

ارایه رابطه عمومی جهت پیش‌روی آب در نوار

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

تاریخ دریافت: 1395/1/12 تاریخ پذیرش: 1395/10/1

چکیده

جهت 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 جهت کاهش داده‌های اندازه‌گیری در مسایل آب و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این پژوهش ارایه رابطه‌ای یکتا و مستقل از شرایط اولیه و مرزی خاک، جهت پیش‌روی آب در نوار با استفاده از مقیاس‌سازی است. برای این منظور آبیاری نواری با استفاده از مدل موج سینماتیک و کاربرد رابطه نفوذ فیلپ دو جمله‌ای برای مولفه‌ی نفوذ، حل گردید. سپس با تعریف عوامل مقیاس که مفهوم فیزیکی داشتند اقدام به مقیاس‌سازی آبیاری نواری برای مسیر پیش‌روی گردید. از آنجا که منحنی‌های پیش‌روی مقیاس‌شده به رابطه‌ی مشخصی میل می‌کردند در نتیجه رابطه‌های توانی، نمایی و سهمی شکل جهت پیشرفت آب در نوار ارایه گردید. رابطه‌های به دست آمده با استفاده از مقیاس‌سازی با رابطه بیان حجمی، برای 25 نوار مختلف 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_r) و درصد متوسط خطای نسبی مدل (E_a) استفاده گردید. نتایج نشان داد مدل توانی با $R^2=0/893$ ، $\lambda=1/003$ ، $E_r=0/9$ و $E_a=13/76$ بهتر از دو مدل دیگر بدست آمده از مقیاس‌سازی منحنی پیش‌روی را پیش‌بینی می‌کند. در مقایسه با رابطه بیان حجمی، رابطه توانی دارای دقت بیش‌تر بود. شکل ساده رابطه و عدم وابستگی به نوع خاک موجب‌تری روش ارایه گردیده نسبت به پژوهش‌های پیشین در این رابطه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نواری، مقیاس‌سازی، نفوذ

مقدمه

پیش‌روی آب مدیریت سیستم آبیاری را بسیار پیچیده کرده است. با توجه به اهمیت پدیده نفوذ در ارزیابی آبیاری سطحی، تحقیقات زیادی برای بدست آوردن پارامترهای رابطه 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). محققان مانند جاینز و کلمنز (Jaynes and Clemmens., 1986)، چایلندز و همکاران (Oyonarte et al., 1993) و اوئونارات و همکاران (Childs et al., 2002) نشان دادند که مشخصات نفوذ آبیاری سطحی با تغییرپذیری مشخصات خاک‌ها نیز تغییر کرده و در نتیجه سرعت پیش‌روی آب در مزرعه نیز متفاوت می‌باشد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران روش‌هایی را برای کاهش نیاز به اندازه‌گیری داده‌های مزرعه‌ای مورد نیاز برای بیان مشخصات پویای آب در خاک ارایه کرده‌اند. برای مثال می‌توان به فرآیند نفوذ (Tuli et al., 1980) و ویژگی هدایت هیدولیکی (Sharma et al., 2001) و نیز تغییرپذیری خاک‌ها (Warrick and Nielsen, 1980) اشاره کرد. یکی از این روش‌ها مقیاس‌سازی می‌باشد که اولین بار

روش‌های آبیاری سطحی و بخصوص آبیاری نواری از رایج‌ترین روش‌های استفاده از آب در مزارع در ایران و سایر نقاط دنیا می‌باشند. 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 و پیش‌روی آب در مزرعه می‌باشد. نوع خاک و شرایط اولیه و مرزی، منحنی پیش‌رویدر مزرعه را تحت تاثیر قرار می‌دهد به طوری که تغییرپذیری مکانی و زمانی

1- دانشجوی دوره دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

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

*- نویسنده مسئول: (Email: .Davary@ferdowsi.um.ac.ir)

(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 رابطه نفوذ کوستیاکف) می‌باشد. در نتیجه برای بیان تمامی شرایط نیاز به تعداد زیادی نمودار بود (Katopodes and Strelkoff., 1977; Strelkoff and Clemmens, 1981). ایلویت و همکاران از شکل بی- بعد معادلات اینرسی صفر برای تعیین پارامترهای نفوذ رابطه کوستیاکوف-لویس در آبیاری جویچه‌ای استفاده کردند. بدین صورت که ابتدا منحنی پیش‌روی برای مقادیر متفاوتی از پارامترهای رابطه نفوذ کوستیاکوف-لویس با استفاده از معادلات اینرسی صفر در شکل بدون بعد رسم می‌گردد، چنانچه منحنی پیش‌روی آب در مزرعه موجود باشد با استفاده از پارامتر مقیاس زمان و مکان منحنی پیش‌روی آب در مزرعه را بدون بعد کرده و نزدیک‌ترین منحنی پیش‌روی رسم گردیده به منحنی پیش‌روی مشاهده شده در شکل بدون بعد انتخاب گردیده پارامترهای رابطه نفوذ کوستیاکوف-لویس با استفاده از میان‌یابی بدست می‌آید (Elliott et al., 1983). بیتایو 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 رابطه نفوذ کوستیاکف از روی طول بدون بعد و زمان قطع جریان بدون بعد مقدار رواناب را به دست آورد (Yitayew and Fangemeier., 1984). استرلکف و شنتاوی از شکل بدون بعد شده‌ی مدل اینرسی صفر برای ارزیابی آبیاری نواری استفاده کرده و نمودارهایی ارائه کردند که از روی آن‌ها می‌توان شاخص‌های ارزیابی آبیاری نواری مانند: راندمان کاربرد، نسبت رواناب و نفوذ عمقی را به دست آورد (Strelkoff and Shatanawi., 1984). ال ایزا 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). 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).

گرچه در تمامی موارد ذکر شده در بالا رابطه سنت-ونانت به خوبی بی‌بعد و مقیاس شده است ولی عدم یکتایی در جواب به دلیل وابستگی به نوع خاک مشکل عمده‌ی تمامی این روش‌ها می‌باشد. در نتیجه با توجه به تفاوت بودن رابطه نفوذ برای خاک‌های متفاوت، رابطه‌های بی‌بعد شده‌ی آبیاری سطحی در بالا را نمی‌توان برای خاک‌های دیگر استفاده کرد. هدف از این پژوهش ارائه رابطه‌ای یکتا در شکل مقیاس شده برای تمامی شرایط آبیاری نواری می‌باشد.

توسط میلر و میلر (Miller and Miller., 1956) با تکیه بر نظریه- محیط‌های متشابه در دانش آب و خاک ظهور یافت. بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، دو خاک را می‌توان متشابه نامید به شرطی که عامل مقیاسی مانند λ وجود داشته باشد که بتواند خاکی را به خاک دیگر تبدیل کند. با ارایه‌ی 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)، سیمونز و همکاران (Simmons., et al 1991)، ایلویت و همکاران (Elliott et al., 1983)، ووگل و همکاران (Vogel et al., 1991) 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 قابل شد، حوزه‌ی اول مربوط به بیان تغییرپذیری مکانی توابع هیدرولیکی خاک‌ها (فهرمان و همکاران، 1390; Kosugi and Hopmans., 1998; Warrick and Hussen., 1993; Vogel et al., 1977; Warrick et al., 1991) است. در حوزه‌ی دوم پرداختن به مواردی همچون اشتقاق حل‌های عمومی فرایندهای آب در خاک مانند نفوذ (مهرابی و سپاسخواه 1392; Sadeghi et al., 2012; Khatri and Smith., 2006; Machiwal et al., 2006; Kozak and Ahuja., 2005; Sharma et al., 1980) جابه‌جایی اصلاح (Sadeghi and Jones., 2012) و توزیع مجدد (صادقی و همکاران، 1387) بوده و حوزه‌ی سوم مربوط به تدوین و فرموله کردن معادلات مربوط به آب و خاک با کم‌ترین تعداد ممکن متغیر استمانند (Elliott et al., 1977; Katopodes and Strelkoff., 1983; Yitayew and Fangemeier., 1984; Hillel and Ram and Singh., 1986; Shatanawi., 1984; Alazba., Strelkoff and Clemmens., 1994; Elrick., 1990; Rasoulzadeh Sepaskhah., 2003; Navabian et al., 1999; Bautista et al., 2012; 2009).

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 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

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم در آبیاری سطحی، دو رابطه‌ی پیوستگی و مومنت است که به معادلات سنت-ونانت شناخته می‌شوند که از قانون بقای جرم و مومنت به دست می‌آیند (Strelkoff and Katopodes., 1977) بر اساس معادلات سنت-ونانت مدل‌های متفاوتی برای شبیه-سازی 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، رابطه پیوستگی به شکل کامل به کار رفته در حالی که تفاوت، در نحوه‌ی به کار بردن رابطه مومنت می‌باشد. بر این اساس معادلات سنت-ونانت به سه دسته مدل هیدرودینامیک کامل، مدل اینرسی صفر و مدل موج سینماتیک تقسیم بندی 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)، رابطه‌ی مومنتوم رامی توان از یکی از معادلات جریان یکنواخت (مانینگ، شزی یا دارسی-ویسباخ) 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 رابطه مانینگ استفاده شود شیب اصطکاک برابر با $S_f = S_0 = \frac{q^2 n^2}{y^{10/3}}$ خواهد بود که در آن n ضریب زیری مانینگ، q دبی 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 (رابطه (الف)) و مرزی (معادلات (ب) و (پ)) مناسب نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

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

$$t > t_{co}: q(0, t) = 0 \quad (پ)$$

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

کلمنز (Clemmens., 1981) برای بیان نفوذ آب در آبیاری نواری، رابطه‌ی نفوذ دوشاخه (branch function infiltration) را ارائه کرد و نشان داد که این رابطه به شکل مناسبی می‌تواند فرایند نفوذ آب در خاک را ارایه کند. در نرم افزار WinSRFR (Bautista et al., 2012)4.1 نیز از رابطه نفوذ شاخه‌ای برای آبیاری نواری استفاده شده است (Clemmens., 1981). طبق تحقیقات فیلیپ (Philip., 1957) در ابتدای آبیاری از آنجا که نیروی ثقل ناچیز می‌باشد برای بیان نفوذ می‌توان از رابطه $Z = St^{0.5}$ استفاده کرد که در آن S ضریب جذب $(mm/min^{0.5})$ ، t زمان (min) و Z عمق

نفوذ (mm) می‌باشد. با گذشت زمان چنانچه شدت نفوذ نزدیک به نفوذ نهایی شود رابطه‌ی نفوذ به صورت $Z = St^{0.5} + f_0 t$ ارایه می‌گردد که در آن f_0 سرعت نفوذ نهایی (mm/min) می‌باشد. برای جلوگیری از مشکلات محاسبه‌ی پارامترهای رابطه‌ی نفوذ و سادگی در تجزیه و تحلیل‌ها، همانند پیشنهادات کلمنز (Clemmens., 1981)، در این جا نیز تابع نفوذ شاخه‌ای برای رابطه‌ی نفوذ دو جزیی فیلیپ توسعه داده می‌شود. در این حالت عمق نفوذ و سرعت نفوذ در محل شاخه‌ای شدن می‌باید بر یکدیگر منطبق باشد. از این رو t_b زمان گذر از شاخه‌ی اول به شاخه‌ی دوم می‌شود:

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

در نتیجه رابطه‌ی 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 بعد بوده که از تقسیم متغیرهای بعددار بر عامل‌های مقیاس به دست می‌آیند. برای معادلات پیوستگی (3 و 4) و مومنتوم، متغیرهای بدون بعد به صورت رابطه 5 تعریف می‌گردد:

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

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

که در آن متغیرهای ستاره دار بدون بعد 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 رابطه‌ی نفوذ برای زمان‌های کوتاه و طولانی متفاوت می‌باشد در نتیجه عوامل مقیاس، برای هر یک از زمان کوتاه و طولانی نیز متفاوت است.

1- شاخه‌ی زمان‌های کوتاه: عامل‌های مقیاس به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که رابطه‌ی مقیاس شده‌ی موج سینماتیک 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. همچنین X_c و T_c را به گونه‌ای تعریف می‌کنیم که رابطه‌ی موج سینماتیک مستقل از خاک گردد. در نتیجه عامل‌های مقیاس به صورت رابطه‌های 6 تا 9 خواهند بود:

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

معادلات آبیاری سطحی برای حالات مختلف داده‌های ورودی حل گشته‌و نمودار مقیاس شده برای هر یک از حالات زمان کوتاه و زمان طولانی ترسیم می‌گردد.

در ادامه به هر یک از نمودارهای مقیاس شده، رابطه‌ی پیش‌روی توانی (رابطه‌ی 14)، رابطه‌ی پیش‌روی ارایه شده توسط SCS (رابطه - ی 15) (Smerdon et al., 1988) و رابطه‌ی سه‌می (رابطه‌ی 16) برازش داده می‌شود:

$$t_x^* = A_1 x^{*A_2} \quad (14)$$

$$t_x^* = B_1 x^{*B_2} e^{B_2 x^*} \quad (15)$$

$$t_x^* = C_1 x^{*2} + C_2 x^* \quad (16)$$

که در آن‌ها t_x^* زمان پیش‌روی تا نقطه‌ی x^* ، A_1 ، A_2 ، B_1 ، B_2 ، C_1 و C_2 ثابت‌های برازش می‌باشند.

خارج کردن از شکل مقیاس شده (de-scaling)

از آنجا که در مسایل آبیاری سطحی از شکل بعددار پارامترها استفاده می‌گردد در نتیجه رابطه‌های مقیاس شده باید حالت مقیاس خارج گردند. شکل مقیاس نشده رابطه‌های 14، 15 و 16 به به صورت 17 تا 19 خواهد بود:

$$t_x = a_1 x^{a_2} \quad (17)$$

$$t_x = b_1 x e^{b_2 x} \quad (18)$$

$$t_x = c_1 x^2 + c_2 x \quad (19)$$

که ضرایب ثابت آن‌ها برابر خواهد بود با روابط 20 تا 22:

$$a_1 = \frac{T_c \cdot A_1}{X_c^{A_2}}, \quad a_2 = A_2 \quad (20)$$

$$b_1 = \frac{T_c B_1 e^{\frac{1}{X_c}}}{X_c}, \quad b_2 = B_2 \quad (21)$$

$$c_1 = \frac{C_1 T_c}{X_c^2}, \quad c_2 = \frac{C_2 T_c}{X_c} \quad (22)$$

برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی از ضرایب مربوط به آن بخش (برای زمان کوتاه روابط 5، 8 و 9 در روابط 17، 18 و 19 و برای زمان طولانی روابط 5، 11 و 12 را در روابط 17، 18 و 19 جایگزین می‌شود) استفاده از پارامترهای ورودی هر نوار (پارامترهای جریان و نفوذ) می‌توان رابطه پیش‌روی را بدست آورد.

در پایان رابطه‌های بدست آمده با استفاده از روش مقیاس‌سازی با رابطه‌ی بیلان ارایه شده توسط شپرد و همکاران (Shepard et al., 1993) (رابطه 23) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

$$q_0 t_x = \sigma_y \gamma_0 x + \frac{\pi S}{4p} x^2 + \frac{2f_0}{3p^2} x^3 \quad (23)$$

که در آن σ_y فاکتور شکل سطحی (برابر با 0/77، ایلپوت و همکاران، Elliott et al., 1983) و p پارامتر برازش ($x = pt^{0.5}$)، با استفاده از داده‌های مسیر پیش‌روی بدست می‌آید و سایر پارامترها

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

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

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

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

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

$$q^* = y^{*5/3} \quad (10ب)$$

$$t^* = 0: q^*(x^*, 0) = 0, \quad y^*(x^*, 0) = 0 \quad (10پ)$$

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

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

2- شاخه‌ی زمان‌های طولانی: عامل‌های مقیاس زمان و فاصله - ی 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 Y_c و q_c مثل حالت پیش است. در نتیجه با تعیین عامل‌های مقیاس رابطه‌ی پیوستگی در حالت مقیاس شده برای شاخه‌ی زمان طولانی به صورت رابطه 13 ارایه گردیده و سایر رابطه‌ها همانند رابطه‌های (10ب تا 10ث) 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 (Walker and Humpherys., 1983) استفاده گردید. در این روش از راه حلی 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 حجم‌ها تغییر کرده و به این ترتیب سطح مقطع جریان در مرزهای بالادست و پایین‌دست 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. 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 رابطه‌ی نفوذ دو جمله‌ای فیلیپس و f_0 ،

صادق می‌باشد. بر اساس تحقیقات وول هیزر و لیگت (Woolhiser and Liggett., 1967)، کاتاپودز و استرلکف (Katopodes and Strelkoff., 1977) و رم و سینگ (Ram and Singh., 1985) چنانچه مدل موج سینماتیک برای آبیاری نواری در حالت بدون بعد نوشته شود از پارامتر بدون بعد K می‌توان برای ارزیابی آن استفاده کرد (روابط 27 تا 29):

$$K = K_1 F_0^2 \quad (27)$$

$$F_0^2 = \frac{V_0^2}{g y_0} \quad (28)$$

$$K_1 = \frac{S_0 L_p}{y_0 F_0^2} \quad (29)$$

که F_0 عدد فرود، V_0 سرعت جریان، g شتاب ثقل، L_p طول سطح خیس شده بوده و در حالتی که از شکل بدون بعد رابطه موج سینماتیک استفاده گردد مقدار آن برابر با پارامتر مقیاس طول می‌باشد. از آنجا که مقدار پارامتر مقیاس برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی طول متفاوت می‌باشد، پارامتر بدون بعد K جداگانه‌ای برای هر یک از زمان‌ها بدست می‌آید. مقدار p در این تحقیق برای زمان کوتاه برابر با $\frac{X_c}{4}$ (پارامتر مقیاس طول برای زمان کوتاه) و برای زمان طولانی برابر با X_{cl} (پارامتر مقیاس طول برای زمان طولانی) می‌باشد. بر اساس تحقیقات کاتاپودز و استرلکف (Katopodes and Strelkoff., 1977) در مواردی که عدد فرود خیلی کوچک (کم‌تر از 0/2) باشد ترم شتاب در رابطه موتوم قابل چشم‌پوشی بوده و رابطه‌ی هیدرودینامیک کامل به رابطه‌ی اینرسی صفر تبدیل می‌شود و وول هیزر و لیگت (Woolhiser and Liggett., 1967) نشان دادند که برای مقادیر K بزرگتر از 2 مدل اینرسی صفر به مدل موج سینماتیک کاهش می‌یابد. رم و سینگ (Ram and Singh., 1985) حد کاهش دقت مدل موج سینماتیک را K کم‌تر از 5 نامیدند. با توجه به موارد ذکر شده چنانچه مقدار عدد فرود کم‌تر از 0/2 و مقدار K بزرگ‌تر از 2 باشد دقت نتایج مدل موج سینماتیک مناسب می‌باشد.

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، رم و لای، آتچسون و رات استفاده می‌گردد (Roth, Ram, 1972; Ram and Lai, 1971; Atchison, 1973; Ram, 1969). که 18 نوار با انتهای بسته شامل داده‌های رم (Ram, 1969 و 1972)، رم و لای (1971) به صورت 9 نوار کشت نشده (R_j , $j=1,2,\dots,9$) و در 9 نوار گندم کشت شده (R_j , $j=10,11,\dots,18$) و دارای خاک زراعی با بافت متوسط می‌باشد. داده‌های آتچسون (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 و At-5

قبلاً تعریف شده‌اند. این روش توسط شپرد و همکاران (Shepard et al., 1993) برای تخمین پارامترهای نفوذ فیلپ با استفاده از روش یک نقطه‌ای و همچنین تعیین پیش‌روی آب در نوار و جویچه ارایه گردید. شپرد و همکاران (Shepard et al., 1993) این روش را برای خاک‌های کالیفرنیا بین محدوده ای از شنی (sand) تا لوم رسی (clayloam) با موفقیت ارزیابی کردند. ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimian et al., 2010) جهت به دست آوردن پارامترهای رابطه‌ی نفوذ فیلپ با استفاده از رابطه 23 از روش دو نقطه‌ای استفاده و نشان دادند که با استفاده از این روش دو نقطه‌ای دقت رابطه 23 در پیش‌بینی منحنی پیش‌روی در نوار و جویچه افزایش می‌یابد.

ارزیابی مدل:

برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده (زمان پیش‌روی) T_0 و مقادیر پیش‌بینی شده T_p ، از برازش داده‌ها به رابطه‌ی رگرسیونی (رابطه 24) استفاده می‌شود (Esfandiari and Maheshwari., 2001):

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

که در آن λ شیب بهترین خط برازش داده شده بر داده‌ها می‌باشد. در این رابطه هرچه مقدار λ به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی دقت بیش‌تر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشد. مقادیر $\lambda < 1$ نشان دهنده پیش‌بینی کم‌تر از مقدار واقعی و $\lambda > 1$ نشان دهنده پیش‌بینی بیش‌تر از مقادیر واقعی می‌باشد. همچنین شاخص ضریب تبیین (R^2) تعیین کننده‌ی تناسب برازش رابطه‌ی 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. 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 و به صورت رابطه 26 تعریف می‌شود:

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

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

ارزیابی مدل موج سینماتیک

از آنجا که رابطه‌های بدست آمده با استفاده از مقیاس‌سازی از مدل موج سینماتیک مشتق شده است در نتیجه معیارهای ارزیابی مدل موج سینماتیک برای رابطه‌های بدست آمده در این تحقیق نیز

استفاده می‌گردد. در نتیجه، مخالف بودن r با $0/5$ موجب انعطاف‌پذیری بیش‌تر برای برآزش می‌شود. چنان‌چه این رابطه در رابطه‌ی بیلان حجمی قرار داده شود پارامترهای رابطه‌ی نفوذ با استفاده از اطلاعات مسیر پیش‌روی برآید و نقطه بدست می‌آیند (اطلاعات بیش‌تر این روش در مقاله Ebrahimi et al., 2010 ارائه شده است. مشخصات نوارهای استفاده‌شده در جدول 1 موجود می‌باشد.

5 کشت شده و At-17 کشت نشده می‌باشد. نوار رات (Roth-8) نیز کشت نشده، انتها باز و دارای بافت لوم شنی می‌باشند (Roth, 1974). جهت به دست‌آوردن پارامترهای رابطه‌ی نفوذ فیلیپ (یعنی S و f_0) از روش دو نقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimi et al., 2010) استفاده شد. در این روش به جای استفاده از رابطه- $x = pt^{0.5}$ از رابطه‌ی توانی $x = pt^r$ برای مسیر پیش‌روی

جدول 1- مشخصات نوارهای آبیاری مورد استفاده

نام نوار*	دبی ($m^3/m/min$)	شیب (m/m)	ضریب زبری	طول (m)	عرض (m)	زمان پیش- روی (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 (1969 and 1972); Ram and Lal (1971)

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

Roth-8; Roth (1974)

نتایج و بحث

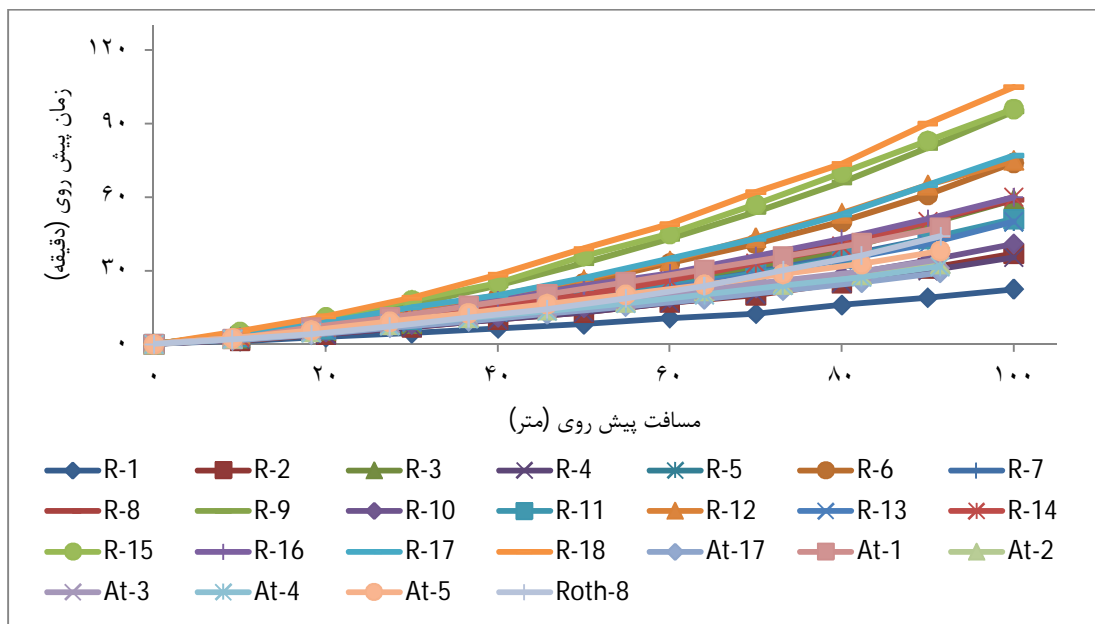
مقیاس‌سازی پیش‌روی

شکل 1 منحنی پیش‌روی آب در نوار برای 25 نوار جدول 1 را نشان می‌دهد. این شکل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی

مسیر پیش‌روی برای 25 نوار جدول 1 رسم گردیده است. در شکل 1 کم‌ترین مدت زمان پیش‌روی مربوط به نوار R-1 با زمان پیش‌روی برابر با 22/5 دقیقه برای طول 100 متر و بیش‌ترین زمان پیش‌روی برابر با 105 دقیقه برای طول 100 متر در نوار R-18 می‌باشد. متغیر بودن زمان پیش‌روی در نوارهای مختلف نشان دهنده‌ی تغییرات زیاد

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 بزرگ ضریب جذب ($0/007562 m/min^{0.5}$) قابل پیش‌بینی بود. با توجه به رابطه‌ی 9 بین T_c و X_c و T_c رابطه‌ی مستقیم وجود دارد، در نتیجه عوامل موثر در T_c نیز 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 می‌باشد.

داده‌های ورودی شامل پارامترهای جریان (شرایط مرزی) و پارامترهای نفوذ (وابستگی به نوع خاک) در این داده‌ها می‌باشد. 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 رابطه‌های (5، 8 و 9) برای زمان کوتاه و رابطه‌های (5، 11 و 12) برای زمان طولانی عوامل مقیاس مربوط به هریک از نمودارها بدست آمد. 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 رابطه‌ی 8 عوامل موثر در مقدار T_c مقادیر عمق نرمال (Y_c)، (که خود Y_c طبق رابطه‌ی (7) به q_0 ، n و S_0 وابسته می‌باشد) به صورت



شکل 1- منحنی پیش‌روی آب در نوارهای مختلف

ضریب جذب (از 0/000611 تا 0/008203 $m/min^{0.5}$) و همچنین شکل رابطه‌ی عامل مقیاس مربوط به زمان کوتاه (رابطه 8) نسبت به رابطه‌ی زمان طولانی (رابطه 11) می‌باشد. مقدار t_b از 0/7 دقیقه At-2 تا 929 دقیقه در R-15 متغیر بوده که نشان‌دهنده‌ی تغییرات زیاد این پارامتر در خاک‌های مختلف می‌باشد.

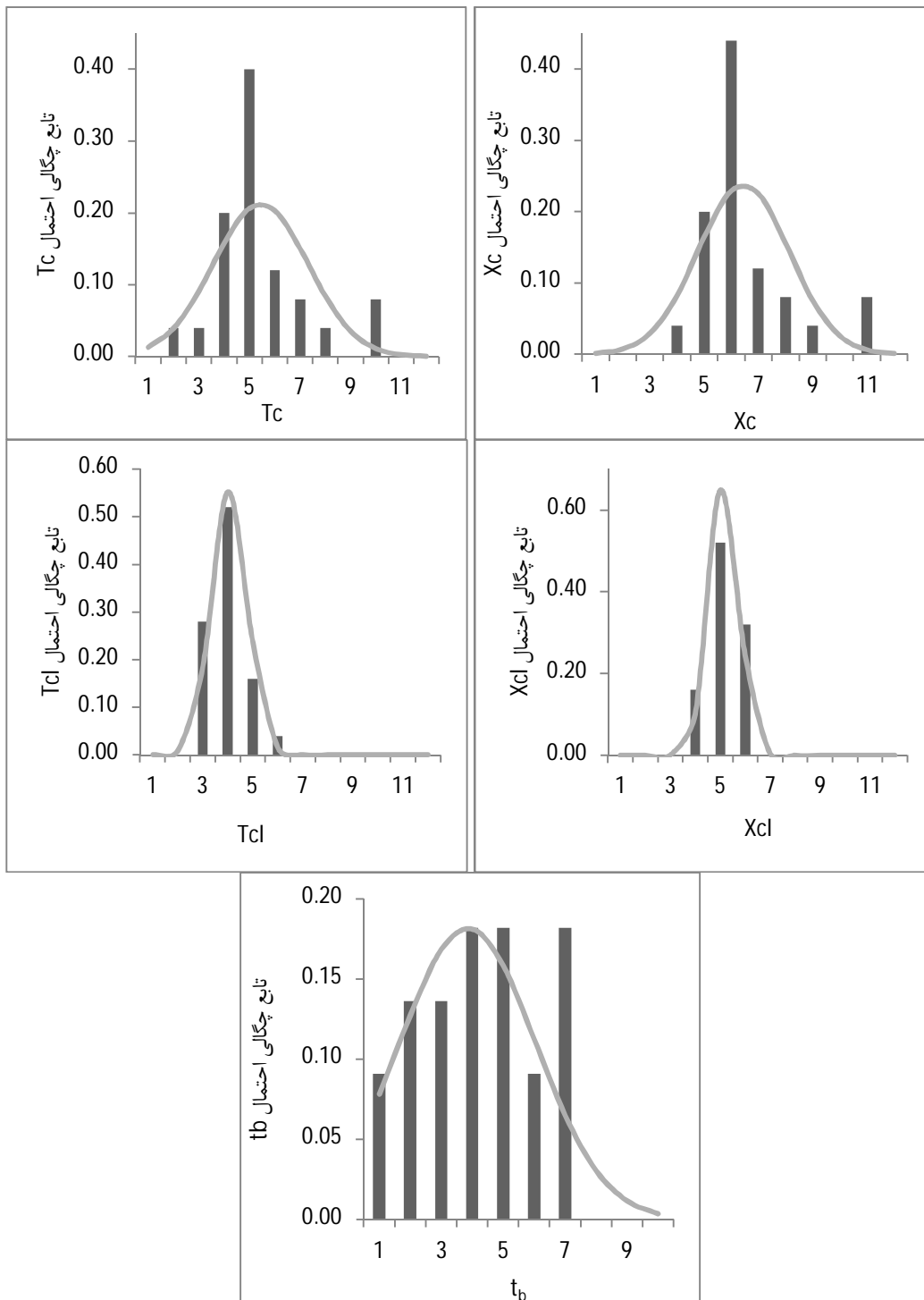
بر اساس جدول 2 محدوده‌ی تغییرات عوامل مقیاس برای زمان کوتاه از T_c از 16/4 تا 42863/7 و X_c از 112/8 تا 85930/1 (بیش‌تر از زمان طولانی T_{cl} از 24/7 تا 426/4 و X_{cl} از 106/6 تا 826/3) می‌باشد که به دلیل کم‌تر بودن دامنه‌ی تغییرات نفوذ نهایی (از 0/000092 تا 0/001012 m/min) در خاک‌ها نسبت به مقدار

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

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 نسبت‌ایکسان پیروی می‌کند.

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)

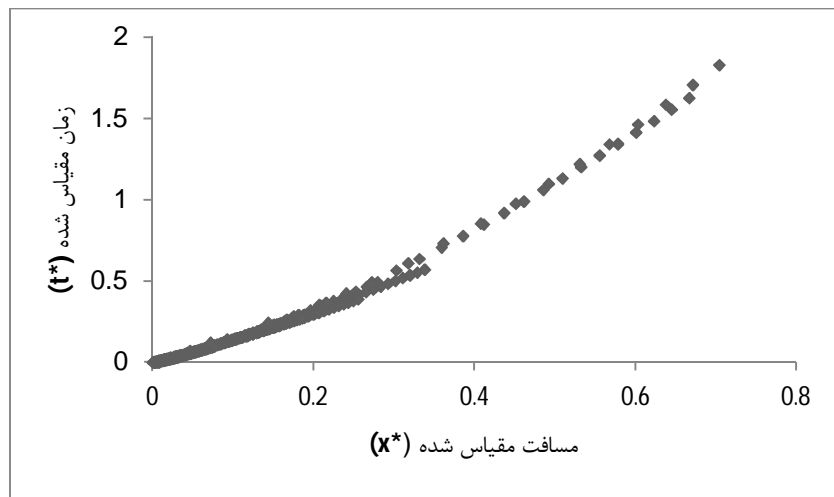


شکل 2- فراوانی عوامل مقیاس t_b مشاهده شده (نمودار ستونی) و محاسبه شده با تابع لوگ-نرمال (نمودار منحنی) برای دو زمان طولانی و کوتاه

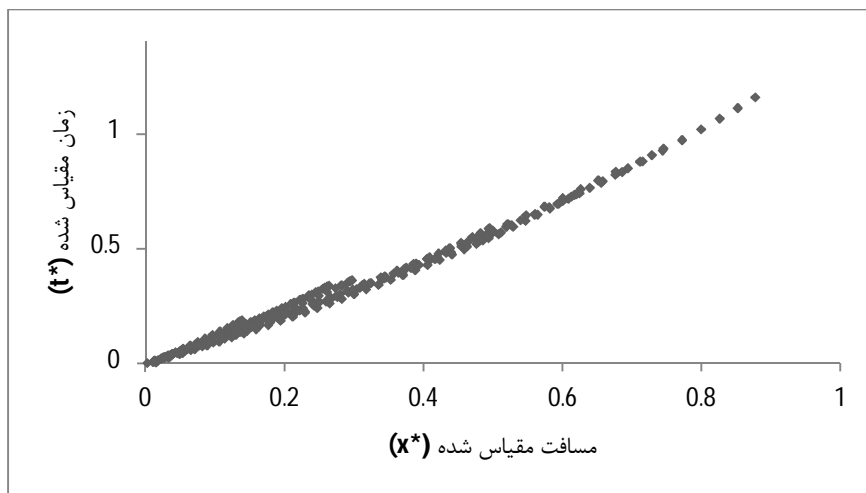
یکدیگر متفاوت می‌باشند. برای بدست آوردن منحنی پیش‌روی در حالت مقیاس شده‌ها زمان شاخه‌ای شدن (t_b^*) از منحنی زمان کوتاه (شکل 3) استفاده گردیده و برای مقادیر بزرگ‌تر از t_b^* در ادامه منحنی زمان کوتاه از منحنی شکل 4 استفاده می‌گردد. شایان ذکر است که مقدار زمان شاخه‌ای (t_b^*) شدن با توجه به نوع خاک (رابطه-های 2 و 5) تغییر کرده و در روی شکل 3 بالا و پایین می‌رود. منحنی‌های پیش‌روی مقیاس شده برای هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی به ترتیب در شکل 3 و 4 به رابطه‌ای مشخص میل می‌کند، در نتیجه عوامل مقیاس به شکل مناسبی تعریف گردیده و نشان‌دهنده‌ی موفقیت مقیاس‌سازی در فرآیند پیش‌روی آب در نوار می‌باشد.

نتایج نشان داد که عوامل زمان (کوتاه و طولانی)، مکان (کوتاه و طولانی) و t_b از توزیع لوگ-نرمال پیروی می‌کند. 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 (Warrick et al., 1977; Kosugi and Hopmans., 1998 و قهرمان و همکاران 1387) نشان از لوگ-نرمال بودن توزیع عوامل مقیاس در این توابع دارد.

شکل 3 و 4 حالت مقیاس شده شکل 1 را به ترتیب برای زمان‌های کوتاه و طولانی (زمان بعد از t_b^*) نشان می‌دهد. از آنجا که عوامل مقیاس مربوط به هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی متفاوت بوده در نتیجه نمودارهای مربوط به هر یک از زمان‌های کوتاه و طولانی با



شکل 3- منحنی پیش‌روی مقیاس شده برای زمان کوتاه



شکل 4- منحنی پیش‌روی مقیاس شده برای زمان بعد از t_b^* (زمان طولانی)

رابطه کلی پیش‌روی

به هر یک از نمودارهای مقیاس شده زمان کوتاه و طولانی در شکل‌های 3 و 4، رابطه‌های (14، 15 و 16) برازش داده می‌شود. نتایج مربوط به برازش برای زمان کوتاه و زمان طولانی در جدول 3 موجود

می‌باشد که در سطح 1 درصد معنی‌دار هستند. با استفاده از رابطه‌های (17 تا 22)، رابطه‌های مقیاس شده‌ی جدول 3 برای هر نوار از حالت مقیاس خارج می‌گردند. پس از خارج شدن از حالت مقیاس رابطه‌های جدول 3، اقدام به ارزیابی رابطه‌ها می‌گردد.

جدول 3- ضرایب $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ معادلات پیش‌روی حاصل از برازش با استفاده از شکل 3 و 4

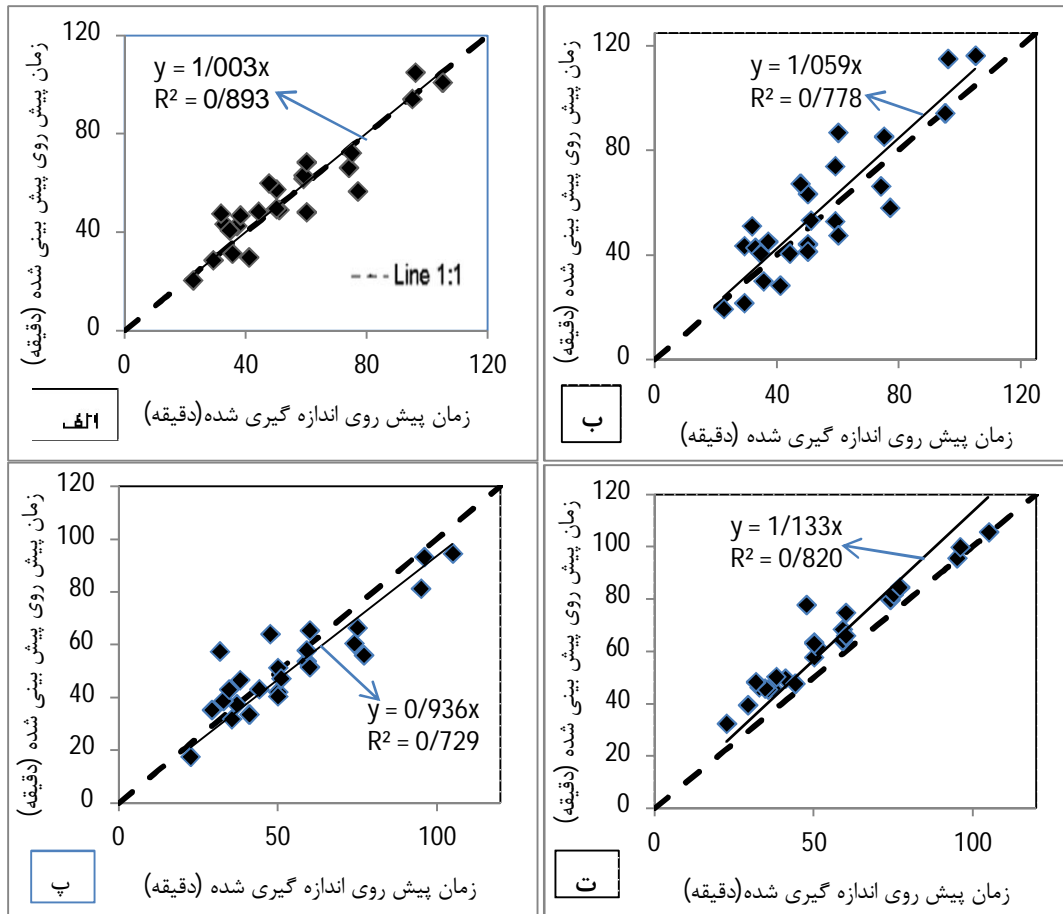
ضرایب		رابطه پیش‌روی زمان	
$A_1 = 4.022$	$A_2 = 1.464$	کوتاه	
$A_1 = 1.412$	$A_2 = 1.13$	طولانی	توانی
$B_1 = 2.057$	$B_2 = 0.491$	کوتاه	
$B_1 = 0.758$	$B_2 = 0.741$	طولانی	SCS
$C_1 = 2.44$	$C_2 = 1.27$	کوتاه	
$C_1 = 1.051$	$C_2 = 0.655$	طولانی	سهمی

و به 1 نزدیک می‌شود. بزرگ‌تر از یک بودن مقدار λ (توزیع نسبت به خط 45 درجه) برای رابطه‌های توانی و SCS حاکی از بیش‌برآورد پیش‌روی پیش‌بینی شده با این رابطه‌ها نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده و کم‌تر از یک بودن مقدار λ برای رابطه سهمی حاکی از کم‌برآورد پیش‌روی پیش‌بینی شده با این رابطه نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده بوده که به دلیل شکل رابطه‌های مورد استفاده شده می‌باشد. از آنجا که از نظر فیزیکی رابطه توانی (رابطه 17) حالت بین رابطه‌های نمایی (رابطه 18) و سهمی (رابطه 19) می‌باشد در نتیجه به طور کلی رابطه سهمی کم‌ترین برآورد را داشته و رابطه نمایی بیش‌ترین برآورد را بین سه رابطه دارد. اسمردون و همکاران (Smerdon et al., 1988) نیز با استفاده از رابطه‌ی بیلان حجمی و به کار بردن رابطه‌های توانی و SCS برای مسیر پیش‌روی، آبیاری نواری را مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که دقت استفاده از روش توانی کمی بیش‌تر از دقت استفاده از رابطه SCS در آبیاری نواری می‌باشد. به طور کلی جدول 4 و شکل 5 نشان می‌دهد که هر سه رابطه به دست آمده با مقیاس‌سازی با دقت قابل قبولی می‌تواند منحنی پیش‌روی آب در نوار را پیش‌بینی کند.

نتایج مربوط به ارزیابی زمان‌پیش‌روی مشاهده شده (زمان رسیدن آب به انتهای نوار) و زمان پیش‌روی پیش‌بینی شده با استفاده از مقیاس‌سازی برای 25 نوار آبیاری (داده‌های جدول 1) مورد بررسی در جدول 4 و مقایسه‌ی زمان پیش‌روی مشاهده شده و زمان پیش‌روی پیش‌بینی شده را نسبت به خط یک به یک به ترتیب برای رابطه توانی، SCS، سهمی و شپرد و همکاران (Shepard et al., 1993) در شکل 5 موجود است. نتایج جدول 4 و شکل‌های 5 نشان می‌دهد که رابطه‌ی توانی (رابطه‌ی 17) با $\lambda = 1/003$ مقدار خطای کم‌تر ($E_r = 0/3$) و $E_a = 13/76$ و ضریب تبیین بالاتر ($R^2 = 0.893$) بهتر از رابطه‌های SCS (رابطه‌ی 18)، سهمی (رابطه‌ی 19) و رابطه شپرد (رابطه‌ی 23) است. پیش‌روی آبیاری نواری را شبیه‌سازی کرده‌است. دقت رابطه‌های SCS و سهمی با اختلاف کمی نزدیک به یکدیگر بوده است. شکل (5) نشان می‌دهد که دقت روش بیلان حجمی شپرد برای نوارهایی که مدت زمان پیش‌روی آن‌ها کوتاه می‌باشد کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش زمان دقت رابطه‌ی بیلان حجمی شپرد نیز افزایش می‌یابد زیرا هراندازه‌زمان کم‌تر یا طول نوار کوتاه‌تر باشد سرعت پیش‌روی آب روی سطح خاک اغلب خطی می‌شود در نتیجه مقدار توان رابطه‌ی پیش‌روی شپرد ($x = pt^{0.5}$) از 0/5 فاصله گرفته

جدول 4- نتایج ارزیابی آماری پیش‌روی آبیاری برای رابطه‌های مختلف (رابطه‌های 17، 18 و 19)

نوع رابطه	λ	E_r (%)	R^2	E_a (%)
توانی	1/003	0/3	0/893	13/76
نمایی	1/059	5/9	0/778	22/26
سهمی	0/936	6/4	0/729	16/72
شپرد	1/133	13/3	0/820	22/56



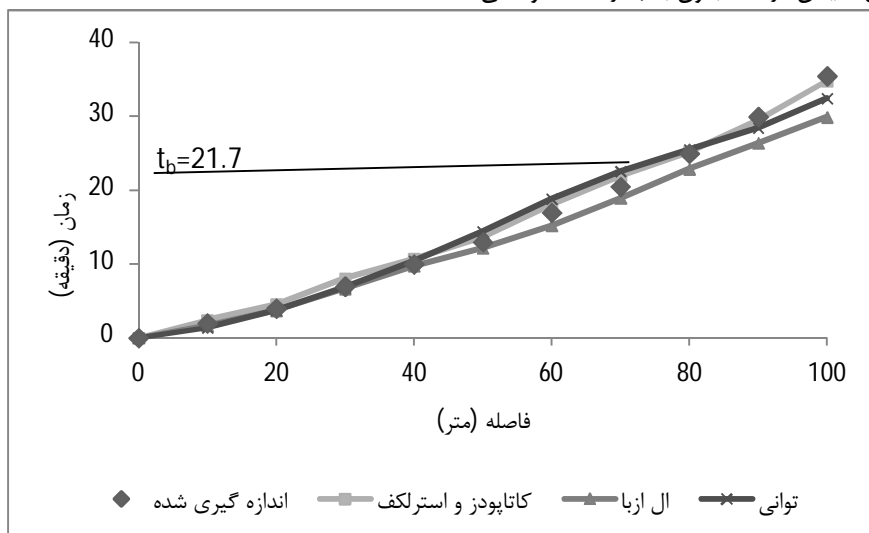
شکل 5- مقایسه زمان پیش‌روی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، الف: رابطه‌ی توانی، ب: رابطه‌ی SCS، پ: رابطه‌ی سهمی و ت: رابطه‌ی شپرد

شده باشد از میان‌یابی برای بدست آوردن منحنی پیش‌روی استفاده می‌گردد. شکل‌های 6 و 7 به ترتیب منحنی پیش‌روی آب در نوار R-4 و R-10 را با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با استفاده از مدل توانی، روش کاتاپودز و استرلکف (Katopodes and Strelkoff., 1977) و ال‌ازبا (Alazba., 1999) را نشان می‌دهد. شکل 6 نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی منحنی پیش‌روی نوار R-4 برای هر سه روش نزدیک به نتایج اندازه‌گیری می‌باشد. از آنجا که در روش کاتاپودز - استرلکف از مدل اینرسی صفر استفاده گردیده دقت آن کمی بهتر از دو روش دیگر بوده و روش توانی به دلیل استفاده از مدل موج سینماتیک کمی بهتر از روش ال‌ازبا (استفاده از مدل بیلان حجمی هارت) می‌باشد. در شکل 7 با افزایش فاصله از ابتدای نوار دقت روش کاتاپودز - استرلکف و ال‌ازبا کاهش یافته است. مقدار توان رابطه کوستیاکف برای خاک‌های نوار R-10 برابر با 0/35 می‌باشد و این مقدار در نمودارهای مقیاس‌شده ارایه گردیده موجود نمی‌باشد در نتیجه برای بدست آوردن منحنی پیش‌روی در این شرایط از میان‌یابی استفاده گردیده که با مقداری خطا همراه است. مقدار عامل مقیاس زمان (برحسب دقیقه) و مکان (برحسب متر) نوار

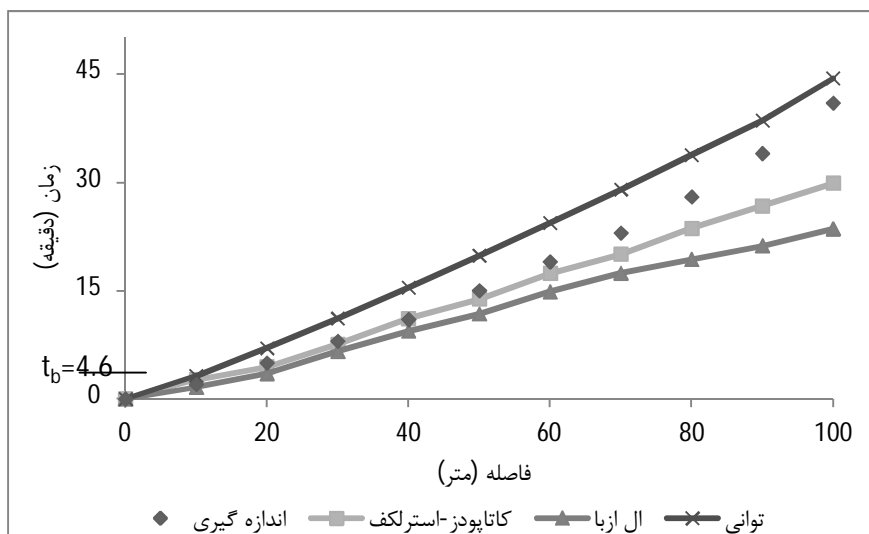
در پژوهش کاتاپودز و استرلکف (Katopodes and Strelkoff., 1977) منحنی پیش‌روی آب در نوار برای مقدار مشخصی از α (توان رابطه‌ی نفوذ کوستیاکف) شامل 0/1، 0/2، 0/3...0/9 با استفاده از حالت بدون بعد مدل اینرسی صفر رسم گردیده است. با داشتن پارامترهای ورودی شامل دبی، شیب، زبری و پارامترهای رابطه‌ی نفوذ کوستیاکف، پارامترهای مقیاس نوار مورد نظر را به دست آورده در نتیجه با استفاده از منحنی پیش‌روی بدون بعد رسم گردیده مسیر پیش‌روی بدست می‌آید. چنانچه مقدار α متفاوت از مقادیر بیان شده (0/1، 0/2، 0/3...0/9) باشد از میان‌یابی برای بدست آوردن منحنی پیش‌روی استفاده می‌گردد. در روش ال‌ازبا ابتدا با استفاده از شکل مقیاس شده رابطه‌ی بیلان حجمی (رابطه هارت) منحنی پیش‌روی مقیاس شده برای 14 رابطه‌ی شماره منحنی نفوذ 0/1، 0/2... تا 4 (که شامل بیش‌تر خاک‌ها می‌شود) ترسیم می‌گردد سپس رابطه‌ی نفوذ کوستیاکف هم‌ارز با رابطه‌ی شماره منحنی نفوذ 0/1، 0/2... تا 4 بدست می‌آید (Alazba., 1999). حال با داشتن منحنی کوستیاکف می‌توان منحنی پیش‌روی را به دست آورد. در این روش نیز مانند روش کاتاپودز و استرلکف چنانچه مقدار α متفاوت از مقادیر بیان

می‌شود به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد استفاده از رابطه‌های بدست آمده در این پژوهش به دلیل شکل ساده‌ی آن‌ها، دارا بودن دقت مدل موج سینماتیکو عدم نیاز به میان‌یابی روی نمودار، نسبت به روش‌های گذشته مناسب‌تر می‌باشد.

R-10 برای روش کاتاپودز- استرلکف و ال‌ازبا به ترتیب برابر با $X_c=1266.9$ ، $T_c=235.7$ و $X_c=1917.5$ ، $T_c=446.1$ می‌باشد و از آنجا که مقدار این عوامل نسبتاً بزرگ می‌باشد خطای کوچک در محاسبات و میان‌یابی در روی نمودار مقیاس شده سبب ایجاد خطای بزرگ (بدلیل ضرب عامل مقیاس در عدد بدون بعد) در حالت واقعی



شکل 6- مسیر پیش‌روی آب در نوار R-4 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، پیش‌بینی شده با مدل‌های کاتاپودز و استرلکف، ال‌ازبا و توانی



شکل 7- مسیر پیش‌روی آب در نوار R-10 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، پیش‌بینی شده با مدل‌های کاتاپودز و استرلکف، ال‌ازبا و توانی

نوارهای کشت نشده برابر با $7/8$ و برای نوارهای کشت شده برابر $18/4$ می‌باشد. اگرچه نتایج نشان می‌دهد که دقت رابطه‌ی توانی در پیش‌بینی زمان پیش‌روی برای نوارهای کشت نشده و کشت شده نسبتاً مناسب می‌باشند ولی دقت رابطه‌ی توانی در خاک‌های کشت نشده بیش‌تر از خاک‌های کشت شده می‌باشد. به عنوان مثال شکل 9 متحنی پیش‌روی آب با استفاده از مدل توانی برای نوار کشت شده‌ی $At-2$ را نشان می‌دهد. در نوار $At-2$ مقدار t_b برابر با $0/74$ دقیقه

حساسیت مقیاس‌سازی نسبت به عوامل تاثیرگذار

تاثیر نوع خاک (k_0 و f_0 وضعیت کشت) در رابطه پیش‌روی

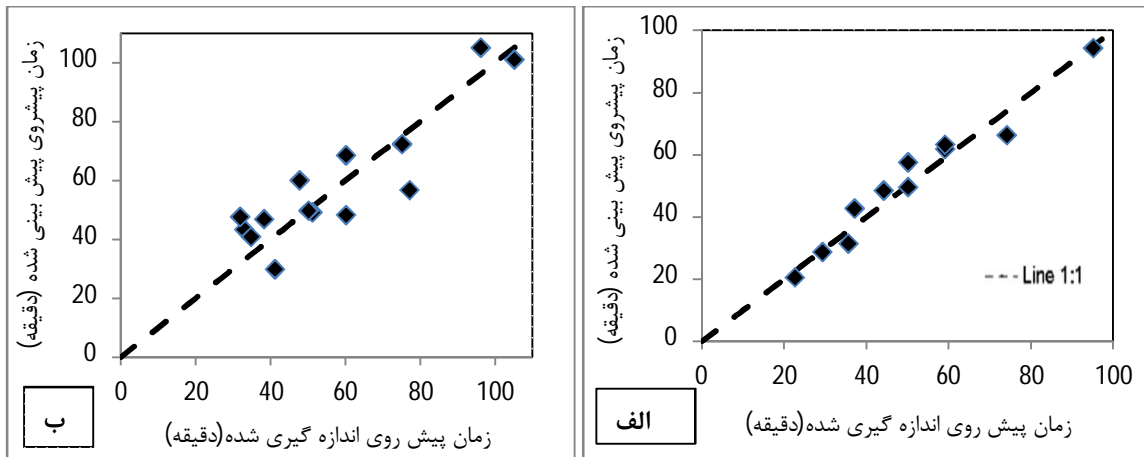
شکل 8 مقایسه‌ی زمان پیش‌روی مشاهده شده و زمان پیش‌روی پیش‌بینی شده با رابطه‌ی توانی نسبت به خط یک به یک برای نوارهای کشت نشده (الف) و کشت شده (ب) نشان می‌دهد. میانگین درصد مطلق خطا $\left(\left| \frac{\text{محاسبه شده} - \text{مشاهده شده}}{\text{مشاهده شده}} \right| \times 100 \right)$ برای زمان پیش‌روی در

های کشت شده‌ی At-1، At-2، At-3، At-4، و At-5 در نظر گرفته نشود مقدار میانگین درصد مطلق خطا برابر 9/3 که نزدیک به مقدار خطای نوارهای کشت نشده (7/8) می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نوع خاک و وضعیت کشت تاثیر زیادی بر روی نتایج نداشته و نتایج مدل توانی برای بیش‌تروضعیت‌های خاکمعتبر می‌باشد.

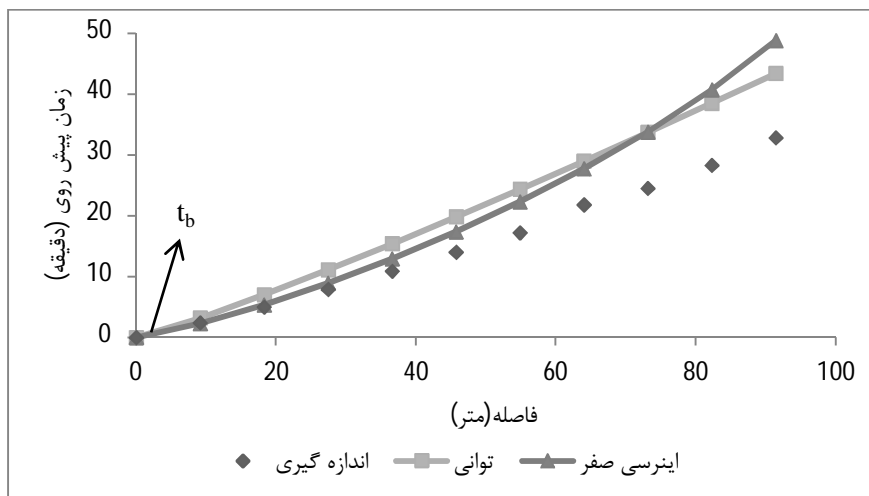
ارزیابی رابطه‌ی موج سینماتیک

جدول 5 مقادیر پارامترهای بدون بعد فرود و K (رابطه‌ی 27) را برای 25 نوار مورد ارزیابی نشان می‌دهد. براساس جدول 5 در بیش‌تر داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، مقدار عدد فرود کوچک ($F_0 \leq 0.30$) و مقدار $K \geq 2$ می‌باشد در نتیجه دقت مدل موج سینماتیک نزدیک به مدل هیدرودینامیک کامل (دقیق‌ترین روش حل رابطه‌ی سنت-ونانت) می‌شود.

می‌باشد ($f_0 = 0.001012 \text{ m/min}$ و $S=0.001742 \text{ m/min}^{0.5}$) در نتیجه تقریباً از همان ابتدا، مسیر پیش‌روی با استفاده از رابطه‌ی زمان طولانی بدست آمده است. همچنین منحنی پیش‌روی آب در نوار با استفاده از مدل اینرسی صفر (با استفاده از نرم افزار WinSRFR 4.1) و استفاده از رابطه‌ی نفوذ کوستیاکف-لویس (پارامترهای رابطه کوستیاکف-لویس ($k=0.0051 \text{ m/min}^{0.5}$, $\alpha = 0.136$) و $f_0 = 0.00064 \text{ m/min}$) با استفاده از نرم افزار InfiltrV5 (McClymont and Smith., 1996) بدست آمد) برای بخش نفوذ در شکل 8 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که منحنی‌های پیش‌روی بدست آمده با استفاده از مدل اینرسی صفر و مدل توانی نزدیک به یکدیگر بوده و مدل اینرسی صفر نیز مانند مدل توانی نتوانسته به شکل مناسبی منحنی پیش‌روی آب در نوار At-2 را نشان دهد. دلیل آن ممکن است ناهمگنی در خاک‌ها یا عدم توانی مدل‌های ریاضی موجود در بیان مقدار نفوذ در این خاک‌ها باشد. چنانچه نوار-



شکل 8- مقایسه زمان پیش‌روی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با رابطه توانی برای نوارهای کشت نشده (الف) و کشت شده (ب)



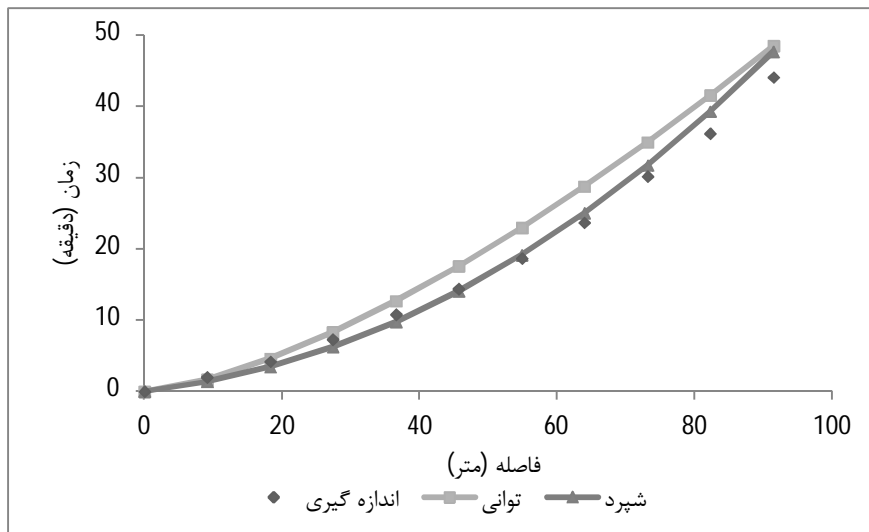
شکل 9- مسیر پیش‌روی آبدر نوار At-2 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده

است. همان گونه که از مقادیر F_0 (برابر با 0/3)، P (برابر با 1/84) و S_0 (0/001) برای نوار 8-roth مشخص بود، دقت رابطه توانی در پیش-بینی منحنی پیش‌روی کاهش یافته و رابطه‌ی شپرد با دقت بیش‌تری پیش‌بینی را انجام داده است. همچنین بر اساس تحقیقات کاتا‌پودز و استرلکف هرچه شیب نوار بیش‌تر و عدد فرود کم‌تر باشد، نتایج مدل موج سینماتیک به نتایج مدل هیدرودینامیک کامل نزدیک‌تر می‌شود (Katopodes and Strelkoff., 1977). به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در بیش‌تر موارد آبیاری نواری با توجه به سرعت کم جریان و کوچک بودن عدد فرود می‌توان از روش ارایه گردیده استفاده کرد.

رم و سینگ نیز با به کار بردن پارامتر K (رابطه‌ی 27) و استفاده از رابطه‌ی نفوذ کوستیاکف برای بخش نفوذ، مدل موج سینماتیک را برای نوارهای $(R_j, j=1,2,\dots,9)$ و $(R_j, j=10,11,\dots,18)$ -Roth 8 مورد ارزیابی قرار دادند (Ram and singh., 1985). نتایج آن‌ها نیز برای نوارهای ذکر شده نزدیک به نتایج جدول 5 می‌باشد. در تعدادی از نوارها معیارهای ارزیابی متقاعد کننده نمی‌باشد. برای مثال شکل 10 مسیر پیش‌روی آب با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، پیش‌بینی شده با رابطه‌های توانی و شپرد را برای نوار 8-roth نشان می‌دهد. از آنجا که مقدار t_b برابر با 879/6 دقیقه می‌باشد تنها از رابطه‌ی توانی زمان کوتاه (جدول 3) برای اندازه‌گیری پیش‌روی آب در نوار استفاده شده

جدول 5- پارامترهای ارزیابی مدل موج سینماتیک

نام نوار	F_0	K (زمان کوتاه)	K (زمان طولانی)
R-1	0/21	40/20	30/14
R-2	0/18	19/43	59/61
R-3	0/23	12/69	177/43
R-4	0/13	11/86	20/11
R-5	0/11	9/21	38/78
R-6	0/10	13/01	31/23
R-7	0/08	3/69	3/99
R-8	0/08	3/06	8/44
R-9	0/08	2/39	19/50
R-10	0/11	40/20	20/74
R-11	0/10	18/19	39/46
R-12	0/08	20/33	54/54
R-13	0/09	9/37	13/26
R-14	0/07	25/61	9/88
R-15	0/05	7/49	65/35
R-16	0/05	2/37	13/26
R-17	0/05	5/59	4/02
R-18	0/05	3/07	13/22
At-17	0/10	9/46	12/22
At-1	0/03	257/66	1/69
At-2	0/06	50/76	2/86
At-3	0/06	42/77	4/34
At-4	0/06	414/88	2/06
At-5	0/07	48/78	5/35
K-1	0/12	5/80	3/84
K-2	0/03	8/19	0/39
K-5	0/04	19/48	3/17
Roth-8	0/30	1/84	53/98



شکل 10- مسیر پیش‌روی آب در نوار Roth-8 با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، پیش‌بینی شده با رابطه‌های توانی و شپرد

نتیجه‌گیری

برخلاف پژوهش‌های قبلی مقیاس‌سازی پیش‌روی آب در آبیاری سطحی مانند کاتاپودز و استرالکف (Katopodes and Strelkoff., 1977)، ایلپوت و همکاران (Elliott et al., 1983)، بیتایو و فنگمیر (Yitayew and Fangemeier., 1984)، استرالکف و کلیمنز (Strelkoff and Clemmens., 1994) و ال‌ابزا (Alazba., 1999) که گرافیکی و وابسته به نوع خاک می‌باشند، در این پژوهش روشی بر اساس مقیاس‌سازی و استفاده از رابطه‌ی نفوذ شاخه‌ای فیلیپ برای مولفه‌ی نفوذ جهت پیشرفت آب در نوار ارایه و مشکلات ناشی از حل گرافیکی و وابستگی به نوع خاک مرتفع گردید. بر پایه‌ی روش پیشنهادی رابطه‌های توانی، نمایی و سهمی (درجه 2) جهت تعیین منحنی مقیاس شده‌ی پیش‌روی آب در نوار ارایه گردید. روش پیشنهاد شده برای 25 نوار شامل نوارهای کشت نشده و نوارهای کشت شده با نتایج رابطه‌ی بیلان حجمی مورد مقایسه قرار گرفت. عوامل مقیاس زمان و مکان در هر دو حالت زمان کوتاه و طولانی از تابع لوگ-نرمال پیروی می‌کردند. نتایج نشان داد که رابطه‌های به دست آمده از روش مقیاس‌سازی، به خصوص رابطه‌ی توانی، با دقت قابل قبولی منحنی پیش‌روی آب در نوار را بیان می‌کند. نتایج روش پیشنهادی و روش کاتاپودز و استرالکف (Katopodes and Strelkoff., 1977) نزدیک به یکدیگر بوده و مشکل حل گرافیکی و وابستگی به خاک‌روش کاتاپودز و استرالکف (Katopodes and Strelkoff., 1977) را بهبود بخشیده است. در مقایسه با روش ال‌ابزا (Alazba., 1999) که با استفاده از مدل بیلان حجمی و برای 14 رابطه‌ی نفوذ مختلف رسم گردیده بود نیز نتایج پیش‌بینی منحنی پیش‌روی آب در روش توانی بهتر بوده و هم مشکل حل گرافیکی و وابستگی به خاک مرتفع گردیده است. نتایج نشان داد وضعیت کشت

تاثیر زیادی روی نتایج نداشته و رابطه‌ی بدست آمده با استفاده از مقیاس‌سازی برای هر دو حالت کشت شده و کشت نشده معتبر می‌باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش پیشنهادی به جز مواردی که محدودیت‌هایی برای استفاده از مدل موج سینماتیک وجود دارد در سایر موارد قابل استفاده بوده و باعث سادگی و کاهش محاسبات در فرآیند پیش‌روی آب در نوار می‌گردد.

منابع

- صادقی، م.، قهرمان، ب.، داوری، ک. 1387. مقیاس‌سازی و پیش‌بینی نیم‌رخ رطوبت خاک در فاز توزیع مجدد. مجله آب و خاک. 22: 417-431.
- قهرمان، ب.، صادقی، م.، داوری، ک.، گهردوست منفرد، م. 1390. مقیاس‌بندی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های غیر متشابه. مجله پژوهش آب ایران. 9: 113-120.
- مهرابی، ف.، سپاسخواه، ع. 1392. مقیاس‌بندی و بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های نفوذ در خاک در مقیاس حوزه آبریز (مطالعه موردی: دشت باجگاه). 14: 13-32.
- Alazba, A.A. 1999. Dimensionless advance curves for infiltration families. Agriculture Water Management. 41: 115-131.
- Atchison, K.T. 1973. Retragance coefficient and other data for a vegetated irrigation border. Unpublished M.S 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.

- 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.
- Oyonarte, N.A., Mateos, L., Palomo, M.J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 128.1: 26-33.
- 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. M.S. 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.
- Ram, R.S., Singh, V.P. 1985. Application of kinematic wave equations to border irrigation design. *Journal Agricultural Engineering Research*. 32: 57-71.
- Rasoulzadeh, A., 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., 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., Hashemina, S.M., Reichardt, K. 2011. Scaling to generalize a single solution of Richards equation for soil water redistribution. *Science Agricultural*. 68: 582-591.
- Sadeghi, M., Jones, S.B. 2012. Scaled Solutions to Coupled Soil-Water Flow and Solute Transport during the Redistribution Process. *Vadose Zone Journal*. 11(4).
- Sharma, M.L., Gander, G.A., Hunt, C.G. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *Journal of Hydrology*. 45: 122-101.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W., Hopmans, J.W. 1993. One method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*. 36.2: 395-404.
- Simmons, C.S., Nielsen, D.R., Biggar, J.W. 1979. Scaling
- Bautista, E., Strelkoff, T., Clemmens, A.J. 2012. Improved Surface Volume Estimates for Surface Irrigation Volume-Balance Calculations. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 138: 715-726.
- Childs, J.L., Wallender, W and Hopmans, J.W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow irrigation. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 119.1: 74-90.
- Clemmens, A.J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agriculture Water Management*. 3: 251-267.
- 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. *Transaction ASAE*. 26.6: 1725-1731.
- Esfandiari, M., Maheshwari, B.L. 2001. Field evaluation of furrow irrigation models. *Journal Agriculture Engineering Research*. 79.4: 459-479.
- Gillies, M.H., Smith, R.J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science*. 24.1: 25-35.
- Hillel, D., Elrick, D.E. 1990. Scaling in soil physics: principles and application. *Soil Science Society of America Special Publication Number 25*, Madison, Wisconsin, USA.
- Jaynes, D.B., Clemmens, A.J. 1986. Accounting for spatially variable infiltration in border irrigation models. *Water Resource Research*. 22.8: 1257-1262.
- Katopodes, N.D., Strelkoff, T. 1977. Dimensionless Solutions of Border Irrigation Advance. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. ASCE 103.4: 401-417.
- Khatri, K.L., 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., 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., 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., 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., Smith, R.J. 1996. Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science* 17.1: 15-22.

- Valiantzas, J.D., Aggelides, S., Sasselou, A. 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agriculture Water Management*. 52:17-32
- Vogel, T., Cislerova, M., Hopmans, J.W. 1991. Porous media with linearly hydraulic properties. *Water Resource Research*. 27.10: 2735-2741.
- Walker, W.R., Humpherys, A.S. 1983. Kinematic-Wave Furrow Irrigation Model. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 109(1R4):377-392.
- Warrick, A.W., Mullen, G.J., 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., Hussen, A.A. 1993. Scaling of Richards' equation for infiltration and drainage. *Soil Science Society of America Journal*. 57: 15-18.
- Warrick, A.W., 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.
- Woolhiser, D.A., Liggett, J.A. 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane-the rising hydrograph. *Water Resource Research*. 3.3: 753-771.
- Yitayew, M., Fangemeier, D.D. 1984. Dimensionless runoff curves for irrigation borders. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 110: 179-191.
- of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*. 47.4:77-174.
- Smerdon, E.T., Blair, A.W., Reddell, D.L. 1988. Infiltration from irrigation advance. I: experimental. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 114:18-30.
- Strelkoff, T., Clemmens, A.J. 1981. Dimensionless Stream Advance in Sloping Borders. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 107.4: 361-382.
- Strelkoff, T., Clemmens, A.J. 1994. Dimensional analysis in surface irrigation. *Irrigation Science*. 15.2-3: 57-82
- Strelkoff, T., Katopodes, N.D. 1977. Border Irrigation Hydraulics with Zero Inertia. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 103.3: 325-342.
- Strelkoff, T., Shatanawi, M.R. 1984. Normalized graphs of border irrigation performance. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 110: 359-374.
- Tuli, A., Kosugi, K., Hopmans, J.W. 2001. 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., Raghuvanshi, N.S. 1999. Semiempirical infiltration equation for furrow irrigation systems. *Journal Irrigation and Drainage Engineering ASCE*. 125.4: 173-178.

Providing General Equation for the Advance of the Water at the Border

M.M.chari¹, K. Davari^{*2}, B. Ghahraman³, A.N. ziaiei⁴

Recived: Mar.31, 2016

Accepted: Dec.21, 2016

Abstract

For evaluating border irrigation, it is needed to use advance data. Due to soil variability, 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 as a means to reduce measurement data on water and soil issues. The aim of this study is to provide a unique equation, independent of initial and boundary conditions, for evaluation of water advance in border through scaling approach. For this purpose border irrigation was solved under the kinematic wave model and Philips 2-term equation for the infiltration. Physically-based scaling factors were defined, attempted to scale the border irrigation for the advance trajectory. Scaling advance curves followed some certain quations, therefore, power, exponential, and parabolic equations were fitted for water advancing of trajectories. The equations obtained using the scaling and the volume balance equation were evaluated for 25 different borders. Four statistical indicators, i.e. coefficient of determination (R^2), distribution around line of perfect aggrement, percentage of model prediction error (E_r), and percentage of average relative error (E_a) were used. The results showed that the power model with $R^2 = 0.893$, $\lambda = 1.003$, $E_r = 0.9$ and $E_a = 13.76$ performed better than the other two models. In comparison with the volume balance equation, the power equation can be more accurate. Simple form and independent of the soil type equations presented are superior methods over previous researches in this field.

Key words: Border irrigation, Infiltration, Scaling

1- PhD Student, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

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@ferdowsi.um.ac.ir)