

بررسی اثر زبری دوزنقه‌ای قائم‌الزاویه و شیب معکوس در حوضچه آرامش بر خصوصیات پرش هیدرولیکی

سیدشهاب بنی‌طبا^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۲ و ناهید پورعبداللله^۳

۱ و ۳- به‌ترتیب دانشجویان کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ و دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲۲

چکیده

آب عبوری از روی سرریزها یا زیر دریچه‌ها اغلب دارای انرژی زیادی می‌باشد. چنانچه این آب با همان انرژی وارد رودخانه شود موجب خرابی سازه‌های پایین دست می‌شود. یکی از راه‌های کاهش این انرژی ایجاد پرش هیدرولیکی می‌باشد. لذا مطالعه و تحقیق در مورد پرش هیدرولیکی اهمیت زیادی دارد. در تحقیق حاضر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی بستری با زبری دوزنقه‌ای قائم‌الزاویه با ارتفاع‌های ۰/۵، ۱ و ۲ سانتی‌متر و شیب‌های صفر، ۱/۵- در صد و ۳- در صد مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن عدد فرود در محدوده ۴ تا ۹ نسبت اعماق مزدوج به‌طور متوسط ۱۸/۸ در صد نسبت به حالت کلاسیک کاهش داشته است. همچنین افت انرژی ۹/۶ در صد نسبت به حالت کلاسیک افزایش پیدا کرده است. بیشترین کاهش عمق ثانویه مربوط به زبری ۲ سانتی‌متر و شیب ۳- در صد بوده است. همچنین زبری و شیب معکوس بر طول پرش تأثیر داشته و باعث کاهش آن نسبت به پرش کلاسیک شده است.

واژه‌های کلیدی

افت انرژی، طول پرش، نسبت اعماق مزدوج

مقدمه

پرش هیدرولیکی از پدیده‌های مهم علم هیدرولیک بوده که در زمره جریان متغیر سریع قرار می‌گیرد. در اثر این پدیده جریان در قسمتی از مسیر با تغییر وضعیت از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی قسمت اعظم انرژی جنبشی خود را به انرژی گرمایی و پتانسیل تبدیل نموده و جریان آشفته، تحت کنترل قرار می‌گیرد (Abrishami & Hosseini, 2013). مطالعات اولیه در این زمینه مربوط به پرش کلاسیک می‌باشد. همچنین بلانگر برای محاسبه عمق ثانویه پرش رابطه ۱ را ارائه نمود.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (1)$$

انرژی پتانسیل ذخیره شده در بالادست سدها در هنگام عبور آب از روی سرریز سدها به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و نیروی هیدرودینامیکی زیادی را ایجاد می‌نماید. چنانچه این جریان با همان شدت وارد رودخانه یا کانال شود موجب فرسایش پایین دست در تأسیسات مربوطه می‌گردد و نهایتاً موجب انهدام و خرابی سازه پایین دست می‌شود. لذا می‌بایست انرژی اضافی آب قبل از ورود به رودخانه مستهلک گردد. راه‌های متعددی از جمله ایجاد پرش هیدرولیکی برای مقابله با این انرژی وجود دارد.

۰/۲۵ و ۰/۴۳ و ۰/۵ بررسی نمودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف است. توکیای (Tokyay, 2005) اثرات بسترهای موج‌دار سینوسی را بر روی پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار داد. وی علاوه بر داده‌های به‌دست آمده از نتایج مطالعات اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) آزمایش‌های جدیدی با طول موج (s) برابر ۵ سانتی‌متر و دو عمق موج (t) ۱ و ۱/۳ سانتی‌متر (۰/۲۶، ۰/۲) در بازه اعداد فرود ۵ تا ۱۲ انجام داد که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که طول پرش حدود ۳۵ درصد و نسبت اعماق مزدوج حدود ۲۰ درصد کمتر از شرایط مشابه نسبت به پرش کلاسیک است. همچنین توکیای (Tokyay, 2005) اعلام نمود شاید بسترهای موج‌دار بتواند جایگزین مناسبی برای بلوک‌ها و آبپایه‌ها در داخل حوضچه‌های آرامش باشند. اید (Ead, 2007) بعد از مطالعات مشترکی که با راجاراتنام در سال ۲۰۰۲ انجام دادند (Ead & Rajaratnam, 2002) آزمایش‌های خود را در بازه اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ روی سه بستر موج‌دار سینوسی، مثلثی و دوزنقه متساوی‌الساقین با طول موج (s)، ۶/۵ سانتی‌متر و عمق موج (t)، ۱/۸ سانتی‌متر (۰/۲۷) انجام داد. او نتیجه گرفت مقادیر مختلف زبری نسبی و اشکال مختلف موج‌های بستر، حدوداً به‌صورت یکسان در کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه و طول پرش در مقایسه با پرش کلاسیک تأثیر دارد. کارولو و فرو (Carollo & Ferro, 2007) نشان دادند که زبری‌ها می‌توانند ضریب عدد فرود اولیه در رابطه ۱ را کاهش دهند و این ضریب به ارتفاع زبری‌ها (قطر متوسط زبری‌ها) وابسته است. آنها با انجام آزمایش‌هایی تأثیر زبری‌های طبیعی شن و قلوه

که در آن،

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$$
 عدد فرود اولیه مربوط به جریان فوق بحرانی، V_1 ، y_1 و y_2 = به ترتیب سرعت اولیه، عمق اولیه و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌باشند. از آنجایی که امروزه بهینه کردن سازه‌ها از نظر اقتصادی و پایداری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. محققان زیادی با استفاده از انواع زبری‌ها و بلوک‌ها و یا ایجاد شیب در حوضچه آرامش سعی در بهینه کردن حوضچه آرامش دارند. اولین تحقیقات در زمینه به‌کارگیری زبری‌های نواری توسط راجاراتنام (Rajaratnam, 1965) انجام شده که نشان داد عمق پایاب مورد نظر برای تشکیل پرش روی این نوع از بسترها کوچکتر از عمق مزدوج مشابه خود در بستر صاف می‌باشد. همچنین وی پارامتری به نام زبری نسبی ($K = \frac{K_e}{y_1}$) تعریف کرد که در آن K_e ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق اولیه جریان فوق بحرانی بر روی زبری‌هاست. پالگیرا & لوتی (Palgira & Lotti, 2008) با استفاده از دریچه کشویی در حوضچه‌ای به طول ۲ متر، عرض ۰/۴ متر و در شیب‌های معکوس ۱۰، ۱۵، ۵ و ۲۰ درصد پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار داد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه بین Fr_1 و نسبت اعماق مزدوج و شیب بستر (i) را به‌صورت رابطه‌های ۲ و ۳ ارائه نمود.

$$G = 3.32^{1.52i} Fr_1 \quad -0.25 < i < 0 \quad (2)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.5(-1 + \sqrt{1 + 8G^2}) \quad (3)$$

اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود ۱۰-۴ و ارتفاع نسبی موج t/y_1 (ارتفاع موج بستر و y_1 عمق اولیه پرش) برابر

سینوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت انجام دادند. نتایج بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش روی بستر زبر در مقایسه با پرش روی بستر صاف می‌باشد. نیسی و شفافی‌بجستان (Nici & Shafai-Bejestan, 2009) با انجام ۴۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴/۹ تا ۱۲/۴ روی حوضچه آرامش با زبری لوزی شکل مشاهده کردند که این زبری‌ها می‌تواند طول حوضچه آرامش را ۴۱ درصد و طول غلطاب را ۳۴ درصد کاهش دهد و به دلیل عدم استفاده از بلوک، مشکل کاویتاسیون ایجاد نمی‌گردد. نیسی و شفافی‌بجستان (Nici & Shafai-Bejestan, 2009) نشان دادند که زبری‌های لوزی شکل می‌توانند عمق متناوب پرش را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند این میزان کاهش برای اعداد فرود، مختلف است به طوری که حداقل ۱۸ درصد و حداکثر ۳۰ درصد و به طور متوسط ۲۴/۲ درصد کاهش در عمق متناوب پرش حاصل می‌شود و رابطه ۶ را طبق نتایج حاصل از آزمایشات خود با استفاده از رگرسیون برای این بسترها ارائه نمودند.

$$R^2 = \frac{y_2}{y_1} = 0.8676Fr_1 + 0.9717 \quad (6)$$

0.981

غزالی و همکاران (Ghazali et al., 2013) تأثیر بسترهای موج‌دار با مقطع مثلثی، بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی به عرض و ارتفاع ۰/۴ متر در بازه اعداد فرود ۶/۱ تا ۱۳/۱ را مورد بررسی قرار دادند. ارتفاع تمام زبری‌ها ۲/۵ سانتی‌متر ولی شیب وجه جانبی آن‌ها متفاوت بوده است. آن‌ها بیان نمودند که به طور متوسط میزان عمق ثانویه و طول پرش به ترتیب حدوداً برابر ۲۵ تا ۵۴/۷ درصد کاهش می‌یابد. راور و همکاران (Ravar et al., 2012) تعداد ۱۲۶ آزمایش در محدوده اعداد فرود

سنگ با پنج قطر متوسط در محدوده ۴/۶ تا ۳۲ میلی‌متر مطالعه کرده و رابطه ۴ را برای محاسبه عمق مزدوج ارائه دادند.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8(1 - \gamma)Fr_1^2}) \quad (4)$$

که در آن، مقدار ضریب γ را پس از انجام آزمایش‌ها به شرح رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$\gamma = \frac{2}{\pi} \arctg\left(0.8 \left(\frac{K_s}{y_1}\right)^{0.75}\right) \quad \text{و} \quad R^2 = 0.71 \quad (5)$$

که در آن، K_s = ارتفاع متوسط زبری‌ها؛ و y_1 = عمق قبل از پرش است.

ایزدجو و شفافی‌بجستان (Izadjoo & Shafai-Bejestan, 2007) دوزنقه‌ای نواری با ۳ طول موج (s)، ۱۲/۵، ۶/۸، ۳/۴ سانتی‌متر و دو عمق موج ۱/۳ و ۲/۶ سانتی‌متر در کانالی به عرض ۰/۵ متر و در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۲ انجام دادند آن‌ها نشان دادند که عمق مورد نیاز پایاب ۲۰٪ کمتر از بستر صاف است. عباسپور و حسین‌زاده (Abaspour & Hosseinzadeh, 2009) با انجام آزمایش‌هایی در محدوده اعداد فرود ۳/۸ تا ۸/۶ مشخصات پرش هیدرولیکی را در بستر موج‌دار سینوسی با دو طول موج ۴ و ۷ سانتی‌متر و چهار عمق موج ۱/۵ و ۲ و ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر در کانالی به عرض ۰/۲۵ متر بررسی کردند و نتایج نشان داد که عمق ثانویه ۲۰ درصد کمتر از بستر صاف است. السباییه و شبایک (Elsebaie & Shabayek, 2010) یک مطالعه آزمایشگاهی در محدوده اعداد فرود ۲ تا ۷/۵ روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های

(Parsamehr *et al.*, 2016) آزمایش‌هایی در محدوده اعداد فرود $3/4$ تا $12/4$ در 3 تراکم و 4 آرایش زیر غیر ممتد لوزی شکل انجام دادند و نتیجه گرفتند که در آرایش ترکیب زبری 3 تایی با تراکم $10/6$ درصد بیشترین مقدار کاهش عمق ثانویه برابر با $29/39$ درصد و میزان افزایش استهلاک انرژی نسبت به بستر صاف به‌طور متوسط $10/94$ درصد می‌باشد. از آنجا که تا کنون مطالعات متنوعی در زمینه به‌کارگیری زبری مصنوعی به شکل‌های مختلف انجام شده است، اما هنوز مطالعاتی در زمینه استفاده از زبری مصنوعی دوزنقه‌ای همراه با شیب معکوس به‌صورت همزمان انجام نشده است. هدف از این تحقیق بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در اثر استفاده همزمان از زبری مصنوعی با ارتفاع‌های مختلف و شیب‌های معکوس مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

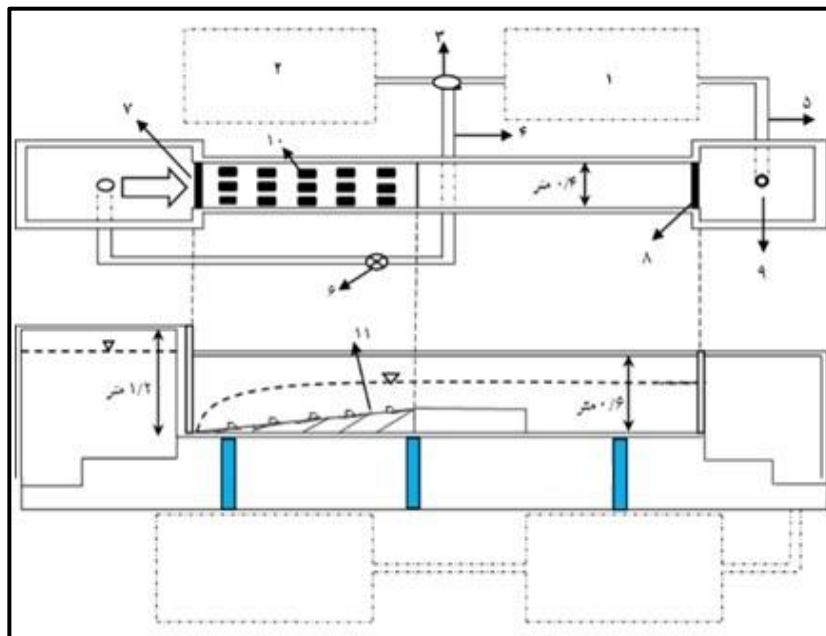
این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان در کانالی به طول 9 متر و عرض $0/4$ متر و ارتفاع $0/6$ متر با دیواره‌های شفاف از جنس پلکسی‌گلس صورت گرفت. به‌منظور افزایش عدد فرود قبل از دریچه اول مخزنی به ارتفاع $1/2$ متر ایجاد شده است. برای ایجاد پرش از دریچه کشویی که بلافاصله بعد از مخزن $1/2$ متری قرار دارد استفاده شد. همچنین برای تثبیت پرش از دریچه کشویی دیگری که در انتهای کانال قرار دارد استفاده شد (شکل ۱). با تغییر دبی پمپ و همچنین تغییر در بازشدگی دریچه اول عدد فرودهای مختلفی ایجاد شده است. در این تحقیق برای ایجاد شیب معکوس از قطعاتی با ارتفاع‌های مختلف متناسب با شیب مورد نظر در زیر صفحه زبری‌ها استفاده شد. شکل ۲ نحوه قرارگیری زبری‌ها در کف

$3/9$ تا $13/7$ برروی زبری‌های دوزنقه یکپارچه با ارتفاع‌های مختلف انجام دادند آن‌ها نشان دادند که حداکثر و میانگین کاهش عمق ثانویه به‌ترتیب 22 درصد و 13 درصد می‌باشد. نژدعلی و همکاران (Najandali *et al.*, 2011) در مطالعات آزمایشگاهی خودشان به بررسی تأثیر نوارهای زبری با مقطع مثلثی قائم‌الزاویه بر پرش هیدرولیکی پرداختند. اعداد فرود در بازه 4 تا $13/7$ متغیر بوده است. آن‌ها اعلام نمودند نسبت عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی برروی بستر زیر نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش عدد فرود اولیه شدت بیشتری می‌یابد. همچنین میزان کاهش طول پرش روی این نوع از زبری‌ها حدوداً برابر 32 درصد نسبت به پرش کلاسیک است. پارسامهر و همکاران (Parsamehr *et al.*, 2012) به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی روی زبری‌های نیم استوانه‌ای در کانالی به عرض $0/25$ سانتی‌متر در بازه تغییرات اعداد فرود $4/6$ تا $7/3$ با سه ارتفاع زبری به شعاع (f)، $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ سانتی‌متر و فاصله (s)، یک تا 4 برابر قطر نیم استوانه‌ها پرداختند. آنها اعلام داشتند حداکثر میزان کاهش عمق ثانویه روی این نوع بسترها حدود $33/5$ درصد می‌باشد.

پورعبدالله و همکاران (Pourabdollah *et al.*, 2014) در تحقیق خود نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف معکوس و افزایش زبری نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. این زبری‌ها در شرایط متفاوتی با اعداد فرود در محدوده بین $4/9$ تا $7/8$ مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌طور متوسط کاهش اعماق نسبی در این تحقیق $31/15$ درصد بود. همچنین به‌طور متوسط کاهش طول پرش $39/6$ درصد و طول غلتاب پرش $32/3$ درصد به‌دست آمد. پارسامهر و همکاران

آن‌ها از یکدیگر در حوضچه آرامش مشخص شده است. در این مطالعه ۱۳۵ آزمایش برای ۵ ارتفاع زبری و ۳ شیب معکوس متفاوت و اعداد فرود در محدوده ۱۰-۴ انجام شده است. همچنین یک حالت ترکیبی از زبری‌های مورد استفاده (۲، ۱، ۱/۵) نیز در نظر گرفته شد. دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق در جدول ۲ نشان داده شده است.

حوضچه آرامش را نشان می‌دهد. از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویتاسیون حائز اهمیت می‌باشد، بر اساس نظر اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) برای جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون، تاج زبری‌ها در حوضچه باید بالاتر از ورودی دریچه قرار نگیرد، که در این تحقیق این مورد رعایت شده است. در جدول ۱ ابعاد زبری‌ها و فاصله قرارگیری



شکل ۱- نمای کلی از کانال آزمایشگاهی

(۱) استخر ذخیره آب شماره ۱، (۲) استخر ذخیره آب شماره ۲، (۳) پمپ آب، (۴) لوله ورودی آب، (۵) لوله خروجی آب، (۶) دریچه سنج، (۷) دریچه کشویی ورودی، (۸) دریچه کشویی خروجی، (۹) صافی (آشغالگیر)، (۱۰) زبری و (۱۱) حوضچه آرامش همراه با شیب معکوس

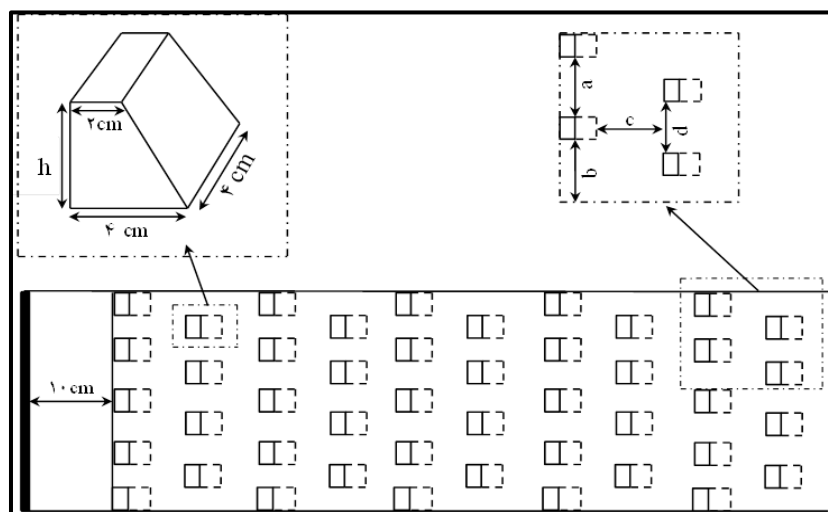
Figure 1- Overview of the laboratory channel

1) water tank 1, 2) water tank 2, 3) pump, 4) water inlet, 5) water outlet, 6) flow meter, 7) inlet slide gate, 8) outlet slide gate, 9) filter, 10) roughness, 11) relaxation basin with reverse slope

جدول ۱- ابعاد و فاصله قرارگیری زبری‌ها

Table 1- Dimensions and spacing of roughnesses

d (cm)	c (cm)	b (cm)	a (cm)	h (cm)	پارامتر Parameter
5	5	4.7	4.7	0.5, 1, 2	مقدار value



شکل ۲- اندازه و نحوه قرار گرفتن زبری در بستر

Figure 2- The size and shape of roughness in the bed

جدول ۲- نوع و تعداد متغیرهای مورد نظر برای انجام آزمایش‌های این پژوهش

Table 2- The type and number of variables required for this study

متغیر variable	جریان (LPS) flow	تعداد فرود Froude number	شیب معکوس Adverse slope (%)	زبری بستر (سانتی‌متر) Roughness bed (cm)	نما layout
مقدار value	30, 40, 50	4-10	0, -1.5, -3	0, 0.5, 1, 1.16, 2	زیگزاگ zigzag
تعداد number	3	3	3	5	-

$$\frac{D_2}{D_1} = f(Re = \frac{v_1 D_1}{\gamma}, Fr_1) = \frac{v_1}{\sqrt{g D_1}} \cdot \frac{t}{D_1} \cdot \theta \quad (8)$$

در این مطالعه با در نظر گرفتن $\gamma \cong 10^{-6} m^2/s$ ، عدد رینولدز در محدوده $2/6 \times 10^5$ تا $4/3 \times 10^5$ متغیر بوده که بیانگر آشفتگی بودن جریان می‌باشد بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرف نظر نمود (Madani, 2004) و معادله بالا به صورت رابطه ۹ خلاصه می‌شود.

$$\frac{D_2}{D_1} = f(Fr_1, \frac{t}{D_1}, \theta) \quad (9)$$

با در نظر گرفتن $\frac{D_2}{D_1}$ به عنوان متغیر وابسته و Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و θ به عنوان متغیرهای مستقل و با توجه

نتایج و بحث

نسبت اعماق مزدوج

در صورتی که D_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، v_1 سرعت اولیه پرش و D_2 عمق ثانویه پرش باشد، بنابراین D_2 تابعی از پارامترهای معرفی شده در رابطه ۷ می‌باشد.

$$D_2 = f(D_1, v_1, g, \mu, \rho, t, \theta) \quad (7)$$

که در آن،

g = شتاب ثقل؛ ρ = دانسیته (جرم مخصوص)، چگالی؛ μ = لزجت دینامیکی آب؛ t = ارتفاع زبری؛ و θ = شیب کف کانال نسبت به افق است. با توجه به تئوری باکینگهام نسبت اعماق مزدوج به صورت تابعی، به شکل رابطه ۸ است.

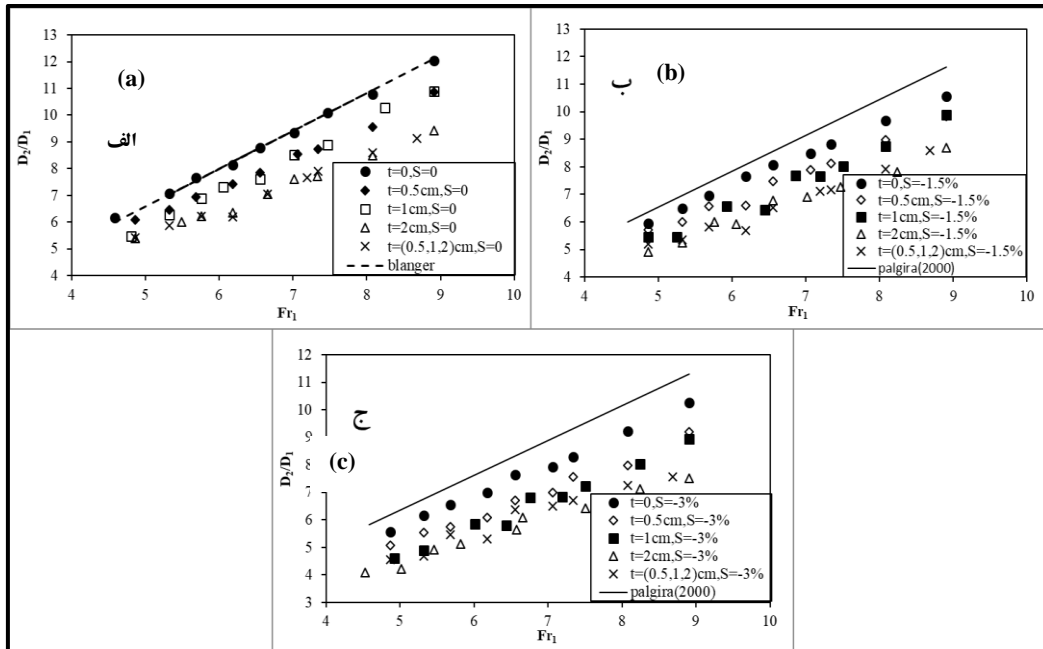
در این تحلیل ابتدا با ۸۰ درصد داده‌ها معادله استخراج شد و با ۲۰ درصد بقیه داده‌ها معادله کنترل شد.

به نتایج حاصل از آزمایشات روی زبری‌ها، تحلیل رگرسیون انجام شد. در رابطه $1.04 < Fr_1 < 10$ و $0 < \theta < -3\%$ و $0 < t < 2$ است.

$$\frac{D_2}{D_1} = 1.176203Fr_1 - 2.29055 \frac{t}{D_1} - 0.42696\theta + 0.771869 \quad R^2 = 0.93 \quad (10)$$

مزدوج شده است، به طوری که در هر شیب منفی، افزایش ارتفاع زبری باعث اضافه شدن نیرو و وزن (به دلیل شیب معکوس) و نیروی مقاوم در برابر جریان آب (به دلیل وجود زبری) در رابطه مومنتم نسبت به حالت کلاسیک شده و باعث کاهش نسبت $\frac{D_2}{D_1}$ شده است.

ضرایب رابطه ۱۰ نشان می‌دهند که، نسبت اعماق مزدوج بیشتر تحت تأثیر $\frac{t}{D_1}$ بوده و زبری نسبی بیشترین سهم را در کاهش نسبت $\frac{D_2}{D_1}$ داشته است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود قرار دادن زبری‌های مختلف روی شیب‌های یکسان باعث کاهش نسبت اعماق



شکل ۳ - نسبت $\frac{D_2}{D_1}$ در برابر Fr_1 برای زبری‌های مختلف در الف) شیب صفر، ب) شیب $-1/5$ درصد و ج) شیب -3 درصد

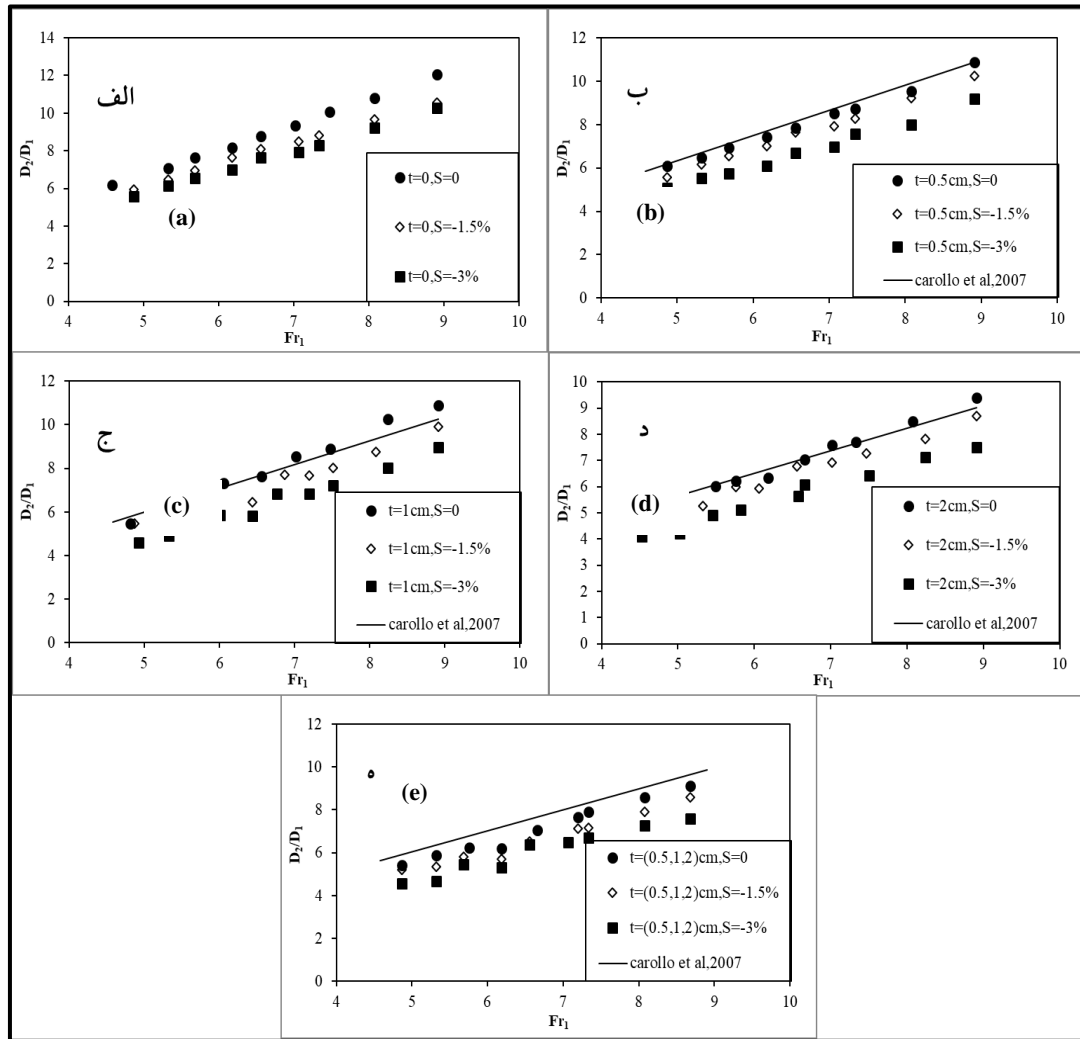
Figure 3- Ratio $\frac{D_2}{D_1}$ versus Fr_1 for different roughness in a) slope=0, b) slope= -1.5%, c) slope= -3%

این مطلب به‌طور مشابه در شکل ۴ با ثابت در نظر گرفتن زبری و تغییر شیب نشان داده شده است. با توجه به اثر شیب و زبری در کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از هر

نظر گرفتن زبری و تغییر شیب نشان داده شده است. با توجه به اثر شیب و زبری در کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از هر

می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود بیشترین کاهش نسبت اعماق مزدوج مربوط به زبری ۲ سانتی‌متر و شیب معکوس ۳- درصد بوده است. این مقدار به‌طور متوسط ۱۸/۸ درصد نسبت به حالت کلاسیک در محدوده اعداد فرود ۴ تا ۱۰ کاهش داشته است. این در حالی است که توکیای (Tokuyay, 2005) این مقدار را برای زبری‌های سینوسی ۲۰ درصد و راور و همکاران (Ravar *et al.*, 2012) با استفاده از زبری‌های ذوزنقه‌ای یکپارچه این مقدار را ۱۳ درصد محاسبه کرده‌اند.

دو باعث کاهش این نسبت می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج پالگیرا و لوتی (Palgira & Lotti, 2008) و کارولو و فرو (Carollo & Ferro, 2007) مقایسه شده است، با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ وجود زبری ذوزنقه‌ای و شیب معکوس تأثیر بیشتری در کاهش نسبت اعماق مزدوج نسبت به محققان فوق داشته است. با توجه به شکل‌ها افزایش ارتفاع زبری و شیب معکوس باعث کاهش نسبت $\frac{D_2}{D_1}$ بوده است، همچنین افزایش عدد فرود باعث تلاطم بیشتر آب شده و باعث افزایش نسبت اعماق مزدوج

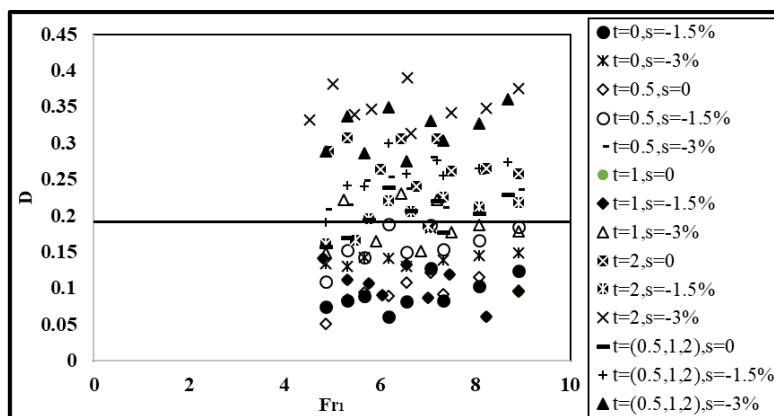


شکل ۴- نسبت $\frac{D_2}{D_1}$ در برابر Fr_1 برای شیب‌های مختلف و زبری (الف) صفر، (ب) ۰/۵، (ج) ۱، (د) ۲، (ه) ۵/۰، ۱، ۲) سانتی‌متر

Fig. 4- Ratio $\frac{D_2}{D_1}$ versus Fr_1 for different slopes in a) roughness=0, b) roughness=0.5, c) roughness=1, d) roughness=2 and e) roughness=(0.5, 1, 2) cm

ذوزنقه‌ای نواری با سه طول موج انجام دادند. آنها نشان دادند عمق مورد نیاز پایاب برای تشکیل پرش بر روی بسترهای زبر همانند مطالعات اید و راجارتنام (Tokyay, Ead & Rajaratnam, 2002) و توکیا (Tokyay, 2005) ۲۰ درصد کمتر از بستر صاف است. عباسپور و حسین‌زاده (Abaspour & Hosseinzadeh, 2009) با انجام آزمایش‌هایی روی بسترهای موج‌دار سینوسی نشان دادند که عمق ثانویه پرش روی بستر موج‌دار سینوسی ۲۰ درصد کمتر از بستر صاف می‌باشد.

همچنین در این تحقیق درصد کاهش عمق ثانویه پرش نسبت به حالت کلاسیک (D) به‌طور متوسط ۱۹/۲ درصد می‌باشد (شکل ۵)، راور و همکاران (Ravar *et al.*, 2012) با استفاده از زبری ذوزنقه‌ای نواری بر روی بستر بدون شیب پارامتر D را ۱۳ درصد محاسبه کردند. پارسامهر و همکاران (Parsamehr *et al.*, 2012) حداکثر مقدار D را برای زبری‌های نیم استوانه‌ای ۳۳/۵ درصد محاسبه کردند. ایزدجو و شفاعی بجستان (Izadjoo & Shafai-Bejestan, 2007) مطالعات خود را بر روی زبری‌های



شکل ۵- مقدار کاهش عمق ثانویه نسبت به حالت کلاسیک

Fig. 6- The amount of secondary depth reduction compared to the classic mode

ایجاد کاویتاسیون در حوضچه آرامش نشود، باعث کاهش بیشتر نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت کلاسیک می‌شود. از بین محققانی که به آنها اشاره شد، نتایج پورعبدالله و همکاران (Pourabdollah *et al.*, 2014) به‌دلیل استفاده از شیب معکوس و زبری طبیعی و ایجاد نیرو وزن در معادله مومنتم به نتایج حاصل از این تحقیق نزدیک‌تر بوده است.

یکی دیگر از پارامترهای پرش هیدرولیکی که زبری و شیب معکوس بر آن تأثیر می‌گذارد، طول پرش می‌باشد. با در نظر گرفتن متغیرهای موثر بر

در شکل ۶ مقایسه بین تحقیق حاضر و سایر مطالعات انجام شده روی پرش هیدرولیکی با به‌کارگیری انواع زبری‌ها انجام شده است. با توجه به شکل و نتایج به‌دست آمده، افزایش ارتفاع زبری در کسب نتیجه به محققانی نظیر، السبایه و شبایک (Elsebaie & Shabayek, 2010)، اید و راجارتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) و غزالی و همکاران (Ghazali *et al.*, 2013) کمک نموده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده وجود زبری‌های مصنوعی، نوک‌تیز بودن زبری‌ها و ارتفاع زیاد زبری‌ها به گونه‌ای که باعث

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در نظر گرفتن $\frac{L_j}{D_1}$ به‌عنوان متغیر وابسته و Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و θ به‌عنوان متغیرهای مستقل، رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ برآزش داده شده است.

طول پرش و با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی و بر اساس تئوری باکینگهام، رابطه ۱۱ را خواهیم داشت.

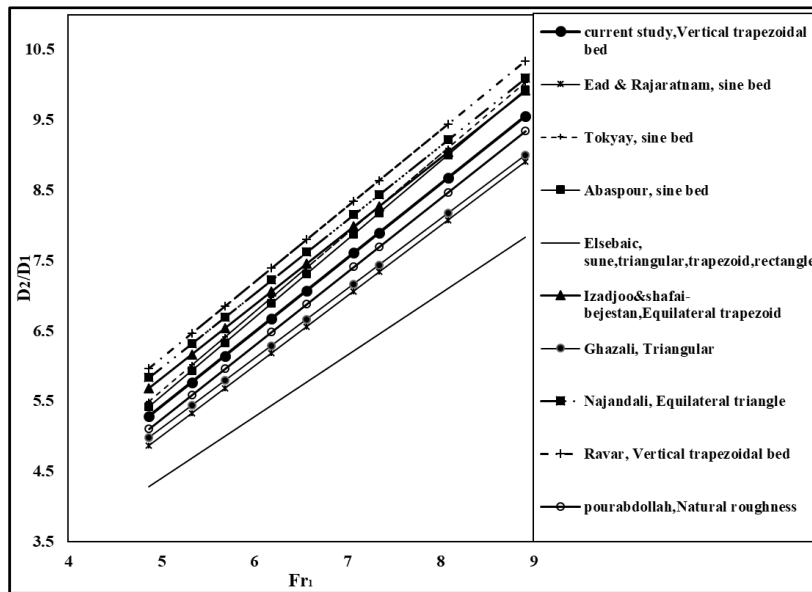
$$\frac{L_j}{D_1} = f(Re, Fr_1, \frac{t}{D_1}, \theta) \quad (11)$$

$$\frac{L_j}{D_1} = 6.598843Fr_1 - 19.8356\frac{t}{D_1} - 2.32919\theta - 4.06032 \quad R^2 = 0.86 \quad (12)$$

$$\frac{L_r}{D_1} = 4.916734Fr_1 - 14.8174\frac{t}{D_1} - 1.26092\theta - 6.87463 \quad R^2 = 0.81 \quad (13)$$

کاهش داشته است. بیشترین کاهش طول پرش مربوط به زبری ۲ سانتی‌متر و شیب ۳- درصد می‌باشد. طول غلطاب به‌طور متوسط ۳۴/۷ درصد کاهش داشته است. زبری و شیب معکوس بیشترین تأثیر را بر طول پرش داشته است.

که در آنها، $0 < Fr_1 < 10$ و $-3\% < \theta < 0$ و $0 < t < 2$ می‌باشد. معادله ۱۳ رابطه بین طول غلطاب را بر حسب Fr_1 ، θ و $\frac{t}{D_1}$ نشان می‌دهد. در این تحقیق طول پرش به‌طور متوسط ۳۴/۸ درصد نسبت به حالت کلاسیک



شکل ۶- مقایسه تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه ناشی از به کارگیری زبری‌های مختلف در بستر حوضچه آرامش

Fig. 6- Comparison of changes in the ratio of the depth of the secondary to the first due to the application of different roughnesses in the relaxation basin

انرژی آب مستهلک شود که این انرژی به‌صورت آشفتگی در آب ظاهر می‌شود. در صورتی‌که انرژی در عمق اولیه E_1 و در عمق ثانویه E_2 باشد،

نرخ استهلاک انرژی برای تبدیل جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی لازم است مقداری از

با در نظر گرفتن $\frac{\Delta E}{E_1}$ به‌عنوان متغیر وابسته و Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و θ به‌عنوان متغیرهای مستقل و با توجه به نتایج حاصل از آزمایشات بر زبری‌های دوزنقه‌ای تحلیل رگرسیون انجام شد. در این تحلیل با در نظر گرفتن اعداد فرود در محدوده ۱۰-۴ و شیب صفر تا ۳- درصد، رابطه ۱۶ برازش داده شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 0.04683Fr_1 + 0.092919\frac{t}{D_1} + 0.004142\theta + 0.29183 \quad R^2 = 0.89 \quad (16)$$

نتایج حاصل از آزمایش‌ها روی زبری‌ها تحلیل رگرسیون انجام و رابطه ۱۷ برازش داده شده است.

$$\frac{E_2}{E_1} = -0.04683Fr_1 - 0.09292\frac{t}{D_1} - 0.00414\theta + 0.70817 \quad R^2 = 0.89 \quad (17)$$

باعث کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌شود به‌همین دلیل برای تبدیل جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی، بایستی پرش هیدرولیکی انرژی خود را در فاصله کوتاه‌تر و به‌مقدار بیشتری از دست دهد، به‌همین دلیل وجود زبری و شیب باعث افزایش افت انرژی نسبت به حالت کلاسیک می‌شود. در این تحقیق بیشترین افت انرژی مربوط به زبری ترکیبی همراه با شیب ۳- درصد است که مقدار آن برابر است با ۱۵/۲ درصد، همچنین افت انرژی به‌طور متوسط در تمام آزمایشات ۹/۶ درصد بیشتر از حالت کلاسیک بود.

میزان افت انرژی به‌صورت رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

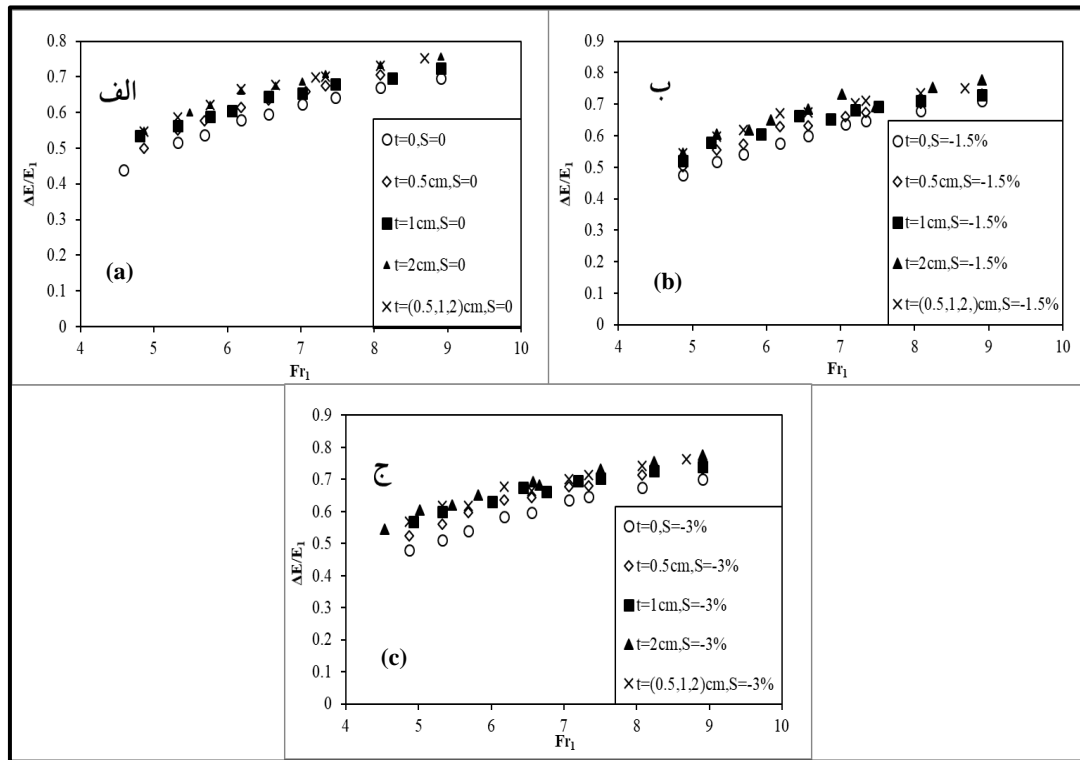
$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \quad (14)$$

با توجه به تئوری باکینگهام افت انرژی تابعی از موارد معرفی شده در رابطه ۱۵ است.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f(Fr_1, \frac{t}{D_1}, \theta) \quad (15)$$

با در نظر گرفتن $\frac{E_2}{E_1}$ به‌عنوان متغیر وابسته و Fr_1 ، $\frac{t}{D_1}$ و θ به‌عنوان متغیرهای مستقل و با توجه به

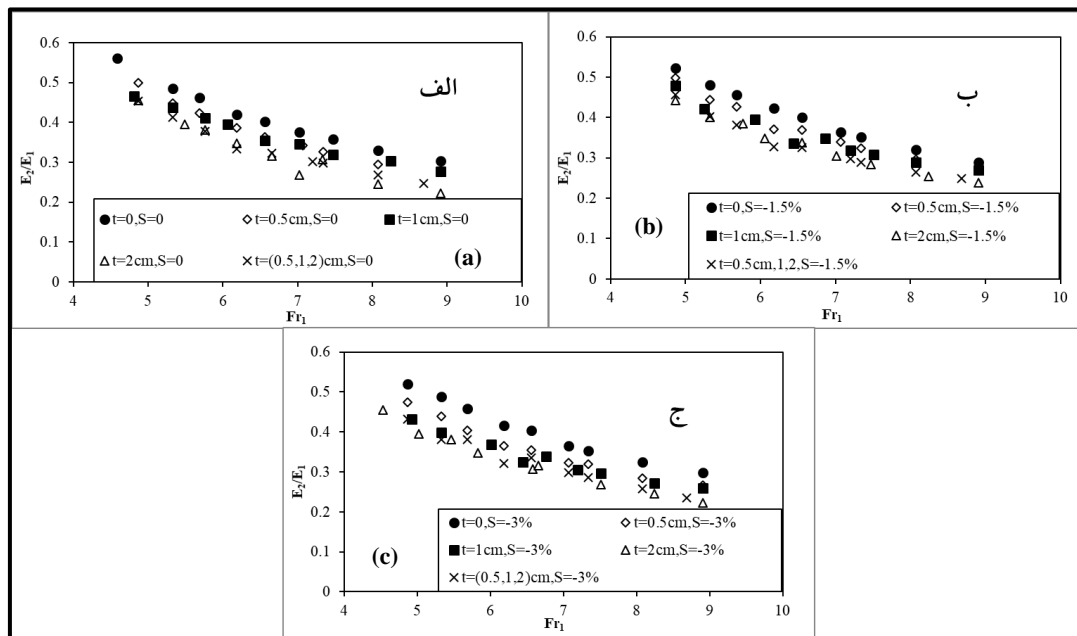
با توجه به این‌که متغیرهای وابسته و مستقل هر دو به دبی و سرعت جریان وابسته می‌باشند بنابراین معادله حاصل از ضریب تعیین بالایی برخوردار خواهد بود. همچنین روابط و ضرایب پارامترهای فوق مشخص می‌کند که تأثیر زبری برای افزایش افت انرژی بیشتر از شیب معکوس بوده است. شکل ۷ تغییرات افت انرژی در مقابل عدد فرود را برای زبری‌های دوزنقه‌ای همراه با شیب معکوس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش عدد فرود باعث افزایش افت انرژی شده است. همان‌گونه که بیان شد وجود زبری و شیب معکوس



شکل ۷- نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ در برابر Fr_1 برای زبری‌های مختلف در الف) شیب صفر، ب) شیب ۱/۵٪-، ج) شیب ۳٪-
 Fig. 7- ratio $\frac{\Delta E}{E_1}$ versus Fr_1 for different roughness in a) slope=0, b) slope= -1.5%, c) slope= -3%

یافته و نسبت $\frac{E_2}{E_1}$ کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش انرژی ثانویه مربوط به زبری ۲ سانتی‌متر و شیب ۳- درصد بوده که مقدار آن با ۲۱ درصد است. نتایج حاصل از تحقیق سایر محققین نشان می‌دهد، وجود زبری سینوسی باعث افزایش حدود ۵ درصد اتلاف انرژی نسبت به حالت کلاسیک می‌باشد و سایر زبری‌ها نیز به همین اندازه افت انرژی را افزایش می‌دهند.

شکل ۸ نسبت انرژی مخصوص در عمق ثانویه به انرژی مخصوص در عمق اولیه را در برابر عدد فرود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه افزایش ارتفاع زبری باعث افزایش تنش برشی و مقاومت در برابر جریان آب و در نتیجه باعث کاهش سرعت آن می‌شود، افزایش ارتفاع زبری باعث کاهش انرژی در طول پرش می‌گردد. با افزایش Fr_1 ، انرژی در ابتدای پرش افزایش



شکل ۸- نسبت $\frac{E_2}{E_1}$ در برابر Fr_1 برای زبری‌های مختلف در الف) شیب صفر، ب) شیب -1.5% ، ج) شیب -3%
 Fig. 8- ratio $\frac{E_2}{E_1}$ versus Fr_1 for different roughness in a) slope=0, b) slope= -1.5%, c) slope= -3%

۱۵/۲ درصد. با توجه به نمودارهای ارائه شده وجود زبری و شیب معکوس باعث کاهش انرژی در طول پرش می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع زبری و شیب معکوس باعث کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و افزایش افت انرژی می‌شود. در تحقیق حاضر وجود زبری ترکیبی با آرایش ردیفی به ارتفاع‌های (۰/۵، ۱ و ۲) سانتی‌متر باعث تثبیت بهتر پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش می‌شود. وجود زبری و شیب معکوس باعث کاهش طول غلطاب و طول پرش در حوضچه آرامش می‌شود، به طوری که افزایش ارتفاع زبری و نوک‌تیز بودن آن باعث کاهش بیشتر طول نسبت به حالت کلاسیک می‌شود. بنابراین جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها برای ساخت حوضچه آرامش می‌توان از زبری و شیب معکوس در بستر استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

وجود زبری و شیب معکوس به دلیل ایجاد نیرویی در خلاف جهت آب در معادله مومنتم باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج و پارامتر D نسبت به حالت کلاسیک می‌شود. در تحقیق حاضر اعماق مزدوج به طور متوسط ۱۸/۸ درصد کاهش یافته است. همچنین پارامتر D به طور متوسط ۱۹/۲ درصد کاهش داشته است. بیشترین مقدار کاهش نسبت اعماق مزدوج و عمق ثانویه مربوط به زبری ۲ سانتی‌متر و شیب معکوس ۳- درصد می‌باشد که به ترتیب برابر با ۳۶ درصد و ۳۵/۲ درصد است. وجود زبری و شیب معکوس باعث افزایش افت انرژی شده است به طوری که این افزایش افت به طور متوسط برابر است با ۹/۶ درصد بیشترین مقدار افزایش افت انرژی برای زبری ترکیبی و شیب ۳- درصد برابر است با

مراجع

- Abaspour, A. and Hosseinzadeh, D. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *J. Appl. Sci.* 9(11): 2045-2055.
- Abrishami, J. and Hosseini, M. 2013. *Hydraulic Open Channels*. Thirty-First Print. Imam Reza University Press. Iran. (in Persian)
- Carollo, F. G. and Ferro, V. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *J. Hydraul. Eng.* 133, 989-999.
- Ead, S. A. 2007. Effect of bed corrugated on the characteristics of a hydraulic jump. King Soud University. Final Research Report. No. 14/1427H.
- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic Jump on corrugated bed. *J. Hydraul. Eng.* 10(1): 40-50.
- Elsebaie, I. H. and Shabayek, Sh. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *Civil Environ. Eng.* 10, 40-50.
- Ghazali, M., Samadi-Boroujeni, H., Ghorbani, B. and Fatahi, R. 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Can. J. Civ. Eng.* 40, 841-847.
- Izadjoo, F. and Shafai-Bejestan, M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *J. Appl. Sci.* 7(8): 1164-1169.
- Madani, H. 2004. *Hydraulic and Fluid Mechanic*. Jahad Publishing University Allameh Tabataba'i. (in Persian)
- Najandali, A., Esmaili, K., Farhoodi, J. and Ravar, Z. 2011. The effect of rhombic roughness on hydraulic jump. *J. Iranian Irrig. Drain.* (in Persian)
- Nici, K. and Shafai-Bejestan, M. 2009. Investigation of the effect of rhombic roughness on hydraulic jump alternate depth. 8th International Civil Engineering. Dec. 15. Shiraz University. (in Persian)
- Palgira, S. and Lotti, I. 2008 Hydraulic Jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *J. Hydro-Environ. Res.* 2, 29-38.
- Parsamehr, P., Hosseinzadeh, A., Farsadizadeh, D. and Abaspour, A. 2012. Hydraulic jump on the bed with semi-cylindrical roughness. *J. Soil Water.* 26(3): 775-785. (in Persian)
- Parsamehr, P., Hosseinzadeh, A., Farsadizadeh, D., Abaspour, A. and Nasresfahani, M. 2016. Investigation of hydraulic jump characteristics on rough bed with different density and roughness arrangements. *J. Water Soil Sci.* 26(4): 13-24. (in Persian)
- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fattahi, R. A. 2014. Effect of roughness on adverse slopes on secondary depth and hydraulic jump energy depletion rate. *J. Water Soil Sci.* 18(67): 165-174. (in Persian)
- Rajaratnam, N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 91, 107-132.
- Ravar, Z., Farhoodi, J. and Najandali, A. 2012. The effect of vertical trapezium roughness on hydraulic jumping specifications and energy depletion. *J. Water Soil.* 26(1): 85-94. (in Persian)

Tokyay, N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Impacts of Global Climate Change Conference. EWRI. May 15-19. Anchorage, Alaska, USA.

Investigation of the Effect of Vertical Trapezium Roughness and Adverse Slope in Relaxation Basin on Hydraulic Jump Characteristics

S. Sh. Banitaba*, M. Heidarpour and N. Pourabdollah

*Corresponding author: M. Sc. Student, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: banitaba73@gmail.com

Received: 26 July 2018, Accepted: 14 October 2018

Abstract

Water after passing over weirs or through gates often has a lot of energy. If the water enters to the river with the same energy, it will damage downstream structures. Creation hydraulic jump is one of the approaches to reduce this energy. Therefore, it is important to study hydraulic jump. In this study, the characteristics of hydraulic jump on bed with vertical trapezoidal roughness with heights of 0.5, 1 and 2 cm and bed slope of 0, -1.5 and -3% were investigated. Based on the results, sequent depth ratio, in Froude number range of 4-9, was decreased by 18.8% more than the classic jump. The energy loss was increased by 9.6% compared to the classic jump. The maximum decrease in sequence depth was related to roughness with 2 cm height and bed slope of -3%. Moreover, the rough bed with adverse slope affected the jump length and caused to decrease it compared to the classic jump.

Keywords: Energy Loss, Jump Length, Sequence Depth Ratio