

مقایسه مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با

استفاده از نرم‌افزار Fluent

فرزانه صاحبی وایقان^{۱*} - داود فرسادی‌زاده^۲ - مهدی اسمعیلی ورکی^۳ - اکرم عباسپور^۴ - علی حسین‌زاده دلیر^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۶

چکیده

یکی از سازه‌های متداول جهت استهلاک انرژی جریان‌های پر سرعت، حوضچه آرامش می‌باشد که از میان هندسه‌های مختلف قابل استفاده، حوضچه‌های آرامش واگرا با مقطع مستطیلی دارای عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تر و هزینه ساخت کمتر می‌باشند. در این تحقیق قابلیت مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه مستطیلی به صورت سه‌بعدی و با بکارگیری مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG، با استفاده از نرم‌افزار Fluent مورد بررسی قرار گرفت. سطح آزاد جریان با مدل جزء حجم سیال (VOF) تعیین شد. مقایسه انجام شده بین خروجی مدل عددی با داده‌های مدل آزمایشگاهی در زوایای واگرایی ۵ و ۱۰ درجه نشان داد که مدل $k-\epsilon$ استاندارد مقادیر پروفیل‌های سطح آب، طول پرش و مقادیر حداکثر سرعت در عمق را با دقت بهتری نسبت به مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ شبیه‌سازی می‌نماید. این مدل کارایی حوضچه‌های واگرا را در کاهش طول پرش نسبت به حوضچه‌های کلاسیک بهتر نشان می‌دهد. لذا در حوضچه‌های واگرا استفاده از این مدل جهت شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی توصیه می‌شود. نتایج مربوط به پروفیل سطح آب حاکی از آن است که خطای نسبی متوسط مقادیر عمق آب بدست آمده از مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده تقریباً ۷ درصد می‌باشد. پروفیل‌های سرعت نیز تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند. همچنین مدل عددی گرداب‌های ایجاد شده در نتیجه واگرایی دیواره‌ها را به خوبی بررسی‌های تجربی نشان داده است. این گرداب‌ها در اعداد فرود بالا در یک سمت دیواره تشکیل شده و در اعداد فرود پایین‌تر در دو طرف دیواره‌های واگرا ایجاد می‌شوند و شدت تشکیل این گرداب‌ها با افزایش زاویه واگرایی دیواره‌ها بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی واگرا، مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ ، مدل جزء حجم سیال (VOF)، Fluent، گرداب

مقدمه

نسبی پرش کاهش یافته و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. مطالعه صاحبی و همکاران (۴) درباره تأثیر واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش بر هزینه‌های ساخت آن نشان داده است که افزایش واگرایی دیواره‌ها از ۴ تا ۹ درجه در محدوده اعداد فرود ۴/۵ تا ۹، باعث افزایش راندمان پرش به میزان ۱۰ تا ۲۹ درصد و کاهش هزینه‌های ساخت حوضچه به میزان ۴ تا ۲۰ درصد نسبت به حوضچه کلاسیک می‌شود. بنابراین هزینه‌های احداث حوضچه‌های آرامش با مقاطع واگرا نسبت به حوضچه‌های مستقیم کمتر خواهد بود و با انجام مطالعات بیشتر این نوع از حوضچه‌ها می‌توانند جایگزین خوبی برای حوضچه‌های استاندارد باشند.

بررسی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با استفاده از روش‌های تحلیلی به دلایل شرایط مرزی این پدیده و پیچیدگی جریان متلاطم و فرآیند پخشیدگی^۶ بین جت جریان با دیواره‌ها، کف و سطح غلطان

از میان انواع سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، حوضچه‌های آرامش با مقاطع مستطیلی دارای بیشترین کاربرد می‌باشند. از این رو تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش انجام شده و معیارهای لازم جهت طراحی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی ارائه شده است. مطالعات انجام شده توسط اربهاهیراما و ابلا (۹)، خلیفه و مک‌کروکودال (۱۲)، اسمعیلی ورکی (۱)، امید و همکاران (۱۵)، شجاعیان و همکاران (۳)، بختیاری و کاشفی‌پور (۲) و کاسی (۶) نشان داده است که با تغییر هندسه پلان حوضچه‌های آرامش و واگرایی دیواره‌ها، نسب عمق ثانویه و طول

۱، ۲، ۴ و ۵ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشیار، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*) نویسنده مسئول: Email: Sahebi.farzaneh@yahoo.com

۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

مدل فیزیکی اختلاف داشت. در مطالعه فرومند (۵) از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG در ترکیب با روش VOF، برای مدل سازی سطح آزاد و ایجاد جریان متلاطم دوفازی آب و هوا استفاده شده است که مدل $k-\epsilon$ استاندارد دقت بیشتری نسبت به $k-\epsilon$ RNG نشان داد. کریمی و همکاران (۷)، نتایج بکارگیری مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG و RSM جهت شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی در پایین دست دریاچه را مقایسه نمودند. در قسمتهای ابتدایی و میانی پرش مدل $k-\epsilon$ استاندارد و در نواحی انتهایی پرش مدل های $k-\epsilon$ RNG و RSM نسبتاً نتایج بهتری داشته اند. عباسپور و همکاران (۸)، پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار را با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG شبیه سازی نمودند و نتایج شبیه سازی عددی با نتایج مدل فیزیکی ساخته شده بدین منظور را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج بیانگر کارایی مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و روش VOF جهت برآورد پروفیل سطح آب بود و خطای مدل برای تعیین پروفیل سطح آب بین ۱ تا ۸/۶ درصد گزارش شد. از آنجا که تاکنون تحقیقی در رابطه با شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی و اگر انجام نشده است، هدف از تحقیق حاضر مدل سازی این پدیده با حل عددی معادلات ناویر-استوکس^۳ و استفاده از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار FLUENT می باشد.

مواد و روش ها

معادلات حاکم

برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر-استوکس متوسط رینولدزی برای هر یک از فازهای جریان (آب و هوا) به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \text{ معادله پیوستگی:}$$

(۲) معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (3)$$

$$\rho = \alpha_A \rho_A + \alpha_W \rho_W$$

در روابط فوق u_i نشان دهنده مولفه های سرعت جریان، α_A ، α_W نسبت آب و هوا، ρ_A ، ρ_W به ترتیب جرم مخصوص آب و هوا می باشد. δ_{ij} نیز دلتای کرونکر می باشد که برای $i = j$ مقدار آن برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می باشد.

مدل های آشفتگی

در این تحقیق از مدل آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ استاندارد و RNG استفاده شده است. جهت بررسی عددی پرش هیدرولیکی

آب دشوار می باشد. اما با توجه به این که در پرش هیدرولیکی جریان متلاطم دو فاز آب و هوا برقرار است لذا شبیه سازی این پدیده با استفاده از مدل های آشفتگی می تواند منجر به نتایج دقیق تری در شناخت بیشتر این پدیده و تاثیر عوامل مختلف هندسی و هیدرولیکی شود و در راستای کاهش هزینه ها طراحان را با شرایط ایجاد شده جریان پس از اجرا آشنا نماید.

شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی در کانال های مستطیلی مستقیم توسط محققین زیادی بررسی شده است. سارکر و رودز (۱۷)، پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف را به صورت تجربی بررسی نموده و سپس با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ RNG^۱ و روش جزء حجم سیال (VOF) شبیه سازی نمودند. نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی در حالت دو بعدی نشان داد اما محاسبات در شرایط سه بعدی از دقت لازم برخوردار نبود. زائو و میسرا (۱۸)، با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم و با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ به صورت دو بعدی پرش هیدرولیکی را شبیه سازی نموده و نتایج تحقیق خود را به صورت پروفیل های سرعت و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی (k) و اتلاف انرژی (E) ارائه نمودند. لیو و همکاران (۱۴)، مطالعاتی بر روی خصوصیات آشفتگی پرش هیدرولیکی انجام دادند که بر طبق نتایج بدست آمده، حداکثر شدت آشفتگی و تنش های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به طور خطی کاهش پیدا می کند و اندازه گرداب های تولید شده نیز در انتهای پرش بیشتر می شود. گونزالز و بومباردلی (۱۱)، پرش هیدرولیکی روی بستر صاف را با استفاده از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ و روش شبیه سازی گرداب های بزرگ LES^۲ بررسی نموده و نتایج را با داده های آزمایشگاهی مقایسه نمودند. رومنگتولی و همکاران (۱۶) پرش هیدرولیکی رخ داده پس از دریاچه و همچنین جریان ریزی آب پس از پایین افتادگی کف کانال بعد از وقوع پرش را به صورت دو بعدی شبیه سازی نمودند. در روند شبیه سازی از روش VOF برای مدل سازی سطح آب و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده گردید. مقایسه های انجام شده بین خروجی مدل و پروفیل سطح آب و همچنین پروفیل های سرعت که با استفاده از دستگاه ADV برداشت گردید مطابقت خوبی نشان داد. فرومند (۵) مدل عددی پرش هیدرولیکی را به صورت دوبعدی بر روی بستر صاف و موج دار بررسی نمود. نتایج حاصل از حل عددی از قبیل پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در عمق برای بسترهای صاف و موج دار با نتایج حاصل از داده های آزمایشگاهی لیو و همکاران و همچنین ایزدجو و همکاران مقایسه شد که نتایج انطباق خوبی با هم داشته اند. طول پرش هیدرولیکی در مدل نیز ۴/۵ درصد با طول پرش اندازه گیری شده در

1- ReNormalization-Group $k-\epsilon$ model (RNG)
2- Large Eddy Simulation

حاضر با توجه به اهمیت مدل کردن سطح آزاد آب در پرش هیدرولیکی از روش بازسازی هندسی استفاده بعمل آمده است. در این روش فرض می‌شود که فصل مشترک دو سیال در هر سلول بصورت خط شیبدار بوده و جابجایی سیال در سلول‌ها به شکل خطوط بدست می‌آید.

مدل آزمایشگاهی

برای مطالعه آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا از نتایج مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط کاسی (۶) در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تهران استفاده شد. مدل حوضچه آرامش دارای طولی به اندازه ۱/۴ و عرض اولیه ۰/۲۵ متر بود که بلافاصله بعد از دریچه کشویی که در پایین دست مخزن تامین ارتفاع جهت ایجاد عمق اولیه لازم برای تشکیل پرش، مستقر گردید. دیواره‌های حوضچه به گونه‌ای طراحی شده بود که امکان ایجاد زوایای واگرایی مختلف به راحتی میسر گردد. طرح کلی مدل آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است.

پروفیل پرش با استفاده از پیزومترهایی که در فواصل ۵ سانتی‌متری بر روی کف حوضچه نصب شده بود، اندازه‌گیری گردید و برای اندازه‌گیری سرعت جریان نیز از سرعت‌سنج ADV استفاده شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی

جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل سه‌بعدی و ارزیابی امکان‌سنجی آن در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا، از دو مدل ۱ و ۲ در زاویه‌های واگرایی ۵ و ۱۰ درجه استفاده شده است که مشخصات آنها به شرح جدول ۱ می‌باشد.

تعریف محدوده هندسی، ایجاد شبکه و تعیین شرایط

مرزی

برای شبیه‌سازی سه بعدی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا ابتدا محدوده هندسی مدل در محیط نرم‌افزار Gambit ایجاد و شبکه‌بندی شد. برای شبکه‌بندی صفحات محدوده از الگوی Quad-Submap و جهت شبکه‌بندی احجام از الگوی HEX-Map استفاده شد. شکل ۲، طرح شماتیک محدوده محاسباتی در مقطع واگرا با زاویه واگرایی ۱۰ درجه را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی ورودی و خروجی به صورت فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شد (شکل ۳). در ورودی عمق آب و سرعت پشت دریچه به مدل داده شد. شرایط اولیه برای سلول‌های بالادست دریچه تا بالای مرز ورودی فشار آب، سیال آب در نظر گرفته شده است.

معادلات آشفتگی به همراه معادلات پیوستگی و مومنتوم حل می‌شوند.

روابط مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ به فرم زیر می‌باشد:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = p - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} p - C_{\varepsilon 2} \rho a) - \rho R + C_{\varepsilon 3} \rho a \nabla \cdot u + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \alpha_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) \quad (5)$$

در این روابط k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی و p تولید انرژی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$p = 2C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left[S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u \quad (6)$$

در معادله‌های فوق، ضرایب تجربی مدل $k-\varepsilon$ استاندارد

$$C_{\varepsilon 2} = 1.68, C_{\varepsilon 1} = 1.44, R=0, \alpha_k = 0.77, C_{\mu} = 0.09$$

می‌باشند. همچنین ترم R اضافه شده به معادله ε در مدل RNG که باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد می‌باشد طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$R = \frac{C_{\mu} \rho \eta^2 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^2} \quad (7)$$

همچنین داریم:

$$C_{\eta} = \frac{\eta (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^2} \quad (8)$$

$$C_{\varepsilon 3RNG} = \frac{-1 + 2C_{\varepsilon 2} - 3m_{\varepsilon} (n_{\varepsilon} - 1) + (-1)^{\beta} \sqrt{\beta} C_{\eta} C_{\mu} \eta}{3} \quad (9)$$

ضرایب ضرایب تجربی در مدل $k-\varepsilon$ RNG به ترتیب

$$C_{\varepsilon 2} = 1.68, C_{\varepsilon 1} = 1.42, \alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39, C_{\mu} = 0.084$$

$$\eta_0 = 4.38, \beta = 0.012 \text{ و } \eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \text{ می‌باشند.}$$

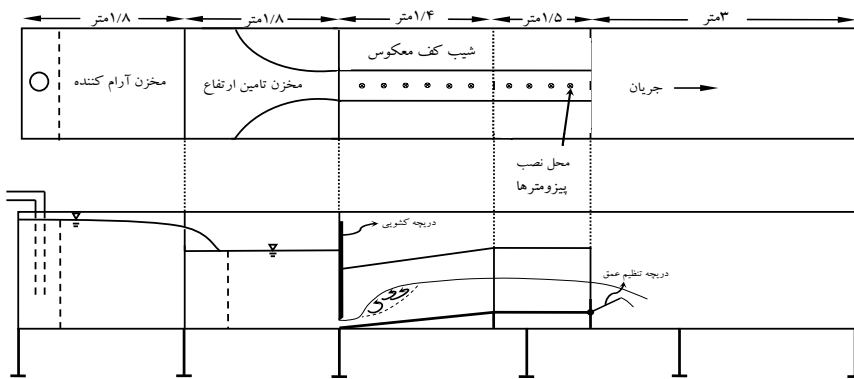
روش جزء حجم سیال (VOF)

برای برای برآورد موقعیت سطح آزاد آب در پرش هیدرولیکی از روش VOF استفاده گردید. در روش مذکور تابع $F(X,Y,Z)$ برای تعیین پروفیل سطح آب تعریف می‌شود که مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر می‌باشد.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

در حل معادله فوق در سلولی که پر از سیال می‌باشد مقدار F برابر ۱ می‌باشد ولی در سلول خالی از سیال برابر صفر است. در سلول سطحی این مقدار بین صفر و یک است. معادله جزء حجم سیال با روش‌های مختلف از جمله الگوی دهنده و گیرنده^۱، الگوی بازسازی هندسی^۲، الگوی صریح اولر^۳ و الگوی ضمنی^۴ می‌باشد که در تحقیق

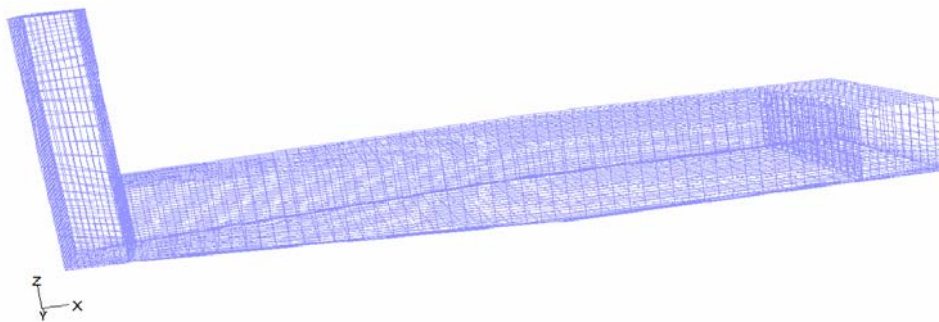
- 1- Donor-Acceptor Scheme
- 2- Geometric Reconstruction Scheme
- 3- Euler Explicit Scheme
- 4- Implicit Scheme



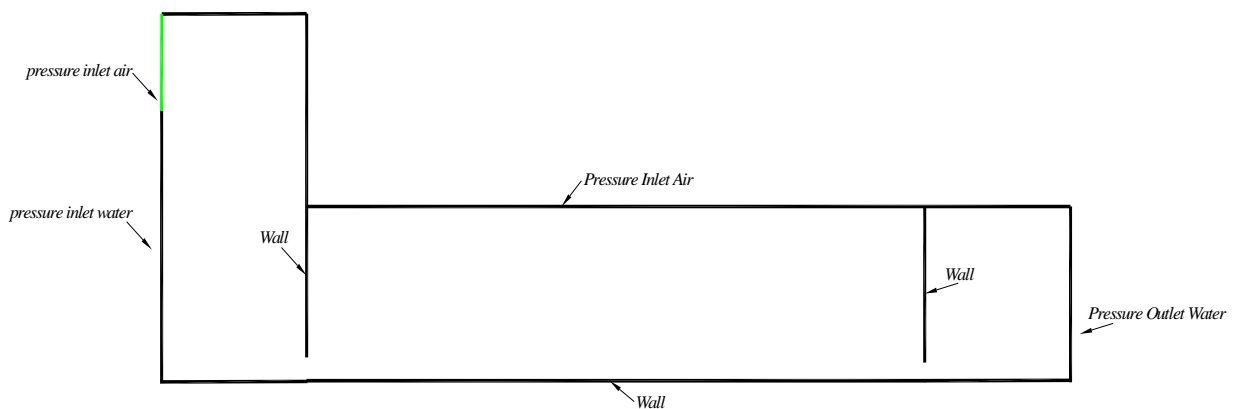
شکل ۱- طرح کلی مدل آزمایشگاهی

جدول ۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی برای صحت‌سنجی مدل عددی

شماره مدل	عدد فرود اولیه پرش	زاویه واگرایی (درجه)	دبی (لیتر بر ثانیه)	عمق آب پشت دریچه (متر)	بازشدگی دریچه ورودی (متر)	عمق اولیه پرش (متر)	عمق ثانویه پرش (متر)	طول پرش (متر)	عرض کانال در ابتدای واگرایی (متر)	عرض کانال در انتهای واگرایی (متر)
۱	۷/۹۶	۱۰	۱۸/۲۵	۰/۶۵	۰/۰۳	۰/۰۱۸	۰/۱۲۳	۱	۰/۳۰۳	۰/۸
۲	۷/۰۷	۵	۱۵/۲۳	۰/۴۵	۰/۰۳	۰/۰۱۸	۰/۱۳۲	۰/۹	۰/۲۸۵	۰/۴۶۰



شکل ۲- محدوده هندسی شبکه‌بندی شده کانال مستطیلی با زاویه واگرایی ۱۰ درجه



شکل ۳- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی

برای تحلیل جریان از مدل چند فازي VOF و با فعال کردن گزینه جریان در کانال‌های روباز استفاده شده است. الگوریتم PISO

شده در مدل فیزیکی نشان داده شده است. همچنین میانگین خطای نسبی و جذر میانگین مربعات خطای مقادیر سطح آب بدست آمده از مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج کسب شده، مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد نتایج بهتری نسبت به مدل آشفتگی $k - \epsilon$ RNG نشان داده است. خطای ایجاد شده توسط مدل، بیشتر در منطقه یک سوم ابتدایی و میانی که دارای حداکثر سرعت و تلاطم می‌باشد نمود پیدا کرده است. نمای سطح آب پرش در مدل‌ها در دیواره سمت راست بالا می‌آید و نیمرخ پرش نیز نامتقارن‌تر می‌شود که به علت تشکیل گرداب‌ها در سمت دیواره راست و در اثر واگرایی دیواره می‌باشد. شدت رخداد این پدیده با افزایش زاویه واگرایی بیشتر می‌شود.

بررسی قابلیت مدل عددی در شبیه‌سازی پروفیل سرعت

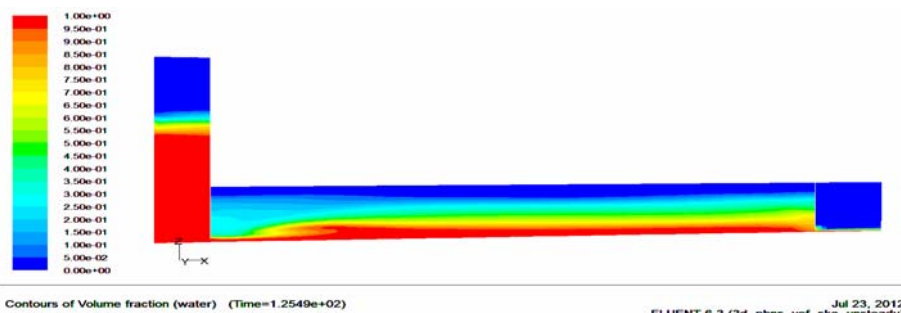
در شکل‌های ۷ و ۸ پروفیل‌های سرعت بدست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های تجربی در مدل‌ها نمایش داده شده است. خطای نسبی متوسط مقادیر سرعت بدست آمده از مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده و در جدول ۳ ارائه گردید.

برای کوپل سرعت و فشار، روش Body Force Weighted گسسته‌سازی معادله فشار، طرح QUICK برای انفصال جابجایی معادلات مومنتوم، طرح Upwind مرتبه دوم برای انفصال جملات جابجایی معادلات آشفتگی منظور شده است. شیوه حل نیز روش با محوریت فشار^۱ منظور شده است. گام زمانی در نظر گرفته شده برای حل معادلات $0.001/0$ بود. روش حل دائمی و ملاک همگرایی برای هر متغیر بر اساس مقدار باقیمانده خطای نسبی برابر $0.001/0$ انتخاب شده است. با شبیه‌سازی، مشخصات پرش شامل پروفیل سطح آب، طول پرش، پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش تعیین گردید و با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شد.

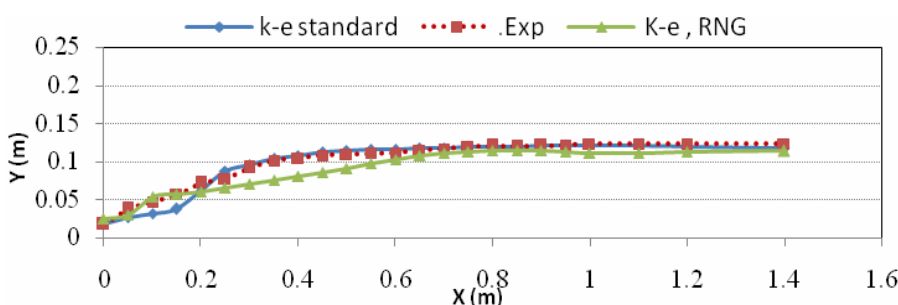
نتایج و بحث

بررسی قابلیت مدل عددی در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب

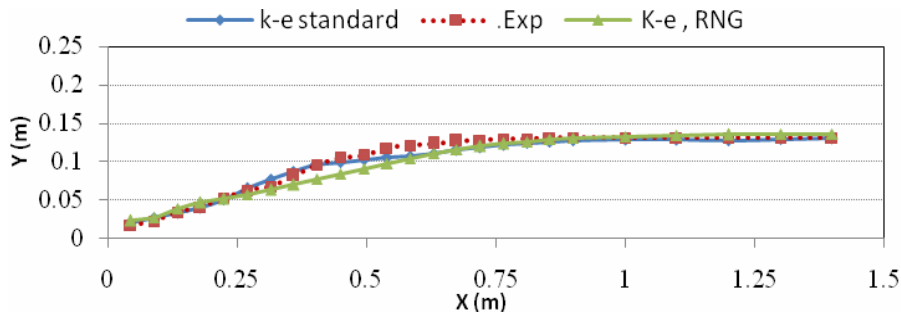
در شکل ۴ پروفیل شبیه‌سازی شده سطح آزاد پرش در مدل ۱ با استفاده از مدل‌های آشفتگی نمایش داده شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ پروفیل‌های سطح آزاد پرش هیدرولیکی بدست آمده از مدل‌های آشفتگی با روش جزء حجم سیال VOF به همراه مقادیر اندازه‌گیری



شکل ۴- شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی در مدل ۱ با استفاده از مدل $k - \epsilon$ استاندارد



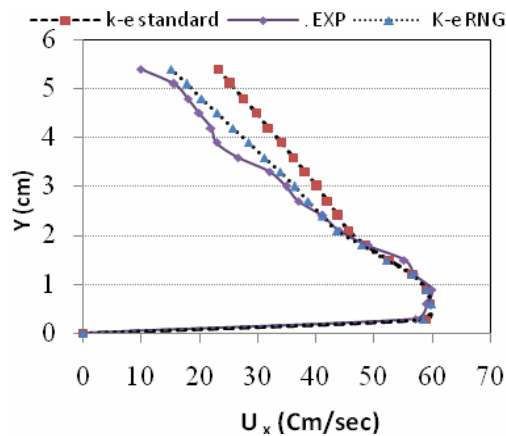
شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های سطح آب بدست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های تجربی مدل ۱



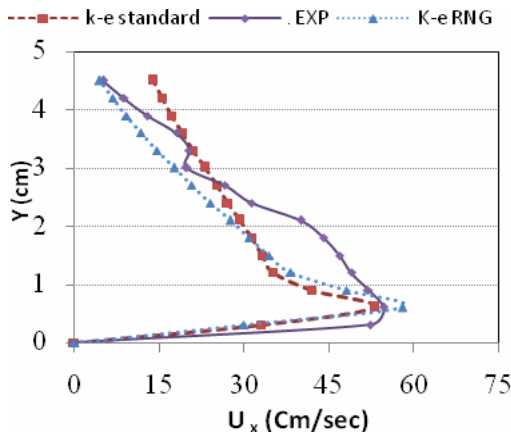
شکل ۶- مقایسه پروفیل‌های سطح آب بدست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های تجربی مدل ۲

جدول ۲- خطای مدل‌های آشفتگی جهت شبیه‌سازی پروفیل‌های سطح آب در مدل‌ها

مدل آشفتگی		شماره مدل پارامتر آماری
مدل k-e استاندارد	مدل k-e RNG	
۱۲/۳	۷/۰	RAE %
-۰/۰۱۲۶	-۰/۰۰۶۸	RMSE (m)
۹/۷	۶/۲	RAE %
-۰/۰۱۰۱	-۰/۰۰۶۷	RMSE (m)



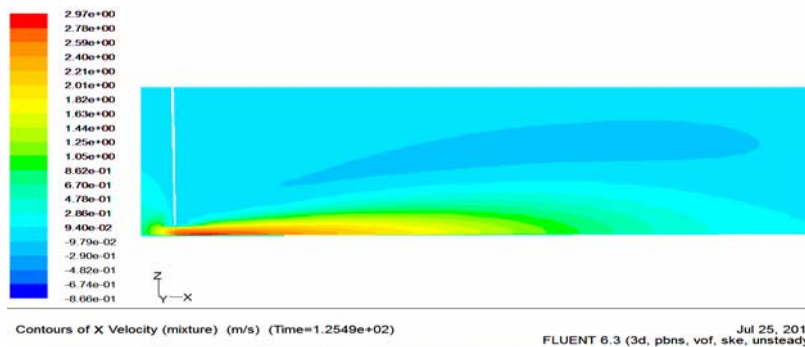
شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت طولی بدست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۶۳ سانتی متری از ابتدای پرش مدل ۱



شکل ۸- مقایسه پروفیل سرعت طولی بدست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۵۳ سانتی متری از ابتدای پرش مدل ۲

جدول ۳- خطای مدل‌های آشفتگی جهت شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت در مدل‌ها

شماره مدل	مدل آشفتگی		پارامتر آماری
	مدل k-e استاندارد	مدل RNG k-e	
۱	۲۶/۳	۹/۶	RAE %
	۶/۸	۲/۶	RMSE (cm/sec)
۲	۳۱/۳	۲۱/۹	RAE %
	۹/۰	۹/۱	RMSE (cm/sec)



شکل ۹- شبیه‌سازی سه بعدی میدان‌های سرعت در مدل ۱ با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد

مقایسه نتایج صحت‌سنجی مدل‌های آشفتگی در

شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا

نتایج حاصل از صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل $k-\epsilon$ استاندارد مقادیر پروفیل‌های سطح آب، طول پرش و مقادیر حداکثر سرعت در مقاطع مورد نظر پرش را با دقت بهتری نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG شبیه‌سازی نموده است. و همچنین از آنجایی که مدل $k-\epsilon$ استاندارد مزیت حوضچه‌های واگرا را در کاهش طول پرش نسبت به حوضچه‌های مستقیم بهتر نشان می‌دهد و طول پرش در این حوضچه‌ها را با خطای بسیار کمتری برآورد می‌نماید، لذا در چنین مقطعی استفاده از این مدل توصیه می‌گردد.

استفاده از قابلیت مدل در شبیه‌سازی سه‌بعدی سرعت‌ها

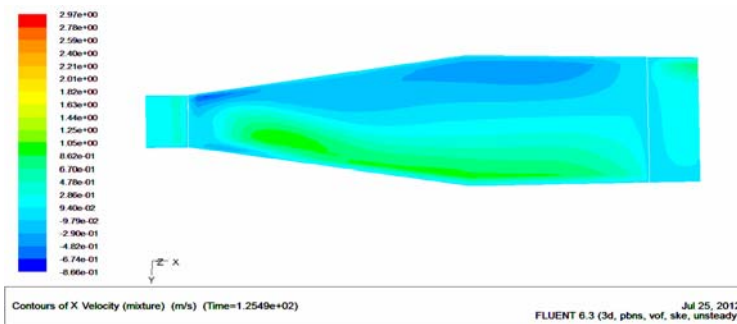
در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ کانتورهای سرعت افقی در مدل‌ها در صفحه‌ای موازی کف و نزدیک سطح آب نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، حداکثر سرعت‌های طولی و عرضی در مدل‌ها در دیواره سمت راست متمرکز می‌باشند و در دیواره سمت چپ سرعت‌های منفی و جریان برگشتی آب مشاهده می‌گردد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در حوضچه‌های آرامش مستطیلی واگرا پرش تمایل به ایجاد جریان دوپایا^۱ دارد. این مسئله تا حدودی توسط خلیفه مک کورکودال (۱۳) مطالعه شده است.

با توجه به نتایج، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG، پروفیل‌های سرعت را نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد بهتر شبیه‌سازی نموده است. خطای ایجاد شده توسط مدل، بیشتر در خط برگشت پروفیل سرعت و نزدیک سطح آب نمود پیدا کرده است. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که مدل $k-\epsilon$ استاندارد مقادیر حداکثر سرعت در مقاطع پرش را نسبت به مدل $k-\epsilon$ RNG بهتر برآورده نموده است. مقدار میانگین خطای نسبی مقادیر حداکثر سرعت بدست آمده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG در مدل‌ها به ترتیب برابر ۱/۹ و ۳/۲ درصد محاسبه شده است.

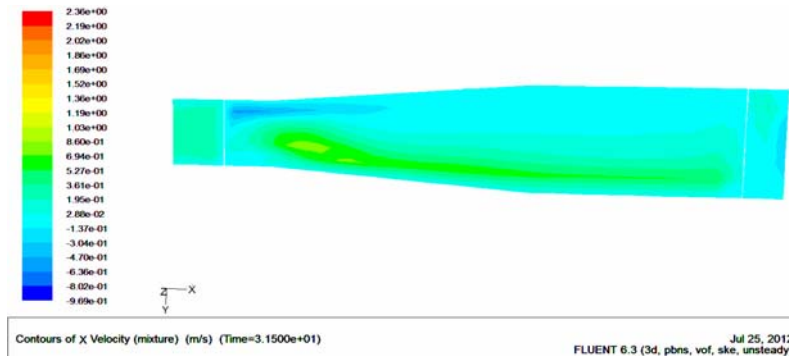
میدان‌های سرعت شبیه‌سازی شده در امتداد جریان برای مدل ۱، در شکل ۹ نشان داده شده است. حداکثر سرعت در ابتدا و در ناحیه چرخشی پرش رخ می‌دهد و به سمت پایین دست پرش گرادیان‌های سرعت بتدریج کاهش می‌یابد. در نزدیکی سطح آب سرعت‌های منفی دیده می‌شود.

بررسی قابلیت مدل عددی در شبیه‌سازی طول پرش هیدرولیکی

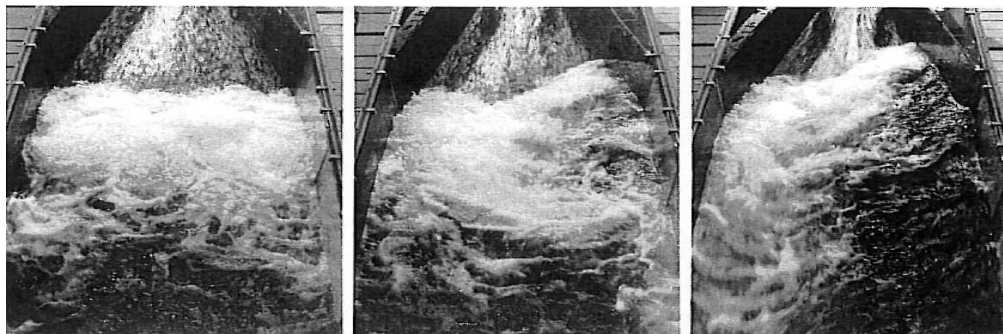
با توجه به نتایج، طول پرش بدست آمده از مدل $k-\epsilon$ استاندارد نسبت به مدل $k-\epsilon$ RNG مطابقت بیشتری با نتایج تجربی دارد. متوسط خطای نسبی این پارامتر در مدل‌های $k-\epsilon$ استاندارد و RNG برای مدل‌ها به ترتیب حدوداً برابر ۵ و ۳۵ درصد بدست آمده است.



شکل ۱۰- شبیه‌سازی میدان‌های سرعت در جهت جریان در صفحه‌ای موازی کف و نزدیک سطح آب در مدل ۱



شکل ۱۱- شبیه‌سازی میدان‌های سرعت در جهت جریان در صفحه‌ای موازی کف و نزدیک سطح آب در مدل ۲

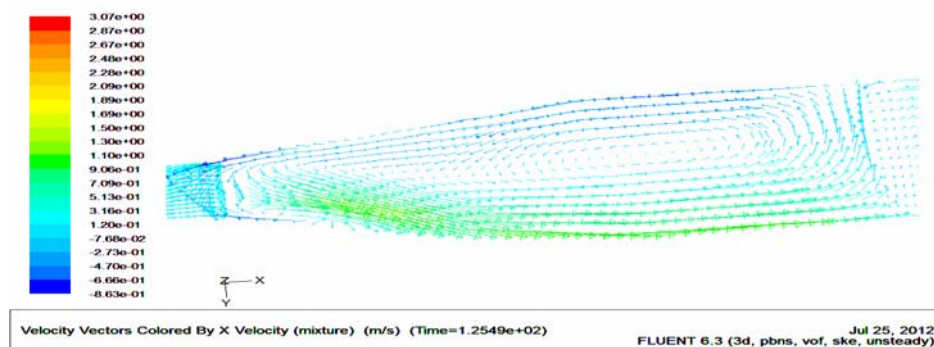


شکل ۱۲- ایجاد و تشدید پدیده جریان دوپایا با افزایش زاویه واگرایی در عدد فرود ثابت (۱۰)

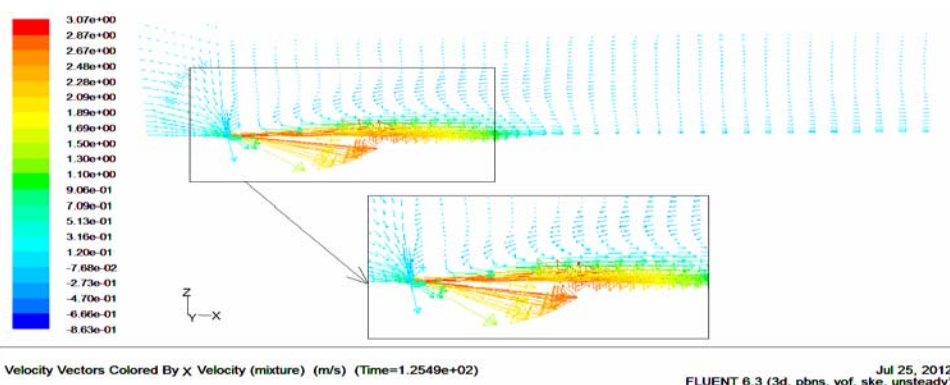
افزوده می‌شود. همچنین با افزایش عدد فرود و به تبع آن افزایش سرعت جریان تبادل مومنتموم بین سرعت در راستای جریان و گردابه‌ها بیشتر می‌شود و شدت رخداد این پدیده افزایش می‌یابد. این پدیده در مقاطع دوزنقه‌ای واگرا بسیار مشهودتر می‌باشد، به طوریکه با افزایش زاویه واگرایی و کاهش شیب جانبی بر شدت تلاطم و سرعت گرداب ایجاد شده در داخل حوضچه افزوده می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در اعداد فرود بالا این گرداب‌ها در یک سمت دیواره تشکیل شده و به سمت دیگر کشیده می‌شود ولی در اعداد فرود پایین‌تر این گرداب‌ها در دو طرف دیواره‌های واگرا ایجاد می‌شود و با افزایش واگرایی نیز شدت رخداد این پدیده بیشتر می‌گردد (۱).

در این حالت جریان از یک دیواره جدا شده و به دیواره دیگر برخورد می‌کند. در نتیجه پرشی نامتقارن به همراه یک ناحیه ساکن^۱ یا گردابه جانبی^۲ در طرف جداشدگی و یک جت قوی در سمت دیگر شکل می‌گیرد. این جت دوپایا تمایل به گسترش به سمت کانال پایین‌دست دارد و گاهی موجب فرسایش شدید کناره کانال می‌شود. در شکل ۱۲ نمونه‌ای از این پدیده را برای عدد فرود ۵/۰۲ و عمق اولیه ۵ سانتی‌متر در زوایای واگرایی مختلف نشان داده شده است. مشاهدات نشان داده است که با افزایش زاویه واگرایی به تدریج این پدیده ظاهر می‌شود و با افزایش بیشتر زاویه واگرایی بر شدت آن

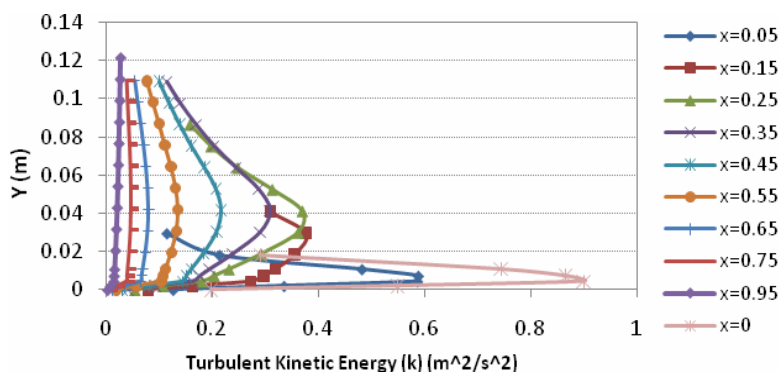
- 1- Dead zone
- 2- Side eddy



شکل ۱۳- نمایش بردارهای سرعت در صفحه‌ای موازی کف در نزدیکی سطح آب و نمایش نحوه تشکیل گرداب‌ها در نزدیکی دیواره‌ها در مدل ۱



شکل ۱۴- نمایش بردارهای سرعت در امتداد جریان و نمایش گرداب‌ها و حرکت چرخشی آب در محل وقوع پرش هیدرولیکی در مدل ۱



شکل ۱۵- توزیع انرژی جنبشی جریان در مقاطع مختلف پرش در مدل ۱

گرداب‌ها در سمت دیواره راست تشکیل شده‌اند. جهت بردارهای سرعت در دو طرف دیواره نشان‌دهنده نحوه تشکیل این نوع گرداب‌ها در این مدل‌ها می‌باشد (شکل ۱۳). لذا از این مدل می‌توان برای بررسی نحوه تشکیل گرداب‌ها در مرحله طراحی حوضچه‌های واگرا استفاده نمود.

همچنین مدل قادر به پیش‌بینی نتایج خواهد بود که در بررسی آزمایشگاهی اندازه‌گیری صورت نگرفته است. شکل ۱۵ نیمرخ‌های برداشت شده انرژی جنبشی تلاطم در خط مرکزی کانال در مدل ۱ را

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ بردارهای سرعت در امتداد پرش در مدل ۱ از جهات مختلف نشان داده شده است. اندازه و رنگ این بردارها نشان‌دهنده مقدار سرعت طولی در امتداد پرش می‌باشد.

با بررسی بردارهای سرعت در مدل‌های شبیه‌سازی شده، جریان‌های چرخشی در محل تشکیل پرش (شکل ۱۴) مشاهده گردید. همچنین مدل قادر است گرداب‌های ایجاد شده در نتیجه واگرایی دیواره‌ها را که در مدل آزمایشگاهی مشاهده شده است شبیه‌سازی نماید. در مدل‌ها اعداد فرود برابر $7/96$ ، $7/07$ می‌باشند و

واگرا را در کاهش طول پرش نسبت به حوضچه‌های مستقیم بهتر نشان می‌دهد و طول پرش برآورد شده با این مدل به مقدار واقعی بسیار نزدیکتر است لذا در چنین مقاطعی استفاده از این مدل جهت شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی توصیه می‌گردد. مقایسه‌ها نشان داد که مدل عددی قادر است پروفیل سطح آب را با خطای نسبی ۷ درصد شبیه‌سازی نماید. طول پرش در مدل‌ها نیز با خطای نسبی نزدیک به ۵ درصد شبیه‌سازی گردید. ارزیابی‌های بعمل آمده حاکی از آن است که مطابقت خوبی بین پروفیل‌های شبیه‌سازی شده سرعت با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد. مدل شبیه‌سازی گرداب‌های ایجاد شده در نتیجه واگرایی دیواره‌ها و همچنین جریان چرخشی در محل وقوع پرش را به خوبی نمایش داده است و در مقایسه با نتایج برمن و هاگر (۱۰) نیز مطابقت خوبی داشته است. با توجه به نتایج صحت‌سنجی، می‌توان از مدل عددی FLUENT در تحلیل جریان درون حوضچه‌های آرامش واگرا که دارای کارایی مناسب‌تری نسبت به حوضچه‌های استاندارد می‌باشند، در مرحله طراحی استفاده نمود.

نمایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با فاصله گرفتن از پرش، پروفیل‌ها یکنواخت‌تر شده و در انتهای پرش مقادیر انرژی جنبشی حداکثر به مقدار ثابت $0/03$ متر مربع بر مجذور ثانیه میل می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG و روش VOF جهت بدست آوردن سطح آب بررسی شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. بررسی‌های انجام شده نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد در مقایسه با روش $k-\epsilon$ و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا مناسبتر می‌باشد. از آنجایی که مدل $k-\epsilon$ استاندارد پارامترهای پرش را بهتر و با خطای کمتری نسبت به مدل $k-\epsilon$ و همچنین مزیت حوضچه‌های

منابع

- ۱- اسمعیلی ورکی م. ۱۳۸۲. مطالعه خصوصیات جهش هیدرولیکی واگرا در حوضچه آرامش دوزنقه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در گرایش سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
- ۲- بختیاری م. و کاشفی پور م. ۱۳۸۷. بررسی خصوصیات هیدرولیکی پارامترهای پرش در مقاطع واگرا. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت، دانشگاه تهران.
- ۳- شجاعیان ز، حسین زاده دلیر ع، فرسادی‌زاده د. و سلماسی ف. ۱۳۹۰. بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس. نشریه دانش آب و خاک دانشگاه تبریز، (۳): ۵۰-۶۰.
- ۴- صاحبی ف، اسمعیلی ورکی م، نوابیان م. و امیری ز. ۱۳۹۱. ارزیابی اقتصادی تأثیر واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش بر تغییر هزینه‌های ساخت آن. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه، دانشگاه ارومیه.
- ۵- فرومند ع. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی روی بستر موج با مدل عددی FLUENT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۶- کاسی ا. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات جهش هیدرولیکی واگرا در حوضچه آرامش با شیب کف معکوس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در گرایش سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
- ۷- کریمی ر، اقبال زاده ا. و جوان م. ۱۳۸۹. مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف جهت شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریچه. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۸ تا ۲۰ آبان، دانشگاه تربیت مدرس.
- 8- Abbaspour A., Farsadizadeh D., Hosseinzadeh Delir A., and Sadraddini A. 2009. Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models. Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, TUBITAC, 33: 61-72.
- 9- Arabhabhrama A., and Abela A. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 97(1): 31-42.
- 10- Bremen R., and Hager W.H. 1990. Ressauts Hydrauliques dans les canaux avec elargissement. Proc. Of XXII Convengo di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Cosenza, Italy, Vol. 1: 171-182 (in Italian).
- 11- Gonzalez A., and Bombardelli F. 2005. Two- Phase Flow Theory and Numerical Models for Hydraulic Jumps, Including Air Entrainment. University of California, USA.
- 12- Khelifa A.M., and McCorquodale A.M. 1979. Radial hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 105(9): 1065-1078.

- 13- Khlifa A.M., and McCorquodale A.M. 1980. Submerged radial hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 106(HY3): 355-367.
- 14- Liu M., Rajaratnam N., and Zhu D. 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude number, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 130 (6): 512-520.
- 15- Omid M.H., Esmaili Varaki M., and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, (4): 512-518.
- 16- Romangnoli M., Portapila M., and Morvan Y.H. 2009. Simulacion Computacional Del Resalto Hidraulico. *Mecanica Computacional VOL XXVII*: 1661-1672. (in Spain)
- 17- Sarker M.A., and Rhodes D.G. 2002. Physical Modeling and CFD Applied to Hydraulic Jumps. Cranfield University Report.
- 18- Zhao Q., and Misra S.K. 2004. Numerical study of a turbulent hydraulic jump. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Delaware, New York, DE.

A Comparison of using $k - \epsilon$ Turbulence Models in Simulating Hydraulic Jump in Diverging Rectangular Sections with Fluent Software

F. Sahebi Vayghan^{1*} - D. Farsadizadeh² - M. Esmacili Varaki³ - A. Abbaspour⁴ -
A. Hosseinzadeh Delir⁵

Received: 27-11-2012

Accepted: 24-02-2013

Abstract

Stilling basins are one of the most common structures for energy dissipation of flow with high velocity and among different sections and types of these basins, diverging basins have better performance and lower constructional costs. In this research, the feasibility of 3D numerical simulation of diverging hydraulic jump in rectangular basins was investigated using standard $k - \epsilon$ and RNG $k - \epsilon$ turbulence models using Fluent software. The free surface was determined using the VOF method. The outputs of numerical model in comparison with the results of physical model of hydraulic jump in diverging rectangular basins with diverging angles of 5° and 10° showed that the standard $k - \epsilon$ turbulence model evaluated the free surface of water, jump length and maximum velocity in defined sections better than RNG $k - \epsilon$ turbulence model. This model shows that the efficiency of diverging basins in decreasing length of jump is more better than the classic basins. So this model is recommended for simulating hydraulic jump in diverging sections. Results showed that the mean relative error of water surface obtained from numerical model and measured values is about 7 percent. Modeled Velocity profiles were in good agreement with measured data. Also the numerical model showed the vortices that were accrued because of diverging walls as well as experiment investigations. These vortices accrued near the right side of diverging wall in high Froude numbers and in lower values of Froude numbers, accrued in both two sides of walls. The intensity of vortices was increased by increasing the angle of diverging walls.

Keywords: Diverging Hydraulic jump, $k - \epsilon$ Turbulence models, Volume of fluid (VOF) model, Fluent, Vortex

1,2,4,5- Msc Student of Water Structures, Associate Professor, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Respectively

(* - Corresponding Author Email: sahebi.farzaneh@yahoo.com)

3- Assistant Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Guilan