

## کاربرد مدل سازی معکوس در برآورد ضرایب نفوذپذیری و زبری در آبیاری جویچه‌ای معمولی و یک‌درمیان

امیر صداقت‌دوست<sup>۱</sup> و حامد ابراهیمیان<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱/۲۶

### چکیده

هدف این پژوهش برآورد ضرایب نفوذپذیری و زبری در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از مدل‌سازی معکوس، به عنوان روشی غیر مستقیم، است. بدین منظور، از مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی در مدل‌سازی معکوس استفاده شد. از الگوریتم ژنتیک و هفت تابع هدف، که شامل کمینه‌کردن اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده‌ی زمان پیش‌روی و زمان پس‌روی و حجم کل رواناب و ترکیبی از آن‌ها بود، برای تعیین مقادیر بهینه ضرایب نفوذپذیری و زبری استفاده شد. نتایج نشان داد تابع هدفی که توانست اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده همه پارامترها را به صورت هم‌زمان کمینه کند ضرایب نفوذپذیری و زبری را با دقت بالایی تخمین زد. درصد خطای نسبی در برآورد زمان پیش‌روی، زمان پس‌روی، و دبی رواناب در روش مدل‌سازی معکوس به ترتیب در محدوده ۱٫۳-۱٫۵، ۳٫۴-۴٫۱، و ۰٫۴-۱۲٫۵ و در روش لیوت و واکر به ترتیب در محدوده ۱۸٫۷-۲۶٫۶، ۳٫۴-۳٫۷، و ۱۲٫۵-۱۳٫۰ برای دو روش آبیاری جویچه‌ای معمولی و یک‌درمیان به دست آمد.

**کلیدواژگان:** آبیاری سطحی، الگوریتم بهینه‌سازی، زبری مانینگ، مدل شبیه‌سازی

### مقدمه

اغلب تطابق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری مزرعه‌ای ندارند. از این رو، در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیر مستقیم تعیین خصوصیات خاک و املاح، که تأثیر شرایط پویایی (دینامیکی) مزرعه را در نظر می‌گیرند، رواج پیدا کرده است (Abbasi, 2012).

در این روش‌ها سعی می‌شود بر اساس خصوصیات زودیافت خاک خصوصیات دیر یافت خاک در سطح کل مزرعه به دست آید. مهم‌ترین و جدیدترین روش‌های تخمین ضرایب نفوذ در آبیاری سطحی روش‌های یک‌نقطه‌ای، دونقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی، و مدل‌سازی معکوس است که تأثیر شرایط پویایی نفوذ آب در خاک را نیز در نظر می‌گیرند. روش مدل‌سازی معکوس ترکیبی از یک مدل شبیه‌سازی و یک الگوریتم بهینه‌سازی و داده‌های مزرعه‌ای است که در آن با کمینه‌کردن خروجی‌های مدل شبیه‌سازی با داده‌های مزرعه‌ای با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی ورودی‌های مدل (به‌خصوص ضرایب نفوذپذیری و زبری خاک) شبیه‌سازی بهینه می‌شوند.

Emdad *et al* (2006) به بررسی نفوذ نهایی و تجمعی خاک در آبیاری جویچه‌ای و تغییرات آن با دفعات آبیاری در زراعت ذرت پرداختند. نتایج نشان داد نفوذ نهایی خاک در

آبیاری سطحی یکی از روش‌های متداول آبیاری است که در آن آب به روش ثقلی در سطح زمین جریان می‌یابد و سطح زمین، به مثابه جذب‌کننده و انتقال‌دهنده آب، استفاده می‌شود (Walker and Skogerboe, 1987). بر اساس گزارش‌های ارائه‌شده، بیش از ۹۰ درصد آبیاری در ایران سطحی است. از سوی دیگر، راندمان آبیاری سطحی در ایران حدود ۴۳ درصد اعلام شده است (Abbasi, 2012). مهم‌ترین عامل کمبود راندمان آبیاری سطحی عدم قطعیت در تعیین ضرایب نفوذپذیری و زبری گزارش شده است (Gillies and Smith, 2005; Moravejalakhani *et al*, 2009). معمول‌ترین روش تعیین خصوصیات خاک به صورت نقطه‌ای و در زمان و مکانی خاص در چند محل از پیش تعیین‌شده اندازه‌گیری می‌شود. تعیین خصوصیات خاک با این روش معمولاً کاری وقت‌گیر و زمان‌بر است. از سوی دیگر، به دلیل تغییرات شدید خصوصیات خاک در سطح مزرعه این نتایج کمتر قابلیت تعمیم به کل سطح مزرعه مورد نظر را دارند و نتایج شبیه‌سازی حاصل از آن‌ها

\* نویسنده مسئول: ebrahimian@ut.ac.ir

این نتیجه رسیدند که در صورتی که پارامترهای نفوذ برای دبی متفاوت از دبی‌ای که در آن اندازه‌گیری شده‌اند به کار رود، تفاوت چشمگیری در مقادیر اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و خروجی‌های شبیه‌سازی مدل به‌دست می‌آید. بنابراین، ضرایب نفوذ به‌دست‌آمده از یک دبی نباید برای ارزیابی و ارائه راهکارهای مدیریتی در دبی‌های دیگر به کار رود.

Moravejalahkami *et al* (2009) کارایی روش بهینه‌سازی چندسطحی را در تعیین ضرایب نفوذ و زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای، با سه نوع هیدروگراف دبی ورودی مختلف، شامل دبی ثابت و دبی با کاهش جریان و آبیاری کابلی با استفاده از یک مدل اینرسی صفر، بررسی کردند. نتایج نشان داد در تخمین مقادیر خروجی مدل آبیاری سطحی روش بهینه‌سازی چندسطحی نسبت به روش دونقطه‌ای کارایی بیشتری دارد.

به طور کلی، بررسی‌های بسیار اندکی در زمینه استفاده از تکنیک مدل‌سازی معکوس در تخمین ضرایب نفوذپذیری و ضریب زبری در آبیاری سطحی انجام شده است. این در حالی است که ضرایب نفوذپذیری و زبری خاک در هیدرولیک جریان آب و حجم آب نفوذیافته و شاخص‌های عملکرد سیستم آبیاری، مانند راندمان و یکنواختی، تأثیر زیادی دارد. بنابراین، هدف این پژوهش برآورد ضرایب نفوذپذیری و زبری در آبیاری جویچه‌ای معمولی و یک‌درمیان با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس و داده‌های مزرعه‌ای، شامل زمان‌های پیش‌روی و پس‌روی و حجم رواناب خروجی از مزرعه، به منظور افزایش دقت در برآورد خصوصیات فیزیکی خاک است.

### مواد و روش‌ها

برای اجرای روش مدل‌سازی معکوس به سه بخش مدل شبیه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی، و داده‌های مزرعه‌ای نیاز است که در ادامه تشریح می‌شوند.

### مطالعه مزرعه‌ای

آزمایش‌های صحرائی در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، واقع در کرج، در سال ۱۳۸۹ انجام شد. موقعیت جغرافیایی مزرعه آزمایشی شامل طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۳۱۳ متر از سطح دریاست. آبیاری جویچه‌ای به صورت دو رژیم آبیاری معمولی و آبیاری یک‌درمیان تحت کشت ذرت صورت گرفت. آب آبیاری به وسیله پمپاژ آب از کانال آب مجاور مزرعه به داخل یک مخزن

انتهای فصل کشت نسبت به ابتدای دوره ۳۴ درصد کاهش و راندمان کاربرد نسبت به ابتدای دوره ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. این نتیجه بیانگر کاهش نفوذ در طول فصل و افزایش زمان آبیاری به منظور نفوذ عمقی مشخص آب برای حصول راندمان کاربرد بالاست.

GhorbaniDashtaki *et al* (2009) امکان تخمین پارامترهای مدل‌های فیلپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوئیس، و هورتون را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در ۱۲۳ نقطه از استان‌های اردبیل، زنجان، فارس، اصفهان و بوشهر بررسی کردند. اعتبارسنجی مدل‌های نفوذ نشان داد شبکه‌های ایجادشده برای پارامترهای مدل فیلپ، با میانگین RMSE معادل ۶۶ سانتی‌متر، بهترین عملکرد را در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک دارند و مدل‌های هورتون و کوستیاکوف- لوئیس و کوستیاکوف به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار می‌گیرند.

RamezaniEtedali *et al* (2009) ضریب زبری مانینگ را در آبیاری جویچه‌ای، با استفاده از مدل EVALUE، تخمین زدند. آن‌ها نشان دادند مقدار ضریب زبری مانینگ برآوردشده برای جویچه‌های مطالعه‌شده بین ۰/۰۲۰ تا ۰/۱۰۲ متغیر است. نتایج مدل یادشده توانست با دقت خوبی مرحله پس‌روی را، که حساسیت بیشتری به ضریب زبری مانینگ دارد، شبیه‌سازی کند.

Ebrahimian *et al* (2010) روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذپذیری را ارزیابی و روش دونقطه‌ای جدید را بر اساس معادله فیلپ در آبیاری جویچه‌ای و نواری ارائه و آن‌ها را با استفاده از مدل آبیاری سطحی SIRMOD مقایسه کردند. نتایج نشان داد در برآورد میزان آب نفوذیافته به خاک در آبیاری نواری روش پیشنهادی و در آبیاری جویچه‌ای روش Shepard *et al* (1993) و روش پیشنهادی کمترین خطای نسبی را دارند. در برآورد مرحله پیش‌روی در آبیاری جویچه‌ای و نواری به ترتیب روش پیش‌روی Benami and Ofen (1984) و روش پیشنهادی و در برآورد مرحله پس‌روی در آبیاری جویچه‌ای و نواری به ترتیب روش Shepard *et al* (1993) و روش پیشنهادی کمترین خطای استاندارد را دارند.

Walker (2005) روش جدید بهینه‌سازی چندسطحی را برای تخمین ضرایب نفوذ کوستیاکوف- لوئیس و ضریب زبری مانینگ ارائه کرد. نتایج نشان داد این روش، شیوه‌ای کارآمد در تعیین خصوصیات نفوذ و ضریب زبری مانینگ است. Langat *et al* (2007) دقت تخمین پارامترهای نفوذ را تحت اندازه‌گیری یک دبی و دبی‌های مختلف در مزرعه بررسی کردند. آن‌ها به

رشد با فواصل هفت روز صورت گرفت. در این پژوهش، از داده‌های مزرعه‌ای دو نوبت آبیاری (چهارم و هشتم) استفاده شد. در طی آبیاری چهارم دبی ورودی مزرعه ۰/۲۶۲ لیتر در ثانیه و زمان قطع جریان ۲۴۰ دقیقه و در طی آبیاری هشتم دبی ورودی مزرعه ۰/۳۸۸ لیتر در ثانیه و زمان قطع جریان ۳۶۰ دقیقه بود. زمان‌های پیش‌روی و پس‌روی در فواصل ۱۰ متری در جویچه‌ها و همچنین هیدروگراف جریان ورودی و خروجی به وسیله فلوم WSC در هر آبیاری اندازه‌گیری شد.

تأمین شد. سطح آب این مخزن به کمک سرریز ثابت نگه داشته شد تا دبی ورودی به جویچه‌ها در طول آزمایش ثابت باشد. گیاه ذرت علوفه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴) در تاریخ ۲۰ خرداد ۱۳۸۹ روی پشته‌ها کشت شد. خصوصیات فیزیکی مزرعه آزمایشی در جدول ۱ می‌آید. یک لایه سنگ‌ریزه در عمق ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک وجود داشت. طول و فواصل جویچه‌ها به ترتیب برابر ۸۶ و ۰/۷۵ متر بود. شیب طولی جویچه‌ها ۰/۰۹۳ و اندازه‌گیری شد. متوسط عرض بالایی و عمق جویچه‌ها به ترتیب ۴۵ و ۱۱ سانتی‌متر بود. آبیاری در کل فصل

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مطالعه‌شده

جرم مخصوص ظاهری (g cm <sup>-3</sup> )	درصد اجزای تشکیل‌دهنده خاک (%)			کلاس بافت خاک	عمق (m)
	رس	سیلت	شن		
۱،۵۰	۲۸،۵	۳۲،۲	۳۹،۳	لوم رسی	۰-۰،۲
۱،۴۶	۲۶،۳	۲۹،۷	۴۴،۰	لوم	۰،۲-۰،۴
۱،۴۹	۱۹،۱	۲۱،۵	۵۹،۴	لوم شنی	۰،۴-۰،۶

(Walker 1982) و مقدار نفوذ نهایی با روش ورودی و خروجی (Walker and Skogerboe, 1987) برآورد شد و ضریب زبری مانینگ به صورت پیش‌فرض مقدار ۰/۰۴ در نظر گرفته شد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش Elliott and walker (1982) در مقابل روش مدل‌سازی معکوس ارزیابی شد.

#### روش بهینه‌سازی

در این پژوهش از کد الگوریتم ژنتیک Carrol (1996)، که به زبان فرترن نوشته شده، برای بهینه‌سازی روش مدل‌سازی معکوس استفاده شد. در این کد عملگرهای انتخاب تورنمنت، تلاقی یکنواخت، جهش خزشی، و نخبه‌گزینی برای حل الگوریتم به کار رفت. پارامترهای ورودی مهم الگوریتم ژنتیک، مانند اندازه جمعیت در هر نسل و حداکثر تعداد نسل و احتمال‌های تزویج و جهش، بر اساس دستورالعمل Carrol (1996) و Praveen et al (2006) تعیین و به ترتیب برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ۰/۵، و ۰/۰۱ انتخاب شد. طول کروموزوم با توجه به محدوده تغییرات متغیرهای تصمیم برابر ۴۶ به دست آمد. در این بررسی، متغیرهای تصمیم ضرایب نفوذپذیری ( $f_0$ ,  $k$ ,  $a$ ) و زبری ( $n$ ) بودند. محدوده هر یک از این متغیرها با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در گذشته و راهنماهای موجود تعیین شد (جدول ۲). این محدوده فضای جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک را مشخص می‌کند و باید به درستی تعیین شود.

#### مدل شبیه‌سازی آبیاری

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی رخدادهای آبیاری و تهیه خروجی‌های مورد نیاز برای روش مدل‌سازی معکوس، یک مدل آبیاری سطحی (Abbasi et al, 2003) به کار رفت که بر مبنای روش اینرسی صفر از معادلات سنت و نانت استفاده می‌کند. این مدل قادر است همه مراحل آبیاری جویچه‌ای و نواری را شبیه‌سازی کند. معادلات حاکم بر مدل به صورت رابطه ۱ و ۲ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (\text{رابطه ۲})$$

$Q$  دبی جریان ( $L^3T^{-1}$ )،  $A$  سطح مقطع ( $L^2$ )،  $z$  حجم آب نفوذیافته در هر متر از جویچه ( $L^3L^{-1}$ )،  $y$  عمق جریان ( $L$ )،  $S_0$  شیب زمین (بی‌بعد)،  $S_f$  شیب مقاومت اصطکاکی (بی‌بعد)، و  $t$  و  $x$  به ترتیب زمان ( $T$ ) و مکان ( $L$ ) است.

در این مدل نفوذپذیری با استفاده از معادله کاستیاکوف-لویس (رابطه ۳) ارائه می‌شود:

$$z = k \tau^a + f_0 \tau \quad (\text{رابطه ۳})$$

$\tau$  فرصت نفوذ ( $T$ )،  $k$  ( $L^2T^a$ ) و  $a$  (بی‌بعد) پارامترهای نفوذ، و  $f_0$  ( $L^2T^{-1}$ ) ضریب نفوذپذیری پایه است.

در این پژوهش شبیه‌سازی اولیه شرایط آبیاری جویچه‌ای ضرایب نفوذپذیری با روش دونقطه‌ای Elliott and walker

جدول ۲. مقادیر حداقل و حداکثر متغیرهای تصمیم (ضرایب نفوذپذیری و زبری خاک)

n(-)		f0(m2min-a)		k(m2min-1)		a(-)		متغیر تصمیم
min	max	Min	Max	min	max	Min	Max	مقدار
۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۹۳	۰/۱	۰/۸	

اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بین زمان پیش‌روی، زمان پس‌روی، و حجم کل رواناب خروجی به صورت مجزا یا ترکیبی از آن‌ها. توابع هدف در جدول ۳ به صورت خلاصه می‌آید.

متغیرهای تصمیم با استفاده از چند تابع هدف، که هر یک به طور جداگانه نتیجه یا نتایجی خاص از مدل شبیه‌سازی را با داده‌های اندازه‌گیری شده کمینه می‌کنند، بهینه می‌شوند. هفت تابع هدف در این مطالعه به کار رفت؛ شامل کمینه‌کردن

جدول ۳. معادلات توابع هدف استفاده‌شده در الگوریتم ژنتیک

معادله تابع هدف*	شماره تابع هدف	شماره معادله
$OF1 = -(T - Tm)^2$	OF1	۴
$OF2 = -(tr - trm)^2$	OF2	۵
$OF3 = -(VR - VRm)^2$	OF3	۶
$OF4 = -[(T - Tm)^2 + (tr - trm)^2]$	OF4	۷
$OF5 = -\left[\frac{(T - Tm)^2}{Tm^2} + \frac{(VR - VRm)^2}{VRm^2}\right]$	OF5	۸
$OF6 = -\left[\frac{(tr - trm)^2}{trm^2} + \frac{(VR - VRm)^2}{VRm^2}\right]$	OF6	۹
$OF7 = -\left[\frac{(T - Tm)^2}{Tm^2} + \frac{(tr - trm)^2}{trm^2} + \frac{(VR - VRm)^2}{VRm^2}\right]$	OF7	۱۰

\*  $T$  و  $Tm$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده زمان پیش‌روی در انتهای جویچه،  $tr$  و  $trm$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده زمان پس‌روی در انتهای جویچه،  $VR$  و  $VRm$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده حجم کل رواناب طی آبیاری است.

### شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی ضرایب نفوذپذیری و زبری به دست آمده با روش مدل‌سازی معکوس، مقادیر شبیه‌سازی شده زمان پیش‌روی و زمان پس‌روی و دبی رواناب خروجی حاصل از این ضرایب با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. برای این منظور سه آماره ضریب همبستگی ( $R^2$ )، میانگین مجذور مربعات خطا ( $RMSE$ )، و خطای نسبی ( $RE$ ) به کار رفت.

$$RE = \frac{X_{mea} - X_{sim}}{X_{mea}} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$X_{mea}$  و  $X_{sim}$  به ترتیب مقدار اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده خروجی مورد نظر و  $N$  تعداد داده است. در این شاخص‌ها هر چه مقدار  $RE$  و  $RMSE$  کوچک‌تر باشد و هر چه  $R^2$  به سمت ۱ میل کند ضرایب به دست آمده دقت بیشتری دارد.

### یافته‌ها و بحث

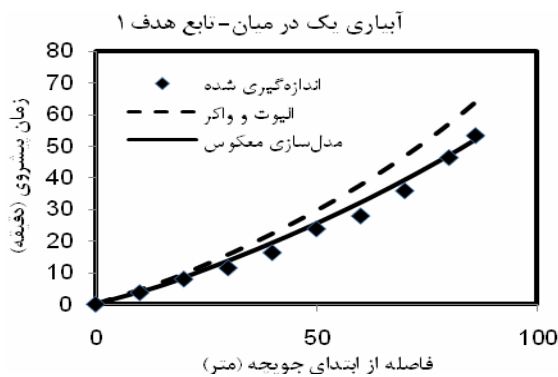
پس از اجرای مدل‌سازی معکوس، توابع هدف با دقتی قابل قبول به سمت عدد کمینه هم‌گرا شد. نمونه‌ای از این هم‌گرایی برای تابع هدف ۴ در شکل ۱ می‌آید. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر تابع هدف ابتدا به صورت پراکنده و ناگهانی تغییر می‌یابد و پس از ایجاد چند نسل با الگوریتم

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{mea} - X_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{mea} - \bar{X}_{mea})^2} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

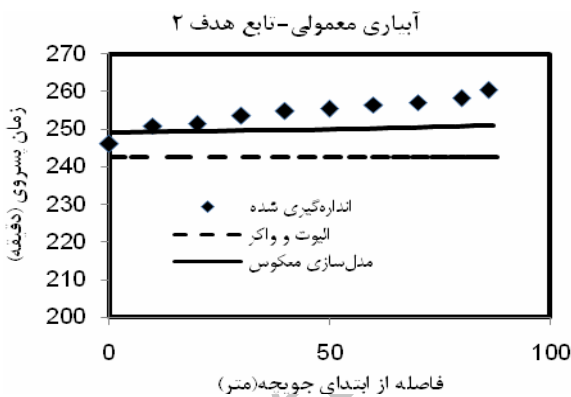
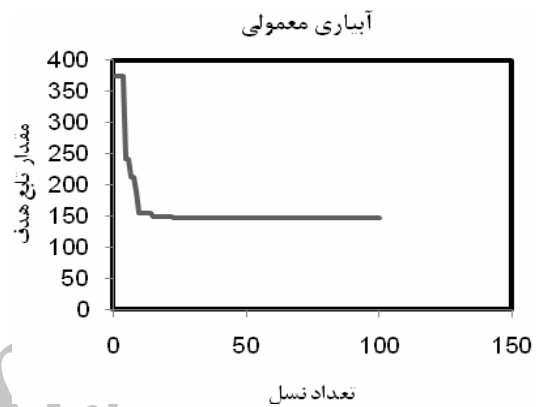
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{mea} - X_{sim})^2} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

۱ خصوصیات از خاک را تعیین می‌کنند که توانسته‌اند اختلاف بین زمان پیش‌روی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را کمینه کنند (شکل ۲). شاخص‌های ارزیابی در روش مدل‌سازی معکوس وضعیتی به مراتب بهتر از روش Elliott and walker دارند (جدول ۴). شکل ۳ و جدول ۵ نشان می‌دهند تابع هدف ۲ نیز در تخمین زمان پس‌روی عملکرد بسیار خوبی نسبت به روش Elliott and walker دارد؛ طوری که می‌تواند خطای روش Elliott and walker را به نصف کاهش دهد.

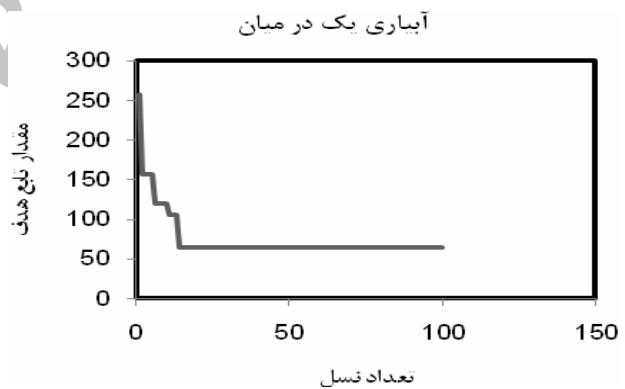
ژنتیک به سمت عددی مشخص میل می‌کند. مقادیر به‌دست‌آمده از ضرایب نفوذپذیری و زبری، بسته به نوع تابع هدف، در برخی موارد توانسته‌اند تطابق خوبی بین همه خروجی‌های مدل شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای برقرار کنند. در برخی موارد فقط یک خروجی مدل شبیه‌سازی را با داده‌های مزرعه‌ای تطبیق داده‌اند. ضرایب نفوذپذیری و زبری، که از تابع هدف ۱ به‌دست آمده، زمان پیش‌روی را به‌خوبی برآورد کرده‌اند. چون تابع هدف



شکل ۲. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زمان پیش‌روی در دو حالت مدل‌سازی مستقیم و معکوس در نوبت آبیاری هشتم



شکل ۳. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زمان پس‌روی در دو حالت مدل‌سازی مستقیم و معکوس در نوبت آبیاری چهارم



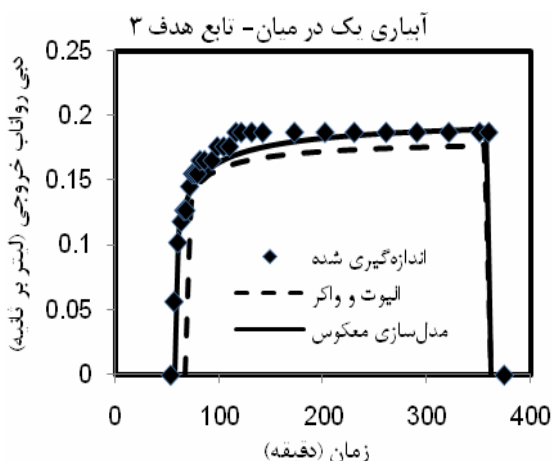
شکل ۱. روند تغییرات مقدار تابع هدف ۴ طی ایجاد نسل توسط الگوریتم ژنتیک

جدول ۴. مقادیر ضرایب نفوذپذیری و زبری و شاخص‌های ارزیابی در روش Elliott and walker و مدل‌سازی معکوس در تخمین زمان پیش‌روی (تابع هدف ۱) در نوبت آبیاری هشتم

روش تخمین	a(-)	k(m3min-1m-1)	f0(m3min-1m-1)	n(-)	R2	RMSE(min)	RE(%)
الیوت و واکر	۰٫۰۹۴	۰٫۰۰۷۳	۰٫۰۰۰۱۴۰	۰٫۰۴	۰٫۹۹	۷٫۳۰	۲۶٫۶۰
مدل‌سازی معکوس	۰٫۱۴۳	۰٫۰۰۵۱	۰٫۰۰۰۱۰۱	۰٫۰۷	۰٫۹۹	۲٫۲۸	۰٫۴

جدول ۵. مقادیر ضرایب نفوذپذیری و زبری و شاخص‌های ارزیابی در روش Elliott and walker و مدل‌سازی معکوس در تخمین زمان پس‌روی (تابع هدف ۲) در نوبت آبیاری چهارم

روش تخمین	a(-)	k(m3min-1m-1)	f0(m3min-1m-1)	n(-)	R2	RMSE(min)	RE(%)
الیوت و واکر	۰٫۱۷۴	۰٫۰۰۳۵	۰٫۰۰۰۰۸۸	۰٫۰۴	۰٫۲۶	۱۲٫۵۴	۶٫۸۷
مدل‌سازی معکوس	۰٫۱۲۸	۰٫۰۰۷۴	۰٫۰۰۰۰۸۷	۰٫۰۷	۰٫۸۷	۵٫۶۲	۳٫۶۱



شکل ۴. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده دبی رواناب خروجی در دو حالت مدل‌سازی مستقیم و معکوس در نوبت آبیاری هشتم

با استفاده از ضرایب نفوذپذیری و زبری که از تابع هدف ۳- تابع هدفی که مقدار حجم رواناب خروجی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را کمینه می‌کند- به دست آمدند مدل شبیه‌سازی توانسته است مقدار دبی رواناب خروجی را با دقت مطلوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده تطابق دهد. شکل ۴ شبیه‌سازی دبی رواناب خروجی را برای زمانی که خصوصیات خاک با روش Elliott and walker و مقادیر پیش‌فرض به دست آمده‌اند- مدل‌سازی مستقیم- و روش مدل‌سازی معکوس مقایسه می‌کند. مقادیر تخمینی ضرایب نفوذ و زبری با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس خطای کمتری در شبیه‌سازی دبی رواناب خروجی نسبت به روش Elliott and walker داشت (جدول ۶).

جدول ۶. مقادیر ضرایب نفوذپذیری و زبری و شاخص‌های ارزیابی در روش Elliott and walker و مدل‌سازی معکوس در تخمین دبی رواناب خروجی (تابع هدف

۳) در نوبت آبیاری هشتم

روش تخمین	a(-)	k(m3min-1m-1)	f0(m3min-1m-1)	n(-)	R2	RMSE(lit)	RE(%)
الیوت و واکر	۰٫۰۹۴	۰٫۰۰۷۳	۰٫۰۰۰۱۴۰	۰٫۰۴	۰٫۶۷	۰٫۰۵	۱۲٫۹۸
مدل‌سازی معکوس	۰٫۱۷۴	۰٫۰۰۴۵	۰٫۰۰۰۱۳۰	۰٫۰۶	۰٫۸۸	۰٫۰۲	۵٫۴۰

با توجه به نتایج جدول‌های ۵ تا ۸ و نتایج توابع هدف مختلف، تفاوت زیادی بین اعداد تخمینی ضرایب  $k$  و  $a$  در دو روش Elliott and walker (1982) و مدل‌سازی معکوس وجود دارد؛ طوری که ضریب تغییرات آن‌ها نسبت به هم در توابع هدف مختلف در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد برای ضریب  $a$  و ۳۰ تا ۴۰ درصد برای ضریب  $k$  بود. این در حالی است که تغییرات ضریب  $f_0$  بین این دو روش به‌ندرت از ۱۰ درصد تجاوز کرد و در محدوده ۱ تا ۷ درصد به‌دست آمد. از سوی دیگر، نتایج نشان داد مقدار فرضی ضریب زبری ۰٫۰۴ از زبری جویچه‌های آزمایشی برآورد کمی می‌دهد و روش مدل‌سازی معکوس همواره زبری را بیش از ۰٫۰۴ و معمولاً بین ۰٫۰۵ تا ۰٫۰۷ تخمین زد.

شکل ۵ نشان می‌دهد روش مدل‌سازی معکوس در برآورد ضرایب نفوذپذیری و زبری آبیاری یک‌درمیان کارایی خوبی دارد و خروجی‌های مدل شبیه‌سازی حاصل از این مقادیر می‌تواند با مقادیر اندازه‌گیری شده به‌خوبی تطبیق پیدا کند. روش مدل‌سازی معکوس در آبیاری یک‌درمیان نسبت به آبیاری جویچه‌ای معمولی عملکرد بهتری داشت. این نتیجه ممکن است از این حقیقت ناشی شود که تعیین ضرایب نفوذپذیری با استفاده از روش Elliott and walker (1982) و مقادیر پیش‌فرض ضریب زبری در آبیاری معمولی، که جریان آب نسبت به آبیاری یک‌درمیان پیچیدگی کمتری دارد، با دقت خوبی

بین توابع هدفی که برای بهینه‌سازی ضرایب نفوذپذیری و زبری طی فرآیند مدل‌سازی معکوس استفاده شدند توابعی وجود داشت که توانست همه خروجی‌های مدل شبیه‌سازی را با داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای به‌خوبی تطبیق دهد. روش آبیاری معمولی تابع هدف ۷، که اختلاف همه خروجی‌های مدل شبیه‌سازی- زمان پیش‌روی و پس‌روی و حجم کل رواناب خروجی- را با داده‌های اندازه‌گیری شده کمینه می‌کند، ضرایب نفوذپذیری و زبری را به گونه‌ای تعیین کرد که خروجی‌های شبیه‌سازی حاصل از آن‌ها با داده‌های مزرعه‌ای بهترین تطابق را نسبت به دیگر توابع هدف داشت (جدول ۷).

جدول ۸ نیز ارزیابی روش مدل‌سازی معکوس در مقایسه با روش مدل‌سازی مستقیم را به صورت کمی بیان می‌کند. مقادیر زمان پیش‌روی و رواناب خروجی در روش مدل‌سازی معکوس خطای کمتری نسبت به مدل‌سازی مستقیم داشت. اما زمان پس‌روی تغییر چندانی پیدا نکرد. در روش آبیاری یک‌درمیان نیز تابع هدف ۷ بهترین ضرایب نفوذپذیری و زبری را برآورد کرد. این تابع هدف در روش آبیاری معمولی توانست زمان پیش‌روی را با خطایی به‌مراتب کمتر از شبیه‌سازی با استفاده از روش Elliott and walker (1982) برآورد کند (جدول ۸). اما زمان پس‌روی و رواناب خروجی تغییر محسوسی نداشت و دو روش کارایی یکسانی از خود نشان داد.

می‌تواند خصوصیات خاک را برآورد کند. در این پژوهش، ضریب نفوذ پایه ( $f_0$ ) در روش Elliott and walker به روش ورودی و خروجی تعیین شد که یکی از عوامل عملکرد خوب این روش، به‌خصوص در آبیاری جویچه‌ای معمولی، بود. اگر مقدار این ضریب بر اساس بافت خاک مزرعه برآورد می‌شد، احتمالاً دقت این روش کاهش می‌یافت.

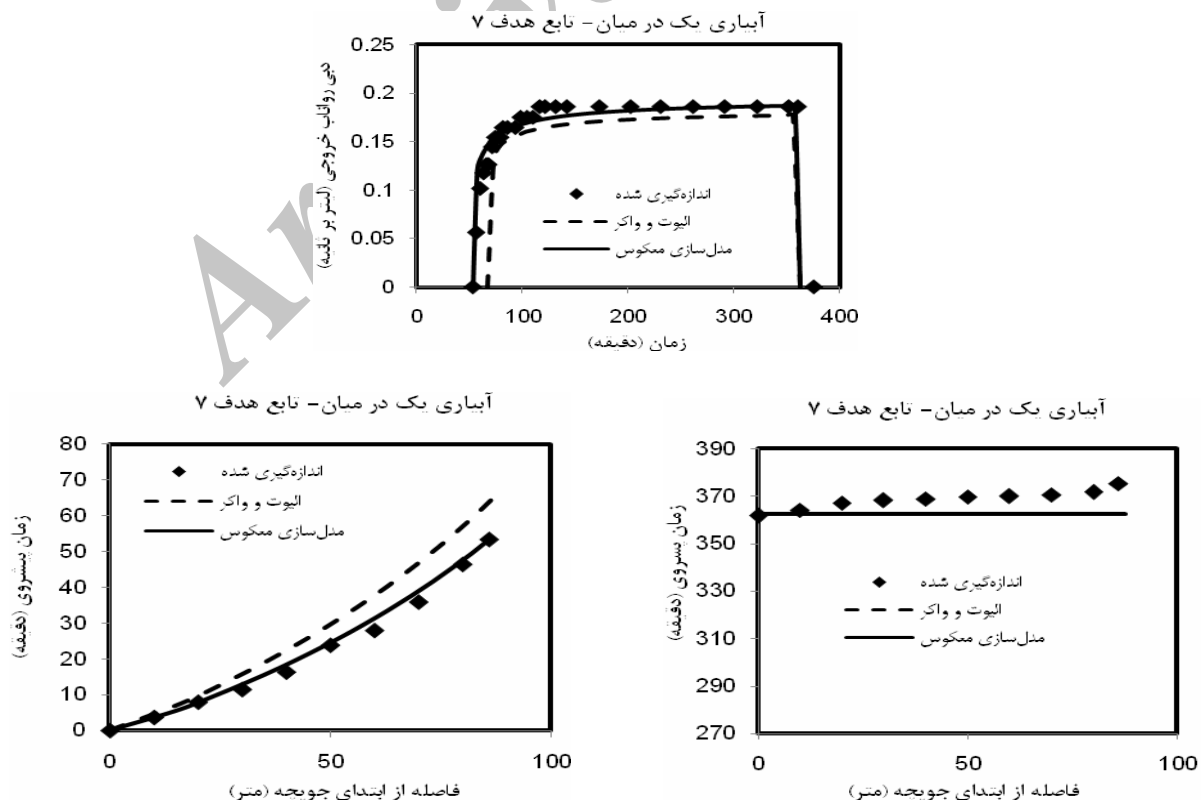
جدول ۷. ضرایب نفوذپذیری و زبری در آبیاری معمولی و یک‌درمیان از روش Elliott and walker و مدل‌سازی معکوس (تابع هدف ۷) در نوبت آبیاری هشتم

روش آبیاری	روش تخمین	a(-)	k(m3min-1m-1)	f0(m3min-1m-1)	n(-)
آبیاری معمولی	الیوت و واکر	۰٫۱۷۴	۰٫۰۰۳۵	۰٫۰۰۰۰۸۸	۰٫۰۴
	مدل‌سازی معکوس	۰٫۱۴۲	۰٫۰۰۵۱	۰٫۰۰۰۰۶۶	۰٫۰۷
آبیاری یک‌درمیان	الیوت و واکر	۰٫۰۹۴	۰٫۰۰۷۳	۰٫۰۰۰۰۱۴۰	۰٫۰۴
	مدل‌سازی معکوس	۰٫۱۴۷	۰٫۰۰۴۶	۰٫۰۰۰۰۱۳۰	۰٫۰۶

جدول ۸. شاخص‌های ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی‌شده در آبیاری معمولی و یک‌درمیان به روش Elliott and walker و مدل‌سازی معکوس (تابع هدف ۷) در نوبت آبیاری هشتم

روش آبیاری	شاخص‌های ارزیابی	زمان پیش‌روی		زمان پس‌روی		رواناب خروجی	
		الیوت و واکر	مدل‌سازی معکوس	الیوت و واکر	مدل‌سازی معکوس	الیوت و واکر	مدل‌سازی معکوس
آبیاری معمولی	R <sup>2</sup>	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۸۳	۰٫۹۲	۰٫۶۶	۰٫۶۹
	RMSE*	۶٫۳۵	۱٫۱۰	۸٫۰۵	۹٫۶۳	۰٫۰۶	۰٫۰۶
	RE(%)	۱۸٫۷۰	۱٫۲۶	۳٫۷۴	۴٫۱۳	۱۲٫۵۰	۱۲٫۵۰
آبیاری یک‌درمیان	R <sup>2</sup>	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۴۰	۰٫۴۱	۰٫۶۷	۰٫۸۴
	RMSE	۷٫۳۰	۱٫۳۵	۷٫۲۲	۷٫۲۰	۰٫۰۵	۰٫۰۲
	RE(%)	۲۶٫۶۴	۱٫۵۰	۳٫۴۱	۳٫۴۱	۱۲٫۹۸	۰٫۳۸

\* واحد آماره RMSE برای زمان پیش‌روی و پس‌روی بر حسب دقیقه و برای رواناب خروجی بر حسب لیتر بر ثانیه است.



شکل ۵. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده دبی رواناب خروجی و زمان پیش‌روی و پس‌روی در دو حالت مدل‌سازی مستقیم و معکوس در آبیاری یک‌درمیان در نوبت آبیاری هشتم

## نتیجه‌گیری

هدف ۷ در هر دو روش آبیاری توانست ضرایب نفوذپذیری و زبری خاک را به گونه‌ای تعیین کند که همه خروجی‌های شبیه‌سازی به‌خوبی با داده‌های مزرعه‌ای مطابقت داشته باشند. این تابع هدف هر سه پارامتر زمان پیش‌روی و پس‌روی و حجم کل رواناب خروجی را به صورت هم‌زمان کمینه کرد. همچنین، دقت روش مدل‌سازی معکوس در تعیین خصوصیات خاک در آبیاری یک‌درمیان بیشتر از آبیاری معمولی بود. نتایج این پژوهش نشان داد روش مدل‌سازی معکوس ابزاری توانمند در تخمین ضرایب نفوذپذیری و زبری خاک است. این ضرایب اهمیت بسیار زیادی در هیدرولیک آبیاری سطحی و جریان زیر سطحی دارد.

در این پژوهش، روش مدل‌سازی معکوس با توابع هدف مختلف برای برآورد ضرایب نفوذپذیری و زبری در آبیاری جویچه‌ای و مقایسه آن با روش Elliott and walker بررسی شد. از این رو از مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی (اینرسی- صفر) الگوریتم ژنتیک و داده‌های مزرعه‌ای، شامل دو روش آبیاری جویچه‌ای معمولی و یک‌درمیان، استفاده شد. نتایج نشان داد ضرایب نفوذپذیری و زبری که به‌ترتیب از توابع هدف ۱ و ۲ و ۳ برآورد شدند توانستند به‌خوبی زمان پیش‌روی و پس‌روی و دبی رواناب خروجی را از جویچه شبیه‌سازی کنند. چون این توابع هدف به‌ترتیب بر اساس کمینه‌کردن اختلاف بین زمان پیش‌روی و پس‌روی و حجم کل رواناب خروجی بودند. از سوی دیگر، تابع

## REFERENCES

- Abbasi, F. (2012). *Principles of flow in surface irrigation*. Iranian national committee on irrigation and drainage, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Abbasi, F., Shooshtari, M. M., and Feyen, J. (2003). Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(3), 208-213.
- Benami, A. and Ofen, A. (1984). *Irrigation Engineering: Sprinkler, Trickle, Surface Irrigation. Principles, Design and Agricultural Practices*. Irrigation Engineering Scientific Publication, IIIC Bet Dagan.
- Carrol, D. L. (1996). Chemical laser modeling with genetic algorithm. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, 34(2), 338-346.
- Ebrahimian, H., Ghanbarian-Alvijeh, B., Abbasi, F., and Hoorfar, A. H. (2010). A new two-point method for estimating infiltration parameters in furrow and border irrigation and comparison with other methods. *Journal of Water and Soil*, 24(4), 690-698. (In Farsi)
- Elliott, R. L. and Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE*, 25(2), 396-400.
- Emdad, M. R., Shahabi-Far, M., and Fardad, H. (2006). Effect of temporal variability of infiltration on the management of furrow irrigation. *Journal of Soil and Water Science*, 21(2), 319-326. (In Farsi)
- GhorbaniDashtaki, Sh., Homaeae, M., and Mahdian, M. H. (2009). Estimating soil water infiltration parameters using Artificial Neural Networks. *Journal of Water and Soil*, 23(1), 185-198. (In Farsi)
- Gillies, M. H. and Smith, R. J. (2005). Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science*, 24(1), 25-35.
- Langat, P. K., Raine, S. R., and Smith, R. J. (2007). Errors in predicting furrow irrigation performance using single measures of infiltration. *Irrigation Science*, 25(4), 339-349.
- 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(2), 374-381.
- Praveen, K., Alameda, J., Bajcsy, P., Folk, M., and Markus, M. (2006). *Hydro informatics data integrative approaches in computation, analysis and modeling*. CRC Press, Taylor and France group.
- RamezaniEtedali, H., Liaghat, A. M., and Abbasi, F. (2009). Evaluation of EVALUE model to estimate the manning roughness coefficient in furrow irrigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 10(3), 83-94. (In Farsi)
- Shepard, J. S., Wallender, W. W., and Hopmans, J. W. (1993). One method for estimating furrow infiltration. *Transaction of ASAE*, 36 (2), 395-404.
- Walker, W. R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 129-136.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. (1987). *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Prentice-Hall, New Jersey, USA.