

تأثیر زبری نواری مستطیلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم افزار FLOW-3D

خدیجه نظری علی آبادی^{۱*}، علی اکبر اختری^۲، امیر گرد نوشهری^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

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

۳- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

Kh54nazari@gmail.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۲/۳۰]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۰/۱۸]

چکیده

یکی از سازه‌های متداول برای استهلاک انرژی جریان‌های پر سرعت، حوضچه آرامش است. بررسی پژوهشگران نشان می‌دهند که واگرایی و زبری‌های مصنوعی حوضچه‌های آرامش هر یک باعث کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه، طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی نسبت به پرش کلاسیک می‌شود. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و مدل‌های آشفتگی k-ε استاندارد و RNG k-ε شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا انجام شد و با نتایج بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی مقایسه شد، در ادامه آثار زبری نواری مستطیلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی k-ε استاندارد برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا مناسب بوده و هماهنگی قابل قبولی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد ایجاد زبری نواری مستطیلی، باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زیر به اندازه ۲۴/۶۳ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۱۷/۶۴ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۱۴/۴۶ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است. به نحوی که استفاده از این زبری حوضچه آرامش را اقتصادی‌تر خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی واگرا، زبری نواری مستطیلی، مدل آشفتگی k-ε، نرم افزار FLOW-3D

۱- مقدمه

به میزان زیادی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی، از میزان سرعت جریان به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. سازه‌هایی که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت به حد قابل قبولی می‌شوند، سازه‌های مستهلک کننده انرژی نامیده می‌شوند و حوضچه‌های آرامش از نوع

پرش یا جهش هیدرولیکی، یک جریان متغیر سریع در کانال‌های روباز است و پدیده‌ای است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیربحرانی تبدیل می‌شود. در اثر پدیده پرش هیدرولیکی عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی

پرشی، معمول‌ترین مستهلک کننده انرژی‌اند که در سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شوند. حوضچه‌های آرامش با بستر زبر به حوضچه‌هایی اطلاق می‌شود که المان‌های زبری به صورت نوارهای موازی یکنواخت، عمود بر جهت جریان در کف حوضچه قرار گرفته باشند، این زبری‌ها می‌تواند به صورت سنگچین، موج‌های سینوسی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی یکپارچه باشد. از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویتاسیون حائز اهمیت است، بر اساس نظر اید و راجاراتنام نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به گونه‌ای قرار گیرند که تاج آنها هم سطح بستر بالا دست بوده و نقش گود افتادگی را ایفا نمایند [1]. موریس فرض کرد افت هد در جریان متلاطم روی بستر زبر بیشتر ناشی از جریان‌های گردابی است همچنین وی بیان نمود فاصله بین اجزاء زبری می‌تواند بر تشکیل حرکت های گردابه‌ای تأثیرگذار باشد. چنانچه فاصله بین اجزاء زبری زیاد باشد گردابه‌ها به صورت مستقل تشکیل شده و اگر فاصله خیلی نزدیک باشد سطح زبری به حالت یک سطح صاف عمل می‌نماید. وی این شرایط را مبنای تقسیم‌بندی جریان، روی سطوح زبر به صورت زیر قرار داد: ۱- جریان با زبری مجزا ۲- جریان با تداخل ضعیف ۳- جریان تقریباً صاف [2]. توکیای آثار بستر موجدار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. نتایج وی نشان می‌دهد که طول پرش حدود ۳۵ درصد و نسبت عمق ثانویه به اولیه در حدود ۲۰ درصد کمتر از شرایط مشابه در پرش نوع کلاسیک است [3]. عباسپور و همکاران مطالعات آزمایشگاهی دیگری روی بسترهای موج‌دار سینوسی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که نسبت عمق ثانویه به اولیه حدود ۲۰ درصد و طول پرش نیز ۵۰ درصد در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش پیدا کرده است [4]. گوهری و فرهودی آزمایش‌های خود را روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی انجام دادند آنها مشاهده کردند عمق ثانویه پرش روی این نوع از زبری نسبت به سطح صاف کاهش دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبریه‌ها و عمق اولیه پرش اثر ناچیزی بر بردند که تغییر ارتفاع زبریه‌ها و عمق اولیه پرش اثر ناچیزی بر مشخصات هیدرولیکی می‌گذارند [5]. السبایه و شبایک، پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر سینوسی، مثلثی، دوزنقه

ای با شیب کناری ۴۵ درجه، دوزنقه‌ای با شیب کناری ۶۰ درجه و مستطیلی به صورت آزمایشگاهی را 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. همچنین نتایج نشان داد که کاهش طول پرش به ترتیب در زبری مثلثی، سینوسی و مستطیلی بیشترین مقدار را دارد [6]. حسام محمد و همکاران، درباره به حداقل رساندن آبشستگی پایین دست یک پرش هیدرولیکی مستغرق با استفاده از انواع زبری نواری مثلثی، آزمایش‌هایی را انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از زبری‌های نواری مثلثی یک راه موثر برای کاهش آبشستگی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی است و زبری نواری مثلثی با فاصله، کمینه عمق و طول آبشستگی را در مقایسه با سایر زبری‌ها بدست آورده است، و این زبری منجر به بالاترین افت انرژی شده است [7]. حسام محمد و همکاران، درباره آثار زبری نواری مثلثی بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حالت مستغرق به صورت آزمایشگاهی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که زبری‌های نواری مثلثی به طور متوسط عمق مستغرق و پایین دست را به ترتیب ۲۹ و ۹ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌دهند [8].

پیشینه عددی پرش هیدرولیکی توسط پژوهشگران بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. دانش فراز و همکاران، اثر واگرایی دیواره‌ها روی ویژگی‌ها و طول پرش و استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش را با استفاده از مدل FLOW-3D بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی، طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و استهلاک انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [9]. صاحبی و همکاران پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی و اگر را به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار FLUENT و مدل آشفتگی k-ε استاندارد و RNG و روش VOF برای بدست آوردن سطح آب بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که مدل عددی قادر است پروفیل سطح آب را با خطای نسبی ۷ درصد شبیه

(۱) مواد و روش ها

نرم افزار Flow-3D

نرم افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسایل پیچیده دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم افزار برای مدل کردن جریان های سطح آزاد سه بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. این نرم افزار معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب احجام محدود حل می کند و دامنه جریان را به شبکه هایی با سلول های مستطیل شکل که المان های آجری نیز نامیده می شوند، تقسیم بندی می کند که برای هر سلول مقدارهای میانگین هر سلول کمیت های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می شوند بجز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می شود.

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

(۱) روش حجم سیال (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می شود.

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

معادلات حاکم بر جریان

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

الف) 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.

سازی نماید. و همچنین هماهنگی خوبی بین پروفیل های شبیه سازی شده سرعت با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد [10]. چرن و سیسموری، با استفاده از مدل عددی SPH، پرش هیدرولیکی را روی بستر صاف و سه بستر موج دار مثلثی، دوزنقه ای و سینوسی شبیه سازی نمودند، آنها توانستند تغییرات پارامترهای پرش را روی بسترهای مذکور با استفاده از روش عددی SPH به خوبی پیش بینی نمایند و مقادیر تغییرات طول نسبی پرش، نسبت اعماق مزدوج و اتلاف انرژی را به دست آورند [11]. ابراهیمی و همکاران، با استفاده از نرم افزار FLUENT به شبیه سازی پرش هیدرولیکی روی بسترهای زیر مستطیلی و مثلثی پرداختند. نتایج نشان داد که خطای پروفیل سطح آب مدل عددی و داده های آزمایشگاهی حداکثر ۴/۴ درصد و خطای طول پرش هیدرولیکی حداکثر ۶/۷ درصد است [12]. بایون و همکاران، به بررسی عملکرد دو نرم افزار OpenFOAM و FLOW-3D در مدل سازی 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 داده های آزمایشگاهی نشان داد هر دو مدل هماهنگی خوبی با داده های آزمایشگاهی دارند [13].

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط پژوهشگرانی همچون، امید و همکاران، بختیاری و کاشفی پور، کاسی، شجاعیان و همکاران [14-17]، نشان داد که واگرایی حوضچه های آرامش باعث کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه، طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی نسبت به حوضچه های کلاسیک می شود.

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زیر انجام گرفته است، با توجه به تاثیر واگرایی روی بهبود ویژگی های پرش هیدرولیکی، پس لزوم پژوهش بیشتر در زمینه تاثیر توام واگرایی و زبری بستر ضروری به نظر می رسد. هدف از این پژوهش بررسی اثر زبری نواری مستطیلی بر ویژگی های پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی و اگر با استفاده از نرم افزار FLOW-3D است.

ب) معادلات مومنتم

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) + g_z \quad (4)$$

که در رابطه بالا g_z شتاب در راستای Z است.

ج) 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:

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

که در این رابطه A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های (x, y, z) ، (u, y, z) ، متوسط سرعت در جهت‌های (x, y, z) ، F تابع نسبت سیال که مقادیری بین $[0, 1]$ دارد.

۳) مشخصات مدل آزمایشگاهی

این پژوهش با توجه به داده‌ها و اطلاعات اولیه مدل آزمایشگاهی گرد نوشهری و همکاران [18] که در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام گرفته است، پایه گذاری شده است.

مدل شامل مخزن آرام کننده با سرریز مستطیلی لبه تیز، مخزن تأمین بار آبی، دریاچه 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 دریاچه 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 دریاچه 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 دریاچه در انتهای کانال، به گونه‌ای تنظیم شده بود که پنجه پرش در ابتدای واگرایی کانال باشد [18]. 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 دریاچه ورودی، Y_1 عمق اولیه پرش، Y_2 عمق ثانویه پرش و L_j طول پرش هیدرولیکی است.

شکل ۱. طرح کانال آزمایشگاهی

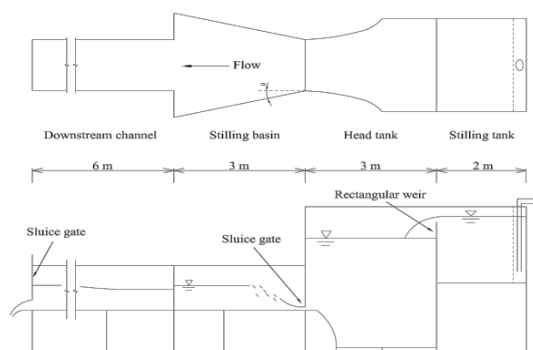


Fig. 1. Laboratory channel plan

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 3

Table 1. Laboratory Model Characteristic

۴) هندسه مدل عددی

برای مدل کردن کانال آزمایشگاهی از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شد و پس از ترسیم آن به صورت

دیواره‌ها و دریچه چون از اهمیت زیادی برخوردار هستند از تعداد سلول‌های مش بیشتری استفاده شد.

در شبکه‌بندی اگر تعداد مش‌ها از مقدار مشخصی کمتر باشد، از دقت حل مسئله کاسته خواهد شد و خطای مدل‌سازی افزایش می‌یابد و اگر از مقدار بهینه بیشتر شوند بدون آنکه تاثیر مثبتی در مقدار خروجی‌ها 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 شبکه‌بندی انجام می‌شود. برای انتخاب مناسب‌ترین شبکه‌بندی، سه مدل با شبکه‌بندی متفاوت که مشخصات آن در جدول (۲) آورده شده است، شبیه‌سازی شد. همانطور که جدول (۲) نشان می‌دهد حالت ۳ دارای کمترین خطای منحنی سطح آب است. این حالت همچنین مقدار عمق اولیه پرش و مکان ابتدای پرش هیدرولیکی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. مدت زمان شبیه‌سازی برای درستی‌آزمایی ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد که در این زمان جریان به پایداری رسید.

جدول ۲- درصد خطای مربوط به شبکه‌های 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

۷) تحلیل نتایج عددی

پروفیل سطح آب

در شکل‌های (۴ و ۵) پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی بدست آمده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG 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

سه‌بعدی، در قالب فایل STL تهیه و به نرم‌افزار FLOW-3D معرفی شد. در شکل (۲) هندسه مدل نشان داده شده است.

شکل ۲. هندسه تهیه شده برای مدل‌سازی عددی

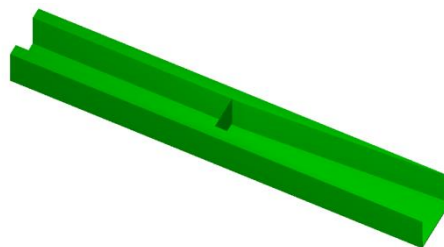


Fig. 2. Geometry prepared for numerical modeling

۵) شرایط مرزی

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

شکل ۳. شرایط مرزی مدل عددی

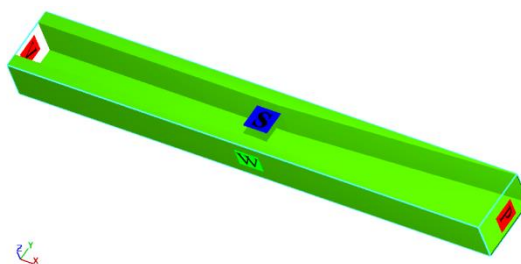


Fig. 3. The numerical model boundary conditions

۶) شبکه بندی مدل عددی و حساسیت سنجی

نرم‌افزار FLOW-3D به منظور حل میدان‌های محاسباتی جریان از شبکه‌های کارتزین و استوانه‌ای استفاده می‌نماید. در این پژوهش از شبکه‌بندی کارتزین 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 شکلی که در مش‌بندی کف،

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

جدول ۳. خطای مدل‌های 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

پروفیل سرعت عمقی

شکل (۶) تعدادی از پروفیل‌های سرعت عمقی جریان را به صورت بی بعد در طول حوضچه آرامش برای مدل آشفتگی k- ϵ استاندارد نشان می‌دهد. این پروفیل‌ها به وضوح، ماکزیمم سرعت در ابتدای پرش، روند کاهشی سرعت ماکزیمم در طول پرش، سرعت‌های منفی در نزدیکی سطح آب که نشان از جریان‌های 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 است.

شکل ۶. پروفیل‌های سرعت عمقی در حوضچه آرامش

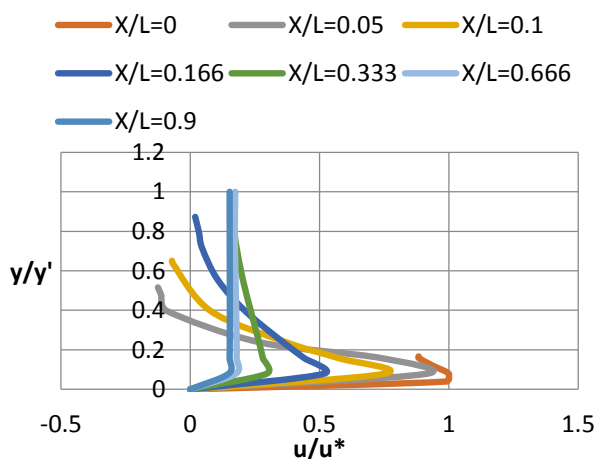


Fig. 6. Deep speed profiles in stilling basin

نسبی مدل عددی و آزمایشگاهی است که مقادیر آن در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است، مدل آشفتگی k- ϵ 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 شبیه سازی 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.

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

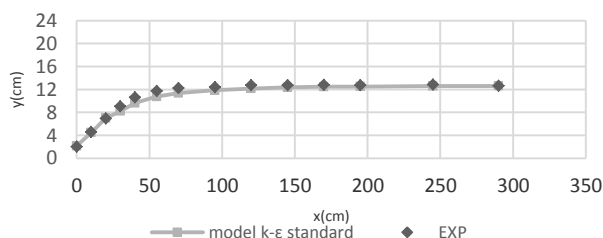


Fig. 4. Compare the water surface profile of the standard k- ϵ turbulence model and experimental data..

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

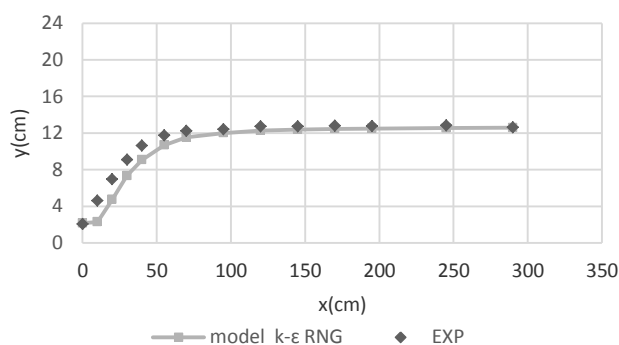


Fig. 5. Compare the water surface profile of the RNG k- ϵ turbulence model and experimental data

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{\text{model}} - y_{\text{exp}}}{y_{\text{exp}}} \right)^2} \times 100 \quad (8)$$

منحنی خطوط جریان

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

	$Y_1(cm)$	$Y_2(cm)$	$L_f(cm)$	$\frac{\Delta E}{E_1}$
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) توسعه مدل عددی

در این بخش به توسعه مدل عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا پرداخته می‌شود. در پژوهش‌های آزمایشگاهی برای تعیین اثر زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در مقایسه با حالت بستر صاف از دریاچه پایین دست استفاده می‌شود، به این ترتیب که عمق پایین دست به وسیله دریاچه 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 اندازه گیری می‌شود. در این پژوهش برای نخستین بار اثر زبری‌ها 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.

همچنین تاکنون اثر زبری نواری مستطیلی در حوضچه‌های کلاسیک مورد بررسی قرار گرفته است. اما در حوضچه‌های آرامش واگرا، تاثیر توأم واگرایی و زبری نواری مستطیلی به صورت آزمایشگاهی و نیز عددی، مطالعه‌ای صورت نگرفته است. پس در این پژوهش سعی شد با ترکیب زبری نواری مستطیلی و واگرایی در حوضچه‌های آرامش، پارامترهای پرش هیدرولیکی بررسی شود.

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

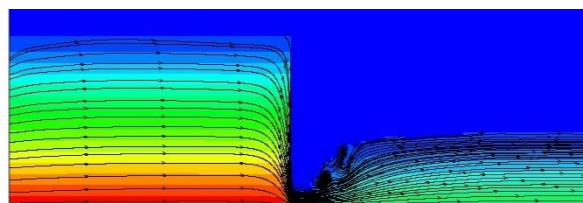


Fig. 7. Flow pattern in the channel longitudinal section

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

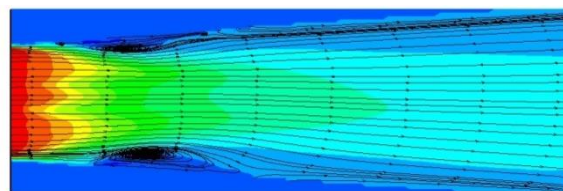


Fig. 8. Flow pattern in the channel cross section on the page $z = 1.5cm$

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 نرم افزار از روش میانگین گیری در چند نقطه عرضی در ابتدا و انتهای

سبب می‌شود که پرش هیدرولیکی طول کوتاهتری را نسبت به حالت بستر صاف داشته باشد. افت انرژی پرش در حوضچه با زبری نواری مستطیلی ۹/۱۲ درصد نسبت به حوضچه واگرای صاف افزایش یافته است.

شکل ۱۰- پروفیل سطح آب حوضچه واگرای زبر و حوضچه واگرای صاف

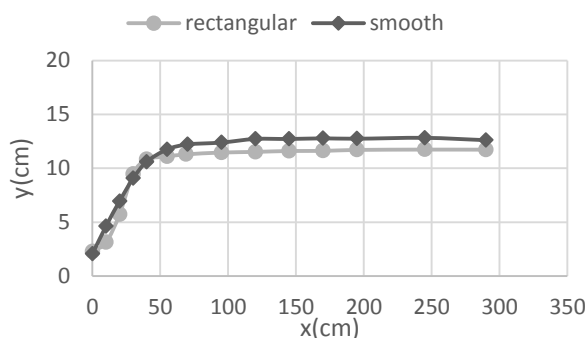


Fig. 10. Water surface profile of Rough divergent stilling basin and Smooth divergent stilling basin

بررسی خطوط جریان

شکل (۱۱) نیمرخ طولی خطوط جریان برای حوضچه واگرا با زبری نواری مستطیلی را نشان می‌دهد. در این حوضچه یک جریان چرخشی پادساعتگرد در سطح آب تشکیل شده است و به سبب حضور زبری های نواری مستطیلی ریز گردابه هایی در قسمت محصور مستطیلی در جهت ساعتگرد تشکیل شده اند. مجموع گردابه های سطح آب و ریز گردابه ها در کف باعث می‌شود استهلاك انرژی در حوضچه واگرا با زبری نواری مستطیلی بیشتر از حوضچه واگرای صاف باشد.

شکل ۱۱. الگوی جریان در حوضچه آرامش واگرا با زبری نواری مستطیلی

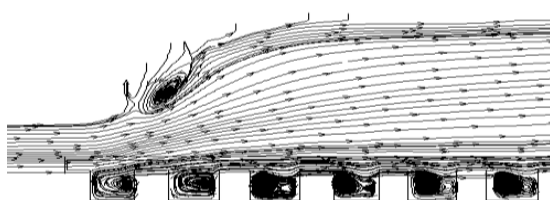


Fig. 11. Flow pattern in the Divergent stilling basin with rectangular strip roughness

برای ایجاد زبری نواری مستطیلی، از مستطیل هایی به طول ۷ سانتی متر و ارتفاع ۲ سانتی متر استفاده شده است و تاج بالایی زبری ها با سطح بستر کانال در یک تراز قرار داده شده اند. فاصله شروع زبری از ابتدای واگرایی ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و این زبری تا انتهای حوضچه آرامش ادامه دارد. در شکل (۹) نمایی از زبری نواری مستطیلی نشان داده شده است.

شکل ۹. نمایی از زبری نواری مستطیلی

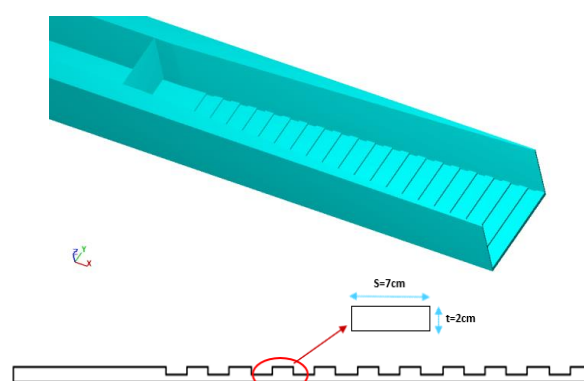


Fig. 9. A view of a rectangular strip roughness

در شکل (۱۰) پروفیل سطح آب در حوضچه آرامش واگرا با زبری نواری مستطیلی (Rectangular) و همچنین پروفیل سطح آب در حوضچه واگرای صاف (Smooth) ترسیم شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود پروفیل سطح آب در حوضچه آرامش واگرا با زبری نواری مستطیلی در مقایسه با حوضچه واگرای صاف کاهش یافته است. طبق اطلاعات بدست آمده از نرم افزار عمق ثانویه پرش در حوضچه آرامش با زبری نواری مستطیلی ۱۳/۶۵ درصد نسبت به حوضچه واگرای صاف کاهش یافته است. دلیل اصلی کاهش عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر در مقایسه با بسترهای صاف، وجود تنش برشی اضافه در کف کانال است. همچنین طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با زبری نواری مستطیلی ۱۱/۴ درصد نسبت به حوضچه واگرای صاف کاهش یافته است. به طور کلی افزایش تلاطم و جریان های چرخشی در سطح آب و نیز اضافه شدن ریز گردابه ها در کف کانال در حضور زبری ها

تأثیر زبری نواری مستطیلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی

تأثیر زبری های نواری مستطیلی بر مشخصات پرش با دو پارامتر N_1 و N_2 بررسی می شود.

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

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

پارامتر N_1 درصد تغییرات مشخصات پرش در حوضچه واگرای زبر نسبت به حوضچه واگرای صاف و پارامتر N_2 درصد تغییرات مشخصات پرش در حوضچه واگرای زبر نسبت به حوضچه کلاسیک است. پارامتر I مربوط به مشخصات پرش در حوضچه واگرای زبر، I' مربوط به مشخصات پرش در مقطع واگرای صاف و I^* مربوط به مشخصات پرش کلاسیک می باشد. اگر در روابط (۸ و ۹) به جای پارامتر I و I' و I^* مقدار عمق ثانویه پرش یعنی Y_2 و 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 را یعنی L_j و L'_j و L^*_j قرار داده شود به T_1 و T_2 و اگر مقدار افت نسبی انرژی یعنی E_L و E'_L و E^*_L قرار داده شود به G_1 و G_2 تبدیل خواهد شد. پارامتر افت نسبی انرژی به صورت رابطه (۱۰) است.

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

مقادیر عمق ثانویه پرش و طول پرش هیدرولیکی و انرژی در حوضچه واگرای زبر از نرم افزار بدست آمد، مقدار انرژی پرش هیدرولیکی مستقیماً از نرم افزار FLOW-3D بدست می آید، اما از آنجایی که کانال آزمایشگاهی واگرا است و عرض کانال ثابت نیست پس برای محاسبه مقدار انرژی در ابتدا و انتهای پرش، ابتدا در عرض کانال در چند نقطه مقدار انرژی پرش از نرم افزار بدست آمد، سپس با روش میانگین گیری مقدار انرژی در ابتدا و انتهای پرش بدست آمد و سپس با اختلاف مقدار انرژی در ابتدا و انتهای پرش، مقدار افت انرژی پرش محاسبه شد. برای بدست آوردن عمق ثانویه پرش کلاسیک از رابطه بلانگر (۱۱) با همان دبی مربوط به حوضچه واگرای صاف و طول پرش از روابط USBR استفاده شده است.

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

در جدول های (۵ و ۶) مقادیر پارامترها نشان داده شده است. همانطور که جدول نشان می دهد زبری مستطیلی باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زبر به اندازه ۱۳/۶۵ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۱۱/۳۹ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۹/۱۲ درصد نسبت به واگرای صاف شده است. همچنین باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زبر به اندازه ۲۴/۶۳ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۱۷/۶۴ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه ۱۴/۴۶ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است. زبری نواری مستطیلی باعث بهبود خصوصیات پرش در مقاطع واگرا می شود.

جدول ۵. مقادیر پارامتر G_1 , T_1 , D_1

Parameter	D_1	T_1	G_1
values	13.65	11.39	9.12

Table (5): Parameter values D_1 , T_1 , G_1 جدول ۶ - مقادیر پارامتر G_2 , T_2 , D_2

Parameter	D_2	T_2	G_2
values	24.63	17.64	14.46

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 درمقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم افزار Flow-3D و مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ انجام گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد، سپس اثر زبری مستطیلی بر مشخصات پرش در مقاطع واگرا بررسی شد. نتایج به دست آمده به طور خلاصه در زیر ارائه شده است.

۱) مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد در مقایسه با مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ برای پیش بینی پروفیل سطح آب بسیار مناسب تر

- 5) Gohari A., and Farhoudi J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress. Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, pp.1-9.
- 6) 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.
- 7) Hossam M , Mohamed M , Ahmed M , Abdel Azim M , Fahmy Salah F. 2014. Minimizing downstream scour due to submerged hydraulic jump using corrugated aprons. Ain Shams Engineering Journal 5, 1059–1069.
- 8) Hossam M , Mohamed E.G , Ahmed M , Abdel Azim M , Fahmy Salah F. 2014. Effect of corrugated beds on characteristics of submerged hydraulic jump . Ain Shams Engineering Journal 5, 1033–1042.
- 9) 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)
- 10) Sahebi Vayghan.F, Farsadizadeh.D, Esmaeili 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)
- 11) Chern M. J., Syamsuri. S. 2013. Effect of Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristic Using SPH Method . Journal of Hydraulic Engineering 139:221-232.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Omid M.H., Esmaeili Varaki M., and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. Journal of Hydraulic Research, (4): 512–518.
- 15) Bakhtiari.M, Kashefipour.M.1387."Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Sections". Fourth National Congress of Civil Engineering.Tehran University, 17 to 19 May. (In Persian)
- 16) Kasi .A, Esmaeili 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)
- 17) Shojaeian.Z, Hosseinzadeh Dalir.A, Farsadizadeh.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)
- 18) 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)

است. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ عمق اولیه پرش و محل ابتدای پرش را به خوبی شبیه سازی کرده است.

(۲) مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد پروفیل سطح آب را با خطای نسبی $3/55$ درصد و میانگین مجذور مربعات (بی بعد) $5/29$ درصد شبیه سازی کرده است که این نتایج توانایی بالای مدل را در شبیه سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا نشان می دهد.

(۳) 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

(۴) اختلاف $4/8$ درصد عمق اولیه پرش هیدرولیکی و $5/33$ درصدی افت نسبی انرژی در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد مطابقت بالایی مدل شبیه سازی شده با داده های آزمایشگاهی را نشان می دهد.

(۵) زبری نواری مستطیلی باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زیر به اندازه $13/65$ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه $11/39$ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه $9/12$ درصد نسبت به واگرای صاف شده است.

(۶) زبری مستطیلی باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زیر به اندازه $24/63$ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه $17/64$ درصد و افزایش افت نسبی انرژی به اندازه $14/46$ درصد نسبت به پرش کلاسیک شده است.

References

(۱۰) مراجع

- 1) Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated bed. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 128: 656-663.
- 2) Morris H.M. 1995. A new concept of flow in rough conduits Transaction. American society of Civil Engineers, 120:373-398.
- 3) Tokyay N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. In: Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI, May, Anchorage, Alaska, USA, 408-416.
- 4) Abbaspour.A, Hosseinzadeh Dalir.A, Farsadizadeh.D, and Sadraddini.AA.1388. "Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics". Water and Soil Science Journal. Volume 19, No 1: 14-26. (In Persian)

Effect of Rectangular Strip Roughness on Hydraulic Jump Characteristic in Diverging Rectangular Sections with FLOW-3D Software

Kh.Nazari Ali Abady^{*1}, A.A. Akhtari², A.Gord Noshahri³

1- M.Sc., Hydraulic Structures, Dept. of Engineering, Razi University, Kermanshah

2- Assist. prof., Civil Engineering, Department of Engineering, Razi University, Kermanshah

3- Ph.D. Student, Water Structures, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

Kh54nazari@gmail.com

Abstract:

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. The stilling basin is of the common and most powerful hydraulic structures 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. However, less are available for the hydraulic jump in other cross sectional shapes of basins. gradually expanding 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 also the length of the basin will be much smaller than what is designed for the usual straight basins. Researchers' studies show that divergence in stilling basins may reduce the sequent depth and the length of the jump while increasing energy losses compared to the classic jumps.

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

Results showed that standard k- ϵ turbulence model was able to predict water level profiles in hydraulic jump in divergence rectangular sections with an appropriate and acceptable coincidence. Results showed that mean relative error of water surface obtained from numerical models and measured values is about 3.55%. Also, the numerical model as well as the experimental investigations showed the vortices that were accrued because of diverging walls. The results show that creating the rectangular Strip roughness, reduces the sequent depth up by 13.65% and the length of the hydraulic jump by 11.39%, while it increases the energy loss by 9.12%, compared to Smooth divergent stilling basin. Results also show that creating the rectangular Strip roughness, reduces the sequent depth by 24.63% and the length of the hydraulic jump by 17.64%, while increasing the energy loss as much as 14.46%, compared to the classic hydraulic jumps. Consequently, the use of roughness in stilling basins would be economical.

Keywords: Diverging Hydraulic Jump, Rectangular strip roughness, k- ϵ Turbulence model, FLOW-3D software