مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۶۵-۷۳

Original Article

مطالعه‌ی پارامترهای مؤثر در طول پرش هیدرولیکی مستغرق همراه با بلوک‌های میانی حوضچه‌ی آرامش

فاطمه جعفری (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران ـ آب، دانشگاه امیرکبیر
سید علی‌اکبر صالحی نیشابوری * (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

پرش هیدرولیکی مستغرق تحت تأثیر بلوک‌های میانی حوضچه‌ی آرامش، به‌صورت دو نوع رژیم اتفاق می‌افتد ۱. جریان منحرف‌شده به سطح یا رژیم DSJ؛ و ۲. به‌صورت جت دیواره‌یی دوباره متصل‌شونده یا رژیم RWJ. نوشتار حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه، ارتفاع بلوک‌ها، و شکل بلوک‌ها بر روی طول پرش هیدرولیکی پرداخته است. بدین منظور از نرم‌افزار فلوئنت برای شبیه‌سازی استفاده و در مجموع ۲۰ مدل برای مقادیر مختلف پارامترهای ذکرشده طراحی و اجرا شده است. نتایج نشان داده است که مهم‌ترین عامل در کاهش طول پرش، تلاش در جهت شکل‌گیری رژیم DSJ است؛ به‌طوری که بلوک‌ها در رژیم RWJ فقط در حدود ۱۴٪ طول پرش را کاهش داده‌اند، این در حالی است که در رژیم DSJ، بسته به اینکه بلوک‌ها در چه فاصله‌یی از دریچه قرار گیرند، می‌توان انتظار بیش از ۴۰٪ کاهش طول پرش را داشت.

واژگان کلیدی: طول پرش، شبیه‌سازی عددی، پرش هیدرولیکی مستغرق، بلوک‌های میانی حوضچه‌ی آرامش.

jafari.f@aut.ac.ir
salehi@modares.ac.ir

۱. مقدمه

هرگونه مانعی که در مسیر پرش آبی واقع شود، به گونه‌یی که باعث اتلاف انرژی آن شود، می‌تواند در تغییر طول پرش تأثیر داشته باشد؛ از آن جمله می‌توان ایجاد برجستگی و فرورفتگی در مسیر کانال یا در محل پرش و نیز احداث حوضچه‌های خاص پرش هیدرولیکی یا حوضچه‌های آرامش را ذکر کرد. در حقیقت این‌گونه سازه‌ها به‌عنوان عاملی برای کنترل پرش به‌کار می‌روند. از جمله سازه‌های کنترل پرش هیدرولیکی، می‌توان به حوضچه‌ی آرامش[1] اشاره کرد که عبارت است از قسمت کوتاهی از یک کانال کف‌سازی‌شده که به‌صورت سازه‌یی خاص در پایین‌دست یک سرریز، یک تندآب و یا یک آبشار از بتن ساخته می‌شود. این‌گونه سازه‌ها علاوه بر از بین‌بردن انرژی آب، وسیله‌یی برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی و به‌وجود آوردن شرایط برای وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص نیز به شمار می‌روند. هدف اصلی از ساختن سازه‌های مذکور، تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه است، تا جریان فوق بحرانی قبل از رسیدن به قسمت‌های غیرکف‌سازی شده‌ی رودخانه یا کانال خاکی پایین‌دست به جریان زیر بحرانی تغییر حالت دهد، تا از انرژی زیاد آن کاسته و از خرابی‌های احتمالی جلوگیری شود. هر حوضچه‌ی آرامش، بر حسب شدت پرش، احتیاج به اجزایی دارد تا ضمن شکل دادن پرش در موقعیتی خاص، تا حد امکان از طول آن بکاهد. وجود سازه‌های عرضی در حوضچه، مایه‌ی اطمینان از جلوگیری انتقال پرش هیدرولیکی به بیرون حوضچه (به‌خصوص در حوضچه‌های با طول کوتاه) است. گاهی وجود این تجهیزات باعث کاهش عمق ثانویه‌ی پرش نیز می‌شود و این امر به طراح اجازه می‌دهد تا ارتفاع دیواره‌های حوضچه را نسبت به حالت پرش بدون بلوک کوتاه‌تر در نظر گیرد. بلوک‌های میانی از جمله سازه‌های عرضی در حوضچه‌ی آرامش هستند که معمولاً برای پایدار ساختن پرش، کوتاه کردن طول آن و استهلاک بیشتر انرژی به‌کارگرفته می‌شوند.

برای آنکه حوضچه‌ی آرامش ساخته‌شده به همراه تجهیزات استهلاک انرژی جریان مؤثرتر واقع شوند، باید طراحی به نحوی انجام گیرد که برای دبی‌های ورودی طرح، تراز پایاب بزرگ‌تر یا مساوی تراز عمق ثانویه‌ی پرش شود؛ در غیر این‌صورت یعنی در حالتی که تراز پایاب[2] از تراز عمق ثانویه کمتر باشد، پرش کامل اتفاق نمی‌افتد و به سمت بیرون حوضچه کشیده می‌شود و هدف ایجاد پرش هیدرولیکی یعنی استهلاک انرژی، نیز تحقق نخواهد یافت. اگر دبی از دبی طراحی بیشتر شود، عمق پایاب بزرگ‌تر از عمق پایاب موردنیاز پرش آزاد می‌شود و پرش به شکل مستغرق شکل می‌گیرد. این شرایط برای سازه‌های هیدرولیکی با هد پایین نظیر دریچه و سرریز سدهای انحرافی کوتاه به‌وجود می‌آید.

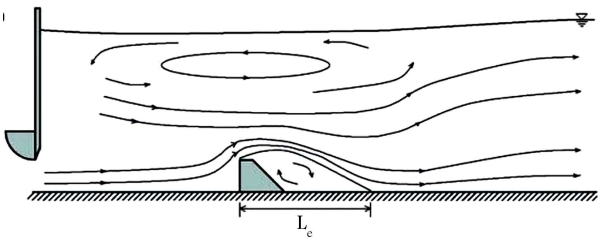
مشاهده شده است که عملکرد بلوک‌های میانی در پرش مستغرق متفاوت از

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۶/۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۳، پذیرش ۱۳۹۴/۱۱/۱۹.

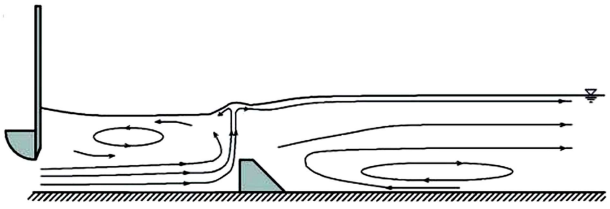
پرش آزاد است. در واقع در حالت پرش مستغرق، تأثیر بلوک‌ها بیشتر بر روی شکل گیری نوع رژیم است، تا بر روی کارایی استهلاک انرژی. به طوری که در این حالت جریان می‌تواند فقط به‌صورت دو نوع رژیم اتفاق بیفتد: ۱. جریان منحرف‌شده به سطح (DSJ)[۳]؛ ۲. به‌صورت جت دیواره‌یی دوباره متصل‌شونده (RWJ)[۴].[۱] در شکل ۱، ضمن نمایش الگوی جریان دو رژیم مذکور، نشان داده شده است که عملکرد بلوک‌ها در آن‌ها با هم فرق دارد.[۱] شکل ۲، پرش هیدرولیکی مستغرق را در کانال بدون بلوک به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد که در آن، L_{rsj} معرف طول پرش ناحیه‌یی است که درگیر گردابه‌هاست.

تاکنون مطالعات زیادی بر روی عملکرد بلوک‌های میانی حوضچه‌ی آرامش در حالت پرش آزاد انجام شده است؛ از جمله: در سال ۱۹۹۹، آزمایش‌هایی برای بررسی اثر اندازه، انحنا و موقعیت بلوک‌های میانی کف منحنی‌شکل در استهلاک انرژی و کنترل پرش هیدرولیکی انجام شده و نتایج به‌دست آمده نشان داده است که برای تمام شرایط جریان، بلوک‌های منحنی در کم کردن انرژی جنبشی پایین‌دست نسبت به بلوک‌های با لبه‌ی مستقیم و مستطیلی مؤثرتر هستند. به‌عبارتی می‌توان گفت که بلوک‌های منحنی، موجب ایجاد گردابه‌ها و آشفتگی بیشتر و در نتیجه استهلاک انرژی بیشتری در طول کمتری از حوضچه می‌شوند.[۳]

در سال ۲۰۰۰ نیز آزمایش‌هایی برای یافتن حوضچه‌ی آرامش اقتصادی برای خروجی‌های دایروی شکل انجام و مشخص شده است که بلوک‌های گوه‌یی شکل شکافنده با زاویه‌ی رأس ۱۵۰ درجه، بهترین عملکرد را در پخش کردن جت آب

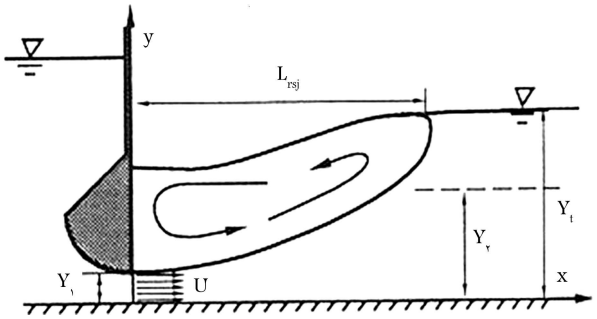


الف) رژیم جت دیواره یی دوباره متصل شونده (RWJ)؛



ب) رژیم جریان منحرف شده به سطح (DSJ).

شکل ۱. الگوی جریان.[۱]



شکل ۲. نمای شماتیک از پرش هیدرولیک مستغرق.[۲]

روی پهنای حوضچه‌ی آرامش در طول کوتاه‌تری دارند.[۴] همچنین در سال ۲۰۰۲، اثر بلوک‌های میانی با وجه جلویی شیب‌دار در طول پرش هیدرولیکی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج نشان داده است که بلوک‌های میانی با وجه شیب‌دار در بالادست آن در کاهش طول پرش هیدرولیکی مؤثرتر از بلوک‌های با وجه عمود و بسترهای زبر است. طول پرش هیدرولیکی با استفاده از بلوک‌های میانی شیب‌دار نسبت به پرش هیدرولیکی آزاد تا ۴۸٪ و نسبت به حوضچه‌ی آرامش نوع دوم تا ۱۸٪ کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ی مذکور اثر ردیف دوم بلوک‌ها در کاهش طول پرش هیدرولیکی نیز بررسی شده و نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که ردیف دوم فقط سبب کاهش طول پرش تا ۵٪ نسبت به حالتی می‌شود که یک ردیف بلوک استفاده شده است.[۵]

در سال ۲۰۱۰، نیز اثرات آستانه‌ی پیوسته‌ی عمودی منفرد و موقعیت آن در کنترل عمق و طول پرش هیدرولیکی اجباری در حوضچه‌ی آرامش به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج آزمایش‌ها، اثرات قابل توجه آستانه در استهلاک انرژی را تأیید کرده و رابطه‌یی بین ارتفاع و موقعیت آستانه، نسبت عمق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی ارائه شده است که مزیت رابطه‌ی مذکور، توانایی آن در طراحی حوضچه‌های آرامشی است که عمق پایاب در آن غیر قابل پیش‌بینی باشد.[۶]

همچنین پرش هیدرولیکی مستغرق به‌عنوان موضوع بسیاری از مطالعات ارائه شده است. در سال ۱۹۹۰ در بررسی گردابه‌های به‌وجود آمده در سطح آب در کنار دریچه در پرش هیدرولیکی مستغرق و اهمیت آنها، نتایج نشان داده است که حرکت گردابه‌های مذکور از سطح آب تا مرکز لایه‌ی برشی گسترده شده و تحت تأثیر آنها، مقیاس طولی b، متناظر با عمق $\frac{u_m}{2}$ دارای سرعت، در کناره‌ی دیواره‌ها بیشتر از مقدار آن در نزدیکی صفحه‌ی مرکزی است. به این پدیده، صعود جت دیواره‌یی در نزدیکی دیواره‌ها گفته می‌شود.[۷]

همچنین در سال ۱۹۹۱، شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ انجام و با مقایسه‌ی پروفیل سرعت عددی و آزمایشگاهی مشاهده شده است که نتایج در ناحیه‌ی جت دیواره‌یی تطابق خوبی دارند، ولی در قسمت ناحیه‌ی برگشتی، اختلاف دارند؛ که دلیل این امر را پخش عمودی بیش از اندازه‌یی ذکر کرده‌اند که در مدل عددی اتفاق می‌افتد.[۸]

به عملکرد بلوک‌های میانی در حالت پرش مستغرق کمتر توجه شده است. یک سری مطالعات آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۲، با هدف تعیین شرایط برای بهترین عملکرد بلوک‌ها در پرش هیدرولیکی مستغرق انجام شده و این نتیجه به‌دست آمده است که در پرش مستغرق، عملکرد بلوک‌ها نسبت به پرش آزاد تغییر می‌کند. در هر صورت، جریان می‌تواند فقط به‌صورت دو نوع رژیم اتفاق افتد: ۱. جریان منحرف‌شده به سطح (DSJ)؛ ۲. به‌صورت جت دیواره‌یی دوباره متصل‌شونده (RWJ) نشان داده شده است که عملکرد بلوک‌ها در این دو نوع رژیم با هم فرق دارد. رخ دادن هر یک از رژیم‌های مذکور بستگی به ضریب استغراق جریان، وضعیت و موقعیت بلوک‌ها دارد. همچنین بلوک‌ها در رژیم DSJ، تأثیر و عملکرد بهتری دارند و تنش وارد به کف در پایین‌دست بلوک‌ها در رژیم مذکور به نسبت رژیم RWJ کمتر است.[۹]

در یک مطالعه‌ی عددی در سال ۲۰۱۴، پرش هیدرولیکی مستغرق همراه با بلوک‌های میانی، الگوی جریان و گردابه‌های شکل‌گرفته در هر رژیم، نتایج نشان داده است که شدت آشفتگی زیاد جریان، منجر به شکل‌گیری گردابه‌های زیاد حول هر سه محور طولی (x)، عرضی (z) و ارتفاعی (y) می‌شود که گردابه‌هایی که حول محور z‌ها درگردش هستند، با توجه به قدرت و ابعاد بزرگ‌تری که دارند، رژیم اصلی

جدول ۱. مشخصات مدل‌های عددی مطالعه‌ی حاضر.

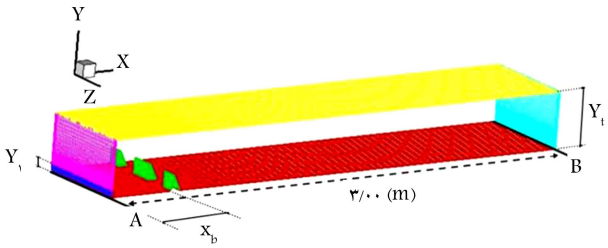
پارامتر مورد بررسی	نماد	مقادیر درنظر گرفته‌شده		
فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه (cm)	X_b	۱۹/۱	۹/۵	۴۰
ارتفاع بلوک‌ها (cm)	h_b	۳/۸۱	۱/۵	۵
شکل بلوک‌ها	SH	استاندارد	مکعب مستطیل	

جریان را تعیین می‌کنند. گردابه‌های مذکور در رژیم DSJ قوی‌تر هستند و باعث استهلاک بیشتر انرژی می‌شوند.[۱۰]

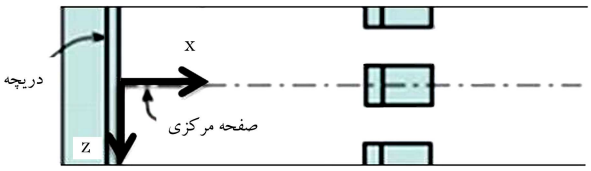
چنانچه گفته شده است، بررسی عملکرد بلوک‌های میانی در پرش مستغرق در میان مطالعات پیشین، بسیار محدود بوده است. از این رو، مطالعه‌ی دقیق حالت‌های مختلف و پارامترهای مؤثر در موضوع مذکور برای درک بهتر پدیده و استفاده از نتایج در طراحی ضرورت می‌یابد. در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر: فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه، ارتفاع بلوک‌ها، و ... در کاهش طول پرش هیدرولیکی پرداخته شده است.

۲. روش پژوهش

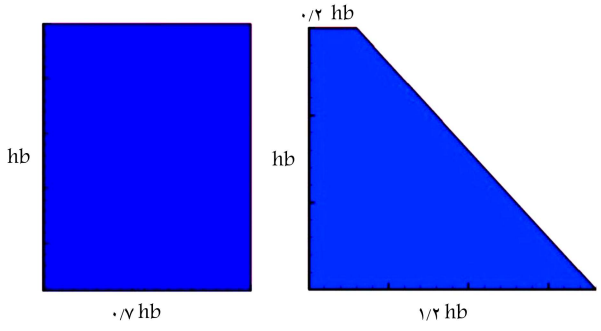
برای بررسی عددی مطالعه‌ی حاضر از نرم‌افزار فلوئنت[۵] نسخه‌ی ۶.۳.۲۶ استفاده شده است. فلوئنت، یک نرم‌افزار عمومی حل میدان جریان است، که به‌صورت دوبعدی یا سه‌بعدی، میدان جریان را تحلیل می‌کند.[۱۱] فلوئنت به‌وسیله‌ی حل معادلات بقاء جرم، اندازه‌ی حرکت و انرژی با استفاده از روش عددی حجم محدود، بر پایه‌ی مجزاسازی، مسائل را شبیه‌سازی می‌کند. شکل شماتیک از هندسه‌ی کانال مدل‌سازی شده و بلوک‌های به کار گرفته‌شده به ترتیب در شکل‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است. برای ساخت هندسه‌ی مدل از نرم‌افزار گامبیت[۶] استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر با توجه به تعداد پارامترها و سطوح ارائه‌شده در جدول ۱، به $۲^۱ \times ۳^۲$ یعنی ۱۸ آزمایش برای تعیین تأثیر هر پارامتر در طول پرش نیاز است. بدین منظور در مجموع ۱۸ مدل با مشخصات هندسی ارائه‌شده در جدول ۲ ساخته شده است. سایر پارامترها برای تمام مدل‌ها مشترک بوده و مطابق جدول ۳ است.



شکل ۳. مشخصات هندسی مدل.



شکل ۴. پلان.



الف) استاندارد؛ ب) مکعب مستطیل.

شکل ۵. مشخصات مقطع بلوک‌های استفاده‌شده.

جدول ۲. مشخصات هندسی مدل‌ها.

شماره‌ی مدل	شکل بلوک	$h_b(cm)$	$x_b(cm)$
۱	استاندارد	۳/۸۱	۱۹/۱
۲	مکعب مستطیل	۱/۵	۱۹/۱
۳	استاندارد	۵	۱۹/۱
۴	استاندارد	۳/۸۱	۹/۵
۵	استاندارد	۱/۵	۹/۵
۶	مکعب مستطیل	۵	۹/۵
۷	مکعب مستطیل	۳/۸۱	۴۰
۸	استاندارد	۱/۵	۴۰
۹	استاندارد	۵	۴۰
۱۰	مکعب مستطیل	۳/۸۱	۱۹/۱
۱۱	استاندارد	۱/۵	۱۹/۱
۱۲	مکعب مستطیل	۵	۱۹/۱
۱۳	مکعب مستطیل	۳/۸۱	۹/۵
۱۴	مکعب مستطیل	۱/۵	۹/۵
۱۵	استاندارد	۵	۹/۵
۱۶	استاندارد	۳/۸۱	۴۰
۱۷	مکعب مستطیل	۱/۵	۴۰
۱۸	مکعب مستطیل	۵	۴۰

جدول ۳. پارامترهای مشترک در همه‌ی مدل‌ها.

پارامترهای مشترک	واحد	علامت	مقدار
عرض کانال	cm	B	۴۶/۷
عرض بلوک‌ها	cm	wb	۴/۵
فاصله‌ی بین بلوک‌ها	cm	ss	۴/۵
بازشدگی دریچه	cm	y۱	۱/۹۱
عمق پایاب	cm	yt	۱۷/۴
عدد فرود جت ورودی		Fr	۴/۵۹

برای تکمیل فرایند آماده‌سازی مدل عددی و هم‌گرایی بهتر حل، از طرح PRESTO برای گسسته‌سازی فشار، الگوریتم SIMPLE برای کوپل‌ساختن سرعت و فشار و به دلیل وجود جریان‌های بازگشتی، طرح QUICK برای انفصال جملات جابجایی معادلات مومنتوم و آشفتگی استفاده شده است.

۱.۲. شرایط مرزی

در شبیه‌سازی، شرایط مرزی ورودی برای جریان ورودی از زیر دریچه به‌صورت Velocity-Intel، مرز خروجی Outflow و برای بلوک‌ها، دریچه و بستر کانال شرط مرزی دیواره در نظر گرفته شده است. میدان حل با شرط مرزی تقارن در دیواره‌ها کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب و برای صرفه‌جویی در وقت، در پژوهش حاضر از شرط مرزی تقارن[۷] برای سطح آب استفاده و شبیه‌سازی به‌صورت یک فازه (فاز آب) انجام شده است.

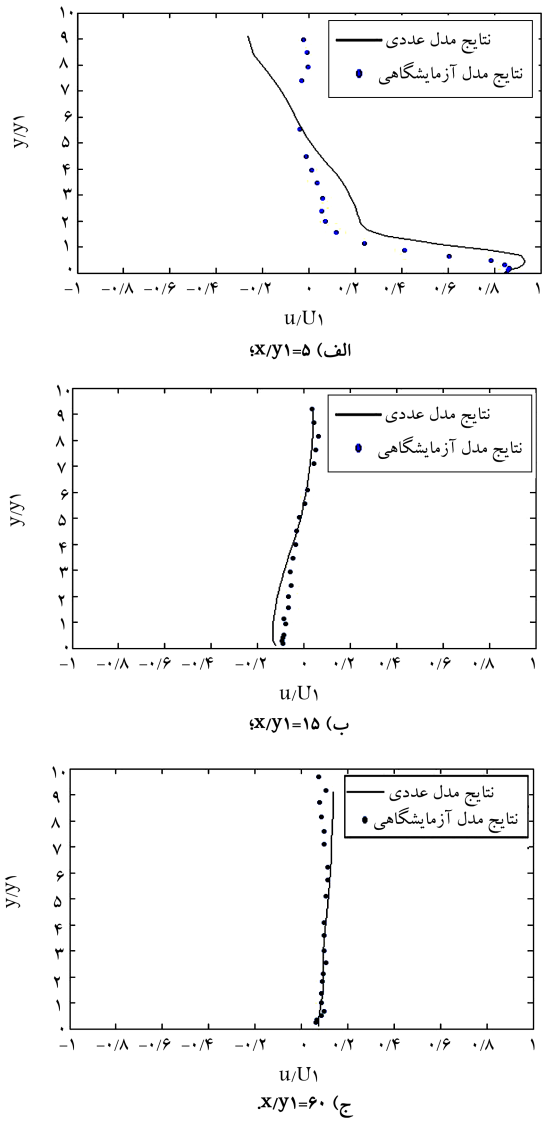
برای شبیه‌سازی، یک سیستم ۸ هسته‌یی با ۶ گیگابایت RAM و CPU ۳٫۰۷ هرتز به کار گرفته شده است. متوسط زمان اجراها تا دقت 10^{-4}، حدود ۴۰ ساعت بوده است. در مطالعه‌ی حاضر با فرض ساده‌کننده‌ی جریان یک فازی و کاهش ضرایب زیرتخفیف و استفاده از روش‌های گسسته‌سازی دقیق‌تر، سعی در کاهش زمان اجرا و بهبود روند هم‌گرایی و عملیاتی‌شدن مدل شده است. نتایج آزمایشگاهی حبیب‌زاده و راجاراتنام (۲۰۱۲) معیار سنجش نتایج عددی قرارگرفته و هندسه‌ی میدان جریان به صورتی ترسیم شده است که بیشترین تطابق را با این مدل آزمایشگاهی داشته باشد.[۹]

۳. صحت‌سنجی

در مطالعه‌ی حاضر از مدل عددی استفاده‌شده در مطالعه‌ی جعفری و صالحی نیشابوری (۲۰۱۴) استفاده شده است.[۱۰] مطابق شکل ۶، پروفیل مؤلفه‌ی افقی سرعت به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی حبیب زاده و راجاراتنام (۲۰۱۱) مقایسه شده است.[۱۱] حساسیت نتایج به ابعاد شبکه‌ی استفاده‌شده، ارزیابی و در همه‌ی اجراها، ابعاد شبکه تا اندازه‌ی مناسب ریز شده است تا نتایج حل عددی مستقل از اندازه‌ی شبکه باشد.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین خطا مربوط به ناحیه‌ی بالادست بلوک‌هاست، که به دلیل وجود گردابه و جریان برگشتی قوی در آن ناحیه ایجاد شده است. همچنین مطابق نتایج لانگ و همکاران (۱۹۹۱) که پرش هیدرولیکی مستغرق بدون بلوک را شبیه‌سازی کرده‌اند، عامل اصلی این مقدار خطا در نزدیکی دریچه، تأثیر جفت گردابه‌هایی است که در پشت دریچه ایجاد می‌شوند. با این حال در پژوهش حاضر با استفاده از مدل آشفتگی RSM سعی شده است تا جای ممکن خطا کاهش داده شود. به طوری که رفته‌رفته به سمت پایین‌دست کانال با کاهش تأثیر گردابه‌ها بر جریان و همچنین کم‌شدن آشفتگی جریان، نتایج حل عددی تطابق بهتری را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

برای بررسی دقیق‌تر مدل عددی، الگوی جریان و محل قرارگیری گردابه‌ها در صفحه‌ی مرکزی کانال ($z = 0$) در رژیم DSJ مشخص و با نتایج حاصل از مطالعات حبیب‌زاده و راجاراتنام (۲۰۱۲) مقایسه شده است.[۸] مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که مدل عددی با دقت خوبی توانسته است محل قرارگیری گردابه‌ها و همچنین طول گردابه‌ها را پیش‌بینی کند. توضیحات بیشتر پیرامون مدل و صحت‌سنجی آن در مطالعه‌ی جعفری و صالحی نیشابوری (۲۰۱۴) ارائه شده است.[۱۰]

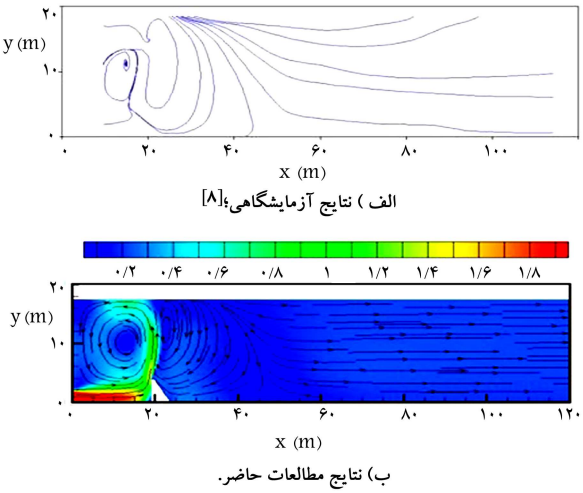


الف) x/y۱=۵؛

ب) x/y۱=۱۵؛

ج) x/y۱=۶۰.

شکل ۶. پروفیل بی‌بعد شده‌ی مؤلفه‌ی افقی سرعت در وسط کانال ($z = 0$) در مدل ۱.



الف) نتایج آزمایشگاهی؛[۸]

ب) نتایج مطالعات حاضر.

شکل ۷. الگوی جریان و محل قرارگیری گردابه‌ها در صفحه‌ی مرکزی کانال در مدل ۱.

جدول ۴. نوع رژیم آزمایش‌ها.

شماره‌ی مدل	S	S_1	S_2	regime
۱	۰٫۵	۰٫۹	۱٫۴	DSJ
۲	۰٫۵	۰٫۲	۰٫۶	Bistable
۳	۰٫۵	۱٫۲	۱٫۷	DSJ
۴	۰٫۵	۰٫۵	۱٫۲	DSJ
۵	۰٫۵	۰٫۱	۰٫۵	RWJ
۶	۰٫۵	۰٫۸	۱٫۵	DSJ
۷	۰٫۵	۱٫۵	۱٫۷	DSJ
۸	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۷	Bistable
۹	۰٫۵	۲٫۰	۲٫۰	DSJ
۱۰	۰٫۵	۰٫۹	۱٫۴	DSJ
۱۱	۰٫۵	۰٫۲	۰٫۶	Bistable
۱۲	۰٫۵	۱٫۲	۱٫۷	DSJ
۱۳	۰٫۵	۰٫۵	۱٫۲	DSJ
۱۴	۰٫۵	۰٫۱	۰٫۵	RWJ
۱۵	۰٫۵	۰٫۸	۱٫۵	DSJ
۱۶	۰٫۵	۱٫۵	۱٫۷	DSJ
۱۷	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۷	Bistable
۱۸	۰٫۵	۲٫۰	۲٫۰	DSJ

۴. نتایج و بحث

ابتدا برای بررسی بهتر جزئیات آزمایش‌ها، نوع رژیم هر مدل در جدول ۴ با استفاده از معادلات تجربی مشخص شده است؛ به طوری که برای تعیین رژیم جریان، مقدار ضریب استغراق آزمایش مطابق با عمق پایاب و عمق ثانویه‌ی پرش با استفاده از رابطه‌ی ۱ به‌دست آمده و با مقادیر ضریب استغراق بحرانی S_1 و S_2 به‌دست آمده از معادلات تجربی مطالعه‌ی حبیب‌زاده و راجاراتنام (۲۰۱۲) طبق رابطه‌های ۲ و ۳ مقایسه شده است که طبق آن، نوع رژیمی که می‌تواند به‌وجود آید، تابعی از ضریب استغراق S است.

$$S = \frac{y_t - y_2}{y_2} \qquad (۱)$$

$$S_1 = 0.44 F_1^{2.1} \left(\frac{h_b}{y_1}\right)^{3.1} \left(\frac{w_b}{h_b}\right)^{1.9} \left(\frac{x_b}{y_1}\right)^{0.65} - 0.06 \qquad (۲)$$

$$S_1 = 2.40 F_1^{-1.3} \left(\frac{h_b}{y_1}\right)^{1.7} \left(\frac{w_b}{h_b}\right)^{1.1} \left(\frac{x_b}{y_1}\right)^{0.17} - 0.50 \qquad (۳)$$

برای کلیه‌ی اعداد فرود و چیدمان مختلف بلوک‌ها، در حالتی که ضریب استغراق کمتر از مقدار بحرانی S_1 باشد، رژیم جریان همواره DSJ و اگر ضریب استغراق بزرگ‌تر از S_2 باشد، رژیم جریان همواره در حالت RWJ خواهد ماند. اگر S میان S_1 و S_2 باشد، بسته به اینکه عمق پایاب با گذشت زمان در حال زیاد یا کم شدن باشد، جریان می‌تواند در هر یک از رژیم‌ها قرار گیرد. این بدان معناست که در این حالت اگر عمق پایاب با گذشت زمان روند افزایشی داشته باشد، تا زمان رسیدن به استغراق برابر S_2، رژیم جریان DSJ و اگر عمق پایاب با گذشت زمان در حال کاهش باشد، تا زمان رسیدن به استغراق برابر S_1، رژیم جریان RWJ است. به این شرایط اصطلاحا دوپایا[8] گویند.[9]

با اجرای مدل‌ها مشاهده شده است که نتایج عددی مطالعه‌ی حاضر در پیش‌بینی رژیم جریان، با نتایج حاصل از روابط تجربی ۲ و ۳ ارائه‌شده توسط راجاراتنام و همکاران (۲۰۱۲) در حالت رژیم‌های پایدار DSJ و RWJ تطابق خوبی را نشان می‌دهد؛ در حالی که مدل عددی حاضر، به‌دلیل درنظر نگرفتن تغییرات زمانی، توانایی شناسایی شرایط دوپایا را ندارد.

الگوی جریان در صفحه‌ی گذرنده از مرکز بلوک‌ها ($z = 0$)، ناشی از نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به ۱۸ مدل ارائه‌شده و جت مستغرق در کانال بدون بلوک به ترتیب در شکل‌های ۸ الی ۱۱ ارائه و مقایسه شده است.

شرایط هیدرولیکی و ابعاد هندسی کانال در مدل مربوط به جت مستغرق ساده، مشابه شرایط سایر مدل‌ها مطابق مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ است. شکل‌های مذکور با توجه به فاصله‌ی محل قرارگیری بلوک‌ها از دریچه‌ی (x_b) گروه‌بندی شده‌اند. در هر گروه، ۳ ارتفاع و ۲ شکل درنظرگرفته‌شده برای بلوک‌ها، مقایسه شده‌اند. به طوری که هر دو شکل روبروی هم در یک خط، شرایط آزمایش یکسانی را نشان می‌دهند، که تفاوت آن‌ها فقط در شکل بلوک‌های به‌کاررفته (استاندارد یا مکعب مستطیل) است و شکل‌های زیر هم در یک ستون، تغییرات ارتفاع را برای بلوک‌ها در شرایط یکسان نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ی حاضر، برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترها، درصد کاهش طول پرش برای هر یک از ۱۸ مدل از معادله‌ی ۴ به‌دست آمده و در جدول ۵ ارائه شده است.

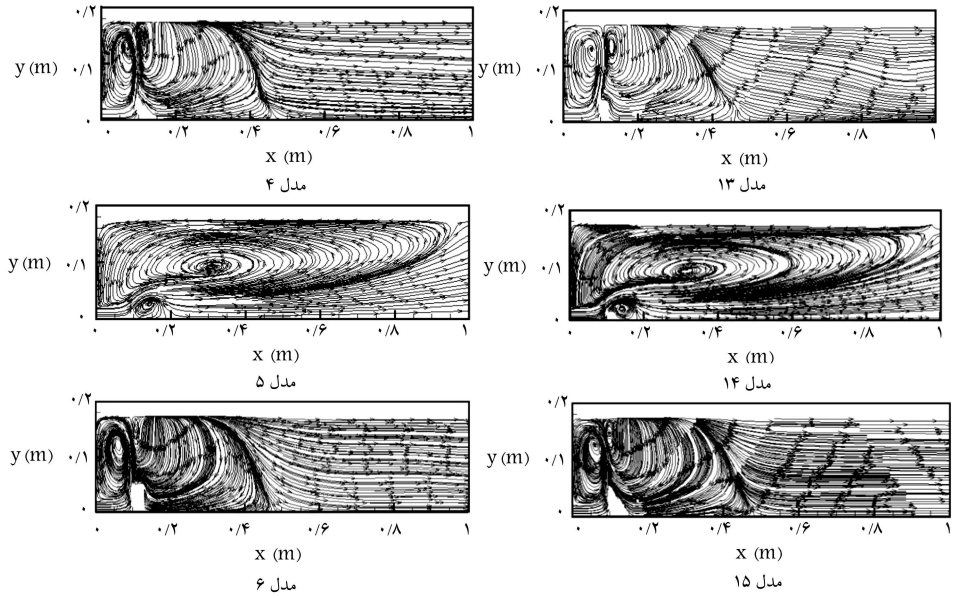
$$\text{کاهش طول برش} = \Delta L = \frac{L_{sj} - L_{sjb}}{L_{sj}} \qquad (۴)$$

که در آن L_{sj}، طول پرش در کانال بدون بلوک و L_{sjb} طول پرش در کانال همراه با بلوک است. منظور از طول پرش، طول ناحیه‌یی است که تحت تأثیر گردابه‌ها و جریان‌های برگشتی است. بنابراین مطابق الگوی جریان ارائه‌شده برای پرش مستغرق در کانال بدون بلوک و پرش مستغرق همراه با بلوک به‌صورت دو رژیم DSJ و RWJ، می‌توان طول پرش را برای هر یک از حالت‌ها تعریف کرد. به‌طوری که در رژیم RWJ و پرش مستغرق بدون بلوک، طول پرش برابر طول گردابه‌ی بزرگی در نظر گرفته می‌شود، که در نزدیکی سطح جریان تشکیل می‌شود و تا فاصله‌یی در پایین‌دست بلوک‌ها همچنان ادامه می‌یابد. در رژیم DSJ طول پرش براساس طول تأثیر دو گردابه‌ی بزرگ در جلو و پشت بلوک‌ها مشخص می‌شود.

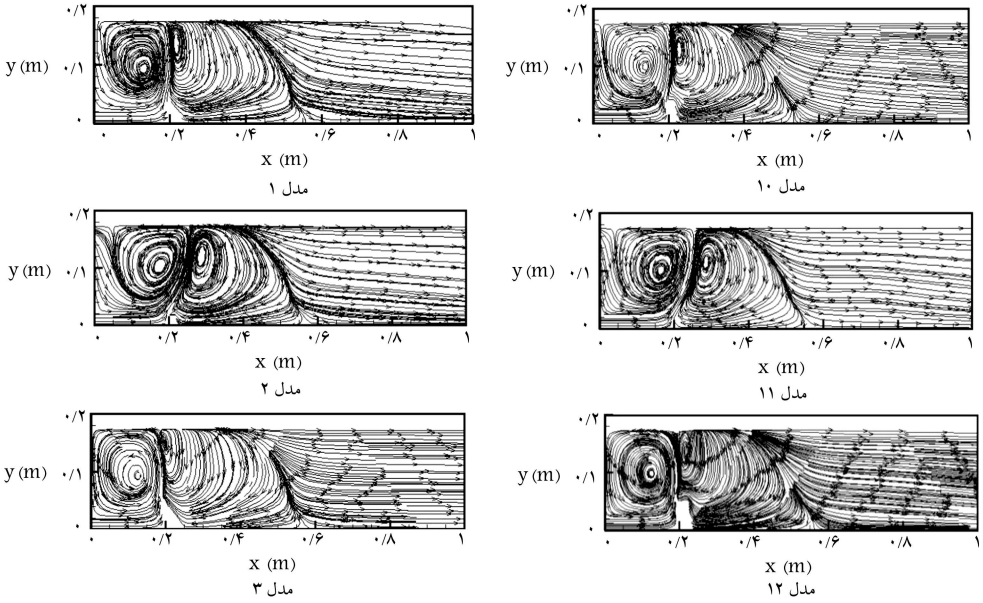
۱.۴. بررسی تأثیر شکل بلوک‌ها

مطابق شکل ۵، در پژوهش حاضر دو شکل برای مقطع بلوک‌های میانی در نظر گرفته شده است، که عمده‌ی تفاوت آن‌ها مربوط به وجود یا عدم وجود شیب در پشت بلوک‌هاست. مطابق الگوی جریان ارائه‌شده در شکل‌های ۸ الی ۱۰، می‌توان گفت که تأثیر شیب وجه پشتی بلوک‌ها در الگوی جریان ناچیز و طول پرش در هر دو شکل تقریباً یکسان بوده است. این واقعیت در جدول ۵ مشاهده می‌شود، به طوری که برای مثال برای مدل ۱ و مدل ۱۰ که تفاوت فقط در شکل بلوک‌هاست، به طوری که برای مثال درصد کاهش طول پرش برای مدل ۱ و مدل ۱۰ که تفاوت فقط درشکل بلوک هاست، با تقریب خوبی برابر است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که از نظر طول پرش هیچ‌یک از شکل‌ها بر دیگری ارجحیت ندارد. تنها تفاوتی که برای این دو شکل می‌توان بیان کرد، ناحیه‌ی جداشدگی پشت بلوک‌هاست. در بلوک‌های استاندارد به علت وجود شیب در ناحیه‌ی پشت



شکل ۸. الگوی جریان در صفحه‌ی مرکزی کانال ($z = ۰$) در حالت $x_b = ۹/۵\ (cm)$.



شکل ۹. الگوی جریان در صفحه‌ی مرکزی کانال ($z = ۰$) در حالت $x_b = ۱۹/۱\ (cm)$.

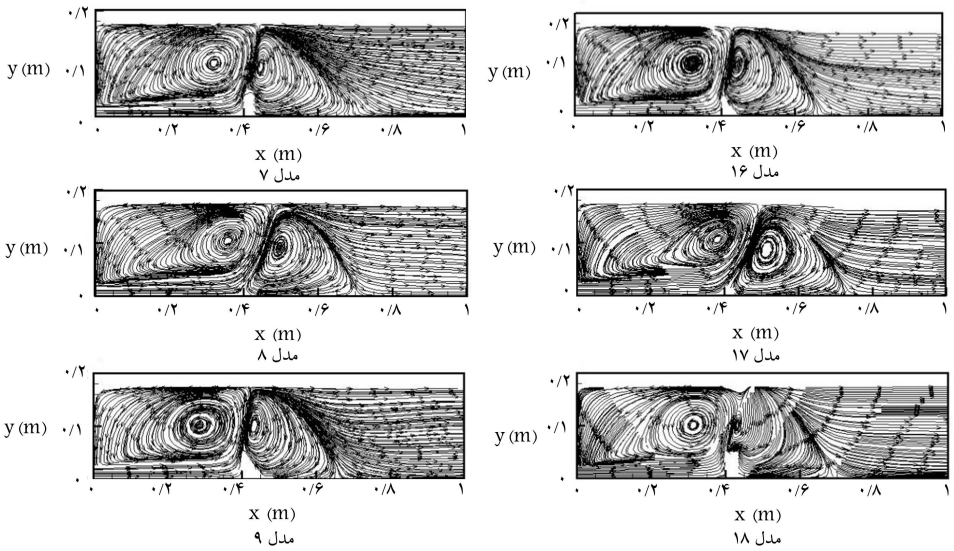
بلوک‌ها و انطباق خطوط جریان بر آن، احتمال ایجاد جداشدگی و خلاء کاهش می‌یابد که این مزیت طراحی را بهبود می‌بخشد.

۲.۴. بررسی تأثیر فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه

به منظور تعیین تأثیر این پارامتر، مدل‌ها برای سه x_b برابر ۱۹/۱، ۹/۵ و ۴۰ ساخته شده است. شکل‌های ۸ الی ۱۰، به ترتیب مربوط به $x_b = ۱۹/۱(cm)$، $x_b = ۹/۵(cm)$، $x_b = ۴۰(cm)$ هستند. مشاهده می‌شود که با کاهش x_b، طول پرش نیزکاهش یافته است. مطابق جدول ۵ می‌توان گفت مقدار درصد کاهش طول پرش برای قرارگیری بلوک‌ها در فواصل $x_b = ۱۹/۱(cm)$، $x_b = ۹/۵(cm)$ و $x_b = ۴۰(cm)$ به ترتیب حدود ۶۰٪، ۵۰٪ و ۴۰٪ است؛ مشروط بر اینکه شرایط منجر به تشکیل رژیم DSJ شود. مشاهده شده است که رژیم RWJ، طول پرش را فقط در حدود ۱۴٪ کاهش می‌دهد. طبق بررسی برخی پژوهشگران، در پرش هیدرولیکی آزاد نیز موقعیت بلوک‌ها تأثیر زیادی در عملکرد پرش ایجاد می‌کند، که این مسئله علاوه بر عملکرد، در پروفیل طولی پرش نیز اثر می‌گذارد.[۱۲] در پرش مستغرق نیز این تأثیر مشاهده می‌شود.

۳.۴. بررسی تأثیر ارتفاع بلوک‌ها

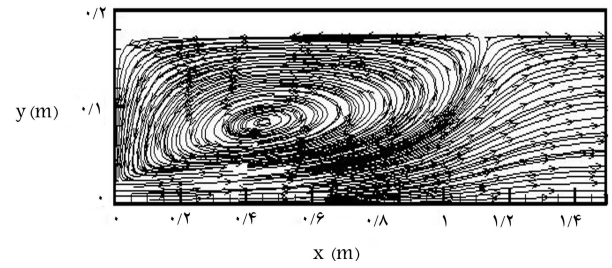
در مطالعه‌ی حاضر، سه ارتفاع بلوک برابر ۱/۵، ۳/۸ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته



شکل ۱۰. الگوی جریان در صفحه‌ی مرکزی کانال ($z = ۰$) در حالت ($x_b = ۴۰\ (cm)$.

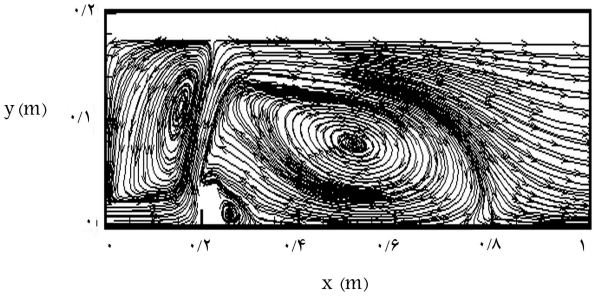
جدول ۵. مقایسه‌ی درصد کاهش طول پرش نسبت به کانال بدون بلوک برای ۱۸ مدل ارائه‌شده.

شماره‌ی مدل	شکل بلوک	$h_b(cm)$	$x_b(cm)$	$\Delta L\%$
۱	استاندارد	۳٫۸۱	۱۹٫۱	۵۰
۲	مکعب مستطیل	۱٫۵	۱۹٫۱	۴۸
۳	استاندارد	۵	۱۹٫۱	۵۰
۴	استاندارد	۳٫۸۱	۹٫۵	۵۹
۵	استاندارد	۱٫۵	۹٫۵	۱۴
۶	مکعب مستطیل	۵	۹٫۵	۵۹
۷	مکعب مستطیل	۳٫۸۱	۴۰	۳۶
۸	استاندارد	۱٫۵	۴۰	۳۶
۹	استاندارد	۵	۴۰	۳۹
۱۰	مکعب مستطیل	۳٫۸۱	۱۹٫۱	۵۰
۱۱	استاندارد	۱٫۵	۱۹٫۱	۵۰
۱۲	مکعب مستطیل	۵	۱۹٫۱	۵۰
۱۳	مکعب مستطیل	۳٫۸۱	۹٫۵	۵۹
۱۴	مکعب مستطیل	۱٫۵	۹٫۵	۱۴
۱۵	استاندارد	۵	۹٫۵	۵۹
۱۶	استاندارد	۳٫۸۱	۴۰	۳۹
۱۷	مکعب مستطیل	۱٫۵	۴۰	۳۵
۱۸	مکعب مستطیل	۵	۴۰	۳۹



شکل ۱۱. الگوی جریان جت دیواره‌یی مستغرق بدون بلوک در صفحه‌ی مرکزی کانال ($z = ۰$).

شده است. این مقادیر با توجه به اندازه‌ی بازشدگی دریچه ($y_۱ = ۱٫۹۱cm$) انتخاب شده‌اند، به‌طوری که تأثیر ارتفاع بلوک‌ها در حالتی که کمتر و بیشتر از ضخامت جت ورودی هستند، مشاهده می‌شود. دیده شده است در حالتی که ارتفاع بلوک‌ها کمتر از ضخامت جت ورودی باشد، قدرت بلوک برای انحراف جریان و نیز احتمال ایجاد رژیم DSJ کاهش می‌یابد و جریان به شکل RWJ و یا بینابینی در می‌آید. نهایتاً می‌توان گفت که در حالت پرش مستغرق، تأثیر بلوک‌ها بیشتر در شکل‌گیری نوع رژیم است. بنابراین باید ارتفاع بلوک‌ها طوری انتخاب شوند که رژیم پایدار DSJ ایجاد شود و عملکرد موردانتظار از نظر کاهش طول پرش را نشان دهد. همچنین مطابق جدول ۵، مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع بلوک



شکل ۱۲. الگوی جریان در صفحه‌ی مرکزی کانال برای حالت دیواره‌ی ممتد در کل عرض کانال.

بیش از ضخامت جت ورودی، تأثیر قابل توجهی در کاهش طول پرش نخواهد گذاشت.

۴.۴. فاصله‌ی بین بلوک‌ها

برای بررسی پارامتر ذکرشده، مدلی مطابق مدل ۱۰ ساخته شده است، با این تفاوت که به جای بلوک‌ها از دیواره‌ی ممتد در کل عرض کانال استفاده شده است. آزمایش با عدد فرود ۴/۵۹ انجام و نتیجه گرفته شده است که به کارگیری دیواره‌ی ممتد به جای بلوک‌ها باعث افزایش طول پرش به اندازه‌ی ۴۵٪ شده است.

شکل ۱۲، الگوی جریان برای شرایط مدل ۱۰ در صورت به‌کارگیری دیواره‌ی ممتد در کل عرض کانال را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه‌شده مشاهده می‌شود که استفاده از بلوک به جای دیواره‌ی ممتد، علاوه بر صرفه‌ی اقتصادی، باعث ایجاد شرایط بهتر از نظر کاهش طول پرش می‌شود.

دلیل این امر انحراف کل جت ورودی به سطح آب و درنتیجه قوی‌شدن گردابه‌ها، به‌خصوص گردابه‌ی شکل‌گرفته در پشت بلوک‌هاست که منجر به تأثیرگذاری بیشتر و طولانی‌تر شدن آن در پشت بلوک‌ها می‌شود.

نتیجه‌ی مشابه پیش‌تر برای پرش آزاد نیز مطرح شده است؛ به طوری که بلیسدل (۱۹۵۹)، باساکو و همکاران (۱۹۷۱) و پترکا (۱۹۸۴) در مطالعات خود بر روی پرش آزاد نتیجه گرفته‌اند که بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که نصف عرض کانال، بلوک قرار داده شود و پارامتر λ را به‌صورت نسبت عرض کل بلوک‌ها به عرض کل کانال تعریف کرده‌اند، که برای شرایط بهینه برابر ۰/۵ است.[۱۳-۱۵]

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر: فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه، ارتفاع بلوک‌ها، و شکل بلوک برروی طول پرش هیدرولیکی ناشی از بلوک‌ها پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

- مدل عددی حاضر، توانایی خوبی برای مدل‌کردن گردابه‌های شکل‌گرفته در شرایط پرش هیدرولیکی مستغرق همراه با بلوک را دارد؛ به طوری که نتایج صحت‌سنجی تطابق بسیار خوبی را به نسبت شرایط پیچیده‌ی جریان آشفته‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد.
- الگوی جریان پیش‌بینی‌شده توسط مدل عددی حاضر با روابط تجربی مطالعات حبیب‌زاده و راجاراتنام (۲۰۱۲) تطابق دارد.
- تأثیر استفاده از دو شکل مختلف بلوک در نظر گرفته‌شده در مطالعه‌ی حاضر بر روی طول پرش هیدرولیکی، که تفاوت آن‌ها در شیب وجه پشتی است، ناچیز و قابل صرف‌نظر است.
- در حالتی که ارتفاع بلوک‌ها بزرگ‌تر از ضخامت جت ورودی باشد، افزایش ارتفاع تأثیر چندانی در طول پرش ندارد.
- در مجموع رژیم RWJ در حدود ۱۴٪ و رژیمی DSJ بسته به فاصله‌ی بلوک‌ها از دریچه تا ۴۰٪ طول پرش را کاهش می‌دهد. دلیل این امر شکل‌گیری گردابه‌ی بزرگ در بالای بلوک‌ها در رژیم RWJ است، که طول آن قابل مقایسه با طول پرش هیدرولیکی مستغرق بدون بلوک است. در نتیجه‌ی طراحی در رژیم DSJ، حوضچه‌ی آرامش کوتاه‌تر با اطمینان از عدم خروج پرش از حوضچه را ممکن می‌کند.
- استفاده از دیواره‌ی ممتد به جای بلوک باعث افزایش طول پرش به میزان قابل توجهی می‌شود.
- در مجموع برای شرایط هیدرولیکی ثابت مشاهده شده است که با تغییر ابعاد و محل قرارگیری بلوک‌ها، رژیم جریان تغییر می‌کند. از آنجا که عملکرد بلوک‌ها از نظر کاهش طول پرش در رژیم DSJ مطلوب‌تر است، بنابراین برای شرایط هیدرولیکی مشخص، برای کم‌کردن طول پرش طراحی باید طوری صورت پذیرد که شرایط پایدار رژیم DSJ شکل گیرد.

پانوشت‌ها

1. stilling basin
2. tail water
3. deflected surface jet (DSJ)
4. reattaching wall Jet (RWJ)
5. Fluent
6. Gambit
7. symmetry
8. bistable

منابع (References)

1. Habibzadeh, A., Wu, S., Ade, F., Rajaratnam, N. and Loewen, M.R. "Exploratory study of submerged hydraulic jumps with blocks", *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**(6), pp. 706-710 (2011).
2. Rajaratnam, N. "Submerged hydraulic jump", *Journal of the Hydraulics Division*, **91**(4), pp. 71-96 (1965).
3. Eloubaidy, A.F., Al-Baidhani, J.H. and Ghazali, A.H. "Dissipation of hydraulic energy by curved baffle

blocks", *Pertanika Journal of Science & Technology*, **7**(1), pp. 69-77 (1999).

4. Verma, D.V.S. and Goel, A. "Stilling basins for pipe outlets using wedge-shaped splitter block", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **126**(3), pp. 179-184 (2000).
5. Bessaih, N. and Rezak, A.B.A. "Effect of baffle block with sloping front face on the length of the jump", *Journal of Civil Engineering, The Institution Of Engineers Bangladesh*, **CE30**, pp. 101-108 (2002).
6. Alikhani, A., Behrozi-Rad, R. and Fathi-Moghadam, M. "Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill", *International Journal of Physical Sciences*, **5**(1), pp. 025-029 (2010).
7. Long, D., Steffler, P.M. and Rajaratnam, N. "LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump", *Journal of Hydraulic Research*, **28**(4), pp. 437-460 (1990).
8. Long, D., Steffler, P.M. and Rajaratnam, N. "A numerical study of submerged hydraulic jumps", *Journal of Hydraulic Research*, **29**(3), pp. 293-308 (1991).
9. Habibzadeh, A., Loewen, M.R. and Rajaratnam, N. "Performance of baffle blocks in submerged hydraulic jumps", *Journal of Hydraulic Engineering*, **138**(10), pp. 902-908 (2012).
10. Jafari, F. and Salehi Neishaboori, S.A.A. "Numerical study of performance of baffle blocks in submerged hydraulic jumps", *The Modares Scientific Research Quarterly Journal of Civil Engineering*, **14**, pp. 37-47 (2014).
11. *FLUENT, Inc. Version 6.3.2*, User Manual (2006).
12. Hari, V.M. "Regimes of forced hydraulic jump", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **9**(3), pp. 613-617 (1973).
13. Blaisdell, F.W. "The SAF stilling basin. United States", Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1949).
14. Basco, D.R. and Adams, J.A. "Drag forces on baffle blocks in hydraulic jumps", *Journal of the Hydraulics Division*, **97**, pp. 2023-2035 (1971).
15. Peterka, A.J., *Hydraulic Design of Spillways and Energy Dissipators*, A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph (1984).