مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۵۴-۴۳

ارزیابی و مقایسهٔ روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای نفوذ درآبیاری جویچه‌ای

پیام کمالی[۱]، حامد ابراهیمیان*[۲]، وحیدرضا وردی‌نژاد[۳]

۱. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه ارومیه

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۱۹

چکیده

پارامترهای معادلات نفوذ، در ارزیابی و طراحی سیستم‌های آبیاری نقش اساسی دارند و به‌منظور افزایش بازده آبیاری ضروری است که با دقت فراوان تخمین زده شوند. در این مطالعه، دو روش تخمین پارامترهای نفوذ آبیاری جویچه‌ای، ارزیابی و با هم مقایسه شدند که عبارت‌اند از: بهینه‌سازی چندسطحی براساس استفاده از داده‌های پیشروی، پسروی و رواناب و مدل IPARM براساس استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب. مطالعهٔ مزرعه‌ای به‌منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در سال ۱۳۹۳ در کرج انجام گردید. چهارده واقعهٔ آبیاری با دو دبی ورودی ۰/۲۹ و ۰/۴۴ لیتر در ثانیه در طول فصل رشد ذرت انجام شد. براساس ضرایب تخمینی معادلهٔ نفوذ کاستیاکف-لوئیس، متوسط خطای نسبی برآورد حجم آبِ نفوذیافتهٔ مدل IPARM و بهینه‌سازی چندسطحی، به‌ترتیب ۸/۱ و ۸/۵ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که هر دو روش در تخمین حجم آب نفوذیافته برای همهٔ سری داده‌ها کم برآورد داشتند. روش IPARM کمتر از روش بهینه‌سازی چندسطحی خطا داشت و در مجموع، هر دو روش برای برآورد پارامترهای نفوذ، عملکرد قابل قبولی در آبیاری جویچه‌ای داشتند.

کلیدواژه‌ها: آبیاری سطحی، بیلان حجمی، خطای نسبی، ضرایب نفوذ، معادلهٔ کاستیاکف- لوئیس.

* نویسنده مسئول Email: ebrahimian@ut.ac.ir

مقدمه

نفوذ آب در خاک از عوامل مهم در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است. نفوذپذیری از سطح خاک، فرایندی پیچیده است و به خواص فیزیکی و شیمیایی آب و خاک بستگی دارد. نفوذ آب در خاک با توجه به زمان و مکان متغیر است و ممکن است از نقطه‌ای در مزرعه به نقطه‌ای دیگر و از زمانی به زمان دیگر، چندین برابر تغییر کند (۱). به‌منظور ارزیابی، طراحی یا شبیه‌سازی سیستم آبیاری سطحی، در مرحلهٔ اول به تعیین پارامترهای معادلهٔ نفوذ نیاز است. با تخمین دقیق پارامترهای معادلهٔ نفوذ، دستیابی به بازده مطلوب طراحی امکان‌پذیر می‌شود.

در مطالعه‌ای، شش روش مختلف برآورد پارامترهای نفوذ ارزیابی شد که عبارت‌اند از: روش دونقطه‌ای، مدل INFILT، روش آپادهیایا و راگوانشی، روش یک‌نقطه‌ای والیانتزاس و همکاران، روش یک‌نقطه‌ای شپارد و همکاران و روش تابع نفوذ خطی. طبق نتایج این مطالعه، مدل INFILT دقیق‌ترین و مطمئن‌ترین روش معرفی شد (۸). در مطالعهٔ دیگری روش بهینه‌سازی چندسطحی برای تخمین پارامترهای نفوذ در شرایط هیدروگراف‌های ورودی مختلف در آبیاری جویچه‌ای استفاده شد. براساس نتایج، روش بهینه‌سازی چندسطحی بهتر از روش دونقطه‌ای الیوت و واکر پارامترهای نفوذ را برآورد می‌کند (۱۲). ارزیابی گسترده‌ای از روش‌های مختلف برآورد پارامترهای نفوذ در جویچه و نوارهای آبیاری نشان داد که روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۹) و روش دونقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) نتایج بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها دارند (۴). مطالعهٔ دیگری، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، به مقایسهٔ روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و موازنهٔ حجم به‌منظور برآورد پارامترهای معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس و ضریب زبری برای جریان ثابت و کاهشی در آبیاری جویچه‌ای پرداخت. برای پیش‌بینی حجم کل رواناب و نفوذ، خطای نسبی در روش بهینه‌سازی چندسطحی، کمتر از روش موازنهٔ حجم بود (۱۱). در تحقیقی از دو مدل IPARM و INFILT و روش دونقطه‌ای الیوت و واکر برای برآورد پارامترهای معادلهٔ نفوذ کاستیاکف-لوئیس برای آبیاری جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغیر استفاده شد. نتایج نشان داد مدل IPARM، دقیق‌ترین و مطمئن‌ترین عملکرد را در مقایسه با روش‌های دیگر دارد (۳).

روش‌های اصلی تخمین نفوذ، مبتنی بر معادلهٔ بیلان حجمی براساس داده‌های مرحلهٔ پیشروی ایجاد شده‌اند. روش‌های مبتنی بر معادلهٔ بیلان حجم، این ضعف را دارند که فقط از داده‌های مرحلهٔ پیشروی استفاده می‌کنند؛ بنابراین، بخشی از فرایند جریان در تخمین پارامترها نادیده گرفته می‌شود. برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای نفوذ، به‌جای مرحلهٔ پیشروی، باید از اطلاعات کل مراحل آبیاری استفاده کرد. به همین دلیل، معادلهٔ بیلان حجمی مبتنی بر داده‌های پیشروی و رواناب (مدل IPARM) برای تخمین پارامترهای معادلهٔ نفوذ کاستیاکف-لوئیس ابداع شد (۶). همچنین روش بهینه‌سازی چندسطحی برای تخمین پارامترهای معادلهٔ نفوذ و ضریب زبری براساس داده‌های مراحل پیشروی، پسروی و رواناب و مدل ریاضی آبیاری سطحی بر مبنای معادلات سنت- ونانت ارائه شد (۱۶). در این مطالعه دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARMدر تخمین پارامترهای معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس ارزیابی و مقایسه شدند تا دقت هریک از آن‌ها در آبیاری جویچه‌ای تعیین شود.

مواد و روش‌ها

معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس برای گسترهٔ وسیعی از خاک‌ها مناسب است و بیشترین کاربرد را در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی دارد (۷):

$$Z = kt^a + f_0 t \qquad (1)$$

در این رابطه، Z حجم نفوذ تجمعی در واحد طول (m^3/m)، f_0 سرعت نفوذ نهایی ($m^3/m/min$)، t زمان (min) و a (–) و k ($m^3/m/min^a$) پارامترهای تجربی معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس هستند. متغیرها به صورت طول در واحد عرض، به عمق تبدیل می‌شوند. روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM قادرند پارامترهای معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس را براساس داده‌های مراحل مختلف آبیاری سطحی برآورد کنند.

بهینه‌سازی چندسطحی

روش بهینه‌سازی چندسطحی[1] از روش‌های جدید برای تخمین پارامترهای معادلهٔ کاستیاکف- لوئیس و ضریب زبری مانینگ است که برخلاف روش‌های قبلی، از اطلاعات تمام مراحل آبیاری استفاده می‌کند (۱۶). عیب این روش، نیاز به محاسبات نسبتاً طولانی است. روش بهینه‌سازی چندسطحی به نوعی مدل ریاضی آبیاری سطحی برای شبیه‌سازی هیدرولیک آبیاری نیاز دارد. برای این منظور، از نرم‌افزار WinSRFR استفاده شد. این نرم‌افزار، مدل ریاضی یک‌بعدی برای تحلیل و شبیه‌سازی آبیاری سطحی است که در سال ۲۰۰۶ توسعه یافت و از مدل‌هایی است که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی دارد. مدل یادشده، با دو مدل ریاضی اینرسی صفر و موج کینماتیکی محاسبات را انجام می‌دهد (۲). گفتنی است مدل اینرسی صفر، به سبب سادگی، دقت و دامنهٔ کاربرد زیاد، مدل برتر در مدل‌سازی هیدرولیک جریان آب روی سطح خاک است و در شرایط مزرعه‌ای، دقت مدل هیدرودینامیک کامل را دارد، اما ضعف‌های آن (ناپایداری و واگرایی) را ندارد (۱)؛ به همین دلیل، از این مدل نیز در این مطالعه استفاده شد.

برخلاف روش دونقطه‌ای الیوت و واکر، f_0 نیز در این روش از داده‌های مراحل آبیاری برآورد می‌شود. علاوه بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ را نیز می‌توان با این روش تخمین زد. در این روش، پارامترها با استفاده از تحلیل حساسیت، اولویت‌بندی و براساس داده‌های مزرعه‌ای (زمان‌های پیشروی و پسروی و هیدروگراف جریان خروجی) برآورد می‌شوند. حساسیت این داده‌ها به پارامترهای مختلف نفوذ متفاوت است؛ مثلاً پسروی تقریباً به a و k حساس نیست، اما به n حساس است. هیدروگراف خروجی بیشتر تابعی از a و f_0 است. زمان پیشروی هم بیشتر به a و k حساس است (۱۶، ۱). روش بهینه‌سازی چندسطحی، محاسبات را طی دو گام انجام می‌دهد. گام اول، تخمین اولیه برای پارامترهای مجهول است؛ مثلاً k از پیشروی، a و f_0 از هیدروگراف خروجی و n از داده‌های پسروی تخمین زده شده و در گام دوم، به‌ترتیب اولویت، به روش بهینه‌سازی برآورد می‌شوند. واکر (۲۰۰۵) با آزمون و خطا، ترتیب تخمین k، f_0، a و n را مناسب‌ترین گزینه پیشنهاد کرد. پارامتر k با استفاده از پیشروی جریان، به صورت زیر برآورد می‌شود (۱۶):

$$k^* = \min\left[\left|t_L - \bar{t}_L\right|\right]_{a,f_0,n} \qquad (2)$$

در این رابطه، k^* مقدار برآوردشدهٔ k، t_L و $\bar{t}_L$ مقدار اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شدهٔ زمان پیشروی به‌ازای مقادیر تخمین اولیهٔ f_0، a و n است. تخمین k در این مرحله نیازمند مقادیر اولیه (حدسی) برای f_0 ، a و n است. مقادیر اولیهٔ پارامترها باید در محدودهٔ مقادیر توصیه‌شده باشد، در غیر این صورت ممکن است مدل به سمت جواب هم‌گرا نشود. با توجه به اینکه ضریب f_0 به روش ورودی- خروجی اندازه‌گیری شده بود، مقدار حاصل از این روش، به‌عنوان مقدار اولیهٔ پارامتر f_0 در نظر گرفته شد. مقدار اولیهٔ ضرایب a و k نیز به روش دونقطه‌ای تخمین زده شد.

1. Multilevel optimization

مقدار اولیهٔ ضریب n نیز با استفاده از جداول راهنما، برابر ۰/۰۴ تخمین زده شد.

مطابق روش بهینه‌سازی چندسطحی، ضریب f_0 از هیدروگراف رواناب خروجی تعیین می‌شود (۱۶):

$$f_{\cdot}^{*} = \min\left[\frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(R_i - \bar{R}_i)^2}\right]_{a,k^*,n} \qquad (۳)$$

در این رابطه، f_0^* مقدار برآوردشدهٔ f_0، R_i و $\bar{R}_i$ مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شدهٔ رواناب در زمان‌های مختلف و N تعداد نقاط اندازه‌گیری رواناب است. پس از تخمین f_0، مرحلهٔ قبل با f_0^* مجدداً و یک مرحلهٔ دیگر برای تخمین k تکرار شود. ضریب a با استفاده از داده‌های هیدروگراف خروجی و به صورت زیر برآورد می‌شود (۱۶):

$$a^{*} = \min\left[\frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(R_i - \bar{R}_i)^2}\right]_{k^*,f_{\cdot}^*,n} \qquad (۴)$$

در این رابطه، a^* مقدار برآوردشدهٔ a است. پس از تخمین a، مراحل قبلی برای برآورد مجدد k و f_0 تکرار می‌شوند. در نهایت، ضریب زبری مانینگ (n) از داده‌های مرحلهٔ پسروی برآورد می‌شود (۱۶):

$$n^{*} = \min\left[\left|t_R - \bar{t}_R\right|\right]_{a^*,f_{\cdot}^*,k^*} \qquad (۵)$$

در این رابطه، t_R و $\bar{t}_R$ مقادیر زمان پسروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده هستند. پس از تخمین n، تمامی مراحل قبلی برای برآورد مجدد a، k و f_0 با n^* تکرار می‌شوند (۱۶). محاسبات با این روش، طولانی و وقت‌گیرتر است؛ ولی ازآنجا که از داده‌های مراحل مختلف آبیاری استفاده می‌کند، از دقت بیشتری برخوردار است. عملیات تکرار تا زمانی ادامه خواهد یافت که خطای پیش‌بینی پیشروی، پسروی و رواناب خروجی حداقل شود.

مدل IPARM

مدل IPARM نرم‌افزاری است که ضرایب معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس را بر اساس معادلهٔ بیلان حجمی برآورد می‌کند. در این مدل، علاوه بر اطلاعات مرحلهٔ پیشروی، از اطلاعات مرحلهٔ ذخیره نیز برای برآورد ضرایب معادلهٔ نفوذ استفاده می‌شود. به‌منظور درنظرگرفتن فاز ذخیره در معادلهٔ بیلان حجمی، عبارت رواناب خروجی (V_R) به معادلهٔ بیلان حجمی اضافه شد (۶):

$$Qt = V_s + V_I + V_R \qquad (۶)$$

در این رابطه، V_S و V_I به‌ترتیب حجم آب ذخیرهٔ سطحی و نفوذیافته، Q دبی و t زمان است. در مدل بیلان حجمی با فرض فاکتور شکل زیرسطحی (σ_z)، حجم نفوذ به فرم معمولی (غیردیفرانسیلی) $\sigma_z Z_x$ است (۱). با تخمین حجم تجمعی نفوذ (Z) از رابطهٔ کاستیاکف- لوئیس (فرض رابطهٔ ۱ برای تابع Z) و تفکیک σ_z به اجزای σ_{z1} و σ_{z2}، حجم آب نفوذیافته از سطح خاک (V_I)، با انتگرال‌گیری از رابطهٔ ۱ در طول سطح خیس‌شده محاسبه می‌شود (۶، ۱):

$$V_I = \int_{s=0}^{s=x} Z(t - t_s)ds = \left(\sigma_{z1} k t^a + \sigma_{z2} f_{\cdot} t\right)x \qquad (۷)$$

در این رابطه، x طول پیشروی و σ_{z1} و σ_{z2} فاکتورهای شکل زیرسطحی است که توسط الیوت و واکر با انتگرال‌گیری از رابطهٔ ۷، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\sigma_{z1} = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a)(1+r)}, \quad \sigma_{z2} = \frac{1}{1+r} \qquad (۸)$$

در این رابطه، r توان تابع پیشروی است و با فرم توانی پیشروی جریان (رابطهٔ ۹) محاسبه می‌شود:

$$x = pt^r \qquad (۹)$$

در رابطهٔ بالا، x و t به‌ترتیب طول و زمان پیشروی و p ضریب ثابت معادلهٔ پیشروی است.

رابطهٔ ۷، حجم نفوذ را فقط در مرحلهٔ پیشروی برآورد می‌کند. برای استفاده از رابطهٔ ۶، اول باید نفوذ در مراحل بعدی نیز لحاظ شود و سپس شکل ذخیرهٔ سطحی، جدا از

شکل پیشنهادی الیوت و واکر (۱۹۸۲) باشد. برای تصحیح ذخیرهٔ زیرسطحی، اسکالوپی و همکاران، ضرایب زیرسطحی را به صورت زیر اصلاح کردند (۱۳):

(۱۰)

$$\sigma_{z1}=\lambda^{r}\left[1-\frac{ar\lambda}{r+1}+\frac{a(a-1)r\lambda^{2}}{2!(r+2)}-\frac{a(a-1)(a-2)r\lambda^{3}}{3!(r+3)}+\frac{a(a-1)(a-2)(a-3)r\lambda^{4}}{4!(r+4)}-\ldots+\ldots\right]$$

$$\sigma_{z2}=1-\frac{r\lambda}{1+r} \qquad (11)$$

در این رابطه، λ نسبت زمان آبیاری به زمان تکمیل مرحلهٔ پیشروی است. به‌این‌ترتیب، هر دو فاکتور شکل زیرسطحی تابعی از زمان خواهد بود. حجم ذخیرهٔ سطحی با ضرب سطح مقطع ورودی جریان در فاکتور شکل سطحی تخمین زده می‌شود که معمولاً ۰/۷۷ فرض می‌شود:

$$V_s=\sigma_y A_0 x \qquad (12)$$

این رابطه در مرحلهٔ پیشروی کاربرد دارد. برای تخمین حجم ذخیرهٔ سطحی در فاز ذخیره، تابعی برای تخمین عمق در فاز پیشروی به صورت زیر پیشنهاد شده است (۱۳):

$$y=y_0\left(1-\frac{S}{x}\right)^{\beta} \qquad (13)$$

در این رابطه، y عمق جریان در فاصلهٔ x، y_0 عمق در ابتدای جویچه، S فاصلهٔ از ابتدای جویچه تا انتهای جبههٔ پیشروی، x فاصلهٔ پیشروی در زمان مشخص و β ثابت انحنا (بیان‌کنندهٔ شکل پروفیل سطح آب در طول جویچه) است (شکل ۱).

شکل ۱. ذخیرهٔ سطحی در طول فاز ذخیره

در ارزیابی سیستم آبیاری جویچه‌ای، عموماً پیشروی و رواناب در گام‌های مکانی و زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود (۱۷). هدف توابع زیر، کمینه‌کردنِ فواصل پیشروی اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده طی فاز پیشروی و حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده طی فاز ذخیره، برای برآورد پارامترهای معادلهٔ نفوذ است:

$$O.F.1=SSE_{Advance}=\sum_{i=1}^{N_a}\left(x_i-\frac{Qt_i}{\sigma_y A_0+\sigma_{z1}kt_i^{a}+\sigma_{z2}f_0 t_i}\right)^{2} \qquad (14)$$

(۱۵)

$$O.F.2=SSE_{Runoff}=\sum_{i=1}^{N_r}\left(V_{Ri}-\left(Qt_i-\sigma_{ys}A_0 L-\sigma_{z1}kL-\sigma_{z2}f_0 L\right)\right)^{2}$$

در این رابطه، SSE مربع خطای استاندارد، x_i، t_i و V_{Ri} به‌ترتیب فواصل پیشروی اندازه‌گیری‌شده، زمان و حجم رواناب، N_a تعداد نقاط اندازه‌گیری پیشروی و N_r تعداد حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده (تعداد نقاط هیدروگراف خروجی) است. با ترکیب دو تابع هدف، می‌توان مسئله را به یک مسئلهٔ تک‌هدفه و بدون بعد تبدیل و حل آن را ساده‌تر کرد:

(۱۶)

$$O.F.=Min.\left[\frac{\sum_{i=1}^{N_a}\left(x_i-\frac{Qt_i}{\sigma_y A_0+\sigma_{z1}kt_i^{a}+\sigma_{z2}f_0 t_i}\right)^{2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_a}x_i^{2}\right)}+\frac{\sum_{i=1}^{N_r}\left(V_{Ri}-\left(Qt_i-\sigma_{ys}A_0 L-\sigma_{z1}kL-\sigma_{z2}f_0 L\right)\right)^{2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_R}V_{Ri}^{2}\right)}\right]$$

ضرایب معادلهٔ نفوذ (a، k و f_0) به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسئلهٔ بهینه‌سازی مدل IPRAM هستند که از کمینه‌کردن تابع هدف بالا (معادلهٔ ۱۶) برآورد می‌شوند.

داده‌های مزرعه‌ای

برای ارزیابی عملکرد روش‌ها، از اطلاعات آزمایش‌های صحرایی آبیاری جویچه‌ای استفاده شد. مطالعه در مزرعهٔ پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، از خرداد تا مهر ۱۳۹۳ انجام گرفت. در این مطالعه، فواصل و طول جویچه‌ها به ترتیب ۰/۷۵ و ۱۱۰ متر و شیب طولی مزرعه ۰/۰۱۲ متر بر متر بود. همچنین عرض پایینی و بالایی جویچهٔ یک، به‌ترتیب ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و برای جویچهٔ دو برابر ۲۲ و ۳۷ سانتی‌متر و با محصول تحت کشت ذرت علوفه‌ای ۷۰۴ کراس و بافت خاک لوم رسی بود. در این تحقیق، هفت سری آزمایش آبیاری جویچه‌ای به صورت انتها باز انجام شد. جریان‌های ورودی و خروجی توسط فلومهای WSC تیپ دو برای دو جویچه با دبی‌های مختلف (۰/۲۹ و ۰/۴۴ لیتر بر ثانیه) اندازه‌گیری شد. پیشروی و پسروی آب هم در طول جویچه و در فواصل ۱۰ متری اندازه‌گیری شد. داده‌های صحرایی اندازه‌گیری‌شده در جدول‌های ۱ و ۲ برای جویچه‌های ۱ و ۲ (به‌ترتیب مربوط به دبی‌های کم و زیاد) آورده شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات داده‌های صحرایی استفاده‌شده برای هفت سری آزمایش برای جویچهٔ ۱

پارامتر آبیاری	شماره آبیاری					
	۲	۳	۴	۵	۶	۷
دبی ورودی (lit/s)	۰/۳۰۵	۰/۲۹	۰/۲۷۶	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹
حجم رواناب (lit)	۳۱۰۴	۲۷۲۱	۱۹۰۷	۲۲۵۵	۲۶۵۲	۱۷۱۹
زمان قطع جریان (min)	۲۶۵	۲۳۰	۲۲۵	۲۰۰	۱۸۰	۱۶۵
زمان پیشروی (min)	۹۵	۷۶	۷۷/۵	۶۰/۵۷	۵۸/۷	۶۱/۵
زمان پسروی (min)	۲۴	۲۲/۵	۲۱/۵	۱۹/۵	۱۸	۱۹

جدول ۲. مشخصات داده‌های صحرایی استفاده‌شده برای هفت سری آزمایش برای جویچهٔ ۲

پارامتر آبیاری	شماره آبیاری					
	۲	۳	۴	۵	۶	۷
دبی ورودی (lit/s)	۰/۴۴۳	۰/۴۴۳	۰/۴۶۲	۰/۴۴۳	۰/۴۴۳	۰/۴۴۳
حجم رواناب (lit)	۳۰۴۳	۲۱۸۴	۲۱۳۶	۲۳۸۱	۲۱۱۲	۱۶۰۱
زمان قطع جریان (min)	۲۲۰	۲۰۵	۱۷۵	۲۰۰	۱۸۰	۱۴۵
زمان پیشروی (min)	۴۲/۶	۵۳/۵	۵۰	۴۹/۹	۴۰/۹۷	۴۳/۵
زمان پسروی (min)	۲۰	۲۲	۲۰/۵	۲۱	۱۷	۱۸/۵

ارزیابی عملکرد روش‌ها

پارامترهای نفوذ توسط هر دو روش، برای هر هفت واقعهٔ آبیاری در طول فصل رشد ذرت برآورد شد. به‌منظور بررسی دقت و صحت روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، کل حجم آب نفوذیافتهٔ پیش‌بینی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده، برای هر جویچهٔ آزمایشی مقایسه شد. مجموع حجم آب نفوذیافتهٔ اندازه‌گیری‌شدهٔ داخل خاک، از تفاوت بین حجم آب ورودی و خروجی جویچه به دست آمد. حجم کل آب نفوذیافتهٔ پیش‌بینی‌شده با استفاده از قانون ذوزنقه‌ای تخمین زده شد:

$$V_t = \sum_{i=1}^{n-1}\left(L_i\left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2}\right)\right) \qquad (17)$$

در این رابطه، n تعداد ایستگاه‌ها، L_i فاصلهٔ ایستگاه‌ها برحسب متر، Z_i و Z_{i+1} به‌ترتیب نفوذ تجمعی برحسب مترمکعب بر متر برای ایستگاه i و i+1ام است. درصد خطای نسبی نیز برای ارزیابی روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، از رابطهٔ زیر محاسبه شد:

$$RE = \frac{V_p - V_m}{V_m} \times 100 \qquad (18)$$

در این رابطه، V_m و V_p به‌ترتیب مقدار اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شدهٔ حجم کل آب نفوذیافته است. همچنین ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی و مقایسهٔ روش‌ها محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - M_i)^2}{n}} \qquad (19)$$

در این رابطه، M_i و P_i به‌ترتیب مقدار اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده و n تعداد نمونه است.

نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای معادلهٔ نفوذ کاستیاکف- لوئیس برای هر رویداد آبیاری و به هر دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM استخراج شد که در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای معادلهٔ کاستیاکف- لوئیس برآوردشده توسط مدل IPARM

شمارهٔ آبیاری	جویچه	a (-)	K ($m^3/min^a/m$)	f_0 ($m^3/min/m$)
دوم	جویچهٔ ۱	۰/۲۴	۰/۰۰۴۸۶	۰/۰۰۰۰۳۴۶
	جویچهٔ ۲	۰/۲۵	۰/۰۰۳۰۲	۰/۰۰۰۰۶۰۹
سوم	جویچهٔ ۱	۰/۱۳	۰/۰۰۵۰۲	۰/۰۰۰۰۶۹۷
	جویچهٔ ۲	۰/۱۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۸۵۳
چهارم	جویچهٔ ۱	۰/۳۲	۰/۰۰۲۴۹	۰/۰۰۰۰۳۴
	جویچهٔ ۲	۰/۱۱	۰/۰۰۵۶۳	۰/۰۰۰۰۸۷۵
پنجم	جویچهٔ ۱	۰/۱۹	۰/۰۰۲۹۸	۰/۰۰۰۰۵۹۲
	جویچهٔ ۲	۰/۳۱	۰/۰۰۲۸۸	۰/۰۰۰۰۵۶۱
ششم	جویچهٔ ۱	۰/۱۹	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۰۰۵۹۸
	جویچهٔ ۲	۰/۳۷	۰/۰۰۱۷۳	۰/۰۰۰۰۷۱
هفتم	جویچهٔ ۱	۰/۲۳	۰/۰۰۲۷۲	۰/۰۰۰۰۵۴۴
	جویچهٔ ۲	۰/۲۴	۰/۰۰۳۲۱	۰/۰۰۰۰۶۷۴

جدول ۴. پارامترهای معادلهٔ کاستیاکف- لوئیس برآوردشده توسط روش بهینه‌سازی چندسطحی

شمارهٔ آبیاری	جویچه	a (-)	K ($m^3/min^a/m$)	f_0 ($m^3/min/m$)
دوم	جویچهٔ ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۵۶۵	۰/۰۰۰۰۵۳۷
	جویچهٔ ۲	۰/۲	۰/۰۰۲۷۸	۰/۰۰۰۰۶۸۷
سوم	جویچهٔ ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰۰۷۲۵
	جویچهٔ ۲	۰/۲	۰/۰۰۳۵۷	۰/۰۰۰۰۹۵
چهارم	جویچهٔ ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۶۲۵
	جویچهٔ ۲	۰/۲	۰/۰۰۳۷۷	۰/۰۰۰۰۸۲۵
پنجم	جویچهٔ ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۲۸۴	۰/۰۰۰۰۶۷۵
	جویچهٔ ۲	۰/۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۸۲۵
ششم	جویچهٔ ۱	۰/۱۸	۰/۰۰۲۹۸	۰/۰۰۰۰۶
	جویچهٔ ۲	۰/۲	۰/۰۰۲۷۱	۰/۰۰۰۰۹۳۷
هفتم	جویچهٔ ۱	۰/۱۸	۰/۰۰۲۷۳	۰/۰۰۰۰۶۷۵
	جویچهٔ ۲	۰/۲	۰/۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۱۱

نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای نفوذی که به‌وسیلهٔ روش بهینه‌سازی چندسطحی برآورد شده است، از روش IPARM نوسان کمتری دارد؛ به گونه‌ای که محدودهٔ ضریب a در روش بهینه‌سازی چندسطحی ۰/۲-۰/۱۶ و در روش IPARM در دامنهٔ ۰/۳۷-۰/۱۱ به دست آمد. ضریب k هم در روش بهینه‌سازی چندسطحی دارای محدودهٔ ۰/۰۰۵۶۵-۰/۰۰۲۰۵ و در روش IPARM دارای محدودهٔ ۰/۰۰۱۷۳-۰/۰۰۵۶۳ مترمکعب بر دقیقه بر متر بود. این نتیجه می‌تواند تأثیر تفاوت روش‌ها در محاسبهٔ پارامترها باشد، به گونه‌ای که در روش بهینه‌سازی چندسطحی، پارامترها به‌ترتیب محاسبه می‌شوند و در مدل IPARM، برداری از مجهولات $[a,k,f_0]$ هم‌زمان بهینه می‌شود. نتایج اندازه‌گیری و تخمینی حجم آب نفوذیافته و خطای نسبی توسط روش‌های مختلف، به‌ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

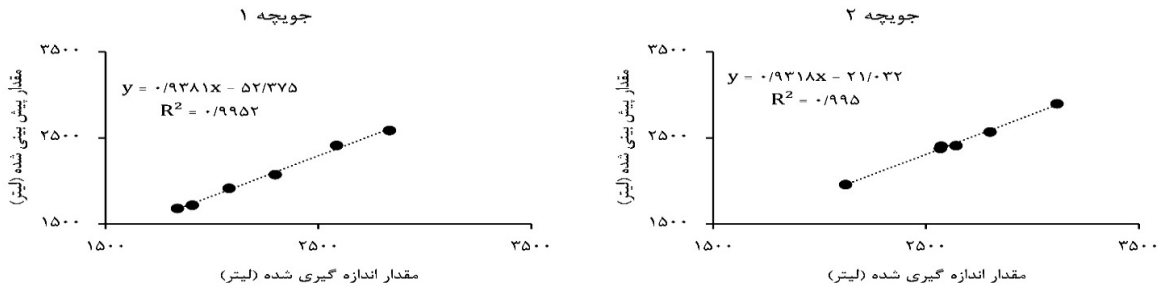
متوسط خطای نسبی روش بهینه‌سازی چندسطحی در تخمین حجم آب نفوذیافته، برای دو دبی مختلف، تفاوتی چندانی ندارند؛ ولی مدل IPARM متوسط خطای نسبی کمتری در مقایسه با روش بهینه‌سازی چندسطحی در برآورد حجم آب نفوذیافته داشت. بررسی جداگانهٔ خطای دو دبی مختلف نشان می‌دهد که مدل IPARM و روش بهینه‌سازی چندسطحی، در دبی کم متوسط، خطای نسبی کمتری نسبت‌به دبی بیشتر داشتند. نتایج نشان‌دهندهٔ دقت نزدیک دو روش بهینه‌سازی سطحی و IPARM است. مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی حجم کل آب نفوذیافته توسط دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM، در شکل‌های ۲ و ۳ و برای آبیاری‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۵. حجم کل آب نفوذیافتهٔ اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده توسط دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM برحسب لیتر

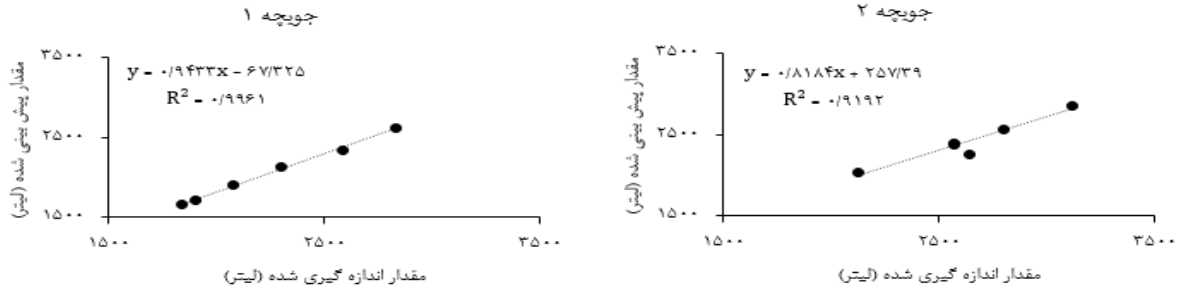
شمارهٔ آبیاری	جویچه‌ها	بهینه‌سازی چندسطحی	IPARM	اندازه‌گیری‌شده
دوم	جویچهٔ ۱	۲۶۱۴/۳	۲۵۸۵/۹	۲۸۳۲/۸
	جویچهٔ ۲	۲۲۵۸/۸	۲۴۱۰/۱	۲۶۴۰/۵
سوم	جویچهٔ ۱	۲۳۳۶/۳	۲۴۱۰/۹	۲۵۸۴/۲
	جویچهٔ ۲	۲۸۵۴/۷	۲۸۹۵/۹	۳۱۱۵/۵
چهارم	جویچهٔ ۱	۲۱۳۴/۶	۲۰۷۴	۲۲۹۶/۴
	جویچهٔ ۲	۲۳۹۴/۱	۲۴۰۲/۹	۲۵۷۰/۴
پنجم	جویچهٔ ۱	۱۸۹۶/۳	۱۹۱۴/۵	۲۰۷۹/۲
	جویچهٔ ۲	۲۵۶۵/۶	۲۵۶۸/۶	۲۸۰۰/۴
ششم	جویچهٔ ۱	۱۷۱۸/۳	۱۷۱۹/۵	۱۹۰۶/۶
	جویچهٔ ۲	۲۳۷۸/۷	۲۳۷۵/۸	۲۵۶۶/۶
هفتم	جویچهٔ ۱	۱۶۶۵/۶	۱۶۸۰/۱	۱۸۳۷/۵
	جویچهٔ ۲	۲۰۳۴/۸	۱۹۵۷/۸	۲۱۲۱/۵

جدول ۶. درصد خطای نسبی روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ

شمارهٔ آبیاری	جویچه‌ها	بهینه‌سازی چندسطحی	IPARM
دوم	جویچهٔ ۱	-۷/۷۱	-۸/۷۱
	جویچهٔ ۲	-۱۴/۴۶	-۸/۷۳
سوم	جویچهٔ ۱	-۹/۵۹	-۶/۷
	جویچهٔ ۲	-۸/۳۷	-۷/۰۵
چهارم	جویچهٔ ۱	-۷/۰۵	-۹/۶۸
	جویچهٔ ۲	-۶/۸۶	-۶/۵۲
پنجم	جویچهٔ ۱	-۸/۸	-۷/۹۲
	جویچهٔ ۲	-۸/۳۸	-۸/۲۸
ششم	جویچهٔ ۱	-۹/۸۸	-۹/۸۲
	جویچهٔ ۲	-۷/۳۲	-۷/۴۳
هفتم	جویچهٔ ۱	-۹/۳۵	-۸/۵۷
	جویچهٔ ۲	-۴/۰۹	-۷/۷۳



شکل ۲. مقایسهٔ مقدار اندازه‌گیری‌شده و تخمینی حجم آب نفوذ یافته توسط روش IPARM برای دبی کم (جویچهٔ ۱) و دبی زیاد (جویچهٔ ۲)



شکل ۳. مقایسهٔ مقدار اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شدهٔ حجم آب نفوذیافته توسط روش بهینه‌سازی چندسطحی برای دبی کم (جویچهٔ ۱) و دبی زیاد (جویچهٔ ۲)

مقدار ضریب تعیین برای روش IPARM در دبی‌های کم و زیاد، برابر ۰/۹۹ و برای روش بهینه‌سازی چندسطحی در دبی‌های کم و زیاد، به‌ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۲ به دست آمد. در کل، روش IPARM برای هر دو دبی نتایج بهتری داشت. ریشهٔ میانگین مربعات خطای برآورد حجم آب نفوذیافته برای دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM برای دو دبی مختلف نیز محاسبه شد. مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا برای روش بهینه‌سازی چندسطحی در دبی‌های کم و زیاد، به‌ترتیب ۱۸۲/۸ و ۲۲۱/۳ لیتر و برای روش IPARM در دبی‌های کم و زیاد، به‌ترتیب ۱۸۰/۲ و ۱۸۷/۶ لیتر به دست آمد. در این مقایسه نیز در دبی کم و زیاد، خطای روش IPARM کمتر از روش بهینه‌سازی چندسطحی بود؛ با اینکه روش بهینه‌سازی چندسطحی، علاوه بر یک مدل ریاضی آبیاری سطحی، به داده‌های مزرعه‌ای بیشتری برای تخمین پارامترهای نفوذ نیاز دارد.

در مطالعه‌ای از این روش برای تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای استفاده شد و نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی چندسطحی، بهتر از روش دونقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) پارامترهای نفوذ را برآورد می‌کند (۱۲). در تحقیقی دیگر، دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و موازنهٔ حجم، بررسی و با هم مقایسه شد. طبق نتایج، عملکرد روش بهینه‌سازی چندسطحی، بهتر از روش موازنهٔ حجم در برآورد پارامترهای نفوذ داشت (۱۱). مدل IPARM نیز برای تمام آبیاری‌ها در دو دبی مختلف برآورد خوبی داشت و نتایج قابل اتکایی ارائه داده است. در تحقیقی، مدل‌های IPARM و INFILT و روش دونقطه‌ای الیوت و

واکـر (۱۹۸۲) بررسـی و بـا هـم مقایسـه شـدند کـه مدل IPARM در برآورد حجم آب نفوذیافته نتـایج بسـیار خـوبی داشـت (۳). در ایـن مطالعـه نیـز هـر دو روش بهینه‌سازی چندسـطحی و IPARM در بـرآورد حجـم آب نفوذیافته عمکرد مناسبی داشتند و از هر دو روش می‌تـوان برای تخمین پارامترهای نفوذ بـرای طراحـی و ارزیـابی در آبیاری سطحی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در ایـن مطالعـه، دو روش بهینـه‌سـازی چندسـطحی و IPARM که علاوه بر داده‌های پیشروی از داده‌هـای سـایر مراحل آبیاری سطحی بـرای پـیش‌بینـی پارامترهـای نفـوذ استفاده می‌کنند، برای چهارده واقعهٔ آبیاری در طـول فصـل رشد ذرت، ارزیابی و با هم مقایسه شدند. متوسـط خطـای نسبی برای روش‌های بهینه‌سازی چندسـطحی و IPARM، به‌ترتیب ۸/۵ و ۸/۱ درصد به دست آمد. روش IPARM با اختلاف کمی پارامترهای نفوذ را بهتر برآورد کـرد. هـر دو روش برآورد قابل قبول و نزدیک به هم داشـتند. همچنـین شایان ذکـر اسـت کـه روش بهینـه‌سـازی چندسـطحی بـه محاسبات طولانی نیاز دارد؛ درحالی‌که نـرم‌افـزار IPARM کاربر دوست است و با دردست‌داشتن ورودی‌هـای مـورد نیاز، به‌راحتی اجـرا مـی‌شـود. روش‌هـایی کـه عـلاوه بـر داده‌های مرحلهٔ پیشروی از داده‌های سـایر مراحـل آبیـاری سطحی برای پیش‌بینی پارامترهای نفوذ اسـتفاده مـی‌کننـد، دقت مطلوبی دارند و مـی‌تـوان از آن‌هـا بـرای طراحـی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی استفاده کرد.

منابع

۱. عباسی ف (۱۳۹۱) اصول جریان در آبیـاری سـطحی. چاپ اول، انتشارات کمیتـهٔ ملـی آبیـاری و زهکشـی ایران، تهران. ۲۰۰ صفحه.

2. Bautista E, Clemmens A J, Strelkoff T S and Schlegel J (2009). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. Agricultural Water Management. 96: 1146-1154.

3. Ebrahimian H (2014) Soil Infiltration Characteristics in Alternate and Conventional Furrow Irrigation using Different Estimation Methods. Korean Society of Civil Engineers. 18(6):1904-1911.

4. Ebrahimian H, Liaghat A L, Ghanbarian B and Abbasi F (2010) Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. Irrigation Science. 28(6): 479–488.

5. Elliott R L and. Walker W R (1982) Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 25(2): 396-400.

6. Gillies M H and Smith R J (2005) Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. Irrigation Science. 24(1): 25-35.

7. Hanson B R, Prichard T L, and Schulbach H (1993) Estimating furrow infiltration. Agricultural Water Management. 24(4): 281–298.

8. Khatri K L and. Smith R J (2005) Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. Irrigation and Drainage Engineering. 54(4): 467–482.

9. Mailapalli, D R, Wallender W W, Raghuwanshi N S and Singh R (2008) Quick method for estimating furrow infiltration. Irrigation and Drainage Engineering. 134(6): 788–795.

10. McClymont D J, Smith R J (1996) Infiltration parameters from optimisation on furrow irrigation advance data. Irrigation Science. 17(1): 15–22.

11. Moravejalahkami B, Mostafazadeh-Fard B, Heidarpour M and Abbasi F (2012) Comparison of Multilevel Calibration and Volume Balance Method for Estimating Furrow Infiltration. Irrigation and Drainage Engineering. 138(8): 777-781.

12. Moravejalahkami B, Mostafazadeh-Fard B, Heidarpour M and Abbasi F (2009) Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. Biosystems Engineering. 103(3): 371–381.

13. Scaloppi E J, Merkley G P, Willardson L S (1995) Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. Irrigation and Drainage Engineering. 121(1): 57–70.

14. Valiantzas J D, Aggelides S and Sassalou A (2001) Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. Agricultural Water Management. 52(1): 17–32.

15. Vatankhah A R, Ebrahimian H and Bijankhan M (2009) 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.

16. Walker W R (2005) Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. Irrigation and Drainage Engineering 131(2): 129–136.

17. Walker WR, Skogerboe G (1987) Surface Irrigation: Theory and Practice. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.