

مقاله پژوهشی

بررسی اثر توامان جت و شیب معکوس بر مشخصات پرش هیدرولیکی

زهره عبداللهی سلم‌آباد^۱، محمدحسین نجفی مود^۲، مهدی دستورانی^{۳*}، عباس خاشعی سیوکی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۴

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر جت آزاد مستطیلی و شیب معکوس بر مشخصات پرش هیدرولیکی انجام گرفته است. این پژوهش داخل یک فلوم به شکل یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. جت آزاد با دبی‌های ۲، ۲/۵ و ۳/۲ لیتر بر ثانیه با زاویه حداکثر اثر جابه‌جایی به ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش به انتهای پرش هیدرولیکی وارد شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در زاویه مشخص از برخورد جت به پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه جابه‌جایی در پرش ایجاد نمی‌شود که این زاویه را به عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شد و با افزایش زاویه جت پرش به سمت بالا دست پرش به سمت بالادست حرکت می‌کند و از یک زاویه به بعد پرش هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست ندارد که این زاویه به عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی نامگذاری گردید تغییر در زاویه و دبی جت موجب کاهش یا افزایش عمق ثانویه، طول پرش، افت انرژی نسبی و نیروی برشی بستر می‌شود استفاده از جت با حداکثر زاویه (۱۳۸ درجه) و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه کم‌ترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان و شیب ۲،۲۵۶ حداکثر مقدار شیب در آزمایشگاه انجام گرفت موجب کاهش تا حدود ۵۶/۲ درصدی نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. به کارگیری جت با زاویه حداقل (۷۸ درجه) و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و بیش‌ترین عدد فرود (۹/۶۲) جریان موجب افزایش ۱۵/۳ درصدی نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف شد. حداکثر میزان کاهش طول پرش (۶۶/۷ درصد) زمانی رخ می‌دهد که از جت با زاویه حداکثر و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و در شرایط کم‌ترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان و بیشترین شیب (۲/۲۵۶) استفاده گردید.

واژه‌های کلیدی: جت آزاد مستطیلی، زوایا، شیب معکوس، طول پرش

مقدمه

نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب و نیز مصارف کشاورزی و افزایش دبی خروجی از زیر دریچه‌ها با دور نگه داشتن پایاب اشاره نمود. دستورانی و نصرآبادی اثر چهار ضریب زبری بستر را بر مشخصات پرش هیدرولیکی روی سه شیب معکوس در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۶ بررسی نمودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه و طول جهش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس روی طول پرش می‌شود (دستورانی و نصرآبادی، ۱۳۹۱). حوضچه‌های آرامش از نوع پرشی، معمول‌ترین مستهلک‌کننده انرژی‌اند که در سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شوند. بلوک‌های میانی از جمله سازه‌های عرضی در حوضچه‌های آرامش هستند که برای پایدار ساختن پرش، کوتاه‌کردن طول آن و استهلاک بیشتر انرژی به کار گرفته می‌شوند. حوضچه‌های آرامش در پایاب سازه‌های هیدرولیکی، محل مناسبی برای ایجاد کنترل و مهار پرش هیدرولیکی به شمار می‌آیند و بلوک‌های داخل حوضچه، باعث هدایت پرش به درون آن و

پرش هیدرولیکی یا پرش آبی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است و عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانال‌های باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی یا پرش آبی موسوم است. از کاربردهای پرش آبی در کانال باز می‌توان به کاهش انرژی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی، مخلوط

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: mdatourani@birjand.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.2.11.3

نبوده است. تغییر طول نسبتاً محسوس جهش آبی در اثر مؤلفه وزن در مجاری شیبدار باعث پیچیدگی بیشتر این گونه پرش‌ها گشته است. در پژوهشی آزمایشگاهی قاسمی و همکاران به منظور توسعه روابطی جدید و با دقت مناسب به بررسی برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. آنها اعلام نمودند که در یک عدد فرود معین، طول پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی نسبی پرش مستغرق به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. به علاوه اینکه برای پرش مستغرق، در یک عدد فرود معین با افزایش نسبت استغراق، طول پرش و عمق استغراق روی درجه افزایش و افت انرژی نسبی آن کاهش می‌یابد (Ghassemi et al., 2017). در پژوهشی پورعبدالله و همکاران به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق در محدوده اعداد فرود اولیه ۴ تا ۱۰ و نسبت استغراق ۰/۱ تا ۱/۵ بر روی بستر با شیب معکوس، زبری سنگریزه‌ای و ارتفاع پله انتهایی متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که در یک عدد فرود معین، طول پرش مستغرق و افت انرژی نسبی آن به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. همچنین با افزایش نسبت استغراق اتلاف انرژی به طور متوسط ۱۲ و طول پرش مستغرق در مقایسه با حالت کلاسیک آن ۳۳ درصد کاهش نشان داد (پورعبدالله و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهش حاضر اثر توامان جت آبی و شیب معکوس بر پرش هیدرولیکی در حالات مختلف دبی و سه شیب مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ضرورت قراردادن شیب معکوس را در افت انرژی، طول پرش هیدرولیکی، تنش برشی در شیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا میزان کاهش افت انرژی محاسبه شود.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر پرش هیدرولیکی در حالت برخورد جت آبی

روابط حاکم در برخورد جریان جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی: شکل ۱ شمای ساده از چگونگی برخورد یک جت سریع مستطیلی را به یک پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. معادله یک بعدی مقدار اندازه حرکت برای چنین شرایطی در واحد عرض به صورت رابطه ۱ خواهد بود.

$$\begin{aligned} \rho(q_1 + q_j)u_2 - \rho q_1 u_1 \\ - \rho q_j u_j \cos \theta + F + F_f \quad (1) \\ = \frac{1}{2} \rho g y_1^2 - \frac{1}{2} \rho g y_2^2 \end{aligned}$$

استهلاک بخشی از انرژی جنبشی پرش هیدرولیکی و در نتیجه افزایش راندمان حوضچه‌های آرامش می‌شوند (راور و همکاران، ۱۳۹۱). شیوه جدیدی به منظور کاهش اعماق مزدوج و طول پرش پیشنهاد دادند که در آن از ویژگی‌های یک جت مستطیلی آزاد سریع برای تأثیرگذاری بر خصوصیات پرش استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد برخورد جت سریع به پرش و انتقال اندازه حرکت به آن خصوصیات و موقعیت پرش را تحت تأثیر قرار می‌دهد (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۵).

به بررسی اثر زاویه برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زیر پرداختند و نتایج آزمایشگاهی نشان داد وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگتر از زاویه بی اثر، باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش افت انرژی و نیروهای برشی کف می‌گردد (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۶). نیسی و همکاران مطالعات خود را بر تأثیر زبری‌های بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی با نسبت بازشدگی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی زبر، باعث ایجاد پرش نامتقارن قوی تر نسبت به پرش واگرایی صاف شده، عمق مزدوج را بطور متوسط به میزان ۳۱/۶ درصد کاهش و راندمان پرش را نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط به میزان ۱۹ درصد افزایش می‌دهد (Neisi et al., 2014).

ولی‌نیا و همکاران بررسی اثر فاصله بلوک‌های کف از درجه بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که طول پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد طول پرش هیدرولیکی با فاصله بلوک از درجه رابطه مستقیم دارد و با افزایش فاصله بلوک از درجه افزایش می‌یابد و با افزایش عمق پایاب نسبی استهلاک انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد (Valinia et al., 2014).

صمدی بروجنی پارامترهای پرش هیدرولیکی برای شش بستر موج‌دار را مثلی مورد مطالعه قرار دادند نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که بستر موج‌دار در مقایسه با بستر صاف موجب کاهش ۲۵ درصدی عمق مزدوج و کاهش ۷ درصدی طول پرش می‌گردد و با افزایش عدد فرود، ضریب نیروی برشی، روند شدیدتری خواهد داشت (Samadi Boroujeni et al., 2013). جریان جت معمولاً توسط یک منبع مداوم و تحت تأثیر نیروهای مومنتم انتشار می‌یابد. همچنین اختلاط جریان جت توسط جریان‌های گرداب‌های اتفاق می‌افتد (احدیان و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به آنکه پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است، در بسیاری از کارهای عملی با آن روبرو بوده و عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی. از زمان‌های گذشته، ایجاد جهش آبی در مجاری شیبدار، فکر محققین را به خود مشغول داشته ولی به علت عدم وجود اطلاعات مورد نیاز، اطمینان کافی به طرح این قبیل مسائل

$$y_1 = f_1(y_1, V_1, g, \rho, u, s, t, \theta, y_j, u_j, x_j) \quad (4)$$

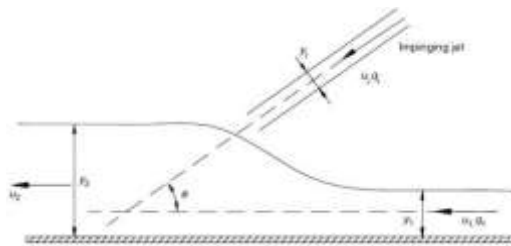
که در آن، s ، فاصله بین زبری‌ها، t ارتفاع زبری‌ها، ν لزجت سینماتیک سیال، ρ چگالی متوسط، g شتاب ثقل و y_1 و V_1 به ترتیب سرعت جریان و عمق جریان فوق بحرانی ورودی و y_j و u_j سرعت و پهنای جت، x_j محل اثر جت و θ زاویه جت می باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی (روش باکینگهام) اگر ρ ، V_1 و y_1 را پارامترهای تکراری در روش باکینگهام انتخاب نماییم (رابطه ۵) به دست می‌آید:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, R_1 = \frac{v_1 y_1}{\nu}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta, \frac{y_j}{y_1}, \frac{x_j}{y_1} \frac{u_j}{V_1} \right) \quad (5)$$

از آن جایی که مقادیر اعداد رینولدز در آزمایش‌های انجام شده بزرگ بود می‌توان از اثر لزجت چشم‌پوشی کرد و (رابطه ۶) به صورت زیر ساده شود:

$$Re = \frac{PVL}{\mu} \rightarrow \frac{VL}{\nu} \rightarrow \frac{L}{L} Re^{\frac{3}{4}} \quad Re > 2000 \quad Re = 10^5 \quad (6)$$

دیگر خصوصیات پرش از جمله طول پرش، افت انرژی نسبی و تنش برشی نیز تابعی از پارامترهای فوق خواهند بود. به منظور بررسی اثر جت و شیب معکوس بر مشخصات پرش هیدرولیکی، از یک مدل آزمایشگاهی در در آزمایشگاه هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. جریان آب توسط یک الکتروپمپ گریز از مرکز به قدرت ۵/۵ kw و حداکثر پمپاژ ۵۱/۷ از مخزن اصلی وارد فلوم و دبی آب به وسیله یک شیر ورودی، تنظیم و توسط دبی سنج الکترومغناطیس، اندازه‌گیری شد. در این آزمایش جهت تنظیم و تثبیت موقعیت ثابت پرش هیدرولیکی، از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده گردید. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- تصویر ساده‌ای از نحوه برخورد جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی (توزنده‌جانی و همکاران، ۱۳۹۲)

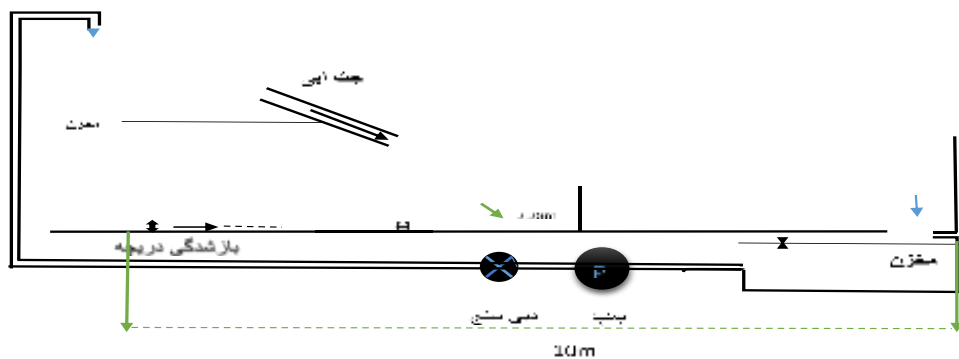
که در رابطه‌های بالا y_1 و u_1 به ترتیب سرعت و عمق بالادست پرش و y_2 و u_2 نیز به ترتیب سرعت و عمق پایین‌دست پرش می‌باشد. y_j و u_j به ترتیب سرعت و ضخامت جت است. θ زاویه جت نسبت به افق، ρ جرم مخصوص آب، F_f نیروی اصطکاک در کف کانال در اثر وجود زبری و F نیروی ناشی از تلاطم اضافی ایجاد شده در اثر اعمال جت ورودی می‌باشد. بنابراین $q_1 = y_1 u_1$ ، $q_2 = y_2 u_2$ و $q_j = y_j u_j$ می‌باشد. با تقسیم معادله‌ی حرکت $\rho g y_1^2 (1/2)$ رابطه ۲ تبدیل می‌گردد:

$$\frac{y_2^3}{y_1^3} - \frac{y_2}{y_1} \left[2Fr_1^2 \left(1 + \frac{q_j^2}{q_1^2} \frac{y_1}{y_j} \cos \theta \right) - 1 \right] - 2Fr_1^2 \left(1 + \frac{q_j}{q_1} \right)^2 + \frac{2F}{gy_1^2 \rho} = 0 \quad (2)$$

برای $q_j = 0$ رابطه ۲ به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد تغییر می‌کند. پرش هیدرولیکی باعث اتلاف انرژی (ΔE) می‌گردد. این اتلاف انرژی در پرش برابر است با تفاوت انرژی قبل و بعد از پرش. که به صورت زیر تعریف می‌شود.

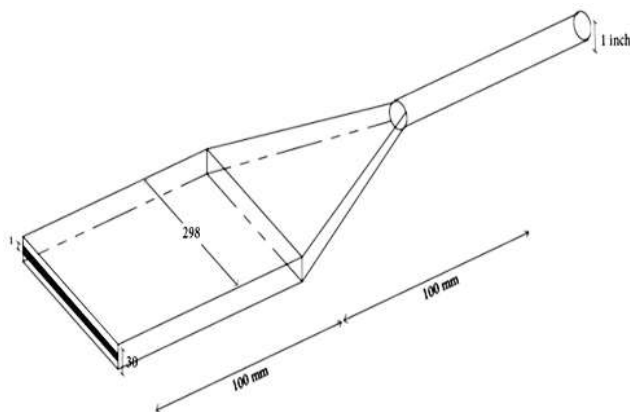
$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (3)$$

تحلیل ابعادی: به‌طور کلی خصوصیات پرش هیدرولیکی پس از اعمال جت به پارامترهای زیر بستگی دارد:



شکل ۲- برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس

زاویه برخورد توسط سیستم مکانیکی ساخته شده که موقعیت قرارگیری نازل را بر روی یک اشل (نقاله) نشان می‌دهد انجام می‌گرفت (شکل ۴).



جت آبی از طریق نازلی با مقطع مستطیلی که تصویر شماتیک آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود تولید می‌گردد. از یک پمپ قوی که قابلیت تولید یک جت صفحه‌ای را دارد جهت این که ضخامت جریان در تمام سطح خروجی یکسان باشد مورد استفاده قرار گرفت. تنظیم



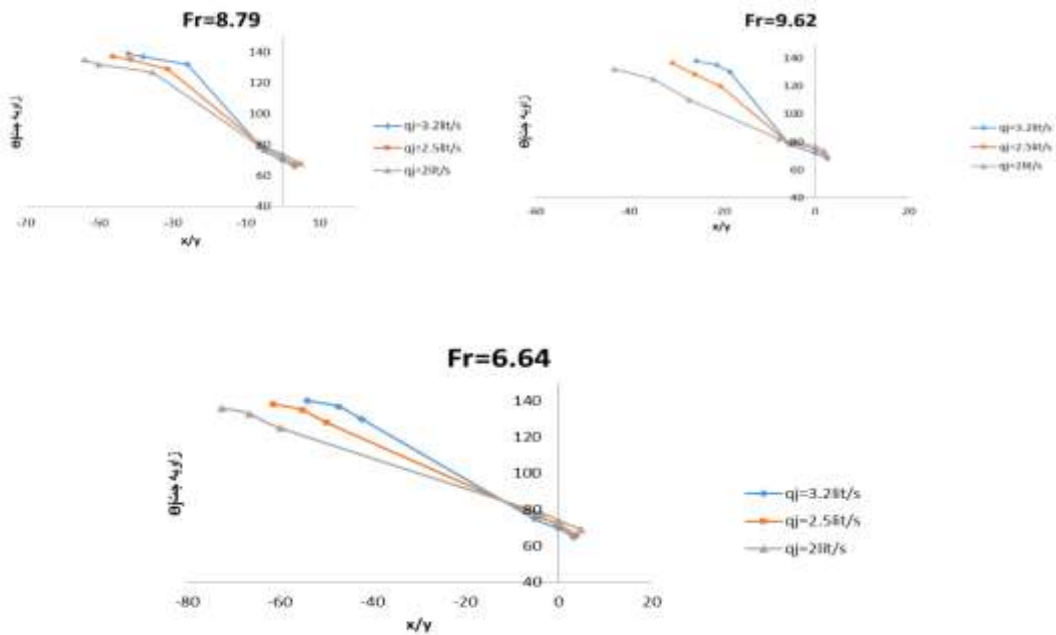
شکل ۳- وسیله ساخته شده جهت ایجاد جت آبی و ابعاد آن

ابتدایی پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش به انتهای پرش هیدرولیکی وارد می‌گردید و میزان جابجایی پرش و طول پرش توسط اشل‌های شفاف مدرج که روی دیواره کانال چسبانده شده بود، اندازه گیری می‌شد. سپس برای همه حالت‌ها با تغییر دریچه انتهایی و تثبیت ابتدای پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، مشخصات پرش اندازه‌گیری می‌گردید و برای افزایش دقت پارامترهای برداشت شده از روش عکس‌برداری به وسیله نرم‌افزار گرافر به صورت غیر-مستقیم نیز مشخصات پرش استخراج گردید و از میانگین داده اندازه-گیری شده مستقیم و با داده‌های استخراج شده نرم‌افزار که اختلاف ناچیزی با هم داشتند استفاده گردید.

در ادامه آزمایشات، ابتدا یک صفحه از جنس آهن گالوانیزه به طول ۲۲۸ سانتی‌متری به عرض ۳۰ سانتی‌متر که در کف با شیب معکوس در سه زاویه متفاوت نصب گردید و جهت تنظیم و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری، از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. بازشدگی دریچه ورودی جریان از مخزن به کانال به میزان، $\frac{2}{4}$ سانتی‌متر به طور ثابت تنظیم و سه دبی به میزان ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه جاری گردید. پس از تثبیت پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، عدد فرود جریان فوق بحرانی مشخص و پارامترهای هیدرولیکی پرش برداشت گردید. سپس جت آزاد با دبی‌های ۲، $\frac{2}{5}$ و $\frac{3}{2}$ لیتر بر ثانیه با چهار زاویه انتخابی نسبت به افق ۶۰ و ۹۰، زاویه حداکثر اثر جابجایی



شکل ۴- نمایی از زوایای حداکثر و حداقل برخورد جت



شکل ۵- تغییرات ابتدایی پرش نسبت به زاویه برخورد

نتایج و بحث

تأثیر جت بر تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی

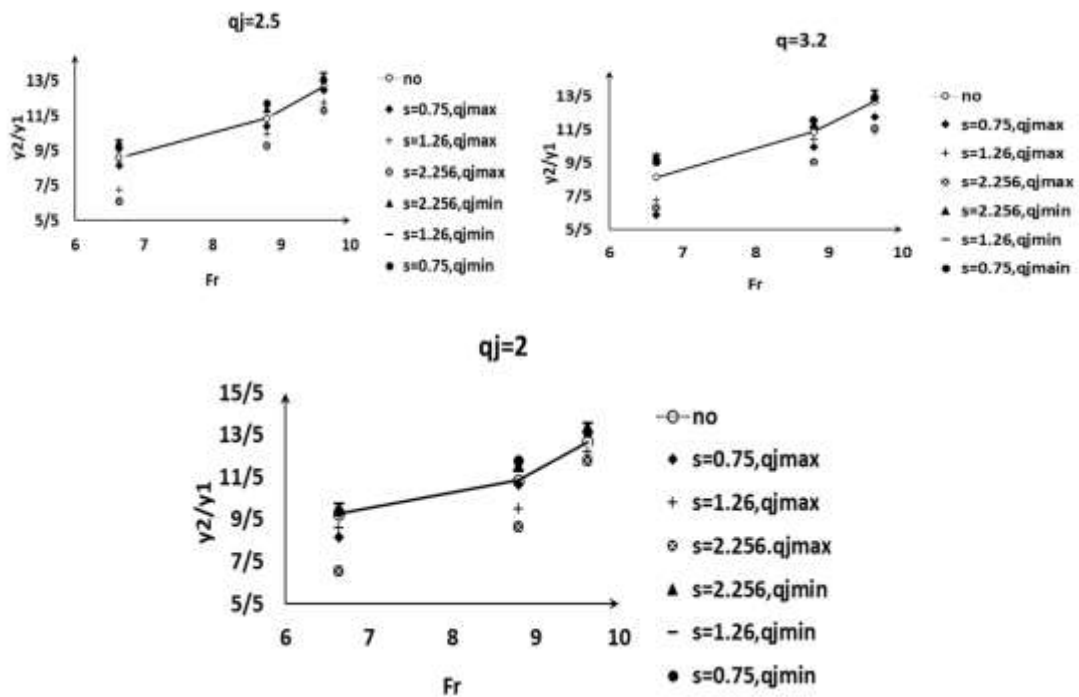
شکل ۵ اثر زاویه برخورد جت آبی را بر جابه‌جایی پرش هیدرولیکی در دبی‌های مختلف و محل اثر متفاوت در عدد فرود یکسان را نشان می‌دهد.

پهمان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود پرش هیدرولیکی در زاویه‌های انتخابی برای جت هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارد (نقاط روی محور عمودی) همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود این زاویه به عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شده است. با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالادست تغییر مکان می‌دهد و از زاویه‌ای مشخص به بعد پرش هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست نداشته است که این زاویه به عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی نامگذاری می‌شود. با توجه به شکل‌ها با افزایش دبی جت زاویه بی‌اثر کاهش می‌یابد و زاویه حداکثر با افزایش دبی جت افزایش می‌یابد و زمانی که جت به انتهای پرش برخورد می‌کند زاویه بی‌اثر کمترین مقدار و زاویه حداکثر بیشترین مقدار خود را خواهد داشت. در نتیجه با افزایش عدد فرود، زاویه بی‌اثر افزایش و زاویه حداکثر، کاهش می‌یابد. با اعمال جت به پرش هیدرولیکی در هر زاویه‌ای کمتر از زاویه بی‌اثر، پرش هیدرولیکی به سمت پایین دست و با هر زاویه‌ای بیشتر از زاویه بی‌اثر، پرش هیدرولیکی به سمت بالادست جابجا می‌شود. هر چه دبی جت آبی بیشتر باشد به طبع این جابه‌جایی بیشتر خواهد شد.

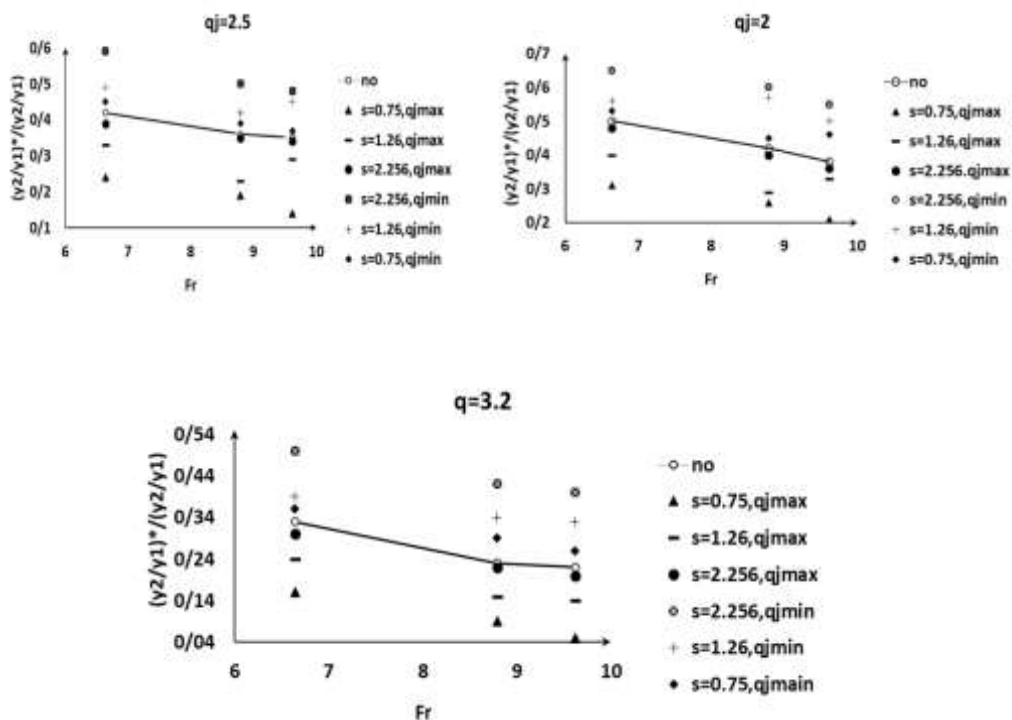
نسبت اعماق مزدوج بر پرش هیدرولیکی

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایشات انجام‌شده بدون جت در این پژوهش، نمودار تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در شکل ۶ ترسیم گردید. در این شکل‌ها خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت می‌باشد.

با توجه به شکل‌های فوق با افزایش دبی جت، نسبت عمق ثانویه در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر افزایش و در زاویه‌های بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود نسبت عمق ثانویه افزایش و با افزایش زاویه جت کاهش می‌یابد. استفاده از جت با حداکثر زاویه (۱۳۸ درجه) و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه کم‌ترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان و شیب معکوس موجب کاهش تا حدود ۵۶/۲ درصدی نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید به کارگیری جت با زاویه حداقل (۷۸ درجه) و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و بیش‌ترین عدد فرود (۹/۶۲) جریان موجب افزایش ۱۵/۳ درصدی نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف شد می‌توان دلیل کاهش یا افزایش نسبت اعماق مزدوج را افزایش یا کاهش نیروهای برشی دانست. برای بهتر نشان‌دادن تغییرات در شکل ۷ نسبت $(y_2/y_1)/(y_2/y_1)$ در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش رسم شده است، که $(y_2/y_1)^*$ نسبت اعماق ثانویه اندازه‌گیری شده با استفاده از جت و (y_2/y_1) نسبت عمق ثانویه در بستر صاف بدون جت می‌باشد. هر چه دبی جت افزایش یابد به طبع، اثر آن در افزایش و کاهش عمق ثانویه نیز بیش‌تر خواهد بود.



شکل ۶- تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه برخورد در شیب معکوس با زاویه‌های متفاوت



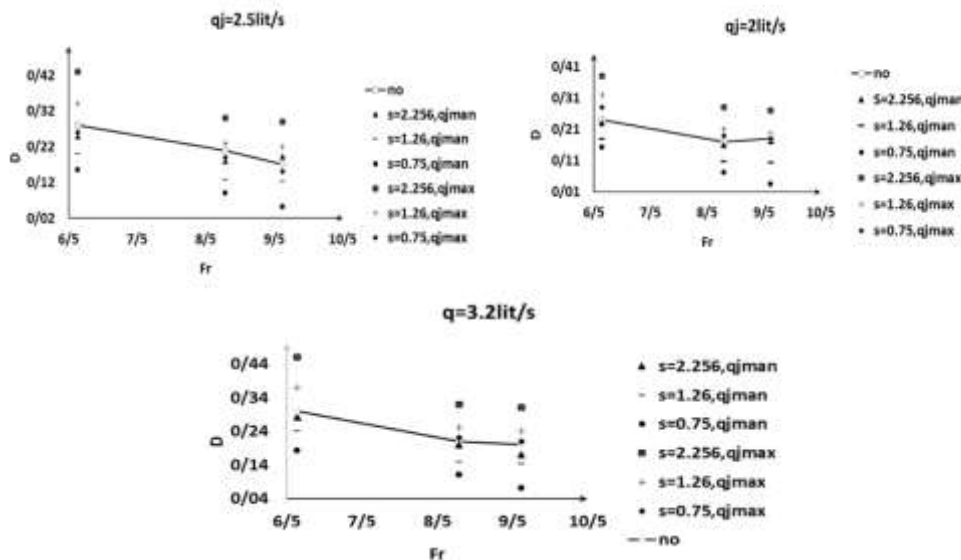
شکل ۷- تغییرات نسبت $(y_2/y_1)^*/(y_2/y_1)$ با افزایش زاویه جت و افزایش شیب معکوس

می‌شود. برای نمایش میزان اختلاف عمق ثانویه با اعمال جت آبی y_2 و پرش کلاسیک y_2^* پارامتر کاهش عمق $D=(y_2^*-y_2)/(y_2^*)$

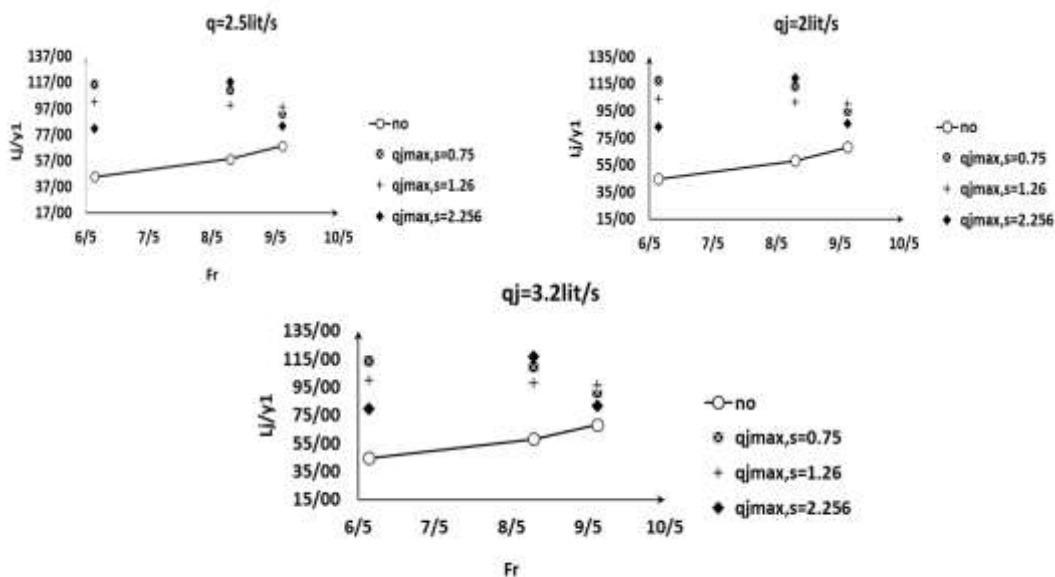
دلیل متغیر بودن نسبت عمق مزدوج را می‌توان به افزایش و کاهش نیروهای برشی در اثر جت آبی دانست، که در ادامه به آن اشاره

۰/۴۷ گردید. تغییرات D با عدد فرود جریان فوق بحرانی ورودی در شکل ۸ نمایش داده شده است.

تعریف شده است. بیشترین مقدار کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و شیب به میزان ۵۵ درصد می‌باشد و کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (D) در بستر شیب معکوس حداکثر



شکل ۸- تغییرات پارامتر D کاهش عمق در مقابل عدد فرود در شیب معکوس با زاویه‌های متفاوت



شکل ۹- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش زاویه برخورد جت و افزایش شیب معکوس

$$\frac{L_j}{Y_1} = 9.75 (Fr_1 - 1)^{1.01} \quad (7)$$

از شکل ۹ می‌توان این چنین دریافت کرد، در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر، طول نسبی پرش در اعداد فرود بالاتر بیشتر از حالت بدون جت می‌باشد و با افزایش زاویه جت طول نسبی پرش کاهش

طول پرش هیدرولیکی

تغییرات طول نسبی پرش با تغییرات زبری کف در روی شیب افقی در شکل ۹ ترسیم شده است. خط ممند در شکل ۹ زیر نشان- دهنده رابطه تجربی سیلوستر (۱۹۶۴)، (رابطه ۷) برای طول پرش در بسترهای صاف و افقی است.

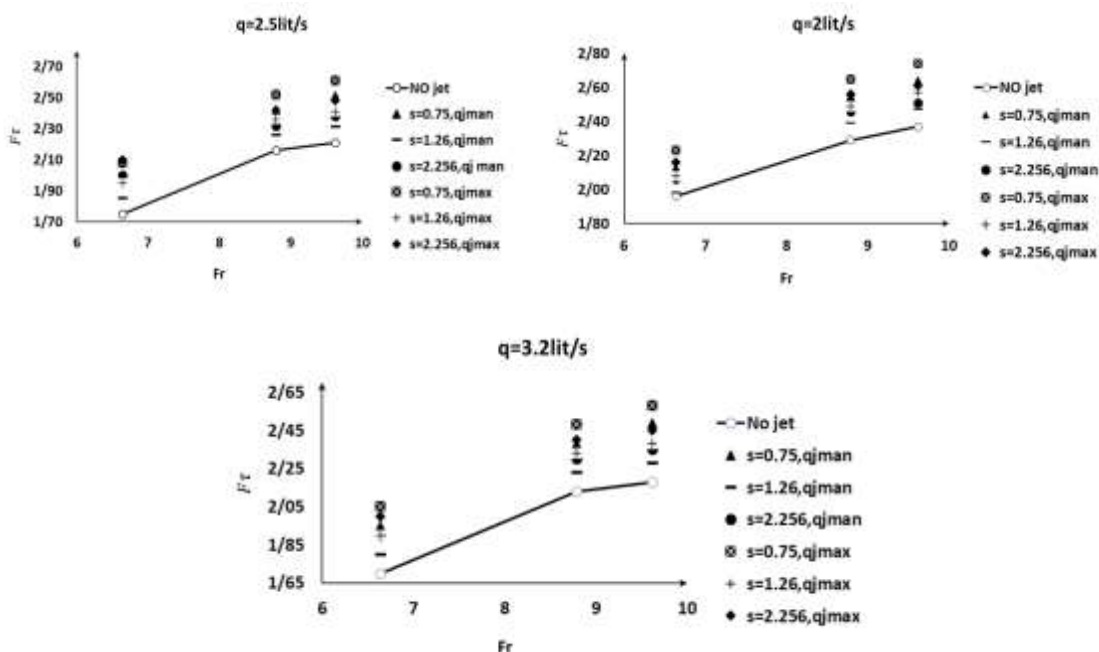
نیروهای تنش برشی

از دلایل اصلی افزایش و کاهش عمق ثانویه در پرش آبی با اعمال جت در مقایسه با پرش بدون جت، وجود تنش برشی اضافی است که در اثر اعمال جت ایجاد می‌شود. با استفاده از معادله‌ی مومنتم در صورتی که جمع نیروهای برشی بستر بر روی سطح افقی، نیروهای تنش برشی رینولدز و اثر نیروی جت در طول پرش باشد، می‌توان بیان کرد:

$$F_{\tau} = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (8)$$

که در آن P و M مقادیر نیروی فشار و مومنتوم و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشانگر مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشند.

می‌یابد، همچنین در زاویه‌های بیشتر از زاویه بی اثر در تمامی اعداد فرود، طول نسبی کمتر از حالت بدون جت می‌باشد. با افزایش دبی جت در زاویه کمتر از زاویه بی اثر طول نسبی افزایش و در زاویه‌های بیشتر از زاویه بی اثر کاهش می‌یابد. و حداکثر میزان کاهش طول در بستر شیب‌دار با اعمال جت تا حدود ۶۶/۷ درصد می‌باشد. دلیل کاهش و افزایش طول پرش در اثر تغییر در عمق ثانویه پرش می‌باشد که بسیاری از محققین پیشین در این مورد، پژوهش‌هایی انجام داده‌اند و به این نتیجه دست یافتند که طول پرش با عمق ثانویه پرش رابطه مستقیم دارد.

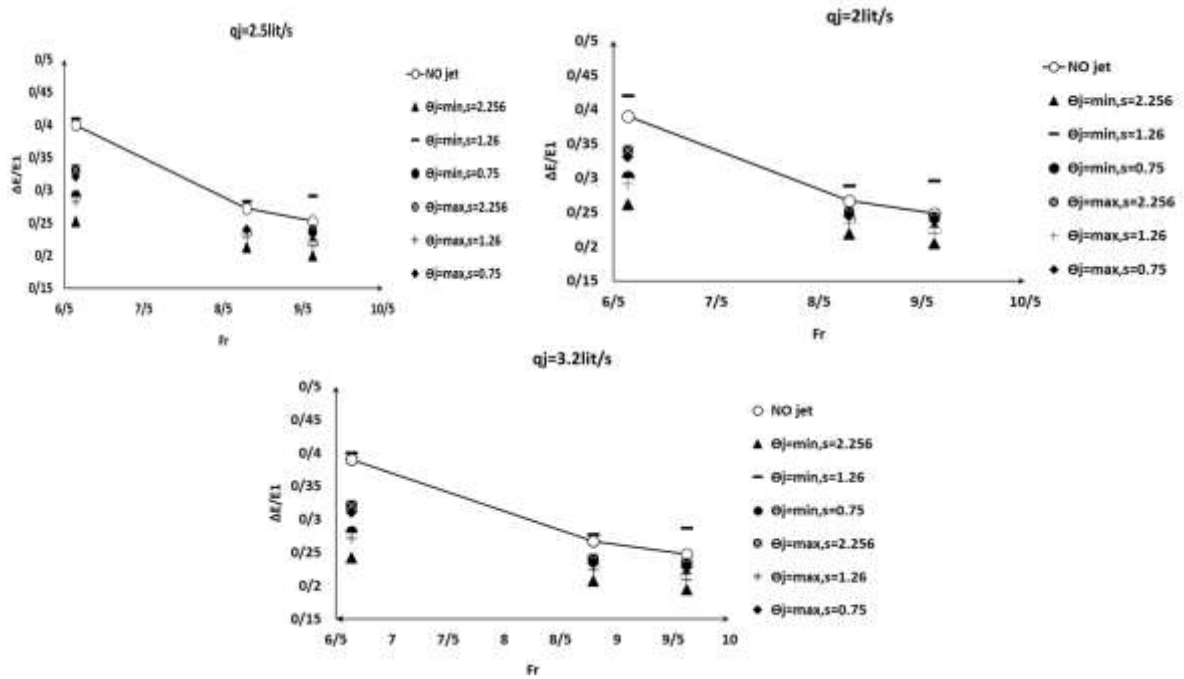


شکل ۱۰- تغییرات نیروهای تنش برشی برشیب معکوس با افزایش زاویه برخورد

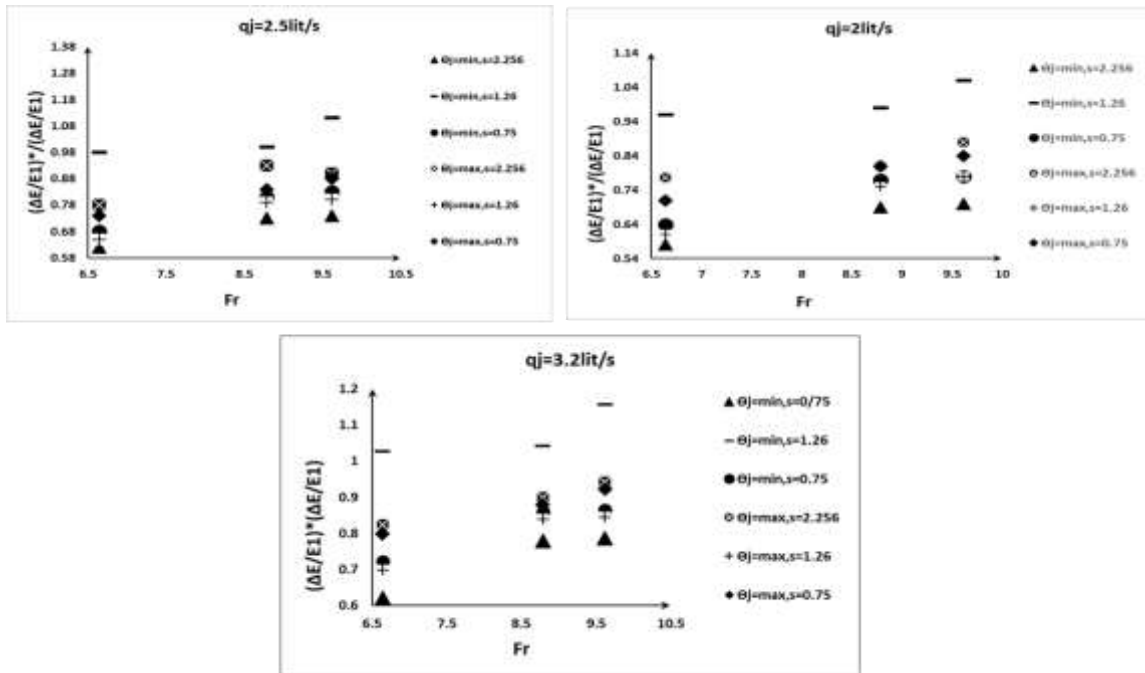
افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی عبارتند از $\Delta E/E_1$ که ΔE اختلاف انرژی مخصوص در ابتدا (E_1) و انتهای پرش (E_2) می‌باشد. در شکل زیر تغییرات افت نسبی انرژی در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با تغییرات زبری کف و محل اثر متفاوت جت ترسیم شده و زیر خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت و بدون شیب است. با توجه به شکل ۱۱ مقادیر افت نسبی، زمانی که جت با زاویه بیشتر از زاویه بی‌اثر بر پرش وارد شود، بزرگتر از پرش بدون جت است. افت نسبی در تمام حالات در بسترهای شیب‌دار بزرگتر از حالت بدون جت و بدون شیب می‌باشد که نشان‌دهنده اثر شیب بیشتر در زاویه کمتر از بی‌اثر است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود، افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد.

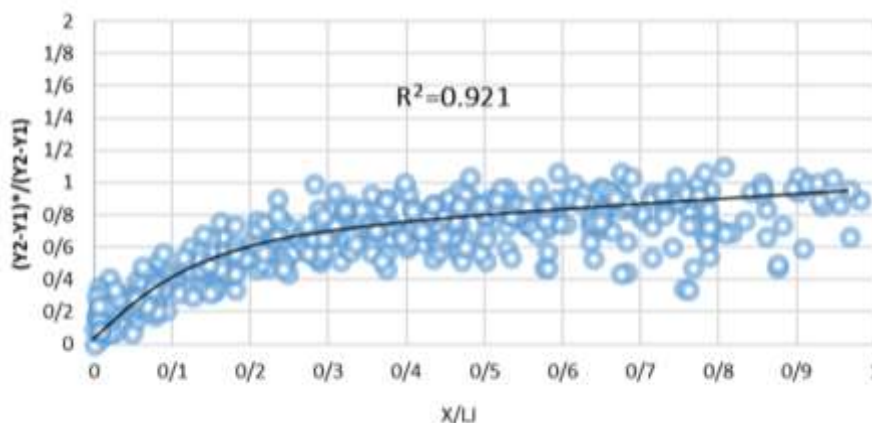
در شکل ۱۰ زیر نمودار تغییرات F_{τ} با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود ترسیم شده است. در این شکل‌ها خط ممتد نشان‌دهنده نیروهای برشی بستر قبل از اعمال جت می‌باشند. افزایش زاویه جت و افزایش دبی جت باعث افزایش نیروهای برشی می‌شود. بیش‌ترین افزایش نیروهای برشی و اعمال جت ۲۶/۲ برابر حالت بدون جت و بدون شیب معکوس می‌باشد. اما این نیروها زمانی که جت با زاویه بی‌اثر اعمال می‌شود با حالت بدون جت برابر می‌شود. بنابراین اگر زاویه جت کمتر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل کاهش نیروهای برشی، پرش به سمت پایین دست و در صورتی که زاویه جت بیشتر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل افزایش نیروهای برشی نسبت به حالت بدون جت، پرش به سمت بالادست جابه‌جا می‌شود.



شکل ۱۱- تغییرات افت انرژی نسبی پرش با تغییر شیب معکوس



شکل ۱۲- تغییرات نسبت $(\Delta E/E1)^*/(\Delta E/E1)$ در مقابل عدد فرود و زاویه‌های متفاوت شیب معکوس



شکل ۱۳- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی با اعمال جت به انتهای پرش بر روی صفحات شیب معکوس برای کلیه آزمایش‌ها

بالادست جریان و پایین دست جریان می‌گردد به طوری که در حداکثر زاویه جت، بیشترین دبی جت و کمترین عدد فرود، نسبت عمق ثانویه تا حدود ۲۵/۴ درصد کاهش می‌یابد و در زاویه حداقل یا بی اثر با بیشترین دبی جت و بیشترین عدد فرود تا حدود ۱۸/۷ افزایش می‌یابد در صورتی که به کارگیری جت با شیب معکوس در حداکثر زاویه جت و حداکثر دبی جت با کم‌ترین عدد فرود و بیشترین شیب باعث کاهش عمق ثانویه ۵۶/۲ درصد می‌شود در کم‌ترین زاویه جت و بیشترین دبی جت با بیشترین عدد فرود موجب افزایش ۱۵/۳ درصد نسبت عمق ثانویه می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل خلاصه می‌گردد:

- ۱- بیشترین افزایش نیروهای برشی در بستر شیب معکوس و اعمال جت حدود ۲۶/۲ برابر حالت بدون جت و بدون شیب معکوس می‌باشد.
- ۲- حداکثر مقدار کاهش نسبی طول پرش هیدرولیکی در بستر شیب معکوس با اعمال جت ۰/۲۴ می‌باشد.
- ۳- بیشترین میزان کاهش افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون جت و بدون شیب معکوس ۳۹/۸ درصد می‌باشد.
- ۴- حداکثر میزان کاهش طول نسبی در بستر شیب معکوس با اعمال جت تا حدود ۶۶/۷ درصد می‌باشد
- ۵- کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در بستر شیب معکوس حداکثر ۰/۴۶ می‌باشد.

منابع

احمدیان، ج. محمدی، ف. و بهرامی، ح. ۱۳۹۳. بررسی اثر زاویه قائم و خصوصیات هیدرولیکی بر نحوه توزیع جریان جت غلیظ منفرد با استفاده از مدل فیزیکی. مجله علوم و فنون دریایی. ۱۳(۱):۵۱-۶۰

افت نسبی با افزایش دبی جت در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر در حالت بستر بدون شیب کاهش و در زاویه‌های بیشتر از زاویه بی‌اثر در حالت بستر بدون شیب افزایش می‌یابد و در بسترهای شیب‌دار با افزایش دبی جت افت نسبی افزایش می‌یابد. با اعمال جت در زاویه حداکثر، بیشترین جابه‌جایی به سمت بالادست جریان اتفاق می‌افتد و همچنین با افزایش دبی جت عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار افت انرژی در بستر شیب معکوس به میزان ۳۹/۸ درصد می‌باشد و با توجه به اینکه در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیشتر است، لذا با کاهش عمق ثانویه اختلاف انرژی در مقاطع اولیه و ثانویه پرش افزایش و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. در توجیه این تغییرات می‌توان گفت که با توجه به این که با افزایش زاویه جت و همچنین افزایش دبی جت عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد و توجه به این موضوع که در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیشتر است، بنابراین با کاهش عمق ثانویه پرش افزایش و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. برای بهتر نشان دادن تغییرات، نسبت $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پر، در شکل ۱۲ رسم شده است.

پروفیل سطح آب

پروفیل بی‌بعد سطح آب که با استفاده از داده‌های بدست‌آمده از نرم‌افزار گرافر در تمام شیب‌های معکوس با زاویه‌های متفاوت بدست آمده است در شکل ۱۳ ترسیم شده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بررسی اثر جت و شیب معکوس بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی شده است. جت باعث حرکت پرش به سمت

دستورانی، م. و نصرآبادی، م. ۱۳۹۰. اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۵: ۹۱-۱۰۰.

Samadi Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B., and Fattahi Nafchi, R. 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *The Canadian Journal of Civil Engineering*. 40: 841-847.

Valinia, M., Ayyoubzadeh, A., and Yasi, M. 2014. An experimental study of the effect of baffle blocks distance from a gate on the hydraulic jump length and energy dissipation. *The Journal of Soil and Water Conservation*. 3 (3): 1-10.

Neisi, K., ShafaiBejestan, M., Ghomshi, M., and Kashefipoor, S.M. 2014. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 37 (2): 83-93.

پورعبداله، ن، حیدرپور، م، عابدی کوپایی، ج. و محمدزاده هایلیلی، ج، ۱۳۹۷. مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق روی سطوح زبر و شیب معکوس، تحقیقات آب و خاک ایران، مرداد و شهریور ۱۳۹۷، ۴۹(۳): ۶۸۳-۶۹۳.

دستورانی، م. اسماعیلی، ک. و خداشناس، س. ۱۳۹۵. بررسی اثر زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳(۳): ۲۲۵-۲۳۹.

دستورانی، م، اسماعیلی، ک، بهرامی. م و دیندارلو، ع. ۱۳۹۶. بررسی اثر زاویه برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زبر. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۶): ۱۵۸-۱۴۱.

راور، ز. فرهودی، ج. و نژندعلی، ع. ۱۳۹۱. تأثیر بستر زبر ذوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی. نشریه آب و خاک، ۲۶(۱): ۸۵-۹۴.

Investigation of the Effect of both Jet and Reverse Slope on Hydraulic Jump Characteristics

Z. Abdollahi Salmabad¹, M.H. Najafi Moud², M. Dastourani^{3*}, A. Khashei Siouki⁴

Received: Nov.28, 2020

Accepted: Jan.23, 2021

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of jet and reverse slope on the characteristics of hydraulic jump. This study was performed inside a flume in the form of a rectangular channel 10 meters long and 30 cm wide. Free jet with flows of 2, 2.5 and 3.2 liters per second with the maximum displacement angle of the beginning of the jump and the angle without changing the beginning of the jump to the end of the hydraulic jump. The results showed that changes in the angle and flow rate of the jet reduce or increase the secondary depth, jump length, relative energy loss and shear stress force of the bed. Using a jet with a maximum angle and flow rate of 3.2 liters per second with the lowest landing number Reverse flow and slope reduced the secondary depth ratio by about 56.2% compared to the no-jet mode and smooth bed. Using a jet with a minimum angle and flow rate of 3.2 liters per second and the maximum flow rate increased the secondary depth ratio relative to Jetless mode was smoothed. The results of this study show that at a certain angle from the jet to the hydraulic jump, there is no displacement in the jump, which was named as the inert angle, and by increasing the angle of the jet jump upwards, the hand jumps to It moves upstream and from one angle onwards the jump does not move upwards. This angle was named as the maximum displacement angle. Changes in the angle and flow rate of the jet reduce or increase the secondary depth, jump length, relative energy drop and stress force. The use of a jet with a maximum angle (138 degrees) and a flow rate of 3.2 liters per second, the minimum number of landings (6.64) and reverse slope reduces the ratio of the secondary depth to about 56.2% relative to the state without jet and bed was smoothed. Using the jet with the minimum angle (78 degrees) and the flow rate of 3.2 liters per second and the maximum number of landings (9.62) flow increased the ratio of secondary depth by 15.3 percent compared to the state without jet and smooth bed.

Keywords: Angles, Jump length, Rectangular free jet, Reverse slope

1- Graduate student of Water Structures, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

4- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

(*- Corresponding Author Email: mdatourani@birjand.ac.ir)