

## ارائه معادله بیلان حجمی برای روش دونقطه‌ای جدید

حمید رضا مغفرتی<sup>۱</sup>، محمد مهدی چاری<sup>۲\*</sup>، پیمان افراسیاب<sup>۳</sup>، معصومه دلبری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۲

### چکیده

به منظور ارزیابی آبیاری سطحی، از داده‌های پیشروی و پارامترهای نفوذ استفاده می‌گردد. معادله نفوذ فیلیپ یکی از معادلاتی است که به طور گسترده در آبیاری سطحی استفاده می‌شود. اولین بار، شپارد و همکاران (۱۹۹۳) روش یک نقطه‌ای را به منظور تعیین پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ در آبیاری سطحی ارائه کردند. در سال‌های اخیر، روش دونقطه‌ای جدید به منظور تعیین پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ ارائه شده است. در روش جدید، معادله بیلان ارائه نشده است. در نتیجه، از معادله بیلان حجمی شپارد و همکاران (۱۹۹۳) برای تعیین فاز پیشروی آب استفاده می‌گردد (روش ابراهیمیان - شپارد، ۲۰۱۰). در این تحقیق، معادله بیلان حجمی برای روش دونقطه‌ای جدید ارائه شده است. معادله بیلان حجمی ارائه شده در این تحقیق با پنج مجموعه داده آبیاری جویچه‌ای مستقل و شرایط ورودی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳)، ابراهیمیان - شپارد (۲۰۱۰) و دونقطه‌ای جدید به ترتیب برابر با ۴۰/۵، ۳۰/۳ و ۱۰/۹ بود. میانگین مطلق خطای پیش‌بینی دارای کمترین مقدار و برابر با ۹/۶ درصد در روش دونقطه‌ای جدید و بعد از آن به ترتیب روش ابراهیمیان - شپارد (۲۰۱۰) و شپارد و همکاران (۱۹۹۳) با مقادیر ۱۹/۵ و ۲۰/۴ درصد بود. مقدار ضریب تعیین نیز برای هر سه روش بیشتر از ۰/۹۷ بود. به طور کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش ارائه شده در این تحقیق با دقت قابل قبولی نسبت به دو روش دیگر منحنی پیشروی را پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بیلان حجمی، معادله فیلیپ، منحنی پیشروی

### مقدمه

داشتن اطلاعات کافی در زمینه نفوذ آب در خاک و حرکت آب در خاک است. نوع خاک، پیشروی، پسروری، رواناب و حجم آب نفوذ کرده در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اهمیت فرآیند نفوذ منجر به توسعه چندین مدل برای پیش‌بینی نفوذ شده است. برخی مدل‌ها بر اساس ترسیم منحنی بین سرعت نفوذ و زمان تحلیل شده‌اند و خصوصیات فیزیکی خاک را در بر نمی‌گیرند، که مدل‌های تجربی نامیده می‌شوند (Kostiakov, 1932; Horton, 1941; SCS, 1974) و برخی دیگر بر مبنای خصوصیات فیزیکی خاک بنا شده‌اند (Green and Ampt, 1911; Philip, 1957).

پارامترهای نفوذ معمولاً با استفاده از داده‌های آزمایشی "تک حلقه" یا "دو حلقه" تعیین می‌شود (Duan et al., 2011). اما از آنجا که این روش‌ها دینامیک مزرعه را در نظر نمی‌گیرند، برای تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری سطحی مناسب نیستند. برای به‌دست آوردن پارامترهای نفوذ در آبیاری سطحی معمولاً از روش‌های ورودی - خروجی، جویچه مسدود، نفوذسنج گردشی، دونقطه‌ای، یک نقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی و بهینه‌سازی معکوس استفاده می‌شود. در این روش‌ها، معمولاً از یک، دو و یا چند نقطه مرحله پیشروی جریان (Elliot and Walker, 1982; Shepard et al., 1993) استفاده می‌گردد.

علی‌رغم کاربرد گسترده آبیاری سطحی در دنیا، به علت کم بودن راندمان و یکنواختی توزیع این روش، میزان عملکرد محصولات در این آبیاری کم است (Adamala et al., 2014). مریام (۱۹۷۷) و کی (۱۹۹۰) بیان کردند که راندمان کم آبیاری سطحی یک مشخصه ذاتی این روش نبوده و به دلیل ضعف طراحی و مدیریت می‌باشد (Merriam, 1977; Kay, 1990). چنانچه سیستم‌های آبیاری سطحی به درستی طراحی و مدیریت شوند، می‌توانند راندمانی نزدیک به آبیاری تحت فشار داشته باشند (James, 1988). بنابراین، به منظور بهبود عملکرد سیستم‌های آبیاری سطحی، نیاز به طراحی و مدیریت مناسب وجود دارد.

طراحی، ارزیابی و شبیه‌سازی صحیح آبیاری سطحی نیاز به

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

(Email: mmahdichari@uoz.ac.ir)

\*- نویسنده مسئول:

لوئیس و میلنه در آبیاری نواری به کار گرفته شد (Lewis and Milne, 1938). این رابطه، بعدها در آبیاری جویچه‌ای به کار گرفته شد. معادله بیلان در هر لحظه از آبیاری (در فاز پیشروی) برابر است با حجم جریان آب در طول شیار (حجم آب موجود روی سطح شیار) و میزان نفوذ آب به داخل خاک و به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$Q \cdot t = V_S + V_I \quad (1)$$

که در آن  $Q$  دبی (شدت جریان) ورودی متوسط ( $m^3/min$ )،  $V_I$  حجم نفوذ ( $m^3$ ) و  $V_S$  حجم ذخیره سطحی ( $m^3$ ) می‌باشد.

$$V_S = \bar{A} \cdot x(t) \quad (2)$$

$$V_S = \sigma_y \cdot A_0 \cdot x(t) \quad (3)$$

که  $\bar{A}$  سطح مقطع متوسط جریان ( $m^2$ )،  $A_0$  سطح مقطع جریان در بالادست ( $m^2$ )،  $\sigma_y$  فاکتور شکل سطحی و  $x(t)$  فاصله پیشروی در زمان  $t$  می‌باشد.

$$V_I = \int_0^x Z(t - t_s) ds \quad (4)$$

که  $t_s$  زمان رسیدن جریان به نقطه پیشروی  $s$  و  $Z$  حجم آب نفوذ یافته در طول مزرعه است. بر این اساس، معادله لوئیس - میلنه در آبیاری سطحی به صورت زیر می‌باشد:

$$Q \cdot t = \sigma_y \cdot A_0 \cdot x(t) + \int_0^x Z(t - t_s) ds \quad (5)$$

### روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳)

این روش توسط شپارد و همکاران برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ ( $Z = St^{0.5} + At$ ) ضریب جذب  $A$  و ضریب انتقال) پیشنهاد گردید. در این روش، از داده‌های مرحله پیشروی برای برآورد ویژگی‌های نفوذ استفاده می‌شود. با این تفاوت که در این روش از تابع نمایی زیر برای بیان مرحله پیشروی آب در سطح مزرعه استفاده می‌شود (Shepard et al., 1993):

$$x = pt^{0.5} \quad (6)$$

رابطه بیلان حجمی برای این روش به صورت زیر است:

$$Q \cdot t = \bar{A}x + \frac{\pi S}{4p} x^2 + \frac{2f}{3p^2} x^3 \quad (7)$$

با به کار بردن رابطه (۷) برای نقاط وسط ( $x_1$ ) و انتهایی مزرعه ( $x_2$ )، پارامترهای معادله فیلیپ برابر است:

$$A = \frac{3\bar{A}}{t_2} \quad (8)$$

$$S = \frac{Qt_2 - 3\bar{A}x_2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)t_2^{0.5}x_2} \quad (9)$$

1993; MacClymont and Smith, 1996; Valiantzas, 2001; Merriam and Keller, (Khatrri and Smith, 2006)، پسروری (، Strelkoff et al., 1999; Walker, 2005) و یا داده‌های رواناب (Scaloppi et al., 1995; Gilles and Smith, 2005) برای تخمین پارامترهای نفوذ استفاده می‌شود.

خاطری و اسمیت شش روش نفوذپذیری برای تعیین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل INFILT (MacClymont and Smith, 1996) دارای بیشترین دقت و پس از آن روش الیوت و واکر (Elliot and Walker, 1982) و تابع خطی نفوذ قرار داشتند (Khatrri and Smith, 2006). قربانی دشتکی و همکاران نتیجه گرفتند که طبیعت تغییرپذیر فرایند نفوذ آب به خاک موجب می‌شود که یک مدل نفوذ در دو خاک که به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی بسیار مشابه هستند دارای کارایی متفاوتی باشد (Ghorbani-Dashtaki et al., 2009).

معادله فیلیپ، با توجه به پایه ریاضی آن، یکی از معادلاتی است که به طور گسترده در آبیاری سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های مختلفی به منظور تعیین پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ ارائه شده است که عبارتند از روش یک‌نقطه‌ای شپرد و همکاران (Shepard et al., 1993)، روش کلمنز و باتیستا (Clemmens and Bautista, 2009)، روش نی و همکاران (Nie et al., 2012) و روش ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimian et al., 2010). شپرد و همکاران، با فرض مقدار  $0/5$  برای توان معادله پیشروی آب، مقدار پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ را در آبیاری سطحی به‌دست آوردند (Shepard et al., 1993). کلمنز و باتیستا روش دونقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) را تصحیح کرده و آن را برای به‌دست آوردن پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ اصلاح شده به‌کار بردند (Clemmens and Bautista, 2009). نی و همکاران (۲۰۱۲)، یک روش غیرخطی برای برآورد پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ و ضریب زبری در آبیاری نواری ارائه کردند که با استفاده از داده‌های زمان پیشروی در طول نوار می‌توان آنها را به‌دست آورد (Nie et al., 2012). ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) روشی را برای تعیین پارامترهای معادله فیلیپ دو جزئی پیشنهاد کردند (Ebrahimian et al., 2010). اگرچه با روش ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) می‌توان با دقت مناسبی پارامترهای معادله فیلیپ را به‌دست آورد، اما عدم ارائه معادله بیلان حجمی یکی از محدودیت‌های روش ذکر شده است. در نتیجه، این تحقیق با هدف ارائه معادله بیلان حجمی ارائه برای روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) انجام گردید.

### مواد و روش‌ها

#### معادله بیلان حجم

این معادله بر قانون بقاء جرم استوار بوده و نخستین بار توسط

$$\frac{dx}{dt_s} = x'(t_s) = prt_s^{(r-1)} \quad (11)$$

که  $x'(t_s)$  سرعت پیشروی جریان آب در زمان  $t_s$  است. با استفاده از دونقطه  $(x_1, t_1)$  و  $(x_2, t_2)$  در طول جویچه، می‌توان مقادیر  $r$  و  $p$  را به‌دست آورد:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \quad (12)$$

$$p = \frac{x_2}{t_2^r} \quad (13)$$

### روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰)

ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) روش یک‌نقطه‌ای شپارد و همکاران (۱۹۹۳) را اصلاح کرده و روش دونقطه‌ای جدیدی برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ ارائه کرده‌اند. تفاوت آن با روش یک‌نقطه‌ای شپارد در آن است که به جای فرض  $r=0.5$  مقدار آن همانند روش دونقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) از رابطه‌ی نمایشی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$x = pt^r \quad (10)$$

بر اساس روابط فوق خواهیم داشت:

با جایگزینی معادله نفوذ فیلیپ ( $Z = St^{0.5} + At$ ) در رابطه بیلان حجم (۵) داریم:

$$Q \cdot t = \sigma_y \cdot A_0 \cdot x(t) + \int_0^x [S(t - t_s)^{0.5} + A(t - t_s)] ds \quad (14)$$

با توجه به رابطه (۱۰) داریم:

$$Q \cdot t = \sigma_y A_0 x + \int_0^x S \left( \left[ \frac{x}{p} \right]^{1/r} - \left[ \frac{s}{p} \right]^{1/r} \right)^{0.5} ds + \int_0^x A \left( \left[ \frac{x}{p} \right]^{1/r} - \left[ \frac{s}{p} \right]^{1/r} \right) ds \quad (15)$$

ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) با اندازه‌گیری زمان رسیدن آب به دو نقطه  $x_1$  و  $x_2$  از مزرعه، پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ را از روابط زیر به‌دست آوردند:

$$A = \frac{\left( [Q_2 t_2 - \bar{A}_2 x_2] x_1^{1+\frac{1}{2r}} - [Q_1 t_1 - \bar{A}_1 x_1] x_2^{1+\frac{1}{2r}} \right) (1+r) p^{1/r}}{x_2^{1+\frac{1}{r}} \cdot x_1^{1+\frac{1}{2r}} - x_2^{1+\frac{1}{2r}} \cdot x_1^{1+\frac{1}{r}}} \quad (16)$$

$$S = \frac{2\Gamma\left(r + \frac{3}{2}\right) \cdot \left[ Q_2 t_2 - \bar{A}_2 x_2 - \left( f x_2^{\left(1+\frac{1}{r}\right)} / \left( (1+r) p^{\frac{1}{r}} \right) \right) \right]}{\sqrt{\pi} \cdot \Gamma(r+1) \cdot x_2 \cdot \left( x_2/p \right)^{1/2r}} \quad (17)$$

### حل معادله بیلان

حل قسمت اول انتگرال معادله (۱۵):

$$\begin{aligned} V_{Z1} &= \int_0^x S \left( \left[ \frac{x}{p} \right]^{1/r} - \left[ \frac{s}{p} \right]^{1/r} \right)^{1/2} ds \\ &= \int_0^x S \left( \frac{x^{1/r} - s^{1/r}}{p^{1/r}} \right)^{1/2} ds = \\ &= \int_0^x \frac{S}{p^{1/2r}} \left( x^{1/r} - s^{1/r} \right)^{1/2} ds = \frac{S}{p^{1/2r}} \int_0^x x^{1/2r} \left( 1 - \frac{s^{1/r}}{x^{1/r}} \right)^{1/2} ds \\ &= \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}} \int_0^x \left( 1 - \left( \frac{s}{x} \right)^{1/r} \right)^{1/2} ds \end{aligned} \quad (18)$$

در ادامه، با استفاده از متغیر جدید:

$$\begin{cases} u = \frac{s}{x} & \Rightarrow & \frac{du}{ds} = \frac{1}{x} & \Rightarrow & du = \frac{ds}{x} \\ & & \begin{cases} s = 0 & \rightarrow u = 0 \\ s = x & \rightarrow u = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

با قرار دادن مقدار  $u = \frac{s}{x}$  در جواب رابطه (۱۸) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} V_{Z1} &= \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}} \int_0^x \left(1 - \left(\frac{s}{x}\right)^{1/r}\right)^{1/2} \cdot ds = \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}} \int_0^x \left(1 - \left(\frac{s}{x}\right)^{1/r}\right)^{1/2} \cdot \frac{x}{x} \cdot ds \\ &= \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}} \int_0^x \left(1 - (u)^{1/r}\right)^{1/2} x \frac{ds}{x} \\ &= \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}+1} \int_0^1 \left(1 - (u)^{1/r}\right)^{1/2} \cdot du \end{aligned} \quad (20)$$

از طرفی، می‌دانیم (Kreyszig., 1979):

$$\int_0^1 (1 - (u)^b)^\alpha \cdot du = \frac{1}{b} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{b}\right) \cdot \Gamma(1 + \alpha)}{\Gamma\left(r + \frac{1}{b} + 1\right)} \quad (21)$$

که،  $\Gamma$  تابع گاما است. در نتیجه:

$$\begin{aligned} \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}+1} \int_0^1 \left(1 - (u)^{1/r}\right)^{1/2} \cdot du &= \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}+1} \cdot \left[ \frac{1}{1/r} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{1/r}\right) \cdot \Gamma(1 + 1/2)}{\Gamma\left(\frac{1}{1/r} + \frac{1}{2} + 1\right)} \right] \\ &= \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}+1} \cdot \sigma_{z1} \end{aligned} \quad (22)$$

که  $\sigma_{z1}$  فاکتور شکل ذخیره خاک بوده و برابر است با:

$$\sigma_{z1} = \frac{r \cdot \Gamma(r) \cdot \Gamma(3/2)}{\Gamma\left(\frac{1}{1/r} + \frac{3}{2}\right)} \quad (23)$$

حل قسمت دوم انتگرال معادله (۱۵):

$$\begin{aligned} V_{ZZ} &= \int_0^x A \left( \left[\frac{x}{p}\right]^{1/r} - \left[\frac{s}{p}\right]^{1/r} \right) \cdot ds = \int_0^x A \left( \frac{x^{1/r} - s^{1/r}}{p^{1/r}} \right) \cdot ds = \frac{A}{p^{1/r}} \int_0^x (x^{1/r} - s^{1/r}) \cdot ds \\ &= \frac{A}{p^{1/r}} \left[ \int_0^x x^{1/r} \cdot ds - \int_0^x s^{1/r} \cdot ds \right] = \frac{A}{p^{1/r}} \left( x^{(1/r)+1} - \frac{1}{(1/r) + 1} x^{(1/r)+1} \right) \\ &= \frac{A}{p^{1/r}} \left( \frac{(1+r)x^{((1+r)/r)} - rx^{((1+r)/r)}}{1+r} \right) = \frac{A}{p^{1/r}} \cdot \frac{x^{(1+r)/r}}{1+r} \end{aligned} \quad (24)$$

در نتیجه، معادله بیلان حجم (معادله ۱۵) برای معادله فیلیپ دوجزیی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$Q \cdot t = \sigma_y A_0 x + \frac{S}{p^{1/2r}} \cdot x^{\frac{1}{2r}+1} \cdot \sigma_{z1} + \frac{A}{p^{1/r}} \cdot \frac{x^{(1+r)/r}}{1+r} \quad (25)$$

۱) سه سری از این داده‌ها شامل Flowell non-wheel، Flowell wheel و Kimberly wheel به وسیله Walker and Busman (1990) گزارش شده است. داده‌های Benson با بافت خاک لوم رسی نیز به وسیله Wilson and Elliot (1988) گزارش شده است. مشخصات داده Walker از نرم‌افزار SIRMOD استخراج شده است (Walker., 1989).

با معلوم بودن دبی ورودی، سطح مقطع جریان و داشتن زمان رسیدن آب به دو نقطه  $x1$  و  $x2$  از مزرعه می‌توان پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ و پیشروی آب در مزرعه را به دست آورد.

### داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، به منظور ارزیابی روش ارائه شده، از پنج سری داده آبیاری جویچه‌ای با بافت‌های مختلف خاک استفاده شد (جدول

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده

Walker	Benson	Kimberly wheel	Flowell non-wheel	Flowell wheel	پارامترها
-	clay loam	Silty clay loam	Sandy loam	Sandy loam	نوع خاک
0.12	0.068	0.12	0.12	0.12	دبی ( $m^3/m/min$ )
0.008	0.0044	0.0104	0.0104	0.0104	شیب ( $m/m$ )
0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	ضریب زبری
360	625	360	360	360	طول ( $m$ )
پارامترهای هیدرولیکی مقطع					
0.33	0.5	0.664	0.326	0.326	$\rho_1$
2.71	2.9	2.878	2.734	2.734	$\rho_2$

آمد. شکل ۱، منحنی نفوذ تجمعی نسبت به زمان را برای هر دو روش و مزارع مختلف نشان می‌دهد. برای روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳) بیشترین مقدار نفوذ در مزرعه Flowell non-wheel و برابر با ۰/۳۳ متر پس از زمان ۸۰۰ دقیقه بود و کمترین مقدار نفوذ تجمعی در مزرعه Benson با مقدار ۰/۰۷ متر پس از ۸۰۰ دقیقه بود. برای روش ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰)، بیشترین مقدار نفوذ ۰/۴۲ متر و کمترین مقدار برابر با ۰/۱۱ متر به ترتیب در مزارع Flowell non-wheel و Benson بود. متغیر بودن مقدار نفوذ تجمعی در مزارع مختلف نشان دهنده‌ی تغییرات زیاد پارامترهای نفوذ (وابستگی به نوع خاک) در این داده‌ها می‌باشد. در بین جویچه‌های مورد مطالعه، بیشترین مقدار نزدیکی دو روش تعیین پارامترهای معادله نفوذ فیلیپ مربوط به مزرعه Kimberly wheel است. در مزارع Flowell wheel، Flowell non-wheel و Benson به طور کلی با افزایش زمان، مقدار نفوذ تجمعی به دست آمده بر اساس روش ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) بیشتر از روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳) بود. بیشترین اختلاف بین دو منحنی نفوذ تجمعی مربوط به مزرعه Walker است. در مزرعه Walker، مقدار نفوذ تجمعی به دست آمده از روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳) بیشتر از روش ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) است. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) برای تعدادی

### ارزیابی مدل جدید بیلان حجمی

برای ارزیابی مدل بیلان حجمی در برآورد فاز پیشروی در آبیاری جویچه‌ای از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطای پیش‌بینی ( $E_a$ ) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_o - T_p)^2}{N}} \quad (26)$$

$$E_a = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|T_o - T_p|}{T_{oi}} \quad (27)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{N(\sum I_o I_p) - (\sum I_o)(\sum I_p)}{\sqrt{[N \sum I_o^2 - (\sum I_o)^2][N \sum I_p^2 - (\sum I_p)^2]}} \right\}^2 \quad (28)$$

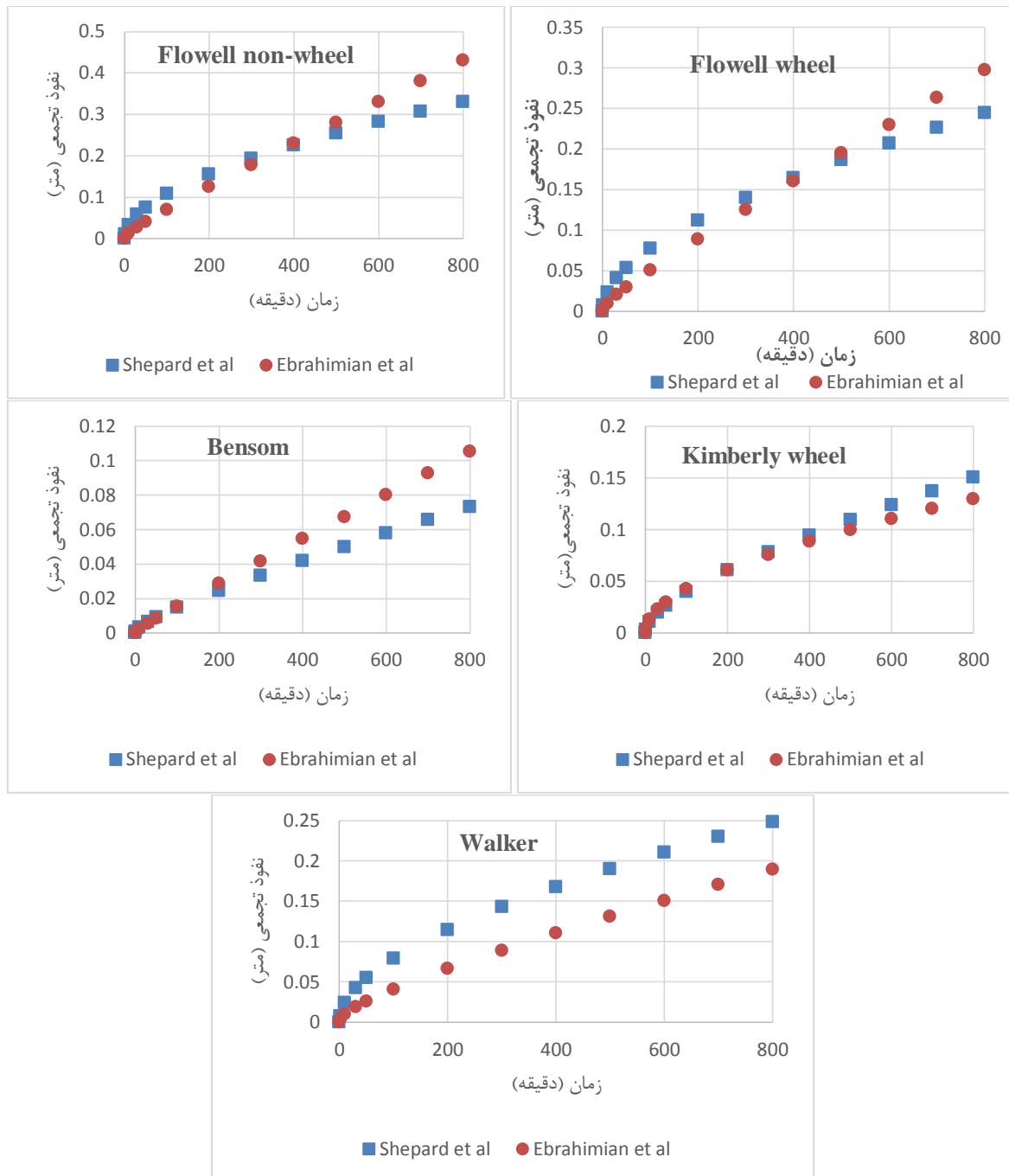
که  $N$  تعداد داده،  $T_{oi}$  زمان پیشروی مشاهده شده در آبیاری‌های مختلف و  $T_{pi}$  زمان پیشروی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل برای آبیاری‌های مختلف می‌باشد.

### نتایج و بحث

#### نفوذ

با استفاده از روش Ebrahimian et al. و Shepard et al., (1993) (2010) پارامترهای معادله فیلیپ برای مزارع مختلف به دست

آبیاری جویچه‌ای و نواری در ایران نشان دادند که روش دونقطه‌ای جدید دارای دقت مناسبی در برآورد مشخصات نفوذ آب در خاک است.



شکل ۱- مقایسه منحنی نفوذ تجمعی به‌دست آمده از روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳) و ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰)

(۲۰۱۰) برای به‌دست آوردن منحنی پیشروی، پارامترهای به‌دست آمده از روش ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) برای معادله فیلیپ (معادلات ۱۶ و ۱۷) را در معادله بیلان حجم شپارد و همکاران (۱۹۹۳) (معادله ۵) قرار داده و منحنی پیشروی را محاسبه کردند.

#### پیشروی آب

از آنجا که معادله بیلان حجمی در روش دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) ارائه نشده بود، در نتیجه، ابراهیمیان و همکاران

Walker و Flowell non-wheel، Flowell wheel کم‌برآورد محاسبه می‌کند. در این روش، بیشترین اختلاف بین نتایج مشاهده شده و شبیه‌سازی شده زمان پیشروی مربوط به مزرعه Walker با RMSE برابر با  $29/3$ ،  $E_a$  برابر  $47/7$  و  $R^2$  برابر با  $0/980$  بود. مزرعه Kimberly wheel با RMSE برابر با  $11/6$ ،  $E_a$  برابر  $6/0$  و  $R^2$  برابر با  $0/999$  دارای بهترین نتایج بود.

در روش سوم (دونقطه‌ای جدید) از رابطه (۲۵) به عنوان معادله بیلان استفاده شده است. مقدار توان معادله پیشروی (f) در این روش برای جویچه‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲، در تمامی مزارع، منحنی پیشروی به دست آمده با استفاده از این روش بسیار نزدیک به داده‌های مشاهده شده است. کمترین اختلاف بین زمان پیشروی محاسبه شده با روش (۳) و مقادیر مشاهده شده مربوط به مزرعه Kimberly wheel با RMSE برابر با  $2/26$ ،  $E_a$  برابر  $2/65$  و  $R^2$  برابر با  $0/999$  بود.

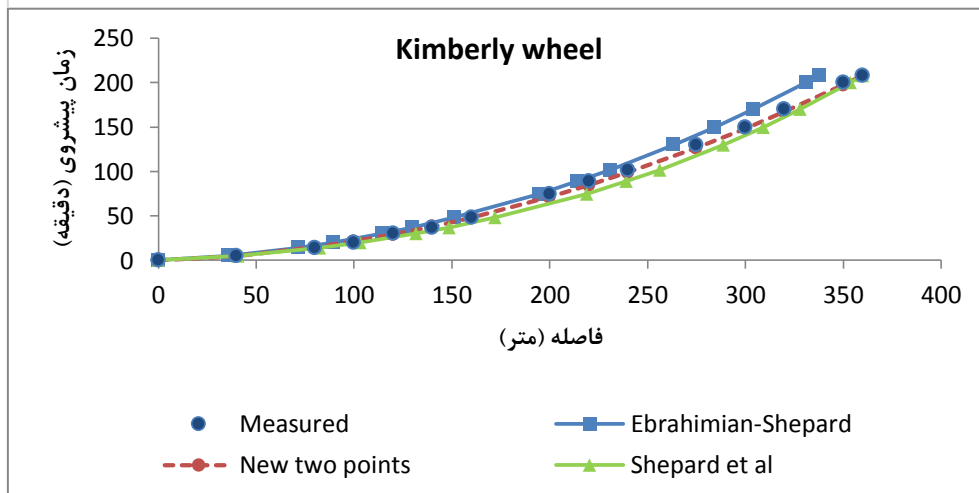
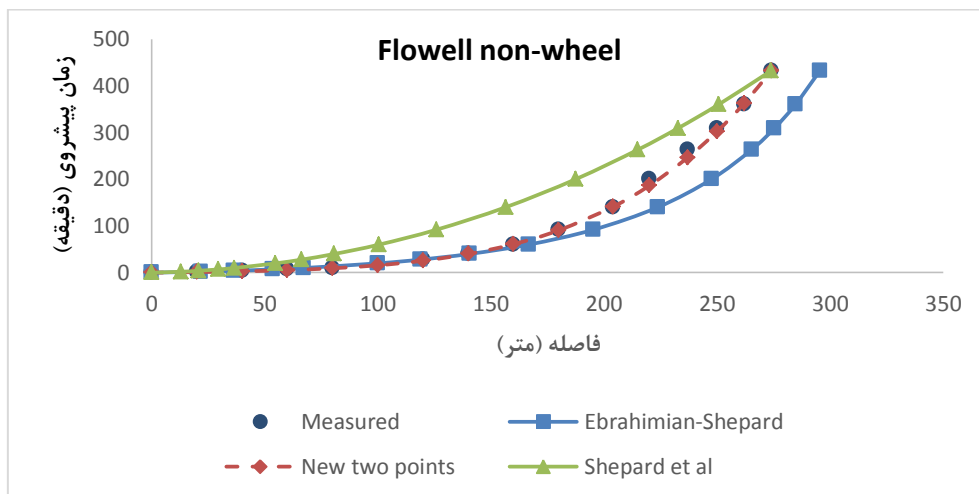
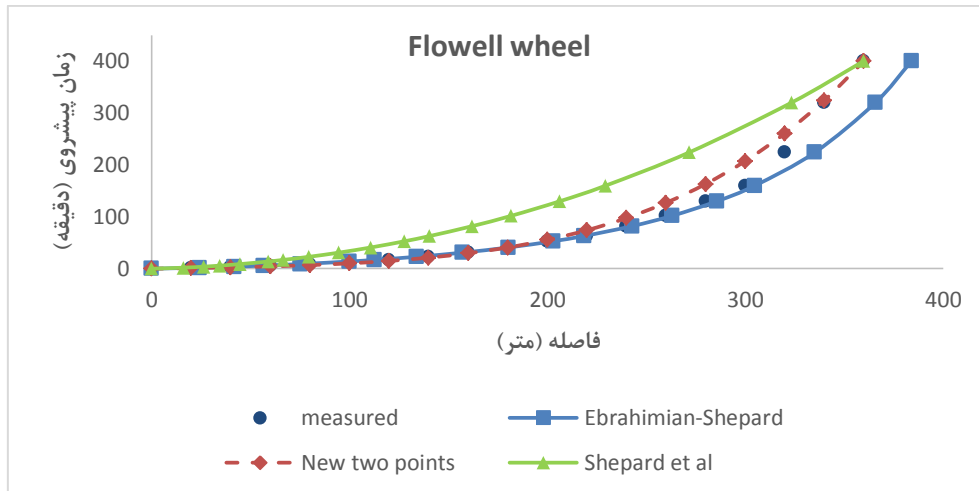
در مزرعه Kimberly wheel، مقدار توان معادله پیشروی (r) در روش دو نقطه‌ای (برابر با  $0/55$ ) نزدیک به مقدار توان پیشروی در روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳) است. در نتیجه، نتایج مربوط به هر سه روش نزدیک به یکدیگر شده است. در مزرعه Benson نیز مقدار r برابر با  $0/59$  بود که نتایج مربوط به پیشروی آب در این مزرعه نیز در هر سه روش نزدیک به یکدیگر است. در مزارع Flowell wheel، Flowell non-wheel و Walker مقدار r کمتر از  $0/5$  بود. در نتیجه، منحنی پیشروی آب بیش‌برآورد شده است. به طور کلی، با افزایش فاصله مقدار r از  $0/5$ ، دقت روش شپارد و همکاران (۱۹۹۳) کاهش یافته است.

مقدار میانگین پارامترهای آماری برای هر سه روش نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. میانگین مقدار RMSE در روش‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با  $40/5$ ،  $30/3$  و  $10/9$  بود که نشان دهنده دقت بیشتر روش سوم (روش ارائه شده در این تحقیق) نسبت به دو روش دیگر بود. کمترین مقدار  $E_a$  در روش سوم با مقدار  $9/6$  درصد و بیشترین مقدار  $E_a$  با  $20/4$  درصد در روش اول بود. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده در این تحقیق با دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر، منحنی پیشروی آب در جویچه را پیش‌بینی می‌کند. مقدار ضریب تعیین برای هر سه روش بیشتر از  $0/97$  بود.

شکل ۲، منحنی پیشروی آب را با استفاده از سه روش: (۱) تعیین پارامترهای معادله نفوذ با استفاده از روابط (۸) و (۹) و کاربرد رابطه (۷) به عنوان معادله بیلان حجمی (Shepard et al., 1993)، (۲) تعیین پارامترهای معادله نفوذ با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) و کاربرد رابطه (۷) به عنوان معادله بیلان حجمی (Ebrahimian et al., 1993) و (۳) تعیین پارامترهای معادله نفوذ با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) و کاربرد رابطه (۲۵) به عنوان معادله بیلان حجمی (دونقطه‌ای جدید) برای مزارع Flowell wheel، Flowell non-wheel، Benson، Kimberly wheel و Walker را نشان می‌دهد. جدول ۲، مقادیر  $E_a$ ، RMSE و  $R^2$  را برای روش‌های مختلف و مزارع متفاوت نشان می‌دهد. جدول ۴ مقدار پارامتر r را با استفاده از دو روش اندازه‌گیری شپارد و همکاران (۱۹۹۳) و ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهد.

در روش اول (Shepard et al., 1993) مقدار توان معادله پیشروی برابر با  $0/5$  است. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که این روش مقدار زمان پیشروی را در مزارع Flowell wheel، Flowell non-wheel و Walker بیش‌برآورد محاسبه می‌کند. مقدار زمان پیشروی با استفاده از (Shepard et al., 1993) بیشترین نزدیکی را در مزارع Kimberly wheel و Benson داشته است. بر اساس نتایج جدول ۲، بهترین نتایج پیشروی آب بر اساس روش اول در مزرعه Kimberly wheel با RMSE برابر با  $10/7$ ،  $E_a$  برابر  $5/54$  و  $R^2$  برابر با  $0/997$  بود. بیشترین اختلاف بین نتایج مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مربوط به مزرعه Walker با RMSE برابر با  $59/1$ ،  $E_a$  برابر  $27/3$  و  $R^2$  برابر با  $0/944$  بود. Shepard et al. (1993) روش بیان شده را برای خاک‌های سن واکین کالیفرنیا (San Joaquin Valley California) دارای بافت سنی تا رسی - لومی آزمایش کردند و نشان دادند که روش ذکر شده با دقت مناسبی منحنی پیشروی آب را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج (Khatri and Smith, 2006) نشان داد که مدل Shepard et al., (1993) دارای دقت کمتری نسبت به سایر مدل‌های برآورد پیشروی آب برای خاک‌های کوئینزلند استرالیا بود.

در روش دوم (Ebrahimian- Shepard) از معادله بیلان شپارد و همکاران (۱۹۹۳) استفاده شده است. در نتیجه، مقدار توان معادله پیشروی برابر با  $0/5$  است. این روش، مقدار زمان پیشروی را در مزارع







## نتیجه گیری

منحنی پیشروی آب و پارامترهای معادله نفوذ از بخش‌های اصلی ارزیابی یک سیستم آبیاری سطحی است. در سال‌های اخیر، ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) روشی را برای به‌دست آوردن پارامترهای معادله نفوذ فیلپ ارائه کردند. بر خلاف روش ارائه شده به وسیله ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) که پارامترهای معادله نفوذ به‌دست آمده از روش دونقطه‌ای را در معادله بیلان حجمی شپارد و همکاران (۱۹۹۳) قرار می‌دهد، در این تحقیق، معادله بیلان حجمی مربوط به روش ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است. معادله بیلان حجمی ارائه شده در این تحقیق برای تعدادی از مزارع آبیاری جویچه‌ای با شرایط ورودی و خاک متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که معادله بیلان حجمی ارائه شده در این تحقیق با دقت بیشتری پیش‌بینی منحنی پیشروی آب در جویچه را افزایش می‌دهد.

## تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-9819-55 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

- Gillies, M.H. and Smith, R.J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and runoff data. *Irrigation Science*. 24(1): 25-35.
- Horton, R.E. 1941. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Journal*. 5(C): 399- 417.
- James, L.G. 1988. *Principles of Farm Irrigation System Design*. John Wiley and Sons, New York, 543 p.
- Kay, M. 1990. Recent developments for improving water management in surface irrigation and overhead irrigation. *Agricultural Water Management*. 17: 7-23.
- Khatri, K.L. and Smith, R.J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrigation Scienc*. 25(1): 33-43.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Transaction of the Sixth Congress of International Society of Soil Science, Russian Part A*, pp. 17-21.
- Kreyszig, E. 1979. *Advanced engineering mathematics*. John Wiley and Sons, Inc., New York. N.Y.
- Lewis, M.R. and Milne, W.E. 1938. Analysis of border irrigation. *Agricultural Engineering*. 19(6): 267-272.
- McClymont, D.J and Smith, R. J. 1996. Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science*. 17(1): 15-22.
- Merriam, J.L. 1977. *Efficient Irrigation*. California Polytechnic and State University, San Luis Obispo, California.
- Nie, W., Fei, L. and Ma, X. 2012. Estimated infiltration parameters and Manning roughness in border irrigation. *Irrigation and Drainage Journal*. 61(2): 231-239.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 3. Moisture profiles and relation to experiment. *Soil Science*. 84(2): 163-178.
- Scaloppi, E.J., Merkley, G. P. and Willardson, L.S. 1995. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 121(1): 57-70.
- Shepard, J.S., Wallender, W.W. and Hopmans, J.W. 1993. One-point method for estimating furrow infiltration. *Transaction of the ASAE*. 36(2): 395-404.
- US Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Service. 1974. *National Engineering Handbook*. Section 15, Border Irrigation, National Technical Information Service, Washington, DC.
- Adamala, S., Raghuwanshi, N. and Mishra, A. 2014. Development of surface irrigation systems design and evaluation software (SIDES). *Computers and Electronics in Agriculture*. 100: 100-109.
- Clemmens, A. and Bautista, E. 2009. Toward physically based estimation of surface irrigation infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 135(5): 588-596.
- Duan, R., Fedler, C.B. and Borrelli, J. 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science*. 29: 379-389.
- 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. and Walker, W.R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transaction of the ASAE*. 25(2): 396-400.
- Ghorbani-Dashtaki, S.h., Homaei, M., Mahdian, M.H. and Kouchakzadeh, M. 2009. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management*. 23(13): 2777-2790.

- Walker, W.R. and Busman, J.D. 1990. Real-time estimation of furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 116(3): 299–318.
- Wilson, B.N. and Elliott, R.L. 1988. Furrow advance using simple routing models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 114(1): 104–117.
- Valiantzas, J.D. 2001. Optimal furrow design I: Time of advance equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 127(4): 201–208.
- Walker, W.R. 1989. SIRMOD: A model of surface irrigation. Utah State University, Logan, Utah.
- Walker, W.R. 2005. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(2): 129-136.

## Providing the Volume Balance Equation for the New Two-Point Method

H.R. Maghferati<sup>1</sup>, M.M. Chari<sup>2\*</sup>, P. Afrasiab<sup>3</sup>, M. Delbari<sup>4</sup>

Received: Dec.05, 2020

Accepted: Mar.21, 2020

### Abstract

Advance data and infiltration parameters are used to evaluate surface irrigation. Philip infiltration equation is one of the most widely used equations in surface irrigation. For the first time, Shepard et al. (1993) presented a one-point method to determine the parameters of the Philip infiltration equation in surface irrigation. In recent years, a new two-point method has been proposed to determine the parameters of Philip infiltration equation. In the new method, the volume balance equation is not presented. As a result, the Shepard et al. (1993) volume balance equation is used to determine the advance phase (Ebrahimian-Sheppard method). In this study, the volume balance equation for the new two-point method is presented. The volume balance equation presented in this study was evaluated with five independent furrow irrigation data sets and different input conditions. Results showed that mean value of root mean square error in Shepard et al. (1993), Ebrahimian-Sheppard (2010) method and new two points were 40.5, 30.3 and 10.9, respectively. The absolute mean error of prediction had the lowest equilibrium of 9.6% in the new two-point method followed by the Ebrahimian-Sheppard (2010) and Shepard et al. (1993) methods with 19.5 and 20.4%, respectively. The coefficient of determination for all three methods was more than 0.97. In general, it can be concluded that the method presented in this study predicts the advance curve with higher accuracy compared to the other two methods.

**Keywords:** Volume balance equation, Philip equation, Advance curve

---

1- M.Sc. Student, Water Engineering Department, University of Zabol

2- Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Zabol

3- Associate Professor, Water Engineering Department, University of Zabol

4- Associate Professor, Water Engineering Department, University of Zabol

(\*- Corresponding Author Email: mmahdichari@uoz.ac.ir)