

مقاله علمی - پژوهشی

تخمین معکوس ضریب زبری مانینگ با استفاده از مدل WinSRFR و بررسی تغییرات آن در رخدادهای مختلف آبیاری

هادی رضایی راد^۱، حامد ابراهیمیان^{۲*}، عبدالمجید لیاقت^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

روش‌های مختلفی به منظور تخمین ضریب زبری مانینگ توسعه یافته است که از این بین روش معکوس کاربرد فراوانی دارد. این تحقیق با هدف تخمین معکوس ضریب زبری مانینگ و ضرایب نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس با استفاده از مدل WinSRFR در آبیاری جویچه ای و بررسی تغییرات آن‌ها در آبیاری‌های مختلف انجام شد. بدین منظور دو دبی ورودی (به طور متوسط ۰/۲۷ و ۰/۵۳ لیتر بر ثانیه)، دو دور آبیاری (۵ و ۱۰ روز)، دو مزرعه با بافت خاک متفاوت (E و F) و در سه واقعه آبیاری (اول تا سوم) و در سه تکرار در نظر گرفته شد. خطای مدل در تخمین زمان پیشروی، زمان پسروی و حجم آب نفوذ یافته با استفاده از شاخص‌های آماری خطای نسبی (RE)، ریشه دوم میانگین مجذور خطا (RMSE) و ریشه دوم میانگین مجذور خطای نرمال شده (NRMSE) بررسی شد. مقادیر این شاخص‌ها در تخمین زمان پیشروی در مزرعه E به ترتیب ۰/۴۴ درصد، ۰/۲۱ دقیقه و ۱/۱۱ درصد در مجموع هر سه رخداد آبیاری تعیین شد. همچنین مقادیر این شاخص‌ها به ترتیب ۱/۵۸ درصد، ۵/۲۵ دقیقه و ۲/۷۸ درصد در زمان پسروی و ۰/۵۹ درصد، ۵/۰۵ لیتر و ۰/۵۰ درصد در حجم آب نفوذ یافته به دست آمد. خطای تخمین زمان پیشروی و پسروی در مزرعه F کمتر بود که این نتایج دقت بسیار خوب روش تخمین معکوس را در تعیین ضریب زبری مانینگ نمایان کرد. نتایج همچنین نشان داد که در مزرعه E حداقل و حداکثر مقدار ضریب زبری مانینگ به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۳۴ و به طور متوسط ۰/۰۷۵ در مجموع هر سه رخداد آبیاری بود و در مزرعه F ضریب زبری مانینگ در هر سه رخداد آبیاری حداقل ۰/۰۱۵، حداکثر ۰/۰۹ و به طور متوسط ۰/۰۴۱ برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، پیشروی، پسروی، حجم آب نفوذ یافته

مقدمه

می‌شوند (Ebrahimian and Liaghat, 2011). علاوه بر این با توجه به هزینه‌های زیاد ساخت و انرژی مصرفی در سیستم‌های آبیاری تحت فشار، بهبود طراحی و بهره‌برداری از روش آبیاری سطحی ضروری به نظر می‌رسد (Seyedzadeh et al., 2019). آبیاری سطحی به‌طور عمده به سه روش جویچه‌ای، نواری و کرتی تقسیم‌بندی می‌شود. آبیاری جویچه‌ای نسبت به سایر روش‌های آبیاری سطحی دقت پایین‌تری دارد ولی با این وجود بیش‌ترین کاربرد را نسبت به سایر روش‌های آبیاری سطحی دارد (Siyal et al., 2016). در این روش از سطح خاک برای نفوذ آب و انتقال آب در سطح مزرعه بهره گرفته می‌شود. کاربرد بهینه و توزیع مناسب آب در آبیاری جویچه‌ای به پارامترهایی نظیر جریان ورودی، بافت خاک، شیب جویچه، نفوذپذیری خاک، پوشش گیاهی، ضریب زبری، مدیریت آبیاری و غیره بستگی دارد (Amiri et al., 2016). از عوامل مهم حرکت آب در آبیاری جویچه‌ای مقاومت در برابر جریان آب

آبیاری سطحی متداول‌ترین و قدیمی‌ترین سیستم آبیاری می‌باشد و این‌گونه تصور می‌شود که به تکنولوژی پیشرفته، ابزار و برنامه پیچیده نیازی ندارد. در نتیجه این موضوع باعث شده راندمان مطلوبی در این سیستم مشاهده نشود. این در حالی است که در ایران، بیش از ۹۰ درصد از زمین‌های آبی توسط سیستم‌های سطحی آبیاری

- ۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
 - ۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
 - ۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
- (*) نویسنده مسئول:
(Email: brahimian@ut.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.10.4

دودار و همکاران به بررسی کارایی مدل WinSRFR در تخمین پارامترهای عملکرد آبیاری جویچه‌ای با طول‌ها و شیب‌های متفاوت در مصر پرداختند (Dewedar et al., 2019). نتایج نشان داد که این مدل کارایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی داشته است. شو و همکاران با استفاده از مدل WinSRFR به ارزیابی عملکرد آبیاری سطحی بر مبنای تغییرات زمانی پارامترهای نفوذ و ضریب زبری مانینگ پرداختند و کارایی این مدل را تأیید نمودند (Xu et al., 2019). کمالی و همکاران به ارزیابی مقدار ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای تحت کشت ذرت با اعمال دو تیمار دبی ورودی در طول فصل رشد، پرداختند و دقت مدل بهینه‌سازی چند سطحی و SIPAR_ID را در تخمین ضریب زبری مانینگ با استفاده از مدل WinSRFR مورد ارزیابی قرار دادند (Kamali et al., 2018). صلاحو و همکاران تأثیر شیب کف، ضریب زبری و دبی ورودی بر عملکرد آبیاری سطحی را با استفاده از این مدل مورد ارزیابی قرار دادند (Salahou et al., 2018). مکاری قهرودی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل WinSRFR، مراحل مختلف آبیاری را در دامنه گسترده‌ای از بافت خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل با دقت خوبی زمان پیشروی و پسروی، فرصت و عمق نفوذ و بیلان حجم را در جویچه‌ها شبیه‌سازی نموده است. گنزالز و همکاران اثر شیب طولی مزرعه بر یکنواختی آبیاری کرتی را با استفاده از این مدل بررسی کردند (González et al., 2011). ویسو و همکاران روشی جدید برای تخمین ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ در آبیاری نواری با استفاده از معادله فیلیپ و توازن حجم ارائه نمودند و نتایج را با خروجی مدل WinSRFR مورد مقایسه قرار دادند (Weibo et al., 2012).

همان‌طور که بیان شد، ضریب زبری مانینگ و پارامترهای نفوذ، از جمله داده‌های ورودی ضروری برای مدل‌های شبیه‌سازی آبیاری سطحی می‌باشند (Eduardo Bautista, Clemmens, Strelkoff, and Schlegel, 2009; Gillies and Smith, 2015; Miao et al., 2015; Salahou et al., 2018). بنابراین تخمین‌های واقع‌بینانه از ضریب زبری و پارامترهای نفوذ آب در خاک، بسیار حیاتی است. در شرایط واقعی در آبیاری سطحی، پارامترهای بسیاری ضریب زبری مانینگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند و منجر می‌شوند تا تعیین دقیق ضریب زبری دشوار شود لذا بازه وسیعی از ضریب زبری در تحقیقات مختلف گزارش شده است (E. Bautista, Clemmens, and Strelkoff, 2009). چاو و همکاران تغییرات ضریب زبری مانینگ را در جویچه‌های لخت بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ متغیر دانستند (Chow, 1959). باتیستا و همکاران و انوار و همکاران به ترتیب ضریب زبری را از ۰/۰۲ تا ۰/۱ و ۰/۰۴ تا ۰/۱۶ متغیر گزارش نمودند (Anwar et al., 2009; Bautista et al., 2016; رمضان اعتدالی و همکاران مقادیر ضریب زبری تخمینی توسط مدل EVALUE را در آبیاری

است. نیروی مقاومی که از کف جویچه بر آب اعمال می‌شود عبارت است از تنش برشی و نیروی مقاومت ناشی از عوامل جانبی مانند زبری سطح خاک و پوشش گیاهی، این مقاومت‌ها در خلاف جهت حرکت آب در جویچه ایجاد عامل زبری می‌کند (Sepaskhah and Bonder, 2002).

برای تفسیر زبری از ضرایبی که در معادلات مختلف مثل شزی، مانینگ، دارسی و غیره وجود دارد می‌توان استفاده نمود اما سهولت کاربرد و دقت قابل قبول در استفاده از معادله مانینگ (رابطه ۱)، موجب انتخاب این معادله به‌عنوان معادله مرسوم برای برآورد سرعت جریان در مجاری روباز و آبیاری سطحی توسط مهندسين هیدرولیک گردیده است (ناصری، ۱۳۹۵):

$$V = 1/n R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1)$$

که در آن V : متوسط سرعت جریان (متر بر ثانیه)، R : شعاع هیدرولیکی (m)، S_f : شیب خط انرژی و n : ضریب زبری مانینگ می‌باشد.

ضریب زبری مانینگ در طراحی و شبیه‌سازی آبیاری سطحی اهمیت بسیاری دارد. در صورتی که مقدار ضریب زبری مانینگ بیش از مقدار واقعی برآورد شود با توجه به اینکه زبری نیرویی مقاوم در مقابل جریان است، دبی کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود و این می‌تواند در شبیه‌سازی و طراحی آبیاری سطحی خطاهای زیادی ایجاد نماید (Clemmens et al., 2001). شرایط جریان در آبیاری سطحی با حالت مشابه آن در کانال‌ها متفاوت است. با توجه به اینکه دبی عبوری از جویچه‌ها ناچیز است، تغییرات در عمق و سرعت آب در جویچه‌ها زیاد است لذا تخمین ضریب زبری در جویچه‌ها نسبتاً مشکل است (برادران، ۱۳۸۹). روش‌های مختلفی به‌منظور شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آبیاری سطحی توسعه یافته است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های SURDEV (Jurriens et al., 2001)، SIRMOD (Walker, 2003)، WinSRFR (Eduardo Bautista, Clemmens, Strelkoff, and Schlegel, 2009)، SIDES (Adamala et al., 2014)، SURCOS (Burguete et al., 2014)، SISCO (Gillies and Smith, 2015) اشاره کرد. در بسیاری از این بسته‌های نرم‌افزاری، ضریب زبری به‌عنوان یک پارامتر ورودی تعریف می‌شود و پارامترهای نفوذ و سطح مقطع جریان، در تمام فصل رشد ثابت در نظر گرفته می‌شوند (Seyedzadeh et al., 2019). باین‌حال، این عوامل ممکن است باعث تغییرات قابل توجهی در زمان پیشروی و در نتیجه در عمق آب نفوذ شده در بخش‌های مختلف مزرعه شوند (Childs et al., 1993) لذا تحقیقات بسیاری به‌منظور تخمین دقیق‌تر این پارامترها از جمله ضریب زبری مانینگ، انجام شد. با توجه به کارایی مدل WinSRFR در شبیه‌سازی آبیاری سطحی، تحقیقات بسیاری بر مبنای استفاده از آن صورت پذیرد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، تأثیر دبی ورودی، دور آبیاری و شماره آبیاری بر ضریب زبری مانینگ بررسی شد. دو دبی ورودی کم (به‌طور متوسط ۰/۲۷ لیتر بر ثانیه) و زیاد (به‌طور متوسط ۰/۵۳ لیتر بر ثانیه)، دو رطوبت قبل از آبیاری (دور آبیاری ۵ و ۱۰ روزه)، سه رخداد آبیاری متوالی (آبیاری اول تا سوم)، دو مزرعه متفاوت و در سه تکرار در نظر گرفته شدند.

مشخصات محل و اجرای طرح

این تحقیق در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج به مختصات ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه و ۳۰/۲ ثانیه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۱۸/۵ ثانیه شمالی و با میانگین بارش سالانه ۲۵۱ میلی‌متر، انجام شد. در این مزرعه دو محل با بافت خاک متفاوت انتخاب شد (مزرعه F که سال‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته بود و مزرعه E که چندین سال تحت کشت نبود). ویژگی‌های خاک مزارع مورد مطالعه برای همه جویچه‌ها تعیین شد و میانگین آن در جدول (۱) ارائه گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مزارع مورد مطالعه

مزرعه	عمق (m)	بافت خاک	EC _e (dS/m)	pH	FC (g/g)	PWP (g/g)	چگالی ظاهری خاک (g/cm ³)
	۰/۲-۰	Clay loam	۱/۵۸	۷/۲۳	۰/۱۸۲	۰/۰۸۷	۱/۵۰
F	۰/۴-۰/۲	Clay loam	۱/۰۳	۷/۳۷	۰/۱۷۵	۰/۰۸۱	۱/۴۵
	۰/۶-۰/۴	Sandy loam	۰/۹۳	۷/۱۱	۰/۱۴۲	۰/۰۶۰	۱/۴۷
	۰/۲-۰	Silty clay loam	۱/۶۳	۷/۲۰	۰/۱۷۲	۰/۰۸۰	۱/۵۱
E	۰/۴-۰/۲	Silty clay loam	۱/۲۳	۷/۲۵	۰/۱۵۵	۰/۰۶۹	۱/۴۸
	۰/۶-۰/۴	Sandy clay loam	۰/۹۰	۷/۲۳	۰/۱۵۰	۰/۰۶۶	۱/۴۹

EC: هدایت هیدرولیکی، pH: اسیدیته، FC: رطوبت ظرفیت زراعی و PWP: رطوبت نقطه پژمردگی دائم.

ارتفاع آب در فلوم‌ها، عمق آب قرائت شد. زمان آبیاری در تمام جویچه‌ها تقریباً ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد. شیب کف جویچه‌ها قبل از آبیاری اول توسط دوربین نقشه‌برداری اندازه‌گیری شد. رطوبت خاک قبل از آبیاری با استفاده از روش وزنی تعیین شد. بدین منظور، در هر جویچه از لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر) سه نمونه برداشت شد و پس از تعیین رطوبت، میانگین آن گزارش گردید. سطح مقطع جویچه (A_p) با استفاده از مقطع سنج (Walker, 1987) در سه نقطه ابتدایی (۲ متر از ابتدای جویچه)، میانی (۱۰ متر از ابتدای جویچه) و انتهایی (۱۸ متر از ابتدای جویچه) قبل و بعد از هر آبیاری اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان داده ورودی به مدل داده شد.

جویچه‌ای بین ۰/۰۲ تا ۰/۱۰۲ تخمین زدند (Ramezani Etedali et al., 2012). نی و همکاران بیان کردند که در جویچه‌های انتها بسته تحت کشت ذرت می‌توان به‌طور متوسط ضریب زبری را ۰/۰۷۵ در نظر گرفت (Nie et al., 2018). عباسی و همکاران در تخمین زبری مانینگ در جویچه‌های انتها باز و بسته و با شیب کم از مدل EVALUE استفاده کردند و مقادیر ضریب زبری را در آبیاری اول جویچه‌های لخت انتها بسته، بین ۰/۰۶۶ تا ۰/۰۸۱ برآورد کردند (Abbasi et al., 2003).

ضریب زبری مانینگ پارامتری تأثیرگذار در شبیه‌سازی آبیاری سطحی است و به پارامترهای مختلفی نظیر بافت و ساختمان خاک، شرایط هیدرولیکی جریان، رطوبت خاک و دیگر عوامل وابسته است. تحقیقات بسیاری به‌منظور تعیین دقیق‌تر این پارامتر انجام شده است اما پیچیدگی تخمین آن به‌واسطه تغییرات مکانی و زمانی ناشی از تأثیر عوامل گوناگون، انجام تحقیقات بیش‌تر را ضروری ساخته است. تحقیق پیش رو به‌منظور ارزیابی دقت روش تخمین معکوس ضریب زبری مانینگ و پارامترهای نفوذ با استفاده از مدل WinSRFR در آبیاری جویچه‌ای انجام شد. در این پژوهش همچنین تأثیر دبی و رطوبت اولیه بر ضریب زبری مانینگ بررسی شده و تغییرات آن در آبیاری‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در ابتدای مزرعه، مخزنی به حجم ۲۰۰۰ لیتر به‌منظور کاهش نوسانات فشار آب قرار داده شد و آب توسط لوله‌های پلی‌اتیلن به ابتدای محل نمونه‌برداری انتقال یافت. در هر دو مزرعه، جویچه‌هایی به عرض ۷۵ سانتی‌متر و طول ۲۰ متر ایجاد شد. در این جویچه‌ها، برای اندازه‌گیری پیشروی و پسروی جریان، ۹ میخ به فاصله ۲ متر از یکدیگر در زمین نصب شد. به‌منظور اندازه‌گیری دبی ورودی و خروجی، فلوم تیپ ۲ در ابتدا و انتهای هر جویچه نصب شد و عمق آب در این دو فلوم در یک ساعت اول (که تقریباً خاک به نفوذ پایه می‌رسد) هر ۵ دقیقه و پس از آن تا انتهای آبیاری هر ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. در طول جویچه‌ها ۴ خط کش به فاصله ۴ متر از هم به‌منظور اندازه‌گیری عمق آب در طول آبیاری، نصب و هم‌زمان با

تعیین ضریب زبری مانینگ

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{N}}}{\bar{X}} \quad (5)$$

که در آن: x_i : داده‌های اندازه‌گیری شده، Y_i : داده‌های تخمین زده شده، N : تعداد کل داده‌های موردبررسی و \bar{X} : میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، می‌باشد.

نتایج و بحث

ارزیابی دقت روش تخمین معکوس ضریب زبری مانینگ

کالیبراسیون دستی مدل نشان داد که زمان پیشروی بیش از هر پارامتر دیگری از ضریب k تأثیر پذیرفت. البته این ضریب بر مقدار حجم آب نفوذ یافته هم تأثیرگذار بود اما تأثیر آن بر زمان پیشروی بسیار بیشتر بود. ضریب a حجم آب نفوذ یافته در خاک را بیش از سایر پارامترها دست‌خوش تغییر کرد و پس از آن زمان پیشروی در اولویت دوم اثرپذیری قرار گرفت. زمان پسروی حساسیت بسیار بالایی به ضریب زبری مانینگ از خود نشان داد. ضریب f_0 هم تأثیر زیادی بر زمان پسروی داشت اما ضریب زبری مانینگ اثرگذارتر بود. این در حالی است که واکر در بررسی کارایی روش بهینه‌سازی چند سطحی پیشنهادی به این نتیجه رسید که فاز پیشروی و پسروی به ترتیب بیش‌ترین حساسیت را با پارامترهای k و n دارند و مقدار هیدروگراف جریان خروجی نسبت به پارامترهای a و f_0 حساس‌تر است (Walker, 2005).

به منظور بررسی دقت مدل WinSRFR در تخمین ضریب زبری مانینگ در کل رخدادهای آبیاری درصد خطای زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۲) میانگین درصد خطای این شاخص‌ها را در دو مزرعه E و F و در سه رخداد آبیاری متوالی نشان می‌دهد. شاخص‌های RE، RMSE و NRMSE در تخمین زمان پیشروی در مزرعه E به ترتیب ۰/۴۴ درصد، ۰/۲۱ دقیقه و ۱/۱۱ درصد در مجموع هر سه رخداد آبیاری تعیین شد. مقادیر این شاخص‌ها به ترتیب ۱/۵۸ درصد، ۵/۲۵ دقیقه و ۲/۷۸ درصد در زمان پسروی و ۰/۵۹ درصد، ۵/۰۵ لیتر و ۰/۵۰ درصد در حجم آب نفوذ یافته به دست آمد. زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته در مزرعه F با خطای نسبی ۰/۲، ۰/۶۹ و ۰/۴۱ درصد توسط مدل تخمین زده شد. شاخص NRMSE هم در این مزرعه نشان داد که تخمین زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته به ترتیب با ۰/۸۷، ۰/۹ و ۰/۵۴ درصد خطا همراه بود. با دقت در نتایج می‌توان دریافت که تمامی شاخص‌ها در مزرعه F در زمان پیشروی و پسروی مقدار کمتری داشتند. در واقع مدل در مزرعه F زمان پیشروی و پسروی را با دقت بالاتری تخمین زد. در توجیه این مسئله می‌توان به تأثیر کلوخه‌های ایجادشده در اثر عملیات مختلف کشاورزی اشاره کرد. بوگل و همکاران بیان کردند که عملیات شخم و ایجاد جویچه

ضریب زبری مانینگ در کل رخداد آبیاری با استفاده از مدل WinSRFR تعیین شد. در سال ۲۰۰۶ مدل WinSRFR با همکاری مرکز تحقیقات کشاورزی مناطق خشک (Center Arid-Land Agricultural Research Service) و بخش تحقیقات کشاورزی (Agricultural Research Service) آمریکا (United States Department of Agriculture) به منظور شبیه‌سازی جریان در آبیاری سطحی ارائه شد (Bautista et al., 2009). نرم‌افزار WinSRFR یک مدل ریاضی یک‌بعدی برای شبیه‌سازی، ارزیابی و طراحی روش‌ها و رژیم‌های مختلف آبیاری سطحی است. اساس کار این مدل بر اساس حل عددی معادلات سنت-ونانت می‌باشد. این مدل قابلیت طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی رژیم‌های مختلف آبیاری را دارد و شامل چهار مؤلفه مختلف می‌باشد. (۱) یک مدل شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار است که می‌تواند برای پیش‌بینی جریان سطحی و زیرسطحی آب در شرایط مرزی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. (۲) ابزاری برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و تخمین میزان نفوذ و زبری با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه می‌باشد. (۳) ابزاری برای طراحی سیستم‌های مختلف آبیاری سطحی بوده و (۴) ابزاری به منظور بهینه‌سازی عملکرد دستگاه‌های آبیاری است (Bautista et al., 2009).

با استفاده از افزونه Solver در نرم‌افزار Excel ضرایب نفوذ کوستیاکف-لوئیس به گونه‌ای تعیین شد که خطای حجم آب نفوذ یافته در خاک، حداقل شود. سپس این مقادیر همراه با سایر پارامترهای موردنیاز و اندازه‌گیری شده در مزرعه، به مدل WinSRFR داده شد. به منظور واسنجی این مدل، ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف-لوئیس (رابطه ۲) (f_0, k, a) و ضریب زبری مانینگ به صورت دستی به گونه‌ای تنظیم شدند که به طور هم‌زمان خطای زمان پیشروی و پسروی و حجم آب نفوذ یافته حداقل شود.

$$Z = kt^a + f_0 t \quad (2)$$

که در آن: Z : نفوذ تجمعی (میلی‌متر)، t : زمان نفوذ (دقیقه) و k (میلی‌متر بر دقیقه^a) و a (بدون بعد) ثابت‌های تجربی و f_0 (میلی‌متر بر دقیقه) ضریب نفوذپذیری پایه می‌باشند.

سپس با استفاده از شاخص‌های خطای نسبی (RE) (رابطه ۳)، ریشه دوم میانگین مجذور خطا (RMSE) (رابطه ۴) و ریشه دوم میانگین مجذور خطای نرمال شده (NRMSE) (رابطه ۵) خطای مدل WinSRFR در تخمین این سه پارامتر بررسی شد.

$$RE = \frac{Y_i - X_i}{X_i} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (4)$$

اثر عملیات شخم در این مزرعه ایجاد شد. در نتیجه احتمالاً کلوخه‌های زیاد و بزرگ ایجاد شده در بستر جویچه سبب شده تا مدل در تخمین زمان پیشروی و پسروی در مزرعه E خطای بیش‌تری داشته باشد. علاوه بر این از تأثیر بافت خاک بر تشکیل کلوخه‌ها هم نمی‌توان چشم‌پوشی کرد.

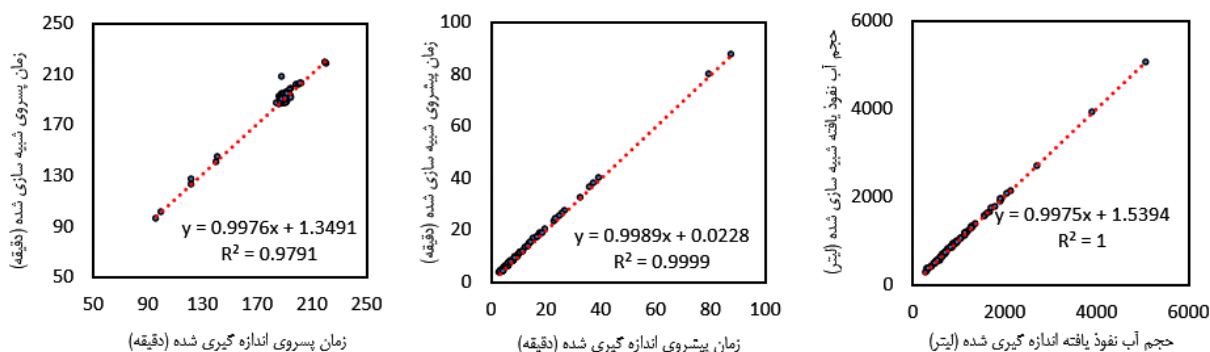
در زمین با توجه نوع بافت، ساختمان و مواد آلی خاک، سبب ایجاد کلوخه‌هایی در بستر جویچه‌ها می‌شود و این کلوخه‌ها و سایر ویژگی‌های خاک می‌تواند عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Bogel et al., 2016). مزرعه F چندین سال مورد استفاده قرار گرفته بود و ساختمان خاک مناسب‌تری نسبت به مزرعه دیگر داشت لذا همان‌طور که مشاهدات مزرعه‌ای نیز نشان داد، کلوخه کمتری در

جدول ۲- میانگین درصد خطا در زمان پیشروی، زمان پسروی و حجم آب نفوذ یافته در مزارع E و F

مزرعه	شاخص	خطا (درصد)	
		زمان پیشروی (دقیقه)	حجم نفوذ یافته (لیتر)
E	RE (درصد)	۰/۴۴	۱/۵۸
	RMSE (دقیقه/لیتر)	۰/۲۱	۵/۲۵
	NRMSE (درصد)	۱/۱۱	۲/۷۸
F	RE (درصد)	۰/۲۰	۰/۴۱
	RMSE (دقیقه/لیتر)	۰/۰۷	۱/۶۶
	NRMSE (درصد)	۰/۸۷	۰/۵۴

همکاران، سیاری و همکاران، شو و همکاران و مزارعی و همکاران که بیان کردند دقت مدل WinSRFR در شبیه‌سازی پیشروی و پسروی جریان قابل قبول است، مطابقت داشت (Abbasi et al., 2003; Anwar et al., 2016; Bo et al., 2012; Mazarei et al., 2021; Sayari et al., 2017; Xu et al., 2019).

شکل (۱) مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حجم آب نفوذ یافته، زمان پیشروی و پسروی را نشان می‌دهد. ضریب تعیین این سه پارامتر به ترتیب ۱، ۰/۹۹ و ۰/۹۷ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای و تخمین ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ بود. نتایج این تحقیق با تحقیقات عباسی و همکاران، چن و همکاران، مکاری و همکاران (۱۳۹۲)، انوار و



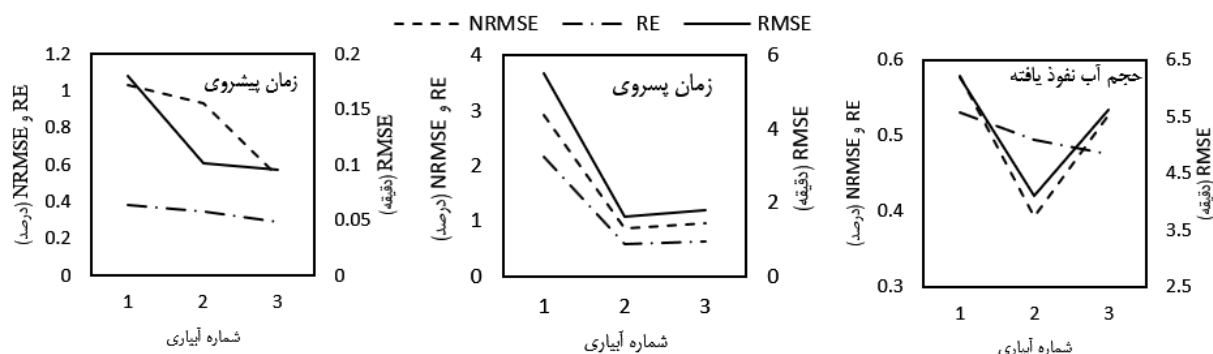
شکل ۱- مقایسه زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تمام جویچه‌های مورد بررسی

درصد، ۶/۱۹ لیتر و ۰/۵۸ درصد تعیین شد. نتایج همچنین نشان داد که مدل در تخمین زمان پیشروی و پسروی در آبیاری اول نسبت به آبیاری‌های بعدی دقت کمتری داشت (اگرچه میانگین خطا در کل مقدار بسیار پایینی داشته است). این کاهش دقت در آبیاری اول می‌تواند به علت وجود کلوخه‌های بیش‌تر باشد. در واقع با افزایش شماره رخداد آبیاری، چرخه خیس شدن و خشک شدن خاک در فاصله دو آبیاری متوالی، سبب حل شدن کلوخه‌ها می‌شود و سطح

شکل (۲) میانگین تغییرات شاخص‌های RE، RMSE و NRMSE را در مزرعه E و F به تفکیک در زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته در آبیاری‌های اول تا سوم نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقادیر این شاخص‌ها در آبیاری اول در زمان پیشروی به ترتیب ۰/۳۸ درصد، ۰/۱۸ دقیقه و ۱/۰۳ درصد بود. میانگین خطای محاسبه شده در آبیاری اول برای زمان پسروی به ترتیب ۲/۱۶ درصد، ۵/۵ دقیقه و ۲/۹۲ درصد و برای حجم آب نفوذ یافته به ترتیب ۰/۵۳

تغییرات این سه شاخص در تعیین دقت حجم آب نفوذ یافته در جویچه‌ها توسط مدل WinSRFR برخلاف زمان پیشروی و پسروی از روند خاصی پیروی نمود.

جویچه هموارتر می‌گردد (Amiri et al., 2016; Grassi, 1972; Harun-ur-Rashid, 1990; Kassem and Ghonimy, 2011) و منجر به افزایش دقت مدل در تخمین این پارامترها می‌گردد. روند



شکل ۲- روند تغییرات شاخص‌های RE، RMSE و NRMSE در شبیه‌سازی زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته در آبیاری اول تا سوم

حداقل و حداکثر ضریب زبری مانینگ در هر سه رخداد آبیاری ۰/۰۱۵ و ۰/۰۹ و در آبیاری اول تا سوم به ترتیب ۰/۰۳۹، ۰/۰۵۹ و ۰/۰۳۴ بود. نتایج نشان داد که ضریب زبری مانینگ در مزرعه F مقدار کمتری داشت. کاهش مقادیر ضریب زبری مانینگ در این مزرعه می‌تواند به علت بافت خاک سنگین‌تر باشد. رضانی اعتدالی و همکاران بیان کردند که بافت خاک به شکل معناداری بر ضریب زبری مانینگ تأثیرگذار است و خاک‌های سبک نسبت به خاک‌های سنگین، ضریب زبری بیش‌تری دارند (Ramezani Etedali et al., 2012).

مقادیر ضریب زبری مانینگ

جدول (۳) مقادیر ضریب زبری مانینگ در کل رخداد آبیاری را در هر دو مزرعه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این جدول، به منظور تعیین متوسط ضریب زبری مانینگ در هر مزرعه، از همه اعداد زبری طی رخدادهاى اول تا سوم آبیاری میانگین‌گیری شد. در مزرعه E حداقل و حداکثر مقدار ضریب زبری مانینگ به ترتیب ۰/۰۱۷ و ۰/۰۳۴ و به طور متوسط ۰/۰۷۵ در مجموع هر سه رخداد آبیاری تخمین زده شد. همچنین متوسط ضریب زبری مانینگ در آبیاری اول تا سوم در این مزرعه به ترتیب ۰/۱۳۵، ۰/۰۵۳ و ۰/۰۳۶ تعیین گردید. در مزرعه F

جدول ۳- مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین ضریب زبری مانینگ در دو مزرعه E و F

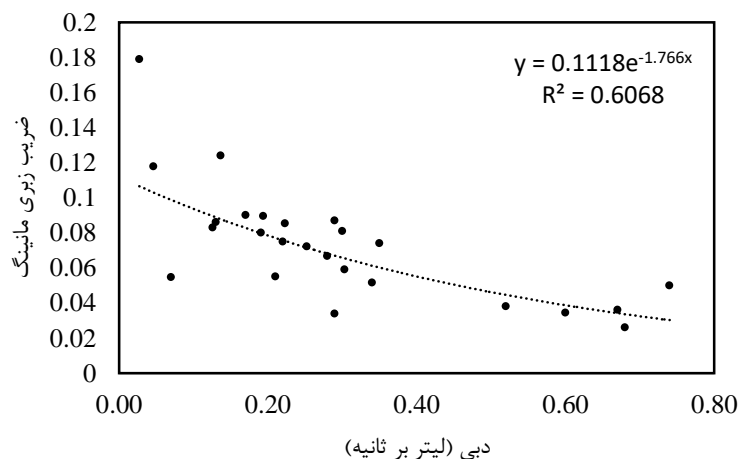
مزرعه	شاخص	ضریب زبری مانینگ
E	حداکثر	۰/۳۴۰
	حداقل	۰/۰۱۷
	میانگین کل	۰/۰۷۵
	میانگین آبیاری اول	۰/۱۳۵
	میانگین آبیاری دوم	۰/۰۵۳
	میانگین آبیاری سوم	۰/۰۳۶
F	حداکثر	۰/۰۹۰
	حداقل	۰/۰۱۵
	میانگین کل	۰/۰۴۱
	میانگین آبیاری اول	۰/۰۵۹
	میانگین آبیاری دوم	۰/۰۳۹
	میانگین آبیاری سوم	۰/۰۳۴

(Sepaskhah & Bonder, 2002). رضانی اعتدالی و همکاران (۱۳۸۸) هم تغییرات ضریب زبری مانینگ در آبیاری اول را بین

سپاسخواه و بندار بیان کردند که ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای در آبیاری اول بین ۰/۰۷ تا ۰/۱۲۱ متغیر است

به منظور بیان ارتباط بین دبی ورودی و ضریب زبری مانینگ در مجموع هر سه آبیاری، تلاش شد تا رابطه رگرسیونی مناسب بین این دو پارامتر ارائه شود اما همبستگی تمام روابط، پایین بود. نتایج بررسی روند تغییرات دبی و ضریب زبری مانینگ نشان داد که با افزایش دبی، ضریب زبری مانینگ کاهش می‌یابد که این نتیجه توسط Ramezani Etedali et al., (2012) و Ebrahimi et al., (2014) نیز تأیید شده است. برای نمونه، رابطه بین دبی ورودی و ضریب زبری مانینگ در رخدادهای آبیاری در شکل (۳) آمده است. کمالی و همکاران، میلپالی و سپاسخواه و بندار هم رابطه دبی و ضریب زبری را یک رابطه ضعیف و معکوس معرفی کردند (Kamali et al., 2018; Mailapalli et al., 2008; Sepaskhah and Bonder, 2002). در نهایت باید بیان نمود که دبی پارامتری مهم و تأثیرگذار بر ضریب زبری مانینگ است و با افزایش آن، ضریب زبری کاهش می‌یابد اما از آنجاکه افزایش یا کاهش دبی سبب تغییر در پارامترهای دیگری نظیر سطح مقطع جریان می‌شود، نمی‌توان رابطه آن با ضریب زبری را به صورت مستقل از سایر پارامترها در نظر گرفت.

۰/۰۷۳ تا ۰/۱۰۲ تعیین نمودند و بیان کردند شیب و دبی ورودی متفاوت، سبب بروز اختلاف ناچیز بین نتایج آن‌ها و تحقیق سپاسخواه و بندار شده است (Sepaskhah and Bonder, 2002). عباسی و همکاران ضریب زبری مانینگ را با استفاده از مدل EVALUE در جویچه لخت و انتها بسته در آبیاری اول تعیین نمودند و مقادیر آن را بین ۰/۰۶۶ تا ۰/۰۸۱ معرفی کردند (Abbasi et al., 2003). امیری و همکاران اظهار داشتند که مقادیر ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای با جریان پیوسته در آبیاری اول بین ۰/۰۴۴ تا ۰/۰۵۵، در آبیاری دوم بین ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۴ و در آبیاری سوم بین ۰/۰۱۸ تا ۰/۰۲۳ متغیر بود (Amiri et al., 2016). کمالی و همکاران ضریب زبری مانینگ در جویچه‌های آبیاری را در دبی‌های کم تا زیاد بین ۰/۰۴۳ تا ۰/۰۵۶ تعیین نمودند (Kamali et al., 2018). زرکانی و همکاران (۱۳۹۸) هم تغییرات ضریب زبری را بین ۰/۰۳۸ تا ۰/۰۸۹ گزارش کردند. به جز نتایج امیری و همکاران، تقریباً تمام مقادیر ارائه شده توسط این محققین با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Amiri et al., 2016).



شکل ۳- رابطه بین دبی و ضریب زبری مانینگ در رخدادهای آبیاری

بهمنی و همکاران و زرکانی و همکاران (۱۳۹۸) هم به نتایج مشابهی دست یافتند (Bahmani et al., 2020). در توجیه این فرایند (کاهش ضریب زبری در اثر افزایش شماره رخدادهای آبیاری) می‌توان به اثر آبیاری در خیس شدن خاک و در نتیجه حل شدن کلوخه‌ها اشاره کرد. در واقع چرخه خیس و خشک شدن خاک در فاصله بین آبیاری‌ها سبب حل شدن کلوخه‌ها و کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت جریان و در نتیجه زبری می‌شود. از طرف دیگر کلوخه‌های حل شده در آب در درز و شکاف‌های موجود در سطح خاک قرار می‌گیرند و لایه سطحی خاک پس از هر آبیاری متراکم‌تر و نرم‌تر می‌شود که در نهایت منجر به کاهش ضریب زبری می‌گردد. گرسی، هارون‌الرشید، قاسم و غونیمی و امیری و همکاران دلایل مشابهی را

متوسط رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده در دوره‌های آبیاری ۵ و ۱۰ روزه در مزرعه E به ترتیب ۱۹/۹ و ۹/۵ درصد و در مزرعه F به ترتیب ۱۲ و ۹/۴ درصد بود. بررسی تأثیر دور آبیاری و رطوبت اولیه خاک بر ضریب زبری بیانگر کاهش ضریب زبری با افزایش رطوبت اولیه خاک بود. کمالی و همکاران نیز ضریب زبری را تابعی از رطوبت خاک معرفی کرده و بیان کردند که رطوبت به شکل غیرمستقیم بر نیروی اصطکاک و در نتیجه زبری مانینگ تأثیرگذار است (Kamali et al., 2018).

در هر دو مزرعه، بیش‌ترین مقدار ضریب زبری مانینگ در آبیاری اول مشاهده شد و پس از آن با افزایش شماره رخدادهای آبیاری، ضریب زبری مانینگ روند کاهشی داشت (جدول ۳). محققین بسیاری نظیر

درصد تخمین زده شد. زرعگانی و همکاران (۱۳۹۸) بیان کردند که در آبیاری دوم و سوم در آبیاری جویچه‌ای، ضریب زبری به ترتیب حدود ۳۰ و ۳۳ درصد کاهش می‌یابد. قاسم و غونیمی اختلاف آبیاری اول و دوم در جریان پیوسته را ۴۴/۵۱ درصد اعلام کردند (Kassem & Ghonimy, 2011). سپاسخواه و بندار هم نشان دادند که ضریب زبری در آبیاری دوم و سوم حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد نسبت به آبیاری اول کاهش می‌یابد که با نتایج این تحقیق نسبتاً مشابه است (Sepaskhah & Bonder, 2002).

برای کاهش ضریب زبری طی رخدادهای مختلف آبیاری ذکر نمودند (Amiri et al., 2016; Grassi, 1972; Harun-ur-Rashid, 1990; Kassem & Ghonimy, 2011).

جدول (۴) درصد کاهش ضریب زبری مانینگ در حفاصل دو آبیاری متوالی را در هر دو مزرعه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در مزرعه E ضریب زبری در آبیاری دوم ۵۶/۲۷ درصد و در آبیاری سوم ۳۴/۵ درصد نسبت به آبیاری قبل، کاهش می‌یابد. این مقادیر در مزرعه F به ترتیب ۵۹/۵۱ و ۲۳/۸۴ درصد بود. میانگین کاهش ضریب زبری مانینگ در آبیاری دوم نسبت به آبیاری اول و آبیاری سوم نسبت به آبیاری دوم در هر دو مزرعه به ترتیب ۵۷/۹ و ۲۹/۱۶

جدول ۴- درصد کاهش ضریب زبری مانینگ در حفاصل دو آبیاری متوالی در مزرعه E و F

نام مزرعه	میانگین درصد اختلاف	کاهش ضریب زبری مانینگ (درصد)
E	اختلاف ضریب زبری در آبیاری اول و دوم	۵۶/۲۷
	اختلاف ضریب زبری در آبیاری دوم و سوم	۳۴/۵
F	اختلاف ضریب زبری در آبیاری اول و دوم	۵۹/۵۱
	اختلاف ضریب زبری در آبیاری دوم و سوم	۲۳/۸۴
میانگین هر دو مزرعه	اختلاف ضریب زبری در آبیاری اول و دوم	۵۷/۹
	اختلاف ضریب زبری در آبیاری دوم و سوم	۲۹/۱۶

مجدد در آبیاری سوم افزایش یافت. افزایش این ضریب در آبیاری سوم می‌تواند به علت کاهش میانگین دبی در این رخداد نسبت به سایر رخدادهای باشد. در مجموع باید بیان نمود که ضریب f_0 در مجموع هر سه رخداد آبیاری در مزرعه F نسبت به E مقدار بیش‌تری داشت و مقادیر k و a در مزرعه E نسبت به F بیش‌تر بود. طباطبایی و همکاران (۱۳۸۵) و ضیایی و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که ضرایب k و a در طول زمان، تغییرات معناداری از خود نشان نداده‌اند این در حالی است که کازرونیان و همکاران (۱۳۹۶) تغییرات زمانی پارامترهای نفوذ را معنادار و غیرقابل اغماض دانستند.

ضرایب نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس

جدول (۵) مقادیر ضرایب نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس را که توسط مدل WinSRFR تخمین زده شده است، نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در مزرعه E با افزایش شماره رخداد آبیاری، میانگین ضریب k کاهش یافت و ضریب a تقریباً بدون تغییر باقی ماند. ضریب f_0 در آبیاری اول مقدار زیادی داشت و در آبیاری دوم کاهش یافت و در آبیاری سوم اندکی افزایش نشان داد. در مزرعه F ضرایب a و f_0 با افزایش شماره رخداد آبیاری کاهش یافتند در حالی که ضریب k در آبیاری اول بیش‌ترین مقدار را دارا بود و در آبیاری سوم کاهش یافته و

جدول ۵- مقادیر تخمینی ضرایب نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس توسط مدل WinSRFR

مزرعه	شاخص	k	a	f_0
E	حداکثر	۲۸/۷۰۰	۰/۹۹۰	۱/۱۱۴
	حداقل	۰/۱۳۰	۰/۰۰۱	۰/۰۹
	میانگین کل	۲/۹۶۷	۰/۳۹۳	۰/۳۹۸
	میانگین آبیاری اول	۶/۵۹۰	۰/۳۹۳	۰/۳۷۹
	میانگین آبیاری دوم	۱/۵۵۸	۰/۳۹۱	۰/۲۴۸
	میانگین آبیاری سوم	۰/۷۵۲	۰/۳۹۶	۰/۲۶۶
F	حداکثر	۶/۵۰۰	۰/۹۹۹	۰/۹۶۰
	حداقل	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۶۴
	میانگین کل	۱/۸۸۳	۰/۳۷۰	۰/۳۱۷
	میانگین آبیاری اول	۲/۸۲۰	۰/۳۹۸	۰/۴۰۶
	میانگین آبیاری دوم	۱/۲۲۰	۰/۳۷۹	۰/۳۰۳
	میانگین آبیاری سوم	۱/۶۱۰	۰/۳۳۴	۰/۲۴۳

مقادیر ضریب k کاهش و توان معادله نفوذ و سرعت نفوذ پایه افزایش می‌یابد. کازرونیان و همکاران (۱۳۹۸) رابطه دبی و ضریب a را معنادار بیان کردند. ضیایی و همکاران (۱۳۹۵) و کازرونیان و همکاران (۱۳۹۸) هم در بررسی رابطه k و دبی، این دو پارامترها مستقل از هم گزارش کردند که با نتایج این تحقیق که رابطه این دو پارامتر را در سطح ۵ درصد معنادار دانسته است، در تضاد می‌باشد.

بررسی همبستگی ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف-لوئیس با دبی ورودی و رطوبت قبل از آبیاری در جدول (۶) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که همبستگی ضرایب a و f_0 با دبی ورودی در سطح یک درصد و ضریب k با دبی در سطح ۵ درصد معنادار بود اما رطوبت اولیه خاک با هیچ‌کدام از این ضرایب همبستگی خاصی نشان نداد. نتایج همچنین نشان داد که دبی ورودی با ضریب k رابطه معکوس و با ضرایب a و f_0 رابطه مستقیم داشت. در واقع با افزایش دبی ورودی

جدول ۶- نتایج آنالیز همبستگی (پیرسون) پارامترها توسط SPSS

Correlations			
پارامتر	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	رطوبت اولیه (درصد وزنی)	
ضریب پیرسون	*-۰/۲۶۵	-۰/۱۶۸	
Sig. (2-tailed)	۰/۰۱۴	۰/۱۴۲	k
تعداد نمونه	۸۴	۸۴	
ضریب پیرسون	**۰/۳۹۰	۰/۰۱۳	
Sig. (2-tailed)	۰/۰۰۰	۰/۹۰۹	a
تعداد نمونه	۸۴	۸۴	
ضریب پیرسون	**۰/۳۷۴	-۰/۱۴۷	
Sig. (2-tailed)	۰/۰۰۱	۰/۱۹۲	f_0
تعداد نمونه	۸۴	۸۴	

*. معناداری در سطح ۵ درصد
 **. معناداری در سطح یک درصد

نتیجه گیری

در این مطالعه، کارایی روش تخمین معکوس ضریب زبری مانینگ و پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس با استفاده از مدل WinSRFR در آبیاری جویچه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از واسنجی دستی مقادیر این پارامترها به گونه‌ای تعیین گردید که به صورت هم‌زمان خطای تخمین زمان پیشروی، زمان پسروی و حجم آب نفوذ یافته حداقل شود. نتایج نشان داد که مدل با دقت بسیار بالایی زمان پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته را برآورد کرد. نتایج همچنین نشان داد که مدل در تخمین زمان پیشروی و پسروی در آبیاری اول نسبت به آبیاری‌های بعدی دقت کمتری داشت.

ضریب زبری در آبیاری اول بیش‌ترین مقدار را داشت و پس از آن با افزایش شماره رخداد آبیاری، ضریب زبری مانینگ کاهش یافت. ارزیابی اثر دبی و رطوبت اولیه بر ضریب زبری مانینگ نشان از کاهش ضریب زبری بر اثر افزایش دبی و رطوبت اولیه داشت. نتایج همچنین نشان داد که همبستگی ضرایب a و f_0 با دبی ورودی در سطح یک درصد و ضریب k با دبی در سطح ۵ درصد معنادار بود اما رطوبت اولیه خاک با هیچ‌کدام از این ضرایب همبستگی خاصی نشان

نداد.

با توجه به تأثیرپذیری ضریب زبری و ضرایب نفوذ از پارامترهای مختلف هیدرولیکی و مزرعه‌ای، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات مشابهی با در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر (نظیر بافت خاک، پوشش گیاهی، سطح مقطع، شیب، اندازه و تعداد کلوخه‌ها) صورت پذیرد تا علاوه بر تعیین کارایی مدل در این شرایط، داده‌های جامع‌تری در ارتباط با بازه تغییرات ضریب زبری و پارامترهای نفوذ جمع‌آوری گردد.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی پارک علم و فناوری دانشگاه تهران از این تحقیق در قالب اعتبار شماره ۵۸۸۸۶۵۶ قدردانی می‌گردد.

منابع

برادران، ر. ۱۳۸۹. بررسی اثر عملیات تهیه زمین بر روی ضرایب هیدرودینامیک خاک در آبیاری جویچه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

2016. The potential of precision surface irrigation in the Indus Basin Irrigation System. *Irrigation Science*. 34(5): 379–396. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0509-5>
- Bahmani, O., Akhavan, S., Khoramian, M. and Gholizadeh Khalteh, G. 2020. Effect of different tillage methods and furrow spacing on soil hydraulic characteristics in furrow irrigation. *Irrigation Sciences and Engineering*. 43(1): 145–156. <https://doi.org/10.22055/jise.2018.24226.1712>
- Bautista, E., Clemmens, A. J. and Strelkoff, T. S. 2009. Structured application of the two-point method for the estimation of infiltration parameters in surface irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 135(5): 566–578. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000054](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000054)
- Bautista, Eduardo, Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. and Niblack, M. 2009. Analysis of surface irrigation systems with winsrfr—example application. *Agricultural Water Management*. 96(7): 1162–1169. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.009>
- Bautista, Eduardo, Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. and Schlegel, J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*. 96(7): 1146–1154. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.007>
- Bo, C., Zhu, O. and Shaohui, Z. 2012. Evaluation of hydraulic process and performance of border irrigation with different regular bottom configurations. *Journal of Resources and Ecology*. 3(2): 151–160. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.02.007>
- Bogel, T., Osinenko, P. and Herlitzius, T. 2016. Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis. *Soil & Tillage Research*. 159: 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.004>
- Burguete, J., Lacasta, A. and García-Navarro, P. 2014. SURCOS: A software tool to simulate irrigation and fertigation in isolated furrows and furrow networks. *Computers and Electronics in Agriculture*. 103: 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.004>
- Childs, j. I., Wallender, W. W. and Hopmans, W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 119(1): 74–90.
- Chow, V. T. 1959. open-channel hydraulics. McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- Clemmens, A. J., Eisenhauer, D. E., and Maheshwari, B. L. 2001. Infiltration and roughness equations for surface irrigation: how form influences estimation. ASAE Meeting Paper No. 01-2255, 1–19.
- Dewedar, O. M., Mehanna, H. M., and El-shafie, A. F. 2019. Validation of winsrfr for some hydraulic
- رضائی اعتدالی، ه.، لیاقت، ع.، و عباسی، ف. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل Evaluate برای تخمین ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. ۱۰(۳): ۸۳–۹۴.
- زرعکانی، ک.، رضائی اعتدالی، ه.، و دانش کار آراسته، پ. ۱۳۹۸. برآورد ضرایب نفوذ و ضریب زبری مانینگ در دو رژیم جریان پیوسته و کاهشی. *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*. ۹(۲): ۸۹–۱۰۱.
- ضیایی، غ.، عباسی، ف.، بابا زاده، ح.، و کاوه، ف. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات زمانی ضرایب نفوذ آب در خاک در آبیاری جویچه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۷(۲): ۲۲۹–۲۳۶.
- طباطبایی، س. ح.، فرداد، ح.، نیشابوری، م.، و لیاقت، ع. ۱۳۸۵. مدل شبیه‌سازی تغییرات زمانی معادله نفوذ کوستیاکف-لوئیس در دو مدیریت زراعی خاک‌های درز و ترک‌دار. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*. ۱۰(۱): ۵۵–۶۸.
- کارزونیان، س. م.، عباسی، ف.، و صدقی، ح. ۱۳۹۶. مطالعه آماری تغییرات پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکف-لوئیس در آبیاری جویچه‌ای طی سه فصل زراعی. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۲۴(۴): ۸۳–۱۰۱.
- مکاری قهرودی، ا.، لیاقت، ع.، و نحوی نیا، م. ج. ۱۳۹۲. کاربرد مدل WinSRFR3.1 در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۷(۱): ۵۹–۶۷.
- ناصری، ا. ۱۳۹۵. تحلیل آماری ضریب زبری مانینگ در کانال‌های خاکی بدون پوشش گیاهی در شبکه آبیاری و زهکشی مغان. *نشریه آب و خاک*. ۳۰(۶): ۱۸۰۸–۱۸۱۹. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i6.41146>
- Abbasi, F., Shoostari, M. M. and Feyen, J. 2003. Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(3): 208–213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:3\(208\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:3(208))
- Adamala, S., Raghuvanshi, N. S. and Mishra, A. 2014. Development of surface irrigation systems design and evaluation software (SIDES). *Computers and Electronics in Agriculture* 100: 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.11.004>
- Amiri, M. J., Bahrami, M., Hamidifar, H. and Eslamian, S. 2016. Modification of furrow Manning's roughness coefficient estimation by finite difference technique under surge and continuous flow. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 6(3): 226–237. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.077390>
- Anwar, A. A., Ahmad, W., Bhatti, M. T. and Ul Haq, Z.

- performance and water saving in Hetao, Yellow River basin: Issues to support irrigation systems modernisation. *Biosystems Engineering*. 136: 102–116.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.05.010>
- Nie, W.-B., Li, Y.-B., Zhang, F., Dong, S.-X., Wang, H. and Ma, X.-Y. 2018. A method for determining the discharge of closed-end furrow irrigation based on the representative value of Manning's roughness and field mean infiltration parameters estimated using the ptf at regional scale. *Water*, 10(12), 1825.
<https://doi.org/10.3390/w10121825>
- Ramezani Etedali, H., Liaghat, A. and Abbasi, F. 2012. Evaluation of the evaluate model for estimating Manning's roughness in furrow irrigation. *Irrigation and Drainage*. 61(3): 410–415.
<https://doi.org/10.1002/ird.650>
- Salahou, M. K., Jiao, X. and Lü, H. 2018. Border irrigation performance with distance-based cut-off. *Agricultural Water Management*, 201(November 2016), 27–37.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.014>
- Sayari, S., Rahimpour, M. and Zounemat-Kermani, M. 2017. Numerical modeling based on a finite element method for simulation of flow in furrow irrigation. *Paddy and Water Environment*. 15(4): 879–887.
<https://doi.org/10.1007/s10333-017-0599-6>
- Sepaskhah, A. R. and Bonder, H. 2002. Estimation of Manning roughness coefficient for bare and vegetated furrow irrigation. *Biosystems Engineering*, 83(3), 351–357.
<https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0092>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E. and Singh, V. P. 2019. Development of an analytical method for estimating Manning's coefficient of roughness for border irrigation. *Irrigation Science*. 37(4): 523–531.
<https://doi.org/10.1007/s00271-019-00631-9>
- Siyal, A. A., Mashori, A. S., Bristow, K. L. and van Genuchten, M. T. 2016. Alternate furrow irrigation can radically improve water productivity of okra. *Agricultural Water Management*. 173: 55–60.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.026>
- Walker, W. R. 1987. *Surface irrigation theory and practice* (1st ed.). <https://hdl.handle.net/10568/36729>
- Walker, W. R. 2003. *SIRMOD III surface irrigation simulation, evaluation and design guide and technical documentation*. Utah State University.
- Walker, W. R. 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(2): 129–136.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(129))
- Weibo, N., Liangjun, F. and Xiaoyi, M. 2012. Estimated infiltration parameters and Manning roughness in parameters of furrow irrigation in egypt. *Plant Archives*. 19(2): 2108–2115.
- Ebrahimian, H. 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 18(6): 1904–1911.
<https://doi.org/10.1007/s12205-014-1343-z>
- Ebrahimian, H. and Liaghat, A. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil and Water Research*, 6(2), 91–101.
- Gillies, M. H. and Smith, R. J. 2015. SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrigation Science*. 33(5): 339–355.
<https://doi.org/10.1007/s00271-015-0470-8>
- González, C., Cervera, L. and Moret-Fernández, D. 2011. Basin irrigation design with longitudinal slope. *Agricultural Water Management*. 98(10): 1516–1522.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.007>
- Grassi, C. J. 1972. *Infiltration characteristics heavy-textured soil*. wageningen.
- Harun-ur-Rashid, M. 1990. Estimation of Manning's roughness coefficient for basin and border irrigation. *Agricultural Water Management*. 18: 29–33.
- Jurriens, M., Zerihun, D., Boonstra, J. and Feyen, J. 2001. SURDEV: surface irrigation software. Design, operation, and evaluation of basin, border, and furrow irrigation. *International Institute for Land Reclamation and Improvement*.
- Kamali, P., Ebrahimian, H. and Parsinejad, M. 2018. Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows. *Irrigation Science*. 36(6): 339–348. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0593-9>
- Kassem, M. A. and Ghonimy, M. I. 2011. Determination of Manning roughness coefficient for border irrigation system. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 28(2): 302–323.
<https://doi.org/10.21608/mjae.2011.105095>
- Mailapalli, D. R., Raghuvanshi, N. S., Singh, R., Schmitz, G. H. and Lennartz, F. 2008. Spatial and temporal variation of Manning's roughness coefficient in furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 134(2): 185–192.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:2\(185\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(185))
- Mazarei, R., Soltani Mohammadi, A., Ebrahimian, H. and Naseri, A. A. 2021. Temporal variability of infiltration and roughness coefficients and furrow irrigation performance under different inflow rates. *Agricultural Water Management*. 245: 106465.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106465>
- Miao, Q., Shi, H., Gonçalves, J. M. and Pereira, L. S. 2015. Field assessment of basin irrigation

on temporal variation of infiltration and roughness. *Agricultural Water Management*, 214(23), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.003>.

border irrigation. *Irrigation and Drainage*. 61(2). 231–239. <https://doi.org/10.1002/ird.624>

Xu, J., Cai, H., Saddique, Q., Wang, X., Li, L., Ma, C. and Lu, Y. 2019. Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based

Inverse Estimation of Manning Roughness Coefficient Using WinSRFR Model and Investigating Its Variations in Different Irrigation Events

H. Rezaei Rad¹, H. Ebrahimian^{2*}, A. Liaghat³

Received: Jan.26, 2021

Accepted: Mar.17, 2021

Abstract

Various methods have been developed to estimate the Manning roughness coefficient, of which the inverse method is widely used. This study aimed to estimate the inverse of Manning roughness coefficient using the WinSRFR model and estimating infiltration parameters of Kostiakov-Lewis equation in furrow irrigation and to investigate their variations in different irrigation events. For this purpose, two inflow discharges (average 0.27 and 0.53 liters per second), two irrigation cycles (5 and 10 days), two fields with different soil texture (E and F) in three irrigation events (first to third) were considered in three replications. Model error in estimating advance and recession time, and volume of infiltrated water was investigated using statistical indices including RE, RMSE and NRMSE. The values of these indices in estimating the advance time in the field E were 0.44%, 0.21 min and 1.11% in the total three irrigation events, respectively. Also, the values of these indices were 1.58%, 5.25 min and 2.78% in the recession time and 0.59%, 5.5 liters and 0.50% in the volume of infiltrated water, respectively. There was less error in estimating the advance and recession time in the field F which showed the excellent accuracy of the inverse estimation method using the WinSRFR model in determining the Manning roughness coefficient. The results also showed that in the field E, the minimum and maximum values of Manning roughness coefficient were estimated as 0.017 and 0.34 and on average 0.075 in the total three irrigation events, respectively. In the field F, the minimum, maximum and the average values of Manning roughness coefficient in three irrigation events were 0.015 and 0.09 and 0.041, respectively.

Keywords: Advance, Furrow irrigation, Infiltrated water volume, Recession

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Associate professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: ebrahimian@ut.ac.ir)