

ارزیابی روش‌های مختلف برای تعیین پارامترهای نفوذ و مقایسه آن‌ها با دو روش پیشنهادی

مسعود محمدی^{۱*}، مهدی مکاری باغ‌خیراتی^۲، حسین انصاری^۳ و کامران داوری^۴

چکیده

در این پژوهش روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر، یک نقطه‌ای شپارد و همکاران، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران، دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران و NRCS، ارزیابی و دو روش دو نقطه‌ای جدید براساس معادله‌های کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیس ارائه شد. بدین منظور از پنج سری داده صحرایی با شرایط مختلف مزرعه‌ای از جمله طول، شیب و دبی ورودی استفاده شد. با استفاده از مدل هیدرودینامیک نرم‌افزار SIRMOD و پارامترهای نفوذ معادله‌های ذکر شده، مراحل پیشروی و پسروی آبیاری شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در برآورد میزان آب نفوذ یافته به خاک روش‌های پیشنهادی دوم و والیانتراس و همکاران به ترتیب با ۷/۹۸ و ۲۴/۰۹ درصد، دارای کمترین و بیشترین خطای نسبی هستند. در پیش‌بینی مرحله پیشروی و پسروی به ترتیب روش‌های پیشنهادی دوم (۲۳/۲) و NRCS (۱/۰۷) دارای کمترین خطای استاندارد بودند. روش‌های پیشنهادی دوم و والیانتراس و همکاران به ترتیب با متوسط کارایی ۰/۷۹ و ۰/۷، بیشترین و کمترین دقت را در پیش‌بینی مرحله پیشروی داشتند. همچنین روش NRCS در تخمین مرحله پسروی با متوسط کارایی ۰/۸۹ درصد دارای بیشترین دقت و روش ابراهیمیان و همکاران با متوسط کارایی ۰/۸۳ درصد دارای کمترین دقت بود. روش پیشنهادی دوم با متوسط ضریب باقیمانده ۰/۱۹ دارای بیشترین دقت و روش والیانتراس و همکاران با متوسط ضریب باقیمانده ۰/۴۵ دارای کمترین دقت در تخمین مرحله پیشروی بودند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، پارامترهای نفوذ، روش پیشنهادی، مرحله پیشروی و پسروی.

ارجاع: محمدی م.، مکاری باغ‌خیراتی م.، انصاری ح. و داوری ک. ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های مختلف برای تعیین پارامترهای نفوذ و مقایسه آن‌ها با دو روش پیشنهادی. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۱۳۵-۱۴۳.

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

نویسنده مسئول: Mmohammadi_64@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۶/۰۸

مقدمه

پارامترهای نفوذ و ضریب زبری مانینگ از متغیرهای بحرانی در طراحی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی هستند (ردریگز و مارتز، ۲۰۱۰). برای تخمین بهتر پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای، روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش جویچه مسدود، ورودی و خروجی، نفوذ سنج گردشی، دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)، شپارد و همکاران (۱۹۹۳) و NRCS (واکر و همکاران، ۲۰۰۶) اشاره کرد. هولزفل و همکاران (۲۰۰۴) به ارزیابی چهار روش مختلف برای تعیین ثابت‌های معادله کوستیاکوف برای دو اندازه مختلف جویچه (جویچه باریک به عرض ۴۰ سانتی‌متر و جویچه عریض به عرض ۶۰ سانتی‌متر) پرداختند. روش‌های نفوذ در این مطالعه شامل روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، نفوذ سنج جویچه (روش ورودی و خروجی)، یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) و پیشروی بنامی و افن (۱۹۸۴) بوده است. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار توان معادله کوستیاکوف به نوع روش تعیین ویژگی‌های نفوذ و اندازه جویچه بستگی ندارد. منحنی نفوذ تجمعی برای جویچه‌های باریک در هر چهار روش به طور تقریبی مشابه بوده است و مستقل از نوع روش به کار رفته بود. در حالی که منحنی نفوذ تجمعی برای جویچه‌های عریض بستگی به نوع روش داشته است. با استفاده از ثابت‌های معادله کوستیاکوف به دست آمده در هر چهار روش و با به کارگیری مدل موج سینماتیک، مرحله پیشروی در جویچه‌ها تخمین زده شده است. نتایج نشان داده که برای جویچه‌های عریض، روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) و برای جویچه‌های باریک روش پیشروی بهترین عملکرد را داشته است. بدترین نتایج برای پیش بینی مرحله پیشروی با استفاده از ثابت‌های نفوذ به دست آمده از روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) حاصل شده است. ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) با ارزیابی روش‌های مختلف نفوذ و ارائه یک روش دو نقطه‌ای جدید براساس معادله نفوذ فلیپ، گزارش کردند که روش پیشنهادی و روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) به ترتیب در آبیاری نواری و جویچه‌ای دارای کمترین خطای نسبی در برآورد میزان آب نفوذ یافته در خاک هستند. اجاقلو و همکاران (۱۳۸۷) گزارش کردند که روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) و بهینه‌سازی

مک‌کلایمونت و اسمیت (۱۹۹۶) برآورد مناسب‌تری برای پارامترهای نفوذ داشتند در حالی که روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) برآورد کمتر از حد و روش یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) برآورد بیش از حد داشت. کاتری و اسمیت (۲۰۰۵) به ارزیابی شش روش نفوذپذیری برای تعیین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. روش‌های مذکور شامل روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، استفاده از مدل رایانه‌ای INFILT (مک‌کلایمونت و اسمیت، ۱۹۹۶)، یوپادایا و راقو وانشی (۱۹۹۹)، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) و تابع خطی نفوذ (آستین و پرندرگاست، ۱۹۹۷) بودند. نتایج این معادله نشان داد که مدل INFILT برای همه داده‌های صحرایی بیشترین دقت را داشت. همچنین به صورت کلی روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) و تابع خطی نفوذ نیز عملکرد خوبی داشتند. رضانی و همکاران (۲۰۱۱) مدل‌های INFILT، EVALUE و SIPAR_ID را برای تعیین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف و ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش کردند که مدل‌های EVALUE و SIPAR_ID خطای کمتری را در تخمین حجم آب نفوذ یافته داشتند و کارایی EVALUE در تخمین ضریب مانینگ تا حدی بهتر از مدل SIPAR_ID است. در آبیاری جویچه‌ای هر کدام از روش‌های اندازه‌گیری سرعت نفوذ که استفاده می‌شوند باید شرایط آبیاری را شبیه‌سازی کند (سهرابی و پایدار، ۱۳۸۴). روش‌هایی مانند استوانه مضاعف شرایط دینامیکی مزرعه را در نظر نمی‌گیرد، به همین دلیل در این مقاله، روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) اصلاح و دو روش دو نقطه‌ای جدید براساس معادله‌های نفوذ کوستیاکوف و کوستیاکوف لوئیس معرفی شد. همچنین دقت روش‌های پیشنهادی با روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)، روش ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) و روش NRCS (واکر و همکاران، ۲۰۰۶) در تخمین حجم آب نفوذ یافته به داخل خاک و مراحل پیشروی و پسروی در آبیاری جویچه‌ای ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

معادلات نفوذ

معادلات نفوذ NRCS (واکر و همکاران، ۲۰۰۶)

در این روش ابتدا شماره منحنی نفوذ (Fn) که با NRCS ارائه شده است، با توجه به بافت خاک مشخص می‌شود. سپس پارامترهای معادله نفوذ مرجع براساس فاروهای تازه شخم خورده یا فاروهای که اولین آبیاری در آن‌ها انجام شده است با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_{ref} = \frac{(0.1571 + 2.5739 \times Fn)}{(1 + 3.6940 \times Fn - 0.1149 \times Fn^2)} \quad (۱)$$

$$F_{oref} = 0.000454(1.0149 - e^{-0.5596Fn}) \quad (۲)$$

$$K_{ref} = 0.00247(Fn + 0.00319)^{0.5817} \quad (۳)$$

که در آن‌ها، Fn شماره منحنی نفوذ ارائه شده با NRCS و k_{ref} ، a_{ref} ، F_{oref} پارامترهای معادله نفوذ مرجع هستند.

حال با رابطه‌های زیر پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوتیس برای آبیاری جویچه‌ای محاسبه می‌شود:

$$I = kt^a + f_0t \quad (۴)$$

$$a = ICF \times a_{ref} \quad (۵)$$

که در آن، ICF ضریبی است که به شرایط آبیاری بستگی دارد و مقدار آن برای آبیاری جویچه‌ای با جریان پیوسته ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود (واکر و همکاران، ۲۰۰۶) و مقنار K از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k = ICF \times K_{ref} \times \left[\frac{WP_a}{WP_{ref}} \right] \quad (۶)$$

که در آن، WP_a محیط خیس شده واقعی جویچه (متر) و WP_{ref} محیط خیس شده مرجع (متر) است که به ترتیب از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$WP_a = 26.472 \left(\frac{Qn}{\sqrt{S}} \right)^{0.4247} + 22.744 \quad (۷)$$

$$WP_{ref} = 0.298 \times (Fn - 0.1417)^{0.548} \quad (۸)$$

که در آن، WP_a بر حسب سانتی‌متر، Q دبی جریان بر حسب لیتر در ثانیه، S شیب کف فارو و n ضریب زبری مانینگ است. سرعت نفوذ نهایی (F_0) در معادله کوستیاکوف-لوتیس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_0 = ICF \times F_{oref} \times \left[\frac{WP_a}{WP_{ref}} \right] \quad (۹)$$

روش دو نقطه‌ای پیشنهادی اول

در این روش از معادله کوستیاکوف و بیلان حجمی آب به منظور پیش بینی میزان نفوذ در طول جویچه استفاده شد. معادله توانی مرحله پیشروی به شکل زیر است:

$$x = pt^r \quad (۱۰)$$

که در آن x طول پیشروی، t زمان پیشروی، r توان معادله پیشروی و p ضریب تجربی معادله است که به نوع خاک بستگی دارد. با جایگزین کردن پارامتر زمان از رابطه بالا در معادله نفوذ کوستیاکوف در بازه t و t_s خواهیم داشت:

$$I = K \left[\left(\frac{x}{p} \right)^{\frac{1}{r}} - \left(\frac{t_s}{p} \right)^{\frac{1}{r}} \right]^a \quad (۱۱)$$

که در آن، t_s مدت زمان لازم برای رسیدن آب به فاصله S از ابتدای جویچه است. معادله بیلان حجم مطابق رابطه زیر است:

$$Qt = \sigma_y A_0 x + \int_0^x Ids \quad (۱۲)$$

با ترکیب رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) داریم:

$$Qt = \sigma_y A_0 x + \int_0^x K \left[\left(\frac{x}{p} \right)^{\frac{1}{r}} - \left(\frac{t_s}{p} \right)^{\frac{1}{r}} \right]^a ds \quad (۱۳)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه بالا و با اندازه‌گیری دو نقطه از مرحله پیشروی x_1 و x_2 ، پارامترهای معادله کوستیاکوف از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$a = \frac{\ln \left[\frac{x_2 (Q_1 t_1 - \sigma_y A_0 x_1)}{x_1 (Q_2 t_2 - \sigma_y A_0 x_2)} \right]}{\frac{1}{r} \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right)} \quad (۱۴)$$

$$k = \frac{Q_2 t_2 - \sigma_y A_0 x_2}{rx_2 \left(\frac{x_2}{p} \right)^{\frac{a}{r}} \cdot \frac{\Gamma(r)\Gamma(a+1)}{\Gamma(a+r+1)}} \quad (۱۵)$$

که در آن، A_0 سطح مقطع اولیه جریان، Q دبی ورودی به جویچه و σ_y فاکتور ذخیره سطحی است. اندیس‌های ۱ و ۲ در معادلات بالا به ترتیب مربوط به پیشروی تا نصف و تمام طول جویچه است.

روش دو نقطه‌ای پیشنهادی دوم

در این روش از معادله کوستیاکوف-لوتیس و بیلان حجمی آب (مشابه روش پیشنهادی اول) برای پیش‌بینی میزان نفوذ در طول جویچه استفاده شد. که پارامترهای a و k از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$a = \frac{\ln \left[\frac{x_2 (Q_1 t_1 - \sigma_y A_0 x_1 - f_0 x_1 \left(\frac{x_1}{p} \right)^{\frac{1}{r}} \frac{1}{r+1})}{x_1 (Q_2 t_2 - \sigma_y A_0 x_2 - f_0 x_2 \left(\frac{x_2}{p} \right)^{\frac{1}{r}} \frac{1}{r+1})} \right]}{\frac{1}{r} \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right)} \quad (۱۶)$$

$$k = \frac{Q_2 t_2 - \sigma_y A_0 x_2 - f_0 x_2 \left(\frac{x_2}{p} \right)^{\frac{1}{r}} \frac{1}{r+1}}{rx_2 \left(\frac{x_2}{p} \right)^{\frac{a}{r}} \cdot \frac{\Gamma(r)\Gamma(a+1)}{\Gamma(a+r+1)}} \quad (۱۷)$$

به دلیل این که تعیین مقدار f_0 از روش ورودی-خروجی نیازمند وقت و هزینه است، این پارامتر از رابطه ۹ محاسبه

که مقدار ضریب r معادله پیشروی 0.5 فرض شده که به ندرت این مقدار حاصل می‌شود. این روش بر اساس بیان حجمی آب استوار بوده و فقط از نقطه انتهایی مرحله پیشروی به منظور تخمین پارامترهای معادله نفوذ SCS (۱۹۸۴) استفاده می‌نماید. مزیت این روش آن است که برخلاف روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) معادله پیشروی را محدود به فرم $(x = pt^{0.5})$ نمی‌کند و همان فرم واقعی آن $(x=pt^f)$ را در نظر می‌گیرد. ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹)، روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) را اصلاح و روش دو نقطه‌ای جدیدی را ارائه دادند. در این روش همانند روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) از معادله فیلیپ و بیان حجمی آب برای پیش‌بینی میزان نفوذ به داخل خاک در طول جویچه استفاده می‌شود. با این تفاوت که به جای فرض $r=0.5$ مقدار آن مانند روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) با استفاده از دو نقطه میانی و انتهایی داده‌های مرحله پیشروی مشخص می‌شود.

داده‌های مورد استفاده

در این مقاله، از پنج سری داده آبیاری جویچه‌ای شامل اطلاعات مراحل پیشروی، پسروری، هیدروگراف جریان ورودی و خروجی برای بررسی دقت روش‌های مختلف برآورد پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای استفاده شد (جدول ۱). این داده‌ها از عباسی و همکاران (۱۳۷۸) گرفته شده است.

و در رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ جایگزین می‌شود. در روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) از پارامتر (فاکتور شکل زیرسطحی) $\sigma_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)}$ که توسط کیفر (۱۹۶۵) پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود، در حالی که در روش پیشنهادی دوم پس از انتگرال‌گیری به رابطه $r \frac{\Gamma(r)\Gamma(a+1)}{\Gamma(a+r+1)}$ خواهیم رسید. همچنین در روش الیوت و واکر مقدار f_0 از روش ورودی- خروجی مشخص می‌شود. شرح روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) در مقاله ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) ارائه شده است. الیوت و واکر (۱۹۸۲) برای محاسبه ضریب‌های معادله کوستیف لوئیس برای آبیاری جویچه‌ای با استفاده از معادله بیان حجمی روشی را ارائه کردند. در این روش با استفاده از میزان جریان ورودی، مساحت سطح مقطع جریان در ابتدای شیار و دو نقطه میانی و انتهایی مرحله پیشروی، پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف- لوئیس مشخص می‌شوند. روش یک نقطه‌ای که توسط شپارد و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شد، مشابه روش دو نقطه‌ای است با این تفاوت که در این روش مقدار توان r در معادله پیشروی برابر 0.5 فرض می‌شود. داده‌های ورودی شامل، میزان جریان ورودی، یک نقطه پیشروی جریان (نقطه انتهایی جویچه) و مساحت مقطع متوسط جریان در طول فارو است روش مذکور متوسط نفوذ در طول جویچه را با معادله فیلیپ محاسبه می‌کند. ایراد این روش این است

جدول ۱- مشخصات داده‌های صحرایی مورد استفاده برای آبیاری جویچه‌ای

پارامتر	علامت	واحد	سری ۱	سری ۲	سری ۳	سری ۴	سری ۵
دبی ورودی	Q_0	lit/s	۰/۵۴۵	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۵۹	۰/۵۴۵
شیب جویچه	S_0	m/m	۰/۰۱۶۳	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۱۷	۰/۰۱۶۳	۰/۰۱۶۳
ضریب مانینگ	n	-	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳
طول جویچه	L	m	۱۸۰	۲۵۰	۱۰۰	۱۹۰	۱۹۰
زمان قطع جریان	T_{c0}	min	۱۸۰	۱۵۶	۱۲۷	۱۰۲	۲۴۰
عرض جویچه	W	m	۰/۷	۰/۷۵	۰/۷	۰/۷	۰/۷
پارامترهای هیدرولیکی مقطع	ρ_1	-	۰/۴۳	۰/۳۱	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲
	ρ_2	-	۲/۷۹	۲/۷۴	۲/۸۱	۲/۸۱	۲/۸۱
بافت خاک	-	-	لوم رسی	لوم سیلتی رسی	لوم	لوم	لوم رسی
نوبت آبیاری	-	-	۱	۱	۱	۱	۱

ارزیابی روش‌های مختلف نفوذ

برای ارزیابی روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ، حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه با روش‌های مختلف (با استفاده از هیدروگراف جریان ورودی- خروجی)

مقایسه شد. برای ارزیابی روش‌ها در تخمین حجم آب نفوذ یافته از معیار درصد خطای نسبی (RE) استفاده شد.

$$RE = \frac{V_p - V_m}{V_m} \times 100 \quad (17)$$

که در آن، V_p و V_m به ترتیب حجم آب نفوذ یافته تخمین

زده شده و اندازه‌گیری شده است.

همچنین با استفاده از مدل هیدرودینامیک نرم افزار SIRMOD (واکر، ۲۰۰۳) و پارامترهای تخمینی معادله نفوذ به هفت روش ارائه شده در این مقاله، مرحله پیشروی و پسروی برای داده‌های مورد استفاده، شبیه سازی شدند تا دقت این روش‌ها بررسی شود. برای مقایسه روش‌ها در تخمین زمان‌های پیشروی و پسروی از شاخص‌های خطای استاندارد (SE)، کارایی مدل‌سازی (EF) و ضریب باقیمانده (CRM) استفاده شد (همایی و همکاران، ۲۰۰۲ و لیگو و گرین، ۱۹۹۹).

نتایج و بحث

پیش‌بینی میزان نفوذ

نتایج به دست آمده از بررسی حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه با استفاده از روش‌های مختلف، در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود روش‌های پیشنهادی دوم و الیوت و واکر (۱۹۸۲) با متوسط خطای نسبی (RE) ۷/۹۷ و ۱۱/۷۷ درصد دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها در تخمین حجم آب نفوذ یافته در خاک هستند. همچنین روش پیشنهادی دوم نسبت به روش‌های پیشنهادی اول، شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)، ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹)، NRCS (واکر و همکاران، ۲۰۰۶) و الیوت و واکر (۱۹۸۲) به ترتیب به میزان ۵۵/۷، ۴۳/۱،

۲۰۲/۲، ۱۷۸/۱، ۱۵۸/۶ و ۴۷/۶ درصد، دقت بیشتری در تخمین حجم آب نفوذ یافته در خاک دارد. کاتری و اسمیت (۲۰۰۵) با ارزیابی شش روش تعیین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای گزارش کردند که، مدل INFILT برای همه داده‌های صحرایی بیشترین دقت را داشت. همچنین به طور کلی روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) و تابع خطی نفوذ نیز عملکرد خوبی داشتند. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) در ارزیابی روش‌های مختلف نفوذ گزارش کردند که روش اصلاح شده میل اپالای (وطن‌خواه و همکاران، ۲۰۱۰) و الیوت و واکر (۱۹۸۲) کمترین خطای نسبی را در برآورد حجم نفوذ یافته در آبیاری جویچه‌ای و نواری داشتند.

اندازه‌گیری سرعت نفوذپذیری نهایی (f_0) تأثیر زیادی در دقت تخمین ضریب‌های معادلات نفوذ کاستاکوف-لوتیس (a و k) دارد. هنگامی که این مقدار از هیدروگراف دبی ورودی و خروجی تعیین می‌شود، دقت آن به طور معمول بیشتر از مقدار تخمینی آن (بر اساس بافت خاک یا شماره منحنی) است. پس انتظار می‌رود که دقت روش پیشنهادی دوم کمتر از روش الیوت و واکر باشد. اما می‌توان گفت دلیل دقت بهتر روش پیشنهادی دوم نسبت به روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) این است که در روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) برای تعیین مقدار k از پارامتر σ_z که توسط کیفر (۱۹۶۵) پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود و همین عامل باعث این اختلاف شده است.

جدول ۲- درصد خطای نسبی (درصد) در برآورد حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه به هفت روش مختلف

نام روش	سری ۱	سری ۲	سری ۳	سری ۴	سری ۵	میانگین
پیشنهادی اول	-۱۶/۱۳	-۸/۶۶	-۹/۱۳	-۹/۶۲	-۱۸/۴۹	۱۲/۴۱
پیشنهادی دوم	۱۳/۵۳	۲/۹۳	۴/۲۳	۷/۵۱	۱۱/۶۷	۷/۹۷
شپارد و همکاران (۱۹۹۳)	۳۹/۴۷	۱۰/۳۷	۸/۹۴	-۱۶/۶۲	۲۱/۵	۱۹/۳۸
والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)	۲۷/۶۹	۱۵/۲۲	۲۰/۵۷	۲۳/۵۴	۳۳/۴۴	۲۴/۰۹
ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹)	-۳۰/۸۹	۱۰/۶۹	۱۶/۴۴	۱۷/۷۱	۳۵/۱۱	۲۲/۱۷
NRCS	-۳۰/۹۴	۷/۲۶	-۱۸/۴۲	-۲۲/۳۱	۲۴/۱	۲۰/۶۱
الیوت و واکر (۱۹۸۲)	۱۸/۲۶	۴/۲۱	۶/۹۶	۱۲/۹۷	۱۶/۴۳	۱۱/۷۷

(۲۰۰۱) با متوسط خطای استاندارد ۶۶/۵۸ درصد، دارای کمترین دقت در پیش‌بینی مرحله پیشروی است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان خطای استاندارد در پیش‌بینی مرحله پسروی (جدول ۳) به مقدار زیادی کمتر از میزان خطای استاندارد در پیش‌بینی مرحله پیشروی

مقدار خطای استاندارد (SE) در پیش‌بینی مراحل پیشروی و پسروی در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود روش پیشنهادی دوم با متوسط خطای استاندارد ۲۳/۲ درصد دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها است و روش والیانتراس و همکاران

دارای بیشترین دقت و روش والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) با متوسط ضریب باقیمانده ۰/۴۵ دارای کمترین دقت در تخمین مرحله پیشروی هستند. در تخمین مرحله پیشروی، کمترین ضریب باقیمانده (۰/۰۰۸) مربوط به روش NRCS است. همچنین بیشترین ضریب باقیمانده (۰/۰۱۸) مربوط به روش ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) است. با توجه به جدول‌های ۳ تا ۵، روش پیشنهادی دوم بیشترین دقت و روش والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) کمترین دقت را در تخمین مرحله پیشروی دارند. در حالی که در تخمین مرحله پیشروی روش NRCS و روش ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین دقت هستند. واکر (۲۰۰۵) با آنالیز حساسیت نشان داد که پارامترهای نفوذ و ضریب مانینگ به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر منحنی پیشروی و منحنی پیشروی داشتند. با توجه به اینکه ضریب مانینگ جویچه‌های مورد استفاده در این مقاله به طور تقریبی مشابه به هم بود (۰/۰۳ و ۰/۰۴) به همین دلیل مقادیر متوسط شاخص‌های آماری در تخمین مرحله پیشروی برای روش‌های مختلف، نزدیک به هم بود (جدول‌های ۳ تا ۵). همچنین به دلیل متفاوت بودن مقادیر پارامترهای معادله نفوذ در روش‌های مختلف، مقادیر متوسط شاخص‌های آماری در تخمین مرحله پیشروی متفاوت بود (جدول‌های ۳ تا ۵).

بوده که نشان‌دهنده حساسیت مرحله پیشروی به پارامترهای معادله نفوذ است. متوسط خطای استاندارد در پیش‌بینی مرحله پیشروی در تمامی روش‌ها کمتر از ۴ درصد است. به طوری که روش NRCS در تخمین مرحله پیشروی با متوسط خطای استاندارد ۱/۰۷ درصد دارای بیشترین دقت و روش ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) با متوسط خطای استاندارد ۱/۷۱ درصد دارای کمترین دقت است. ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) نیز در ارزیابی روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری نواری و جویچه‌ای گزارش کردند، متوسط خطای استاندارد در پیش‌بینی مرحله پیشروی در روش‌های مختلف نفوذ کمتر از ۴ درصد است. ارزیابی کارایی روش‌ها (EF) نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی دوم و والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) به‌ترتیب با متوسط کارایی ۰/۷۹ و ۰/۷۰، بیشترین و کمترین دقت را در پیش‌بینی مرحله پیشروی دارند (جدول ۴). همچنین روش NRCS در تخمین مرحله پیشروی با متوسط کارایی ۰/۸۹ درصد دارای بیشترین دقت و روش ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) با متوسط کارایی ۰/۸۳ درصد دارای کمترین دقت است (جدول ۴). مقادیر ضریب باقیمانده (CRM) در جدول ۵ آورده شده است، این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دوم با متوسط ضریب باقیمانده ۰/۱۹

جدول ۳- میزان خطای استاندارد (SE) در پیش‌بینی مراحل پیشروی و پیشروی با استفاده از مدل هیدرودینامیک بسته SIRMOLD

نام روش	سری ۱	سری ۲	سری ۳	سری ۴	سری ۵	میانگین
پیشنهادی اول	۳۱/۲۳***	۲۱/۲۹	۲۷/۴	۲۹/۸	۳۹/۲۱	۲۹/۷۸
	(۱/۸)*	(۱/۳)	(۱/۰۸)	(۱/۱۴)	(۲/۳)	(۱/۵۲)
پیشنهادی دوم	۳۲/۴۳	۱۴/۶۸	۱۸/۱۴	۲۳/۵۶	۲۷/۲	۲۳/۲
	(۱/۱)	(۱/۷)	(۱/۵)	(۱/۴۲)	(۱/۰۵)	(۱/۳۵)
شپارد و همکاران (۱۹۹۳)	۵۶/۵۵	۳۰/۷۱	۵۰/۸۶	۴۱/۸۳	۶۰/۱۳	۴۸/۰۲
	(۰/۹۴)	(۱/۱۳)	(۱/۹۶)	(۲/۱۳)	(۰/۶۹)	(۱/۳۷)
والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)	۹۹/۵	۴۶/۶۲	۵۵/۰۷	۵۷/۱	۷۴/۶	۶۶/۵۸
	(۰/۶)	(۱/۱۱)	(۱/۷۱)	(۱/۰۴)	(۱/۱)	(۱/۱۱)
ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹)	۷۵/۸	۳۳/۷	۶۰/۱	۶۸/۸۴	۷۷/۹۶	۶۳/۲۸
	(۱)	(۰/۵)	(۲/۶)	(۳/۳۱)	(۱/۱۳)	(۱/۷۱)
NRCS	۵۱/۳	۲۳/۹۹	۳۱/۲۶	۳۳/۵۲	۴۲/۳۱	۳۶/۴۷
	(۰/۶)	(۱)	(۱/۳۹)	(۱/۴)	(۰/۹۴)	(۱/۰۷)
الیوت و واکر (۱۹۸۲)	۳۳/۷	۱۷/۹۲	۲۴/۳	۲۹/۳۵	۳۱/۲۴	۲۷/۳
	(۲/۳)	(۱/۷۴)	(۱/۶)	(۱/۴۱)	(۰/۹۹)	(۱/۶۱)

***، * به‌ترتیب خطای استاندارد مربوط به مرحله پیشروی و پیشروی هستند.

در هر ستون ردیف اول خطای استاندارد مرحله پیشروی و ردیف دوم خطای استاندارد مرحله پیشروی است.

جدول ۴- مقادیر کارایی مدل سازی (EF) در پیش‌بینی مراحل پیشروی و پسروی با استفاده از مدل هیدرودینامیک بسته SIRM0D

نام روش	سری ۱	سری ۲	سری ۳	سری ۴	سری ۵	میانگین
پیشنهادی اول	۰/۷۱**	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۷۰	۰/۷۴
	(۰/۸۲)*	(۰/۸۹)	(۰/۸۷)	(۰/۸۷)	(۰/۸۴)	(۰/۸۶)
پیشنهادی دوم	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۷۹
	(۰/۸۲)	(۰/۹۳)	(۰/۸۸)	(۰/۸۷)	(۰/۸۳)	(۰/۸۷)
شپارد و همکاران (۱۹۹۳)	۰/۶۷	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۷۲
	(۰/۸۱)	(۰/۹۱)	(۰/۸۷)	(۰/۸۵)	(۰/۸۲)	(۰/۸۵)
والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۷۰
	(۰/۸۵)	(۰/۹۳)	(۰/۸۷)	(۰/۸۴)	(۰/۸۶)	(۰/۸۷)
ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹)	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۷۱
	(۰/۸۱)	(۰/۸۸)	(۰/۸۵)	(۰/۸۲)	(۰/۸۱)	(۰/۸۳)
NRCS	۰/۶۹	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۷۲
	(۰/۸۶)	(۰/۹۲)	(۰/۹)	(۰/۸۹)	(۰/۸۶)	(۰/۸۹)
الیوت و واکر (۱۹۸۲)	۰/۷۲	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۷۶
	(۰/۸۳)	(۰/۹۴)	(۰/۸۸)	(۰/۸۳)	(۰/۸۵)	(۰/۸۷)

**، * به ترتیب کارایی مدل‌سازی مربوط به مرحله پیشروی و پسروی هستند.

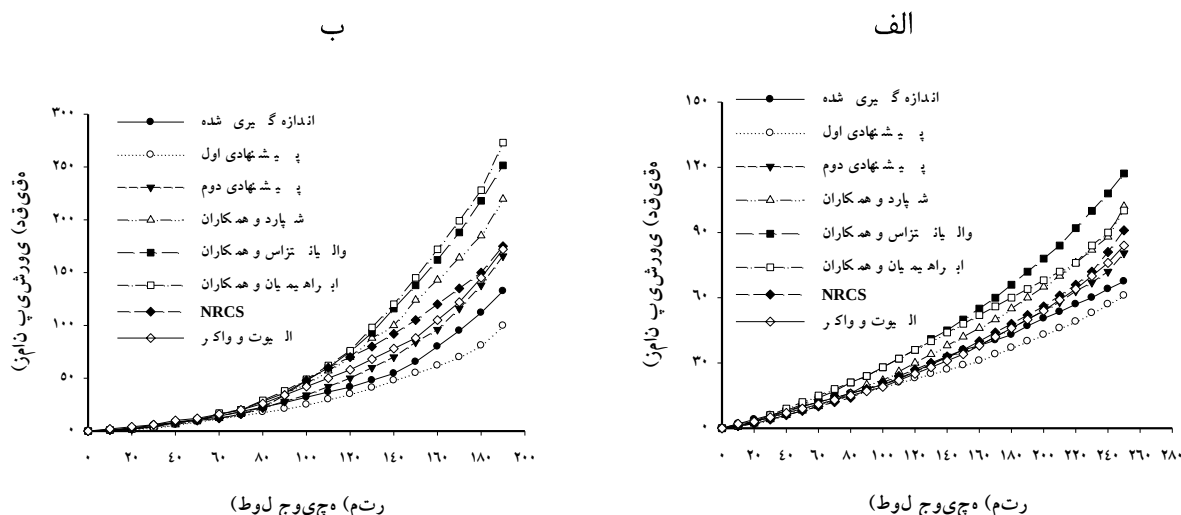
جدول ۵- مقادیر ضریب باقیمانده (CRM) در پیش‌بینی مراحل پیشروی و پسروی با استفاده از مدل هیدرودینامیک بسته SIRM0D

نام روش	سری ۱	سری ۲	سری ۳	سری ۴	سری ۵	میانگین
پیشنهادی اول	۰/۳۲**	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۲۵
	(۰/۰۱۲)*	(۰/۰۰۴)	(-۰/۰۰۶)	(۰/۰۰۹)	(۰/۰۱۷)	(۰/۰۱)
پیشنهادی دوم	-۰/۲۸	-۰/۰۹	-۰/۱۴	-۰/۱۹	-۰/۲۴	۰/۱۹
	(-۰/۰۱۳)	(-۰/۰۰۵)	(۰/۰۰۶)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۱۲)	(۰/۰۰۹)
شپارد و همکاران (۱۹۹۳)	-۰/۵۳	-۰/۲۵	-۰/۲۵	۰/۲۶	-۰/۴	۰/۳۴
	(۰/۰۱۲)	(-۰/۰۰۶)	(۰/۰۱۲)	(-۰/۰۱۱)	(۰/۰۲۲)	(۰/۰۱۳)
والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)	-۰/۷۳	-۰/۲۱	-۰/۲۸	-۰/۴۷	-۰/۵۴	۰/۴۵
	(-۰/۰۱۷)	(-۰/۰۰۶)	(-۰/۰۰۴)	(۰/۰۰۱)	(-۰/۰۱۳)	(۰/۰۰۹)
ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹)	۰/۴۶	-۰/۲۴	-۰/۲۵	-۰/۳۷	-۰/۴۱	۰/۳۳
	(۰/۰۳۵)	(-۰/۰۱)	(۰/۰۱۳)	(-۰/۰۱۵)	(۰/۰۱۹)	(۰/۰۱۸)
NRCS	۰/۴۲	-۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۶	-۰/۳۶	۰/۲۸
	(۰/۰۱۱)	(۰/۰۰۵)	(-۰/۰۰۶)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۰۹)	(۰/۰۰۸)
الیوت و واکر (۱۹۸۲)	-۰/۳۴	-۰/۱۲	-۰/۱۶	-۰/۲۴	-۰/۲۹	۰/۲۳
	(-۰/۰۱۷)	(-۰/۰۰۳)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۱)	(۰/۰۰۹)

**، * به ترتیب ضریب باقیمانده مربوط به مرحله پیشروی و پسروی هستند.

اول زمان پیشروی را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند که جدول ۵ نیز نشان‌دهنده این مطلب است. جدول ۱ بیانگر این است که همه روش‌ها بجز روش پیشنهادی اول، برای سری‌های دوم و پنجم مقدار نفوذ را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند. بنابراین این روش‌ها به دلیل بیش‌برآورد کردن حجم نفوذ، مقدار زمان پیشروی را نیز بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند، که شکل ۱ گویای این مطلب است.

نتایج به دست آمده از پیش‌بینی مرحله پیشروی به طور نمونه برای سری دوم و پنجم داده‌های آبیاری جویچه‌ای در شکل ۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در هر دو نمودار روش پیشنهادی دوم نسبت به سایر روش‌ها، دقت بیشتری در تخمین زمان پیشروی داشته است. روش والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) و ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) کمترین دقت را در تخمین زمان پیشروی دارند. همه روش‌ها بجز روش پیشنهادی



شکل ۱- مقایسه مرحله پیشروی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل هیدرودینامیک بسته SIRM برای داده سری دوم (الف) و سری پنجم (ب)

کمترین دقت در تخمین مرحله پیشروی بودند. مرحله پسروی تخمین زده شده، به پارامترهای معادله نفوذ چندان حساس نبود و روش‌های مختلف متوسط خطای استاندارد کمتر از ۴ درصد را داشتند. با توجه به این نتایج می‌توان گفت روش پیشنهادی دوم ارائه شده در این مقاله برای تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای مناسب است. اما در پژوهش‌های بعدی، این روش باید برای بافت‌های مختلف و همچنین طول فاروهای مختلف ارزیابی شده و با روش‌های دیگر مقایسه شود.

منابع

۱. ابراهیمیان ح.، قنبریان علویچه ب.، عباسی ف. و هورفر ح. ۱۳۸۹. ارائه روش دو نقطه‌ای جدید به منظور برآورد پارامترهای نفوذپذیری در آبیاری جویچه‌ای و نواری و مقایسه آن با سایر روش‌ها. مجله آب و خاک. ۲۴(۴): ۶۹۰-۶۹۸
۲. اجاقلو ح.، قبادی‌نیا م.، مجدزاده ب.، سهرابی ت. و عباسی ف. برآورد پارامترهای معادله نفوذ برای شبیه‌سازی جریان پیشروی آب در جویچه. دومین سمینار راهکارهای بهبود و اصلاح سامانه‌های آبیاری سطحی. ۲ خردادماه ۱۳۸۷. ۳۰۹-۳۲۰
۳. سهرابی ت. و پایدار ز. ۱۳۸۴. طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات دانشگاه تهران، ۴۰۶ ص.
۴. عباسی ف.، جلینی م.، طایفه رضایی ح. و شوشتری م.م. ۱۳۷۸. توسعه یک مدل ریاضی برای ارزیابی و طراحی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذپذیری خاک در آبیاری جویچه‌ای شامل روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، یک نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱)، دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) و NRCS (واکر و همکاران، ۲۰۰۶)، و دو روش دو نقطه‌ای جدید بر اساس معادله‌های کوستیاکف (روش پیشنهادی اول) و کوستیاکف-لوئیس (روش پیشنهادی دوم) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در برآورد میزان آب نفوذیافته به خاک روش پیشنهادی دوم دارای کمترین خطای نسبی (۷/۹۷ درصد) است. در پیش‌بینی مرحله پیشروی با استفاده از مدل هیدرودینامیک بسته SIRM و پارامترهای معادله نفوذ تخمین زده شده به روش‌های مختلف، روش پیشنهادی دوم با متوسط خطای استاندارد ۲۳/۲ درصد دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها بود و روش والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) با متوسط خطای استاندارد ۶۶/۵۸ درصد، دارای کمترین دقت در پیش‌بینی مرحله پیشروی بود. ارزیابی کارایی روش‌ها نشان داد که روش‌های پیشنهادی دوم و والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) به‌ترتیب با متوسط کارایی ۰/۷۹ و ۰/۷۰، بیشترین و کمترین دقت را در پیش‌بینی مرحله پیشروی داشتند. روش پیشنهادی دوم با متوسط ضریب باقیمانده ۰/۱۹ دارای بیشترین دقت و روش والیانتراس و همکاران (۲۰۰۱) با متوسط ضریب باقیمانده ۰/۴۵ دارای

- Technical Information Service, USDA, Washington, D.C. 129 p.
19. - Upadhyaya S. K. and Raghuwanshi N. S. 1999. Semiempirical infiltration equations for furrow irrigation systems. *Irrigation and Drainage*. 125(4):173-178.
 20. Valiantzas J. D. Aggelides S. and Sassalou A. 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*. 52:17-32.
 21. Vatankhah A. R. Ebrahimian H. and Bijankhan M. 2010. Discussion of Quick method for estimating furrow infiltration by Mailapalli D. R. Wallender W. W. Raghuwanshi N. S. and Singh R. *Irrigation and Drainage Engineering*. 136(1):73-75.
 22. Walker W. R. 2003. SIRMOD III – Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design. User's Guide and Technical Documentation. Utah State University, Logan, USA. 145 p.
 23. Walker W.R. 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Irrigation and Drainage Engineering*. 131(2):129-136.
 24. Walker W. R. Prestwich C. and Spofford T. 2006. Development of the revised USDA–NRCS intake families for surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 85:157-164.
 - سیستم‌های آبیاری سطحی. گزارش فنی، شماره ۱۲۲، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج. ۸۵ ص.
 5. Austin N. R. and Prendergast J. B. 1997. Use of kinematic wave theory to model irrigation on a cracking soil. *Irrigation Science*. 18:1-10.
 6. Benami A. and Ofen A. 1984. *Irrigation Engineering: Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation. Principles, Design and Agricultural Practices*. Irrigation Engineering Scientific Publication, IIIC Bet Dagan, Israel. 257 p.
 7. Ebrahimian H. Liaghat A. Ghanbarian-Alavijeh B. and Abbasi F. 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrigation Science*. 28:479-488.
 8. Elliott R. L. and Walker W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transaction ASAE*. 25:396-400.
 9. Holzapfel E. A. Jara J. Zuñiga C. Mariño M. A. Paredes J. and Billib M. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*. 68:19-32.
 10. Homaei M. Dirksen C. and Feddes R. A. 2002. Simulation of root water uptake, I: Non uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions, *Agricultural Water Management*. 57:89-109.
 11. Khatri K. L. and Smith R. J. 2005. Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. *Irrigation and Drainage*. 54:467-482.
 12. Kiefer F. W. 1965. Average depth of absorbed water in surface irrigation. Special publication. Department of Civil Engineering, Utah State University, Logan.
 13. League K. and Green R. E. 1999. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*. 7:51-73.
 14. McClymont D. J. and Smith R. J. 1996. Infiltration parameters from optimisation on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science*. 17(1):15-22.
 15. Ramezani Etedali H. Ebrahimian H. Abbasi F. and Liaghat A. 2011. Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 9(2): 641-649.
 16. Rodriguez J. A. Martos J. C. 2010. SIPAR_ID: freeware for surface irrigation parameter identification. *Environ Modell Softw*. 25(11):1487-1488.
 17. Shepard J. S. Wallender W. W. and Hopmans J. W. 1993. One method for estimating furrow infiltration. *Transaction ASAE*. 36(2):395-404.
 18. U.S. Department of Agriculture. 1984. National engineering handbook. Chap.5, Sec.15, National

