

روشی هوشمند برای شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز کرامپ مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی

سمیه امامی^{۱*}، امید جهان‌دیده^۲، حجت امامی^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

DOI: 10.22103/nrswe.2024.21699.1041

چکیده

سرریزها عموماً برای انحراف جریان، عبور سیل، کنترل سطح آب در سدها، رودخانه‌ها و مجاری روباز به کار گرفته می‌شوند. سرریز کرامپ با طراحی خاص خود، جزو سرریزهای لبه کوتاه است و جهت اندازه‌گیری دبی عبوری کانال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر، ضریب دبی جریان بر روی سرریز کرامپ با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به‌ازای شیب‌ها و ارتفاع‌های مختلف مدل‌سازی شد. میدان جریان بر روی سرریز کرامپ با استفاده از سه مدل آشفتگی RSM، k- ϵ و k- ω به‌صورت دو بعدی و مدل چند فاز VOF انجام شد. شرایط جریان در تمامی حالات به‌صورت زیربحرانی، آشفته و جریان ریزشی در نظر گرفته شد. کارایی نرم‌افزار FLUENT با استفاده از شاخص‌های آماری، شامل ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که نرم‌افزار FLUENT با کسب مقادیر $RMSE=0/93$ و $MAE=0/7$ کارایی مناسبی در مدل‌سازی جریان بر روی سرریز کرامپ دارد. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع سرریز در یک دبی ثابت، ضریب دبی کاهش می‌یابد. ضریب دبی در سرریز کرامپ با ارتفاع ۰/۱۵ متر بیش‌ترین مقدار را دارا بود. رابطه مستقیمی با افزایش شیب دیواره پایین‌دست سرریز و ضریب دبی جریان وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش شیب دیواره، ضریب دبی جریان نیز افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: سرریز کرامپ، ضریب دبی، مدل‌های آشفتگی، FLUENT.

* - نویسنده مسئول، دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. Email:somayehemami70@gmail.com

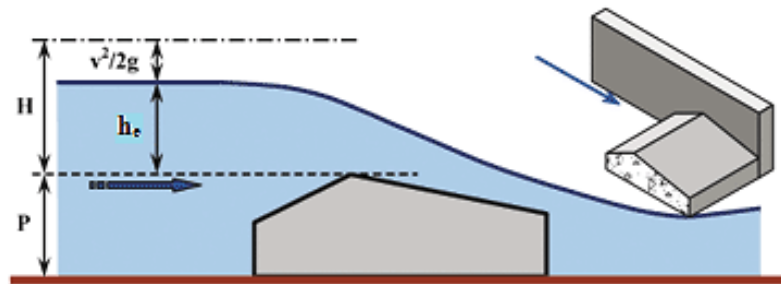
^۲ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

^۳ - دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه بناب، بناب، ایران.

مقدمه

سرریزها از قدیمی ترین سازه هایی هستند که برای اندازه گیری دبی در کانال های روباز مورد استفاده قرار می گیرند. در طول سال های اخیر، مهندسين هیدرولیک تلاش کرده اند که با ساخت و نصب سازه های اندازه گیری در کانال ها، دبی جریان را با دقت مناسبی اندازه گیری کنند. معمولاً سرریزها را بر اساس مهم ترین مشخصه آن ها، تقسیم بندی می کنند (Atashi et al. 2022; Emami et al.

2011; Ghomeshi and Emamgholizadeh. 2018). این مشخصه می تواند در رابطه با سازه کنترل، کانال تخلیه و یا هر عضو دیگر آن باشد. در صورتی که سرریزها بر اساس تراز آبگیریشان تقسیم بندی شوند، می توان آن ها را به دو دسته سرریزهای سطحی و زیرسطحی معرفی کرد. یکی از رایج ترین سرریزها، سرریز کرامپ می باشد که در مقطع طولی دارای شکل مثلثی و در پلان دارای شکل مستطیلی است (Sattari et al. 2016). شکل (۱) مقطع طولی سرریز کرامپ را نشان می دهد.



شکل (۱): مقطع طولی سرریز کرامپ

رسیدن به پاسخ از دلایل گرایش به این رویکرد می باشد. مدل های عددی در مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی دارای مزیت های قابل توجهی می باشند. با استفاده از مدل های عددی امکان بررسی مشخصات جریان در محدوده وسیعی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بدون انجام آزمایش هایی با هزینه های بالا و در زمان کم تر برای پژوهشگران فراهم می شود (Khosrojerdi and Habibi. 2008).

(Khosrojerdi and Habibi 2008) جریان عبوری از روی سرریز کرامپ را با استفاده از نرم افزار FLUENT شبه سازی و با سرریز اوجی سد کوچری مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در سرریز کرامپ برخلاف سرریز اوجی با افزایش ارتفاع آب، ضریب دبی کاهش می یابد. (Azimi et al. 2013) به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریز مثلثی کرامپ با شیب بالادست و پایین دست مختلف در شرایط جریان آزاد پرداختند. آن ها دریافتند با افزایش شیب پایین دست، ضریب دبی سرریز افزایش می یابد. (Tavakolsadrabadi et

دبی جریان بر روی سرریز کرامپ با استفاده از رابطه (۱)، محاسبه می شود (Muhsun et al. 2020).

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gB_c} h_e^{1.5} \quad (1)$$

که Q دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، C_d ضریب دبی جریان (بدون بعد)، g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه، B_c عرض تاج سرریز و h_e بار آبی مؤثر جریان بر روی تاج سرریز بر حسب متر می باشد.

امروزه مسائل متعددی از جمله افزایش هزینه ها، وقت گیر بودن و وقوع خطای انسانی در بررسی های آزمایشگاهی، موجب استفاده از مدل های سه بعدی و کامپیوتری شده است. استفاده از این روش ها منوط به آشنایی مهندسين با قابلیت ها و محدودیت های آن ها می باشد. امروزه نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۴ برای بررسی شرایط جریان سیالات در بین پژوهشگران جایگاه ویژه ای به خود اختصاص داده است. استفاده آسان، هزینه کم و مهم تر از همه سرعت بالای نرم افزارهای CFD در

^۴- Computational fluid dynamics

کنترل و در انتها نتایج را مورد بازبینی قرار دهد (Gholshahifar 2008).

معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان در رودخانه‌ها و مجاری روباز بر اساس معادلات سه بعدی میانگین‌گیری شده به روش رینولدز در شرایط جریان آشفته و ناماندگار به صورت معادله‌های (۲) و (۳) بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial(u_j)}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

که، u_i مؤلفه سرعت در جهت X_i ($i=1, 2, 3$) به ترتیب برای جهت‌های x, y, z ، P بیانگر فشار، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی و جمله‌های $-\rho \overline{u_i u_j}$ به عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند.

معادله‌های (۲) و (۳)، دارای سه مجهول شامل مؤلفه‌های سرعت در دو جهت (u, v) و فشار می‌باشند. از طرفی معادله مومنتم شامل چهار مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، بنابراین سیستم معادله‌های بالا بسته نیست و باید با استفاده از مدل آشفتگی مناسب، تنش رینولدز محاسبه شوند.

مدل آشفتگی K-ε

مدل $k-\epsilon$ مدلی دو معادله ای است. مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای را می‌توان زیر بنای بسیاری از مطالعات در حوزه جریان‌های آشفته دانست. مدل $k-\epsilon$ در عین ساده بودن، تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که منجر به استفاده از آن در اغلب شبیه‌سازی‌ها می‌شود. این مدل بر سه نوع استاندارد، RNG و Realizable می‌باشد. این مدل دارای دو معادله بر اساس k و ϵ است. در این مدل k معرف انرژی جنبشی اغتشاش و ϵ معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی می‌باشد. هدف اصلی مدل $k-\epsilon$ را می‌توان بهبود مدل طول اختلاط دانست، به گونه‌ای که بتواند یک توصیف

(al. 2016) به بررسی پارامترهای هیدرولیکی سرریز گابیونی کرامپ، شامل ضریب دبی، پروفیل سطح آب و حجم دبی درون‌گذر از محیط متخلخل با استفاده از مدل سه‌بعدی Flow-3D در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج نشان داد افزایش زاویه خارجی بالادست و پایین دست سرریز موجب کاهش ضریب دبی و دبی درون‌گذر می‌شود. (Al-Shukur et al. 2017) خصوصیات جریان بر روی سرریز کرامپ در شرایط مختلف را به صورت آزمایشگاهی بررسی و نشان دادند مقدار ضریب دبی با کاهش ارتفاع تاج و افزایش دبی بر روی سرریز افزایش می‌یابد.

(Khairai et al. 2013) هیدرولیک جریان سرریزهای کرامپ گابیونی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد ضریب دبی سرریز کرامپ گابیونی بیش‌تر از ضریب دبی سرریز کرامپ نفوذناپذیر است. (Muhsun et al. 2020) جریان بر روی سرریز کرامپ تحت شیب‌های طولی مختلف را با استفاده از CFD شبیه‌سازی کردند. تجزیه و تحلیل آماری، تفاوت ناچیزی بین پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را نشان داد. در پژوهش حاضر با توجه به در نظر گرفتن مزیت‌های چشم‌گیر روش‌های عددی از جمله امکان بررسی مشخصات جریان در محدوده وسیعی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی، جریان عبوری از روی سرریز کرامپ با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار FLUENT

نرم‌افزار FLUENT از سه جزء اصلی پیش‌پردازنده، حل کننده و پس‌پردازنده تشکیل شده است. در قسمت پیش‌پردازنده علاوه بر مدل‌سازی و تعیین هندسه و محدوده حل می‌توان شبکه یا همان مش مورد نیاز برای حل را ایجاد کرد. در قسمت حل کننده مراحل مدل‌سازی انجام می‌پذیرد و عملیاتی که در قسمت پس‌پردازنده انجام می‌گیرند به کاربر کمک می‌کنند تا شرایط حل را

استفاده از معادلات آشفتگی و حل معادلات سطح آزاد جریان به روش حجم سیال (VOF)^۸ انجام شد. مدل VOF برای شبیه سازی جریان های دو فازی غیر مخلوط شونده استفاده و عموماً کاربرد آن برای شبیه سازی سطح اشتراک دو سیال می باشد. گسسته سازی عبارت فشار به روش PISO^۹ (بر اساس مرتبه بالاتر تقریب ارتباط بین تصحیحات فشار و سرعت توسعه یافته است)، گسسته سازی عبارت مومنتم به روش جهت مند مرتبه دوم و با توجه به شرایط مرزی و شرایط اولیه در نظر گرفته شده، صورت پذیرفته است. تحلیل عددی جریان به صورت غیر دائمی انجام شده و تا رسیدن به حالت دائمی ادامه مییابد، به همین دلیل نیز جریان به صورت غیردائمی در نظر گرفته شده است (Papageorgakis and Assanis 1999).

برای بررسی خصوصیات جریان بر روی سرریز کرامپ، ۶ مدل سرریز کرامپ با شیب های بالادست و پایین دست مختلف در نرم افزار GAMBIT طراحی شد. پس از تعیین روش های گسسته سازی، معادلات حاکم، شرایط مرزی و غیره، طرح در نرم افزار FLUENT فراخوانی و اجرا گردید. در شکل (۲) مشخصات هندسی سرریز کرامپ ارائه شده است.

آزمایش های انجام شده بر اساس تغییر ابعاد (شیب های بالادست و پایین دست سرریز) و ارتفاع سرریز صورت گرفته اند. به این صورت که یک سرریز کرامپ در کانالی با طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ و ارتفاع ۵۰ سانتی متر، با شیب های (۱H:۲۷، ۱H:۵۷)، (۱H:۲۷، ۱H:۲۷) و (۲H:۳۷، ۲H:۹۷) و در ارتفاع های ۱۵ و ۱۷ سانتی متر طراحی شده است. در جدول (۱) مشخصات سرریز کرامپ ارائه شده است.

جبری برای مقیاس طول آشفتگی در جریان های با پیچیدگی زیاد، بیان کند. مدل $k-\varepsilon$ برای جریان های داخلی، خارجی و جریان های با دیواره محدود با گرادین فشار نسبتاً کوچک دقت و عملکرد خوبی دارد (Gholshahifar 2008).

مدل آشفتگی RNG

مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ یک نوع مدل مشتق شده از خانواده $k-\varepsilon$ است. معادلات و ضرایب این مدل به صورت تحلیلی با استفاده از تئوری Renormalization group استخراج شده است. در این مدل نسبت به مدل $k-\varepsilon$ standard معادله ε تغییرات قابل ملاحظه ای کرده که توانایی این مدل را برای شبیه سازی جریان هایی که تحت کرنش شدیدی قرار دارند بهبود بخشیده است. همچنین، مدل توبولانس $k-\varepsilon$ RNG توانایی خوبی در شبیه سازی جریان های چرخشی با عدد رینولدز پایین دارد (Gholshahifar 2008).

مدل آشفتگی RSM

مدل RSM^7 برای شبیه سازی آشفتگی در جریان کاملاً غیر همگن و غیر ایزوتروپ کاربرد دارد و جهت مدل سازی سه بعدی داخل قوس که جریان های ثانویه علاوه بر جریان اصلی درون کانال وجود دارند بهتر عمل می نماید. هر چند این مدل دقت بالاتری در حل مسائل سه بعدی دارد، اما به دلیل پیچیدگی معادلات ریاضی، حل توسط این مدل نسبت به دو مدل $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ طولانی تر است (Gholshahifar 2008).

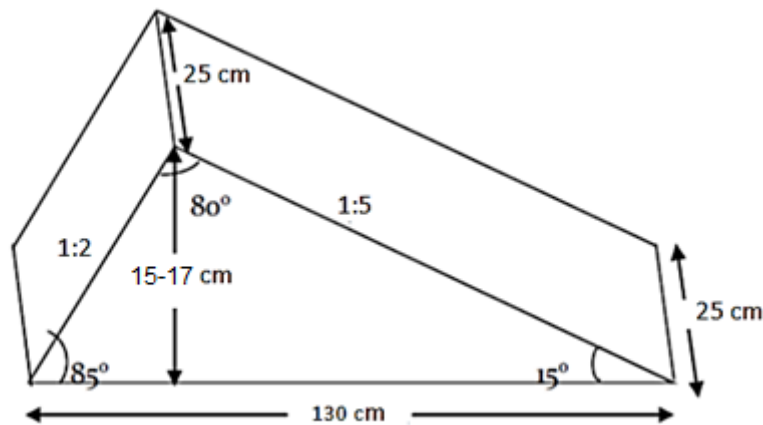
در پژوهش حاضر بررسی های عددی به روش حجم محدود، شبیه سازی جریان پیرامون سرریز کرامپ با

^۸- Volume of Fluid

^۹- Pressure Implicit with Splitting Operators

^۶- Re-Normalization Group

^۷- Reynolds Stress Turbulence



شکل (۲): مشخصات هندسی سرریز کرامپ برای مدل‌سازی (Obaida and Mohammed 2023)

جدول (۱): مشخصات سرریز کرامپ

پارامتر	محدوده عددی
دبی در واحد عرض	۰/۰۰۶۹۶ - ۰/۱۷۲
عدد رینولدز (Re)	۶۹۱۲ - ۱۷۰۸۰۴
عدد فرود (Fr)	۰/۳۷۶ - ۰/۰۲۷۵
ارتفاع آب در بالادست (y ₁)	۰/۳۵۶ - ۰/۱۸۳
عمق آب روی سرریز (h ₁)	۰/۱۸۵ - ۰/۰۲۶
شیب بالادست (Sup)	۰/۶۶ - ۰/۵۵
شیب پایین دست (S _{do})	۰/۵ - ۰/۲
ضریب دبی (Cd)	۰/۸۱۶ - ۰/۵۴۹

تحلیل ابعادی

با استفاده از تحلیل ابعادی به روش π باکینگهام و بر اساس متغیرهای هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان آزاد بر روی سرریز کرامپ، توابع بدون بعد زیر با هدف ارزیابی ضریب دبی در شرایط جریان آزاد حاصل می‌گردد:

$$f\left(\frac{h_1}{p}, \frac{L}{p}, \frac{q}{g^{0.5} h_1^{1.5}}, \frac{\rho g^{0.5}}{\mu h_1^{4.5}}, \frac{\delta}{\mu g h_1^{0.5}}, S, \frac{B}{p}, \frac{\sigma}{\mu \sqrt{g h_1}}\right) = 0 \quad (4)$$

در رابطه (۳)، به دلیل جزئی بودن تأثیر لزجت (μ)، ضریب تراکم (δ) و کشش سطحی (σ) و نیز ثابت بودن شیب کانال (S) از پارامترهای بی‌بعد مربوط به آن‌ها صرف‌نظر می‌گردد. در نتیجه تأثیر عمق آب روی سرریز در بالادست (h_1)، ارتفاع سرریز (P)، دبی جریان (q)، طول سرریز (L) و

شتاب ثقل (g) با پارامترهای بی‌بعد $(\frac{h_1}{p})$ ، $(\frac{L}{p})$ و $(\frac{B}{p})$ در ضریب دبی $(\frac{q}{g^{0.5} h_1^{1.5}})$ به صورت تابع زیر به دست می‌آید:

$$f\left(\frac{h_1}{p}, \frac{L}{p}, \frac{B}{p}, \frac{q}{g^{0.5} h_1^{1.5}}\right) = 0 \quad (5)$$

در نتیجه ضریب دبی سرریز در حالت آزاد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_d = f\left(\frac{h_1}{p}, \frac{L}{p}, \frac{B}{p}\right) \quad (6)$$

با توجه به این که عرض کانال ثابت است، لذا، از پارامتر بدون بعد آن صرف‌نظر می‌شود.

شبکه‌بندی

در پژوهش حاضر از یک میدان مش کلی به منظور شبیه‌سازی کانال استفاده شد. نرم‌افزار GAMBIT نسخه

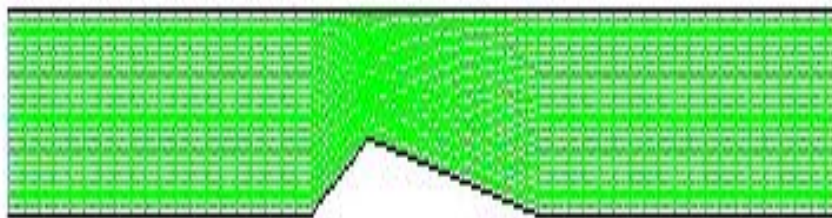
$$\text{Error}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N [C_{d\text{real}} - C_{d\text{CFD}}]}{\sum_{i=1}^N C_{d\text{real}}} \times 100 \quad (7)$$

$$C_{d\text{real}} = 0.611 + 0.075 \frac{h}{p} \quad (8)$$

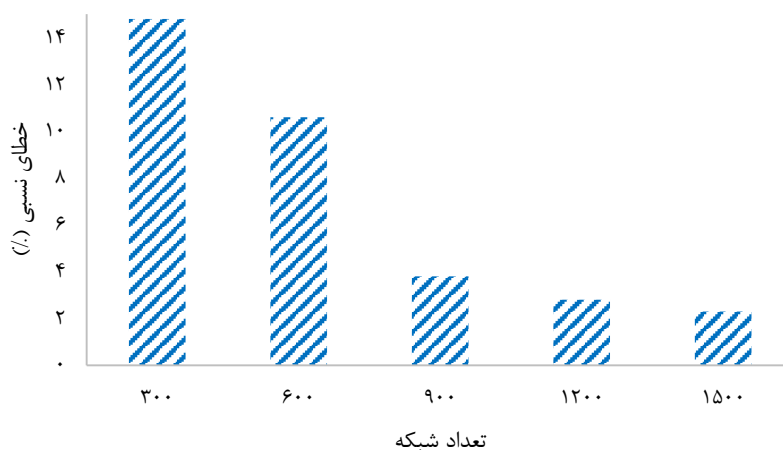
که $C_{d\text{CFD}}$ ضریب دبی حاصل از شبیه سازی در مدل عددی، $C_{d\text{real}}$ ضریب دبی سرریز لبه تیز، h_e بار آبی روی تاج سرریز، P ارتفاع سرریز و N تعداد کل داده ها می باشد. در ادامه، با در نظر گرفتن معیارهای دقت و سرعت هم گرایی جواب های حاصل، شبکه مناسب انتخاب گردید. شکل (۴) مقدار تغییر خطای مقادیر شبیه سازی شده ضریب دبی جریان به مقادیر واقعی را برای تعداد شبکه محاسباتی مختلف نشان می دهد. پس از انجام سعی و خطا، بهترین تعداد مش برابر ۱۵۰۰ انتخاب و برای مدل سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۲،۴،۶ به عنوان نرم افزار پیش پردازنده برای مدل سازی استفاده شد. مدل در این نرم افزار طراحی و سپس مش مورد نیاز بر روی مدل تهیه گردید. برای شبکه بندی هندسه مدل از المان Quad نوع Quad/Pave استفاده شد. همچنین جهت افزایش دقت محاسبات در نزدیکی سرریز، اندازه مش های مورد استفاده در این قسمت کوچک در نظر گرفته شد (شکل ۳).

برای کنترل عدم تأثیر اندازه سلول ها بر نتایج حاصل از حل عددی پنج نوع شبکه بندی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شد. جهت بررسی حساسیت شبکه، روند تغییرات خطای نسبی ضریب دبی جریان به صورت رابطه های (۷) و (۸) مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۳): مدل شبکه بندی شده در نرم افزار GAMBIT



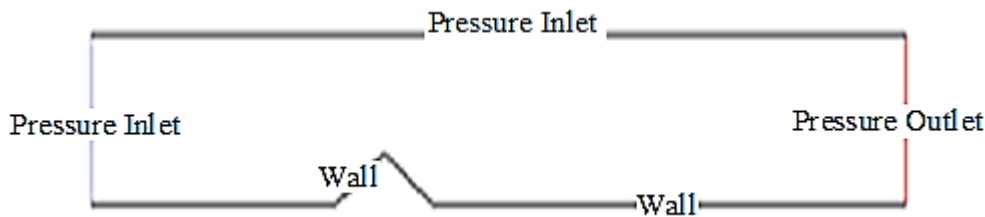
شکل (۴): روند تغییرات خطای نسبی ضریب دبی جریان به ازای تعداد شبکه محاسباتی مختلف

توجه به این که سرعت سیال در روی مرزهای جامد $(Z_{\min}, Y_{\min}, X_{\min})$ برابر صفر می باشد، از شرط مرزی دیواره استفاده شد. برای سطح آزاد جریان، شرط مرزی

شرایط مرزی

شرایط مرزی در مقطع ورودی به صورت فشار جریان آب و برای مقطع خروجی از فشار خروجی صفر تعریف شد. با

فشار هوا که مقدار آن صفر می‌باشد، تعریف شد. شکل (۵) شرایط مرزی اعمال شده در مدل را نشان می‌دهد.



شکل (۵): شرایط مرزی اعمال شده در مدل

نتایج و بحث

جهت صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار FLUENT، مدل سرریز کرامپ در کانالی با طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر طراحی و به‌ازای دبی‌های مختلف، شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید (Hajipoor 2009). نتایج حاصل از مدل‌های عددی با شاخص‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. مقدار RMSE، MAE و R^2 به‌ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۷ و ۰/۹۸ حاصل شد. با توجه به این‌که میزان شاخص‌های آماری در حد ایده‌آل قرار دارند، بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که مدل‌سازی عددی در محاسبه ضریب دبی سرریز کرامپ موفق عمل نموده است. در شکل (۶)، رابطه بین ضریب دبی به‌ازای مقادیر h_e/P ‌های مختلف برای سرریز کرامپ ارائه شده است. در مدل‌های شبیه‌سازی شده ضریب دبی همانند نتایج آزمایشگاهی، روند صعودی داشته و تطابق مناسبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی وجود دارد.

برای حل مسئله در تمامی مدل‌ها گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه به‌کار گرفته شد.

معیارهای ارزیابی

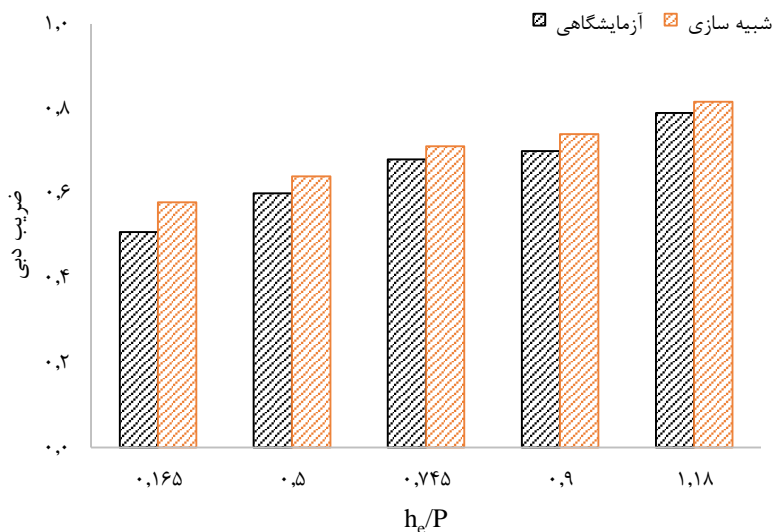
به منظور ارزیابی نتایج مدل FLUENT، از شاخص آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) به‌صورت روابط (۹) تا (۱۱) استفاده شد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})(K_i - \bar{K})}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(L_i - \bar{L})^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{(K_i - \bar{K})^2}} \right]^2 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - K_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i - K_i)}{N} \quad (11)$$

که \bar{L} و \bar{K} به‌ترتیب میانگین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی و N تعداد داده‌ها می‌باشند.



شکل (۶): مقایسه ضریب دبی شبیه‌سازی شده (CFD) و مقادیر آزمایشگاهی (EXP)

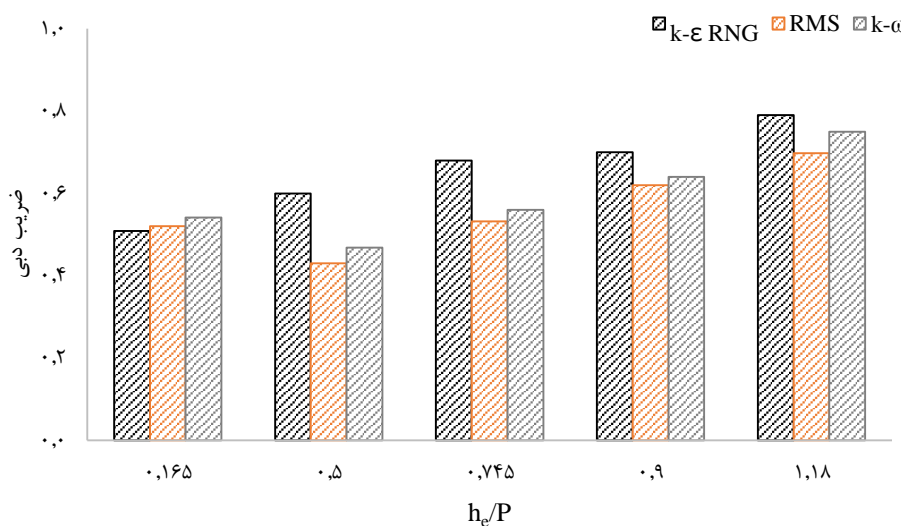
از اجرای مدل‌های عددی می‌توان نتیجه گرفت مدل آشفتگی k-ε RNG خطای کم‌تری در مقایسه با سایر مدل‌های آشفتگی دارد.

در جدول‌های (۲ و ۳)، به ترتیب میانگین خطای مدل‌های آشفتگی برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب و نتایج به‌دست آمده از مدل عددی برای سرریز کرامپ به‌ازای شیب‌ها و مدل‌های آشفتگی مختلف به‌ازای $0.165 < \frac{h_0}{P} < 1.18$ برای تمامی ۶ مدل مورد بررسی، مقایسه شده است.

پس از حصول اطمینان از عملکرد نرم‌افزار و روش‌های به‌کار گرفته شده در نرم‌افزار FLUENT به طراحی مدل‌های سرریز کرامپ با ارتفاع و شیب‌های مختلف در نرم‌افزار GAMBIT پرداخته شد.

بررسی ضریب دبی

در شکل (۷)، نتایج حاصل از سه مدل RSM، k-ε RNG و k-ω به‌ازای h₀/P های مختلف در حالت بدون شیب دیواره مقایسه شده است. با مقایسه ضریب دبی‌های به‌دست آمده



شکل (۷): تغییرات ضریب دبی به‌ازای h₀/P های مختلف

جدول (۲): مقایسه میانگین خطای مدل‌های آشفتگی برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب

مدل آشفتگی	MAE (%)	RMSE (%)	R ²
K-ε RNG	۰/۷۱	۰/۹۴	۰/۹۷
K-ω	۰/۷	۰/۹۳	۰/۹۸
RMS	۰/۷۳	۰/۹۵	۰/۹۷

جدول (۳): مقادیر ضریب دبی حاصل از مدل عددی به‌ازای مدل‌های آشفتگی مختلف

مدل	شیب بالادست	شیب پایین‌دست	نسبت بار آبی به ارتفاع سرریز	k-ε RNG	RMS	k-ω
W1	۱:۲	۱:۲	۰/۱۶۵	۰/۵۰۹	۰/۵۲۰	۰/۵۴۱
W2	۱:۲	۱:۵	۰/۷۴۲	۰/۶۸۰	۰/۵۳۲	۰/۵۶۰
W3	۲:۳	۲:۹	۱/۱۸	۰/۷۹۰	۰/۶۹۸	۰/۷۵۸
درصد خطای نسبی					٪۱۱/۶	٪۹/۳

در شیب دیواره (۵: ۱،۲: ۱) بیش‌تر از شیب دیواره (۲: ۱،۲: ۱) و در شیب دیواره (۹: ۲،۳: ۲) کم‌تر از دو شیب دیگر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شیب دیواره بالادست سرریز، ذخیره آب کاهش پیدا کرده است. در مطالعه‌ای نشان داده شد با افزایش دبی در شیب‌های صفر، پروفیل سطح آب افزایش می‌یابد که با نزدیک شدن به تاج سرریز، پروفیل سطح آب کاهش می‌یابد که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد (Naqshbandi et al. 2013).

در شکل (۸) پروفیل سطح آب جریان عبوری از روی سرریز کرامپ نشان داده شده است. در این شکل، رنگ زرد، فاز آب و رنگ قرمز، فاز هوا را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش فاصله از مبدأ و نزدیک شدن به پائین‌دست سرریز از عمق آب کاسته می‌شود. پروفیل سطح آب در قسمت شیب بالادست سرریز کرامپ با اختلاف کمی، در شیب دیواره (۵: ۱،۲: ۱) بالاتر از شیب دیواره (۲: ۱،۲: ۱) و در شیب دیواره (۹: ۲،۳: ۲) پائین‌تر از دو شیب دیگر است. بنابراین ذخیره آب



شکل (۸): پروفیل سطح آب بر روی سرریز کرامپ

در تمامی سرریزهای مورد بررسی، با افزایش نسبت h/P ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد و به عدد ثابت ۰/۷۴ میل می‌کند. بالا بودن ضریب دبی جریان در این سرریزها به‌خاطر انحنای زیاد جریان (سبب ایجاد مکش نسبتاً زیاد در شیب پایین‌دست) و افزایش ضریب دبی می‌باشد. به‌طور کلی افزایش ضریب دبی جریان به‌علت کاهش مقاومت اصطکاکی در پایین‌دست سرریز کرامپ می‌باشد. در ادامه

محاسبه ضریب دبی به ازای شیب و ارتفاع‌های مختلف در شکل‌های (۹) و (۱۰) (الف تاج)، ضریب دبی سرریزهای کرامپ در دو ارتفاع ۰/۱۵ و ۰/۱۷ متر در سه شیب مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای (۹) و (۱۰) نتیجه می‌شود رابطه مستقیمی با افزایش شیب دیواره پایین‌دست سرریز و ضریب دبی جریان وجود دارد، به‌طوری که با افزایش شیب دیواره، ضریب دبی جریان به میزان ۱۰/۶٪ افزایش یافت.

آزمون رگرسیون غیر خطی مورد استفاده قرار گرفت. برای به دست آوردن بهترین معادله باید توجه داشت که بهترین معادله دارای کمترین RMSE و بالاترین R^2 می باشد. رابطه رگرسیون خطی ضریب دبی جریان در سرریز کرامپ با ضریب R^2 برابر ۰/۹۸ و RMSE برابر با ۰/۴۵ درصد به صورت رابطه (۱۲) می باشد:

$$C_d = 0.791 + 0.011S_{up} - 0.027S_{do} + 0.062\frac{h_e}{P} \quad (12)$$

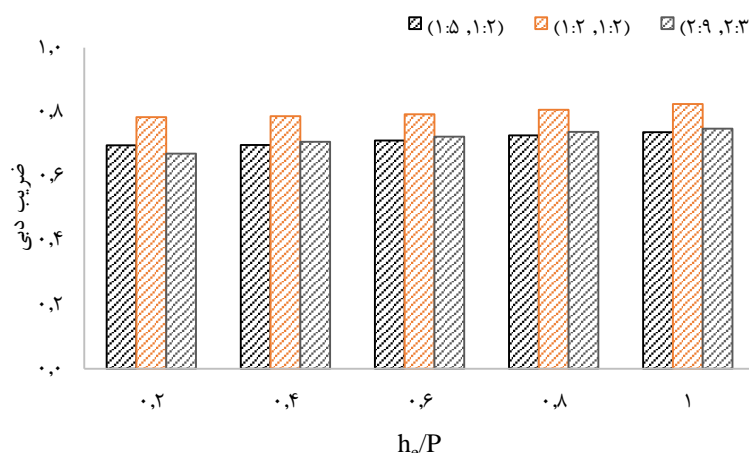
نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی ۶ مدل از سرریز کرامپ با شیبها و ارتفاعهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. صحت سنجی انجام شده نشان داد نتایج نرم افزار FLUENT از تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار بوده و حاکی از عملکرد قابل قبول آن در برآورد ضریب دبی جریان سرریز کرامپ می باشد. همچنین نتایج حاصل از به کارگیری مدل آشفتگی k-ε RNG در مقایسه با دیگر مدل های آشفتگی، نتایج مناسب تری به دست داد. ضریب دبی سرریز کرامپ با استفاده از نتایج بررسی مدل های عددی برابر ۰/۷۴ به دست آمد. همچنین ضریب دبی در سرریز کرامپ با شیب دیواره (۱H:۲V، ۱H:۲V) و ارتفاع ۰/۱۵ متر بیشترین مقدار را دارا بود.

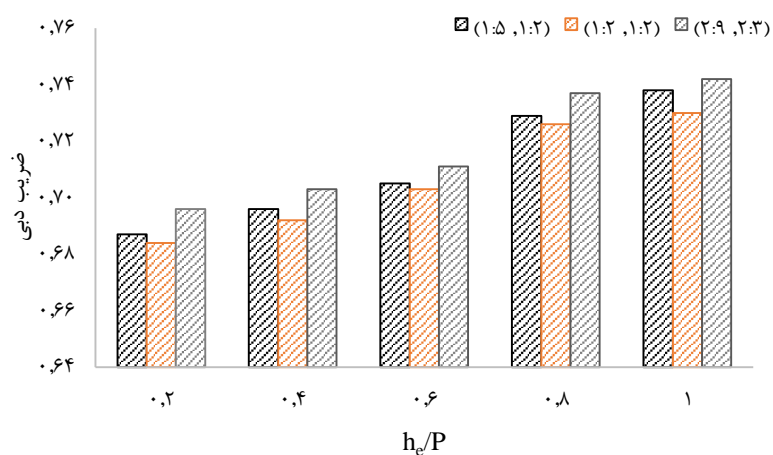
در شکل (۱۱)، تغییرات ضریب دبی جریان سرریز کرامپ بدون شیب دیواره در ارتفاعهای متفاوت ارائه شده است. بررسی تغییرات ضریب دبی جریان در ارتفاعهای متفاوت نشان می دهد که با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب دبی جریان در یک ارتفاع ثابت به ازای های h_e/P مختلف افزایش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز در یک دبی ثابت، نسبت h_e/P کاهش یافته و ضریب دبی کاهش می یابد. در پژوهش مشابهی نتیجه گرفته شد در مدل های سرریز کرامپ مورد بررسی، ضریب دبی برای سرریز گابیونی با شیب پایین دست ۱۰٪ بیش تر از سرریز گابیونی با شیب بالادست و شیب ترکیبی در حالت جریان آزاد است (Khairai et al. 2013). پژوهش ها نشان داد مقادیر ضریب دبی سرریز کرامپ با افزایش دبی جریان و همچنین با کاهش ارتفاع سرریز افزایش می یابد که با نتایج پژوهش حاضر در تطابق می باشد (Khalifa et al. 2021).

تابع ضریب دبی جریان

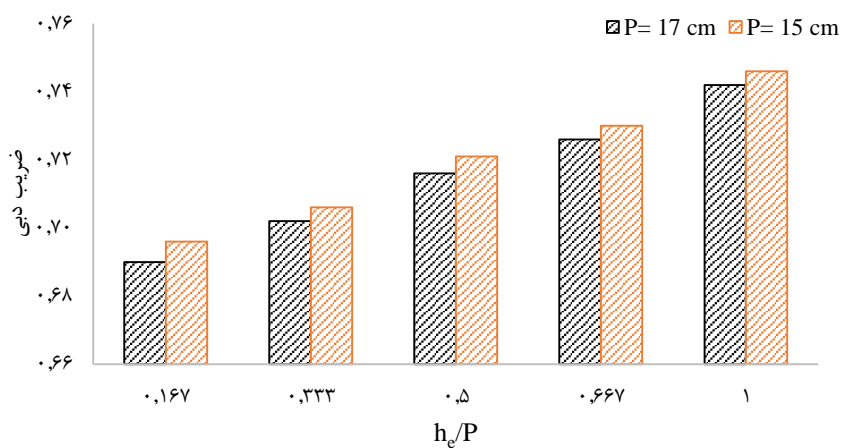
برای تعیین رابطه ضریب دبی جریان روی سرریز کرامپ از رگرسیون خطی و غیر خطی استفاده شده است. برای به دست آوردن بهترین معادله، توابع مختلف برای C_d به عنوان متغیر وابسته در ارتباط با متغیرهای مستقل نظیر S_{do} ، S_{up} ، h_e/P معادلاتی برای C_d استخراج گردید. ۸۰ درصد داده ها جهت آموزش و ۲۰ درصد باقی مانده جهت



شکل (۹): تغییرات ضریب دبی جریان در سرریز کرامپ به ازای شیب دیواره های مختلف در ارتفاع ۰/۱۵ متر



شکل (۱۰): تغییرات ضریب دبی جریان در سرریز کرامپ به‌ازای شیب دیواره‌های مختلف در ارتفاع ۰/۱۷ متر



شکل (۱۱): تغییرات ضریب دبی جریان در ارتفاع‌های متفاوت

منابع

1. Atashi V., Bejestan M. S., and Lim Y. H. 2022. Flow pattern and erosion in a 90-degrees sharp bend around a W– weir. *Water*, 15(1): 1-15. <https://doi.org/10.3390/w15010011>.
2. Emami S., Arvanaghi H., and Parsa J. 2018. Numerical investigation of geometric parameters effect of the labyrinth weir on the discharge coefficient. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6(1): 1-9. <https://doi.org/10.22075/JRCE.2017.11428.1188>
3. Ghomeshi M., and Emamgholizadeh S. 2011. Fluid mechanics and hydraulic. First edition. Shahid Chamran Ahvaz university (In Persian).
4. Sattari M.T., Salmasi F., and Haji-Mohammadi A. 2016. Modeling the discharge coefficient of crump weir using Machine Learning Techniques. *Water and Soil Journal*. 26 (4-2):1-12 (In Persian).
5. Muhsun, S. S., Al-Madhhachi, A. S. T., and Al-Sharify, Z. T. 2020. Prediction and CFD simulation of the flow over a curved crump weir under different longitudinal slopes. *International Journal of Civil Engineering*, 18(9): 1067-1076. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00527-2>.
6. Khosrojerdi. A., and Habibi, M. 2008. Investigation of discharge coefficient of crump weir and compared with ogee weir using Fluent software. 3th Water Resources Management Conference. 23-25 October. (In Persian)
7. Azimi, A. H., Rajaratnam, N., and Zhu. D. Z. 2013. Discharge characteristics of weirs of finite crest length with upstream and downstream ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(1): 78-53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000519](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000519).
8. Tavakolsadrabadi M. T., Fathi Moghaddam, M., and Mohammadpour, R. 2016. Modeling of free flow on gabbay crump weir. *Journal of Water Sciences and Engineering*, 6 (14): 77-93. (In Persian)
9. Al-Shukur, A., Al-jumaily, M., and Shaker, Z. 2017. Experimental investigation of flow characteristics over crump weir with different conditions. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 2(10): 373-379. <https://doi.org/10.21276/sjeat.2017.2.10.3>.
10. Khairai, M., Fathi Moghadam, M., and Ghobadi, R. 2013. The water transfer coefficient of crimp gabion spillways in free flow conditions. National Conference on Civil Engineering, Urban Planning and Sustainable Development, Tehran. (In Persian)
11. Gholshahifar, M. 2008. Applied Fluent. Sanei-Shahmirzadi, Tehran. (In Persian)
12. Papageorgakis, G. C., and Assanis. D. N. 1999. Comparison of linear and nonlinear RNG-based models for incompressible turbulent flows. *Journal of Numerical Heat Transfer*. University of Michigan, 3: 1-22. <https://doi.org/10.1080/104077999275983>.
13. Obaida, A. A. M., and Mohammed, A. Y. 2023. The effect of crump weir's geometry changes on hydraulic flow characteristics: A review. In *International Conference on Scientific and Academic Research*, 1:235-331.

14. Hajipoor, Gh. H. 2009. Investigation of characteristic of crump weir using physical and CFD models. Master of Sciences in Hydraulic Structures thesis. University of Tabriz, September. (In Persian)
15. Naqshbandi, G., Khosravinia, P., and Rezaei, A. 2013. The influence of the slope of the channel bottom in the flow pattern on the Cramp series. The 13th Iranian Hydraulic Conference, Tabriz. (In Persian)
16. Khalifa, S. Y., Adeogun, B. K., Ismail, A., Ajibike, M. A., and Muhammad, M. M. 2021. Experimental study to determine flow parameters over roughed crump weir models. ATBU Journal of Science, Technology and Education, 9(2): 18-29.

An Intelligent Method for Numerical Simulation of Flow Over Crump Weir Based on Computational Fluid Dynamics

Somayeh Emami*¹⁰, Omid Jahandideh¹¹, Hojjat Emami¹²

DOI: 10.22103/nrswe.2024.21699.1041

Abstract

Weirs are generally used for flow diversion, flood passage, and water level control in dam reservoirs, rivers, and open channels. The Crump weir with its special design is one of the short-edge weirs, which is used to measure the discharge of channels. In the present study, the discharge coefficient on the Crump weir was modeled using FLUENT software for different slopes and heights. The flow field on the Crump weir was performed using three turbulence models RSM, $k-\varepsilon$ RNG, and $k-\omega$ in two dimensions and a multiphase VOF model. The flow conditions were considered as subcritical, turbulent, and falling flow in all cases. The efficiency of FLUENT software was evaluated using statistical indicators, including correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE). The results show that the FLUENT software has good efficiency in modeling the flow on the crump weir by obtaining $RMSE=0.93$ and $MAE=0.7$. The results showed that with the increase of the weir height at a constant discharge, the discharge coefficient decreases. The discharge coefficient in the Crump weir with a height of 0.15m had the highest value. There is a direct relationship between the increase in the downstream wall slope of the weir and the discharge coefficient so with the increase in the downstream wall slope, the discharge coefficient increases.

Keywords: Crump weir, Discharge coefficient, Turbulence models, FLUENT.

^{1*}- Ph.D. in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
Corresponding Author: somayhemami70@gmail.com

² - Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

³ - Associate Professor, Department of Computer Engineering, Bonab University, Bonab, Iran.