

Scaling of Volume Balance Equation in Border Irrigation

MOHAMMAD MAHDI CHARI^{1*}

1. Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, zabol, Iran
(Received: July. 20, 2019- Revised: Oct. 26, 2019- Accepted: Nov. 11, 2019)

ABSTRACT

In most cases, advance data is used for evaluating border irrigation. Due to soil variability, as well as initial and boundary conditions in border irrigation, water advance rate varies considerably in different borders. Scaling techniques helped to reduce the required measurements in soil and water issues. The aim of this study was to scale the volume balance equation and provide a simple equation to determine water advance in border irrigation. For this purpose, 21 borders, including cultivated and uncultivated borders with slope of 0.001 to 0.005, roughness of 0.017 to 0.211, length of 91.4 to 100 m, and discharge rate of 0.08 to 0.16 m³/m/min were used. Scale factors were defined such that the volume balance equation remained independent from soil and initial conditions. The scaled advance curves showed certain patterns. As a result, empirical equations were fitted to the scaled solutions. The empirical equation was evaluated for prediction of water advance in the border. The root mean square error obtained from the observed and calculated values by the experimental equation for the different borders, in most cases, was less than 5 minutes, and the mean absolute error value was less than 10%. The determination coefficient of the final advance from observed and calculated values by the experimental equation was 0.93. In general, simple form and independent to the soil type equations presented are advantages of this method.

Keywords: Border irrigation, Volume balance, Scaling, Empirical equation.

مقیاس‌سازی معادله بیلان حجمی در آبیاری نواری

محمد مهدی چاری^{۱*}

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۸/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۸/۲۰)

چکیده

در اکثر موارد به منظور ارزیابی آبیاری نواری از داده‌های پیشروی آب در نوار استفاده می‌گردد. با توجه به متغیر بودن نوع خاک و همچنین شرایط اولیه و مرزی در آبیاری نواری، سرعت پیشروی آب در نوارهای مختلف بسیار متفاوت می‌باشد. روش مقیاس‌سازی به عنوان ابزاری برای کاهش داده‌های اندازه‌گیری در مسائل آب و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این پژوهش مقیاس‌سازی معادله بیلان حجمی و ارائه معادله ساده‌ای به منظور تعیین پیشروی آب در نوار است. برای این منظور از داده‌های ۲۱ نوار شامل نوارهای کشت نشده و نوارهای کشت شده شامل شیب‌های ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۵، زبری ۰/۰۱۷ تا ۰/۲۱۱، طول ۹۱/۴ تا ۱۰۰ متر و دبی ۰/۰۸ تا ۰/۱۶ مترمکعب بر دقیقه بر متر مورد استفاده شد. عوامل مقیاس به‌گونه‌ای تعیین شد که معادله بیلان حجم مستقل از شرایط اولیه و خاک شود. نتایج نشان داد که منحنی‌های پیشروی مقیاس‌شده به معادله‌ی مشخصی میل می‌کردند، در نتیجه معادله‌های تجربی به حل‌های مقیاس‌شده برازش داده شد. معادله ارائه شده از حالت بدون بعد خارج شده و برای پیش‌بینی پیشروی آب در نوار مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار ریشه میانگین مربعات خطای پیشروی مشاهده و محاسبه شده با معادله ارائه شده در این تحقیق برای نوارهای مختلف در اکثر موارد کمتر از ۵ دقیقه و مقدار میانگین درصد مطلق خطا کمتر از ۱۰ درصد بود. ضریب تعیین (R^2) بین پیشروی نهایی به‌دست آمده از معادله توانی و پیشروی مشاهده شده ۰/۹۳ بود. به‌طور کلی شکل ساده معادله و عدم وابستگی به نوع خاک از مزایای این روش است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری، بیلان حجمی، مقیاس‌سازی، معادله تجربی

مقدمه

روش‌های آبیاری سطحی و به‌خصوص آبیاری نواری از رایج‌ترین روش‌ها برای استفاده از آب در مزارع است. این روش‌ها نسبت به روش‌های آبیاری بارانی، قطره‌ای و زیرزمینی برتری دارند، زیرا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرای آنها کمتر است، تعمیر و نگهداری وسایل مورد نیاز ساده بوده و به کارگر ماهر نیاز چندانی ندارد. طراحی، ارزیابی و شبیه‌سازی صحیح آبیاری سطحی، نیاز به داشتن اطلاعات کافی در زمینه نفوذ آب در خاک و حرکت آب در خاک است. نوع خاک، پیشروی، پسروی، رواناب و حجم آب نفوذ کرده در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییرپذیری مکانی و زمانی سرعت نفوذ، مدیریت آبیاری را پیچیده کرده است (Adamala et al., 2014).

تفاوت‌های ویژگی‌های خاک باعث تغییرات زمانی و مکانی ظرفیت نفوذ خاک در مقیاس مزرعه (Guzmán-Rojo et al., 2019; Schwankl, et al., 2000; Oyonarte et al., 2002; Childs et al., 1993) می‌شود. از آنجایی که ویژگی‌های نفوذ تابعی از زمان و مکان بوده، در نتیجه به تعداد نسبتاً زیادی

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نیاز است تا بیانی از متوسط شرایط مزرعه باشد (Bautista and Wallender, 1985). در سال‌های اخیر پژوهشگران روش‌هایی را برای کاهش نیاز به اندازه‌گیری داده‌های مزرعه‌ای و ناحیه‌ای مورد نیاز برای بیان مشخصات پویایی آب در خاک ارائه کرده‌اند. یکی از این روش‌ها مقیاس‌سازی (Scaling) می‌باشد که اولین بار توسط Miller and Miller (1956) با تکیه بر نظریه‌ی محیط‌های متشابه در دانش آب و خاک ظهور یافت (Sadeghi et al., Miller and Miller, 1956). بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، خاک‌ها را می‌توان متشابه نامید به شرطی که خاک‌های مختلف را بتوان با نسبت‌هایی از یک طول مشخصه فیزیکی، تحت عنوان «فاکتور مقیاس»، بر روی یک منحنی مرجع قرار داد.

در کلاس دوم منحنی مرجع اختیاری بوده و هریک از معادله‌های نفوذ را می‌توان به عنوان منحنی مرجع در نظر گرفت. فرض اساسی در این روش این است که شکل مشخصات نفوذ علیرغم تغییر در مقدار سرعت و عمق نفوذ تقریباً ثابت بوده است. Khatri and Smith (2006) روشی برای برآورد ضرایب نفوذ با

(مقیاس) کرده و برای استفاده از این معادلات نمودارهایی را ارائه کردند که هر یک از این نمودارها وابسته به نوع خاک می‌باشد. در نتیجه برای بیان تمامی شرایط نیاز به تعداد زیادی نمودار بود. Yitayew and Fangemeier (1984) معادلات آبیاری سطحی را برای آبیاری نواری با انتهای باز بدون بعد کرده و به این وسیله نمودارهای بدون بعدی ارائه گردید که می‌توان با توجه به پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف از روی طول بدون بعد و زمان قطع جریان بدون بعد مقدار رواناب را به دست آورد. Alazba (1999) با استفاده از روش مقیاس‌سازی منحنی پیشروی آب در آبیاری نواری را برای هر یک از شماره منحنی‌های خانواده نفوذ ترسیم کرد، در نتیجه با توجه به نوع خاک از روی منحنی‌های موجود می‌توان سرعت پیشروی را به دست آورد. Bautista et al. (2012) با محاسبه مقدار حجم سطحی در روش بیلان حجمی با استفاده از مقیاس سازی موجب بهبود روش بیلان حجمی شدند. Gonzalez et al. (2011) برای به دست آوردن شیب بهینه در آبیاری کرتی از حل مقیاس شده معادله سنت-ونانت استفاده کرد. با استفاده از فاکتورهای مقیاس معادله سنت-ونانت را بدون بعد کرده و نتیجه مجموعه‌ای از نمودارهای سه بعدی ارائه کرد که است که نشان‌دهنده رابطه شیب مزرعه، یکنواختی آبیاری و بقیه متغیرهای بدون بعد مرتبط با پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ، زمان قطع، دبی جریان و طول و عرض مزرعه است. Chari et al. (2019) معادله فیلیپ دو جزئی را به دو بخش زمان کوتاه و طولانی تقسیم کرده و با استفاده از روش مقیاس‌سازی حلی مستقل از خاک و شرایط اولیه و مرزی برای معادله موج کینماتیک ارائه کردند. گرچه در اکثر موارد ذکر شده در بالا مدل آبیاری سطحی به خوبی بی‌بعد و مقیاس شده است ولی عدم یکتایی در جواب به دلیل وابستگی به نوع خاک و شرایط مرزی و اولیه مشکل عمده‌ی تمامی این روش‌ها می‌باشد. در نتیجه هدف از این پژوهش مقیاس‌سازی معادله بیلان حجمی و ارائه معادله ای یکتا در شکل مقیاس شده برای تمامی شرایط آبیاری نواری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادله بیلان حجمی

معادله بیلان حجمی بر اساس قانون بقا جرم استوار بوده و نخستین بار توسط Lewis and Milne (1938) در آبیاری نواری به کار گرفته شده است. معادله بیلان حجمی به شکل زیر می‌باشد:

$$Q_0 t = \sigma_y A_0 x + \sigma_z Z_0 x \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Q_0 دبی ورودی (m^3/min)، t زمان (min)، σ_y فاکتور شکل سطحی ($0/77$) و σ_z فاکتور شکل زیر سطحی، Z_0

استفاده از یک نقطه پیشروی و یک منحنی نفوذ مدل (نمونه) در آبیاری سطحی پیشنهاد کردند. آن‌ها یک فاکتور مقیاس برای هر یک از مزارع تعریف کردند و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس را بدست آوردند. این روشی آسان برای استفاده و کاربرد در سطح مزرعه است که فقط به پیشروی در یک نقطه به علاوه شدت جریان و سطح مقطع جریان در ورودی جویچه نیاز دارد. Langat et al. (2008) به بررسی روش مقیاس‌سازی Khatri and Smith (2006) در روش آبیاری جویچه‌ای معمولی و همچنین تأثیر مسافت‌های مختلف پیشروی بر کاهش خطای تخمین روش مقیاس‌سازی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که چنانچه فاکتور مقیاس بر اساس فاصله پیشروی تا وسط شیار و بیشتر از آن باشد، دقت نتایج مناسب است. Koech et al. (2014a) از روش مقیاس‌سازی ارائه شده به وسیله Khatri and Smith (2006) برای تعیین زمان واقعی قطع جریان در آبیاری شیاری خودکار استفاده کردند. در این روش با توجه به زمان رسیدن آب به وسط مزرعه و فرآیند مقیاس‌سازی پارامترهای نفوذ در آبیاری شیاری تعیین و پس از آن زمان قطع جریان بهینه تعیین شد. Koech et al. (2014b) به منظور کاربردی ساختن روش Koech et al. (2014a)، اثر تغییرات تابع هدف (مانند راندمان کاربرد حداکثر)، دبی ورودی و کمبود آبیاری را با استفاده از فرآیند مقیاس‌سازی و منحنی نفوذ مرجع را مورد بررسی قرار دادند. از طرفی در بسیاری موارد داده‌های پیشروی آب در نوار و یا شیار موجود نبوده و پارامترهای معادله نفوذ در نوار و یا شیار قبل از آبیاری موجود است؛ در نتیجه در این موارد نمی‌توان از این روش برای مقیاس‌سازی استفاده کرد. Poozan et al. (2019) با استفاده از نسبت مقدار نفوذ تجمعی در نوار مورد نظر به مقدار نفوذ تجمعی در نوار مرجع برای یک زمان مشخص (به طور مثال ۱۸۰ دقیقه) مقدار فاکتور مقیاس را برای هر نوار یا واقعه آبیاری بدست آوردند و نشان دادند که فاکتور مقیاس بدست آمده با استفاده از این روش با دقت مناسبی منحنی نفوذ تجمعی را شبیه‌سازی می‌کند.

با توجه به مشکلات حل معادلات سنت-ونانت از دهه‌های گذشته از فرآیند مقیاس‌سازی به عنوان ابزاری به منظور تسهیل در ارزیابی و طراحی آبیاری سطحی استفاده شده است (Chari et al., 2019). Strelkoff and Clemmens (1981) اظهار داشتند که با تبدیل معادلات آبیاری سطحی به فرم بدون بعد تعداد پارامترهای مستقل کاهش یافته و در نتیجه درک حالت عمومی مدل ساده‌تر خواهد شد. Strelkoff and Katopodes (1977) و Strelkoff and Clemmens (1994) با استفاده از چند متغیر مرجع (عوامل مقیاس) معادلات آبیاری نواری را بدون بعد

مقدار نفوذ در ابتدای نوار، x فاصله پیشروی (m) است.

معادله نفوذ کوستیاکف یکی از معادلات است که در آبیاری

سطحی به کار رفته و به صورت زیر می‌باشد:

$$Z = kt^\alpha \text{ and } \frac{dz}{dt} = \alpha kt^{\alpha-1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که k و α ثابت‌هایی هستند که وابسته به نوع خاک می‌باشد. تحقیقات گذشته در ارتباط با مقیاس کردن معادلات آبیاری سطحی، نشان داده است که معادله مقیاس شده وابسته به خاک و بخصوص توان معادله نفوذ کوستیاکف بوده است (Bautista et al. 2012; Strelkoff and Clemmens, 1994).

در این تحقیق برای به دست آوردن نفوذ از روش Poozan et al. (2019) و کاربرد معادله کوستیاکف استفاده می‌شود. در این روش از «نفوذ مقیاس‌سازی شده یا معادل» برای هر نوار یا واقعه آبیاری استفاده می‌شود. فرض اساسی در این روش این است که شکل منحنی نفوذ علیرغم تغییر در مقدار سرعت و عمق نفوذ تقریباً ثابت بوده است. Valiantzas (2000) نیز از نفوذ معادل استفاده کرده و معادله نفوذ کوستیاکف-لوئیس را به نفوذ معادل کوستیاکف تبدیل کردند. Khatari and Smith (2006) نیز با استفاده از فاکتور مقیاس و انتخاب یکی از به عنوان منحنی مرجع، پارامترهای نفوذ در سایر جوپچه‌ها را بدست آورد. در این روش یکی از معادله‌های نفوذ را به عنوان منحنی نفوذ مرجع انتخاب می‌کنیم (Poozan et al., 2019) نشان دادند که انتخاب معادله نفوذ مرجع اختیاری است) و سپس نفوذ معادل (یا مقیاس شده) برای هر نوار یا واقعه برابر است با:

$$Z_i = F_{si} [k_{ref} t^{\alpha_{ref}}] \quad (\text{رابطه ۳})$$

F_{si} عامل مقیاس (بدون بعد) هر نوار یا واقعه آبیاری، عامل مقیاس (F_{si}) برابر است با عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص (t_i) در نوار مورد نظر به عمق آب نفوذ کرده پس از زمان مشخص در نوار مرجع:

$$F_{si} = \frac{Z_i}{Z_{ref}} = \frac{k_i t_s^{\alpha_i}}{k_{ref} t_s^{\alpha_{ref}}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که Z_i ($i=1,2, \dots, n$) عمق آب نفوذ کرده بعد از زمان مشخص (t_s)، مقدار t_s در این تحقیق برابر با ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. Poozan et al. (2019) نشان دادند چنانچه زمان انتخابی بین ۱۲۰ تا ۲۴۰ دقیقه باشد دقت مقیاس‌سازی معادله نفوذ مناسب می‌باشد. k_{ref} و α_{ref} پارامترهای معادله نفوذ مرجع است.

چنانچه نفوذ تجمعی با معادله (۳) نشان داده شود، داریم:

$$q_0 t = \sigma_y \gamma_0 x + F_{si} \sigma_z k_{ref} t^{\alpha_{ref}} x \quad (\text{رابطه ۵})$$

بدون بعد کردن معادله بیلان حجمی

مقیاس‌سازی (بدون بعد) سبب می‌گردد که تعداد متغیرها وابسته کاهش یابد (Strelkoff and Clemmens, 1981). اولین گام در مقیاس کردن معادلات و شرایط حاکم، تعیین متغیرهای بدون بعد بوده که از تقسیم متغیرهای بعد دار بر عامل‌های مقیاس به دست می‌آیند (Elliott et al., 1983):

$$q^* = \frac{q}{q_c}, \quad x^* = \frac{x}{X_c} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$y^* = \frac{y}{Y_c}, \quad t^* = \frac{t}{T_c}$$

که در آن متغیرهای ستاره‌دار بدون بعد و q_c, Y_c, X_c و T_c

عامل‌های مقیاس به ترتیب برای دبی، عمق جریان روی سطح خاک، فاصله‌ی طولی و زمان می‌باشند. مرحله‌ی بعدی مقیاس‌سازی شامل تعیین روابط بین عامل‌های مقیاس و متغیرهای فیزیکی می‌باشد. چنانچه معادله (۶) را در معادله (۵) جایگزین شود:

$$(q^* q_c)(t^* T_c) = \sigma_y \gamma_0 (x^* X_c) + F_{si} \sigma_z k_{ref} (t^* T_c)^{\alpha_{ref}} (x^* X_c) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در نتیجه:

$$\frac{q_c T_c}{(\sigma_y \gamma_0) X_c} (q^* t^*) = x^* + \frac{t^{*\alpha_{ref}}}{1 + \alpha_{ref}} \left(\frac{F_{si} k_{ref} T_c^{\alpha_{ref}}}{\sigma_y \gamma_0} \right) x^* \quad (\text{رابطه ۸})$$

عامل‌های مقیاس به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که معادله‌ی

بیلان حجمی مستقل از خاک و شرایط مرزی و اولیه گردد. چون متغیرهای هیدرولیکی تنها در ورودی مزرعه نسبت به زمان مستقل می‌باشند، عامل‌های مقیاس دبی (q_c) و عمق جریان (Y_c) برای شرایط جریان ورودی و در ارتباط با جریان آرام بدست می‌آیند. T_c و X_c را به گونه‌ای تعریف شدند که معادله‌ی بیلان حجمی مستقل از خاک گردد. در نتیجه عامل‌های مقیاس به صورت زیر خواهند بود:

$$q_c = q_0 \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$Y_c = \sigma_y \gamma_0 = \sigma_y \left(\frac{n q_0}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$T_c = \left(\frac{Y_c}{F_{si} k_{ref}} \right)^{1/\alpha_{ref}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$X_c = \frac{q_c T_c}{Y_c} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

γ_0 عمق نرمال است. با تعیین عامل‌های مقیاس، معادله‌ی

بیلان حجمی در حالت مقیاس شده به شکل معادله‌ی (۱۳) نوشته می‌شود:

$$t^* = x^* + \frac{t^{*\alpha_{ref}}}{1 + \alpha_{ref}} x^* \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که معادله بالا مستقل از شرایط اولیه و مرزی و شرایط

خاک است.

$$R^2 = \left\{ \frac{N(\sum I_{0i}I_{pi}) - (\sum I_{0i})(\sum I_{pi})}{\sqrt{[N\sum I_{0i}^2 - (\sum I_{0i})^2][N\sum I_{pi}^2 - (\sum I_{pi})^2]}} \right\}^2 \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

که N تعداد داده‌ها، T_{0i} زمان پیشروی مشاهده شده در آبیاری‌های مختلف و T_{pi} زمان پیشروی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل برای آبیاری‌های مختلف می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق برای ارزیابی معادلات به‌دست آمده با استفاده از روش مقیاس‌سازی در آبیاری نواری، از ۲۱ مجموعه اطلاعات ارائه شده توسط (Roth, Ram and Lal (1971), Ram (1969, 1972), (1974) استفاده می‌گردد. که ۱۸ نوار با انتهای بسته شامل داده‌های به صورت ۹ نوار کشت نشده ($R_j, j=1,2,\dots,9$) و در ۹ نوار گندم کشت شده ($R_j, j=10,11,\dots,18$) و دارای خاک زراعی با بافت متوسط می‌باشد. نوار (Roth-8-9-10) نیز کشت نشده، انتها باز و دارای بافت لوم شنی می‌باشند. نوارها دارای شیب‌های ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۵، زبری ۰/۰۱۷ تا ۰/۲۱۱، طول ۹۱/۴ تا ۱۰۰ متر و دبی ۰/۰۸ تا ۰/۱۶ مترمکعب بر دقیقه بر متر است. مشخصات نوارهای استفاده شده در جدول (۱) موجود می‌باشد. اطلاعات مربوط به نحوه بدست آوردن پارامترها و اندازه‌گیری در Singh and Yu (1986) بیان گردیده است. در این تحقیق معادله نفوذ نوار R-5 را به عنوان منحنی مرجع انتخاب شد (انتخاب منحنی نفوذ مرجع اختیاری است).

یکتا بودن حل معادله مقیاس شده بیلان حجمی (معادله ۱۳) این امکان را ایجاد می‌کند که یک معادله تجربی که به‌طور تقریبی پیشروی آب در نوار را پیش‌بینی کند استخراج کنیم. یک معادله توانی به حل پیشروی مقیاس شده برازش داده می‌شود:

$$t_{Ax}^* = A_1 x^{*A_2} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که t_{Ax}^* زمان پیشروی مقیاس شده در نقطه x^* و A_1 و A_2 پارامترهای برازش هستند.

از آنجا که در مسایل آبیاری سطحی از شکل بعددار پارامترها استفاده می‌گردد در نتیجه معادله‌های مقیاس شده باید به حالت مقیاس خارج گردند. معادله (۱۱) و (۱۲) را در معادله (۱۴) جایگزین کنیم، داریم:

$$t_{Ax} = a_1 x^{a_2} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

که ضرایب ثابت آن برابر خواهد بود با:

$$a_1 = \frac{T_c \cdot A_1}{X_c^{A_2}}, \quad a_2 = A_2 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

در پایان برای ارزیابی مقیاس‌سازی در برآورد فاز پیشروی در آبیاری نواری از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی (E_a) استفاده می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{0i} - T_{pi})^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

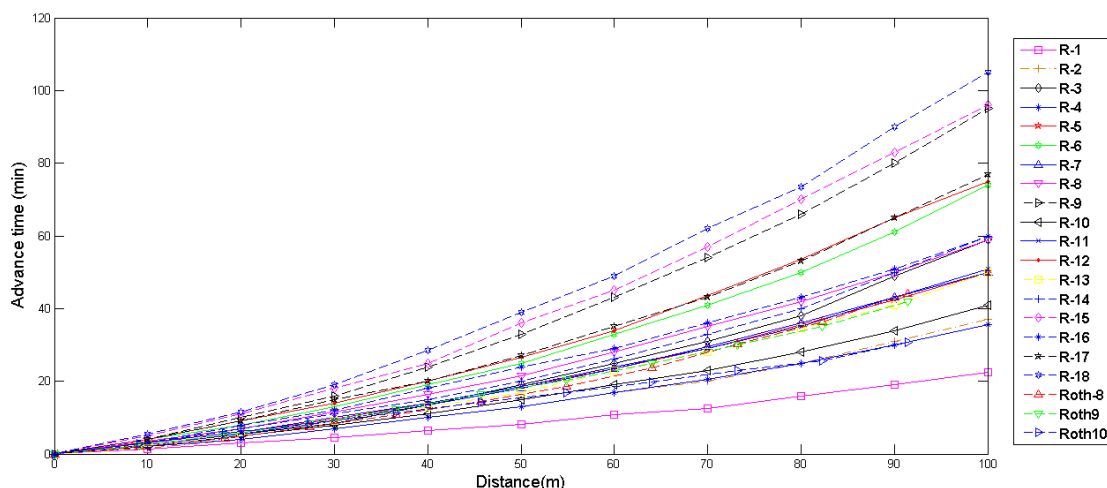
$$E_a = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|T_{0i} - T_{pi}|}{T_{0i}} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

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 | ۰/۰۰۴۷ | ۰/۵۹ |
| R-4 | ۰/۱۶ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۷۷ | ۱۰۰ | ۶ | ۳۵/۵ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۶۰۵ |
| R-5 | ۰/۱۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۹۲ | ۱۰۰ | ۶ | ۵۰ | ۰/۰۰۴۶ | ۰/۵۸۸ |
| R-6 | ۰/۰۸ | ۰/۰۰۳ | ۰/۱۰ | ۱۰۰ | ۶ | ۷۴ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۶۱۵ |
| R-7 | ۰/۱۶ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۸ | ۱۰۰ | ۶ | ۵۰ | ۰/۰۰۴ | 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 | ۰/۰۰۶ | ۰/۵۲۷ |
| R-10 | ۰/۱۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۱۱۴ | 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 | ۰/۱۱۷ | ۱۰۰ | ۶ | ۵۰ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۶۷۴ |
| R-14 | ۰/۱۲ | ۰/۰۰۳ | ۰/۱۴۵ | ۱۰۰ | ۶ | ۶۰ | ۰/۰۰۴ | ۰/۶ |
| R-15 | ۰/۰۸ | ۰/۰۰۳ | ۰/۱۸۸ | ۱۰۰ | ۶ | ۹۶ | ۰/۰۰۶ | ۰/۵۳۳ |
| R-16 | ۰/۱۶ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۴۶ | ۱۰۰ | ۶ | ۶۶ | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۶۴ |
| R-17 | ۰/۱۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۱۶ | ۱۰۰ | ۶ | ۷۷ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۶۹ |
| R-18 | ۰/۰۸ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۳۰ | ۱۰۰ | ۶ | ۱۰۵ | ۰/۰۰۴ | ۰/۵۸۵ |
| Roth-8 | ۰/۱۰۵ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۱۷ | ۹۱/۴ | ۵/۸۹ | ۳۵/۱ | ۰/۰۰۹۳ | ۰/۴۴ |
| Roth-9 | ۰/۱۴۱ | ۰/۰۱۱ | ۰/۲۱۱ | ۹۱/۴ | ۵/۸۹ | ۴۲ | ۰/۰۱۵۲ | ۰/۳۳۶ |
| Roth-10 | ۰/۱۴ | ۰/۰۱۱ | ۰/۱۰۷ | ۹۱/۴ | ۵/۸۹ | ۳۷ | ۰/۰۱۷۹ | ۰/۲۵۷ |

متر در نوار R-18 می‌باشد. متغیر بودن زمان پیشروی در نوارهای مختلف نشان دهنده‌ی تغییرات زیاد داده‌های ورودی شامل پارامترهای جریان (شرایط مرزی) و پارامترهای نفوذ (وابستگی به نوع خاک) در این داده‌ها می‌باشد.

شکل (۱) منحنی پیشروی آب در ۲۱ نوار مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در شکل (۱) کمترین مدت زمان پیشروی مربوط به نوار R-1 با زمان پیشروی برابر با ۲۲/۵ دقیقه برای طول ۱۰۰ متر و بیشترین زمان پیشروی برابر با ۱۰۵ دقیقه برای طول ۱۰۰



شکل ۱. منحنی پیشروی آب در نوارهای مختلف

برای منحنی‌های نفوذ R-1، R-7 و R-16 نشان می‌دهد. شکل (۳) نشان می‌دهد که برای نوار R-1 مقدار نفوذ تجمعی واقعی پس از ۳۶۰ دقیقه برابر با ۰/۱۳۴ متر و مقدار نفوذ تجمعی به‌دست آمده از فرآیند مقیاس‌سازی برابر با ۰/۱۳۲ متر است برای نوار R-7 مقدار نفوذ تجمعی واقعی پس از ۳۶۰ دقیقه ۰/۲۳۳ متر و نفوذ مقیاس‌سازی شده برابر با ۰/۲۲۵ متر است. مقدار نفوذ تجمعی واقعی و مقیاس‌سازی شده برابر نوار R-16 به ترتیب برابر با ۰/۱۷۹ و ۰/۱۷۳ متر پس از ۳۶۰ دقیقه است. برای سایر زمان‌ها نیز منحنی نفوذ تجمعی واقعی و مقیاس‌سازی شده بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. (Poozan et al., 2019) نشان دادند که اختلاف معنی‌داری بین منحنی نفوذ واقعی منحنی نفوذ به‌دست آمده از مقیاس‌سازی وجود ندارد.

منحنی پیشروی مقیاس‌سازی شده

با استفاده از معادله‌های (۹) تا (۱۲) عامل‌های مقیاس‌سازی برای هر یک از ۲۱ نوار مورد مطالعه محاسبه شد. جدول (۲) پارامترهای آماری شامل حداکثر، حداقل، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات را برای عوامل مقیاس‌سازی را نشان می‌دهد. مقدار عوامل مقیاس‌سازی شدت جریان مطابق با معادله (۹) برابر شدت جریان ورودی است که مقادیر آن برای نوارهای مختلف موجود است. با توجه به معادله‌ی (۱۱) عوامل مؤثر در مقدار T_c ، مقادیر عمق نرمال (Y_c) (که خود به γ_0 و در نتیجه به q_0 و n و S_0 وابسته است) به صورت رابطه‌ی مستقیم و K_{ref} و F_{si} (مربوط به نوع خاک) به صورت رابطه‌ی عکس می‌باشد. کمترین مقدار T_c مربوط به نوار

نتایج و بحث

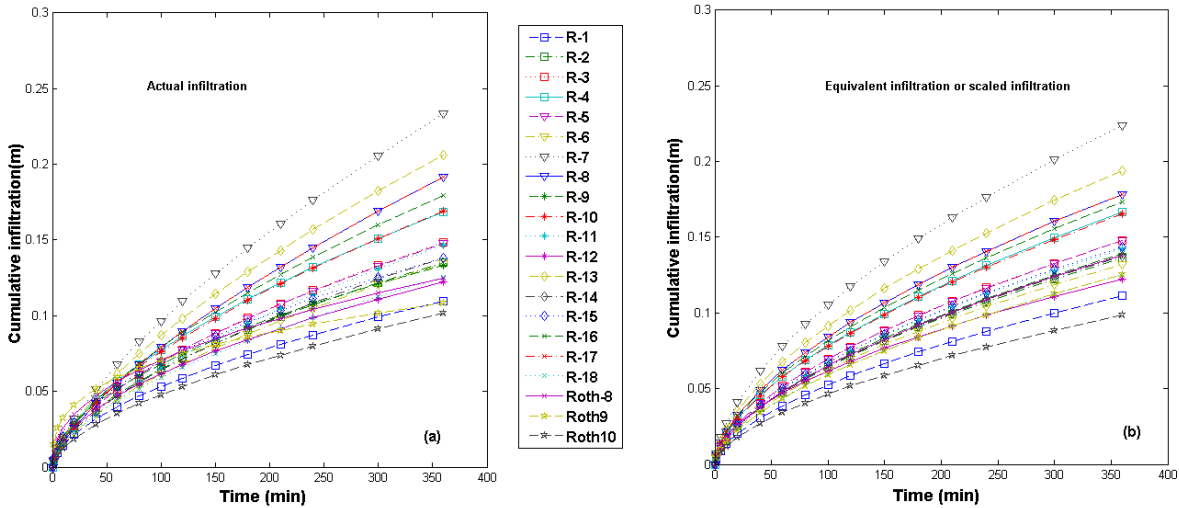
نفوذ

شکل (۲-a) منحنی نفوذ بدست آمده با استفاده از معادله (۲) (نفوذ واقعی) و شکل (۲-b) منحنی نفوذ بدست آمده با استفاده از معادله (۳) (فرآیند مقیاس‌سازی) را نشان می‌دهد. در این تحقیق مقدار t_s را برابر با ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته و سپس با استفاده از معادله (۴) مقدار فاکتور مقیاس‌سازی نفوذ برای هر یک از معادله‌های نفوذ به‌دست آمده است. بیشترین مقدار نفوذ تجمعی واقعی برابر با ۰/۲۳۳ متر پس از ۳۶۰ دقیقه کمترین مقدار نفوذ تجمعی واقعی برابر با ۰/۰۸۱ متر پس از ۳۶۰ دقیقه بود. بیشترین و کمترین مقدار نفوذ تجمعی به‌دست آمده از مقیاس‌سازی به-ترتیب برابر با ۰/۲۲۴ و ۰/۰۷۹ متر پس از ۳۶۰ دقیقه بود. مقایسه شکل‌های (۲-a) و (۲-b) نشان می‌دهد که نفوذ تجمعی واقعی و نفوذ تجمعی به‌دست آمده از مقیاس‌سازی با اختلاف جزئی در مقادیر ابتدایی و انتهایی مشابه هستند. اختلاف جزئی در مقادیر ابتدایی و انتهایی منحنی نفوذ به دلیل این است که منحنی‌های نفوذ واقعی و مقیاس‌سازی شده در زمان میانه (در این تحقیق برابر ۱۸۰ دقیقه) بر یکدیگر منطبق هستند.

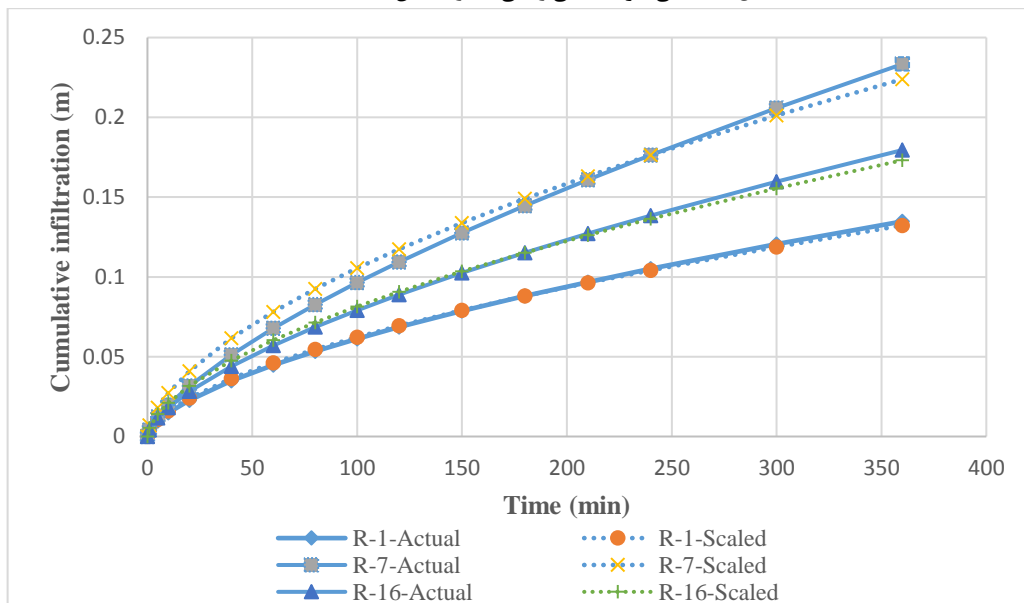
برای نشان دادن بیشتر شباهت بین نفوذ واقعی و مقیاس‌سازی شده، منحنی نفوذ تجمعی واقعی و به‌دست آمده از فرآیند مقیاس‌سازی ($Z_{scaled} = F_s Z_{Ref}$) برای هر یک از منحنی‌های نفوذ مورد مقایسه قرار گرفتند. برای مثال شکل (۳) مقایسه بین منحنی نفوذ تجمعی واقعی و به‌دست آمده از فرآیند مقیاس‌سازی

عوامل مقیاس برای زمان بین ۲/۸ تا ۵۱/۲ دقیقه و برای مکان از ۲۱/۸ تا ۱۸۷/۹ متر است. با توجه به وابستگی عوامل مقیاس زمان و مکان به یکدیگر، مقدار ضریب تغییرات آنها نیز نزدیک به یکدیگر است.

R-3 با مقدار ۲/۸ دقیقه که با توجه به کوچکترین مقدار Y_c (برابر با ۰/۰۱۰ متر) منطقی است. با توجه به معادله (۱۱)، بین X_c و T_c رابطه‌ای مستقیم وجود دارد. در نتیجه، عوامل مؤثر در T_c در X_c نیز مؤثر می‌باشد. بر اساس جدول (۲) محدوده‌ی تغییرات



شکل ۲. منحنی نفوذ تجمعی واقعی (a) و مقیاس شده (b)



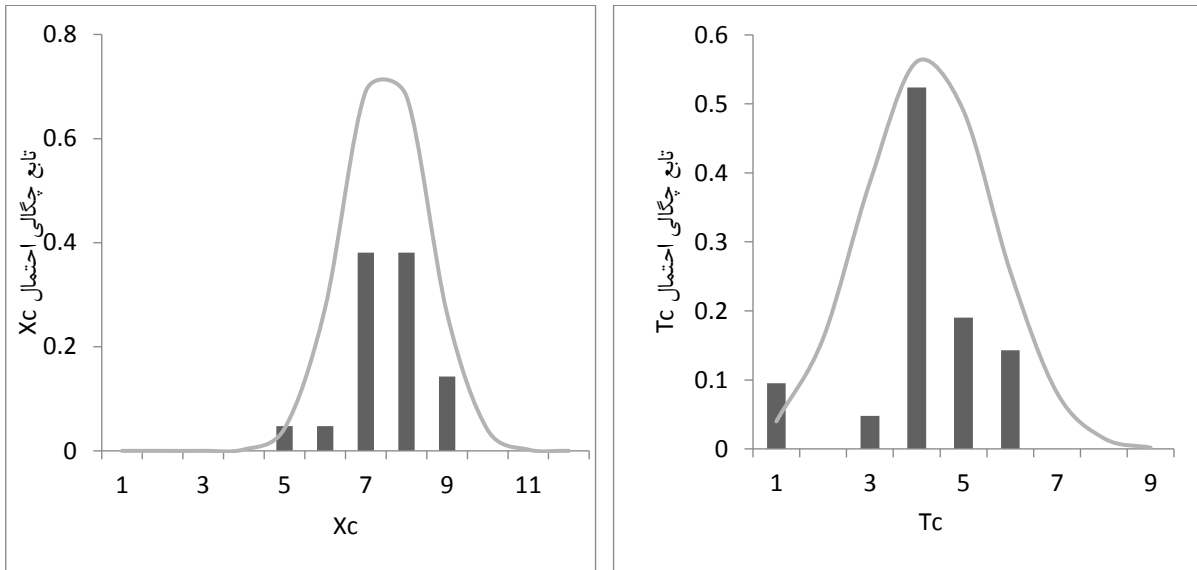
شکل ۳. مقایسه بین منحنی نفوذ تجمعی واقعی و بدست آمده از مقیاس سازی برای منحنی‌های نفوذ R-1، R-7 و R-16

جدول ۲. شاخص‌های آماری عامل‌های مقیاس

| X_c (m) | T_c (min) | Y_c (m) | q_c ($m^3/m/min$) | شاخص آماری |
|--------------|----------------|--------------|--------------------------|------------------|
| ۱۸۷/۹ | ۵۱/۲ | ۰/۰۴۴ | ۰/۱۶ | حداکثر |
| ۲۱/۸ | ۲/۸ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۸ | حداقل |
| ۹۹/۷ | ۲۱/۲ | ۰/۰۲۴ | ۰/۱۲۱ | میانگین |
| ۴۴/۲۵ | ۱۲/۳۹ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۳۱ | انحراف استاندارد |
| ۰/۴۴ | ۰/۵۸۳ | ۰/۳۳۷ | ۰/۱۶ | ضریب تغییرات |

مقیاس‌سازی مدل موج کینماتیک در آبیاری نواری را مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که عوامل مقیاس از توزیع لوگ-نرمال پیروی می‌کند. مطالعات گذشته در ارتباط با عوامل مقیاس توابع هیدرولیکی نیز نشان می‌دهد که عوامل مقیاس پارامترهای هیدرولیکی خاک نیز از توزیع لوگ-نرمال پیروی می‌کند (Kosugi and Hopmans, 1998).

تابع چگالی احتمال عامل‌های مقیاس زمان و مکان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۴) فراوانی عوامل مقیاس مشاهده شده (نمودار ستونی) و محاسبه شده با تابع لوگ-نرمال (نمودار منحنی) را نشان می‌دهد. شکل (۴) مشخص می‌کند که عوامل مقیاس زمان و مکان از شکل نسبتاً یکسان پیروی می‌کنند. نتایج نشان داد که عوامل زمان و مکان توزیع لوگ-نرمال پیروی می‌کنند. (Chari et al. (2019) عوامل مقیاس به‌دست آمده از



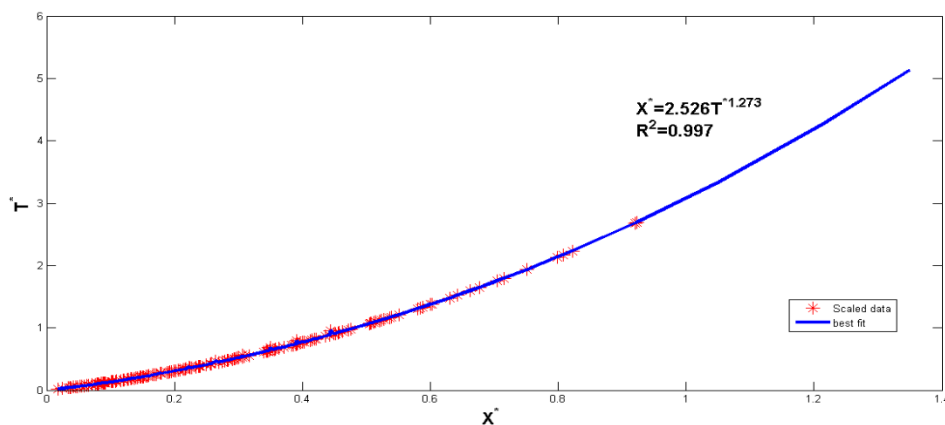
شکل ۴. فراوانی عوامل مقیاس مشاهده (نمودار ستونی) و محاسبه شده با تابع لوگ-نرمال (نمودار منحنی)

معادله‌ای مشخص میل می‌کند در نتیجه یک معادله تجربی (معادله ۱۴) که وابسته به فاصله مقیاس شده و زمان مقیاس شده است به آن برآزش می‌دهیم:

$$t_{Ax}^* = 2.526x^{*1.273} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

حالا چنانچه این معادله برای نوارهای مختلف از حالت مقیاس خارج شود می‌توان معادله پیشروی را در نوارهای مختلف و شرایط اولیه متفاوت به‌دست آورد.

شکل (۵) حالت مقیاس شده شکل (۱) را نشان می‌دهد. این شکل با استفاده از شکل مقیاس شده معادله بیلان (معادله ۱۳) و کاربرد فاکتورهای مقیاس مختلف (معادله ۹ تا ۱۲) بدست آمده است شکل (۵) نشان می‌دهد که تمامی منحنی‌های پیشروی در حالت مقیاس شده بسیار به یکدیگر نزدیک شده‌اند، که نشان دهنده تعریف مناسب در عوامل و موفقیت مقیاس‌سازی در فرآیند پیشروی آب در نوار می‌باشد. از آنجا که شکل (۵) به



شکل ۵. منحنی پیشروی مقیاس شده

است. کمتر از یک بودن مقدار ضریب خط رگرسیون در شکل (۶) نشان دهنده کم‌برآورد پیشروی پیش‌بینی شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده بوده است.

جدول ۲. مقایسه بین زمان پیشروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در نوار-های مختلف

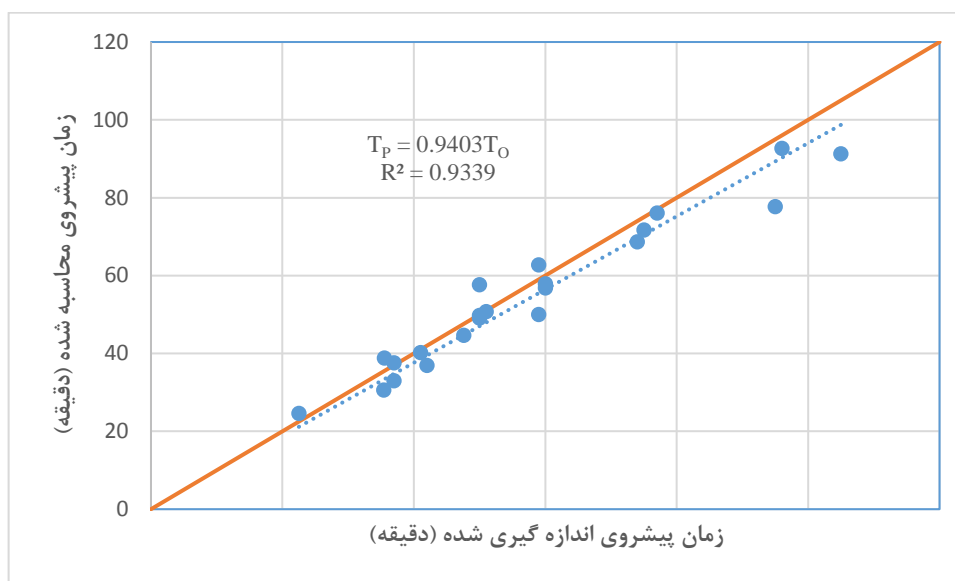
| شماره نوار | RMSE (min) | E _a (%) | R ² |
|------------|------------|--------------------|----------------|
| R-1 | ۱/۸۷ | ۱۰/۷ | ۰/۹۹۴ |
| R-2 | ۲/۱۱ | ۱۱/۳ | ۰/۹۹۲ |
| R-3 | ۳/۳۵ | ۸/۳ | ۰/۹۸۴ |
| R-4 | ۲/۸۶ | ۱۱/۶ | ۰/۹۹۵ |
| R-5 | ۱/۵۷ | ۵/۵ | ۰/۹۹۶ |
| R-6 | ۲/۴۹ | ۶/۶ | ۰/۹۹۰ |
| R-7 | ۲/۳۱ | ۱۱/۸ | ۰/۹۹۶ |
| R-8 | ۳/۶۵ | ۱۰/۶۳ | ۰/۹۹۶ |
| R-9 | ۶/۹۱ | ۶/۴ | ۰/۹۹۳ |
| R-10 | ۱/۴۶ | ۶/۶ | ۰/۹۹۴ |
| R-11 | ۱/۹۱ | ۷/۵ | ۰/۹۹۴ |
| R-12 | ۲/۱۳ | ۴/۶ | ۰/۹۹۳ |
| R-13 | ۲/۰۶ | ۸/۵ | ۰/۹۹۱ |
| R-14 | ۲/۳۸ | ۶/۹ | ۰/۹۸۲ |
| R-15 | ۲/۲۳ | ۴/۸ | ۰/۹۹۱ |
| R-16 | ۰/۵۲ | ۲/۳ | ۰/۹۹۹ |
| R-17 | ۳/۱۳ | ۷/۹ | ۰/۹۹۲ |
| R-18 | ۵/۴۸ | ۶/۸ | ۰/۹۹۶ |
| Roth-8 | ۴/۳۷ | ۸/۳ | ۰/۹۹۱ |
| Roth-9 | ۵/۳۳ | ۱۰/۷ | ۰/۹۸۸ |
| Roth-10 | ۸/۴۳ | ۱۳/۴ | ۰/۹۷۶ |

شکل (۷) منحنی پیشروی آب برای چهار نوار شامل دو نوار کشت نشده شامل R-1، R-7 و دو نوار کشت شده، شامل R-10، R-17 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با روش ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی مسیر پیشروی را مشابه پیشروی واقعی با اختلافی بسیار کم پیش‌بینی می‌کند. زمان پیشروی نهایی واقعی برای نوار R-1، R-7، R-10 و R-17 به ترتیب برابر با ۲۲/۵، ۵۰، ۴۱ و ۷۷ دقیقه و زمان نهایی پیشروی بدست آمده از مقیاس‌سازی برای نوارهای بیان گردیده به ترتیب برابر با ۲۴/۶، ۵۱/۵، ۴۰/۲ و ۷۶/۱ دقیقه است. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که دقت معادله‌ی ارائه شده در این تحقیق در پیش‌بینی زمان پیشروی برای نوارهای کشت نشده و کشت شده یکسان است.

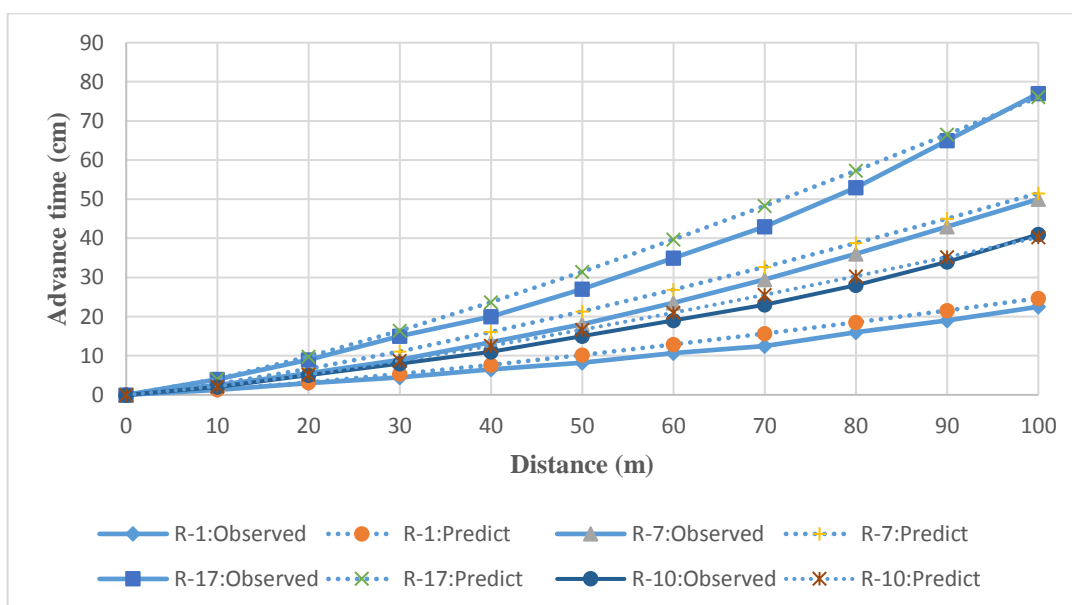
ارزیابی معادله ارائه شده

برای هر یک از نوارها مورد استفاده در این تحقیق معادله (۱۶) را در معادله (۱۸) جایگزین کرده و منحنی پیشروی آب در نوار ترسیم گردید. نتایج مربوط به ارزیابی زمان پیشروی مشاهده شده و زمان پیشروی پیش‌بینی شده با استفاده از مقیاس‌سازی برای ۲۱ نوار آبیاری (داده‌های جدول ۱) مورد بررسی در جدول (۳) موجود است. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که بیشترین مقدار درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی (E_a) در نوار Roth-10 و برابر با ۱۳/۴ درصد و کمترین مقدار آن برابر با ۴/۶ درصد در نوار R-12 است. به طور کلی مقدار درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی فاز پیشروی در نوارها پایین و در اکثر موارد کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. مقدار RMSE دارای کمترین مقدار برابر با ۰/۵۲ دقیقه در نوار R-16 و دارای بیشترین مقدار برابر با ۸/۴۳ دقیقه در نوار Roth-10 است. در اکثر موارد، زمان پیشروی پیش‌بینی شده با استفاده از معادله توانی دارای مقدار RMSE کمتر از ۵ دقیقه بود. بیشترین تاثیر روی نتایج روش ارائه شده در این تحقیق را نوع خاک یا معادله نفوذ خاک مورد مطالعه دارد. در بین نوارهای مورد مطالعه بیشترین تفاوت معادله نفوذ با معادله نفوذ مرجع (R-5) مربوط به نوار Roth-10 است در نتیجه بیشترین خطا روش ارائه شده در این تحقیق نیز مربوط به این نوار است. مقدار ضریب تعیین (R²) با استفاده از معادله (۱۹) تعیین گردید. محدوده مقدار R² بین ۰/۹۹۹ و ۰/۹۷۶ بود که دقت بسیار بالای معادله ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. نتایج جدول (۳) نشان داد دبی ورودی و شیب، تاثیر زیادی در مقدار خطا اندازه‌گیری (RMSE و E_a) ندارد و مقدار خطا برای مقادیر مختلف دبی ورودی و شیب تقریباً یکسان است. به طور کلی نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که معادله ارائه شده در این تحقیق با دقت قابل قبولی منحنی پیشروی آب در نوار را پیش‌بینی می‌کند.

برای درک بهتر استفاده از معادله ارائه شده در این تحقیق در برآورد فاز پیشروی، زمان نهایی فاز پیشروی شبیه‌سازی شده با استفاده از معادله (۱۵) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل (۶) رسم گردیده است. نتایج ارزیابی خطا یک به یک نشان می‌دهد که ضریب تبیین زمان پیشروی محاسبه و اندازه‌گیری شده دارای مقدار بالا و برابر با ۰/۹۳ است. همچنین مشاهده $T = 0.94T_{\text{محاسبه}}$ (T، زمان پیشروی) است که نشان دهنده دقت مناسب روش ارائه شده است. رابطه خطی شکل (۶) نشان می‌دهد که به‌خصوص در زمان‌های زیاد مقدار زمان پیشروی مشاهده شده کمی بیشتر از زمان پیشروی محاسبه شده



شکل ۶. مقایسه زمان های پیشروی مشاهده و محاسبه شده با معادله (۱۵)



شکل ۷. مقایسه منحنی پیشروی آب در نوار R-1، R-7، R-10 و R-17 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با روش ارائه شده در این تحقیق

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش جدید برای مقیاس‌سازی معادله بیلان حجمی ارائه شد. برای به‌دست آوردن مشخصات نفوذ در هر نوار از معادله نفوذ کوستیاکف معادل (مقیاس‌شده) استفاده شد. نتایج نشان داد که شکل منحنی نفوذ معادل (مقیاس‌شده) و واقعی بسیار به هم شبیه هستند. عوامل مقیاس به‌گونه‌ای تعریف شدند که معادله بیلان حجمی مستقل از خاک و شرایط مزرعه باشد. نتایج نشان داد که عوامل مقیاس زمان و مکان از تابع لوگ-نرمال پیروی می‌کردند. از آنجا که منحنی‌های پیشروی مقیاس‌شده به سمت یک منحنی واحد میل می‌کردند یک معادله‌ی تجربی جدید با استفاده از مفهوم مقیاس‌سازی به‌منظور برآورد منحنی پیشروی آب در نوار ارائه شد. روش پیشنهادی برای

۲۱ نوار کشت شده و کشت نشده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد وضعیت کشت تاثیر زیادی روی نتایج نداشته و معادله‌ی به‌دست آمده با استفاده از مقیاس‌سازی برای هر دو حالت کشت شده و کشت نشده معتبر می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شکل ساده معادله و عدم وابستگی به نوع خاک از مزایای روش ارائه شده در این تحقیق است.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-9618-122 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

REFERENCES

- 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.
- Alazba, A.A. (1999). Dimensionless advance curves for infiltration families. *Agric. Water Manage.* 41: 115-131.
- Bautista E., and Wallender WW. (1985). Spatial variability of infiltration in furrows. *Trans. ASAE.* 28, 1846–1851.
- 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.
- Chari, M.M., Davari, K., Ghahraman, B., and Ziaiei, A.N. (2019). General equation for border advance and recession of water in border irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage*. DOI: 10.1002/ird.2342.
- Childs, J., Wallender, W. W., & Hopmans, J. W. (1993). Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage engineering*, 119(1): 74-90.
- Elliott, R.L., Walker, W.R. and Skogerboe. G.V. (1983). Furrow irrigation advance rate: a dimensionless approach. *Transactions of the ASAE*, 26 (6): 1722-1725.
- Gonzalez, C., Cervera, L., and Moret-Fernandez, D. 2011. Basin irrigation design with longitudinal slope. *Agriculture water management*. 98(10): 1516-1522.
- 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.
- Khatri, K. L., and Smith, R. J. (2006). Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrigation Science*, 25(1): 33-43.
- Koech RK, Smith RJ, Gillies MH. (2014a). A real-time optimisation system for automation of furrow irrigation. *Irrigation science*, 32(4), 319-327.
- Koech RK, Smith RJ, Gillies MH. (2014b). Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. *Agricultural Water Management* 142: 77–87.
- Kosugi, K. and Hopmans, J.W. (1998). Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 1496–1504.
- Langat, P. K., Smith, R. J., and Raine, S. R. (2008). Estimating the furrow infiltration characteristic from a single advance point. *Irrigation Science*, 26(5): 367-374.
- Miller, E. E., & Miller, R. D. (1956). Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics*, 27(4), 324-332.
- 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.
- Poozan, M.T., Chari, M. M., Afrasiab, P. and kakhmoghadam, P. (2019). Application of scaling in estimating soil infiltration characteristics. *Iranian journal of Soil and water research*. (In Farsi)
- Ram, R. S. (1969). Hydraulics of recession flow in border irrigation system. M.S. thesis. Indian Inst. of Technol. Kharagpur, India.
- Ram, R. S. (1972). Comparison of infiltration measurement techniques. *J. Agric. Eng. India*. 9(2): 67-75.
- Ram, R. S. and Lal, R. (1971). Recession flow in border irrigation. *J. Agric. Eng. India*, 8(3): 62-70.
- Roth, R. L. (1974). Data for border irrigation models. *Trans. ASAE*. 17 (1): 157-161.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Ziaei, A.N., Davary, K. and Reichardt, K. (2012). Invariant solutions of Richard's equation for Water movement in dissimilar Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 76(1): 1-9.
- Schwankl LJ, Raghuwanshi, NS, and Wallender WW. (2000). Furrow irrigation performance under spatially varying conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126, 355–361.
- Strelkoff, T. and Clemmens, A. J. (1981). Dimensionless Stream Advance in Sloping Borders. *J. Journal of irrigation and drainage engineering*, 107(4): 361-382.
- Strelkoff, T. and Clemmens. A.J. (1994). Dimensional analysis in surface irrigation. *Irrigation Science*, 15 (2-3): 57-82
- Strelkoff, T. and Katopodes, N. D. (1977). Border Irrigation Hydraulics with Zero Inertia. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 103(3): 325-342.
- Valiantzas, J. D. (2000). Surface water storage independent equation for predicting furrow irrigation advance. *Irrigation Science*, 19, 115–123.
- Yitayew, M. and Fangemeier, D.D. (1984). Dimensionless runoff curves for irrigation borders. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 110: 179-191.