

## بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با تراکم و آرایش‌های مختلف زبری

پرستو پارسامهر<sup>۱\*</sup>، داود فرسادی زاده<sup>۲</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۲</sup>، اکرم عباسپور<sup>۳</sup>، محمدجواد نصر اصفهانی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۲۰

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴- کارشناس سازمان آب و برق خوزستان

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [parastoo.parsamehr@gmail.com](mailto:parastoo.parsamehr@gmail.com)

### چکیده

پرش هیدرولیکی یک جریان متغیر سریع در مجاری روباز است که نقش مؤثری در استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین‌دست سازه‌های آبی ایفا می‌کند. در تحقیق حاضر خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل عمق ثانویه پرش، اتلاف انرژی، ضریب تنش برشی بستر و پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش بر روی بستر زبر با اجزای زبر غیرممتد لوزی شکل مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود  $4/3$  تا  $12/4$  در سه تراکم و چهار آرایش زبری ترکیبی انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد پروفیل‌های سرعت بر روی بسترهای زبر مشابه و با پروفیل سرعت جت آب بر روی بستر صاف متفاوت می‌باشند. مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در بستر زبر برابر  $0/53$  محاسبه شد که از مقدار ضخامت لایه مرزی در بستر صاف،  $0/16$ ، بیشتر است. با افزایش تراکم زبری تنش برشی بستر ناشی از تأثیر متقابل جریان فوق بحرانی بالادست با بستر زبر افزایش یافته در نتیجه باعث افزایش استهلاک انرژی و در نتیجه کاهش عمق ثانویه می‌شود. در آرایش ترکیب زبری سه‌تایی با تراکم  $10/67$  درصد، بیشترین مقدار کاهش عمق ثانویه برابر با  $29/39$  درصد می‌باشد که میزان افزایش استهلاک انرژی نسبت به پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف به‌طور متوسط  $10/94$  درصد و ضریب تنش برشی در بستر زبر به‌طور متوسط  $13/45$  برابر بستر صاف به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، بستر زبر، پرش هیدرولیکی، پروفیل‌های سرعت، تنش برشی بستر

## Investigation of Hydraulic Jump Characteristics on Rough Bed with Different Density and Arrangements of Roughness Elements

P Parsamehr<sup>1\*</sup>, D Farsadizadeh<sup>2</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>2</sup>, A Abbaspour<sup>3</sup>, MJ Nasr Esfahani<sup>4</sup>

Received: 24 January 2016 Accepted: 14 March 2015

1 – Ph.D. Student of Water Structures Eng., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

2 - Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

3 - Assist. Prof., Dept. of Water Eng. Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

4 – Employee of Khuzestan Water and Power Authority, Ahvaz, Iran

\*Corresponding Author, Email: parastoo.parsamehr@gmail.com

### Abstract

Hydraulic jump is a rapidly varied flow in open channels which performs an effective role in dissipation of the kinetic energy of flow at downstream of water structures. In the present study the characteristics of hydraulic jump, including sequent depth, energy dissipation, bed shear stress and velocity profiles at different sections, on rough bed with discontinuous roughness elements of lozenge shape have been investigated. The experiments were carried out for a range of Froude number values from 4.3 to 12.4 in three roughness densities and four combined arrangements of roughness elements. The results of this study showed that the velocity profiles on rough beds were similar but somehow different from those of wall jet on smooth bed. The dimensionless boundary layer thickness was 0.53 on rough bed that was more than corresponding value on smooth bed with the amount of 0.16. As the roughness density increased the bed shear stress produced by the interaction of upstream supercritical flow with the roughness elements enhanced so the energy loss increased and as a result the sequent depth decreased. In the arrangement of ternary combination of roughness elements with density of 10.67 % the maximum reduction value of the sequent depth was about 29.39%, the increase of the energy dissipation relative to hydraulic jump on smooth bed was 10.94% and the bed shear stress coefficient on rough bed was about 13.54 times as much as its corresponding value on smooth bed.

**Keywords:** Bed shear stress, Energy dissipation, Hydraulic jump, Rough bed, Velocity profiles

### مقدمه

می‌باشد. آشفتگی و تلاطم در پرش هیدرولیکی موجب تبدیل انرژی سینماتیک مازاد به انرژی گرمایی شده و لذا از این پدیده به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها و غیره استفاده می‌شود (ونگ و همکاران ۲۰۱۴). وجود امواج در سطح آب به دلیل انرژی جنبشی آب می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را به تأسیسات آبی وارد کند، بنابراین کنترل انرژی جنبشی آب اهمیت زیادی دارد. از جمله سازه‌های کنترل پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش است. تلاش محققان همواره

پرش هیدرولیکی یک جریان متغیر سریع در مجاری روباز است که به‌صورت انتقال ناگهانی جریان از حالت فوق بحرانی به جریان زیربحرانی توصیف می‌شود. ناحیه غلطابی پرش بلافاصله پایین‌دست پنجه پرش با وجود گرداب‌های در مقیاس بزرگ و جریان‌های چرخشی تشکیل می‌شود. طبیعت نوسانی جریان به‌صورت نوسان طولی موقعیت پنجه پرش و ایجاد گرداب‌های بزرگ به‌صورت شبه تناوبی قابل‌مشاهده

$D$  تقریباً برابر  $0/25$  است. نیسی و شفافی بجزستان (۱۳۸۸) اثر اجزای زبر غیر ممتد با شکل‌های مختلف بر تنش برشی بستر و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی را در محدوده اعداد فرود  $4/5$  تا  $12$  بررسی کردند. نتایج نشان داد که عمق مزدوج به دلیل وجود اجزای زبر کاهش می‌یابد. میزان این کاهش بستگی به عدد فرود و شکل اجزای زبر دارد. کمترین و بیشترین میزان کاهش عمق مزدوج ( $D$ ) به ترتیب مربوط به اجزای زبر مستطیلی ( $D=0/21$ ) و مثلثی شکل ( $D=0/27$ ) بود. نصر اصفهانی و شفافی بجزستان (۲۰۱۲) تأثیر پارامترهای زبری مصنوعی با تراکم  $11/6$  درصد در محدوده اعداد فرود  $3/03$  تا  $11/68$  را بر پرش هیدرولیکی روی پله معکوس مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده افزایش طول زبری تأثیر زیادی در کاهش افت انرژی نداشتند اما ارتفاع زبری در خصوصیات پرش هیدرولیکی تأثیر به‌سزایی دارد. عمق مزدوج نسبی بستر زبر در مقایسه با بستر صاف در حدود  $5/3$  تا  $12/76$  درصد کاهش می‌یابد.

تحقیقات زیادی در مورد اثر تراکم و آرایش زبری بر روی پرش هیدرولیکی توسط محققان انجام نشده است. در تحقیق حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل عمق ثانویه، اتلاف انرژی، تنش برشی و پروفیل‌های سرعت بر روی بستر زبر با زبری لوزی شکل در سه تراکم زبری و آرایش ترکیبی زبری مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

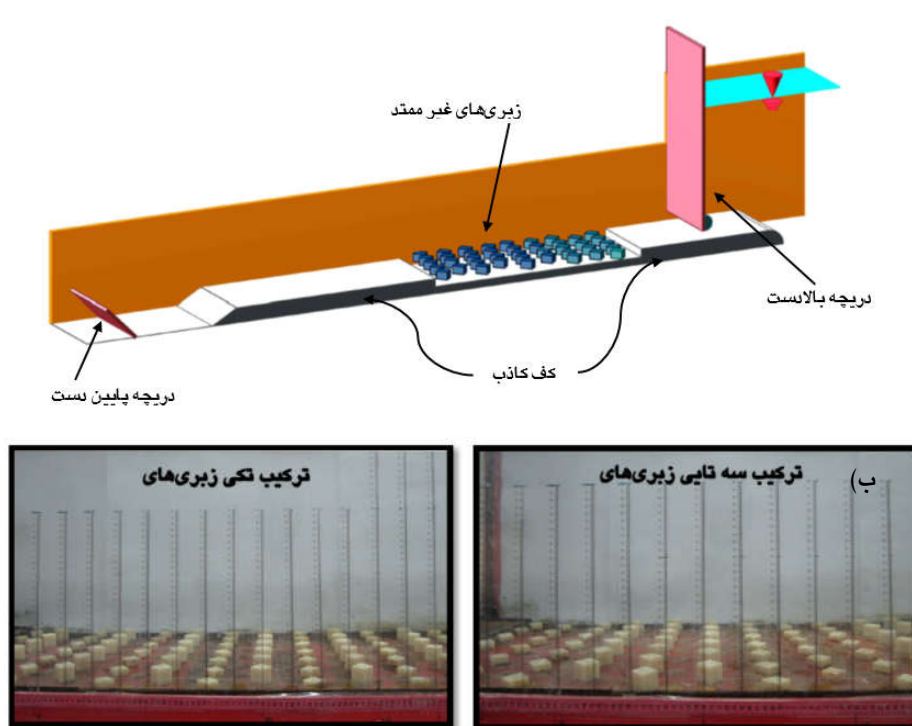
آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول  $10$  متر، عرض  $0/5$  متر و ارتفاع  $0/6$  متر با شیب کف افقی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد. به منظور تأمین بار آبی جهت تشکیل پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف، مخزنی به ارتفاع  $2$  متر در بالادست دریچه کشویی بالادست احداث گردید. به منظور جلوگیری از انقباض خطوط جریان خروجی از دریچه و همچنین برای اینکه عمق اولیه پرش با بازشدگی دریچه برابر باشد، لبه بالادست

بر ایجاد تمهیداتی بوده است که ساخت حوضچه آرامش علاوه بر مقاومت در برابر جریان صرفه‌جویی اقتصادی به همراه داشته باشد، که می‌توان به اقداماتی چون ساخت بلوک‌های پای شوت و یا بلوک‌های میانی اشاره کرد. ممکن است در مواقعی این بلوک‌ها در معرض خلأزایی قرار بگیرند لذا به‌کارگیری روش‌های مقاوم‌سازی حوضچه نسبت به کاویتاسیون و فرسایش، با استفاده از اجزای زبری به‌صورتی که تاج زبری‌ها هم‌تراز با کف بستر بالادست باشد، پیشنهاد شده است.

هاگز و فلک (۱۹۸۴) مطالعه تجربی در رابطه با بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در محدوده عدد فرود  $3$  تا  $10$  و زبری نسبی  $0$  تا  $0/9$  در فلوم مستطیلی با شیب کف افقی بر روی بستر صاف و پنج بستر زبر انجام دادند. نتایج نشان داد که اجزاء زبری می‌توانند عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند و میزان کاهش به عدد فرود اولیه و زبری نسبی بستگی دارد. کاهش طول پرش در تمام اعداد فرود مشاهده شد اما کاهش عمق ثانویه در اعداد فرود بزرگتر از  $3/5$  قابل توجه بود. محمدعلی (۱۹۹۱) طول پرش هیدرولیکی را بر روی بستر زبر با زبری غیرممتد مکعبی شکل به ابعاد  $1/6$  سانتی‌متر با تراکم ثابت  $10\%$  در شش طول تحت پوشش زبری در محدوده  $200/66 - 28/50$  سانتی‌متر و در نظر گرفتن شش نسبت برای  $L_R/h_b$  در محدوده  $17/81$  تا  $125/41$  (که  $L_R$  طول تحت پوشش زبری و  $h_b$  ارتفاع معادل زبری می‌باشد) مطالعه نمود. نتایج نشان داد میزان کاهش طول پرش نسبت به پرش کلاسیک در  $10 < Fr_1 < 4$ ، بین  $27/4$  تا  $67/4$  درصد و به‌طور متوسط  $47/4$  درصد می‌باشد. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) به دلیل ایجاد خلأزایی در بلوک‌های کف، بسترهای موج‌دار را پیشنهاد کردند. آن‌ها پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود  $4$  تا  $10$  بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف می‌باشد. هم‌چنین عمق بدون بعد  $D$  که به‌صورت نسبت  $y_2^*/(y_2^* - y_2)$  مطرح شد، و  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف می‌باشد، در بستر موج‌دار پارامتر

بهترین تراکم زبری تعیین گردید. در حالت بهترین تراکم زبری، اجزای زبر با دو ارتفاع مختلف به صورت آرایش ترکیبی تکی، سه، پنج و هفت تایی در بستر زبر جای-گذاری شده و مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. منظور از آرایش ترکیبی تکی چیدمان زبری با ارتفاع ۱/۴ سانتی متری به صورت یک ردیف عرضی و زبری با ارتفاع ۲/۸ سانتی متری در ردیف بعدی می باشد. در شکل ۱ شمای کلی بستر زبر در کانال آزمایشگاهی و آرایش ترکیبی تکی و سه تایی زبری مشاهده می شود.

دریچه به شکل نیم دایره ساخته شد. در پایین دست فلوم نیز برای تثبیت موقعیت پرش از دریچه کشویی دیگری استفاده شد. در تمامی آزمایش ها بازشدگی دریچه ثابت و برابر ۲/۲ سانتی متر بود. با تغییر دبی، پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف ایجاد گردید. برای ایجاد بستر زبر در تحقیق حاضر، اجزای زبر با مقطع عمود بر جریان به شکل لوزی با دو ارتفاع ۱/۴ و ۲/۸ سانتی متری، از جنس پلی اتیلن ساخته شدند. ابتدا بستر زبر با زبری به ارتفاع ۱/۴ سانتی متری در سه تراکم ۸/۷۳، ۹/۷ و ۱۰/۶۷ درصد مورد آزمایش قرار گرفته و



شکل ۱- الف- شمای کلی بستر زبر در کانال آزمایشگاهی ب- آرایش ترکیبی زبری.

منظور از کف کاذب در بالادست و پایین دست حوضچه آرامش استفاده شد. به دلیل نوسانات سطح آب در پرش هیدرولیکی عمق اولیه و ثانویه پرش با استفاده از حسگر اولتراسونیک دیتالاجیک US30 با دقت  $\pm 1$  میلی متر به مدت ۶۰ ثانیه اندازه گیری و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان عمق اولیه و ثانویه در نظر گرفته شد. دبی جریان با استفاده از دبی سنج اولتراسونیک، پروفیل سرعت با استفاده از سرعت سنج پره ای میکرو با دقت

همچنین منظور از میزان تراکم نسبت مساحت اجزای زبر به مساحت کل بستر زبر می باشد و با استفاده از رابطه  $I = \frac{a \cdot N}{A} \times 100$  محاسبه می شود که  $a$  مساحت هر جزء زبری،  $N$  تعداد کل زبری ها و  $A$  مساحت حوضچه آرامش است. اجزای زبر به گونه ای در کف فلوم قرار داده شدند که تاج آن ها با سطح بستر در بالادست و پایین دست بستر زبر هم تراز باشند به طوری که لبه پایین جت ورودی هم تراز سطح بالای اجزای زبر بود. برای این

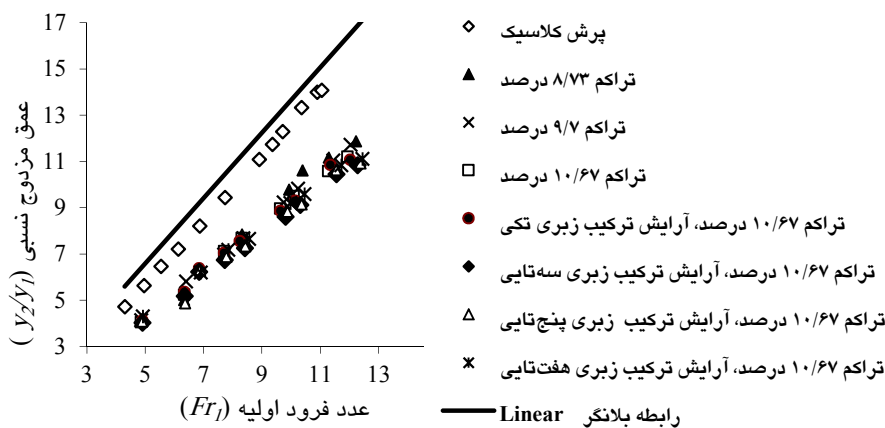
در تحقیق حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل عمق ثانویه پرش، افت انرژی، تنش برشی بستر و پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش بر روی بستر زبر با زبری غیرممتد لوزی شکل در محدوده اعداد فرود  $4/3 - 12/4$  مورد ارزیابی قرار گرفت.

عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی

نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی به‌ازای اعداد فرود مختلف برای تراکم و آرایش‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.

$0/1 \pm$  سانتی‌متر بر ثانیه و همچنین طول پرش هیدرولیکی، معادل فاصله از ابتدای پرش تا مکانی که غلظت حباب‌های هوا کم و سطح آب تقریباً افقی بوده در نظر گرفته شد، از طریق اشل نواری نصب شده بر روی بدنه فلوم با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. در تمام آزمایش‌ها پروفیل سطح آب با عکس‌برداری دیجیتال از پرش هیدرولیکی و رقومی کردن آن توسط نرم‌افزار گرافر ۱۱ به‌دست آمد.

### نتایج و بحث



شکل ۲- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه.

و  $b$  و همچنین میزان ضریب تعیین  $R^2$  در جدول ۱ مشخص شده است.

$$\frac{y_2}{y_1} = aFr_1 - b \quad [1]$$

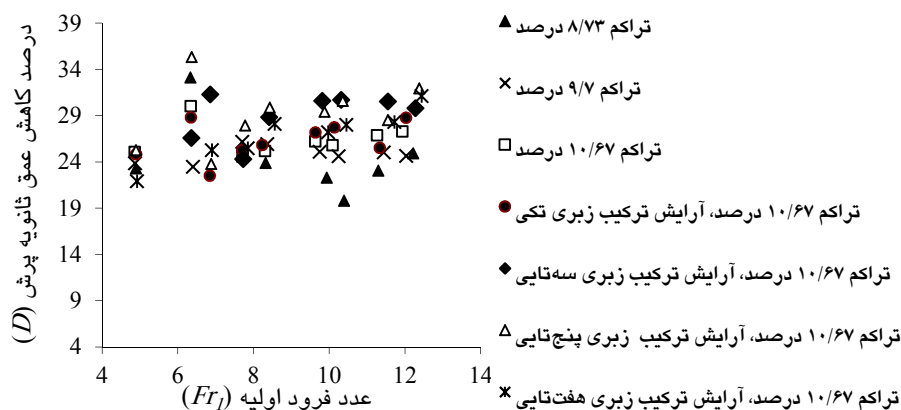
رابطه بین عمق مزدوج نسبی و عدد فرود به صورت کلی به شکل رابطه زیر برای هر تراکم و آرایش زبری بستر برآزش داده شده است که مقادیر ضرایب  $a$

جدول ۱- مقادیر ضرایب و میزان همبستگی رابطه عمق مزدوج نسبی در بسترهای زبر.

	$a$	$b$	$R^2$
تراکم ۸/۷۳ درصد	۱/۱۳۲	۱/۶۰۶	۰/۹۸۷
تراکم ۹/۷ درصد	۱/۰۵۷	۱/۰۳۸	۰/۹۹۹
تراکم ۱۰/۶۷ درصد	۱/۰۳۱	۰/۹۸	۰/۹۹۶
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری تکی	۰/۹۹۸	۰/۷۱	۰/۹۹۴
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری سه‌تایی	۰/۹۳۵	۰/۵۱۲	۰/۹۹۴
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری پنج‌تایی	۰/۹۵۴	۰/۶۴۴	۰/۹۸۷
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری هفت‌تایی	۰/۹۳	۰/۱۹۱	۰/۹۹۷

می‌باشد (اید و راجاراتنام ۲۰۰۲)، محاسبه گردید و در شکل ۳ تغییرات مقادیر  $D$  به ازای عدد فرود اولیه نشان داده شده است.

پارامتر میزان درصد کاهش عمق ثانویه ( $D$ )، برابر با  $(y_2^* - y_2)/y_2^*$  که در آن  $y_2$  عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر و  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف



شکل ۳- تغییرات مقدار کاهش عمق ثانویه در بسترهای زبر بر حسب عدد فرود اولیه.

نسبی عمق ثانویه در تراکم ۱۰/۶۷٪ برابر با ۲۶/۳۹ درصد و بیشتر از دو تراکم دیگر به دست آمد.

مقدار متوسط کاهش عمق ثانویه برای هر تراکم و آرایش زبری بستر بر حسب درصد در جدول ۲ به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار متوسط کاهش

جدول ۲- مقادیر متوسط کاهش عمق ثانویه در بسترهای زبر.

	$D$ %
تراکم ۸/۷۳ درصد	۲۴/۴۳
تراکم ۹/۷ درصد	۲۴/۸۵
تراکم ۱۰/۶۷ درصد	۲۶/۳۹
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری تکی	۲۶/۲۷
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری سه‌تایی	۲۹/۳۹
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری پنج‌تایی	۲۹/۱۹
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری هفت‌تایی	۲۶/۹۲

در حوضچه‌های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است، در آرایش سه‌تایی و پنج‌تایی زبری ترکیب زبری با ارتفاع بیشتر باعث افزایش تلاطم گردابی در پرش شده اما در ترکیب هفت تایی زبری بیش از یک‌سوم طول پرش بر روی زبری با ارتفاع ۱/۴ سانتی‌متر قرار می‌گیرد، لذا تأثیر زبری با ارتفاع بیشتر محسوس نمی‌باشد.

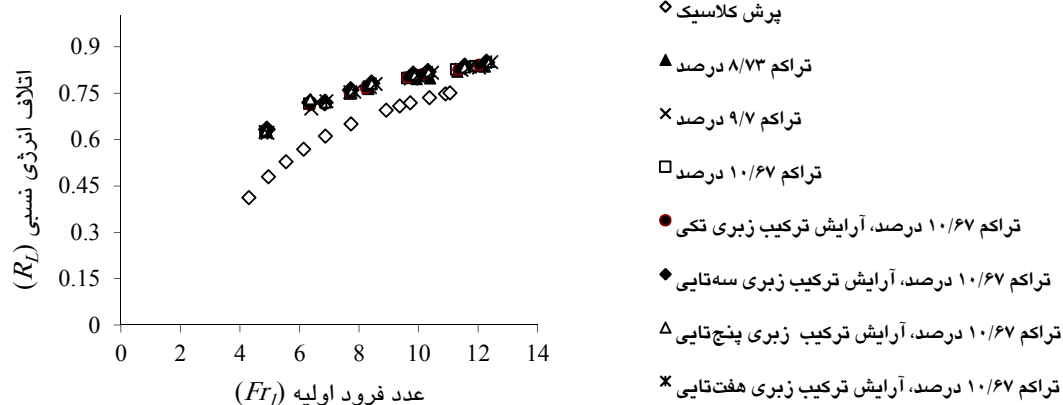
میزان متوسط کاهش عمق ثانویه در ترکیب پنج-تایی زبری نزدیک به ترکیب سه‌تایی می‌باشد و در ترکیب هفت‌تایی این مقدار کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته توسط محققین احتمال وقوع بیشینه فشارهای ایجاد شده در ۳۰ درصد ابتدایی طول پرش هیدرولیکی است و استهلاك انرژی همراه با تلاطم جریان

### اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی

اختلاف میزان انرژی جریان در قسمت بالادست و پایین دست پرش معرف میزان اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی است. اتلاف نسبی انرژی پرش هیدرولیکی از رابطه ۲ محاسبه می‌شود که در این رابطه  $E_1$  و  $E_2$  به ترتیب انرژی مخصوص قبل و بعد پرش است. در شکل

۴ مقادیر افت نسبی انرژی به‌ازای اعداد فرود اولیه نشان داده شده که با مقادیر افت انرژی نسبی در پرش کلاسیک مقایسه شده است.

$$R_L = \frac{E_L}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \quad [2]$$



شکل ۴- تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش هیدرولیکی در بستریهای زبر برحسب اعداد فرود اولیه.

پرش بر حسب عدد فرود اولیه با استفاده از رگرسیون غیرخطی به صورت رابطه ۳ به دست آمد. ضرایب مربوطه در جدول ۳ مشاهده می‌شوند.

$$\frac{EL}{E_1} = -aFr_1^2 + bFr_1 + c \quad [3]$$

مطابق این نمودار اتلاف انرژی در بستریهای زبر در اعداد فرود یکسان نسبت به بستر صاف بیشتر است. با افزایش تراکم و در آرایش زبری ترکیب سه- گانه این روند افزایش می‌یابد. به صورت کلی تغییر در فاصله و ارتفاع زبری تأثیر ناچیزی بر اتلاف انرژی نسبی دارد. روابط روند تغییرات اتلاف نسبی انرژی

جدول ۳- مقادیر ضرایب و میزان همبستگی رابطه اتلاف انرژی نسبی پرش هیدرولیکی در بستریهای زبر.

	$a$	$b$	$c$	$R^2$
تراکم ۸/۷۳ درصد	۰/۰۰۳	۰/۰۷۶۹	۰/۳۳۲۶	۰/۹۶۸۱
تراکم ۹/۷ درصد	۰/۰۰۳۴	۰/۰۸۵۲	۰/۲۹۱۱	۰/۹۹۷۴
تراکم ۱۰/۶۷ درصد	۰/۰۰۳	۰/۰۷۹	۰/۳۲۱۵	۰/۹۸۹۷
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری تکی	۰/۰۰۳	۰/۰۷۹۹	۰/۳۱۵۴	۰/۹۹۲۴
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری سه‌تایی	۰/۰۰۳۲	۰/۰۸۲۸	۰/۳۰۹۵	۰/۹۹۲
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری پنج‌تایی	۰/۰۰۳۲	۰/۰۸۲۲	۰/۳۱۲۶	۰/۹۷۹۸
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری هفت‌تایی	۰/۰۰۳۲	۰/۰۸۴۹	۰/۲۸۵۲	۰/۹۹۵۶

## تنش برشی

از جمله دلایل اصلی کاهش عمق ثانویه در بسترهای زبر افزایش تنش برشی می‌باشد. تنش برشی بستر در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با استفاده از رابطه مومنتم تعیین می‌شود. چنانچه  $F_\tau$  جمع نیروهای برشی بستر در طول پرش هیدرولیکی باشد می‌توان نوشت:

$$F_\tau = (F_{P_1} - F_{P_2}) + (M_1 - M_2) \quad [4]$$

$$F_{P_1} - F_{P_2} - F_\tau = \rho Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1)$$

که  $F_{P_1}$  و  $F_{P_2}$  و  $M_1$  و  $M_2$  نیروهای فشار و مومنتم در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی می‌باشند. ضریب تنش برشی  $\varepsilon$  در بستر صاف و زبر با استفاده از رابطه ارائه شده توسط راجاراتنام (۱۹۶۵) به صورت زیر قابل محاسبه است (اید و راجاراتنام ۲۰۰۲).

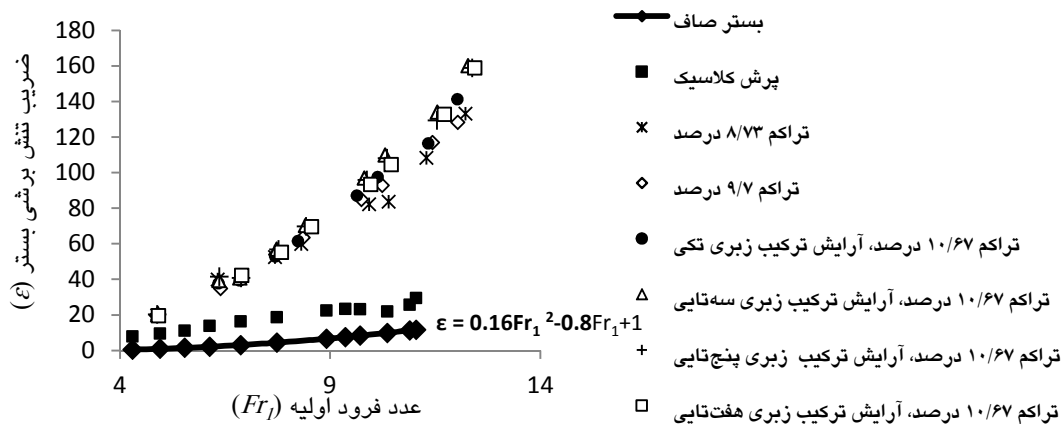
$$\varepsilon = \frac{F_\tau}{\gamma y_1^2 / 2} \quad [5]$$

که در آن  $F_\tau$  نیروی برشی بستر است. در این تحقیق تنش برشی بستر زبر افقی با استفاده از رابطه ۵ تعیین گردید.

ضریب تنش برشی برای بستر صاف افقی با تجزیه تحلیل داده‌های تجربی توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) به شکل رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad [6]$$

تغییرات ضریب تنش برشی بستر به ازای اعداد فرود اولیه برای تمام آزمایش‌ها و نتایج ضریب تنش برشی پرش روی بستر صاف افقی در شکل ۵ نشان داده شده است. به طور کلی ضریب تنش برشی بستر با افزایش عدد فرود در هر دو بستر صاف و زبر افزایش می‌یابد. مقدار متوسط ضریب تنش برشی بستر زبر با تراکم ۱۰/۶۷ درصد برابر با ۱۲/۷۴ برابر ضریب تنش برشی بستر صاف و بیشتر از دو تراکم دیگر به دست آمد. در آرایش زبری با ترکیب تکی، سه، پنج و هفت تایی زبری این مقدار به ترتیب ۱۲/۷۹، ۱۳/۴۵، ۱۳/۳۶ و ۱۲/۷۷ برابر بستر صاف می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده ترکیب سه تایی زبری باعث افزایش تلاطم و جریان‌های گردابی و در نتیجه افزایش تنش برشی می‌گردد.



شکل ۵- مقایسه تغییرات ضریب تنش برشی بسترهای زبر و صاف به ازای اعداد فرود اولیه.

ضرایب مربوطه در جدول ۴ مشاهده می‌شوند.

$$\varepsilon = aFr_1^2 - bFr_1 + c \quad [7]$$

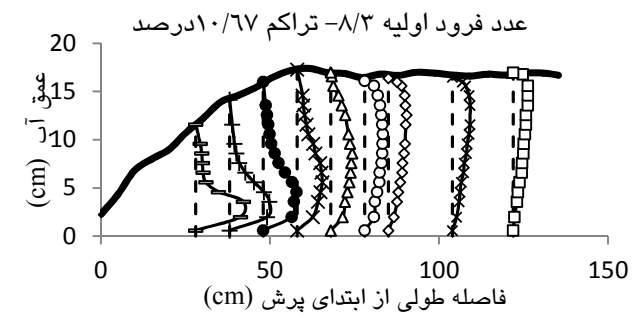
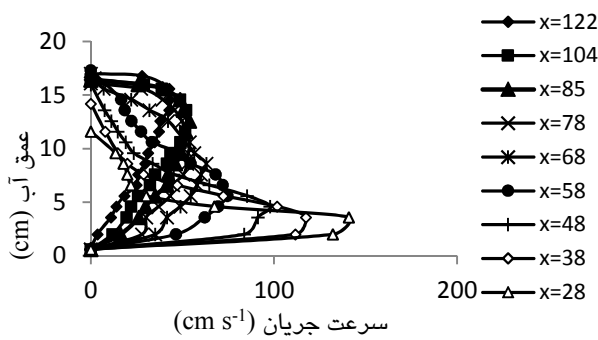
روند تغییرات ضریب تنش برشی بستر بر حسب

عدد فرود اولیه با استفاده از رگرسیون غیرخطی به صورت رابطه ۷ به دست آمد.

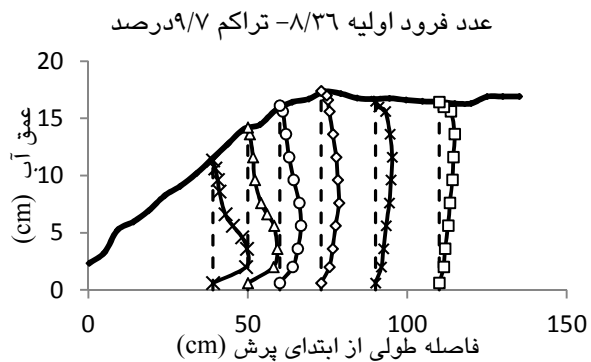
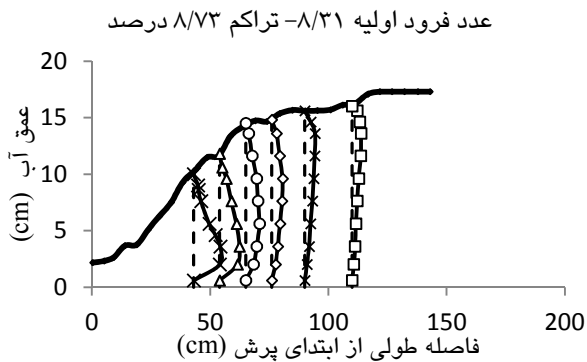


جدول ۴- مقادیر ضرایب و میزان همبستگی ضریب تنش برشی بسترهای زبر.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
تراکم ۸/۷۳ درصد	۱/۰۸۷	۱/۲۳۹	۱۸/۵۱۲	-/۹۸۶
تراکم ۹/۷ درصد	۰/۷۶۲	-۲/۳۲۵	-۹/۹۵۸	۰/۹۹۹۶
تراکم ۱۰/۶۷ درصد	۱/۱۳	۳/۰۴۴	۹/۴۳۳	۰/۹۹۹
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری تکی	۱/۱۳۳	۲/۷۰۲	۶/۸۴۳	۰/۹۹۶
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری سه تایی	۱/۱۲۴۸	۲/۸۸۴	۵/۰۶۷	۰/۹۹۸
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری پنج تایی	۱/۱۹۰	۲/۵۹۱	۵/۶۶۶	۰/۹۹۶
تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری هفت تایی	۱/۳۲۶	۵/۰۲۰	۱۳/۰۴۶	۰/۹۹۸

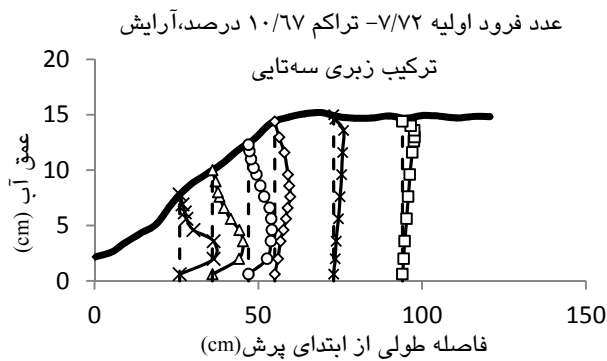


(الف)



(ب)

(ج)



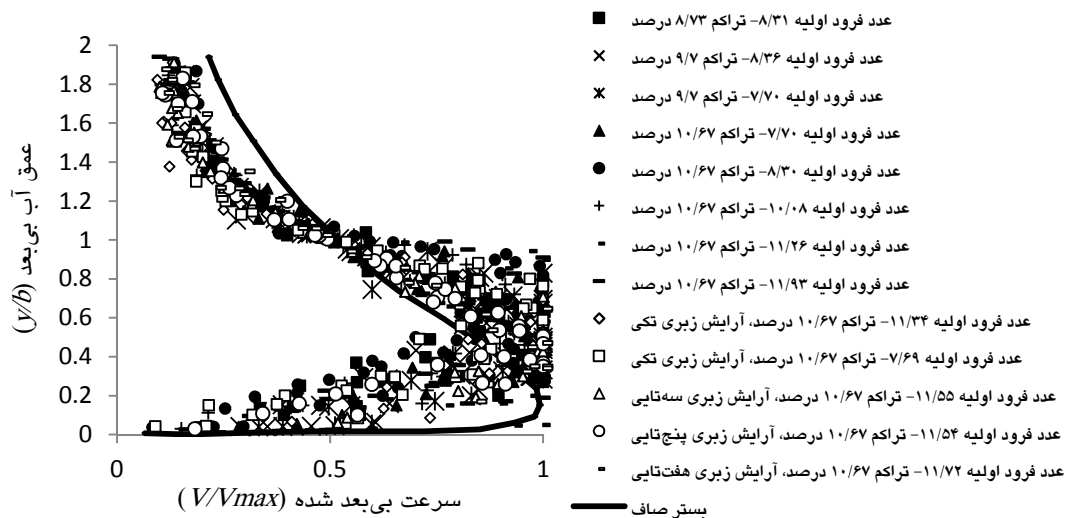
(د)

شکل ۶- پروفیل‌های سرعت در بستر زبر الف- تراکم ۱۰/۶۷ درصد، ب- تراکم ۸/۷۳ درصد، ج- تراکم ۹/۷ درصد، د- تراکم ۱۰/۶۷ درصد، آرایش ترکیب زبری سه تایی.

## پروفیل‌های سرعت

تعدادی از پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف در طول پرش هیدرولیکی مربوط به آزمایش‌های سه تراکم زبری و آرایش ترکیب زبری تکی با تراکم ۱۰/۶۷ درصد در اعداد فرود اولیه معین در شکل ۶ ترسیم شده است. در این شکل به خوبی تغییرات سرعت و رشد لایه مرزی قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین سرعت‌ها در ابتدای پرش اتفاق افتاده است و هر چه به پایین دست نزدیک می‌شویم تلاطم جریان کمتر شده و پروفیل‌های سرعت از یکنواختی بیشتری برخوردار هستند که نشان‌دهنده افت انرژی در طول پرش می‌باشد.

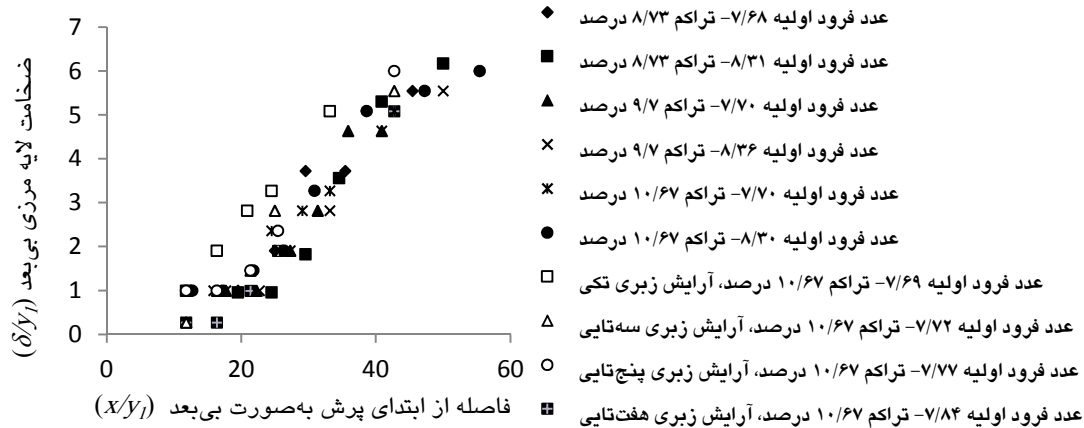
به منظور مقایسه پروفیل‌های برداشت شده سرعت در آزمایش‌های مختلف با یکدیگر پارامترهای بی بعد  $y/b$  و  $v/v_{max}$  در هر آزمایش محاسبه و در شکل ۷ رسم گردید.  $x$  فاصله طولی از ابتدای پرش،  $y$  برابر عمق آب از بستر زبر و  $b$  عمقی است که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت بیشینه و در شرایط  $\partial u/\partial y < 0$ ،  $v$  سرعت جریان و  $v_{max}$  سرعت بیشینه در مقطع مورد نظر می‌باشد. در این شکل همچون حالت بی بعد شده پروفیل قائم سرعت برای جت دیواری کلاسیک که توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) ارائه شده رسم شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که سرعت بیشینه بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف در نقطه بالاتری بوده و ضخامت لایه مرزی در پرش بر روی بستر زبر بیشتر می‌باشد.



شکل ۷- مقایسه پروفیل‌های بی بعد شده سرعت در بسترهای زبر و صاف.

ضخامت لایه مرزی در هر مقطع از پرش هیدرولیکی برابر با عمقی است که سرعت جریان در آن بیشینه است.

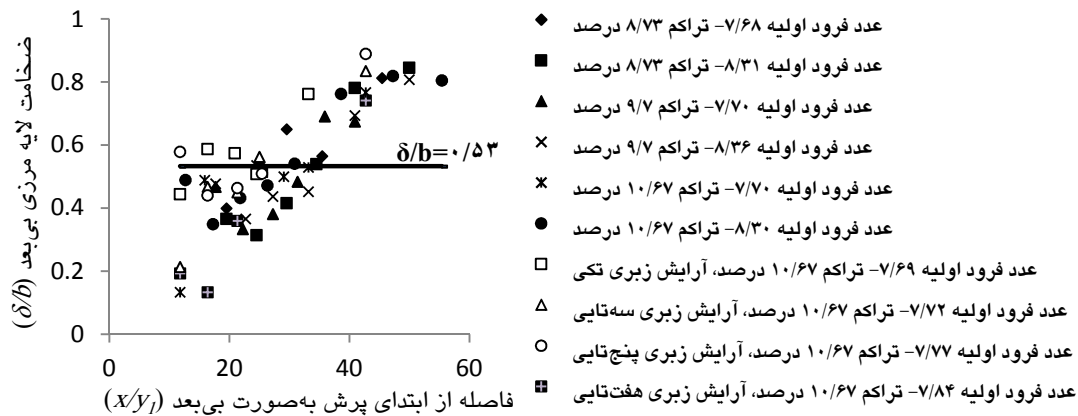
شکل ۸ و ۹ تغییرات مقادیر ضخامت لایه مرزی بی بعد شده  $\delta/b$  و  $\delta/y_1$  را در امتداد طولی پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد.



شکل ۸- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد  $\delta/y_1$  به‌ازای  $x/y_1$  در بسترهای زبر.

صاف بوده و به‌دلیل وجود زبری در بستر فاصله رخ دادن عمق نظیر سرعت بیشینه نسبت حالت پرش بر روی بستر صاف افزایش یافته و در نتیجه ضخامت لایه مرزی نیز افزایش یافته و با توجه به اینکه تمام اثر گرانروی سیال در این لایه متمرکز می‌باشد، افزایش تنش برشی سبب افزایش افت انرژی می‌شود.

راجاراتنام (۱۹۶۵) مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد شده  $\delta/b$  را در بستر صاف برابر  $0.16$  بیان نمود (اید و راجاراتنام، ۲۰۰۲). با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود این مقدار در تحقیق حاضر برابر با  $0.53$  می‌باشد. این اختلاف نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر پروفیل سرعت در امتداد طولی پرش بر روی بستر زبر نسبت به بستر



شکل ۹- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی‌بعد  $\delta/b$  به‌ازای  $X/y_1$  در بسترهای زبر.

زبری ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج به- شرح زیر ارائه می‌شود.

- مقایسه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عمق مزدوج پرش در بستر زبر کمتر از عمق مزدوج پرش بر روی بستر صاف می‌باشد. میزان کاهش

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر پروفیل‌های سرعت و مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با اجزای زبری غیرممتد لوزی شکل در سه تراکم و چهار آرایش

- در هر تراکم و آرایش زبری به عدد فرود بستگی دارد. مقدار متوسط کاهش نسبی عمق ثانویه با افزایش تراکم افزایش یافته و در تراکم  $۱۰/۶۷\%$  برابر با  $۲۶/۳۹$  درصد به دست آمد. در آرایش زبری با ترکیب سه تایی اجزای زبر بیشترین میزان کاهش عمق ثانویه برابر با  $۲۹/۳۹$  درصد مشاهده شد.
- اتلاف انرژی پرش در بسترهای زبر بیشتر از بسترهای صاف است. با افزایش تراکم و در آرایش ترکیب سه تایی زبری، این روند افزایش می یابد. در حالت کلی تغییر در فاصله و ارتفاع زبری تأثیر ناچیزی بر اتلاف انرژی نسبی دارد. روابط تغییرات اتلاف نسبی انرژی پرش بر حسب عدد فرود اولیه با استفاده از رگرسیون غیرخطی ارائه شده است. میزان اتلاف انرژی پرش در بستر زبر با آرایش سه تایی در تراکم  $۱۰/۶۷$  درصد، بیشینه  $۱۵/۷\%$  نسبت به پرش بر روی بستر صاف در شرایط عمق اولیه و عدد فرود معین افزایش می یابد.
- به طور کلی ضریب تنش برشی بستر با افزایش عدد فرود در بستر زبر افزایش می یابد. مقادیر ضریب نیروی برشی با استفاده از داده های آزمایشگاهی به صورت تابعی از عدد فرود برای هر تراکم و آرایش زبری ارائه شده است. ضریب تنش برشی بستر در بستر زبر با آرایش سه تایی در تراکم  $۱۰/۶۷$  درصد، به طور متوسط  $۱۳/۴۵$  برابر برابر بستر صاف به دست آمد.
- پروفیل های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در تراکم ها و آرایش های مختلف مشابه بوده و با پروفیل های پرش هیدرولیکی روی بستر صاف متفاوت می باشند. به طوری که سرعت بیشینه بر روی بستر زبر نسبت به جت دیواری کلاسیک در نقطه بالاتری بوده و ضخامت لایه مرزی در پرش بر روی بستر زبر بیشتر می باشد. مقدار ضخامت لایه مرزی بی بعد شده  $\delta/b$  در تحقیق حاضر برابر با  $۰/۵۳$  به دست آمد که بیشتر از مقدار مربوطه در بستر صاف است.

#### منابع مورد استفاده

- نیسی ک و شفاعی بجستان م، ۱۳۸۸. بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تاثیر اجزای زبر کف. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۲، صفحه های ۱۶۵ تا ۱۷۶.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jump on corrugated bed. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 128(7): 656-663.
- Hughes WC and Flack JE, 1984. Hydraulic jump properties over rough bed. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 110(12): 1751-1771.
- Mohammad Ali HS, 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 117(1): 83-93.
- Nasr Esfahani MJ and Shafai Bejestan M, 2012. Design of stilling basins using artificial roughness. Journal of Civil Engineering 2(4): 159-163.
- Rajaratnam N, 1965. The hydraulic jump as a wall jet. Journal of Hydraulic Division ASCE 91(5): 107-132.
- Wang H, Felder S and Chanson H, 2014. An experimental study of turbulent two-phase flow in hydraulic jumps and application of a triple decomposition technique. Journal of Experimental Methods and Their Applications to Fluid Flow 55(1775): 1-18.