

تأثیر بلوک های قائم و منحنی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در مقاطع

مستطیلی واگرا با استفاده از نرم افزار FLOW-3D

خدیجه نظری علی آبادی^{۱*}، علی اکبر اختری^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی

Kh54nazari@gmail.com

تاریخ پذیرش ۹۶/۰۷/۰۲

تاریخ دریافت ۹۵/۰۳/۱۰

چکیده

یکی از سازه های متداول برای استهلاک انرژی جریان های پر سرعت، حوضچه آرامش است. بررسی پژوهشگران نشان می دهد که واگرایی و زبری های مصنوعی حوضچه های آرامش هر یک باعث کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه، طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی نسبت به پرش کلاسیک می شود. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار FLOW-3D و مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا انجام شده است و با نتایج بدست آمده از بررسی های آزمایشگاهی مقایسه شد. در ادامه آثار بلوک قائم و منحنی بر مشخصات پرش هیدرولیکی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی k-ε استاندارد برای پیش بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا مناسب بوده و هماهنگی قابل قبولی دارد. بررسی ها نشان داد که در مقایسه میان بلوک ها، بلوک های منحنی، اثر گذارتر عمل می کنند، طوری که بلوک های منحنی باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی به ترتیب ۷۰ و ۳۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است و بلوک های قائم، باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی به ترتیب ۴۶ و ۱۸ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است.

واژگان کلیدی: پرش هیدرولیکی واگرا، بلوک قائم، بلوک منحنی، مدل آشفتگی k-ε، نرم افزار FLOW-3D

۱) مقدمه

سرعت جریان به اندازه قابل توجهی کاسته می شود. سازه هایی که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت به حد قابل قبولی می شوند، سازه های مستهلک کننده انرژی نامیده می شوند و حوضچه های آرامش از نوع پرشی، معمول ترین مستهلک کننده انرژی اند که در سازه های هیدرولیکی استفاده می شوند. بلوک های میانی از جمله سازه های عرضی در حوضچه آرامش هستند که برای پایدار ساختن پرش، کوتاه

پرش یا جهش هیدرولیکی، یک جریان متغیر سریع در کانا های روباز است و پدیده ای است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تبدیل می شود. در اثر پدیده پرش هیدرولیکی عمق جریان در مسیر کوتاهی به میزان زیادی افزایش می یابد و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی، از میزان

آبشستگی پایین دست سرریز را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که مدل‌هایی که تولید جریان چرخشی عمودی می‌کنند، بهتر از سایر بلوک‌ها منجر به افت انرژی بیشتر می‌شوند [6]. ولی‌نیا و همکاران، بررسی اثر فاصله بلوک‌های کف از دریچه بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی را آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد فاصله بلوک‌های کف از دریچه، اثر ناچیزی بر استهلاك انرژی نسبی دارد و افزایش فاصله بلوک‌های کف از ۰/۱۸ به ۰/۵۴، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر طول نسبی پرش هیدرولیکی دارد به گونه‌ای که این طول به طور میانگین حدود ۱۱۵ درصد افزایش می‌یابد [7].

ژائو و میسرا، پرش روی بستر با شیب کم را شبیه‌سازی کردند. آنها با استفاده از معادلات پیوستگی و مومتم و با مدل آشفستگی $k-\epsilon$ به صورت دو بعدی پرش هیدرولیکی را شبیه سازی کردند و نتایج پژوهش خود را به صورت پروفیل‌های سرعت و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی (k) و اتلاف انرژی ارائه دادند [8]. صباغ یزدی و همکاران، پرش هیدرولیکی را به وسیله نرم‌افزار FLOW-3D درحوضچه آرامش سرریز سد نازلو چای شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد نرم‌افزار، پروفیل سطح آب و توزیع عمقی سرعت را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به خوبی محاسبه کرده است. در خصوص محاسبه فشار نیز، مقادیر محاسبه شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردارند [9]. دانش فراز و همکاران، اثر واگرایی دیواره‌ها روی ویژگی‌ها و طول پرش و استهلاك انرژی در حوضچه‌های آرامش را، با استفاده از مدل FLOW-3D مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی، طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و استهلاك انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [10]. صاحبی و همکاران، پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا را به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و مدل آشفستگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG و روش VOF برای بدست آوردن سطح آب بررسی کردند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که مدل عددی قادر است

کردن طول آن و استهلاك بیشتر انرژی، به کارگرفته می‌شوند. مطالعات انجام شده در این زمینه را می‌توان به دو بخش عددی و آزمایشگاهی تقسیم نمود، در ادامه به خلاصه‌ای از تحقیقات قبلی اشاره شده است.

الوبایدی و همکاران، آزمایش‌هایی را برای بررسی اثر اندازه، انحنا و موقعیت بلوک‌های میانی کف منحنی شکل در استهلاك انرژی و کنترل پرش هیدرولیکی انجام داده‌اند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بلوک‌های منحنی در کم کردن انرژی جنبشی پایین دست نسبت به بلوک‌های با لبه مستقیم و مستطیلی موثرتر است [1]. ورما و همکاران، آزمایش‌های خود را برای یافتن حوضچه‌های آرامش اقتصادی برای خروجی‌های دایره‌ای شکل انجام دادند. در این مطالعه مشخص شد که بلوک‌های گوه‌ای شکل شکافنده با زاویه راس ۱۵۰ درجه بهترین عملکرد را در پخش کردن جت آب روی پهنای حوضچه آرامش در طول کوتاهتری دارند [2]. قویسی و همکاران، تأثیر بلوک‌های کف بر ویژگی‌های هیدرولیکی جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نصب بلوک کف در حوضچه آرامش واگرا با مقطع دوزنقه‌ای، بطور متوسط ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش نسبت عمق ثانویه را نسبت به جهش مشابه بدون بلوک در پی دارد [3]. السبایه و شبایک، پرش هیدرولیکی را روی بستر زبر سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای با شیب کناری ۴۵ درجه، دوزنقه‌ای با شیب کناری ۶۰ درجه و مستطیلی در دامنه اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش عمق ثانویه به ترتیب در زبری سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای با شیب کناری ۴۵ درجه، مستطیلی، دوزنقه‌ای با شیب کناری ۶۰ درجه بیشترین مقدار را دارد [4]. عبدالحمید، درباره آثار بلوک‌های نیم دایره‌ای بر میزان آبشستگی در پایین دست یک سرریز مطالعاتی را به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش ارتفاع بلوک موجب کاهش عمق و طول آبشستگی پایین دست می‌گردد. همچنین افزایش فاصله بلوک از ابتدای حوضچه موجب کاهش عملکرد حوضچه می‌شود [5]. بستای، آثار بلوک‌های مختلف بر میزان

طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی نسبت به حوضچه‌های کلاسیک می‌شود.

نصب ضمامی از قبیل بلوک‌های کف و آب پایه انتهایی در حوضچه‌های مستطیلی مستقیم نتایج بسیار مثبتی را در بهبود پارامترهای جهش هیدرولیکی نشان داده است. بنظر می‌رسد استفاده از این ضمام در حوضچه‌های واگرا نیز تاثیر مشابهی بر افزایش استهلاک انرژی، کاهش طول و نیز تثبیت موقعیت جهش داشته باشد. پس لزوم پژوهش‌های بیشتر در این زمینه به نظر می‌رسد. همچنین تاکنون درباره اثر توام واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش و بلوک‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی به صورت عددی تحقیقی صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش بررسی اثر بلوک‌های قائم و منحنی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D است.

(۲) مواد و روش‌ها

۲-۱- نرم‌افزار Flow-3D

نرم‌افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسایل پیچیده دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم‌افزار برای مدل‌کردن جریان‌های سطح آزاد سه بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. این نرم‌افزار معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب احجام محدود حل می‌کند و دامنه جریان را به شبکه‌هایی با سلول‌های مستطیل شکل که المان‌های آجری نیز نامیده می‌شوند، تقسیم‌بندی می‌کند که برای هر سلول مقدارهای میانگین هر سلول کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می‌شود.

در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است.

(۱) روش حجم سیال (VOF): این روش برای نشان دادن

رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می‌شود.

پروفیل سطح آب را با خطای نسبی ۷ درصد شبیه‌سازی نماید. و همچنین هماهنگی خوبی بین پروفیل‌های شبیه‌سازی شده سرعت با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد [11]. کاهه و دهقانی، شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی روی سطوح موج‌دار را با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل RNG k-ε توانایی بهتری در تخمین عمق ثانویه، طول پرش و توزیع سرعت دارد. ضریب تنش برشی بدست آمده از مدل عددی به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک بود و به طور متوسط ۸ برابر مقدار آن در پرش هیدرولیکی روی سطوح صاف بدست آمد [12]. چرن و سیسموری، با استفاده از مدل عددی SPH، پرش هیدرولیکی را روی بستر صاف و سه بستر موج دار مثلثی، دوزنقه‌ای و سینوسی شبیه‌سازی نمودند، آنها توانستند تغییرات پارامترهای پرش را روی بسترهای مذکور با استفاده از روش عددی SPH به خوبی پیش‌بینی نمایند و مقادیر تغییرات طول نسبی پرش، نسبت اعماق مزدوج و اتلاف انرژی را به دست آورند [13]. ابراهیمی و همکاران، با استفاده از نرم افزار FLUENT به شبیه‌سازی دوبعدی پرش هیدرولیکی روی بسترهای زیر مستطیلی و مثلثی پرداختند. در این پژوهش از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شد و برای درستی‌آزمایی در این پژوهش از مدل آزمایشگاهی السبایه و شبایک، استفاده کردند. نتایج نشان داد که خطای پروفیل سطح آب مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی بیشینه ۴/۴ درصد و خطای طول پرش هیدرولیکی بیشینه ۶/۷ درصد بدست آمده است و نتایج هماهنگی خوبی با نتایج السبایه و شبایک داشت [14] بایون و همکاران، به بررسی عملکرد دو نرم‌افزار OpenFOAM و FLOW-3D در مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی با عدد رینولدز پایین پرداختند. 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 هماهنگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند [15]. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط پژوهشگرانی همچون امید واسمعیلی ورکی، امید و همکاران، بختیاری و کاشفی پور، کاسی، شجاعیان و همکاران [20-16]، نشان داد که واگرایی حوضچه‌های آرامش باعث کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه،

۳) مشخصات مدل آزمایشگاهی

این پژوهش با توجه به داده‌ها و اطلاعات اولیه مدل آزمایشگاهی گرد نوشهری و همکاران [21] که در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام گرفته است، پایه‌گذاری شده است.

مدل شامل مخزن آرام کننده با سرریز مستطیلی لبه تیز، مخزن تأمین بار آبی، دریچه کشویی لبه تیز با ارتفاع بازشدگی ثابت ۳ سانتی‌متر، یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌های شیشه‌ای به عرض ۰/۵ متر، عمق ۰/۶ متر و طول ۹ متر و یک دریچه کشویی در انتهای کانال پایین دست برای تنظیم عمق مورد نیاز پایاب بود. بخشی از کانال مدل به طول ۳ متر که بلافاصله بعد از دریچه مخزن قرار داشت، به گونه‌ای طراحی و ساخته شده بود که به عنوان حوضچه آرامش، امکان ایجاد واگرایی با زوایای متفاوت در دامنه وسیعی را فراهم می‌کرد. زوایای واگرایی دیواره جانبی حوضچه آرامش نسبت به محور مرکزی کانال (θ) معادل ۳، ۵ و ۹ درجه انتخاب شده بودند. موقعیت جهش با تنظیم پایاب به کمک یک دریچه در انتهای کانال، بگونه‌ای تنظیم شده بود که پنجه پرش در ابتدای واگرایی کانال باشد [21]. در شکل (۱) طرح کانال آزمایشگاهی گرد نوشهری و همکاران آورده شده است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به یک دبی آمده است. در این جدول θ زاویه واگرایی کانال نسبت به محور کانال، Fr_1 عدد فرود اولیه پرش، Q دبی با واحد لیتر بر ثانیه، Y_g ارتفاع بازشدگی دریچه ورودی، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق ثانویه پرش و L_j طول پرش هیدرولیکی است.

شکل ۱. طرح کانال آزمایشگاهی

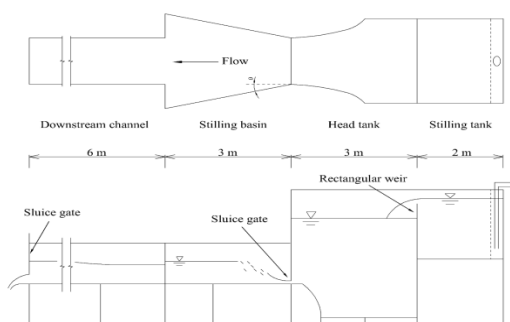


Fig. 1. Laboratory channel plan

۲) روش کسر مساحت- حجم مانع (FAVOR): کاربرد این روش برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب، مانند مرزهای هندسی است.

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتم و معادله پروفیل سطح آزاد است.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(uA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(uA_z) = 0 \quad (1)$$

که در این معادله (u, v, w) و (A_x, A_y, A_z) به ترتیب مقادیر سرعت و نسبت مساحت در راستای (x, y, z) است.

معادلات مومنتم:

معادلات مومنتم یا حرکت از حل معادلات ناویر- استوکس حاصل می‌شوند. معادلات ناویر- استوکس به صورت زیر است.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2)$$

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

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

که در رابطه بالا g_z شتاب در راستای Z است.

معادله پروفیل سطح آزاد:

پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال (VOF)، یعنی $F(x, y, z)$ تخمین زده می‌شود. این تابع مقدار حجم سیال را در سلول محاسباتی نشان می‌دهد و به وسیله معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right\} = 0 \quad (5)$$

که در این رابطه A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های (x, y, z) ، (u, v, w) متوسط سرعت در جهت‌های (x, y, z) ، $F(x, y, z)$ تابع نسبت سیال که مقادیری [۰/۱] بین دارد.

جدول ۱. مشخصات مدل آزمایشگاهی

L_j	Y_2	Y_1	Y_g	Q	θ
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(Lit/s)	Fr_1 (degree)
79	12.3	2.05	3	23.9	5.2

Table 1. Laboratory Model Characteristic

۴) هندسه مدل عددی

برای مدل کردن کانال آزمایشگاهی از نرم افزار AutoCAD استفاده شد و پس از ترسیم آن به صورت سه بعدی، در قالب فایل STL تهیه و به نرم افزار FLOW-3D معرفی شد. در شکل (۲) هندسه مدل نشان داده شده است.

شکل ۲. هندسه تهیه شده برای مدل سازی عددی

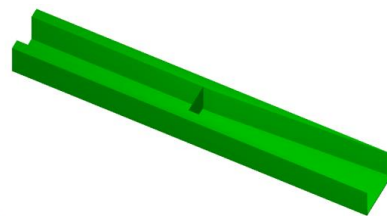


Fig. 2. Geometry prepared for numerical modeling

۵) شرایط مرزی

برای شبیه سازی از شرط مرزی بالادست سرعت ثابت^۱ و در پایین دست فشار ثابت^۲ معادل عمق پایاب، برای دیواره ها و کف کانال از شرط مرزی دیواره^۳ و مرز سطح آب به صورت تقارن^۴ انتخاب شده است. در شکل (۳) شرایط مرزی میدان حل نشان داده شده است.

شکل ۳. شرایط مرزی مدل عددی

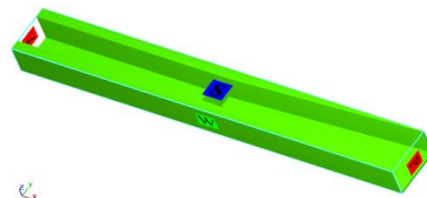


Fig. 3. The numerical model boundary conditions

۶) شبکه بندی مدل عددی و حساسیت سنجی

نرم افزار FLOW-3D به منظور حل میدان های محاسباتی جریان از شبکه های کارتیزین و استوانه ای استفاده می نماید. در این پژوهش از شبکه بندی کارتیزین استفاده شده است. با توجه به هندسه مدل و همچنین معادلات پیچیده پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا شبکه بندی کانال به صورت غیر یکنواخت در نظر گرفته شد، به گونه ای که در مش بندی کف، دیواره ها و دریچه چون از اهمیت زیادی برخوردار هستند از تعداد سلول های مش بیشتری استفاده شد.

در شبکه بندی اگر تعداد مش ها از مقدار مشخصی کمتر باشد، از دقت حل مسئله کاسته خواهد شد و خطای مدل سازی افزایش می یابد و اگر از مقدار بهینه بیشتر شوند بدون آنکه تاثیر مثبتی در مقدار خروجی ها داشته باشد، زمان بیشتری صرف آن خواهد شد و هم اینکه ممکن است اختلالاتی در حل مسئله بوجود بیاید. پس باید یک شبکه بهینه در نظر گرفته شود که برای این منظور حساسیت شبکه بندی انجام می شود. برای انتخاب مناسب ترین شبکه بندی، سه مدل با شبکه بندی متفاوت که مشخصات آن در جدول (۲) آورده شده است، شبیه سازی شد. همان گونه که جدول (۲) نشان می دهد حالت ۳ دارای کمترین خطای منحنی سطح آب است. این حالت علاوه بر اینکه منحنی سطح آب را با کمترین خطا شبیه سازی می کند بلکه مقدار عمق اولیه پرش و همچنین مکان ابتدای پرش هیدرولیکی را به خوبی شبیه سازی می کند. مدت زمان شبیه سازی برای درستی آزمایی ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد که در این زمان جریان به پایداری رسید.

جدول ۲. درصد خطای مربوط به شبکه های مختلف

RMSE%	The Number of cells in Length	The number of cells in Width	The number of cells in Height	Mesh No
13.71	164	36	40	Mesh 1
9.45	220	50	54	Mesh 2
5.29	325	75	80	Mesh 3

Table 2. The value of Error (percent) in different mesh

^۱ Specified Velocity^۲ Specified pressure^۳ wall^۴ Symmetry

۷) تحلیل نتایج عددی

۷-۱- پروفیل سطح آب

استاندارد نتایج بهتری را نسبت به مدل آشفتگی RNG k-ε نشان می‌دهد. مقدار خطای میانگین نسبی و میانگین مجذور مربعات مدل آشفتگی k-ε استاندارد به ترتیب برابر ۳/۵۵ و ۵/۲۹ درصد است که این نتایج توانایی بالای مدل را در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا نشان می‌دهد. علت خطای بیشتر مدل RNG k-ε در شروع پرش است. ابتدای پرش هیدرولیکی کمی در جلوتر اتفاق می‌افتد و همین باعث خطای بیشتر این مدل می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{\text{model}} - y_{\text{exp}}}{y_{\text{exp}}} \right)^2} \times 100 \quad (6)$$

$$RAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{\text{model}} - y_{\text{exp}}}{y_{\text{exp}}} \right) \times 100 \quad (7)$$

جدول ۳. خطای مدل های آشفتگی در شبیه سازی پروفیل سطح آب

the RNG k-ε turbulence model	the standard k-ε turbulence model	The statistical parameter
10.9	3.55	RAE (%)
17.5	5.29	RMSE (%)

Table 3. Error turbulence models in Simulation of water surface profile

۷-۲- پروفیل عمقی سرعت

شکل (۶) تعدادی از پروفیل های عمقی سرعت جریان را به صورت بی بعد در طول حوضچه آرامش برای مدل آشفتگی k-ε استاندارد نشان می‌دهد. این پروفیل ها به وضوح، ماکزیمم سرعت در ابتدای پرش، روند کاهشی سرعت ماکزیمم در طول پرش، سرعت های منفی در نزدیکی سطح آب که نشان از جریان های چرخشی و گردابه‌های پرش است و نیز پایداری و یکنواختی سرعت در انتهای حوضچه را نشان می‌دهد. در شکل X فاصله از ابتدای حوضچه، L طول حوضچه، U سرعت جریان، U* سرعت جریان در ابتدای حوضچه، Y عمق جریان و Y' عمق پایاب می باشد.

در شکل های (۴ و ۵) پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای صاف، که از مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε بدست آمده، با مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. برای محاسبه خطای شبیه‌سازی از دو رابطه (۶ و ۷) استفاده شده است. این روابط میانگین مجذور مربعات (بی بعد) و خطای میانگین نسبی مدل عددی و آزمایشگاهی است که مقادیر آن در جدول (۳) ارائه شده است.

شکل ۴. مقایسه پروفیل سطح آب مدل آشفتگی k-ε استاندارد و داده‌های آزمایشگاهی

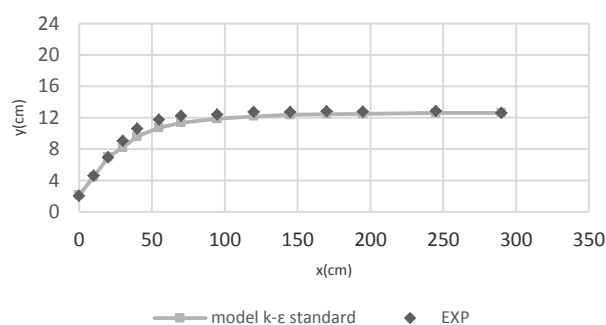


Fig. 4. Compare the water surface profile of the standard k-ε turbulence model and experimental data

شکل ۵. مقایسه پروفیل سطح آب مدل آشفتگی RNG k-ε و داده‌های آزمایشگاهی

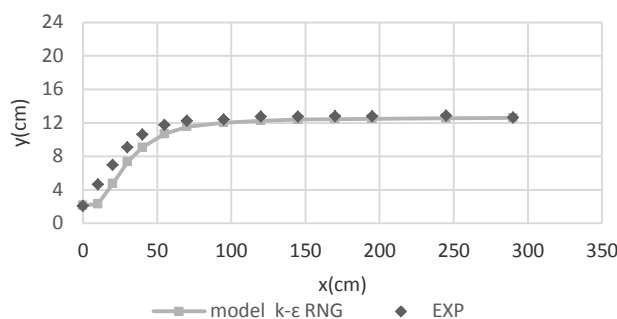


Fig. 5. Compare the water surface profile of the RNG k-ε turbulence model and experimental data

همان‌گونه که از نمودارها مشخص است، مدل آشفتگی k-ε

۴-۷- مشخصات پرش هیدرولیکی

در مطالعه پرش هیدرولیکی پارامترهای نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی سعی بر آن بوده که مقادیر این پارامترها با داده‌های آزمایشگاهی دارای کمترین خطا باشند. در جدول (۴) مشخصات پرش هیدرولیکی مدل شبیه‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. برای بدست آوردن افت نسبی انرژی از نرم‌افزار از روش میانگین‌گیری در چند نقطه عرضی در ابتدا و انتهای پرش استفاده شده است. نزدیکی اعداد بدست آمده از FLOW-3D با مقادیر آزمایشگاهی و همچنین مقادیر پایین خطاهای RMSE و RAE نشان می‌دهد مدل عددی می‌تواند با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی را انجام دهد.

جدول ۴. مقایسه مشخصات پرش هیدرولیکی مدل و داده‌های آزمایشگاهی

	$Y_1(cm)$	$Y_2(cm)$	$L_j(cm)$	$\frac{\Delta E}{E_1}$
EXP	2.05	12.3	79	0.5624
FLOW-3D	2.15	11.65	83	0.5324
Error (%)	4.8	5.28	5	5.33

Table 4. Compare the model hydraulic jump characteristics and laboratory data

۸) کاربرد مدل عددی

در این بخش به نوآوری مدل عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا پرداخته می‌شود. در پژوهش‌های آزمایشگاهی برای تعیین اثر زبری و بلوک‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی در مقایسه با حالت بستر صاف از دریچه پایین دست استفاده می‌شود، به این ترتیب که عمق پایین دست به وسیله دریچه طوری تنظیم می‌شود که مکان ابتدای پرش هیدرولیکی و عدد فرود اولیه پرش با حالت بستر صاف یکسان باشد. سپس مشخصات پرش از جمله کاهش عمق ثانویه و طول پرش و افزایش افت انرژی اندازه‌گیری می‌شود. تا کنون بلوک‌های قائم در حوضچه‌های کلاسیک و واگرا به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌اند، اما به صورت عددی

شکل ۶. پروفیل‌های سرعت عمقی در حوضچه آرامش

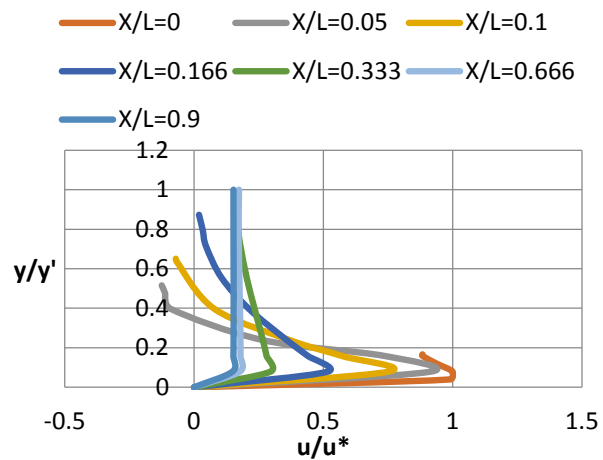


Fig. 6. Velocity profiles in stilling basin

۷-۳-۱- منحنی خطوط جریان

شکل (۷) الگوی جریان در مقطع طولی کانال را نشان می‌دهد. مدل، جریان‌های چرخشی ابتدای پرش هیدرولیکی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. شکل (۸) نیز جریان‌های چرخشی در مقطع عرضی در صفحه $z = 1.5cm$ و شبیه‌سازی میدان سرعت را نشان می‌دهد. براساس مشاهدات آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی به صورت متقارن رخ داده است که منحنی خطوط جریان شکل (۸) نیز این مطلب را تایید می‌کند.

شکل ۷. الگوی جریان در مقطع طولی کانال

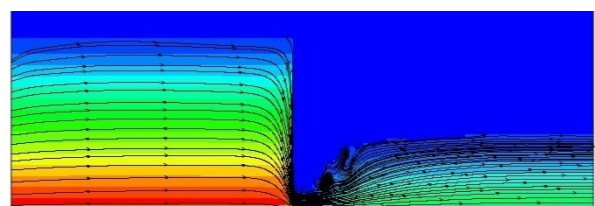


Fig. 7. Flow pattern in the channel longitudinal section

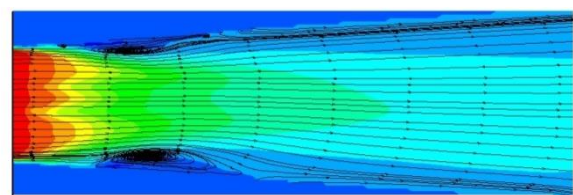
شکل ۸. الگوی جریان در مقطع عرضی کانال در صفحه $z = 1.5cm$ 

Fig. 8. Flow pattern in the channel cross section; $z = 1.5cm$

همچنین پروفیل سطح آب در حوضچه واگرایی صاف (smooth) ترسیم شده است. مشاهده می شود در مقایسه میان بلوک های قائم و منحنی، بیشترین کاهش سطح آب مربوط به بلوک های منحنی است.

در مقاله اشرف بستای [6] که در پیشینه تحقیق نیز ذکر شد، نشان داده شده است که بلوک های منحنی در حوضچه های کلاسیک بیشترین کاهش را در میزان عمق و طول آبشستگی در پایین دست سرریز دارند. و نیز در مقاله الوبایدی و همکاران [1] اشاره شد که بلوک های منحنی بیشترین اثر را در افزایش افت انرژی نسبت به سایر بلوک ها دارند. پس پارامترهای پرش هیدرولیکی با حضور بلوک های منحنی بیشتر از سایر زبری ها و بلوک ها بهبود می یابد.

شکل ۹. نمایی از بلوک قائم

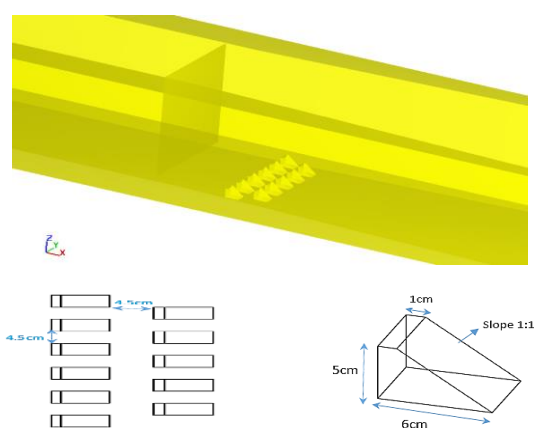


Fig. 9. A view of vertical block

شکل ۱۰. نمایی از بلوک منحنی

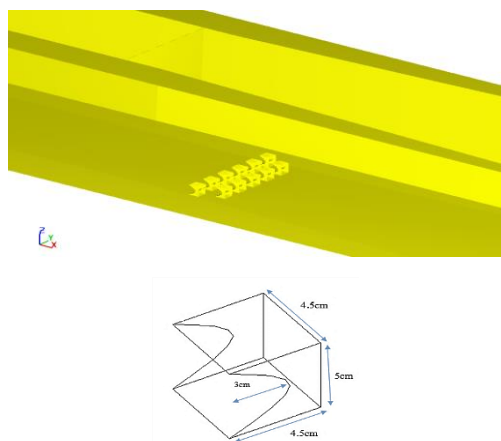


Fig. 10. A view of curve block

مطالعه ای صورت نگرفته است. همچنین تاکنون درباره اثر بلوک های منحنی بر ویژگی های پرش در حوضچه های کلاسیک مطالعاتی صورت گرفته است. اما در حوضچه آرامش واگرایی که این حوضچه ها نیز ویژگی های پرش را بهبود می بخشد، تأثیر توأم واگرایی و بلوک های منحنی به صورت آزمایشگاهی و نیز عددی مطالعه ای صورت نگرفته است. پس در این پژوهش سعی شد با بلوک های قائم و منحنی در حوضچه های آرامش واگرایی پارامترهای پرش هیدرولیکی بیشتر بهبود یابد.

در این پژوهش برای نخستین بار اثر بلوک قائم و منحنی بر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی و افزایش افت انرژی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D انجام شده است. لازم به ذکر است که تأثیر بلوک قائم و منحنی بر مشخصات پرش در مقاطع واگرایی در پژوهش آزمایشگاهی گردنوشهری و همکاران انجام نشده است.

برای ایجاد حوضچه آرامش با حضور بلوک ها از دو ردیف بلوک استفاده شده است. بلوک های قائم به طول ۶ سانتی متر، عرض ۴/۵ سانتی متر، ارتفاع ۵ سانتی متر و شیب ۴۵ درجه پایین دست، در کف بستر کانال در نظر گرفته شده اند. بلوک های منحنی به طول و عرض ۴/۵ سانتی متر، ارتفاع ۵ سانتی متر و شعاع انحنا ۳ سانتی متر، در کف بستر کانال در نظر گرفته شده اند. فاصله طولی و عرضی بین بلوک ها ۴/۵ سانتی متر و فاصله بلوک از ابتدای واگرایی ۱۶ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل های (۹ و ۱۰) به ترتیب نمایی از بلوک قائم و منحنی استفاده شده معلوم است.

لازم به ذکر است که در مرحله توسعه مدل عددی از بافل هایی در قبل از دریچه و نیز پایین دست حوضچه آرامش برای کنترل دبی استفاده شد. دبی در حالت حوضچه آرامش با مقطع واگرایی همراه با بلوک قائم و منحنی برابر با دبی در حالت حوضچه آرامش با مقطع واگرایی صاف است.

در شکل (۱۱) پروفیل سطح آب در حوضچه آرامش واگرایی با بلوک قائم (vertical block)، بلوک منحنی (Curve block)

سمت بالاحرکت کند و در گردابه ایجاد شده سطح آب، حجم بیشتری درگیر شود و یک گردابه قوی و بزرگتری نسبت به بلوک قائم تشکیل شود که منجر به استهلاک بیشتر انرژی و در نتیجه عمق پایاب کمتر می‌شود.

شکل ۱۳. نیمرخ طولی خطوط جریان در حوضچه واگرا با بلوک منحنی

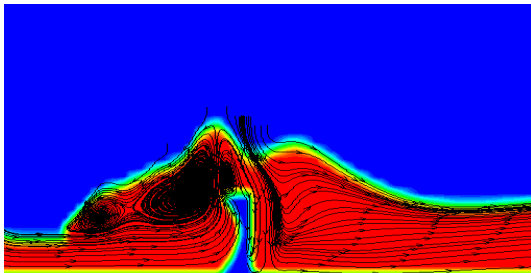


Fig. 13. Flow pattern in the Divergent stilling basin with curve block

۸-۲- اثر بلوک های قائم و منحنی بر مشخصات پرش هیدرولیکی

اثر بلوک های قائم و منحنی را بر مشخصات پرش با دو پارامتر N_1 و N_2 بررسی می‌شود.

$$N_1 = \left| \frac{I' - I}{I'} \right| \times 100 \quad (8)$$

$$N_2 = \left| \frac{I^* - I}{I^*} \right| \times 100 \quad (9)$$

پارامتر N_1 ، درصد تغییرات مشخصات پرش در حوضچه واگرای زیر نسبت به حوضچه واگرای صاف و پارامتر N_2 ، درصد تغییرات مشخصات پرش در حوضچه واگرای با بلوک نسبت به حوضچه کلاسیک است. پارامتر I مربوط به مشخصات پرش در حوضچه واگرای زیر، I' مربوط به مشخصات پرش در مقطع واگرای صاف و I^* مربوط به مشخصات پرش کلاسیک است. اگر در روابط (۸) و (۹) به جای پارامتر I و I' و I^* مقدار عمق ثانویه پرش یعنی Y_2 و Y_2^* قرار داده شود پارامتر N_1 و N_2 به پارامتر D_1 و D_2 و اگر مقدار طول پرش، یعنی L_1 و L_1^* و L_2 قرار داده شود به T_1 و T_2 و اگر مقدار افت نسبی انرژی، یعنی E_{L1} و E_{L1}^* قرار داده شود به G_1 و G_2 تبدیل خواهد شد. پارامتر افت نسبی انرژی به صورت رابطه (۱۰) است.

شکل ۱۱- پروفیل سطح آب حوضچه واگرا با بلوک قائم، بلوک منحنی و واگرای صاف

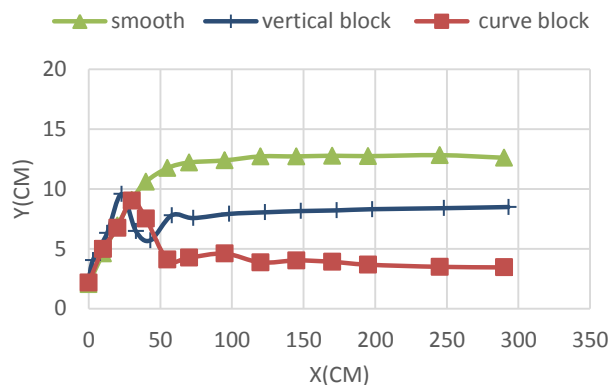


Fig. 11. Water surface profile of divergent stilling basin with vertical block, curve block and smooth divergent

۸-۱- بررسی خطوط جریان

در شکل های (۱۲ و ۱۳)، نیمرخ طولی خطوط جریان در طول کانال در بستر بلوک قائم و منحنی نشان داده شده است. در هر دو حوضچه دو جریان چرخشی پاد ساعتگرد در بالادست بلوک ها تشکیل شده است، که در حوضچه با بلوک منحنی این جریان چرخشی قوی تر تشکیل شده است، یکی در سطح بالای بلوک و دیگری در مقداری عقب تر تشکیل شده است. بعد از بلوک یک ناحیه موج تشکیل شده و سپس جریان به سمت یک جریان یکنواخت نزدیک می‌شود.

شکل ۱۲. الگوی جریان در حوضچه واگرا با بلوک قائم

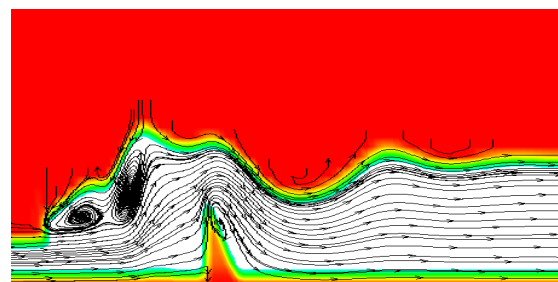


Fig. 12. Flow pattern in the Divergent stilling basin with vertical block

با مقایسه خطوط جریان میان بلوک قائم و منحنی دیده می‌شود که علت عملکرد بهتر بلوک های منحنی، انحناء بلوک است که سبب می‌شود آب در قسمت زیرین و کف کانال به

جدول ۶. مقادیر پارامتر D_2 ، T_2 ، G_2

Parameter	D_2	T_2	G_2
vertical block	46.27	17.64	31.57
Curve Block	69.76	35.29	32

Table 6. Parameter values D_2 , T_2 , G_2

۹) نتیجه گیری

در این پژوهش شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی به صورت سه بعدی در مقاطع مستطیلی و اگر با استفاده از نرم افزار Flow-3D و مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε انجام گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. سپس اثر بلوک های قائم و منحنی بر مشخصات پرش در مقاطع و اگر بررسی شد. نتایج حاصله به طور خلاصه در زیر ارائه شده است.

۱) مدل آشفتگی k-ε استاندارد در مقایسه با مدل آشفتگی RNG k-ε برای پیش بینی پروفیل سطح آب مناسب تر است. مدل آشفتگی k-ε عمق اولیه پرش و محل ابتدای پرش را به خوبی شبیه سازی کرده است.

۲) مدل آشفتگی k-ε استاندارد پروفیل سطح آب را با خطای نسبی ۳/۵۵ درصد و میانگین مجذور مربعات (بی بعد) ۵/۲۹ درصد شبیه سازی کرده است که این نتایج توانایی بالای مدل را در شبیه سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع و اگر نشان می دهد.

۳) پروفیل های سرعت عمقی بدست آمده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد به وضوح، ماکزیمم سرعت در ابتدای پرش، روند کاهشی سرعت ماکزیمم در طول پرش، سرعت های منفی در نزدیکی سطح آب که نشان از جریان های چرخشی و گردابه های پرش است و نیز پایداری و یکنواختی سرعت در انتهای حوضچه را نشان می دهد.

۴) مدل، جریان های چرخشی ابتدای پرش هیدرولیکی را به خوبی شبیه سازی کرده است. همچنین جریان های چرخشی در مقطع عرضی در صفحه ای نزدیک کف به خوبی نشان داده شده است، که براساس مشاهدات آزمایشگاهی نیز پرش هیدرولیکی به صورت متقارن رخ داده است.

$$E_L = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100 \quad (10)$$

مقادیر عمق ثانویه پرش و طول پرش هیدرولیکی و انرژی در حوضچه و اگر ای با بلوک از نرم افزار بدست آمد، برای بدست آوردن عمق ثانویه پرش کلاسیک از رابطه بلانگر (۱۱) با همان دبی مربوط به حوضچه و اگر ای صاف استفاده شده است.

$$\frac{Y_2^*}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right) \times 100 \quad (11)$$

برای محاسبه طول پرش کلاسیک از روابط USBR استفاده شده است. در رابطه (۱۲) طول پرش کلاسیک به ازای بازه عدد فرود اولیه آورده شده است. در این روابط عدد فرود اولیه پرش، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق ثانویه پرش و L_j طول پرش هیدرولیکی در حوضچه کلاسیک است.

$$\begin{aligned} 1 < Fr_1 < 2.5 & \quad L_j = 3y_2 Fr_1^2 \\ 2.5 < Fr_1 < 4.5 & \quad L_j = 5(y_2 - y_1) \quad (12) \\ 4.5 < Fr_1 < 9 & \quad L_j = 6y_2 \end{aligned}$$

در جدول های (۵ و ۶) مقادیر پارامترهای فوق نشان داده شده است. همان گونه که جداول نشان می دهد بلوک های منحنی باعث کاهش عمق ثانویه به اندازه ۶۹/۷۶ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۳۵/۲۹ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۳۲ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است. همچنین بلوک های قائم باعث کاهش عمق ثانویه به اندازه ۶/۲۷ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۱۷/۶۴ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۳۱/۵۷ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است. بلوک های منحنی باعث بهبود بهتر ویژگی های پرش در مقاطع و اگر می شوند.

جدول ۵. مقادیر پارامتر D_1 ، T_1 ، G_1

Parameter	D_1	T_1	G_1
vertical block	38.45	11.39	25.78
Curve Block	65.36	30.38	25.84

Table 5. Parameter values D_1 , T_1 , G_1

- 8) Zhao Q., and Misra S.K. 2004. Numerical study of a turbulent hydraulic jump. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Delaware, New York, DE.
- 9) Sabagh Yazdi S.R, shamlou H, Rostami F. (1387). "Numerical flow study in hydraulic jump stilling basin VOF method ". *Second National Conference on Hydropower*. (In Persian)
- 10) Daneshfaraz.R, Rooouhy. Jafar, Rooouhy Javad. 1392. "Numerical Investigation of the effect of changing the divergence angle of the stilling basin on hydraulic jump characteristic with flow-3d software". *Seventh National Congress of Civil Engineering*, 17 and 18 May, Faculty of martyr Nikbakht, Zahedan. (In Persian)
- 11) Sahebi Vayghan.F, Farsadzadeh.D, Esmaili Varaki.M, Abbaspour.A, Hosseinzadeh Delir.A. 1392. "A Comparison of using K-ε Turbulence Models in Simulating Hydraulic Jump in Diverging Rectangular Sections with Fluent Software". *Journal of Water and Soil*. Vol 27(1). 235-246. (In Persian)
- 12) Kahe M, Dehghani A.A. (1392). "Numerical Simulation of Hydraulic Jump on Corrugated Beds". *Journal of water and soil conservation*. 5(20). PP.41-60. (In Persian)
- 13) Chern M. J., Syamsuri. S. 2013. Effect of Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristic Using SPH Method. *Journal of Hydraulic Engineering* 139:221-232.
- 14) Ebrahimi S., Salmasi F., Abbaspour A. (2013). Numerical Study of Hydraulic Jump on Rough Beds Stilling Basins. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, Vol3, No.1, pp. 19-24.
- 15) Bayon A, Valero D, Bartual R.G, Moran F.J.V, Jimenez.A.L., 2016. Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software* 80. 322-335.
- 16) Omid M.H., Esmaili Varaki M. (1384). "Theoretical and experimental study of divergent hydraulic jumps in trapezoidal shape ". *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 9(2). PP17-29. (In Persian)
- 17) Omid M.H., Esmaili Varaki M., and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, (4): 512-518.
- 18) Bakhtiari.M, Kashfipour.M. (1387). "Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Sections". *Fourth National Congress of Civil Engineering*. Tehran University, 17 to 19 May. (In Persian)
- 19) Kasi .A, Esmaili Varaki .M, Farhoudi .J. 1390. " Study laboratory of Diverging hydraulic jump Characteristics with an Adverse Slope". *Sixth National Congress of Civil Engineering*. Semnan University, 6 and 7 May. (In Persian)
- 20) Shojaeian.Z, Hosseinzadeh Dalir.A, Farsadzadeh.D, Salmasi.F. 1390. "Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Rectangular Sections on Inverse Slope". *Journal of Water and Soil*. Vol 3(21). 50-60. (In Persian)
- 21) Gord Noshahri .A, Omid M.H, Kochakzadeh.S. .1388. "Experimental study of sill-controlled hydraulic jump in a gradually diverging basin". *Iran Water Research Journal*. Vol 3(4). 31-39. (In Persian)
- ۵) اختلاف ۴/۸ درصد عمق اولیه پرش هیدرولیکی و ۵/۳۳ درصد افت نسبی انرژی در مدل آشفتگی k-ε استاندارد هماهنگی بالایی مدل شبیه‌سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.
- ۶) بلوک‌های قائم باعث کاهش عمق ثانویه به اندازه ۴۶/۲۷ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۱۷/۶۴ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۳۱/۵۷ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است.
- ۷) بلوک‌های منحنی باعث کاهش عمق ثانویه به اندازه ۶۹/۷۶ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۳۵/۲۹ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۳۲ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است.
- ۸) با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان از نرم افزار Flow-3D در شبیه‌سازی جریان در حوضچه‌های آرامش واگرا همراه با بلوک‌های قائم و منحنی که دارای مزیت‌های بسیار نسبت به حوضچه‌های کلاسیک هستند استفاده نمود.

References

۱۰ مراجع

- 1) Eloubaidy, A. F., J. Al-Baidhani and A. H. Ghazali (1999). «Dissipation of hydraulic energy by curved baffle blocks.» *Pertanika Journal of Science & Technology* 7(1), pp. 69-77.
- 2) Verma, D. and A. Goel (2000). «Stilling basins for pipe outlets using wedge-shaped splitter block.» *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 26(3), pp. 179-184.
- 3) Ghoveisi H., Omid M.H, Kochakzadeh.S .1387. "Effect of floor blocks on hydraulic properties of divergent hydraulic jump in trapezoidal sections". *Third Conference on Iranian Water Resources Management*. Tabriz University. (In Persian)
- 4) Elsebaie, I.H., and Shabayek, Sh. (2010). Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *Civil & Environmental Engineering*, Vol. 11, No. 1, 01-21. pp. 37-47.
- 5) Fahmy Salah, Fahmy Abdelhaleem. 2013. Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. *Ain Shams Engineering Journal*. 4, 675-684.
- 6) Bestawy, Ashraf. 2013. New Shapes Of Baffle Piers Used In Stilling Basins As Energy Dissipators. *Asian Transactions on Engineering*. 3.
- 7) Valinia M, Ayyoubzadeh A, Yasi M. (1393). "An experimental study of the effect of baffle blocks distance from a gate on the hydraulic jump length and energy dissipation ". *Journal of water and soil resources conservation*, 3(3), PP.1-9. (In Persian)

Effect of Vertical and Curve blocks on Hydraulic Jump Characteristic in Diverging Rectangular Sections With FLOW-3D Software

Kh.Nazari Ali Abady*¹, A.A. Akhtari²

1- M.SC of Hydraulic Structures, Department of Engineering, Razi University, Kermanshah

2- Assistant professor of Civil Engineering, Department of Engineering, Razi University, Kermanshah

Kh54nazari@gmail.com

Abstract

The hydraulic jump phenomenon is one of the most common phenomena in open channels. Hydraulic jump is a transition state from supercritical to subcritical flow regime, which normally occurs in conjunction with hydraulic structures, such as spillways, weirs, and sluice gates. A hydraulic jump phenomenon serves a variety of purposes, for instance, to dissipate the energy of flow to prevent bed erosion and aerate water or to facilitate the mixing process of chemicals used for the purification of water. Stilling basins are one of the most common structures for energy dissipation of flow with high velocities. The stilling basin has been accepted to be the most powerful hydraulic structure for the dissipation of the flow energy. The size and geometry of the stilling basin affect the formation of flow patterns, which can be influential for hydraulic performance of the whole system. The depth of water after the jump is related to the energy content of the flow, and any reduction in energy content with increased energy dissipation in the jump will reduce the required depth of flow after the jump. Sometimes these basins are supplied with appurtenances that increase the overall roughness of the basins. This in turn increases the energy dissipation, decreases the sequent depth, and requires a shorter basin for the full development of the hydraulic jump. There are plenty of research studies in the literature regarding the classical hydraulic jump in the usual rectangular straight stilling basin, but less for the hydraulic jump in other cross section shape of basins. Expanding gradually basin with the rectangular cross section acts as two separate hydraulic structures including stilling basin and transition. In this type of structures not only the transition can be eliminated, but the length of the basin will be also much smaller than what is designed for the usual straight basins. Researchers' studies show that divergence in stilling basins reduce the sequent depth and the length of the jump while increasing the energy losses compared to the classic jumps.

In this research, numerical simulation of the hydraulic jump was performed in divergence rectangular sections, and compared with the results of the laboratory, making use of the FLOW-3D software and the standard k- ϵ and RNG k- ϵ turbulence models. The effects of Vertical and Curve blocks on the specification of hydraulic jump were evaluated.

The results showed that the standard k- ϵ turbulence model was able to predict the water level profiles in the hydraulic jump in divergence rectangular sections with appropriate and acceptable coincidence. Results showed that the mean relative error of water surface obtained from numerical model and measured values is about 3.55 percent. Also the numerical model showed the vortices that were accrued because of diverging walls as well as experiment investigations. The results show that creating the vertical blocks, reduces the sequent depth as much as 46.27 % and the length of the hydraulic jump as much as 17.64%, while increasing the energy loss as much as 31.57%, compared to the classic hydraulic jumps. The results also show that creating the Curve blocks, reduces the sequent depth as much as 69.76 % and the length of the hydraulic jump as much as 35.29%, while increasing the energy loss as much as 32%, compared to the classic hydraulic jumps.

Keywords: Diverging Hydraulic Jump, Curve blocks, Vertical blocks, k- ϵ Turbulence model, FLOW-3D software