

## مطالعه آزمایشگاهی استهلاک انرژی و طول پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زبر با بلوک‌های

### مکعبی در پایین دست دریچه کشویی

فرشته اسدی<sup>1</sup>، رامین فضل‌اولی<sup>2\*</sup>، علیرضا عمادی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1395/6/11 تاریخ پذیرش: 1395/12/2

### چکیده

سازه‌های مستهلک کننده انرژی علاوه بر از بین بردن انرژی آب، وسیله‌ای برای کنترل پرش هیدرولیکی محسوب می‌شوند. در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی اثر زبری‌های مکعبی با آرایش‌های زیگزاگی و ردیفی در ردیف‌ها و زاویه‌های متفاوت بر طول پرش و استهلاک انرژی پرداخته شده است. به این منظور در مدل آزمایشگاهی از فلومی به طول 12، عرض 0/5 و ارتفاع 0/7 متر استفاده شد و بسترهای زبر در پایین دست دریچه کشویی لبه تیز قرار گرفت. آزمایش‌ها در محدوده عدد فرود 4/5 تا 9 انجام شد. نتایج عملکرد بهتر آرایش زیگزاگی نسبت به ردیفی در کاهش طول پرش به میزان 49 درصد را نشان داد به طوری که درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی برای بسترهای زبر مورد آزمایش در مقایسه با بستر صاف در آرایش زیگزاگی بین 46 تا 54 درصد و در آرایش ردیفی 37 تا 46 درصد محاسبه شد. در آرایش زیگزاگی با افزایش عدد فرود، طول نسبی پرش ( $\frac{L_p}{y_2}$ ) افزایش می‌یابد و در آرایش ردیفی تغییرات  $\frac{L_p}{y_2}$  در اعداد فرود بالا مستقل از اعداد فرود می‌باشد. در آرایش زیگزاگی درصد افزایش نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در محدوده 19 تا 31 و در آرایش ردیفی بین 20 تا 34 درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آرایش زیگزاگی و ردیفی، طول نسبی پرش، محدوده عدد فرود، مدل آزمایشگاهی

### مقدمه

خودبه‌خود باعث افزایش تنش برشی و در نتیجه تلاطم بیش‌تر می‌گردد (Peterka., 1978). زبر کردن کف باعث می‌شود که در یک حجم کنترل مقدار مومنتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومنتم خروجی به اندازه نیروی مقاومتی زبری‌ها، کم‌تر از مومنتم ورودی شود. با توجه به تحقیقات انجام شده، زبری بستر عامل موثری در کاهش هزینه‌های حوضچه‌های استهلاک انرژی می‌باشد (راور و همکاران، 1391).

### تئوری و مبانی حاکم

#### طول چرخش<sup>5</sup> و طول پرش هیدرولیکی<sup>6</sup>

طول پرش هیدرولیکی یکی از پارامترهای حساس در طراحی است، اما در حالت کلی از طریق تحلیل‌های ریاضی قابل محاسبه نبوده و لازم است تا در هر مورد از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده گردد. در پرش‌های آبی، عموماً دو طول مورد توجه قرار می‌گیرد، طول چرخش که عبارت است از فاصله شروع پرش تا آخرین موج غلطان و دیگری طول پرش که برابر است با فاصله شروع پرش

پرش هیدرولیکی یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که با استهلاک انرژی زیادی همراه می‌باشد. از کاربردهای پرش آبی در کانال باز می‌توان به کاهش انرژی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی، مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب و نیز مصارف کشاورزی و افزایش دبی خروجی از زیر دریچه‌ها با دور نگه داشتن پایاب<sup>4</sup> اشاره نمود (حسینی و ابریشمی، 1390). ابعاد حوضچه‌های آرامش مستقیماً به مشخصات پرش نظیر طول پرش و عمق پایاب مورد نیاز بستگی دارد. در حوضچه‌های آرامش بلوک‌ها با ایجاد نیرویی در خلاف جهت جریان باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شود و وجود بلوک‌ها

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

2- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

3- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

\*- نویسنده مسئول: (Email: raminfazl@yahoo.com)

4- Tailwater

5- Roller Length

6- Jump Length

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \quad (5)$$

### استهلاک انرژی در پرش هیدرولیکی

میزان افت در پرش هیدرولیکی برای مقاطع مستطیلی و شیب صفر کف حوضچه به صورت رابطه 6 محاسبه می شود (بیرامی، 1390):

$$E_L = E_1 - E_2 = \left( y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2 y_1} \quad (6)$$

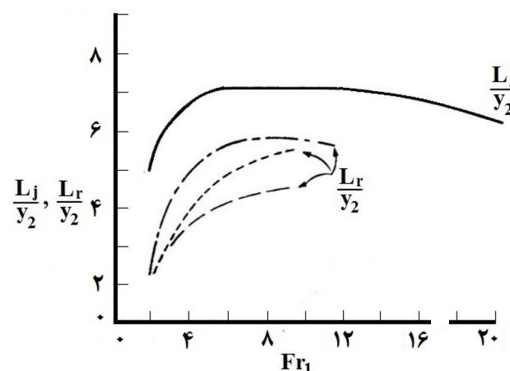
$E_1$  و  $E_2$  به ترتیب انرژی مخصوص در مقاطع اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی و  $y_1$  و  $y_2$  به ترتیب عمق های اولیه و ثانویه پرش می باشند. بنابراین می توان درصد نرخ افت انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک (G) را با استفاده از رابطه 7 که توسط توکیای ارایه شده محاسبه نمود (Tokuyay., 2005). در رابطه 7،  $E_L^*$  و  $E_L$  به ترتیب افت انرژی پرش روی بستر صاف افقی و بستر زبر می باشد.

$$G = \frac{E_L - E_L^*}{E_L^*} \times 100 \quad (7)$$

### پرش هیدرولیکی روی بستر زبر و مطالعات انجام شده

چنانچه زبری به طور یکنواخت روی بستر حوضچه آرامش توزیع شود، پرش ایجاد شده را پرش هیدرولیکی روی بستر زبر می نامند. مطالعات راجاراتنام روی بسترهای زبر نشان داد که طول پرش و طول چرخش روی بسترهای زبر در مقایسه با بسترهای صاف به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد (Rajaratnam., 1968). راورو همکاران (1391) مطالعاتی در زمینه تاثیر به کارگیری زبری هایی به شکل دوزنقه قائم زاویه انجام دادند. ایشان 126 آزمایش در بازه اعداد فرود 3/9 تا 13/7 با 12 نوع زبری با ابعاد مختلف انجام دادند و بیان داشتند که متوسط کاهش طول پرش روی این نوع بسترها حدودا برابر 41 درصد می باشد. با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری ها، مقدار طول غلطاب حداکثر تا 37 درصد کاهش می یابد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که تاثیر فاصله زبری ها بر کاهش طول غلطاب بیش تر است. حداکثر افت انرژی در بستر زبر حدود 84 درصد بوده و افزایش افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر 9 درصد بیش تر به دست آمد. نژندعلی و همکاران (1391) به بررسی اثر فاصله زبری های مثلثی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد طول پرش ایجاد شده بعد از دریچه کشویی روی بستر زبر نسبت به بستر صاف به طور متوسط 24 درصد کاهش داشته است و افزایش افت انرژی به طور متوسط، 13 درصد می باشد. مشاهدات آن ها بیانگر آن بود که با افزایش فاصله بین زبری ها، طول پرش و طول غلطاب کاهش یافته و افت انرژی افزایش می یابد. نتایج تحقیقات شکریان و شفافی بجستان (1393) نشان داد که تعیین مشخصات پرش بر روی تنداب با بستر زبر به طراحی مناسب و اقتصادی دیواره ها و طول حوضچه آرامش پایین دست کمک خواهد کرد.

تا نقطه ای در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان، که در این صورت ارتفاع این نقطه تقریبا با ارتفاع پایاب برابر است (حسینی و ابریشمی، 1390). آزمایش های انجام گرفته نشان می دهد که تعیین مقدار دقیق طول چرخش بسیار مشکل و عمدتا نتایج متفاوتی به دست می دهد. در حالی که اندازه گیری مقدار طول پرش عموما به نتایج مشابهی منتج می شود، برادلی و پترکا (1957) منحنی شکل 1 را که مقدار طول نسبی پرش  $(\frac{L_j}{y_2})$  بر حسب عدد فرود ( $Fr_1$ ) را معین می کند برای کانال های مستطیلی پیشنهاد نمودند (Bradley and Peterka., 1957) که آزمایش های انجام گرفته توسط راجاراتنام در سال 1965 آن را کاملا تأیید می نماید (Rajaratnam., 1965).



شکل 1- طول پرش در کانال های مستطیلی (Bradley and Peterka., 1957)

مطالعات تجربی محققان نشان می دهد که  $L_r$  متناسب با تفاوت میان عمق های مزدوج به صورت رابطه 1 در نظر گرفته می شود. در رابطه 1 ضریب a در منابع مختلف در محدوده 5/2 تا 6 ذکر شده است (Carollo et al., 2007).

$$\frac{L_r}{h_1} = a \left[ \frac{h_2}{h_1} - 1 \right] \quad (1)$$

هگر و همکاران آزمایش هایی را در 3 فلوم با عرض متفاوت انجام دادند، آن ها رابطه 2 را برای  $2/5 < Fr_1 < 8$  پیشنهاد نمودند. همچنین برای طول چرخش روابط 3 و 4 به صورت زیر پیشنهاد شده است (Hager et al., 1990):

$$\frac{L_r}{h_1} = 8 [Fr_1 - 1.5] \quad (2)$$

$$\frac{L_r}{h_1} = \frac{a_0}{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1.272}} \quad (3)$$

$$\frac{L_r}{h_1} = b_0 (Fr_1 - 1) \quad (4)$$

که در آن  $a_0$  و  $b_0$  ضریب عددی وابسته به زبری بستر می باشد (Carollo et al., 2007). همچنین نرخ کاهش طول پرش هیدرولیکی (T) با استفاده از رابطه 5 که توسط توکیای ارایه شده، محاسبه شد که در آن،  $L_j^*$  و  $L_j$  به ترتیب طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و زبر می باشد (Tokuyay., 2005).

پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر باید به سه پارامتر خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان توجه داشت. طبق رابطه 8 بعد از شناسایی پارامترهای موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل  $y_2$  عمق ثانویه پرش،  $y_1$  عمق اولیه پرش،  $v_1$  سرعت اولیه در ابتدای پرش،  $g$  شتاب ثقل،  $\mu$  لزجت،  $\rho$  چگالی،  $n$  تعداد ردیف،  $y_0$  عمق آب بالادست دریچه،  $a$  بازشدگی دریچه و  $\theta$  زاویه در مقابل جریان، اعداد بدون بعد مطابق رابطه 9 با استفاده از روش پی باکینگهام<sup>1</sup> استخراج گردید.

$$y_2 = f_1(y_1, v_1, g, \mu, \rho, n, y_0, a, \theta) \quad (8)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2(\text{Re} = \frac{\rho y_1 v_1}{\mu}, \text{Fr}_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{y_0}{a}, n, \theta) \quad (9)$$

براساس نظر راجاراتنام (Rajaratnam., 1976) و هگر و برمن (Hager and Bremen., 1989)، می‌توان مطابق رابطه 10 از اثر

لزجت به دلیل بالا بودن عدد رینولدز صرف‌نظر نمود.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3(\text{Fr}_1, \frac{y_0}{a}, n, \theta) \quad (10)$$

طبق رابطه 10 نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش به عدد فرود، نسبت عمق آب بالادست به بازشدگی دریچه، تعداد ردیف و زاویه‌های مختلف در مقابل جریان وابسته است. به‌طور مشابه می‌توان بر اساس روابط 11، 12 و 13 طول پرش هیدرولیکی، تغییرات استهلاک نسبی انرژی و ضریب نیروی برشی را نیز وابسته به عدد فرود اولیه، نسبت عمق آب بالادست به بازشدگی دریچه، تعداد ردیف و زاویه‌های مختلف در مقابل جریان اثبات نمود:

$$\frac{L_j}{y_2} = f_4(\text{Fr}_1, \frac{y_0}{a}, n, \theta) \quad (11)$$

که  $L_j$  طول پرش و  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش کلاسیک (روی بستر صاف) می‌باشد.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = f_5(\text{Fr}_1, \frac{y_0}{a}, n, \theta) \quad (12)$$

$$\varepsilon = f_6(\text{Fr}_1, \frac{y_0}{a}, n, \theta) \quad (13)$$

### مشخصات کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی با طول، عرض و ارتفاع 12، 0/5 و 0/7 متر در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. دبی فلوم با سرریز مثلثی 90 درجه که به‌صورت حجمی واسنجی گردید، اندازه‌گیری شد. از طریق سعی و خطا و با توجه به مطالعات پیشین، پس از قرارگیری دریچه کشویی لبه تیز در 5/5 متری از ورودی کانال با بازشدگی ثابت 0/04 متر، قرائت‌ها در محدوده اعداد فرود 5/5 تا 9 برای بسترهای زبر مختلف و یک بستر صاف که در پایین‌دست دریچه کشویی نصب شده، انجام شد. دبی حداکثر با روشن کردن دو پمپ ایجاد شده و دبی ورودی به وسیله شیر فلکه تنظیم و پس از ثابت شدن سطح آب، عمق آب بالای سرریز مثلثی، عمق آب

هم‌چنین زبری نسبی می‌تواند تا حدود زیادی نسبت عمق‌های مزدوج، طول پرش و طول غلتایی را کاهش دهد. مردانی و همکاران (1394) به بررسی میزان استهلاک انرژی و آبشستگی حوضچه در حضور بلوک و عدم آن و معرفی حوضچه بهینه در شرایط مختلف پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از بلوک در حوضچه آرامش موجب افزایش عملکرد در مقایسه حالت بدون بلوک می‌گردد. چرن و سیامسوری مطالعاتی روی مدل SPH برای شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی در بستر موج‌دار انجام دادند و اثر شکل زبری بر پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد بسترهای موج‌دار موجب کاهش طول پرش و افزایش افت انرژی می‌شود و بستر سینوسی دارای کم‌ترین طول پرش و بیش‌ترین توزیع تنش برشی بین سایر بسترها است (Chern and Syamsuri., 2013). صمدی بروجنی و همکاران پارامترهای پرش هیدرولیکی به‌صورت تجربی برای شش بستر موج‌دار مثلی در مقطعی از فلوم مستطیلی که در آن سرریز اوجی واقع شده مورد مطالعه قرار دادند؛ نتایج نشان داد که برای عمق فوق بحرانی و عدد فرود اولیه  $\text{Fr}_1$ ، طوری که محدوده عدد فرود 6/1 تا 13/1 باشد، مقادیر شیب موج به‌صورت  $0/29 \leq \frac{0/22_s}{s} \leq$  (عمق موج و  $s$  طول موج) و زبری نسبی 0/7 تا 4/5 می‌باشد. برای اعداد فرود کمتر از 9/5، طول نسبی پرش  $\frac{L_j}{y_1}$  تقریباً 2/5 و برای فرود بزرگ‌تر از 9/5، 3/17 بوده است. بستر موج‌دار در مقایسه با بستر صاف موجب کاهش 54/7 درصدی طول پرش گردید. هم‌چنین اثر شکل در این مطالعه ناچیز بوده و هیچ کدام از ورق‌ها با طول و ارتفاع موج متفاوت، نتوانست به‌طور هم‌زمان باعث کاهش طول پرش شود (Samadi Broujeni et al., 2013). النخیلی به بررسی اثر استفاده از ورق فایبرگلاس به عنوان زبری با آرایش زیگزگی بر مشخصات مختلف جریان پرداخت. نتایج نشان داد که بستر زبر در مقایسه با بستر صاف، باعث کاهش 8/1 درصدی طول نسبی پرش  $(\frac{L_j}{y_1})$  و افزایش 14 درصدی افت نسبی انرژی  $(\frac{\Delta E}{E_1})$  می‌گردد (Elnikhely., 2014).

با توجه به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی تاثیر دو آرایش زیگزگی و ردیفی با زبری‌های مکبی و سه زاویه قرارگیری مختلف در مقابل جریان (زاویه 90، 45 و ترکیبی 90 و 45 درجه) در ردیف‌های متفاوت (دو، سه، چهار و پنج ردیفه) بر طول نسبی پرش  $(\frac{L_j}{y_2})$ ، کاهش طول نسبی  $(T_e)$ ، استهلاک انرژی نسبی  $(\frac{\Delta E}{E_1})$  و درصد افزایش نرخ استهلاک (%G) می‌باشد. نهایتاً روابطی برای تخمین استهلاک نسبی انرژی ارائه شده است.

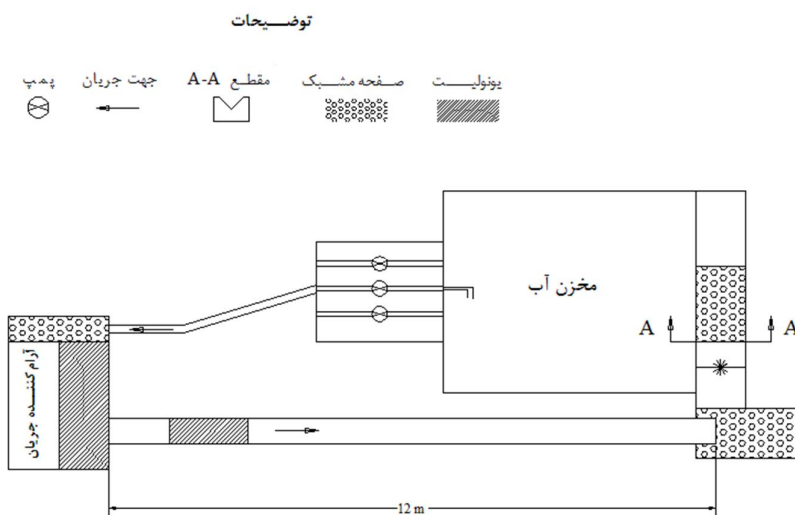
### مواد و روش‌ها

#### تحلیل ابعادی

برای انجام آنالیز ابعادی، به‌منظور شناسایی مشخصات پدیده

صفحه‌های یونولیت نیز برای کاهش موج‌های سطحی در 3 متری بالادست دریچه قرار داده شد. شکل 2 نمای بالا از سیستم گردش آب در فلوم را نشان داده است.

قبل از پرش، عمق آب بعد از پرش با استفاده عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر و طول پرش با استفاده از نوار درجه‌بندی شده اندازه‌گیری و این روند برای دبی‌های مختلف از زیاد به کم انجام شد.

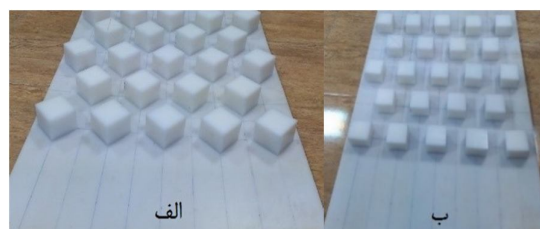


شکل 2- نمای بالا از سیستم گردش آب در فلوم

قرارگیری 90، 45 و ترکیبی 90 و 45 درجه در مقابل جریان روی بستر نصب گردیدند. طراحی بسترهای زیر ابتدا توسط نرم‌افزار AutoCAD 2015 انجام شد سپس قطعات مکعبی مورد نظر با لیزر برش داده شد و روی بستر نصب گردید. نمای واقعی دو نمونه بستر زیر مورد استفاده در شکل 3 نشان داده شده است.

#### مدل‌های مورد استفاده

در این آزمایش‌ها از 24 مدل بستر زیر و در هر بستر، از تعدادی بلوک‌های مکعبی به ابعاد 0/05 متر استفاده شده است. نحوه‌ی چیدمان این بلوک‌ها با دو آرایش زیگزاگی و ردیفی می‌باشد و بلوک‌های مکعبی به صورت دو، سه، چهار و پنج ردیفه با سه زاویه



شکل 3- دو نمونه از بستر زیر مورد مطالعه (شکل الف: آرایش زیگزاگی، 5 ردیفه و زاویه 45 درجه در مقابل جریان و شکل ب: آرایش زیگزاگی، 5 ردیفه و زاویه 90 درجه در مقابل جریان)

#### نتایج و بحث

##### بررسی صحت آزمایش‌های انجام شده

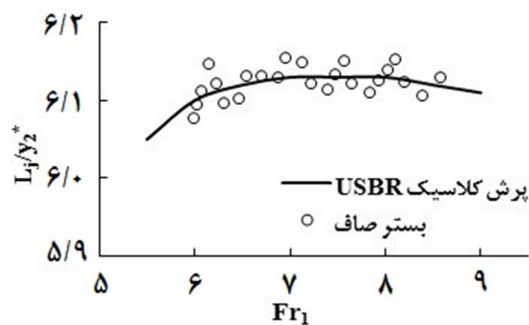
آزمایش‌هایی روی بستر صاف برای مقایسه طول نسبی پرش  $(\frac{L}{y_2})$  با طول نسبی پرش ارایه شده توسط اداره عمران ایالات متحده آمریکا انجام شد. بنا بر گزارش USBR (1955) طول نسبی پرش برای اعداد فرود بزرگ‌تر از 5 مقدار ثابت 6/1 می‌شود. همان‌طور که

جدول 1 تمام مشخصات بسترهای زیر به کار برده شده و تعداد آزمایش‌ها در هر حالت را نشان می‌دهد. برای انجام این تحقیق مجموعاً 658 آزمایش انجام شد و پس از تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از آزمایش‌ها اثر هر آرایش بر طول پرش و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار گرفت و با بستر صاف مقایسه گردید.

در شکل 4 مشاهده می‌شود طول نسبی پرش حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی بستر صاف تطابق مناسبی با طول نسبی پرش کلاسیک ارایه شده توسط USBR دارد.

جدول 1- حالت‌های مختلف انجام آزمایش

شماره آزمایش	بستر	آرایش	تعداد ردیف	زاویه قرارگیری در مقابل جریان	شماره آزمایش	بستر	آرایش	تعداد ردیف	زاویه قرارگیری در مقابل جریان
1	A5		5	90 درجه	13	D5		5	90 درجه
2	B5		5	45 درجه	14	E5		5	45 درجه
3	C5		5	ترکیبی 90 و 45 درجه	15	F5		5	ترکیبی 90 و 45 درجه
4	A4		4	90 درجه	16	D4		4	90 درجه
5	B4		4	45 درجه	17	E4		4	45 درجه
6	C4		4	ترکیبی 90 و 45 درجه	18	F4		4	ترکیبی 90 و 45 درجه
7	A3	زیگزاگی	3	90 درجه	19	D3	ردیفی	3	90 درجه
8	B3		3	45 درجه	20	E3		3	45 درجه
9	C3		3	ترکیبی 90 و 45 درجه	21	F3		3	ترکیبی 90 و 45 درجه
10	A2		2	90 درجه	22	D2		2	90 درجه
11	B2		2	45 درجه	23	E2		2	45 درجه
12	C2		2	ترکیبی 90 و 45 درجه	24	F2		2	ترکیبی 90 و 45 درجه



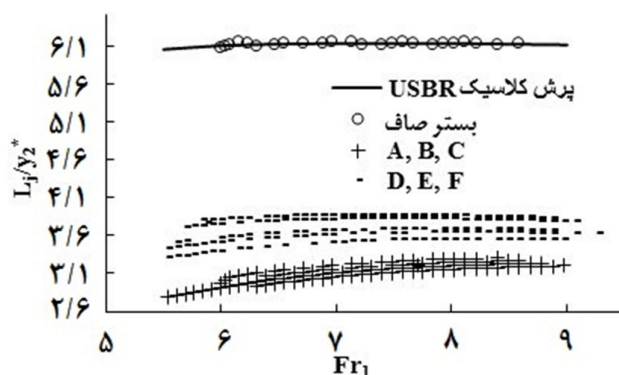
شکل 4- مقایسه طول نسبی پرش حاصل از آزمایش‌های حاضر روی بستر صاف و پرش کلاسیک بلانگر

اثر آرایش زیگزاگی و ردیفی بر طول پرش هیدرولیکی و مقایسه آن با بستر صاف

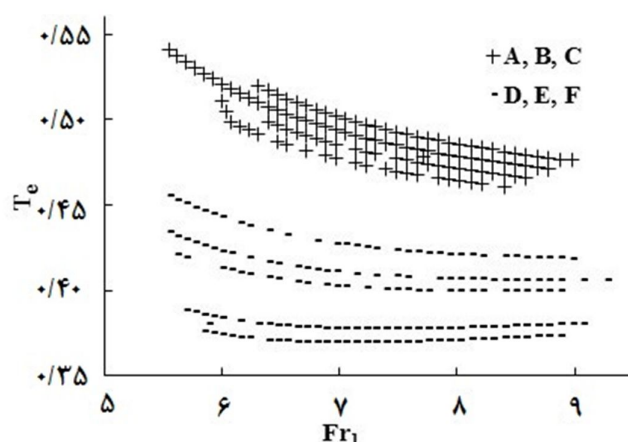
مطابق شکل 5 در آرایش زیگزاگی با افزایش عدد فرود،  $\frac{L_j}{y_2^*}$  نیز افزایش می‌یابد و هرچه عدد فرود بزرگ‌تر می‌شود شیب نقاط برازش داده شده کم‌تر می‌گردد به طوری که تغییرات  $\frac{L_j}{y_2^*}$  در محدوده 2/8 تا 3/3 قرار می‌گیرد و مقدار  $\frac{L_j}{y_2^*}$  به طور میانگین 3/1 محاسبه می‌شود. در آرایش ردیفی به ازای  $Fr_1 < 7$  تغییرات  $\frac{L_j}{y_2^*}$  روند افزایشی دارد و در  $Fr_1 > 7$  مقدار ثابت 3/8 می‌رسد. به طور کلی تغییرات طول پرش در اعداد فرود بالا مستقل از اعداد فرود می‌باشد. بنابراین آرایش زیگزاگی در مقایسه با آرایش ردیفی در کاهش طول پرش  $(\frac{L_j}{y_2^*})$  اثر بیش‌تری

دارد.

در شکل 6 محدوده کاهش طول پرش هیدرولیکی  $(T_e)$  برای بسترهای زبر مورد آزمایش در مقایسه با بستر صاف در آرایش زیگزاگی بین 46 تا 54 درصد و آرایش ردیفی 37 تا 46 درصد می‌باشد. آرایش زیگزاگی باعث کاهش 49 درصدی طول پرش و آرایش ردیفی موجب کاهش 39 درصدی طول پرش گردید. نتایج نشان داد که بسترهای زبر با آرایش زیگزاگی در مقایسه با آرایش ردیفی نتایج بهتری در کاهش طول نسبی پرش داشته است به طوری که در یک عدد فرود یکسان، میزان کاهش طول پرش در آرایش زیگزاگی بیش‌تر از آرایش ردیفی بوده است.



شکل 5- طول نسبی پرش برای بسترهای زیر با آرایش زیگزاگی و ردیفی و برای بستر صاف



شکل 6- تغییرات کاهش طول نسبی پرش در مقابل عدد فرود برای بسترهای زیر با آرایش زیگزاگی (A، B و C) و آرایش ردیفی (D، E و F)

انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک (G%) به ازای کلیه اعداد فرود اولیه  $Fr_1$  در محدوده 19 تا 31 درصد قرار دارد و در آرایش ردیفی G% بین 20 تا 34 درصد می‌باشد.

در آرایش ردیفی به‌طور میانگین درصد افزایش نرخ استهلاک انرژی نسبت به پرش کلاسیک 26 درصد و مقدار این پارامتر در آرایش زیگزاگی 23 درصد به‌دست آمد. بنابراین درصد افزایش نرخ استهلاک انرژی در آرایش ردیفی کمی بیش‌تر از آرایش زیگزاگی محاسبه می‌شود. با افزایش عدد فرود اولیه درصد افزایش نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک برای هر دو آرایش رو به کاهش بوده است.

در تحقیق حاضر برای بسترهای زیر مکعبی مورد آزمایش با آرایش زیگزاگی در محدوده عدد فرود 5/5 تا 9 نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک  $(\frac{L_j}{y_2^*})$  3/1، برای آرایش ردیفی، 3/8 و به ازای کلیه بسترهای زیر به‌طور میانگین 3/4 به‌دست آمد و براساس آزمایش‌های انجام شده توسط محققان در زمینه پرش هیدرولیکی

#### استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی

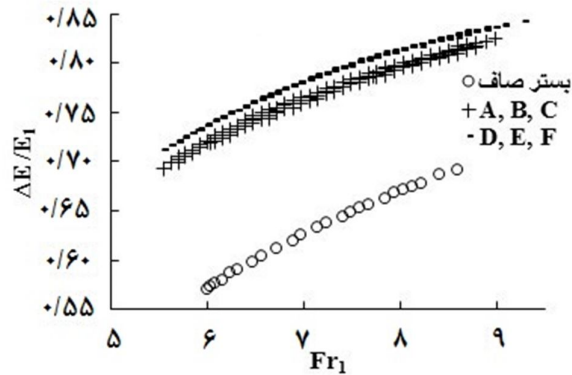
اثر آرایش زیگزاگی و ردیفی، مقایسه آن با بستر صاف و استخراج روابط حاکم

شکل 7 مقادیر استهلاک نسبی انرژی به ازای اعداد فرود اولیه را نشان می‌دهد که با مقادیر استهلاک نسبی انرژی در بستر صاف مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل مذکور نشان داده شده استهلاک نسبی انرژی در آرایش ردیفی (D، E و F) اندکی بیش‌تر از آرایش زیگزاگی (A، B و C) می‌باشد و به ازای عدد فرود یکسان میزان استهلاک نسبی انرژی در هر دو آرایش بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد و با افزایش عدد فرود روند افزایشی خواهد داشت. بررسی معنی‌داری اثر آرایش‌ها در ادامه توضیح داده خواهد شد. روابط به‌دست آمده بین  $\frac{\Delta E}{E_1}$  و  $Fr_1$  با استفاده از رگرسیون غیرخطی، با توجه به مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطح یک درصد به‌صورت معنی‌داری مطابق جدول 2 می‌باشد.

طبق شکل 8 در آرایش زیگزاگی درصد افزایش نرخ استهلاک

بستر زبر و صاف به ازای اعداد فرود اولیه در تحقیق حاضر و مطالعات مشابه را نشان می‌دهد. مقدار استهلاک نسبی انرژی در بسترهای زبر مختلف بیش‌تر از بستر صاف است و این اختلاف با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر روی بسترهای زبر مکعبی در محدوده عدد فرود 5/5 تا 9 حداکثر استهلاک نسبی انرژی به‌طور میانگین 78 درصد به‌دست آمد. بنابراین بستر زبر مکعبی در افزایش استهلاک انرژی نسبت به سایر بسترها عملکرد مناسبی دارد.

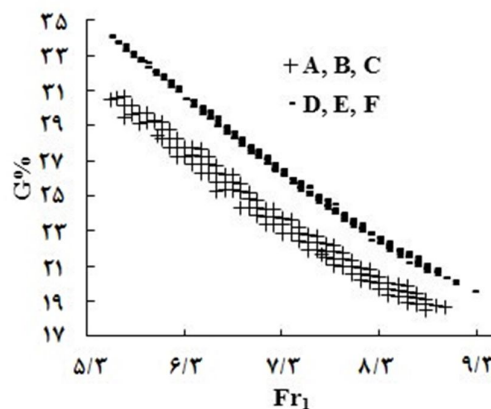
روی بسترهای زبر مختلف، نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک  $\frac{L_j}{y_2}$  به‌صورت جدول 3 ارایه شده است. بنابراین با توجه به جدول 3، نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک در مطالعه حاضر با مطالعات سایر محققان هم‌خوانی مناسبی دارد و محدوده تغییرات نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک به‌ازای اعداد فرود مختلف روی بسترهای زبر 2 تا 4/5 بوده است. شکل 9 میزان استهلاک نسبی انرژی پرش هیدرولیکی روی



شکل 7- میزان استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر با آرایش زیگزاگی (A، B و C) و آرایش ردیفی (D، E و F) و بستر صاف به ازای عدد فرود اولیه

جدول 2- روابط به‌دست آمده از استهلاک نسبی انرژی برای دو آرایش مورد مطالعه

نوع آرایش	تعداد داده‌ها	رابطه ارایه‌شده	ضریب همبستگی محاسبه‌شده	مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری 1 درصد
زیگزاگی	308	$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0046Fr_1^2 + 0.1035 Fr_1 + 0.2658$	0/9978	0/147
ردیفی	325	$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0055Fr_1^2 + 0.1153 Fr_1 + 0.2427$	0/99994	0/145

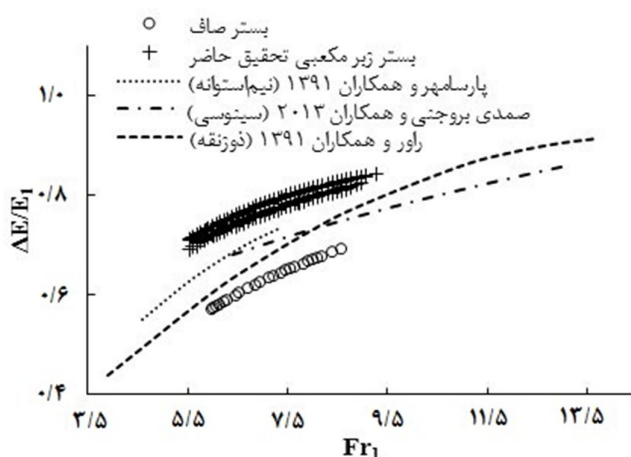


شکل 8- درصد نرخ افزایش استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک در آرایش زیگزاگی (A، B و C) و آرایش ردیفی (D، E و F)



جدول 3- نسبت طول پرش به عمق نانویه پرش کلاسیک در تحقیقات سایر محققان

محقق	بستر	$\frac{L_j}{\bar{y}_j}$
(Ead&Rajaratnam, 2002)	سینوسی	2
(Tokuy, 2005)	سینوسی	4
(Abbaspour& et al., 2009)	سینوسی	(برای اعداد فرود بیش تر از 6) 3 و (برای اعداد فرود کم تر از 6) 3/5
بدیع زادگان و همکاران	سینوسی	(برای اعداد فرود بیش تر از 6) 4 و (برای اعداد فرود کم تر از 6) 3/5
(Izadjoo&ShafaiBajestan, 2007)	دوزنقه متساوی ساقین	3
غزالی و همکاران 1389	مثلثی	2/72
نژندعلی و همکاران 1391	مثلثی قائم زاویه	(برای اعداد فرود بیش تر از 6) 3/5 و (برای اعداد فرود کم تر از 6) 4/5
راور و همکاران 1391	دوزنقه قائم زاویه	3/5
پارسامهر و همکاران 1391	نیم استوانه‌ای	3/5



شکل 9- مقایسه استهلاک نسبی انرژی در مقابل عدد فرود در مطالعه حاضر و سایر تحقیقات انجام شده

استفاده گردید (مومنی و فعال قیومی، 1386). با توجه به توضیحات فوق، برای بررسی معنی داری از آزمون‌های مذکور استفاده شد که به عنوان نمونه برای تعدادی از بسترهای مورد آزمایش، 3 آزمون مذکور برای داده‌های طول نسبی و استهلاک نسبی پرش به تفصیل بیان و برای بقیه بسترها نتایج به صورت جمع بندی ارائه شده است.

#### بررسی اثر آرایش زیگزاگی (B4) و ردیفی (E4) بر استهلاک نسبی انرژی پرش (آزمون t)

قسمت اول جدول 4 مربوط به آزمون لون است که برابری واریانس‌ها را بررسی می‌کند با توجه به این که مقدار پارامتر معنی داری از 5 درصد بیش تر می‌باشد، فرض صفر مبنی بر برابر بودن واریانس دو جامعه تایید شد. بنابراین برای بررسی برابری میانگین‌ها (آزمون تی) از نتایج سطر اول (واریانس‌های برابر) استفاده شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری بین میانگین دو جامعه وجود دارد چون مقدار پارامتر معنی داری محاسبه شده کم تر از 0/05 می‌باشد (sig. < 0/05) (2-tailed). به عبارت دیگر فرض صفر رد شد و وجود تفاوت

#### تحلیل آماری

آنالیز آماری داده‌ها به وسیله نرم افزار SPSS برای سطح معنی داری 0/05 درصد انجام شد. برای بررسی نرمال بودن متغیرها از آزمون شاپیرو-ویلک<sup>1</sup> استفاده گردید. به دلیل این که روش نرمال سازی (تبدیل لگاریتمی) برای برخی داده‌های غیر نرمال پاسخ گو نبود از روش‌های غیر پارامتریک استفاده گردید. برای مقایسه میانگین دو جامعه برای متغیرهای نرمال از آزمون t و برای متغیرهای غیر نرمال از آزمون من-ویتنی<sup>2</sup> استفاده شد. برای مقایسه میانگین چند جامعه از آزمون کروسکال-والیس<sup>3</sup> (به دلیل نرمال نبودن داده‌های مورد مقایسه) بر اساس نمونه‌های مستقل از آن‌ها استفاده گردید. در آزمون t و آزمون من-ویتنی به ترتیب برای بررسی این که میانگین کدام دو گروه بیش تر است از حد بالا و پایین مربوط به فاصله اطمینان 95 درصد برای تفاضل میانگین دو گروه و از میانگین رتبه‌ها

1- Shapiro-Wilk

2- Man-Withney

3- Kruskal-Wallis



تفاضل میانگین دو گروه استفاده شد با توجه به این که حد بالا و پایین منفی است بنابراین میانگین طول نسبی بستر زبر B4 کم‌تر از E4 می‌باشد به عبارتی دیگر مقادیر استهلاک نسبی در بستر با آرایش زیگزاگی کم‌تر از آرایش ردیفی می‌باشد.

معنی‌داری بین داده‌های طول نسبی پرش در بستر زبر با آرایش زیگزاگی و بستر زبر با آرایش ردیفی تایید شد. برای بررسی این که میانگین کدام دو گروه B4 و E4 بیش‌تر است از حد بالا و حد پایین مربوط به فاصله اطمینان 95 درصد برای

جدول 4- خروجی آزمون t در SPSS برای مقایسه میانگین دو بستر (آزمون پارامتریک)

آزمون نمونه‌های مستقل					آزمون لون برای برابری واریانس		
فاصله اطمینان 95٪ از اختلاف‌ها		اختلاف خطای استاندارد شده	مقدار پارامتر معنی‌داری محاسبه شده	درجه آزادی	آماره t	مقدار پارامتر معنی‌داری محاسبه شده	آماره F
حد پایین	حد بالا						
-0/01469	-0/03966	0/0062	-0/0271	0/000	46	-4/383	0/247
فرض واریانس‌های برابر							
B4 فرض							
E4 فرض							
-0/01469	-0/03966	0/0062	-0/0271	0/000	44/885	-4/383	
واریانس‌های نابرابر							

مقدار معنی‌داری محاسبه شده کم‌تر از 0/05 باشد در این صورت فرض صفر که عدم تفاوت بین گروه‌هاست رد می‌شود. با توجه به مقدار پارامتر معنی‌داری محاسبه شده صفر، حداقل دو میانگین از این گروه‌ها متفاوتند. به عبارت دیگر حداقل دو میانگین از نسبت طول نسبی پرش از بسترهای ABC با آرایش زیگزاگی، بسترهای DEF با آرایش ردیفی و بستر صاف با هم تفاوت معنی‌داری دارند.

بررسی اثر آرایش زیگزاگی (B3) و ردیفی (E3) بر نسبت طول نسبی پرش (آزمون من - ویتنی)

با توجه به جدول 5، مقدار پارامتر معنی‌داری آزمون، معادل با عدد صفر به دست آمد که با این مقدار فرض صفر مبنی بر برابر بودن میانگین‌ها رد می‌شود و این یعنی این که طول نسبی پرش در دو آرایش زیگزاگی و ردیفی تفاوت معنی‌داری با هم دارند. مطابق جدول 6 می‌توان میانگین رتبه‌ها را به تفکیک برای هر گروه مشاهده نمود. میانگین رتبه طول نسبی پرش در بستر با آرایش ردیفی E3 بیش‌تر از آرایش زیگزاگی B3 می‌باشد.

جدول 6- خروجی آزمون من - ویتنی

رتبه‌ها			
مجموع رتبه‌ها	میانگین رتبه	تعداد داده‌ها	گروه
300/00	12/50	24	B3
876/00	36/50	24	E3

جدول 5- خروجی آزمون من - ویتنی در SPSS برای مقایسه میانگین دو بستر (آزمون ناپارامتریک)

آماره‌های آزمون	
B3 E3	
0/00	من - ویتنی
300/00	ویلکاکسن
0/00	معنی‌داری

جدول 7- خروجی آزمون کروسکال - والیس در SPSS برای مقایسه میانگین چند بستر (ناپارامتریک)

آماره‌های آزمون	
ABC DEF SMOOTH	
508/974	مجذور کای
2	درجه آزادی
0/000	معنی‌داری

بررسی اثر بسترهای زبر با آرایش زیگزاگی (ABC)، ردیفی (DEF) و بستر صاف بر نسبت طول نسبی پرش (آزمون کروسکال - والیس)

طبق جدول 7 برای اثبات تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها باید

## اثر آرایش و مقایسه بستر زبر با صاف

پرش معنی‌دار شد. در مقایسه دوتایی بسترها در سطح 5 درصد، اثر آرایش بر استهلاک نسبی انرژی در هشت مورد بستر زبر (A5، B5؛ B3، E3؛ B4، E4؛ B5، E5؛ C2، F2؛ C3، F3؛ C4، F4 و C5، F5) دارای تفاوت معنی‌داری شد و در چهار مورد بستر زبر مورد مقایسه (A2، D2؛ A3، D3؛ A4، D4 و A5، D5) تفاوتی وجود نداشت.

طول نسبی پرش و استهلاک نسبی انرژی در همه بسترهای زبر با آرایش ردیفی (DEF) بیش‌تر از آرایش زیگزاگی (ABC) است و روی بستر صاف بیش‌تر از بسترهای زبر با آرایش‌های مختلف می‌باشد.

در جدول 8 با توجه به نرمال بودن یا نرمال نبودن داده‌ها برای مقایسه چندتایی از آزمون کروسکال - والیس استفاده شد سپس برای داده‌های نرمال و غیرنرمال به ترتیب از آزمون‌های t من - ویتنی برای مقایسه دوتایی بسترها استفاده شد. اثر آرایش‌های زیگزاگی و ردیفی و مقایسه بستر زبر با بستر صاف روی بسترهای مختلف بر طول نسبی و استهلاک نسبی پرش در جدول 8 مشاهده می‌گردد. برای بررسی اثر آرایش‌های مورد مطالعه، بسترهایی با ردیف‌ها و زوایای مشخص در دو آرایش زیگزاگی و ردیفی مورد بررسی قرار گرفت. در مقایسه دوتایی و چندتایی بسترها، اثر آرایش بر طول نسبی

جدول 8- خلاصه تحلیل آماری نتایج برای مقایسه طول نسبی و استهلاک نسبی انرژی در بسترهای مورد مطالعه

ردیف	زاویه	بستر	$\frac{L_1}{y_2}$	$\frac{\Delta E}{E_1}$	
2	90	A2 D2	A2 < D2	A5 < D5	
3		A3 D3	A3 < D3		
4		A4 D4	A4 < D4		
5		A5 D5	A5 < D5		
2		B2 E2	B2 < E2		
3	45	B3 E3	B3 < E3	B5 < E5	
4		B4 E4	B4 < E4		
5		B5 E5	B5 < E5		
2		C2 F2	C2 < F2		C5 < F5
3		C3 F3	C3 < F3		
4	C4 F4	C4 < F4			
5	C5 F5	C5 < F5			
2	ترکیبی	C2 F2	C2 < F2	F5 < E5	
3		C3 F3	C3 < F3		
4		C4 F4	C4 < F4		
5		C5 F5	C5 < F5		
2		D2 A2	D2 < A2		D5 < A5
3	D3 A3	D3 < A3			
4	D4 A4	D4 < A4			
5	D5 A5	D5 < A5			
2	E2 B2	E2 < B2	E5 < B5		
3	E3 B3	E3 < B3			
4	E4 B4	E4 < B4			
5	E5 B5	E5 < B5			

بسترهای زبر با آرایش زیگزاگی، ردیفی و بستر صاف  
 ABC < DEF    ABC < DEF  
 SMOOTH < ABC    ABC < SMOOTH    ABC DEF SMOOTH  
 SMOOTH < DEF    DEF < SMOOTH

## نتیجه‌گیری

و به ازای عدد فرود یکسان میزان استهلاک نسبی انرژی در هر دو آرایش بیش‌تر از بستر صاف محاسبه شد و با افزایش عدد فرود روند افزایشی نشان داد.

4- در آرایش زیگزاگی درصد افزایش نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک (%G) برای کلیه اعداد فرود اولیه  $F_{T1}$  بیش‌تر از آرایش ردیفی بوده است. با افزایش عدد فرود اولیه درصد افزایش نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک برای هر دو آرایش روند کاهشی نشان داد.

5- بسترهای زبر در مقایسه با بستر صاف موجب افزایش استهلاک نسبی انرژی و کاهش نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک می‌شود.

1- در آرایش زیگزاگی با افزایش عدد فرود، نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک ( $\frac{L_1}{y_2}$ ) افزایش یافته است و در آرایش ردیفی به ازای اعداد فرود کوچک‌تر، تغییرات  $\frac{L_1}{y_2}$  روند افزایشی نشان داد و در اعداد فرود بزرگ‌تر تقریباً به مقدار ثابتی رسید. تغییرات طول پرش در اعداد فرود بالا تقریباً مستقل از اعداد فرود به‌دست آمد.

2- درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی ( $T_e$ ) برای بسترهای زبر مورد آزمایش در مقایسه با بستر صاف در آرایش زیگزاگی بیش‌تر از آرایش ردیفی محاسبه شد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر آرایش زیگزاگی در کاهش طول پرش می‌باشد.

3- استهلاک نسبی انرژی ( $\frac{\Delta E}{E_1}$ ) در آرایش ردیفی (D، E و F) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از آرایش زیگزاگی (A، B و C) به‌دست آمد

- Hydraulics Division, 83(HY5): 1401-1406.
- Carollo, F.G., Ferro, V. and Pampalone, V. 2007. Hydraulic Jumps on Rough Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133.9: 989-999.
- Chern, M.J and Syamsuri, S. 2013. Effect of Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristic Using SPH Method. *Journal of Hydraulic Engineering*.139.2: 221-232.
- Ead, S.A. and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic Jump on Corrugated Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 128.7: 656-663.
- Elnikhely, E.A. 2014. Effect of Staggered Roughness Elements on Flow Characteristics in Rectangular Channel. *IJRE: International Journal of Research in Engineering and Technology*. Volume: 03 Issue: 08. 12 pp.
- Hager, W.H. and Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump; Sequent Depths. *Journal of Hydraulic Research*. 27.5: 565-585.
- Hager, W.H., Bremen, R. and Kawagowshi, N. 1990. Classical hydraulic jump: Length of roller. *Journal Hydraulic Res.*, 28.5: 591-608.
- Izadjoo, F. and Shafai Bajestan, M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Journal of Applied Sciences*, 7.8: 1164-1169.
- Peterka, A.J. 1978. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipater. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington. 240 pp.
- Rajaratnam, N. 1965. The Hydraulic Jump as a Wall Jet, *Journal of the Hydraulics Division*. 91.5: 107-132.
- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic Jump on Rough Bed. *Transaction of the Engineering Institute of Canada*. 11.2:1-8.
- Rajaratnam, N. 1976. *Turbulent Jets*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, the Netherlands, 303 pp.
- Samadi Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B and Fattahi Nafchi, R. 2013. Effect of Triangular Corrugated Beds on the Hydraulic Jump Characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 40: 841-847.
- Tokyay, N.D. 2005. Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps. *Water & Environmental Resources Congress*, Anchorage, Alaska, USA, 8 pp.
- USBR. 1955. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipater.
- منابع**
- بدیع‌زادگان، ر.، صانعی، م. و اسماعیلی، ع. 1393. مقایسه مشخصات پرش هیدرولیکی روی انواع بسترهای زبر موج‌دار. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. 8. 2: 220-232.
- بیرامی، م. ک. 1390. سازه‌های انتقال آب. دانشگاه صنعتی اصفهان، 462 ص.
- پارسامهر، پ.، حسین‌زاده‌دلیر، ع.، فرسادی‌زاده، د. و عباسپور، ا. 1391. پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*. 26. 3: 775-785.
- حسینی، م. و ابریشمی، ج. 1390. هیدرولیک کانال‌های باز. دانشگاه امام رضا، مشهد، 612 ص.
- راور، ز.، فرهودی، ج. و نژدعلی، ع. 1391. تاثیر بستر زبر دوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، دانشگاه فردوسی مشهد. 26. 1-85:94.
- شکریان، م. و شفاعی بجستان، م. 1393. اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر خصوصیات پرش نوع B. *نشریه آب و خاک*. 24. 2: 215-226.
- غزالی، م.، صمدی بروجنی، ح.، قربانی، ب. و فتاحی نافچی، ر. 1389. تأثیر بستر موج‌دار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. *مجله پژوهش آب ایران*. 7: 99-107.
- نژدعلی، ع.، اسماعیلی، ک. و فرهودی، ج. 1391. اثر فاصله زبری‌های مثلثی بستر بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، دانشگاه فردوسی مشهد. 26. 2: 289-282.
- مردانی، م.، رحیم‌زاده، ح. و سرکرده، ح. 1394. تحلیل و بررسی استفاده از بلوک بر عملکرد حوضچه‌های آرامش. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*. دوره 15. 6: 31-41.
- مومنی، م. و فعال‌قیومی، ع. 1386. تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS. *نشر کتاب نو*. چاپ اول. 302 ص.
- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D. and Sadraddini, A.A. 2009. Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics. *Journal of Hydro-environment Research* 3:109-117.
- Bradley, J.N. and Peterka, A.J. 1957. The Hydraulic Design of Stilling Basin. *ASCE Journal of*

## Experimental Investigation of Energy Dissipation and Hydraulic Jump Length in Rough bed Condition With Cubic Blocks Downstream Sluice gate

F. Asadi<sup>1</sup>, R. Fazloula<sup>2\*</sup>, A.R. Emadi<sup>3</sup>

Received: Jan.25, 2017

Accepted: Feb.20, 2017

### Abstract

Energy dissipation structures are device to control of hydraulic jump, in addition to dissipation of water energy. In this research, experimental investigation the effect of cubic roughness was done with staggered and strip arrangements in different angles and rows on jump length and energy dissipation. For this purpose, in laboratory model used from flume with length of 12, width of 0.5 and height 0.7 meters and rough beds placed in downstream of sharp sluice gate. Experiments was performed for Froude number between 4.5 to 9. The results showed staggered arrangement produced better performance compare to strip arrangement in terms of decreasing relative length, moreover, value showed 49 percent, so that percent of decreasing hydraulic jump length for tested rough beds in compare with smooth bed calculated in range of 46 to 54 percent for staggered arrangement and 37 to 46 percent in strip arrangement. Jump relative length ( $\frac{L_j}{y_2}$ ) increases for staggered arrangement with increasing Froude number and for strip arrangement the variation of  $\frac{L_j}{y_2}$  in high Froude number are independent of Froude numbers. The percent of increasing hydraulic jump energy dissipation rate was in range of 19 to 31 for staggered arrangement and 20 to 34 percent in strip arrangement.

**Keywords:** Jump relative length, Laboratory model, Range of Froude number, Staggered, Strip arrangement

---

1- M.Sc. Student, Department. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
2- Associate Prof., Department. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
3- Associate Prof., Department. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
(\*- Corresponding Author Email: raminfazl@yahoo.com)