

بررسی تأثیر شیب جانبی کانال دوزنقه‌ای بر تنش برشی بستر و مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل Flow3D

صابر ابراهیمیان^۱، هومن حاجی‌کندی^{۲*}، محمود شفاعی بجستان^۳، سعید جمالی^۴ و ابراهیم اسدی^۵

چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر شیب جانبی کانال بر تنش برشی بستر و مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا مدل عددی فلوتری‌دی به کمک نتایج آزمایشگاهی منتشر شده برای کانال دوزنقه‌ای با شیب بدنه ۴۵ درجه واسنجی شد، مدل آر ان جی از بین مدل‌های آشفته‌گی انتخاب و سپس مدل برای شرایط هیدرولیکی متفاوت (عدد فرود بین ۱/۵ تا ۱۲) و دو شیب ۶۰ و ۷۵ درجه بدنه کانال اجرا شد. نظر به اهمیت تنش برشی، که معمولاً در مطالعات آزمایشگاهی بررسی نمی‌شود، در این مطالعه علاوه بر مشخصات پرش، توزیع تنش بستر در هر سه کانال محاسبه شد. نتایج حاصل رفتار متفاوت پرش و تنش برشی در فلوم دوزنقه‌ای با شیب ۴۵ درجه را نشان می‌دهد؛ به طوری که عدم تقارن پرش در آن بسیار ملموس است و تمرکز تنش برشی در سمت چپ فلوم مشاهده شد. مقایسه نمودارهای تنش برشی حاکی از کاهش چشمگیری مقادیر تنش برشی بعد از پرش بوده که بیشترین آن مربوط به فلوم با شیب جانبی ۴۵ درجه است. همچنین، مشخص شد که با افزایش شیب جانبی میزان تنش برشی و نسبت اعماق مزدوج افزایش و میزان افت انرژی و طول پرش کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی نسبی، پرش هیدرولیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، تنش برشی، کانال دوزنقه‌ای، مدل Flow3D، مدل آشفته‌گی RNG.

ارجاع: ابراهیمیان ص. حاجی‌کندی ه. شفاعی بجستان م. جمالی س. و اسدی ا. ۱۳۹۸. بررسی تأثیر شیب جانبی کانال دوزنقه‌ای بر تنش برشی بستر و مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل Flow3D. مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۱۰۳-۱۱۲.

۱- دانشجوی دکترای عمران آب، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۲- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

۴- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۵- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.

* نویسنده مسئول: h_hajikandi@iauctb.ac.ir

تاریخ پذیرش: 1397/11/03

تاریخ دریافت: 1397/01/17

مقدمه

تا به حال بیشتر آزمایش‌هایی که برای محاسبه مشخصات پرش هیدرولیکی ارائه شده است، عمدتاً مربوط به کانال‌های مستطیلی (پرش هیدرولیکی کلاسیک) است و هدف عمده این مطالعات، شناخت مشخصات پرش بوده است که از جمله می‌توان به مطالعات چانسون (۲۰۰۸) اشاره کرد. مطالعاتی نیز درباره کاهش طول پرش انجام شده است؛ از جمله به کمک زبری در کف حوضچه که می‌توان مطالعات هاگز و فلک (۱۹۸۴) را نام برد؛ نتایج آنها نشان داد که اجزای زبری می‌توانند عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند و میزان کاهش به عدد فرود اولیه و زبری نسبی بستگی دارد.

هرچند بیشتر کانال‌های انتقال آب ذوزنقه‌ای شکل هستند؛ اما مطالعات انجام شده در این باره بسیار اندک‌اند. تقریباً اولین مطالعاتی که صرفاً در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال‌های ذوزنقه‌ای انجام شده است، آزمایش‌های وانوشک و هاگر (۱۹۸۹) است. طبق این مطالعه آزمایشگاهی که بر روی یک فلوم ذوزنقه‌ای با شیب دیواره ۴۵ درجه و دامنه اعداد فرود ۵/۵ تا ۱۵ انجام شد، مشخص می‌شود که پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع ذوزنقه‌ای رفتاری متفاوت با کانال کلاسیک از خود نشان می‌دهد، از ویژگی‌های پرش در کانال‌های مستطیلی، می‌توان به سرعت بالای جریان در کف و تشکیل غلتک‌های سطحی اشاره کرد؛ در حالیکه در کانال‌های ذوزنقه‌ای جریان با سرعت بالا در هوا پخش می‌شود و یک ناحیه پاشش را تشکیل می‌دهد. نکته قابل توجه دیگر در این مطالعه، عدم تقارن جریان بعد از پرش و تمرکز آن در سمت چپ کانال و سپس انتقال جریان به کف کانال ذوزنقه‌ای است. در این زمینه، اوهاتسو (۱۹۷۶) نیز تحقیقاتی را تحت عنوان پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در کانال‌های ذوزنقه‌ای و مستطیلی انجام داد.

امید و همکاران (۲۰۰۷)، تحقیقاتی را بر روی پرش هیدرولیکی در کانال ذوزنقه‌ای و اگر انجام دادند و تأثیر زاویه واگرایی بر مؤلفه‌های پرش را مورد بررسی قرار داده و با پرش در کانال مستطیلی مقایسه کردند. آنها دریافتند که با کاهش شیب کناره‌ها در کانال ذوزنقه‌ای واگرایی نسبت اعماق مزدوج کم شده و نسبت افت انرژی به عمق اولیه در مقایسه با کانال مستطیلی با عدد فرود مشابه افزایش می‌یابد. کاهه و دهقانی (۱۳۹۲) نیز در تحقیقی به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح

موجدار با استفاده از مدل عددی Flow3D و با دو مدل آشفتگی k-ε و RNG پرداختند. آنها دریافتند که مدل آشفتگی RNG توانایی خوبی در تخمین مؤلفه‌های مذکور دارد.

همان‌گونه که ملاحظه شد، مطالعات بر روی تأثیر تغییر شیب جانبی مقطع ذوزنقه‌ای که می‌تواند بر تنش برشی بستر و مشخصات پرش هیدرولیکی مانند عمق ثانویه و طول پرش و میزان استهلاك انرژی تأثیر گذار، کمتر مطالعه شده است. با توجه به اهمیت تنش برشی در مسائل هیدرولیک جریان، در پژوهش حاضر اثر شیب جانبی کانال ذوزنقه‌ای بر روی مشخصات پرش و توزیع تنش برشی بستر به کمک مدل عددی فلوتری‌دی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از نرم‌افزار Flow3D نسخه ۱۱ استفاده شد. ابتدا شبیه‌سازی براساس مطالعه آزمایشگاهی امید و همکاران (۲۰۰۷) روی کانال با مقطع ذوزنقه‌ای انجام و سپس با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد تا مناسب‌ترین مدل آشفتگی و تعداد مش برای انطباق بیشتر نتایج عددی با آزمایشگاهی حاصل شود و در نهایت، دو شیب بدنه دیگر کانال ذوزنقه‌ای شبیه‌سازی شدند.

معادلات حاکم

با در نظر گرفتن جریان توسعه‌یافته ماندگار، یکنواخت و غیرقابل تراکم، در جهت جریان معادله‌های پیوستگی و مومنوم را می‌توان به صورت معادلات (۱) و (۲) نوشت:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g S + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2)$$

که در آن: ρ : چگالی آب؛ g : شتاب جاذبه؛ S : شیب کانال؛ τ_{yx} و τ_{zx} : به ترتیب تنش برشی در جهت جریان x ، در صفحات $y-x$ و $z-x$ هستند. پس از ضرب ρu در معادله (۱) عبارت حاصل با معادله (۲) جمع می‌شود، سپس از آن انتگرال‌گیری می‌شود و با استفاده از تئوری گاوس معادله (۳) پدید می‌آید:

$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial n} + w \frac{\partial z}{\partial n} \right) dA = \rho g S V + \int_A \left(\tau_{yx} \frac{\partial y}{\partial n} + \tau_{zx} \frac{\partial z}{\partial n} \right) dA \quad (3)$$

که در آن V ، حجم دلخواه روی سطح A است. عبارت سمت چپ معادله ۳ شار خالص مومنوم در سطح کنترل

و τ_t را به ترتیب می‌توان با استفاده از قانون نیوتن و معادله پرناتدل به دست آورد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲)

مدل Flow3D

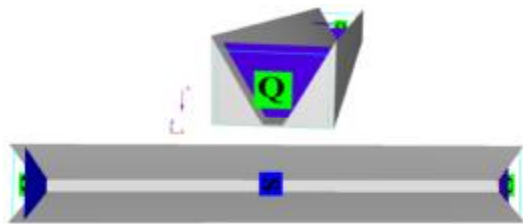
مدل Flow3D، یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی^۱ با قابلیت بالای تحلیل سه‌بعدی میدان جریان است و محدوده کاربرد بسیار وسیعی در مسائل مربوط به سیالات دارد.

مدل‌های آشفتگی

در این تحقیق، برای انجام شبیه‌سازی، ابتدا از دو مدل (k-ε) و (RNG) استفاده شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی تطبیق‌پذیری بیشتر مدل (RNG) را نشان داد. مدل RNG بر پایه گروه‌های نرمال شده تنش رینولدز استوار است و از معادلات صریح برای محاسبات استفاده می‌کند؛ بر این اساس، نتایج خروجی مدل دارای دقت بیشتر است.

مدل‌سازی هندسی کانال

در شکل ۲، مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار دیده می‌شود. جریان پس از وارد شدن به مخزن ابتدایی و عبور از زیر دریچه با بازشدگی ۳/۵ سانتی‌متر وارد فلوم شده و پس از طی مسیر فلوم و عبور از دیواره انتهایی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از فلوم خارج می‌شود.



شکل ۲- هندسه سه‌بعدی و پلان مدل شبیه‌سازی شده و موقعیت دریچه و دیواره انتهایی - شیب جانبی ۶۰ درجه

شبکه حل و شرایط مرزی

نرم‌افزار Flow3D فقط قابلیت تولید شبکه‌های حل منظم متشکل از سلول‌های مکعبی را دارد. شبکه حل در این مدل، متشکل از ۳۰۰۰۰۰ سلول با شش وجه است که دارای شرایط مرزی مختلفی است.

برای تعیین مش بهینه تغییرات، مش‌بندی بدین صورت است که ابتدا شبیه‌سازی با کمترین تعداد مش یا به

A است. به‌طور کلی، معادله پیوستگی جرم به‌صورت معادله (۴) است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (4)$$

که V_F کسر حجمی جریان؛ ρ ، دانسیته سیال؛ R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی؛ و R_{SOR} ، منبع جرم هستند. برای سیالات تراکم‌ناپذیر، ρ در معادله پیوستگی ثابت است؛ بنابراین، معادله (۴) به‌صورت معادله (۵) ساده‌سازی می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (5)$$

حجم کنترل BCHGB در شکل ۱ در جهت جریان دارای طول واحد و مرزهای BG و CH متقارن‌اند. شار اندازه حرکت در معادله (۳) به‌صورت معادله (۶) بیان می‌شود:

$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial n} + w \frac{\partial z}{\partial n} \right) dA = \int_{BC} + \int_{CH} + \int_{HG} + \int_{GB} \quad (6)$$

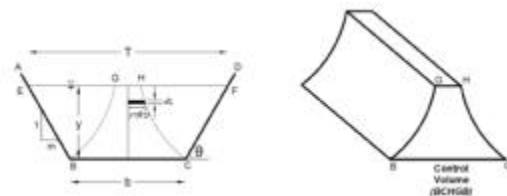
با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش، می‌توان معادله (۶) را به‌صورت معادله (۷) ساده کرد:

$$\int_A \rho u \left(v \frac{\partial y}{\partial n} + w \frac{\partial z}{\partial n} \right) dA = 2 \int_{CH} \rho u (w dy - v dz) \quad (7)$$

در معادله (۳) ترم گرانشی به‌صورت $\rho g S A_b$ ساده شده است، که در آن $v = A_b$ ، برابر مساحت جریان مربوط به کف کانال است. همچنین، عبارت نیروی برشی به‌طور مشابه نوشته می‌شود. در نهایت معادله (۸) حاصل خواهد شد:

$$\bar{\tau}_b = \frac{\rho g S A_b}{b} - \frac{2}{b} \int_{CH} \rho u (w dy - v dz) + \frac{2}{b} \int_{CH} (\tau_{zx} dy - \tau_{yx} dz) \quad (8)$$

که در آن $\bar{\tau}_b$ ، متوسط تنش برشی کف بوده و از ترم تنش برشی روی مرز BC به‌دست آمده است.



شکل ۱- سطح مقطع و حجم کنترل کانال دوزنقه‌ای

در جریان‌های آشفته، تنش برشی τ در هر سطحی برابر است با مجموع تنش برشی ناشی از تأثیر لزجت مایع (τ_e) و تنش برشی حاصل از جریان متلاطم (τ_t)، که مقدار τ_e

برای بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی پارامترهای پرش و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی از روش‌های آماری زیر استفاده شد:

• میانگین قدر مطلق انحرافات^۱ که به صورت معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - S_i|}{n} \quad (9)$$

که در آن: n : تعداد داده‌ها؛ E_i : داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی؛ و S_i : داده‌های شبیه‌سازی شده است.

• میانگین مربعات خطا^۲ که به صورت معادله (۱۰) قابل بیان است:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - S_i)^2}{n} \quad (10)$$

• مجذور میانگین مربعات خطا^۳، که این شاخص آماری را می‌توان به شکل معادله (۱۱) بیان کرد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - S_i)^2}{n}} \quad (11)$$

کاربرد شاخص‌های آماری بالا، بدین صورت است که هرگاه مقادیر محاسبه شده به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت بالاتر مدل در شبیه‌سازی پارامترهای پرش هیدرولیکی را نشان خواهد داد.

• میانگین قدر مطلق درصد خطا^۴، که براساس معادله (۱۲) قابل توصیف است:

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - S_i}{E_i} \right|}{n} \times 100 \quad (12)$$

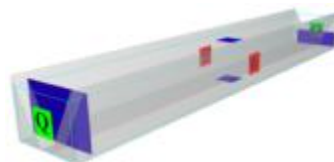
در معادله (۱۲)، هرچه مقدار محاسبه شده کوچک‌تر باشد، میزان دقت مدل در شبیه‌سازی پارامترهای پرش بیشتر خواهد بود.

• ضریب راندمان مدل Nash-Sutcliffe^۵، که مطابق معادله (۱۳) قابل محاسبه است:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \times 100 \quad (13)$$

محدوده این شاخص آماری بین $-\infty$ و ۱ است؛ به طوری که مقادیر بین ۰ و ۱ به عنوان دامنه قابل قبول عملکردی و NSE برابر یک به عنوان بهترین مقدار در نظر گرفته می‌شود. مقادیر کوچک‌تر از صفر (مقادیر منفی) نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین مشاهداتی دارای انحراف است، که نشان‌دهنده عملکرد غیر قابل قبول مدل است (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

عبارتی با ابعاد مش بزرگ به نحوی که نتایج قابل قبول ارائه دهد، انجام می‌گیرد. سپس، در آزمایش‌های بعدی تعداد مش‌ها بزرگ‌تر انتخاب می‌شود تا به عددی برسد که پس از آن تغییر در ابعاد مش تغییری در خروجی نتایج ندهد. شکل ۳، شرایط مرزی به کار رفته در این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شرایط مرزی به کار رفته برای وجه‌های مختلف شبکه حل

پس از انتخاب بهترین شبکه حل، نتایج مدل‌سازی عددی شامل مؤلفه‌های پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، اعماق مزدوج و استهلاک انرژی و نیز مقادیر تنش برشی استخراج شد؛ در نهایت، این مقادیر بدون بعد شده و براساس آن نمودارهای مربوطه رسم شدند. جدول ۱، مقادیر بدون بعد استخراج شده را براساس خروجی عددی نرم‌افزار نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در مدل

پارامتر	علامت اختصاری	دامنه
عدد فرود قبل از پرش	Fr_1	۱۲ - ۱/۵
شیب جانبی	m	۱:۱، ۱:۰.۵۷، ۱:۰.۲۷
نسبت عرض کانال به طول پرش	x/L_j	۰.۱۹ - ۰.۷۶
نسبت تنش برشی به تنش برشی حداکثر	$\frac{\tau}{\tau_{max}}$	۰.۰۵ - ۱/۲
نسبت طول پرش به عمق اولیه	$\frac{L_j}{y_1}$	۶۵ - ۱۷
نسبت عمق ثانویه پرش به عمق اولیه	$\frac{y_2}{y_1}$	۱۱ - ۱/۶
نسبت افت انرژی مخصوص	R_L	۸۵ - ۲/۵

صحت‌سنجی مدل

در این مطالعه، برای صحت‌سنجی مدل از نتایج پژوهش آزمایشگاهی امید و همکاران (۲۰۰۷) با کانال دوزنقه‌ای واگرا به طول ۹ متر و عرض کف ۰/۵ متر با بستر نرم، دیواره‌های شیشه‌ای با سه شیب جانبی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و زاویه واگرایی ۳ تا ۹ درجه در دامنه‌های مختلف اعداد فرود از ۳ تا ۹/۸۳ استفاده شد. در تحقیق حاضر

1- Mean Absolute Deviation

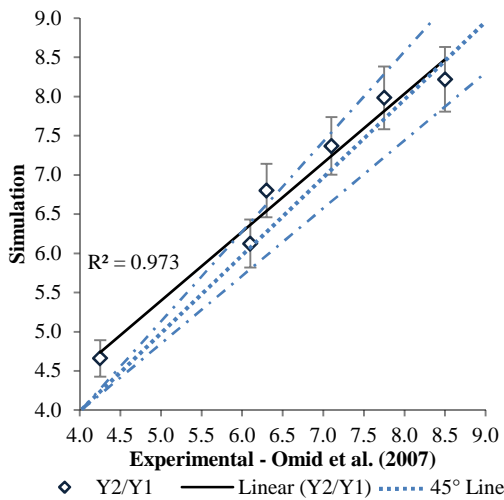
2- Mean Square Error

3- Root Mean Square Error

4- Mean Absolute Percentage Error

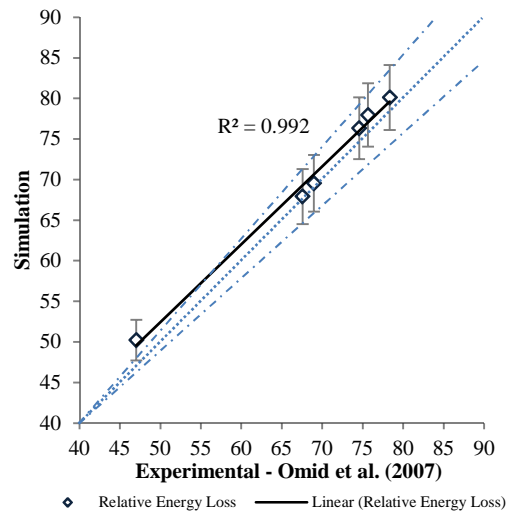
5- Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

مؤلفه‌های پرش، مقادیر شاخص‌های آماری ذکر شده ارائه شده است. در حالت کلی، بررسی محدوده شاخص‌های آماری درج شده در جدول زیر نشان می‌دهد که توانایی مدل در شبیه‌سازی در دامنه قابل قبولی قرار دارد. مقادیر شاخص RMSE که در تحلیل‌های آماری دارای اهمیت ویژه‌ای است، برای مقایسه‌های مربوط به افت انرژی نسبی، نسبت اعماق مزدوج و نسبت بدون بعد طول پرش به ترتیب مقادیر ۱/۹۲۱، ۰/۳۲۳ و ۱/۶۲۵ را نشان می‌دهد که بر این اساس می‌توان گفت مدل دارای توانایی و دقت بالایی در شبیه‌سازی است.

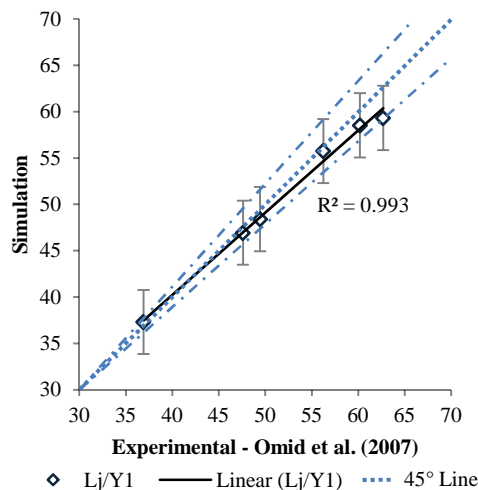


شکل ۵- مقایسه نسبت عمق ثانویه پرش به عمق اولیه به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی

برای صحت‌سنجی مدل Flow3D، مقادیر آزمایشگاهی امید و همکاران (۲۰۰۷) در مقابل مقادیر محاسباتی حاصل از مدل عددی در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ رسم شدند؛ با توجه به این شکل‌ها، مشخص است که مدل، دقت قابل قبولی در برآورد مؤلفه‌های یاد شده دارد؛ به طوری که به ترتیب برای مقادیر افت انرژی نسبی، نسبت اعماق مزدوج و نسبت بدون بعد طول پرش بیش از ۸۳٪، ۶۷٪ و ۹۵٪ از داده‌های شبیه‌سازی شده در محدوده اطمینان $\pm 5\%$ قرار دارند. در جدول ۲، برای تعیین دقت مدل و میزان انطباق آن با نتایج آزمایشگاهی برای هر کدام از



شکل ۴- مقایسه نسبت افت انرژی مخصوص حاصل از نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی



شکل ۶- مقایسه نسبت طول پرش به عمق اولیه به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی

بسیار پر اهمیت است. همانطور که در بخش قبل بدان اشاره شد، پس از تعیین و به‌کارگیری شرایط مرزی مذکور در مدل، روند تشکیل پرش هیدرولیکی در مدل شبیه‌سازی شد. شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب پروفیل پرش

نتایج و بحث

ساختار پرش هیدرولیکی

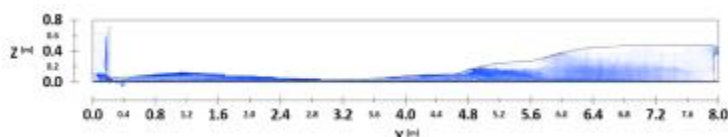
برای شبیه‌سازی تمام پدیده‌های هیدرولیکی، از جمله پرش هیدرولیکی نحوه به‌کارگیری شرایط اولیه و مرزی

۳/۹ متر تا فاصله ۶/۹ متر از ابتدای فلوم) و عمق ثانویه پرش ۰/۵۵ متر و نهایتاً در شکل ۹، طول و عمق ثانویه پرش در فلوم ۷۵ درجه به ترتیب ۲/۶ متر (در حد فاصل ۴/۵ متر تا ۷/۱+ متر از ابتدای فلوم) و ۰/۷۰ متر است. در حالت کلی، طول پرش در کانال با شیب جانبی ۴۵ درجه نسبت به شیب ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب در حدود ۱۷٪ و ۲۸٪ بیشتر است؛ این در حالی است که عمق ثانویه پرش با شیب ۴۵ درجه در مقایسه با دو شیب جانبی ۶۰ و ۷۵ به ترتیب با ۲۲٪ و ۵۶٪ کاهش، کمترین عمق را دارد. بر این اساس، می‌توان گفت که با افزایش شیب جانبی شاهد کاهش طول پرش و افزایش عمق پرش خواهیم بود.

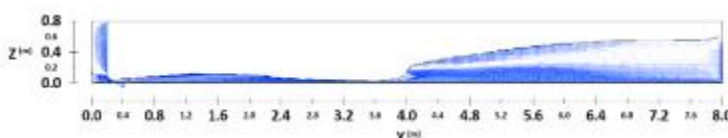
هیدرولیکی شبیه‌سازی شده با سه زاویه ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه را با عدد فرود ۱۱ نشان می‌دهند. از مقایسه پروفیل طولی پرش با شیب‌های جانبی مختلف در شکل‌های اخیر، قابل مشاهده است که طول و عمق پرش رفتاری کاملاً متفاوت دارد. در شکل ۷، پروفیل طولی فلوم با زاویه ۴۵ درجه نشان داده شده است. ساختار پرش در این حالت با طول پرش ۳/۶ متر (در فاصله ۳/۴ متر تا فاصله ۷ متر از ابتدای فلوم) و عمق ثانویه پرش ۰/۴۵ متر دارای بیشترین طول و کمترین عمق ثانویه پرش است. در شکل ۸ که نشان‌دهنده مقطع طولی فلوم ۶۰ درجه است، طول پرش ۳ متر (در فاصله

جدول ۲- مقایسه آماری مقادیر مؤلفه‌های پرش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده

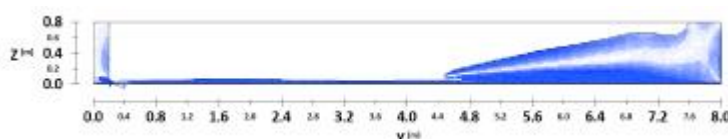
R ²	NSE	MAPE	RMSE	MSE	MAD	مؤلفه‌های پرش
۰/۹۹۲	۰/۹۶۶	۰/۰۲۶	۱/۹۲۱	۳/۶۸۹	۱/۶۵۵	نسبت افت انرژی مخصوص
۰/۹۷۳	۰/۹۴۳	۰/۰۴۷	۰/۳۲۳	۰/۱۰۴	۰/۱۹۳	نسبت بدون بعد اعماق مزدوج
۰/۹۹۳	۰/۹۶۵	۰/۰۲۳	۱/۶۲۵	۲/۶۴۲	۱/۱۲۸	نسبت طول پرش به عمق اولیه



شکل ۷- پروفیل طولی پرش شبیه‌سازی شده در فلوم با شیب جانبی ۴۵ درجه



شکل ۸- پروفیل طولی پرش شبیه‌سازی شده در فلوم با شیب جانبی ۶۰ درجه



شکل ۹- پروفیل طولی پرش شبیه‌سازی شده در فلوم با شیب جانبی ۷۵ درجه

به ترتیب شاهد کاهشی در حدود ۲۰٪ و ۳۱٪ خواهیم بود. در جدول ۳ برای تعیین طول پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای براساس عمق اولیه و عدد فرود قبل از پرش تعیین شد.

عمق مزدوج

در شکل ۱۱ که مقایسه‌ای از شیب‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای و کانال مستطیلی ارائه شده توسط U.S.B.R را نشان می‌دهد، نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه در برابر

تغییرات طول پرش هیدرولیکی

در این تحقیق، طول پرش فاصله طولی بین شروع و پایان نوسانات سطح جریان حاصل از مدل عددی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، نتایج نسبت بی‌بعد طول پرش با شیب‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای و نتایج کانال مستطیلی ارائه شده توسط U.S.B.R مقایسه شده‌اند؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار m یا به عبارتی با کاهش شیب جانبی بر مقادیر بی‌بعد $\frac{L_j}{y_1}$ افزوده شده که نشان می‌دهد با افزایش شیب جانبی از ۴۵ به ۶۰ و ۷۵ درجه

جدول ۴- معادلات استخراج شده برای تعیین نسبت اعماق مزدوج در کانال دوزنقه‌ای

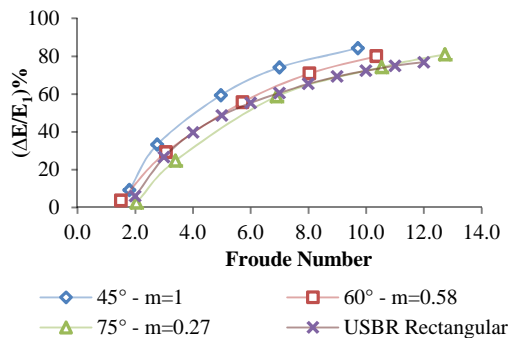
شماره معادله	رنگ معادله	کانال (درجه) پش
(۱۷)	$\frac{y_2}{y_1} = 0.7473Fr_1 + 0.0972$	۴۵
(۱۸)	$\frac{y_2}{y_1} = 0.6991Fr_1 + 0.8154$	۶۰
(۱۹)	$\frac{y_2}{y_1} = 0.6992Fr_1 + 1.4897$	۷۵

استهلاک انرژی

اختلاف بین هد کل در بالادست و پایین دست پرش را که معادل اختلاف انرژی مخصوص قبل و بعد از پرش است، به عنوان افت انرژی پرش هیدرولیکی در نظر می‌گیرند. نسبت افت انرژی مخصوص به انرژی اولیه به صورت معادله (۲۰) بیان می‌شود:

$$R_L = \frac{\Delta E}{E_1} = \frac{y_1 - y_2 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]}{y_1 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2}} \quad (20)$$

که در آن: y_1 ، عمق اولیه پرش؛ y_2 ، عمق ثانویه پرش؛ Fr ، عدد فرود؛ A ، سطح مقطع جریان؛ و D ، عمق هیدرولیکی است. از بررسی شکل ۱۲ که نتایج افت انرژی نسبی در شیب‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای و نتایج U.S.B.R برای کانال مستطیلی را نشان می‌دهد، قابل درک است که در کانال با شیب دیواره ۴۵ درجه بیشترین مقدار افت انرژی اتفاق می‌افتد که در این حالت، بیشترین میزان افت مربوط به عدد فرود ۹/۷ با دبی ورودی ۹۰ لیتر بر ثانیه به مقدار ۸۴/۳٪ است. این مقدار در مقایسه با دو شیب جانبی ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب ۵٪ و ۱۲٪ افزایش افت انرژی را نشان می‌دهد. برای تعیین نسبت بی‌بعد افت انرژی مخصوص در کانال دوزنقه‌ای براساس عدد فرود معادلات مندرج در جدول ۵ پیشنهاد شده است.

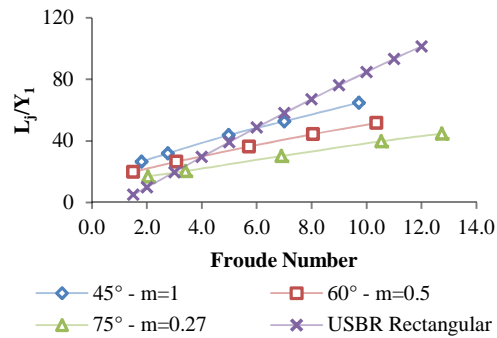


شکل ۱۲- نسبت افت انرژی مخصوص در شیب‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای

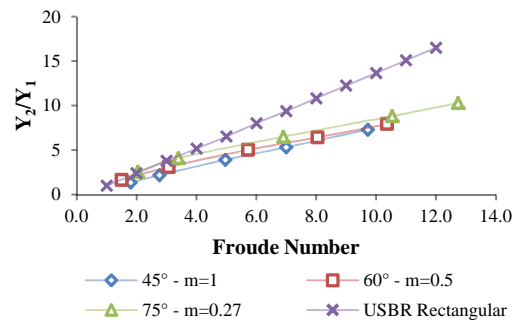
عدد فرود برای شیب‌های مختلف دیواره جانبی با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش شیب جانبی نسبت اعماق مزدوج افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش شیب جانبی از زاویه ۴۵ درجه به ۶۰ و ۷۵ درجه به مقادیر نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه افزوده می‌شود. این اختلاف در مقایسه با کانال ۶۰ و ۷۵ درجه کاهشی به ترتیب در حدود ۸٪ و ۲۰٪ نشان می‌دهد. در جدول ۴ برای تعیین نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه در کانال دوزنقه‌ای براساس معادلاتی ارائه شده است.

جدول ۳- معادله‌های استخراج شده برای تعیین طول پرش هیدرولیکی در کانال دوزنقه‌ای

شماره معادله	رنگ معادله	شیب (درجه) جانبی کانال
(۱۴)	$\frac{L_j}{y_1} = 19.105Fr_1^{0.5276}$	۴۵
(۱۵)	$\frac{L_j}{y_1} = 15.766Fr_1^{0.4952}$	۶۰
(۱۶)	$\frac{L_j}{y_1} = 11.166Fr_1^{0.5352}$	۷۵

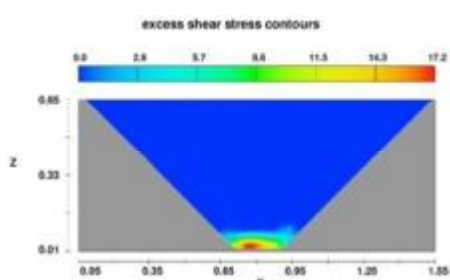


شکل ۱۰- نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش در شیب‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای

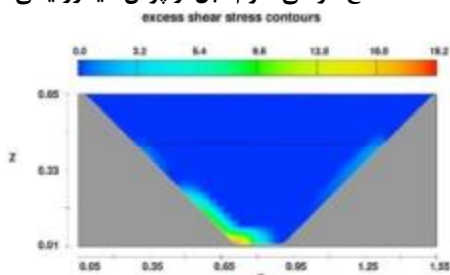


شکل ۱۱- نسبت عمق ثانویه پرش به عمق اولیه در شیب‌های مختلف کانال

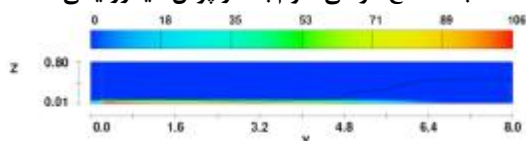
کف موسوم‌اند، است. در شکل‌های ۱۶ الی ۲۰ مقادیر تنش برشی بعد از پرش هیدرولیکی با اعداد فرود مختلف در سه شیب یادشده با هم مقایسه شده‌اند. در نمودارها، تمرکز تنش در بخش میانی مقطع عرضی کانال مشهود است. در حالت کلی، برای اعداد فرود بالاتر از ۳، با افزایش شیب جانبی از ۴۵° به ۶۰° و ۷۵° مقدار بدون بعد تنش برشی بعد از پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. مقایسه مقادیر تنش برشی برای سه فلوم مذکور حاکی از استهلاک تنش برشی بعد از پرش نسبت به قبل از پرش هیدرولیکی است که بیشترین آن مربوط به فلوم با شیب ۴۵ درجه به میزان ۴۸٪ است.



الف - مقطع عرضی فلوم قبل از پرش هیدرولیکی

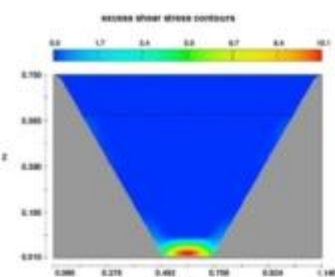


ب - مقطع عرضی فلوم بعد از پرش هیدرولیکی



ج - مقطع طولی فلوم در طول پرش هیدرولیکی

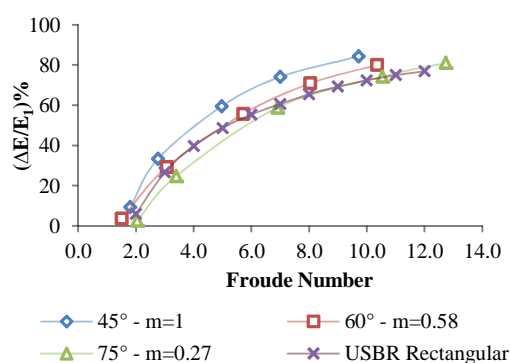
شکل ۱۳- پروفیل عرضی و طولی تنش برشی در فلوم ۴۵ درجه با دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۴- پروفیل عرضی تنش برشی بعد از پرش هیدرولیکی در فلوم ۶۰ درجه با دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه

جدول ۵- معادلات استخراج شده برای تعیین نسبت بی‌بعد افت انرژی مخصوص در کانال دوزنقه‌ای

شماره معادله	شکل معادله	تعیین کننده
(۲۱)	$\frac{\Delta E}{E_1} = 44.617 \ln(Fr_1) - 14.18$	۴۵
(۲۲)	$\frac{\Delta E}{E_1} = 40.2 \ln(Fr_1) - 14.012$	۶۰
(۲۳)	$\frac{\Delta E}{E_1} = 43.363 \ln(Fr_1) - 27.735$	۷۵

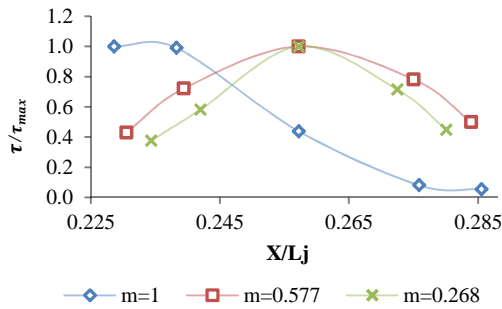


شکل ۱۲- نسبت افت انرژی مخصوص در شیب‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای

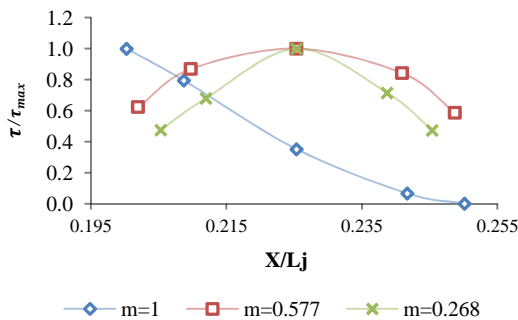
تنش برشی

شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ تغییرات تنش برشی را در مجاورت کف و دیواره کانال دوزنقه‌ای نشان می‌دهند. شکل ۱۳، پروفیل عرضی و طولی تنش برشی را قبل و بعد از پرش هیدرولیکی برای فلوم ۴۵ درجه نشان می‌دهد؛ نکته قابل توجه در این شکل، تمرکز تنش برشی در سمت چپ فلوم و روی دیواره جانبی کانال بعد از پرش هیدرولیکی است. با دقت در قسمت «ج» شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که تنش برشی کف بعد از درجه بیشترین مقدار را دارد و پس از پرش هیدرولیکی به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. این امر، به دلیل افت ناگهانی سرعت و اتلاف انرژی بعد از پرش اتفاق می‌افتد.

در بررسی شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵، تمرکز تنش برشی بعد از پرش هیدرولیکی در قسمت چپ فلوم با شیب ۴۵ درجه قابل تأمل است؛ در حالیکه چنین وضعیتی در فلوم با زاویه ۶۰ و ۷۵ درجه که مقطع عرض آنها به فلوم مستطیلی نزدیک‌تر است، مشاهده نمی‌شود. این امر به دلیل وجود ناحیه جداشدگی در کف، که به غلتک‌های



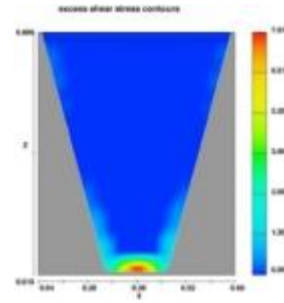
شکل ۱۹- تنش برشی با شیب‌های مختلف - عدد فرود ۸



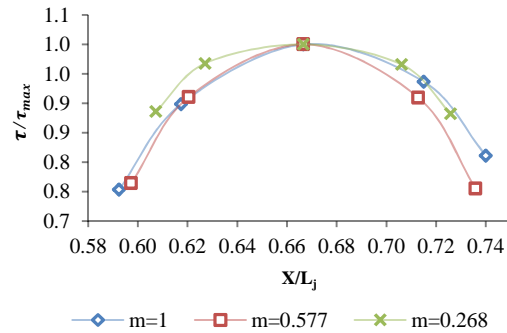
شکل ۲۰- تنش برشی با شیب‌های مختلف - عدد فرود ۱۰

نتیجه‌گیری

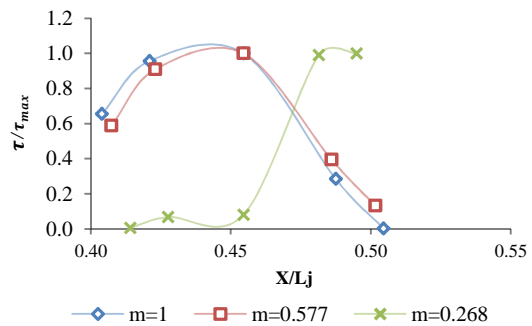
طبق این مطالعه ملاحظه شد که در مقایسه کانال دوزنقه‌ای با شیب‌های مختلف، پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۴۵ درجه رفتاری متفاوت از خود نشان داد. تقارن پرش در کانال دوزنقه‌ای وابستگی شدیدی به عدد فرود دارد؛ به طوری که در اعداد فرود بزرگ‌تر از ۳ پرش و تنش برشی در سمت چپ کانال متمرکزتر دیده می‌شود. بررسی نتایج نشان داد بیشترین میزان افت انرژی مربوط به کانال با زاویه ۴۵ درجه با عدد فرود ۹/۷ به مقدار ۸۴/۳٪ بود. مقایسه نسبت طول پرش به عمق اولیه نیز حاکی از آن است که بیشترین مقدار مربوط به زاویه ۴۵ درجه بوده و نسبت به کانال ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب اختلافی در حدود ۲۰٪ و ۳۱٪ را نشان داد. همان‌طور که از مقایسه نمودارها ملاحظه شد، با افزایش شیب جانبی از ۴۵ درجه به ۶۰ و ۷۵ درجه از مقدار نسبت عمق ثانویه پرش به عمق اولیه کاسته شد.



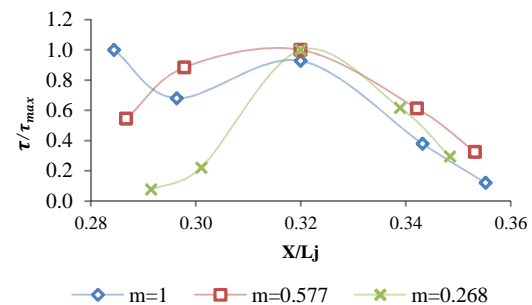
شکل ۱۵- پروفیل عرضی تنش برشی بعد از پرش هیدرولیکی در فلوم ۷۵ درجه با دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۶- تنش برشی با شیب‌های مختلف - عدد فرود ۱/۵



شکل ۱۷- تنش برشی با شیب‌های مختلف - عدد فرود ۳



شکل ۱۸- تنش برشی با شیب‌های مختلف - عدد فرود ۵/۵

منابع

۱. شفاعی بجستان م. ۱۳۹۲. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. ویرایش دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران. ۵۴۹ ص.
۲. کاهه م. و دهقانی ا.ا. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۰(۵): ۴۱-۶۰.
3. Chanson H. 2008. Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena, A survey of experimental results. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 28: 191-210.
4. Hughes William C. and Ernest Flack J. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic engineering*. 110(12): 1755-1771.
5. Moriasi D. N. Arnold J. G. Van Liew M. W. Bingner R. L. Harmel R. D. and Veith T. L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations" *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
6. Ohtsu I. 1976. Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels. In *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 246: 57-72.
7. Omid M. H. Esmaeeli Varaki M. and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel", *Journal of Hydraulic Research*. 45(4): 512-518.
8. Wanoschek R. and Hager W. H. 1989. Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel. *Journal of Hydraulic Research*. 27(3): 429-446.