

مقاله علمی-پژوهشی

مقیاس سازی مدل موج سینماتیک در آبیاری نواری

امیر نبی زاده سرابندی^۱، پیمان افراسیاب^{۲*}، محمدمهدی چاری^۲، حسین دهقانی سانج^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

چکیده

آبیاری سطحی در مرحله طراحی، ارزیابی و شبیه سازی به حجم بالایی از اطلاعات میدانی نیاز دارد؛ خصوصاً داده های مرتبط با حرکت و نفوذ آب که شرایط نسبی مزرعه را به خوبی بیان کنند. هدف از این تحقیق مقیاس سازی آبیاری نواری است. برای این منظور فرم مقیاس شده معادله نفوذ کوستیاکف مورد استفاده قرار گرفت و سپس مدل موج سینماتیک مقیاس شده است. نتایج نشان داد با تعریف مناسب عوامل مقیاس معادله موج سینماتیک به صورت مستقل از شرایط اولیه و مزرعه مقیاس می شود. در ادامه ابتدا یک معادله واحد به منحنی پیشروی آب در سیستم آبیاری نواری برازش داده شد و سپس مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی از اطلاعات ۱۸ نوار شامل ۹ نوار کشت نشده و ۹ نوار گندم کشت شده استفاده شد. عوامل مقیاس به نحوی تعیین شد که معادله موج سینماتیک به معادله ای مستقل از شرایط اولیه و نوع خاک تبدیل شود. نتایج نشان داد معادله $t_{AX}^* = 1.8628x^{1.1293}$ به عنوان معادله تجربی به دست آمده از منحنی پیشروی مقیاس شده برای هر یک از نوارهای آبیاری، دارای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر از ۱۲ دقیقه و درصد میانگین مطلق خطای پیش بینی (E_a) در اکثر مواقع کمتر از ۱۱ درصد می باشد. همچنین ضریب تعیین (R^2) میان پیشروی پیش بینی شده از طریق معادله و پیشروی مشاهداتی همواره دارای مقادیر بالای ۹۶ درصد بوده است.

واژه های کلیدی: محیط های متشابه، مقیاس سازی، منحنی پیشروی، نفوذ کوستیاکف

مقدمه

(Costabile et al., 2023)، در پادانا^۴ نیز به عنوان بزرگ ترین دشت آبی اتحادیه اروپا با ۴/۷ مگا هکتار وسعت منطقه آبی نیز آبیاری سطحی روش عمدتاً غالب منطقه است (Masseroni et al., 2017). همچنین به طور کلی می توان آبیاری سطحی را به روش های آبیاری کرتی، نواری و جوی پشته ای تقسیم نمود که از این میان روش آبیاری نواری با وجود عملکرد کم تر نسبت به روش های تحت فشار و آبیاری جوی پشته ای رایج ترین روش برای کشت محصولات به صورت ردیفی به شمار می رود (Fadul et al., 2020, Morris et al., 2015).

با توجه به وضعیت منابع آب در سطح جهان یکی از مهم ترین مسائل در بحث کشاورزی و تولید محصولات کشاورزی جهت تأمین غذا، مدیریت آب در مزرعه است. مدیریت صحیح آب در مزرعه نیازمند طراحی و ارزیابی دقیق است، به نحوی که باید میزان عملکرد سیستم آبیاری طراحی شده متناسب با منابع و محدودیت های موجود همچنین بر اساس شاخص های عملکردی آبیاری، مطلوب باشد (Pazouki, 2021). استفاده از مدل های ریاضی به عنوان یکی از راه های تعیین متغیرهای طراحی آبیاری سطحی شناخته می شود و

آبیاری سطحی به عنوان یک روش غالب آبیاری در سراسر جهان شناخته می شود که از گذشته مورد استفاده بوده است (Vico and Porporato, 2011; Soroush et al., 2013; Akbari et al., 2018). به نحوی که مطابق اطلاعات منتشر شده توسط کمیته بین المللی آبیاری و زهکشی در May 2022 (http://www.icid.org/imp_data.pdf)، نسبت آبیاری سطحی به اراضی تحت آبیاری در جهان به ترتیب در هند ۹۷ درصد (شامل تقریباً ۶۰/۸ مگا هکتار)، چین ۹۴ درصد (شامل تقریباً ۵۷/۸ مگا هکتار)، ایالات متحده آمریکا ۴۴ درصد (شامل تقریباً ۲۲/۴ مگا هکتار) و پاکستان ۱۰۰ درصد (شامل تقریباً ۱۹/۶ مگا هکتار) است

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- استاد گروه تحقیقات آبیاری و زهکشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان آموزش و ترویج تحقیقات کشاورزی، کرج، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: P_afراسیاب@yahoo.com)

استرلکف و کاتوپودس سپس استرلکف و کلمنز، به مقیاس‌سازی فاز پیشروی با استفاده از فاکتورهای مقیاس معادلات آبیاری نواری حل شده توسط مدل اینرسی صفر پرداخته و به کمک نتایج آن برای خاک‌های مختلف و ضرایب α و k معادله نفوذ کوستیاکف، گراف‌های مربوط به هر نوع خاک را ارائه کردند (Strelkoff and Katopodes, 1977; Strelkoff and Clemmens, 1981). بیتایو و فانگمایر، با پژوهش بر روی مقیاس‌سازی معادلات آبیاری سطحی نواری با انتهای باز و گراف‌های مربوط به آن، مقدار رواناب را به کمک پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکف و بر پایه فاکتور طول و زمان قطع جریان بدون بعد شده به دست آوردند (Yitayew and Fangemeier, 1984). آلازا، هر یک از شماره منحنی‌های خانواده نفوذ را به کمک مقیاس‌سازی منحنی پیشروی آب در آبیاری سطحی نواری ترسیم نمودند. در نتیجه این تحقیق بر اساس منحنی‌های ترسیم‌شده و با توجه به نوع خاک می‌توان مسیر پیشروی آب در نوار را به دست آورد (Alazba, 1999). ختری و اسمیت، از فرآیند مقیاس‌سازی برای کاهش داده‌های موردنیاز جهت پیش‌بینی ویژگی‌های نفوذ برای هر شیار و هر رویداد آبیاری در سطح مزرعه استفاده نمودند و با مقایسه نتایج آن با نتایج محاسبه‌شده از داده‌های پیشروی به دست آمده از مدل کامپیوتری INFILT به شکل و روند یکسانی دست یافتند (Khatiri and Smith, 2006). چاری و همکاران، روشی را برای مقیاس کردن معادله‌های خانواده نفوذ (USDA-NRCS intake families) مختلف ارائه نمودند و نشان دادند که با استفاده از این روش می‌توان معادله‌های خانواده نفوذ را مقیاس کرد (Chari et al., 2021). مغفرتی و همکاران، به پیش‌بینی فاز پیشروی و نرخ نفوذ با استفاده از ارائه یک معادله بیلان حجمی مقیاس‌سازی شده برای معادله فیلیپ با استفاده از روش دونقطه‌ای جدید و مقایسه آن با سایر روش‌ها پرداختند که نتایج حاکی از سادگی روش مقیاس‌سازی شده نسبت به سایر روش‌ها بوده است (Maghferati et al., 2021). چاری و همکاران، با استفاده از روش مقیاس‌سازی و استفاده از معادله نفوذ فیلیپ شاخه‌ای برای دو زمان کوتاه و طولانی مدل موج سینماتیک برای آبیاری نواری را مقیاس کرده و معادله‌ای برای پیشروی در آبیاری نواری ارائه کردند. اگرچه این روش دارای نتایج مناسبی بود اما استفاده از معادله نفوذ فیلیپ شاخه‌ای یک ساده‌سازی بود که در واقعیت به‌سختی انجام می‌شود (Chari et al., 2019). به‌طور کلی، با توجه به محدودیت فزاینده منابع آب و نقش اساسی آبیاری سطحی در کشاورزی، بهبود کارایی مصرف آب در این سیستم‌ها ضرورت یافته است. آبیاری سطحی باوجود سادگی و هزینه پایین، به دلیل رواناب سطحی، تبخیر آب داخل نهرها و سطح خاک و نفوذ عمیق این روش دارای تلفات آبی زیاد است (Irmak et al., 2011). از این رو اصلاح و بهینه‌سازی طراحی و مدیریت این سامانه‌ها باهدف کاهش مصرف آب و افزایش راندمان اهمیت ویژه‌ای دارد

شامل مدل بیلان حجمی، مدل موج سینماتیک، مدل اینرسی صفر و مدل هیدرودینامیک کامل است. از این میان برای آبیاری نواری مدل موج سینماتیک در پیش‌بینی نتایج نسبتاً دقیقی به همراه دارد (Alazba, 1999). اما عملکرد سیستم‌های آبیاری نواری به ابعاد زمین، شیب، سرعت ورود آب به مزرعه، زمان قطع جریان، ضریب زبری مانینگ و ویژگی‌های نفوذ خاک بستگی دارد (Pereira et al., 2002; Mailapalli, 2008; Smith et al., 2018; Xu et al., 2019). از این رو، طراحی و ارزیابی بهینه آبیاری همواره نیازمند درک درست از وضعیت زمانی و مکانی آب و توزیع رطوبت در خاک می‌باشد. در آبیاری نواری نیز وضعیت نفوذ آب در خاک، حجم رواناب و همچنین مرحله پیشروی متأثر از نوع خاک است و این موارد به عنوان متغیرهای طراحی برای برنامه‌ریزی بهینه آبیاری موردنیاز می‌باشد، اما به دلیل تغییرات زمانی و مکانی زیاد در آبیاری سطحی، ظرفیت نفوذ آب در خاک و در نتیجه حجم رواناب سطحی و همچنین وضعیت مرحله پیشروی، در مقیاس مزرعه متفاوت است (Guzmán-Rojo et al., 2019; Schwankl, et al., 2000; Oyonarte, 2002; Childs et al., 1993). بنابراین این تغییرپذیری مکانی و زمانی سرعت نفوذ در مزرعه، وضعیت مدیریت آبیاری را پیچیده کرده است (Adamala et al., 2014) و مدیریت این موضوع وابسته به حجم زیاد اطلاعات اندازه‌گیری مزرعه به‌ویژه اطلاعات کافی در زمینه حرکت و نفوذ آب در خاک است تا بیان‌کننده نسبی از شرایط مزرعه باشد (پوزن و همکاران، ۱۳۹۸ و Chari et al., 2021). در طی سالیان گذشته پژوهشگران روش‌های مختلف را جهت کاهش نیاز به اندازه‌گیری‌های متعدد داده‌های مزرعه‌ای جهت مدیریت آب در مزرعه ارائه نموده‌اند. از جمله این مطالعات، ارائه روش مقیاس‌سازی در سال ۱۹۵۶ توسط میلر^۱ و میلر را می‌توان به عنوان آغاز پژوهش‌ها بر پایه نظریه محیط‌های متشابه در دانش آب و خاک ذکر نمود (Sadeghi et al., 2012). در این روش و بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، خاک‌ها را می‌توان متشابه نامید به شرط اینکه خاک‌های مختلف را بتوان با نسبت‌هایی از یک طول مشخصه فیزیکی، تحت عنوان فاکتور مقیاس، بر روی یک منحنی مرجع قرار داد (Sadeghi et al., 2016; Chari et al., 2020; Lakzaiyanpoor et al., 2021).

پس از ارائه روش مقیاس‌سازی در علوم آب و خاک، مطالعات بر پایه روش مقیاس‌سازی برای روش‌های آبیاری سطحی و معادله‌های نفوذ به کاررفته در آن نیز با در نظر گرفتن این موضوع که بدون بعد سازی معادلات آبیاری سطحی موجب درک ساده‌تر نسبت به حالت عمومی خواهد شد و این امر در نتیجه‌ی کم شدن تعداد پارامترهای غیر وابسته است ادامه یافت (Strelkoff and Katopodes, 1977; Bautista et al., 2012; Alazba, 1999; Chari et al., 2020).

در واحد عرض برحسب مترمربع بر ثانیه (m^2/s)، v سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه (m/s)، S_0 و S_f به ترتیب شیب کف و شیب اصطکاک، A سطح مقطع جریان برحسب مترمربع (m^2)، g شتاب ثقل برحسب متر بر ثانیه به توان دو (m/s^2)، i شدت نفوذ برحسب متر بر ثانیه (m/s)، Z عمق آب نفوذ یافته برحسب متر (m) و D ثابت عددی می باشد که وابسته به رابطه مشتق شده از معادله مؤمنتم است. مدل های متفاوتی به دلیل فرم معادلات استفاده شده و حل آنها بر پایه معادلات سنت-ونانت برای شبیه سازی جریان سطحی آب روی خاک وجود دارد، اما وجه مشترک تمام این مدل های مشتق شده از معادلات سنت-ونانت به کارگرفتن شکل کامل معادله پیوستگی است و تفاوت عمده آنها در نحوه به کار بردن معادله مؤمنتم می باشد که بر همین اساس معادلات سنت-ونانت به سه دسته بندی تقسیم می شوند: ۱- مدل هیدرودینامیک کامل، ۲- مدل اینرسی صفر و ۳- مدل موج سینماتیک. مدل به کارگرفته در این پژوهش نیز مدل موج سینماتیک می باشد.

معادله موج سینماتیک

چنانچه در معادله (۲) بخش های مرتبط با شتاب و گرادیان عمق به عنوان پارامترهای دینامیک جریان در نظر گرفته نشود یا به عبارتی دیگر مقدار شیب کف برابر با شیب اصطکاک در نظر گرفته شود در نتیجه معادله (۲) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f = 0 \quad (3)$$

بنابراین در رابطه به دست آمده می توان از اساس رابطه دی-اشل و معادلات جریان یکنواختی مانند روابط مانینگ، سزی و یا دارسی-ویسباخ استفاده نمود. با استفاده از معادله مانینگ شیب اصطکاک برابر است با معادله (۴):

$$S_f = \frac{q^2 n^2}{y^{10/3}} \quad (4)$$

و در نتیجه خواهیم داشت:

$$S_0 = S_f = \frac{q^2 n^2}{y^{10/3}} \quad (5)$$

که q دبی، n ضریب زبری مانینگ و y عمق جریان می باشد. معادله پیوستگی در مدل موج سینماتیک به صورت کامل (معادله ۱) در نظر گرفته می شود. در نتیجه معادلات مورد استفاده در این مدل، معادلات (۱) و (۵) می باشد. بنابراین شرایط اولیه برابر است با معادله (۶):

$$t = 0; \quad q(x, 0) = 0, \quad y(x, 0) = 0 \quad (6)$$

و شرایط مرزی مناسب نیز به صورت دو معادله (الف) و (ب) تعریف می گردد:

$$0 < t \leq t_{co}; \quad q(0, t) = q_0, \quad y(0, x) = y_0 \quad (الف)$$

$$t > t_{co}; \quad q(0, t) = 0 \quad (ب)$$

(Irmak et al., 2011; Gonçalves et al., 2021). در همین راستا، مقیاس سازی معادله بیلان حجمی به عنوان روشی برای ساده سازی پیش بینی پیشروی آب مورد توجه قرار گرفته است. از جمله، چاری (۱۳۹۹) با مقیاس سازی معادله بیلان حجمی، یک معادله نسبتاً ساده برای تخمین پیشروی جریان در آبیاری نواری ارائه کرد. با این حال، محدودیت های روش های موجود نظیر فرضیات خاص شرایط مرزی و نیاز به داده های پیچیده، زمینه ساز نیاز به پژوهش های جدید است. بررسی منابع نشان می دهد اگرچه چاری و همکاران (۲۰۱۹) معادله موج سینماتیک را مقیاس کردند، اما از معادله فیلیپ شاخه ای دوجزئی برای بخش نفوذ استفاده نمودند که خود یک ساده سازی است که در واقعیت کمتر اتفاق می افتد و کاربرد کمی دارد (Chari et al., 2019). پوزن و همکاران (۱۳۹۸) و چاری و همکاران (۲۰۲۰) روشی جدیدی برای مقیاس سازی معادله نفوذ به تنهایی ارائه کردند و نشان دادند که این روش را می توان برای معادلات مختلف نفوذ مورد استفاده قرار داد. بنابراین در پژوهش حاضر، با هدف مقیاس سازی مدل موج سینماتیک و استفاده از معادله نفوذ کوستیاکف در آبیاری نواری، روش مقیاس سازی تعمیم یافته و در شرایط عملیاتی مختلف و مستقل از خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است، به طوری که معادله تجربی ساده تر و عمومیت پذیرتر برای پیشروی آب به دست آمده است. به بیان ساده تر، در این تحقیق از معادله نفوذ به دست آمده با استفاده از روش چاری و همکاران (۲۰۲۰) برای مقیاس سازی مدل موج سینماتیک در آبیاری سطحی استفاده می گردد. نتایج این تحقیق علاوه بر ارتقای دقت پیش بینی، بهینه سازی مدل سازی، کاربرد مهمی در طراحی سیستم های آبیاری سطحی مانند تعیین زمان بندی بهینه هر نوبت آبیاری دارد. همچنین این روش می تواند به کاهش مصرف آب و افزایش راندمان آبیاری منجر شود، که از طریق ساده سازی عملیات میدانی امکان اجرای کاربردی تر نتایج این تحقیق فراهم می گردد.

مواد و روش ها

معادلات سنت-ونانت

معادلات حاکم در آبیاری سطحی شامل معادلات سنت-ونانت است که از قانون بقای جرم و مؤمنتم به دست آمده اند. معادلات سنت-ونانت با دو معادله پیوستگی (۱) و معادله مؤمنتم (۲) به شرح ذیل شناخته می شود (Katapodes and Strelkoff, 1977):

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{Dvi}{gA} \quad (2)$$

در روابط ذکر شده x فاصله از ابتدای زمین (کرت، نوار و شیار)، t فاصله زمانی از شروع آبیاری، y عمق جریان برحسب متر (m)، q دبی

فاکتورهای مقیاس جهت مشخص نمودن متغیرهای بدون بعد است. بنابراین روابط زیر برای معادلات (۵) و (۱۱) تعریف می‌گردد:

$$q^* = \frac{q}{q_c} \quad (۱۲ \text{ الف})$$

$$x^* = \frac{x_c}{x_c} \quad (۱۲ \text{ ب})$$

$$y^* = \frac{y}{y_c} \quad (۱۲ \text{ پ})$$

$$t^* = \frac{t}{t_c} \quad (۱۲ \text{ ت})$$

در روابط فوق متغیرهای ستاره‌دار، بدون بعد و متغیرهای دارای اندیس c، متغیرهای مشخصه غیر صفر و به‌عنوان عامل مقیاس می‌باشند. بنابراین q_c عامل مقیاس دبی، y_c عامل مقیاس عمق جریان روی سطح خاک، x_c عامل مقیاس فاصله طولی و t_c عامل مقیاس زمان است.

در مرحله بعد از مقیاس‌سازی، روابط بین عامل‌های مقیاس و متغیرهای فیزیکی تعیین می‌گردد. در نتیجه با جایگزین نمودن روابط (۱۲ الف، ب، پ و ت) در معادله (۱۱)، معادله جدید به فرم زیر به دست می‌آید:

$$\frac{q_c}{x_c} \frac{\partial q^*}{\partial x^*} + \frac{y_c}{t_c} \frac{\partial y^*}{\partial t^*} + \alpha_{ref} F_{si} k_{ref} t_c^{\alpha_{ref}-1} t^{*\alpha_{ref}-1} = 0 \quad (۱۳)$$

با جایگزین نمودن معادله (۱۰) در معادله (۱۳) و سپس ضرب نمودن t_c/y_c در معادله (۱۳)، معادله به فرم زیر تبدیل می‌گردد:

$$\frac{q_c t_c}{x_c y_c} \frac{\partial q^*}{\partial x^*} + \frac{\partial y^*}{\partial t^*} + \frac{\alpha_{ref} k_i t_s^{\alpha_i} t_c^{\alpha_{ref}}}{y_c t_s^{\alpha_{ref}}} t^{*\alpha_{ref}-1} = 0 \quad (۱۴)$$

در نتیجه شکل مقیاس شده شرایط اولیه (معادله ۶) برابر است با:

$$t^* = 0; \quad q^*(x^*, 0) = 0, \quad y^*(x^*, 0) = 0 \quad (۱۵)$$

و شرایط مرزی (معادلات ۷ الف و ۷ ب) به ترتیب می‌شود:

$$0 < t^* \leq t_{co}^*; \quad q^*(0, t^*) = q_0^*, \quad y^*(0, x^*) = y_0^* \quad (۱۶ \text{ الف})$$

$$t^* > t_{co}^*; \quad q^*(0, t^*) = 0 \quad (۱۶ \text{ ب})$$

با توجه به، شکل مقیاس شده شرایط اولیه (معادله ۶) که برابر است با معادله ۱۵ و شکل مقیاس شده شرایط مرزی (معادلات ۷ الف و ۷ ب) که به ترتیب برابر است با معادلات ۱۶ الف و ۱۶ ب، شرایط اولیه و مرزی مستقل از خاک تبدیل شده است. بنابراین، معادلات (۱۴)، (۱۵)، (۱۶ الف) و (۱۶ ب) با استفاده از متغیرهای بدون بعد (q^* ، y^* ، x^* و t^*) و پارامترهای بدون بعد زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{q_c t_c}{x_c y_c} \frac{\partial q^*}{\partial x^*} + \frac{\partial y^*}{\partial t^*} + \frac{\alpha_{ref} k_i t_s^{\alpha_i} t_c^{\alpha_{ref}}}{y_c t_s^{\alpha_{ref}}} t^{*\alpha_{ref}-1} = 0 \quad (۱۷ \text{ الف})$$

$$0 < t^* \leq t_{co}^*; \quad q^*(0, t^*) = q_0^*, \quad y^*(0, x^*) = y_0^* \quad (۱۷ \text{ ب})$$

$$t^* > t_{co}^*; \quad q^*(0, t^*) = 0 \quad (۱۷ \text{ پ})$$

بنابراین عامل‌های مقیاس به نحوی انتخاب می‌شوند که معادله موج سینماتیک را مستقل از نوع خاک و شرایط اولیه و مرزی تبدیل کنند. عامل‌های مقیاس دبی (q_c)، عمق جریان (y_c) به دلیل اینکه متغیرهای هیدرولیکی فقط در ابتدای ورود به مزرعه نسبت به زمان

که q_0 دبی ورودی، t_{co} زمان قطع جریان و y_0 عمق جریان در ابتدای نوار (عمق نرمال) می‌باشد.

یکی از پارامترهای بسیار مهم در معادلات آبیاری سطحی، نفوذ می‌باشد. معادله نفوذ به شدت تحت تأثیر نوع خاک بوده و با توجه به نوع خاک تغییر می‌کند. معادلات نفوذ کوستیاکف یکی از معادله‌هایی است که در پژوهش‌های قبلی معمولاً مورد استفاده قرار گرفته است (Katapodes and Strelkoff, 1977; Yitayew and Fangemeier, 1984) و به صورت زیر می‌باشد:

$$Z = kt^\alpha \text{ and } \frac{\partial Z}{\partial t} = \alpha kt^{\alpha-1} \quad (۸)$$

α و k مقادیر ثابت و وابسته به نوع خاک می‌باشند. پژوهش‌های انجام شده جهت مقیاس‌سازی معادلات آبیاری سطحی حاکی از وابستگی میان نوع خاک و به‌ویژه توان معادله نفوذ کوستیاکف با معادله مقیاس‌سازی شده است (Bautista et al., 2012; Strelkoff and Clemmens, 1994).

در این پژوهش برآورد نفوذ از طریق کاربرد معادله نفوذ کوستیاکف و همچنین روش معرفی شده توسط پوزن و همکاران (Chari et al., 2021) و (۱۳۹۸) محاسبه می‌گردد. به طوری که در این روش با فرض ثابت بودن شکل منحنی باوجود تغییرات مقادیر سرعت و عمق نفوذ از میزان نفوذ مقیاس شده و یا میزان نفوذ معادل برای هر نوار یا هر واقعه آبیاری استفاده می‌شود. از آنجاکه انتخاب معادله نفوذ مرجع اختیاری است (پوزن و همکاران، ۱۳۹۸ و Chari et al., 2021)، در مرحله اول از میان معادله‌های نفوذ در این پژوهش یک معادله به‌عنوان منحنی مرجع جهت مقیاس‌سازی انتخاب شد. در نتیجه نفوذ معادل برای هر نوار یا واقعه برابر است با:

$$Z_i = F_{si} [k_{ref} t^{\alpha_{ref}}] \quad (۹)$$

$$F_{si} = \frac{Z_i}{Z_{ref}} = \frac{k_i t_s^{\alpha_i}}{k_{ref} t_s^{\alpha_{ref}}} \quad (۱۰)$$

که در رابطه فوق F_{si} عامل مقیاس هر نوار و واقعه آبیاری است و معادل با عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص t_s در نوار i به عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص در نوار مرجع، Z_i می‌باشد. مقدار t_s مطابق پژوهش پوزن و همکاران (۱۳۹۸) و Chari et al., (2021) جهت کسب دقت مقیاس‌سازی معادله نفوذ مناسب، در بازه زمانی ۱۲۰ الی ۲۴۰ دقیقه قرار دارد. در این تحقیق زمان ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین k_{ref} و α_{ref} پارامترهای معادله نفوذ مرجع می‌باشند.

در نتیجه معادله (۱) به فرم زیر تغییر می‌یابد:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + \alpha_{ref} F_{si} k_{ref} t^{\alpha_{ref}-1} = 0 \quad (۱۱)$$

مقیاس‌سازی معادله موج سینماتیک

اولین مرحله از مقیاس‌سازی، تقسیم متغیرهای دارای بعد بر

که T_{0i} زمان پیشروی مشاهده‌شده در هر آبیاری، T_{pi} زمان پیشروی پیش‌بینی‌شده در هر آبیاری ($i=1,2,3,\dots,n$) و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش برای ارزیابی معادلات مقیاس‌شده در آبیاری سطحی نواری، از ۱۸ مجموعه اطلاعات ارائه‌شده توسط (Ram, 1969) و (Ram, 1972)، (Ram and Lai, 1971)، (Atchison, 1973) و (Roth, 1974) استفاده گردید که از این مجموعه، اطلاعات مربوط به نوار با انتهایی بسته شامل داده‌های (Ram, 1969) و (Ram, 1972)، (Ram and Lai, 1971) به صورت ۹ نوار کشت نشده ($R_j, j=1,2,\dots,9$) و در ۹ نوار گندم کشت‌شده ($R_j, j=10,11,\dots,18$) می‌باشد. اطلاعات مربوط به نحوه کسب پارامترهای نفوذ به روش بیلان حجم و اندازه‌گیری‌ها در تحقیقات Singh and Ram, 1983 و Singh and Yu, 1986 بیان شده است و مشخصات کامل نوارهای آبیاری مورد استفاده در این پژوهش به شرح جدول (۱) می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه انتخاب منحنی مرجع انتخابی است (پوزن و همکاران، ۱۳۹۸ و Chari et al., 2021)، در این پژوهش به صورت دلخواه معادله نوار R-5 به عنوان منحنی مرجع انتخاب گردید.

همان‌طور که منحنی‌های پیشروی و پسروی در ۱۸ نوار مورد مطالعه در شکل (۱) قابل مشاهده است، نوارها دارای زمان‌های پیشروی متفاوتی با یکدیگر می‌باشند. به طوری که بیشترین زمان پیشروی آب آبیاری در نوارها مربوط به نوار Roth-8 با $181/4$ دقیقه در طول $91/5$ متر و کمترین زمان پیشروی نیز مربوط به نوار R-1 با $22/5$ دقیقه در طول 100 متر بوده است. عدم ثبات و یکنواختی در مدت زمان پیشروی برای نوارهای مختلف، بیان‌گر تغییرات گسترده در پارامترهای جریان و نفوذ به عنوان داده‌های ورودی می‌باشد و خود نشان‌دهنده وابستگی شرایط به نوع خاک است.

نتایج و بحث

نفوذ

در این پژوهش، همانند مطالعات پیشین، برای مدل‌سازی نفوذ تجمعی از معادلات تجربی کلاسیک استفاده شده است. به طور خاص، پوزن و همکاران (۱۳۹۸) با به کارگیری روش مقیاس‌سازی و داده‌های آزمایش نفوذ، ضرایب معادله کوستیاکف-لوپس را با حداقل اندازه‌گیری میدانی برآورد کردند و به دقت بالایی (ضریب تعیین حدوداً $0/99$ و ریشه میانگین مربعات خطا $0/01$) دست یافتند. همچنین جواد و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که معادله کوستیاکف-لوپس نسبت به معادلات تجربی دیگر (هورتون و فیلیپ) در پیش‌بینی نفوذ

مستقل می‌باشند، برای شرایط جریان ورودی و به صورت جریان آرام به دست می‌آیند. همچنین عامل مقیاس فاصله طولی (x_c) و زمان (t_c) نیز به نحوی در نظر گرفته شده است که در معادله نهایی مقیاس‌شده حتماً تمامی پارامترها بدون بعد باشد و معادله موج سینماتیک مستقل از نوع خاک به دست آید. در نتیجه عامل‌های مقیاس به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$q_c = q_0 \quad (18)$$

$$y_c = y_0 = \left(\frac{nq_0}{\sqrt{S_0}}\right)^{3/5} \quad (19)$$

$$t_c = \left(\frac{y_c t_s^{\alpha_{ref}}}{\alpha_{ref} k_i t_s^{\alpha_i}}\right)^{1/\alpha_{ref}} \quad (20)$$

$$x_c = \frac{q_c t_c}{y_c} \quad (21)$$

در رابطه (۱۹) عامل مقیاس عمق جریان (y_c) با توجه به در نظر گرفتن جریان آرام برابر با عمق نرمال (y_0) است.

معادله موج سینماتیک در حالت مقیاس‌شده با مشخص شدن عامل‌های مقیاس به صورت مستقل از نوع خاک و شرایط اولیه و مرزی، به فرم رابطه (۲۲) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial q^*}{\partial x^*} + \frac{\partial y^*}{\partial t^*} + t^{* \alpha_{ref} - 1} = 0 \quad (22)$$

یکتا بودن معادله فوق امکان استخراج یک معادله تجربی جهت پیش‌بینی تقریبی پیشروی آب در هر نوار را ایجاد می‌کند. در نتیجه یک معادله توانی به حل پیشروی مقیاس‌شده برآزش داده می‌شود:

$$t_{Ax}^* = A_1 x^{* A_2} \quad (23)$$

در این رابطه A_1 و A_2 پارامترهای برآزش و t_{Ax}^* زمان پیشروی مقیاس‌شده در نقطه x^* است.

معادله‌های مقیاس‌شده به دلیل استفاده مسائل آبیاری سطحی از فرم دارای بعد پارامترها، باید از حالت بدون بعد و مقیاس خارج شوند. بنابراین معادله‌های (۲۰) و (۲۱) در معادله (۲۳) جایگزین شدند:

$$t_{Ax} = \alpha_1 x^{\alpha_2} \quad (24)$$

و ضرایب ثابت در این رابطه برابر است با:

$$\alpha_1 = \frac{t_c A_1}{x_c^{A_2}} \quad (25 \text{ الف})$$

$$\alpha_2 = A_2 \quad (25 \text{ ب})$$

در پایان از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی (E_a) و ضریب تعیین (R^2) جهت ارزیابی مقیاس‌سازی در برآورد فاز پیشروی آبیاری نواری استفاده می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{0i} - T_{pi})^2}{n}} \quad (26)$$

$$E_a = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_{0i} - T_{pi}|}{T_{0i}} \quad (27)$$

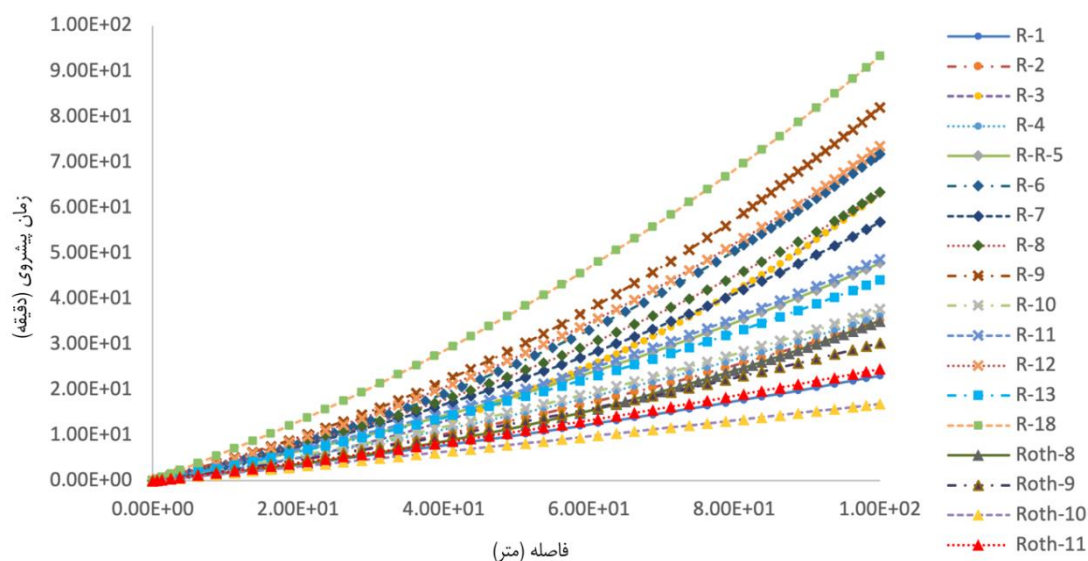
$$R^2 = \left\{ \frac{n(\sum I_{0i} I_{pi}) - (\sum I_{0i})(\sum I_{pi})}{\sqrt{[n \sum I_{0i}^2 - (\sum I_{0i})^2]} \sqrt{[n \sum I_{pi}^2 - (\sum I_{pi})^2]}} \right\}^2 \quad (28)$$

به دست آمده از معادله نفوذ کوستیاکف (معادله ۸) و شکل (۲-ب) نشان دهنده منحنی نفوذ مقیاس سازی شده با استفاده از معادله (۹) است.

تجمعی کارایی بهتری دارد. نتایج نفوذ به دست آمده در مطالعه حاضر نیز با یافته های پژوهش های مذکور هماهنگ است و نشان دهنده دقت بالای روش انتخاب شده در شرایط مورد بررسی می باشد. به طوری که شکل (۲-الف) نشان دهنده منحنی نفوذ واقعی

جدول ۱ - مشخصات نوارهای آبیاری مورد استفاده

نام نوار	دبی (m ³ /m/min)	شیب (m/m)	ضریب زبری (-)	طول (m)	عرض (m)	زمان پیشروی (min)	k (m/min ^{0.5})	α (-)
R-1	۰/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۰۵۹	۱۰۰	۶	۲۲/۵	۰/۰۰۳۹	۰/۵۶۷
R-2	۰/۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۶۶	۱۰۰	۶	۳۷	۰/۰۰۴۶	۰/۵۷۴
R-3	۰/۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۴۸	۱۰۰	۶	۵۹	۰/۰۰۴۶	۰/۵۹
R-4	۰/۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۷۷	۱۰۰	۶	۳۵/۵	۰/۰۰۴۷۹	۰/۶۰۵
R-5	۰/۱۲	۰/۰۰۳	۰/۰۹۲	۱۰۰	۶	۵۰	۰/۰۰۴۶۴	۰/۵۸۸
R-6	۰/۰۸	۰/۰۰۳	۰/۱	۱۰۰	۶	۷۴	۰/۰۰۳۶۱	۰/۶۱۵
R-7	۰/۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۸	۱۰۰	۶	۵۰	۰/۰۰۴۰۲	۰/۶۹
R-8	۰/۱۲	۰/۰۰۱	۰/۰۷۱	۱۰۰	۶	۵۹	۰/۰۰۳۳	۰/۶۹
R-9	۰/۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۷۳	۱۰۰	۶	۹۵	۰/۰۰۰۶	۰/۵۲۷
R-10	۰/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۱۱	۱۰۰	۶	۴۱	۰/۰۰۴۴	۰/۶۲
R-11	۰/۱۲	۰/۰۰۵	۰/۱۳۲	۱۰۰	۶	۵۱	۰/۰۰۳۶	۰/۶۳
R-12	۰/۰۸	۰/۰۰۵	۰/۱۵۴	۱۰۰	۶	۷۵	۰/۰۰۵۳	۰/۵۳۳
R-13	۰/۱۶	۰/۰۰۳	۰/۱۱	۱۰۰	۶	۵۰	۰/۰۰۳۹	۰/۶۷۴
R-18	۰/۰۸	۰/۰۰۱	۰/۱۳	۱۰۰	۶	۱۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۵۸۵
Roth-8	۰/۱۰۵۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۹۱/۵	۵/۸۹	۱۸۱/۴	۰/۰۰۹۳	۰/۴۴۱
Roth-9	۰/۱۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	۹۱/۵	۵/۸۹	۱۷۹/۹	۰/۰۱۵	۰/۳۳۶
Roth-10	۰/۲۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۲۶	۹۱/۵	۵/۸۹	۱۷۹/۹	۰/۰۲۴۴	۰/۱۱
Roth-11	۰/۱۴۵۷	۰/۰۰۱	۰/۰۲۹	۹۱/۵	۵/۸۹	۱۷۹/۹	۰/۰۱۷۹	۰/۲۵۷



شکل ۱- منحنی پیشروی آب آبیاری در ۱۸ نوار مورد مطالعه

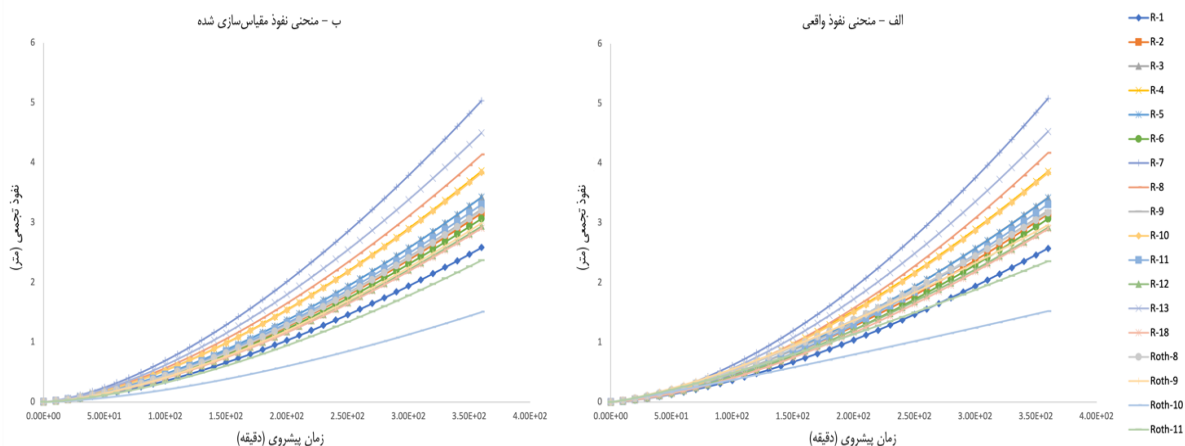
منحنی نفوذ تجمعی واقعی و نفوذ تجمعی مقیاس سازی شده نخواهد بود و میان منحنی های نفوذ تجمعی واقعی و نفوذ تجمعی به دست آمده از مقیاس سازی اختلاف معناداری وجود ندارد.

در این پژوهش عامل های مقیاس با استفاده از معادله های (۱۸)، (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) برای هر یک از نوارها محاسبه گردید و پارامترهای آماری شامل کمینه، بیشینه، میانگین مقدار، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات طبق جدول (۲) برای عوامل مقیاس بررسی شد. مطابق رابطه (۱۸) مقادیر عامل مقیاس دبی جریان، با شدت جریان ورودی در هر نوار آبیاری برابر است. با توجه به رابطه (۱۹) مقادیر مقیاس عمق نرمال با شدت جریان و ضریب زبری رابطه مستقیم و با پارامتر شیب نوار رابطه عکس دارد. در ادامه بر اساس رابطه (۲۰) قابل مشاهده است که عامل مقیاس عمق نرمال و عامل مقیاس زمان دارای رابطه مستقیم و طبق معادلات (۱۰) و (۲۰) نسبت به پارامترهای F_{si} و k_{ref} رابطه عکس دارند. همچنین طبق رابطه (۲۱) میان عامل مقیاس فاصله طولی و عامل مقیاس زمان نیز رابطه مستقیم برقرار است. بر اساس جدول (۲) بازه تغییرات عوامل مقیاس زمان از ۱۷/۹۵ تا ۲۲۷/۰۴۵ دقیقه و بازه تغییرات عوامل مقیاس فاصله طولی از ۹۶/۱۸ تا ۱۵۶۸/۱۳ متر متغیر است.

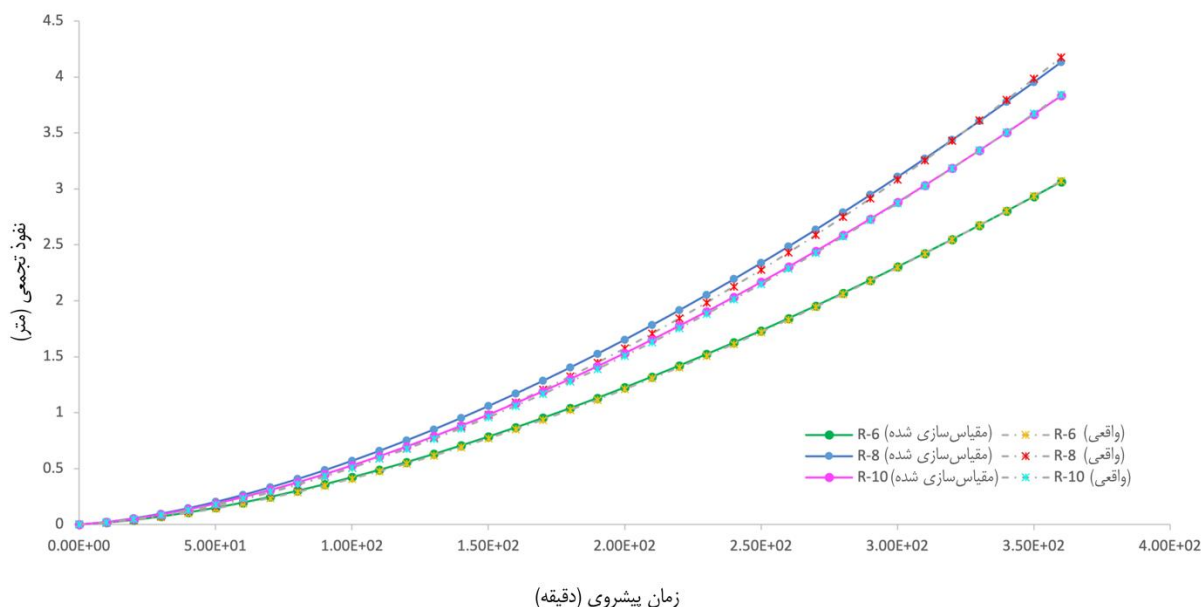
در ادامه شکل (۴) حالت مقیاس شده شکل (۱) را برای منحنی های پیشروی نشان می دهد که با استفاده از فرم مقیاس شده معادله موج سینماتیک و به کمک فاکتورهای مقیاس معرفی شده در این پژوهش (معادله های ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱) به دست آمده است. در شکل (۴) به دلیل تعریف مناسب عوامل مقیاس و مقیاس سازی موفق پیشروی آب آبیاری در هر نوار، تمام منحنی های مقیاس شده در این پژوهش بسیار نزدیک و قابل تطابق بر یکدیگر قرار گرفته اند.

در این پژوهش مقدار t_s را معادل ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته و در ادامه مقدار فاکتور مقیاس نفوذ برای هر یک از معادله های نفوذ با استفاده از معادله (۱۰) به دست آمده است. در این پژوهش بیشترین کمترین مقدار برای نفوذ تجمعی واقعی در زمان ۳۶۰ دقیقه به ترتیب ۴/۵۳۲ و ۱/۵۲۲ متر بود. همچنین بیشترین و کمترین مقدار نفوذ تجمعی مقیاس شده در زمان ۳۶۰ دقیقه به ترتیب ۴/۴۹۴ و ۱/۵۰۳ متر بود. مقایسه دو شکل (۲-الف) و (۲-ب) نشان می دهد که نفوذ تجمعی واقعی و نفوذ تجمعی به دست آمده از مقیاس سازی در بخش های زیادی مشابه یکدیگر بوده است و در بعضی موارد تفاوت هایی در مقادیر ابتدایی و انتهایی به دلیل انطباق دو منحنی در زمان میانه (۱۸۰ دقیقه) قابل مشاهده است.

برای نمایش بهتر میزان شباهت بین نفوذ واقعی و نفوذ مقیاس سازی شده، منحنی های نفوذ واقعی و منحنی به دست آمده از مقیاس سازی ($Z_{scaled} = F_{si}Z_{Ref}$) برای هر یک از منحنی های نفوذ مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۳) نتایج مقایسه برخی از منحنی ها (R-6, R-8, R-10) نشان داده شده است. به طوری که برای نوار (R-6) مقدار نفوذ تجمعی واقعی و مقیاس سازی شده در زمان ۳۶۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۳/۰۶۹ و ۳/۰۶۲ متر است. برای نوار (R-8) مقدار نفوذ تجمعی واقعی و مقیاس سازی شده در زمان ۳۶۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۴/۱۷۵ و ۴/۱۳۲ متر است. همچنین برای نوار (R-10) مقدار نفوذ تجمعی واقعی و مقیاس سازی شده در زمان ۳۶۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۳/۸۴۱ و ۳/۸۳۰ متر است. برای سایر زمان ها نیز مشابه با نتایج پژوهش پوزن و همکاران، (۱۳۹۸) و Chari et al., (2021) منحنی نفوذ تجمعی واقعی و نفوذ تجمعی مقیاس سازی شده بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. به طوری که تفاوتی میان استفاده از



شکل ۲- منحنی نفوذ تجمعی واقعی (الف) و منحنی نفوذ تجمعی مقیاس شده (ب)



شکل ۳- مقایسه بین منحنی نفوذ تجمعی واقعی و منحنی نفوذ به دست آمده از مقیاس‌سازی برای نوارهای (R-6, R-8, R-10)

جدول ۲- شاخص‌های آماری عامل‌های مقیاس

X_c (m)	T_c (min)	Y_c (m)	q_c ($m^3/m/min$)	شاخص آماری
۱۵۶۸/۱۳۳۹	۲۲۷/۰۴۴۸	۰/۰۴۹۸	۰/۲۰۱۱	حداکثر
۹۶/۱۸۴۷	۱۷/۹۴۸۷	۰/۰۱۴۹	۰/۰۸	حداقل
۳۳۱/۱۸۵	۷۶/۷۷۵۱	۰/۰۳۱۵	۰/۱۲۶۵	میانگین
۳۲۳/۴۹۲۳	۴۶/۲۶۲۶	۰/۰۰۹۳	۰/۰۳۷	انحراف استاندارد
۰/۹۷۶۷۷۲	۰/۶۰۳۹	۰/۲۹۴۶	۰/۲۹۲۸	ضریب تغییرات

روندی یکسان اما مستقل از شرایط خاک همگرا شده است. این همگرایی در منحنی‌های مقیاس‌سازی شده تأییدی بر اثربخشی روش مقیاس‌دهی در ساده‌سازی الگوهای پیشروی و در تکمیل نتایج چاری (۱۳۹۹) می‌باشد.

ارزیابی معادله ارائه شده

منحنی پیشروی آب در هر نوار با استفاده از جایگزین نمودن معادلات (۲۵ الف و ب) در معادله (۲۹) به دست آمده است. نتایج پیش‌بینی زمان پیشروی به کمک مقیاس‌سازی نسبت به نتایج مشاهده شده مرحله پیشروی هر نوار به کمک معادلات (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد. نتایج ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) حاکی از این است که بیشترین مقدار RMSE به ترتیب مربوط به نوارهای R-3، R-9 و R-6 و برابر با ۱۱/۹۶، ۶/۰۶ و ۵/۸۸ دقیقه و کمترین

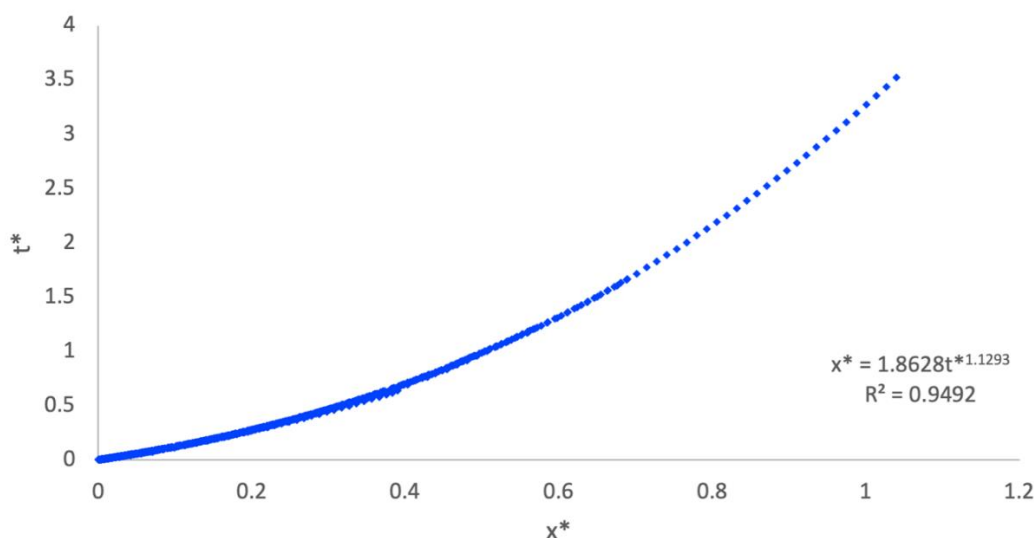
شکل (۴) مشخص می‌کند که منحنی به سمت معادله‌ای مشخص میل می‌کند در نتیجه یک معادله تجربی (معادله ۲۳) بر پایه فاصله مقیاس‌سازی شده و زمان مقیاس‌سازی شده است به آن برآزش می‌دهیم:

$$t_{AX}^* = 1.8628x^{*1.1293} \quad (29)$$

چنانچه معادله (۲۹) برای نوارهای مختلف از حالت مقیاس‌سازی شده خارج شود، معادله پیشروی در نوارها و شرایط اولیه متفاوت به دست می‌آید.

مطالعه چاری (۱۳۹۹) نیز نشان داد که پس از اعمال روش مقیاس‌سازی، منحنی‌های پیشروی آب در نوارهای مختلف تمایل دارند به یک الگوی توانی مشترک گرایش پیدا کنند. بنابراین با استفاده از الگو به دست آمده توانست رابطه‌ای توانی برای پیش‌بینی پیشروی نهایی با ضریب تعیین حدود ۹۳ درصد ارائه دهد. در این پژوهش تحت شرایط متنوع، داده‌های پیشروی تحلیل شدند و مشاهده گردید پس از مقیاس‌دهی مناسب، منحنی‌های پیشروی به

همچنین با ارزیابی ضریب تعیین (R^2) مشاهده شد در تمام نوارها، نسبت داده‌های مشاهداتی و نتایج پیش‌بینی دارای مقادیر بالای ۹۶ درصد بوده است. از این میان نتایج ۱۴ نوار دارای دقت بسیار بالا با مقادیر نزدیک به ۱۰۰ و بالای ۹۹ درصد می‌باشد. نتایج جدول (۳) ارائه‌دهنده دقت بالای معادله معرفی شده در این تحقیق و بسیار نزدیک به نتایج به دست آمده از پژوهش چاری (۱۳۹۹) می‌باشد. همچنین عدم وابستگی خطاهای پیش‌بینی نسبت به داده‌های دبی ورودی و شیب در هر دو پژوهش است.



شکل ۴- منحنی پیشروی مقیاس شده

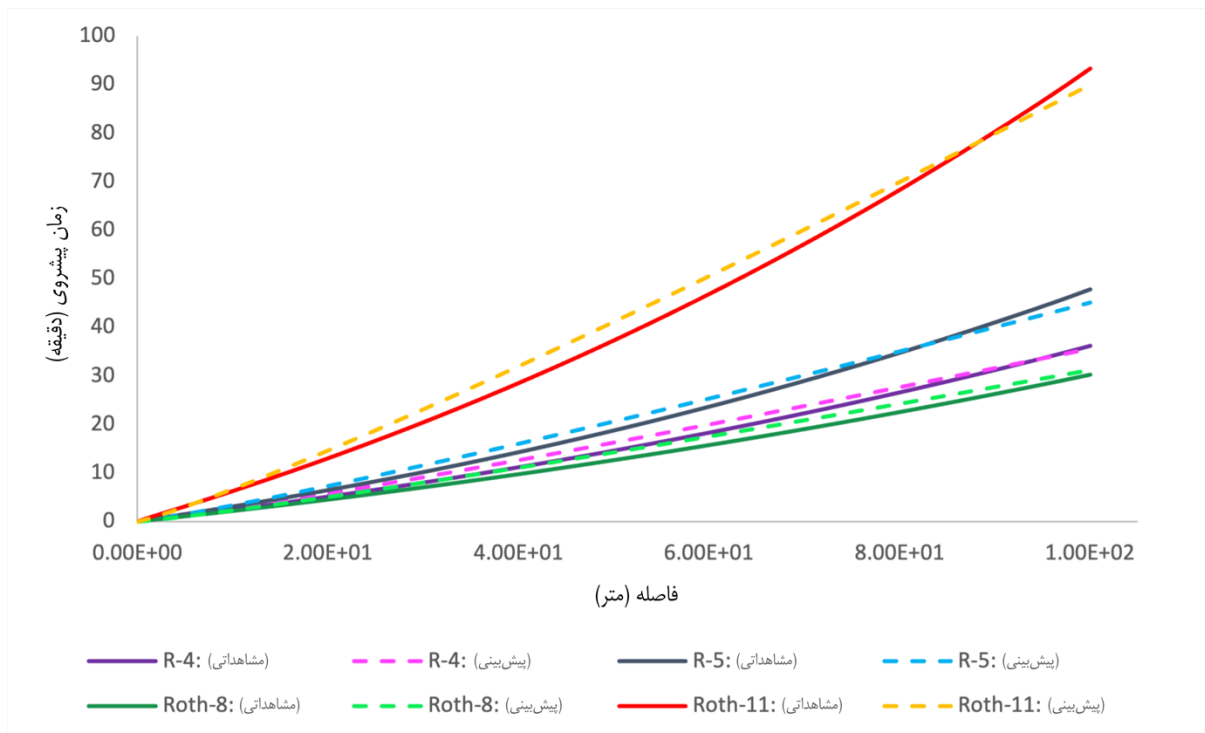
هم‌راستا با این تحقیق، چاری (۱۳۹۹) نیز معادله ساده شده بیلان حجمی را به منظور پیش‌بینی پیشروی نهایی آب در نوار با ضریب تعیین ۹۳ درصد به صورت بدون بعد و مستقل از شرایط اولیه و نوع خاک ارائه کرد. همچنین مغفرتی و همکاران (۱۳۹۹) معادله بیلان حجمی اصلاح شده با دقت بالا (ریشه میانگین مربعات خطا تقریباً ۹ دقیقه و میانگین خطای مطلق حدوداً ۶/۹ درصد) در روش دونقطه‌ای جدید، معرفی نمودند. در نتیجه با توجه به این که استفاده از معادلات تجربی نفوذ و گسترش مشاهدات میدانی در مدل سازی، موجب افزایش دقت پیش‌بینی شده است، روش حاضر با ترکیب عناصر این دو رویکرد، مدلی توسعه یافته تر ارائه می‌دهد و نتایج نشان داد خطای پیش‌بینی پیشروی در این تحقیق مطابق با مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین در محدوده خطاهای چند دقیقه یا درصد بسیار اندک است.

مقدار آن مربوط به نوار Roth-9 و برابر با ۰/۹۵ دقیقه بوده است. همچنین در سایر نوارهای مورد مطالعه این مقدار کمتر از ۴ دقیقه می‌باشد. به طور کلی برای اکثر نوارها این مقدار نزدیک به مقدار RMSE برای نوار مرجع R-5 بوده است که نشان از دقت نسبتاً خوب مقیاس سازی دارد. درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی (E_a) برای نوارهای مورد مطالعه در این پژوهش با بیشترین مقدار برای نوار R-3 با ۲۲ درصد و کمترین مقدار برای نوار R-7 با ۸ درصد می‌باشد که به صورت عمده در کل پژوهش کمتر از ۱۱ درصد ارزیابی شده است.

در ادامه به منظور درک بهتر جدول (۳) و نمایش دقت بالای معادله ارائه شده جهت پیش‌بینی مرحله پیشروی آبیاری در نوارها، نحوه قرارگیری منحنی پیش‌بینی شده زمان پیشروی با روش مقیاس سازی و منحنی پیشروی داده‌های مشاهداتی برای نوارهای مورد مطالعه در این پژوهش ترسیم شده است (شکل ۵). با توجه به نحوه قرارگیری منحنی‌ها در شکل (۵)، نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در این پژوهش زمان پیشروی را به خوبی و با اختلاف اندکی پیش‌بینی کرده است. زمان پیشروی اندازه‌گیری شده برای نوارهای R-4، R-5، Roth-8 و Roth-11 به ترتیب برابر است با ۳۶/۲۴، ۴۷/۸۳، ۳۰/۳۱ و ۹۳/۳۷ دقیقه و زمان پیشروی به دست آمده از این پژوهش نیز به ترتیب برابر با ۳۵/۶، ۴۵/۱۹، ۳۱/۲۸ و ۹۰ دقیقه است. به طور کلی نتایج شکل (۵) نشان‌دهنده دقت معادله‌ی ارائه شده جهت پیش‌بینی زمان پیشروی آب آبیاری در مدل آبیاری نواری و نوارهای کشت شده و کشت نشده است.

جدول ۳- شاخص‌های آماری عامل‌های مقیاس

نام نوار	R^2	E_a (%)	RMSE (min)
R-1	۰/۹۹۹۱	۱۰/۳۵	۱/۱۱
R-2	۰/۹۹۲۷	۸/۶۸	۱/۱۴
R-3	۰/۹۶۵۹	۲۲/۹۲	۱۱/۹۶
R-4	۰/۹۹۶۲	۸/۷۵	۱/۰۷
R-5	۰/۹۹۴۶	۸/۴۳	۱/۳۱
R-6	۰/۹۸۹۹	۱۲/۴۹	۵/۸۸
R-7	۰/۹۹۳۵	۸	۱/۷۵
R-8	۰/۹۹۰۹	۸/۷۷	۳
R-9	۰/۹۸۸۶	۱۰/۳۳	۶/۰۶
R-10	۰/۹۹۶۸	۸/۹۷	۱/۲
R-11	۰/۹۹۹۶	۸/۶۴	۱/۳۹
R-12	۰/۹۹۰۷	۸/۹۹	۳/۶۷
R-13	۰/۹۹۶۸	۱۰/۴۷	۱/۷۴
R-18	۰/۹۸۸۳	۱۳/۶۱	۳/۹
Roth-8	۰/۹۹۷۹	۱۰/۳۴	۱/۲۸
Roth-9	۰/۹۹۹۶	۹/۹۶	۰/۹۵
Roth-10	۰/۹۹۹۴	۱۱/۶۴	۱/۴۵
Roth11	۰/۹۹۵۷	۸/۲۱	۱/۱۱



شکل ۵ - مقایسه منحنی پیشروی آب آبیاری در نوارهای R-4، R-5، Roth-8، و Roth-11 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده به روش ارائه شده در این تحقیق

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش جدید به منظور مقیاس‌سازی معادله موج سینماتیک ارائه شد که نتایج بیانگر تشابه شکل منحنی پیشروی برآورد شده و داده‌های مشاهداتی می‌باشد. همچنین مشخصات نفوذ برای هر یک از نوارها از معادله نفوذ کوستیاکف مقیاس‌شده به دست آمده است که مقادیر نفوذ به دست آمده با استفاده از معادله کوستیاکف و معادله نفوذ مقیاس‌شده به یکدیگر بسیار نزدیک بودند. عوامل مقیاس نیز به نحوی تعریف شدند که معادله موج سینماتیک مستقل از خاک و شرایط مزرعه عمل نماید. با توجه به نتایج به دست آمده از منحنی‌های پیشروی مقیاس‌شده و تمایل آن به یک منحنی واحد، یک معادله تجربی جدید در این مطالعه با استفاده از مفهوم مقیاس‌سازی و برای برآورد منحنی پیشروی آب آبیاری در هر نوار ارائه گردید. معادله موردنظر برای ۱۸ نوار آبیاری به صورت کشت‌شده و کشت نشده مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان‌دهنده دقت بالا و عدم تأثیر قابل توجه وضعیت کشت بر روی پیش‌بینی پیشروی در این روش بوده است. به طوری که، نتایج نشان داد نوار Roth-9 با کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار ضریب تعیین (R^2)، دقیق‌ترین پیش‌بینی پیشروی آب را داشته است. علاوه بر این، نوارهای R-1 و Roth-10 نیز با داشتن RMSE پایین و R^2 بالا، دقت نسبتاً بالایی در پیش‌بینی پیشروی آب داشته‌اند. در انتها می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در روش ارائه‌شده نسبت به پژوهش‌های گذشته انجام‌شده، شکل ساده معادله و همچنین عدم وابستگی آن به نوع خاک مورد مطالعه مزیت قابل توجه این تحقیق جهت مقیاس‌سازی معادله موج سینماتیک در آبیاری نواری می‌باشد.

مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین نشان می‌دهد پژوهش حاضر ضمن تأیید سیر منطقی نتایج چاری (۱۳۹۹)، چارچوب آن مطالعه را نیز توسعه داده است. علاوه بر این، روش مقیاس‌سازی مورد استفاده در این پژوهش توانست وابستگی معادله بیلان حجمی به شرایط اولیه و نوع خاک را کاهش دهد. مزیت روش حاضر سادگی معادله و استقلال از ویژگی‌های خاک است و در عین حال دقت پیش‌بینی آن با مطالعات مشابه قابل مقایسه می‌باشد. از جمله تحقیقات مغفرتی و همکاران (۱۳۹۹) که نشان داد تنظیم پارامترهای مدل در روش دونقطه‌ای جدید منجر به کاهش چشمگیر خطای پیش‌بینی (ریشه میانگین مربعات خطا ۹ دقیقه) می‌گردد. به‌طور کلی، مدل مقیاس‌سازی ارائه‌شده در این مطالعه ضمن تأیید نتایج تجربی چاری (۱۳۹۹)، خطای پیش‌بینی بسیار کمی را نشان می‌دهد. بنابراین یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که مدل توسعه‌یافته با اتکا بر روش‌شناسی مقیاس‌سازی، دقت پیش‌بینی پیشروی آب در آبیاری نواری را بهبود بخشیده است.

منابع

- پوزن، م. ط...، چاری، م. م.، افراسیاب، پ. و کهخامقدم، پ. ۱۳۹۸. کاربرد مقیاس‌سازی در برآورد مشخصات نفوذ خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. (۵۰): ۷: ۱۶۸۷-۱۶۷۷
- جوادی، ع.، مشعل، م.، ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ نسبت به شرایط اولیه و مرزی مختلف در آبیاری جویچه‌ای. فصلنامه پژوهش آب در کشاورزی. (۲۸): ۴: ۷۹۹-۷۸۸.
- چاری، م. م. ۱۳۹۹. مقیاس‌سازی معادله بیلان حجمی در آبیاری نواری. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. (۵۱): ۲: ۳۷۳-۳۶۳.
- مغفرتی، ح. ر.، چاری، م. م.، افراسیاب، پ.، دلبری، م. ۱۳۹۹. ارائه معادله بیلان حجمی برای روش دونقطه‌ای جدید. مجله آبیاری و زهکشی ایران. (۱۴): ۳: ۱۰۶۶-۱۰۵۵.
- Adamala, S., Raghuwanshi, 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>
- Akbari, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B. and Shayannejad, M. 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. Agric. Water Manag. 201, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.015>
- Alazba, A. A. 1999. Dimensionless advance curves for infiltration families. Agric. Water Manage. 41: 115-131. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00113-9)
- Atchison, K. T. 1973. Retragance coefficient and other data for a vegetated irrigation border. Unpublished MS thesis, University of Arizona: Tucson, USA.
- Bautista, E., Strelkoff, T. and Clemmens, A. J. 2012. Improved Surface Volume Estimates for Surface Irrigation Volume-Balance Calculations. Journal of Irrigation and Drainage 138:715-726. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000461](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000461)
- Chari, M. M., Davari, K., Ghahraman, B. and Ziaiei, A. N. 2019. General equation for advance and recession of water in border irrigation. Irrigation and Drainage, 68 (3): 676-687. <https://doi.org/10.1002/ird.2342>
- Chari, M. M., Poozan, M. T. and Afrasiab, P. 2020.

- methods in surface irrigation. *Arabian Journal of Geosciences*. 14: 241. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06505-9>
- 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 Eng.* 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))
- Masseroni, D., Ricart, S., De Cartagena, F. R., Monserrat, J., Gonçalves, J. M., De Lima, I., Facchi, A., Sali, Gravity-fed surface irrigation systems in Mediterranean European contexts. *Water Journal*. 9 (1): 20. <https://doi.org/10.3390/w9010020>
- Miller, E. E. and Miller, R. D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics*. 27(4): 324-332. <https://doi.org/10.1063/1.1722370>
- Morris, M. R., Hussaina, A., Gillies, M. H border irrigation performance. *Agric. Water Manage.* 155, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.017>
- Oyonarte, N. A., Mateos, L., and Palomo, M. J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128(1): 26-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2002\)128:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:1(26))
- Pazouki, E. 2021. A practical surface irrigation design based on fuzzy logic and meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management*. 256: 107069. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107069>
- Pereira, L. S., Oweis, T., and Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. ***Agricultural water management*** 57 (3): 175-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\) 00075-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02) 00075-6)
- Ram, R. S. 1969. Hydraulics of recession flow in border irrigation system. M.S. thesis. Indian Inst. of Technol. Kharapur, India.
- Ram, R. S. 1972. Comparison of infiltration measurement techniques. *Journal of Agricultural Engineering*. 9(2): 67-75.
- Ram, R. S., and Lal, R. 1971. Recession flow in border irrigation. *Journal of Agricultural Engineering*. 8(3): 62-70.
- Roth, R. L. 1974. Data for border irrigation models. *Trans.ASAE*. 17 (1): 157-161.
- Schwankl L. J., Raghuvanshi, N.S performance under spatially varying conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 126: 355-361. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:3\(355\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(355))
- Modeling soil water infiltration variability using scaling. *Biosystem Engineering*. 196: 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.014>
- Chari, M. M., Poozan, M. T. and Afrasiab, P. 2021. Modeling infiltration in surface irrigation with minimum measurement (study of USDA-NRCS intake families). *Modeling Earth Systems and Environment*. 7: 433-441. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00865-z>
- Childs, J., Wallender, W. W., and Hopmans, J. W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage engineering*. 119(1): 74-90. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:1\(74\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:1(74))
- Costabile, P., Costanzo, C., Gangi, F., Iapige De Gaetani, C., Rossi, L., Gandolfi, C. and Masseroni, D. 2023. High-resolution 2D modelling for simulating and improving the management of border irrigation. *Agricultural Water Management*. 275: 108042: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108042>
- Fadul, E., Masih, I., De Fraiture, C. and Suryadi, F. X. 2020. Irrigation performance under alternative field designs in a spate irrigation system with large field dimensions. ***Agricultural water management***. 231: 105989 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105989>
- Gonçalves, J. M., Miao, Q., Duarte, I. M. and Shi, H. 2021. Water-saving techniques and practices for on-farm surface irrigation systems. *Biology and Life Sciences Forum*. 3(1): 46; <https://doi.org/10.3390/IECAG2021-09675>
- Guzmán-Rojo, D. P., Bautista, E., Gonzalez-Trinidad, J. G. and Bronson, K. F. 2019. Variability of furrow infiltration and estimated infiltration parameters in a macroporous Soil. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 145(2): 04018041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001366)
- Irmak, S., Odhiambo, L. O., Kranz, W. L., and Eisenhauer, D. E. 2011. Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency. 1-8
- Katopodes, N. D. and Strelkoff, T. 1977. Dimensionless Solutions of Border Irrigation Advance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 103 (4): 401-417. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001168>
- Khatri, K. L., and Smith, R. J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrigation Science*. 25: 33-43. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0032-1>
- Maghferati, H. R., Chari, M. M., and Afrasiab, P. 2021. Investigation of various volume-balance

- Irrigation Hydraulics with Zero Inertia. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 103(3): 325-342. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001157>
- Vico, G. and Porporato, A. 2011. From Rainfed Agriculture to Stress-Avoidance Irrigation: I. A Generalized Irrigation Scheme with Stochastic Soil Moisture. *Advances in Water Resources*. 34 (2): 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.11.010>
- 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 on temporal variation of infiltration and roughness. *Agricultural Water Management*. 214: 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.003>
- Yitayew, M. and Fangemeier, D. D. 1984. Dimensionless runoff curves for irrigation borders. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 110: 179-191. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1984\)110:2\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1984)110:2(179)9437(2000)126:6(355))
- Singh, V. P. and Ram, R. S. 1983. A kinematic model for surface irrigation: verification by experimental data. *Water Resources Research*. 19 (6) 1599-1612. <https://doi.org/10.1029/WR019i006p01599>
- Smith, R. J., Uddin, M. J. and 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>
- Soroush, F., Fenton, J. D., Mostafazadeh-Fard, B., Mousavi, S. F. and Abbasi, F. 2013. Simulation of furrow irrigation using the slow-change/slow-flow equation. *Agricultural Water Management*. 116L 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.07.008>
- Strelkoff, T. and Clemmens. A. J. 1994. Dimensional analysis in surface irrigation. *Irrigation Science*. 15 (2-3): 57-82. <https://doi.org/10.1007/BF00187194>
- Strelkoff, T. and Katopodes, N. D. 1977. Border

Scaling the Kinematic Wave Model in Border Irrigation

A. Nabizadeh Sarabandi¹, P. Afrasiab^{*2}, M.M. Chari², H. Dehghanisani³

Received: Jan.23, 2025

Accepted: May.17, 2025

Abstract

Surface irrigation requires a large amount of field information in the design, evaluation, and simulation stages, especially data related to water movement and infiltration that describe the relative conditions of the field well. The purpose of this research is to scale strip irrigation. For this purpose, the scaled form of the Kostyakov infiltration equation was used, and then the kinematic wave model was scaled. The results showed that with an appropriate definition of scale factors, the kinematic wave equation is scaled independently of the initial conditions and the field. Next, a single equation was fitted to the water advance curve in the strip irrigation system and then evaluated. For the evaluation, data from 18 strips, including 9 uncultivated strips and 9 cultivated wheat strips, were used. The scale factors were determined so that the kinematic wave equation becomes an equation independent of the initial conditions and soil type. The results showed that equation $t_{AX}^* = 1.8628x^{*1.1293}$, as an empirical equation obtained from the scaled advance curve for each of the irrigation strips, has a root mean square error (RMSE) of less than 12 minutes, and the mean absolute percentage of the prediction error (E_a) is less than 11 percent in most cases. Also, the coefficient of determination (R^2) between the predicted advance through the equation and the observed advance has always had values above 96 percent.

Keywords: Advance curve, Kostiakov infiltration, Scaling, Similar states

1 - PhD Candidate in Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

2 - Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

3 - Professor, Irrigation and Drainage Research Department, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(* - Corresponding Author Email: p_afrasiab@yahoo.com)