) و h_n = مکش خاک (m) متناظر با رطوبت اولیه θ_n است. منحنی رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک $K(h)$ ، با استفاده از مدل وان گنوختن - معلم در نظر گرفته شدند. توابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و منحنی رطوبتی بر اساس این مدل در منابع علمی مختلف ارائه گردیده است (۱۳، ۱۹، ۲۰ و ۲۸). برنامه‌ای به زبان برنامه‌نویسی QBASIC برای تعیین مقدار h_f به روش انتگرال‌گیری سیمپسون^۲ نوشته شد. مدل‌های کوستیاکوف و کوستیاکوف - لویس (۸ و ۱۰) برای برازش داده‌های استوانه مضاعف مورد آزمون قرار گرفت. مدلی که بهترین برازش را بر داده‌های آزمایش‌های استوانه مضاعف داشت برای محاسبه قسمت اول در سمت راست معادله ۱ (I_{1D}) استفاده می‌شود.

شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های آماری خطای مطلق، $\sum AE$ و مجذور میانگین مربعات خطا، RMSE^۲ برای ارزیابی مدل استفاده شد (۲۳):

$$AE = 100 \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

که در آنها، O_i = مقدار اندازه‌گیری شده، P_i = مقدار پیش بینی شده متناظر با O_i و n = تعداد اندازه‌گیری‌ها است.

واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل دو بعدی نفوذ

از آزمایش شماره ۲ با دبی ۰/۴ لیتر بر ثانیه، نفوذ دو بعدی

دبی ورودی و خروجی جویچه‌ها با استفاده از فلوم WSC تیپ ۲ به فاصله ۱۱۰ متر جهت برآورد نفوذ با استفاده از روش ورودی - خروجی اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های جویچه با دبی‌های مختلف انجام و با شماره‌های ۱ تا ۵ نامگذاری شدند. مشخصات این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه گردیده است.

ضریب مانینگ برای خاک لخت و بدون پوشش گیاهی ۰/۰۳۵ تعیین و پارامترهای هیدرولیکی ρ_1 و ρ_2 از طریق رگرسیون توانی بین متغیرهای اندازه‌گیری شده اجزای رابطه مانینگ حاصل شد (۲۶). در هر آزمایش سه جویچه آبیاری و در جویچه وسطی اندازه‌گیری‌ها انجام گردید. آبیاری اول برای کاهش اثرات زبری سطح خاک و اندازه‌گیری‌ها و برداشت اطلاعات در آبیاری دوم صورت گرفت. زمان پیشروی و پسروی در طول جویچه‌های آزمایشی به فواصل ۱۰ متری و رطوبت اولیه خاک با نوترون متر اندازه‌گیری شد.

معادلات حاکم بر مدل دو بعدی نفوذ

جریان نفوذ چند بعدی آب به خاک از یک نوار مرطوب مانند تیپ یا جویچه از مجموع نفوذ یک بعدی و جریان نفوذ از لبه‌های نوار یا جویچه تشکیل می‌شود. بر اساس این اصل کلی ابتدا هاورکمپ و همکاران (۷) معادله‌ای را برای نفوذ چند بعدی و بر اساس آن واریک و لازارویچ نیز معادله دیگری را برای نفوذ آب به داخل خاک از یک نوار مرطوب توسعه دادند (۲۸). سپس واریک و همکاران (۲۸ و ۲۹) با این فرض که نوار مرطوب موقعی که اشباع می‌شود شبیه به یک جویچه کم عمق می‌گردد، تابع زیر را برای نفوذ دو بعدی در جویچه‌ها ارائه دادند:

$$\frac{I_{2D}}{W^*} = I_{1D} + \frac{\gamma S_0^2 t}{W(\theta_0 - \theta_n)} \quad (1)$$

قسمت دوم در سمت راست معادله ۱ به نام اثر لبه (DI) می‌باشد و در واقع اختلاف بین نفوذ تجمعی در واحد محیط خیس شده تعدیل شده (W^*) و نفوذ یک بعدی متناظر آن است:

$$\Delta I = \frac{\gamma S_0^2 t}{W(\theta_0 - \theta_n)} \quad (2)$$

که در آنها، I_{2D} = نفوذ تجمعی دو بعدی در واحد طول جویچه ($m^3 m^{-1}$)، I_{1D} = نفوذ تجمعی یک بعدی در واحد طول جویچه (m)، W = محیط خیس شده (m)، W^* = ضریب تجربی محیط خیس شده تعدیل شده یا محیط خیس شده موثر (m)، θ_0 = رطوبت سطح خاک در زمان t ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_n = رطوبت اولیه ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، t = زمان (min)، γ = ضریب تجربی، S_0 = قابلیت جذب آب ($cm \text{min}^{-1}$)

2- Integral Simpson Rule
 3- Absolute Error
 4- Root Mean Square Error

1- Sorptivity

نتایج و بحث

واسنجی مدل دو بعدی نفوذ

داده‌های حاصل از آزمایش استوانه مضاعف در دو تکرار برآزش بهتری با معادله کوستیاکوف داشتند. علت این موضوع را می‌توان در زمان کم (۲۴۰ دقیقه) آزمایش‌های انجام شده با استوانه مضاعف دانست. در جدول ۳ ضرایب نفوذ این معادله در تکرارهای مختلف و میانگین ضرایب آن ارائه گردیده است.

همانطور که مشاهده می‌شود ضریب تبیین (R^2) مدل کوستیاکوف بالا (۰/۹۹) و میانگین درصد خطای آن نسبتاً پایین (۵/۸ درصد) است.

پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه اثر لبه در آزمایش شماره ۲ در جدول ۴ خلاصه گردیده است. متغیرهای h_0 , h_n و θ_n و W اندازه‌گیری و متغیر h_n متناظر با θ_n از روی منحنی رطوبتی معادل ۱۰۰۰- سانتی‌متر تعیین شد. این مقدار مکش برای شرایط رطوبتی خاک قبل از آبیاری مناسب است. واگل و همکاران (۲۷) نیز همین مقدار را برای شرایط اولیه خاک قبل از آبیاری در یک خاک با بافت متوسط در نظر گرفتند. مقدار h_f با برنامه تهیه شده به زبان QBASIC معادل ۴۵- سانتی‌متر محاسبه شد. اسکونارد (۲۳) مقدار h_f را برای خاک‌های مختلف آزمایش‌های خود از ۱۱- تا ۴۹- سانتی‌متر محاسبه کرد. سپس مقادیر برآورد شده نفوذ تجمعی دو بعدی در مقادیر مختلف γ و W^*/W از معادله ۱ با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه و شاخص آماری مجذور میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. مقادیر ۰/۶۲ و ۱/۱۵ به ترتیب برای γ و W^*/W کمترین شاخص مجذور میانگین مربعات خطا را داشته و به عنوان مقادیر قابل قبول پذیرفته شد.

اندازه‌گیری شده (I_{2D}) به روش ورودی-خروجی تعیین شد. پارامترهای h_0 , θ_n و W اندازه‌گیری و پارامتر h_n متناظر با θ_n از روی منحنی رطوبتی تعیین شد. مقدار h_f با برنامه تهیه شده به زبان QBASIC محاسبه گردید. سپس اثر لبه ($\square I$) بر اساس معادله ۲ محاسبه گردید. نفوذ یک بعدی (I_{1D}) از معادله کوستیاکوف حاصل برآزش داده‌های آزمایش نفوذ استوانه مضاعف محاسبه شد و در نهایت مقادیر نفوذ تجمعی دو بعدی به ازای مقادیر مختلف γ و W^*/W از معادله ۱ با استفاده از نرم‌افزار EXCEL محاسبه گردید. سپس هر یک از مقادیر محاسبه شده نفوذ تجمعی دو بعدی که در مقادیر مختلف γ در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۱/۴ و مقادیر مختلف W^*/W در محدوده‌ی ۰/۸ تا ۱/۳ به دست آمده بود با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و شاخص آماری مجذور میانگین مربعات خطا محاسبه شد. کمترین شاخص مجذور میانگین مربعات خطا، مقدار قابل قبول γ و W^*/W را تعیین کرد. برای محاسبه کمترین شاخص آماری مجذور میانگین مربعات خطا نیز از نرم‌افزار EXCEL استفاده شد. مدل دو بعدی نفوذ (معادله ۱) و مقادیر به دست آمده برای γ و W^*/W با آزمایش‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ اعتبارسنجی شد.

حساسیت مدل دو بعدی (معادله ۱) به تغییر هر یک از پارامترهای مؤثر بر نفوذ تجمعی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تغییرات نسبی نفوذ تجمعی محاسبه شده با مدل دو بعدی با تغییر مقادیر هر یک از پارامترهای h_0 , h_f , θ_n , θ_s , θ_0 , K_s و γ و W در سطوح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش و افزایش در حالی که مابقی پارامترها ثابت در نظر گرفته شد، بررسی گردید. با مقایسه مقادیر نفوذ تجمعی محاسبه شده با مقادیر افزایش یا کاهش داده شده هر پارامتر با مقادیر اولیه حساسیت مدل نسبت به پارامترهای فوق بررسی شد. برای این منظور مقادیر درصد تغییرات نسبی مدل در برآورد نفوذ دو بعدی در اثر تغییر هر یک از پارامترها نسبت به مقادیر اولیه از معادله ۵ برآورد شد.

جدول ۳- ضرایب معادله کوستیاکوف برای آزمایش‌های استوانه نفوذ

مدل نفوذ	k (cm min ⁻³)	a	R ²	AE(%)
استوانه مضاعف تکرار ۱	۰/۲۹۴۵	۰/۵۷۶۸	۰/۹۹	۲/۲
استوانه مضاعف تکرار ۲	۰/۲۰۲۲	۰/۶۸۰۵	۰/۹۹	۹/۵
میانگین	۰/۲۴۸۴	۰/۶۲۶۸		۵/۸

جدول ۴- پارامترهای مورد نیاز برای تعیین اثر لبه در آزمایش ۲

W (cm)	W [*] /W	γ	S ₀ (cm min ^{-0.5})	θ_n (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	h _f (cm)	h ₀ (cm)
۱۹	۱/۱۵	۰/۶۲	۰/۴۳	۰/۲۱	۰/۴۴	-۴۵	۲/۸

واسنجی شده γ محاسبه شد. شکل ۱ نشان می‌دهد که اثر لبه با زمان

اثر لبه (ΔI) از معادله ۲ در زمان‌های مختلف و به ازای مقدار

شکل ۲ نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده نفوذ با مدل واریک به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک است. شاخص‌های آماری ارایه شده در جدول ۵ نیز همین نتیجه را نشان می‌دهد.

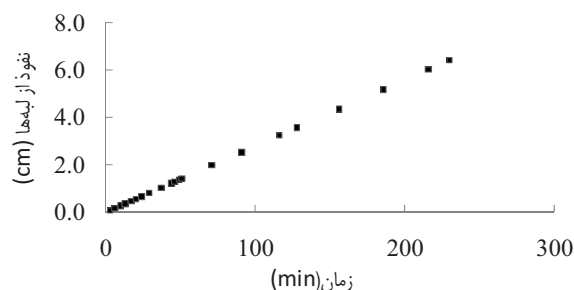
اعتبارسنجی مدل دو بعدی نفوذ

مقادیر حجم آب نفوذ یافته اندازه‌گیری و محاسبه شده با مدل دو بعدی (معادله ۱) و شاخص‌های آماری خطا برای آزمایش‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ محاسبه و در جدول ۵ ارایه گردیده است. با مشاهده این جدول مشخص می‌شود که مقادیر محاسباتی نفوذ دو بعدی با مقادیر اندازه‌گیری شده در جویچه بسیار نزدیک می‌باشد. از نظر آماری درصد خطای این مدل مقادیر اندازه‌گیری شده ۵/۹ درصد و میانگین RMSE آن برابر ۰/۰۰۳۱ مترمکعب بر متر بود. مقادیر جدول ۵ نشان می‌دهد که خطای این مدل برای برآورد نفوذ تجمعی جویچه‌ها نسبتاً پایین است. بیشترین مقدار خطا مربوط به آزمایش ۵ است که در آن مقدار دبی ورودی جریان آب به جویچه معادل دبی فرسایشی است. همچنین برای مشاهده بهتر نتایج در شکل ۳ مقادیر محاسبه شده نفوذ با مدل دو بعدی در مقابل نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به ترتیب برای آزمایش‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در همه آزمایش‌ها نقاط به خط ۱:۱ نزدیک بوده و مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده مطابقت خوبی دارند. این نتیجه با یافته‌های واریک و همکاران (۲۸) نیز مطابقت دارد.

حساسیت پارامترهای مدل دو بعدی نفوذ

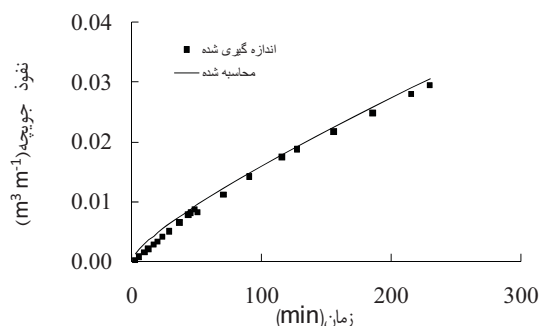
حساسیت مدل دو بعدی نفوذ واریک (معادله ۱) به ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش و افزایش در هر یک از پارامترهای ورودی مدل بررسی و نتایج آن بر حسب درصد تغییرات نسبی نفوذ نسبت به مقادیر اولیه محاسبه شده و در جدول ۶ نشان داده شده است.

رابطه خطی دارد و با افزایش زمان مقدار آن افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج به‌دست آمده توسط واریک و همکاران (۲۹) که رابطه خطی اثر لبه با زمان را نشان دادند مطابقت دارد.



شکل ۱- تغییرات نفوذ از لبه‌ها با زمان در آزمایش ۲

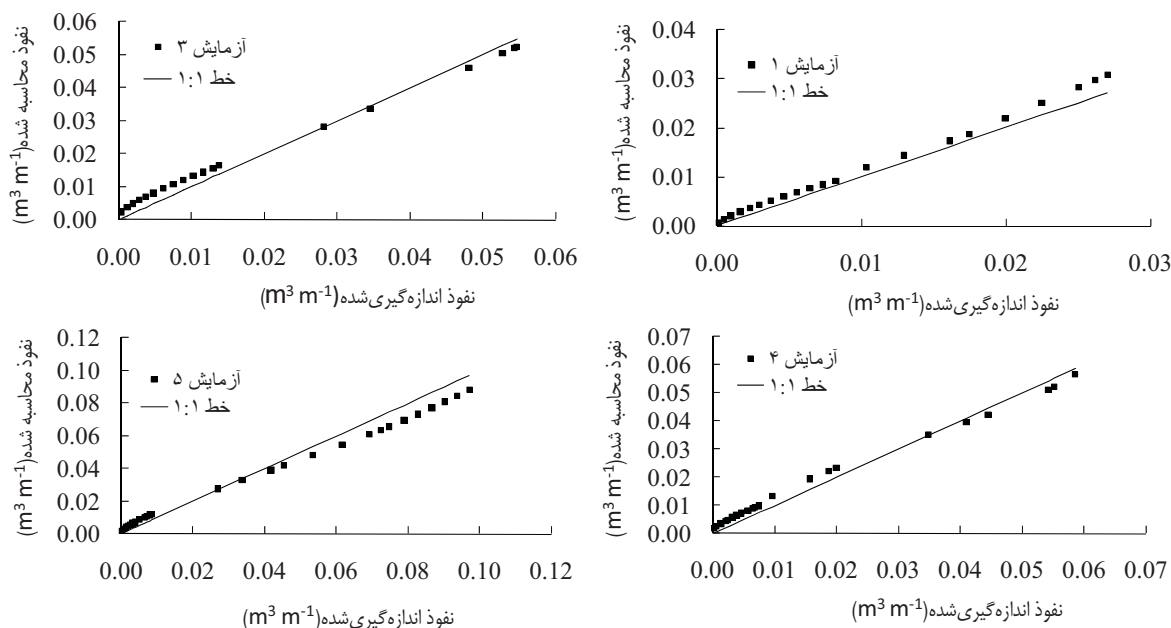
نفوذ دو بعدی اندازه‌گیری شده در آزمایش ۲ (I_{2D}) و محاسبه شده با معادله ۱ ($I_{1D}+DI$) به ازای مقادیر ۰/۶۲ و ۱/۱۵ به ترتیب برای γ و W^*/W در شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر نفوذ یک بعدی (I_{1D}) از معادله کوستیاکوف با ضرایب k و a به ترتیب ۰/۲۴۸۴ و ۰/۶۲۶۸ محاسبه شد و مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲- مقایسه نفوذ تجمعی دو بعدی محاسبه شده از معادله ۱ با نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش ۲

جدول ۵- مقادیر حجم آب نفوذ یافته اندازه‌گیری (V_{t0}) و محاسبه شده (V_{tc}) با مدل دو بعدی

شماره آزمایش	V_{t0} (m^3)	V_{tc} (m^3)	AE(%)	RMSE($m^3 m^{-1}$)
آزمایش ۱	۲/۹۷	۳/۱۹	۷/۳	۰/۰۰۱۶
آزمایش ۳	۶/۰۱	۵/۷۶	۴/۳	۰/۰۰۲۶
آزمایش ۴	۶/۴۴	۶/۲۴	۳/۱	۰/۰۰۲۶
آزمایش ۵	۱۰/۶۸	۹/۷۰	۹/۲	۰/۰۰۵۹
میانگین خطا			۵/۹	۰/۰۰۳۱



شکل ۳- مقایسه بین نفوذ دو بعدی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده ($m^3 m^{-1}$) برای آزمایش‌های ۱، ۳، ۴ و ۵

ریاضی آبیاری سطحی و مدل‌های کودآبیاری قابل تلفیق می‌باشد. لذا این تحقیق با هدف ارزیابی، تعیین ضرایب تجربی و تحلیل حساسیت این مدل انجام شد. پس از واسنجی مدل دو بعدی نفوذ در یک خاک لوم رسی مقادیر $0/62$ و $1/15$ به ترتیب برای ضرایب تجربی γ و W^*/W مدل به دست آمد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل، نفوذ جویچه‌ها را به خوبی برآورد می‌نماید. درصد میانگین خطای برآورد این مدل $5/9$ درصد و مجذور میانگین مربعات خطاهای آن $0/031$ مترمکعب بر متر بود. نتایج نشان داد اثر لبه با زمان رابطه خطی دارد و با افزایش زمان مقدار آن افزایش می‌یابد. لذا می‌توان این مدل را برای برآورد دقیق تر نفوذ دو بعدی در جویچه‌ها در شرایط خاک مشابه استفاده نمود. تحلیل حساسیت نشان داد که مدل کمترین حساسیت را به رطوبت اولیه خاک و عمق آب در داخل جویچه و بیشترین حساسیت را به رطوبت اشباع و محیط خیس شده دارد.

مدل بیشترین حساسیت را به پارامتر θ_s و پس از آن به W داشت. افزایش نفوذ تجمعی دو بعدی با ازای 10 ، 20 و 30 درصد افزایش θ_s به ترتیب $6/9$ ، $13/8$ و $20/7$ درصد بود. مدل به پارامترهای θ_n ، h_f ، h_0 و θ_n حساسیت کمتری داشت. کمترین حساسیت مدل به پارامتر θ_n بود. افزایش نفوذ تجمعی دو بعدی با ازای 10 ، 20 و 30 درصد افزایش θ_n به ترتیب $0/07$ ، $0/14$ و $0/21$ درصد بود. بنابراین اندازه‌گیری‌های دقیق آزمایشگاهی برای پارامتر θ_s و اندازه‌گیری‌های دقیق مزرعه ای برای پارامتر W توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

به دلیل وجود شرایط دو بعدی نفوذ آب در جویچه‌ها، در نظر گرفتن نفوذ به صورت دو بعدی در مدل‌های آبیاری و کودآبیاری سطحی برای توصیف و ارزیابی بهتر عملکرد آبیاری اهمیت زیادی دارد. مدل دو بعدی نفوذ واریک (معادله ۱) به راحتی با مدل‌های

جدول ۶- حساسیت مدل نفوذ دو بعدی واریک به کاهش و افزایش پارامترهای ورودی (درصد افزایش یا کاهش نفوذ)

ضریب افزایش پارامترها	h_0	h_f	θ_n	θ_s	θ_0	K_s	γ	W
۰/۷	-۰/۹	-۸/۱	-۰/۲۱	-۲۰/۷	۱۶/۶	-۱۱/۴	-۹/۹	-۱۸/۴
۰/۸	-۰/۶	-۵/۴	-۰/۱۴	-۱۳/۸	۱۲/۷	-۷/۵	-۶/۶	-۱۲/۲
۰/۹	-۰/۳	-۲/۷	-۰/۰۷	-۶/۹	۷/۴	-۳/۷	-۳/۳	-۶/۱
۱/۱	۰/۳	۲/۷	۰/۰۷	۶/۹	-۷/۴	۳/۷	۳/۳	۶/۱
۱/۲	۰/۶	۵/۴	۰/۱۴	۱۳/۸	-۱۲/۷	۷/۵	۶/۶	۱۲/۲
۱/۳	۰/۹	۸/۱	۰/۲۱	۲۰/۷	-۱۶/۶	۱۱/۱	۹/۹	۱۸/۴

تنها با ویژگی‌های زود یافت فیزیکی خاک، مقادیر نفوذ را در خاک‌های مختلف با این معادله برآورد کرد. این موضوع در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در صورتی که به جای معادله کوستیاکوف که برای محاسبه نفوذ یک بعدی استفاده شد، از معادله نفوذ گرین و امپت که معادله‌ای با اساس فیزیکی است استفاده شود، مدل دو بعدی نفوذ (معادله ۱) به یک معادله کاملاً فیزیکی تبدیل خواهد شد. در آن صورت می‌توان

منابع

- 1- Abbasi F., Adamsen F.J., Hunsaker D.J., Feyen J., Shouse P., and Van Genuchten M.Th. 2003. Effects of flow depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: Field data analysis. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129(4): 237-246.
- 2- Abbasi F., Feyen J., and Van Genuchten M.Th. 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 290: 63-79.
- 3- Bautista E., Clemmens A.J., Strelkoff T.S., Schlegel J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agric. Water Manage.*, 96: 1146-1154.
- 4- Butters G.L., Benjamin J.G., Ahuja L.R., and Ruan H. 2000. Bromide and atrazine leaching in furrow- and sprinkler-irrigated corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64(5): 1723-1732.
- 5- Enciso-Medina J., Martin D., and Eisenhauer D. 1998. Infiltration model for furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(2): 73-80.
- 6- Fok Y.S., and Chiang S.H. 1984. 2-D infiltration equations for furrow irrigation. *Rev. Quant. Finance Account.*, 110(2): 208-217.
- 7- Haverkamp R., Ross P.J., Smettem P.J., and Parlange J.Y. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2: Physically based infiltration equation. *Water Resour. Res.*, 30 (11): 2931-2935.
- 8- Kostiaikov A.V. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamics point of view for purposes of amelioration. *Transactions of the Sixth Commission of International Society of Soil Science*, part A, pp: 17-21.
- 9- Lazarovitch N., Warrick A.W., Furman A., and Zerihun D. 2009. Subsurface water distribution from furrows described by moment analysis. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 135(1): 7-12.
- 10- Lewis M.R. 1937. The rate of infiltration of water in irrigation practice. *Trans. Am. Geophys. Union.*, 18: 361-368.
- 11- Mailhol J.C., Crevoisier D., and Triki K. 2007. Impact of water application conditions on nitrogen leaching under furrow irrigation: experimental and modelling approaches. *Agric. Water Manage.*, 87: 275-284.
- 12- Mailhol J.C. 2003. A validation of a predictive form of Horton infiltration for simulating furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129: 412-421.
- 13- Mualem Y. 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resour. Res.*, 12(6): 513-522.
- 14- Perea H., Strelkoff T.S., Šimůnek J., Bautista E., and Clemmens A.J. 2003. Unsteady furrow infiltration in the light of the Richards Equation. p. 625-636. *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Irrigation and Drainage: Water for a Sustainable World Limited Supplies and Expanding Demand*, United States Committee of Irrigation and Drainage Engineering, Denver.
- 15- Rassam D., Šimůnek J., and Van Genuchten M.T. 2003. Modeling variably saturated flow with HYDRUS-2D. ND consult, Brisbane, Australia.
- 16- Schaap M.G., Leij F.J., Van Genuchten M.Th. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251: 163-176.
- 17- Schmitz G.H. 1993. Transient infiltration from cavities. I: Theory. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 119(3): 443-457.
- 18- Schmitz G.H. 1993. Transient infiltration from cavities. II: Analysis and application. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 119(3): 458-470.
- 19- Simunek J., Sejna M., and Van Genuchten M.Th. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 2.0, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, Calif.
- 20- Simunek 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, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, Calif.
- 21- Singh D.K., Rajput T.B.S., Singh D.K., Sikarwar H.S., Sahoo R.N., and Ahmad T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water Manage.*, 8 3:1 30 - 134.
- 22- Singh V.P., He Y.C., and Yu F.X. 1987. 1-D, 2-D, and 3-D infiltration and irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 113(2), 266-278.
- 23- Skonard C.J. 2002. A field-scale furrow irrigation model. PhD Dissertation. University of Nebraska, Lincoln.

- 24- Strelkoff T.S., Clemmens A.J., and Bautista E. 2009. Field properties in surface irrigation management and design. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 135(5): 525-536.
- 25- Vogel T., and Hopmans J.W. 1992. Two-dimensional analysis of furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 118(5): 791-806.
- 26- Walker W., and Skogerboe V. 1987. *Surface irrigation theory and practice*. Prentice Hall, Nj: 1-386.
- 27- Warrick A.W. 2003. *Soil Water Dynamics*. Oxford University Press, NewYork.
- 28- Warrick A.W., and Lazarovitch N. 2007. infiltration from a strip source. *Water Resour. Res.*, 43(3).
- 29- Warrick A.W., Lazarovitch N., Furman A., and Zerihun D. 2007. Explicit infiltration function for furrows. *J. Irrig. and Drain. Eng.*, 133(4):307-313.
- 30- Wöhling Th., Schmitz G.H., and Maihol J.C. 2004. Modeling two-dimensional infiltration from irrigation furrows. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130(4): 296-303.
- 31- Wöhling Th., Singh R., and Schmitz G.H. 2004. Physically based modeling of interacting surface-subsurface flow during furrow irrigation advance. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130(5): 349-356.

Evaluation of a Two Dimensional Infiltration Function for Irrigated Furrows

M. Panahi¹ - S.M. Mirlatifi^{2*} - F. Abbasi²

Received:7-3-2011

Accepted:18-9-2011

Abstract

This study addresses two dimensional infiltration from irrigated furrows. The basic approach is to develop a two-dimensional infiltration as a combination of the corresponding one-dimensional vertical and an edge effect. The edge effect is the difference between the cumulative infiltration per unit of adjusted wetting perimeter and the corresponding one-dimensional infiltration. This approach was evaluated using field measured furrow experiments and double ring infiltration tests. In this study, two series of experiments was conducted in 2010 on a clay loam soil. The first series of the tests included five experiments with inflow rate ($0.3-0.8 \text{ ls}^{-1}$) on free draining furrows having 110 meters in length, 75 cm wide and general slope of 0.008 m m^{-1} . The second series of the experiments were carried out using double ring. A general conclusion was that the edge effect was linearly related to time. Using minimizing root mean square error (RMSE) the two empirical coefficients of the model including γ and W^*/W were determined. The values of 0.62 and 1.15 were determined for the two empirical parameters in the clay loam soil studied. The results showed that the RMSE and the absolute error (AE) were 0.0031 and 5.9 %, respectively. Model sensitivity analysis showed that the lowest sensitivity was to initial water content and the highest sensitivity was to saturation water content. The approach leads to an infiltration function for irrigation furrows without the need to perform a fully two-dimensional simulation.

Keywords: Furrow irrigation, Two-dimensional infiltration models, Warrick model, Edge effect

1,2- PhD Student and Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

(*-Corresponding Author Email: mirlat_m@modares.ac.ir)

3- Associate Professor Agriculture and Engineering, Research Institute, AERI, Karaj