

بررسی مدل عددی سلول‌های جریان‌های ثانویه در کانال‌های دوزنقه‌ای و تأثیر آن بر پرش هیدرولیکی

بهادر فاتحی نوبریان^۱

هومن حاجی‌کندی*^۲

یوسف حسن‌زاده^۳

سعید جمالی^۴

چکیده

مطالعه سلول‌های جریان‌های ثانویه امری پرهزینه و نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی مجهزی است، لذا پژوهشگران، دینامیک سیالات محاسباتی CFD را روشی مقرون‌به‌صرفه برای مدل‌سازی می‌دانند. در تحقیق حاضر ویژگی‌های سلول‌های جریان‌های ثانویه در کانال‌های دوزنقه با زوایای جانبی ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه، تحت تأثیر ۵ دبی مختلف در نرم‌افزار Flow3D شبیه‌سازی شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داده است که رابطه عکس بین سرعت ثانویه در جهت عرض کانال (X) و سرعت در جهت عمق جریان (Z) وجود دارد. علاوه بر این مشاهده شد که با افزایش شیب دیواره جانبی کانال از ۴۵ به ۷۵ درجه سرعت جریان ثانویه در امتداد (X) افزایش یافته و در امتداد (Z) کاهش می‌یابد. در ضمن مقادیر سرعت‌های جریان ثانویه در امتداد (X) و (Z) با افزایش عدد فرود به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. حداکثر سرعت جریان‌های ثانویه در جهت عمود بر محور جریان (X) در مقطع ۴۵ درجه به مقطع ۷۵ درجه در عدد فرود ۱۰، ۷۱٪ است و حداکثر سرعت جریان ثانویه در جهت عمود بر سطح جریان (Z) در مقطع ۷۵ درجه نسبت به مقطع ۴۵ درجه در عدد فرود ۲، ۸۸٪ بوده است. علاوه بر این مشاهده شد با افزایش شیب دیواره جانبی کانال افت انرژی نیز افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی

جریان‌های ثانویه، کانال‌های دوزنقه، پرش هیدرولیکی، تنش برشی مرز

۱. دانشجوی دکتری عمران آب، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

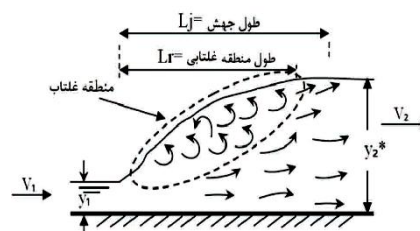
*۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران h_hajikandi@iauctb.ac.ir

۳. استاد، گروه مهندسی عمران-آب، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مقدمه

پرش هیدرولیکی پدیده‌ای است که در آن، جریان در فاصله کوتاهی از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی تبدیل می‌شود. پرش هیدرولیکی در شبکه‌های آبیاری و توزیع آب، در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریزها و دریچه‌ها اتفاق می‌افتد، طی این پدیده عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاهی به میزان فراوانی افزایش یافته و در نتیجه ضمن ایجاد افت محسوس انرژی، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. با توجه به اهمیت کانال‌ها در بحث انتقال آب و وابستگی آن به سیستم‌های مدیریت آبی بررسی شرایط جریان در آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به گونه‌ای که سیستم‌ها انتقال آب یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی در تمامی سازه‌های هیدرولیکی بشمار می‌رود. در شکل (۱) شمای کلی پدیده پرش هیدرولیکی نشان داده شده است. از مهم‌ترین موضوعات بررسی جریان در کانال‌ها، می‌توان به اثر مؤلفه‌های عرضی سرعت روی جریان اشاره نمود، که بارزترین این اثرات ایجاد سلول‌های جریان ثانویه است. در حال حاضر روش‌هایی که برای محاسبه و طراحی کانال‌ها وجود دارد اثر جریان‌های ثانویه و در نتیجه توزیع نیروهای هیدرودینامیکی موجود روی پیرامون مرطوب را نادیده می‌گیرند و این مسئله یکی از مهم‌ترین دلایل تغییر شکل مقطع عبوری، کاهش قابلیت اعتماد عملکرد و ظرفیت کانال‌ها است (اژدری^۱ و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل (۱): شمای کلی پرش هیدرولیکی در یک کانال صاف

بسیار اندک است. مهم‌ترین آزمایش در مورد جهش‌های هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه را می‌توان به تحقیقات هگر اختصاص داد، هگر^۲ و همکاران (۱۹۸۹) و ماهسون^۳ (۲۰۱۲) طیف‌های مختلفی از دبی جریان را در مقطعی دوزنقه‌ای با زاویه جانبی ۴۵ درجه بر روی پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. جانسون^۴ و همکاران در سال (۲۰۱۶) تحقیقاتی بر روی پرش‌های هیدرولیکی به روش هیدرودینامیک ذرات نرم انجام دادند، آن‌ها دریافتند که دامنه نوسانات پرش با افزایش اعداد فرود بیشتر می‌شود. با این حال، ویژگی‌های جریان ایجاد شده در کانال‌های دوزنقه‌ای کاملاً متفاوت بوده و به جای داشتن مسیر مستقیم در پنجه افقی پرش، در کانال دوزنقه‌ای بال‌هایی به شکل گوه‌ای سه‌گوش بر روی هر طرف از دیواره جانبی آن قرار دارد. از مطالعات تجربی انجام شده در زمینه‌ی بررسی سلول‌های جریان ثانویه و اثرات ناشی از آن‌ها می‌توان به بررسی آزمایشگاهی نزوه^۵ و همکاران (۱۹۸۵) اشاره کرد. آن‌ها نشان دادند ساختار اصلی جریان‌های ثانویه به صورت چشمگیری تغییر نمی‌کند، اما مقیاس عرضی سلول‌ها بزرگ‌تر می‌شود. البته آن‌ها این بررسی را روی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای انجام ندادند. بررسی توزیع تنش برشی مرزی در کانال‌های دوزنقه‌ای منشوری نیز توسط برخی محققان بررسی شده است که در این میان می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود، داسگوپتا^۶ و همکاران (۲۰۱۵) و جابرزاده^۷ و همکاران (۱۳۸۷)، برای بررسی توزیع جانبی سرعت و تنش برشی مرزی می‌توان از تحقیقات خداشناس^۸ و همکاران (۲۰۰۸) بهره برد. با توجه به این مهم که کانال‌های دوزنقه‌ای معمول‌ترین شکل مقطع در مهندسی آب برای انتقال آب به شمار می‌روند، کومار^۹ و همکاران (۲۰۱۳) طول پرش و افت انرژی در پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی جریان سیال که مبتنی بر محاسبات CFD هستند در مقایسه با

۲. Hager et al.

۳. Muhsun

۴. Jonsson et al.

۵. Nezu et al.

۶. Dasgupta et al.

۷. Jaberzadeh et al.

۸. Khodashenas et al.

۹. Kumar, G. et al.

اگرچه تحقیقات زیادی در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال با مقاطع مستطیلی انجام شده، اما اطلاعات موجود درباره خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقاطع غیر مستطیلی

۱. Azhdari et al.

به صورت عددی و به کمک نرم‌افزار Flow3D انجام شده است.

جریان‌های ثانویه سلول‌های

جریان‌های ثانویه جریان‌هایی هستند که در صفحه‌ی مقطع جریان و عمود بر راستای جریان و یا حول محوری عمود بر صفحه‌ی مقطع جریان به وجود می‌آیند. این گونه جریان‌ها در انحناها به جریان‌های ثانویه قوی موسوم می‌باشند ولی در کانال‌های بدون انحنا در پلان، به جهت تأثیر نامنظمی مقاطع به جریان‌های ثانویه ضعیف موسوم هستند (حسینی^۶، ۱۳۹۴). در حقیقت یک جریان چرخشی در یک مقطعی از جریان به سه حالت اصلی چرخش، حول محور طولی، حول محور عمقی، حول محور عرضی تقسیم می‌شود.

نزو و همکاران^۷ (۱۹۸۵)، بررسی جریان‌های ثانویه در مهندسی هیدرولیک و در جریان کانال‌های روباز را به دلیل اثر این جریان‌ها روی میدان جریان، قانون اصطکاک و تشکیل اشکال سه‌بعدی بر روی بستر اصلی بسیار پراهمیت می‌دانند.

معادلات جریان‌های ثانویه

علت ایجاد جریان‌های عرضی در جریان طولی یکنواخت، ناهمسانی تنش‌های رینولدز و به‌طور اساسی مؤلفه‌های عمودی آن است، دو مکانیسم اصلی به وجود آورنده‌ی جریان‌های چرخشی در جهت جریان به شکل زیر بیان می‌شود (یعقوبی^۸ و همکاران، ۱۳۸۶):

- ۱- انحراف تنش‌های برشی اصلی به‌وسیله‌ی یک گرادیان فشار عرضی و یا نیروی جسمی (کانال‌های منحنی شکل).
 - ۲- ناهمسانی و نوسانات آشفتگی در صفحه‌ی عمود بر محور چرخش.
- معادله‌ی چرخش طولی در جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\mathbf{v} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\bar{v}^2 - \bar{w}^2) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \bar{v} \mathbf{w} + \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \xi \quad (1)$$

روش‌های تجربی دارای چند مزیت عمده می‌باشند، مانند کاهش اساسی در زمان و هزینه طراحی، افزایش توان مطالعه سیستم‌های پیچیده که امکان انجام آن‌ها مشکل است، افزایش سطح جزییات در ارائه نتایج (قاسم‌زاده^۱، ۱۳۹۴). جنبه اصلی نوآوری پژوهش حاضر مطالعه الگوی جریان‌های ثانویه در پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای و تأثیر آن‌ها بر مؤلفه‌های پرش هیدرولیکی است. می‌دانیم که در کانال‌ها جریان‌های ثانویه همیشه وجود دارند. این جریان‌ها، جریان‌هایی هستند که در صفحه عمود بر محور جریان اتفاق می‌افتند. در کانال‌های خم‌دار برخورد جریان با دیواره بیرونی قوس باعث افزایش فشار سکون^۲ شده و جریان ثانویه قوی ایجاد می‌کند. این جریان‌ها باعث تغییر مورفولوژی^۳ بستر و در نتیجه تغییر توزیع سرعت و تنش برشی در بستر می‌شوند. در کانال‌های مستقیم نیز جریان‌های ثانویه ناشی از اثرات دیواره ایجاد می‌شوند. این جریان‌ها در کانال‌های دوزنقه‌ای، مهم‌تر از کانال‌های مستطیلی هستند. شیب دیواره جانبی سرعت حرکت جانبی سیال در جهت عمود بر محور جریان را افزایش می‌دهد. مطالعات هگر بر روی پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای بیانگر وجود نوعی جریان غلتشی در کف کانال و در طول محدوده پرش بوده است که به جریان غلتشی کف^۴ شهرت دارد. این جریان در کنار جریان غلتشی سطح^۵ منشأ اصلی استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای محسوب می‌شود. درحالی‌که در کانال مستطیلی فقط جریان غلتشی سطح وجود دارد. به همین دلیل افت انرژی در کانال دوزنقه‌ای بیشتر از کانال مستطیلی است. عامل ایجاد جریان غلتشی کف، جریان‌های ثانویه است. الگوی این جریان‌ها در طی پرش هیدرولیکی تغییر می‌کند؛ بنابراین تابع عدد فرود جریان اصلی می‌باشند. با توجه به اینکه تاکنون مطالعه جامعی بر روی جریان‌های ثانویه در پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای صورت نگرفته است، لذا نوآوری اصلی کار حاضر، پرداختن به این موضوع است. این مطالعه به دلیل توانایی مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده،

۱. Ghasemzadeh

۲. Stagnation Pressure

۳. Morphology

۴. Bottom Roller

۵. Surface Roller

۶. Hosseini

۷. Nezu et al.

۸. Yaaghoubi et al.

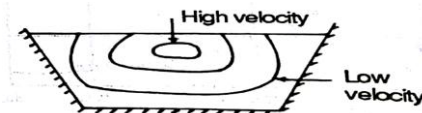
به طوری که در آن:

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2)$$

V و W به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در عرض کانال (Z) و عمود بر بستر کانال (Y) و یا همان مؤلفه‌های جریان ثانویه هستند که به کمک تابع جریان Ψ به صورت زیر بیان می‌شود.

$$v = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (3)$$

و در رابطه (۱) V لزجت سینماتیکی سیال و \overline{W} تنش برشی رینولدز و \overline{V}^2 و \overline{W}^2 تنش‌های عمودی رینولدز می‌باشند. تفاضل تنش‌های عمودی نشان‌دهنده ساختار اصلی جریان‌های ثانویه است که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): خطوط بدون بعد $(\overline{W}^2 - \overline{V}^2) / U_{\max}^2$ (راجو، ۲۰۰۳)

لازم به ذکر است در تحقیق حاضر متغیرهای Z و Y به ترتیب با متغیرهای X برای سرعت در عرض کانال و Z برای عمود بر بستر کانال مشخص شده است.

مدل‌سازی سلول‌های جریان‌های ثانویه

برای مدل‌سازی صحیح جریان‌های ثانویه ابتدا لازم است یک مدل عددی از میانگین سرعت در مقاطع مختلف انجام داده شود تا بهتر بتوان مرزهای تغییر سرعت در آن را به دست آورد. البته پیشتر محققان بسیاری برای مدل‌سازی تنش‌های برشی در مقاطع هندسی مختلف تلاش‌هایی انجام داده‌اند ولی به دلیل عدم بهره‌گیری از روش‌های دینامیک سیالات در نتایج موفقیت لازم را کسب نکرده‌اند، برای به دست آوردن یک مدل صحیح CFD و ارتباط صحیح بین حل دقیق و همگرایی پاسخ‌ها از نرم‌افزار Flow3D که مبتنی بر طیف هندسی جریان و بررسی خصوصیات جریان از طریق شبکه‌بندی همگن در توزیع مقطع جریان صورت گرفته است.

شبکه حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعبی است که اساس حل این نرم‌افزار را تشکیل می‌دهد، شاید در نگاه اول این نوع شبکه‌بندی یک محدودیت به نظر بیاید، در صورتی که اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه و نظم مناسب و ثانیاً به دلیل به کارگیری دو ابزار VOF^۲ تحت عنوان حجم جریان و Favor^۳ تحت عنوان روش کسر مساحت - حجم مانع در مدل Flow3D که از روش‌های حجم محدود هستند، یک مزیت خواهد بود، روش VOF و Favor مثال‌هایی از روش‌های حجم محدود هستند، در این روش‌ها ناحیه‌ای که باید مدل شود ابتدا به شبکه‌ای از المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود، برای المان‌های حاوی سیال، مقادیر عددی برای هر کدام از متغیرهای جریان نظیر فشار، دما و سرعت در داخل آن‌ها نگهداشته می‌شود مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچ‌گونه تغییر شکل و جابجایی شبکه وجود ندارد. روش Favor نیز برای تعیین هندسه بکار برده می‌شود، همان‌طور که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال بکار برده می‌شود و از طرفی این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده است، نیز استفاده شود.

از آنجاکه هندسه مجرای یک جریان ثابت است لذا جز حجمی V_f و جز سطحی A_f در طول مدل‌سازی تغییر نمی‌کند. زمانی که این دو روش باهم ترکیب می‌شوند، جز حجمی سیال، به عنوان بخشی از جز خالی سلول V_f که توسط بدنه صلب اشغال نشده است، تعریف می‌شود، لذا اگر حجم یک سلول برابر Γ باشد، حجم واقعی سیال در آن سلول عبارت است از $(FV_f)\Gamma$ ، (Flow3D، ۲۰۱۵). شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود که مشکلات روش‌های قبلی که عمدتاً مبتنی بر آزمون و خطا بود برطرف شده است. معادلات پیوستگی، معادلات مومنوم، تنش برشی دیواره‌ها، معادلات انرژی سیال و روابط ورود هوا جز معادلاتی هستند که اساساً روش کار این نرم‌افزار را شکل می‌دهند. در تحقیق حاضر که بر روی تأثیر سلول‌های جریان‌های ثانویه بر روی پدیده پرش هیدرولیکی صورت گرفته است، سه مقطع دوزنقه‌ای با زوایای جانبی ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و با طیف اعداد فرود متفاوت تحت اثر پنج دبی

۲. Volume of Flow

۳. Fractional Area-Volume Obstacle Representation

۴. Flow- 3D User Manual

ابعاد آن و محل قرار گرفتن دریاچه به منظور ایجاد پرش هیدرولیکی مناسب و میزان بازشدگی زیر دریاچه در جدول (۱) آمده است که برای مقایسه نتایج عددی با نتایج امید و همکاران (۲۰۰۷) ابعاد و مشخصات هندسی کانال با کانال مورد استفاده در آزمایش‌ها منطبق شده است.

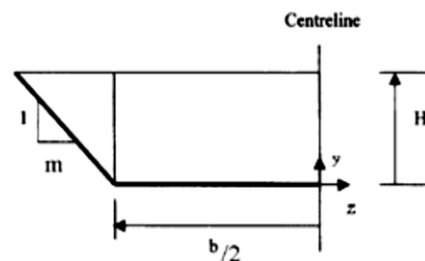
مختلف ۹۰، ۷۰، ۵۰، ۳۰ و ۱۰ لیتر در ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است که انتخاب سه زاویه جانبی متفاوت در یک فلوم دوزنقه‌ای یکی از جنبه‌های نوآوری این تحقیق را نشان می‌دهد و عمدتاً در پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده است و همچنین مشخصات هندسی کانال و

جدول (۱): مشخصات هندسی کانال مورد مدل‌سازی

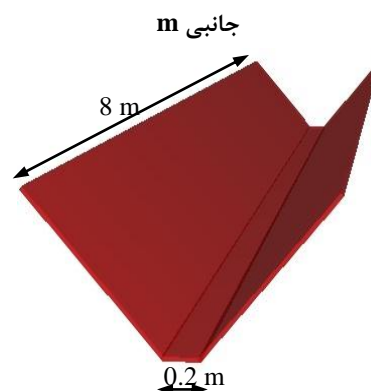
نوع مقطع دوزنقه	طول کانال (متر)	عرض کف کانال (متر)	ارتفاع آب در کانال (متر)	ارتفاع کانال (متر)	بازشدگی زیر دریاچه (متر)	محل دریاچه از ابتدای کانال (متر)
m=۱ m=۰/۵۸ m=۰/۲۵	۸	۰/۲	۰/۳۵	۰/۷۵	۰/۰۳۵	۰/۲

روش‌های عددی به میزان دقت در اندازه‌گیری مش بندی و شبکه‌بندی محیط بستگی داشته و تعیین تعداد مش بهینه تأثیر بسزایی در دقت و زمان محاسبات خواهد داشت، هرچند تعداد سلول‌های شبکه‌بندی بر اساس اصول هر نرم‌افزار متفاوت است ولی ساختار مش بندی بایستی با مشخصات هندسی کانال مورد استفاده در محاسبات و همچنین باید با اصول روش حجم محدود سازگار بوده باشد، به این منظور تعداد سلول‌های استفاده شده در هر سه مقطع هندسی بسته به شرایط مرزی و جریان عبوری متفاوت بوده است. با توجه به وجود دریاچه در فاصله ۰/۲ متری در ابتدای هر کدام از کانال‌ها احتمال آشفتگی جریان تا لحظه رسیدن هد مخزن به ارتفاع لازم، به مسئله‌ای پیچیده تبدیل می‌شود که با بهینه و تعادل سازی در ایجاد گره‌ها و شبکه‌بندی سلول‌ها این مشکل مرتفع گشته است؛ به طوری که در مجموع سه میلیون و دویست و بیست هزار سلول مش برای سه مقطع کانال استفاده شده است که به طور جداگانه برای کانال ۴۵ درجه در مجموع پنج دبی، یک میلیون و هشتصد هزار سلول مش و برای کانال ۶۰ درجه یک میلیون و صد هزار و برای کانال ۷۵ درجه ۳۲۰ هزار سلول مش بکار رفته است که به دلیل صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی هگر و همکاران، تعداد مش بندی کانال ۴۵ درجه به منظور دقت در عمل بیشتر انتخاب شده است و همچنین سهم مقطع ۶۰ درجه از دیگر مقاطع به دلیل آشفتگی جریان قبل از دریاچه و همچنین فشرده بودن سلول‌های جریان در کنار هم کمتر انتخاب شده است که در مجموع باعث افزایش سرعت حل نیز شده است. جهت

با توجه به مشخصات هندسی کانال دوزنقه که در جدول (۱) آمده است، m به عنوان شیب جانبی کانال فرض شده که در شکل (۳) به طور شماتیک نشان داده شده است. در این تحقیق مقدار عددی شیب جانبی بکار رفته، برای سه زاویه ۴۵ و ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب برابر مقدار ۱ و ۰/۵۸ و ۰/۲۶ بوده است و همچنین هندسه کانال مورد بررسی در محیط نرم‌افزار Flow3D به صورت شماتیک با ابعاد بکار رفته شده، در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۳): شمای کلی از نصف سطح مقطع دوزنقه با شیب

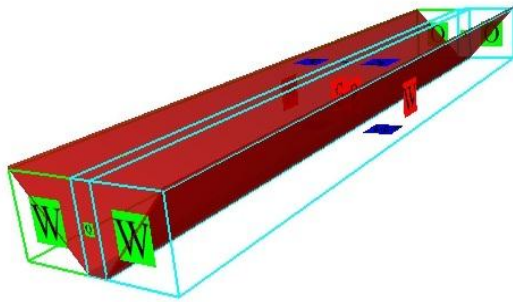


شکل (۴): شمای کلی هندسی مدل در فضای نرم‌افزار

Flow 3D

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود کانال دوزنقه‌ای مورد مطالعه با ابعاد عرض کف و طول کانال به طور یکنواخت فرض شده است، به طوری که دقت محاسبات در

تعریف گردیده است که تمامی این شرایط شامل هر سه مقطع بررسی شده دوزنقه بوده است.



شکل (۵): تعیین شرایط مرزی محدوده کانال

مدل آشفتگی (RNG)^۳

به طور معمول مدل‌های آشفتگی زیادی برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرند، هدف اصلی هر مدل آشفتگی، ایجاد مکانیزمی برای تخمین اثر نوسانات آشفتگی بر روی کمیت‌های متوسط جریان است. معمولاً این تأثیر با استفاده از عبارات‌های اضافی در معادلات توسعه داده شده برای انتقال جرم، مومنتوم و انرژی میانگین توصیف می‌شود (بایون^۴، ۲۰۱۶). این مدل‌ها بر اساس روش عمل و تعداد معادلات دیفرانسیل مورد استفاده برای کمیت‌های آشفتگی به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که از جمله آن‌ها، مدل دارای معادله تنش است که این مدل‌ها بر پایه گروه‌های نرمال شده رینولدز استوار است. این مدل شامل روش‌های آماری برای استحصال معادلات متوسط گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی نظیر انرژی جنبشی و نرخ اتلاف آن است که بهترین مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی پرفش هیدرولیکی می‌تواند محسوب شود. مدل RNG از روابطی نظیر روابط موجود در مدل $k-\epsilon$ استفاده می‌کند. با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل $k-\epsilon$ که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند. به منظور تعیین مدل اغتشاشی مناسب، مسئله مورد نظر یک‌بار با مدل $K-\epsilon$ و یک‌بار هم با مدل RNG شبیه‌سازی شد. در اشکال (۶) و (۷) به ترتیب نسبت تغییرات اعماق مزدوج در مقابل عدد فرود و تغییرات طول پرفش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود ناشی از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی هگر که صرفاً مربوط به کانال ۴۵ درجه می‌شد مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده

انتخاب اندازه مش بهینه ابتدا در کانال ۴۵ درجه از مش درشت استفاده شد. برای این منظور از یک میلیون سلول استفاده شد. سپس تعداد سلول‌ها به یک میلیون و پانصد هزار و بعد به دو میلیون افزایش یافت. مقایسه نسبت اعماق مزدوج، طول پرفش و افت انرژی در هر سه حالت صورت گرفت. نتایج نشان دادند که تغییرات از حالت مدل‌سازی با یک میلیون و پانصد هزار سلول مش به دو میلیون سلول ناچیز است. در مرحله بعد یک میلیون و هشتصد هزار سلول انتخاب شد و مشاهده شد که نتایج با مدل‌سازی با دو میلیون سلول اختلاف قابل توجهی نخواهد داشت؛ بنابراین اندازه مش بهینه که نتایج مستقل از ابعاد مش داشته باشد برابر یک میلیون و هشتصد هزار سلول انتخاب شد.

شرایط مرزی^۱

تمامی محیط‌ها و سیستم‌های فیزیکی در محدوده عکس‌العمل خود دارای مرز هستند که شرایط جریان در آن محدوده تعریف می‌شود و معادلات جریان شامل همان محدوده و کران است، در مدل Flow3D مقادیر k_T و ϵ_T در هر سلولی از شبکه که بخشی از یک سطح آن یا کل یک سطح آن توسط مرز صلب احاطه شده است، مشخص می‌شود. در روش معمول برای تعیین مقادیر مرزی برای کمیت‌های k_T و ϵ_T تعادل موضعی بین فرآیندهای تولید و زوال تنش برشی متلاطم و یک قانون پروفیل سرعت دیواره فرض می‌شود (بایون^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین تنش‌های مماسی در مرز دیواره‌های جانبی به دلیل صفر بودن سطح جریان، صفر است. به‌طور کلی شرایط مرزی در محاسبات CFD در نرم‌افزار Flow3D به هشت نوع تقسیم می‌گردند که اساساً تمامی آن‌ها در یک سیستم بکار نمی‌روند، در تحقیق حاضر همان‌طوری که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود شرایط مرزی محدوده جریان و کانال مربوطه مشخص شده است که این محدوده برای بخش ورودی فلوم از شرایط مرزی Q یا دبی ورودی و برای مرز خروجی جریان از فلوم شرط مرزی O (Out) یا دبی خروجی استفاده شده است، در ضمن برای دیواره‌های کناری فلوم به دلیل عدم وجود جریان و بسته بودن محدوده، شرط مرزی جریان صفر یا همان W (Wall) (Wall)

۳. Renormalized group model

۱. Boundary Condition

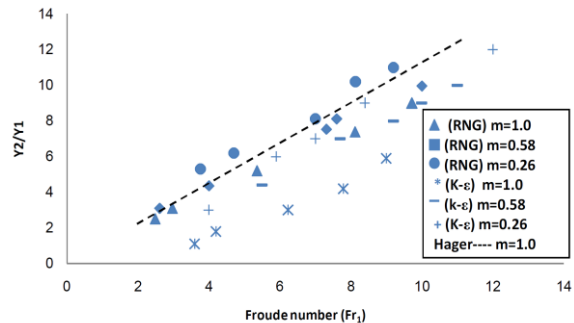
۲. Bayon et al.

ورود هوا در اثر تلاطم و آشفتگی سطح جریان رخ می‌دهد، ولی ضرورتی به استفاده از مدل‌های آشفتگی برای شبیه‌سازی ورود هوا وجود ندارد. برای شبیه‌سازی پدیده ورود هوا در این تحقیق ضریب نرخ ورود هوا ۰/۵ در نظر گرفته شده است که برای اغلب پدیده‌های هیدرولیکی با سطح آزاد مناسب است (Flow3D, 2015).

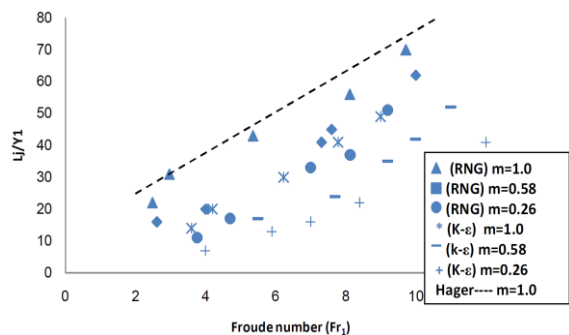
نتایج حاصل از مدل‌سازی

به‌منظور ایجاد پرش هیدرولیکی در طول کانال چندین حالت مختلف هیدرولیکی مدل‌سازی عددی شده است که بهترین نتیجه از نظر هندسه پرش و هم‌ازلحاظ نتایج عددی و اینکه پرش هیدرولیکی موردنظر تمامی مشخصات یک پرش صحیح را بر اساس تحقیقات هگر که بر روی کانال‌های دوزنقه‌ای ۴۵ درجه داشته است مدل حاضر بوده است، بر اساس تعریف، تبدیل جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تحت پنج دبی مختلف که اعداد فرود متفاوتی در هر سه زاویه جانبی مورد بررسی قرار گرفته است، هدفی از این پژوهش بوده که بررسی دقیق‌تری بر روی سلول‌های جریان‌های ثانویه و خصوصیات آن‌ها و تأثیر آن بر پرش هیدرولیکی انجام شده است. پرش‌های بررسی شده در تحقیقات گذشته از جمله پرش‌های کلاسیک بوده که بر روی مقاطع مستطیلی صورت گرفته است، لذا بر همین اساس سه زاویه مختلف دوزنقه‌ای بر اساس جدول (۱) انتخاب شده است که در ابتدا مقطع با زاویه ۷۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته است که به دلیل نزدیک بودن خصوصیات هندسی آن به کانال مستطیلی بیشتر خصوصیات جریان بعد از مدل‌سازی در مقطع ۷۵ درجه مشابه کانال مستطیلی بوده است، دو زاویه دیگر یعنی ۶۰ و ۴۵ درجه نیز برای مدل عددی در این تحقیق انتخاب گردیده است، انتخاب زاویه ۴۵ درجه بیشتر بدان جهت بوده است که محققانی نظیر هگر و همکاران^۵ (۱۹۸۹) این زاویه را برای بررسی پرش هیدرولیکی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده بودند و رفتار مقطع دوزنقه و تأثیر آن بر روی پرش را مطالعه کرده‌اند. در این پژوهش نیز یکی از مقاطع مورد بررسی مقطع ۴۵ درجه بوده است که تأثیر سلول‌های جریان‌های ثانویه بر روی پرش هیدرولیکی بررسی شده و به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی صورت

می‌شود نتایج مدل RNG در هر دو شکل به نتایج آزمایشگاهی هگر نزدیک‌تر است و بنابراین مدل RNG بهتر عمل می‌کند و برای استخراج سایر پارامترهای پرش از نتایج این مدل استفاده شده است.



شکل (۶): نسبت اعماق مزدوج در مقابل تغییرات عدد فرود در سه مقطع دوزنقه‌ای



شکل (۷): نسبت طول پرش هیدرولیکی به عمق اولیه در مقابل تغییرات عدد فرود در سه مقطع دوزنقه‌ای

ورود هوا به جریان^۱

در جریان‌های با سطح آزاد ممکن است تلاطم مایع به‌اندازه‌ی کافی برای آشفتگی کردن سطح جریان و شکل‌گیری پدیده‌ی ورود هوا به داخل جریان باشد (ویت^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های انتقال آشفتگی بر اساس انرژی جنبشی آشفتگی k و تابع استهلاک ε طبقه‌بندی می‌شوند (گوالتری و چانسون^۳، ۲۰۱۰؛ یان و چانسون^۴، ۲۰۱۱). در صورتیکه انرژی جنبشی آشفتگی در واحد حجم بیشتر باشد، می‌تواند بر نیروی تعادل سطحی غلبه کند که در نتیجه آن هوا وارد جریان می‌شود، این پدیده در پرش هیدرولیکی نیز دارای اهمیت ویژه‌ای است. اگرچه

۱. Air Entrainment

۲. Witt et al.

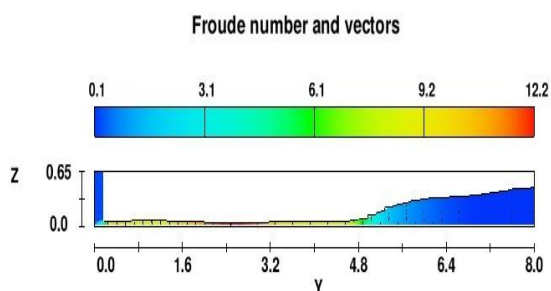
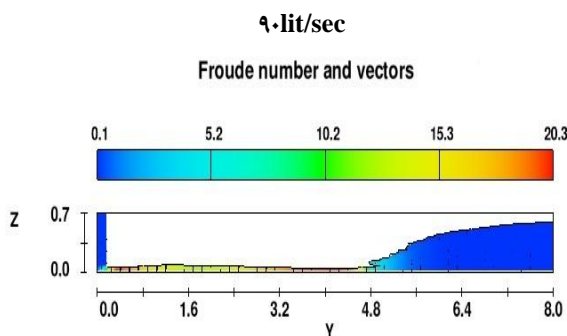
۳. Gualtieri, Chansun

۴. Yann, Chansun

۵. Hager et al.

پرش هیدرولیکی و روند افزایش عمق در طول پرش به صورت صحیح ایجاد شود، طبق تعریف طول پرش به فاصله بین ابتدای پرش تا اولین نقطه در پایین دست گردابه‌ها که سطح آب نسبتاً افقی است، گفته می‌شود، به طور کلی پرش هیدرولیکی ایجاد شده در تمامی مدل‌ها در انتهای کانال رخ داده است که با توجه به محدودیت‌های مدل عددی برای ایجاد پرش از دیواره قائم در انتهای کانال برای ایجاد پرش استفاده شده است که محلی مناسب برای پرش در انتهای کانال بوده است، همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در تمامی پرش‌های ایجاد شده طول پرش هیدرولیکی از مقطع ۷۵ درجه به سمت ۴۵ درجه بلند شده است که عملکرد بهتر مقطع ۴۵ درجه را در استهلاك انرژی پرش، می‌رساند. بررسی مقاطع عرضی تمامی مدل‌های صورت گرفته باهدف اندازه‌گیری و رفتارشناسی مقادیر سرعت متوسط جریان‌های ثانویه در جهت افقی (X) یا عمود بر محور جریان و عمودی (Z) یا عمود بر کف کانال، در مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته است که به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

شکل (۸): پرش هیدرولیکی در کانال ۴۵ درجه با دبی



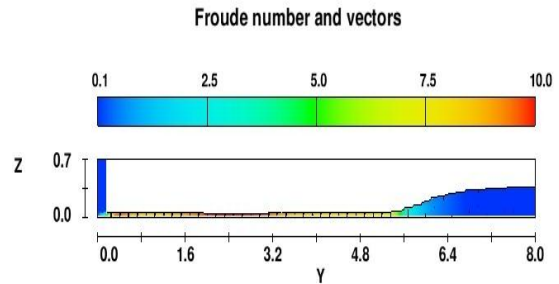
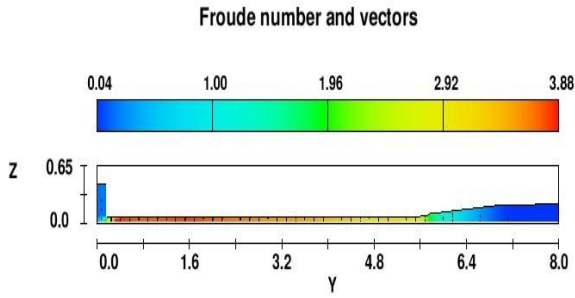
گرفته نتایج مدل عددی مقطع ۴۵ درجه با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط هگر و دیگر محققان مقایسه شده است که به طور کلی پنج دبی مختلف ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ لیتر در ثانیه و مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است که نتایج قابل توجه‌ای به دنبال داشته است.

همچنین در جدول (۲) نتایج عدد فرود قبل و بعد از پرش و عمق اولیه پرش و همچنین نسبت طول پرش به عمق ثانویه در هر سه مقطع مدل‌سازی شده برای پنج دبی بکار رفته شده، آورده شده است، برای نمونه بر اساس روند مدل‌سازی پرش هیدرولیکی و مقایسه بهتر مدل‌های عددی انجام شده با آزمایش‌های صورت گرفته توسط امید^۱ و همکاران (۲۰۰۷) نتیجه‌ی مدل‌سازی مقطع ۴۵ درجه در ۴ دبی بیشتر در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده شده است، از طرفی مقایسه‌ی نتایج مطالعات امید و همکاران با نتایج مدل عددی در این پژوهش برای مقطع ۴۵ درجه با دبی‌های ۹۰ و ۷۰ و ۵۰ و ۳۰ و ۱۰ لیتر در ثانیه به طور میانگین حاکی از ۸٪ افزایش طول پرش در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی را دارد که این صحت‌سنجی مدل عددی انجام شده در خصوص طول پرش هیدرولیکی را می‌رساند و به منظور بی‌بعد نشان دادن طول پرش، نسبت آن به عمق ثانویه پرش نشان داده شده است، در شکل‌های (۸) تا (۱۱) محور افقی بر اساس عدد فرود در طول کانال بوده و محور قائم بر مبنای ارتفاع کانال در مقطع عرضی است. با کاهش دبی جریان پرش ایجاد شده به سمت انتهای کانال حرکت کرده و از طول پرش نیز کاسته می‌شود، همچنین نتایج مدل عددی در این پژوهش که در سه مقطع دوزنقه‌ای با زوایای ۴۵°، ۶۰° و ۷۵° با پنج دبی‌های مختلف انجام شده است و در مجموع ۱۵ مدل عددی را تشکیل می‌دهد، با تغییرات عدد فرود در ابتدا و انتهای پرش، در جدول شماره (۲) آورده شده است.

شکل‌های (۸) تا (۱۱) مقطع عرضی از مدل انجام شده را نشان می‌دهند که در آن‌ها به ترتیب می‌توان به روند ایجاد پرش هیدرولیکی اشاره کرد که در شرایط هندسی یکسان ولی با میزان دبی مختلف در یک کانال دوزنقه‌ای ۴۵ درجه ایجاد شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بعد از چندین مدل عددی برای تعیین محل پرش و انتخاب ساختار صحیح مدل هندسی کانال باعث شده است تا طول

شکل (۹): پرش هیدرولیکی در کانال ۴۵ درجه با دبی

۷۰ lit/sec



شکل (۱۱): پرش هیدرولیکی در کانال ۴۵ درجه با دبی

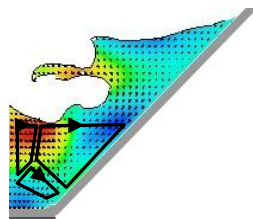
۳۰ lit/sec

شکل (۱۰): پرش هیدرولیکی در کانال ۴۵ درجه با دبی

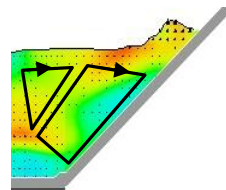
۵۰ lit/sec

جدول (۲): اعداد فرود قبل و بعد از پرش و اعماق اولیه به تفکیک مقاطع

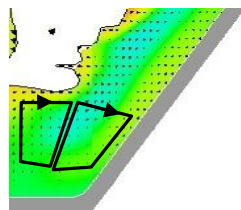
m=۰/۲۶			m=۰/۵۸			m=۱/۰			عمق اولیه (m)	L _j /Y ₂	عدد فرود (F _r)	عمق اولیه (m)	L _j /Y ₂	عدد فرود (F _r)	عمق اولیه (m)	L _j /Y ₂	عدد فرود (F _r)	قبل از پرش	بعد از پرش	Q (lit/sec)
عمق اولیه (m)	L _j /Y ₂	عدد فرود (F _r)	عمق اولیه (m)	L _j /Y ₂	عدد فرود (F _r)	عمق اولیه (m)	L _j /Y ₂	عدد فرود (F _r)												
۰/۰۷۱	۶/۱۸	۹/۲	۰/۰۵۵	۶/۸۳	۱۰	۰/۰۵	۶/۹۲	۹/۷۲	۰/۷۳	۰/۸۷	۰/۰۵	۶/۹۲	۹/۷۲	۰/۷۳	۰/۸۷	۰/۰۵	۶/۹۲	۹/۷۲	قبل از پرش	Q=۹۰ (lit/sec)
		۰/۸۷			۱۰			۰/۸۷					۰/۷۳					بعد از پرش		
۰/۰۵۲	۶/۱۳	۸/۱۳	۰/۰۴۹	۶/۷۸	۷/۶	۰/۰۴۱	۶/۹۲	۸/۱۲	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۰۴۱	۶/۹۲	۸/۱۲	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۰۴۱	۶/۹۲	۸/۱۲	قبل از پرش	Q=۷۰ (lit/sec)
		۰/۹۹			۷/۶			۰/۹۳					۰/۹۳					بعد از پرش		
۰/۰۴۳	۵/۵	۷	۰/۰۳۶	۵/۳۵	۷/۳۱	۰/۰۳۱	۶/۷۴	۵/۳۹	۰/۹۷	۰/۳۳	۰/۰۳۱	۶/۷۴	۵/۳۹	۰/۹۷	۰/۳۳	۰/۰۳۱	۶/۷۴	۵/۳۹	قبل از پرش	Q=۵۰ (lit/sec)
		۰/۳۳			۷/۳۱			۰/۹۷					۰/۹۷					بعد از پرش		
۰/۰۳۲	۴	۴/۷	۰/۰۲۶	۵/۲۵	۴	۰/۰۲	۵/۷۶	۲/۹۷	۰/۳۴	۰/۹۴	۰/۰۲	۵/۷۶	۲/۹۷	۰/۳۴	۰/۹۴	۰/۰۲	۵/۷۶	۲/۹۷	قبل از پرش	Q=۳۰ (lit/sec)
		۰/۹۴			۴			۰/۳۴					۰/۳۴					بعد از پرش		
۰/۰۳۹	۳/۱	۳/۷۶	۰/۰۳۳	۴/۴	۲/۶۲	۰/۰۲۱	۴/۹	۲/۴۸	۰/۲	۰/۵	۰/۰۳۳	۴/۹	۲/۴۸	۰/۲	۰/۵	۰/۰۳۳	۴/۹	۲/۴۸	قبل از پرش	Q=۱۰ (lit/sec)
		۰/۵			۲/۶۲			۰/۲					۰/۲					بعد از پرش		



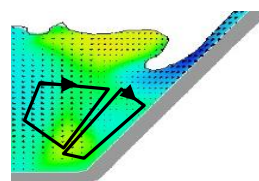
(الف)



(ب)



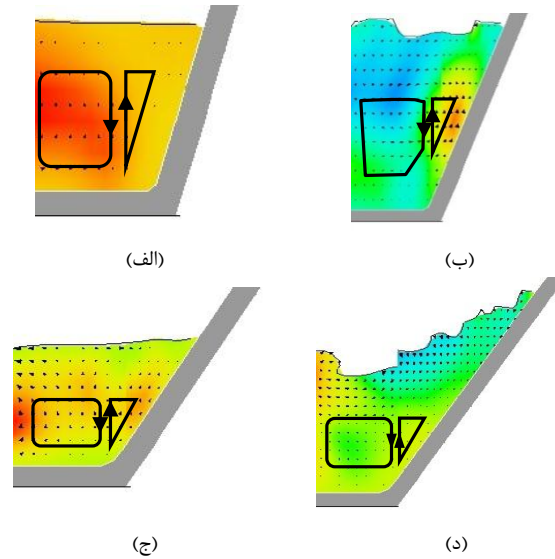
(ج)



(د)

شکل (۱۲): حساسیت سنجی سرعت در جهت X

شکل‌های (الف) و (ب) برای مقطع ۴۵ درجه به ترتیب برای دبی 90 lit/sec و 70 lit/sec و (ج) و (د) برای مقطع ۶۰ درجه به ترتیب برای دبی 90 lit/sec و 70 lit/sec



شکل (۱۳): حساسیت سنجی سرعت در جهت Z

شکل‌های (الف) و (ب) برای مقطع ۷۵ درجه به ترتیب برای دبی 10 lit/sec و 30 lit/sec و (ج) و (د) برای مقطع ۶۰ درجه به ترتیب برای دبی 10 lit/sec و 30 lit/sec

قابل توجهی داشته است بنابراین در بررسی‌های سلول‌های جریان‌های ثانویه در جهت افقی (عمود بر محور جریان) تنها دو دبی بیشتر یعنی 90 lit/sec و 70 lit/sec مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دبی‌های کمتر از این مقادیر در سلول‌های جریان‌های ثانویه در جهت افقی تأثیر چشمگیری در افت انرژی پخش نداشته‌اند، بنابراین هر چه سرعت جریان طولی در امتداد کانال (Y) بیشتر شود سرعت جریان ثانویه در جهت افقی (X) در مقطع ۴۵ درجه بیشتر از مقاطع ۶۰ و ۷۵ درجه می‌شود، در صورتیکه توزیع بردارهای سرعت جریان ثانویه در جهت عمود بر کف کانال جریان (Z) در دبی‌های ضعیف‌تر به دلیل پایین بودن سرعت جریان و غالب بودن نیروی ثقل توزیع سرعت به سمت کف کانال بیشتر از دیواره‌ها بوده است که این مسئله در مقادیر سرعت جریان‌های ثانویه در هر سه مقطع که در جدول (۳) نشان داده شده است، ملاحظه می‌گردد. همان‌طور که بیان شد سرعت‌های استخراج شده در دو جهت X و Z به صورت متوسط بوده و به مقدار دبی جریان وابسته است و این سرعت‌های عرضی در هر دو جهت X و Z در هر سه مقطع قبل از پخش و در مقطع ابتدای پخش برای دبی‌های مختلف اندازه‌گیری شده است و در جدول (۳) نمایش داده شده است. همان‌طوری

به‌طور کلی در شکل (۱۲) و (۱۳) مقاطع عرضی از جریان قبل از پخش نمایش داده شده است که به دلیل متقارن بودن مقطع کانال و توزیع سرعت‌های عرضی در مقطع، نصف هر کدام از مقاطع در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) که مربوط به مقاطع ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه، نشان داده شده است که هر کدام از آن‌ها به صورت مقطعی از ابتدای پخش بوده و همچنین مسیر حرکت و جهت بردارهای سرعت نشان داده می‌شود، بردارهای سرعت در مقاطع عرضی در کانال‌ها بیان‌کننده مسیر حرکت سلول‌های جریان‌های ثانویه است، به‌طور معمول حرکت سلول‌های جریان‌های ثانویه در کانال‌های دوزنقه‌ای با زاویه جانبی کمتر (۴۵ درجه) به سمت گوشه‌ها قابل توجه است و این امر در نتایج مدل‌سازی عددی نیز به وضوح دیده می‌شود.

مسئله‌ایی که در اینجا قابل ذکر است و در دو شکل (۱۲) و (۱۳) نیز دیده می‌شود روند توزیع سرعت در جهت افقی (X) یعنی در جهت عمود بر محور جریان در کانال‌هایی که شیب جانبی دیواره آن‌ها کمتر است همانند ۴۵ درجه بیشتر بوده و سرعت جریان در جهت X هم بیشتر است و لذا باعث ایجاد تنش برشی در دیواره‌های کانال می‌گردد و در نهایت موجب افت انرژی پخش هیدرولیکی در این گونه هندسه کانال شده است که این امر در دبی‌های بالاتر تأثیر

عمود بر محور جریان (X) نسبت به عدد فرود برای تمامی ۱۵ مدل انجام‌شده نمایش داده شده است که محور عمودی این نمودار درصد نسبت مقادیر سرعت در جهت X به سرعت ماکزیمم در مقطع عرضی در طول پرش است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای بی‌بعد کردن مقدار سرعت در جهت X نسبت مقادیر متوسط سرعت به سرعت ماکزیمم محاسبه شده و در شکل (۱۴) ترسیم شده است.

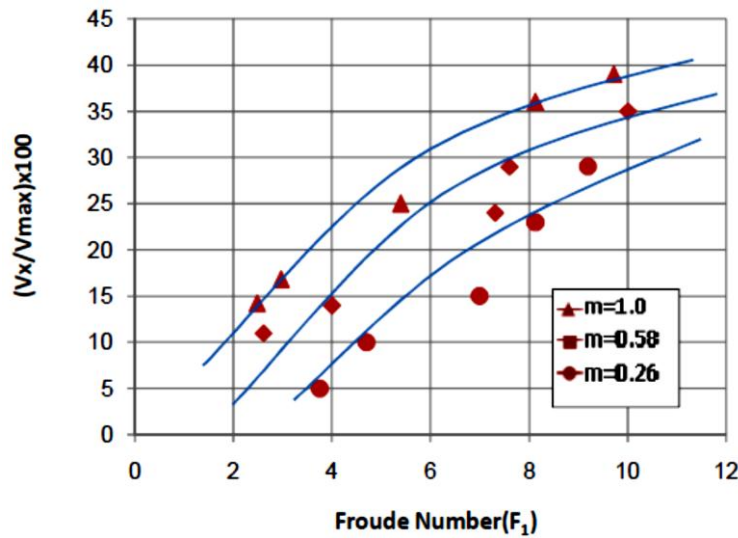
که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود مقادیر سرعت در جهت X برای دبی‌های بالاتر و در ۲ مقطع ۴۵ و ۶۰ درجه بیشتر از مقادیر سرعت ثانویه در جهت Z برای همان مقاطع بوده است و همچنین سرعت ثانویه در جهت Z برای دبی‌های پایین‌تر در مقاطع ۶۰ و ۷۵ درجه بیشتر از سرعت ثانویه در جهت X برای همان مقاطع بوده است. همچنین در شکل (۱۴) تغییرات سرعت‌های جریان ثانویه در جهت

جدول (۳) سرعت جریان‌های ثانویه در جهات X و Z به تفکیک مقاطع مختلف

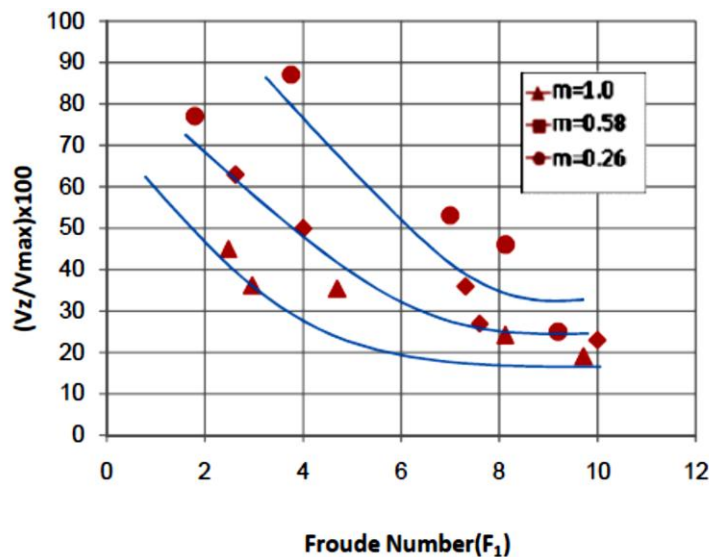
ردیف	دبی lit/sec	m=۱/۰	m=۰/۵۸	m=۰/۲۶
۱	۹۰	$V_x=۰/۳۹$ m/sec	$V_x=۰/۳۵$ m/sec	$V_x=۰/۲۹$ m/sec
		$V_z=۰/۱۹$ m/sec	$V_z=۰/۲۳$ m/sec	$V_z=۰/۲۵$ m/sec
۲	۷۰	$V_x=۰/۳۶$ m/sec	$V_x=۰/۲۱$ m/sec	$V_x=۰/۱۷$ m/sec
		$V_z=۰/۲۴$ m/sec	$V_z=۰/۲۷$ m/sec	$V_z=۰/۴۶$ m/sec
۳	۵۰	$V_x=۰/۲۴$ m/sec	$V_x=۰/۱۸$ m/sec	$V_x=۰/۱۵$ m/sec
		$V_z=۰/۳۵$ m/sec	$V_z=۰/۴۶$ m/sec	$V_z=۰/۵۷$ m/sec
۴	۳۰	$V_x=۰/۱۶$ m/sec	$V_x=۰/۱۳$ m/sec	$V_x=۰/۱$ m/sec
		$V_z=۰/۳۶$ m/sec	$V_z=۰/۴۷$ m/sec	$V_z=۰/۷۶$ m/sec
۵	۱۰	$V_x=۰/۱۴$ m/sec	$V_x=۰/۱۱$ m/sec	$V_x=۰/۰/۵$ m/sec
		$V_z=۰/۴۱$ m/sec	$V_z=۰/۵۵$ m/sec	$V_z=۰/۸۷$ m/sec

تغییر مقطع از ۷۵ درجه به ۴۵ درجه در اعداد فرود بالا فراوان است و همچنین می‌توان افزایش سرعت در جهت عمود بر کف کانال (Z) با تغییر مقطع از ۴۵ درجه به ۷۵ درجه در اعداد فرود پایین‌تر را ملاحظه کرد. همان‌طور که از داده‌های شکل (۱۴) و (۱۵) و جدول (۳) می‌توان دریافت، این رشد سرعت عرضی در جهت عمود بر محور جریان (X) از مقطع ۷۵ درجه به مقطع ۶۰ درجه در حدود ۲۸/۹٪ و از مقطع ۶۰ درجه به ۴۵ درجه در حدود ۳۲/۶٪ بوده است و در مورد سرعت‌های ثانویه در جهات عمود بر کف کانال (Z)، از مقطع ۴۵ درجه به ۶۰ درجه ۲۸٪ افزایش و از مقطع ۶۰ درجه به ۷۵ درجه، ۴۷٪ افزایش را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۴) سرعت سلول‌های جریان‌های ثانویه برای مقطع ۴۵ درجه در جهت عمود بر محور جریان (X) در دبی‌های مختلف بیشتر از سایر مقاطع بوده و این نشان می‌دهد تنش برشی ایجادشده در دیواره‌های این مقطع بیشتر از دو مقطع دیگر است که هدایت جریان را به سمت دیواره‌ها به دنبال دارد. در شکل (۱۵) نیز تغییرات سرعت جریان ثانویه در جهت عمود بر کف کانال (Z) نسبت به عدد فرود نمایش داده شده است که به‌طور کلی روند عکس جهت افقی (X) را دارد، با تند شدن شیب جانبی دیواره‌های کانال یعنی هرچه مقطع از ۴۵ درجه به سمت ۷۵ درجه تبدیل می‌شود سرعت جریان‌های ثانویه در اعداد فرود پایین‌تر، افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین باملاحظه این روند می‌توان بیان کرد، رشد سرعت در جهات افقی (X) با



شکل (۱۴): تغییرات سرعت جریان ثانویه در جهت عمود بر محور جریان (X) نسبت به عدد فرود



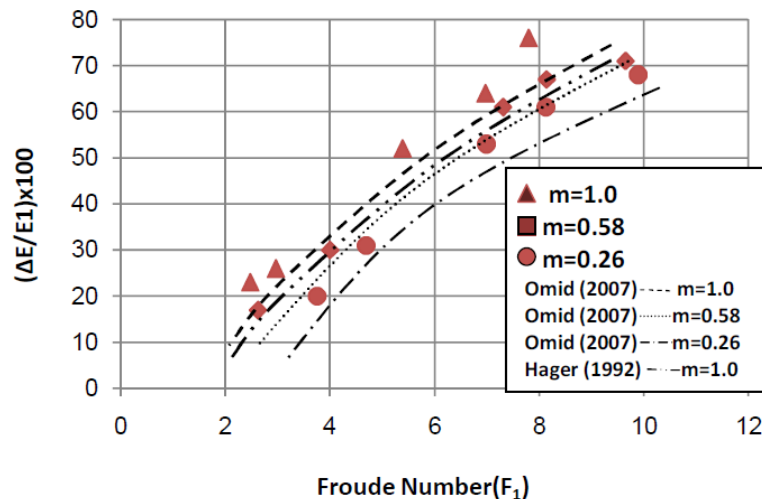
شکل (۱۵): تغییرات سرعت جریان ثانویه در جهت عمود بر کف کانال (Z) نسبت به عدد فرود

آمدن تنش برشی مرزی و همچنین باعث ورود حجم هوا در اثر حرکت سلول‌های ثانویه به سمت دیواره‌ها بوده است که در مقطع ۴۵ درجه ۹٪ افزایش را نسبت به ۷۵ درجه توده حجم هوای بیشتری را نشان می‌دهد. شکل (۱۶) نمایش تغییرات افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی را می‌دهد، در این نمودار میزان افت انرژی در مدل‌های انجام‌شده نسبت به عدد فرود نشان داده شده است، همان‌طور که دیده می‌شود میزان افت انرژی در مقاطع دوزنقه با زاویه جانبی ۴۵ درجه نسبت به ۲ مقطع دیگر قابل توجه بوده است که به منظور صحت سنجی بهتر داده‌های این نمودار افت انرژی در هر ۳ مقطع در مدل عددی این پژوهش با نتایج امید و همکاران (۲۰۰۷) برای

در ادامه برای بیان روند افت انرژی پرش و مقایسه هر ۳ مقطع هندسی مدل‌سازی شده، نمودار افت انرژی پرش نسبت به عدد فرود برای تمامی ۱۵ مدل انجام‌شده در شکل (۱۶) ترسیم شده است. شدت افت انرژی مخرب در پرش هیدرولیکی به دلیل سرعت جریان‌های ثانویه در جهت عمود بر محور جریان و همچنین ورود توده حجم هوای بیشتر در اثر حرکت سلول‌های ثانویه به سمت دیواره‌ها در مقاطع ۴۵ درجه و در دی‌های بالاتر بسیار بیشتر از مقاطع ۶۰ و ۷۵ درجه بوده است که میزان حجم هوای واردشده در مقطع ۴۵ درجه و ۷۵ درجه در طول پرش هیدرولیکی به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۱۵۵ مترمکعب که باعث به وجود

آزمایشگاهی هگر و همکاران و همچنین ۸٪ افزایش در مقطع ۶۰ درجه و ۱۱٪ افزایش در مقطع ۷۵ درجه را نسبت به نتایج امید و همکاران نشان می‌دهد.

تمامی مقاطع و نتایج آزمایشگاهی هگر و همکاران که تنها برای مقطع ۴۵° موجود بوده است، مقایسه شده است که ۷٪ افزایش در مقطع ۴۵ درجه، در مقایسه با نتایج امید و همکاران و ۹٪ افزایش در مقایسه با نتایج



شکل (۱۶): تغییرات افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به عدد فرود در سه مقطع کانال دوزنقه

۵- ورود توده حجم هوا در مقطع ۴۵ درجه در ابتدای پرش هیدرولیکی به داخل جریان در جهت عمود بر محور جریان نسبت به مقطع ۷۵ درجه، ۹٪ بیشتر بوده، به طوری که از مقدار ۰/۱۵۵ مترمکعب در مقطع ۷۵ درجه به مقدار ۰/۱۷ مترمکعب در مقطع ۴۵ رسیده است که این امر یکی از دلایل افت انرژی پرش هیدرولیکی در مقطع ۴۵ درجه بوده است.

۶- نتایج نشان‌دهنده رابطه عکس بین سرعت جریان ثانویه در جهت عمود بر محور جریان (X) و سرعت ثانویه در جهت عمق جریان (عمود بر کف کانال) (Z) را دارد.

مراجع

- ۱- اژدری‌مقدم، م. تاج‌نسایی، م. گیوه‌چی، م. (۱۳۹۲)، به‌کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه در کانال دوزنقه‌ای، نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۸-۱۵.
- ۲- جابرزاده، م. عطاری، ج. مجدزاده، م. ابوالقاسمی، م. (۱۳۸۷)، مطالعه‌ی آزمایشگاهی جریانات چرخشی افقی و نقش آن در محل تشکیل نهشته‌ی رسوبی در قوس، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان در این پژوهش به نتایج عمده زیر اشاره کرد.

- ۱- روش محاسبه این نرم‌افزار و الگوریتم بکار رفته در آن برای مدل‌سازی سلول‌های جریان‌های ثانویه و تنش‌های مرزی مناسب است بنابراین روش دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل نمودن چنین پدیده‌هایی مناسب خواهد بود.
- ۲- شرایط مرزی استفاده‌شده در این نرم‌افزار برای تعیین حدود مرزی محاسبات و حساسیت سنجی آن بسیار مؤثر بوده است.
- ۳- سرعت سلول‌های جریان‌های ثانویه در جهت عمود بر محور جریان (X) در مقاطع با بازشدگی بالا همانند ۴۵ درجه نسبت به ۶۰ و ۷۵ درجه، بیشتر بوده و این افزایش در مقطع ۴۵ درجه نسبت به ۷۵ درجه ۷۱٪ بوده است.
- ۴- سرعت سلول‌های جریان‌های ثانویه در جهت عمود بر کف کانال (Z) در مقاطع با بازشدگی کمتر همانند ۷۵ درجه نسبت به ۶۰ و ۴۵ درجه، بیشتر بوده و این افزایش در مقطع ۷۵ درجه نسبت به ۴۵ درجه، ۸۸٪ بوده است.

- ۱۱- Hager, W.H. Wanoschek, R. (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, *Journal of Hydraulic Research*, 27(3), 429-446.
- ۱۲- Khodashenas, S.R. Abderrezzak. K.E. Paquier, K. (2008), A Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods, *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 598-609.
- ۱۳- Witt, A. et al. (2015) Simulating air entrainment and vortex dynamics in a hydraulic jump, *Science Direct, International Journal of Multiphase Flow*, 72. 165-180.
- ۱۴- Muhsun, S.S. (2012), Characteristics of the Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel, Section, *Journal of Environmental Studies*, 9, 53-62.
- ۱۵- Omid, M.H. Esmaeeli, V.M. Narayanan, R. (2007), Gradually expanding hydraulic jump in trapezoidal channel, *Journal of Hydraulic Research*, 45, 512-518.
- ۱۶- Ranga Raju, K. (2003), *Flow Through Open Channels*, McGraw-Hill Co. 0-07-460497-X.
- ۱۷- Kumar, G. et al. (2013), Modeling of relative length and relative energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel, *Science Direct, Procedia Engineering*, 51. 529-537.
- ۱۸- Nezu, I. et al. (1985), Secondary Currents in Straight channel Flow and the Relation to Its Aspect Ratio, *Springer, Turbulent Shear Flow* 4, 246-260.
- ۱۹- Yann, C. Chansun, H. (2011), Bubbly flow measurements in hydraulic jumps with small inflow Froude number, *Science Direct, International Journal of Multiphase Flow*, 37. 555-564.
- ۳- حسینی، م. ابریشمی، ج. (۱۳۸۱)، هیدرولیک کانال‌های باز، دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، تهران، ایران، ۳۶-۴۱.
- ۴- قاسم‌زاده، ف. (۱۳۹۴)، شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در Flow 3D، نشر نوآور، ۱۸-۱۳.
- ۵- یعقوبی، م. فغفور مغربی، م. گیوه‌چی، م. (۱۳۸۶)، اثر جریان‌های ثانویه در تخمین سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مستطیلی با زبری نواری، کنفرانس مدیریت منابع آب دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران.
- 6- Dasgupta, R. et al. (2015), Viscous Undular Hydraulic Jumps of Moderate Reynolds Number Flow, *Science Direct*, 300-304.
- 7- Bayon, A. et al. (2016), Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump, *Science Direct, Environmental Modeling & Software*, 80. 322-335.
- 8- Jonsson et al. (2016), Smoothed Particle Hydrodynamic simulation of hydraulic jump using periodic open boundaries, *Science Direct, Apply Mathematical Modelling*, 1-15.
- 9- Flow -3D user manual, (2015), (version 11.1.1.), GDI generic.
- 10- Gualtieri, C. Chanson, H. (2010), Effect of Froude number on bubble clustering in a hydraulic jump”, *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 504-508.

Numerical Modeling Investigation of Secondary Current Cells in Trapezoidal Channels and its Effect on Hydraulic Jump's Properties

Bahador FatehiNobarian¹

Houman Hajikandi*²

Yousef Hassanzadeh³

Saeed Jamali⁴

Abstract

Since experimental investigation of secondary currents cells is costly and requires laboratory equipment, Researchers consider CFD computational fluid dynamics to be a cost-effective way for this kind of modeling. In the present study, the characteristics of secondary currents in trapezoidal channels have been investigated with side angles 45°, 60° and 75° angles, under the influence of 5 different discharges in the Flow3D finite volume software. The results of modeling and numerical comparison of the rate of secondary currents flow in different Froude numbers and the investigation of secondary currents flows have shown that the opposite relationship between the secondary velocity in the direction of perpendicular to the axis of flow (x) and velocity in a direction perpendicular to the flow level (z) in trapezoidal channels. And also in the 45° angle sections, has been remarkable the energy loss hydraulic jump. The ratio of the increase in the secondary currents velocity in the direction of perpendicular to the axis of flow at 45° angle is 71% relative to the 75 °degree cross section. Then, the secondary currents velocity in the direction of perpendicular to the flow surface at 75° was greater than 60° and 45° angles. And this increase was 75° angle compared to 45° angle, 88%.

Keywords

Secondary currents, Trapezoidal channel, Hydraulic jump, Boundary shear stress

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- Tehran Central Branch, Iran.

2*. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- Tehran Central Branch, Iran. h_hajikandi@iauctb.ac.ir

3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tabriz Iran.

4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- Tehran Central Branch, Iran.