



Presenting empirical equations for estimating Manning roughness coefficient in furrow irrigation in different irrigation phases

Hadi Rezaei Rad¹ | Hamed Ebrahimian² | Abdolmajid Liaghat³

1. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Hadi.rezaei@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Ebrahimian@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Aliaghat@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: Apr. 23, 2024</p> <p>Revised: May. 29, 2024</p> <p>Accepted: June. 10, 2024</p> <p>Published online: Sep. 2024</p> <p>Keywords: Manning Roughness Coefficient, Advance Phase, Storage Phase, WinSRFR, SIPAR_ID.</p>	<p>This study aimed to estimation of the Manning roughness coefficient (n) in different phases and events of irrigation using empirical relations. For this purpose, six inflow rates in two flow categories, low and high, three consecutive irrigation events, advance and storage phases, two irrigation intervals and two types of soil texture were investigated. Next, the correlation between roughness and these parameters was investigated using Pearson and Kendall statistical tests. Then, using its results, regression equations were developed to estimate Manning's n in different irrigation phases. The results indicated that the advance time and the size of clods before irrigation had a high correlation and the slope, initial soil moisture and the size of clods after irrigation had a low correlation with the Manning's n data in the whole irrigation event. The roughness coefficient of the advance phase also had the highest correlation with the advance time. The highest and lowest correlation coefficients between the parameters and roughness coefficient of the storage phase were related to advance time and inflow rate with values of 0.65 and -0.31, respectively, which shows high correlation and direct relationship between advance time and roughness and weak correlation and inverse relationship between flow rate and roughness. The average values of R^2, RMSE, and NRMSE indices in the provided relationships were 0.87, 0.014, and 26.97%, respectively, which indicated the appropriate accuracy of these relationships. Finally, it was suggested to conduct similar studies in different field and hydraulic conditions so that the presented relations are more comprehensive and can be recommended in other fields since the development of such relations can increase the speed of roughness estimation in different phases and the ease of using it.</p>

Cite this article: Rezaei Rad, H., Ebrahimian, H., & Liaghat, A. (2024) Presenting empirical equations for estimating Manning roughness coefficient in furrow irrigation in different irrigation phases, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (7), 1079-1094.

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375555.669696>



ارائه روابط تجربی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری جویچه‌ای

هادی رضایی راد^۱ | حامد ابراهیمیان^۲ | عبدالمجید لیاقت^۳۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Hadi.rezaei@ut.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Ebrahimian@ut.ac.ir۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Aliaghat@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این تحقیق با هدف تخمین ضریب زبری مانینگ در فازها و رخدادهای مختلف آبیاری با استفاده از روابط تجربی انجام شد. بدین منظور شش مقدار دبی ورودی در دو دسته دبی کم و زیاد، سه رخداد آبیاری متوالی، فازهای پیشروی و ذخیره، دو دور آبیاری و دو نوع بافت خاک مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه همبستگی بین زبری و این پارامترها با استفاده از آزمون‌های آماری پیرسون و کندال بررسی شد. سپس با استفاده از نتایج آن، روابطی رگرسیونی برای تخمین زبری در فازهای مختلف آبیاری توسعه یافت. نتایج نشان داد که زمان پیشروی و اندازه کلوخه‌ها قبل از آبیاری همبستگی زیاد و شیب، رطوبت و اندازه کلوخه‌های پس از آبیاری همبستگی پایین با داده‌های زبری مانینگ در کل رخداد آبیاری داشتند. زبری فاز پیشروی هم بیشترین همبستگی را با زمان پیشروی داشت. بیشترین و کمترین ضریب همبستگی بین پارامترها و ضریب زبری فاز ذخیره مربوط به زمان پیشروی و دبی ورودی با مقدار ۰/۶۵ و ۰/۳۱- بود که نشان از همبستگی بالا و ارتباط مستقیم زمان پیشروی و همبستگی ضعیف و رابطه معکوس دبی و زبری در این حالت داشت. میانگین مقادیر شاخص‌های R^2 ، RMSE و NRMSE در روابط ارائه شده به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۱۴ و ۲۶/۹۷ درصد بود که نشان از دقت مناسب این روابط داشت. در نهایت پیشنهاد شد تا تحقیقات مشابهی در شرایط متفاوت مزرعه‌ای و هیدرولیکی انجام شود تا روابط ارائه شده جامعیت بیشتری یابند و قابل توصیه در مزارع دیگر باشند چراکه توسعه چنین روابطی می‌تواند به افزایش سرعت تخمین زبری در فازهای مختلف و سهولت استفاده از آن کمک نمایند.
واژه‌های کلیدی: ضریب زبری مانینگ، فاز پیشروی، فاز ذخیره، WinSRFR، SIPAR_ID	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۱	
تاریخ انتشار: مهر ۱۴۰۳	

استاد: رضایی راد، هادی؛ ابراهیمیان، حامد؛ و لیاقت، عبدالمجید (۱۴۰۳). ارائه روابط تجربی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری جویچه‌ای، مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۷)، ۱۰۷۹-۱۰۹۴.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375555.669696>

مقدمه

معادله مانینگ یک رابطه تجربی است که معمولاً برای محاسبه جریان آب در کانال‌های باز مورد استفاده قرار می‌گیرد (رضایی راد و همکاران، ۱۴۰۰). با این حال، کاربرد آن در بررسی هیدرولیک جریان در آبیاری سطحی خصوصاً در جویچه‌های آبیاری به دلیل فرضیاتی که برای آن در نظر گرفته شده است، با محدودیت‌هایی مواجه است. در این معادله اولاً فرض شده که جریان ماندگار و یکنواخت است (GiMey et al., 1991; Pradhan & Khatua, 2018) پس باید دبی در زمان‌های مختلف ثابت بوده و سطح مقطع جریان نیز در طول مسیر بدون تغییر باشد. این در حالی است که در جویچه‌های آبیاری جریان به دلیل نفوذ آب در خاک و تغییرات شکل آن‌ها در طول مسیر (Maheshwari & McMahon, 1992)، غالباً غیر ماندگار و غیریکنواخت است. ثانیاً، در معادله مانینگ فرض شده مقطع جریان منشوری است (Gill, 1976; Nematollahi & Abedini, 2020; Srivastava, 2003) که در جویچه‌ای آبیاری به دلیل عملیات شخم و وجود کلوخه‌ها غالباً مقطع غیر منشوری است. علاوه بر این، معادله مانینگ عمدتاً برای جریان‌های عمیق ایجاد شده‌اند و کاربرد این معادله در آبیاری سطحی که عمق جریان کم است و خصوصیات جریان به دلیل عناصر ناهموار در بستر تغییرات زیادی را نشان می‌دهد، مورد تردید است (Maheshwari, 1992; Maheshwari & McMahon, 1992; Maheshwari, 1992). با این حال، به دلیل سهولت استفاده و عدم وجود رابطه جایگزین، محققان از این رابطه برای توصیف وضعیت هیدرولیکی جریان در آبیاری سطحی پس از تثبیت نفوذ آب در خاک (رسیدن به نفوذ پایه) که غالباً در فاز ذخیره رخ می‌دهد، استفاده می‌کنند (Esfandiari & Maheshwari, 1998; Sepaskhah & Bondar, 2002). در سایر فازهای آبیاری مثل پیشروی با توجه به اینکه میزان نفوذ آب در خاک رو به کاهش و ناپایدار بوده و تعیین عمق جریان و در نتیجه سطح مقطع و محیط خیس شده عملاً غیرممکن است، صحت استفاده از معادله مانینگ در شبیه‌سازی جریان بیش از پیش ابهام‌زا است. لذا استفاده مستقیم از رابطه مانینگ برای تخمین ضریب زبری مانینگ در دیگر فازها احتمالاً به نتایج غیرقابل اتکایی منجر می‌شود. این پیچیدگی‌ها سبب شده تا محققین ضریب زبری مانینگ را با پذیرش خطاهای احتمالی در تخمین، به صورتی عددی ثابت در طول هر رخداد آبیاری در نظر بگیرند (Seyedzadeh et al., 2019) و تغییرات آن را طی یک رخداد آبیاری کمتر مورد توجه قرار دهند. این در حالی است که اگر مقدار ضریب زبری مانینگ بیش (کم‌تر) از مقدار واقعی برآورد شود با توجه به اینکه زبری نیرویی مقاوم در مقابل جریان است، دبی کمتر (بیش‌تر) از مقدار واقعی برآورد شده و منجر به بروز خطاهای زیادی در شبیه‌سازی و طراحی آبیاری سطحی می‌گردد (Clemmens et al., 2001)؛ لذا لازم است تا با استفاده از روش‌های گوناگون و فرضیاتی که به ساده‌سازی پیچیدگی‌های تخمین زبری منتهی می‌شود، تغییرات زمانی ضریب زبری طی یک رخداد آبیاری بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این به نظر می‌رسد برای درک بهتر نحوه تغییرات، بررسی عوامل مؤثر بر زبری در فازهای مختلف آبیاری هم ضروری است تا امکان توسعه روابطی تجربی برای تخمین راحت‌تر و سریع‌تر آن فراهم گردد.

پیشینه تحقیق

روش‌های مختلفی برای برآورد ضریب زبری توسط محققین توسعه یافته است که این روابط در پنج دسته روش‌های تصویری، جداول تجربی، روابط تجربی، روش مستقیم و روش تحلیلی یا حل معکوس تقسیم‌بندی می‌شوند (عباسی، ۱۳۹۱؛ عباسی و ابراهیمیان، حامد، ۱۴۰۲). بر مبنای این روش‌ها، محققین تلاش کردند تا با توسعه مدل‌های مختلفی نظیر: SURDEV (Jurriens et al., 2001)، SIRM (Walker, 2003)، WinSRFR (Bautista, Clemmens, Strelkoff, et al., 2009)، SIDES (Adamala et al., 2014)، SURCOS (Burguete et al., 2014) و SISCO (Gillies & Smith, 2015) تخمین پارامترهای معادلات نفوذ و ضریب زبری را آسان‌تر نمایند. همزمان با توسعه مدل‌ها تحقیقات بسیاری به منظور ارزیابی دقت و کارایی آن‌ها و بررسی تغییرات ضریب زبری در شرایط مختلف مزرعه‌ای و در کل رخداد آبیاری صورت پذیرفت (Dewedar et al., 2019; Etedali et al., 2011; Kamali et al., 2018; Mehri et al., 2023; W. B. Nie et al., 2014a; Tabatabaei & Asadi, 2015; Mailapalli et al., 2008). با اطمینان از کارایی و دقت مدل‌ها محققین تلاش کردند تا تغییرات زمانی ضریب زبری مانینگ را بیش از پیش مورد توجه قرار دهند. به عنوان نمونه، (Mailapalli et al., 2008) سه جویچه آبیاری را برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی ضریب زبری مانینگ مورد مقایسه قرار دادند و بیان کردند که چارک دوم و انتهای جویچه به دلیل فرسایش، بیش‌ترین میزان ضریب زبری مانینگ را در هر دو وضعیت وجود و عدم وجود پوشش گیاهی داراست. دیگر نتایج نیز بیانگر کاهش زبری مانینگ در یک رخداد آبیاری در اثر گذر زمان بود. (Amiri et al., 2016) در بررسی ضریب زبری مانینگ در شرایط دبی ورودی پیوسته و موحی اظهار داشتند که زبری مانینگ در آبیاری اول بیش‌ترین



مقدار را داشت و با افزایش شماره آبیاری مقدار آن کاهش یافت. این کاهش در آبیاری دوم و سوم به ترتیب ۳۲ و ۶۶ درصد بود. همچنین در این تحقیق در سه رخداد آبیاری ابتدایی، مقدار متوسط زبری در جریان پیوسته و موجی به ترتیب ۰/۰۳۵ و ۰/۰۲۸ معرف شد. Mazarei et al. (2021) نیز به مطالعه اثر تغییرات زمانی و دبی‌های ورودی متفاوت بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ و عملکرد آبیاری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب زبری مانینگ در آبیاری سوم بین ۰/۰۳۸ تا ۰/۰۹۱ متغیر بود. این مقادیر در آبیاری پنجم ۰/۰۵۳ تا ۰/۱۱ و در آبیاری هشتم ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۹۹ بود. Ramesh & Ostad-Ali-Askari (2023) هم تغییرات زمانی ضریب زبری مانینگ را در آبیاری جویچه‌های آبیاری با استفاده از آب معمولی، آب مغناطیسی و پساب تصفیه‌شده مورد بررسی قرار دادند و کاهش مقدار ضریب زبری طی یک فصل رشد را تأیید نمودند.

بررسی تغییرات زمانی ضریب زبری با استفاده از نرم‌افزارها و آزمایشات متعدد مزرعه‌ای زمان‌بر و پرهزینه است. این موضوع سبب شده تا محققان به دنبال یافتن رابطه ضریب زبری مانینگ و پارامترهای مختلف هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی باشند تا در نهایت روابطی تجربی برای تخمین ضریب زبری ارائه نمایند (Mailapalli et al., 2008; Sepaskhah & Bondar, 2002). به عنوان نمونه، Mwendera & Feyen (1992) بیان کردند که زبری سطح خاک با سرعت پیشروی، پسروی و عمق نفوذ آب در جویچه مرتبط است. Xu et al. (2019) نیز زمان پیشروی آب در نوارهای آبیاری را به مقدار ضریب زبری مانینگ و ضریب K در معادله کوستیاکف وابسته دانستند. این در حالی است که Nie et al. (2014, 2018)، Salahou et al. (2018) و Smith et al. (2018) رابطه ضریب زبری و زمان پیشروی را معنادار ندانستند. Ebrahimian (2014)، Ramezani Etedali et al. (2012) و Mailapalli et al. (2008) هم ضریب زبری و زمان پیشروی را معنادار ندانستند. Sepaskhah & Bondar (2002) دبی ورودی و شیب را پارامتری مهم و تأثیرگذار بر ضریب زبری مانینگ معرفی کردند و دبی را نسبت به شیب مؤثرتر دانستند. Kamali et al. (2018) و Mazarei et al. (2020) هم رابطه ضریب زبری و دبی ورودی را معکوس و ضعیف گزارش کردند این در حالی است که Esfandiari & Maheshwari (1998) بیان کردند که در دبی‌های پایین، ضریب زبری با تغییر در دبی تغییرات اندکی داشت ولی با افزایش دبی (بیش از ۰/۷ لیتر بر ثانیه)، ضریب زبری تقریباً بدون تغییر باقی ماند. Enciso-Medina et al. (1998) بیان کردند که محتوی آب موجود در خاک به سه طریق نفوذ آب در جویچه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اول اینکه مرطوب بودن خاک سبب تغییر در گرادیان هیدرولیکی بین جویچه و توده خاک اطراف آن در ابتدای آبیاری می‌شود. همچنین هدایت هیدرولیکی خاک به شکل مستقیم از رطوبت خاک تأثیر پذیرفته و سرعت نفوذ را تغییر می‌دهد. در نهایت رطوبت بر درز و شکاف‌های ایجادشده در کف جویچه هم نقش مؤثری دارد. لذا ضریب زبری مانینگ که با مقدار نفوذ آب در خاک در ارتباط است (Katopodes et al., 1990)، با تغییر رطوبت اولیه موجود در خاک تغییر می‌کند (Behzad Izadi & W. W. Wallender, 1985; Kamali et al., 2018). علاوه بر این پارامترها، اندازه و تعداد کلوخه‌ها نیز می‌تواند بر مقدار ضریب زبری مانینگ مؤثر باشد چرا که با خرد شدن و حل شدن کلوخه‌ها در اثر آبیاری، سرعت جریان افزایش و در نتیجه مقاومت در برابر جریان و زبری کاهش می‌یابد (Amiri et al., 2016; Bautista, Clemmens, Strelkoff, et al., 2009; Clemmens, 2009; Kassem & Ghonimy, 2011; Li & Zhang, 2001; Mailapalli et al., 2008; Mwendera & Feyen, 1992).

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، بررسی تغییرات زمانی ضریب زبری با استفاده از نرم‌افزارها و آزمایش‌های متعدد مزرعه‌ای زمان‌بر و پرهزینه است. لذا به نظر می‌رسد استفاده از روابط تجربی برای تخمین ضریب زبری مانینگ با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی می‌تواند راهگشا باشد. علاوه بر این با دقت در تحقیقات ارائه‌شده می‌توان دریافت که این تحقیقات غالباً به دنبال بررسی روند تغییرات زبری طی رخداد‌های آبیاری مختلف بودند این در حالی است که ضریب زبری مانینگ طی یک رخداد آبیاری در طول زمان به دلیل نرم شدن کلوخه‌ها و پر شدن شکاف‌های بستر شیار کاهش می‌یابد (Clemmens et al., 2001)، در نتیجه ضریب زبری در ابتدای آبیاری و در فاز پیشروی نسبت به سایر مراحل آبیاری مقدار بیشتری خواهد داشت لذا در نظر گرفتن یک ضریب زبری ثابت در تمام فازهای آبیاری می‌تواند به خطاهای زیادی در تخمین این پارامتر منجر شود. اهمیت این موضوع سبب شد تا این تحقیق با هدف توسعه روابط رگرسیونی برای تخمین زبری در فازهای مختلف آبیاری با استفاده از پارامترهای مختلف هیدرولیکی و غیرهیدرولیکی، انجام شود.

روش‌شناسی پژوهش

با توجه به اینکه هدف این تحقیق دستیابی به رابطه‌ای برای تخمین ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای (جویچه‌های لخت) در شرایط مختلف مزرعه بود، تیمارها باید به گونه‌ای انتخاب می‌شدند که اثر اکثر مؤلفه‌های مؤثر بر ضریب زبری نظیر پارامترهای طراحی (طول و شیب جویچه)، پارامترهای هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی (دبی ورودی، سطح مقطع، رطوبت قبل از آبیاری و غیره) و فازها و

رخدادهای مختلف آبیاری را در برگیرند. در نتیجه شش مقدار دبی ورودی (متناسب با شرایط جویچه و حداکثر دبی غیر فرسایشی) شامل ۳ دبی ورودی کم (با میانگین ۰/۲۷ لیتر بر ثانیه) و ۳ دبی زیاد (با میانگین ۰/۵۷ لیتر بر ثانیه)، سه شماره (نوبت) آبیاری (آبیاری اول تا سوم)، فازهای پیشروی و ذخیره، دو دور آبیاری (۵ و ۱۰ روزه) و دو نوع بافت خاک مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر ضریب زبری مانینگ چشم‌پوشی شد و تمام علف‌های هرز قبل از هر اندازه‌گیری از بستر جویچه‌ها حذف شدند.

مشخصات محل و اجرای طرح

این تحقیق در مزرعه آزمایشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج به مختصات $50^{\circ}57'30.2''E$ و $35^{\circ}48'18.5''N$ و با میانگین بارش سالانه ۲۵۱ میلی‌متر، در سال ۱۳۹۶ انجام شد. در این مزرعه دو محل با بافت خاک متفاوت انتخاب شد. مزرعه اول که سال‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته بود، F و مزرعه دوم که چندین سال تحت کشت نبوده، E نام‌گذاری شد و آزمایش‌ها در هر دو محل انجام شد. ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه که شامل بافت خاک، شوری و اسیدیته بود، 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)
F	۰-۰/۲	Clay Loam	۱/۵۸	۷/۲۳	۰/۱۸۲	۰/۰۸۷	۱/۵۰
	۰/۲-۰/۴	Clay Loam	۱/۰۳	۷/۳۷	۰/۱۷۵	۰/۰۸۱	۱/۴۵
	۰/۴-۰/۶	Sandy Loam	۰/۹۳	۷/۱۱	۰/۱۴۲	۰/۰۶۰	۱/۴۷
E	۰-۰/۲	Silty Clay Loam	۱/۶۳	۷/۲۰	۰/۱۷۲	۰/۰۸۰	۱/۵۱
	۰/۲-۰/۴	Silty Clay Loam	۱/۲۳	۷/۲۵	۰/۱۵۵	۰/۰۶۹	۱/۴۸
	۰/۴-۰/۶	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.

در ابتدای مزرعه، مخزنی به حجم ۲۰۰۰ لیتر به منظور کاهش نوسانات فشار آب قرار داده شد و آب توسط لوله‌های پلی‌اتیلن به ابتدای محل نمونه‌برداری انتقال یافت. در هر دو زمین، 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. به منظور اندازه‌گیری دبی ورودی و خروجی، WSC 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 به منظور اندازه‌گیری عمق آب در طول آبیاری، نصب و هم‌زمان با 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 (۰-۱۵ سانتی‌متر) سه نمونه برداشت شد و پس از تعیین رطوبت، میانگین آن مورد استفاده قرار گرفت.

سطح مقطع جویچه (A_f) 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. سطح مقطع (A_w) و محیط خیس شده (P_w) جریان در هر جویچه نیز با استفاده از خط‌کش‌های تعیین عمق جریان و مقطع سنج در زمان‌های مختلف تعیین شد (رضایی راد و همکاران، ۱۴۰۰).

تعیین ضریب زبری مانینگ

در این تحقیق ضریب زبری مانینگ در مراحل پیشروی، ذخیره و کل رخدادهای آبیاری به طور جداگانه تعیین شد. بدین منظور در مرحله پیشروی، با وجود ابهاماتی که در استفاده از معادله مانینگ وجود داشت، به دلیل نبود رابطه‌ای مناسب و جایگزین برای تخمین ضریب زبری مانینگ از مدل SIPAR_ID که از داده‌های فاز پیشروی، دبی ورودی و عمق جریان در یک نقطه و در زمان‌های مختلف استفاده می‌کند (Rodríguez & Martos, 2010)، استفاده شد. چرا که این داده‌های ورودی انطباق بیشتری با فاز پیشروی دارند. بدین منظور

در این مدل از داده‌های مربوط به دبی ورودی و عمق جریان تا انتهای زمان پیشروی به عنوان مقادیر ورودی در مدل مذکور استفاده شد. همچنین برای بررسی دقت تخمین ضریب زبری مانینگ در این فاز آبیاری، زمان پیشروی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 (رابطه ۶)، $RMSE$ (رابطه ۴) و $NRMSE$ (رابطه ۵) مورد مقایسه قرار گرفتند.

در فاز ذخیره با توجه به اینکه تقریباً پس از گذشت یک ساعت از شروع آبیاری، سرعت نفوذ آب در خاک مناطق مورد مطالعه ثابت شده و مقدار دبی خروجی از جویچه‌ها (به شرط ثابت بودن دبی ورودی) بدون تغییر باقی می‌ماند، فرض شد که شرط جریان یکنواخت در جویچه برقرار است و ضریب زبری مانینگ توسط معادله مانینگ (رابطه ۱) محاسبه شده و به عنوان نماینده فاز ذخیره در نظر گرفته شد (جزئیات بیشتر در (رضایی راد و همکاران، ۱۴۰۰)).

$$Q = \frac{A}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times S_0^{\frac{1}{2}} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن: Q : دبی (مترمکعب بر ثانیه)، A : سطح مقطع جریان (مترمربع)، n : ضریب زبری مانینگ (ثانیه بر (متر)^{۱/۳})، R : شعاع هیدرولیکی (متر) و S_0 : شیب کف جویچه می‌باشد.

به منظور افزایش دقت در تخمین ضریب زبری مانینگ در این فاز، ضریب زبری در ابتدا و انتهای جویچه به صورت مجزا محاسبه شد. بدین منظور، با استفاده از مقطع سنج ابتدای جویچه و دبی ورودی، ضریب زبری در بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای تعیین و میانگین آن در کل فاز ذخیره تعیین شد. به طریق مشابه، ضریب زبری مانینگ در انتهای جویچه با استفاده از دبی خروجی تخمین زده شد و میانگین آن‌ها به عنوان ضریب زبری این فاز گزارش گردید.

از آنجا که استفاده از معادله مانینگ در فاز ذخیره، دقیق‌ترین روش برای محاسبه ضریب زبری مانینگ است (رضایی راد و همکاران، ۱۴۰۰)، دقت این روش برابر با حداکثر دقت ممکن در نظر گرفته شد.

تعیین ضریب زبری مانینگ در کل رخدادهای آبیاری نیز با استفاده از مدل WinSRFR (Bautista, Clemmens, Strelkoff, et al., 2009) انجام شد. در این مدل پس از ورود کلیه داده‌های ورودی، پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف-لوویس (رابطه ۲) f_0 و k (رابطه ۲) ضریب زبری مانینگ به گونه‌ای واسنجی شدند که خطای تخمین زمان پیشروی، حجم آب نفوذ یافته و زمان پسروری حداقل شود.

$$Z = kt^a + f_0t \quad \text{(رابطه ۲)}$$

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.

به منظور بررسی دقت مدل WinSRFR در تخمین ضریب زبری مانینگ در کل رخدادهای آبیاری درصد خطای زمان پیشروی، پسروری و حجم آب نفوذ یافته با استفاده از شاخص‌های آماری RE (رابطه ۶)، $RMSE$ و $NRMSE$ مورد ارزیابی قرار گرفت.

تخمین بهترین رابطه بین ضریب زبری و پارامترهای مختلف

پس از تعیین ضریب زبری مانینگ در فازهای پیشروی، ذخیره و کل آبیاری، رابطه بین تمام پارامترهای مورد بررسی شامل دبی (Q)، رطوبت قبل از آبیاری (M)، شماره رخدادهای آبیاری (IE)، شیب (S_0)، سطح مقطع جویچه (A_f)، سطح مقطع جریان (A_{flow})، محیط خیس شده (P)، سرعت نفوذ نهایی (f_0)، زمان پیشروی ($Tadv$)، زمان پسروری ($Trec$)، EC ، pH ، سایز کلوخه‌ها قبل (S_d) و بعد از آبیاری (S_w) با ضریب زبری مانینگ با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد مطالعه قرار گرفت. ارتباط بین ضریب زبری مانینگ و پارامترهای شماره رخدادهای آبیاری و اندازه کلوخه‌های قبل و بعد از آبیاری با توجه به ماهیت رتبه‌ای بودن آن‌ها، توسط آزمون کندال و سایر پارامترها که ماهیت کمی داشتند توسط آزمون پیرسون بررسی شد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه در نرم‌افزار SPSS رابطه‌هایی برای تخمین ضریب زبری در فاز پیشروی (n_s)، ذخیره (n_d) و کل آبیاری (n_t) با استفاده از پارامترهای مؤثر ارائه شد.

از آنجا که تعیین اندازه و تعداد کلوخه‌ها به صورتی کمی کاری دشوار و تا حدودی غیرممکن بود، شاخصی برای بررسی این پارامتر تعریف شد و قبل و بعد از آبیاری به ترتیب به صورت S_d و S_w نام‌گذاری گردید. برای تخمین این شاخص با استفاده شاسی مخصوصی که محل دوربین و میزان نور در آن ثابت بود، عکس‌هایی از سطح هر جویچه و در پنج نقطه قبل و بعد از آبیاری تهیه شد. سپس این عکس با استفاده از نظرات ۳ نفر از کارشناسان، در سه دسته کلوخه زیاد، متوسط و کم قبل و بعد از آبیاری دسته‌بندی شدند. به منظور انجام محاسبات لازم در SPSS، شاخص اندازه و تعداد کلوخه‌ها قبل از آبیاری (S_d) برای کلوخه‌های زیاد، متوسط و کم، به ترتیب برابر با ۲، ۳ و ۱ و مقدار شاخص S_w نیز برای کلوخه‌های زیاد، متوسط و کم به ترتیب برابر با ۲/۵، ۱/۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد (شکل ۱).



شکل ۱. نمونه‌ای از تصاویر استفاده‌شده برای تعیین شاخص اندازه و تعداد کلوخه‌ها قبل از آبیاری (الف: کلوخه زیاد، ب: کلوخه متوسط، ج: کلوخه کم)

برای بررسی دقت رابطه بین پارامترهای مختلف و ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف، کلیه داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند. بدین منظور ۸۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمون مورد استفاده قرار گرفتند سپس با بررسی شاخص‌های آماری R^2 ، $RMSE$ و $NRMSE$ در داده‌های آموزش و آزمون بهترین معادلات در فازهای پیشروی، ذخیره و کل رخداد آبیاری استخراج شد.

$$RE = \frac{Y_i - X_i}{X_i} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{N \bar{X}}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i \times Y_i) - N \times \bar{X}_t \times \bar{Y}_t}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n X_i^2 - N \times \bar{X}^2)(\sum_{i=1}^n Y_i^2 - N \times \bar{Y}^2)}} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن: x_i : داده‌های اندازه‌گیری شده، Y_i : داده‌های تخمین زده‌شده، N : تعداد کل داده‌های مورد بررسی، \bar{X} : میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و \bar{Y} : میانگین داده‌های تخمین زده‌شده می‌باشد.

نتایج و بحث

مقادیر ضریب زبری مانینگ

میانگین شاخص‌های RE ، $RMSE$ و $NRMSE$ در تخمین فاز پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته در هر دو مزرعه به ترتیب ۰/۵ درصد، ۰/۱ دقیقه، ۱ درصد و ۱/۲ درصد، ۳/۵ دقیقه، ۱/۸ درصد و ۰/۶ درصد، ۵/۴ لیتر، ۰/۵ درصد بودند که نشان از عملکرد بسیار خوب مدل WinSRFR در تخمین ضریب زبری در کل رخداد آبیاری داشت (رضایی راد و همکاران، ۱۴۰۰). مدل SIPAR_ID نیز با میانگین شاخص‌های R^2 ، $RMSE$ و RE به ترتیب برابر با ۰/۹۹۴، ۰/۳۸ دقیقه و ۴/۳۵ درصد عملکرد بسیار خوبی در تخمین ضریب زبری در فاز پیشروی و پارامترهای معادله نفوذ داشت (W.-B. Nie et al., 2018; W. B. Nie et al., 2014; Ramezani Etedali et al., 2011; رضایی و همکاران، ۱۳۸۸؛ زرکانی و همکاران، ۱۳۹۸) هم دقت مدل SIPAR_ID در تخمین ضرایب نفوذ و زبری را قابل قبول و قابل توصیه بیان کردند.

جدول (۲) مقادیر ضریب زبری مانینگ در فاز پیشروی، ذخیره و کل رخداد آبیاری را در هر دو مزرعه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در فاز پیشروی در هر دو مزرعه ضریب زبری در مجموع سه رخداد آبیاری بین ۰/۰۱۷ تا ۰/۶۳۶ متغیر بود و مقدار متوسط آن حدود ۰/۰۸۳ تعیین گردید. میانگین ضریب زبری در فاز ذخیره در آبیاری اول تا سوم به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۹ و ۰/۰۴ و در کل رخداد آبیاری به ترتیب ۰/۰۴۱، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۳۶ بود که نشان از همبستگی بالای ضریب زبری فاز ذخیره و کل رخداد آبیاری داشت. با

توجه به اینکه طول جویچه‌ها ۲۰ متر در نظر گرفته شده بود، نسبت زمان پیشروی به کل زمان آبیاری کم بود لذا تأثیر ضریب زبری این فاز در کل رخدادهای آبیاری ناچیز بود. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که اگر زمان پیشروی نسبت به کل زمان آبیاری کم باشد، می‌توان ضریب زبری فاز ذخیره یا کل رخدادهای آبیاری را با اطمینان خاطر به عنوان نماینده کل رخدادهای آبیاری مورد استفاده قرار داد در غیر این صورت با توجه به اختلاف زیاد ضریب زبری در فاز پیشروی نسبت به دیگر فازها ثابت در نظر گرفتن ضریب می‌تواند منجر به بروز خطاهای زیادی شود. لذا لازم است تا ضریب زبری در فازهای مختلف به صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۲. حداقل، حداکثر و میانگین ضریب زبری مانینگ در رخدادهای آبیاری اول تا سوم در مزارع E و F

مزرعه	شاخص	فاز پیشروی	فاز ذخیره	کل آبیاری	دبی ورودی (l/s)
E	حداکثر	۰/۶۳۶	۰/۳۱۷	۰/۳۴۰	۰/۵۸
	حداقل	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۱۴
	میانگین کل	۰/۱۱۰	۰/۰۷۳	۰/۰۷۵	۰/۲۷
	میانگین در آبیاری اول	۰/۲۱۲	۰/۱۴۰	۰/۱۳۵	۰/۲۶
	میانگین در آبیاری دوم	۰/۰۷۴	۰/۰۵۶	۰/۰۵۳	۰/۲۷
	میانگین در آبیاری سوم	۰/۰۵۲	۰/۰۳۵	۰/۰۳۶	۰/۲۶
F	حداکثر	۰/۱۸۰	۰/۰۹۰	۰/۰۹۰	۰/۹۱
	حداقل	۰/۰۲۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۱
	میانگین کل	۰/۰۶۴	۰/۰۴۱	۰/۰۴۱	۰/۴۷
	میانگین در آبیاری اول	۰/۱۰۱	۰/۰۵۶	۰/۰۵۹	۰/۵
	میانگین در آبیاری دوم	۰/۰۴۴	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	۰/۵۱
	میانگین در آبیاری سوم	۰/۰۵۲	۰/۰۳۶	۰/۰۳۴	۰/۴۳

تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب زبری مانینگ

نتایج دو آزمون آماری پیرسون و کندال نشان داد که ضریب زبری کل رخدادهای آبیاری (Π_t) با پارامترهای دبی ورودی و خروجی، زمان پیشروی، رطوبت، سطح مقطع جریان، اندازه کلوخه‌ها قبل و بعد از آبیاری و شماره رخدادهای آبیاری در سطح ۱ درصد و با شیب کف جویچه در سطح ۵ درصد در ارتباط است. (Pallant, 2010) بیان کرد که اگر ضریب همبستگی عددی بین ۰/۱ تا ۰/۲۹، ۰/۳ تا ۰/۴۹ و ۰/۵ تا ۱ داشته باشد، همبستگی بین پارامترهای مورد بررسی به ترتیب ضعیف، متوسط و بالا خواهد بود. با توجه به مقدار ضریب همبستگی ارائه شده در جدول (۳ و ۴) می‌توان دریافت که زمان پیشروی و اندازه کلوخه‌ها قبل از آبیاری همبستگی زیاد و شیب، رطوبت و اندازه کلوخه‌های پس از آبیاری همبستگی پایین با داده‌های ضریب زبری مانینگ در این حالت داشته و سایر پارامترها نیز در سطح همبستگی متوسط قرار دارند.

جدول (۳ و ۴) همچنین نشان داد که ضریب زبری فاز پیشروی (n_a) بیش‌ترین همبستگی را با زمان پیشروی داشت. دبی و اندازه کلوخه‌های پس از آبیاری در سطح همبستگی ضعیف و سایر پارامترها در سطح متوسط قرار گرفتند. بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب همبستگی بین پارامترها و ضریب زبری فاز ذخیره (n_s) مربوط به زمان پیشروی و دبی ورودی با مقدار ۰/۶۵ و ۰/۳۱- بود که نشان از همبستگی بالا و ارتباط مستقیم زمان پیشروی و همبستگی ضعیف و رابطه معکوس دبی با این زبری در این حالت داشت.

ارائه بهترین رابطه بین پارامترها و ضریب زبری و آنالیز حساسیت آن‌ها

در این بخش معادلاتی رگرسیونی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری با استفاده از پارامترهای مختلف هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی توسعه یافت و دقت این معادلات با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، $RMSE$ و $NRMSE$ مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۵). سپس آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف این معادلات انجام شد و تأثیر آن بر ضریب زبری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تأثیر کاهش ۱۰ درصدی پارامترها بر ضریب زبری و رتبه اهمیت آن‌ها در جدول (۶) ارائه شد. شکل (۲) نیز نتیجه کلی آنالیز حساسیت را در ۴ رابطه ضریب زبری در ازای کاهش و افزایش ۵۰ درصدی پارامترها نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج آزمون پیرسون در بررسی همبستگی ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری و سایر پارامترهای هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی

P (cm)	A_{flow} (cm ²)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	M (%)	V_{inf} (l)	T_{rec} (min)	T_{adv} (min)	f_0 (m ³ .m ⁻¹ .min ⁻¹)	A_r (cm ²)	S (m/m)	Q_{out} (l/s)	Q_{in} (l/s)	
۰/۰۵	۰/۳۱۳**	۰/۰۲	-۰/۱۲	-۰/۲۹**	۰/۰۴۸	-۰/۰۰۳	۰/۶۳**	۰/۰۰۱	-۰/۰۳	۰/۲۳۸*	-۰/۳۷**	-۰/۳۱**	Pearson Correlation
۰/۶۵	۰/۰۰۴	۰/۸۶	۰/۲۷	۰/۰۰۶	۰/۶۶	۰/۹۷۹	-۰/۰۰۰	۰/۹۹۵	۰/۷۷۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	Sig. (2-tailed)
۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۳	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	N
۰/۰۷۷	۰/۳۴۴**	-۰/۰۲۵	-۰/۰۹۶	-۰/۳۲۰**	۰/۰۱۳	-۰/۰۱۴	۰/۵۰۲**	-۰/۰۲۰	-۰/۰۱۲	۰/۱۸	-۰/۳۲۹**	-۰/۲۸۸**	Pearson Correlation
۰/۴۸۵	۰/۰۰۱	-۰/۸۲۰	-۰/۳۸۵	۰/۰۰۳	۰/۹۰۶	۰/۹۰۰	-۰/۰۰۰	۰/۸۵۸	۰/۹۱۰	۰/۱۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۸	Sig. (2-tailed)
۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۳	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	N
۰/۰۶۵	۰/۳۴۴**	-۰/۰۴۲	-۰/۰۹۱	-۰/۳۰۶**	۰/۰۸۱	۰/۰۰۹	۰/۶۵**	۰/۰۴۸	۰/۰۰۰	۰/۱۹	-۰/۳۷۴**	-۰/۳۱**	Pearson Correlation
۰/۵۵۶	۰/۰۰۱	۰/۷۰۳	-۰/۴۰۹	۰/۰۰۵	۰/۴۶۴	۰/۹۳۶	-۰/۰۰۰	۰/۶۶۵	۰/۹۹۸	۰/۰۷۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴	Sig. (2-tailed)
۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۳	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	N

*. معناداری در سطح ۵ درصد، **. معناداری در سطح ۱ درصد.

جدول ۴. نتایج آزمون کندال در بررسی همبستگی ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری و پارامترهای S_w ، S_d و IE

IE	S_w	S_d			
-۰/۳۷۶**	۰/۲۷۹**	۰/۳۷۰**	Correlation Coefficient		
۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	Sig. (2-tailed)	n_t	
۸۳	۸۳	۸۱	N		
-۰/۴۵۸**	۰/۲۵۸**	۰/۴۶۷**	Correlation Coefficient	Kendall's tau_b	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	Sig. (2-tailed)		n_a
۸۳	۸۳	۸۱	N		
-۰/۴۱۸**	۰/۳۰۰**	۰/۴۶۱**	Correlation Coefficient		
۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	Sig. (2-tailed)	n_s	
۸۳	۸۳	۸۳	N		

*. معناداری در سطح ۵ درصد، **. معناداری در سطح ۱ درصد.

رابطه (۷) نشان داد که دبی خروجی از جویچه، زمان پیشروی و سطح مقطع جریان پارامترهای مؤثر بر ضریب زبری کل رخدادهای آبیاری می‌باشند. R^2 ، $RMSE$ و $NRMSE$ داده‌های آزمون در این رابطه به ترتیب ۰/۸، ۰/۱۴ و ۲۸/۷ درصد تعیین شد (جدول ۵). در این معادله، دبی رابطه معکوس و زمان پیشروی و سطح مقطع جریان، رابطه مستقیم با ضریب زبری دارند. نتایج همچنین نشان داد که زبری کل رخدادهای آبیاری بیش از سایر پارامترها از سطح مقطع جریان تأثیر پذیرفت و پس از آن دبی جریان خروجی از جویچه، مؤثرتر بود (شکل ۲). آنالیز حساسیت نیز ثابت کرد که با کاهش ۱۰ درصدی در مقدار سطح مقطع و دبی، ضریب زبری مانینگ کل رخدادهای آبیاری به ترتیب ۱۰/۴ و ۶- درصد تغییر می‌کند (جدول ۶). در واقع در رابطه ارائه شده، سطح مقطع جریان بیش‌ترین و زمان پیشروی کمترین حساسیت را با ضریب زبری این فاز دارند. پایین بودن حساسیت زبری به زمان پیشروی قابل پیش‌بینی بود چراکه نسبت زمان پیشروی به کل زمان آبیاری نسبتاً کوتاه است و اثرات کمی بر زبری کل رخدادهای آبیاری دارد.

$$n_t = -0.103Q_{out} + 0.001155t_{adv} + 0.0019A_{flow} + 0.014 \quad \text{(رابطه ۷)}$$

رابطه بین ضریب زبری فاز پیشروی و پارامترهای مؤثر بر آن در رابطه (۸) نشان داده شده است. R^2 ، $RMSE$ و $NRMSE$ برابر با ۰/۸۲، ۰/۱۷ و ۲۵/۶ درصد نشان از اعتبار نسبتاً خوب معادله ارائه شده داشت (جدول ۵). دبی ورودی، زمان خاتمه جریان، رطوبت قبل از آبیاری و شماره آبیاری رابطه معکوس و زمان پیشروی، نفوذ پایه، سطح مقطع جریان و سطح مقطع جویچه قبل از آبیاری رابطه‌ای مستقیم با ضریب زبری فاز پیشروی داشتند. ضریب زبری فاز پیشروی بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را به ترتیب نسبت به زمان خاتمه آبیاری و رطوبت قبل از آبیاری نشان داد (جدول ۶). نتایج همچنین نشان داد که با کاهش ۱۰ درصدی مقدار زمان خاتمه آبیاری و رطوبت قبل از آبیاری، ضریب زبری فاز پیشروی به ترتیب ۹/۲۶- و ۱/۵۴- درصد تغییر می‌کند. انتظار می‌رفت که ضریب زبری فاز پیشروی، حساسیت

بالایی نسبت به زمان پیشروی داشته باشد اما نتایج این گونه نشان نمی‌دهند؛ که این موضوع می‌تواند به علت تأثیر دبی جریان و سایر عوامل مؤثر نظیر شعاع هیدرولیکی، اندازه کلوخه‌ها و تلفیقی از این موارد باشد. در واقع دبی و دیگر عوامل اثراتی بر زمان پیشروی می‌گذارند که می‌تواند رابطه غیر مستقیم بین زبری و زمان پیشروی را تحت تأثیر قرار دهند. به عنوان مثال، مطابق با نتایج جدول (۳)، می‌توان دریافت که زمان پیشروی و دبی ورودی به جویچه با یکدیگر رابطه‌ای نسبتاً قوی و معکوس داشته و با افزایش دبی، زمان پیشروی کاهش می‌یابد. این در حالی است که رابطه زمان پیشروی و ضریب زبری قوی و مستقیم است. علاوه بر این، از اثرات وجود عدم قطعیت به دلیل استفاده از مدل‌ها و روش‌های حل معکوس در تخمین ضریب زبری نیز نمی‌توان چشم‌پوشی کرد.

رابطه (۸)

$$n_a = -0.121Q_{in} + 0.001t_{adv} - 0.000329t_{rec} + 0.002A_{flow} - 0.011IE + 44.45f_0 - 0.001\theta_m + 0.889A_f + 0.104$$
 ضریب زبری مانینگ در فاز ذخیره با دبی خروجی و زمان خاتمه آبیاری رابطه معکوس و با زمان پیشروی، سطح مقطع جریان و سطح مقطع جویچه قبل از آبیاری رابطه مستقیم داشت (رابطه ۹). شاخص‌های آماری R^2 ، $RMSE$ و $NRMSE$ به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۰۱ و ۲۰/۶ درصد برای این رابطه محاسبه شد (جدول ۵). آنالیز حساسیت پارامترها نشان داد که ضریب زبری فاز ذخیره بیش‌ترین تأثیر را از سطح مقطع جریان و زمان خاتمه آبیاری پذیرفت. در واقع با کاهش ۱۰ درصدی این دو پارامتر ضریب زبری در این فاز به ترتیب ۱۰/۳۴ و ۴/۸۴- درصد افزایش و کاهش می‌یابد (جدول ۶).

$$n_s = -0.0763Q_{out} + 0.00173t_{adv} - 0.000132t_{rec} + 0.00185A_{flow} + 0.7237A_f + 0.00463 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

جدول ۵. شاخص‌های آماری مورد بررسی برای سه معادله استخراج‌شده در فاز پیشروی، ذخیره و کل رخدادهای آبیاری (داده‌های آزمون)

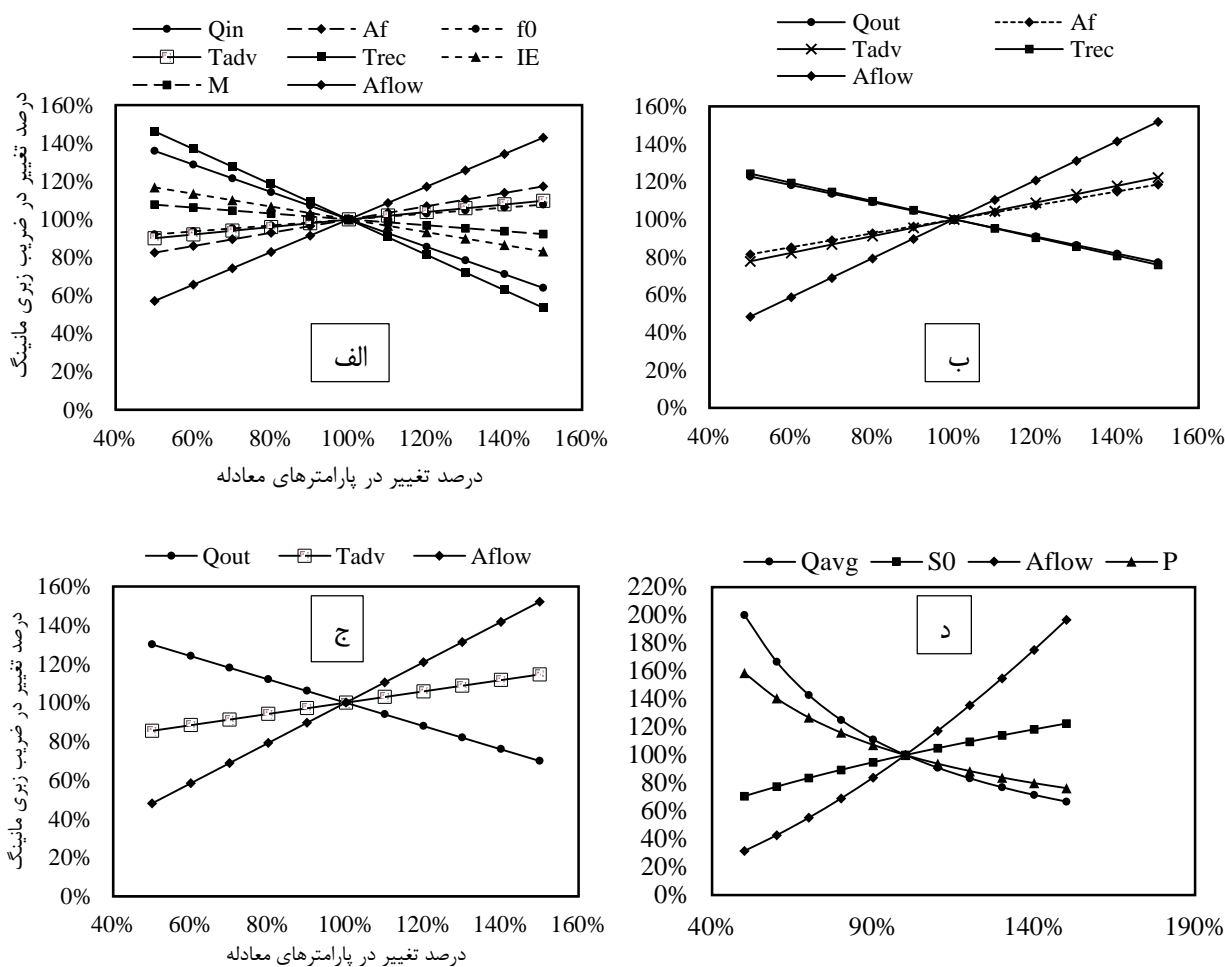
n_s	n_a	n_f	Index
۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۸۰	R^2
۰/۰۱۰	۰/۰۱۷	۰/۰۱۴	RMSE
۲۰/۶	۲۵/۶	۲۸/۷	(%) NRMSE [*]

* اگر $NRMSE < 10$ ، $10 < NRMSE < 20$ ، $20 < NRMSE < 30$ و $NRMSE > 30$ به ترتیب نشان‌دهنده سطوح تخمین عالی، خوب، متوسط و ضعیف می‌باشد (Jamieson et al., 1991).

جدول ۶. درصد تغییرات ضریب زبری در فازهای مختلف به ازای کاهش ۱۰ درصدی پارامترهای ورودی و رتبه اهمیت هر کدام از آنها

پارامتر	فاز پیشروی		فاز ذخیره		کل رخدادهای آبیاری		معادله مانینگ	
	درصد تغییرات	رتبه اهمیت	درصد تغییرات	رتبه اهمیت	درصد تغییرات	رتبه اهمیت	درصد تغییرات	رتبه اهمیت
Q_{in}	-۷/۲	۳	.	.	.	.	.	.
Q_{out}	.	.	-۴/۵	۳	-۶	۲	.	.
Q_{avg}	.	.	.	.	.	.	.	۲
S	.	.	.	.	.	.	.	۴
A_f	۳/۵	۴	۳/۷	۵	.	.	.	.
f_0	۱/۶	۷	.	.	.	.	.	.
T_{adv}	۲	۵	۴/۴	۴	۲/۹	۳	.	.
T_{rec}	-۹/۳	۱	-۴/۸	۲	.	.	.	.
V_{inf}	.	.	.	.	.	.	.	.
S_d	.	.	.	.	.	.	.	.
S_w	.	.	.	.	.	.	.	.
IE	-۳/۳	۶	.	.	.	.	.	.
M	-۱/۵	۸	.	.	.	.	.	.
pH	.	.	.	.	.	.	.	.
EC	.	.	.	.	.	.	.	.
A_{flow}	۸/۶	۲	۱۰/۳	۱	۱۰/۴	۱	۱۶/۱	۱
P_{flow}	.	.	.	.	.	.	-۷/۳	۳

جدول (۶) علاوه بر آنالیز حساسیت سه رابطه استخراج شده، آنالیز حساسیت رابطه مانینگ (رابطه ۱) را نیز نشان داده است. در رابطه مانینگ، ضریب زبری بیشترین حساسیت را نسبت به سطح مقطع جریان و دبی داشت و ضریب زبری به ترتیب ۱/۱۶، ۱۱/۱۱، ۷/۲۸- و ۵/۱۳ درصد بازاء تغییر در سطح مقطع، دبی، محیط خیس شده و شیب تغییر کرد. یوسفی و بانژاد (۱۳۹۲) نیز نتایجی همسو با این تحقیق را گزارش کردند در حالی که ارجمند و همکاران (۱۳۹۷) دبی را حساسترین پارامتر نسبت به ضریب زبری معرفی کردند. با بررسی هر ۴ رابطه، می توان بیان کرد که به ترتیب پارامترهای سطح مقطع جریان و دبی جریان (ورودی، خروجی و متوسط) بیشترین تأثیر را در ضریب زبری مانینگ در تمام فازهای آبیاری داشته است. زمان پستروی و پیشروی هم دیگر پارامترهای تأثیرگذار در ضریب زبری بودند. (Bautista, Clemmens, & Strelkoff (2009), Walker (2005) و Sedaghatdoost & Ebrahimian (2015) هم ضریب زبری مانینگ را نسبت به این پارامترها حساس معرفی کردند.



شکل ۲. آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی معادله و درصد تغییر در ضریب زبری مانینگ. الف) ضریب زبری مانینگ در فاز پیشروی، ب) ضریب زبری مانینگ در فاز ذخیره، ج) ضریب زبری مانینگ در کل رخدادهای آبیاری و د) ضریب زبری مانینگ معادله.

نتیجه گیری و پیشنهادها

استفاده از معادله مانینگ در شبیه سازی جریان در آبیاری جویچه ای به دلیل فرضیات و محدودیت های آن همواره چالش برانگیز بوده است. این چالش ها از ابتدای فاز پیشروی تا قبل از ثابت شدن سرعت نفوذ آب در خاک دو چندان است. این مشکلات و موانع سبب شده تا تغییرات زمانی ضریب زبری مانینگ طی یک رخداد آبیاری کمتر مورد توجه قرار گیرد و معمولاً ضریب زبری مانینگ طی یک رخداد آبیاری به صورتی عددی ثابت در نظر گرفته می شود. به منظور رفع این مشکل تلاش شد تا ضریب زبری مانینگ در فازهای پیشروی، ذخیره و کل رخدادهای آبیاری به صورت مجزا تخمین زده شود. همچنین تلاش شد تا روابطی تجربی برای تعیین ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری توسعه یابد تا تخمین آن را آسان تر سازد و از پیچیدگی های آن بکاهد. آن طور که از نتایج بر آمد، روش های



مورد استفاده برای تخمین ضریب زبری حتی در فاز پیشروی که کاربرد معادله مانینگ در آن بیش از پیش قابل تأمل است، از دقت مناسبی برخوردارند. بررسی مقادیر نشان داد که ضریب زبری طی یک رخداد آبیاری روندی کاهشی دارد لذا بیشترین مقدار ضریب زبری در فاز پیشروی و پس از آن در کل رخداد آبیاری و فاز ذخیره قابل مشاهده است.

بررسی همبستگی بین ضریب زبری و پارامترهای هیدرولیکی و غیر هیدرولیکی نشان داد که ضریب زبری کل رخداد آبیاری بیشترین همبستگی را با زمان پیشروی و اندازه کلوخه‌ها قبل از آبیاری دارد که نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالای زمان پیشروی از ضریب زبری و زبری از اندازه کلوخه‌هاست. در فاز پیشروی زبری بیش از همه پارامترها بر زمان پیشروی اثر گذاشت چرا که سایر پارامترها در مدت زمان پیشروی که نسبت به کل آبیاری کوتاه‌تر است کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در فاز ذخیره مطابق انتظار دبی ورودی کمترین همبستگی را با داده زبری فاز ذخیره از خود نشان داد. آنالیز حساسیت ضریب زبری مانینگ در معادلات توسعه‌یافته برای تخمین زبری در فازهای مختلف نیز نشان داد که سطح مقطع و دبی جریان (ورودی، خروجی و متوسط) بیشترین تأثیر را در ضریب زبری مانینگ در تمام فازهای آبیاری داشته است و زمان پسروری و پیشروی هم دیگر پارامترهای تأثیرگذار در ضریب زبری بودند. اهمیت و تأثیر متقابل دبی و سطح مقطع روشن بوده و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. آن طور که از این نتایج بر می‌آید، توجه به رابطه متقابل زبری و زمان پیشروی و پسروری نیز اهمیت فراوانی دارد چراکه به عنوان نمونه افزایش ضریب زبری در جویچه به دلایل مختلف از جمله وجود کلوخه، ایجاد انسداد در مسیر جویچه، نا منظمی در مسیر جویچه (شخم نامنظم) و غیره می‌تواند به افزایش زمان پیشروی و در نتیجه افزایش بی‌رویه نفوذ عمقی و در نتیجه اتلاف آب یا عدم توازن در توزیع آب در طول جویچه منجر گردد لذا لازم است تا این موضوع در تحقیقات آتی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود تحقیقات مشابهی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در شرایط متنوع مزرعه‌ای صورت پذیرد تا اطلاعات جامع‌تری از تغییرات زمانی زبری و ارتباط آن با پارامترهای مختلف در دسترس باشد این اطلاعات می‌توانند به توسعه روابط تجربی دقیق‌تر، کاراتر و قابل‌تعمیم به دیگر مزارع منجر شود. این روابط به تعیین ضریب زبری مانینگ در فازهای مختلف آبیاری و در نتیجه افزایش دقت تخمین زبری، افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها و نهایتاً بهینه‌سازی مصرف آب منجر خواهند شد. توجه به این نکته ضروری است که استفاده از این روابط نسبت به مدل‌های کامپیوتری کاربری بسیار ساده‌تری دارند و حصول نتیجه را سریع‌تر می‌کنند.

سپاسگزاری

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

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- ارجمند، میلاد؛ فرمانی خراجو، فراز؛ رضائی، مهدی؛ رضوی فر، رضا و کاظمی مطلق، علیرضا. (۱۳۹۷). تحلیل حساسیت پارامترهای معادله مانینگ کانال‌های هیدرولیکی باز با استفاده از معادلات دیفرانسیل. *مجله نخبگان علوم مهندسی*، ۳(۳)، ۱۰۷-۱۱۱.
- برادران، رضا. (۱۳۸۹). بررسی اثر عملیات تهیه زمین بر روی ضرایب هیدرودینامیک خاک در آبیاری جویچه‌ای. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- رضایی راد، هادی؛ ابراهیمیان، حامد و لیاقت، عبدالمجید (۱۴۰۰). تخمین معکوس ضریب زبری مانینگ با استفاده از مدل WinSRFR و بررسی تغییرات آن در رخدادهای مختلف آبیاری. *نشریه آبیاری*، ۱۵(۳)، ۵۹۸-۶۱۰.
- رضایی راد، هادی؛ ابراهیمیان، حامد؛ لیاقت، عبدالمجید؛ خلجی، فاطمه و شبانی آرانی، مهشید (۱۴۰۰). تأثیر دبی و رطوبت اولیه بر ضریب زبری مانینگ در فازهای پیشروی و ذخیره در آبیاری جویچه‌ای. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۱(۲)، ۱۵۹-۱۷۲.
- رضایی اعتدالی، هادی؛ لیاقت، عبدالمجید و عباسی، فریبرز (۱۳۸۸). ارزیابی مدل EVALUE برای تخمین ضریب زبری مانینگ در آبیاری جویچه‌ای. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۰(۳)، ۸۳-۹۴.
- زرعکانی، کیوان؛ رضایی اعتدالی، هادی و دانش کار آراسته، پیمان (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.
- عباسی، فریبرز (۱۳۹۱). *اصول جریان در آبیاری سطحی*. کمیته ملی آبیاری و زهکشی.
- عباسی، فریبرز و ابراهیمیان، حامد (۱۴۰۲). *هیدرولیک آبیاری سطحی*. انتشارات نشر دانشگاهی.

یوسفی، کامران و بانژاد، حسین (۱۳۹۲). تحلیل حساسیت فرمول مانینگ نسبت به ضریب زبری با روش معادلات دیفرانسیل. اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی. <https://civilica.com/doc/537966>.

REFERENCES

- Abbasi, F. (2012) Principles of flow in surface irrigation. *National Irrigation and Drainage Committee* (in Persian).
- Abbasi, Fariborz and Ebrahimian, Hamed. (1402). Surface irrigation hydraulics. *University publications Center* (in Persian).
- Adamala, S., Raghuwanshi, N. S., & 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., & 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. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.077390>
- Arjamand, M., Farmani Kharajo, F., Rezaei, M., Razavifar, R. and Kazemi Mutal, A. (2017). Sensitivity analysis of Manning equation parameters of open hydraulic channels using differential equations. *Elite Journal of Engineering Sciences*, 3(3), 107-111 (in Persian).
- Baradaran, R. (2010). Investigating the effect of land preparation operations on soil hydrodynamic coefficient in furrow irrigation. Shahid Chamran University of Ahwaz (in Persian).
- Bautista, E., Clemmens, A. J., & 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, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., & 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>
- Behzad Izadi, & W. W. Wallender. (1985). Furrow Hydraulic Characteristics and Infiltration. *Transactions of the ASAE*, 28(6), 1901–1908. <https://doi.org/10.13031/2013.32539>
- Burguete, J., Lacasta, A., & 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>
- Clemmens, A. J. (2009). Errors in surface irrigation evaluation from incorrect model assumptions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 556–565. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000059](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000059)
- Clemmens, A. J., Eisenhauer, D. E., & Maheshwari, B. L. (2001). Infiltration and Roughness Equations for Surface Irrigation: How Form Influences Estimation. *An ASAE Meeting Presentation No. 01-2255, 0300(xx)*, 1–19.
- Dewedar, O. M., Mehanna, H. M., & El-shafie, A. F. (2019). Validation of WinSRFR for some hydraulic 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>
- Enciso-Medina, J., Martin, D., & Eisenhauer, D. (1998). Infiltration Model for Furrow Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(2), 73–80. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1998\)124:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1998)124:2(73))
- Esfandiari, M., & Maheshwari, B. L. (1998). Suitability of Selected Flow Equations and Variation of Manning's n in Furrow Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(2), 89–95. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1998\)124:2\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1998)124:2(89))
- Etedali, H. R., Ebrahimian, H., Abbasi, F., & Liaghat, A. (2011). *Evaluating models for the estimation of furrow irrigation*. 9(2), 641–649.
- Gill, M. A. (1976). EXACT SOLUTION OF GRADUALLY VARIED FLOW. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(9), 1353–1364. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004617/REFERENCES>
- Gillies, M. H., & 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>
- GiMey, J. E., Kottwitz, E. R., & Wieman, G. a. (1991). Roughness Coefficients for Selected Residue Materials. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 503–514. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-)



9437(1991)117:4(503)

- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), 337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Jurriens, M., Zerihun, D., Boonstra, J., & 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., & 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., & Ghonimy, M. I. (2011). Determination of manning roughness coefficient for border irrigation system. 28(April), 302–323.
- Katopodes, N. D., Tang, J., & Clemmens, A. J. (1990). Estimation of Surface Irrigation Parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(5), 676–696. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:5\(676\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:5(676))
- Li, Z., & Zhang, J. (2001). Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient. *Agricultural Water Management*, 49, 153–161.
- Maheshwari, B. L. (1992). Suitability of different flow equations and hydraulic resistance parameters for flows in surface irrigation: A review. *Water Resources Research*, 28(8), 2059–2066. <https://doi.org/10.1029/92WR00424>
- Maheshwari, B. L., & McMahon, T. A. (1992). Modeling Shallow Overland Flow in Surface Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(2), 201–217.
- Mailapalli, D. R., Raghuwanshi, N. S., Singh, R., Schmitz, G. H., & 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., & 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>
- Mehri, A., Mohammadi, A. S., Ebrahimian, H., & Boroomandnasab, S. (2023). Evaluation and optimization of surge and alternate furrow irrigation performance in maize fields using the WinSRFR software. *Agricultural Water Management*, 276, 108052. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108052>
- Mwendera, E. J., & Feyen, J. (1992). Estimation of depression storage and Manning's resistance coefficient from random roughness measurements. *Geoderma*, 52(3–4), 235–250. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90039-A](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90039-A)
- Nematollahi, B., & Abedini, M. J. (2020). Analytical Solution of Gradually Varied Flow Equation in Non-prismatic Channels. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 44(1), 251–258. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00316-5>
- Nie, W. B., Fei, L. J., & Ma, X. Y. (2014a). Applied closed-end furrow irrigation optimized design based on field and simulated advance data. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(2), 395–408.
- Nie, W. B., Fei, L. J., & Ma, X. Y. (2014b). Applied closed-end furrow irrigation optimized design based on field and simulated advance data. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(2), 395–408.
- Nie, W.-B., Li, Y.-B., Zhang, F., Dong, S.-X., Wang, H., & 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>
- Pallant, J. (2010). SPSS Survival Manual. In *McGraw-Hill Education* (4th ed.).
- Pradhan, A., & Khatua, K. K. (2018). Assessment of Roughness Coefficient for Meandering Compound Channels. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(5), 2010–2022. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1818-9>
- Ramesh, A., & Ostad-Ali-Askari, K. (2023). Effect of effluent and magnetized effluent on Manning roughness coefficient in furrow irrigation. *Applied Water Science*, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01818-w>
- Ramezani Etedali, H., Ebrahimian, H., Abbasi, F., & Liaghat, A. (2011). Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(2), 641. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110902-342-10>
- Ramezani Etedali, H., Liaghat, A., & Abbasi, F. (2012). Evaluation of The EVALUE Model for Estimating Manning's Roughness in Furrow Irrigation. *Irrigation and Drainage*, 61(3), 410–415.

<https://doi.org/10.1002/ird.650>

- Ramezani, H., Liaqat, A., 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 Persian).
- Rezaei Rad, H., Ebrahimian, H., & Liaqat, A. (2021). Inverse Estimation of Manning Roughness Coefficient Using WinSRFR Model and Investigating Its Variations in Different Irrigation Events. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3(15), 598-610 (in Persian).
- Rezaei Rad, H., Ebrahimian, H., Liaqat, A., Khalji, F., and Shabani Arani, M. (2021). Effect of inflow rate and initial soil moisture on Manning roughness coefficient in advance and storage phases in furrow irrigation. *Water and Irrigation Management*, 11(2), 159–172. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.316828.852> (in Persian).
- Salahou, M. K., Jiao, X., & Lü, H. (2018). Border irrigation performance with distance-based cut-off. *Agricultural Water Management*, 201(2016), 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.014>
- Sedaghatdoost, A., & Ebrahimian, H. (2015). Calibration of infiltration, roughness and longitudinal dispersivity coefficients in furrow fertigation using inverse modelling with a genetic algorithm. *Biosystems Engineering*, 136, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.05.011>
- Sepaskhah, A. R., & Bondar, H. (2002). Estimation of Manning Roughness Coefficient for Bare and Vegetated Furrow Irrigation. *Biosystems Engineering*, 82(3), 351–357. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0076>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E., & 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>
- Smith, R. J., Uddin, M. J., & Gillies, M. H. (2018). Estimating irrigation duration for high performance furrow irrigation on cracking clay soils. *Agricultural Water Management*, 206, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.014>
- Srivastava, R. (2003). Discussion of “Integrating Equation of Gradually Varied Flow.” *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, January, 77–78.
- Tabatabaei, S. M., & Asadi, R. (2015). Estimation of Infiltration Parameters and Manning Roughness with SIPAR_ID Software. *International Journal of Life Sciences*, 9(5), 70–74.
- Walker, W. R. (1987). *surface irrigation theory and practice* (1st ed.).
- 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))
- Xu, J., Cai, H., Saddique, Q., Wang, X., Li, L., Ma, C., & Lu, Y. (2019). Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness. *Agricultural Water Management*, 214(23), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.003>
- Yousefi, K. and Banjad, H. (2012). Analyzing the sensitivity of Manning's formula to the roughness coefficient with the method of differential equations. *The first national conference on the challenges of water resources and agriculture*. <https://civilica.com/doc/537966> (in Persian).
- Zarekani, K., Ramezani Mederani, H., and Daneshkar Araste, P. (2018). Estimation of infiltration parameters and Manning roughness coefficient under two continuous and cutback flows regimes. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 9(2), 89–101 (in Persian).



Presenting empirical equations for estimating Manning roughness coefficient in furrow irrigation in different irrigation phases

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Manning equation is an empirical equation that is commonly used to calculate water flow in open channels. However, its application in investigating the flow hydraulics in surface irrigation, especially in irrigation furrows, faces limitations due to the assumptions made for it. These limitations have led the researchers to consider Manning roughness coefficient as a fixed number during each irrigation event by accepting possible errors in the estimation and to pay less attention to its changes during an irrigation event. This is despite the fact that if the value of Manning roughness coefficient is estimated more (less) than the actual value, considering that the roughness is a force resisting the flow, the flow rate is estimated less (more) than the actual value and leads to many errors in the simulation and hence, it is necessary to pay more attention to the time changes of the roughness coefficient by using various methods and assumptions that lead to the simplification of roughness estimation complexities.

Objectives/Goals:

This research aimed to developing regression equations to estimate roughness in different irrigation phases, using different hydraulic and non-hydraulic parameters.

Research Method

To investigate the values of Manning roughness coefficient in different phases and events in furrow irrigation, different treatments were considered in such a way as to cover most of the factors influencing roughness. For this purpose, six inflow rates in two flow categories, low (with an average of 0.27 liters per second) and high (with an average of 0.54 liters per second), three consecutive irrigation events, advance and storage phases, two irrigation intervals (5 and 10 days) and two types of soil texture were investigated. Secondly, Manning roughness coefficient was determined in whole irrigation event, advance and storage phases and respectively by using SIPAR_ID model, Manning equation and WinSRFR. Finally, the mutual effect of various hydraulic and non-hydraulic parameters on Manning roughness coefficient was investigated and regression equations based on the influential parameters were developed using SPSS software to estimate the roughness coefficient in different phases.

Results

The results showed that Manning roughness coefficient in the advance, storage phases and whole irrigation event in the first to third irrigations ranged between 0.017 and 0.636, 0.015 and 0.317, and 0.015 and 0.34, respectively. The average was 0.083, 0.054 and 0.055. The results also showed that the advance time and the size of clods before irrigation had a high correlation and the slope, moisture and the size of clods after irrigation had a low correlation with the Manning roughness coefficient data in the entire irrigation event. The roughness coefficient of the advance phase also had the highest correlation with the advance time. The highest and lowest correlation coefficients between the parameters and roughness coefficient of the storage phase were related to the advance time and inflow rate with values of 0.65 and -0.31, which shows high correlation and direct relationship between advance time and weak correlation and inverse relationship between flow rate and roughness.

Conclusion

Results indicate the suitable accuracy of the methods used to estimate the roughness coefficient even in the advance phase where the application of Manning equation can be considered more than before.

The sensitivity analysis of Manning roughness coefficient in the equations developed to estimate roughness in different phases also showed that the cross-sectional area and flow rate (inflow, outflow and average) had the greatest influence on Manning roughness coefficient in all irrigation phases, and the recession and advance time were other parameters influencing the roughness coefficient. The importance and mutual influence of flow and cross-section is clear and has been given much attention.

As results indicate, it is very important to take into account the mutual relationship between roughness and advance and recession time, since as an example, the increase of roughness coefficient in the furrow is due to various reasons such as the presence of clods, Obstruction in the furrow path, irregularity in the path (irregular plowing) etc. can lead to an increase in the advance time and as a result an excessive increase in depth infiltration and consequently water loss or an imbalance in the distribution of water along the furrow, which may have received less attention so far and might require more precision.

Keywords: Manning Roughness Coefficient, Advance Phase, Storage Phase, WinSRFR, SIPAR_ID.