

شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی

ناهید پور عبدالله^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۲ و جهانگیر عابدی کوپایی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۵)

چکیده

پرش هیدرولیکی برای از بین بردن انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از جمله سرریزها، تندآب‌ها و دریچه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و همچنین شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی آزاد با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D در ۶ حالت مختلف شیب معکوس، بستر زبر و پله انتهایی با هم مقایسه شد. گفتنی است، برای شبیه‌سازی عددی از دو مدل آشفتگی k-ε و RNG استفاده شد. بر اساس نتایج، دقت شبیه‌سازی با کاربرد مدل RNG بیشتر از مدل k-ε بود. شاخص‌های آماری NS، ME، NRMSE و R² برای مقایسه نتایج پروفیل سطح آب حاصل از کاربرد مدل RNG به ترتیب ۰/۰۰۵۲، ۴/۳۴، ۰/۰۰۵۲، ۰/۹۹۵ و ۰/۹۸۳ بدست آمد. همچنین مقدار این شاخص‌ها برای نتایج پروفیل سرعت با استفاده از مدل مذکور به ترتیب ۱۴/۹۲، ۰/۱۲۷، ۰/۹۸۲ و ۰/۹۶۲ محاسبه شد. بطور کلی میزان خطای حاصل از شبیه‌سازی پروفیل سطح آب و سرعت به ترتیب برابر ۵/۳۱ و ۱۲/۴ درصد بدست آمد. همچنین بیشینه خطای نتایج شبیه‌سازی عددی D₂/D₁، L_j/D₂ و L_r/D₁ به ترتیب برابر ±۱۲، ±۱۲ و ±۱۶ درصد بود. بنابراین استفاده از نرم‌افزار Flow-3D همراه با کاربرد مدل آشفتگی RNG برای شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در شرایط مختلف پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، شبیه‌سازی عددی، پروفیل سطح آب، پروفیل سرعت، مدل‌های آشفتگی

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: nahid7760@yahoo.com

مقدمه

پرش هیدرولیکی یک جریان متغیر سریع بوده و از پدیده‌های مورد توجه در زمینه مهندسی هیدرولیک است. پرش هیدرولیکی از تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی شکل گرفته و بعنوان یک پدیده اتلاف کننده انرژی نیز کاربرد دارد. گفتمانی است که بررسی ویژگی‌های پرش در مسیر کانال‌ها و یا حوضچه‌های با شیب منفی هنوز در سطح وسیع مورد مطالعه قرار نگرفته است. این موضوع می‌تواند در کاهش هزینه‌های اجرایی مؤثر باشد چرا که شیب منفی خود در مسیر جریان به عنوان یک مانع عمل کرده و کاهش نسبت اعماق مزدوج و کاهش طول پرش را به دنبال خواهد داشت. همچنین موجب افزایش راندمان اتلاف انرژی نسبت به بستر افقی شده و در نهایت امکان ساخت حوضچه‌ای کوتاه‌تر و با ارتفاع دیواره‌های کمتر را ممکن می‌سازد. وجود زبری روی بستر نیز دارای اثر مشابه است. ضمن آنکه زبری بستر پرش را در موقعیت مد نظر تثبیت می‌نماید. پالگیرا و پالرمو (۱۵) اثر ۵ اندازه زبری سنگریزه‌ای را بر روی بستر با ۲ شیب معکوس مورد بررسی قرار دادند. همچنین یک راه حل تحلیلی را ارائه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها عنوان کردند راه حل تحلیلی و نتایج آزمایش‌ها تطابق مناسبی دارد. پورعبدالله و همکاران (۱۷) در تحقیق خود نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب بستر معکوس و افزایش زبری نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. بطور متوسط کاهش اعماق نسبی، کاهش طول پرش و طول غلتاب در تحقیق ایشان به ترتیب ۳۱/۱۵، ۳۹/۶ و ۳۲/۳ درصد بود. حسن‌پور و همکاران (۷) نیز نشان دادند که با افزایش زبری و افزایش میزان واگرایی، نسبت طول غلتاب کاهش می‌یابد. مطالعه جریان سیالات، یکی از زمینه‌های علمی جالب است که تا چند دهه پیش برای انجام آن فقط از روش‌های تجربی و یا روش‌های تحلیلی همراه با فرضیات بسیار ساده کننده استفاده می‌شد. با پیدایش رایانه‌های قدرتمند، زمان و هزینه‌های محاسباتی کاهش یافت و بشر توانست ضمن کاهش فرضیات ساده کننده، پدیده‌های

پیچیده‌تری را در زمینه دینامیک سیالات به صورت عددی مورد تحلیل قرار دهد. چرا که به عنوان نمونه پیچیدگی بسیاری از جریان‌های طبیعی در کانال‌های روباز سبب شده که حتی معادلات موجود در شکل کلی آنها نیز قادر به تحلیل دقیق این جریان‌ها نباشند. نرم‌افزار Flow-3D یکی از نرم‌افزارهای قوی در این زمینه بوده که با استفاده از مدل‌های متنوع قادر به حل عددی مسائل دینامیک سیالات است. شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی افقی توسط برخی محققین بررسی شده است. ساکر و رودرز (۱۹) پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف را به صورت تجربی بررسی کرده و سپس با استفاده از مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی کردند. ایشان اعلام کردند که نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی در حالت دو بعدی داشته‌اند اما محاسبات در شرایط سه بعدی از دقت لازم برخوردار نبوده است. لیو و همکاران (۱۱) مطالعاتی بر روی خصوصیات آشفتگی پرش هیدرولیکی انجام دادند. ایشان بیان داشتند که بیشینه شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به طور خطی کاهش پیدا می‌کند و اندازه گرداب‌های تولید شده نیز در انتهای پرش بیشتر می‌شود. مینان و همکاران (۱۲) نیز مطالعاتی بر روی ویژگی‌های آشفتگی پرش هیدرولیکی انجام دادند. آنها نیز اعلام کردند بیشترین شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به طور خطی کاهش پیدا می‌کند. گونزالس و بمباردلی (۹) نیز پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف را با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و LES شبیه‌سازی کرده و با نتایج تجربی لیو و همکاران (۱۱) مقایسه کردند. ابراهیمی و همکاران (۶) شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی را روی بسترهای زبر مستطیلی و مثلثی انجام دادند. طبق نتایج ایشان، بیشینه خطای مدل عددی در برآورد پروفیل سطح آب و طول پرش هیدرولیکی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی ۴/۴ و ۶/۷ درصد بوده است. بایون و جیمنز (۳) با استفاده از نرم‌افزار Open Foam پرش هیدرولیکی را شبیه‌سازی کردند. ایشان اعلام داشتند مدل آشفتگی $k-\epsilon$ نتایج مناسب‌تری را ارائه داده است. چرن و سیسموری (۴)، با استفاده از مدل عددی SPH

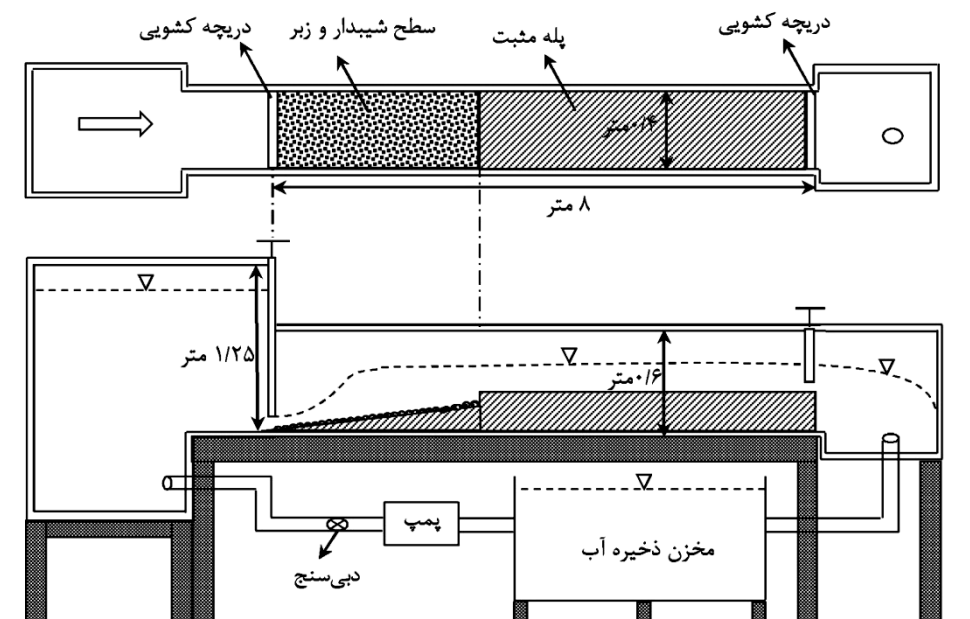
هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا مناسب بوده و هماهنگی قابل قبولی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دارد. نظری علی‌آبادی و همکاران (۱۴) در پژوهشی دیگر نشان دادند که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ پروفیل سطح آب را با خطای نسبی $3/55$ درصد و میانگین مجذور مربعات $5/29$ درصد شبیه‌سازی کرده است که این نتایج توانایی بالای مدل را در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا نشان می‌دهد. باید توجه کرد که کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از حوضچه‌های آرامش در تپ‌های مختلف در همه نقاط نه تنها اقتصادی نبوده بلکه ممکن است امکان احداث آنها نیز وجود نداشته باشد. بنابراین به تازگی بررسی کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌هایی با سادگی ساخت بیشتر و هزینه کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. از جمله عواملی که در این حوضچه‌ها برای کنترل پرش هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به شیب معکوس بستر، پله مثبت انتهایی و زبری بستر اشاره کرد. تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در شرایط حضور همزمان چنین اجزایی صورت نگرفته است. لذا هدف از این پژوهش شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حضور چنین اجزایی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D با دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG بوده است.

مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان در کانالی با مقطع مستطیلی به عرض $0/4$ ، ارتفاع $0/6$ و طول 8 متر و دیوارهای پلکسی گلاس شفاف انجام شده است. طول حوضچه آرامش شامل 2 متر سطح شیب‌دار و یک پله انتهایی بود. به منظور افزایش عدد فرود اولیه در 2 متر از طول کانال (قبل از دریچه بالادست) ارتفاع کانال از $0/6$ متر به $1/25$ متر افزایش یافت (شکل ۱). برای اندازه‌گیری عمق جریان از یک عمق‌سنج دستی با دقت $0/1$ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری دبی و سرعت به ترتیب از دبی‌سنج الکترومغناطیسی و لوله پیتوت استفاده گردید. آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری خصوصیات

پرش هیدرولیکی را روی بستر صاف و سه بستر موج‌دار مثلثی، دوزنقه‌ای و سینوسی شبیه‌سازی کردند. آنها توانستند تغییرات ویژگی‌های پرش از جمله طول نسبی پرش، نسبت اعماق مزدوج و اتلاف انرژی را به خوبی پیش‌بینی نمایند. بایون و همکاران (۲) بررسی عملکرد دو نرم‌افزار Open Foam و Flow-3D در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی را انجام دادند. مقایسه پروفیل سطح آزاد آب، نسبت اعماق مزدوج، طول پرش هیدرولیکی و سرعت متوسط بین دو مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد هر دو مدل قادر هستند نتایج قابل قبولی ارائه دهند. عباسپور و همکاران (۱) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار با استفاده از مدل‌های آشفتگی را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار مناسب بوده و متوسط خطای نسبی در تعیین سطح آب 2 تا 7 درصد بوده است. صاحبی و ایقان و همکاران (۱۸) مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی را در حوضچه مستطیلی با زاویه‌های واگرایی 5 و 10 درجه به صورت سه بعدی با بکارگیری مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل $k-\epsilon$ استاندارد مقادیر پروفیل‌های سطح آب، طول پرش و مقادیر بیشینه سرعت را با دقت بهتری نسبت به مدل آشفتگی RNG شبیه‌سازی کرده است. شجاعیان و کاشفی‌پور (۲۰) پرش هیدرولیکی را با نرم‌افزار Flow-3D با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG شبیه‌سازی کردند. بررسی انجام شده نشان داد که نتایج مدل RNG در مقایسه با مدل $k-\epsilon$ استاندارد، بهتر است. گاهی و دهقانی (۱۰) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و مدل‌های آشفتگی، شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی را بر روی سطح موج‌دار با ارتفاع زبری انجام دادند. نتایج، توانایی مدل RNG را در تخمین عمق ثانویه، طول پرش و توزیع سرعت به خوبی نشان داد. نتایج مطالعه نظری علی‌آبادی و همکاران (۱۳) نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش



شکل ۱. نمای کانال آزمایشگاهی

غیر متخلخل بودن محیط، معادله پیوستگی به صورت ذیل خلاصه می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(uAy) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (2)$$

معادلات ناویر-استوکس با توجه به روش های استفاده شده در نرم افزار Flow-3D، غیر قابل تراکم بودن سیال، غیر متخلخل بودن محیط، ثابت بودن مرزهای جامد، انتخاب راستای z به عنوان راستای ثقل که در نتیجه تنها شتاب ثقل (g_z) وارد بر جریان خواهد بود و استفاده از مختصات کارتزین به صورت زیر خلاصه می شوند (۸):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + g_z \quad (5)$$

که در این رابطه A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت های (x,y,z) ، u، v و w متوسط سرعت در جهت های F،

جریان پرش هیدرولیکی آزاد در حالت های مختلف با زبری سنگریزه ای (t) به قطر ۲ سانتی متر، شیب معکوس ۳٪ (θ) و پله انتهایی (z) ۶ سانتی متر در کانال آزمایشگاهی انجام و سپس با نرم افزار Flow-3D شبیه سازی شد.

معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی و معادله مومنتم هستند. معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن موازنه جرم برای یک المان سیال به دست می آید. به صورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می شود (۸):

$$V_f = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial x}(\rho w A_x) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{dif} + R_{sor} \quad (1)$$

که در این معادله V_f مقدار نسبت حجم باز به جریان، ρ چگالی سیال، (u,v,w) به ترتیب مقادیر سرعت در (x,y,z) ، (A_x,A_y,A_z) به ترتیب مقادیر نسبت مساحت در راستای (x,y,z) ، R و ξ مربوط به سیستم انتخابی، R_{dif} تابع دیفیوژن و R_{sor} تابع چشمه می باشد. به دلیل غیر قابل تراکم بودن سیال، مقدار ρ ثابت و یکنواخت خواهد بود. با توجه به استفاده از مختصات کارتزین و

مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Inventor ترسیم و به نرم‌افزار Flow-3D منتقل شدند. همچنین همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، برای دیواره‌ها و کف کانال از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. دلیل این انتخاب عدم عبور جریان در جهت عمود بر جدار فلوم بود. برای مرز سطح آزاد آب از شرط تقارن استفاده شده است. این شرط سبب می‌شود تا زمانی که جریان به این مرز نرسیده است شرایط بالای سیال به صورت شرایط اتمسفر در نظر گرفته شود (۸). در خصوص شرط مرزی بالادست نیز فشار ثابت معادل ارتفاع آب پشت دریچه و در پایین دست فشار ثابت معادل عمق پایاب در نظر گرفته شد. این دو انتخاب نیز با توجه به مشخص بودن وضعیت جریان قبل و بعد از محدوده مد نظر برای شبیه‌سازی (محدوده وقوع پرش هیدرولیکی) انجام شد.

در این مطالعه ابتدا پرش کلاسیک با استفاده از مدل k-ε به منظور تعیین مقدار بهینه اندازه سلول‌های شبکه (مش) شبیه‌سازی شد. برای تعیین اندازه سلول‌های شبکه (مش) بهینه در ابتدا شبیه‌سازی با تعداد سلول کمتری (اندازه ۲ سانتی‌متری) انجام شد و پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، تعداد سلول‌های مورد استفاده بیشتر شد. افزایش تعداد سلول‌ها (کاهش اندازه سلول‌ها) تا زمانی ادامه پیدا کرد که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی تغییری نداشته و به نزدیک‌ترین مقدار به نتایج آزمایشگاهی رسیده باشند. شکل ۳ اندازه مش بهینه برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. سپس پرش کلاسیک با در نظر گرفتن مقدار مش بهینه و با استفاده از دو مدل آشفتگی k-ε و RNG دوباره شبیه‌سازی شد. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در این مرحله مدل آشفتگی مناسب انتخاب شد. نکته دیگری که در شبیه‌سازی‌های عددی مهم است، زمان اجرای مدل تا رسیدن به یک مقدار مناسب از نظر همگرایی حل عددی و پایداری و ماندگاری جریان است. برای این منظور با توجه به سعی و خطای صورت گرفته در هنگام شبیه‌سازی، زمان اجرای مدل ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در ادامه شبیه‌سازی پرش

تابع نسبت سیال که مقادیری بین [۱،۰] دارد. اگر F برابر با یک باشد، نشان دهنده اشغال کامل فضای سلول شبکه‌بندی توسط سیال و اگر صفر باشد بیانگر عدم وجود سیال است.

مدل‌های آشفتگی

در این مطالعه از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای k-ε و RNG استفاده شده است. در مدل آشفتگی k-ε معادله‌های زیر حاکم هستند (۱۶):

$$\rho \frac{DK}{Dt} = P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \alpha_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) - \rho R + C_{\varepsilon 3} \rho \varepsilon \nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \alpha_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

در این معادلات k انرژی جنبشی آشفتگی، ε نرخ اتلاف انرژی و P تولید انرژی است. همچنین مقدار ضرایب μ لزجت سینماتیکی، ρ چگالی، R صفر، α_ε برابر ۰/۷۷، α_k برابر ۱، ∇·u گرادیان سرعت، t زمان، C_μ=۰/۰۹، C_{ε۱}=۱/۴۴، C_{ε۲}=۱/۶۸ و C_{ε۳}= -۱ هستند. همچنین عبارت R اضافه شده به معادله ε در مدل RNG که باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد است، طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$R_{RNG} = \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (8)$$

$$C_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (9)$$

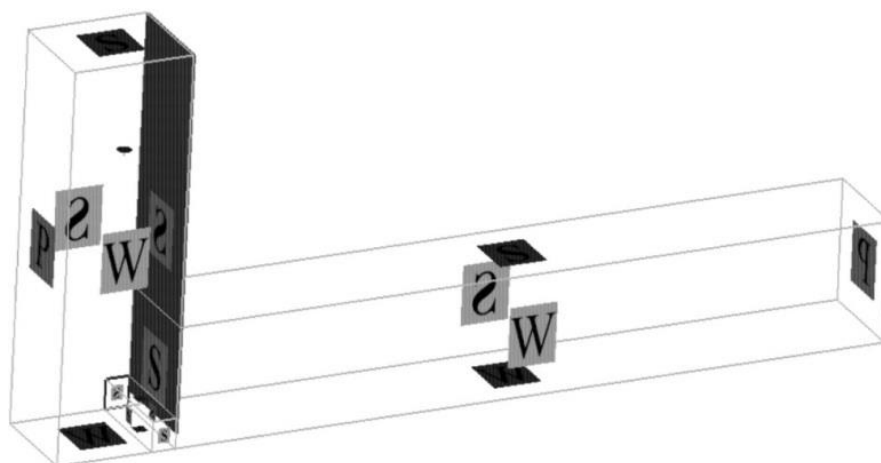
$$C_{\varepsilon 3RNG} = \frac{-1 + 2C_{\varepsilon 1} - 3m_1(\eta_1 - 1) + (-1)^\delta \sqrt{6} C_\mu C_\eta \eta}{3} \quad (10)$$

گفتنی است، ضرایب تجربی در مدل آشفتگی RNG به ترتیب برابر با C_{ε۲}=۱/۶۸، C_{ε۱}=۱/۴۴، α_k=α_ε=۱/۳۹، C_μ=۰/۰۸۴،

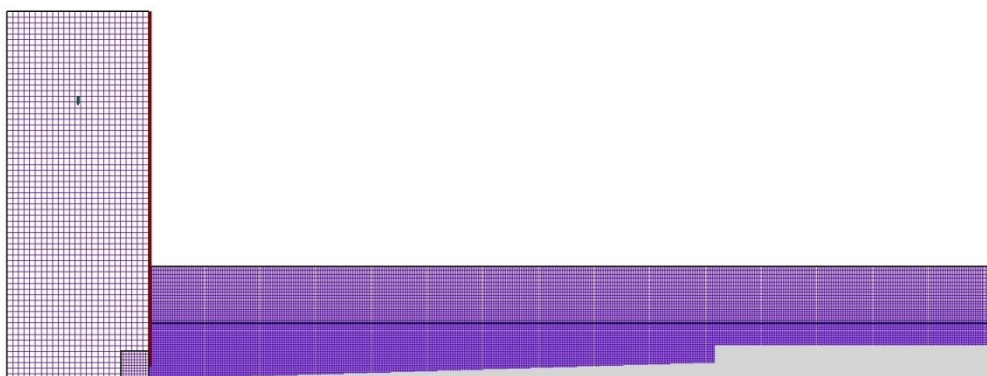
$$\eta_0 = 4/38, \beta = 0/012 \text{ و } \eta = \frac{sk}{\varepsilon} \text{ هستند.}$$

مشخصات میدان حل

برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی، مدل‌های فیزیکی مورد



شکل ۲. شرایط مرزی اعمال شده در مدل



شکل ۳. شبکه‌بندی مورد استفاده در شبیه‌سازی

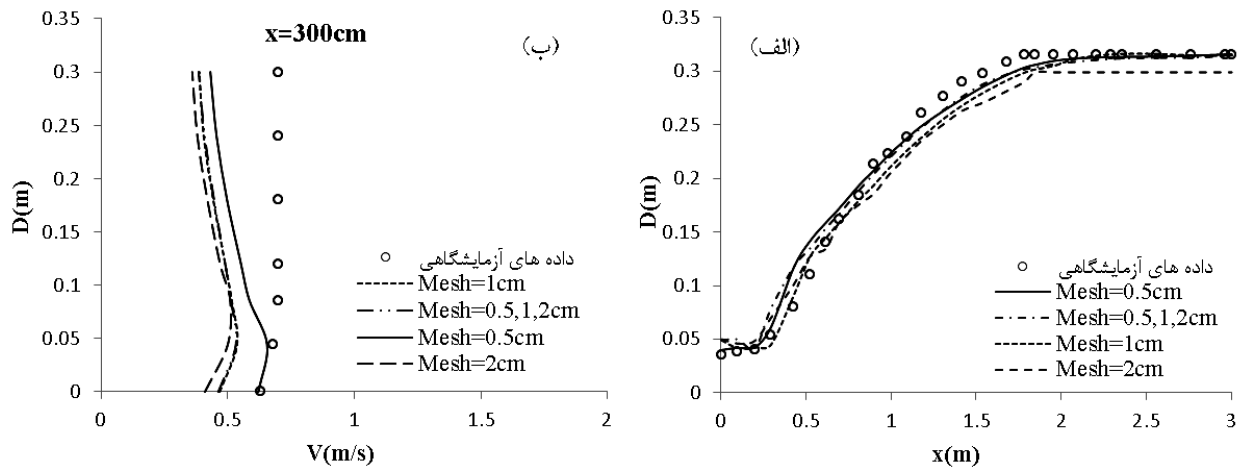
کلاسیک در حالت استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج این مقایسه در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نَش (NS) مقادیر سطح آب و سرعت به دست آمده از مدل عددی در مقایسه با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود اندازه‌ی مش ۰/۵ سانتی‌متر، نزدیک‌ترین نتیجه را با داده‌های آزمایشگاهی داشته است. این موضوع توسط مقادیر شاخص‌های آماری ارائه شده در جداول ۱ و ۲ نیز تأیید شده است. از این رو برای ادامه شبیه‌سازی‌ها اندازه‌ی مش، ۰/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

غیرکلاسیک در ۶ حالت مختلف ترکیب شیب معکوس بستر، زبری بستر و پله مثبت انتهایی انجام و نتایج آنها با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. گفتنی است به‌منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی در حالات مختلف بیان شده از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، نَش (NS) و میانگین خطا (ME) استفاده شد.

نتایج و بحث

انتخاب مش بهینه

همان‌طور که پیش از این بیان شد، برای انتخاب مش بهینه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پروفیل سطح آب و سرعت پرش



شکل ۴. مقایسه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده پرش کلاسیک در اندازه‌های مختلف، الف) پروفیل‌های سطح آب و ب) پروفیل سرعت

جدول ۱. مقایسه دقت شبیه‌سازی پروفیل‌های سطح آب پرش کلاسیک در اندازه‌های مختلف مش با استفاده از شاخص‌های آماری

R ²	NS	ME	NRMSE	اندازه مش (cm)	
				در راستای طول (x)	در راستای طول (x)
۰/۹۰	۰/۹۴۵	۰/۰۱۳	۵/۸۵	۲	۲
۰/۹۸	۰/۹۸۶	۰/۰۱۰	۵/۵۷	۱	۱
۰/۹۹۱	۰/۹۸۴	۰/۰۰۹	۵/۳۰	۰/۵، ۱، ۲	۰/۵، ۱، ۲
۰/۹۹۱	۰/۹۸۵	۰/۰۰۸	۵/۳۶	۰/۵	۰/۵

جدول ۲. بررسی دقت شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت پرش کلاسیک در اندازه‌های مختلف مش با استفاده از شاخص‌های آماری

R ²	NS	ME	NRMSE	اندازه مش (cm)	
				در راستای طول (x)	در راستای طول (x)
۰/۹۴۶	۰/۸۶۷	۰/۳۰۲	۲۲/۳۰	۲	۲
۰/۹۵۲	۰/۹۴۱	۰/۲۳۴	۱۷/۷۹	۱	۱
۰/۹۵۲	۰/۹۵۱	۰/۲۱۶	۱۶/۶۸	۰/۵، ۱، ۲	۰/۵، ۱، ۲
۰/۹۵۶	۰/۹۵۶	۰/۱۷۴	۱۴/۹۳	۰/۵	۰/۵

انتخاب بهترین مدل آشفتگی

جذر میانگین مربعات (NRMSE) و نش (NS) حاصل از مقایسه مقادیر پروفیل سطح آب و سرعت بدست آمده از مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج کسب شده، مدل آشفتگی RNG نتایج بهتری را نسبت به مدل آشفتگی k-ε نشان داده است.

در این پژوهش برای بررسی میزان دقت مدل‌های آشفتگی k-ε و RNG، پرش کلاسیک با استفاده از اندازه مش بهینه (۰/۵ سانتی‌متر) شبیه‌سازی شده و نتایج با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. برای این منظور، ضریب تبیین (R²),

جدول ۳. بررسی دقت مدل‌های آشفته‌گی مختلف در شبیه‌سازی پروفیل‌های سطح آب و سرعت پرش کلاسیک با استفاده از شاخص‌های آماری

R ²	NS	ME	NRMSE	مدل‌های آشفته‌گی	
۰/۹۹۱	۰/۹۸۵	۰/۰۰۸	۵/۳۶	k-ε	پروفیل سطح آب
۰/۹۹۲	۰/۹۸۸	۰/۰۰۷	۴/۸۷	RNG	
۰/۹۵۶	۰/۹۵۶	۰/۱۷۴	۱۴/۹۳	k-ε	پروفیل سرعت
۰/۹۶۸	۰/۹۶۱	۰/۱۵۲	۱۳/۴۸	RNG	

ابتدای پرش تا تاج پرش به دلیل آشفته‌گی‌های بسیار زیاد، اختلاف کمی بین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی دیده می‌شود. البته با نزدیک شدن به انتهای پرش به دلیل کاهش تلاطم این میزان اختلاف نیز از بین رفته و مقادیر مد نظر بر هم منطبق شده‌اند. لازم به یادآوری است که وجود زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی باعث کاهش تلاطم پرش هیدرولیکی شده و در نتیجه دقت شبیه‌سازی عددی بهتر شده است.

نتایج پروفیل سرعت برای مدل‌های مختلف آزمایشگاهی

بررسی دقت شبیه‌سازی پروفیل سرعت در حالات غیر کلاسیک نیز مشابه پروفیل سطح آب انجام شده و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود میزان خطای کم به دست آمده نشان دهنده تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. در مجموع می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد نرم‌افزار در شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت در جریان پرش هیدرولیکی نیز مناسب بوده است. همچنین مطابق با جدول ذکر شده با قرار گرفتن زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی به دلیل کاهش آشفته‌گی در طول پرش هیدرولیکی مقادیر خطای بدست آمده کاهش یافته است. بطور کلی میزان خطای شبیه‌سازی پروفیل سرعت به صورت عددی $\pm 12/4$ درصد بوده است. این نتایج با پژوهش‌های عباسپور و همکاران (۱)، صاحبی و همکاران (۱۸)، همکاران (۶) و بایون و همکاران (۲) مطابقت دارد.

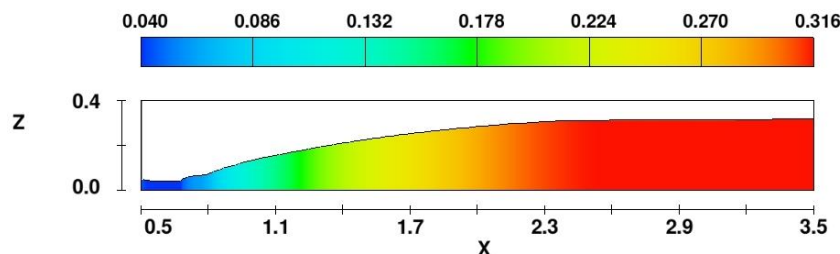
شکل ۸ پروفیل‌های سرعت حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و

نتایج پروفیل سطح آب برای مدل‌های مختلف آزمایشگاهی

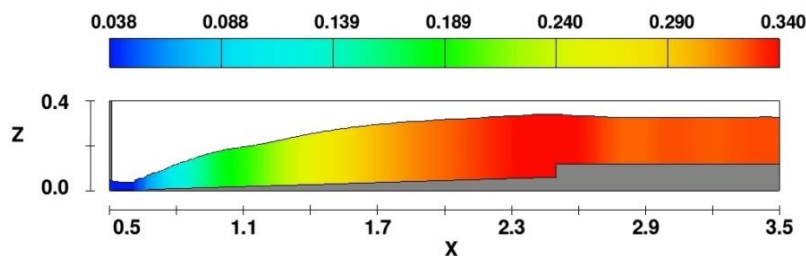
پس از تعیین اندازه مش بهینه (۵/۰ سانتی‌متر) و همچنین مدل آشفته‌گی مناسب (RNG)، دقت شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در دیگر حالت‌های غیر کلاسیک با توجه به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ارزیابی شد. این ارزیابی برای پروفیل سطح آب در شرایط مختلف زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج شبیه‌سازی عددی به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و در مجموع می‌توان گفت که نرم‌افزار در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی بسیار خوب عمل کرده است. همچنین با قرار گرفتن زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی به دلیل کاهش آشفته‌گی در طول پرش هیدرولیکی مقادیر خطای بدست آمده، کاهش نشان داده است. بطور کلی میزان خطا در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب ۵/۳۱ درصد بوده است. این نتایج با پژوهش‌های عباسپور و همکاران (۱)، صاحبی و اقیان و همکاران (۱۸)، نظری علی آبادی و همکاران (۱۳) و ابراهیمی و همکاران (۶) که میزان درصد خطای شبیه‌سازی پروفیل سطح آب را برابر با ۷-۲، ۷، ۳/۵۵ و ۴/۴ بیان کردند، مطابقت دارد. شکل ۵ و ۶ نمونه‌هایی از پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده در مدل عددی را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود در انتهای پرش پروفیل سطح آب دارای نوسان نبوده و پرش به حالت پایدار رسیده است. مقایسه بین پروفیل‌های سطح آب حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی شده در انواع زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی در شکل ۷ قابل مشاهده است. بر اساس این شکل، از

جدول ۴. بررسی دقت شبیه‌سازی پروفیل سطح آب پرش در حالات غیر کلاسیک با استفاده از شاخص‌های آماری

مدل‌ها	نوع پرش	NRMSE	ME	NS	R ²
$\theta=3\%, t=0, z=0$	آزاد	۹/۲۶	۰/۰۱۵	۰/۹۸۵	۰/۹۴
$\theta=3\%, t=0, z=6$	آزاد	۵/۲۹	۰/۰۰۶	۰/۹۹۷	۰/۹۷۶
$\theta=0, t=2, z=0$	آزاد	۶/۴۰	۰/۰۰۷	۰/۹۹۶	۰/۹۷۸
$\theta=0, t=2, z=6$	آزاد	۳/۹۰	۰/۰۰۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۳
$\theta=3\%, t=2, z=0$	آزاد	۲/۷۱	۰/۰۰۳	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷
$\theta=3\%, t=2, z=6$	آزاد	۲/۹۴	۰/۰۰۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۱



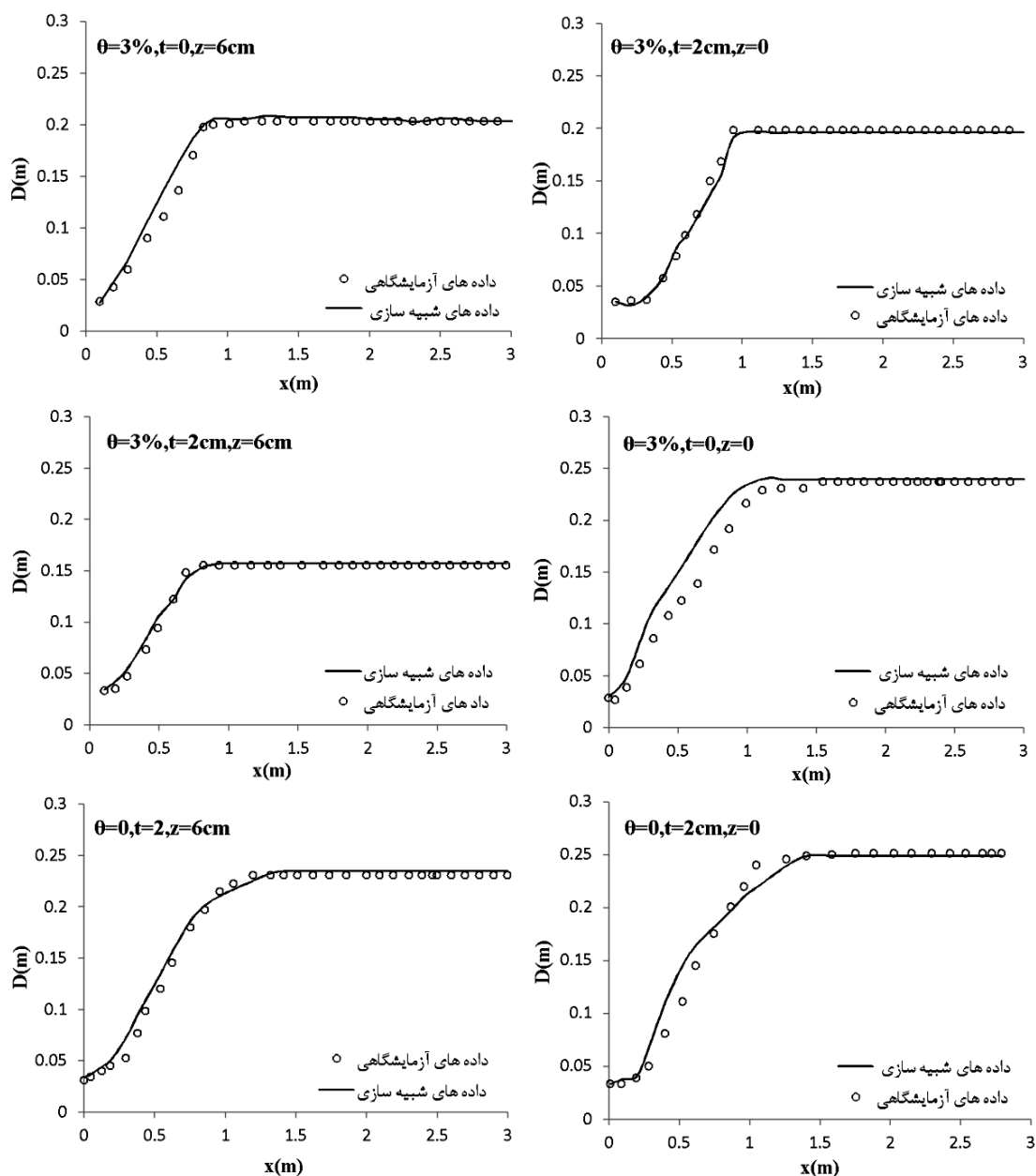
شکل ۵- پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده پرش در حالت کلاسیک



شکل ۶- پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده پرش در حالت وجود شیب معکوس و پله مثبت انتهایی

حالت پایدار و حالت توسعه یافته است. بنابراین با قرار گرفتن زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی به دلیل کاهش آشفتگی در پرش، پروفیل‌های سرعت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند. به عبارت دیگر، نرم‌افزار شبیه‌سازی را با دقت بیشتری انجام داده است. در نهایت پروفیل‌های بی‌بعد سرعت (V/V_m) در مقابل (D/b) حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و

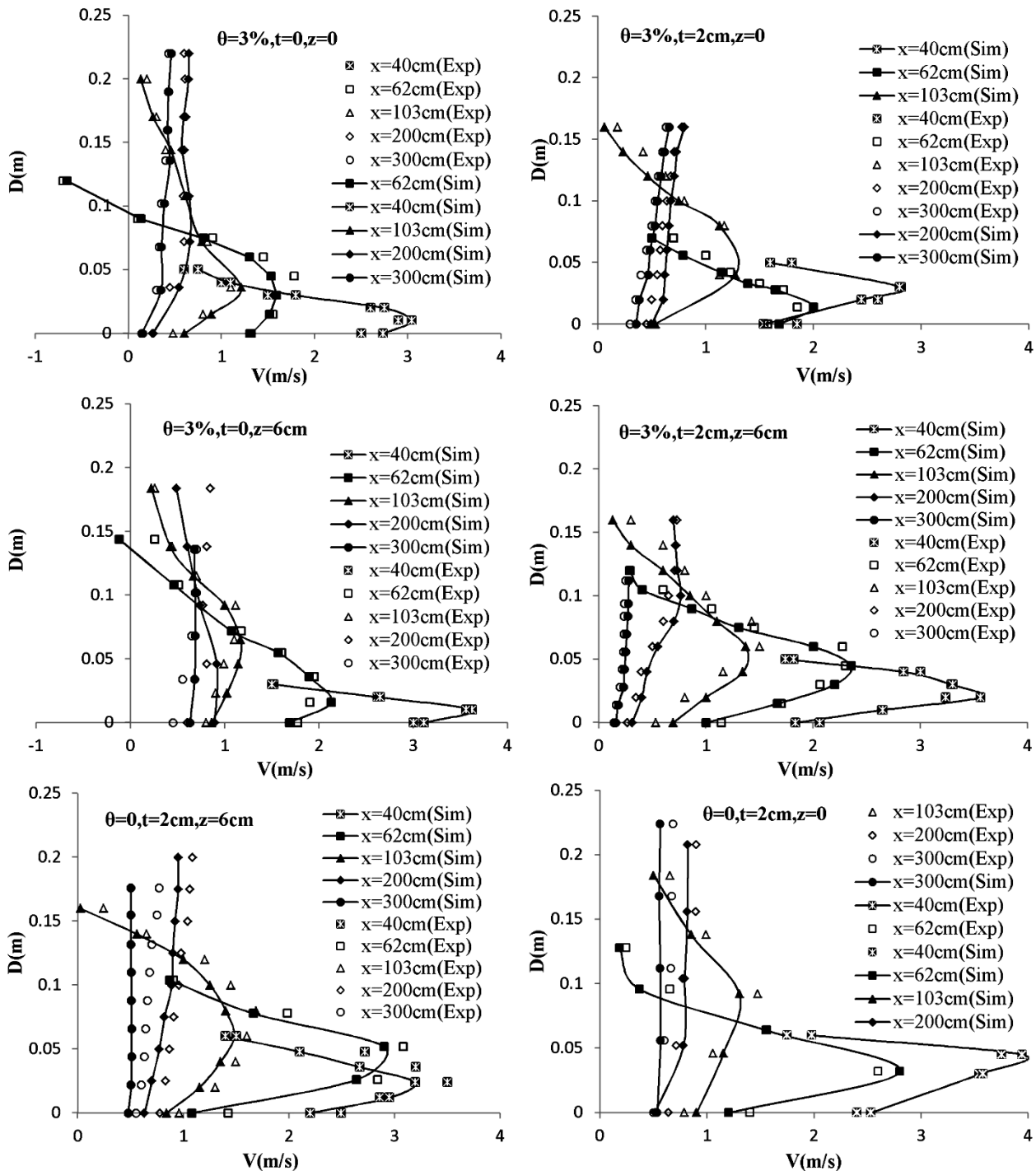
مقادیر شبیه‌سازی شده را در انواع زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی مورد مقایسه قرار داده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با عبور آب از زیر دریچه بالادست سرعت جریان زیاد بوده و با نزدیک شدن به انتهای پرش هیدرولیکی سرعت جریان کاهش یافته و پروفیل سرعت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده به هم نزدیک شده‌اند. این مسئله ناشی از کاهش تلاطم و رسیدن به



شکل ۷. مقایسه پروفیل های سطح آب حاصل از اندازه گیری های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده در انواع زبری، پله مثبت و شیب معکوس (حالات غیر کلاسیک)

جدول ۵. بررسی دقت شبیه سازی پروفیل سرعت برای حالات غیر کلاسیک با استفاده از شاخص های آماری

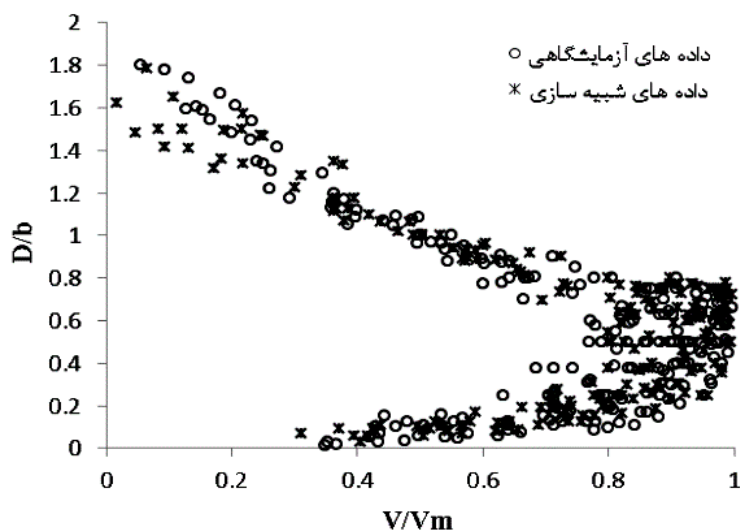
R ²	NS	ME	NRMSE	نوع پرش	مدل ها
۰/۹۷۱	۰/۹۹۶	۰/۱۴۳	۱۳/۱۲	آزاد	$\theta=3\%, t=0, z=0$
۰/۹۷۴	۰/۹۹۱	۰/۰۹۸	۱۲/۰۹	آزاد	$\theta=3\%, t=0, z=6$
۰/۹۸۱	۰/۹۹۲	۰/۱۱۶	۱۲/۸۴	آزاد	$\theta=0, t=2, z=0$
۰/۹۷۷	۰/۹۸۱	۰/۱۰۲	۱۱/۷۵	آزاد	$\theta=0, t=2, z=6$
۰/۹۸۱	۰/۹۸۳	۰/۰۷۹	۱۱/۱۴	آزاد	$\theta=3\%, t=2, z=0$
۰/۹۸۵	۰/۹۹۵	۰/۰۸۶	۱۰/۷۵	آزاد	$\theta=3\%, t=2, z=6$



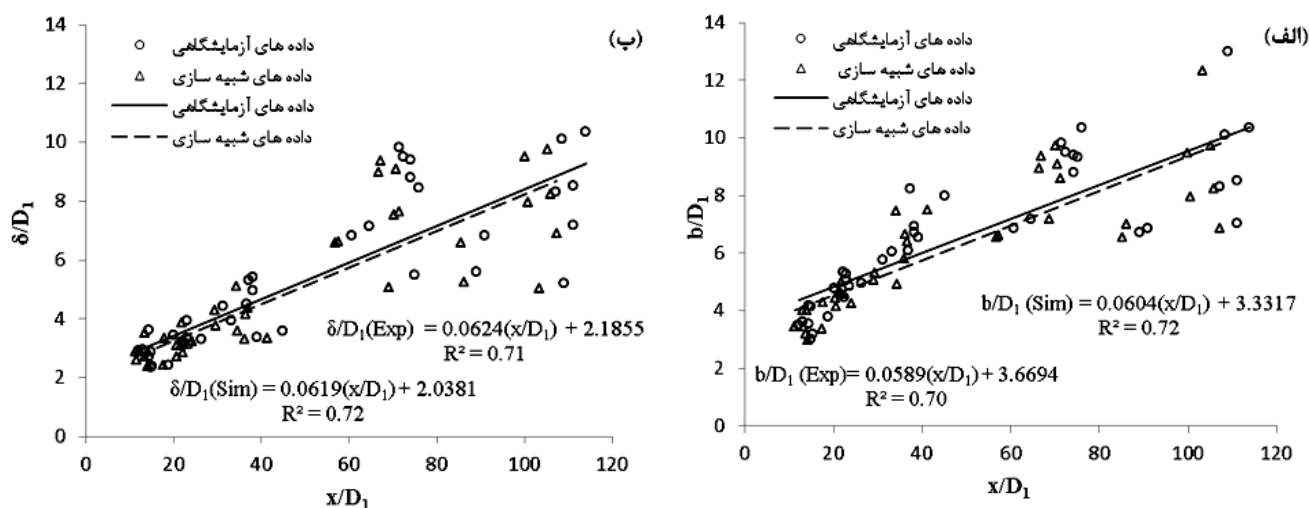
شکل ۸. مقایسه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در انواع زبری، پله مثبت انتهایی و شیب معکوس (حالات غیر کلاسیک)

آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود تطابق مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. بنابراین می‌توان مقدار b و δ (ضخامت لایه مرزی) را با دقت خوبی برآورد کرد.

نتایج شبیه‌سازی شده در شکل ۹ ترسیم شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود بطور کلی نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته‌اند. شکل ۱۰ تغییرات b/D_1 و δ/D_1 در برابر x/D_1 را برای داده‌های



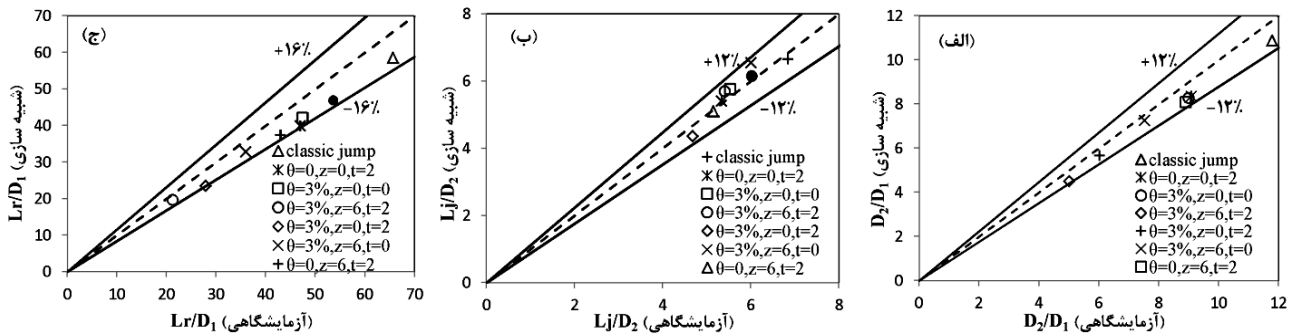
شکل ۹. مقایسه پروفیل‌های بی‌بعد سرعت محاسبه شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول پرش هیدرولیکی



شکل ۱۰. تغییرات الف) b/D_1 و ب) δ/D_1 در برابر x/D_1 برای داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده

حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. مطابق شکل مذکور بیشترین خطای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در تعیین این پارامتر $\pm 12\%$ درصد بوده است. همچنین مقایسه نسبت Lr/D_1 نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در شکل ۱۱- ج نشان داده شده است، تطابق مناسبی بین مقادیر نسبت Lr/D_1 حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. مطابق شکل بیشترین خطا در تعیین این پارامتر نسبت به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی $\pm 16\%$ درصد بوده است.

مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی سایر خصوصیات پرش با انجام شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی آزاد در شرایط مختلف نتایج استخراج و با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۱ مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱۱- الف دیده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارند. میزان خطا در نسبت اعماق مزدوج برابر $\pm 12\%$ درصد است. مقایسه نسبت Lj/D_2 آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در شکل ۱۱- ب نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تطابق مناسبی بین مقادیر نسبت Lj/D_2



شکل ۱۱. مقایسه پارامترهای بی‌بعد مختلف حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، الف) D_2/D_1 ، ب) Lj/D_2 و ج) Lr/D_1

حال افزایش بوده و سپس این میزان تا انتهای پرش کاهش می‌یابد. به‌وسیله این شکل‌ها می‌توان طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی را برآورد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و با دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG انجام شد. با توجه به نتایج کسب شده، مدل آشفتگی RNG نتایج بهتری نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ داشت. همچنین اندازه مش $5/0$ سانتی‌متری به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد. نتایج نشان داد که از ابتدای پرش تا تاج پرش به‌دلیل آشفتگی‌های بسیار زیاد، اندکی اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی وجود داشته است. البته با نزدیک شدن به انتهای پرش به‌دلیل کاهش تلاطم، این میزان اختلاف نیز از بین رفته و داده‌ها بر هم منطبق شده‌اند. ضمن آنکه وجود زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی باعث کاهش تلاطم پرش هیدرولیکی نسبت به حالت کلاسیک شده و در نتیجه دقت شبیه‌سازی عددی افزایش یافته است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که میزان خطا در برآورد نسبت اعماق مزدوج برابر $\pm 12\%$ درصد بوده است. علاوه بر

تنش برشی بستر

دلیل اصلی کاهش عمق پایاب (D_2) و طول پرش هیدرولیکی در پرش بر روی بسترهای زبر، افزایش تنش برشی بستر است. مقدار ضریب نیروی برشی بستر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = F_\tau / \left(\gamma \cdot \frac{D_1^2}{2} \right) \quad (11)$$

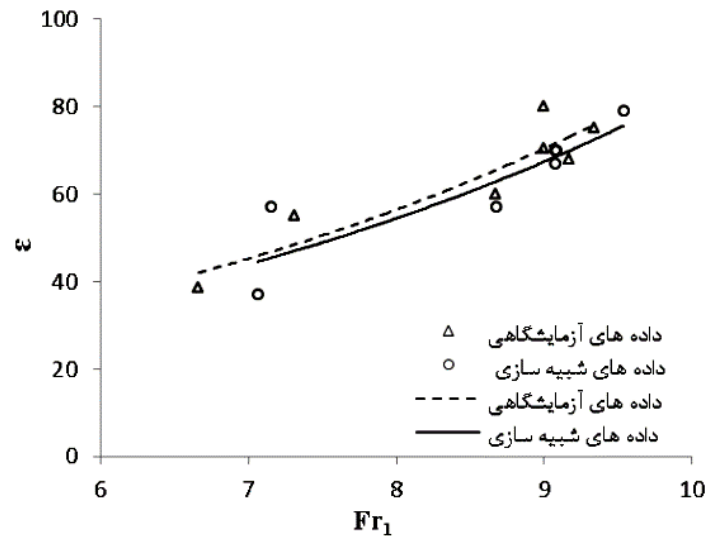
که F_τ مجموع نیروهای برشی بستر با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید (۵):

$$F_1 = (F_1 - F_2) + M_1 - M_2 \quad (12)$$

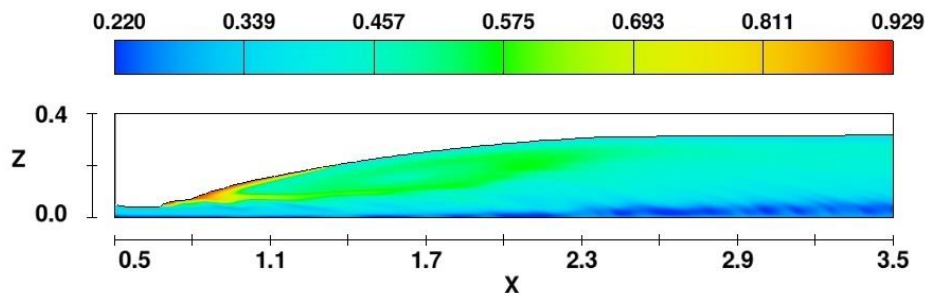
در رابطه فوق $F_2 = 0.5\gamma \cdot D_2^2 \cos \theta$ ، $F_1 = 0.5\gamma \cdot D_1^2 \cos \theta$ ، $M_2 = \rho u_2^2 D_2$ و $M_1 = \rho u_1^2 D_1$ سرعت در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی به‌دست می‌آیند. تغییرات ضریب نیروی برشی (ε) در برابر عدد فرود اولیه برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده اختلاف کمی با یکدیگر دارند.

حجم ورود هوا

شکل ۱۳ حجم ورود هوای شبیه‌سازی شده در طول پرش در نرم‌افزار Flow-3D را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، از ابتدای پرش تا تاج پرش حجم ورود هوا در



شکل ۱۲. مقایسه تغییرات ضریب نیروی برشی (ϵ) بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر شبیه‌سازی شده



شکل ۱۳. حجم ورود هوای شبیه‌سازی شده در طول پرش کلاسیک

کلی می‌توان بیان کرد که نرم‌افزار Flow-3D قادر به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی با دقت مناسب در حالت‌های مختلف است.

این بیشترین خطا در برآورد Lr/D_1 و Lj/D_2 به ترتیب برابر $\pm 16\%$ و $\pm 12\%$ درصد بوده است. همچنین مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که مقادیر δ و ϵ به خوبی توسط نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شده‌اند. بنابراین به طور

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, A., D. Farsadizadeh., A. Hosseinzadeh Dalir and A. A. Sadraddini. 2010. Numerical simulation of hydraulic jump on corrugated bed using FLUENT model. *Water and Soil Science*. 20(2): 83-96.
2. Bayon, A., D. Valero, R. G. Bartual, F. J. V. Moran and A. L. Jimenez. 2016. Performance assessment of Open-FOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling and Software*. 80(1):322-335.
3. Bayon, A., D. and A.L. Jimenez. 2015. Numerical analysis of hydraulic jumps using Open FOAM. *Journal of Hydroinformatics*. 17(4):662-678.
4. Chern, M. J. and S. Syamsuri. 2013. Effect of corrugated bed on hydraulic jump characteristic using SPH Method. *Journal of Hydraulic Engineering*. 139(2):221-232.
5. Ead, S. A. and N. Rajaratnam. 2002. Plane turbulent wall jets in shallow tail water. *Journal of Engineering Mechanics*. 128(2): 143-155.

6. Ebrahimi, S., F. Salmasi and A. Abbaspour. 2013. Numerical study of hydraulic jump on rough beds stilling basins. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 3(1): 19-24.
7. Hassanpour, N., A. Hosseinzadeh Dalir and D. Farsadizadeh. 2017. An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*. 9(12). 945-960
8. Ghasemzadeh, F. 2013. Simulation of hydraulic question in Flow-3D. Naavar Publications. Tehran.
9. Gonzalez, A and F. Bombardelli. 2005. Two-Phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment. *Proceeding of the Congress- International Association for Hydraulic Research*. 28-29.
10. Kaheh, M. and A. A. Dehghani. 2013. Numerical simulation of hydraulic jump on corrugated beds. *Journal of Water and Soil Conservation*. 20(5): 40-60.
11. Liu, M., N. Rajaratnam and D. Zhu. 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(6): 511-520.
12. Minnan, L., R. Nallamuthu and D. Z. Zhu. 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude Numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 129(5): 500-510.
13. Nazari Ali Abady, Kh., A.A. Akhtari, and A. Gord Noshahri. 2017. Effect of rectangular strip roughness on hydraulic jump characteristic in diverging rectangular sections with FLOW-3D software. *Modares Civil Engineering Journal*. 17(4) :251-262.
14. Nazari Ali Abady, Kh and A. A. Akhtari. 2017. Effect of vertical and curve blocks on hydraulic jump characteristic in diverging rectangular sections with FLOW-3D software. *Modares Civil Engineering Journal*. 17(6):269-280.
15. Pagliara, S and Palermo, M. 2015. Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-sloped beds. *Journal of Hydraulic Research*. 53(2):243-252.
16. Papageorgakis, G. C. and Assanis, D. N. 1999. Comparison of linear and nonlinear RNG-based models for incompressible turbulent flows. *Journal of Numerical Heat Transfer*. 35(1): 1-22.
17. Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R. A., 2014. Experimental investigation of effect of roughness and adverse slope on length and roller length of hydraulic jump. *Iranian Water Researches Journal*. 8(14): 155-164 .
18. Sahabi Vayghan, F., D. Farsadi, M. Esmaeili Varaki, A., Abbaspour and A., Hosseinzadeh. 2013. A comparison of using turbulence models in simulating hydraulic jump in diverging rectangular sections with FLUENT software. *Water and Soil Science*. 27(1): 235-246.
19. Sarker, M. A. and D. G. Rhodes. 2002. Physical modeling and CFD applied to hydraulic jump. Cranfield University Report.
20. Shojaeian, Z and S. M. Kasegipour. 2013. Numerical modeling of hydraulic jump in stilling basin of Nemrood reservoir dam. *Water and Soil Science*. 23(2): 283-295.

Numerical Simulation Results of Hydraulic Jump in Different Conditions of Roughness, Adverse Slope, and Positive Step

N. Pourabdollah*, M. Heidarpour, J. Abedi-Koupai¹

(Received: August 5-2018 ; Accepted: December 26-2018)

Abstract

Hydraulic jump is used for dissipation of kinetic energy downstream of hydraulic structures such as spillways, chutes, and gates. In the present study, the experimental measurements and numerical simulation of the free hydraulic jump by applying Flow-3D software in six different conditions of adverse slope, roughness, and positive step were compared. It should be noted that two turbulence models including k- ϵ and RNG were used for numerical simulation. Based on the results, simulation accuracy using the RNG model was more than the k- ϵ model. The statistical indices of NRMSE, ME, NS, and R² for comparing the water surface profile were obtained at 34.3, 0.0052, 0.995, and 983 for the application of the RNG model, respectively. Also, using the RNG model, the values of these indices for the velocity profile were obtained at 14.92, 0.127, 0.9982, and 962, respectively. In general, the error of the simulated water surface and velocity profile were obtained at 5.31 and 12.4 percent, respectively. Moreover, the maximum error of the numerical simulation results of D_2/D_1 , L_j/D_2 , and L_r/D_1 was ± 12 , ± 12 , and 16%, respectively. Therefore, the use of Flow-3D software with the application of the RNG turbulence model is recommended for numerical simulation of the hydraulic jump in different situations.

Keywords: Hydraulic jump, Numerical simulation, Water surface profile, Velocity profile, Turbulence models

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: nahid7760@yahoo.com