

توسعه رابطه برآورد نفوذ آب در خاک با استفاده از مقیاس سازی در آبیاری جویچه‌ای

علیرضا توکلی، حسین بابازاده*، فریبرز عباسی و حسین صدقی**

* نگارنده مسئول: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. ص. پ: ۷۷۵-۱۴۵۱۵، تلفن: ۴۴۸۶۵۴۷۴ (۰۲۱)،

پيام‌نگار: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

** به ترتیب: دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران؛ استاد پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ و استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۱۶

چکیده

تغییرات مکانی و زمانی نفوذ، مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی و به ویژه آبیاری جویچه‌ای را بر هزینه، زمان بر و پیچیده می‌سازد. در آبیاری جویچه‌ای، پارامترهای نفوذ برای دبی‌های ورودی متفاوت، شکل هندسی جویچه و مقدار آب خاک، متغیر هستند و از این رو ارائه رابطه‌ای کلی برای نفوذ دشوار است. یکی از روش‌های مناسب برای تعیین رابطه کلی نفوذ، استفاده از مقیاس سازی است. در این مقاله نشان داده شده که به کمک آنالیز ابعادی و با استفاده از داده‌های ۱۲ آزمایش آبیاری جویچه‌ای متفاوت که هر یک ۱۵ نوبت تکرار شده است، رابطه‌ای برای مقیاس سازی مشخصه‌های نفوذ آب در خاک به دست آمده است. مقادیر R^2 و $RMSE$ برای واسنجی رابطه پیشنهادی به ترتیب برابر $0/984$ و $0/199$ محاسبه شد. علاوه بر این، پس از راست آزمایی رابطه استخراجی، مقدار بالای ضریب R^2 ($>0/98$) و مقدار اندک آماره $RMSE$ ($<0/1$) نشان از دقت مناسب مدل دارد. مقایسه این رابطه با روابط ارائه شده در پژوهش‌های گذشته، به دو دلیل برتری رابطه حاضر را نشان می‌دهد: (۱) نیاز به داده‌های ورودی کم‌تر (دبی ورودی، عمق آب در جویچه، زمان آبیاری و زمان پیشروی)، و (۲) اندازه‌گیری آسان‌تر داده‌های ورودی.

واژه کلیدی

آبیاری سطحی، آنالیز ابعادی، رابطه نفوذ کوستیاکوف- لوئیس

مقدمه

راندمان‌های بالا در آبیاری سطحی دور از انتظار نخواهد بود (Smith et al., 2005). تکنیک‌های جدیدی مثل آبیاری جویچه‌ای یک در میان باعث کاهش نفوذ عمقی، افزایش راندمان و بهره‌وری آب آبیاری می‌شود (Sepaskhah & Kamgar-Haghighi, 1997). نفوذ آب در خاک در آبیاری جویچه‌ای فرایندی پیچیده و وابسته به چندین پارامتر است از جمله: هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، ضریب زبری خاک و مشخصات هندسی جویچه که

آبیاری سطحی به دلیل هزینه پایین‌تر و مصرف انرژی کمتر، در مقایسه با آبیاری تحت فشار رایج‌تر و روش آبیاری غالب در سطح جهان است (Vico & Porporato, 2011). آبیاری جویچه‌ای رایج‌ترین روش آبیاری سطحی است و توانایی بهتری در مدیریت آب در مزرعه دارد (Walker, 2003). با مدیریت صحیح آبیاری و در نظر گرفتن تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات خاک،

پیشنهاد شده است (Elliott & Walker, 1982; Elliott *et al.*, 1983; Hopmans, 1989; Scaloppi *et al.*, 1995) شکل کلی این رابطه به صورت زیر است:

$$Z = kt^a + f_0t \quad (1)$$

که در آن،

Z = نفوذ تجمعی (مترمکعب بر متر)؛ t = فرصت نفوذ (دقیقه)؛ a ، k = ضرایب تجربی؛ f_0 = سرعت نفوذ نهایی (مترمکعب بر متر بر دقیقه) است.

مقیاس‌سازی یکی از روش‌های تعیین پارامترهای نفوذ آب در خاک است که امروزه بسیار از آن استفاده می‌شود. مفهوم مقیاس‌سازی را اولین بار میلر و میلر (Miller & Miller, 1956) با تئوری محیط‌های متشابه مطرح کردند. از مقیاس‌سازی برای مشخص کردن تغییرات مکانی خصوصیات هیدرولیکی خاک به طور گسترده استفاده شده است (Nielsen *et al.*, 1998; Warrick, 1998; Sposito, 2008). یانگز و پرایس (Youngs & Price, 1981) نفوذ عمودی یک بعدی را برای خاک‌های مختلف با شکل و اندازه متفاوت، مقیاس‌سازی کردند. واریک و همکاران (Warrick *et al.*, 1985) حل نیمه تحلیلی رابطه فیلیپ را برای نفوذ یک بعدی با مقیاس‌سازی، تعمیم دادند. واریک و حسین (Warrick & Hussen, 1993) از تکنیک‌های مقیاس‌سازی برای حل رابطه نفوذ ریچاردز (Richards, 1931) استفاده کردند.

در مطالعات اخیر، روش‌هایی جدید برای کاهش داده‌های مورد نیاز به منظور تخمین مشخصه‌های نفوذ آب در خاک پیشنهاد شده است. رسول‌زاده و سپاسخواه (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003) برای یافتن یک رابطه کلی، از هشت رابطه مختلف نفوذ برای شش سری نمونه خاک به کمک آنالیز ابعادی و مقیاس‌سازی استفاده

محاسبه آنها در مزرعه اگر نه مشکل ولی زمان‌بر است. از سوی دیگر، مشخصه‌های نفوذ آب در خاک بر عملکرد آبیاری سطحی بسیار تأثیرگذار هستند (McClymont, & Smith, 1996; Oyonarte *et al.*, 2002) اساسی در طراحی سیستم‌های آبیاری به شمار می‌آیند (Machiwal *et al.*, 2006). تغییرات مکانی و زمانی نفوذ، مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی را دشوار می‌سازد (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003; Khatri & Smith, 2006). همچنین، ممکن است پارامترهای نفوذ برای دبی‌های مختلف و مقدار رطوبت اولیه خاک، تغییر کند. تنظیم دبی ورودی به جویچه و زمان قطع جریان، به بهینه‌سازی عملکرد آبیاری نسبت به تغییرات نفوذ آب در خاک منجر می‌شود (Gillies & Smith, 2005). دبی ورودی به جویچه نیز با تغییر دادن دو پارامتر عمق آب در جویچه و محیط خیس شده، بر نفوذ تأثیرگذار است (Enciso-Medina *et al.*, 1998).

اهمیت فرایند نفوذ منجر به توسعه چندین مدل تحلیلی ساده برای پیش‌بینی نفوذ شده است. این مدل‌ها به مدل‌های تجربی (Kostiakov, 1932; Horton, 1941; Holtan, 1961) فیزیکی (Green & Ampt, 1911; Philip, 1957) تقسیم‌بندی می‌شوند. تنها تعداد کمی از مدل‌های پیشنهادی با موفقیت روی داده‌های مزرعه‌ای به کار برده شده‌اند (Machiwal *et al.*, 2006). پرچمی عراقی و همکاران (Parchami Araghi *et al.*, 2010) گزارش کردند که در مقایسه با سایر مدل‌های نفوذ (کوستیاکف، هورتون و فیلیپ)، مدل کوستیاکف-لویس بهترین و مناسب‌ترین مدل برای بیان فرایند نفوذ آب در خاک در آبیاری جویچه‌ای است. در بسیاری از تحقیقات از رابطه کوستیاکف-لویس برای اندازه‌گیری نفوذ آب در خاک استفاده و روش‌هایی نیز برای تعیین پارامترهای آن

بررسی منابع فوق نشان دهنده آن است که روابط و مدل‌هایی که تاکنون برای برآورد نفوذ آب در خاک به دست آمده‌اند یا دقت کافی ندارند یا نیاز به داده‌های ورودی زیادی دارند که کاربرد آنها زمان‌بر و پرهزینه است (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003; Khatri & Smith, 2006). نفوذ آب در خاک در آبیاری جویچه‌ای پدیده‌ای است پیچیده و به پارامترهای زیادی وابسته است مانند طول جویچه، مدت زمان آبیاری، مدت زمان پیشروی، دبی ورودی به جویچه، فاصله بین جویچه‌ها، محیط خیس شده، مساحت خیس شده، رطوبت اولیه خاک، عمق آب در جویچه، هدایت هیدرولیکی غیراشباع، ضریب زبری مانینگ و شیب جویچه؛ از این روابطی که ضمن دارا بودن دقت کافی، به داده‌های کمتر و روش محاسبه ساده‌تر نیاز داشته باشد ضروری است. روش کوستیاکوف- لوئیس برای برآورد نفوذ دارای دقت مناسبی است ولی برآورد پارامترهای k ، a و f_0 وقت‌گیر و پرهزینه است، لذا در این پژوهش به کمک آنالیز ابعادی، پارامترهای رابطه نفوذ کوستیاکوف- لوئیس با نگرش فوق مقیاس‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ورودی از ۱۲ آزمایش آبیاری جویچه‌ای انتها باز با ۱۵ تکرار در یک مزرعه کشت ذرت استخراج شدند (Abbasi & Chogan, 2011). بافت خاک مزرعه مورد آزمایش لومی، شیب طولی جویچه‌ها ۰/۰۰۶ و طول جویچه‌ها ۱۶۵ متر است. میانگین برخی ویژگی‌های جویچه‌های آزمایشی برای ۱۲ آزمایش و ۱۵ نوبت آبیاری در جدول ۱ ارائه شده است.

کردند. رابطه حاصل تابعی از محیط خیس شده و حجم آب ورودی به مزرعه است. ارزیابی رابطه نفوذ مقیاس شده نشان می‌دهد که این رابطه برای سایر جویچه‌های دارای بافت و شرایط هیدرولیکی متفاوت قابل استفاده خواهد بود و مقدار نفوذ را با دقت بسیار مناسبی تخمین می‌زند.

خاطری و اسمیت (Khatri & Smith, 2006) روشی جدید برای تخمین پارامترهای نفوذ با استفاده از یک نقطه پیشروی و یک مدل منحنی نفوذ پیشنهاد کردند. این پژوهشگران فاکتور مقیاسی به دست آوردند که همراه با رابطه کوستیاکوف- لوئیس برای مقیاس‌سازی منحنی‌های نفوذ منفرد در سطح مزرعه به کار می‌رود. استفاده از این روش در مزرعه ساده است و تنها نیاز به اندازه‌گیری یک نقطه پیشروی در طول جویچه، دبی ورودی و مساحت خیس شده دارد. اهوچا و همکاران (Ahuja *et al.*, 2007) پارامترهای رابطه نفوذ کوستیاکوف- لوئیس را بر اساس روابط بین پارامترهای این رابطه و هدایت هیدرولیکی اشباع مؤثر مقیاس‌بندی کردند. صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2008) برای پیش‌بینی نیم‌رخ رطوبت خاک در فاز توزیع مجدد با استفاده از مقیاس‌سازی، مدلی ارائه کردند که مقدار رطوبت خاک در هر عمق و زمان را در طول فاز توزیع مجدد تخمین می‌زند. کرمی و همکاران (Karami *et al.*, 2012) به کمی‌سازی پارامترهای نفوذ آب در خاک با استفاده از مقیاس‌سازی پرداختند و داده‌ها را به سه مدل نفوذ آب در خاک (کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوئیس و فیلیپ) برازش دادند. نتایج این برازش نشان می‌دهد که مدل دو پارامتری فیلیپ با بالاترین ضریب تبیین، بهترین مدل است.

جدول ۱- میانگین برخی ویژگی‌های جویچه‌های آزمایشی

شماره آزمایش	دبی ورودی (لیتر در ثانیه)	مدت زمان آبیاری (دقیقه)	مدت زمان پیشروی (دقیقه)
۱	۰/۲۶	۶۰۲	۴۷
۲	۰/۳۵	۳۴۸	۴۳
۳	۰/۳۷	۲۶۸	۴۶
۴	۰/۲۸	۵۸۰	۶۴
۵	۰/۲۹	۳۳۵	۷۱
۶	۰/۳۲	۲۶۱	۱۰۴
۷	۰/۳۵	۶۰۴	۳۶
۸	۰/۳۶	۳۰۲	۳۷
۹	۰/۳۵	۲۳۹	۹۲
۱۰	۰/۳۶	۶۰۵	۴۰
۱۱	۰/۳۲	۴۸۸	۳۴
۱۲	۰/۳۶	۳۶۸	۳۴

تئوری مقیاس‌سازی

یکی از مشکلات پیش روی دانشمندان علوم مرتبط با خاک، نحوه برخورد با تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک است. به منظور غلبه بر این مشکل، میلر و میلر (Miller & Miller, 1956) نظریه "محیط‌های متشابه" را مطرح کرده‌اند. با تکیه بر این نظریه، مفهوم مقیاس‌سازی در دانش فیزیک خاک ظهور یافت که امروزه ابزاری قدرتمند برای بیان تغییرپذیری توابع هیدرولیکی خاک شناخته می‌شود. بر اساس نظریه محیط‌های متشابه، دو خاک را هنگامی می‌توان متشابه نامید که یک عامل مقیاس مانند γ وجود داشته باشد تا بتواند یک خاک را به خاک دیگر تبدیل کند. در این نظریه، نسبت دو طول مشخصه فیزیکی متناظر از دو محیط می‌تواند به عنوان عامل مقیاس، یک محیط را به محیط دیگر تبدیل کند (Sadeghi et al., 2010). طی چهار دهه اخیر، روش‌های مقیاس‌سازی با تکیه بر مفهوم محیط‌های متشابه، در دانش فیزیک خاک توسعه فراوانی پیدا کردند و به طور عمده در دو حوزه به کار گرفته شدند: الف) برای بیان تغییرپذیری مکانی توابع هیدرولیکی خاک‌ها (Sadeghi et al., 2010)، و ب) برای اشتقاق

حل‌های عمومی فرایندهای آب در خاک مانند نفوذ (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003)، تبخیر (Kozak & Ahuja, 2005) و جابه‌جایی املاح (Sadeghi & Jones, 2012). مسئله اصلی در مقیاس‌سازی، یافتن مشخصه‌های اصلی و تعیین پارامترهای مؤثر بر هر مشخصه و سپس مدل‌سازی سیستم است. در این مطالعه مشخصه‌های زمانی و مکانی به روش آنالیز ابعادی و با استفاده از تئوری II باکینگهام (Buckingham, 1914) به دست آمد.

آنالیز ابعادی

آنالیز ابعادی روشی است ریاضی که روابط بین متغیرهای فیزیکی کمی را در مطالعات آزمایشگاهی یا مزرعه‌ای برقرار می‌کند. با آنالیز ابعادی، کمیت‌های فیزیکی به کمیت‌هایی بی‌بعد تبدیل می‌شوند که منجر به کاهش تعداد آزمایش‌ها می‌شود. آنالیز ابعادی ابزاری مؤثر در مدل‌سازی مسائلی است که به روش تحلیلی قابل حل نیستند و باید با آزمایش‌های مکرر حل نیستند (Massey & Ward-Smith, 2006).

توسعه رابطه برآورد نفوذ آب در خاک با استفاده...

مقدار $RMSE$ و MBE و بیشترین مقدار R^2 ارزیابی شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{actual} - Z_{scaled})^2}{n}} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{actual} - Z_{scaled})}{n} \quad (3)$$

که در آن،

Z_{actual} = مقدار نفوذ اندازه‌گیری شده؛ و Z_{scaled} = نفوذ مقیاس شده؛ و n = تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

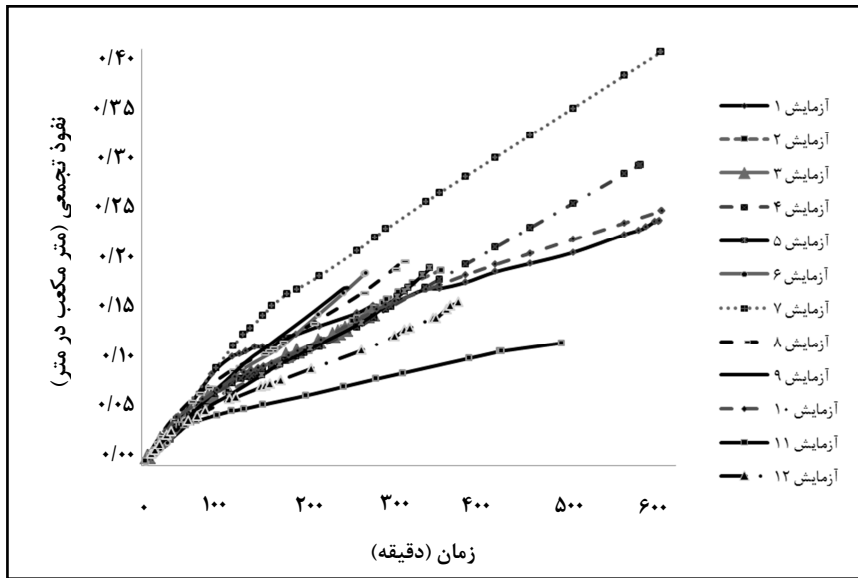
نفوذ تجمعی در برابر مدت زمان برای تمامی ۱۲ آزمایش در شکل ۱ ترسیم شده است. برای اینکه کارایی مقیاس‌سازی بیشتر مشخص شود از جویچه‌هایی استفاده شده است که تغییرات نفوذ تجمعی نسبت به مدت زمان در آنها با تغییرات نفوذ تجمعی سایر جویچه‌ها تفاوت زیادی دارد. همان‌طور که از شکل ۱ پیداست مثلاً در آزمایش ۱۱ پس از ۵۰۰ دقیقه آبیاری نفوذ تجمعی حدود ۰/۱ مترمکعب بر متر است ولی در آزمایش ۷ پس از ۵۰۰ دقیقه آبیاری، نفوذ تجمعی حدود ۰/۳۵ مترمکعب بر متر است، یعنی حدود ۳/۵ برابر. تفاوت زیاد مقادیر نفوذ تجمعی ناشی از تغییرات فیزیکی خاک (از جمله ساختمان خاک، رطوبت اولیه خاک، هدایت هیدرولیکی غیراشباع، ضریب زبری مانینگ) و خصوصیات هیدرولیکی جویچه‌ها (مانند محیط و مساحت خیس شده) است.

مشخصه‌های اصلی مورد استفاده شامل مشخصه‌های مکانی مقیاس‌شده (L_c) و زمانی مقیاس‌شده (T_c) هستند که به پارامترهای زیادی وابسته‌اند، پارامترهایی چون: L = طول جویچه (متر)، t_c = زمان آبیاری (ثانیه)، t_p = زمان پیشروی (ثانیه)، Q = دبی ورودی به جویچه (مترمکعب بر ثانیه)، w = فاصله بین جویچه‌ها (متر)، W_p = محیط خیس شده (متر)، A = مساحت خیس شده (مترمربع)، D = رطوبت اولیه خاک (مترمکعب بر مترمکعب)، H = عمق آب در جویچه (متر)، K_s = هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر ثانیه) و S_0 = شیب جویچه. از ۸۰ درصد داده‌های ورودی به منظور تعیین پارامترهای بی‌بعد (T^* زمان مقیاس‌شده و Z^* نفوذ مقیاس‌شده) و از ۲۰ درصد باقیمانده برای صحت‌سنجی استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17، پارامترهای بی‌بعد در قالب رابطه نفوذ کوستیاکف - لوئیس قرار داده شد و ضرایب ثابت رابطه (a ، k و f_0) به دست آمد.

معیارهای ارزیابی

معیارهای آماری مورد استفاده برای ارزیابی رابطه پیشنهادی عبارت‌اند از: R^2 ضریب تبیین، $RMSE$ جذر میانگین مربعات خطا و MBE میانگین انحراف خطا. جذر میانگین مربعات خطا با فراهم کردن مقایسه جمله به جمله اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده، معلوماتی در مورد عملکرد کوتاه مدت مدل به دست می‌دهد.

در حالت‌های کم‌برآورد یا بیش‌برآورد بودن مدل از MBE استفاده شد. عملکرد مدل‌ها براساس کمترین



شکل ۱- نفوذ تجمعی در برابر مدت زمان برای کلیه داده‌های مورد استفاده

Q = دبی ورودی (مترمکعب بر ثانیه)؛ t_p = مدت زمان پیشروی (ثانیه)؛ H = عمق آب در جویچه (متر)؛ z = نفوذ تجمعی (مترمکعب بر متر)؛ و t_c = مدت زمان آبیاری (ثانیه) است.

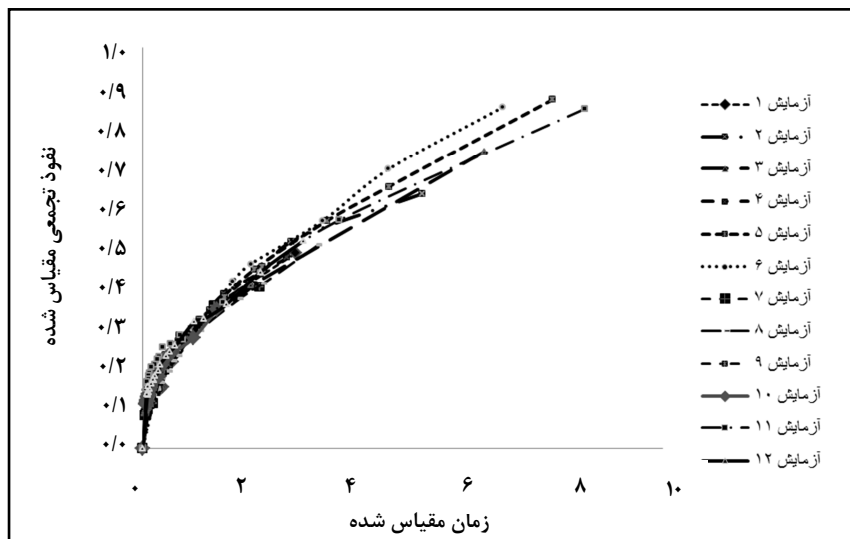
در ادامه، مقادیر T^* در برابر Z^* رسم شد (شکل ۲). روابط به دست آمده برای پارامترهای T^* و Z^* به خوبی برآورد شده‌اند زیرا تغییرات زیاد منحنی‌های نفوذ نسبت به مدت زمان (شکل ۱) را به خوبی بر یکدیگر منطبق ساخته‌اند (شکل ۲) تا در نهایت بتوان به رابطه‌ای جامع دست یافت.

با استفاده از ۸۰ درصد داده‌های ورودی، روابط نهایی برای فاکتورهای زمان مقیاس شده T^* و نفوذ مقیاس شده Z^* به صورت زیر محاسبه شد:

$$Z^* = \frac{z \sqrt{\frac{Qt_p}{H^7}}}{50} \quad (4)$$

$$T^* = \left(\frac{t_c}{t_p}\right) \quad (5)$$

که در آنها؛



شکل ۲- نفوذ تجمعی مقیاس شده در برابر زمان مقیاس شده برای ۸۰ درصد داده‌ها

از مقایسه رابطه ۶ با رابطه ۱ مقدار k ، a و f_0 به ترتیب برابر ۰/۲۵۹۴، ۰/۳۴۰۱ و ۰/۰۴۲۴ است. شاخص‌های آماری رابطه ۶ در جدول ۲ ارائه شده است. مثبت بودن مقدار آماره MBE حاکی از بیش‌برآورد نفوذ حاصل از رابطه نسبت به مقدار نفوذ اندازه‌گیری شده است.

پس از آن، بهترین خط برازشی برای داده‌های مقیاس شده در شکل ۲، با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17 رسم شد و رابطه زیر به دست آمد:

$$Z^* = 0.2594 \times (T^*)^{0.3401} + 0.0424 \times T^* \quad (۶)$$

جدول ۲- تحلیل آماری رابطه پیشنهادی

R^2	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین انحراف خطا (MBE)
۰/۹۸۴	۰/۰۱۹۹	۰/۰۰۰۱۵

(Khatri & Smith, 2006) برای ۲۷ آبیاری با مدت زمان پیشروی ۵۰ تا ۶۰۰ دقیقه، R^2 را برابر ۰/۹۹۷۳ گزارش کردند. داده‌های مورد نیاز آنها شامل ورودی‌های روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (Elliott & Walker, 1982) بود که محاسبه این ورودی‌ها نسبت به داده‌های رابطه ۶ وقت‌گیرتر و پرهزینه‌تر است و سبب ایجاد خطا در محاسبات می‌شود.

در شکل ۱ منحنی‌ها بسیار پراکنده‌اند ولی در شکل ۲، که بعد از مقیاس‌سازی حاصل شده است، منحنی‌ها تا حدود زیادی بر هم منطبق‌اند که خود نشان از دقت رابطه استخراجی در مقیاس‌سازی پراکندگی بین داده‌ها دارد و این توجیه فراگیر بودن رابطه ۶ است.

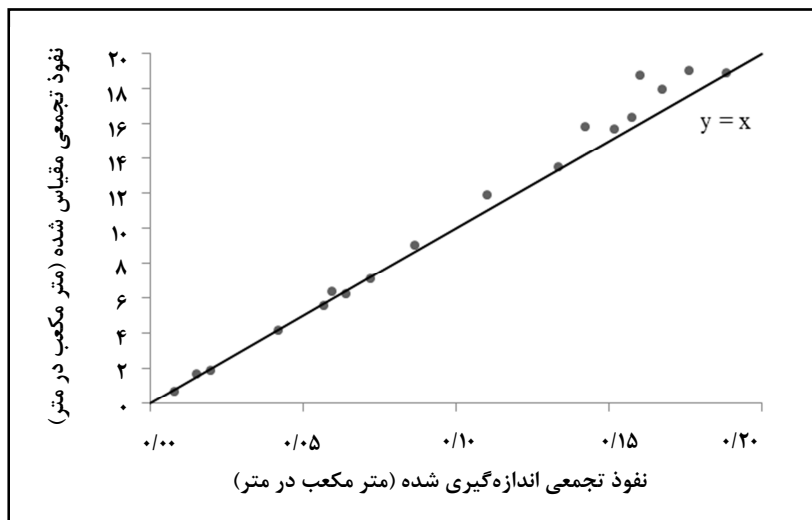
برای راست آزمایی رابطه پیشنهادی، مقدار نفوذ تجمعی مقیاس‌شده و اندازه‌گیری شده برای ۲۰ درصد داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت و نتایج ۳ آزمایش به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).

در مطالعه‌های مشابه، رسول‌زاده و سپاس‌خواه (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003) با استفاده از کشش سطحی، دانسیته و لزوجت آب، تغییرات رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و محیط خیس شده به عنوان داده‌های ورودی، رابطه نفوذ مقیاس‌شده را به شکل زیر استخراج کردند:

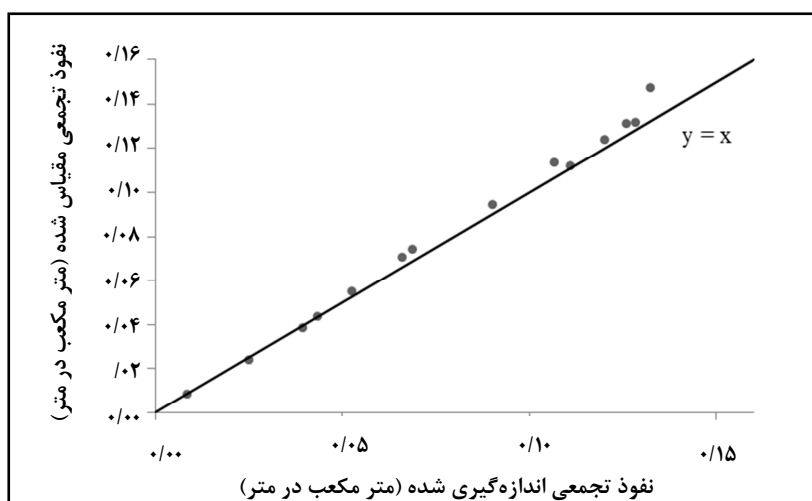
$$Z^* = 0.1283 \times (T^*)^{0.3301} + 2.3161 \times T^* \quad (۷)$$

این پژوهشگران از میان شاخص‌های آماری، تنها مقدار R^2 را برابر با ۰/۹۹۷۶ گزارش کردند. با وجود مشابهت زیاد روابط ۶ و ۷، رابطه پیشنهادی در پژوهش حاضر به داده‌های سهل‌الوصول‌تری نیاز دارد (دبی ورودی، مدت زمان پیشروی، مدت زمان آبیاری و عمق آب در جویچه) که استفاده از آن را کاربردی‌تر می‌سازد.

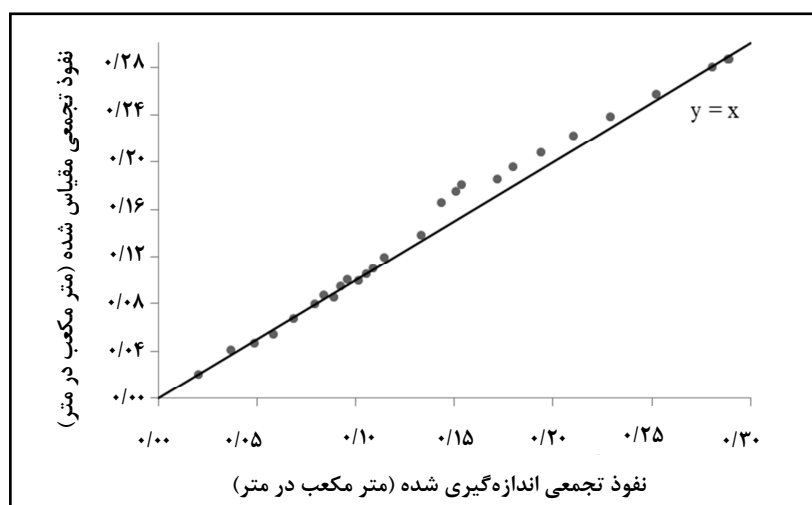
در راستای مقیاس‌کردن مقدار نفوذ تجمعی برای کاهش داده‌های ورودی مورد نیاز، خاطری و اسمیت



شکل ۳- مقایسه تجمعی اندازه‌گیری شده و اندازه‌گیری شده (آزمایش ۲)



شکل ۴- مقایسه تجمعی اندازه‌گیری شده و اندازه‌گیری شده (آزمایش ۳)



شکل ۵- مقایسه تجمعی اندازه‌گیری شده و اندازه‌گیری شده (آزمایش ۴)

داده‌ها به خط یک به یک نشان از دقت مناسب پیش‌بینی است. شاخص‌های آماری مربوط به این ۳ آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده را اندکی کم‌برآورد می‌کند. با این همه، نزدیک بودن خط برازش داده شده بر

جدول ۳- شاخص‌های آماری برای آزمایش‌های منتخب

آزمایش/شاخص	R^2	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین انحراف خطا (MBE)
آزمایش ۲	۰/۹۹۱۳	۰/۰۰۹۲	-۰/۰۰۵۲
آزمایش ۳	۰/۹۹۲۹	۰/۰۰۹	-۰/۰۰۵۸
آزمایش ۴	۰/۹۸۸۴	۰/۰۱	-۰/۰۰۵۲

و بر هزینه است. در واقع، پژوهش حاضر، با تحلیل مناسب‌تر نسبت به دو مقاله ذکر شده، به نوعی اصلاح کننده آنها نیز هست.

نتیجه‌گیری

تغییرات مکانی و زمانی نفوذ (که با پارامترهای H و Q در رابطه ۴ نمایان شده‌اند)، مدیریت روش‌های آبیاری سطحی و به ویژه آبیاری جویچه‌ای را پرهزینه، زمان‌بر و پیچیده می‌سازد. بنابراین در آبیاری جویچه‌ای، پارامترهای نفوذ برای دبی‌های ورودی متفاوت، شکل هندسی جویچه و مقدار آب خاک متغیرند. بر این اساس ارائه رابطه‌ای کلی برای نفوذ بسیار مشکل است. برای محاسبه نفوذ با روش کوستیاکوف-لوتیس که دارای دقت مناسبی است، ابتدا باید پارامترهای k ، a و f_0 محاسبه شوند که محاسبه آنها وقت‌گیر و پرهزینه است. برای سهولت با روش‌های مقیاس‌سازی در این مقاله و با استفاده از داده‌های ۱۲ آزمایش آبیاری جویچه‌ای متفاوت، رابطه‌ای استخراج شد که با صرف هزینه و مدت زمان کمتر و دقت بالا (نزدیک بودن مقدار R^2 به عدد یک $(>0/98)$ در کنار پایین بودن مقدار $RMSE$ $(<0/01)$) مقدار نفوذ برآورد شود. برتری این رابطه نسبت به روابط پیشنهاد شده در پژوهش‌های قبلی، نیاز به داده‌های ورودی کمتر و روش

مقادیر منفی آماره MBE نشان از کم‌برآورد شدن نفوذ مقیاس شده نسبت به نفوذ اندازه‌گیری شده در ۳ آزمایش نمونه است. رابطه ۶ بیش‌برآورد ناچیزی دارد (جدول ۲) ولی در آزمایش‌های انتخاب شده، کم‌برآورد مشاهده شد که مقدار آن نیز بسیار اندک است (جدول ۳). نزدیک بودن مقدار R^2 به عدد یک $(>0/98)$ در کنار پایین بودن مقدار $RMSE$ $(<0/01)$ نشان از دقت بالای مدل است. دقت نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج تحقیقات رسول‌زاده و سپاسخواه (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003) و خاطری و اسمیت (Khatrri & Smith, 2006) قابل مقایسه است. اما برتری این رابطه بر سایر روابطی که تاکنون ارائه شده‌اند، پارامترهای ورودی کمتر، روش محاسبه ساده‌تر و سریع‌تر است. مثلاً در مقاله رسول‌زاده و سپاسخواه (Rasoulzadeh & Sepaskhah, 2003) نیاز به محاسبه تغییرات رطوبت خاک، طول مشخصه ماکروسکوپی برای نفوذ، هدایت هیدرولیک اشباع دیده می‌شود که محاسبه هر یک از آنها زمان‌بر و پرهزینه است. در مقاله خاطری و اسمیت (Khatrri & Smith, 2006) نیز برای محاسبه فاکتور مقیاس، نیاز به ورود داده‌های روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (Elliott & Walker, 1982) است و در ادامه فاکتور مقیاس محاسبه می‌شود، که این روش هم وقت‌گیر

محاسبه ساده‌تر نیز هست بدین نحو که فقط چهار پارامتر برای این رابطه مورد نیاز است: دبی ورودی، عمق آب در جویچه، مدت زمان آبیاری و مدت زمان پیشروی. با توجه به نوع خاک بررسی شده (که لومی است) در حال حاضر این رابطه برای این نوع خاک توصیه می‌شود. هر چند ممکن است رابطه پیشنهادی برای سایر خاک‌های مشابه نیز قابل استفاده باشد و پاسخی مطلوب ارائه دهد. برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود، پژوهش‌های مشابه در جویچه‌هایی با بافت خاک متفاوت، طول‌های متنوع جویچه و شیب‌های متغیر اجرا شود تا رابطه مقیاس شده جامع‌تری با داده‌های ورودی کمتر و دقت مناسب‌تری به دست آید.

مراجع

- Abbasi, F. and Chogan, R. 2011. Investigation the effects of surface fertigation on water use efficiency, yield and yield components of corn in Karaj. Final Research Report, No. 40212. Agricultural Engineering Research Institute. (in Farsi)
- Ahuja, L. R., Kozak, J. A., Andales, A. A. and Ma, L. 2007. Scaling parameters of the Lewis-Kostiakov water infiltration equation across soil textural classes and extension to rain infiltration. *Trans. ASABE*. 50(5): 1525-1541.
- Buckingham, E. 1914. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev.* 4(4), 345-376.
- Elliott, R. L. and Walker, W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions [irrigation; Colorado]. *Trans. ASAE*. 25, 396-400.
- Elliott, R. L., Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. 1983. Infiltration parameters from furrow irrigation advance data [Modified Kostiakov infiltration equation, soils, Colorado farms]. *Trans. ASAE*. 26, 1726-1731.
- Enciso-Medina, J., Martin, D. and Eisenhauer, D. 1998. Infiltration model for furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 124(2): 73-80.
- Gillies, M. H. and Smith, R. J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrig. Sci.* 24(1): 25-35.
- Green, W. H. and Ampt, G. A. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4(1): 1-24.
- Holtan, H. N. 1961. Concept for infiltration estimates in watershed engineering. *USDA-ARS Bull.* 41-51.
- Hopmans, J. W. 1989. Stochastic description of field-measured infiltration data. *Trans. ASAE*. 32, 1987-1993.
- Horton, R. E. 1941. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5(C): 399-417.
- Karami, A., Homaee, M., Bybordi, M. and Mahmoodian Shushtari, M. 2012. Quantification of soil water infiltration parameters using scaling. *Iran Water Res. J.* 11(2): 65-73. (in Farsi)
- Khatri, K. L. and Smith, R. J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 25(1): 33-43.
- Kostiakov, A. N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans.* 6, 17-21.
- Kozak, J. A. and Ahuja, L. R. 2005. Scaling of infiltration and redistribution of water across soil textural classes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(3): 816-827.
- Machiwal, D., Jha, M. K. and Mal, B. C. 2006. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosys. Eng.* 95(4): 569-582.

- Massey, B. and Ward-Smith A. J. 2006. *Mechanics of Fluids*. 8th Ed. Taylor and Francis. London.
- McClymont, D. J. and Smith, R. J. 1996. Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrig. Sci.* 17(1): 15-22.
- Miller, E. E. and Miller, R. D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.* 27(4): 324-332.
- Nielsen, D. R., Hopmans, J. W. and Reichardt, K. L. A. U. S. 1998. An emerging technology for scaling field soil-water behavior. *Scale Dependence and Scale Invariance Hydrology*. 136-166.
- Oyonarte, N. A., Mateos, L. and Palomo, M. J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 128(1): 26-33.
- Parchami Araghi, F., Mirlatif, S. M., Ghorbani Dashtaki, S. and Mahdian, M. H. 2010. Evaluating some infiltration models under different soil texture classes and land uses. *Iranian J. Irrig. Drain.* 2(4): 193-205. (in Farsi)
- Philip, J. R. 1957. The theory of infiltration: 3. moisture profiles and relation to experiment. *Soil Sci.* 84(2): 163-178.
- Rasoulzadeh, A. and Sepaskhah, A. R. 2003. Scaled infiltration equations for furrow irrigation. *Biosys. Eng.* 86(3): 375-383.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *J. Appl. Phys.* 1(5): 318-333.
- Sadeghi, M. and Jones, S. B. 2012. Scaled solutions to coupled soil-water flow and solute transport during the redistribution process. *Vadose Zone J.* 11(4).
- Sadeghi, M., Ghahreman, B. and Davari, K. 2008. Scaling and prediction of soil moisture profile during redistribution phase. *J. Water Soil.* 22(2): 417-431. (in Farsi)
- Sadeghi, M., Gohardoust Monfared, M. R. and Ghahraman, B. 2010. Scaling of soil hydraulic conductivity function using effective capillary drive. *J. Water Soil.* 24(1): 189-197. (in Farsi)
- Scaloppi, E. J., Merkle, G. P. and Willardson, L. S. 1995. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121(1): 57-70.
- Sepaskhah, A. R. and Kamgar-Haghighi, A. A. 1997. Water use and yields of sugarbeet grown under every-other-furrow irrigation with different irrigation intervals. *Agric. Water Manage.* 34(1): 71-79.
- Smith, R. J., Raine, S. R. and Minkevich, J. 2005. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. *Agric. Water Manage.* 71(2): 117-130.
- Sposito, G. (Ed.). 2008. *Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology*. Cambridge University Press.
- Vico, G. and Porporato, A. 2011. From rainfed agriculture to stress-avoidance irrigation: I. A generalized irrigation scheme with stochastic soil moisture. *Adv. Water Resour.* 34(2): 263-271.
- Warrick, A. W. 1998. Spatial variability. In: Hillel, D. (Ed.) *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA.
- Warrick, A. W. and Hussen, A. A. 1993. Scaling of Richards' equation for infiltration and drainage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(1): 15-18.
- Warrick, A. W., Lomen, D. O. and Yates, S. R. 1985. A generalized solution to infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49(1): 34-38.
- Walker, W. R. 2003. *SIRMOD III: Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design*. Guide and Technical Documentation. Department of Biological and Irrigation Engineering. Utah State University. Logan. UT. USA.
- Youngs, E. G. and Price, R. I. 1981. Scaling of infiltration behavior in dissimilar porous materials. *Water Resour. Res.* 17(4): 1065-1070.

Use of Scaling in Developing an Equation to Estimate Infiltration of Water in Soil in Furrow Irrigation

A. Tavakoli , H. Babazadeh* , F. Abbasi and H. Sedghi

* Corresponding Author: Associate Professor, Water Engineering Department. Science and Research Branch, Islamic Azad University, P. O. Box: 14515-775, Tehran, Iran. E-Mail: h_babazadeh@srbiau.ac.ir
Received: 19 November 2014, Accepted: 6 June 2015

The management of surface irrigation systems, specifically furrow irrigation, is costly, time-consuming, and complicated because of spatial and temporal variations of infiltration. The infiltration parameters for inflow discharge, furrow geometry, and soil water content vary for furrow irrigation; consequently, it is difficult to present a general equation for infiltration. Scaling is a suitable method of obtaining a general relationship for infiltration. The present study developed an appropriate equation for scaling of infiltration components using dimensional analysis and irrigation test datasets with 15 replicates for 12 distinctive furrows. Calibration of the proposed equation produced R^2 and RMSE values of 0.984 and 0.0199, respectively. The results for validation of the equation demonstrated high R^2 values (>0.98) and low RMSE values (<0.01), which reflects the accuracy of this model. A comparison of the proposed model and published equations revealed the superiority of the proposed equation. The advantages include the need for less data (inflow discharge, flow depth in furrow, irrigation time, and advance time) and ease of measurement of the required inputs.

Keywords: Dimensional Analysis, Kostiaikov-Lewis Infiltration Equation, Surface Irrigation