

مقایسه روش‌های دو نقطه‌ای و دو زمانی برای تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای گردشی

فاطمه سروش^{۱*}، بهروز مصطفی‌زاده فرد^۲، سید فرهاد موسوی^۳ و فریرز عباسی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۹)

چکیده

نفوذ، مهم‌ترین ویژگی در طراحی و مدیریت هر سامانه آبیاری سطحی است. از آنجایی که هیدرولیک جریان در جویچه‌های مارپیچی در مقایسه با جویچه‌های استاندارد متفاوت است، باید دقت روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ برای طراحی و مدیریت بهینه آبیاری جویچه‌ای گردشی ارزیابی شود. این پژوهش با هدف مقایسه دقت روش‌های دو نقطه‌ای الیوت و واکر و دو زمانی در تخمین پارامترهای معادله نفوذ آبیاری جویچه‌ای گردشی با استفاده از چهار سری داده مزرعه‌ای انجام شد. دقت توابع نفوذ برآورد شده با انجام شبیه‌سازی غیرماندگار جریان با استفاده از مدل کم-تغییر/کم جریان اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که منحنی‌های پیشروی پیش‌بینی شده به روش الیوت و واکر (با میانگین RMSE، ۰/۶۸ دقیقه) قابل مقایسه با روش دو زمانی (با میانگین RMSE، ۰/۶۶ دقیقه) بود. ضریب راندمان نش ساتکلیف هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش‌های دو زمانی و دو نقطه‌ای به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۵۰ بود که نشانگر قدرت پیش‌بینی بهتر روش دو زمانی است. علاوه بر این روش دو زمانی، کل حجم نفوذ را با خطای نسبی (۱/۵- درصد) کمتر از روش دو نقطه‌ای (۴۷/۲- درصد) پیش‌بینی می‌کند. بنابراین استفاده از داده‌های پس از پیشروی (مانند روش دو زمانی) برای برآورد پارامترهای تابع نفوذ، شبیه‌سازی جریان در جویچه‌های گردشی را بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، ارزیابی، شبیه‌سازی عددی، بیلان حجم پس-آبیاری

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۴. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fatemeh_soroush60@yahoo.com

مقدمه

آبیاری جویچه‌ای گردشی (آبیاری غلام گردشی)، شکل اصلاح شده آبیاری جویچه‌ای است که در ایران برای افزایش راندمان آبیاری در زمین‌های شیب‌دار به‌جای جویچه‌ای مستقیم استفاده می‌شود. استفاده از آبیاری جویچه‌ای گردشی سبب کاهش هزینه‌های تسطیح و مانع از فرسایش خاک زراعی می‌شود. در این روش آبیاری، زمان رسیدن آب به انتهای جویچه‌ها بیشتر از جویچه‌های استاندارد در همان مزرعه است. همچنین میزان رواناب خروجی از انتهای جویچه‌های گردشی کمتر از جویچه‌های استاندارد است (۱۰، ۱۱ و ۱۵).

نفوذ، مهم‌ترین فرایند هیدرولیکی هر سیستم آبیاری سطحی است که یکنواختی و راندمان آبیاری سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (۲۰). بنابراین ارزیابی، مدیریت، طراحی و شبیه‌سازی این روش آبیاری نیز مانند سایر روش‌های آبیاری سطحی به آگاهی از ویژگی‌های نفوذ وابسته است. مقدار نفوذ آب در خاک را می‌توان از معادلاتی مانند معادله گرین-امپت یا حل عددی معادله ریچاردز به‌دست آورد. این روش‌ها اثر بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت پیشین خاک و عمق آب روی خاک را در نظر می‌گیرند (۲۱). ولی مدل‌های فیزیکی نفوذ نمی‌توانند تغییرات ساختمان خاک که در نتیجه درز و شکاف، شخم، مواد آلی، تغییرات دمای خاک و خیس‌شدگی اولیه خاک به‌وجود می‌آید را پیش‌بینی کنند (۴). از این‌رو، استفاده از توابع تجربی نفوذ آب در خاک برای تحلیل سامانه‌های آبیاری سطحی برای اهداف عملی متداول شده است (۲ و ۱۷). روش‌های مختلفی در منابع برای تخمین پارامترهای معادلات نفوذ با استفاده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها، روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۵) است. این روش از لحاظ ریاضی آسان بوده و نیاز به داده‌های کمی دارد و برای محاسبه پارامترهای معادله نفوذ تنها به داده‌های فاز پیشروی جریان متکی است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از این روش در تخمین پارامترهای معادله نفوذ در بعضی شرایط اعتبار کمتری دارد (۲، ۶، ۷، ۸ و ۱۷). روش‌های مختلفی برای بهبود

تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسعه داده شده است. این روش‌ها علاوه بر داده‌های پیشروی از داده‌های سایر فازهای آبیاری برای تخمین نفوذ استفاده می‌کنند. استرلکف و همکاران (۱۸) برنامه EVALUE را توسعه و از داده‌های هیدروگراف‌های عمق و حجم ذخیره سطحی برای تخمین نفوذ استفاده کردند. کلمنز (۳) با استفاده از داده‌های پیشروی و پس‌روی یک روش پس-آبیاری برای تخمین نفوذ توسعه داد. گیلی و اسمیت (۶) از یک روش بهینه‌سازی و داده‌های پیشروی و هیدروگراف خروجی برای تخمین نفوذ استفاده کردند. واکر (۱۹) یک روش بهینه‌سازی چند مرحله‌ای برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف-لویس توسعه داد. بیشتر این روش‌ها پیچیده هستند و نیاز به مدل‌سازی عددی دارند. یکی از روش‌های آسان و سریع که از داده‌های پس از پیشروی برای تخمین نفوذ استفاده می‌کند، روش دو زمانی است که توسط باتیستا و همکاران (۲) ارائه شد. محاسبات روش دو زمانی شبیه به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر است و تنها این دو روش از لحاظ داده‌های مورد نیاز با هم متفاوت هستند. سپاسخواه و شعبانی پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف-لویس را برای جویچه‌های گردشی به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر به‌دست آوردند (۱۳). آنها پارامترهای معادله نفوذ برای جویچه‌های گردشی را با مقادیر متناظر در جویچه‌های استاندارد مقایسه کردند. لیکن نتایج آنها حاوی اطلاعاتی در مورد درستی پارامترهای برآورد شده توسط روش دو نقطه‌ای برای جویچه‌های گردشی نبود. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی و مقایسه دقت روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر و دو زمانی باتیستا و همکاران برای برآورد نفوذ در جویچه‌های گردشی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های مزرعه‌ای و پارامترهای ارزیابی

برای بررسی دقت روش‌های دو نقطه‌ای و دو زمانی برای آبیاری جویچه‌ای گردشی، چهار آزمایش آبیاری جویچه‌ای گردشی در پاییز سال ۱۳۸۹ در مزرعه آزمایشی دانشگاه صنعتی (۵۱/۲۳)

جدول ۱. داده‌های ورودی مدل جویچه‌ای

| گردشی چهار | گردشی سه | گردشی دو | گردشی یک | پارامتر |
|-----------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|
| SCL | SCL | SCL | SCL | بافت خاک |
| ۴۵ | ۴۵ | ۴۵ | ۴۵ | طول مزرعه (m) |
| ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ | فاصله بین جویچه‌ها (m) |
| ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۰۸۰ | ۰/۰۰۲۵ | ۰/۰۰۷۳ | شیب جویچه (m/m) |
| پارامترهای مقطع هندسی جویچه | | | | |
| ۱/۳۲ | ۱/۹۹ | ۱/۵۳ | ۱/۶۲ | C |
| ۰/۵۱۸ | ۰/۷۱۹ | ۰/۵۸۶ | ۰/۶۲۸ | M |
| ۶۰ | ۶۰ | ۷۵ | ۷۵ | زمان قطع جریان (min) |
| ۰/۰۵ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۴ | ضریب زبری |
| ۰/۷ | ۰/۷ | ۰/۹ | ۰/۹ | دبی ورودی ($L.S^{-1}$) |

$B = B^*$, $B^* = cy^m$ = عرض بالادست آب در جویچه، y = عمق جریان، c, m = ضریب و توان

یک معادله با یک مجهول کاهش داده است. این مدل بر دشواری‌های معمول در مدل‌های اینرسی- صفر و موج جنبشی فائق آمده و قادر است جریان در جویچه‌های با شیب‌های زیاد و پایین را با دقت زیاد شبیه‌سازی کند (۱۴).

روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۵)

این روش بر اساس فرض پیشروی توانی و استفاده از معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس استوار است:

$$Z = kt^a + f_0 \tau \quad (1)$$

$$x = pt^r \quad (2)$$

که در آنها، Z حجم نفوذ بر واحد طول مزرعه، f_0 سرعت نفوذ نهایی، τ فرصت زمان نفوذ، k, a پارامترهای تجربی معادله نفوذ و p, r پارامترهای معادله پیشروی هستند.

الیوت و واکر انتگرال لوئیس و میلنه (۹) را با جایگزینی معادلات (۱) و (۲) و استفاده از روابط اسکولایی (۱۲) به صورت زیر حل کردند:

$$V_Q(t) - V_Y(t) = V_Z(t) = x_A(t) \cdot \left[\sigma_{Z1}(a, r) kt_0^a + \sigma_{Zr}(r) f_0 \tau_0 \right] \quad (3)$$

که در آن، $V_Q(t)$ حجم جریان ورودی، $V_Y(t)$ حجم ذخیره

درجه شرقی و ۳۲/۳۲ درجه شمالی) انجام شد. این آزمایش‌ها از نظر دبی ورودی، شیب در جهت جریان و زمان قطع جریان متفاوت بودند. مزرعه آزمایشی دارای بافت لوم رسی شنی بود. آزمایش‌های گردش یک و سه در یک مزرعه با شیب ۲/۹ درصد انجام شدند. ایجاد جویچه‌های گردش سبب کاهش شیب جویچه در جهت جریان می‌شود. شیب واقعی جویچه‌های گردش با ترازبایی در مسیر جریان اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های گردش دو و چهار در مزرعه‌ای با شیب ۱/۱ درصد انجام شدند. آزمایش‌ها در جویچه‌هایی با طول واقعی ۴۵ متر انجام شدند. مقطع هندسی جویچه‌ها با استفاده از دستگاه مقطع سنج جویچه اندازه‌گیری و محاسبات مربوط به آن با استفاده از روش استرلکف و کلمنز (۱۶) انجام شد. جدول ۱ ویژگی‌های جویچه‌های گردش آزمایشی را نشان می‌دهد. اعتبار توابع نفوذ تخمین زده شده با دو روش مذکور با استفاده از شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در جویچه‌ها با استفاده از مدل کم- تغییر/کم جریان (۱۴) ارزیابی شد. مدل کم- تغییر/کم جریان (SC/SF) یک مدل آبیاری سطحی است که توسط سروش و همکاران توسعه داده شد (۱۴). این مدل با استفاده از مفهوم حجم بالایی، معادلات سنت- ونانت را به

$$V_Q(t_{co}) - V_Y(t_{co}) - V_{RO}(t_{co}) = V_Z(t_{co}) = L \cdot \left[\sigma_{Z1}(a, r) k t_{co}^a + \sigma_{Z2}(r) f_0 t_{co} \right] \quad (11)$$

که در آن، V_{RO} حجم رواناب است. روابط مربوط به فاکتورهای شکل ذخیره زیرسطحی σ_{Z1} و σ_{Z2} در مرحله ذخیره توسط اسکولایی و همکاران (۱۲) در سال ۱۹۹۵ ارائه شدند. این روابط توسط استرلکف و همکاران (۱۷) اصلاح شدند. روابط اصلاح شده به صورت زیر هستند:

$$\sigma_{Z1} = 1 + \sum_{i=1}^N \frac{(-(t_L/t))^i}{r+i} \prod_{j=0}^{i-1} \frac{a-j}{i-j} \quad (12)$$

$$\sigma_{Z2} = \left(1 - \frac{r(t_L/t)}{r+1} \right) \quad (13)$$

که در آنها، N تعداد جملات استفاده شده در بسط، i و j نمایه‌ها و Π حاصل ضرب i جمله است.

در رویکرد دو زمانی، از معادله بیلان حجم در زمان $t_{\delta L}$ (زمان پیشروی تا وسط مزرعه) صرف نظر کرده و سیستم معادلات بیلان حجم برای زمان t_L و t_{co} نوشته می‌شود. بنابراین دو معادله خطی با دو مجهول خواهیم داشت. ابتدا یک تخمین منطقی از a زده و سپس معادلات بیلان (۸) و (۱۱) برای محاسبه مقدار k و f_0 حل می‌شوند. لازم به ذکر است که همچنان بایستی زمان پیشروی آب به وسط مزرعه $t_{\delta L}$ را برای محاسبه توان معادله پیشروی، r ، ثبت کرد.

چندین آماره برای ارزیابی برازش توابع نفوذ تخمین زده شده محاسبه شدند. ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)، برای مقایسه منحنی‌های پیشروی و پسروری شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t'_i - t_i)^2}{N}} \quad (14)$$

که در آن، t'_i زمان پیشروی/پسروری پیش‌بینی شده توسط مدل جریان برای نقطه i ام، t_i زمان پیشروی/پسروری اندازه‌گیری شده برای نقطه i ام و N تعداد اندازه‌گیری‌ها است. مقدار ریشه متوسط مربعات خطا برای منحنی پیشروی با $RMSE_TA$ و برای منحنی پسروری با $RMSE_TR$ در جدول ۲ نمایش داده شده است. خطای نسبی در برآورد حجم آب نفوذ یافته با استفاده از آماره

سطحی، $V_Z(t)$ حجم نفوذ، T فرصت نفوذ در ابتدای مزرعه و σ_{Z1} ، σ_{Z2} فاکتورهای شکل ذخیره زیرسطحی هستند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\sigma_{Z1} = \frac{1+a+r(1-a)}{1+a+r(1+a)} \quad (4)$$

$$\sigma_{Z2} = \frac{1}{1+r} \quad (5)$$

الیوت و واکر فرض کردند که سرعت نهایی نفوذ با استفاده از دبی ماندگار ورودی (Q_0) و خروجی (Q_{RO}) به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$f_0 = \frac{Q_0 - Q_{RO}}{L} \quad (6)$$

در روش دو نقطه‌ای از دو نقطه میانی و انتهایی مرحله پیشروی برای برپایی دو معادله بیلان حجم به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$E_{\delta L} = \frac{V_Q(t_{\delta L})}{\delta L} - \frac{V_Y(t_{\delta L})}{\delta L} - \sigma_{Z2}(r) f_0 t_{\delta L} = \sigma_{Z1}(a, r) k t_{\delta L}^a \quad (7)$$

$$E_L = \frac{V_Q(t_L)}{L} - \frac{V_Y(t_L)}{L} - \sigma_{Z2}(r) f_0 t_L = \sigma_{Z1}(a, r) k t_L^a \quad (8)$$

در نهایت مقدار a از تقسیم رابطه (۸) بر (۷) به دست می‌آید:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{E_L}{E_{\delta L}}\right)}{\ln\left(\frac{t_L}{t_{\delta L}}\right)} \quad (9)$$

سپس k از معادله (۸) به دست می‌آید. مقدار ذخیره سطحی از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$V_Y = \sigma_y \cdot A_0 \cdot x(t) \quad (10)$$

که در آن، A_0 سطح مقطع نرمال جریان در بالادست مزرعه و σ_y فاکتور شکل ذخیره سطحی است که الیوت و واکر مقدار متوسط ۰/۷۷ را برای آن پیشنهاد کرده‌اند.

روش دو زمانی (۲)

در این روش معادله بیلان حجم برای انتهای مزرعه و در زمان قطع جریان (t_{co})، پس از اتمام مرحله پیشروی نوشته می‌شود. معادله بیلان حجم برای زمان قطع جریان به صورت زیر است:

جدول ۲. پارامترهای معادله نفوذ و پارامترهای نیکویی برازش مربوط به هر یک از روش‌ها برای مزارع آزمایشی

| گردشی چهار | | گردشی سه | | گردشی دو | | گردشی یک | | پارامتر |
|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|--|
| دو نقطه‌ای | دو زمانی | دو نقطه‌ای | دو زمانی | دو نقطه‌ای | دو زمانی | دو نقطه‌ای | دو زمانی | |
| ۰/۵۰ | ۰/۱۰ | ۰/۴۰ | ۰/۲۶ | ۰/۵ | ۰/۱۸ | ۰/۴۰ | ۰/۳۰ | a (-) |
| ۰/۰۰۰۷۰ | ۰/۰۰۳۴۲ | ۰/۰۰۲۸۱ | ۰/۰۰۴۶۳ | ۰/۰۰۱۵۳ | ۰/۰۰۸۵۲ | ۰/۰۰۳۱۶ | ۰/۰۰۸۴۴ | k (m ^۳ min ^{-a} m ^{-۱}) |
| ۰/۰۰۰۵۷۴ | ۰/۰۰۰۲۷۴ | ۰/۰۰۰۴۸۵ | ۰/۰۰۰۳۴۹ | ۰/۰۰۰۶۶۱ | - | ۰/۰۰۰۵۹۳ | - | f ₀ (m ^۳ . min ^{-۱} . m ^{-۱}) |
| ۱/۱۳ | ۰/۵۶ | ۰/۳۰ | ۰/۶۰ | ۰/۶۹ | ۰/۳۳ | ۰/۵۳ | ۱/۲۴ | RMSE_TA (min) |
| ۲/۴۴ | ۱/۷۸ | ۴/۰۰ | ۳/۷۳ | ۲/۱۳ | ۲/۸۳ | ۲/۱۳ | ۳/۲۹ | RMSE_TR (min) |
| -۰/۵ | -۴۴/۲ | -۱/۷ | -۲۲/۶ | -۰/۳۳ | -۴۹/۸ | -۳/۳ | -۷۲/۰ | RE_VZ (%) |
| ۰/۹۵ | ۰/۵۳ | ۰/۹۱ | ۰/۶۰ | ۰/۸۵ | ۰/۴۰ | ۰/۸۵ | ۰/۴۵ | NSE |

توصیه باتیستا و همکاران (۲) مقدار سرعت ثابت نفوذ (f₀) صفر در نظر گرفته شد.

خطای نسبی (RE) برآورد شد:

$$RE = \frac{Vz_p - Vz_m}{Vz_m} \times 100 \quad (15)$$

که در آن، Vz_p و Vz_m به ترتیب حجم آب نفوذ یافته شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است.

دقت روش‌های دو نقطه‌ای و دو زمانی در برآورد هیدروگراف خروجی با استفاده از راندمان نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe efficiency) مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q'_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q'_i - \bar{Q})^2} \quad (16)$$

که در آن، Q_i و Q'_i به ترتیب مقدار دبی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای آمین نقطه هیدروگراف خروجی، \bar{Q} متوسط اندازه‌گیری‌ها و N تعداد اندازه‌گیری‌ها است. مقدار این شاخص بین صفر تا یک است. عدد یک انطباق کامل هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

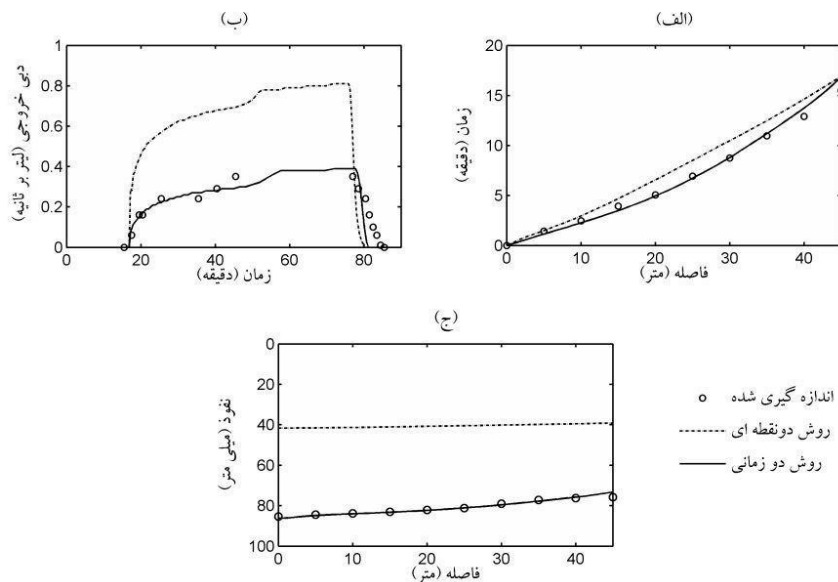
نتایج و بحث

جدول (۲) مقدار پارامترهای معادلات نفوذ حاصل از روش دو نقطه‌ای و دو زمانی و نتایج سنجش اعتبار هر یک از این روش‌ها را نشان می‌دهد. مقدار توان معادله نفوذ حاصل از روش دو نقطه‌ای با استفاده از روش دو نقطه‌ای معمول برای آزمایش‌های گردشی یک و دو عددی منفی بود. برای رفع این مشکل بنابر

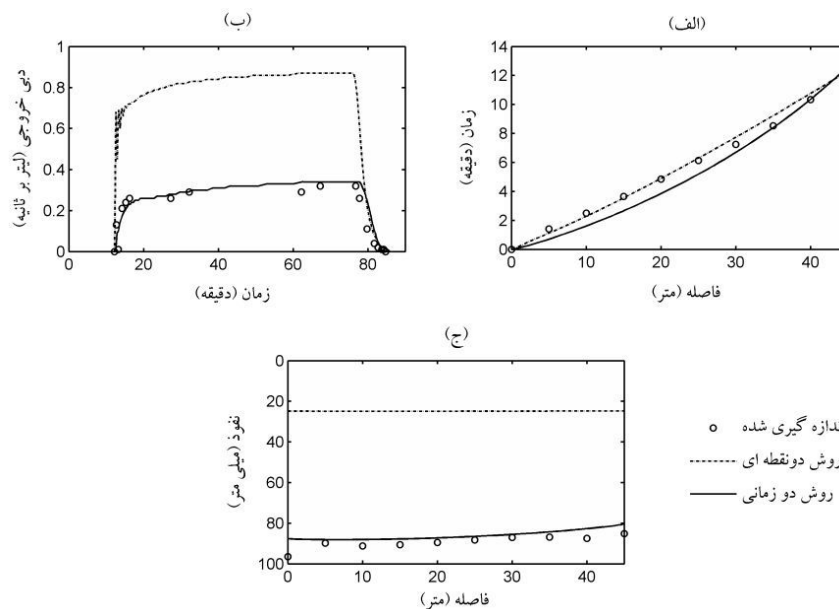
آزمایش جویچه‌ای گردشی یک

نتایج نشان داد که منحنی‌های پیشروی شبیه‌سازی شده با مدل کم-تغییر/کم جریان و روش‌های دو نقطه‌ای و دو زمانی در تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده بودند (شکل ۱-الف). مقدار خطای RMSE منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (۱/۲۴ دقیقه) بیشتر از روش دو زمانی (۰/۵۳ دقیقه) است. علاوه بر این میانگین مربعات خطای منحنی پسروی شبیه‌سازی شده با روش دوزمانی (۲/۱۳ دقیقه) کمتر از مقدار متناظر این خطا با روش دو نقطه‌ای (۳/۲۹ دقیقه) است (جدول ۲). لیکن، روش دو زمانی با دقت بهتری نسبت به روش دو نقطه‌ای توانست هیدروگراف خروجی آزمایش گردشی یک را شبیه‌سازی کند (شکل ۱-ب). به طوری که مقدار شاخص NSE برای هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای ۰/۴۵ و برای روش دوزمانی ۰/۸۵ بود (جدول ۲).

باتیستا و همکاران (۲) بیان کردند که روش دو نقطه‌ای می‌تواند در جویچه‌های انتها باز با نسبت پیشروی بزرگ (نسبت زمان قطع به زمان پیشروی آب به انتهای جویچه) نتایج بسیار نادرستی را ایجاد کند. آنها ادعا کردند که داده‌های رواناب



شکل ۱. مقایسه الف) منحنی پیشروی، ب) هیدروگراف خروجی و ج) توزیع نفوذ اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای آزمایش گردشی یک

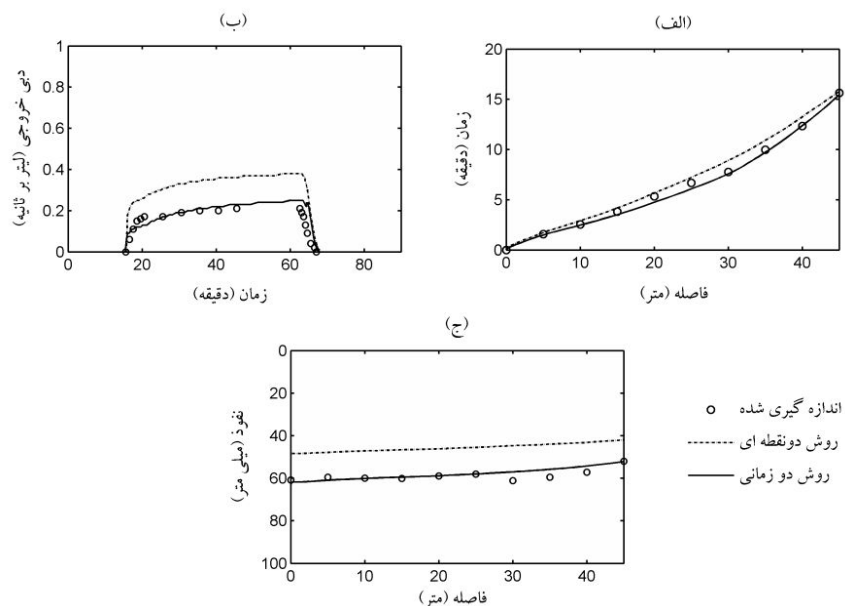


شکل ۲. مقایسه الف) منحنی پیشروی، ب) هیدروگراف خروجی و ج) توزیع نفوذ اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای آزمایش گردشی دو

آزمایش جویچه‌ای گردشی دو

نتایج نشان می‌دهد که روش دو نقطه‌ای بهتر از روش دو زمانی توانست فاز پیشروی را برآورد کند، اگرچه دقت روش دو زمانی نیز در برآورد فاز پیشروی قابل قبول بود (شکل ۲-الف). مقدار خطای RMSE منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده با روش دو

حاوی اطلاعات حیاتی برای برآورد مسأله و مطمئن کردن نتایج است. در این آزمایش زمان رسیدن آب به انتهای جویچه‌های گردشی (۱۵/۵ دقیقه)، زمان قطع جریان (۷۵ دقیقه) و در نتیجه نسبت پیشروی ۴/۸ بود. با توجه به بزرگ بودن نسبت پیشروی در این آزمایش نتایج دور از انتظار نیست.



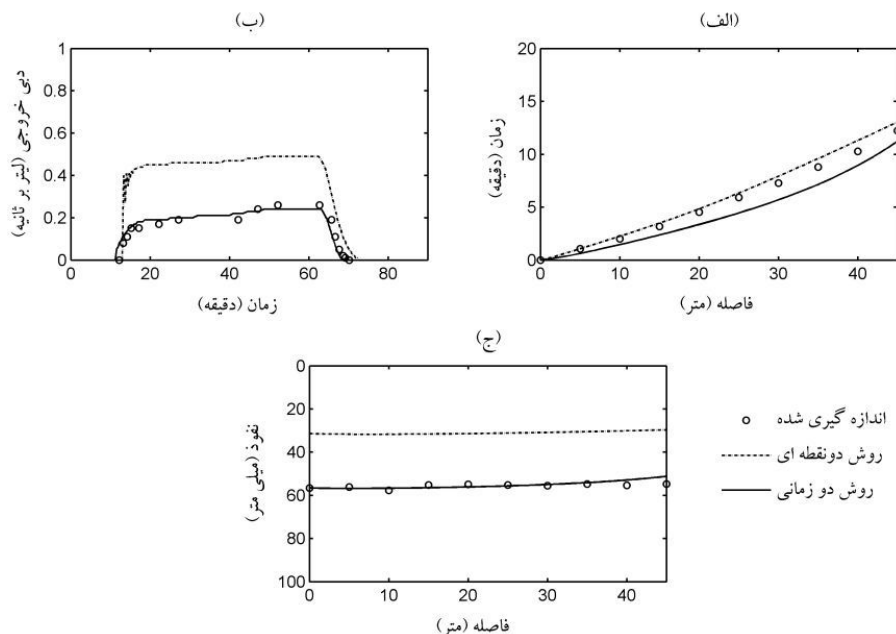
شکل ۳. مقایسه الف) منحنی پیشروی، ب) هیدروگراف خروجی و ج) توزیع نفوذ اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای آزمایش گردشی سه

نسبت زمان پیشروی (۶ نتایج نادرست در برآورد هیدروگراف خروجی مورد انتظار است (۲). با توجه به اینکه در روش دو زمانی از داده‌های زمان قطع جریان در معادله بیلان استفاده می‌شود، این روش رواناب و نفوذ پس از پایان مرحله پیشروی را با دقت بهتری برآورد می‌کند.

آزمایش جویچه‌ای گردشی سه

شکل ۳- الف نشان می‌دهد منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای و دو زمانی را در مقایسه با زمان‌های پیشروی قرائت شده در مزرعه نشان می‌دهد. مقدار RMSE منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (۰/۶ دقیقه) بیشتر از روش دو زمانی (۰/۳ دقیقه) است در حالی که مقدار این خطا برای منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (۳/۳۳ دقیقه) کمتر از روش دو زمانی (۴ دقیقه) بود (جدول ۲). شکل ۳- ب نشان می‌دهد که روش دو نقطه‌ای هیدروگراف خروجی برای جویچه گردشی سه را با دقت کمتری نسبت به روش دو زمانی برآورد نموده است، اگر چه تخمین این روش برای آزمایش گردشی سه نسبت به آزمایشات گردشی یک و دو بهبود

نقطه‌ای (۰/۳۳ دقیقه) کمتر از روش دو زمانی (۰/۶۶ دقیقه) است. مقدار خطا RMSE برای منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (۲/۸۳ دقیقه) بیشتر از روش دو زمانی (۲/۱۳ دقیقه) بود، لکن اختلاف آنها قابل توجه نبود (جدول ۲). بررسی هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای نشان داد که روش دو زمانی با دقت بهتری نسبت به روش دو نقطه‌ای توانست هیدروگراف خروجی آزمایش گردشی دو را شبیه‌سازی کند (شکل ۲- ب). به طوری که مقدار شاخص NSE برای هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (۰/۴) حدود نصف مقدار این شاخص برای روش دو زمانی (۰/۸۵) بود (جدول ۲). همچنین دقت تخمین دو زمانی توزیع نفوذ برای آزمایش جویچه‌ای گردشی دو خوب بود در حالی که اختلاف توزیع نفوذ شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای با نفوذ اندازه‌گیری شده قابل توجه بود (شکل ۲- ج). علاوه بر این جدول (۲) نشان می‌دهد که خطای نسبی روش دو نقطه‌ای (۰/۴۹/۸-) در برآورد حجم نفوذ بسیار بیشتر از روش دو زمانی (۰/۳۳-) است. در آزمایش گردشی دو، زمان رسیدن آب به انتهای جویچه ۱۲/۵ دقیقه و زمان قطع جریان ۷۵ دقیقه بود. بنابراین با توجه به نسبت زمان پیشروی بالا



شکل ۴. مقایسه الف) منحنی پیشروی، ب) هیدروگراف خروجی و ج) توزیع نفوذ اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای آزمایش گردش چهار

یافته است. به‌هرحال، همچنان مقدار شاخص NSE آزمایش گردش سه برای هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (۰/۶) کمتر از روش دو زمانی (۰/۹۱) است (جدول ۲). علاوه بر این روش دو زمانی توزیع عمق نفوذ برای آزمایش گردش سه را بهتر از روش دو نقطه‌ای برآورد کرد (شکل ۳-۲). به‌طوری که خطای نسبی روش دو نقطه‌ای در برآورد حجم نفوذ (۲۲/۶-) بیشتر از روش دو زمانی (۱/۷-) است (جدول ۲). زمان رسیدن آب به انتهای این جویچه گردش ۱۵/۶ دقیقه، زمان قطع جریان ۶۰ دقیقه و نسبت زمان پیشروی ۳/۸ بود. با توجه به بالا بودن نسبت زمان پیشروی تخمین معادله نفوذ به‌دست آمده از روش دو نقطه‌ای فراتر از زمان ۱۵/۶ دقیقه قابل اطمینان نیست (۲)، لکن از آنجایی که نسبت زمان پیشروی نسبت به دو آزمایش قبلی کاهش یافته است، خطا در تخمین رواناب و نفوذ کاهش یافته است.

آزمایش جویچه‌ای گردش چهار

شکل ۴- الف نشان می‌دهد منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده به دو روش دو نقطه‌ای و دو زمانی را نشان می‌دهد. مقدار خطای

RMSE منحنی‌های پیشروی و پسروی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای (به ترتیب ۰/۵۶ و ۱/۷۸ دقیقه) کمتر از روش دو زمانی (به ترتیب ۱/۱۳ و ۲/۴۴ دقیقه) است، اگرچه اختلاف این دو روش در تخمین فاز پیشروی و پسروی ناچیز است (جدول ۲). ولی روش دو زمانی با دقت بهتری نسبت به روش دو نقطه‌ای توانست هیدروگراف خروجی آزمایش گردش چهار را شبیه‌سازی کند (شکل ۴-ب)، به‌طوری که مقدار شاخص NSE برای هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش زمانی (۰/۹۵) بیشتر از مقدار این شاخص برای روش دو زمانی (۰/۵۳) بود (جدول ۲). علاوه بر این شکل ۴-ج نشان می‌دهد که روش دو نقطه‌ای توزیع نفوذ را در آزمایش جویچه‌ای گردش چهار را با دقتی کمتر از روش دو زمانی پیش‌بینی کرد. خطای نسبی روش دو زمانی در تخمین حجم نفوذ (۰/۵-) کمتر از روش دو نقطه‌ای (۴۴/۲-) بود (جدول ۲). در آزمایش جویچه‌ای ۴ زمان رسیدن آب به انتهای جویچه ۱۲/۲ دقیقه، زمان قطع جریان ۶۰ دقیقه و نسبت زمان پیشروی ۴/۹ بود. بنابراین خطا در تخمین رواناب و نفوذ قابل توجه بود.

به‌طورکلی نتایج به‌دست آمده در مورد چهار آزمایش

جویچه‌ها مناسب نیست و بایستی روش‌هایی مانند روش دو زمانی که از داده‌های بیشتری برای تخمین پارامتر در این جویچه‌ها به کار رود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه پارامترهای معادله نفوذ برای آبیاری جویچه‌ای گردشی با استفاده از دو روش تخمین پارامتر با داده‌های محدود که یکی تنها مبتنی بر داده‌های فاز پیشروی (دو نقطه‌ای الیوت و واکر) است و دیگری (روش دو زمانی) که علاوه بر داده‌های فاز پیشروی، از داده‌های مربوط به زمان قطع جریان نیز بهره می‌گیرد، برآورد شد. برای ارزیابی روش‌های مذکور، معادلات نفوذ به‌دست آمده به‌عنوان ورودی به مدل ریاضی SC/SF وارد شد و فازهای مختلف جریان شبیه‌سازی شد. نتایج مقایسه پارامترهای جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با معادلات نفوذ حاصل از دو روش نشان داد که روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر با دقت خوب (با میانگین RMSE ۰/۶۸ دقیقه) و نزدیک به روش دو زمانی (با میانگین RMSE ۰/۶۶ دقیقه) فاز پیشروی، آزمایش‌های جویچه‌ای گردشی را برآورد کرد. لکن اختلاف این دو روش در برآورد هیدروگراف خروجی قابل ملاحظه بود، به‌طوری که متوسط شاخص NSE هیدروگراف خروجی شبیه‌سازی شده با روش دو نقطه‌ای ۰/۵۰ و متوسط این شاخص برای روش دو زمانی ۰/۸۹ بود. علاوه بر این خطای نسبی روش دو نقطه‌ای در شبیه‌سازی حجم نفوذ در جویچه‌های گردشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از روش دو زمانی بود. علت آن است که استفاده از مدل‌های بیلان حجمی که مبتنی بر استفاده از داده‌های محدود باشند، در تخمین نفوذ منجر به اشتباهات سیستماتیکی در تخمین نفوذ می‌شود که به‌خوبی توسط استفاده‌کنندگان مدل‌های بیلان حجم شناخته نشده است (۱). استفاده از داده‌های جریان پس از زمان پیشروی به بهبود تخمین‌ها کمک خواهد کرد. بنابراین استفاده از روش دو زمانی به‌عنوان یک روش سریع و دقیق برای تخمین پارامترهای نفوذ در جویچه‌های گردشی توصیه می‌شود.

جویچه‌ای گردشی نشان داد که تخمین نفوذ به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر سبب بیش‌برآورد رواناب شبیه‌سازی شده و در نتیجه شبیه‌سازی کمتر از مقدار واقعی توزیع و حجم نفوذ شد. این درحالی است که شبیه‌سازی آزمایشات گردشی مذکور با روش دو زمانی که یک روش پس آبیاری تخمین نفوذ است، منجر به برآورد مناسبی از هیدروگراف خروجی و توزیع نفوذ در طول جویچه شد. تحقیقات پیشین (۷ و ۸) نیز نشان دادند که توابع نفوذ برآورد شده به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر می‌توانند، زمان‌های پیشروی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند، لکن در پیش‌بینی رواناب و در نتیجه نفوذ، به‌خصوص زمانی که زمان قطع جریان نسبت به زمان پیشروی آب به انتهای مزرعه بزرگ باشد، از دقت کمتری برخوردار است. این مشکل تنها مربوط به روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر بوده بلکه تمام روش‌های تخمین پارامتری که مبتنی بر داده‌های پیشروی باشند، اتفاق می‌افتد (۶). نتایج ما در توافق با تحقیقات پیشین بود و روش دو نقطه‌ای در برآورد رواناب و نفوذ جویچه‌های گردشی توفیقی نداشت، لکن در شبیه‌سازی منحنی پیشروی به خوبی روش دو زمانی و حتی گاه از آن بهتر عمل کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که منحنی پسروی شبیه‌سازی شده با روش دو زمانی و دو نقطه‌ای هر دو با دقت قابل قبولی پسروی اندازه‌گیری شده در مزرعه را برآورد کردند. واکر (۱۹) بیان کرد که شبیه‌سازی منحنی پسروی تابعی از سرعت نفوذ نهایی (f_0) و ضریب زبری مانینگ (n) است، مقدار ضریب زبری ورودی به مدل SC/SF برای دو روش تخمین نفوذ یکی در نظر رفته شد بنابراین تنها تفاوت در سرعت نفوذ نهایی موجب تفاوت در شبیه‌سازی منحنی پسروی شده است. علاوه بر این باتیستا و همکاران در سال ۲۰۰۹ گزارش کرده‌اند که وجود غیریکنواختی در طول جویچه، دقت نتایج روش دو نقطه‌ای در تخمین پارامترهای معادله نفوذ را کاهش خواهد داد (۲). جویچه‌های گردشی مارپیچی شکل هستند، بنابراین با توجه به مسیر مارپیچی جویچه‌ها، پیشروی در جویچه‌ها به‌صورت غیر یکنواخت صورت می‌گیرد. از این‌رو روش دو نقطه‌ای برای این

منابع مورد استفاده

1. Bautista, E. and J. L. Schlegel. 2017. A flexible system for estimation of infiltration and hydraulic resistance parameters in surface irrigation. *Transactions of the ASABE* 60(4): 1223-1234.
2. Bautista, E., A. J. Clemmens and T. S. Strelkoff. 2009. Structured application of the two-point method for the estimation of infiltration parameters in surface irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 135(5): 566-578.
3. Clemmens, A. J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agricultural Water Management* 3: 251-267.
4. Clemmens, A. J. and E. Bautista. 2009. Toward physically based estimation of surface irrigation infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 135(5): 588-596.
5. Elliott, R. L. and W. R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE* 25(2): 396-400.
6. Gillies, M. H. and R. J. Smith. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science* 24: 25-35.
7. Hanson, B. R., T. L. Prichard and H. Schulbach. 1993. Estimating furrow infiltration. *Agricultural Water Management* 24(4): 281-298.
8. Khatri, K. L. and R. J. Smith. 2005. Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. *Irrigation and Drainage* 54(4): 467-482.
9. Lewis, M. R. and W. E. Milne. 1938. Analysis of border irrigation. *Agricultural Engineering* 19(6): 267-272.
10. Mostafazadeh-Fard, B. and B. Moravejalahkami. 2006. The performance of Gholam-gardeshi furrow irrigation. *International Journal of Agriculture and Biology* 8(5): 698-702.
11. Mostafazadeh-Fard, B., R. Kavei-Deylami, S. H. Saghalian-Nejad and A. Jalalian. 2009. The comparison of advance and erosion of meandering furrow irrigation with standard furrow irrigation under varying furrow inflow rates. *Irrigation and Drainage Systems* 23: 181-190.
12. Scaloppi, E. J., G. P. Merkeley and L. S. Willardson. 1995. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(1): 57-70.
13. Sepaskhah, A. R. and M. K. Shaabani. 2007. Infiltration and hydraulic behavior of an agatiform furrow in heavy texture soils of Iran. *Biosystems Engineering* 98(2): 248-256.
14. Soroush, F., J. D. Fenton, B. Mostafazadeh-Fard, S. F. Mousavi and F. Abbasi. 2013. Simulation of furrow irrigation using the Slow-change/slow-flow equation. *Agricultural Water Management* 116(1): 160-174.
15. Soroush, F., B. Mostafazadeh-Fard, S. F. Mousavi and F. Abbasi. 2012. Solute distribution uniformity and fertilizer losses under meandering and standard furrow irrigation methods. *Australian Journal of Crop Science* 6(5): 884-890.
16. Strelkoff, T. S. and A. J. Clemmens. 2000. Approximating wetted perimeter in power-law cross section. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126 (2): 98-109.
17. Strelkoff, T. S., A. J. Clemmens and E. Bautista. 2009. Estimation of soil and crop hydraulic properties. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135(5): 537-555.
18. Strelkoff, T. S., A. J. Clemmens, M. El-Ansary and M. Awad. 1999. Surface-irrigation evaluation models: Application to level basins in Egypt. *Transactions of the ASAE* 42(4): 1027-1036.
19. Walker, W. R. 2005. Multi-level calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(2): 129-136.
20. Walker, W. R., C. Prestwich and T. Spofford. 2006. Development of the revised USDA-NRCS intake families for surface irrigation. *Agricultural Water Management* 85: 157 - 164
21. Zerihun, D., A. Furman, A. W. Warrick and C. A. Sanchez. 2005. Coupled surface-subsurface flow model for improved basin irrigation management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(2): 111-128.

Comparison of Two-point and Two-Time Methods for Estimating the Infiltration Parameters in Meandering Furrow Irrigation

F. Soroush^{1*}, B. Mostafazadeh-Fard², S. F. Mousavi³ and F. Abbasi⁴

(Received: December 19-2016; Accepted: June 30-2018)

Abstract

Infiltration is the most important characteristic in the design and management of any surface irrigation system. Since the hydraulic of flow in meandering furrows is different from the standard furrows, the accuracy of infiltration function parameter estimation methods should be examined for the optimal design and management of meandering furrow irrigation. The main objective of this study was to compare Elliot and Walker's two-point and two-time methods for estimating the empirical infiltration function parameters of meandering furrow irrigation using four sets of field data. The estimated infiltration functions, as obtained by the two methods, were validated by performing the unsteady flow simulations and using the Slow-change/slow-flow (SC/SF) model. The results showed that Elliot and Walker prediction of the advance trajectories (with a mean RMSE of 0.68 minutes) was comparable to the two-time method (with an average RMSE of 0.66 min). The Nash–Sutcliffe efficiency coefficient for the simulated outflow hydrograph by the two-time and two-point methods was 0.89 and 0.50, respectively, indicating the excellent predictive power of the two-times method. In addition, the two-time method predicted the total volume of infiltration with the less relative error (-1.5%), in comparison to the two-point method (-47.2%). Therefore, the use of post-advance data (such as a two-time method) for infiltration function parameters estimation improves the flow simulation in the meandering furrows.

Keywords: Surface irrigation, Evaluation, Numerical simulation, Post-irrigation volume balance

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3. Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

4. Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran.

*: Corresponding Author, Email: fatemeh_soroush60@yahoo.com