

## شبیه‌سازی مشخصات جریان روی سرریز نیمه استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار عددی Ansys CFX

حجت کرمی<sup>۱\*</sup>، سعید فرزین<sup>۲</sup>، علی حیدری<sup>۳</sup>، خسرو حسینی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۱۰

### چکیده

سرریزها از مهمترین و پر کاربردترین وسایل اندازه‌گیری شدت جریان در نهرهای باز می‌باشند و در بسیاری از مطالعات در زمینه‌ی مهندسی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت سرریزهای نیمه استوانه‌ای و تاج دایره‌ای نسبت به سایر سازه‌های مهارکننده و اندازه‌گیری، ضریب تخلیه‌ی بالاتر، الگوی جریان پایدار، راحتی عبور اجسام معلق در آب، سهولت در طراحی، اجرا و در نهایت هزینه‌های پایین‌تر می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی Ansys CFX وضعیت جریان در مورد سه نمونه‌ی آزمایشگاهی، سرریز نیمه استوانه‌ای مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار گرفت. سطح آزاد جریان، توزیع فشار و تأثیر بار هیدرولیکی بالادست و قطر سرریز بر ضریب بده مربوط به این سرریزها بررسی شد. شبیه‌های آشفتگی  $k-\epsilon$ ،  $k-\omega$  و  $k-\epsilon$  RNG در این شبیه‌سازی بهره‌وری گردید، و نتایج آن با نمونه آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این تحقیق نشان دادند که به ازای شعاع‌های ۴، ۶ و ۷ سانتی‌متر مقدار ضریب بده در محدوده‌ی ۱/۲ تا ۱/۴ به دست می‌آید. همچنین، به ازای افزایش شعاع، مقدار ضریب بده افزایش داشت. محل ایجاد کمترین فشار بر روی سرریز به ازای افزایش بده نیز به سمت بالادست حرکت می‌کند که با سایر مطالعات قبلی هماهنگی داشت.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز نیمه استوانه‌ای، ضریب بده، Ansys CFX، شبیه‌سازی‌های آشفتگی، شبیه‌سازی حجم سیال.

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: hkarami@semnan.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

<sup>۳</sup> دانشجوی فارغ‌التحصیل مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

<sup>۴</sup> دانشیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

## مقدمه

سرریز مانعی است که در داخل نهر و در جهت عمود بر جریان آب به صورت قائم نصب یا ساخته می‌شود. سرریزها بر اساس ضخامت تاج سرریز به سرریزهای لبه تیز یا لبه پهن تقسیم می‌شوند. اگر ضخامت تاج سرریز در محل عبور آب در حدود ۲ میلی‌متر یا کمتر باشد، سرریز لبه تیز، و اگر ضخامت تاج سرریز بیش از ۲ میلی‌متر باشد سرریز را لبه پهن می‌گویند (محمودیان شوشتری، ۸۸). سرریز لبه پهن سازه‌ای است که برای اندازه‌گیری بدهی جریان در رودخانه‌های عریض و کم عمق، یا نهرهای آبیاری که بایستی افت کارمایه در آن‌ها حداقل باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر طول تاج سرریز لبه پهن در جهت جریان (L<sub>B</sub>) و H بار آبی روی سرریز باشد، بایستی رابطه‌ی  $12 < L_B / H < 3.5$  صدق کند (استرم، ۲۰۰۱).

سرریزهای نیمه استوانه‌ای نیز یکی از انواع سرریزهای لبه پهن می‌باشد که مقطع عرضی سرریز در آن استوانه گونه است. سابقه‌ی کاربرد سرریزهای استوانه‌ای به اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰، پیش از ابداع سرریزهای منحنی پیوند باز می‌گردد. امروزه سرریزهای نیمه استوانه‌ای با داشتن مزیت‌های سادگی و هزینه‌ی ساخت، در سامانه‌های توزیع و انتقال، اندازه‌گیری جریان و تنظیم سطح آب به کار می‌روند. مطالعات باس (۱۹۷۶) و رامامورتی و وو (۱۹۹۳) نشان دادند که توزیع فشار روی سرریز استوانه‌ای آب‌ایستائی نیست. چانسون و مونتس (۱۹۹۸) آزمایش‌هایی را در مورد سرریزهای استوانه‌ای با قطرهای مختلف انجام داده، و شرایط بالادست را به منظور بررسی ضریب تغییر دادند. نتایج حاکی از آن بودند که شیب بالادست تأثیر چندانی نداشت ولی دیگر فراسنج‌های مورد بررسی مؤثر بودند. درگاهی (۲۰۰۴) سرریز منحنی پیوند را به صورت سه بعدی و با استفاده از شبیه‌سازی پویائی سیالات محاسباتی (CFD) مورد شبیه‌سازی قرار داد، و پس از مقایسه‌ی نتایج با نمونه آزمایشگاهی، نیمرخ سطح آب و نیمرخ سرعت را نیز در نقاط مختلف شبیه‌سازی بررسی کرد؛ از طرفی، برای شبیه‌سازی عددی آشفتگی جریان از شبیه k-ε استاندارد و RNG بهره برد.

باقری و حیدرپور (۲۰۱۰) از انگاره‌ی جریان گردابه‌ای آزاد در سرریزهای استوانه‌ای استفاده کردند.

ایشان همچنین رابطه‌ای را برای به‌دست آوردن ضریب بده و توزیع سرعت به ازای H/R کمتر یا مساوی ۲ ارائه نمودند (که H ارتفاع آب بالای تاج در بالادست سرریز و R شعاع سرریز می‌باشد). کبیری و باقری (۲۰۱۴) در مورد ضریب بده سرریزهای استوانه‌ای مطالعاتی را صورت دادند. آن‌ها شبیه‌سازی نیمه تحلیلی ارائه نمودند که ضریب بده و توزیع سرعت را به ازای H/R بزرگتر از ۷ به صورت رضایت بخشی پیش‌بینی کرد. ایشان همچنین ثابت کردند که نسبت H/R مهمترین عامل تأثیرگذار بر ضریب بده می‌باشد. یوس و همکاران (۲۰۱۵) سرریزهای استوانه‌ای مورب را تحت زوایای مختلف به وسیله پویائی سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار داده، و فراسنج‌های هیدرولیکی جریان، از جمله توزیع سرعت و فشار و عدد فرود را مورد ارزیابی قرار دادند. پارسایی و همکاران (۲۰۱۶) ضریب بده را در سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از شبکه‌ی عصبی مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجه این تحقیق حاکی از آن بود که عدد فرود جریان در بالادست سرریز، و نسبت عرض سرریز به قطر آن، از مهمترین فراسنج‌ها بر ضریب تخلیه می‌باشند.

حیدرپور و همکاران (۱۳۸۱) با به‌کارگیری تابع جریان در اطراف یک استوانه، توزیع سرعت روی تاج را تعیین، و یک شبیه ریاضی را برای تعیین ضریب بده جریان در سرریزهای تاج دایره‌ای ارائه دادند. ایشان نیمرخ توزیع سرعت و شبیه ریاضی ضریب جریان را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز استوانه‌ای، نیمه استوانه‌ای با ارتفاع‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. ورجاوند و همکاران (۱۳۸۹) شبیه‌سازی جریان را در مورد سرریزهای استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار فلونت انجام داده و مشخصه‌های هیدرولیکی جریان را با مقادیر آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از این پژوهش این بودند که ضریب بده در سرریزهای استوانه‌ای، به دلیل انحنای زیاد بیشتر از سایر سرریزهای لبه پهن می‌باشد. این ضریب با افزایش نسبت بار کل هیدرولیکی در بالادست سرریز به قطر آن تا حد معینی افزایش می‌یابد. هنر و مظلوم شهرکی (۱۳۹۳) ضریب بده‌ی مربوط به سرریزهای جانبی استوانه‌ای و نیمه استوانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج این تحقیق نشان دادند که استفاده از سرریزهای جانبی استوانه‌ای و نیمه استوانه‌ای در مقایسه با سایر



شکل ۱- جریان در سرریز نیمه استوانه‌ای در مطالعات عبدالطیف و عبد محسن، ۲۰۱۰

### معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال، شامل معادلات پایستگی جرم، اندازه حرکت و کارمایه است. معمولاً برای تحلیل جریان‌های با سطح آزاد در نهرهای باز، معادلات پایستگی جرم (پیوستگی) و اندازه‌ی حرکت (ناویراستوکس) برای سیال لزج و تراکم ناپذیر استفاده می‌شود. روابط ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر معادله‌ی پیوستگی و اندازه حرکت سیال لزج و تراکم ناپذیر در جریان آرام می‌باشند:

$$\sum \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

با در نظر گرفتن اثر تلاطم، رابطه‌ی زیر برای معادله‌ی اندازه حرکت بیان می‌شود:

$$\rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right] \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲،  $i$  و  $j$  مقادیر ۱، ۲، ۳ گرفته و نشان دهنده‌ی سه جهت مختلف  $x$ ،  $y$  و  $z$  است.  $u_i$  مؤلفه‌ی سرعت بر حسب (m/s) در جهت  $X_i$ ،  $p$  فشار بر حسب (pa)،  $\rho$  چگالی بر حسب (kg/m<sup>3</sup>) و  $\mu$  لزجت پویائی سیال بر حسب (kg/(m·s)) است.

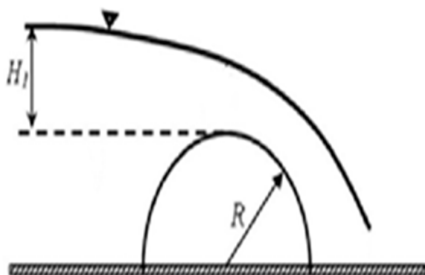
روش بررسی حجم، که غالباً به‌عنوان روش حجم سیال نامیده می‌شود، اولین بار به‌وسیله‌ی هیرت و نیکولز (۱۹۸۱) به وجود آمد. فلسفه‌ی شبیه مزبور بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال باهم ترکیب نمی‌شوند. برای هر حالت یک متغیر در شبیه در نظر گرفته می‌شود، که همان نسبت حجمی آن حالت در سلول

سرریزهای جانبی لبه پهن، ضمن کاهش در طول سرریز، افزایش بازده هیدرولیکی و کاهش هزینه‌های اجرایی را به دنبال دارد. عباسپور (۱۳۹۴) سرریز استوانه‌ای با سه شعاع مختلف با کاربرد نرم‌افزار Xflow، و همچنین جریان بالقوه را بررسی کرد و فراسنج‌های ضریب بده، توزیع فشار و سرعت جریان را مورد ارزیابی قرار داد. علیزاده صنمی و همکاران (۱۳۹۵) در سازه‌ی ترکیبی سرریز-دریچه نیمه استوانه‌ای، موقعیت قرارگیری سازه و زاویه وجه تخت سازه را نسبت به افق بر میزان افت کارمایه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که انحنا‌ی رو به بالادست تأثیر بیشتری را در میزان کاهش افت کارمایه عبوری نسبت به انحنا‌ی رو به پایین دست دارد.

با توجه به کارایی نرم‌افزار Ansys CFX در شبیه سازی‌های هیدرولیکی، و از آنجا که تاکنون در مورد سرریزهای نیمه استوانه‌ای با این نرم‌افزار مطالعات جامعی صورت نگرفته است، هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی و تحلیل مشخصات جریان بر روی سرریز نیمه استوانه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی Ansys CFX می‌باشد. در این راستا، پس از شبیه‌سازی سطح آزاد جریان و توزیع فشار، تأثیر بار هیدرولیکی بالادست و قطر سرریز بر ضریب بده‌ی مربوط به این سرریزها مطالعه می‌شود. بررسی توزیع فشار و عوامل مؤثر بر آن در محدوده‌ی سرریزهای نیمه استوانه‌ای، به دلیل انحنا‌ی زیاد خطوط جریان بر روی این سرریزها، در طراحی و کاربرد این سازه‌ها با اهمیت می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر، برای صحت سنجی نتایج شبیه عددی از نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز نیمه استوانه‌ای ساخته شده به وسیله‌ی عبدالطیف و عبد محسن (۲۰۱۰) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بغداد استفاده شده است. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی به شرح زیر است. سرریز نیمه استوانه‌ای در نهر پایه‌داری با طول ۵ متر، عرض ۰/۰۷۶ متر و عمق ۰/۱۵ متر قرار گرفته است. در این آزمایش سرریز نیمه استوانه‌ای با شعاع‌های ۴، ۶ و ۷ سانتی‌متر استفاده شده است. شکل ۱ نمایی از این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- فراسنج  $H_1$  در سرریز نیمه استوانه‌ای

ایجاد شبکه‌بندی مناسب برای حل معادلات اساسی حاکم بر شبیه، یکی از بخش‌های مهم در شبیه‌سازی می‌باشد. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان در حل معادلات به یک همگرایی مناسب دست یافت و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه‌بندی می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی مناسب در محاسبات گردد.

### شبیه‌سازی شرایط مرزی

با توجه به اینکه تمام سامانه‌های فیزیکی در فاصله‌ی معینی دارای مرز می‌باشند، بایستی در محاسبه با شرایط مشخصی در حدود یا مرزهای سامانه فیزیکی در نظر گرفته شود، این شرایط اعمالی به عنوان شرایط مرزی شناخته می‌شوند. اکثر شرایط مرزی در نهرهای روباز شبیه به شرایط مربوط به مجراهای بسته می‌باشد که تنها شرایط مرزی در سطح آزاد متفاوت است. شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه‌سازی عددی موضوع مورد نظر در نرم افزار Ansys CFX نیز شامل ورودی، خروجی، سطح آزاد و شرط مرزی دیواره می‌باشند.

### شبیه‌سازی آشفتگی

یک شبیه‌سازی آشفتگی عبارت است از روندی محاسباتی که برای بستن سامانه معادلات جریان متوسط، یا معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز، به گونه‌ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد. در این نرم‌افزار نیز شبیه‌های متعددی به منظور در نظر گرفتن آشفتگی وجود دارند که عبارتند از: k- $\epsilon$  RNG و K- $\epsilon$ , k- $\omega$ .

محاسباتی است. در هر حجم نظارت کننده مجموع نسبت‌های حجمی تمامی حالت‌ها یک می‌باشد (چن و همکاران ۲۰۰۲). برای تعیین سطح آزاد با کاربرد روش حجم سیال (VOF) معادله‌ی پیوستگی دیگری، یعنی معادله‌ی ۳ برای نسبت حجم حالت‌های مختلف موجود بایستی حل گردد:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

که اگر  $\alpha_q = 0$ ، یعنی سلول در ادامه‌ی حل خالی از  $q$  امین سیال است.  $\alpha_q = 1$  یعنی سلول در ادامه‌ی حل پر از  $q$  امین سیال است و  $0 < \alpha_q < 1$  یعنی سلول شامل سطح بین دو سیال است و برای  $n$  حالت خواهیم داشت:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4)$$

با در نظر گرفتن مقداری برای سطح آزاد در یک جزء حجمی معین، می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد، که معمولاً مقدار سطح آزاد جریان در جزء حجمی آب را برابر با ۰/۵ در نظر می‌گیرند. در این معادلات  $u_i$  سرعت در جهت  $x$  که  $i=1, 2, 3$  و  $\alpha_q$  نسبت حجم یا کسر حجم سیال در هر سلول  $p$ ، چگالی،  $p$  فشار و  $g_i$  نیروی ثقلی در جهت خواسته شده می‌باشد.

### ضریب بده

سرریزهای نیمه استوانه‌ای همانند سرریزهای لبه پهن عمل می‌کنند؛ بنابراین، تحلیل جریان در سرریزهای استوانه‌ای بر اساس رابطه‌ی سرریزهای لبه پهن نشان می‌دهد که ضریب بده در این سرریزها به صورت معادله‌ی ۵ می‌باشد (باس، ۱۹۷۶):

$$C_d = \frac{q}{g^{0.5} \left( \frac{2}{3} H_1 \right)^{1.5}} \quad (5)$$

که در آن،  $C_d$  ضریب بده ی جریان،  $q$  بده‌ی جریان عبوری از روی سرریز در واحد عرض آن،  $g$  شتاب ثقل ( $m/s^2$ ) و  $H_1$  ارتفاع تراز آب بالای سرریز در بالادست برحسب ( $m$ ) می‌باشد که در شکل ۲ می‌توان فراسنج  $H_1$  را مشاهده نمود.

## معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی شبیه‌ها جهت بررسی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از شاخص‌های ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تشخیص ( $R^2$ ) استفاده شد، که در روابط ۶، ۷ و ۸ قابل مشاهده اند. لازم به ذکر است که هرچه RMSE و MAE به صفر نزدیکتر و هرچه  $R^2$  به یک نزدیکتر باشد مطلوبتر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{EXP} - Y_{NUM})^2} \quad (6)$$

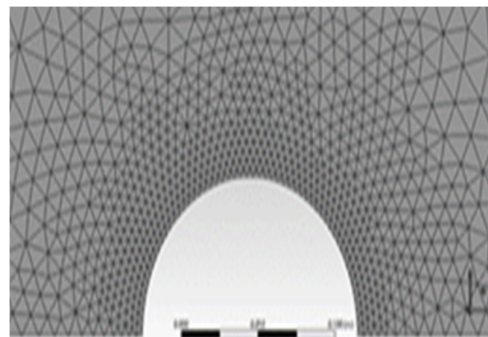
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{EXP} - Y_{NUM}| \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (Y_{NUM} - \bar{Y}_{NUM})(Y_{EXP} - \bar{Y}_{EXP}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{NUM} - \bar{Y}_{NUM})^2 \sum_{i=1}^N (Y_{EXP} - \bar{Y}_{EXP})^2} \quad (8)$$

در روابط ۶، ۷ و ۸؛  $Y_{NUM}$  نتیجه‌ی شبیه‌سازی عددی،  $Y_{EXP}$  نتیجه نمونه آزمایشگاهی،  $\bar{Y}_{NUM}$  میانگین نتایج عددی،  $\bar{Y}_{EXP}$  میانگین نتایج آزمایشگاهی و  $N$  تعداد کل داده‌ها می‌باشند.

## نتایج و بحث

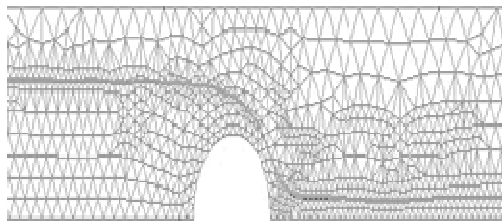
در ابتدا، به منظور شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان، از محیط Workbench نرم‌افزار Ansys CFX استفاده شده است. از آنجا که نتایج در محدوده‌ی سرریز اهمیت ویژه‌ای را دارد، از این رو تعداد گره‌ها در این محدوده با سایر قسمت‌ها متفاوت بوده و شبکه‌بندی اطراف سرریز کوچک‌تر گردیده است (شکل ۳).



شکل ۳- شبکه‌بندی اولیه‌ی شبیه در نرم‌افزار

از طرفی، شبیه عددی بایستی نسبت به شبکه‌بندی خود حساسیت سنجی، و فراسنج‌هایی که نرم‌افزار پس از حل، پیش‌بینی درستی از مقدار آن‌ها در برخی از نواحی شبیه نداشته اصلاح و شبکه‌بندی در آن قسمت‌ها ریزتر گردد. در نرم‌افزار Ansys CFX، به منظور حساسیت سنجی شبکه‌بندی می‌توان به منظور اصلاح شبکه با توجه به معیارهای انتخابی، از گزینه‌ی mesh adaption در فرایند پیش پردازش استفاده کرد؛ بنابراین، نرم‌افزار قادر خواهد بود که بهترین شبکه را طی روند حل مسئله ایجاد کند، که حداقل حساسیت را در نتایج نسبت به شبکه‌بندی داشته باشد. در پژوهش حاضر پس از شبکه‌بندی هندسه‌ی مسئله از mesh adaption جهت تصحیح شبکه در فرایند پیش پردازش استفاده گردید، تا در جاهایی که نیاز است نرم‌افزار به صورت خودکار شبکه را ریزتر یا درشت‌تر کند. جهت اعمال این فرایند، بایستی تنظیمات پیش فرض‌هایی را نیز در مورد mesh adaption در نظر گرفت.

این تنظیمات بر اساس تجربه و پس از چندین مرحله آزمون خطا، و حل شبیه به ازای انتخاب‌های مختلف حاصل می‌گردند که در این تحقیق عبارتند از: کسر حجمی آب، کسر حجمی هوا، سرعت آب، فشار، آشفتگی و گردابه-ی جریان. در شکل ۴ اصلاح این شبکه را به وسیله‌ی mesh adaption می‌توان مشاهده کرد.

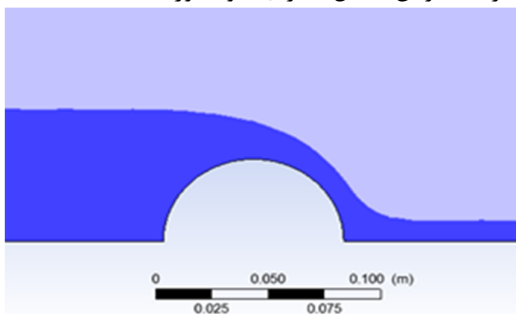


شکل ۴- شبکه‌بندی سرریز نیمه استوانه‌ای با

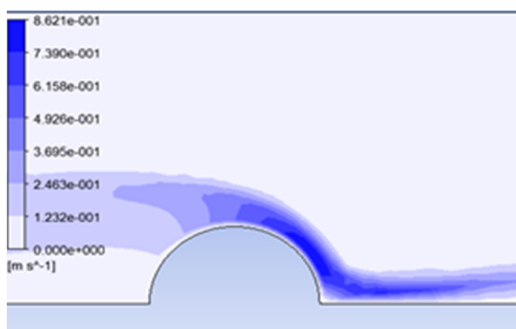
### mesh adaption

به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزی نیز، شرط مرزی ورودی از نوع inlet است که در آن مقدار سرعت و تابع فشار داده شده‌اند. شرط مرزی خروجی از نوع outlet است که از یک ارتفاع شبکه‌ی خاص در قالب فشار ایستایی به مقطع اعمال شده است. شرط مرزی دیواره برای محدود کردن نواحی سیال با مرز جامد به کار می‌رود که در این

در ادامه، نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان عبوری از سرریز نیمه استوانه‌ای و مشخصات هیدرولیکی مربوطه، با استفاده از نرم‌افزار Ansys CFX مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. همچنین نیمرخ سطح آب (شکل ۶) و سرعت جریان (شکل ۷) برای نمونه آورده شده است.



شکل ۶- نیمرخ سطح آب برای شعاع ۴cm و بدهی  $0.714 \text{ (l/s)}$

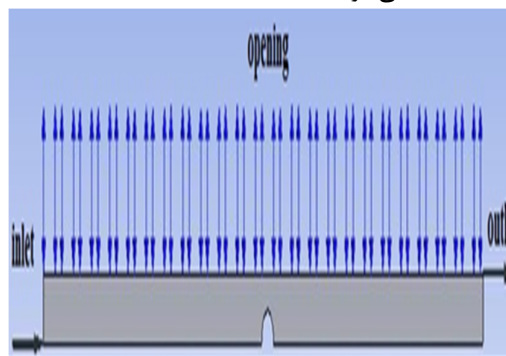


شکل ۷- نمودار توزیع سرعت بر روی سرریز برای شعاع ۴cm و بدهی  $0.714 \text{ (l/s)}$

### تحلیل نیمرخ سطح آب

اطلاعات استخراج شده از شبیه عددی شبیه‌سازی شده و نمونه‌ی آزمایشگاهی برای شعاع‌های مختلف، و همچنین بده‌های متفاوت برای سرریز نیمه استوانه‌ای در ادامه محاسبه شده است. شرح کامل تر شبیه‌ها و میزان دقت حاصل از محاسبات در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. مقایسه‌ی شبیه‌سازی در شکل ۸، که برای سه شعاع مختلف صورت گرفته، و همچنین میزان دقت موجود در جدول ۲ حاکی از آن است که شبیه حاضر، توانایی مطلوبی را در شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب دارد. به‌عنوان نمونه، عمق آب روی سرریز در نمونه آزمایشگاهی حاضر برای شعاع ۷ سانتی‌متر به ترتیب برابر با  $9/5$  و  $9/6$  سانتیمتر می‌باشد (شکل ۹).

مسئله، مرزهای جامد شامل کف و دیواره نهر می‌باشند؛ البته، در این جداره‌ها، از شرط عدم لغزش بهره گرفته شده است. برای معرفی سطح آزاد از شرط مرزی opening استفاده می‌شود؛ که اجازه‌ی تبادل آب و هوا را می‌دهد، و شیب فشار در آن صفر است. در شکل ۵ شرایط مرزی شبیه مشاهده می‌شوند.

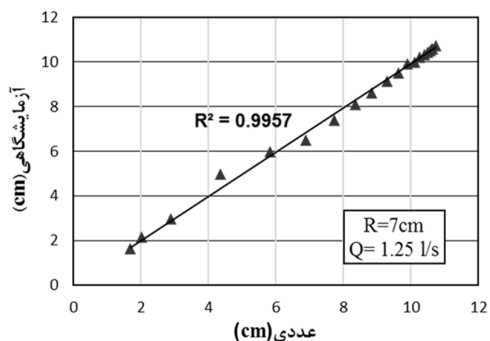


شکل ۵- شرایط مرزی شبیه

در ادامه، برای شبیه‌سازی جریان از شبیه‌های آشفتگی از دو معادله‌ی  $k-\omega$ ،  $k-\varepsilon$ ،  $\text{RNG } k-\varepsilon$ ،  $K-\varepsilon$  استفاده شده‌است. شبیه مورد ارزیابی سرریز نیمه استوانه‌ای به شعاع ۷.۶ سانتیمتر و بده  $1/25 \text{ (l/s)}$  می‌باشد. تعداد نقاط مورد ارزیابی در شبیه با توجه به داده‌های آزمایشگاهی در بیست نقطه در محدوده‌ی سرریز بودند. با توجه به میزان دقت حاصل از شبیه‌ها در جدول ۱، شبیه‌سازی آشفتگی  $\text{RNG } k-\varepsilon$  با داشتن ریشه میانگین مربعات خطای برابر با  $0.213$  و میانگین مطلق خطا برابر با  $0.153$  بود. با توجه به بررسی‌های انجام شده، (اژدری‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۳) معمولاً شبیه‌سازی‌های  $\text{RNG}$  برای جریان‌های چرخشی و انحنادار مناسبی باشند، که نتایج به‌دست آمده نیز مؤید همین موضوع است. بنابراین، در تمام مراحل بعدی این پژوهش از این شبیه استفاده شده‌است.

جدول ۱- ارزیابی شبیه‌های آشفتگی

شبیه‌های آشفتگی	$R^2$	RMSE	MAE
K-ε	۰/۹۹۵۹	۰/۲۳۱۲	۰/۱۸۴۱
RNG k-ε	۰/۹۹۵۷	۰/۲۱۳	۰/۱۵۳۷
k-ω	۰/۹۹۶۲	۰/۲۱۹	۰/۱۶۹۴



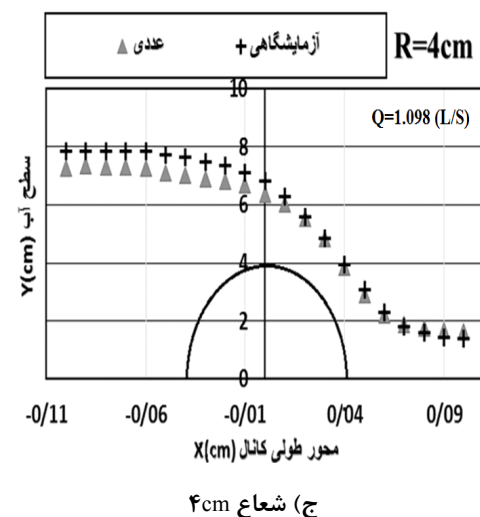
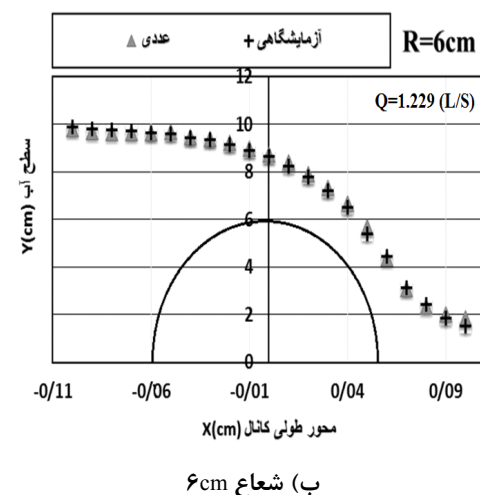
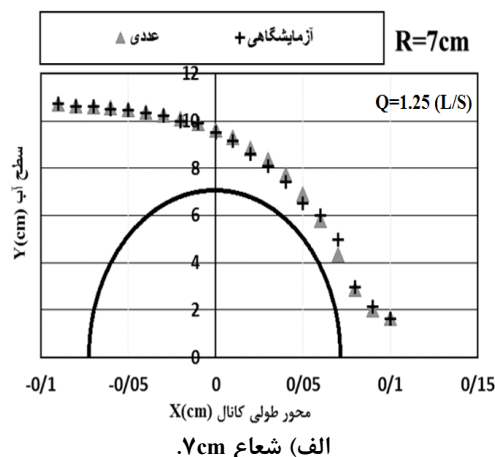
شکل ۹- مقایسه‌ی نیمرخ سطح آب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی (برای شعاع ۷cm و بده‌ی ۱/۲۵(l/s))

جدول ۲- تخمین دقت بین نتایج عددی و آزمایشگاهی

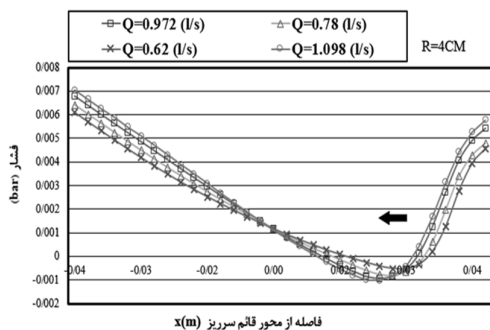
R	Q	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
۷	۱/۲۵	۰/۹۹۵۳	۰/۲۱	۰/۱۵
۷	۰/۹۸۶۸	۰/۹۹۵۴	۰/۲۲	۰/۱۷
۷	۰/۸۲۸۲	۰/۹۹۴۵	۰/۲۷	۰/۲۱
۷	۰/۷۵۸۷	۰/۹۹۳۶	۰/۲۴	۰/۱۶
۶	۱/۲۳۹	۰/۹۹۷۹	۰/۱۴	۰/۱۲
۶	۱/۰۸۳	۰/۹۹۵۳	۰/۲	۰/۱۶
۶	۰/۹۸	۰/۹۹۵	۰/۱۸	۰/۱۸
۶	۰/۹۳۳۷	۰/۹۸۸۸	۰/۲	۰/۱۹
۴	۱/۰۹۸	۰/۹۹۴۶	۰/۴	۰/۳۴
۴	۰/۷۱۴	۰/۹۹۶۴	۰/۴۹	۰/۴۴
۴	۰/۷۸	۰/۹۹۶۲	۰/۳۳	۰/۲۸
۴	۰/۶۲	۰/۹۹۶۵	۰/۳۹	۰/۳۷

### تحلیل فشار روی سرریز

بررسی توزیع فشار بر روی سرریز نشان داد که با عبور جریان توزیع فشار همواره کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای شعاع ۷ سانتیمتری و بده‌ی ۱/۲۵(l/s) در ابتدای سرریز میزان فشار عمودی بر سرریز در حدود ۰/۰۱



شکل ۸- شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی در شعاع‌های مختلف



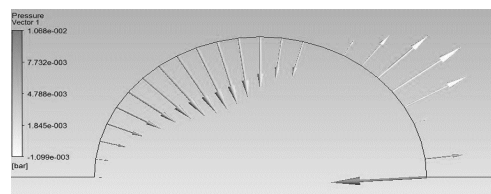
(ج)

شکل ۱۱- مقایسه ی توزیع فشار بر روی سرریز نیمه استوانه‌ای در بده‌های مختلف

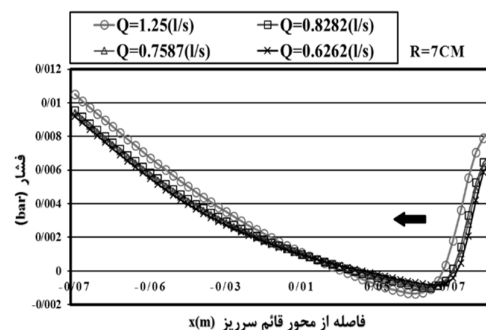
### بررسی ضریب بده

بررسی ضریب بده در تحقیق حاضر دو نتیجه‌ی کلی را داشت: اول اینکه به ازای افزایش بار آبی جریان در بالادست مقدار ضریب بده افزایش یافته است؛ به عنوان مثال، در شعاع ۷ سانتیمتری به ازای  $H/R=0/43$  مقدار  $Cd=1/23$  و  $H/R=0/47$  مقدار  $Cd=1/29$  به دست آمده اند. سایر مقادیر نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. ثانیاً، به ازای کاهش شعاع مدل، ضریب بده به صورت متوسط افزایش خواهد داشت، که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. بر طبق مطالعات آزمایشگاهی چانسون (۱۹۹۶) وجود خلأ و چسبندگی تیغه‌ای در سرریزهای استوانه‌ای باعث می‌شود که خطوط جریان با انحنا و با سرعت بیشتری به وجود آیند. از این رو، ضریب تخلیه مقادیری در حدود یک و بیشتر اختیار کند. از طرفی، با توجه به مطالعاتی که به وسیله‌ی ریوک (۱۹۲۹)، فاور (۱۹۳۷) و سارنجینسون (۱۹۷۲) صورت گرفته‌اند، ضریب بده ( $Cd$ ) نزدیک به یک و معمولاً بزرگتر از آن می‌باشد. ضریب بده بر اساس هم‌ی این مطالعات تابعی از نسبت بار آبی بالادست به شعاع است. نتایج حاصل از این تحقیق نیز با استفاده از رابطه‌ی باس (۱۹۷۶) مقداری در حدود یک و بیشتر را نشان می‌دهند.

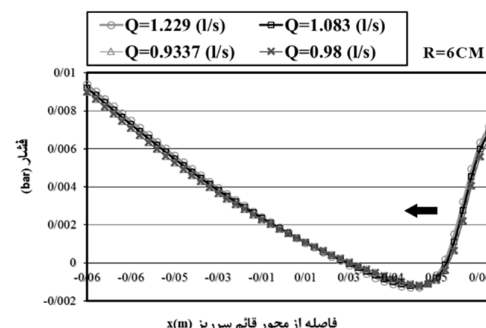
بار می‌باشد، اما در نیمه‌ی دوم سرریز و قبل از انتهای آن مقدار فشار تا  $0/014$  - بار کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده نمود. همچنین، محدوده‌ی نقطه جدائی، که معمولاً پس از تاج سرریز تشکیل می‌شود، با افزایش بده به تاج سرریز نزدیک گردیده و در بده‌های کم از تاج فاصله می‌گیرد، که در شکل ۱۱ در شعاع‌های مختلف قابل مشاهده است. به عنوان مثال در شعاع ۷ سانتیمتری، نمودار مربوط به بده‌ی  $1/25$  (l/s) نسبت به نمودار  $0.8282$  (l/s) به سمت تاج حرکت کرده است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۹). علت این موضوع هم وجود فشار منفی می‌باشد که باعث چسبندگی تیغه‌ای می‌گردد. به عبارتی، با افزایش بده جدایی تیغه‌ای به بالادست انتقال یافته و به تاج سرریز نزدیک خواهد شد.



شکل ۱۰- نمودار توزیع فشار بر روی سرریز



(الف)



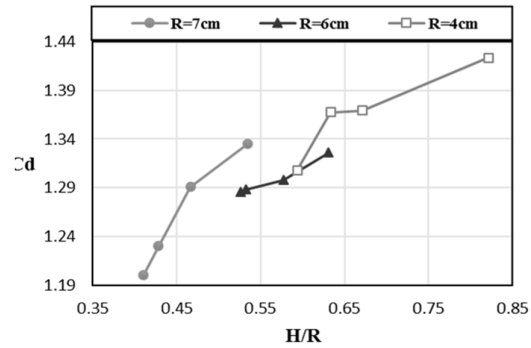
(ب)



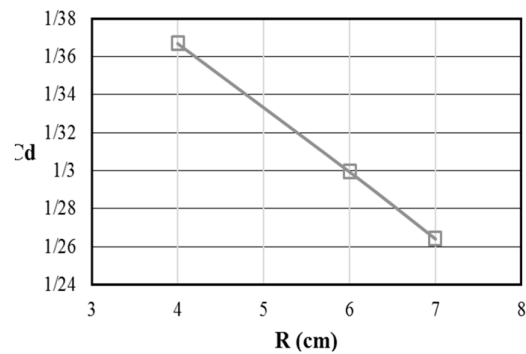
به‌خوبی شبیه‌سازی کند. بررسی توزیع فشار حاکی از آن بود که برای یک قطر مشخص، هرچه بده جریان افزایش پیدا کند نقطه‌ی جدائی جریان حاصل از فشار منفی به سمت بالادست منتقل خواهد شد. ضریب بده روی تاج سرریزهای نیمه استوانه‌ای با به‌کارگیری رابطه باس به-دست آمد، که در محدوده‌ی  $1 < H/R < 2$  از  $1/2$  تا  $1/4$  متغیر بود. همچنین، ضریب بده در سرریز نیمه استوانه‌ای با قطر سرریز رابطه عکس داشت. که با توجه به مطالعات دیگر محققین نتایج مربوط به ضریب بده، و همچنین تأثیرات بار هیدرولیکی در بالادست، و شعاع سرریز در مورد ضریب بده رضایت بخش بودند.

### منابع

- ۱) اسماعیلی، ک.، نقوی، ب.، کوروش وحید، ف.، یزدی، ج. ۱۳۸۹. مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی الگوی جریان در سرریزهای استوانه‌ای. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۴(۱): ۱۶۶-۱۷۹.
- ۲) اژدری مقدم، م.، حیدری، ح.، جعفر طباطبایی، ب. ۱۳۹۰. بررسی عدد فرود جریان در ورودی حوضچه آرامش در سرریزهای منحنی پیوند با استفاده از نرم‌افزار- FLOW 3D. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه سمنان.
- ۳) حیدر پور، م.، افضل‌ی مهر، ح.، خرمی، ا. ۱۳۸۱. کاربرد تابع جریان اطراف سیلندر دایره‌ای شکل در سرریزهای تاج دایره‌ای. علوم فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۶(۳): ۵۱-۶۰.
- ۴) عباسپور، ا. ۱۳۹۴. تحلیل جریان بر روی سرریز استوانه‌ای به روش تابع جریان و مدل عددی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده علوم کشاورزی. دانشگاه تبریز.
- ۵) عزیزاده صنمی، ف.، مسعودیان، م.، صانعی، م. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات افت کارمایه جریان عبوری از سرریز-دریچه نیم استوانه‌ای با چرخش حول مرکز. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۲۳(۲): ۲۹۱-۲۹۹.
- ۶) محمودیان شوشتری، م. ۱۳۸۸. اصول جریان در مجاری باز. جلد ۲. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز
- ۷) ورجاوند، پ. فرسادی زاده، د. خسروی نیا، پ. رفیعی، ز. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی جریان در سرریزهای



شکل ۱۲- رابطه‌ی بین  $H/R$  و  $C_d$ .



شکل ۱۳- رابطه‌ی بین  $R$  و  $C_d$ .

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی جریان روی سرریز نیمه استوانه‌ای با کاربرد نرم‌افزار Ansys CFX صورت گرفت. اهمیت سازه‌های استوانه‌ای و نیمه استوانه‌ای نسبت به سازه‌هایی با شکل‌های دیگر مزایایی چون سهولت ساخت، هزینه کم، ضریب بده بالاتر، و طراحی آسان می‌باشد. در پژوهش حاضر پس از شبکه‌بندی هندسه‌ی مسئله از mesh adaption جهت تصحیح شبکه در فرایند پیش پردازش استفاده گردید تا در جاهایی که نیاز است نرم‌افزار به صورت خودکار شبکه را ریزتر یا درشت‌تر کند. شبیه‌سازی آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG نیز با داشتن ریشه‌ی میانگین مربعات خطای برابر با  $0.213$ ، و میانگین مطلق خطا برابر با  $0.153$ ، مناسب‌ترین شبیه بود. همچنین، با توجه به اینکه نرم‌افزار مزبور برای جریان‌های چرخشی و انحنادار مناسب می‌باشد، از آن در تمام مراحل بعدی استفاده شد. به طور کلی، نتایج حاصل از این تحقیق بدین صورتند که نرم‌افزار می‌تواند تغییرات سطح جریان را

- 21) Rehbock, T. 1929. The River hydraulic laboratory of the technical University of Karlsruhe. In Hydraulic laboratory practice (ASME, New York, USA) pp: 111-242.
- 22) Sarginson, E. J. 1972. The influence of surface tension on weir flow. *J. Hydr Res. Delft. The Netherlands* 10: 431-446.
- 23) Sturm, T. W. 2001. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill book Company, New York.
- 24) Yuce, M. I., Al-Babely, A. A., and Al-Dabbagh, M. A. 2015. Flow simulation over oblique cylindrical weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering* 42: 389-407.
- استوانه‌ای با Fluent و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی. مجله دانش آب و خاک ۲۰(۲): ۵۹-۶۹.
- ۸) هنر، ت. مظلوم شهرکی، ص. ۱۳۹۳. تحلیل ضریب دبی سرریزهای جانبی استوانه‌ای و نیمه‌استوانه‌ای در جریان‌های زیر بحرانی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک ۱۸(۶۹): ۱۴۱-۱۵۰.
- 9) Abdul-latif, T., and Abdul-Mohsen, M. 2010. Calibrating the discharge coefficient of semicircular crested weir. *Eng. and Tech. Journal* 28:631-644.
- 10) Bagheri, S., and Heidarpour, M. 2010. Application of free vortex theory to estimating discharge coefficient for sharp-crested weirs. *Journal of Biosystems Engineering* 105(3):423-427.
- 11) Bos, M. G. 1976. Discharge measurement structures. *International Institute for Land Reclamation and Improvement/ LIRI Wageningen. The Netherlands* 20:107- 126.
- 12) Chanson, H. 1996. Some hydraulic aspects during overflow above inflatable flexible membrane dam. Rep. CH47/96, Dept. of Civ. Engrg., University of Queensland, Australia, May.
- 13) Chanson, H., and Montes, J. S. 1998. Overflow characteristics of circular weirs: Effects of inflow condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124: 152-162.
- 14) Chen, Q. Dai, G., and Liu, H. 2002. Volume of fluid for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *J of Hydraulic Eng.* 128: 683-688.
- 15) Dargahi, B. 2004. Experimental study and 3D numerical simulations for a free over flow spillway. *Hydraul Engin. ASCE.* 132: 899- 907.
- 16) Fawer, C. 1937. Etude de Quelques Ecoulements Permanents a Filets Courbes (Study of some steady flows with curved streamlines) Thesis. Lausanne, Switzerland. Imprimerie La Concorde (in French).
- 17) Hirt, C. W., and Nichols, B. D. 1981. Volume of fluid (Vof) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 39: 201-225.
- 18) Kabiri-Samani, A. R., and Bagheri. S. 2014. Discharge coefficient of circular-crested weirs based on a combination of flow around a cylinder and circulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 140:1-6.
- 19) Parsaie, A., Haghbi, A. H., Saneie, M., and Torabi, H. 2017. Predication of discharge coefficient of cylindrical weir-gate using adaptive neuro fuzzy inference systems (ANFIS). *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 11: 111-122.
- 20) Ramamurthy, A. S., and Vo, N. D. 1993. Characteristics of circular- crested weir flow. *Journal of Applied Mechanics ASCE* 114:61-73.