

مدلسازی و تحلیل عددی جریان تحت شرایط آبیاری جویچه‌ای

علی کولائی¹، محمدعلی غلامی سفیدکوهی^{2*}، میرخالق ضیایاتبار احمدی³، حسن دادش‌زاده⁴

تاریخ دریافت: 1394/3/23 تاریخ پذیرش: 1394/8/20

چکیده

به منظور شبیه‌سازی توام جریانات کم عمق روی سطح خاک و نفوذ به درون آن، معادلات سنت - ونانت بسط داده شد. با توجه به عدم وجود راه حل تحلیلی جهت حل این نوع معادلات، از این رو محققین جهت حل این مسائل روش‌های عددی را پیشنهاد می‌کنند. در تحقیق حاضر از بین مدل‌های هیدرولیکی آبیاری سطحی مدل هیدرودینامیک کامل به دلیل شبیه‌سازی دقیق جریان و از بین روش‌های عددی دو الگوی عددی شامل خطوط مشخصه (HD-CH) و صریح لکس انتشاری (HD-LAX) برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر آبیاری سطحی استفاده و در ادامه برنامه‌های کامپیوتری به کمک زبان برنامه‌نویسی متلب تهیه شد. جهت ارزیابی روش‌های عددی از چهار سری داده‌های جویچه‌ای استفاده شد، که این داده‌ها از طریق آزمایش در مزرعه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین روش پیشنهادی در شرایط یکسان با مدل هیدرودینامیک نرم‌افزارهای SIRMOD و SRFR مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که هر دو الگوی عددی در شرایط جویچه‌ای با دقت مناسبی فرآیندهای مختلف جریان را شبیه‌سازی می‌کنند. با این حال نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهد مدل HD-LAX به واسطه روش حل دارای دقت مرتبه دوم است، و با متوسط ضریب تبیین، آماره خطا و کارایی مدل (0/88، 1/43، 0/815 و 0/91، 1/36، 0/834) به ترتیب برای مرحله پیشروی و پسروی و خطای نسبی (7/44 - و 19/8) درصد در برآورد حجم آب نفوذ یافته و رواناب، همچنین زمان محاسباتی کم‌تر جهت شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف جریان جویچه‌ای از دقت بالاتری نسبت به روش HD-CH برخوردار است. نتایج بررسی محاسباتی توسط روش پیشنهادی HD-LAX در مقایسه با روش‌های HD-SIRMOD و HD-SRFR نشان داد که در مرحله پیشروی روش پیشنهادی و مدل HD-SIRMOD اختلاف معنی‌داری ندارند در حالی که مدل HD-SRFR در سطح یک درصد با مقادیر مشاهده‌ای دارای اختلاف می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، هیدرودینامیک کامل، لکس، روش مشخصه

مقدمه

است تا مشخص شود که آیا این آب به برآورده ساختن نیاز آبیاری کمک می‌کند و اینکه چه مقدار از آن در اثر نفوذ عمقی و به شکل رواناب هدر می‌رود. بدین منظور هدف نهایی مطالعات هیدرولیکی آبیاری توصیه‌هایی است که به سطوح قابل قبولی از عملکرد مدیریت آب در مزرعه منجر شود (Burguete, Lacasta et al. 2014).

مهم‌ترین بخش در طراحی آبیاری سطحی فرموله کردن جریان می‌باشد که از پیچیدگی ویژه‌ای برخوردار است. معادلات مربوط به این جریان، حاصل دو معادله پیوستگی و اندازه حرکت جریان می‌باشد که به معادلات سنت - ونانت مشهورند. این معادلات به عنوان معادلات پایه‌ای در رشته‌های مختلف مهندسی آب از جمله آبیاری سطحی، نقش اساسی و مهم در حل مسائل دارد. از این رو برای حل این معادلات مدل‌های هیدرولیکی متعددی تهیه شدند که هر کدام محاسن و معایب خود را دارا می‌باشند. به‌طور کلی برای حل این معادلات از مدل‌های هیدرودینامیک کامل⁵ (HD)، اینرسی صفر¹

مطالعات مهندسی هیدرولیک آبیاری سطحی با ارزیابی عملکرد این سامانه مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری در مزرعه آغاز می‌گردد تا مقدار آب مصرفی در آبیاری تعیین شود. آبیاری سطحی بسته به وضعیت توپوگرافی و نوع محصول با روش‌های مختلفی از جمله روش نواری، جویچه‌ای و کرتی انجام می‌شود. این روش‌ها از تکنیک ساده‌ای برخوردار هستند و به دلیل سادگی و نیاز به کارگر، در کشورهای در حال توسعه بیش‌تر رواج دارند. نکته مورد توجه در طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی، توزیع آب نفوذی در امتداد مزرعه

- 1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 - 2- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 - 3- استاد گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
 - 4- مدرس گروه ریاضی دانشگاه پیام نور مازندران
- * - نویسنده مسئول: (Email: ma.gholami@sanru.ac.ir)

از معادلات ریچاردز براساس روش المان محدود استفاده شد. آن‌ها عنوان نمودند که در تمامی موارد آزمایشی، پیش‌بینی مدل شباهت خوبی با داده‌های مزرعه‌ای دارد (Banti, Zissis et al. 2011). دانگ و زو در تحقیقی مشابه به شبیه‌سازی ترکیبی جریان سطحی و زیر سطحی در آبیاری نواری پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی جریان سطحی از روش حجم محدود و الگوریتم ضمنی آن استفاده کردند. نتایج نشان داد دقت روش پیشنهادی نسبت به روش مبتنی بر تفاضل محدود کمتر می‌باشد (Dong, Xu et al. 2013). سروش فنتون و همکاران براساس روش تفاضل محدود و دو الگوی عددی صریح اولیر و ضمنی کرنک نیکلسون معادلات جریان آرام که فرم کاهش یافته معادلات جریان می‌باشد جهت شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای حل نمودند. آن‌ها عنوان داشتند در تمامی موارد آزمایشی، پیش‌بینی مدل شباهت مناسبی با داده‌های مزرعه دارد (Soroush, Fenton et al. 2013). بورگویت و همکاران جهت شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای و کود آبیاری سطحی معادلات یک بعدی سنت و نانت با استفاده از روش تفاضل محدود (الگوی عددی صریح اولیری) حل کردند. نتایج نشان داد که معادلات جریان و همرفت با استفاده از طرح صریح اولیری قدرت تفکیک بالایی دارد و باعث اجتناب محدودیت بیشتر در گام زمانی می‌شود. همچنین سرعت محاسباتی این مدل در شبیه‌سازی جویچه‌های با طول کوتاه زیاد است. این در حالی است که جویچه‌های با طول زیاد و مدت زمان آبیاری طولانی، این مدل کندتر عمل می‌کند، اما سرعت محاسباتی قابل قبول خواهد داشت (Burguete, Lacasta et al. 2014).

ملاحظه شد با توجه به ماهیت فیزیکی پدیده‌های مربوط به معادلات سنت - و نانت، که در آن‌ها یک کمیت خاص در امتداد مشخص به نام سطوح مشخصه منتشر می‌شود، روش‌های خطوط مشخصه و تفاضل محدود (صریح) مناسب‌تر می‌باشد. در چند دهه گذشته، مدل‌هایی مبتنی بر کامپیوتر تهیه شد تا از این فرآیند تحلیلی پشتیبانی کنند. رایج‌ترین موتورهای شبیه‌سازی، SRFR (Strelkoff, Clemmens et al. 1999) و SIRM (Walker 2003) را می‌توان (با فرض یک بعدی بودن جریان) برای مدل‌سازی جویچه‌ها استفاده کرد. این بدان معنا است که تمام ویژگی‌های جریان تنها با فاصله در امتداد طول مزرعه و با زمان تغییر می‌یابند.

در تحقیق حاضر مدل هیدرودینامیک کامل در شرایط آبیاری جویچه‌ای با استفاده از روش خطوط مشخصه (HD-CH) و الگوی تفاضل محدود شامل روش عددی لکس انتشاری (HD-LAX) گسسته‌سازی و سپس به شبیه‌سازی مراحل مختلف جریان پرداخته شد. در این تحقیق براساس معیارهای دقت و زمان محاسبات بهترین روش انتخاب شد. در نهایت با دو مدل هیدرودینامیکی رایج در آبیاری سطحی شامل HD-SIRM و HD-SRFR مورد مقایسه قرار گرفت تا صحت مدل معرفی مورد ارزیابی قرار گیرد.

(ZI)، موج سینماتیک² (KW)، بیلان حجم³ (VB) و جریان پایدار⁴ (SF) استفاده می‌شود (Abbasi, Shooshtari et al. 2003). از بین مدل‌های بیان شده، مدل هیدرودینامیک کامل از پیچیده‌گی حل برخوردار می‌باشد و معمولاً مبنای حل معادلات سنت - و نانت محسوب می‌شود (Strelkoff and Katopodes 1977).

مرور منابع نشان می‌دهد که روش خطوط مشخصه از روش‌های اولیه حل مدل‌های هیدرولیکی آبیاری سطحی محسوب می‌شود (Strelkoff, Clemmens et al. 1999). اگر چه این روش یکی از متداول‌ترین الگو در حل معادلات حاکم می‌باشد ولی به دلیل پیچیدگی و سختی این روش عددی محققین روش‌های دیگری جهت حل ارائه کردند (Wallender and Rayej 1990). برای بررسی مدل هیدرودینامیک کامل تحت شرایط آبیاری جویچه‌ای پیشنهاد نمودند که از روش انتگرال اولیری استفاده شود. باتیستا و والیندر یک مدل تفاضل محدود بر اساس الگوریتم shooting را برای شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای ارائه کردند و عنوان نمودند مدلی که براساس گام‌های مکانی و زمانی متغیر حل شود، نسبت به مدل‌هایی که براساس گام مکانی ثابت و گام زمانی متغیر تهیه شده‌اند از سرعت همگرایی کم‌تری برخوردار است (Bautista and Wallender 1992). عباسی (1374) مدل هیدرودینامیک کامل را به روش تفاضل محدود و به صورت کاملاً ضمنی برای شبیه‌سازی مراحل مختلف جریان در آبیاری نواری استفاده کرد. برادفورد و کاتوپودس به بررسی مدل حجم محدود در شبیه‌سازی آبیاری کرتی تسطیح نشده پرداختند. در این مدل جریان با استفاده از الگوی عددی صریح بسط داده شد و در نهایت پیش‌بینی مدل در حالت یک بعدی و دو بعدی با داده‌های اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفت (Bradford and Katopodes 2001). کلمنز و استریلکوف یک راه حل عددی مبتنی بر روش تفاضل محدود و به صورت الگوریتم صریح برای شبیه‌سازی دو بعدی جریان از یک منبع نقطه‌ای در کرت غیر مسطح ارائه نمود (Clemmens, Strelkoff et al. 2003). با استفاده از روش مبتنی بر حجم کنترل متحرک و به صورت ضمنی به شبیه‌سازی جریان در آبیاری نواری و جویچه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که مدل معرفی شده در پیش‌بینی مراحل پیشروی، پسروی، حجم نفوذ یافته و رواناب نتایج رضایت بخش می‌دهد. بنتی و زیسس با استفاده از یک مدل ترکیبی سطحی و زیر سطحی به شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای پرداختند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی معادلات حاکم بصورت یک بعدی براساس روش تفاضل محدود و الگوی عددی صریح مک کورمک و برای حالت زیر سطحی

- 1- Zero-Inertia Models
- 2- Kinematic Wave Model
- 3- Water volume balance models
- 4- Steady flow models

$$N = g(S_o - S_f) + \frac{g}{BC} I \quad M = g(S_o - S_f) - \frac{g}{BC} I$$

$$W = \frac{D.I}{2A}$$

انتگرال گیری از روابط فوق حول منحنی مشخصه، روابط زیر حاصل می‌گردد حال با در نظر گرفتن A و B به عنوان نقاط معلوم و نقطه P به عنوان گره مجهول، با داشتن سرعت و عمق جریان در نقاط A و B، می‌توان مقادیر سرعت و عمق جریان را در نقطه P به دست آورد.

$$(v_P - v_A) + \left(\frac{g}{C}\right)_A (y_P - y_A) = M(t_P - t_A) + W \int_A^P v dt \quad (5)$$

$$(v_P - v_B) + \left(\frac{g}{C}\right)_B (y_P - y_B) = N(t_P - t_B) + W \int_B^P v dt \quad (6)$$

برای حل معادلات فوق استفاده از روش‌های عددی ضروری است زیرا مقادیر v و c در طول مشخصه‌ها نامعلوم است. با استفاده از قاعده ذوزنقه‌ای انتگرال $\int_A^P v dt$ و $\int_B^P v dt$ به صورت رابطه (7) تقریب زده شد. معادلات به صورت روابط (8) و (9) نوشته می‌شوند.

$$\int_B^P v dt = \frac{(t_P - t_B)}{2} [v_P + v_B] + O(\Delta t^2) \quad (7)$$

$$\int_A^P v dt = \frac{(t_P - t_A)}{2} [v_P + v_A] + O(\Delta t^2) \quad (8)$$

$$v_P = \frac{1}{1 - \frac{W}{2}(t_P - t_A)} \left[\left[1 + \frac{W}{2}(t_P - t_A) \right] v_A + \left(\frac{g}{C}\right)_A y_A + M(t_P - t_A) - \left(\frac{g}{C}\right)_A y_P \right] \quad (9)$$

$$v_P = \frac{1}{1 - \frac{W}{2}(t_P - t_B)} \left[\left[1 + \frac{W}{2}(t_P - t_B) \right] v_B + \left(\frac{g}{C}\right)_B y_B + N(t_P - t_B) + \left(\frac{g}{C}\right)_B y_P \right]$$

به‌طور ساده به‌صورت روابط زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} v_P = L [c_P - C_A y_P] \\ v_P = L [c_n + C_B y_P] \end{cases} \quad (10)$$

که در روابط فوق با در نظر گرفتن

$$C_A = \left(\frac{g}{C}\right)_A \quad C_B = \left(\frac{g}{C}\right)_B$$

و $L = \frac{1}{1 - \frac{W}{2}(t_P - t_A)}$

$$c_P = \left[1 + \frac{W}{2}(t_P - t_A) \right] v_A + C_A y_A + M(t_P - t_A) \quad (11)$$

مواد و روش‌ها

اصول تئوری حل الگوریتم عددی

معادلات سنت - ونانت یک جفت معادله دیفرانسیل جزئی می‌باشد، که به شکل کامل، فاقد حل تحلیلی بود و بیش‌تر، آن را با روش‌های عددی حل می‌نمایند. این معادلات پس از تعدیل، به جهت شمول نفوذ از سطح آب، به‌صورت زیر ارائه می‌شود (Strelkoff and Katopodes 1977).

$$\frac{A \partial v}{\partial x} + \frac{Bv \partial y}{\partial x} + \frac{B \partial y}{\partial t} + I = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f + \frac{DvI}{2gA} \quad (2)$$

y : عمق آب، t : زمان از آغاز آبیاری، V : سرعت جریان آب (تابعی از X و t)، X : فاصله از ابتدای جویچه، I : شدت نفوذ آب به داخل خاک (تابعی از X و t)، g : شتاب ثقلی، S₀ : شیب طولی جویچه، S_f : شیب خط انرژی، A : سطح مقطع جریان، B : عرض بالایی جریان آب و D : ثابت عددی که در صورتی که معادله مومنتم از قانون دوم نیوتن مشتق شود مقدار آن برابر با یک و در صورتی که از قانون بقای انرژی مشتق شده باشد مقدار آن 0/5 در نظر گرفته می‌شود (Bautista and Wallender 1992).

الگوی عددی مشخصه (HD-CH)

برای حل معادله مشخصه در ابتدا معادله (1) را در یک عدد λ ضرب و سپس با معادله (2) جمع و ساده‌سازی شد (Gerald, 1989). با فرض $\lambda_1 = \frac{g}{c}$ و $\lambda_2 = \frac{g}{c}$ دو معادله دیفرانسیلی در منحنی مشخصه حاصل می‌شود.

$$\lambda_1 \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v + c \\ Dv + \frac{g}{c} Dy = \left[g(S_o - S_f) - \frac{g}{BC} I \right] dt + \frac{DI}{2A} v \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_2 \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v - c \\ Dv - \frac{g}{c} Dy = \left[g(S_o - S_f) + \frac{g}{BC} I \right] dt + \frac{DI}{2A} v \end{cases} \quad (4)$$

این معادلات به ترتیب معادله‌های مشخصه مثبت و منفی است، البته این معادلات فقط در طول منحنی‌های مشخصه صدق می‌کنند و برای تمامی نقاط شبکه صادق نیستند. و با در نظر گرفتن فرض:

به صورت توابعی از زمان در مرزهای پایین دست بازه مورد نظر تعریف شود. شرایط مرزی برای حل رابطه عددی به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(0, t_k) = y_i \quad k, i = 0, \dots, n \\ v(0, t_k) = v_i \end{array} \right. \quad \text{شرایط مرزی}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x_i, 0) = 0 \\ v(x_0, 0) = v_0 \quad i = 0, \dots, n \\ v(x_{i \neq 0}, 0) = 0 \end{array} \right. \quad \text{شرایط اولیه}$$

این معادلات بسته به اینکه در چه فازی از آبیاری و در چه نقطه-ای از میدان حل اعمال شوند، متفاوت می‌باشد. شرایط فاز پیشروی در مرز بالادست جریان به جز در زمان پسروی در بقیه مراحل ثابت در نظر گرفته شد. در این حالت دبی جریان معلوم و مشخص بود ولی عمق جریان مجهول و در هر گام زمانی تعیین گردید.

$$Q(0, t) = Q_0 \quad 0 < t < t_{co} \quad (17)$$

در روابط فوق، Q_0 دبی ورودی و t_{co} زمان قطع جریان است. مرز پایین دست در مرحله پیشروی یک مرز متحرک است که در هر گام زمانی به سمت انتهای جویچه در حال حرکت است. در این مرز عمق جریان و عمق آب نفوذی دارای تغییرات بیش‌تری می‌باشند. در این تحقیق از فرض (عباسی 1374) در شبیه‌سازی مرز پایین دست استفاده شد. شرایط مرزی در این مرحله به صورت زیر بیان می‌شود.

$$Q(x_a, t) = A(x_a, t) = 0 \quad 0 < t < t_a \quad (18)$$

x_a محل جبهه پیشروی و t_a زمان رسیدن جریان به x_a می‌باشد. پس از رسیدن آب به انتهای جویچه، در صورتی که جریان ورودی به جویچه ادامه داشته باشد، فاز ذخیره شروع می‌شود. در این فاز شرایط مرز بالادست همانند فاز پیشروی بود و هیچ‌گونه تفاوتی با آن نداشته و در این مرز معتبر می‌باشد. مرز پایین دست فاز ذخیره بر خلاف فاز پیشروی یک مرز متحرک نمی‌باشد، بلکه یک مرز ثابت بود که آب به صورت رواناب از آن تخلیه می‌گردد. اما در فاز تخلیه معادلات حاکم همان معادلات فاز ذخیره می‌باشد و هیچ‌گونه تغییری نخواهد کرد. در این فاز دبی ورودی صفر می‌باشد و وقتی که عمق جریان در یک گره به 5 درصد عمق اولیه جریان رسید، عمق جریان در آن گره صفر منظور شد. در نهایت فاز پسروی به طور مرتب عمق و سرعت جریان در حال کاهش می‌باشد. با کاهش عمق و سرعت جریان، مشاهده موقعیت لبه انتهایی جبهه پسروی مشکل می‌شود. در این مرحله از محاسبات شرایط مرزی به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$A(x_R, t) = Q(x_R, t) = 0 \quad t_{co} < t < t_R \quad (19)$$

که x_R محل جبهه عقب نشینی (پسروی) و t_R زمان پسروی در محل جبهه عقب نشینی می‌باشد. در این تحقیق برای پایداری

$$c_n = \left[1 + \frac{W}{2}(t_p - t_B) \right] v_B + c_B y_B + M(t_p - t_B) \quad (12)$$

که c_n و c_p در بازه‌های $t_p - t_A$ و $t_p - t_B$ ثابت هستند، بنابراین با داشتن مقادیر سرعت (v) و عمق جریان (y) در نقاط A و B و حل دستگاه (12) مقادیر v و y در نقطه‌ای P حاصل خواهد شد. با همین روند برای تمامی نقاط شبکه مقادیر عمق و سرعت جریان محاسبه شد.

الگوی عددی HD-LAX

برای تقریب مدل هیدرودینامیک کامل به روش لکس از تقریب-های تفاضل مرکزی برای مشتق جزئی توابع نسبت به مکان، و تفاضل چهار نقطه‌ای برای عبارت دیفرانسیلی نسبت به زمان استفاده شد (Chanson 2004).

$$\frac{\partial f}{\partial x}(k, i) = \frac{f_{i+1}^k - f_{i-1}^k}{2\Delta x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t}(k+1, i) = \frac{f_i^{k+1} - f_i^k}{\Delta t} \quad (14)$$

که در آن α عدد حقیقی می‌باشد، و مقدار آن بین $0 < \alpha < 1$ متغیر می‌باشد و در روابط فوق برای سادگی f را به جای هر دو متغیر مستقل v و y به کار رفته است. با جایگذاری تقریب‌های فوق در معادلات (1) و (2) مقادیر y_i^{k+1} و v_i^{k+1} به طور صریح نسبت به مقادیر عمق و سرعت جریان در سطح زمانی k ام محاسبه می‌شود.

$$y_i^{k+1} = y^* - \left(\frac{A}{B} \right) \left(\frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) (v_{i+1}^k - v_{i-1}^k) - \left(\frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) v^* (y_{i+1}^k - y_i^k) - \frac{\Delta t}{B} I^* \quad (16)$$

$$v_i^{k+1} = v^* - \left(\frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) v^* (v_{i+1}^k - v_{i-1}^k) - g \left(\frac{\Delta t}{2\Delta x} \right) (y_{i+1}^k - y_i^k) + g \Delta t (S_0 - S_f) + \frac{D}{2A} \Delta t v^* I^*$$

شرایط مرزی¹ و اولیه² و شرط پایداری

برای مشخص کردن مقادیر واقعی متغیرهای مجهول در زمان و مکان‌های مختلف، باید مقادیر اولیه آن‌ها و همچنین مقادیر آن‌ها در دو انتهای جریان معلوم باشد. شرایط اولیه می‌تواند به صورت تعیین پارامترهای جریان نظیر عمق و سرعت در حالت جریان غیر دائمی برای تمام نقاط بر روی محور x در لحظه شروع محاسبات بیان نمود. به علت پایین بودن عدد فرود و زیر بحرانی بودن جریان شرایط مرزی در پایین دست مورد نیاز است که این شرایط مرزی می‌تواند به صورت رابطه‌ی مشخصات جریان نظیر عمق و سرعت و یا بیان این متغیرها

1- Boundary conditions

2- Initial conditions

ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بافت خاک مورد مطالعه دارای بافت سنگین می‌باشد. سپس با توجه به شیب طولی و توپوگرافی زمین، جویچه‌هایی جهت انجام آزمایش احداث و برای جلوگیری از اثرات نشست جانبی در جویچه‌ها، در دو طرف آن جریان برقرار گردید (جویچه محافظ). تمامی جویچه‌ها، زهکش آزاد داشتند و همچنین جهت ارزیابی روش‌های عددی، میخکوبی در جویچه‌ها به فواصل نیم متر انجام شد و سپس بیشینه دبی غیر فرسایشی در مزرعه با آزمون و خطا به دست آمد. لازم به توضیح است که با توجه به شرایط زمین از نظر توپوگرافی و بافت خاک این روش با اطمینان بهتری نسبت به دیگر روش‌های تجربی بود. البته تمام دبی‌های به دست آمده با این روش‌ها مورد بررسی و مقایسه با روابط تجربی قرار گرفت. لذا پس از اطمینان از دبی‌های حاصله این بده از جریان مورد اجرا قرار گرفت، جهت رسیدن به بالاترین بازده آبیاری، ارزیابی با دبی‌های فرسایشی و دبی کمتر از دبی بیشینه غیر فرسایشی صورت گرفت. مشخصات هندسی جویچه‌های مورد آزمایش در جدول (2) ارائه شد.

آزمایشات در تابستان سال 1392 و در شرایط بدون کشت انجام شد به طوری که برای اندازه‌گیری دبی ورودی و خروجی از فلوم‌های WSC³ استفاده گردید. آزمایشات با ورود آب به جویچه آغاز و زمان رسیدن آب به هر یک از ایستگاه‌ها یادداشت گردید (زمان پیش‌روی). پس از رسیدن جریان به ایستگاه آخر (انتهای مزرعه) برای تمامی جویچه‌ها 25 دقیقه زمان به عنوان آبیاری کامل (زمان ذخیره) در نظر گرفته، در این وضعیت رواناب سطحی از مزرعه اندازه‌گیری شد. پس از قطع جریان ورودی به مزرعه زمان ناپدید شدن آب در سطح مزرعه در هر یک از ایستگاه‌ها نیز یادداشت گردید. به منظور تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف - لوئیس، از روش ورودی - خروجی برای تعیین سرعت نفوذ نهایی (f_0) و از روش دو نقطه‌ای (Elliott, Walker et al. 1983) برای تعیین ضرایب معادله (a و K) استفاده شد، برای مشخص کردن ضریب زبری مانینگ از توصیه سازمان حفاظت خاک آمریکا استفاده شد که نتایج آن در جدول (2) ارائه شد.

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی و بررسی دقت روش‌ها عددی در پیش‌بینی فرآیندهای مختلف جریان آبیاری از ضرایب آماری مانند R^2 ، RMSE، EF و RE استفاده شد. آماره ضریب تبیین (R^2) شاخصی است که میزان خطی بودن رابطه بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی را نشان می‌دهد. هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، رابطه خطی مورد نظر مشهودتر است. مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) همواره مثبت بوده و بهترین حالت زمانی است که

الگوی عددی صریح LAX از عدد کورانت¹ استفاده شد. لازم است که این معیار در تمام گره‌های شبکه کم‌تر یا مساوی یک باشد. چنانچه مقدار عددی کورانت از یک بیش‌تر باشد باید گام زمانی را کاهش داد و اگر مقدار آن به طور قابل ملاحظه‌ای از یک کم‌تر باشد باید گام زمانی را افزایش داد که بیان ریاضی این معیار به صورت رابطه (20) می‌باشد (Chanson 2004). تمام مراحل حل عددی مدل هیدرودینامیک با کد نویسی در محیط M-File برنامه 8 Matlab انجام شد.

$$c_r = \frac{|V| + \sqrt{gy}}{\frac{\Delta x}{\Delta t}} \quad (20)$$

مدل رایانه‌ای SFRF و SIRM0D

مدل رایانه‌ای SIRM0D یک بسته نرم‌افزاری جامع برای شبیه‌سازی هیدرولیک سیستم‌های آبیاری سطحی در سطح مزرعه با حل هیدرودینامیکی معادلات سنت - ونانت است که با استفاده از روش عددی انتگرال اویلری، زمان و مکان متغیر خروجی را ارائه می‌دهد. این نرم‌افزار در تمامی روش‌های آبیاری سطحی از جمله آبیاری جویچه‌ای قابل اجرا است و قادر به اعمال مدیریت آبیاری در مورد جریان‌های موجی، کاهش دبی و آبیاری انتهایی باز یا انتهایی بسته می‌باشد (Walker 2003). در این تحقیق از برنامه 2006 SIRM0D III که ویرایش جدیدی از بسته نرم‌افزاری مربوط به نسخه اصلی است استفاده شد. با توجه به اینکه این نرم‌افزار شامل سه الگوی عددی هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک است، در این تحقیق خروجی مدل هیدرودینامیک مدنظر قرار گرفت.

مدل SFRF یک مدل ریاضی یک بعدی برای شبیه‌سازی، ارزیابی و طراحی روش‌ها و رژیم‌های مختلف آبیاری سطحی است که توسط سازمان حفاظت منابع طبیعی آمریکا² ارائه شد. اساس کار مدل براساس حل عددی معادلات سنت - ونانت در فرم مدل هیدرودینامیکی کامل با استفاده از روش انتگرال اویلری است به - طوری که عملکرد این مدل بسیار شبیه به مدل SIRM0D می‌باشد (Strelkoff, Clemmens et al. 1998).

داده‌های تحقیق

جهت ارزیابی روش‌های عددی مبادرت به انجام آزمایش صحرائی شد. بدین منظور یک قطعه زمین زراعی به مساحت 1000 متر مربع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انتخاب شد. بافت خاک و بعضی از مشخصات فیزیکی مزرعه در جدول (1)

1- Courant Number

2- Natural Resources Conservation Servicer (NRCS)

مقدار آن به صفر نزدیک شود. مقدار (EF) نیز نشان دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت، تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها تغییر می‌کند.

جدول 1- مشخصات فیزیک خاک مزرعه تحقیقاتی

عمق (cm)	درصد ذرات خاک			بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری gr/cm ³	رطوبت جرمی
	رس	سیلت	شن			
0-25	42	24	34	رسی	1/35	0/3
25-50	46	39	15	رسی	1/35	0/3
50-75	25	34	41	رسی	1/4	0/34
75-100	21	30	49	لومی - رسی	1/42	0/34

جدول 2- مشخصات هندسی و هیدرولیکی جویچه‌های آزمایشی

مزارع آزمایشی				پارامترها
F ₄	F ₃	F ₂	F ₁	
40	40	60	60	طول (m)
0/75	0/75	0/75	0/75	فاصله (m)
0/0011	0/0011	0/0013	0/0013	شیب (m/m)
0/04	0/04	0/04	0/04	ضریب زبری
0/5	0/75	0/5	0/75	جریان ورودی (lps)
45	38	65	50	زمان قطع جریان (min)
0/151	0/624	0/3	0/4	a
0/007	0/0027	0/0054	0/0038	k(m ² /min ³)
0/0004	0/0003	0/0003	0/0003	f _o (m ² /min/m)
0/59	0/59	0/66	0/66	δ ₁
1/29	1/29	1/37	1/37	δ ₂
0/21	0/21	2/51	2/51	ρ ₁
2/62	2/62	0/73	0/73	ρ ₂

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_o)^2}{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2} \quad (24)$$

$$RE = \frac{V_p - V_o}{V_o} \times 100 \quad (25)$$

که در رابطه (25)، V_p: حجم تخمین زده توسط مدل و V_o: حجم اندازه‌گیری در مزرعه می‌باشد. \bar{X}_p و \bar{X}_o متوسط مقادیر مشاهده در مزرعه و پیش‌بینی توسط مدل می‌باشد. برای ارزیابی زمان‌های پیشروی و پسروی اندازه‌گیری و محاسبه شده توسط روش پیشنهادی از اصول آماری (آزمون t-test) و نرم‌افزار آماری Sigma

هم‌چنین به منظور ارزیابی مقادیر رواناب و مجموعه حجم آب نفوذ یافته از معیار خطای نسبی (RE) برحسب درصد استفاده شد (Moravejalahkami, Mostafazadeh-Fard et al. 2009). بیان ریاضی چهار شاخص فوق به صورت روابط زیر می‌باشد.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)(X_p - \bar{X}_p) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^n (X_p - \bar{X}_p)^2} \quad (22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_o)^2}{n}} \quad (23)$$

شدن مدل وجود دارد. به طور نمونه، با گام مکانی 0/25 متر مدل در قسمتی از طول جویچه، مرحله پیشروی را مناسب شبیه‌سازی می‌نماید اما پس از طی مسافتی در طول جویچه، مدل ناپایدار و ادامه‌های مرحله پیشروی شبیه‌سازی نمی‌شود. این مسئله برای مدل‌های اینرسی صفر (Schwankl and Wallender 1988)، و هیدرودینامیک (Aminizadeh, Liaghat et al. 2006) و (Bautista and Wallender 1992) که در این مدل‌ها از راه حل صریح جهت شبیه‌سازی جریان استفاده شد مشاهده گردید. نتایج این محققین نشان داد که با کاهش گام مکانی، پیچیدگی حل به سرعت افزایش یافت و مدل قادر به شبیه‌سازی مرحله‌ی پیشروی با گام مکانی کوچک نمی‌باشد. از طرفی دیگر هر چه گام مکانی بزرگ‌تر در نظر گرفته شود باید اندازه‌ی گام زمانی را در مرحله ذخیره، بزرگ‌تر در نظر گرفت تا مدل در مرحله ذخیره ناپایدار نشود. از این رو با در نظر گرفتن تمام عوامل فوق گام مکانی در این تحقیق 0/5 متر در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی بعد، شبیه‌سازی جویچه با در نظر گرفتن گام مکانی ثابت و گام زمانی متغیر شبیه‌سازی گردید که در جدول (3) ارائه شد. همانطور که از این جدول ملاحظه می‌شود یکنواختی توزیع، نسبت رواناب برای هر یک از گام‌های مکانی ثابت و زمانی متفاوت ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده پایداری، نتایج مدل به اندازه گام‌های زمانی حساس نمی‌باشد.

در نهایت معادلات حاکم در آبیاری سطحی به کمک دو الگوی عددی برای گام زمانی متغیر یک تا دو دقیقه و گام مکانی 0/5 متر در یک شبکه مستطیلی در صفحه $x-t$ حل شدند، این فواصل مکانی و زمانی برای تمام مراحل آبیاری یکسان در نظر گرفته شد. سپس جهت کنترل پایداری محدوده عددی کورانت در طول شبیه‌سازی برای روش HD-LAX بررسی شد.

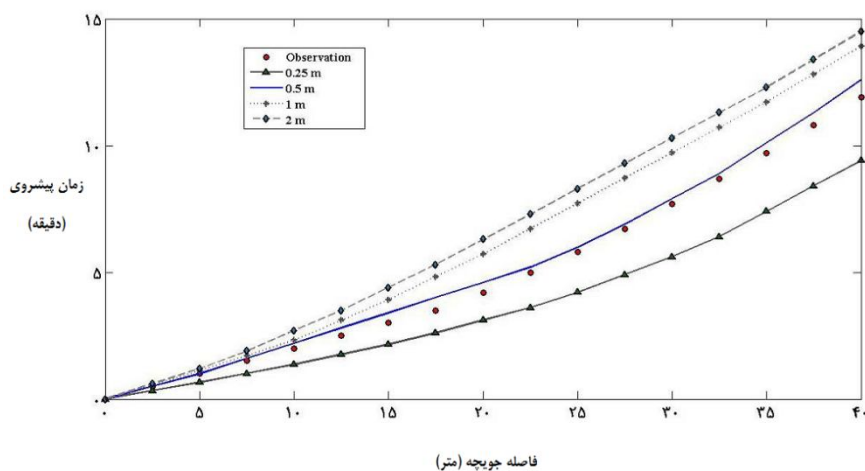
Plot استفاده شد. این آزمون به صورت ردیفی برای هر یک از خروجی مدل‌های عددی پیشنهادی در دو سطح 1 و 5 درصد آماری اعمال شد.

نتایج

بررسی اندازه‌های گام‌های (مکانی و زمانی) و بررسی پایداری عددی

یکی از عوامل تأثیرگذار روی نتایج محاسباتی مدل هیدرولیکی به خصوص زمانی که با استفاده از الگوریتم‌های عددی تفاضل محدود و مشخصه گسسته شوند، انتخاب اندازه گام‌های زمانی و مکانی است. چنانچه مدل با اندازه مناسب آن اجراء نشود، ممکن است نتایج مدل فاصله زیادی از نتایج مزرعه‌ای داشته باشد. با توجه به ثابت در نظر گرفتن گام‌های مکانی در شبیه‌سازی مراحل مختلف آبیاری، از این رو لازم است مقدار گام مکانی مناسب مورد بررسی و شناسایی قرار بگیرد بدین منظور در تحقیق حاضر از تکنیک (Aminizadeh, Liaghat et al. 2006) استفاده شد. مرحله‌ی پیشروی با سری داده‌های مشاهده‌ای برای گام‌های مکانی 0/25، 0/5، 1 و 2 متر با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی شد که به طور نمونه نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش HD-LAX در شکل (1) برای جویچه F_3 ارائه شد. ملاحظه می‌شود که با افزایش اندازه گام‌های مکانی شبیه‌سازی مرحله پیشروی جریان با دقت پایینی انجام شد. اما با کاهش اندازه‌ی گام‌های مکانی، نتایج حاصل از این مدل به داده‌های واقعی نزدیک‌تر می‌باشد که این نشان می‌دهد که روش عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی مرحله‌ای پیشروی همگرا می‌باشد.

در این روش با کاهش اندازه گام مکانی در شبیه‌سازی مرحله پیشروی، پیچیدگی حل به سرعت افزایش یافت و احتمال ناپایدار



شکل 1- تأثیر انتخاب اندازه گام مکانی بر دقت شبیه‌سازی مرحله پیشروی برای جویچه F_3

جدول 3- مقایسه نتایج مدل با گام‌های مکانی ثابت و زمانی متغیر برای جویچه F₃

گام مکانی	گام زمانی (دقیقه)		یکنواختی توزیع (%)	نسبت رواناب
	مرحله ذخیره	مرحله تخلیه و پسروری		
0/5	4	1	92/1	24/16
0/5	4	2	92/5	24/56
0/5	2	1	91/2	25/32
0/5	2	2	91/7	24/87

جدول 4- پارامترهای ارزیابی مدل‌ها در مرحله پیش‌روی و پسروری برای جویچه‌های آزمایشی

جویچه	مدل	پیش‌روی			پسروری		
		EF	RMSE	R ²	EF	RMSE	R ²
F ₁	HD-CH	0/811	1/59	0/91	0/83	1/55	0/753
	HD-LAX	0/851	1/24	0/93	0/86	1/46	0/817
	میانگین	0/831	1/42	0/92	0/85	1/51	0/785
F ₂	HD-CH	0/761	1/88	0/86	0/86	1/53	0/778
	HD-LAX	0/795	1/69	0/89	0/88	1/49	0/815
	میانگین	0/778	1/79	0/88	0/87	1/51	0/795
F ₃	HD-CH	0/835	1/46	0/91	0/85	1/55	0/803
	HD-LAX	0/864	1/15	0/95	0/88	1/52	0/829
	میانگین	0/849	1/40	0/93	0/87	1/54	0/816
F ₄	HD-CH	0/780	1/54	0/82	0/87	1/31	0/799
	HD-LAX	0/825	1/37	0/86	0/91	1/25	0/802
	میانگین	0/803	1/47	0/84	0/89	1/28	0/800

بیانگر آن است که با افزایش دبی ورودی به جویچه در یک طول ثابت مقادیر پیش‌بینی توسط روش‌های عددی با دقت بهتری محاسبه می‌شوند، به نظر می‌رسد که با کاهش شدت جریان ورودی به جویچه و از سوی دیگر بالا بودن ضریب زبری این عوامل باعث کندی پیش‌روی جریان و افزایش نفوذ در سطح جویچه شد و در نهایت باعث عدم دقت محاسباتی در روش‌های عددی می‌شود. این نتایج را می‌توان برای آزمایشات جویچه‌های با طول یکسان (F₄ و F₃) مشاهده نمود. این موضوع با نتایج تحقیقات (McClymont, Smith et al. 1999; Esfandiari and Maheshwari 2001; Ebrahimian and Liaghat 2011) مطابقت دارد.

برای بررسی اثر مشخصات هندسی جویچه بر عملکرد روش‌های عددی دو جویچه (F₁ و F₃) که دبی ورودی آن ثابت، ولی مشخصات هندسی آن‌ها شامل طول و شیب متفاوت است، انتخاب شد. همانگونه که ملاحظه می‌شود میانگین شاخص‌های ضریب تبیین (R²) و کارایی مدل (EF) برای مراحل پیش‌روی و پسروری با کاهش طول جویچه و شیب به ترتیب از مقادیر (0/808، 0/89) به (0/833، 0/91) رسید. افزایش این مقادیر نشان داد که با کاهش طول و ملایم شدن شیب جویچه دقت پیش‌بینی مراحل مختلف آبیاری جویچه

نتایج نشان داد که محدوده پایداری بین 0/21-0/28 متغیر است که نشانگر وضعیت مطلوب پایداری عددی در مراحل شبیه‌سازی جریان می‌باشد.

ارزیابی روش‌های عددی

به منظور بررسی عملکرد روش‌های عددی حل هیدرولیک جریان، نتایج حاصل از خروجی این روش‌ها با مشاهدات مزرعه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت، که نتایج در جدول (4) ارائه شد. همانطور که ملاحظه می‌شود، هر دو روش با دقت مناسبی فرآیند پیش‌روی و پسروری جریان را محاسبه می‌کنند. حال با در نظر گرفتن شاخص‌های ارزیابی به بررسی تأثیر عوامل ثابت طراحی (دبی ورودی، مشخصات هندسی) بر نتایج مدل پرداخته شد.

مطابق جدول (4)، نتایج نشان داد که مقدار دبی بر عملکرد روش‌های عددی مؤثر است. به طوری که با افزایش دبی ورودی به جویچه‌ها در طول ثابت، نتایج با دقت بالاتر حاصل می‌شود. به‌طور نمونه در جویچه‌های F₁ و F₂ متوسط مقادیر ضریب تبیین (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در مرحله پیش‌روی به ترتیب از (0/831، 1/42) به (0/778، 1/79) کاهش می‌یابد. که این نتایج

خطای نسبی رواناب به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد البته افزایش شیب خود باعث افزایش رواناب شد ولی همانطور که ملاحظه می‌شود این افزایش شیب جویچه F_1 نسبت به F_3 به اندازه 0/02 درصد بود که تاثیر منفی زیادی بر افزایش رواناب نخواهد داشت.

شکل (2) پروفیل‌های سطحی و زیرسطحی، محاسبه شده توسط روش‌های عددی، بعد از تکمیل مرحله پیشروی را نشان می‌دهد. همانطوری که ملاحظه می‌شود پروفیل‌های آب نفوذی یا زیر سطحی مشابه بوده و اختلافی بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که پروفیل‌های سطحی جریان، اندکی با هم اختلاف دارند. این اختلاف در مرز پایین دست بیش‌تر می‌شود. اختلاف پروفیل‌های سطحی روش حل HD-LAX در قسمت اعظم طول جویچه اندک بود، این در حالی است که پروفیل سطحی روش HD-CH در قسمت زیادی از طول جویچه با پروفیل سطحی اندازه‌گیری دارای اختلاف می‌باشد. علت اصلی این تفاوت به روش‌های ریاضی حل آن‌ها مرتبط می‌باشد. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر در رابطه با شبیه‌سازی پروفیل سطح آب هیچ گونه فرضیاتی اعمال نگردید. این در حالی است که بعضی از محققین در زمینه شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در مزرعه فرضیات ساده‌کننده‌ی در مدل خود استفاده کردند (Strelkoff, Clemmens et al. 1999; Raghuwanshi 2009).

در شکل (2) پروفیل آب نفوذی بعد از فرآیند پیشروی، نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود پروفیل آب نفوذی یافته خیلی نزدیک به هم تخمین زده شد و اختلاف زیادی بین پروفیل آب نفوذی مشاهده نمی‌شود.

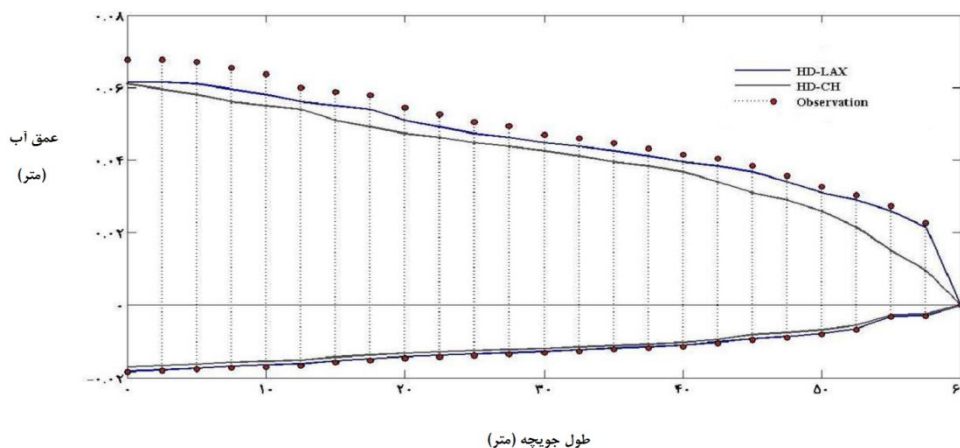
توسط روش‌های عددی افزایش می‌یابد. با توجه به این نتایج می‌توان بیان نمود که روش حل معرفی شده جهت شبیه‌سازی جریان در جویچه‌های با طول کم‌تر دارای دقت بالاتر است. به بیان دیگر هر چه طول جویچه کم‌تر و میزان دبی ورودی بیش‌تر باشد کارایی روش‌های عددی بیش‌تر خواهد بود.

یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی و بررسی دقت مدل هیدرودینامیک، ارزیابی بیلان حجمی آب اندازه‌گیری در سطح مزرعه و محاسبه شده توسط روش‌های عددی می‌باشد (Moravejalakhani, Mostafazadeh-Fard et al. 2009). بدین منظور نتایج حجم آب نفوذ یافته و رواناب خروجی در جدول (4) ارائه شد. براساس شاخص خطای نسبی، هر چند الگوهای عددی با دقت مناسبی حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه را پیش‌بینی نمودند، ولی هر دو روش دارای مشکل "کم برآورد" می‌باشند. یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل HD-LAX با متوسط خطای نسبی (RE) $-7/44$ درصد از دقت بالاتری برخوردار است. هم‌چنین با کاهش دبی ورودی در یک جویچه (F_1, F_2) مقدار خطا افزایش می‌یابد. در مقابل اگر دبی ورودی به جویچه ثابت باشد و طول جویچه کاهش یابد (F_1, F_3) مقدار خطای نسبی کاهش می‌یابد. این نتایج در (Abbasi, Shooshtari et al. 2003; Clemmens, Strelkoff et al. 2003; Ebrahimian and Liaghat 2011) تکرار شد.

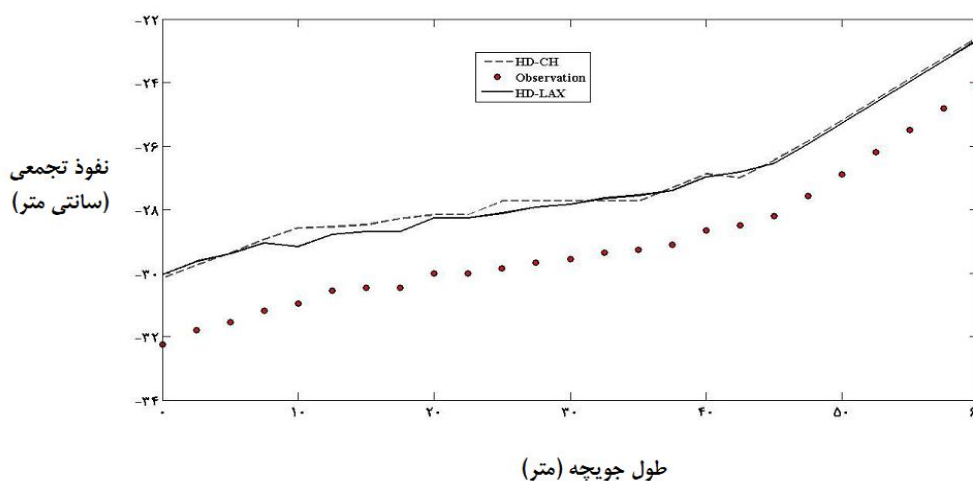
همانطور که از جدول (1) و (4) ملاحظه شد، دبی ورودی برای جویچه‌های F_1 و F_3 برابر 0/75 لیتر بر ثانیه است ولی رواناب در این دو جویچه متفاوت بود به طوری که برای جویچه‌ها سری اول و سوم به ترتیب 0/42 لیتر بر ثانیه و 0/53 لیتر بر ثانیه است. بنابراین با افزایش طول جویچه (از 40 به 60 متر) به اندازه 50 درصد، درصد

جدول 5- حجم نفوذ و رواناب شبیه‌سازی توسط روش‌های عددی

جویچه	حجم نفوذ شبیه‌سازی (m^3)		حجم مشاهده‌ای (m^3)	خطای نسبی (%)	
	HD-LAX	HD-CH		HD-LAX	HD-CH
F_1	1/69	1/65	1/8	-6/11	-7/78
F_2	1/18	1/14	1/3	-9/23	-12/31
F_3	1/13	1/11	1/2	-5/55	-6/71
F_4	0/82	0/81	0/9	-8/89	-10/47
میانگین	-	-	-	-7/44	-9/32
جویچه	حجم رواناب شبیه‌سازی (m^3)		حجم مشاهده‌ای (m^3)	خطای نسبی (%)	
	HD-LAX	HD-CH		HD-LAX	HD-CH
F_1	0/52	0/55	0/42	23/8	30/9
F_2	0/62	0/66	0/5	24/7	32/1
F_3	0/60	0/62	0/53	13/2	14/52
F_4	0/47	0/49	0/4	17/5	22/5
میانگین	-	-	-	19/80	25/01



شکل 2- مقایسه پروفیل سطحی و زیرسطحی آب محاسبه شده توسط روش‌های مختلف عددی بعد از تکمیل فاز پیشروی برای داده‌های جویچه F₁



شکل 3. مقایسه پروفیل آب نفوذی (نفوذ تجمعی) محاسبه شده توسط مدل‌های مختلف برای داده‌های جویچه F₁

سازی فرآیندهای مختلف جریان می‌باشد. بنابراین، به منظور حل مدل هیدرودینامیک کامل در آبیاری جویچه، روش عددی لکس انتشاری HD-LAX) به‌عنوان الگوی برتر در مقایسه با روش HD-CH جهت شبیه‌سازی انتخاب شد.

صحت سنجی روش عددی

به منظور صحت و اعتباردهی روش عددی HD-LAX جهت شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای، مبادرت به مقایسه با روش حل مدل هیدرودینامیک HD-SIRMOD و HD-SRFR شد. همچنین جهت یکسان سازی شرایط ارزیابی از داده‌های جویچه F₃ استفاده شد. نتایج مقادیر شاخص‌های مورد ارزیابی حاصل از مدل هیدرودینامیک در مرحله پیشروی و پسروی آبیاری در جدول (6) ارائه شد.

زیرا در روش‌های عددی یک معادله نفوذ استفاده شد (کوستیاکوف - لوئیس) همچنین میزان آب نفوذ یافته به فرصت نفوذ و یا به عبارتی به زمان پیشروی و پسروی بستگی دارد، این در حالی است که هر دو روش زمان پیشروی و پسروی را در حد تقریباً یکسانی شبیه‌سازی نمودند و اختلاف اندکی بین آن‌ها وجود دارد که این اختلاف در میزان آب نفوذ یافته تأثیر چندانی نخواهد گذاشت. با توجه به نتایج بدست آمده از ارزیابی مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای، می‌توان روش عددی لکس انتشاری HD-LAX را روشی موفق‌تر نسبت به روش HD-CH دانست. به نظر می‌رسد، اختلاف در پیش‌بینی این دو الگوی عددی ناشی از روش حل آن‌ها می‌باشد. همچنین از نظر زمان محاسبات نتایج نشان می‌دهد که روش HD-CH بواسطه پیچیدگی حل با متوسط 1600 ثانیه و نسبت به روش HD-LAX با متوسط 1350 ثانیه نیازمند زمان زیادتر جهت شبیه-

جدول 6- پارامترهای ارزیابی روش‌های عددی در مرحله پیشروی و پسروی برای جویچه F₃

پسروی			پیشروی			روش
EF	RMSE	R ²	EF	RMSE	R ²	
0/88	1/52	0/8290	0/95	1/15	0/8640	HD-LAX
0/91	1/47	0/8385	0/96	1/08	0/8742	HD-SIRMOD
0/90	1/51	0/8307	0/87	1/53	0/811	HD-SRFR

جدول 7- نتایج آزمون مقایسه به روش آزمون t- استیودنت برای جویچه F₃

درجه آزادی		مشاهده - (HD-LAX)	پسروی	درجه آزادی		مشاهده - (HD-SIRMOD)	پیشروی
t	t						
-1/858 ^{n.s}	119	مشاهده - (HD-LAX)		-1/082 ^{n.s}	119	مشاهده - (HD-LAX)	
-1/508 ^{n.s}	119	مشاهده - (HD-SIRMOD)		-1/117 ^{n.s}	119	مشاهده - (HD-SIRMOD)	
-2/019 ^{n.s}	119	مشاهده - (HD-SRFR)		-2/726 [*]	119	مشاهده - (HD-SRFR)	

n.s: اختلاف غیر معنی‌دار * *: اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد * *: اختلاف بسیار معنی‌دار در سطح یک درصد

توجه و یا نوسان غیرفیزیکی جواب‌ها مشاهده نشد. به نظر می‌رسد این به دلیل دقت مرتبه دوم در این روش می‌باشد (Loukili and Soulaïmani 2007). هم‌چنین نتایج نشان داد که روش عددی مشخصه داری دقت پایین‌تری است، به نظر می‌رسد این روش عددی به خطاهای داده‌های ورودی حساس است به‌طوری‌که خطا نسبت به دیگر روش عددی افزایش پیدا کرد و این امر موجب پیچیدگی مدل و افزایش زمان حل معادلات خواهد شد. البته این روش دارای محدودیت‌هایی است که می‌توان آن را برای کارهای آتی در این زمینه پیشنهاد داد، از جمله اینکه منحنی مشخصه در گره‌های یکنواخت به‌صورت ایده‌آل در نظر گرفته شد به نظر می‌رسد که اگر غیرایده‌آل در نظر گرفته شود نتایج حاصل دقت بیش‌تری خواهد داشت (Hoffman and Frankel 2001). ارزیابی نتایج پیش‌بینی توسط روش پیشنهادی HD-LAX در مقایسه با روش‌های HD-SIRMOD و HD-SRFR حاکی از آن است که، در مرحله پیشروی روش پیشنهادی و روش HD-SIRMOD اختلاف معنی‌داری ندارند در حالی که روش HD-SRFR در سطح یک درصد با مقادیر مشاهده‌ای دارای اختلاف می‌باشد، در مرحله پسروی روش‌های HD-LAX، HD-SIRMOD و HD-SRFR اختلاف معنی‌داری با مقادیر مشاهده‌ای ندارند. بنابر این مدل SIRMOD با توجه به دقت بالاتر، داده‌های ورودی آسان، تحت ویندوز بودن، سرعت محاسباتی بالا و کاربر پسند بودن از کارایی بالایی برخوردار بود که مطالعات (Abbasi, Shooshtari et al. 2003) نیز گواه بر این موضوع است.

منابع

عباسی، ف. 1374. استفاده از مدل‌های کامپیوتری در طراحی آبیاری

این نتایج نشان می‌دهد متوسط مقادیر ضریب تبیین و کارایی مدل برای روش HD-SIRMOD به ترتیب با میزان (0/94، 0/8564) دارای بالاترین دقت جهت پیش‌بینی فرآیند پیشروی و پسروی جریان می‌باشد. هم‌چنین نتایج مقادیر آزمون t- استیودنت در مرحله پیشروی و پسروی (جدول 7) نشان داد که مقایسه مقادیر مشاهده‌ای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، به جز در روش HD-SRFR که در سطح یک درصد اختلاف معنی‌دار است، در سایر روش‌ها تفاوتی از نظر آماری وجود ندارند. مهم‌ترین علت عدم دقت در روش SRFR آن است که در فاز پیشروی، پروفیل سطح آب به‌صورت خطی در نظر گرفته و هم‌چنین در این روش از نفوذ متوسط در پیش‌بینی فرآیندهای مختلف جریان استفاده می‌کند (Bautista, Clemmens et al. 2009).

نتیجه‌گیری و بحث

در این تحقیق مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای توسط مدل هیدرودینامیک کامل شبیه‌سازی شد. معادلات مربوط برای جریان آبیاری سطحی از طریق روش‌های خطوط مشخصه و تفاضل محدود که شامل الگوی عددی صریح لکس انتشاری است گسسته‌سازی و در نهایت در میدان حل مبادرت به شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف جریان شد. به‌همین منظور یک قطعه زمین زراعی انتخاب و در هر آزمایش داده‌های لازم جهت شبیه‌سازی مدل اندازه‌گیری شد. هم‌چنین از دو مدل HD-SIRMOD و HD-SRFR جهت صحت‌سنجی روش پیشنهادی استفاده شد. یافته‌ها نشان داد که استفاده از روش لکس انتشاری، برای شبیه‌سازی تک بعدی جریان در آبیاری سطحی مناسب می‌باشد. قابلیت این روش به‌طور خاص در شبیه‌سازی پیشروی جریان آبیاری سطحی و حل دقیق آن، رضایت بخش و امیدوارکننده بود به‌طوری‌که با بررسی دامنه معیار پایداری کورانت ملاحظه شد که در هیچ یک از آزمون‌ها مشکل پخش عددی قابل

- Hoffman, J.D., Frankel, S. 2001. Numerical methods for engineers and scientists: CRC press.
- Loukili, Y., Soulaïmani, A. 2007. Numerical Tracking of Shallow Water Waves by the Unstructured Finite Volume WAF Approximation. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics. 8.2: 75-88.
- McClymont, D.J., Smith, R.J., Raine, S.R. 1999. An integrated numerical model for the design and management of furrow irrigation. An integrated numerical model for the design and management of furrow irrigation, 6.
- Moravejalakhkani, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., Abbasi, F. 2009. Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. Biosystems Engineering. 103.3: 374-381.
- Raghuwanshi, D.R. 2009. Physically Based Model for Simulating Flow in Furrow Irrigation. I: Model Development. irrigation and drainage engineering. Schwankl, L., Wallender, W. 1988. Zero inertia furrow modeling with variable infiltration and hydraulic characteristics. Transactions of the ASAE.
- Soroush, F., Fenton, J.D., Mostafazadeh-Fard, B., Mousavi, S.F., Abbasi, F. 2013. Simulation of furrow irrigation using the Slow-change/slow-flow equation. Agricultural Water Management, 116, 160-174.
- Strelkoff, T., Clemmens, A., El-Ansary, M., Awad, M. 1999. Surface-irrigation evaluation models: Application to level basins in Egypt. Transactions of the ASAE. 42.4: 1027-1036.
- Strelkoff, T., Clemmens, A., Schmidt, B. 1998. SRFR, Version 3.31—A model for simulating surface irrigation in borders, basins and furrows. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.
- Strelkoff, T., Katopodes, N.D. 1977. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 103.3: 325-342.
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., El-Ansary, M., Awad, M. 1999. surface-irrigation evaluation models: Application to level Basin in Egypt. American Society of Agricultural Engineers. 42: 1027-1036.
- Walker, W.R. 2003. SIRMOD III Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design. Guide and technical documentation. Dept of Biological and Irrigation Engineering, Utah St University, Logan, UT, USA.
- Wallender, W., Rayej, M. 1990. Shooting method for Saint Venant equations of furrow irrigation. journal of irrigation and drainage engineering. 116.1: 114-122.
- نواری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- Abbasi, F., Shooshtari, M.M., Feyen, J. 2003. Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models. journal of irrigation and drainage engineering. 129.3: 208-213.
- Aminizadeh, M. R., Liaghat, A., Mahmodian-Shoshtari, M., Kouchakzadeh, S. 2006. An Explicit Scheme of Zero-Inertia Model Equations with Effectiveness of Wetted Perimeter for Furrow Irrigation Simulation. Water Agricultural research. 8.3: 1-16.
- Banti, M., Zisis, T., Anastasiadou-Partheniou, E. 2011. Furrow Irrigation Advance Simulation Using a Surface-Subsurface Interaction Model. journal of irrigation and drainage engineering. 137.5: 304-314.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Niblack, M. 2009. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—Example application. Agricultural Water Management. 96.7: 1162-1169.
- Bautista, E., Wallender, W. 1992. Hydrodynamic furrow irrigation model with specified space steps. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 118.3: 450-465.
- Bradford, S.F., Katopodes, N.D. 2001. Finite volume model for nonlevel basin irrigation. journal of irrigation and drainage engineering. 127.4: 216-223.
- Burguete, J., Lacasta, A., García-Navarro, P. 2014. SURCOS: A software tool to simulate irrigation and fertigation in isolated furrows and furrow networks. Computers and Electronics in Agriculture, 103, 91-103.
- Chanson, H. 2004. Environmental Hydraulics of Open Channel Flows.
- Clemmens, A., Strelkoff, T., Playan, E. 2003. Field verification of two-dimensional surface irrigation model. journal of irrigation and drainage engineering. 129.6: 402-411.
- Dong, Q., Xu, D., Zhang, S., Bai, M., Li, Y. 2013. A hybrid coupled model of surface and subsurface flow for surface irrigation. Journal of Hydrology, 500, 62-74.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. Soil Water Res, 6(2), 91-101.
- Elliott, R., Walker, W., Skogerboe, G. 1983. Infiltration parameters from furrow irrigation advance data [Modified Kostikov infiltration equation, soils, Colorado farms]. Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers].
- Esfandiari, M., Maheshwari, B. 2001. SW—Soil and Water: Field Evaluation of Furrow Irrigation Models. Journal of agricultural engineering research. 79.4: 459-479.
- Gerald, C.F., Wheatley, P.O., Bai, F. 1989. Applied numerical analysis (Vol. 19903): Addison-Wesley New York.

Modelling and Numerical Analysis of Flow under Furrow Irrigation

A. Koulaian¹, M.A Gholami Sefidkouhi^{2*}, M. Ziatabar Ahmadi³, H. Dadashzadeh⁴

Received: Jun.13, 2015

Accepted: Nov.11, 2015

Abstract

In order to simulate shallow flow on the soil surface and penetration into the depth, the Saint-Venant equations were developed. Due to the lack of analytical solution for solving these types of equations, researchers generally suggest numerical methods as a solution. In the present study, from the hydraulic models of surface irrigation, the full hydrodynamic model due to its accurate simulation of the flow, and from the numerical methods, two numerical models, including the characteristic line method (HD-CH) and the explicit diffusive LAX method (HD-LAX), were used to discretize the governing equations of surface irrigation. Afterwards, a computer program was developed using MATLAB programming language. In order to evaluate the numerical methods, four furrow data series were used, which were measured through testing in the farm. In addition, under the same conditions, the proposed method was compared with the hydrodynamic model of SIRMOD and SRFR softwares and was consequently validated. The perceived results revealed that both numerical models simulate various flow processes under furrow conditions at an acceptable accuracy. However, the results of the evaluation indicators demonstrated that the HD-LAX model, due to the solution method of the second degree of accuracy, with the average coefficient of determination, error statistics, and model efficiency of (0.834, 1.36, 0.91) and (0.815, 1.43, 0.88), respectively for the forward and backward stages, and with the relative errors of 7.44 % and 19.8 %, has a higher accuracy than the HD-CH model, in estimating the volume of water infiltration and runoff, and it also needs less computational time for simulating different furrow flow processes. The results of calculations, through comparing the proposed HD-LAX method with the HD-SIRMOD and HD-SRFR methods, showed that in the forward stage, the proposed method and the HD-SIRMOD model do not have any significant difference, while the HD-SRFR model, at the confidence level of 1%, has some differences with the observed values.

Keywords: Furrow Irrigation, Full Hydrodynamics, LAX, Method of Characteristics.

1- M.S. Graduated of Irrigation and Drainage, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources

2 - Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources

3 - Professor, Water Engineering Department, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources

4 - Department of Mathematics, Payame Noor University of Mazandran

(*-Corresponding Author Email: ma.gholami@sanru.ac.ir)