

بررسی پارامترهای آشفتگی در پرش هیدرولیکی با مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از مدل Fluent

محمد رضا نیک پور

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی. m_nikpour@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۴

چکیده

حوضچه‌های آرامش با مقطع واگرا دارای عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تر و هزینه ساخت کمتر نسبت به حوضچه‌های کلاسیک می‌باشند. در تحقیق حاضر با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی و به‌ازای هفت عدد فرود مختلف در محدوده ۹/۱-۳/۲، سه مدل از حوضچه‌های مذکور با هندسه‌های مختلف از نظر زاویه واگرایی و نوع دیواره، در حالت سه بعدی مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. برای تحلیل آشفتگی از مدل‌های $k-\epsilon$ RNG و RSM و برای سطح آزاد جریان از مدل حجم سیال (VOF) در محیط نرم‌افزار Fluent استفاده شد. دقت مدل‌های آشفتگی مذکور در شبیه‌سازی سطح آزاد پرش مشابه یکدیگر و میانگین خطای محاسباتی آنها به ترتیب ۷/۴ و ۵/۷ درصد حاصل شد. اما در شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت مدل RSM عملکرد بهتری را به همراه داشت، به طوری که میانگین خطای محاسباتی مدل‌های $k-\epsilon$ RNG و RSM به ترتیب ۱۶/۲ و ۷/۷ درصد به دست آمد. بر اساس نتایج مدل عددی وقوع جریان دوپایا در مقاطع واگرا به خوبی قابل مشاهده بود. همچنین با استفاده از مدل RSM توزیع قائم شدت آشفتگی، تنش‌های رینولدز و انرژی جنبشی اغتشاش در مقاطع مختلف پرش مورد بررسی قرار گرفت.

کلید واژه‌ها: پرش هیدرولیکی، جریان دوپایا، حوضچه آرامش، مدل آشفتگی، مقطع واگرا.

مقدمه

(Bakhtiari et al., 2014); (Varaki, 2005) در رابطه با تأثیر توأم شیب جانبی و واگرایی دیواره‌ها بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان داد با کاهش شیب جانبی دیواره‌های حوضچه آرامش، افت نسبی انرژی و طول پرش هیدرولیکی افزایش و نسبت اعماق مزدوج کاهش می‌یابد. ضمناً به‌ازای شیب جانبی یکسان، افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. Sahebi et al. (2012) نشان دادند که استفاده از دیواره‌های واگرا در حوضچه‌های آرامش علاوه بر افزایش راندمان پرش نسبت به پرش کلاسیک، موجب صرفه جویی اقتصادی در هزینه‌های احداث حوضچه آرامش می‌شود. Sahebi (2013) برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG در محیط Fluent استفاده کرد. مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی به‌ازای دو زاویه واگرایی نشان داد که مدل $k-\epsilon$ استاندارد از دقت بالاتری در شبیه‌سازی مقادیر عمق و سرعت پرش برخوردار می‌باشد. بر اساس بررسی منابع صورت گرفته در خصوص شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا، مدل تنش رینولدز (RSM) مورد استفاده قرار نگرفته است و از آنجایی که پدیده پرش هیدرولیکی با نوسانات سرعت و تغییرات شدید تنش‌های رینولدز همراه می‌باشد، در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی پدیده مذکور در حوضچه‌های آرامش مستطیلی با مقاطع واگرا علاوه بر مدل $k-\epsilon$ RNG از مدل RSM نیز استفاده شد. همچنین با استفاده از نتایج مدل RSM به تحلیل پارامترهای آشفتگی پرش هیدرولیکی شامل تنش‌های

پرش هیدرولیکی یکی از مهمترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع می‌باشد که در نتیجه تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی در جریان‌های با سطح آزاد ایجاد می‌شود و با پدید آمدن آن عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. ایجاد پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه‌های آرامش یکی از اساسی‌ترین روش‌های کنترل پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد. عملکرد بهینه و موثر حوضچه آرامش کلاسیک نیازمند عمق آب مناسب در پایین‌دست آن می‌باشد اگر به هر دلیلی نتوان عمق پایاب مناسب برای تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش را تأمین کرد واگرایی تدریجی یا ناگهانی در مقطع جریان می‌تواند یک راه حل مناسب برای کاهش عمق مورد نیاز برای وقوع پرش باشد که در حین حال باعث کاهش هزینه احداث حوضچه آرامش می‌گردد (Bremen and Hager, 1993). مطالعات آزمایشگاهی (Arabhabhirama and Abela, 1971); (Khalifa and McCorquodale, 1979); (Mosavi Khandan et al., 2001); (Esmaeeli Varaki, 2003); (Bakhtiari and Kashefipour, 2008); (Shojaeian et al., 2011); (Kasi et al., 2011) نشان داد که واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش و همچنین افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با پرش تشکیل یافته در حوضچه‌های آرامش کلاسیک می‌شود. همچنین تحقیقات انجام گرفته توسط (Posey and Hsing, 1938) (Omid et al., 2007); (Omid and Esmaeeli

نیک پور: بررسی پارامترهای آشفتگی در پرش هیدرولیکی با...

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

در روابط فوق، G_k و G_b چشمه‌های معادله k بوده که به ترتیب اثر گرادیان سرعت متوسط و اثر شناوری را در معادله اعمال می‌کند. پارامتر Y_M نیز معرف توزیع نوسانات تلاطم در جریان‌های تراکم پذیر می‌باشد. پارامترهای $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ ضرایب ثابت و σ_k و σ_ε اعداد پراوتل آشفتگی برای k و ε می‌باشند. در مدل RNG k - ε رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه اعداد پراوتل آشفتگی وجود دارد در حالی که در مدل k - ε استاندارد از مقادیر تعریف شده توسط کاربر استفاده می‌شود. همچنین مدل k - ε به واسطه داشتن ترم اضافی در معادله ε ، جریان‌های همراه با کرنش‌های بزرگ و سریع را نسبت به مدل k - ε استاندارد بهتر مدل می‌کند. در مدل آشفتگی RSM از فرضیه بوزینسک استفاده نمی‌شود. در مدل RSM سه بعدی نسبت به مدل k - ε ، پنج معادله انتقال اضافی جهت تحلیل تنش‌های رینولدز حل می‌گردد (Anonymous, 2006). شکل تانسوری معادلات انتقال در مدل RSM مطابق رابطه (۸) می‌باشد (Sahebi, 2013).

$$\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} = P_{ij} + \varphi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

در معادله فوق P_{ij} تانسور تولید، φ_{ij} تانسور فشار-کرنش، D_{ij} تانسور پخش شدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف است. در تحقیق حاضر برای تحلیل آشفتگی جریان از مدل‌های k - ε RNG و RSM و برای شبیه‌سازی سطح آزاد پرش از مدل حجم سیال استفاده شد. در مدل حجم سیال برای برآورد سطح آزاد جریان دو فاز آب و هوا از روش تعیین پارمتر جزء حجمی F که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است، استفاده می‌شود. مقدار F با حل معادله پیوستگی برای جزء حجم سیال (رابطه ۹) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

با حل رابطه (۸)، در صورتی که سلول پر از سیال باشد مقدار F برابر یک و برای سلول خالی از سیال برابر صفر به دست می‌آید. در تحقیق حاضر برای حل رابطه (۹) الگوی بازسازی هندسی که معمولاً بهترین سطح تماس را مدل می‌کند، به کار گرفته شد. همچنین برای تعیین سطح آزاد جریان، مقدار جزء حجمی برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد.

مدل آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر از داده‌های آزمایشگاهی Sadeghi (2013) استفاده شد. مطالعه آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه

رینولدز، شدت آشفتگی طولی و انرژی جنبشی اغتشاش و به کمک مدل Fluent پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم در مدل Fluent

روابط (۱) و (۲) به ترتیب معادلات پیوستگی و مومنتم ناویر-استوکس متوسط رینولدزی را نشان می‌دهد.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\rho = \alpha_A \rho_A + \alpha_W \rho_W \quad (3)$$

در روابط فوق u_i نشان‌دهنده مولفه‌های سرعت جریان، α_A و α_W به ترتیب نسبت آب و هوا، ρ_A و ρ_W به ترتیب جرم مخصوص آب و هوا می‌باشد. δ_{ij} نیز دلتای کرونکر می‌باشد که برای $i = j$ مقدار آن برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد. پارامتر $\overline{u_i' u_j'}$ را تنش رینولدز می‌نامند که اثر گرداب‌های آشفتگی در جریان سیال آشفتگی را نشان می‌دهد. یکی از روش‌های مرسوم برای حل معادلات متوسط گیری شده رینولدزی استفاده از فرضیه بوزینسک است که بر اساس آن و با به‌کارگیری رابطه (۴)، گرادیان‌های سرعت متوسط را جایگزین تنش‌های رینولدز می‌کند.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، μ_t لزجت گردابه‌ای بوده و مقدار آن با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

در رابطه (۵) پارامترهای k و ε به ترتیب معرف انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ استهلاک انرژی جنبشی اغتشاش می‌باشد. پارامتر C_μ ضریب ثابت و برابر ۰/۰۹ می‌باشد. مدل k - ε از جمله مدل‌های آشفتگی است که از فرضیه بوزینسک استفاده می‌کند. معادلات حاکم بر این مدل به شرح روابط (۶) و (۷) می‌باشند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (6)$$

غیرماندگار و ملاک همگرایی برای هر متغیر بر اساس مقدار باقی‌مانده خطای نسبی برابر $0/001$ انتخاب شد. لازم به ذکر است که هنگام شبیه‌سازی با استفاده از مدل RSM به منظور تسریع روند همگرایی حل معادلات، ضرایب زیرتخفیف برای فشار، مومنتم و تنش‌های رینولدز کوچک‌تر از یک منظور شد.

مشخصات میدان حل و شرایط مرزی

قبل از ورود به محیط Fluent هندسه مدل در محیط AutoCAD ترسیم و توسط نرم‌افزار Gambit شبکه‌بندی شد. به‌منظور مستقل از شبکه شدن هندسه مدل طی چهار مرحله به‌ازای شرایط مرزی یکسان، شبکه مدل‌ها ریزتر و تعداد المان‌ها افزایش یافت که در نهایت با بررسی رفتار خطای شبیه‌سازی مدل عددی، به‌ترتیب 773840 ، 616080 و 680080 سلول محاسباتی برای شبکه‌بندی مدل‌های یک تا سه در نظر گرفته شد. آرایش شبکه‌ها به گونه‌ای طراحی شد که بسته به میزان حساسیت نواحی حل از المان‌ها با اندازه‌های متفاوت استفاده گردید. لازم به ذکر است برای شبکه‌بندی مدل در نزدیکی دیواره (به‌منظور به‌کارگیری تابع دیواره) از پنج ردیف مش لایه مرزی با ضریب رشد $1/2$ استفاده شد. همچنین فاصله اولین ردیف مش لایه مرزی تا کف $0/001$ متر در نظر گرفته شد. پارامترهای مذکور با کنترل γ^+ بین 30 تا 300 تعیین گردید. شکل‌های (۱) و (۲) محدوده هندسه شبکه‌بندی شده مدل‌های یک و سه را نشان می‌دهد. شرایط مرزی برای قسمت‌های ورودی و خروجی مدل به ترتیب فشار ورودی و خروجی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که برای شرط مرزی ورودی، مقادیر دبی و ارتفاع آب در مخزن به ازای هر عدد فرود مطابق با مقادیر ذکر شده در جدول (۲) در نظر گرفته شد. در قسمت خروجی مدل نیز فشار هوا در نظر گرفته شد. همچنین برای کناره‌ها و کف مدل از شرط مرزی دیواره برای بخش بالایی آن از شرط مرزی تقارن استفاده شد.

مهندسی آب دانشگاه ارومیه انجام گرفت. طی کار تحقیقاتی مذکور پرش هیدرولیکی تشکیل یافته در سه هندسه متفاوت از حوضچه‌های آرامش با مقطع واگرا مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. مشخات هندسی مدل‌های مذکور در جدول (۱) آورده شده است. پروفیل سطح آزاد پرش و مقادیر سرعت لحظه‌ای در محور میانی حوضچه به ازای هفت عدد فرود مختلف در محدوده $9/1-3/2$ اندازه‌گیری گردید. در جدول (۲) خصوصیات هیدرولیکی آزمایش‌ها آورده شده است. در جدول (۲)، Q نشان دهنده دبی ورودی به مخزن، H ارتفاع آب مخزن و Fr_1 عدد فرود متناظر با آن در کانال بالادست می‌باشد. برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آزاد از عمق سنج نقطه‌ای با دقت اندازه‌گیری $\pm 0/1$ میلی‌متر و به‌منظور اندازه‌گیری سرعت جریان از سرعت سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق مدل ACM2-RS با دقت $\pm 0/5$ سانتی‌متر در ثانیه استفاده شد اندازه‌گیری سرعت از 5 میلی‌متری بستر تا حدوداً 3 سانتی‌متر زیر سطح آب در فواصل قائم یک سانتی‌متر انجام گرفت (Sadeghi, 2013).

مدل عددی

در تحقیق حاضر به‌منظور شبیه‌سازی سه بعدی جریان از نرم‌افزار Fluent استفاده گردید. در محیط این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی حرکت سیال معادلات ناویر-استوکس در حالت کامل به همراه معادلات آشفستگی و مدل شبیه‌سازی جریان چند فازی با استفاده از روش حجم محدود، گسسته‌سازی و حل می‌شوند. در تحقیق حاضر روش Body Force Weighted برای گسسته‌سازی معادلات فشار، طرح QUICK برای انصال جملات معادلات مومنتم، طرح Upwind مرتبه دوم برای انصال جملات معادلات آشفستگی و الگوریتم PISO برای کوپل سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه‌سازی جریان در نزدیکی دیواره، تابع دیواره غیرمتعادل به‌کار گرفته شد. روش حل،

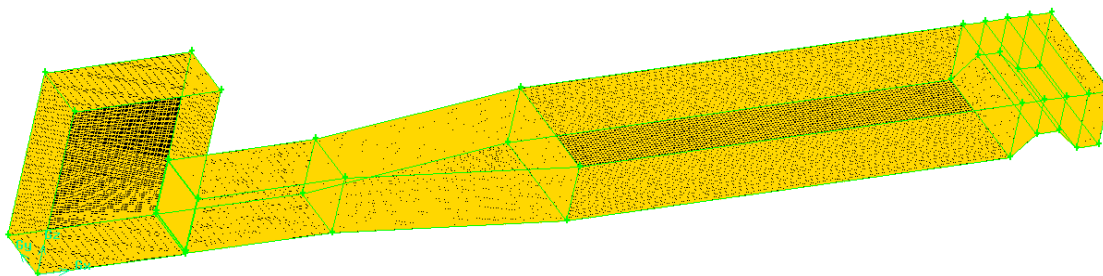
جدول ۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی (Sadeghi, 2013)

مدل	نوع دیوار حوضچه	طول دیوار حوضچه (m)	عرض کانال بالادست (m)	عرض کانال پایین دست (m)	زاویه واگرایی (درجه)
۱	مستقیم	۱/۵	۰/۴	۰/۸	۷/۷
۲	مستقیم	۰/۶	۰/۴	۰/۸	۱۹/۵
۳	انحنادار	۰/۶	۰/۴	۰/۸	۱۹/۵

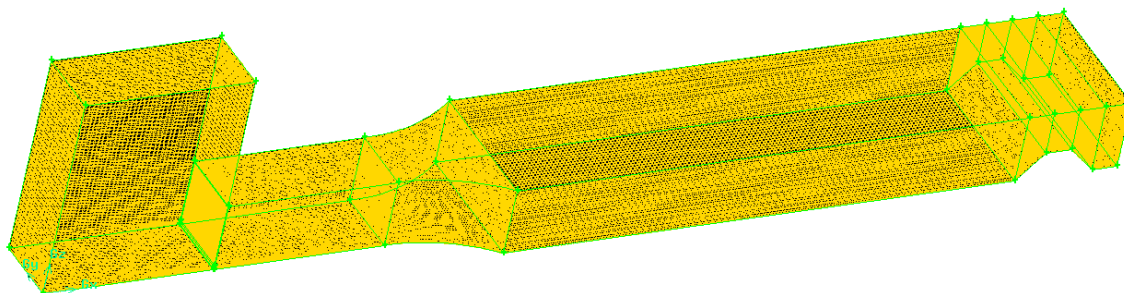
جدول ۲- خصوصیات هیدرولیکی آزمایش‌ها (Sadeghi, 2013)

Q (lit/s)	H (m)	Fr_1
۱۷/۵	۰/۶۸	۳/۲
۲۶/۳	۰/۷۹	۴/۵
۳۰/۱	۰/۸۷	۵/۱
۳۴/۲	۰/۹۵	۶/۲
۳۹/۲	۱/۰۶	۷/۴
۴۳/۴	۱/۱۲	۸/۳
۴۷/۱	۱/۱۸	۹/۱

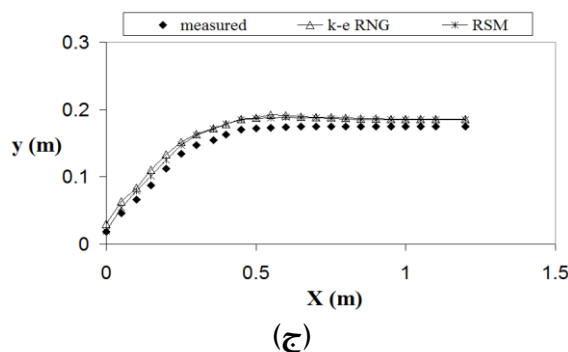
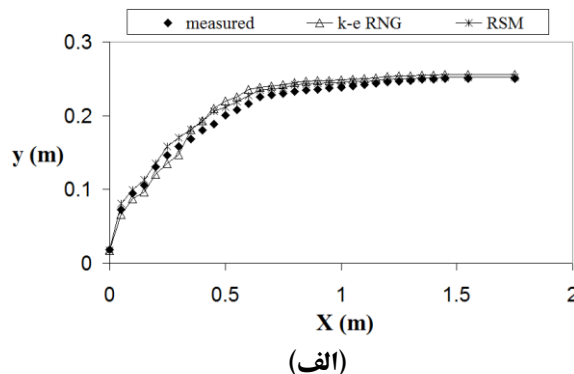
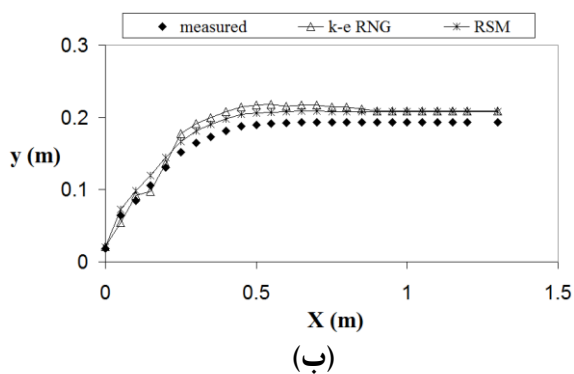
نیک پور: بررسی پارامترهای آشفتگی در پرش هیدرولیکی با...



شکل ۱- محدوده هندسه شبکه بندی شده مدل یک



شکل ۲- محدوده هندسه شبکه بندی شده مدل سه



شکل ۳- مقایسه پروفیل های سطح آزاد بدست آمده از مدل های آشفتگی با مقادیر اندازه گیری شده به ازای عدد فرود ۷/۴ (الف): مدل یک (ب): مدل دو (ج): مدل سه

سرعت پرش در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل های (۳) و (۴) پروفیل های سطح آزاد و سرعت پرش حاصل از مدل های آشفتگی k-ε RNG و RSM در مقایسه با مدل های آزمایشگاهی به عنوان نمونه به ازای عدد فرود ۷/۴ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که پروفیل های

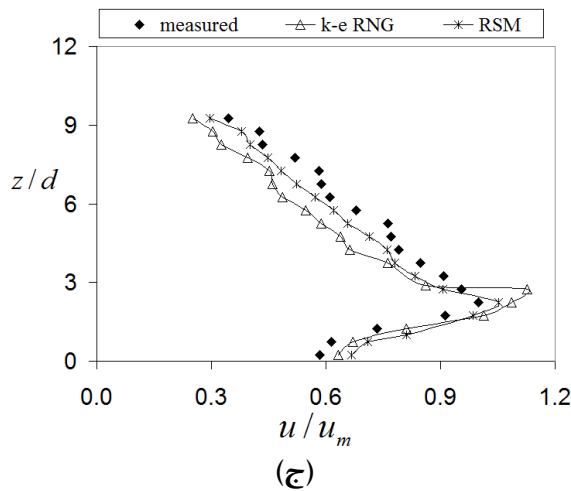
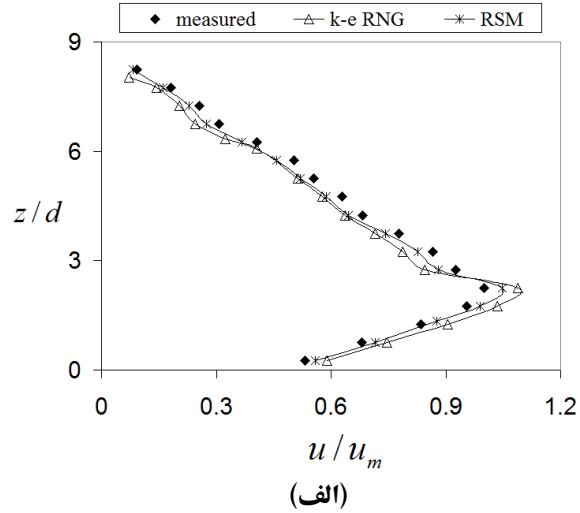
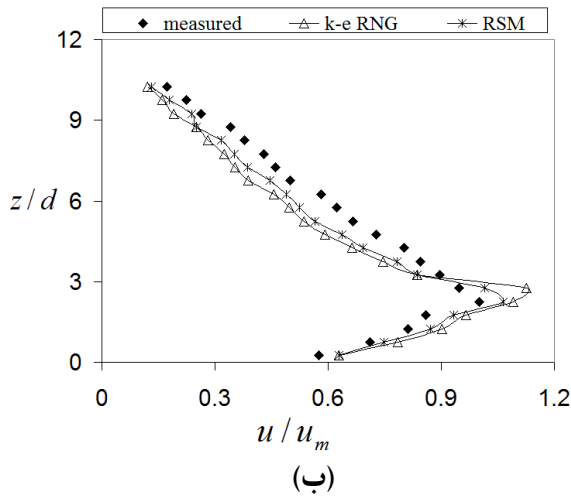
نتایج و بحث

صحت سنجی مدل عددی

پس از واسنجی مدل عددی شامل مستقل از شبکه نمودن مدل و یافتن ضرایب و الگوهای مناسب حل برای به حداقل رساندن خطای شبیه سازی، دقت مدل عددی در برآورد عمق و

راستای قائم می‌باشد. در جدول‌های (۳) و (۴) نیز میانگین خطای نسبی مدل‌های آشفتگی مذکور در محاسبه پروفیل‌های سطح آزاد و سرعت پرش به ازای کلیه اعداد فرود و در کل طول پرش گزارش شده است.

سرعت مربوط به مقادیر برداشت شده در مرکز حوضچه‌های آرامش می‌باشد. در شکل‌های (۳) و (۴) پارامترهای x, y, z, d, u و u_m به ترتیب نمایانگر فاصله طولی نسبت به ابتدای پرش، عمق جریان، فاصله قائم از کف، میزان گشودگی دریچه، میانگین سرعت لحظه‌ای در نقطه مورد نظر و مقدار بیشینه سرعت در هر



شکل ۴- مقایسه پروفیل‌های سرعت بدست آمده از مدل‌های آشفتگی با مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای عدد فرود $Fr_1 = 7/4$ و در مرکز حوضچه آرامش (الف): مدل یک (ب): مدل دو (ج): مدل سه

جدول ۳- میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح آزاد پرش توسط مدل‌های آشفتگی

k-ε RNG و RSM در مرحله صحت‌سنجی

میانگین	$Fr_1 = 9/1$	$Fr_1 = 8/3$	$Fr_1 = 7/4$	$Fr_1 = 6/2$	$Fr_1 = 5/1$	$Fr_1 = 4/5$	$Fr_1 = 3/2$		
۵/۹	۷/۳	۶/۸	۶/۳	۵/۹	۵/۵	۵/۱	۴/۶	k-ε RNG	مدل یک
۳/۸	۵/۴	۴/۹	۴/۲	۳/۸	۳/۵	۲/۷	۲/۱	RSM	
۸/۸	۱۱/۳	۱۰/۸	۹/۲	۸/۵	۷/۹	۷/۳	۶/۷	k-ε RNG	مدل دو
۷/۲	۱۰/۲	۹/۳	۷/۶	۷/۰	۶/۵	۵/۴	۴/۷	RSM	
۷/۵	۱۰/۵	۹/۵	۷/۹	۷/۵	۷/۰	۵/۶	۴/۸	k-ε RNG	مدل سه
۶/۰	۹/۱	۸/۰	۶/۴	۵/۹	۵/۱	۴/۱	۳/۲	RSM	

نیک پور: بررسی پارامترهای آشفتگی در پرش هیدرولیکی با...

جدول ۴- میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت پرش توسط مدل‌های آشفتگی

k-ε RNG و RSM در مرحله صحت‌سنجی

میانگین	Fr ₁ = ۹/۱	Fr ₁ = ۸/۳	Fr ₁ = ۷/۴	Fr ₁ = ۶/۲	Fr ₁ = ۵/۱	Fr ₁ = ۴/۵	Fr ₁ = ۳/۲		
۱۲/۱	۱۴/۱	۱۳/۳	۱۲/۷	۱۲/۰	۱۱/۴	۱۱/۰	۱۰/۲	k-ε RNG	مدل یک
۵/۹	۸/۰	۷/۱	۶/۵	۵/۶	۵/۱	۴/۶	۴/۳	RSM	
۱۹/۰	۲۱/۲	۲۰/۵	۱۹/۶	۱۸/۹	۱۸/۱	۱۷/۷	۱۶/۹	k-ε RNG	مدل دو
۸/۸	۱۱/۰	۱۰/۳	۹/۴	۸/۷	۷/۹	۷/۳	۶/۸	RSM	
۱۷/۶	۱۹/۷	۱۹/۱	۱۸/۲	۱۷/۶	۱۶/۹	۱۶/۲	۱۵/۵	k-ε RNG	مدل سه
۸/۳	۱۰/۲	۹/۴	۸/۹	۸/۳	۷/۹	۷/۱	۶/۵	RSM	

نتایج نشان می‌دهد که:

حوضچه آرامش سبب کاهش نسبی طول پرش و نسبت عمق‌های مزدوج در مقایسه با دیواره مستقیم می‌شود که در شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر نیز نتیجه مذکور حاصل شد (Sadeghi, 2013).

بررسی وقوع جریان دوپایا

مطالعات آزمایشگاهی Khalifa و McCorquodale (1979) نشان داد که پرش هیدرولیکی تشکیل یافته در حوضچه‌های آرامش مستطیلی با مقطع واگرا منجر به ایجاد جریان دوپایا می‌شود. در این حالت جریان از یک دیواره جدا شده و به دیواره دیگر برخورد می‌کند. در نتیجه پرشی نامتقارن به همراه یک ناحیه ساکن در طرف جداشدگی و یک جت قوی در سمت دیگر شکل می‌گیرد. جت دوپایا تمایل به گسترش به سمت کانال پایین‌دست دارد و گاهی موجب فرسایش شدید کناره کانال می‌شود (Sahebi, 2013). در مطالعه آزمایشگاهی مربوط به تحقیق حاضر نیز این پدیده مشاهده شد. شکل (۵) وقوع جریان دوپایا را در پرش هیدرولیکی تشکیل یافته در مدل یک به ازای عدد فرود ۷/۴ نشان می‌دهد. شکل‌های (۶) و (۷) میدان‌های سرعت طولی را در صفحه‌ای موازی بستر و نزدیک سطح آب برای مدل‌های یک و سه نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر حداکثر مولفه‌های افقی سرعت در دیواره سمت راست متمرکز می‌باشند و در دیواره سمت چپ نیز ناحیه ساکن قابل مشاهده است که نشان از شبیه‌سازی جریان دوپایا توسط مدل عددی دارد. شکل‌های (۸) و (۹) نیز بردارهای سرعت جریان در امتداد پرش را در صفحه‌ای موازی بستر و نزدیک سطح آب برای مدل دو و سه به ازای عدد فرود ۷/۴ نمایش می‌دهد. اندازه و رنگ بردارها نشان‌دهنده مقدار سرعت طولی در امتداد پرش می‌باشد. با بررسی بردارهای سرعت جریان‌های چرخشی در محل تشکیل پرش به وضوح دیده می‌شود. علاوه بر آن گرداب‌های ایجاد شده در نتیجه واگرایی دیواره‌ها نیز قابل مشاهده است. همچنین میدان‌ها و بردارهای سرعت (شکل‌های ۶ تا ۹) نشان می‌دهند که حداکثر سرعت در ابتدا و در ناحیه چرخشی پرش رخ می‌دهد و به سمت پایین‌دست پرش گرداب‌های سرعت به تدریج کاهش می‌یابد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نیز پروفیل سطح آزاد شبیه‌سازی شده مدل‌های یک و سه را توسط مدل RSM و به ازای عدد فرود ۷/۴ نمایش می‌دهد.

۱- در حالت کلی خطای مدل‌های آشفتگی در محاسبه مقادیر سرعت در مقایسه با پروفیل سطح آزاد بیشتر است، که علت آن نوسانات سرعت لحظه‌ای و تلاطم شدید جریان در هر راستای قائم محدوده پرش می‌باشد.

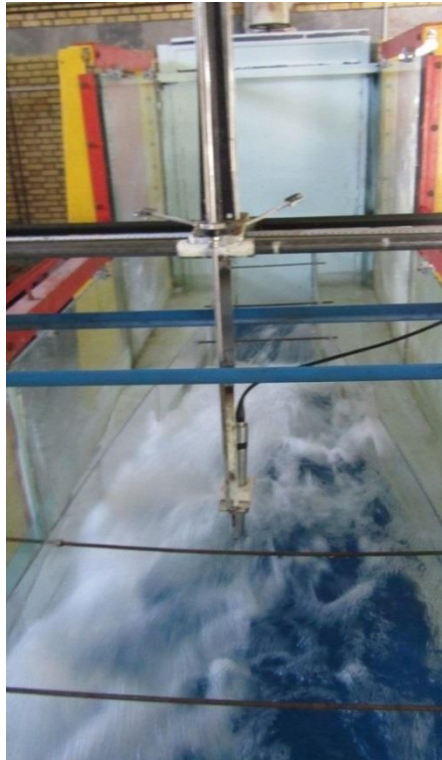
۲- ضعف مدل‌های آشفتگی در یک‌سوم ابتدایی پرش به علت اختلاط شدید آب و هوا کاملاً نمایان بود. با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و کاهش نسبی تلاطم جریان و همچنین توسعه یافتن تدریجی لایه مرزی، خطای مدل عددی نیز کاهش یافت.

۳- پروفیل‌های سرعت نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از بستر، تطابق بین نتایج عددی با آزمایشگاهی کاهش یافته است. در واقع با فاصله گرفتن از بستر به علت تغییرات سرعت لحظه‌ای و تأثیر آن بر پارامترهای آشفتگی جریان، از دقت شبیه‌سازی مدل‌های آشفتگی کاسته شده است.

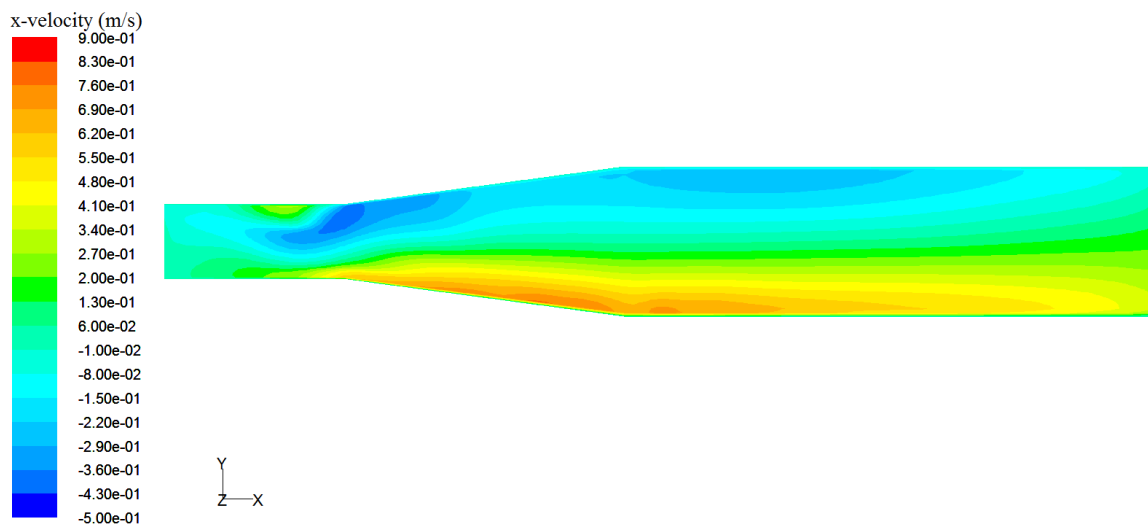
۴- در محاسبه پروفیل سطح آزاد مدل‌های آشفتگی k-ε RNG و RSM خطای نسبتاً مشابهی را به دنبال داشتند و میانگین خطای محاسباتی آن‌ها به ترتیب ۷/۴ و ۵/۷ درصد حاصل شد. اما در هنگام شبیه‌سازی توسط مدل RSM خطای محاسباتی سرعت در مقایسه با مدل k-ε RNG به میزان قابل توجهی کاهش یافت. به طوری که میانگین خطای محاسباتی مدل‌های آشفتگی مذکور به ترتیب ۱۶/۲ و ۷/۷ درصد به دست آمد. با توجه به نوسانات شدید سرعت در راستای قائم پرش و نظر به اینکه در مدل RSM تنش‌های رینولدز به صورت مستقیم حل می‌گردد، این مدل عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

۵- شبیه‌سازی عددی مدل دو نسبت به مدل یک خطای محاسباتی بیشتری را به همراه داشت. در واقع متناسب با افزایش زاویه واگرایی و تشدید اختلاط آب و هوا (به‌ویژه در یک‌سوم ابتدایی پرش) به خطای مدل عددی نیز افزوده شد. برای سرعت‌های محاسباتی اختلاف خطا کاملاً محسوس بود.

۶- خطای محاسباتی عمق و سرعت در مدل سه به میزان جزئی کمتر از مقادیر متناظر در مدل دو به دست آمد. در واقع با وجود یکسان بودن زوایای واگرایی مدل‌های دو و سه، انحنای دیواره مدل سه تا حدودی موجب تعدیل اغتشاشات و کاهش خطای مدل عددی شده است. لازم به ذکر است که بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به ازای زاویه واگرایی یکسان، انحنا در بودن دیواره

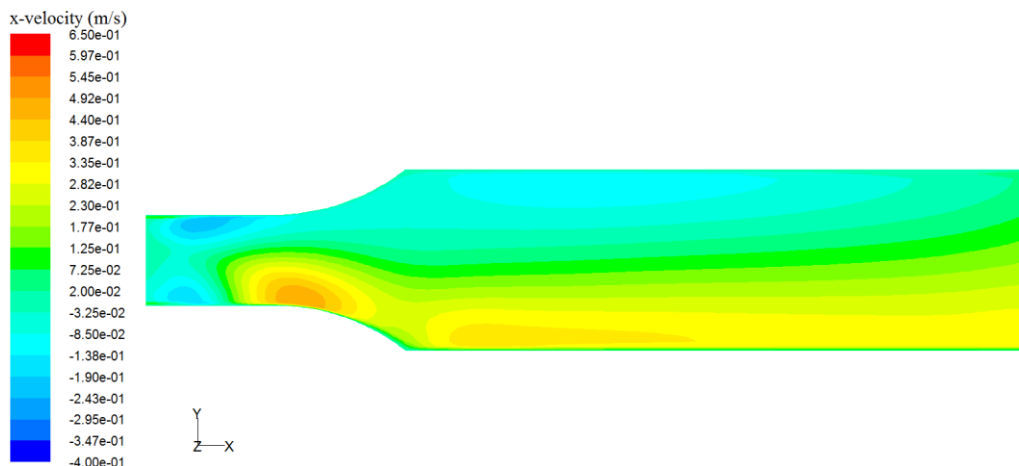


شکل ۵- تشکیل جریان دوپایا در پرش هیدرولیکی مدل یک به ازای عدد فرود $7/4$ (Sadeghi, 2013)

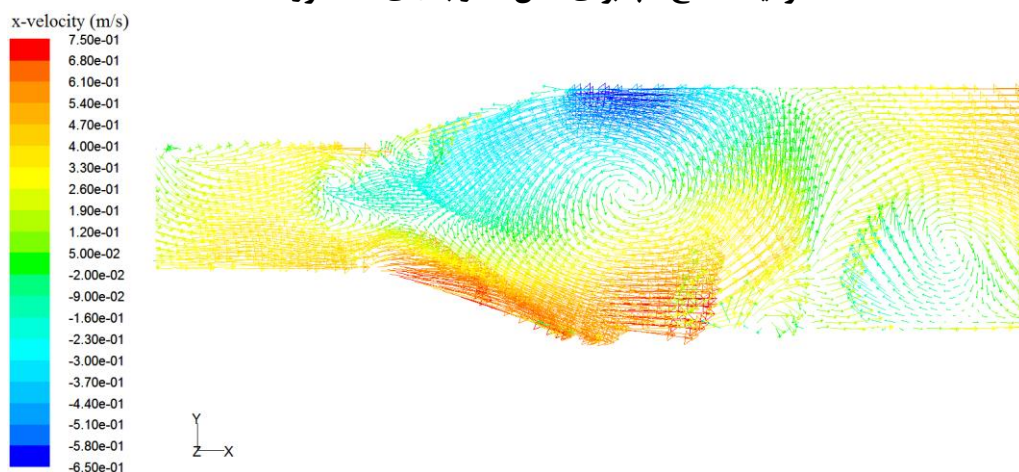


شکل ۶- میدان‌های سرعت شبیه‌سازی شده توسط مدل RSM در جهت جریان در صفحه‌ای موازی بستر و نزدیک سطح آب برای مدل یک و به ازای عدد فرود $7/4$

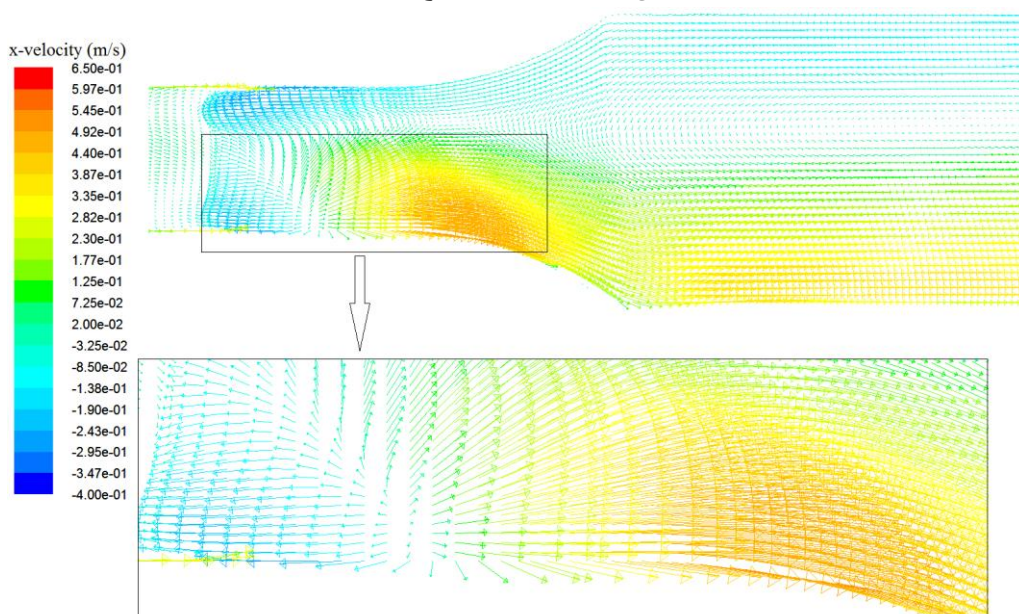
نیک پور: بررسی پارامترهای آشفتگی در پرش هیدرولیکی با...



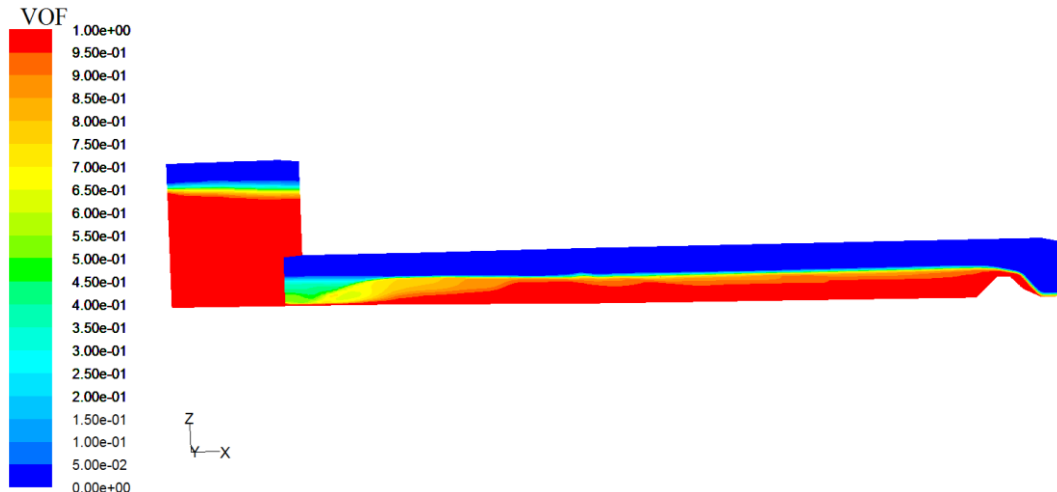
شکل ۷- میدان‌های سرعت شبیه‌سازی شده توسط مدل RSM در جهت جریان در صفحه‌ای موازی بستر و نزدیک سطح آب برای مدل سه و به‌ازای عدد فرود $7/4$



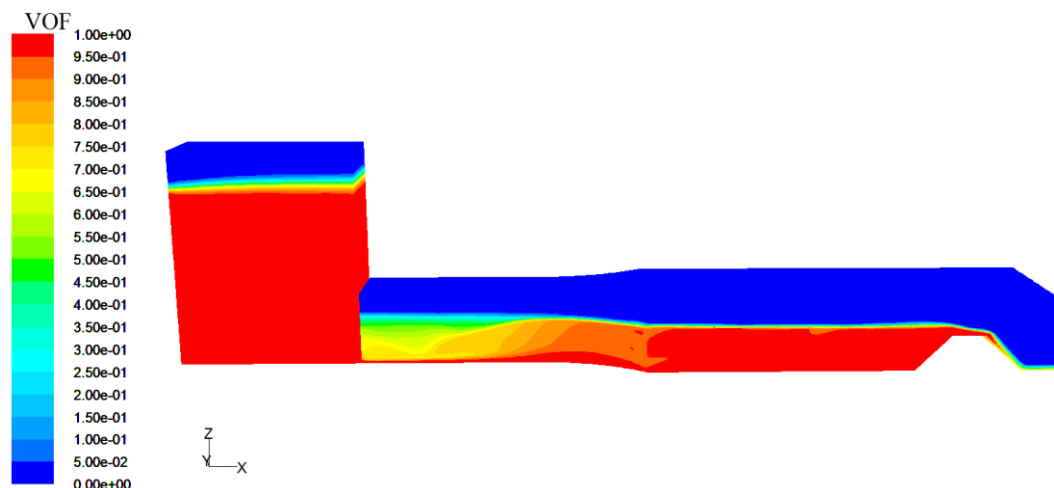
شکل ۸- نمایش بردارهای سرعت و نمایش گرداب‌ها و حرکت چرخشی آب در محل وقوع پرش هیدرولیکی در مدل دو و به‌ازای عدد فرود $7/4$



شکل ۹- نمایش بردارهای سرعت و نمایش گرداب‌ها و حرکت چرخشی آب در محل وقوع پرش هیدرولیکی در مدل سه و به‌ازای عدد فرود $7/4$



شکل ۱۰- پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی در مدل یک و به ازای عدد فرود ۷/۴



شکل ۱۱- پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی در مدل سه و به ازای عدد فرود ۷/۴

پس از رسیدن به مقدار حداکثر با شیب ملایمی نزول کرده و در انتها به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که شیب نزولی پروفیل‌ها در مدل دو نسبت به مدل یک تندتر می‌باشد. با توجه به نسبت واگرایی یکسان حوضچه‌های آرامش و نظر به اینکه در مدل دو افزایش عرض جریان نسبت به مدل یک در فاصله کوتاه‌تری انجام گرفته است لذا تغییر رفتار سیال در این مدل شدیدتر بوده و همان‌گونه که اشاره شد در پرش هیدرولیکی تشکیل شده در مدل دو اختلاط آب و هوا شدیدتر از مدل یک می‌باشد، به همین خاطر روند تغییرات در مدل دو چشم‌گیرتر از مدل یک می‌باشد. هم‌چنین مطابق شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله از ابتدای پرش، شدت تلاطم کاهش می‌یابد و حداکثر شدت تلاطم در ناحیه غلطان پرش رخ می‌دهد. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و توسعه لایه مرزی، z/d متناظر با محل وقوع حداکثر شدت آشفتگی افزایش می‌یابد و به عبارت بهتر هسته آشفته جریان از جدار دورتر می‌شود.

تحلیل پارامترهای آشفتگی پرش هیدرولیکی الف) شدت تلاطم

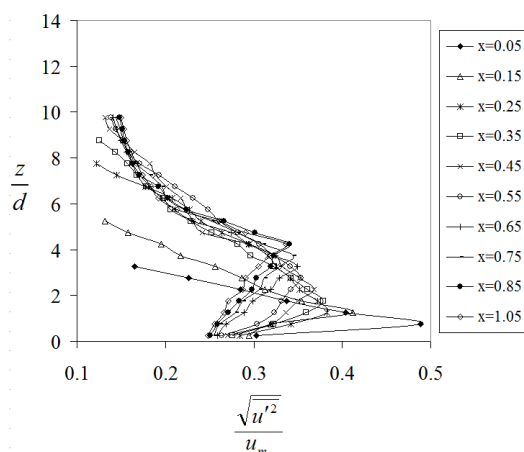
در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توزیع بدون بعد مؤلفه افقی شدت تلاطم در محور مرکزی پرش هیدرولیکی شبیه سازی شده در مدل‌های یک و دو با استفاده از نتایج مدل RSM به ازای عدد فرود ۷/۴ نمایش داده شده است. در شکل‌های مذکور پارامتر u' نشان‌دهنده نوسانات لحظه‌ای سرعت طولی می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توزیع غیر یکنواخت شدت آشفتگی کاملاً مشهود است، به طوری که در مقاطع ابتدایی پرش مقادیر آن با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر با افت ناگهانی مواجه می‌شود. با توجه به اینکه اختلاط آب و هوا باعث کاهش دامنه نوسانات سرعت لحظه‌ای و در نتیجه جزء یکی از عوامل کاهش شدت اغتشاش محسوب می‌شود، لذا کاهش پارامتر مذکور می‌تواند به دلیل اختلاط آب و هوا باشد. با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و آرام شدن نسبی سطح آب شدت آشفتگی

نیک پور: بررسی پارامترهای آشفستگی در پرش هیدرولیکی با...

چرخشی قوی تر بوده بنابراین در شکل (۱۵) مقادیر منفی بیشتر مشاهده می شود.

ج) انرژی جنبشی تلاطم

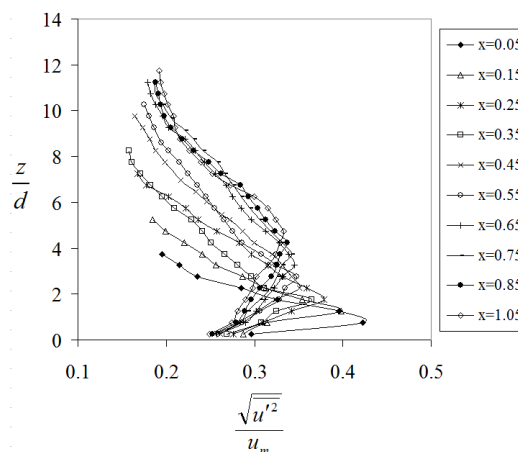
در شکل های (۱۶) و (۱۷) تغییرات بدون بعد انرژی جنبشی تلاطم در محور مرکزی پرش هیدرولیکی شبیه سازی شده در مدل های یک و دو با استفاده از نتایج مدل RSM به ازای عدد فرود $7/4$ نمایش داده شده است. پارامتر K معرف انرژی جنبشی تلاطم می باشد. همان طور که مشاهده می شود با فاصله گرفتن از ابتدای پرش توزیع قائم انرژی جنبشی اغتشاش یکنواخت تر شده و در ناحیه انتقالی پرش به طرف پایین دست، پارامتر مذکور به مقدار تقریباً ثابتی می رسد. همچنین همان طور که ملاحظه می شود مقدار بیشینه انرژی جنبشی اغتشاش در ابتدای پرش و در محل وقوع حداکثر شدت آشفستگی رخ می دهد.



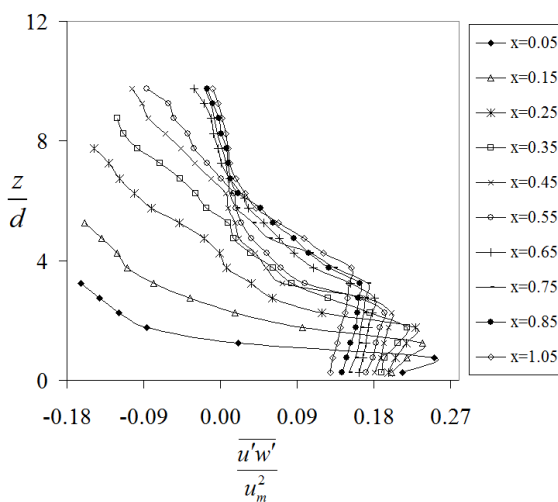
شکل ۱۳- تغییرات مؤلفه افقی شدت آشفستگی در پرش هیدرولیکی مدل دو به ازای عدد فرود $7/4$

ب) تنش های رینولدز

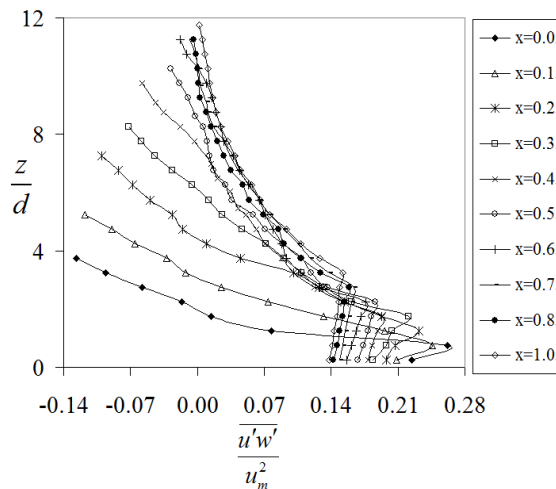
در شکل های (۱۴) و (۱۵) توزیع بدون بعد تنش های رینولدز در محور مرکزی پرش هیدرولیکی شبیه سازی شده در مدل های یک و دو با استفاده از نتایج مدل RSM به ازای عدد فرود $7/4$ نمایش داده شده است. در شکل های مذکور پارامتر w نشان دهنده نوسانات لحظه ای سرعت در جهت قائم می باشد. با توجه به شکل های مذکور، مقادیر تنش های رینولدز در نزدیکی بستر مثبت بوده اما با فاصله گرفتن از بستر، مقادیر آن تغییر جهت ناگهانی داده و منفی می شود که علت آن جریان های چرخشی در محدوده ابتدای پرش است. با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و ضعیف شدن جریان های چرخشی و همچنین کاهش ضخامت لایه اختلاط آب و هوا، وقوع پیک منفی شدید در پروفیل های تنش های رینولدز از بین رفته و غیر یکنواختی توزیع آن تعدیل می شود. از سوی دیگر با توجه به اینکه در پرش تشکیل یافته در مدل دو جریان های



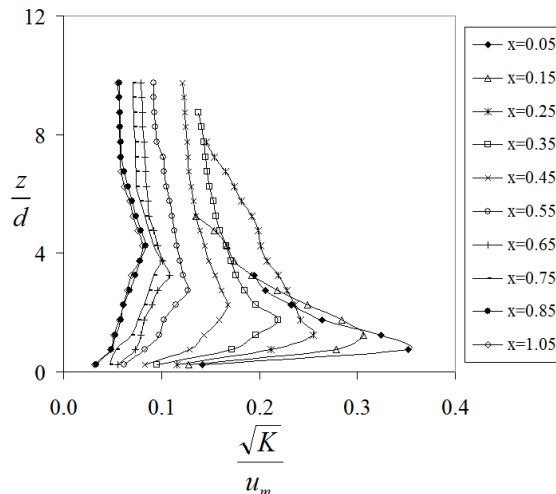
شکل ۱۴- تغییرات مؤلفه افقی شدت آشفستگی در پرش هیدرولیکی مدل یک به ازای عدد فرود $7/4$



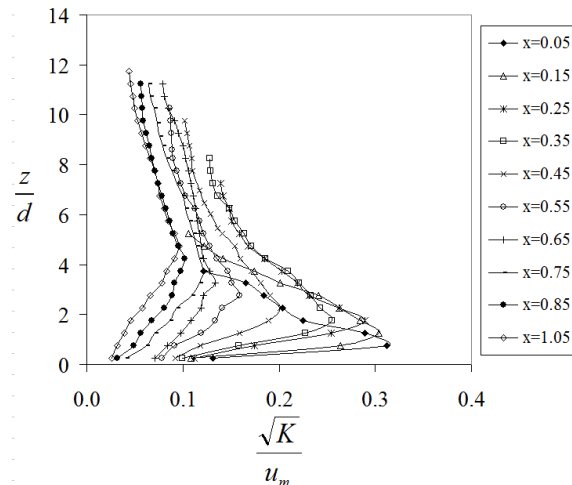
شکل ۱۵- تغییرات تنش های رینولدز در پرش هیدرولیکی مدل دو به ازای عدد فرود $7/4$



شکل ۱۶- تغییرات تنش های رینولدز در پرش هیدرولیکی مدل یک به ازای عدد فرود $7/4$



شکل ۱۷- تغییرات انرژی جنبشی تلاطم در پرش هیدرولیکی مدل دو به ازای عدد فرود $7/4$



شکل ۱۶- تغییرات انرژی جنبشی تلاطم در پرش هیدرولیکی مدل یک به ازای عدد فرود $7/4$

درصد به دست آمد. هم‌چنین میانگین خطای محاسباتی در برآورد سرعت و به‌ازای شرایط فوق به‌ترتیب $16/2$ و $7/7$ درصد حاصل شد.

خروجی‌های گرافیکی مدل عددی به خوبی جریان‌های چرخشی و نحوه تشکیل گرداب‌ها را نشان داد. لذا نظر به اهمیت وقوع جریان دوپایا در مقاطع واگرا، با استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌توان طول غلطان ایجاد شده در اثر وقوع پدیده مذکور و نحوه توسعه آن به طرف پایین دست را بررسی نمود.

نظر به اینکه زمان اجرای برنامه برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل RSM تقریباً ۲ برابر مدل k-ε RNG بود، لذا در مواقعی که صرفاً شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش مد نظر باشد، استفاده از مدل RSM به علت هزینه محاسباتی بالا توصیه نمی‌شود. اما برای تحلیل آشفتگی و استخراج مقادیر سرعت مدل RSM از دقت بالاتری برخوردار بوده، به طوری که بر اساس نتایج تحقیق حاضر با استفاده از مدل مذکور درصد خطای محاسباتی در مقایسه با مدل k-ε RNG به بیش از ۵۰ درصد کاهش یافت.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی تشکیل یافته در حوضچه‌های آرامش مستطیلی با مقاطع واگرا به ازای زوایای واگرایی مختلف و دیواره‌های مستقیم و انحنا دار، در محیط Fluent و با به‌کارگیری مدل‌های آشفتگی k-ε RNG و RSM و با استفاده از روش VOF انجام گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

میزان تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی در نقاط مختلف پرش متفاوت بود. به طوری که بیشترین خطای مدل در یک سوم ابتدایی پرش مشاهده شد. هم‌چنین با فاصله گرفتن از کف خطای محاسباتی سرعت افزایش یافت. تغییر هندسه مقاطع واگرا نیز بر روی دقت شبیه‌سازی تأثیر گذار بود. به طوری که به‌ازای نسبت واگرایی یکسان، افزایش زاویه واگرایی خطای محاسباتی را افزایش داد و به‌ازای زاویه و نسبت واگرایی یکسان، انحنا دار نمودن دیواره به مقدار جزئی خطای مدل عددی را کاهش داد.

میانگین خطای محاسباتی مدل‌های آشفتگی k-ε RNG و RSM در برآورد پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی تشکیل یافته در مدل‌های یک، دو و سه و به‌ازای هفت عدد فرود مختلف در محدوده $9/1-3/2$ به‌ترتیب $7/4$ و $5/7$

منابع

- 1- Anonymous, 2006. *Fluent 6.2 user's guide*. Fluent Inc group.
- 2- Arbbhahirama, A.N.A.T. and Abella, A.U., 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(1), pp.31-42.
- 3- Bremen, R. and Hager, W.H., 1993. T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), pp.61-78.
- 4- Bakhtiari, M. and Kashefipour, S.M., 2008. Investigation of hydraulic jump characteristics in divergent sections. In *4th National Civil Conference, University of Tehran, Tehran, Iran*. (In Persian).

- 5- Bakhtiari, M., Kashefipour, S.M. and Shafaei Bajestan, M., 2014. Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in divergent rectangular stilling basins. In *4th National Management of Irrigation and Drainage Networks Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*. (In Persian).
- 6- Esmaeeli Varaki, M. 2003. *Study of divergent hydraulic jump characteristics in trapezoidal stilling basin*. MSc. thesis, Department of Water Engineering, Faculty of engineering and agriculture technology, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Persian).
- 7- Kasi, A., Farhoudi, J. and Esmaeeli Varaki, M., 2011. Theoretical and experimental study of divergent hydraulic jump with diverse slope. *Iranian Water Research Journal*, 9, pp.121-130. (In Persian).
- 8- Khalifa, A.M. and Mccorquodale, J.A., 1979. Radial hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(9), pp.1065-1078.
- 9- Mosavi Khandan, A., Borgheie, M. and Daemi, A., 2001. Scour profile properties in downstream of divergent stilling basins. In *3th National Hydraulic Conference, University of Tehran, Tehran, Iran*.
- 10-Omid, M.H. and Esmaeeli Varaki, M., 2005. Theoretical and experimental study of divergent hydraulic jump in trapezoidal sections. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 9(2), pp.17-29. (In Persian).
- 11-Omid, M.H., Esmaeeli Varaki, M. and Narayanan, R., 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), pp.512-518.
- 12-Posey, C.J. and Hsing, P.S., 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. *Engineering News Record*, 121(26), pp.797-798.
- 13-Sadeghi, H., 2013. *Effect of wall shape on hydraulic jump in open- channels transitions*. MSc. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Islamic Azad University, Branch of Maragheh, Maragheh, Iran. (In Persian).
- 14-Sahebi, F., 2013. *Comparison of k-ε turbulence models in simulation of hydraulic jump in divergent rectangular sections using Fluent software*. MSc. thesis, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Persian).
- 15-Sahebi, F., Esmaeeli Varaki, M., Navabian, M. and Amiri, Z., 2012. Economic evaluation of stilling basin walls divergence effect on construction costs changes. In *11th National Hydraulic Conference, University of Urmia, Urmia, Iran*.
- 16-Shojaeian, Z., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Salmasi, F., 2011. Investigation of hydraulic jump characteristics in divergent rectangular sections with adverse slope. *Water and Soil Science*, 3(21), pp.49-60. (In Persian).

**EXTENDED ABSTRACT****Investigation of Hydraulic Jump Turbulence Parameters in Divergent Rectangular Sections using Fluent Model**

M. R. Nikpour

Assistant Professor of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (*m_nikpour@uma.ac.ir*).

Received: 4 August 2016

Accepted: 10 December 2016

Keywords: Bistable flow, Divergent section, Hydraulic jump, Stilling basin, Turbulence model.

Introduction

A Stilling basin with divergent section has better performance and lower constructional costs than the classic basin. It can easily adapt itself to the upstream and downstream conditions in terms of depths and cross sections (Omid et al., 2007). Khalifa and McCorquodale (1979) studied radial hydraulic jumps in a gradually expanding channel of rectangular cross section and developed a theoretical equation assuming a second degree polynomial for the surface profile. Omid et al. (2007) studied the hydraulic jump formed in a gradually expanding stilling basin of trapezoidal cross section. They also investigated the hydraulic jumps for three different basin side slopes. Their experimental results indicated that the divergence of the basin for a given side slope causes reductions in the sequent depth and jump length, and an increase of the energy loss in jump relative to those observed in rectangular cross sections. Sahebi (2013) simulated a divergent hydraulic jump in rectangular basins using standard and RNG turbulence models. The outputs of the numerical model showed that the standard turbulence model evaluated the free surface of flow, jump length and maximum velocity in defined sections better than RNG turbulence model. In this study, for seven Froude numbers in the range of 3.2-9.1, three models of the divergent basins were numerically simulated at three dimensional conditions with various geometries of divergence angle and wall type. The k- ϵ RNG and RSM models were used for turbulence analysis and volume of fluid (VOF) model was used for simulating of free surface profile in the Fluent model. Also, vertical distributions of turbulence intensity, Reynolds stresses and turbulent kinetic energy were investigated using the RSM model in various sections of the hydraulic jumps.

Methodology**Experimental model**

Experimental data of Sadeghi (2013) were used in this research. In the mentioned research, characteristics of hydraulic jump formed in three models of divergent basins with various geometries of divergence angle and wall type were investigated. Geometrical parameters of the models are listed in Table 1. Also, hydraulic characteristics of the experiments are listed in Table 2, where Q, H and Fr_1 are referred as the discharge, flow head and Froude number for incoming flow, respectively.

Table 1- Geometrical parameters of the experimental model (Sadeghi, 2013)

<i>Model</i>	<i>Type of basin wall</i>	<i>Wall basin length (m)</i>	<i>Upstream channel width (m)</i>	<i>Downstream channel width (m)</i>	<i>Divergence angle (degree)</i>
1	<i>Straight</i>	1.5	0.4	0.8	7.7
2	<i>Straight</i>	0.6	0.4	0.8	19.5
3	<i>Curved</i>	0.6	0.4	0.8	19.5

Table 2- Hydraulic characteristics of the experiments (Sadeghi, 2013)

<i>Q (lit/s)</i>	<i>H (m)</i>	<i>Fr₁</i>
17.5	0.68	3.2
26.3	0.79	4.5
30.1	0.87	5.1
34.2	0.95	6.2
39.2	1.06	7.4
43.4	1.12	8.3
47.1	1.18	9.1

Numerical model

In this research, Fluent model was employed for numerical simulation. Fluent is one of the most popular and suitable models of CFD that provides a wide array of advanced physical models for fluid flow and heat transfer applications including multiphase flow. It can exchange the dominant differential equations to algebraic equations by using the finite volume method and solve them in 2D and 3D dimensions (Nikpour et al., 2014). In order to make the numerical model independent from the number of meshes, the lowest required number of meshes that has the least computational error should be determined. Considering a constant boundary conditions, four different grids were applied to the numerical model. Comparing the mean relative error of the above mentioned, the most appropriate number of meshes was obtained equal to 773840, 616080 and 680080 for the models 1, 2 and 3, respectively.

Results and Discussion

The validation results of the numerical model indicated that the accuracy of the turbulence models in simulating of free surface profile was similar and the average relative errors of calculation were 7.4% and 5.7%, respectively. But the RSM model performed better than the k- ϵ RNG model in simulating of velocity profiles, so that the values were 16.2% and 7.7%, respectively. The agreement rate between the measured and computational values varied in different points of the hydraulic jump, so that the model's errors mostly observed in the third initial of the jump. On the other hand, the velocity profiles showed as the distance increased from the bed, the agreement between numerical and measured values decreased. Indeed, by moving away from the bed, simulation accuracy of the turbulence models reduced due to changes of the turbulence intensity as well as air and water mixture. Also, for the same divergence ratio, by increasing of the divergence angle, the computational error increased, and for the same angles and divergence ratios, the curvature of the wall reduced the partial value of the numerical model error. Moreover, the numerical model showed the vortices and bistable flow occurred by diverging walls as well as experimental results. Therefore, considering the importance of bi-stable flow occurring in the divergent sections, the numerical simulation can be used to study the rolling length due to the occurrence of the phenomenon and its development to the downstream.

Conclusion

Based on the overall results obtained from this study, it was concluded that since the run time for the simulation of hydraulic jump using the RSM model was approximately 2 times of the k- ϵ RNG model, therefore, when simply considering the jump free-surface profile simulation, the RSM model is not recommended due to its high computational cost. But for analyzing the turbulence and gaining velocity values, the RSM model has a higher accuracy, therefore, based

on the results of this study, the percentage of computational error decreased by more than 50% compared to the $k-\varepsilon$ RNG model.

References

- 1- Khalifa, A.M. and Mccorquodale, J.A., 1979. Radial hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(9), pp.1065-1078.
- 2- Nikpour, M.R., Nazemi, A.H., Dalir, A.H., Shoja, F. and Varjavand, P., 2014. Experimental and numerical simulation of water hammer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), pp.2669-2675.
- 3- Omid, M.H., Esmaeeli Varaki, M. and Narayanan, R., 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), pp.512-518.
- 4- Sadeghi, H., 2013. *Effect of wall shape on hydraulic jump in open- channels transitions*. MSc. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Islamic Azad University, Branch of Maragheh, Maragheh, Iran. (In Persian).
- 5- Sahebi, F., 2013. *Comparison of $k-\varepsilon$ turbulence models in simulation of hydraulic jump in divergent rectangular sections using Fluent software*. MSc. thesis, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Persian).