

## شبیه سازی عددی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با در نظر گرفتن مؤلفه‌ی زبری با استفاده از

### شبیه $k-\epsilon$ معیار

اکرم عباسپور<sup>\*</sup>، سعید هاشمی‌کیا<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۲۳

### چکیده

با توجه به ماهیت نیمرخ سطح آب روی سرریزها، سرریزهای استوانه‌ای در دسته بندی سرریز لبه کوتاه به شمار می‌روند. از مهمترین مزایای آبی یک سرریز استوانه‌ای، طراحی ساده، سهولت عبور اجسام شناور و الگوی پایدار جریان در مقایسه با طراحی سرریز منحنی پیوند شکل می‌باشد. در این مقاله جریان بر روی سرریز استوانه‌ای صاف و زبر با استفاده از شبیه‌سازی شفتگی  $k-\epsilon$  معیار به صورت دو بعدی شبیه سازی شده و سطح آزاد جریان با روش VOF تعیین گردید. نتایج نشان دادند که شبیه‌سازی شفتگی  $k-\epsilon$  معیار و روش VOF برای پیش بینی نیمرخ سطح آب و بدهی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای مناسب بوده، و خطای نسبی متوسط مقادیر بار آبی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و اندازه گیری شده ۱ تا ۴ درصد می‌باشد. تأثیر زبری سرریز استوانه‌ای بر روی ضریب بده بررسی شد و با مقادیر تجربی محققین قبلی مقایسه گردید. نیمرخ‌های سرعت افقی پیش-بینی شده از انگاره درسلا و تابع جریان برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** سرریز استوانه‌ای، جزء حجم سیال (VOF)، ضریب بدهی جریان، شبیه‌سازی شفتگی  $k-\epsilon$  معیار

<sup>۱</sup> - استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی مهندسی آب دانشگاه تبریز

<sup>\*</sup> - نویسنده مسئول: akabbspour@yahoo.com

## مقدمه

چنسون و مونتز (۱۹۹۷، ۱۹۹۸) جریان بر روی سرریزهای استوانه ای را در شرایط مختلف ابعاد هندسی سرریز و ارتفاع سطح آب بالادست بررسی کردند. در این تحقیق ۸ سرریز با شعاعها و با ارتفاعهای متفاوت، با در نظر گرفتن شرایط جریان ورودی به صورت نسبتاً توسعه یافته، کاملاً توسعه یافته، شیب دیواره بالادست سرریز، و تشکیل پرش آبی در بالادست ارزیابی گردید. در این بررسی روابط ارائه شده‌ی محققین مختلف برای تعیین ضریب بده در سرریزهای استوانه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. روابط توانی ضریب بده برای شرایط آبی کاملاً توسعه یافته به وسیله‌ی چنسون و مونتز (۱۹۹۸) و مونتز (۱۹۶۴) به ترتیب به شکل زیر به دست آمده اند:

$$C_D = 1.1854 \left( \frac{H_w}{R} \right)^{0.1358} \quad 0.45 < \frac{H_w}{R} < 1.9 \quad (3)$$

$$C_D = 1.169 \left( \frac{H_w}{R} \right)^{1/8} \quad 0.05 < \frac{H_w}{R} < 1.2 \quad (4)$$

چونرونک و همکاران (۲۰۰۲)، جریان بر روی سرریزهای دایره ای شکل را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. شبیه سازی عددی با استفاده از شبیه آشفنگی  $k-\epsilon$  و روش جزء حجم سیال انجام گرفت. این تحقیق در مورد چهار نوع الگوی جریان با اعداد فرود مختلف صورت گرفت.

حیدرپور و چمنی (۲۰۰۶) نیمرخهای سرعت جریان را بر روی سرریز استوانه‌ای با ابعاد مختلف بررسی کردند. در این تحقیق، برای اندازه گیری سرعت از لوله‌ی پراتل استفاده شد. ضریب بده‌ی جریان با کاربرد روش تحلیل ریاضی و ابعادی مورد مطالعه قرار گرفته، و تأثیر فراسنجهای معین بار آبی و قطر سرریز بر روی شاخص بدون بعد ضریب بده به صورت تجربی ارزیابی گردید. روش دیگر برای تعیین ضریب بده بر اساس تابع جریان با استفاده از اندازه گیری سرعت حداکثر بر روی تاج سرریز ( $U_1$ )، کارمایه‌ی آب بالادست سرریز ( $H_w$ ) و عمق آب روی تاج ( $Y_2$ ) از رابطه‌ی زیر می باشد:

$$C_D = \frac{3}{4} \frac{U_1}{\sqrt{2gH_w}} \cdot \frac{R}{H_w} \left( \frac{2 + \frac{Y_2}{R}}{1 + \frac{R}{Y_2}} \right) \quad (5)$$

همچنین، در این تحقیق، توزیع سرعت افقی نسبت به محور قائم  $Y$  بر اساس رابطه‌ی زیر بررسی گردید:

جریان بر روی سرریزها و سدها به صورت جریان متغیر سریع می باشد. سرریزها سازه‌های آبی ساده ای می باشند که به منظور تنظیم سطح آب و اندازه گیری جریان در نهرهای آبیاری مورد استفاده قرار می گیرند. از این میان، سرریزهای لبه تیز و لبه پهن، استوانه‌ای به شکل و منحنی پیوند بطور متداول استفاده می گردد. این سرریزها علاوه بر سادگی در ساخت، از نظر آبی نیز مورد توجه قرار داشته اند. مهمترین امتیازهای آبی یک سرریز استوانه ای این است که ظرفیت عبور بده‌ی جریان بالاتری را نسبت به سرریزهای لبه پهن و تیز دارا می باشد. همچنین، از موارد دیگر کاربرد این نوع سرریزها به صورت دریچه‌های غلتان و سد لاستیکی است. دریچه‌ی غلتان به صورت استوانه‌های فلزی بر روی پایه‌های بتنی در دو انتهای آن ساخته می شود. استفاده از این نوع دریچه‌ها در جریانهای کم مقرون به صرفه نمی باشد.

معادله‌ی ریاضی جریان آزاد بر روی سرریز استوانه‌ای به صورت زیر به دست می آید (چنسون و مونتز، ۱۹۹۷):

$$q = C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} H_w^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

که در آن،  $H_w$  کارمایه جریان در بالادست سرریز نسبت به تاج،  $q$  بده جریان در واحد عرض سرریز و  $C_D$  ضریب بده می باشد. ضریب بده در سرریزها بستگی به عرض تاج، ارتفاع سرریز و بار آبی دارد، و به صورت تجربی تعیین می گردد.

رامامورتی و وو (۱۹۹۳) از رابطه‌ی درسلا (۱۹۷۸) مربوط به نیمرخهای سرعت بر روی سطوح منحنی شکل برای پیش بینی توزیع سرعت بر روی سرریز استوانه‌ای شکل استفاده کردند. با فرض جریان مطلوب و دائمی معادله‌ی نیمرخ سرعت افقی درسلا (۱۹۷۸) به شکل زیر است:

$$\frac{u}{U_1} = \frac{1}{1 + (y/R)} \quad (2)$$

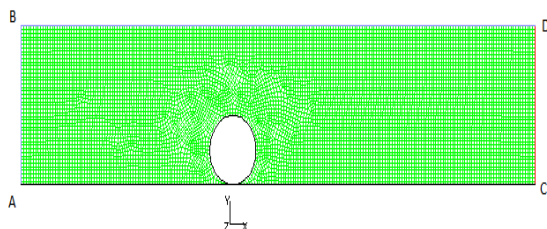
که در آن  $U_1$  سرعت حداکثر جریان (شکل ۳) بر روی تاج سرریز،  $R$  شعاع سرریز و  $y$  فاصله از سطح سرریز استوانه‌ای می باشند.

شد. مقادیر خطای متوسط شبیه‌سازی سطح آب در محدوده ۱ تا ۳/۵ درصد قرار دارد.

هدف از این تحقیق بررسی عددی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای و تأثیر عوامل مختلف بر روی مشخصات جریان با استفاده از شبیه‌آشتگی k-ε معیار است. این تحقیق با استفاده نرم‌افزار FLUENT و با کاربرد روش حجم محدود در حل معادلات ناویر استوکس متوسط رینولدزی انجام گرفته، و سطح آزاد جریان با روش عددی جزء حجم سیال تعیین گردید.

### مواد و روشها

در این تحقیق جریان بر روی سرریز استوانه‌ای شکل به ازاء بارهای آبی مختلف با استفاده از شبیه‌آشتگی جریان دو حالت و با به‌کارگیری روشهای عددی مورد بررسی قرار گرفت. طرح‌واره‌ی محدوده‌ی محاسباتی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است. ابعاد محدوده‌ی محاسباتی  $1/7 \text{ m} \times 0/35 \text{ m}$ ، و تعداد شبکه‌ها برای دو سرریز با شعاعهای متفاوت ۹۱۲۲ و ۹۱۸۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱- محدوده‌ی محاسباتی جریان .

### معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و اندازه حرکت ناویر استوکس متوسط رینولدزی برای هر یک از حالت‌های جریان (آب و هوا) در جریان بر روی سرریز استوانه‌ای به شکل زیر در نظر گرفته می‌شوند (فلوونت، ۲۰۰۶):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu + \mu_t) \quad (8)$$

$$\left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j$$

$$\rho = \alpha_A \rho_A + \alpha_w \rho_w \quad (9)$$

$$\frac{u}{U_1} = 0.5 \left( 1 + \frac{R^2}{(R+y)^2} \right) \quad (6)$$

مسعودیان و همکاران (۱۳۹۰) اثر قطر و بار آبی را روی سرریز استوانه‌ای برای ضریب بده مطالعه کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت بی‌بعد بار آبی روی سرریز به شعاع سرریز ضریب دبی برای هر سرریز افزایش یافته و ضریب دبی در این نوع سرریزها نزدیک به یک است.

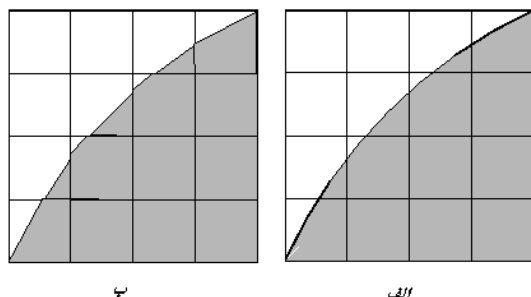
تأثیر قطر و زبری سطح سرریز استوانه‌ای بر روی ضریب بدهی جریان به صورت تجربی به‌وسیله‌ی عثمان و همکاران (۲۰۱۱) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که مقادیر ضریب بده با افزایش آن و کاهش قطر استوانه فزونی می‌یابد. همچنین، با افزایش زبری سرریزها ضریب بده نیز کاهش می‌یابد.

با توسعه روشهای پیشرفته عددی قابلیت شبیه‌سازی جریان متلاطم با مرزهای پیچیده امکان پذیر شده، و از این روشها برای تعیین نیمرخهای سطح آب، توزیع سرعت و تنش برشی بستر می‌توان استفاده کرد. با توجه به این‌که هنگام گذشتن آب از روی سرریزها جریان متلاطم دو حالت آب و هوا برقرار می‌باشد، شبیه‌سازی این پدیده با استفاده از شبیه‌های آشتگی مانند k-ε معیار، با در نظر گرفتن جزء حجم سیال<sup>۱</sup> (VOF) می‌تواند به نتایج دقیقتری منجر شود.

تادایون و رامامورتی (۲۰۰۹) جریان روی سرریزهای دایره‌ای شکل را با روش تلاطمی شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق از شبیه تلاطمی RSM<sup>۲</sup>، و روش جزء حجم سیال برای شبیه‌سازی سطح آب و نیمرخهای سرعت استفاده شده است. بررسیها نشان دادند که شبیه RSM برای جریان با هندسه‌ی پیچیده و انحنادار معتبر است. هان و همکاران (۲۰۱۱) جریان را بر روی سرریزهای دوزنقه‌ای شبیه‌سازی عددی نمودند. در این تحقیق از نرم‌افزارهای FLOW3D و SSIIM برای شبیه‌سازی سطح آب و نیمرخهای سرعت استفاده گردید، و با داده‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌ی فیزیکی مقایسه

<sup>1</sup>- volume of fluid

<sup>2</sup>- Reynolds Stress Model



شکل ۲- فصل مشترک دو سیال الف: شرایط واقعی  
ب: روش بازسازی هندسی.

### شبیه آشفته‌گی $k-\varepsilon$ معیار

در این تحقیق از شبیه‌های آشفته‌گی دو معادله‌ای معیار  $k-\varepsilon$  استفاده گردید. در شبیه آشفته‌گی  $k-\varepsilon$  روابط

زیر برقرار است (لیو و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\rho \frac{DK}{Dt} = P - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu\alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) \quad (12)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\varepsilon}{k} (C\varepsilon_1 P - C\varepsilon_2 \rho\varepsilon) - \rho R +$$

$$C\varepsilon_3 \rho\varepsilon \nabla \cdot u + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu\alpha_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) \quad (13)$$

در این روابط  $k$  کارمایه‌ی جنبشی آشفته‌گی،  $\varepsilon$  نرخ اتلاف کارمایه و  $P$  تولید کارمایه که از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$P = 2C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} [S_{ij}S_{ij} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot U)^2] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot U \quad (14)$$

در معادله‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) ضرایب تجربی شبیه  $k-\varepsilon$  معیار  $C_\mu = 0.09$ ،  $\alpha_k = 1$ ،  $\alpha_\varepsilon = 0.77$ ،  $R = 0$ ،  $C_{\varepsilon 1} = 1/44$ ،  $C_{\varepsilon 2} = 1/68$  و  $C_{\varepsilon 3} = -1$  می‌باشند.

### مشخصات عددی شبیه و شرایط مرزی و اولیه

برای تحلیل عددی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای ابتدا هندسه‌ی شبیه در محیط Gambit ایجاد و شبکه‌بندی شد. برای شبکه‌بندی شبیه عددی از شبکه‌های غیرساختاری استفاده گردید. اندازه‌ی شبکه‌ها در امتداد دو محور مختصات ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۱) شرایط مرزی به‌صورت فشار آب‌ایستایی جریان آب (AB)، فشار آب‌ایستایی ورودی (BD) و فشار آب‌ایستایی خروجی (CD) برابر صفر و دیواره‌ها (بستر نهر و سرریز) تعریف شد. مقدار زبری مطلق در سرریز صاف با توجه به جنس سرریز برابر با ۰/۰۰۱ میلی‌متر، و در سرریزهای زبر برابر با ۱/۲ و ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. روش حل شبیه عددی جریان بر روی

روابط فوق  $u_i$  نشان دهنده‌ی مؤلفه‌های سرعت جریان،  $P$  فشار متوسط رینولدزی،  $\alpha_A$  و  $\alpha_w$  نسبت هوا و آب و  $\rho_A$ ،  $\rho_w$  و  $\rho$  به ترتیب جرم مخصوص هوا، آب و جرم مخصوص مخلوط آب و هوا می‌باشد. همچنین  $\mu_t$  و  $\mu$  به ترتیب گرانیروی گردابی و گرانیروی مخلوط آب و هوا بوده که  $\mu_t$  از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

که در آن  $k$  کارمایه جنبشی،  $\varepsilon$  نرخ اتلاف کارمایه و  $C_\mu$  ضریب ثابت شبیه آشفته‌گی می‌باشد.

### روش جزء حجم سیال (VOF)

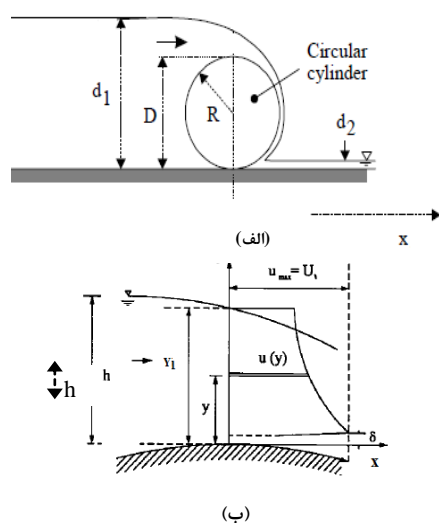
برآورد موقعیت سطح آزاد آب در جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با استفاده از روش جزء حجم سیال (VOF) انجام شد. در این روش تابع  $F(x,y,t)$  برای تعیین نیمرخ سطح آب تعریف می‌شود. تابع  $F$  به شکل زیر بوده و مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر می‌باشد (فلوونت، ۲۰۰۶).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (11)$$

برای حل معادله‌ی فوق در سلولی که پر از آب است، مقدار تابع  $F$  برابر با یک می‌باشد. در سلول خالی (پر از هوا) مقدار تابع برابر با صفر است، و در سلولهایی که سطح آب وجود دارد این مقدار بین صفر و یک می‌باشد. معادله‌ی جزء حجم سیال با روشهای مختلف حل می‌شود، که در این تحقیق از روش بازسازی هندسی<sup>۱</sup> استفاده شده است. در روش بازسازی هندسی سطح مشترک جریان بین دو حالت با کاربرد روش خطوط جزء به‌دست می‌آید، که در شبکه بندی غیرساختاری<sup>۲</sup> متداول بوده و از دقت بیشتری برخوردار است. در روش بازسازی هندسی فرض می‌شود که فصل مشترک دو سیال در هر سلول به‌صورت خط شیب دار بوده، و جابه‌جایی سیال در سلولها با توجه به شکل خطوط به‌دست می‌آید. در شکل (۲) فصل مشترک دو حالت آب و هوا در شرایط واقعی و روش بازسازی هندسی نمایش داده شده است (فلوونت، ۲۰۰۶).

<sup>1</sup>- geometric reconstruction

<sup>2</sup>- unstructured meshing



شکل ۳- نمایش جریان الف) بر روی سرریز استوانه‌ای  
ب) نیمرخ سرعت (چنسون و مونتز، ۱۹۹۸).

### نتایج و بحث

در این تحقیق به بررسی شبیه عددی جریان از روی سرریز و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایشگاهی عثمان و همکاران (۲۰۱۰) پرداخته شده است. با شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای صاف و زبر، بدهی جریان و نیمرخ سطح آب در حالت‌های مختلف تعیین گردید. شبیه‌سازی عددی برای سه نوع نمونه‌ی سرریز صاف و زبر (با ارتفاع زبری ۱/۲ و ۲/۵ میلی‌متری) با قطرهای متفاوت (۱۰/۱۶ و ۱۵/۲۴ سانتی‌متر)، و با ۴ بدهی (جمعاً ۲۴ شبیه عددی) با کاربرد نرم افزار فلوونت صورت گرفت.

### نیمرخ سطح آب

نیمرخ سطح آب بر روی سرریز استوانه‌ای با قطرهای و زبریهای متفاوت، با شبیه‌سازی k-ε معیار تعیین گردید. در شکل (۴) نیمرخهای سطح آزاد آب شبیه‌سازی شده در فواصل مختلف سرریز استوانه‌ای با دو قطر متفاوت نشان داده شده است. در شکل (۵) سطح آب به‌دست آمده از شبیه‌سازی k-ε معیار و جزء حجم سیال برای دو آزمون نمایش داده شده است. با بررسی بار آبی بالادست سرریز (h) با داده‌های آزمایشگاهی می‌توان استنباط کرد که مقادیر عددی بار آبی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند.

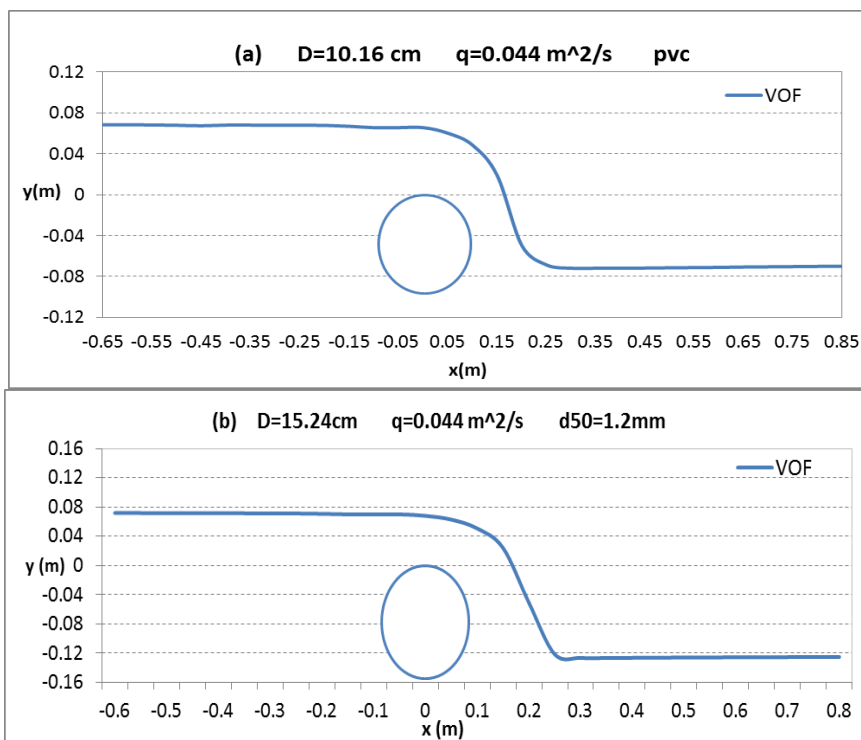
سرریزها غیر ماندگار است. شرایط اولیه در همه‌ی سلولهای بالادست سرریز تا سطح آب، سیال آب بوده و تابع F برابر با یک می‌باشد.

### نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز استوانه‌ای

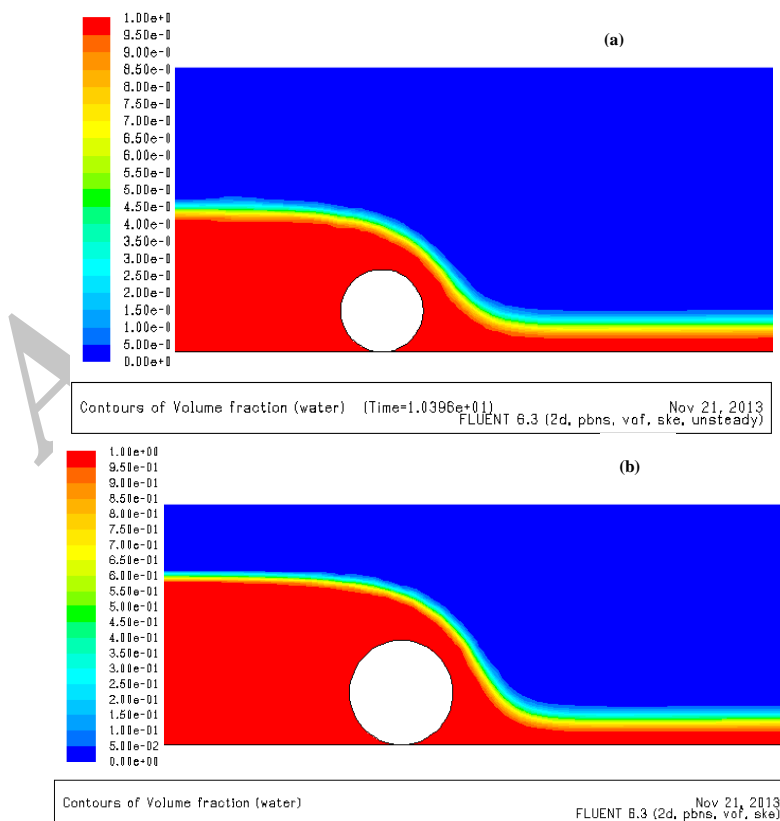
در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی عثمان و همکاران (۲۰۱۰) برای ارزیابی روش شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزها با شبیه‌سازی استفاده شده است. آزمایشها در یک نهر پایه‌دار مستطیلی به عرض ۰/۴۴۶ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و طول ۷/۶ متر انجام گرفته است. سرریز استوانه‌ای از جنس پی‌وی‌سی با سطح صاف و زبر پوشش شده با ذرات ماسه (mm ۱/۲ و ۲/۵)  $(D_{50}=2/5)$  قطرهای ۱۰/۱۶ و ۱۵/۲۴ سانتی‌متری ساخته شده است (شکل ۳). نیمرخهای سطح آب و ضریب بدهی جریان بر روی سرریز با بار آبی (h) مختلف بررسی شده است. در جدول (۱) مشخصات فیزیکی و آبی سرریزها ارائه شده‌اند.

### جدول ۱- مشخصات فیزیکی و آبی سرریزها.

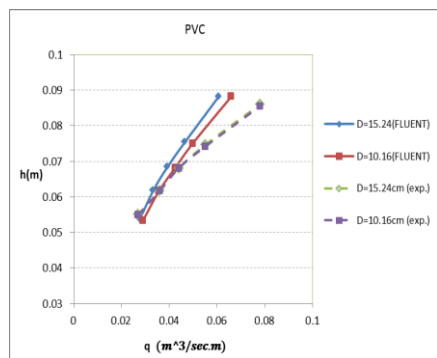
متغیرها	مقادیر داده‌های آزمایشگاهی
D(cm)	۱۵/۲۴, ۱۰/۱۶
h (cm)	۸/۶-۵/۱۲
$d_{50}$ (mm)	۲/۵, ۱/۲, ۰
q ( $m^3/m.s$ )	۰/۰۵۵-۰/۰۲۷



شکل ۴- نیمرخ سطح آزاد آب (a) سرریز صاف،  $D=10/16\text{ cm}$ ، (b) سرریز زبر  $(d_{50}=1/2\text{ mm})$  و  $D=15/24\text{ cm}$

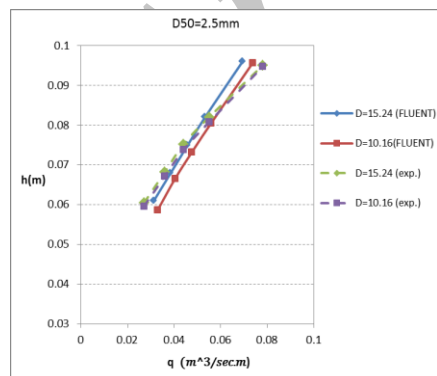
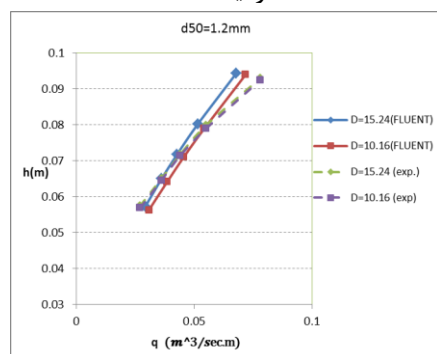


شکل ۵- شبیه سازی نیمرخ سطح آب (a) سرریز صاف،  $D=10/16\text{ cm}$ ، (b) سرریز زبر  $(d_{50}=1/2\text{ mm})$ ،  $D=15/24\text{ cm}$



شکل ۶- مقایسه‌ی بدهی جریان به دست آمده از شبیه‌آشتگی با داده‌های تجربی در سرریز صاف.

در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ تغییرات ضریب بدهی سرریز استوانه‌ای به ازاء  $H_w/R$  نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها می‌توان استنباط نمود که با افزایش نسبت  $H_w/R$  ضریب بدهی افزایش می‌یابد. همچنین، به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی از روابط ضریب بدهی سرریز استوانه‌ای شکل مربوط به چنسون و مونتز (۱۹۹۸) و مونتز (۱۹۶۴) استفاده گردید.



شکل ۷- مقایسه‌ی بدهی جریان به دست آمده از شبیه‌آشتگی با داده‌های تجربی در سرریزهای زبر.

## ضریب بدهی ( $C_D$ )

بر اساس تحقیقات چنسون و مونتز (۱۹۹۸)، ضریب بدهی برای سرریزهای لبه پهن از معادله‌ی (۱) به دست می‌آید. عثمان و همکاران (۲۰۱۰) ضریب بدهی سرریز استوانه‌ای را تعیین کردند که در جدول (۲) آمده است.

به منظور ارزیابی توانایی شبیه‌سازی فلوونت برای شبیه‌سازی دقیق جریان بر روی سرریز استوانه‌ای، شاخص آماری خطای نسبی  $RE^1$  محاسبه گردید. خطای نسبی از رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد.

$$RE = \frac{|Y_{oi} - Y_{ci}|}{Y_{oi}} \quad (15)$$

که در آن  $Y_{ci}$  مقادیر شبیه‌سازی شده و  $Y_{oi}$  مقادیر اندازه‌گیری شده در گام زمانی  $t_i$  و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

جدول (۲) مقادیر ضریب بدهی ( $C_D$ ) آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای آزمون‌های مختلف را نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی این مقادیر مشاهده می‌شود که اختلاف اندکی بین ضریب بدهی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود دارد. مقادیر خطای نسبی نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی عثمان و همکاران (۲۰۱۰) برای آزمون‌های مختلف نشان دهنده‌ی انطباق مقادیر ضریب بدهی شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی است. همچنین، حداکثر خطای ضریب بدهی مربوط به سرریز صاف با بدهی  $0.055$  مترمکعب بر متر بر ثانیه می‌باشد.

در شکل‌های (۶) و (۷) مقادیر آبی و بدهی به دست آمده از شبیه‌آشتگی  $k-\epsilon$  و داده‌های آزمایشگاهی برای سرریزهای صاف و زبر نشان داده شده‌اند. با مقایسه‌ی بدهی شبیه‌آشتگی در سرریزهای استوانه‌ای با بدهی آزمایشگاهی عثمان و همکاران (۲۰۱۰)، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بدهی شبیه‌آشتگی  $k-\epsilon$  معیار تطابق خوبی با بدهی آزمایشگاهی دارند. همچنین، بدهی جریان وابسته به بار آبی بالادست سرریز است بوده، و زبری تأثیر کمی بر جریان روی سرریز استوانه‌ای دارد.

1- relative error

(۵) شامل فراسنجهای آبی بیشتری (سرعت حداکثر، بار آبی بالادست) بوده و رابطه‌ی چنسون و مونتز (۱۹۹۸) با تعداد داده‌های آزمایشگاهی بیشتری به‌دست آمده و دقیق‌تر است.

#### منحنی‌های هم سرعت

می‌توان با استفاده از نرم افزار فلوونت منحنیهای هم‌سرعت را نیز به‌دست آورد. شکل (۱۱) منحنیهای سرعت شبیه‌سازی شده را برای سرریز زیر با قطر  $D=15/24$  سانتی‌متر به ازاء بدهی  $q=0/044$  مترمکعب بر متر در ثانیه نشان می‌دهد. با توجه به منحنیهای هم سرعت برای این شبیه مشاهده می‌شود که سرعت در بالادست سرریز کم، نزدیک کف و سرریز استوانه‌ای برابر با صفر، و در پایین دست افزایش می‌یابد.

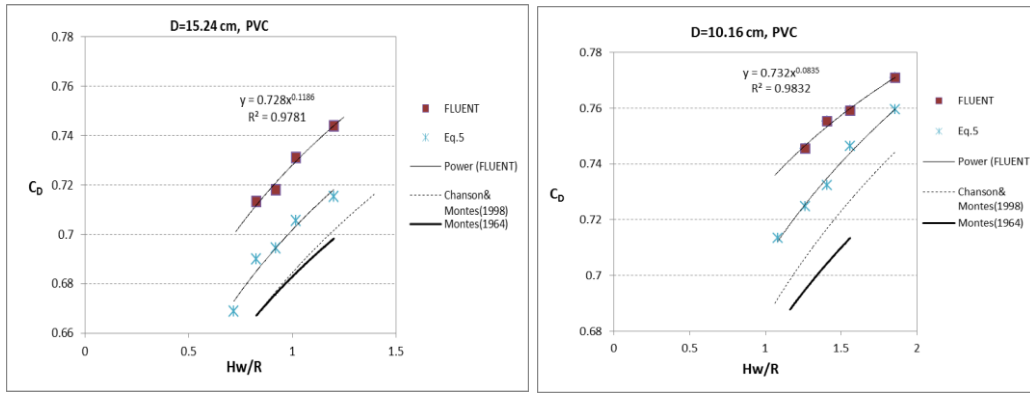
با توجه به شکل ۸ می‌توان استنباط نمود که در سرریزهای صاف، نتایج شبیه عددی به مقادیر ضریب بدهی به‌دست آمده از تابع جریان (معادله‌ی ۵) نزدیک‌ترند. همچنین، در سرریزهای زیر (شکل‌های ۹ و ۱۰) مقادیر شبیه عددی با نتایج آزمایشگاهی چنسون و مونتز (۱۹۹۸) همخوانی بهتری دارند.

بررسیها نشان دادند که زبری سرریز بر مقادیر ضریب بده تأثیری ندارد، و عوامل موثر بر ضریب بده شامل شعاع سرریز و بار آبی در بالادست سرریز است. بطور کلی، مطابق شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، مقادیر ضرایب بده به‌دست آمده از شبیه عددی با مقادیر معادله‌ی مونتز (۱۹۶۴) (رابطه‌ی توانی ۴) برای سرریزهای صاف و زیر مقایسه شده‌اند، که مقادیر ضریب بده با معادله‌ی (۴) انطباق کمتری نشان داده‌اند، و این مسأله‌ی ناشی از سادگی رابطه‌ی توانی (۴) می‌باشد، در حالی که معادله‌ی

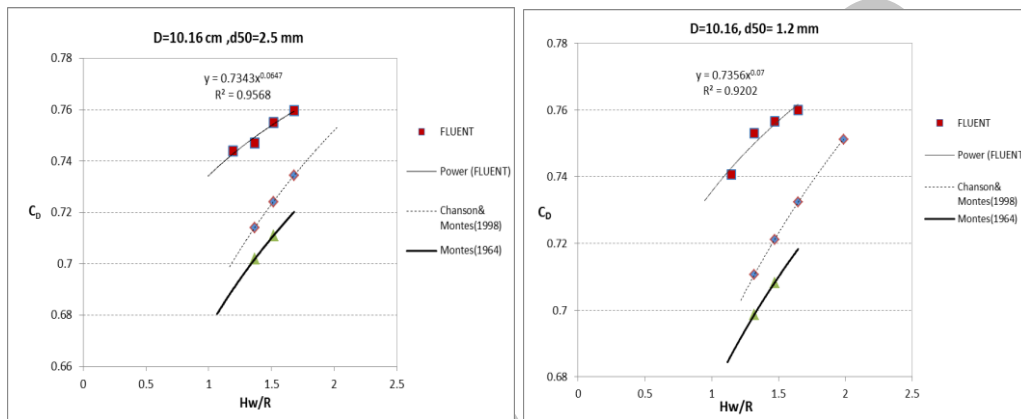
جدول ۲- مشخصات جریان در شبیه عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی.

شبیه سرریز	D=۱۰/۱۶ cm					D=۱۵/۲۴ cm				
	q (m <sup>3</sup> /m.s)	q (m <sup>3</sup> /m.s) (Fluent)	C <sub>D</sub> آزمایشگاهی	C <sub>D</sub> محاسباتی	RE % C <sub>D</sub>	q (m <sup>3</sup> /m.s)	q (m <sup>3</sup> /m.s) (Fluent)	C <sub>D</sub> آزمایشگاهی	C <sub>D</sub> محاسباتی	RE % C <sub>D</sub>
D50=0 (PVC)	۰/۰۲۷	۰/۰۲۹	۰/۷۱۱	۰/۷۵۹	۶/۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲۸	۰/۷۰۹	۰/۷۳۴	۳/۵
	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۷۸	۰/۷۴۵	۴/۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۳	۰/۷۷۹	۰/۷۱۳	۸/۴
	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳	۰/۸۲۹	۰/۷۵۵	۸/۹	۰/۰۴۴	۰/۰۳۹	۰/۸۲۹	۰/۷۱۸	۱۳/۳
	۰/۰۵۵	۰/۰۵۰	۰/۹۰۶	۰/۷۶	۱۶/۲	۰/۰۵۵	۰/۰۴۷	۰/۹۹	۰/۷۳۱	۱۸/۵
D50= ۱/۲ mm	۰/۰۲۷	۰/۰۳۱	۰/۶۷۶	۰/۷۴	۹/۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۹	۰/۶۶۵	۰/۷۰	۵/۶
	۰/۰۳۶	۰/۰۳۹	۰/۷۲۸	۰/۷۵۲	۳/۴	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۷۲۱	۰/۷۱۴	۰/۹
	۰/۰۴۴	۰/۰۴۶	۰/۷۷۱	۰/۷۵۶	۱/۹	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲	۰/۷۶۶	۰/۷۲۳	۵/۵
	۰/۰۵۵	۰/۰۵۴	۰/۸۲۴	۰/۷۶	۷/۸	۰/۰۵۵	۰/۰۵۲	۰/۸۰۸	۰/۷۳۳	۹/۲
D50= ۲/۵ mm	۰/۰۲۷	۰/۰۳۳	۰/۶۳	۰/۷۴۳	۰/۰۳۱	۰/۰۲۷	۰/۰۳۱	۰/۶۱۸	۰/۶۸۵	۱۰/۸
	۰/۰۳۶	۰/۰۴	۰/۶۸۷	۰/۷۴۷	۸/۷۵	۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	۰/۶۷۱	۰/۷۱۱	۶/۱
	۰/۰۴۴	۰/۰۴۸	۰/۷۳۵	۰/۷۵۵	۲/۷	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۷۱۵	۰/۷۲۵	۱/۵
	۰/۰۵۵	۰/۰۵۶	۰/۷۹۵	۰/۷۵۹	۴/۷	۰/۰۵۵	۰/۰۵۴	۰/۸۸۸	۰/۷۴۳	۵/۸

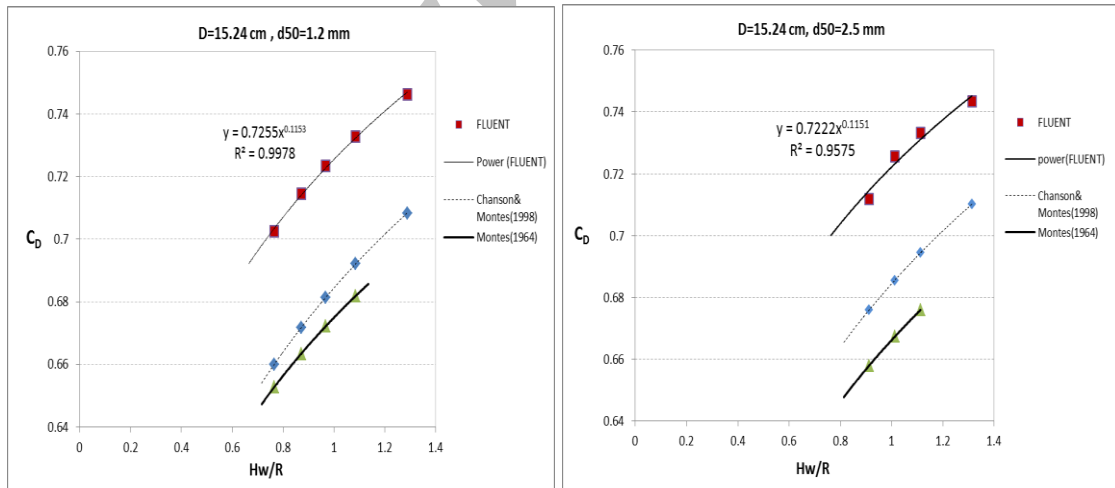




شکل ۸- مقادیر شبیه سازی شده‌ی  $C_D$  به ازاء  $H_w/R$  در سرریز استوانه‌ای صاف، و مقایسه‌ی آنها با نتایج تجربی چنسون و مونتز (۱۹۹۸) و مونتز (۱۹۶۴).



شکل ۹- مقادیر شبیه سازی شده‌ی  $C_D$  به ازاء  $H_w/R$  در سرریز استوانه‌ای زیر و مقایسه‌ی آنها با نتایج تجربی چنسون و مونتز (۱۹۹۸) و مونتز (۱۹۶۴).



شکل ۱۰- مقادیر شبیه سازی شده‌ی  $C_D$  به ازاء  $H_w/R$  در سرریز استوانه‌ای زیر و مقایسه‌ی آنها با نتایج تجربی چنسون و مونتز (۱۹۹۸) و مونتز (۱۹۶۴).

روی این نمودار سرعت متوسط جریان در بالادست سرریز با کاربرد روش انتگرال سطحی، سرعت به ترتیب برابر با ۰/۱۹ متر بر ثانیه به دست آمده، که با مقدار سرعت

با توجه به منحنیهای هم سرعت، و روند تغییرات سرعت، می توان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین نمونه‌ی فیزیکی و شبیه عددی وجود دارد. همچنین، از



## منابع

8. Heidarpour, M., and M.R. Chamani. 2006. Velocity distribution over cylindrical weirs. *J. Hyd. Res.* 44: 708–711.
9. Liu, C.R., W.J. Ma, and A.D. HuHe. 2002. Numerical investigation of flow over a weir. *J. Acta. Mech. Sinica* 18: 594-602.
10. Montes, J.S. 1964. On the influence of curvature, surface tension and viscosity on flow over round-crested weirs. Discussion. *Proc. Instn. Civil. Engrs., London.* 28: 562-563.
11. Othman, K.I., T.A. Chilmeran, and A.I.A Ibrahim. 2011. Effect of size and surface roughness of circular weirs on overflow characteristic. *J. Al Rafidain Eng.* 19: 77-89.
12. Ramamurty, A.S., and N.D. Vo. 1993. Characteristics of circular crested weir. *J. Hyd. Res. ASCE.* 119: 1055-1063.
13. Tadayon, R., and A.S. Ramamurthy. 2009. Turbulence modeling of flows over circular spillways. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.* 135: 260–262.
1. مسعودیان، م.، م. قره‌گزلو، ف. نادری، و ن. فندرسکی. ۱۳۹۰. هیدرولیک جریان مستغرق در شبیه ترکیبی سرریز دریچه نیم استوانه ای. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، دانشگاه کرمان، ۱۱-۱۰ بهمن.
2. Chanson, H., and J.S. Montes. 1997. Overflow characteristics of circular weirs. Res. Rep. No. CE154. The Univ. of Queensland, Australia.
3. Chanson, H., and J.S. Montes. 1998. Overflow characteristics of circular weirs: effect of inflow conditions. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.* 124: 152-162.
4. Chonrong, L., A. Huhe, and M. Wenju. 2002. Numerical and experimental investigation of flow over cylindrical weirs. *Acta Mech. Sinica.* 18: 23-31.
5. Dressler, R.F. 1978. New nonlinear shallow flow equations with curvature. *J. Hyd. Res.* 16: 205–222.
6. Fluent. 6.3. 2006. User's Guide. Fluent Incorporated, Lebanon, N.H. Available at <http://www.fluent.com>.
7. Haun, S., R.B. Nils, and R. Feurich. 2011. Numerical modeling of flow over trapezoidal broad crested weir. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 5397-405.