نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۸ شماره ۳ صفحه‌های ۴۱ تا ۵۱ / سال ۱۳۹۷

مدل‌سازی جــریان یک بعــدی در آبیــاری جویــچه‌ای با حل عددی معادلات هیدرودینامیک کامل به روش Roe

آیلر ابراهیم زاده[۱]، علی نقی ضیائی[۲]*، محمدرضا جعفرزاده[۳]، علی اصغر بهشتی[۴]، ندا شیخ رضازاده نیکو[۵]

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۲۵

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۲-دانشیار، گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۳-استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۴-استادیار، گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۵-دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: an-ziaei@um.ac.ir

چکیده

شبیه‌سازی و تسخیر ناپیوستگی‌ها در معادلات جریان های کم عمق بسیار حائز اهمیت است. روش‌های متعارف عددی از جمله شمای تفاضل محدود پریسمن، بدون انجام اصلاحاتی، قادر به شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها نمی‌باشند. روش حجم محدود با بهره گیری از حل‌کننده‌های ریمن، علاوه بر قابلیت حل نواحی هموار، قادر به شبیه‌سازی مطلوب ناپیوستگی-ها نیز می باشند. در این پژوهش، حل کننده‌های ریمن به روش رو مرتبه دو بهمراه توابع محدود کننده برای کاهش نوسانات عمده (نسخه تی‌وی‌دی[1]) برای شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی در آبیاری جویچه‌ای بکاربرده شد. معادله یک بعدی "سنت-ونانت" در جریان سطحی و معادله کاستیاکوف-لوییس در جریان زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفت. با تهیه یک کد در محیط فرترن برای روش رو- تی‌وی‌دی، نتایج مدل ارائه شده با مدل تفاضل محدود مبتنی بر شمای ضمنی پریسمن و همچنین دو سری داده مزرعه‌ای (پرینتز و واکر) مقایسه و با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، خطای استاندارد (SE) و ضریب تبیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. مشاهده شد که در کلیه مدل‌سازی‌ها، مدل رو عملکرد بهتری نسبت به مدل پریسمن داشته و بویژه در رواناب خروجی $RMSE$ به مقدار ۶۲ درصد بهبود یافت. برتری دیگر روش رو صریح بودن آن است کاهش زمان اجرا وتسهیل در رسیدن به جواب در شرایط پیچیده را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، جریان سطحی و زیر سطحی، حل‌کننده‌های ریمن، تی‌وی‌دی

[1] TVD

Numerical Modeling of One-Dimensional Flow in Furrow Irrigation by Solving the Full Hydrodynamics Equations using Roe Approach

A Ebrahimzadeh, AN Ziaei*, MR Jafarzadeh, AA Beheshti, N Sheikh Rezazadeh Nikou

Received: 2016-09-22 Accepted: 2017-12-16

[1-]M.Sc. graduate, Water Science and Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Iran
[2-]Asso. Prof., Water Science and Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Iran
[3-]Prof., Civil Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Iran
[4-]Asso. Prof., Water Science and Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Iran
[5-]PhD Student, Water Science and Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Iran
* Corresponding Author, Email: an-ziaei@um.ac.ir

Abstract

Flow Simulation and discontinuous shock capturing are important in shallow water equations. Common numerical schemes such as finite difference Preissmann scheme, without performing some modifications, cannot simulate discontinuities. Finite volume methods using Riemann solvers by taking advantage of the characteristics of solving the smooth areas as well, have the ability to simulate discontinuities. In this paper, the second order Roe model of Riemann solver was employed by applying the limiting functions to eliminate the spurious oscillations of the numerical simulation in the surface and subsurface flows (Saint-Venant equations in surface flow and Kostiakov-Lewis in subsurface flow). A Fortran code was developed for Roe-TVD method, the presented model was evaluated using the Preissmann scheme (an implicit finite difference scheme) and two sets of field data (Printz-323 and Walker) based on Root Mean Square Error (*RMSE*), Standard Error (*SE*) and Determination Coefficient (R^2). It was concluded that Roe model showed better results comparing to the Preissmann scheme in all of the simulations, particularly in outgoing runoff, RMES was improved up to 62%. The applied model was an explicit method and reduced running time and had the ability of application under different field conditions.

Keywords: Numerical modeling, Riemann solver, Surface irrigation, Surface and Subsurface flow, TVD

مقدمه

سامانه‌های آبیاری سطحی سهم عمده‌ای را در کشاورزی فاریاب در سراسر جهان در بر می‌گیرند وکیفیت اجرای این سامانه‌ها به شدت وابسته به مراحل مختلف طراحی آن‌ها است. معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی، شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است که به معادلات سنت _ ونانت[1] معروف است. با توجه به غیرخطی بودن این معادلات، حل تحلیلی آن‌ها محدود به حالات ساده و یا مستلزم حذف پارامترهای مهم معادلات است، از این رو در حالات عمومی از روش‌های عددی به عنوان ابزاری سودمند برای حل معادلات مذکور استفاده می‌شود. از طرف دیگر شبیه‌سازی موقعیت جریان بعلت تغییر ناگهانی وضعیت آن، بسیار پیچیده است، بنابراین روش‌های عددی متعارف نظیر مدل چهار نقطه‌ای پریسمن قادر به مدل سازی جریان با دقت بالا نیستند. استفاده از روش‌های غیر نوسانی حجم محدود در حل معادلات جریان کم عمق موضوع پژوهش مطالعات فراوانی بوده‌است که برتری آن را در مدل‌سازی محدوده وسیعی از جریان‌های زیربحرانی و فوق بحرانی حتی در بسترهای خشک نشان می‌دهد (فیسر و همکاران ۲۰۱۶). این روشها به خاطر صریح بودن بی‌نیاز از حل دستگاه بوده و برای اعداد کورانت کمتر از یک پایدار می‌باشند (ساندرز ۲۰۰۲). لذا در این مقاله نیز به استفاده از این روش‌ها در آبیاری سطحی پرداخته می‌شود.

[1] Saint -Venant

الیوت و همکاران (۱۹۸۲) برای شبیه‌سازی پیشروی جریان در جویچه، از مدل اینرسی صفر استفاده کردند و مقدار نفوذ را از معادله کاستیاکوف- لوییس به دست آوردند، نتایج آن‌ها نشان داد که مدل اینرسی صفر، مرحله پیشروی را در آبیاری جویچه‌ای به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. عباسی و همکاران (۱۳۷۶) برای شبیه‌سازی مراحل مختلف آبیاری نواری، از مدل اینرسی صفر استفاده کرده و معادلات حاکم بر جریان را با استفاده از روش تفاضل محدود و به صورت غیر صریح حل کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که حذف ترم‌های شتاب در معادله مومنتم تأثیر معنی‌داری روی نتایج مدل نداشته و مدل آن‌ها زمان‌های پیشروی، پسروی و حجم آب نفوذ یافته را با دقت خوبی تخمین می‌زند، اما حجم رواناب را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. برادفورد و نیکلاس (۲۰۰۱) از مدل عددی هیدرودینامیک کامل به روش رو جهت شبیه‌سازی زمان پیشروی و نفوذ آب در آبیاری کرتی در دو بعد استفاده کردند. امینی‌زاده و همکاران (۱۳۸۵) از مدل اینرسی صفر برای شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای با گام های مکانی ثابت و تأثیر محیط خیس شده در محاسبه نفوذ، با این فرض که محیط خیس شده تابعی از سطح مقطع جریان است، استفاده کردند. بیک زاده و همکاران (۱۳۹۳) از مدل چهار نقطه‌ای پریسمن برای مدل‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی در آبیاری جویچه‌ای استفاده کردند، آنها مشاهده کردند که مدل پریسمن عملکرد مشابه با مدل سیموراد[2](مدل شبیه‌سازی آبیاری سطحی) دارد. یوآن و همکاران (۲۰۱۲) با کاربرد مدل حجم محدود و استفاده از حل‌کننده رو جریان سطحی و زیرسطحی را بصورت یک بعدی کوپل کردند. ایشان در ابتدا برای واسنجی مدل، حالت شکست سد را اجرا و نتایج آن را با نتایج تحلیلی مقایسه کرده به مطالعه جریان جذرومد در امتداد خاکریز پراختند.

روزتی و بگنودلی (۲۰۱۳) از روش عددی حل‌کننده عمومی رو برای مدل‌سازی دوبعدی جریان سطحی به‌صورت دوفازه بر روی بستر متحرک استفاده کردند. نتاج عددی و آزمایشگاهی در هریک ازحالت های انتقال موج شکست سد دایروی با حل تحلیلی مقایسه شده است که بر هم منطبق بوده‌اند. زریهان و همکاران (۲۰۱۴) به مدلسازی جریان و انتقال املاح در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. ایشان با کاربرد روش اینرسی صفر به مدل‌سازی هیدرولیک جریان و انتقال املاح پرداخته‌اند. برای واسنجی مدل، نتایج عددی جریان زیرسطحی را با نرم‌افزار دوبعدی هایدروس[1] مقایسه و نتایج انتقال املاح را با حل تحلیلی آن مقایسه کرده‌اند. در نهایت،نتایج عددی و آزمایشگاهی را مقایسه نموده‌اند.

لذا عمده مطالعات قبلی مدل‌سازی جریان در آبیاری جویچه‌ای مبتنی بر فرم‌های ساده شده معادلات حاکم بوده و یا معادلات هیدرودینامیک کامل نیز با استفاده از روش‌های ضمنی تفاضلات محدود حل شده است که همگرایی آنها در شرایط واقعی همراه با محدودیت است. در این پژوهش با استفاده از روش‌های مبتنی بر حل کننده‌های ریمن که صریح بوده، و جبهه موج را با دقت بیشتری مدل‌سازی می‌کنند برای مدل‌سازی جریان در آبیاری جویچه‌ای استفاده می‌شود. با استفاده از این روش‌ها، محدودیت‌های حل کاهش یافته و نیازی به تمهیدات خاصی برای فرآیندهای پیشروی و پسروی جبهه جریان در آبیاری جویچه‌ای نیست. عملکرد مدل رو و پریسمن در این نوع آبیاری با یکدیگر و با مقادیگر اندازه گیری شده مقایسه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان آب در آبیاری جویچه‌ای، معادلات یک بعدی جریان کم عمق یا همان معادلات معروف سنت ونانت می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان زیرسطحی نیز از معادله کوستیاکوف- لوئیس استفاده شد.

مدل هیدرودینامیک کامل

فرم ابقایی معادلات "سنت _ ونانت" با در نظر گرفتن نفوذ به ترتیب زیر می‌باشند (لای ۱۹۸۶):

---

[2] SIRMOD

[1] HYDRUS

$$U_t + F_x + S = 0 \qquad [1]$$

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \end{pmatrix}, \qquad F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + 0.5gh^2 \end{pmatrix}, \qquad S = \begin{pmatrix} i \\ -gh(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \qquad [2]$$

در معادلات فوق u سرعت جریان ($m\,s^{-1}$)، h عمق جریان (m)، i شدت نفوذ ($m\ s^{-1}$)، S_0 شیب کف کانال ($m\,m^{-1}$)، S_f شیب اصطکاکی ($m\,m^{-1}$)، x مسافت در طول مسیر جریان (m)، t زمان (s) و g شتاب جاذبه ($m\ s^{-2}$) می‌باشند.

معادله نفوذ کاستیاکوف- لوییس

برای تعیین نفوذ آب به داخل خاک از معادله کاستیاکوف- لوییس استفاده شد (انصاری ۱۳۹۰):

$$Z = k\tau^{\alpha} + f_0 \qquad [3]$$

که در آن، Z نفوذ تجمعی در واحد سطح (m)، f_0 سرعت نفوذ نهایی (بر حسب ($m^3m^{-1}min^{-1}$) در جویچه و ($m^3m^{-2}min^{-1}$) در کرت و نوار)، kو α ضریب معادله هستند و τ فرصت زمانی نفوذ (s) است (علیزاده ۱۳۸۵). نرخ نفوذ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$i = \frac{dZ}{d\tau} = \alpha k \tau^{\alpha - 1} + f_0 \qquad [۴]$$

که در آن iمیزان نرخ نفوذ ($m\ s^{-1}$) است.

روش‌عددی رو-تی وی دی

برای حل معادلات سنت ـ ونانت از روش حجم محدود استفاده شده است. شکل کلی حل معادلات با این روش به صورت زیر نوشته می‌شود (تورو ۲۰۰۱):

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}\left[F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n\right] + \Delta t . S_i^n \qquad [۵]$$

در معادله فوق: U_i^n، بردار متغیر وابسته (معادله ۱) در گام زمانی n ، $\left[F_{i+1/2}^n \mp F_{i-1/2}^n\right]$بردار شارهای عددی بین سلولی ورودی و خروجی سلول محاسباتی، Δt و Δx گام زمانی و مکانی و S_i^n بردار جملات منبع است.

در روش‌های حجم محدود محاسبه شارهای عددی بسیار مهم است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. شار عددی در روش رو-تی‌وی‌دی برای معادلات جریان‌های کم عمق به صورت صریح با استفاده از تکنیک متکی به بالادست، مطابق معادله ۶ به‌دست می‌آید (گلایستر ۱۹۸۸).

$$F_{i+\frac{1}{2}}^{RoeTVD} = 0.5[F_i - F_{i+1}] - 0.5\sum_{k=1}^{2}(\tilde{\alpha}_{i+\frac{1}{2}}^k \left|\lambda_{i+\frac{1}{2}}^k\right| \tilde{R}_{i+\frac{1}{2}}^k) + 0.5\sum_{k=1}^{2}\varphi(\tilde{r}_{i+\frac{1}{2}}^k)\tilde{\alpha}_{i+\frac{1}{2}}^k \left|\lambda_{i+\frac{1}{2}}^k\right| (1 - \frac{\Delta t}{\Delta x}\left|\lambda_{i+\frac{1}{2}}^k\right|)\tilde{R}_{i+\frac{1}{2}}^k \qquad [۶]$$

در این رابطه $\varphi(r)$ تابع محدودکننده است . اگر $\varphi(r) = 0$ باشد، مدل مرتبه اول متکی به بالادست[1] حاصل می‌شود و در صورتی که $\varphi(r) = 1$ باشد، مدل مرتبه دوم لاکس- وندروف به دست می‌آید. چنانچه $\varphi(r)$ با توابع مختلف محدودکننده جایگزین شود، مدل نوع تی‌وی‌دی روش رو حاصل می‌شود. ملاحظه شد که روش رو با محدودکننده به طور نسبی کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) را برای عمق و سرعت جریان به همراه داشته و عملکرد بهتری را نشان می‌دهد که در مدل‌سازی حاضر از روش مذکور استفاده شده است.

$$\varphi(r) = \max\left[0, \min(2r, 1), \min(r, 2)\right]$$

و

$$r_i = \frac{\Delta U_{i\ \frac{1}{2}}^n}{\Delta U_{i+\frac{1}{2}}^n} \qquad [۷]$$

λ مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبی بردار شار($A = \frac{\partial F(U)}{\partial x}$)، R بردارهای ویژه راست ماتریس A و α ضرایب خطی Roe است که به‌صورت روابط ذیل تخمین زده می‌شود.

$$\tilde{\alpha}_{i+\frac{1}{2}}^{1,2} = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2c}\{\Delta(uh) - u.\Delta h\} \qquad [۸]$$

برای افزایش دقت محاسبات و از بین بردن نوسانات ناخواسته گام پیش‌بینی به مراحل محاسباتی افزوده شده است. به واسطه این مرحله معادلات سنت ـ ونانت به‌صورت ساده شده پیش‌بینی شده و در گام تصحیح

[1] Upwind

اصلاح می‌شوند. در گام پیش‌بینی زمان محاسباتی نصف شده و متغیر وابسته U_i از معادله ۹ محاسبه می‌گردد.

$$U_i^{k+1/2} = U_i^k - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(F_{i+1/2}^k - F_{i-1/2}^k) + \frac{\Delta t}{2}\left[(S_0)_i^k - \frac{1}{2}(S_f)_i^k - \frac{1}{2}(S_f)_i^{k+1/2}\right] \quad [۹]$$

در مرحله تصحیح مقادیر سرعت و مساحت در گام زمانی جدید از معادله ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$U_i^{k+1} = U_i^k - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(F_{i+1/2}^{k+1/2} - F_{i-1/2}^{k+1/2}) + \frac{\Delta t}{2}\left[(S_s)_i^k - (S_s)_i^{k+1}\right] \quad [10]$$

$$S_s = \begin{pmatrix} -i \\ gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad [۱۱]$$

محاسبات عددی نشان داده است که روش مرتبه اول متکی به بالادست، باعث میرایی پیشانی موج می‌شود و با اضافه نمودن جملات مرتبه دوم (مدل لاکس-وندروف[2]) نوسانات غیرفیزیکی در مجاورت موج جریان تولید می‌شود، اما استفاده از مدل رو- تی وی دی با حذف نوسانات به شکل مطلوبی قادر به شبیه‌سازی جریان است (قـزل سوفلو و جعفرزاده ۱۳۸۳).

حل عددی توأم جریان سطحی و زیرسطحی

حل معادلات ۱ و ۲، پروفیل های سطحی و زیر سطحی جریان در طول فرآیند آبیاری که به ترتیب شامل مراحل پیشروی، ذخیره و پسروی است را توصیف می کند. اما حل این معادلات بعد از اتمام هر مرحله با توجه به تغییر شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست، متفاوت می‌شود (واکـر ۱۹۸۹).

شرایط مرزی جریان در طول مرحله پیشروی

در قسمت ورودی زمین (بالادست مزرعه) دبی ورودی، توسط آبیار کنترل می‌گردد، و همچنین دبی ورودی در مرحله پیشروی ثابت بوده و تغییرات آن صفر است. در انتهای زمین (پایین‌دست مزرعه)، عمق جریان در طول مرحله پیشروی صفر است.

آغاز مرحله مرطوب شدن یا مرحله ذخیره

زمانی که جریان به انتهای زمین برسد، شرایط مرزی پایین‌دست متفاوت خواهد بود. اگر انتهای جویچه باز باشد، جریان بر طبق معادله مانینگ از انتهای زمین خارج شده و بنابراین شرط مرزی پایین‌دست به این صورت تغییر خواهد کرد:

$$Q_N = aA_N^b \quad [12]$$

که در آن N شماره آخرین گره محاسباتی (انتهای زمین) است و a و b برای جریان یکنواخت (معادله مانینگ) و با شرایط انتهای باز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a = \frac{\sqrt{\rho_1 S_0}}{n} \quad [۱۳]$$

$$b = \frac{\rho_2}{2} \quad [۱۴]$$

در معادلات بالا n ضریب زبری مانینگ، ρ_1 و ρ_2 ضرایب مربوط به شکل مقطع جویچه می‌باشد (واکـر ۲۰۰۳).

شروع مرحله پسروی

پس از اتمام مرحله ذخیره، محاسبات مذکور تا زمانی که سطح مقطع جریان در آخرین نقطه از زمین به پنج درصد (یا کمتر) مقداری از آن در فاصله شروع جریان تا زمان قطع آن برسد، ادامه خواهد داشت.

در این پژوهش با تولید یک کد در محیط فرترن تهیه شده تا با استفاده از حل کننده‌های ریمن به روش رو- تی‌وی‌دی با دقت مرتبه دوم، برای شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرسطحی با اعمال تابع محدودکننده برای حذف نوسانات غیرفیزیکی مدل‌سازی آبیاری جویچه‌ای صورت پذیرد. برای ارزیابی و بررسی دقت و صحت مدل ارائه شده، دو سری داده مزرعه‌ای مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه مشخصات هر کدام از آن‌ها شرح داده می‌شود. برای این منظور از جویچه‌ای به شکل ۱ استفاده می‌شود. مقادیر $T_{\max}$، T_{mid}، $Base$ و $Y_{\max}$ در شکل ۱ به‌ترتیب عرض سطح جویچه، عرض میانی جویچه، عرض کف جویچه و ارتفاع جویچه می‌باشد. برای مقایسه کارایی مدل مبتنی بر روش رو، نتایج آن با مقادیر بدست آمده از روش پریسمن (بیک زاده و همکاران ۱۳۹۳) نیز مقایسه گردید.

---

[2] Lax- Wendroff

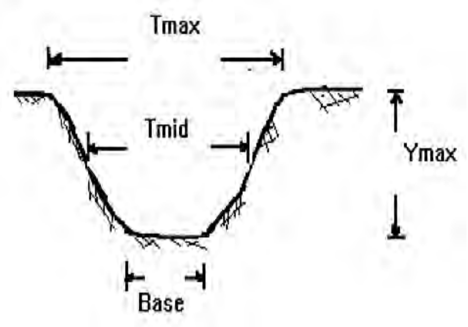
داده‌های آزمایشگاهی

داده‌های مزرعه‌ای پرینتز-۳۲۳ (ردی ۱۹۸۹)

آبیاری پرینتز-۳۲۳ نیز توسط الیوت (۱۹۸۰) انجام شده و مشخصات کامل آن در جدول۱ مشاهده می‌شود که از تحقیق ردی (۱۹۸۹) استخراج شده است.

داده‌های مزرعه‌ای واکر(۱۹۸۹)

مشخصات این آبیاری از مثال طراحی نرم افزار *SIRMOD* استخراج و به دلیل کامل بودن داده‌های پیشـروی و پسروی، مورد اسـتفاده قرار گرفت. جزئیات مربوط به مشخصات این آبیـاری در جـدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- شکل کلی مقطع عرضی از یک جویچه.

جدول ۱- پارامترهای ورودی مزارع آبیاری واکر (۱۹۸۹) و پرینتز (ردی ۱۹۸۹).

پارامترهای مربوط به مشخصات مزرعه	مزرعه آبیاری واکر (۱۹۸۹)	مزرعه آبیاری پرینتز
$(m^3 \min^{-1})\, q_0$: دبی ورودی	۰/۱۲	۰/۲۱
$(m\, m^{-1})\, S_0$: شیب کف	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۲۵
$(-)\, n$: ضریب مانینگ	۰/۰۴	۰/۰۲
$(m)\, l$:طول جویچه	۳۶۰	۳۵۰
$(min)\, t_{cut}$: زمان قطع جریان	۴۸۰	۱۱۰
$(-)\, k$: ضریب معادله	۰/۰۰۲۸	۰/۰۱۲۵
$(-)\, a$: ضریب معادله	۰/۵۳۴	۰/۰۲۴
$(m^3 m^{-1} min^{-1})\, f_0$: ضریب معادله	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۵۰
$(-)\, \sigma_1$: ضریب شکل هندسی **جویچه**	۰/۵۰۸	۰/۹۵۳
$(-)\, \sigma_2$: ضریب شکل هندسی **جویچه**	۱/۵۵۴	۱/۳۳۳
$(-)\, \rho_1$ ضریب هیدرولیکی جویچه	۰/۳۳	۰/۶۲
$(-)\, \rho_2$ ضریب هیدرولیکی جویچه	۲/۷۱	۲/۹۲
$(m)\, w$: فاصله‌ی جویچه‌ها	۰/۷۶	۱/۵۲

شاخص‌های ارزیابی مدل

برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و ارزیابی دقیق‌تر مدل، از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) و خطای استاندارد (*SE*) به عنوان معیار صحت و ضریب تعیین (R^2) که در مسائل آبیاری مزارع و مدل‌های مربوطه (بعنوان مثال: باتیستا و همکاران ۲۰۱۰، ابراهیمیان و لیاقت ۲۰۱۱، اعتدالی و همکاران ۲۰۱۱) متداول است، به‌عنوان معیار دقت استفاده شد. این معیارها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (o_i - p_i)^2}{n}} \quad [۱۸]$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (o_i - p_i)^2}}{\overline{p}} \quad [۱۹]$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(o_i - \overline{o})(p_i - \overline{p}))^2}{\sum_{i=1}^{n}(o_i - \overline{o})^2 \times \sum_{i=1}^{n}(p_i - \overline{p})^2} \quad [20]$$

که در معادلات ۱۸ تا ۲۰، n تعداد داده‌ها، o_i ، i امین مقدار داده اندازه‌گیری شده یا مشاهده شده، P_i ، i امین مقدار داده پیش‌بینی شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و $\overline{o}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا با استفاده از دو سری اطلاعات آبیاری که قبلاً معرفی شد، به ارزیابی مدل پیشنهادی پرداخته و نتایج مدل در تمامی داده‌های مزرعه‌ای با مدل حاصل از روش پریسمن نیزمقایسه می گردد.

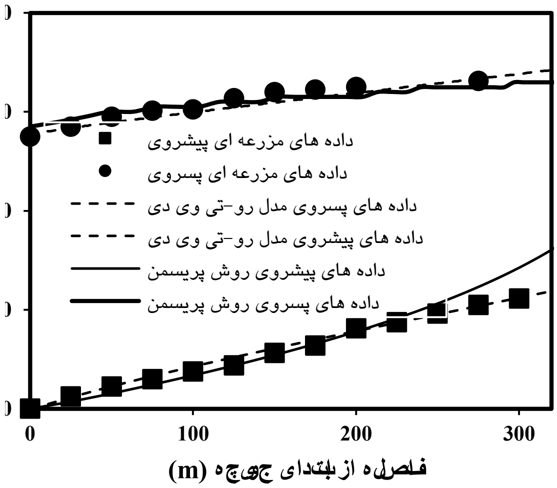
داده‌های مزرعه پرینتز-۳۲۳

نتایج شبیه‌سازی مراحل پیشروی و پسروی در این سری از داده‌ها شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل رو- تی‌وی‌دی تطابق بهتری در مرحله پیشروی و پسروی با داده‌های مزرعه‌ای دارد.

با توجه به مقادیر خطای شبیه‌سازی در آبیاری پرینتز-۳۲۳ که در جدول ۲ آورده شده است، می‌توان مشاهده کرد که خطای مدل پیشنهادی در مقایسه با پریسمن کمتر و صحت مدل رو- تی‌وی‌دی بیشتر از مدل پریسمن است.

داده‌های مزرعه واکر (۱۹۸۹)

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل پیشنهادی نسبت به مدل پریسمن تطابق بهتری با داده‌های واقعی دارد. همان‌طورکه در جدول ۳ نشان داده شده است، مقادیر خطای پیشروی و پسروی نسبت به مدل حاصل از مدل پریسمن کاهش پیدا کرده و مدل ارائه شده در هر دو مرحله عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - مقایسه‌ی نتایج پیشروی حاصل از مدل رو- تی‌وی‌دی با م

دل پریسمن و داده‌های مزرعه‌ای پرینتز-۳۲۳.

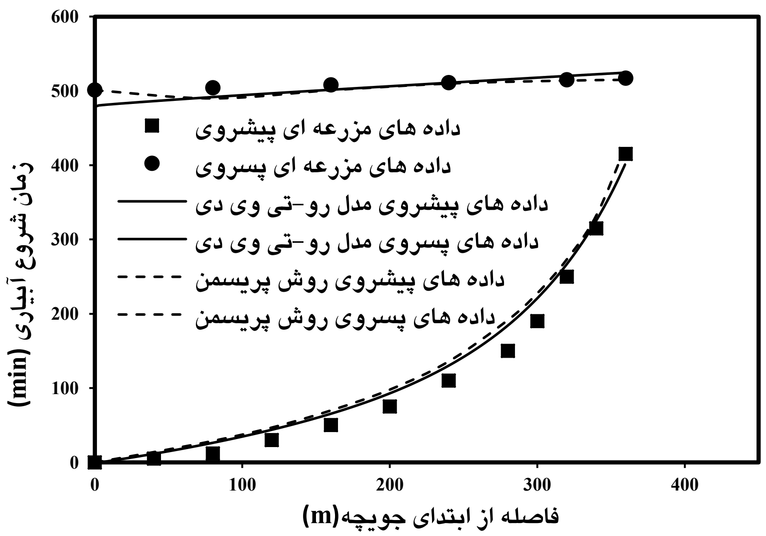
در شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر خطای پیشروی، پسروی و رواناب حاصل از دو مدل رو- تی‌وی‌دی و پریسمن نشان داده است. ملاحظه می‌شود خطای داده‌های مزرعه‌ای واکر(۱۹۹۸) بسیار کمتر از خطای داده‌های مزرعه‌ای پرینتز-۳۲۳ است. دلیل بهبود نتایج در مدل رو- تی‌وی‌دی را باید در ماهیت احجام محدود آن جستجو کرد. از آنجایی که در روش حجم محدود از فرم ابقایی معادلات استفاده شده و در هر حجم کنترل (سلول محاسباتی) معادله پیوستگی ارضاء می‌شود لذا نتایج آن به واقعیت نزدیکتر است. از طرف دیگر صریح بودن روش رو- تی‌وی‌دی و مرتبه خطای قطع مرتبه دو و همچنین جلوگیری از نوسانی شدن حل باعث بهبود نتایج با استفاده از این روش گردیده است.

جدول۲- شاخص‌های آماری در آبیاری پرینتز-۳۲۳.

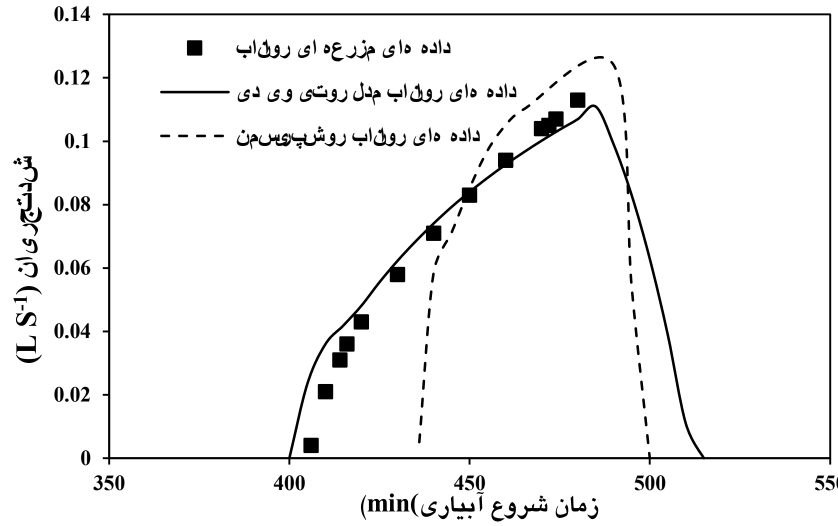
شاخص آماری	مدل پریسمن		مدل رو	
	پیشروی	پسروی	پیشروی	پسروی
خطای استاندارد (SE)	۰/۱۹	۰/۰۲۲	۰/۱۸۷	۰/۰۱۹
خطای ریشه میانگین مربعات $(RMSE)$ (min)	۵/۷۶۷	۲/۷۲۰	۵/۷۶۳	۲/۱۲۱
ضریب همبستگی (R^2)	۰/۹۸۶	۰/۹۸۳	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹

جدول۳- شاخص‌های آماری در آبیاری واکر (۱۹۸۹).

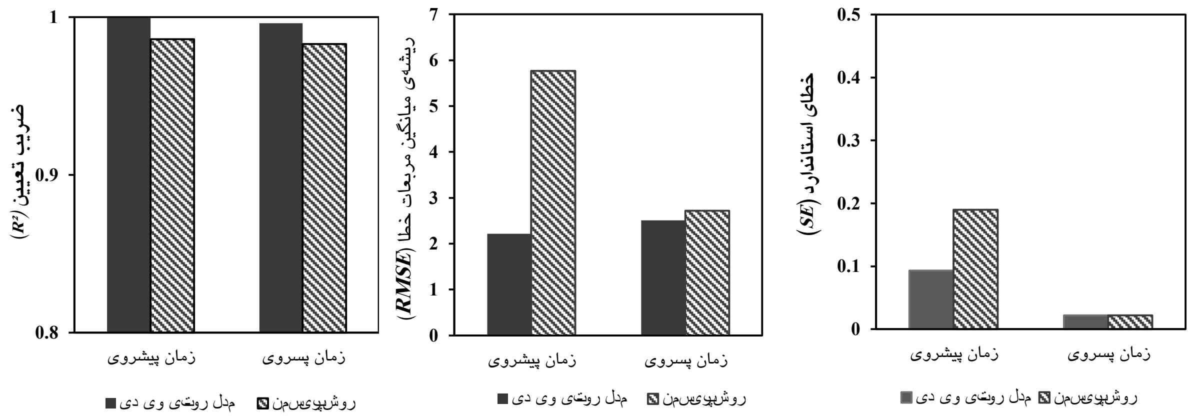
شاخص آماری	مدل پریسمن			روش رو		
	پیشروی	پسروی	رواناب	پیشروی	پسروی	رواناب
خطای استاندارد (SE)	۰/۴۹۹	۰/۰۳۱	۰/۱۵۲	۰/۳۶۰	۰/۰۰۹	۰/۱۲۳
خطای ریشه میانگین مربعات $(RMSE)$ (min)	۵/۹۹۸	۶/۵۶۷	۰/۰۱۳	۵/۳۸۹	۴/۳۷۲	۰/۰۰۸
ضریب همبستگی (R^2)	۰/۹۹۸	۰/۸۳۵	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۴	۰/۹۹۹



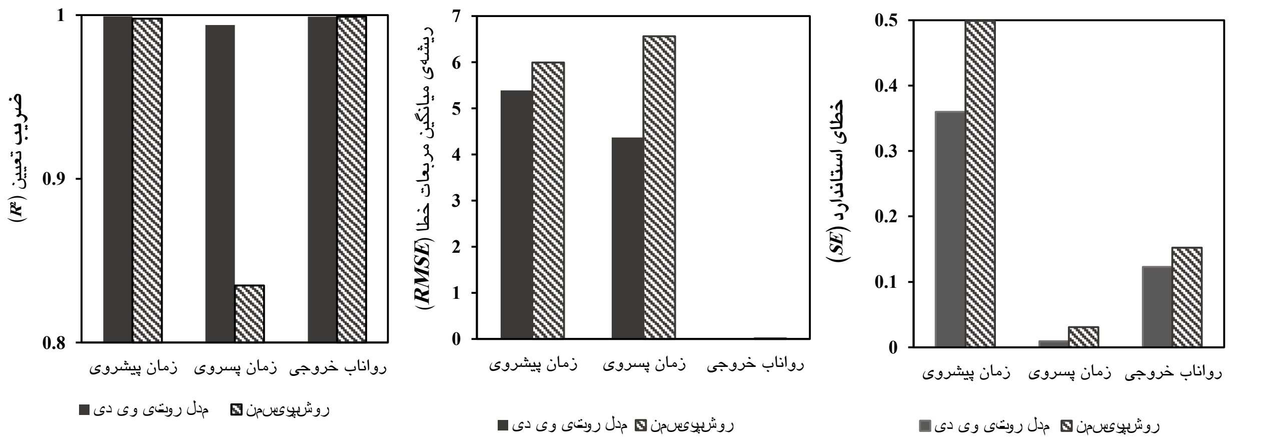
شکل۳ - مقایسه نتایج پیشروی و پسروی حاصل از مدل رو- تی‌وی‌دی با پریسمن و داده‌های مزرعه‌ای واکر(۱۹۸۹).



شکل ۴- مقایسه نتایج رواناب خروجی مدل رو- تی‌وی‌دی با مدل پریسمن و داده‌های مزرعه‌ای واکر(۱۹۸۹).



شکل ۵- مقادیر خطای پیشروی و پسروی دو مدل رو- تی‌وی‌دی و پریسمن برای آبیاری پرینتز-۳۲۳.



شکل ۶- مقادیر خطای پیشروی، پسروی و رواناب دو مدل رو- تی‌وی‌دی و پریسمن برای آبیاری رواناب(۱۹۸۹).

نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، از روش احجام محدود برای مدل‌سازی جریان آب در آبیاری جویچه ای استفاده شد. مقایسه نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده پیشروی، پسروی و رواناب خروجی نشان داد که استفاده از روش غیرنوسانی و صریح رو- تی‌وی‌دی با تابع محدودکننده

سوپربی به خوبی می‌تواند برای مدل‌سازی این جریان استفاده شود. مقایسه نتایج مدل با روش تفاضل محدود با شمای پریسمن نیز برتری این مدل را نشان داد. برتری این مدل را باید منتسب به صریح بودن شمای عددی، ارضاء بقای جرم (معادله پیوستگی) در هر سلول محاسباتی، خطای قطع مرتبه دوم و جلوگیری از نوسانات نامطلوب در جبهه پیشروی و پسروی موج دانست. در روش تفاضل محدود و ضمنی پریسمن برای شبیه‌سازی جبهه پیشروی باید سلول‌های مثلثی در پیشانی جبهه در نظر گرفت که حل دستگاه معادلات تولید شده را با دشواری همراه می‌سازد. در حلی‌که مدل پیشنهادی در این تحقیق با قابلیت مدل‌سازی در بستر خشک بدون نیاز به تمهیدات خاص امکان مدل‌سازی مناسب پیشروی و پسروی را فراهم ساخت. با افزایش زمان پیشروی، خطای شبیه‌سازی افزایش یافت که دلیل آنرا باید در مطلوب نبودن پارامترهای معادله نفوذ انتخاب شده دید و از طرف دیگر هرچه پارامترهای ورودی مزرعه با دقت و یکنواختی بیشتری اعمال گردند، عملکرد مدل بهبود خواهد یافت.

منابع مورد استفاده

Abbasi F, Mahmodian-Shoshtari M and Pazira A, 1997. Zero Inertia Model for Estimation of Design Parameters in Border Irrigation. Iranian Journal of Agricultural Science, 28(3): 59-68.

Alizadeh A, 2006. Designing Irrigation Systems (1st volume: Designing Surface Irrigation Systems). Publication of Imam Reza university, Mashhad.

Aminizadeh S M R, Liaghat A, Mahmodian-Shoshtari M and Kouchakzadeh S, 2006. An Explicit Scheme of Zero-Inertia Model Equations with Effectiveness of Wetted Perimeter for Furrow Irrigation Simulation. Journal of Quarterly Agricultural Research 6(3): 1-16.

Ansari H, 2011. Surface Irrigation, Evaluation, Designing and Simulation. 1st edition, Jahad Daneshgahi Publication of Mashhad, Mashhad.

Behbahani M R and Babazadeh H, 2005. Field Evaluation of Surface Irrigation Model (SIRMOD)(Case study in Furrow Irrigation) Journal of Agricultural Science and Natural Resources 12(2): 1-10.

Beykzadeh E, Ziaei A N, Davari K and Ansari H, 2014. Optimization Of Inflow Rate And Cutoff Timeusing The Full Hydrodynamic Model. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 8(2): 377-385.

Bradford F and Nikolaos D, 2001. Finite volume model for non-level Basin irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 127: 216-223.

Bautista E, Zerihun D, Clemmens AJ and Strelkoff TS, 2010. External iterative coupling strategy for surface-subsurface flow calculations in surface irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136: 692-703.

Ebrahimian H and Liaghat A, 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. Soil and Water Research 6: 91-101.

Elliott RL, 1980. Furrow irrigation field evaluation data. Colorado State University, Fort Collins, Colorado. Cited by Reddy M J. 1989. Integral equation solutions to surface irrigation, Journal of Agricultural Engineering Research, 42(4):251-265.

Elliott RL, Walker, WR, and Skogerboe GV, 1982. Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 108: 179-195.

Etedali RH, Ebrahimian H, Abbasi F and Liaghat A, 2011. Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness. Spanish Journal of Agricultural Research 9: 641-649.

Fišer M, Özgen I, Hinkelmann R and Vimmr J, 2016. A mass conservative well-balanced reconstruction at wet/dry interfaces for the Godunov-type shallow water model. International Journal for Numerical Methods in Fluids 82 (12): 893–908.

Ghezelsofloo A, 2005. Numerical Modeling of Shocks' Behavior in Shallow Flows using Advanced Finite Volume Method, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

Glaister P, 1988. Approximate Riemman solutions of the shallow water equation. Journal of Hydraulic Research 26: 293-306.

Lai C, 1986. Numerical Modeling of Unsteady Open Channel Flow. Advances in Hydroscience, Vol. 14. Academic Press, USA, 161–333.

Reddy MJ, 1989. Integral equation solutions to surface irrigation. Journal of Agricultural Engineering Research 42: 251-265.

Rosatti G and Begnudelli L, 2013. A closure-independent Generalized Roe solver for free-surface, two-phase flows over mobile bed. Journal of Computational Physics 255: 362–383.

Sanders BF, 2002. High-resolution and non-oscillatory solution of the St. Venant equations in non-rectangular and non-prismatic channels. Journal of Hydraulic Research 39(3): 321-330.

Toro EF, 2001. Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flow. John Wiley & Sons LTD, United Kingdom.

Toro EF, 2009. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. A Practical Introduction 3rd Edition, Springer, London.

Walker WR, 1989. SIRMOD a model of surface irrigation. User’s manual, Utah State University, Logan, Utah.

Walker WR and Humpherys AS, 1983. Kinematic-Wave furrow irrigation model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 109: 377-392.

Walker WR, 2003. SIRMOD III surface irrigation design, evaluation and simulation software, user’s guide and technical documentation. Utah State University, Logan, Utah.

Yuan B, Yuan D, Sun J and Tao J, 2012. A finite volume model for coupling surface and subsurface flows. Journal of Procedia Engineering 31: 62 – 67.

Zerihun D, Sanchez CA, Lazarovitch N, Warrick AW, Clemmens AJ and Bautista E, 2014. Modeling flow and solute transport in irrigation furrows. Journal of Irrigation & Drainage Systems Engineering 3(2):1-16.