نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶ جلد ۱۱، بهمن - اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۱۶۱-۱۱۵۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 11, Feb.-Mar. 2018, p. 1152-1161

بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان غیردائمی با گام‌های مکانی مختلف در بدنه سد پاره‌سنگی

اکبر محمدیها[۱]، مجید حیدری[۲*]، جلال صادقیان[۳]، علیرضا عمادی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۱۸

چکیده

یکی از روش‌های ارزان قیمت کنترل سیلاب استفاده از سدهای پاره‌سنگی فاقد هسته به صورت منفرد یا چندگانه است. این سدها از نوع سدهای تأخیری بوده که قادرند پیک سیلاب خروجی را نسبت به سیلاب ورودی کاهش دهند، از این رو بررسی نحوه رفتار جریان و روندیابی سیلاب در این سدها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق عملکرد معادلات سنت و نانت با استفاده از روش حجم محدود و بر مبنای روابط غیردارسی در شبیه‌سازی جریان غیردائمی در درون بدنه سد پاره سنگی با فرض شرط خروجی نامعلوم و با دو گام مکانی مختلف (۵ و ۱۰ سانتی‌متری) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مدل ریاضی معادلات مذکور در محیط متلب تهیه شد، سپس برای ارزیابی عملکرد این مدل از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان روی سد پاره‌سنگی استفاده شد. نتایج حاکی از دقت مناسب مدل عددی تهیه شده در شبیه‌سازی جریان بود، به‌طوریکه بر مبنای مقایسه انجام شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت و عمق جریان با مقادیر محاسباتی در سه مقطع و در سه لایه عمقی ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در بدنه سد پاره‌سنگی، میانگین خطای نسبی عمق و میانگین قدر مطلق خطای نسبی سرعت به ازای گام مکانی ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با۱۲/۷۶- و ۷/۲۶ درصد بدست آمد و با کاهش میزان گام مکانی از ۱۰ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر، دقت مدل به میزان ۴/۵ درصد در بخش تخمین عمق و ۲/۱ درصد در بخش تخمین سرعت افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: روابط غیردارسی، روش حجم محدود، محیط متخلخل درشت دانه، معادلات سنت و نانت

مقدمه

سدهای پاره‌سنگی (گابیون) به سدهای سیمی گالوانیزه‌ای اطلاق می‌شود که با پاره‌سنگ یا سنگدانه پر شده و از این سازه‌ها برای کنترل سیلاب، تغییر مسیر جریان رودخانه، کنترل رسوب و ... استفاده می‌شود. این سدها با ایجاد ذخیره موقت، نه تنها پیک سیل را کاهش می‌دهند بلکه در بعد زمانی نیز تأخیر ایجاد می‌کنند (Nazemi., 2011؛ Samani and Heydari., 2007). یکی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با این سدها انجام روندیابی دینامیکی، تعیین غلظت رسوبات در مقاطع مختلف و ... است، که این امر مستلزم تعیین مقادیر سرعت و فشار در داخل این سدها می‌باشد. در سدهای پاره‌سنگی به‌علت اینکه خلل و فرج داخل آن‌ها بزرگ است جریان به صورت آشفته بوده و قانون دارسی و سایر معادلات متداول در این محیطها صادق نمی‌باشد. بنابراین در چنین جریان‌هایی لازم است معادله دیگری (معادلات غیردارسی) جانشین معادله دارسی شده و حل گردد (Samani et al., 2003). رینولدز با انجام آزمایشاتی که در سال ۱۸۸۳ میلادی انجام داد معیار آرام بودن (جریان های ورقه‌ای) یا آشفته بودن جریان (جریان متلاطم) را با تعریف عدد رینولدز مشخص کرد، بر اساس این آزمایشات اگر عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۱۰ باشد جریان آشفته بوده و قانون دارسی اعتباری ندارد (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۹). بدین منظور و برای تحلیل جریان در بدنه سدهای پاره‌سنگی، بایستی معادلات حاکم بر این محیطها (معادلات غیر-دارسی و پیوستگی جریان) به صورت همزمان حل گردند. حل همزمان این معادلات با روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نبوده و برای حل چنین معادلاتی بایستی از روش‌های عددی (مثل روش تفاضل-

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، ایران
۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mheydari@basu.ac.ir)

های محدود[1]، روش عناصر محدود[2]، روش عناصر مرزی[3] و روش احجام محدود[4]) استفاده شود. از آنجا که در روش احجام محدود، پیوستگی از دقت بسیار بالایی برخوردار است – این خاصیت در مورد محاسبات دبی ورودی و یا خروجی به حجم محدود بسیار مهم است (حیدری، ۱۳۸۶) – لذا در این تحقیق از روش احجام محدود استفاده خواهد شد.

حسینی و صنعی (۱۳۸۲) با استفاده از معادله فورشهایمر[5]، معادله لاپلاس[6] و روش اجزای محدود به بررسی دوبعدی جریان دائمی عبوری از بدنه سدهای سنگریزه‌ای پرداختند. آن‌ها بر اساس مقایسه انجام گرفته بین نتایج حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که کارایی مدل ارائه شده در تحلیل تراوش جریان غیرخطی در توده‌های سنگریزه‌ای با مصالح یکنواخت در حالت دائمی و شرایط جریان پیوسته اشباع در حد مسائل بررسی شده قابل قبول است. آلدریگتی برای شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد و تحت فشار در کانال‌های باز و بسته و با هر شکل مقطع دلخواه از حل عددی معادلات سنت و نانت با استفاده از روش عددی حجم محدود استفاده کرد (Aldrighetti., 2007). حسینی و جوی جریان‌های دائمی و غیر دائمی عبوری از بدنه سد پاره‌سنگی متشکل از مصالح همگن را بررسی نمودند. ایشان برای تعیین مشخصات جریان (دبی– عمق) در این محیط از معادله ترکیبی سنت و نانت – فرشهایمر استفاده کردند. آن‌ها برای حل این معادلات از تکنیک چهار نقطه‌ای روش تفاضلات محدود و گام مکانی ثابت استفاده نموده و دستگاه غیرخطی حاصل را با استفاده از طرح نیوتن رفسون[7] حل نمودند. مقایسه نتایج مدل ریاضی و آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که مدل ارائه شده از دقت مناسبی در شبیه‌سازی عمق و پروفیل سطح آب نسبت به زمان برخوردار است. آن‌ها در تحقیق خود، شرط مرزی خروجی را همانند شرط مرزی ورودی ثابت در نظر گرفته و ضرایب رابطه فورشهایمر را با استفاده از رگرسیون‌گیری غیرخطی و بر مبنای نتایج جریان دائمی تعیین نمودند (Hosseini and Joy., 2007). اکبری و فیروزی به‌منظور بررسی حرکت موج سیل در یک رودخانه عریض مستطیلی، معادله سنت و نانت را به دو روش عددی لکس و پرایزمن[8] حل نمودند و نتایج را با مقادیر خروجی برنامه هکرس[9] مقایسه نمودند، نتایج روش‌های عددی با خروجی برنامه هکرس تطابق مناسبی نداشت که آن‌ها این مسئله را ناشی از جایگزینی معادله مومنتوم به جای معادله انرژی در برنامه هکرس دانستند (Akbari and Firoozi., 2010). کمپه و همکاران برای شبیه‌سازی جریان از حل عددی معادلات ناویر استوکس[10] به روش حجم محدود استفاده کردند (Kempe et al., 2014). آسیابان و همکاران با حل معادله متغیر تدریجی به روش گام به گام مستقیم پروفیل سطح آب را در درون سد پاره‌سنگی شبیه‌سازی کرده و نتایج مدل خود را با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه نمودند که نتایج حاکی از دقت مناسب این روش در شبیه‌سازی جریان و در نهایت شبیه‌سازی سیلاب بود (Asiaban et al., 2015). لیو و همکاران از روش شبکه Boltzmann که یک تکنیک Mesoscopic و کاملاً صریح است برای حل معادلات سنت و نانت استفاده کردند که نتایج حاکی از دقت بسیار مناسب این روش در حل معادله سنت و نانت بود (Liu et al., 2015).

لذا با توجه به تحقیقات اشاره شده و توجه به این نکات که جریان‌های موجود در طبیعت بیشتر غیردائمی و آشفته است، شرط مرزی خروجی نامعلوم می‌باشد (به جز در مواردی که در پایین‌دست نقطه کنترل تشکیل شده باشد یا به علت وجود شرایط خاص مانند دریاچه یا ابزار آلات اندازه‌گیری، شرط مرزی خروجی معلوم باشد) و دقت نتایج خروجی مدل ریاضی تابعی از اندازه گام مکانی است، در این تحقیق سعی بر آن شده است که با استفاده از حل عددی معادلات سنت و نانت به روش حجم محدود، فرض شرط خروجی نامعلوم و با اندازه گام‌های مکانی مختلف، رفتار جریان در حالت غیردائمی در داخل بدنه سد پاره‌سنگی بررسی و شبیه‌سازی گردد.

مواد و روش‌ها

هیدرولیک جریان در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه

در سدهای پاره‌سنگی به‌علت بزرگ بودن خلل و فرج داخل آن‌ها، جریان به صورت آشفته بوده و قانون دارسی و سایر معادلات متداول در این محیط ها صادق نمی‌باشد، بنابراین لازم است از روابطی استفاده گردد که ضمن تبیین خصوصیات فیزیکی این محیط‌ها بتواند هیدرولیک جریان آن‌ها را نیز شبیه‌سازی کند. در این تحقیق از فرم دوجمله‌ای بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت استفاده شده، که به معادله فورشهایمر نیز معروف است و با استفاده از معادلات ناویر استوکس بدست آمده است (Samani et al., 2003).

$$I = Au + Bu^2 \qquad (۱)$$

که در آن I گرادیان هیدرولیکی، u سرعت جریان، A و B

1- Finite Difference Method
2- Finite Element Method
3- Boundary Element Method
4- Finite Volume Method
5- Forchheimer equation
6- Laplace's equation
7- Newton-Raphson scheme
8- Lax and Preissmann
9- HEC-RAS
10- Navier–Stokes equations

ضرایب ثابت که A به مشخصات فیزیکی مصالح، میزان گرانروی و دانسیته سیال و B به مشخصات فیزیکی مصالح و شرایط هیدرولیکی در بدنه متخلخل بستگی دارد (Nazemi., ؛ Samani et al., 2003 2011).

معادله حاکم بر جریان

برای محاسبه مشخصات جریان در بدنه سد پاره‌سنگی در شرایط جریان غیردائم از معادله سنت و نانت به شرح روابط ۲ و ۳ استفاده شده است، که شامل یک دسته معادلات تفاضلات جزئی هذلولی می‌باشند (Aldrighetti., 2007).

الف) معادله پیوستگی :

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (uh)}{\partial x}=0 \qquad (۲)$$

ب) معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial h}{\partial x}=g(S_0-S_f) \qquad (۳)$$

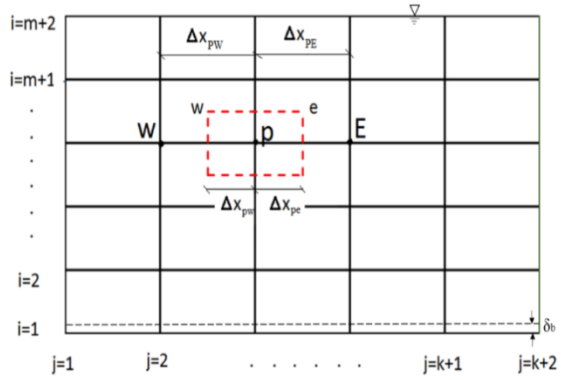
در روابط فوق u، مولفه سرعت جریان، h عمق جریان، x راستای طولی جریان ، S_0 شیب بستر، S_fSf شیب خط انرژی (گرادیان هیدرولیکی) و t مولفه زمانی است (Aldrighetti., 2007).

حل عددی معادله سنت و نانت در بدنه سد پاره‌سنگی

حل مستقیم معادله سنت و نانت به‌علت ماهیت غیرخطی این معادلات امکان‌پذیر نبوده و برای حل آن‌ها بایستی از روش‌های تحلیلی، ترسیمی و یا عددی استفاده شود. در تحقیق حاضر به منظور گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان (معادله سنت و نانت – فورشهایمر) از روش عددی حجم محدود با رویکرد ضمنی استفاده شده است. استفاده از این رویکرد، موجب پایداری بی‌قید و شرط حل مسئله خواهد شد.

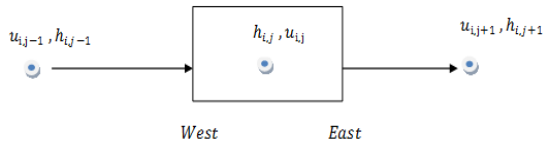
گسسته‌سازی معادلات جریان

برای حل معادلات شبیه‌ساز جریان در درون بدنه سد پاره‌سنگی، ابتدا معادله غیردارسی فورشهایمر با معادله مومنتوم در معادله سنت و نانت ترکیب شده، سپس این معادلات با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی شدند. بدین منظور ناحیه حل (بدنه سد) در جهت جریان مطابق شکل ۱ شبکه‌بندی شد و گسسته سازی معادلات برای کلیه گره‌های داخلی با انتگرال‌گیری از عبارات مشتق و با بکارگیری روش تفاضل بالاسویه[1] در جهت جریان و نهایتاً تقسیم تمام عبارات به حجم کنترل سلول‌ها انجام می‌گیرد. تمامی مشتقات مکانی موجود در معادله مذکور در گام بعدی (در زمان n+1) در نظر گرفته شده و این معادله به‌صورت کاملاً ضمنی حل شده است (قدیمی، ۱۳۹۲؛ Versteeg and Malalasekera., 2007).



شکل ۱- شبکه بندی دامنه جریان

بدین منظور دامنه محاسباتی به تعدادی حجم کنترل کوچک و مجزا مطابق با شکل ۲ تقسیم شد.



شکل ۲- حجم کنترل در نظر گرفته شده

به دلیل اینکه جهت جریان در تعیین مقادیر u و h روی سطوح حجم کنترل موثر است و طرح تفاضل بالاسویه یکی از روش‌هایی بوده که مبتنی بر جهت جریان است لذا در این تحقیق از روش مذکور برای گسسته‌سازی مقادیر u و h روی سطوح حجم کنترل استفاده شده است (Versteeg and Malalasekera., 2007).

در روش بالاسویه گسسته‌سازی طبق رابطه ۴ است.

$$\eta=\begin{cases}\eta_{East}=\begin{cases}\eta_{i,j} & if \quad Q_{i,j+\frac{1}{2}}\geq 0\\ \eta_{i,j+1} & if \quad Q_{i,j+\frac{1}{2}}<0\end{cases}\\ \eta_{West}=\begin{cases}\eta_{i,j-1} & if \quad Q_{i,j+\frac{1}{2}}\geq 0\\ \eta_{i,j} & if \quad Q_{i,j+\frac{1}{2}}<0\end{cases}\end{cases} \qquad (۴)$$

در رابطه ۴، η می‌تواند سرعت یا عمق باشد.

لذا فرم نهایی معادلات پیوستگی و مومنتوم برای گره‌های داخلی به شرح روابط ۵ و۶ خواهند بود:

الف) معادله پیوستگی

$$\frac{h_{i,j}^{n+1}-h_{i,j}^{n}}{\Delta t}+\frac{u_{i,j}^{n+1}h_{i,j}^{n+1}-u_{i,j-1}^{n+1}h_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x}=0 \qquad (۵)$$

1- The upwind differencing scheme

ب) معادله مومنتوم در ترکیب با معادله دو جمله‌ای فورشهایمر

$$\frac{u_{i,j}^{n+1}-u_{i,j}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{\Delta x}\left(\frac{u_{i,j}^{2\,n+1}-u_{i,j-1}^{2\,n+1}}{4}\right)+\frac{1}{2\Delta x}u_{i,j}^{n+1}\left(\frac{u_{i,j+1}^{n+1}-u_{i,j-1}^{n+1}}{2}\right)+g\left(\frac{h_{i,j}^{n+1}-h_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x}\right)-g\left(S_0-\left(A.u_{i,j}^{n+1}+B.u_{i,j}^{2\,n+1}\right)\right)=0 \qquad (۶)$$

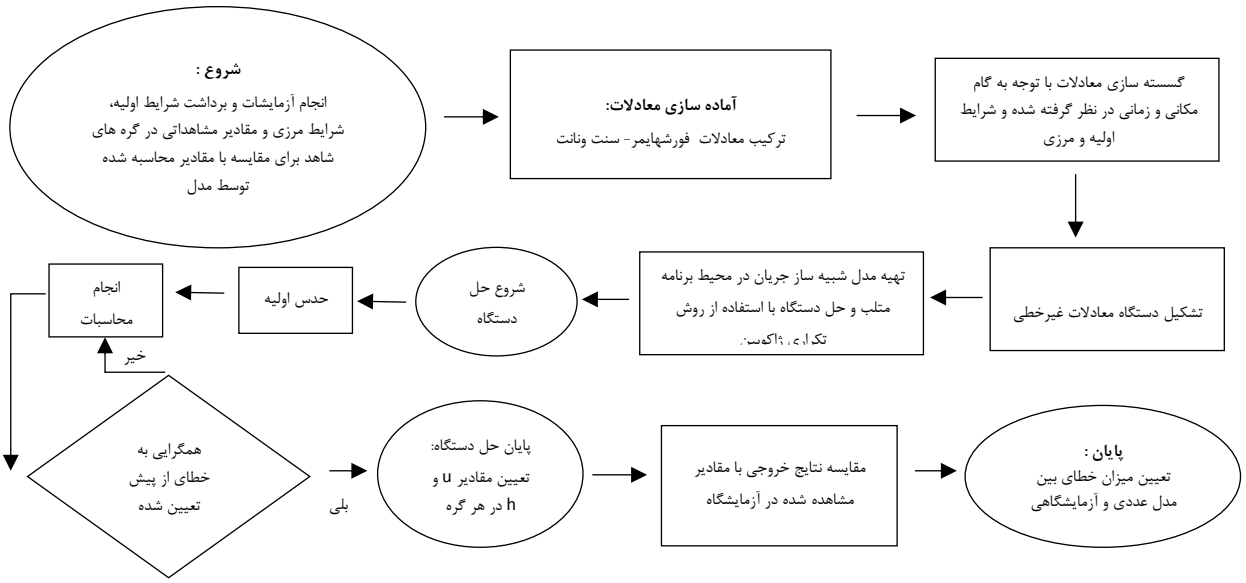
برای حل همزمان معادلات ۵ و ۶ در گام زمانی بعدی (n+1) با توجه به غیرخطی بودن آن‌ها، نیازمند یک شرط اولیه (سرعت و عمق جریان در زمان فعلی (n)) و دو شرط مرزی است. مقادیر اندازه‌گیری‌شده سرعت و عمق نظیر در زمان (n+1) در ورودی بدنه سد پاره‌سنگی به‌عنوان شرط مرز ورودی جریان خواهد بود و در مرز خروجی جریان گرادیان نرمال سرعت در زمان (n+1) برابر با صفر قرار داده می‌شود (قدیمی، ۱۳۹۲). در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر گام مکانی بر نتایج خروجی، شبکه‌بندی جریان با فواصل ۵ و ۱۰ سانتی‌متری انجام گرفته و مقادیر سرعت در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شده است. نتیجه بسط معادلات در هر سطر از شبکه‌بندی، سیستمی از معادلات جبری غیرخطی با توجه به تعداد گره‌ها خواهد بود. بدین منظور برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی متلب تهیه شد و دستگاه معادلات غیرخطی بر اساس روش تکراری ژاکوبین حل گردید. خروجی این برنامه مقادیر u و h در گام زمانی بعدی (n+1) می‌باشد. در شکل ۳ فلوچارت این روش ارائه شده است.

توابع هدف و متغیرهای تصمیم

در این تحقیق برای بررسی میزان خطا از معیار درصد خطای نسبی (%RE) استفاده گردید (Addiscott and Whitmor., 1987).

$$\%RE=100.\frac{(c-o)}{o} \qquad (۷)$$

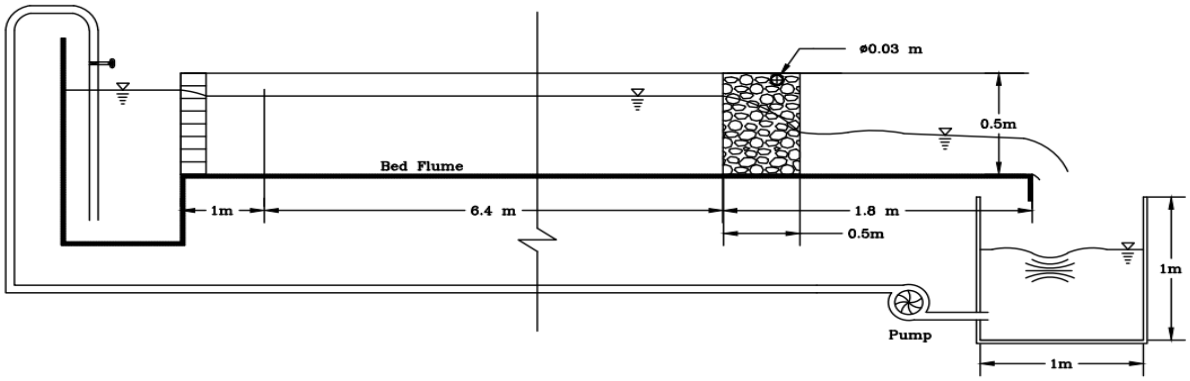
در این رابطه C و O به ترتیب مقادیر محاسبه و مشاهده شده عمق و سرعت است. مقدار شاخص RE در واقع میزان انحراف نسبی مقادیر محاسبه شده از مقادیر واقعی است. این شاخص می‌تواند مقادیر مساوی، بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از صفر داشته باشد. مقدار ایده‌آل برای این شاخص صفر است.



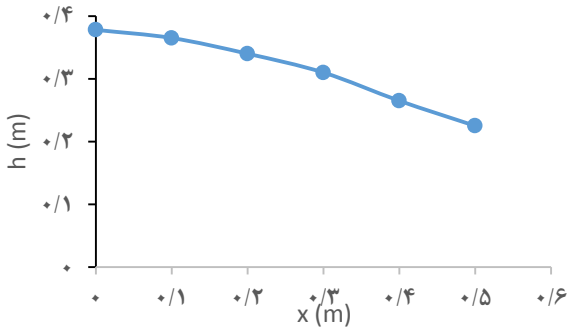
شکل ۳- فلوچارت روش انجام تحقیق

روش آزمایش

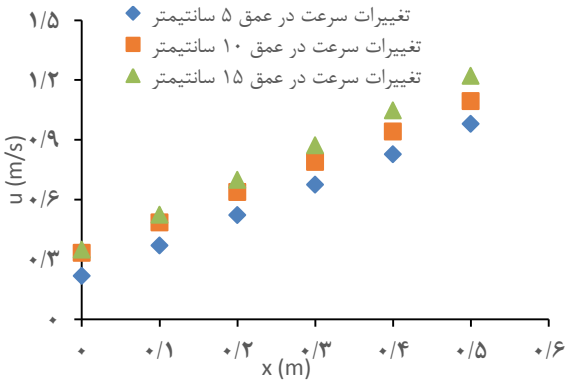
در راستای صحت‌سنجی مدل ریاضی تهیه شده از نتایج آزمایشگاهی انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا در تابستان ۱۳۹۵، روی فلوم شیشه‌ای به طول ۹/۲ متر، عرض داخلی ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۵متر، شیب کانال ۰/۰۰۴۱ استفاده شد. این فلوم توسط موتور پمپ با حداکثر دبی ۶۰ لیتر در ثانیه تغذیه شده و میزان دبی توسط یک شیر برقی مجهز به اینورتور کم و زیاد می‌گردد. بدین منظور درون فلوم با استفاده از توری فلزی و سنگدانه‌هایی به ابعاد متوسط ۳ سانتی‌متر، سد پاره‌سنگی به طول ۵۰ سانتی‌متر مطابق با شکل ۴ ساخته شد. کانال بالادست این سد به عنوان مخزن عمل می‌نماید. اندازه‌گیری سرعت در داخل بدنه سد توسط دستگاه ADV انجام شد؛ بدین منظور در داخل بدنه سد پاره‌سنگی از جعبه استوانه‌ای شکل به قطر ۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر با دیواره مشبک ساخته شده از توری فلزی، برای استقرار دستگاه ADV استفاده شد.



شکل ٤- نمایی از فلوم آزمایشگاهی



شکل٥- تغییرات عمق به ازای دبی ۷/٥ لیتر در ثانیه



شکل ٦- تغییرات سرعت به ازای دبی ۷/٥ لیتر در ثانیه در اعماق مختلف

تراز سطح آب توسط شبکه‌ای از لوله‌های پیزومتر تعبیه شده در کف فلوم به فواصل ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری دبی ورودی به فلوم از دستگاه دبی‌سنج التراسونیک[1] استفاده شد. شکل ۴ نمایی از فلوم استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. نحوه انجام آزمایشات بدین‌گونه بوده است که ابتدا دبی ۷/۵ لیتر در ثانیه در کانال برقرار شده و بر مبنای شبکه-بندی در نظر گرفته شده در داخل بدنه سد پاره‌سنگی، مشخصات جریان شامل عمق و سرعت اندازه‌گیری شده (شرایط اولیه جریان)، سپس دبی جریان توسط شیر برقی مجهز به اینورتور به ۹ لیتر در ثانیه افزایش یافته و مجدداً مشخصات جریان شامل سرعت و عمق با گام زمانی ۶۰ ثانیه در همان نقاط اندازه‌گیری شد. استفاده از شیر

1- Ultrasonic Flow Meter

برقی مجهز به اینورتور قابل برنامه‌ریزی موجب خواهد شد که بتوان بارها دبی را به صورت دقیق از دبی ۷/۵ لیتر در ثانیه به میزان ۹ لیتر در ثانیه افزایش داده و با انتقال دستگاه ADV به نقاط مختلف فلوم، سرعت را در نقاط مشخص و در زمان معین اندازه‌گیری نمود. اطلاعات اندازه‌گیری شده در دبی ۹ لیتر در ثانیه شامل مرز ورودی و مقادیر مشاهداتی به منظور مقایسه با مقادیر محاسباتی است.

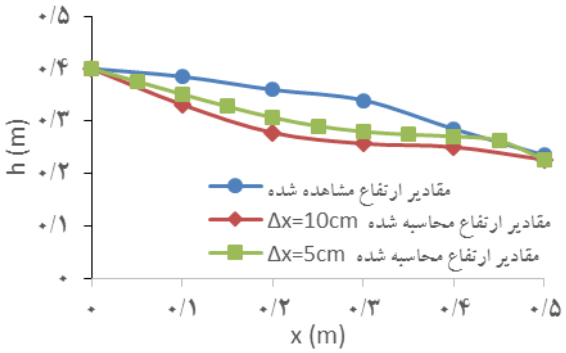
نتایج و بحث

طبق روش شرح داده شده در قسمت روش آزمایش، ابتدا جریان با دبی ۷/۵ لیتر در ثانیه در کانال برقرار شده و شرایط اولیه جریان اندازه گیری شد، در مرحله بعد دبی جریان به ۹ لیتر در ثانیه افزایش یافت و شرایط مرز ورودی (سرعت و عمق) و سرعت و عمق در دیگر نقاط بدنه (مقادیر مشاهداتی برای مقایسه با مقادیر محاسبه شده توسط مدل) پس از ۶۰ ثانیه برداشت شد. در شکل ۵ و ۶ مقادیر عمق و سرعت مشاهده شده به ازای دبی ۷/۵ لیتر در ثانیه نشان داده شده است. بر مبنای اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در این دبی، حداقل مقدار عدد رینولدز در این آزمایش ۳۲۸۲۱ بوده که حاکی از آشفته بودن جریان است.

همانطور که از شکل ۵ و ۶ مشخص است در داخل سد پاره-سنگی و در جهت جریان از انرژی فشاری جریان کاسته شده و بر انرژی جنبشی جریان افزوده می‌شود که این مسئله با کاهش عمق و افزایش سرعت نمود پیدا خواهد کرد. با حرکت در جهت جریان در داخل بدنه سد پاره‌سنگی مقدار سرعت جریان نه تنها در راستای افقی بلکه در راستای قائم نیز افزایش یافت، که نحوه این افزایش سرعت برای اعماق بین ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری به وضوح در شکل ۶ قابل رویت است. ماکزیمم سرعت در مقطع خروجی و در عمق ۱۵ سانتی-متری (مطابق با توزیع عمودی سرعت در کانال) مشاهده شد، مطابق با شکل ۵ در این مقطع عمق آب نسبت به دیگر مقاطع کوچک‌تر بوده و افزایش سرعت با کاهش عمق قابل انتظار است. در این تحقیق به‌منظور بررسی عملکرد مدل شبیه‌ساز تهیه شده، مقادیر A و B در معادله فورشهایمر، به ترتیب ۲/۱ و ۲/۴۶- در نظر گرفته شد.

روند انجام کار بدین صورت بوده است که برمبنای مدل شبیه‌ساز تهیه شده در محیط متلب و با استفاده از اطلاعات دبی پایه (دبی ۷/۵ لیتر در ثانیه) و شرایط مرزی (در دبی ۹ لیتر در ثانیه)، مشخصات جریان شامل سرعت و عمق در بدنه سد پاره‌سنگی به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری محاسبه شده و نهایتاً این مقادیر با مقادیر واقعی (مشاهده شده) مقایسه شد. مقادیر عمق مشاهده شده و محاسبه شده در دبی ۹ لیتر در ثانیه پس از ۶۰ ثانیه در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷ و جدول ۱ مبین این مطلب است که مدل ریاضی توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان در درون بدنه سدپاره‌سنگی دارد و در مجموع به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب با میانگین خطای نسبی ۸/۲۶- و ۱۲/۷۶- درصد عمق آب را تخمین زده است. بر این اساس با انتخاب گام‌های مکانی کوچک‌تر میزان دقت مدل افزایش می‌یابد که این موضوع در شکل ۷ به وضوح قابل رویت است.



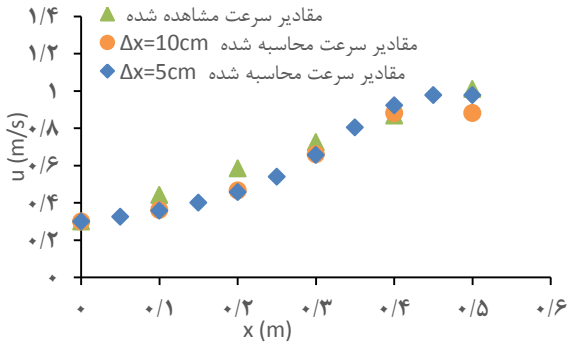
شکل ۷- تغییرات عمق مشاهداتی و محاسباتی در دبی ۹ لیتر در ثانیه

جدول ۱- مقادیر درصد خطای نسبی عمق در بدنه سد پاره‌سنگی به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری

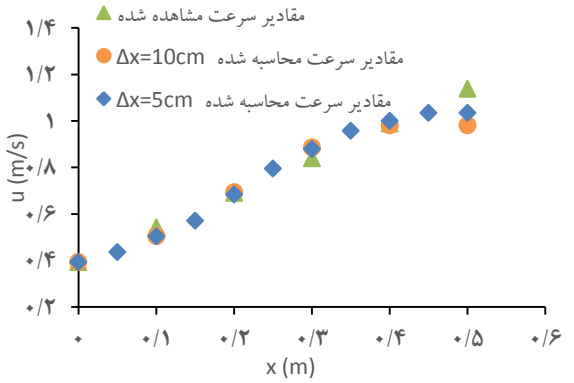
x	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/۵	میانگین خطای نسبی
خطای نسبی به ازای Δx=5cm	۰	-۸/۷۱	-۱۴/۷۱	-۱۷/۵۹	-۴/۹۱	-۳/۶	-۸/۲۶
خطای نسبی به ازای Δx=10cm	۰	-۱۳/۸۸	-۲۲/۷۹	-۲۴/۳۲	-۱۲	-۳/۵۵	-۱۲/۷۶

از دلایل ایجاد خطا بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌توان به روش بالاسویه و ماهیت این روش، آشفتگی جریان، خطای روش

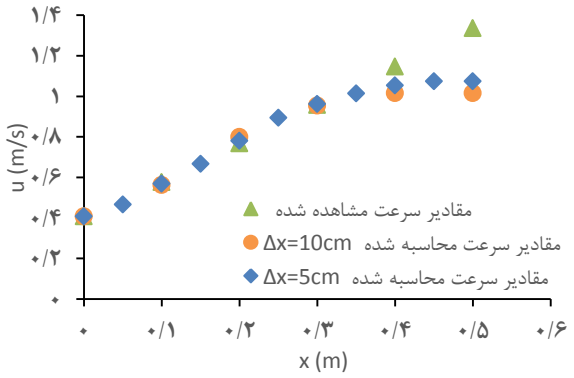
عددی، خطای اندازه‌گیری، خطای تطابق بین گام زمانی اندازه‌گیری‌شده و محاسباتی، نوسانات اندک جریان، ضعف معادله دوجمله‌ای فورشهایمر در شبیه‌سازی جریان و مناسب نبودن ضرایب آن‌ها اشاره کرد، هرچند در انجام آزمایشات و اجرای مدل تلاش شد که این خطاها کم‌ترین دخالت ممکن را داشته باشند. بر اساس جدول ۱ مقدار خطای نسبی مدل در پیش‌بینی عمق جریان خروجی از سد پاره‌سنگی به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۳/۶- و ۳/۵۵- درصد می‌باشد که این مسئله حاکی از دقت بسیار مناسب این مدل ریاضی در تخمین عمق جریان خروجی است و از این مدل می‌توان با دقت بالا برای روندیابی سیلاب در درون بدنه سد پاره‌سنگی استفاده کرد. در شکل‌های (۸، ۹ و ۱۰) تغییرات مقدار سرعت مشاهده شده و محاسبه شده در اعماق ۵، ۱۰و ۱۵ سانتی‌متری به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری نشان داده شده است.



شکل ۸- تغییرات سرعت مشاهداتی و محاسباتی به ازای دبی ۹ لیتر در ثانیه در عمق ۵ سانتی‌متری



شکل ۹- تغییرات سرعت مشاهداتی و محاسباتی به ازای دبی ۹ لیتر در ثانیه در عمق ۱۰سانتی‌متری



شکل ۱۰- تغییرات سرعت مشاهداتی و محاسباتی به ازای دبی ۹ لیتر در ثانیه در عمق ۱۵ سانتی‌متری

مطابق با شکل ۸ تا ۱۰ و جدول ۲ در حالت کلی میانگین قدر مطلق خطاهای نسبی مدل در نقاط اندازه‌گیری شده به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۵/۱۶ و ۷/۲۶ درصد بود که حاکی از دقت خوب مدل در پیش‌بینی سرعت جریان است. نتایج نشان داد در این قسمت نیز با انتخاب گام‌های مکانی کوچک‌تر میزان دقت مدل افزایش یافت که این موضوع در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به وضوح دیده شد. لازم به ذکر است این موضوع هرچند موجب افزایش اندک خطا در برخی از نقاط شد که احتمالاً ناشی از ضرایب انتخابی معادله فورشهایمر است ولی در حالت کلی موجب کاهش خطا گردید. به دلیل شرط مرزی در نظر گرفته شده (صفر گرفتن گرادیان نرمال سرعت خروجی)، سرعت محاسباتی در دو مقطع آخر شبکه در نظر گرفته شده برای هر عمق ثابت می‌گردد که این مسئله موجب افزایش میزان خطای نسبی در مقطع خروجی (مقطع ۰/۵ در جدول ۲) در حالت کلی می‌شود و با انتخاب گام‌های مکانی کوچک‌تر می‌توان این افزایش خطا را بهبود بخشید. مطابق با جدول ۲ مقدار میانگین قدر مطلق خطای نسبی مدل در مقطع خروجی از سد پاره‌سنگی به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۱۰/۶۱ و ۱۶/۸ درصد می‌باشد که این مسئله حاکی از دقت کمتر این مدل ریاضی در تخمین سرعت جریان خروجی نسبت به تخمین عمق جریان خروجی است.

جدول ۲- مقادیر درصد خطای نسبی سرعت در بدنه سد پاره‌سنگی به ازای دو گام مکانی ۵ و ۱۰ سانتی‌متری

x (m)	۰	۰/۳		۰/۵		میانگین کلی قدر مطلق خطای نسبی (٪)
عمق	گام مکانی					
	۵ و ۱۰	۵	۱۰	۵	۱۰	
۵ cm	۰	-۹/۴۳	-۹/۱۵	-۳/۱۸	-۱۲/۷۲	-
۱۰ cm	۰	۴/۷۶	۵/۴۶	-۹/۰۲	-۱۳/۷۴	-
۱۵ cm	۰	۰/۴۷	-۰/۲۸	-۱۹/۶۴	-۲۳/۹۵	-
میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای Δx= 5 cm	۰	۴/۸۸	-	۱۰/۶۱	-	۵/۱۶
میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای Δx= 10 cm	۰	-	۴/۹۶	-	۱۶/۸	۷/۲۶

نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار جریان آب در درون بدنه سد پاره‌سنگی با استفاده از روش عددی حجم محدود در حل معادلات ترکیبی سنت و نانت غیردارسی (معادله دوجمله‌ای فورشهایمر) بررسی گردید. بدین منظور مدل شبیه‌ساز جریان با استفاده از معادلات مذکور در محیط برنامه متلب تهیه شد و خروجی این مدل با مقادیر مشاهده شده در آزمایشگاه مقایسه گردید، میانگین خطای نسبی عمق و میانگین قدر مطلق خطای نسبی سرعت محاسبه شده برای این آزمایش به ازای گام مکانی ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۱۲/۷۶- و ۷/۲۶ درصد بوده که حاکی از این مسئله است که روش عددی حجم محدودی به خوبی توانایی حل معادلات حاکم بر بدنه سد پاره‌سنگی و شبیه‌سازی جریان را دارا است. بنابراین از این مدل به خوبی می‌توان در روندیابی دینامیکی سیلاب، تخمین غلظت رسوبات در نقاط مختلف بدنه و ... است. بر اساس نتایج مدل ارائه شده مشاهده شد با کاهش میزان گام مکانی از ۱۰ سانتی‌متر به ۵ سانتی‌متر، باعث افزایش دقت مدل به میزان ۴/۵ درصد در بخش تخمین عمق و ۲/۱ درصد در بخش تخمین سرعت شد. که این مسئله اهمیت انتخاب گام مکانی را در دقت نتایج خروجی مخصوصاً در مقطع آخر نشان داد. مطابق با جدول ۱ و ۲ هر چند در حالت کلی مدل ریاضی تهیه شده تخمین سرعت بهتری نسبت به تخمین عمق دارد ولی در بخش خروجی بدنه سد پاره‌سنگی دقت تخمین عمق نسبت به تخمین سرعت بالاتر است که این موضوع بیشتر ناشی از شرط مرزی در نظر گرفته شده است و با کوچک در نظر گرفتن مقدار گام مکانی (Δx) می‌توان تا حد زیادی مقدار تخمین سرعت را بهبود بخشید.

بر اساس مدل تهیه‌شده می‌توان با در اختیار داشتن هیدروگراف ورودی سیلاب و شرایط پایه جریان، مطابق با روش شرح داده شده، روندیابی دینامیکی را انجام داد. از طرفی با استفاده از این مدل می‌توان عملکرد مخازن مختلف را در ابعاد و ذرات تشکیل دهنده مختلف، به ازای سیلاب‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داد و بهینه‌ترین ابعاد بدنه و ذرات تشکیل‌دهنده آن را با توجه به اهداف مورد انتظار (میزان افزایش ارتفاع جریان در انتهای مخزن، میزان حجم ذخیره شده و زمان عبور سیلاب و در نهایت کاهش دبی پیک خروجی از سد پاره‌سنگی) قبل از احداث تعیین نمود. که این موضوع به لحاظ اقتصادی و فنی در شرایط عملی بسیار مفید می‌باشد. همچنین به‌منظور محاسبه میزان رسوب عبوری و غلظت رسوب در نقاط مختلف نیازمند تعیین مقادیر سرعت و ارتفاع بوده، که از نتایج خروجی این مدل به خوبی می‌توان در این راستا استفاده کرد.

منابع

حسینی،س.م.، صنعی،ا. ۱۳۸۲. تحلیل جریان از بدنه سدهای سنگریزه‌ای به روش اجزا محدود در قالب شبکه ثابت. مواد پیشرفته در مهندسی – استقلال. ۲۲.۱: ۱۰۸-۹۱.

حیدری،م. ۱۳۸۶. مدل دوبعدی جریان عبوری از داخل و روی سدهای پاره‌سنگی و کاربرد آن در کنترل سیلاب. رساله دکتری تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

قدیمی،پ. ۱۳۹۲. دینامیک سیالات محاسباتی کاربردی، مبتنی بر روش‌های تفاضل محدود، اجزاء محدود و حجم محدود. جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

محمودیان شوشتری،م. ۱۳۸۹. هیدرولیک آب‌های زیرزمینی. انتشارات دانشگاه شهید چمران.

Addiscott,T.M and Whitmore,A.P. 1987. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn. Winter and spring. Journal of Agricultural Science. 109: 141-157.

Akbari,G and Firoozi,B. 2010. Implicit and Explicit Numerical Solution of Saint-Venent Equations for Simulating Flood Wave in Natural Rivers. 5th National Congress on Civil Engineering, May 4-6, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Aldrighetti,E. 2007. Computational hydraulic techniques for the Saint Venant Equations in arbitrarily shaped geometry. PhD thesis, Universita degli Studi di Trento.

Asiaban,P., Amiri Tokaldany,E and Tahmasebi Nasab,M. 2015. Simulation of Water Surface Profile in Vertically Stratified Rockfill Dams. International Journal of Environmental Research. 9.4:1193-1200.

Hosseini,S.M and Joy,D.M. 2007. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porousmedia applicable to valley fills. International Journal of River Basin Management. 5.4:253-265.

Kempe,T., Vowinckel,B and Fröhlich,j. 2014. On the relevance of collision modeling for interface-resolving simulations of sediment transport in open channel flow. International Journal of Multiphase Flow. 58:214-235.

Liu,H., Wang,H., Liu,Sh., Hu,Ch., Ding,Y and Zhang,J. 2015. Lattice Boltzmann method for the Saint–Venant equations. Journal of Hydrology. 524: 411-416.

Nazemi,A. 2011. Flow Hydraulics and Sediment Transport in Pervious Rockfill Detention Dams. PhD thesis, University of Putra, Malaysia.

Samani,J.M.V and Heydari,M. 2007. Reservoir Routing through Successive Rockfill Detention Dams. Journal of Agricultural Science and Technology. 9: 317-326.

Samani,H.M.V., Samani,J.M.V and Shayannejad,M. 2003. Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dam. Journal of Hydraulic Engineering. 129.6:448-454.

Versteeg,H and Malalasekera,W. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd Edition. Pearson Education Ltd, Harlow, England, 557 pp.

فهرست علائم

A, B	ضرایب ثابت رابطه فورشهایمر
C, O	مقادیر محاسباتی و مشاهداتی عمق و سرعت
h	عمق جریان (m)
I	گرادیان هیدرولیکی
n, n+1	گام زمانی معلوم و مجهول (s)
RE	خطای نسبی (٪)
S_0 , S_f	شیب بستر و شیب خط انرژی
t	زمان (s)
u	سرعت جریان (ms^{-1})
x	راستای طولی بدنه (m)
η	سرعت یا عمق

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 11, Feb.-Mar. 2018, p. 1152-1161

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶ جلد ۱۱، بهمن - اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۱۶۱-۱۱۵۲

Numerical and Experimental Study of the Unsteady Flow with Different Distance Steps in Body of Rockfill Dam

A. Mohamadiha[1], M. Heydari[2]*, J. Sadeghiyan[3], A.R. Emadi[4]
Recived: Jul.28, 2017 Accepted: Sep.09, 2017

Abstract

Non-Core Rockfill dam is one of the low-cost methods of flood control for single or multiple. Rockfill dams are one type of detention dams and capable to reduce the output peak of flood to the entrance flood. Therefore, studying the flow behavior and flow routing is very important. In this study, Performance of the Saint–Venant equations studied via finite volume method and on the basis of the non-Darcy relations in the simulation of unsteady flow in the body of Rockfill dam, assuming the condition of the unknown output and with two different distance steps (5 and 10 cm). For this purpose, first mathematical model of mentioned equations prepared in MatLab and then in order to evaluate the performance of this model used the results of conducted experiments in the hydraulic laboratory of Agriculture faculty of Bu-Ali Sina University of Hamadan on the Rockfill dams. The results showed the good accuracy of mentioned numerical model in flow simulation. The mean of depth relative error and the mean absolute of velocity relative error are -12.76% and 7.26% on the basis of comparison between measured data and calculated data of flow velocity and depth for Δx=10 cm in three sections and three depth layer of 5, 10 and 15 cm in body of Rockfill dam, and by decreasing the distance step from 10 cm to 5 cm, the accuracy of the model increased in the depth estimation section and the velocity estimation section about 4.5% and 2.1%, Respectively.

Keywords: Coarse Porous Media, Saint-Venant Equations; Non-Darcy Relations; Finite Volume Method

1- Ph.D. student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari ,Iran
(*-Corresponding Author Email: mheydari@basu.ac.ir)