

ارایه معادله عمومی پسروری آب در آبیاری نواری

محمد مهدی چاری¹، کامران داوری^{2*}، بیژن قهرمان³، علی نقی ضیایی⁴

تاریخ دریافت: 1395/7/12 تاریخ پذیرش: 1395/10/4

چکیده

تعیین منحنی پسروری جهت ارزیابی آبیاری نواری دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. با توجه به متغیر بودن نوع خاک و همچنین شرایط اولیه و مرزی در آبیاری نواری، سرعت پسروری آب در نوارهای مختلف بسیار متفاوت می‌باشد. در سال‌های اخیر روش مقیاس‌سازی به عنوان ابزاری جهت کاهش داده‌های اندازه‌گیری و تدوین و فرموله کردن معادلات مربوط در مسایل آب و خاک مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، ارایه معادله‌ای یکتا و مستقل از شرایط اولیه و خاک، جهت پسروری آب در نوار با استفاده از مقیاس‌سازی است. برای این منظور، آبیاری نواری با استفاده از مدل موج سینماتیک و کاربرد معادله نفوذ فیلپ دو جمله‌ای برای مولفه‌ی نفوذ، حل گردید. عوامل مقیاس به گونه‌ای تعریف شدند که معادله موج سینماتیک مستقل از شرایط اولیه و خاک گردد. نتایج نشان داد که عوامل مقیاس مورد استفاده در این تحقیق از توزیع لوگ-نرمال پسروری می‌کنند. از آنجا که منحنی‌های پسروری مقیاس‌شده به معادله‌ی مشخصی میل می‌کردند در نتیجه، معادله‌ی درجه 2 جهت پسرورت آب در نوار ارایه گردید. معادله‌ی به‌دست آمده با استفاده از مقیاس‌سازی، برای 25 نوار شامل نوارهای کشت نشده و نوارهای کشت شده و شیب‌های 0/001 تا 0/005، زبری 0/017 تا 0/211، طول 91/4 تا 100 متر و دبی 0/08 تا 0/16 مترمکعب بر دقیقه بر متر مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت ارزیابی، از چهار شاخص آماری ضریب تبیین (R^2)، توزیع نسبت به خط 45 درجه (λ)، درصد متوسط خطای پیش‌بینی مدل (E_p) و درصد متوسط خطای نسبی مدل (E_n) استفاده گردید. نتایج نشان داد که معادله ارایه گردیده با استفاده از مقیاس‌سازی با $R^2=0/94$ ، $\lambda=1/046$ ، $E_p=4/6$ و $E_n=7/52$ به شکل مناسبی کار پیش‌بینی منحنی پسروری را انجام می‌دهد. نتایج نشان داد که میانگین درصد مطلق خطا برای زمان پسروری در نوارهای کشت نشده برابر با 6/78 و برای نوارهای کشت شده برابر 8/08 بوده و دقت معادله ارایه گردیده برای هر دو شرایط کشت شده و کشت نشده مناسب می‌باشد. به طور کلی، نتایج نشان داد که معادله‌ی به دست آمده از روش مقیاس‌سازی، با توجه به شکل ساده و عدم وابستگی به نوع خاک، با دقت قابل قبولی پسروری آب در نوار را پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری، پسروری، مقیاس‌سازی

مقدمه

تحقیقات زیادی برای بدست آوردن پارامترهای معادله نفوذ انجام گرفته است (Clemmens., 1981; Elliott et al., 1983; Shepard et al., 1993; McClymont and Smith., 1996; Upadhyaya and Raghuvanshi., 1999; Valiantzas et al., 2001; Gillies and Smith., 2005; Ebrahimian et al., 2010; Khatari and Smith., 2006). در حالی که جهت ارایه منحنی پسروری روش‌های گوناگونی ارایه گردیده است (Katopodes and Strelkoff., 1977; Elliott et al., 1983; Ebrahimyan et al., 2009; Gillies and Smith., 2005; Khatari and Smith., 1996; McClymont and Smith., 2006) با توجه به مکانیسم پیچیده منحنی پسروری، در مقایسه با منحنی پسروری کم‌تر توسعه یافته است. به طور کلی برای مدل کردن فاز پسروری سه روش وجود دارد که عبارتند از: الف- مدل‌های هیدرولیکی (Walker., 2003; WinSRFR 4.1, 2012) ب- مدل بیلان حجمی (Wu., 1972) ج- مدل تجربی (Clemmens., 2007; Strelkoff., 1977) د- مدل‌های هیدرولیکی، معادله (Ram and Lai., 1971).

سیستم‌های آبیاری سطحی را می‌توان بر اساس عملکرد هیدرولیکی آن‌ها تقسیم‌بندی کرد. یکی از روش‌های تقسیم‌بندی، استفاده از منحنی‌های پیش‌روی و پسروری می‌باشد (Clemmens., 2007). معادله نفوذ و شرایط اولیه و مرزی، منحنی پیش‌روی و پسروری در مزرعه را تحت تاثیر قرار می‌دهد به طوری که تغییرپذیری مکانی و زمانی نفوذ مدیریت سیستم آبیاری را بسیار پیچیده کرده است. با توجه به اهمیت پدیده نفوذ در ارزیابی آبیاری سطحی،

- 1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه فردوسی مشهد و عضو هیئت علمی دانشگاه زابل
 - 2- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 3- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 4- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
- (Email: k.davary@gmail.com) * - نویسنده مسئول:

قابل شد. حوزه‌ی اول، مربوط به بیان تغییرپذیری مکانی توابع هیدرولیکی خاک‌ها (قهرمان و همکاران، 1390; Kosugi and Hopmans., 1998; Warrick and Hussen., 1993; Warrick et al., 1977) است. در حوزه‌ی دوم، پرداختن به مواردی همچون اشتقاق حل‌های عمومی فرایندهای آب در خاک مانند نفوذ (مهرابی و سپاسخواه 1392; Khatri and Smith., 2012; Sadeghi et al., 2006; Machiwal et al., 2006; Kozak and Ahuja., 2005; Sharma et al., 1980) و توزیع مجدد (Sadeghi et al., 2011; Warrick and Hussen., 1993) بوده و حوزه‌ی سوم مربوط به تدوین و فرموله کردن معادلات مربوط به آب و خاک با کم‌ترین تعداد ممکن متغیر است (Katopodes and Strelkoff., 1977; Elliott et al., 1983; Yitayew and Fangemeier., 1984; Ram and Singh., 1986; Strelkoff Alazba, 1999; Rasoulzadeh and Clemmens., 1994; Bautista et al. and Sepaskhah., 2003; Navabian et al., 2009 al., 2012).

در حوزه کاربرد سوم مقیاس‌سازی، می‌توان معادلات حاکم بر آبیاری سطحی یعنی معادلات سنت - ونانت را نام برد. استرلکف و کلمنز اظهار داشتند که با تبدیل معادلات آبیاری سطحی به فرم بدون بعد تعداد پارامترهای غیروابسته کاهش یافته و در نتیجه درک حالت عمومی مدل ساده‌تر خواهد شد (Strelkoff and Clemmens., 1981). کاتاپودز و استرلکف و استرلکف و کلمنز با استفاده از چند متغیر مرجع (عوامل مقیاس) معادلات آبیاری نواری را بدون بعد (مقیاس) کرده و برای استفاده از این معادلات نمودارهایی را ارائه کردند که هر یک از این نمودارها وابسته به نوع خاک (مثلاً α و k در رابطه نفوذ کوستیاکف) می‌باشد. در نتیجه برای بیان تمامی شرایط نیاز به تعداد زیادی نمودار بود (Katopodes and Strelkoff., 1977; Strelkoff and Clemmens., 1981). ییتایو و فنگمیر 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 (Yitayew and Fangemeier., 1984). ال‌ابزا 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 بدست آورد (Alazba., 1999). نوایان و همکاران با استفاده از آنالیز ابعادی و استفاده از فاکتورهای مقیاس معادله‌هایی را برای ارزیابی آبیاری جویچه‌ای ارائه کردند (Navabian et al., 2009). باتیستا و همکاران از طریق محاسبه مقدار حجم سطحی در روش بیلان حجمی با استفاده از مقیاس‌سازی موجب بهبود این روش شدند (Bautista et al., 2012).

سنت - ونانت (معادله پیوستگی و مومنتم) بوده و جهت کاربرد آن نیاز به حل عددی و محاسبات کامپیوتری می‌باشد، و دارای سه مدل هیدرودینامیک کامل، اینرسی صفر و مدل موج سینماتیک است. مدل بیلان حجمی بر اساس مدل پیوستگی می‌باشد. در بسیاری از موارد، این مدل مقدار زمان پسروری در ابتدا و انتهای نوار را مشخص کرده و مقدار زمان پسروری در طول نوار را مشخص نمی‌کند. مدل تجربی دارای ضرایبی می‌باشد که برای هر نوار با توجه به داده‌های ورودی و شکل نوار اصلاح می‌گردد. رم و سینگ روش‌های بیلان حجمی و تجربی را برای برآورد منحنی پسروری مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که خطای این روش‌ها زیاد (بین 30 تا 80 درصد) می‌باشد (Ram and Singh., 1982). یو و سینگ با استفاده از حل تحلیلی معادله بیلان حجمی، معادله‌ای را برای بیان فاز پسروری ارائه کردند و نشان دادند که این معادله دارای دقت بیشتری نسبت به مدل استرلکف (Strelkoff., 1977) می‌باشد (Yu and Singh., 1989). با توجه به تحقیقات کم صورت گرفته در این مورد، به نظر می‌رسد که ارائه معادله‌ای بر اساس مدل هیدرولیکی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، می‌توان از مقیاس - سازی استفاده کرد.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران روش‌هایی را برای کاهش نیاز به اندازه‌گیری داده‌های مزرعه‌ای مورد نیاز برای بیان مشخصات پویای آب در خاک ارائه کرده‌اند. برای مثال، می‌توان به فرایند نفوذ (Sharma et al., 1980)، ویژگی هدایت هیدرولیکی (Tuli et al., 2001) و نیز تغییرپذیری خاک‌ها (Warrick and Nielsen., 1980) اشاره کرد. یکی از این روش‌ها، مقیاس‌سازی می‌باشد که اولین بار توسط میلر و میلر با تکیه بر نظریه‌ی محیط‌های متشابه در دانش آب و خاک ظهور یافت (Miller and Miller., 1956). (Sadeghi et al., 2016). بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، دو خاک را می‌توان متشابه نامید به شرطی که عامل مقیاسی مانند γ وجود داشته باشد که بتواند خاکی را به خاک دیگر تبدیل کند. با ارائه‌ی مفهوم محیط‌های متشابه، میلر و میلر (Miller and Miller., 1956) آنگاه مفهوم جریان متشابه را برای مقیاس‌سازی معادلات داری و پیوستگی مطرح نموده و اظهار داشتند که جریان آب در دو خاک متشابه تحت شرایط مرزی و اولیه مقیاس شده‌ی یکسان، متشابه خواهد بود. به منظور کاربردی ساختن نظریه میلرها (Miller and Miller., 1956)، واریک و همکاران (Warrick et al., 1977)، ایلپوت و همکاران (Elliott et al., 1983)، و کوزوگی و هاپمنز (Kosugi and Hopmans., 1998) از جمله محققینی بودند که تعاریف متفاوتی از محیط‌های متشابه ارائه نمودند. به طور کلی، برای مقیاس‌سازی و با تکیه بر مفهوم محیط‌های متشابه در دانش فیزیک خاک، می‌توان کاربردهایی را در سه حوزه

در تمامی موارد مقیاس‌سازی ذکر شده در بالا، بحثی در رابطه با فاز پسروی صورت نگرفته و معادله‌ای جهت محاسبه آن ارائه نگردیده است. در نتیجه، هدف این تحقیق ارائه معادله‌ای یکتا برای فاز پسروی آبیاری نواری با استفاده از مقیاس‌سازی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم در آبیاری سطحی، دو معادله‌ی پیوستگی و مومنتم است که به معادلات سنت-ونانت شناخته می‌شوند که از قانون بقای جرم و مومنتم به دست می‌آیند (Strelkoff and Katopodes., 1977). بر اساس معادلات سنت-ونانت، مدل‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی جریان آب روی سطح خاک وجود دارد و تفاوت عمده آن‌ها در شکل معادلات به کار رفته و روش حل آن‌ها می‌باشد. در همه مدل‌های مشتق شده از معادلات سنت-ونانت، معادله پیوستگی به شکل کامل به کار رفته، در حالی که تفاوت در نحوه‌ی به کار بردن معادله مومنتم می‌باشد. بر این اساس، معادلات سنت-ونانت به سه دسته مدل هیدرودینامیک کامل، مدل اینرسی صفر و مدل موج سینماتیک تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به سادگی مدل موج سینماتیک، در این تحقیق از این مدل استفاده شده است.

چنانچه قسمت‌های مربوط به دینامیک جریان (شتاب و گرادیان عمق) در نظر گرفته نشود (شیب کف برابر با شیب اصطکاک)، معادله‌ی مومنتم را می‌توان از یکی از معادلات جریان یکنواخت (مانینگ، شزی یا داری - ویسیاخ) که معمولاً اساس رابطه‌ی دبی-اشل را تشکیل می‌دهند، به دست آورد. این مدل‌ها به نام مدل‌های عمق یکنواخت یا جریان یکنواخت شناخته می‌شوند. چنانچه از معادله مانینگ استفاده شود شیب اصطکاک برابر معادله (1 الف) خواهد بود که در آن n ضریب زیری مانینگ، q دبی واحد جریان (متر بر ثانیه)، y عمق جریان (متر)، S_0 شیب زمین (متر بر متر) و S_f شیب اصطکاک (متر بر متر) می‌باشد.

$$t_b = \left(\frac{0.5S}{f_0} \right)^2 \quad (2)$$

در نتیجه، معادله‌ی پیوستگی برای زمان‌های کوتاه و طولانی به ترتیب به صورت رابطه 3 و 4 خواهند بود:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + 0.5St^{-0.5} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + f_0 = 0 \quad (4)$$

مقیاس‌سازی

اولین گام در مقیاس کردن معادلات و شرایط حاکم، تعیین متغیرهای بدون بُعد بوده که از تقسیم متغیرهای بُعددار بر عامل‌های مقیاس به دست می‌آیند. برای معادلات پیوستگی (3 و 4) و مومنتم، متغیرهای بدون بُعد به صورت رابطه 5 تعریف می‌گردند:

$$q^* = \frac{q}{q_c}, \quad x^* = \frac{x}{X_c} \quad (5)$$

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

که در آن‌ها متغیرهای ستاره‌دار بدون بُعد بوده 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. از آنجا که معادله‌ی نفوذ برای زمان‌های کوتاه و طولانی متفاوت می‌باشد در نتیجه، عوامل مقیاس برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی نیز متفاوت است.

1- شاخه‌ی زمان‌های کوتاه: عامل‌های مقیاس به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که معادله‌ی مقیاس‌شده‌ی موج سینماتیک مستقل از

در تمامی موارد مقیاس‌سازی ذکر شده در بالا، بحثی در رابطه با فاز پسروی صورت نگرفته و معادله‌ای جهت محاسبه آن ارائه نگردیده است. در نتیجه، هدف این تحقیق ارائه معادله‌ای یکتا برای فاز پسروی آبیاری نواری با استفاده از مقیاس‌سازی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم در آبیاری سطحی، دو معادله‌ی پیوستگی و مومنتم است که به معادلات سنت-ونانت شناخته می‌شوند که از قانون بقای جرم و مومنتم به دست می‌آیند (Strelkoff and Katopodes., 1977). بر اساس معادلات سنت-ونانت، مدل‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی جریان آب روی سطح خاک وجود دارد و تفاوت عمده آن‌ها در شکل معادلات به کار رفته و روش حل آن‌ها می‌باشد. در همه مدل‌های مشتق شده از معادلات سنت-ونانت، معادله پیوستگی به شکل کامل به کار رفته، در حالی که تفاوت در نحوه‌ی به کار بردن معادله مومنتم می‌باشد. بر این اساس، معادلات سنت-ونانت به سه دسته مدل هیدرودینامیک کامل، مدل اینرسی صفر و مدل موج سینماتیک تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به سادگی مدل موج سینماتیک، در این تحقیق از این مدل استفاده شده است.

چنانچه قسمت‌های مربوط به دینامیک جریان (شتاب و گرادیان عمق) در نظر گرفته نشود (شیب کف برابر با شیب اصطکاک)، معادله‌ی مومنتم را می‌توان از یکی از معادلات جریان یکنواخت (مانینگ، شزی یا داری - ویسیاخ) که معمولاً اساس رابطه‌ی دبی-اشل را تشکیل می‌دهند، به دست آورد. این مدل‌ها به نام مدل‌های عمق یکنواخت یا جریان یکنواخت شناخته می‌شوند. چنانچه از معادله مانینگ استفاده شود شیب اصطکاک برابر معادله (1 الف) خواهد بود که در آن n ضریب زیری مانینگ، q دبی واحد جریان (متر بر ثانیه)، y عمق جریان (متر)، S_0 شیب زمین (متر بر متر) و S_f شیب اصطکاک (متر بر متر) می‌باشد.

شرایط اولیه (معادله 1-ب) و مرز (معادلات 1-ج و 1-د) مناسب نیز به صورت روابط 1 الف تا پ تعریف می‌گردد:

$$S_f = S_0 = \frac{q^2 n^2}{y^{10/3}} \quad (1 الف)$$

$$t = 0, q(x, 0) = 0, y(x, 0) = 0 \quad (1 ب)$$

$$0 < t \leq t_{co}: q(0, t) = q_0, y(0, x) = y_0 \quad (1 ج)$$

$$t > t_{co}: q(0, t) = 0 \quad (1 د)$$

$$Z = St_b^{0.5} + f_0(t - t_b) \quad (1 ه)$$

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

کلمتزر برای بیان نفوذ آب در آبیاری نواری، معادله‌ی نفوذ دوشاخه

حجمها تغییر کرده و به این ترتیب سطح مقطع جریان در مرزهای بالادست و پایین دست در زمانهای مختلف، متفاوت خواهد بود. سپس برای هر گام زمانی با استفاده از روش نیوتن-رافسون، سطح مقطع و در نتیجه فاصله‌ی پیشروی (δX) بدست می‌آید و این روش تا رسیدن به انتهای نوار ادامه می‌یابد. وقتی جریان در ورودی شیار قطع می‌گردد، فرض می‌شود که در مرز سمت چپ فوراً سطح مقطع صفر خواهد شد. در نتیجه فاز پسروری شروع می‌گردد. محاسبات مانند فاز پیشروی صورت می‌گیرد. محاسبات تا زمانی که سطح مقطع جریان در آخرین نقطه به 5٪ یا کمتر از مقدار آن در زمان قطع برسد ادامه می‌یابد (Walker and Skogerboe., 1987). برای این منظور، برنامه‌ی رایانه‌ای در محیط برنامه‌نویسی متلب تهیه شد. با استفاده از داده‌های ورودی مورد نیاز جهت آبیاری (شامل: دبی، شیب، زبری، طول نوار، زمان قطع و پارامترهای معادله‌ی نفوذ دو جمله‌ای فیلیپ (S و f_0))، معادلات آبیاری سطحی برای حالات مختلف داده‌های ورودی حل گشته و نمودار مقیاس شده برای هر یک از حالات زمان کوتاه و زمان طولانی ترسیم می‌گردد.

در ادامه، به هریک از نمودارهای پسروری مقیاس شده برای زمان‌های کوتاه و زمان طولانی، معادله‌ی تابع درجه (Walker and Skogerboe., 1987) برازش داده می‌شود:

$$t_{x^*}^* = A_1 x^{*2} + A_2 x^* \quad (14)$$

که در آن $t_{x^*}^*$ زمان پسروری تا نقطه‌ی x^* و A_1 و A_2 ثابت-های برازش می‌باشند.

خارج کردن از شکل مقیاس شده (De-scaling)

از آنجا که در مسایل آبیاری سطحی از شکل بُعددار پارامترها استفاده می‌گردد، در نتیجه معادله‌های مقیاس شده باید از حالت مقیاس خارج گردند. شکل مقیاس نشده‌ی معادله‌ی 14 به صورت رابطه 15 خواهد بود:

$$t_x = a_1 x^2 + a_2 x \quad (15)$$

که ضرایب ثابت آن برابر خواهد بود (رابطه 16):

$$a_1 = \frac{A_1 T_c}{X_c^2}, \quad a_2 = \frac{A_2 T_c}{X_c} \quad (16)$$

برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی از ضرایب مربوط به آن بخش استفاده می‌گردد. در نتیجه، معادله‌ها از شکل مقیاس شده خارج گردیده و می‌توان معادله پسروری را بدست آورد.

ارزیابی مدل

برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده (زمان پسروری) T_0 و مقادیر پیش‌بینی شده T_p از برازش داده‌ها به معادله‌ی رگرسیون (رابطه 24) استفاده می‌شود (Esfandiari and Maheshwari., 2001):

$$T_p = \lambda T_0 \quad (24)$$

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. همچنین X_c و T_c به گونه‌ای تعریف می‌گردند که معادله‌ی موج سینماتیک مستقل از خاک گردد. در نتیجه، عامل‌های مقیاس به صورت رابطه 6 تا 9 خواهند بود:

$$q_c = q_0 \quad (6)$$

$$Y_c = \left(\frac{nq_0}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} \quad (7)$$

$$T_c = 4 \left(\frac{Y_c}{S} \right)^2 \quad (8)$$

$$X_c = \frac{q_c T_c}{Y_c} \quad (9)$$

با تعیین عامل‌های مقیاس، معادله‌ی موج سینماتیک در حالت مقیاس شده برای زمان کوتاه به شکل معادله‌ی (10 الف و ب) و شرایط مرزی و اولیه‌ی مقیاس شده به شکل معادله‌ی (10 ج تا ه) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial q^*}{\partial x^*} + \frac{\partial y^*}{\partial t^*} + t^{*-0.5} = 0 \quad (10 \text{ الف})$$

$$q^* = y^{*5/3} \quad (10 \text{ ب})$$

$$t^* = 0: q^*(x^*, 0) = 0, \quad y^*(x^*, 0) = 0 \quad (10 \text{ ج})$$

$$0 < t^* \leq t_{co}^*: q^*(0, t^*) = 1, \quad y^*(0, t^*) = 1 \quad (10 \text{ د})$$

$$t^* > t_{co}^*: q^*(0, t^*) = 0 \quad (10 \text{ ه})$$

2- شاخه‌ی زمان‌های طولانی: عامل‌های مقیاس زمان و فاصله‌ی طولی در این حالت به صورت رابطه 11 و 12 تعریف می‌شوند:

$$T_{cl} = \frac{Y_c}{f_0} \quad (11)$$

$$X_{cl} = \frac{q_c T_{cl}}{Y_c} \quad (12)$$

در حالی که q_c و Y_c مثل حالت قبل است. در نتیجه، با تعیین عامل‌های مقیاس، معادله‌ی پیوستگی در حالت مقیاس شده برای شاخه‌ی زمان طولانی به صورت رابطه 13 ارایه گردیده و سایر معادله‌ها همانند معادله‌های (10 ب تا ه) می‌باشند:

$$\frac{\partial q^*}{\partial x^*} + \frac{\partial y^*}{\partial t^*} + 1 = 0 \quad (13)$$

جهت حل عددی معادلات آبیاری سطحی برای زمان‌های کوتاه و طولانی از روش ارایه شده توسط واکر و هامفیروز استفاده گردید (Walker and Humpherys., 1983). در این روش، از راه‌حلی بر پایه‌ی حجم کنترل متغیر استفاده می‌گردد. جریان آب در مسیر حرکت به سلول‌های مربع شکل کوچکی تقسیم می‌گردد که طول هر کدام δx متر می‌باشد. در خلال هر گام زمانی (δt)، در این تحقیق برابر با 2 دقیقه، جریان ورودی و خروجی مربوط به هر کدام از این سلول‌ها یا

به منظور ارزیابی کلی از قابلیت مدل مورد بررسی در شرایط مزرعه، از درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی (E_a) استفاده می‌گردد. E_a نشان‌دهنده کارایی نسبی مدل است و به صورت رابطه 26 تعریف می‌شود:

$$E_a = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|T_{0i} - T_{pi}|}{T_{0i}} \quad (26)$$

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

که در آن λ شیب بهترین خط برازش داده شده بر داده‌ها می‌باشد. در این معادله، هرچه مقدار λ به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بیش‌تر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشد. مقادیر $\lambda < 1$ نشان‌دهنده پیش‌بینی کم‌تر از مقدار واقعی و $\lambda > 1$ نشان‌دهنده پیش‌بینی بیش‌تر از مقادیر واقعی می‌باشد. همچنین شاخص ضریب تبیین (R^2) تعیین‌کننده تناسب برازش معادله‌ی فوق به داده‌ها می‌باشد. درصد متوسط خطای مطلق بر اساس خط برازش داده شده از رابطه‌ی 25 بدست می‌آید:

$$E_r = |1 - \lambda| \times 100 \quad (25)$$

که E_r نشان‌دهنده‌ی روند کلی خطا در داده‌های به کار رفته می‌باشد.

جدول 1- مشخصات نوارهای آبیاری مورد استفاده

نام نوار*	دبی ($m^3/m/min$)	شیب (m/m)	ضریب زبری	طول (m)	عرض (m)	زمان پیشروی (min)	S ($m/min^{0.5}$)	f_0 (m/min)	t_b (min)
R-1	0/16	0/005	0/059	100	6	22/5	0/004461	0/001036	4/6
R-2	0/12	0/005	0/066	100	6	37	0/005557	0/000437	40/4
R-3	0/08	0/005	0/048	100	6	59	0/005615	0/000151	345/6
R-4	0/16	0/003	0/077	100	6	35/5	0/006361	0/000681	21/8
R-5	0/12	0/003	0/092	100	6	50	0/006949	0/000283	121/8
R-6	0/08	0/003	0/10	100	6	74	0/004295	0/000284	57/1
R-7	0/16	0/001	0/08	100	6	50	0/006584	0/000804	16/8
R-8	0/12	0/001	0/071	100	6	59	0/00626	0/000364	73/7
R-9	0/08	0/001	0/073	100	6	95	0/005787	0/000132	481/8
R-10	0/16	0/005	0/114	100	6	41	0/007374	0/000518	50/38
R-11	0/12	0/005	0/132	100	6	51	0/005742	0/000435	43/5
R-12	0/08	0/005	0/154	100	6	75	0/004436	0/000244	82/6
R-13	0/16	0/003	0/117	100	6	50	0/007158	0/000834	18/4
R-14	0/12	0/003	0/145	100	6	60	0/003749	0/000845	4/9
R-15	0/08	0/003	0/188	100	6	96	0/005658	0/000092	929/7
R-16	0/16	0/001	0/146	100	6	66	0/008203	0/000194	448/5
R-17	0/12	0/001	0/116	100	6	77	0/004633	0/000569	16/6
R-18	0/08	0/001	0/130	100	6	105	0/002102	0/000138	344/1
At-17	0/141	0/0011	0/06	91/44	5/89	29/2	0/004048	0/000363	36/3
At-1	0/141	0/0011	0/211	91/4	5/89	47/6	0/000776	0/001141	0/1
At-2	0/14	0/0011	0/107	91/4	5/89	32/8	0/001742	0/001012	0/7
At-3	0/113	0/0011	0/098	91/4	5/89	34/6	0/001709	0/000645	1/8
At-4	0/141	0/0011	0/119	91/4	5/89	31/7	0/000611	0/000132	0/1
At-5	0/0849	0/0011	0/092	91/4	5/89	38/1	0/001348	0/000485	2/0
Roth-8	0/105	0/001	0/017	91/4	5/89	44/1	0/007562	0/000127	879/6

*: R_j , $j=1,2,\dots,9$ و R_j , $j=10,11,\dots,18$; (Ram and Lal., 1971); (Ram., 1969 and 1972)

At-17, At-1, At-2, At-3, At-4, At-5; (Atchison., 1973)

Roth-8; (Roth., 1974)

داده‌های مورد استفاده

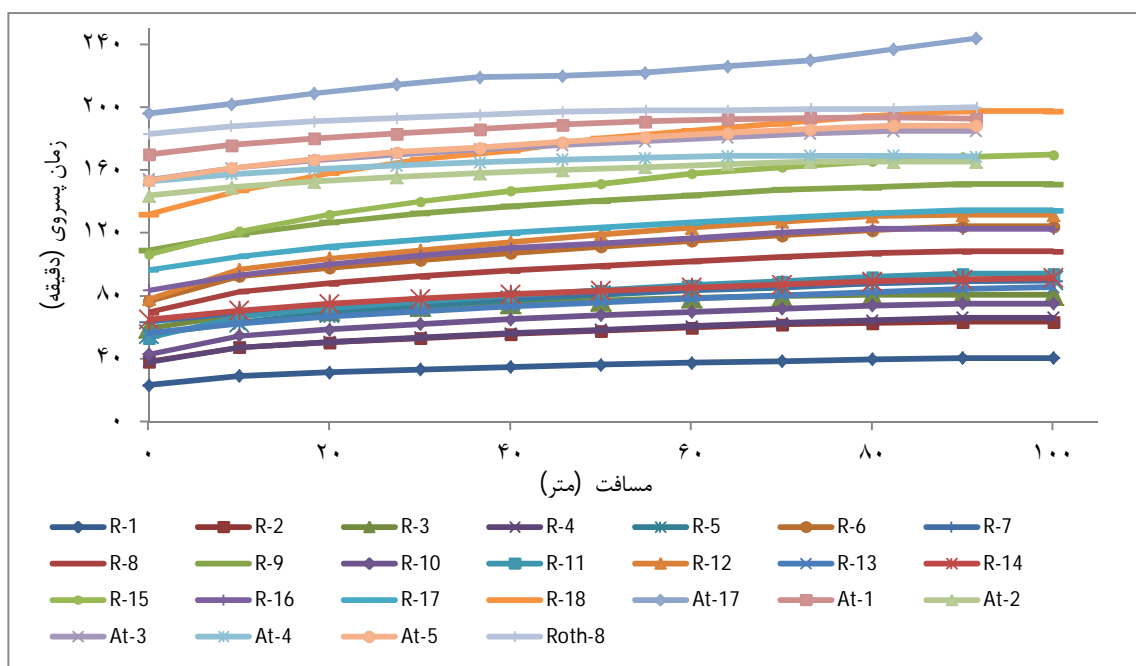
در این تحقیق، برای ارزیابی معادلات بدست آمده با استفاده از روش مقیاس‌سازی در آبیاری نواری، از 25 مجموعه اطلاعات ارایه شده توسط رم (Ram., 1972; Ram., 1969)، رم و لای (Ram and Lai., 1971) and لای، آتچیسون (Atchison., 1973) و رات (Roth., 1974) استفاده می‌گردد. این 18 نوار شامل داده‌های رم (Ram., 1972; Ram., 1969)، رم و لای (Ram and Lai., 1971) به صورت 9 نوار کشت نشده ($R_z, z=1,2,\dots,9$) و در 9 نوار گندم کشت شده ($R_z, z=10,11,\dots,18$) و دارای خاک زراعی با بافت متوسط می‌باشد. داده‌های آتچیسون (Atchison., 1973) شامل 6 نوار با عرض 5/98 متر و با انتهای باز و دارای خاک نسبتاً سبک می‌باشد که نوارهای At-1، At-2، At-3، At-4، At-5 و At-17 کشت شده و At-8 کشت نشده می‌باشد. نوار رات (Roth-8) نیز کشت نشده و دارای بافت لوم‌شنی می‌باشند (Roth., 1974). جهت به دست آوردن پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ (Philip., 1957)، (یعنی S و f_0) از روش دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimian et al., 2010) استفاده شد. در این روش، به جای استفاده از معادله $x = pt^{0.5}$ از معادله توانی $x = pt^r$ برای مسیر پیشروی استفاده می‌گردد. در نتیجه، برابر نبودن r با 0/5 موجب انعطاف‌پذیری بیشتر برای برازش می‌شود. چنانچه این معادله در معادله بیلان حجمی قرار داده شود پارامترهای معادله نفوذ با استفاده از اطلاعات مسیر پیشروی برای دو نقطه بدست می‌آیند (اطلاعات بیشتر این

روش در Ebrahimian et al., 2010 ارایه شده است). مشخصات نوارهای استفاده شده در جدول 1 موجود می‌باشد. از آنجا که این تحقیق برای نوارهای با انتها باز صورت گرفته است جهت به دست آوردن منحنی پسروری نوارهای ارایه شده توسط رم (Ram., 1972; Ram., 1969) و رم و لای (Ram and Lai., 1971) از مدل اینرسی صفر (با استفاده از نرم‌افزار WinSRFR 4.1) استفاده گردیده است.

نتایج و بحث

مقیاس‌سازی پسروری

شکل 1 منحنی پسروری آب برای 25 نوار جدول 1 را نشان می‌دهد. این شکل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با مدل اینرسی صفر (برای نوارهای با انتهای بسته) رسم گردیده است. در شکل 1 کم‌ترین مدت زمان پسروری مربوط به نوار R-1 با زمان پسروری برابر با 40/3 دقیقه برای طول 100 متر و بیش‌ترین زمان پسروری برابر با 244 دقیقه برای طول 91/4 متر در نوار At-17 می‌باشد. متغیر بودن زمان پسروری در نوارهای مختلف نشان دهنده تغییرات زیاد داده‌های ورودی شامل پارامترهای جریان (شرایط مرزی) و پارامترهای نفوذ (وابستگی به نوع خاک) در این داده‌ها می‌باشد.



شکل 1- منحنی پسروری آب در نوارهای مختلف

بزرگ ضریب جذب ($0/007562m/min^{0.5}$) منطقی است. با توجه به معادله 9، بین X_c و T_c رابطه‌ای مستقیم وجود دارد. در نتیجه، عوامل موثر در T_c در X_c نیز موثر می‌باشد. به طور کلی، با توجه به جدول 2، عوامل مقیاس مربوط به زمان کوتاه دارای مقادیر بزرگ‌تر از عوامل مقیاس مربوط به زمان طولانی می‌باشند. بر اساس جدول 2 محدوده‌ی تغییرات عوامل مقیاس برای زمان کوتاه (T_c) از $16/4$ تا $42863/7$ و X_c از $112/8$ تا $85930/1$ (بیش‌تر از زمان طولانی (T_{cl}) از $24/7$ تا $426/4$ و X_{cl} از $106/6$ تا $826/3$) می‌باشد که به دلیل کم‌تر بودن دامنه‌ی تغییرات نفوذ نهایی (از $0/000092$ تا $0/001012 m/min$) در خاک‌ها نسبت به مقدار ضریب جذب (از $0/000611$ تا $0/008203 m/min^{0.5}$) و همچنین شکل معادله‌ی عامل مقیاس مربوط به زمان کوتاه (معادله 8) نسبت به معادله‌ی زمان طولانی (معادله 11) می‌باشد. مقدار t_b از $0/7$ دقیقه در $At-2$ تا 929 دقیقه در $R-15$ متغیر بوده که نشان‌دهنده‌ی تغییرات زیاد این پارامتر در خاک‌های با بافت مختلف می‌باشد.

جدول 2- شاخص‌های آماری عامل‌های مقیاس

t_b (min)	X_{cl} (m)	T_{cl} (min)	X_c (m)	T_c (min)	Y_c (m)	q_c ($m^3/m/min$)	شاخص آماری
929/7	826/3	426/4	85930/1	42863/7	0/080	0/16	حداکثر
0/74	106/6	24/7	112/8	16/4	0/015	0/08	حداقل
159/1	340/7	125/6	3669/6	3669/6	0/039	0/121	میانگین
267/1	426/4	108/1	22081/7	10677/5	0/014	0/031	انحراف استاندارد
1/67	0/62	0/86	2/8	2/9	0/368	0/16	ضریب تغییرات

مربوط به هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی متفاوت بوده، در نتیجه نمودارهای مربوط به هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی با همدیگر متفاوت می‌باشند. برای بدست آوردن منحنی پیروی در حالت مقیاس شده تا زمان شاخه‌ای شدن (t_b^*) از منحنی زمان کوتاه (شکل 3- الف) استفاده گردیده و برای مقادیر بزرگ‌تر از t_b^* در ادامه منحنی زمان کوتاه از منحنی شکل (3- ب) استفاده می‌گردد. منحنی‌های پیروی مقیاس شده برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی به ترتیب در شکل‌های (3- الف و ب) به معادله‌ای مشخص میل می‌کند. در نتیجه، عوامل مقیاس به شکل مناسبی تعریف گردیده و نشان می‌دهد که فرایند پیروی آب در نوار به خوبی مقیاس شده است.

معادله‌ی کلی پیروی

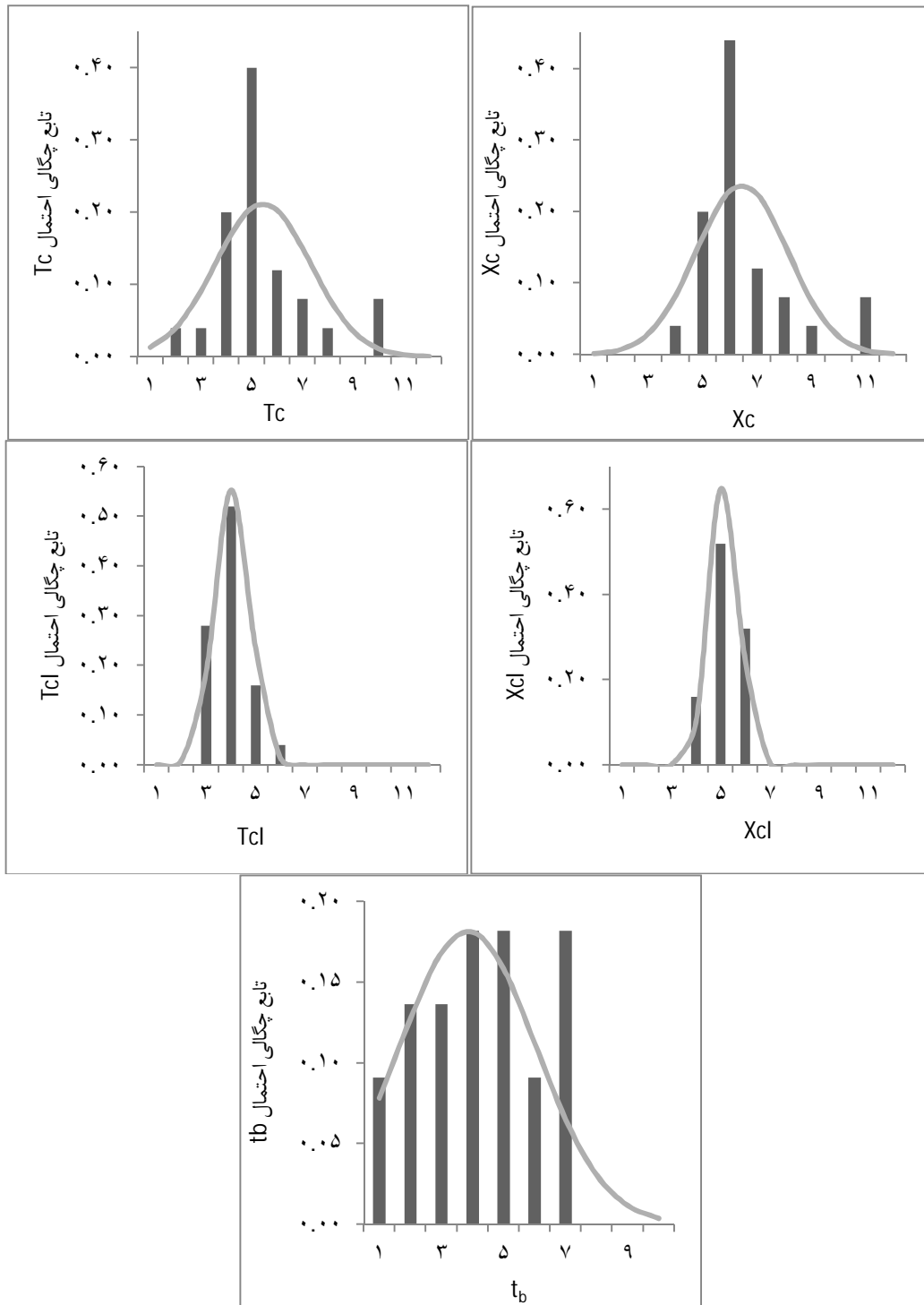
به هر یک از نمودارهای مقیاس شده زمان کوتاه و طولانی در شکل‌های (3- الف و ب)، معادله‌ی 14 برازش داده می‌شود. نتایج

با استفاده از مقدار t_b (جدول 1) منحنی‌ها را به دو بخش زمان کوتاه و زمان طولانی تقسیم کرده و سپس با استفاده از معادله‌های 5، 8 و 9 برای زمان کوتاه و معادله‌های 5، 11 و 12 برای زمان طولانی، عوامل مقیاس مربوط به هر یک از نمودارها بدست آمد. با توجه به مقدار t_b برای مقیاس کردن منحنی پیروی 7 نوار $R-3$ ، $R-5$ ، $R-9$ ، $R-15$ ، $R-16$ ، $R-18$ و $Roth-8$ از داده‌های زمان کوتاه و برای 17 نوار باقی‌مانده از پارامترهای مقیاس زمان طولانی استفاده می‌گردد. جدول 2 پارامترهای آماری شامل حداکثر، حداقل، میانگین، انحراف استاندارد و ضریب تغییرات را برای عوامل مقیاس و t_b را نشان می‌دهد. با توجه به معادله‌ی 8 عوامل موثر در مقدار T_c ، مقادیر عمق نرمال (Y_c) (که خود Y_c طبق معادله‌ی 7 به n و S_0 وابسته می‌باشد) به صورت رابطه‌ی مستقیم و ضریب جذب، S (مربوط به نوع خاک و T_c) به صورت رابطه‌ی عکس می‌باشد. کم‌ترین مقدار T_c مربوط به نوار $Roth-8$ با مقدار $16/4$ دقیقه که با توجه به مقدار کم عمق نرمال (برابر با $0/015$ متر) و مقدار نسبتاً

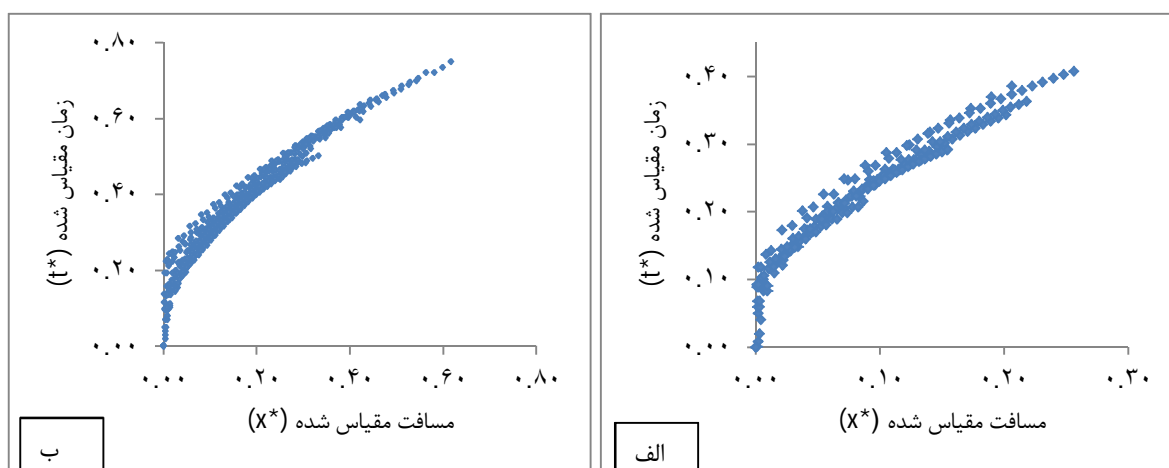
تابع چگالی احتمال عامل‌های مقیاس زمان و مکان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل 2 فراوانی عوامل مقیاس مشاهده شده (نمودار ستونی) و محاسبه شده با تابع لوگ - نرمال (نمودار منحنی) برای دو زمان طولانی و کوتاه و همچنین t_b را نشان می‌دهد. شکل 2 مشخص می‌کند که عوامل مقیاس زمان و مکان برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی از شکل نسبتاً یکسان پیروی می‌کنند. نتایج نشان داد که عوامل زمان (کوتاه و طولانی)، مکان (کوتاه و طولانی) و t_b از توزیع لوگ - نرمال پیروی می‌کنند. اگرچه تاکنون عوامل مقیاس در آبیاری سطحی از نظر نرمال بودن مورد بررسی قرار نگرفته‌اند اما نتایج پژوهشگران پیشین در رابطه با عوامل مقیاس توابع هیدرولیکی خاک (Kosugi and Warrick et al., 1977; Hopmans., 1998 و قهرمان و همکاران 1387) نشان از لوگ - نرمال بودن توزیع عوامل مقیاس در این توابع دارد.

شکل 3 حالت مقیاس شده شکل 1 را به ترتیب برای زمان‌های کوتاه (الف) و طولانی (ب) نشان می‌دهد. از آنجا که عوامل مقیاس

مربوط به برازش برای زمان کوتاه و زمان طولانی در جدول 3 ارایه شده که در سطح 1 درصد معنی دار هستند.



شکل 2- فراوانی عوامل مقیاس t_b مشاهده شده (نمودار ستونی) و محاسبه شده با تابع لوگ- نرمال (نمودار منحنی) برای دو زمان طولانی و کوتاه



شکل 3- منحنی پسروری مقیاس شده برای زمان کوتاه (الف) و زمان طولانی (ب)

جدول 3- ضرایب A_1 و A_2 ، معادله پسروری حاصل از برازش با استفاده از شکل 3 و 4

ضرایب		معادله پسروری	زمان
$A_1 = -3.147$	$A_2 = 2.815$		کوتاه
$A_1 = -8.771$	$A_2 = 3.209$		طولانی

جدول 4- نتایج ارزیابی آماری پسروری آبیاری برای معادله 15

نوع معادله	λ	E_r (%)	R^2	E_a (%)
زمان کوتاه	1/143	14/3	0/92	14/3
زمان طولانی	0/998	0/2	0/98	4/67
کل	1/046	4/6	0/94	7/52

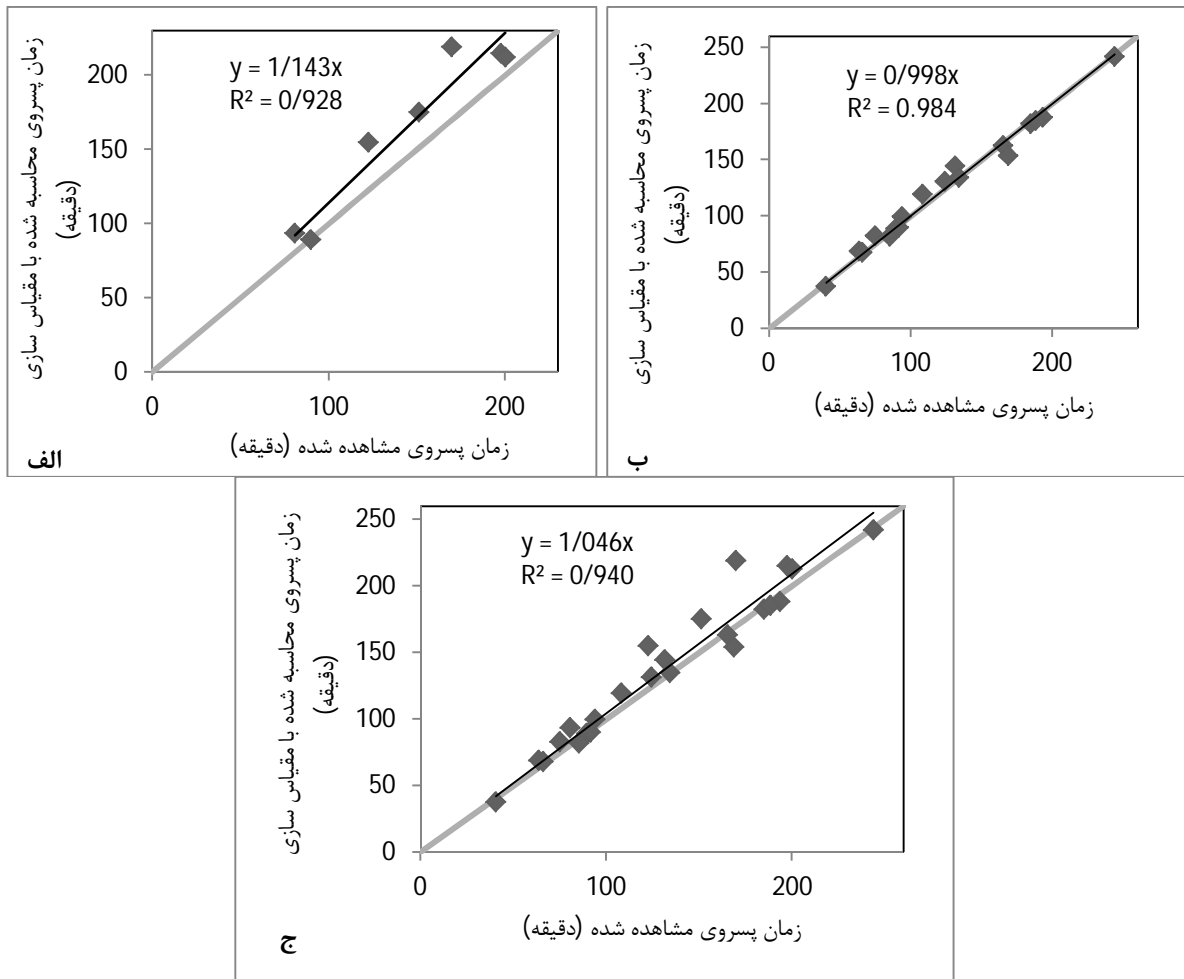
می‌دهد که دلیل آن استفاده از معادله نفوذ خطی ($Z = St_b^{0.5} + f_0(t - t_b)$) برای فاز پسروری برای زمان طولانی می‌باشد. کلمنز از معادله نفوذ شاخه‌ای برای ارزیابی آبیاری نواری استفاده کرد. نتایج مشخص کرد که استفاده از بخش زمان طولانی نفوذ برای فاز پسروری باعث افزایش دقت مدل می‌شود (Clemmens., 1981). بر اساس تحقیق (Singh and Yu., 1988) در بیش‌تر موارد، نوع جریان در فاز پسروری جریان آرام و یا انتقالی می‌باشد. در نتیجه، به نظر می‌رسد که استفاده از معادله نفوذ خطی منطقی‌تر بوده و باعث افزایش دقت بخش زمان طولانی شده است.

برای درک بهتر نتایج مربوط به روش ارایه گردیده، برای تعدادی از نوارها منحنی پسروری در شکل‌های 5 و 6 رسم گردیده است. شکل 5 نمودار پسروری مشاهده شده و پیش‌بینی شده را برای نوارهای R-3، R-16 و Roth-8 (نوارهای زمان کوتاه) و شکل 6 نمودار پسروری مشاهده شده و پیش‌بینی شده را برای نوارهای R-1، R-11 و R-12 (نوارهای زمان طولانی) نشان می‌دهد. نتایج شکل‌های 5 و 6 نشان دهنده دقت مناسب معادله ارایه گردیده با استفاده از مقیاس‌سازی

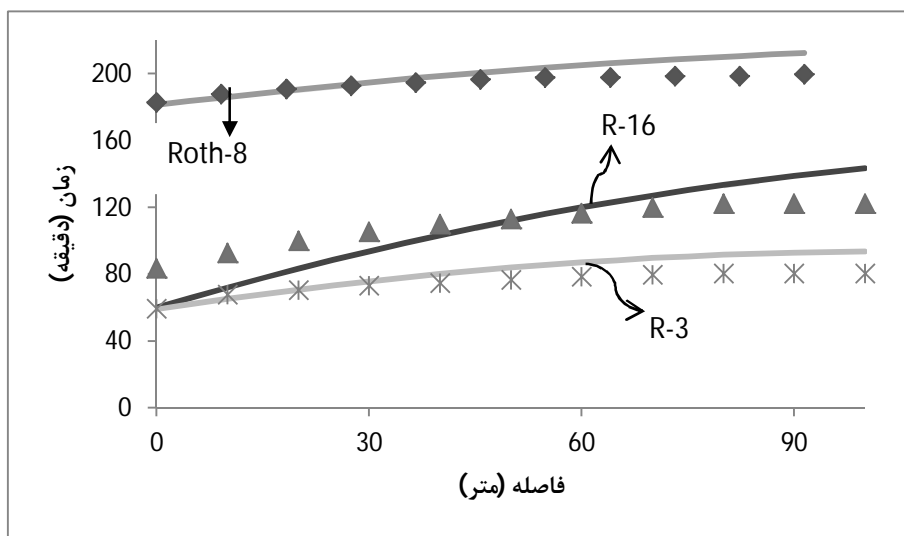
با استفاده از معادله 15، ضرایب ارایه گردیده در جدول 3 و داده‌های ورودی هر نوار می‌توان معادله پسروری در حالت خارج از مقیاس را رسم کرد. پس از خارج شدن از حالت مقیاس معادله‌ها، اقدام به ارزیابی معادله‌ها برای هر نوار گردید. نتایج آماری مربوط به ارزیابی زمان پسروری مشاهده شده (یا شبیه‌سازی شده با مدل اینرسی صفر برای نوارهای با انتهای بسته) و زمان پسروری پیش‌بینی شده با استفاده از معادله 15 برای 25 نوار آبیاری (داده‌های جدول 1) مورد بررسی، در محدوده زمان کوتاه (نوارهای R-3، R-5، R-9، R-15، R-16، R-18 و Roth-8)، زمان طولانی و برای مجموع همه نوارها در جدول 4 ارایه گردیده است.

جدول 4 نشان می‌دهد که نتایج مربوط به زمان طولانی با $\lambda=0/998$ مقدار خطای کم‌تر ($E_r=0/2$ و $E_a=4/67$) و ضریب تبیین بالاتر ($R^2=0.98$) بهتر از زمان کوتاه بوده است. همچنین، مقایسه‌ی زمان پسروری مشاهده شده و زمان پسروری پیش‌بینی شده نسبت به خط یک به یک در شکل 4 موجود است. نتایج جدول 4 و شکل 4 نشان می‌دهد که معادله ارایه گردیده برای زمان طولانی با دقت بیش‌تری نسبت به زمان کوتاه کار پیش‌بینی فاز پسروری را انجام

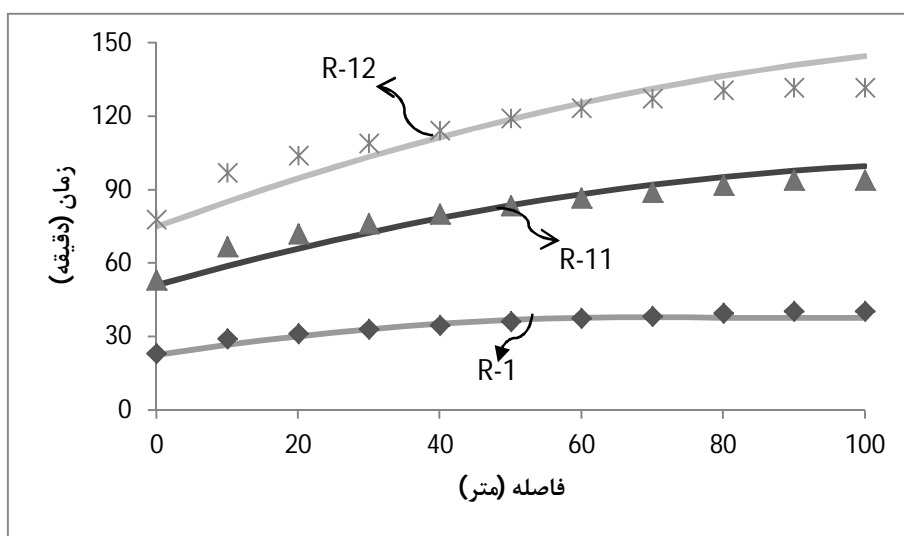
(معادله 15) در برآورد منحنی پسروری آب در نوارهای با انتهای باز می‌باشد.



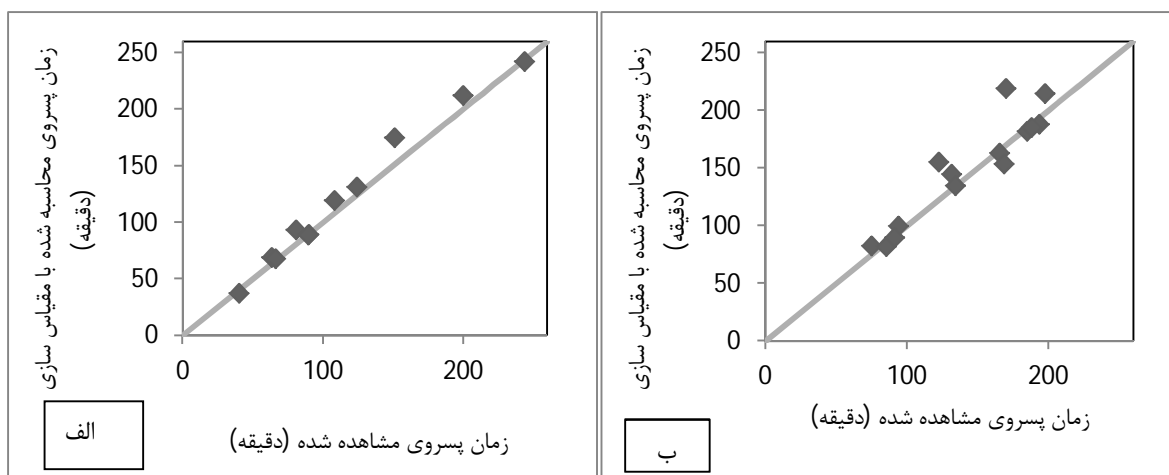
شکل 4- مقایسه زمان پسروری مشاهده شده و پیش‌بینی شده، زمان کوتاه (الف) زمان طولانی (ب) و کل (ج)



شکل 5- مسیر پسروری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در نوارهای R-3، R-16 و Roth-8 (نقاط = اندازه‌گیری شده و خطوط ممتد = شبیه‌سازی شده)



شکل 6- مسیر پسروری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در نوارهای R-1، R-11 و R-12 (نقاط= اندازه‌گیری شده و خطوط ممتد= شبیه‌سازی شده)



شکل 7- مقایسه زمان پسروری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای نوارهای کشت نشده (الف) و کشت شده (ب)

کشت نشده و کشت شده مناسب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

از آنجا که تعیین منحنی پسروری جهت ارزیابی آبیاری نواری دارای اهمیت بسیاری بوده و از طرفی معادله‌های ارایه گردیده برای تعیین پسروری بسیار محدود است و دقت آن‌ها نیز کم می‌باشد، در این تحقیق، یک معادله‌ی جدید با استفاده از مفهوم مقیاس‌سازی جهت برآورد منحنی پسروری در آبیاری نواری با انتهای باز ارایه گردید. جهت ارایه معادله، از شکل مقیاس‌شده مدل موج سینماتیک و کاربرد معادله‌ی نفوذ شاخه‌ای فیلیپ برای مولفه‌ی نفوذ استفاده شد. این معادله با استفاده از عوامل مقیاس زمان و مکان در هر دو حالت زمان کوتاه و طولانی بدست آمد. عوامل مقیاس زمان و مکان در هر دو

تأثیر وضعیت کشت در معادله‌ی پسروری

شکل 7 مقایسه‌ی زمان پسروری مشاهده شده و زمان پسروری پیش‌بینی شده با معادله‌ی 15 را نسبت به خط یک به یک، برای نوارهای کشت نشده (الف) و کشت شده (ب) نشان می‌دهد. میانگین درصد مطلق خطا $\left(\left| \frac{\text{محاسبه‌شده} - \text{مشاهده‌شده}}{\text{مشاهده‌شده}} \right| \times 100 \right)$ برای زمان پسروری در نوارهای کشت نشده برابر با 6/78 و برای نوارهای کشت شده برابر 8/08 می‌باشد.

اگرچه نتایج نشان می‌دهد که دقت معادله‌ی پسروری در خاک-های کشت نشده بیش‌تر از خاک‌های کشت شده می‌باشد، ولی به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که دقت معادله‌ی ارایه گردیده با استفاده از مقیاس‌سازی در پیش‌بینی زمان پسروری برای نوارهای

- Esfandiari, M and Maheshwari, B.L. 2001. Field evaluation of furrow irrigation models. *Journal Agricultural Engineering Research*. 79.4: 459-479.
- Gillies, M.H and Smith, R.J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and runoff data. *Irrigation Science*. 24.1: 25-35.
- Katopodes, N.D and Strelkoff, T. 1977. Dimensionless solutions of border irrigation advance. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 103.4: 401-417.
- Khatri, L and Smith, R.J. 2005. Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. *Irrigation and Drainage*. 54: 467-482.
- 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.
- 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.
- Kozak, J.A and Ahuja, L.R. 2005. Scaling of infiltration and redistribution of water across soil textural classes. *Soil Science Society of America Journal*. 69.3: 816-827.
- Machiwal, D., Madan, K.J and Mal, B.C. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*. 95.4: 569-582.
- McClymont, D.J and Smith, R.J. 1996. Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science*. 17.1: 15-22.
- Miller, E.E and Miller, R.D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal Applied Physics*. 27: 324-332.
- Navabian, M., Liaghat, A.M., Smith, R.J and Abbasi, F. 2009. Empirical functions for dependent variables in cutback furrow irrigation. *Irrigation Science*. 27: 215-222.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration-3: Moisture profiles and relation to experiment. *Soil Science*. 84: 163-178.
- Ram, R.S. 1969. Hydraulics of recession flow in border irrigation system. MSc. Thesis. Indian Institute of Technology.. Kharagpur, India.
- Ram, R.S. 1972. Comparison of infiltration measurement techniques. *Journal Agriculture Engineering, India*. 9.2: 67-75.
- Ram, R.S and Lal, R. 1971. Recession flow in border irrigation. *Journal Agriculture Engineering, India*. 8.3: 62-70.
- حالت زمان کوتاه و طولانی از تابع لوگ- نرمال پسروری می‌کردند. شکل ساده معادله و عدم وابستگی به نوع خاک از مزایای معادله ارایه شده جهت برآورد منحنی پسروری می‌باشد. معادله ارایه گردیده برای 25 نوار شامل نوارهای کشت نشده و نوارهای کشت شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که معادله‌ی به دست آمده از روش مقیاس‌سازی با دقت قابل قبولی منحنی پسروری آب در نوار را برای زمان کوتاه و طولانی و همچنین نوارهای کشت نشده و نوارهای کشت شده بیان می‌کند.

منابع

- صادقی، م، قهرمان، ب، داوری، ک. 1387. مقیاس‌سازی و پیش‌بینی نیمرخ رطوبت خاک در فاز توزیع مجدد. *مجله آب و خاک*. 2.22: 431-417.
- قهرمان، ب، صادقی، م، داوری، ک، گهردوست منفرد، م. 1390. مقیاس‌بندی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های غیرمتشابه. *مجله پژوهش آب ایران*. 9: 120-113.
- مهرابی، ف، سپاسخواه، ع. 1392. مقیاس‌بندی و بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های نفوذ در خاک در مقیاس حوزه آبریز (مطالعه موردی: دشت باجگاه). 14: 1. 32-13.
- Alazba, A.A. 1999. Dimensionless advance curves for infiltration families. *Agriculture Water Managment*. 41: 115-131.
- Atchison, K.T. 1973. Retardance coefficient and other data for a vegetated irrigation border. Unpublished MSc. Thesis. University of Arizona. Tucson. USA.
- Bautista, E. Schlegel, J. Strelkoff, T.S. 2012. WinSRFR 4.1, Software and User Manual USDA-ARS U.S. Arid Land Agricultural Research Center Maricopa. AZ USA.
- Clemmens, A.J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agriculture Water Managment*. 3: 251-267.
- Clemmens, A.J. 2007. Simple approach to surface irrigation design: Theory. *Journal of Land and Water*. 1: 1-19.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A. Ghanbarian-Alavijeh, B and Abbasi, F. 2010. Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrigation Science*. 28.6: 479-488.
- Elliott, R.L., Walker, W.R and Skogerboe, G.V. 1983. Furrow irrigation advance rate: A dimensionless approach. *Trans ASAE*. 26.6: 1725-1731.

- Simultaneous scaling of soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions assuming lognormal pore-size distribution. *Advance Water Resource*. 24: 677-688.
- Upadhyaya, S.K and Raghuwanshi, N.S. 1999. Semiempirical infiltration equation for furrow irrigation systems. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 125.4: 173-178.
- Valiantzas, J.D., Aggelides, S and Sasselou, A. 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agriculture Water Management*. 52: 17-32.
- Walker, W.R. 2003. SIRMOD III: Surface irrigation simulation, evaluation and design. Guide and technical documentation. Department. of Biological and Irrigation Engineering. Utah State Univ., Logan, Utah.
- Walker, W.R and Humpherys, A.S. 1983. Kinematic-wave furrow irrigation model. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 109.4: 377-392.
- Walker, W.R and Skogerboe, G.V. 1987. *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Englewood Cliffs, New Jersey. 386 p.
- Warrick, A.W., Mullen, G.J and Nielsen, D.R. 1977. Scaling of field measured hydraulic properties using a similar media concept. *Water Resource Research*. 13.2: 355-362.
- Warrick, A.W and Hussen, A.A. 1993. Scaling of Richards' equation for infiltration and drainage Soil Science Society of America Journal. 57: 15-18.
- Warrick, A.W and Nielsen, D.E. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. PP. 319-344. In: D.I. Hillel (Ed.). *Application of Soil Physics*. Academic Press, New York.
- Wu, I.P. 1972. Recession flow in surface irrigation. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 98: 77-89.
- Yitayew, M and Fangemeier, D.D. 1984. Dimensionless runoff curves for irrigation borders. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 110: 179-191.
- Yu, F.X and Singh, V.P. 1989. Analytical model for border irrigation. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 115: 982-999.
- Ram, R.S and Singh, V.P. 1982. Evaluation of models of border irrigation recession. *Journal Agricultural Engineering Research*. 27: 235-252.
- Ram, R.S and Singh, V.P. 1985. Application of kinematic wave equations to border irrigation design. *Journal Agricultural Engineering Research*. 32: 57-71.
- Rasoulzadeh, A and Sepaskhah, A.R. 2003. Scaled infiltration equations for furrow irrigation. *Biosystems Engineering*. 86.3: 375-383.
- Roth, R.L. 1974. Data for border irrigation models. *Transactions of the ASAE*. 17.1: 157-161.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Ziaei, A.N., Davary, K and Reichardt, K. 2012. Invariant solutions of Richards' equation for water movement in dissimilar soils. *Soil Science Society of America Journal*. 76.1: 1-9.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Davary, K., Hasheminia, S.M and Reichardt, K. 2011. Scaling to generalize a single solution of Richards' equation for soil water redistribution. *Science Agricultural*. 68: 582-591.
- Sadeghi, M., Ghahraman, B., Warrick, A.W., Tuller, M and Jones, S.B. 2016. A critical evaluation of the Miller and Miller similar media theory for application to natural soils. *Water Resource Research*. 52.4: 1-18.
- Sharma, M.L., Gander, G.A and Hunt, C.G. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology*. 45: 122-101.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W and Hopmans, J.W. 1993. One method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*. 36.2: 395-404.
- Strelkoff, T and Clemmens, A.J. 1981. Dimensionless stream advance in sloping borders. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 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. 1977. Algebraic computation of flow in border irrigation. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 103: 357-377.
- Strelkoff, T and Katopodes, N.D. 1977. Border irrigation hydraulics with zero inertia. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 103.3: 325-342.
- Tuli, A., Kosugi, K and Hopmans, J.W. 2001.

General Equation for Recession of Water in Border Irrigation

M. M. Chari¹, K. Davari^{2*}, B. Ghahraman³, A. N. Ziaei⁴

Received: Oct.03, 2016

Accepted: Dec.23, 2016

Abstract

Determination of recession curve for evaluation of border irrigation is of prime importance. Due to variability of soil types, as well as initial and boundary conditions in border irrigation, water advance rate varies considerably indifferent borders. In recent years, scaling approach has been adopted to reduce number of measurements, and to formulate governing equations. The aim of this study was to develop a unique equation, independent of initial and boundary conditions, for evaluation of water recession in borders, by using scaling approach. For this purpose, we considered kinematic wave model and Philip's 2-termequation for border irrigation. The scaling factor was defined, so as the kinematic wave equation is independent of initial conditions and soil properties. Results showed that the scaling factor follows Log-normal distribution. A quadratic equation was fitted to define recession of water. The equation was evaluated for 25 borders under cultivated and uncultivated and including different slopes of 0.001 to 0.005, roughness of 0.017 to 0.211, length of 91.4 to 100 m and flow rate of 0.08 to 0.16 m³/min.m. For indices of coefficient of determination (R²), comparison with perfect line of agreement, percentage of model prediction error (Er), and percentage of average relative error (E_a) were used. The results showed that the proposed equation based on scaling performed well (R²=0.94, λ=1.046, Er=4.6 and Ea=7.52). Results showed that the mean absolute percent error for recession time was 6.78 and 8.08 for uncultivated and cultivated border, respectively, which are nearly the same. On the overall, border recession was simulated under scaling method which is simple and independent of soil type.

Keywords: Border irrigation, Recession, Scaling

1- PhD student Ferdowsi University of Mashhad and faculty Member University of Zabol

2- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(*-Corresponding Author Email: k.davary@gmail.com)