



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۵۴-۴۳

ارزیابی و مقایسه روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری 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، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۱۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

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، پسروری و رواناب و مدل IPARM براساس استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب. مطالعه مزرعه‌ای به‌منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در سال ۱۳۹۳ در کرج انجام گردید. چهارده واقعه آبیاری با دو دبی ورودی ۰/۲۹ و ۰/۴۴ لیتر در ثانیه در طول فصل رشد ذرت انجام شد. براساس ضرایب تخمینی معادله نفوذ کاستیاکف-لویس، متوسط خطای نسبی برآورد حجم آب نفوذیافته مدل IPARM و بهینه‌سازی چندسطحی، به ترتیب ۸/۱ و ۸/۵ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که هر دو روش در تخمین حجم آب نفوذیافته برای همه 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، معادله کاستیاکف-لویس.

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). به منظور ارزیابی، طراحی یا شبیه‌سازی سیستم آبیاری سطحی، در مرحله اول به تعیین پارامترهای معادله نفوذ نیاز است. با تخمین دقیق پارامترهای معادله 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 آپادهیا یا و راگوانشی، روش یک‌نقطه‌ای والیانتراس 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 مطالعه 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). مطالعه دیگری، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، به مقایسه روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و موازنه حجم به منظور برآورد پارامترهای معادله 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 موازنه حجم بود (۱۱). در تحقیقی از دو مدل IPARM و INFILT و روش دونقطه‌ای الیوت و واکر برای برآورد پارامترهای معادله 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 معادله بیلان حجمی براساس داده‌های مرحله پیشروی ایجاد شده‌اند. روش‌های مبتنی بر معادله بیلان حجم، این ضعف را دارند که فقط از داده‌های مرحله پیشروی استفاده می‌کنند؛ بنابراین، بخشی از فرایند جریان در تخمین پارامترها نادیده گرفته می‌شود. برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای نفوذ، به جای مرحله پیشروی، باید از اطلاعات کل مراحل آبیاری استفاده کرد. به همین دلیل، معادله بیلان حجمی مبتنی بر داده‌های پیشروی و رواناب (مدل IPARM) برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف-لوئیس ابداع شد (۶). همچنین روش بهینه‌سازی چندسطحی برای تخمین پارامترهای معادله 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 IPARM در تخمین پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف-لوئیس ارزیابی و مقایسه شدند تا دقت هر یک از آن‌ها در آبیاری جویچه‌ای تعیین شود.

مواد و روش‌ها

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

مدیریت آب و آبیاری

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، به ترتیب 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):

$$k^* = \min_{a, f_0, n} [t_L - \bar{t}_L] \quad (2)$$

در این رابطه، k^* مقدار برآورد شده k ، t_L و \bar{t}_L مقدار اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زمان پیشروی به‌ازای مقادیر تخمین اولیه f_0 ، a و n است. تخمین k در این مرحله نیازمند مقادیر اولیه (حدسی) برای f_0 ، a و n است. مقادیر اولیه پارامترها باید در محدوده 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 اولیه پارامتر f_0 در نظر گرفته شد. مقدار اولیه ضرایب a و k نیز به روش دونقطه‌ای تخمین زده شد.

$$Z = kt^a + f \cdot t \quad (1)$$

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 پارامترهای تجربی ($m^3/m/min^a$) پارامترهای تجربی معادله نفوذ کاستیاکف-لوئیس هستند. متغیرها به صورت طول در واحد عرض، به عمق تبدیل می‌شوند. روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM قادرند پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف-لوئیس را براساس داده‌های مراحل مختلف آبیاری سطحی برآورد کنند.

بهینه‌سازی چندسطحی

روش بهینه‌سازی چندسطحی^۱ از روش‌های جدید برای تخمین پارامترهای معادله 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 دامنه 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

1. Multilevel optimization

مدل IPARM

مدل IPARM نرم‌افزاری است که ضرایب معادله نفوذ کاستیاکف-لویس را بر اساس معادله بیلان حجمی برآورد می‌کند. در این مدل، علاوه بر اطلاعات مرحله پیشروی، از اطلاعات مرحله ذخیره نیز برای برآورد ضرایب معادله نفوذ استفاده می‌شود. به منظور در نظر گرفتن فاز ذخیره در معادله بیلان حجمی، عبارت رواناب خروجی (V_R) به معادله بیلان حجمی اضافه شد (۶):

$$Qt = V_s + V_I + V_R \quad (6)$$

در این رابطه، V_s و V_I به ترتیب حجم آب ذخیره سطحی و نفوذ یافته، 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 رابطه کاستیاکف-لویس (فرض رابطه ۱ برای تابع Z) و تفکیک σ_z به اجزای σ_{z1} و σ_{z2} ، حجم آب نفوذ یافته از سطح خاک (V_I)، با انتگرال گیری از رابطه ۱ در طول سطح خیس شده محاسبه می‌شود (۶، ۱):

$$V_I = \int_{s=0}^{s=x} Z(t-t_s) ds = (\sigma_{z1} kt^a + \sigma_{z2} f.t) x \quad (7)$$

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

$$\sigma_{z1} = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)}, \quad \sigma_{z2} = \frac{1}{1+r} \quad (8)$$

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

$$x = pt^r \quad (9)$$

در رابطه بالا، x و t به ترتیب طول و زمان پیشروی و p ضریب ثابت معادله پیشروی است.

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

مقدار اولیه ضریب n نیز با استفاده از جداول راهنما، برابر 0.04 تخمین زده شد.

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

$$f_0^* = \min \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{a,k^*,n} \quad (3)$$

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

$$a^* = \min \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{k^*,f_0^*,n} \quad (4)$$

در این رابطه، a^* مقدار برآورد شده 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 مرحله پسروی برآورد می‌شود (۱۶):

$$n^* = \min \left[|t_R - \bar{t}_R| \right]_{a^*,f_0^*,k^*} \quad (5)$$

در این رابطه، t_R و \bar{t}_R مقادیر زمان پسروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده هستند. پس از تخمین n ، تمامی مراحل قبلی برای برآورد مجدد a و k و f_0 با n^* تکرار می‌شوند (۱۶). محاسبات با این روش، طولانی و وقت‌گیرتر است؛ ولی از آنجا 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.

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

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

$$(15)$$

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

در این رابطه، SSE مربع خطای استاندارد، x_i ، t_i و V_{Ri} به ترتیب 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 مسئله تک‌هدفه و بدون بعد تبدیل و حل آن را ساده‌تر کرد:

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

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

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

$$\sigma_{zr} = 1 - \frac{r\lambda}{1+r} \quad (11)$$

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

$$V_s = \sigma_y A.x \quad (12)$$

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

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

در این رابطه، y عمق جریان در فاصله x ، y_0 عمق در ابتدای جویچه، S فاصله از ابتدای جویچه تا انتهای جبهه پیشروی، x فاصله پیشروی در زمان مشخص و β ثابت انحنای بیان‌کننده شکل پروفیل سطح آب در طول جویچه است (شکل ۱).



شکل ۱. ذخیره سطحی در طول فاز ذخیره

مدیریت آب و آبیاری

جویچه دو برابر ۲۲ و ۳۷ سانتی متر 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 صحرائی اندازه‌گیری شده در جدول‌های ۱ و ۲ برای جویچه‌های ۱ و ۲ (به ترتیب مربوط به دبی‌های کم و زیاد) آورده شده‌اند.

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

داده‌های مزرعه‌ای

برای ارزیابی عملکرد روش‌ها، از اطلاعات آزمایش‌های صحرائی آبیاری جویچه‌ای استفاده شد. مطالعه در مزرعه 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 جویچه یک، به ترتیب ۲۰ و ۳۰ سانتی متر و برای

جدول ۱. مشخصات داده‌های صحرائی استفاده شده برای هفت سری آزمایش برای جویچه ۱

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

جدول ۲. مشخصات داده‌های صحرائی استفاده شده برای هفت سری آزمایش برای جویچه ۲

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

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴

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

در این رابطه، V_p و V_m به ترتیب مقدار اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده حجم کل آب نفوذ یافته است. همچنین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی و مقایسه روش‌ها محاسبه شد:

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

در این رابطه، P_i و M_i به ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و n تعداد نمونه است.

نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف-لویس 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.

ارزیابی عملکرد روش‌ها

پارامترهای نفوذ توسط هر دو روش، برای هر هفت واقعه آبیاری در طول فصل رشد ذرت برآورد شد. به منظور بررسی دقت و صحت روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، کل حجم آب نفوذ یافته پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، برای هر جویچه آزمایشی مقایسه شد. مجموع حجم آب نفوذ یافته اندازه‌گیری شده داخل خاک، از تفاوت بین حجم آب ورودی و خروجی جویچه به دست آمد. حجم کل آب نفوذ یافته پیش‌بینی شده با استفاده از قانون دوزنقه‌ای تخمین زده شد:

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

در این رابطه، n تعداد ایستگاه‌ها، L_i فاصله ایستگاه‌ها بر حسب متر، Z_i و Z_{i+1} به ترتیب نفوذ تجمعی بر حسب مترمکعب بر متر برای ایستگاه i و $i+1$ است. درصد خطای نسبی نیز برای ارزیابی روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، از رابطه زیر محاسبه شد:

جدول ۳. پارامترهای معادله کاستیاکف-لویس برآورد شده توسط مدل IPARM

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

مدیریت آب و آبیاری

جدول ۴. پارامترهای معادله کاستیاکف- لویس برآورد شده توسط روش بهینه‌سازی چندسطحی

شماره آبیاری	جویچه	a (-)	K (m ³ /min ⁰ /m)	f ₀ (m ³ /min/m)
دوم	جویچه ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۵۶۵	۰/۰۰۰۰۵۳۷
	جویچه ۲	۰/۲	۰/۰۰۲۷۸	۰/۰۰۰۰۶۸۷
سوم	جویچه ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰۰۷۲۵
	جویچه ۲	۰/۲	۰/۰۰۳۵۷	۰/۰۰۰۰۹۵
چهارم	جویچه ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۶۲۵
	جویچه ۲	۰/۲	۰/۰۰۳۷۷	۰/۰۰۰۰۸۲۵
پنجم	جویچه ۱	۰/۱۶	۰/۰۰۲۸۴	۰/۰۰۰۰۶۷۵
	جویچه ۲	۰/۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۸۲۵
ششم	جویچه ۱	۰/۱۸	۰/۰۰۲۹۸	۰/۰۰۰۰۰۶
	جویچه ۲	۰/۲	۰/۰۰۲۷۱	۰/۰۰۰۰۹۳۷
هفتم	جویچه ۱	۰/۱۸	۰/۰۰۲۷۳	۰/۰۰۰۰۶۷۵
	جویچه ۲	۰/۲	۰/۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۰۱۱

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

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

ارزیابی و مقایسه روش بهینه‌سازی چندسطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای

جدول ۵. حجم کل آب نفوذ یافته اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM بر حسب لیتر

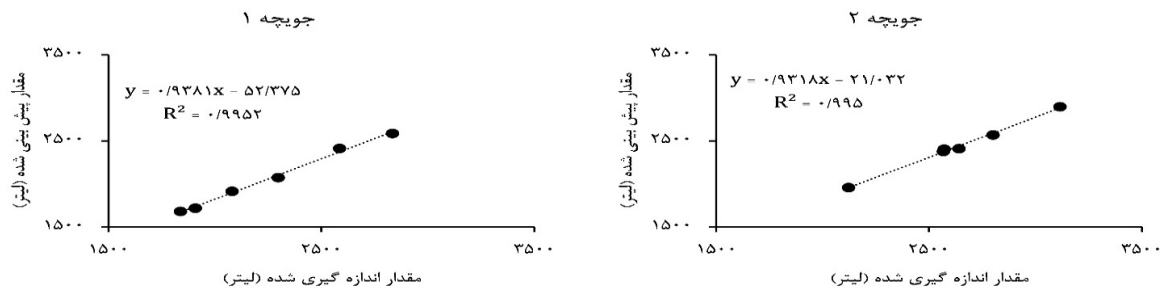
شماره آبیاری	جویچه‌ها	بهینه‌سازی چندسطحی	IPARM	اندازه‌گیری شده
دوم	جویچه ۱	۲۶۱۴/۳	۲۵۸۵/۹	۲۸۳۲/۸
	جویچه ۲	۲۲۵۸/۸	۲۴۱۰/۱	۲۶۴۰/۵
سوم	جویچه ۱	۲۳۳۶/۳	۲۴۱۰/۹	۲۵۸۴/۲
	جویچه ۲	۲۸۵۴/۷	۲۸۹۵/۹	۳۱۱۵/۵
چهارم	جویچه ۱	۲۱۳۴/۶	۲۰۷۴	۲۲۹۶/۴
	جویچه ۲	۲۳۹۴/۱	۲۴۰۲/۹	۲۵۷۰/۴
پنجم	جویچه ۱	۱۸۹۶/۳	۱۹۱۴/۵	۲۰۷۹/۲
	جویچه ۲	۲۵۶۵/۶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

جدول ۶. درصد خطای نسبی روش‌های تخمین پارامترهای نفوذ

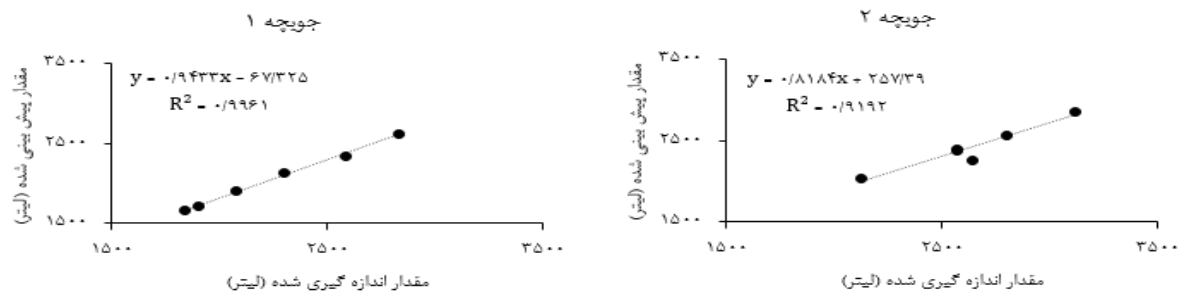
شماره آبیاری	جویچه‌ها	بهینه‌سازی چندسطحی	IPARM
دوم	جویچه ۱	-۷/۷۱	-۸/۷۱
	جویچه ۲	-۱۴/۴۶	-۸/۷۳
سوم	جویچه ۱	-۹/۵۹	-۶/۷
	جویچه ۲	-۸/۳۷	-۷/۰۵
چهارم	جویچه ۱	-۷/۰۵	-۹/۶۸
	جویچه ۲	-۶/۸۶	-۶/۵۲
پنجم	جویچه ۱	-۸/۸	-۷/۹۲
	جویچه ۲	-۸/۳۸	-۸/۲۸
ششم	جویچه ۱	-۹/۸۸	-۹/۸۲
	جویچه ۲	-۷/۳۲	-۷/۴۳
هفتم	جویچه ۱	-۹/۳۵	-۸/۵۷
	جویچه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

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۴



شکل ۲. مقایسه مقدار اندازه گیری شده و تخمینی حجم آب نفوذ یافته توسط روش IPARM برای دبی کم (جویچه ۱) و دبی زیاد (جویچه ۲)



شکل ۳. مقایسه مقدار اندازه گیری شده و پیش بینی شده حجم آب نفوذ یافته توسط روش بهینه سازی چندسطحی برای دبی کم (جویچه ۱) و دبی زیاد (جویچه ۲)

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 موازنه حجم، بررسی و با هم مقایسه شد. طبق نتایج، عملکرد روش بهینه‌سازی چندسطحی، بهتر از روش موازنه 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

مقدار ضریب تعیین برای روش IPARM در دبی‌های کم و زیاد، برابر ۰/۹۹ و برای روش بهینه‌سازی چندسطحی در دبی‌های کم و زیاد، به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۹ به دست آمد. در کل، روش IPARM برای هر دو دبی نتایج بهتری داشت. ریشه میانگین مربعات خطای برآورد حجم آب نفوذ یافته برای دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM برای دو دبی مختلف نیز محاسبه شد. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا برای روش بهینه‌سازی چندسطحی در دبی‌های کم و زیاد، به ترتیب ۱۸۲/۸ و ۲۲۱/۳ لیتر و برای روش IPARM در دبی‌های کم و زیاد، به ترتیب 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،

منابع

1. عباسی ف (۱۳۹۱) اصول جریان در آبیاری سطحی. چاپ اول، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی 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.

واکر (۱۹۸۲) بررسی و با هم مقایسه شدند که مدل IPARM در برآورد حجم آب نفوذ یافته نتایج بسیار خوبی داشت (۳). در این مطالعه نیز هر دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM در برآورد حجم آب نفوذ یافته عملکرد مناسبی داشتند و از هر دو روش می‌توان برای تخمین پارامترهای نفوذ برای طراحی و ارزیابی در آبیاری سطحی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، دو روش بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM که علاوه بر داده‌های پیشروی از داده‌های سایر مراحل آبیاری سطحی برای پیش‌بینی پارامترهای نفوذ استفاده می‌کنند، برای چهارده واقعه آبیاری در طول فصل رشد ذرت، ارزیابی و با هم مقایسه شدند. متوسط خطای نسبی برای روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی و IPARM، به ترتیب ۸/۵ و ۸/۱ درصد به دست آمد. روش IPARM با اختلاف کمی پارامترهای نفوذ را بهتر برآورد کرد. هر دو روش برآورد قابل قبول و نزدیک به هم داشتند. همچنین شایان ذکر است که روش بهینه‌سازی چندسطحی به محاسبات طولانی نیاز دارد؛ درحالی‌که نرم‌افزار IPARM کاربر دوست است و با در دست داشتن ورودی‌های مورد نیاز، به راحتی اجرا می‌شود. روش‌هایی که علاوه بر داده‌های مرحله پیشروی از داده‌های سایر مراحل آبیاری سطحی برای پیش‌بینی پارامترهای نفوذ استفاده می‌کنند، دقت مطلوبی دارند و می‌توان از آن‌ها برای طراحی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی استفاده کرد.

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 Salsalou 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.