

## بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با بستر زبر مکعب مستطیلی

اکرم عباسپور<sup>1\*</sup>، محمدرضا عبدیان رکنی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 1394/10/7 تاریخ پذیرش: 1395/7/26

### چکیده

پرش هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است که مورد توجه مهندسين هیدرولیک می‌باشد که برای استهلاک انرژی جریان در انتهای سازهایی نظیر سدها، تن آب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، به منظور حفاظت پایین دست حوضچه آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق زبری بستر و واگرایی حوضچه به طور هم‌زمان بررسی شدند و زبری‌ها در حوضچه‌هایی با دیواره‌های واگرا با زوایای 0، 2، 4، 6 و 8 درجه و هر کدام از این حالت‌ها با 6 عدد فرود (دبی) مختلف آزمایش شده است. در مجموع 190 آزمایش در محدوده اعداد فرود 5 تا 8 انجام شد. مقدار کاهش نسبی عمق مزدوج پرش به طور متوسط برای زوایای انتخابی به ترتیب برابر 10، 17/2، 22، 25 و 25/5 درصد بدست آمد. میانگین کاهش طول نسبی پرش برای زوایای مورد نظر با بستر زبر به ترتیب برابر 45/5، 55، 56/1، 64 و 66/2 درصد بدست آمده است. میانگین کاهش طول پرش هیدرولیکی برای زبری‌های مکعب مستطیلی 60/3 درصد بدست آمد. البته واگرایی حوضچه به تنهایی و بدون اعمال زبری نیز تاثیر بسیار زیادی بر کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی بین 37 تا 47 درصد دارد و این کاهش با افزایش زاویه واگرایی حوضچه نسبت مستقیم دارد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو عامل واگرایی دیواره حوضچه آرامش و زبری بستر باعث کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی می‌شوند. این مساله موجب می‌شود که ساخت حوضچه اقتصادی‌تر شود و کنترل پرش بهتر صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: بستر زبر، پرش هیدرولیکی حوضچه واگرا، طول پرش، عمق مزدوج

### مقدمه

اقتصادی‌تر و ایمن‌تر طراحی شوند (Rajaratnam., 1976).

برای کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی و همچنین افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی ممکن است از یک سری دیواره یا آب‌پایه در طول پرش یا از یک سری بلوک‌های بتنی استفاده شود. بررسی محققین نشان می‌دهد که دیواره واگرای حوضچه با بستر صاف، باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول نسبی گرداب پرش می‌شود. همچنین مطالعات اخیر نشان می‌دهد بستر زبر در کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی موثر می‌باشد.

حوضچه‌های آرامش واگرا با مقطع مستطیلی یک نوع از حوضچه‌های آرامش می‌باشد که به دلیل عدم نیاز به استفاده از سازه تبدیل در ابتدا و انتهای آن، در صورتی که از نظر نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت نسبی انرژی، قابل رقابت با حوضچه‌های کلاسیک باشند، جایگزین مناسبی برای این نوع حوضچه‌ها خواهند بود. با توجه به این که در مورد مقاطع مستطیلی واگرا با بستر زبر تحقیقی گزارش نشده است بنابراین این تحقیق صورت پذیرفت.

محققین زیادی در این زمینه تحقیقات خود را انجام داده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان کچ و کارستانجن، لیندکویست، سفرانز، راجاراتنام، هاگر و برمن و سایر محققین صورت گرفته است (Koch and Carstanjen., 1926 Safranez., 1927; Rajaratnam., 1976;

پرش هیدرولیکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک بوده و در زمره جریان‌های متغیر سریع طبقه‌بندی می‌شود. این پدیده امکان استهلاک انرژی اضافی آب را در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، تندآب‌ها، و دریچه‌ها فراهم می‌آورد. به طور کلی پرش هیدرولیکی دارای خصوصیتی است که در آن انرژی جنبشی مازاد جریان تلف می‌شود. از این ویژگی مهم به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها و غیره استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت پرش هیدرولیکی در هفتاد سال گذشته به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و اطلاعات جامعی نیز منتشر شده است. هدف از این مطالعات شناخت بهتر مکانیزم پرش و ایجاد روابطی برای پیش بینی خصوصیات آن نظیر طول پرش، عمق پایاب مورد نیاز، میزان استهلاک انرژی، توزیع سرعت جریان، نوسانات فشار و نیز پروفیل سطح آب در طول پرش بوده است. برآورد دقیق این خصوصیات کمک کرده است تا سازه‌های مستهلک کننده انرژی،

1- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

2- کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

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

Hager and Bremen., 1989).

معمولا جهت تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از بلوک‌ها و آب‌پایه‌ها استفاده می‌شود. استفاده از اجزای زبر در حوضچه آرامش موجب افزایش کارایی حوضچه، کاهش عمق ثانویه و طول پرش می‌گردد. در مورد پرش هیدرولیکی روی بستر زبر مطالعات مفصلی توسط محققین انجام گرفته است (Hughes and Flack., 1984).

از آن‌جا که هزینه قابل توجهی از طراحی و اجرای سدها به حوضچه آرامش مربوط می‌شود و نیز به خاطر اهمیت قابل توجهی که موضوع استهلاک انرژی و به تبع آن میزان فرسایش پایین دست حوضچه دارد محث طراحی هیدرولیکی در راستای اهداف کاهش ابعاد و افزایش راندمان حوضچه آرامش دارای اهمیت خواهد بود.

عباس‌پور و همکاران تاثیر بستر موج‌دار سینوسی شکل بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در محدوده وسیع‌تری از شیب موج بستر  $(t/s)$  با ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  در بازه  $0/32$  تا  $1/67$  و  $s/y_1$  در بازه  $0/85$  تا  $3/33$  بررسی نمودند (Abbaspour et al., 2009).

خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای با زبری‌های نواری مستطیلی توسط گوهری و فرهودی مورد مطالعه قرار گرفت (Gohari and Farhoudi., 2009). بر اساس نتایج این تحقیق، با افزایش فاصله بین زبری‌ها عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد. نژندعلی و همکاران (2011) اثر زبری‌های عرضی مثلثی را در کف حوضچه بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی با سه ارتفاع زبری و چهار فاصله متفاوت بین زبری‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر 18 درصد افزایش می‌یابد.

امید و اسمعیلی ورکی به دو صورت تئوری و آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه‌ای واگرا را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها پژوهش خود را در مورد تاثیر توام تغییرات شیب جانبی و واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش بر پرش هیدرولیکی انجام دادند (Omid and EsmaeeliVaraki., 2004). موحدان و دادمهر روی اثرات واگرایی ناگهانی و تدریجی مقطع مستطیلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی تحقیقاتی را انجام دادند (Movahedan and Dadmehr, 2009). گرد نوشهری و همکاران به بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی کنترل شده توسط آستانه لبه تیز در حوضچه‌های آرامش واگرا پرداختند. آن‌ها آستانه‌هایی با ارتفاع‌های مختلف و در موقعیت‌های متفاوت نسبت به پنجه پرش را در حوضچه‌هایی با زوایای واگرایی 3، 5 و 9 درجه قرار دادند (Gord Noshahriet al., 2009). کاشف‌پور و بختیاری پرش هیدرولیکی در حوضچه واگرایی تدریجی با زوایای واگرایی مختلف را بررسی کردند، در آزمایش‌های آن‌ها زوایای واگرایی 5، 12/5، 15، 22/5 و 25 درجه برای حوضچه مورد استفاده قرار گرفتند. پس از انجام آزمایش‌های متعدد و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر، این‌گونه دریافتند که عمق ثانویه پرش با

افزایش زاویه واگرایی کاهش می‌یابد (Kashefpur and Bakhtiari., 2009). والیانی و کالی در مورد مومنتم خطی و زاویه‌ای پرش هیدرولیکی در کانال‌های واگرا تحقیق کردند (Valianiand Caleffi., 2011).

در تحقیق حاضر به منظور بررسی توام تاثیر زبری نواری و واگرایی دیواره حوضچه آرامش بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقطع مستطیلی، آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های مختلف آزمایشگاهی صورت گرفت. در این تحقیق آزمایش‌ها با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند دبی، عمق اولیه و ثانویه پرش، طول پرش، طول غلتان و عرض‌های مقطع واگرا در محل ایجاد اعماق اولیه و ثانویه انجام شد. با روش تحلیل ابعادی پارامترهای بدون بعد موثر بر شرایط پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با زبری بستر مختلف مشخص، و سپس روابط بین عوامل و پارامترهای مورد نظر پرش هیدرولیکی از جمله طول پرش، اعماق مزدوج و انرژی تلف شده در پرش هیدرولیکی با متغیرهای بدون بعد بررسی گردید.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات آزمایش

در تحقیق حاضر شکل بستر زبر به صورت زبری‌های نواری مستطیلی روی شیب افقی با 4 زاویه واگرایی مختلف حوضچه مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک بر روی فلوم فلزی با مقطع مستطیلی به طول 10 متر، عرض  $0/25$  متر و ارتفاع  $0/5$  متر با شیب کف ثابت  $0/002$  انجام گرفت. با توجه به این‌که از فاصله 2 متری از مخزن آب، دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس شیشه می‌باشد، به همین دلیل مدل آزمایشگاهی حوضچه آرامش با دیواره‌های واگرا در فاصله 2 متری از دریچه بالادست که امکان مشاهده پروفیل سطح آب و شرایط جریان وجود دارد، قرار گرفت. شکل 1 فلوم آزمایشگاهی مورد نظر را نشان می‌دهد. کانال مجهز به دریچه تنظیم جریان در ابتدای ورودی کانال و سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه 53 درجه برای اندازه‌گیری دبی جریان در انتهای فلوم است. برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی از دو سطح سنج اولترا سونیک با دقت  $0/1$  میلی‌متر که روی فلوم تعبیه شده بودند استفاده شد و داده‌ها در کامپیوتر ثبت گردید (شکل 1). پروفیل سطح آب در طول کانال توسط عمق سنج با دقت  $0/1$  میلی‌متر در فواصل 10-5 سانتی‌متری اندازه‌گیری شد.

بستر زبر از قطعات مکعب مستطیلی نواری از جنس چوب و به طول متغیر و دو ارتفاع زبری  $1/5$  و  $2/5$  و با عرض‌های  $1/5$  و  $2/5$  سانتی‌متر ساخته شده‌اند. این زبری‌ها با فواصل مختلف سه تا پنج برابر ارتفاع زبری ( $s= 3D, 4D, 5D$ ) بر روی یک ورق PVC چسبانده شدند. هر کدام از این زبری‌ها با یک فاصله ثابت برای 4

فرود بررسی شد. در هر آزمایش پس از نصب زبری بستر با زاویه واگرایی مورد نظر دبی لازم (6 دبی مختلف) و عدد فرود مشخص با تنظیم ارتفاع آب مخزن برقرار می‌گردید. سپس دریچه پایین دست به آرامی بسته می‌شد تا پرش به سمت بالا دست حرکت کرده و به ابتدای حوضچه آرامش واگرا برسد. در همه آزمایش‌ها عمق اولیه جریان  $y_1$ ، عمق ثانویه  $y_2$ ، طول پرش  $L$  و عمق پایاب  $y_t$  ثبت شد.

زاویه واگرایی مختلف (زوایای 2، 4، 6 و 8 درجه) و نیز زاویه صفر درجه مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل 2). مشخصات بستر مکعب مستطیلی شکل و اندازه‌های مختلف زبری در جدول 1 نشان داده شده است.

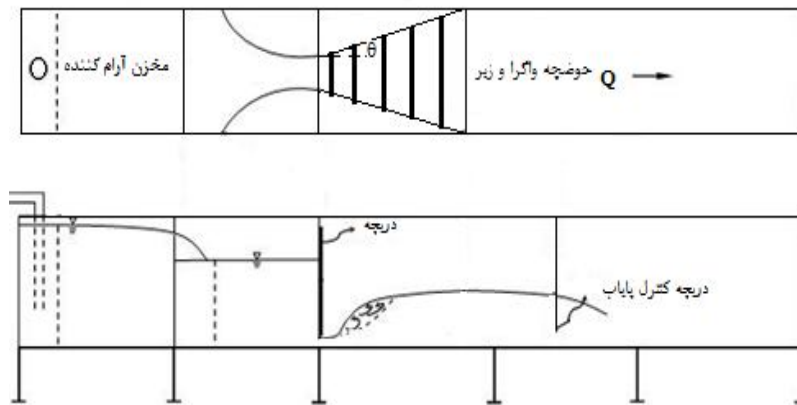
در تحقیق حاضر مدل آزمایشگاهی شامل در مجموع 190 آزمایش پرش هیدرولیکی انجام شد که متغیرهای نظیر شکل زبری، اندازه زبری، فاصله زبری‌ها، زاویه واگرایی حوضچه آرامش و عدد



شکل 1- نمایش فلوم آزمایشگاهی و بستر زبر مکعب مستطیل نواری

جدول 1 - مشخصات بستر زبر مکعب مستطیلی نواری شکل

نام بستر	r(cm)	s(cm)	r/s	Lmax (cm)
R1.2D	1/5	6	0/25	25
R1.3D	1/5	9	0/167	25
R1.4D	1/5	12	0/125	25
R2.2D	2/5	10	0/25	25
R2.3D	2/5	15	0/167	25
R2.4D	2/5	20	0/125	25



شکل 2- طرحی از پلان و مقطع طولی مدل آزمایشگاهی

### نتایج و بحث

در مجموع 190 آزمایش با دبی‌های مختلف و در محدوده اعداد فرود 5 تا 7/8 بر روی زبری‌های مکعب مستطیلی شکل با دو ارتفاع 1/5 و 2/5 سانتی‌متر انجام شد (جدول 1).

#### طول نسبی پرش

بررسی نتایج نشان داد که مقدار متوسط طول نسبی پرش  $(L_j/y_2^*)$  روی بستر صاف و حوضچه بدون واگرایی برابر 5/53 می‌باشد. این مقدار برای حوضچه‌های با بستر صاف و با زاویه واگرایی 2، 4، 6 و 8 درجه به ترتیب برابر 3/6، 3/4، 3 و 2/9 بدست آمد. با این نتایج مشخص می‌شود که واگرایی حوضچه به تنهایی و بدون اعمال زبری تاثیر بسیار زیادی بر کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی داشته که این کاهش بین 37 تا 47 درصد است. کاهش طول نسبی پرش با افزایش زاویه واگرایی حوضچه نسبت مستقیم دارد. برای آزمایش‌هایی که در آن‌ها زبری بستر و واگرایی به طور هم‌زمان اعمال شده بود میزان طول نسبی پرش هیدرولیکی 2/46 تا 2/88 بدست آمد که نشان دهنده کاهش 48 تا 56 درصدی می‌باشد.

تاثیر واگرایی حوضچه آرامش بر طول نسبی پرش هیدرولیکی  $(L_j/y_1)$  به ازای اعداد فرود اولیه در شکل‌های 3 تا 5 به نمایش در آمده است. در این شکل‌ها زبری‌ها و فاصله‌شان از هم ثابت در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه واگرایی طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و مقدار این کاهش با شکل‌های مختلف زبری و تغییر فاصله بین آن‌ها متفاوت می‌باشد.

### تحلیل ابعادی

مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. پارامترهای موثر در پرش هیدرولیکی واگرا بر روی بستر زبر مکعب مستطیلی را به صورت رابطه 1 می‌توان نشان داد:

$$f(\rho, \mu, v_1, y_1, y_2, B_1, B_2, g, \theta, L_j, s, r) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $Fr_1$  عدد فرود اولیه پرش،  $y_1$  و  $y_2$  عمق اولیه و ثانویه پرش،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی،  $\theta$  زاویه واگرایی حوضچه آرامش،  $r$  ارتفاع زبری و  $s$  فاصله بین زبری‌ها می‌باشد، همچنین  $B_1$  و  $B_2$  عرض حوضچه در عمق‌های مزدوج هستند. با استفاده از روش باکینگهام رابطه 2 را می‌توان بدست آورد.

$$f_1\left(\text{Re}, Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{r}{s}, \theta, \frac{B_1}{B_2}\right) = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق  $Fr_1$  عدد فرود اولیه و  $\text{Re}$  عدد رینولدز جریان می‌باشد. با صرف نظر کردن از اثر لزوجت با توجه به عدد رینولدز بالا و ثابت بودن نسبت  $\frac{B_1}{B_2}$  رابطه 2 به صورت رابطه 3 ساده می‌گردد.

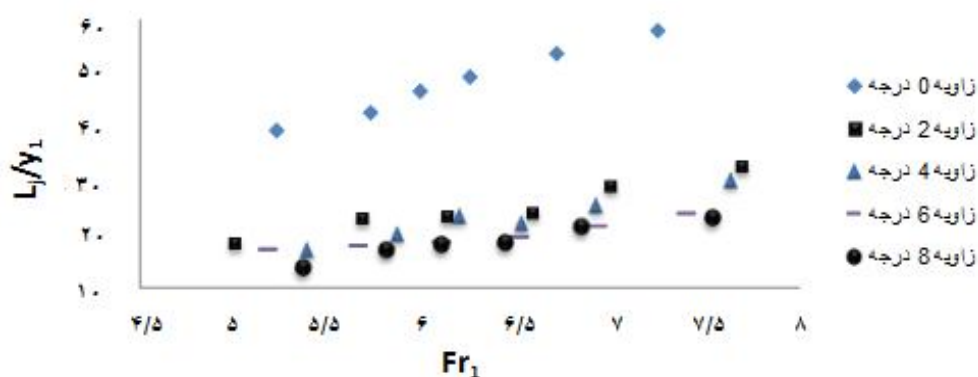
$$f_2\left(Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{r}{s}, \theta\right) = 0 \quad (3)$$

در نهایت رابطه پارامترهای بی بعد عمق نسبی  $\frac{y_2}{y_1}$  و طول پرش

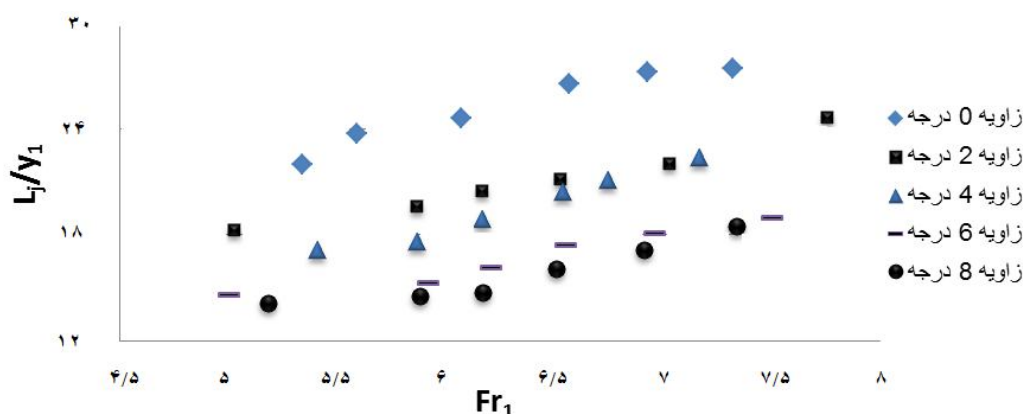
هیدرولیکی  $\frac{L_j}{y_1}$  را می‌توان به صورت رابطه 4 نوشت:

$$\frac{y_2}{y_1} \text{ or } \frac{L_j}{y_1} = f_3\left(Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{r}{s}, \theta\right) = 0 \quad (4)$$

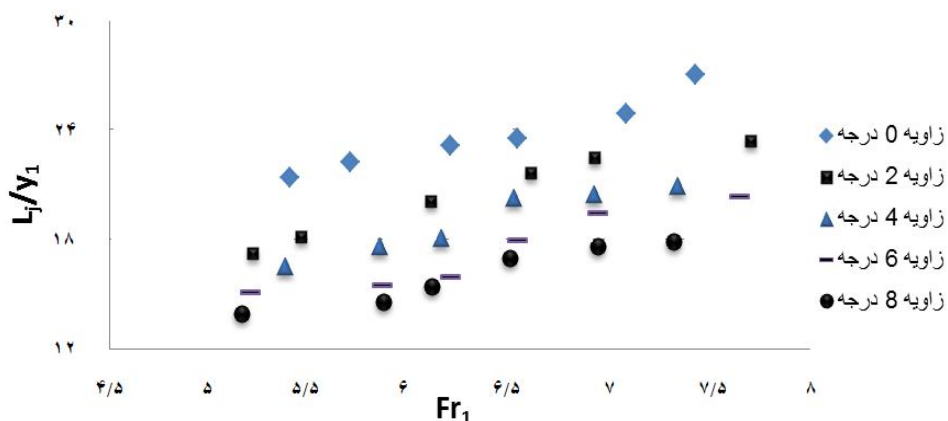
که پارامتر  $r/s$  نشان دهنده زبری بستر است و تاثیر زبری بر روی پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهد.



شکل 3- تغییرات طول نسبی پرش هیدرلیکی به ازای اعداد فرود اولیه در بستر صاف برای زوایای مختلف واگرایی



شکل 4- تغییرات طول نسبی پرش هیدرلیکی به ازای اعداد فرود اولیه در بستر R1.4D برای زوایای مختلف واگرایی



شکل 5- تغییرات طول نسبی پرش هیدرلیکی به ازای اعداد فرود اولیه در بستر R2.3D برای زوایای مختلف واگرایی

واگرایی به ازای اعداد فرود مختلف بررسی و در شکل‌های 6 و 7 نمایش داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که طول پرش با قرار دادن زبری در حوضچه‌ها کاهش می‌یابد و این روند کاهش با واگرایی حوضچه آرامش افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر میانگین کاهش طول پرش هیدرولیکی در زوایای 0، 2، 4، 6 و 8 درجه با بستر زبر به ترتیب برابر 55، 45/5، 55/1، 64 و 66/2 درصد بدست

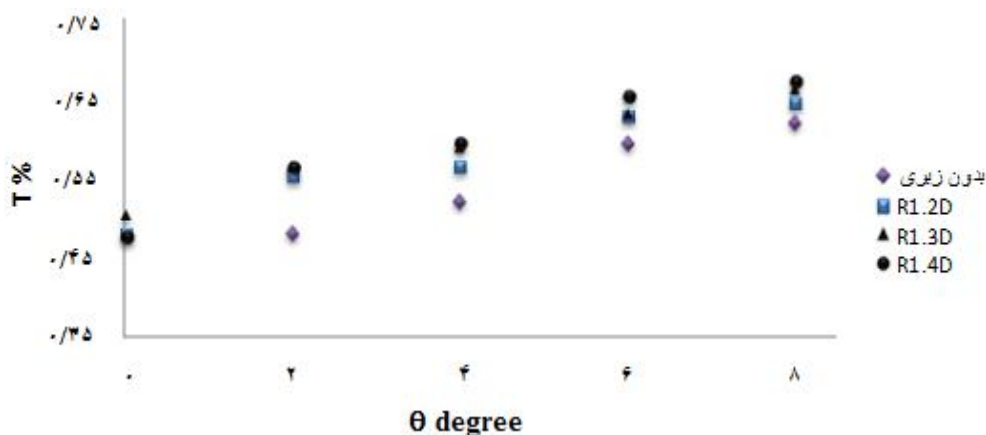
پارامتر کاهش طول نسبی پرش  $T$  توسط اید و راجاراتنام به- شکل رابطه 7 ارائه شده است (Ead and Rajaratnam., 2002).

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*} \quad (7)$$

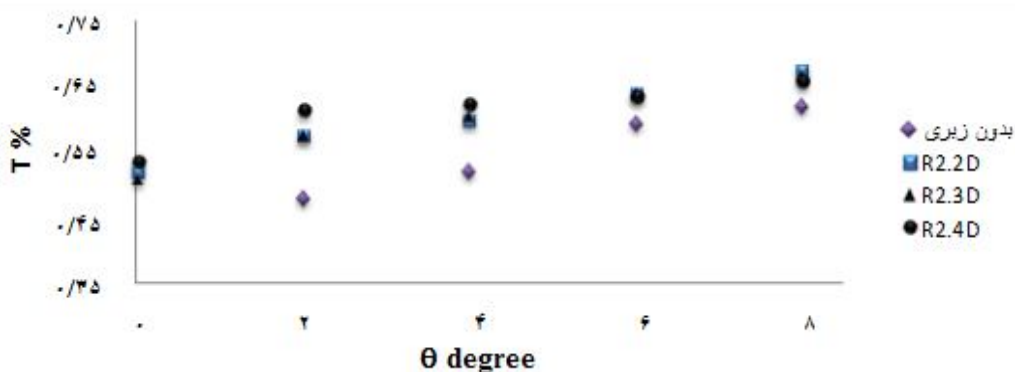
درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی بطور متوسط برای هر زاویه

می‌دهد واگرایی حوضچه هم‌زمان با زبری بستر باعث کاهش بیش‌تر طول پرش هیدرولیکی می‌شوند.

آمد. میانگین کاهش طول پرش هیدرولیکی برای زبری‌های مکعب مستطیلی 60/3 درصد بدست آمد، بنابراین نتایج این تحقیق نشان



شکل 6- درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی به‌ازای زوایای واگرایی برای بستر  $R_1$  با فواصل مختلف

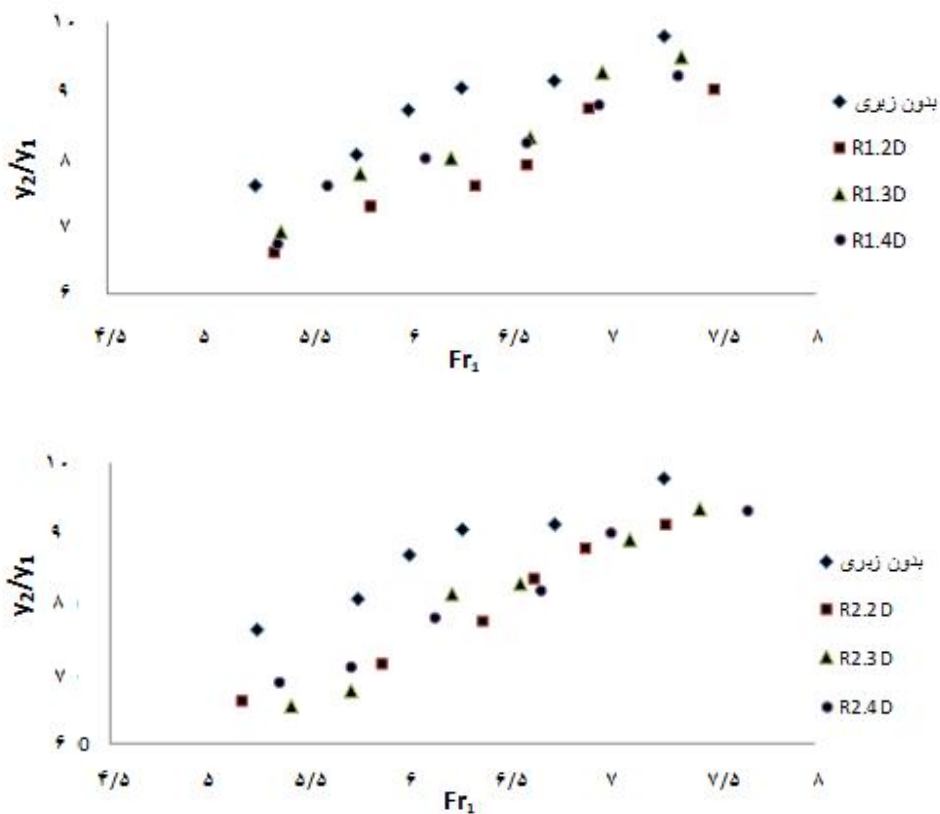


شکل 7- درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی به‌ازای زوایای واگرایی برای بستر  $R_2$  با فواصل مختلف

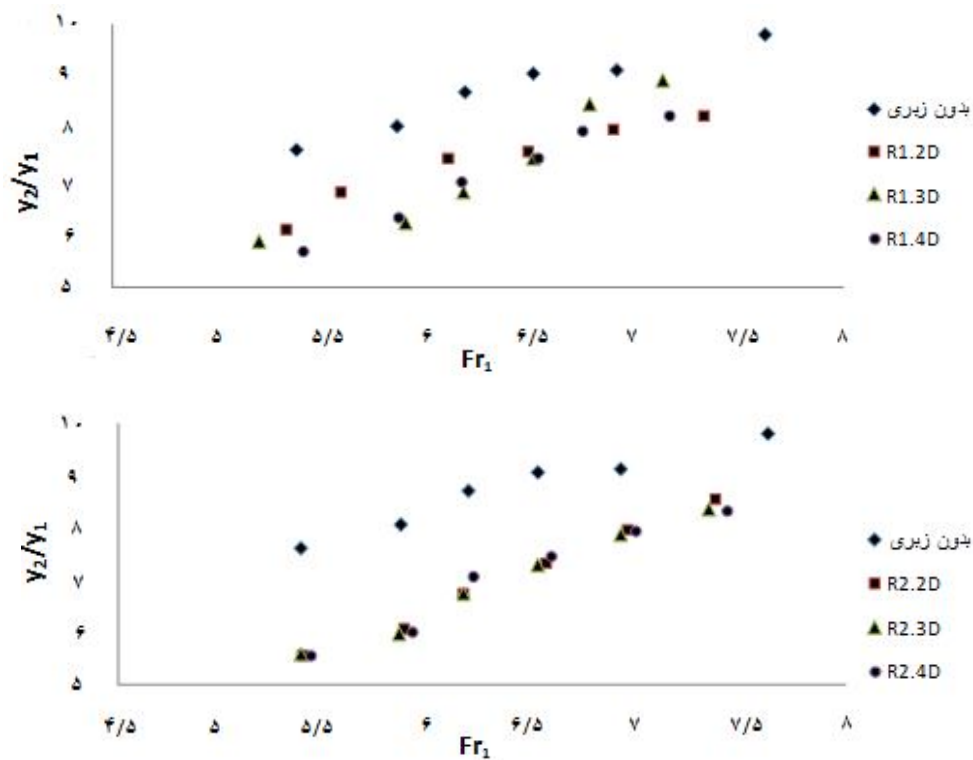
برای کاهش عمق مزدوج نسبی بدست آمد. تاثیر تغییر زاویه واگرایی حوضچه برای یک زبری با شکل، ارتفاع و فاصله یکسان در شکل‌های 11 تا 17 نشان داده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌کنید با افزایش زاویه واگرایی نسبت عمق مزدوج نسبی روند کاهشی پیدا می‌کند، هرچند این مقدار کاهشی از زاویه 6 تا 8 درجه تغییر محسوسی را نشان نداده است. در شکل 11 نتایج آزمایشگاهی با داده‌های اسمعیلی ورکی و همکاران (1393) با شرایط بدون زبری بستر، به‌ازای زوایای 3 و 9 درجه مقایسه شده است. با توجه به این شکل نتایج این تحقیق به‌ازای زاویه 9 درجه با داده‌های اسمعیلی ورکی و همکاران (1393) انطباق بهتری دارد.

در شکل‌های 8 تا 10 تاثیر زبری با فواصل مختلف بر مقادیر عمق مزدوج نسبی در برابر اعداد فرود اولیه نمایش داده شده است. با تغییر فاصله بین زبری‌ها عملکرد گرداب تشکیل شده بین آن‌ها تغییر کرده و نتایج متفاوتی از کاهش عمق مزدوج نسبی را نشان می‌دهد. کم‌ترین میزان کاهش عمق مزدوج نسبی در بین زبری‌های مستطیلی نیز مربوط به زبری مستطیلی 2/5 سانتی‌متری (برابر با 17%) بوده است. البته از این شکل‌ها می‌توان استنباط نمود که با افزایش زاویه واگرایی برای یک زبری خاص روند کاهش عمق مزدوج نسبی شدت می‌گیرد.

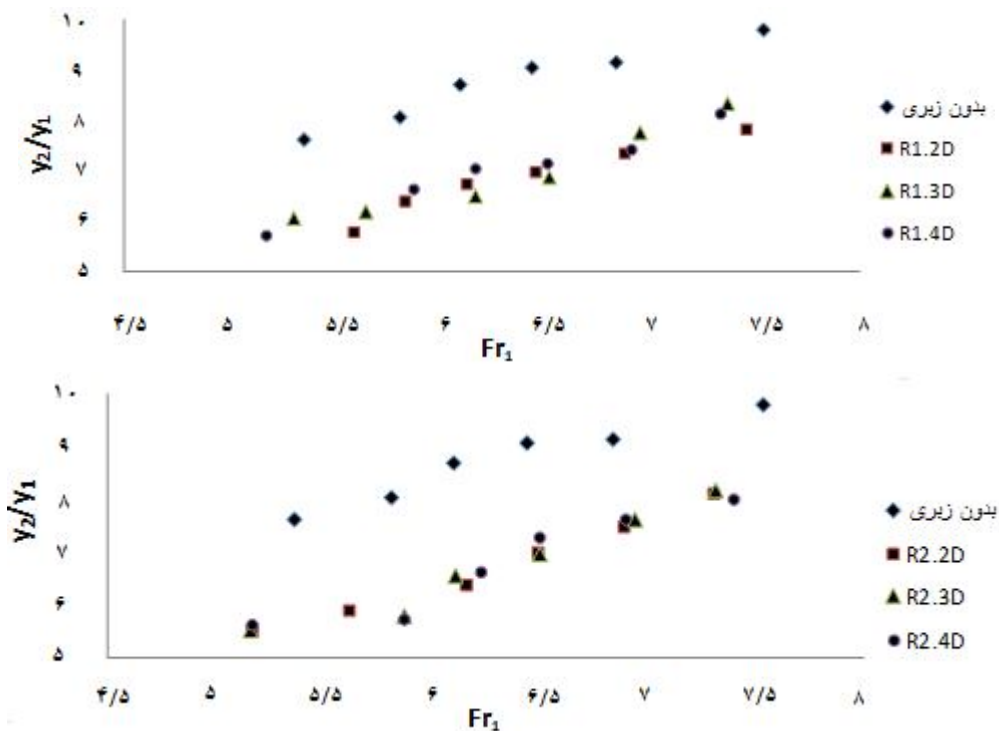
در زبری مکعب مستطیلی، با ارتفاع 2/5 سانتی‌متری عملکرد بهتری را نسبت به زبری 1/5 سانتی‌متری داشت. هم‌چنین در این حالت فواصل بین زبری 2D، 3D و 4D به ترتیب بهترین نتیجه را



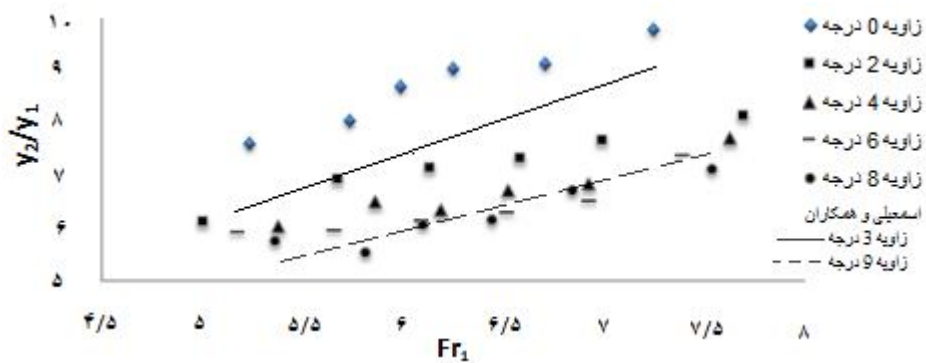
شکل 8- تغییرات عمق مزدوج نسبی به‌ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه با زاویه واگرایی صفر درجه و زبری‌های  $R_1$  و  $R_2$  با فواصل مختلف



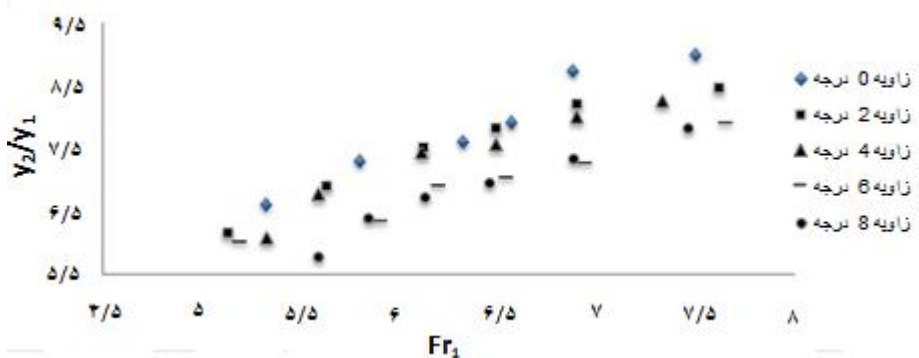
شکل 9- تغییرات عمق مزدوج نسبی به‌ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه با زاویه واگرایی 4 درجه و زبری‌های  $R_1$  و  $R_2$  با فواصل مختلف



شکل 10- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حوضچه با زاویه واگرایی 8 درجه و زبری های  $R_1$  و  $R_2$  با فواصل مختلف

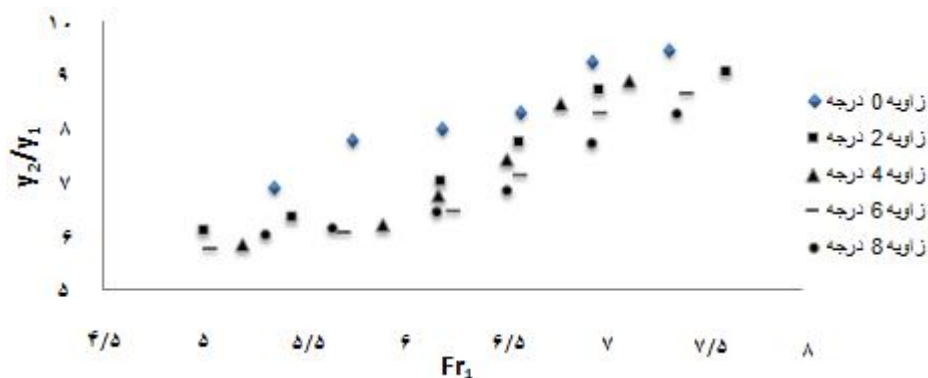


شکل 11- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه بدون زبری کف با زوایای واگرایی مختلف

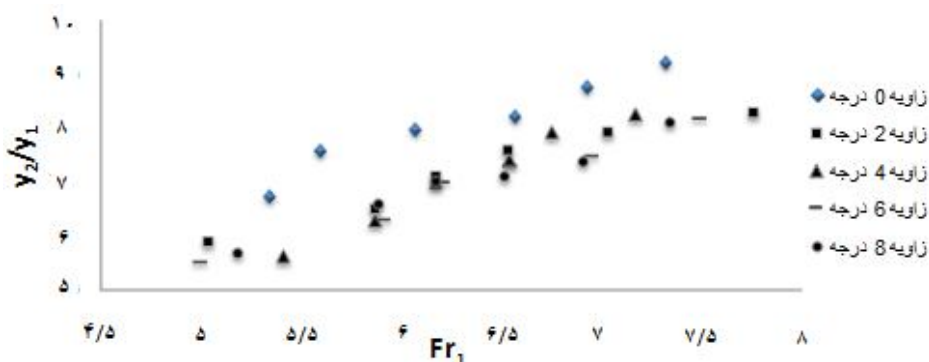


شکل 12- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه  $R_{1.2D}$  با زوایای واگرایی مختلف

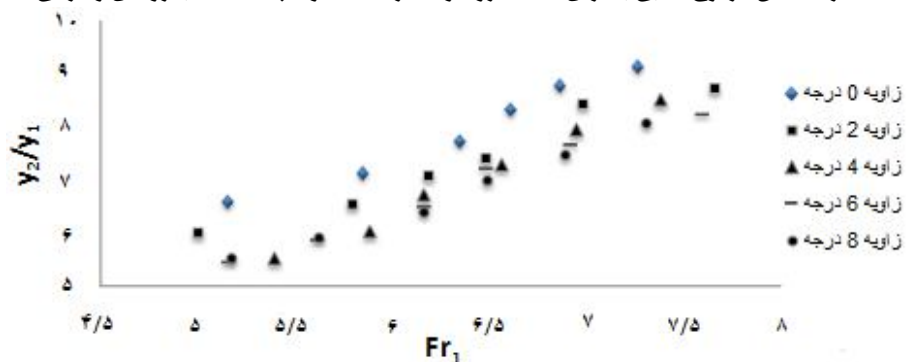




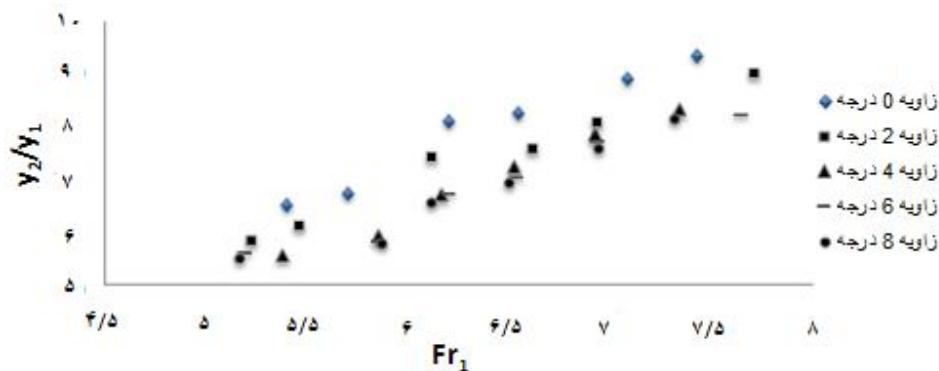
شکل 13- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه  $R_{1.3D}$  با زوایای واگرایی مختلف



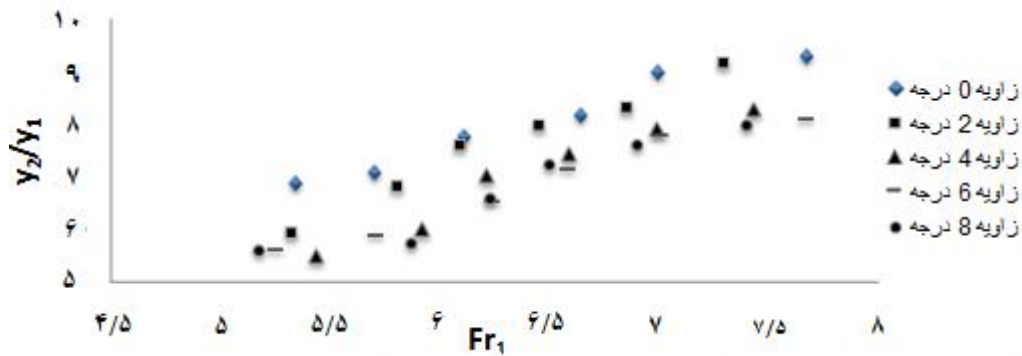
شکل 14- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه  $R_{1.4D}$  با زوایای واگرایی مختلف



شکل 15- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه  $R_{2.2D}$  با زوایای واگرایی مختلف



شکل 16- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه  $R_{2.3D}$  با زوایای واگرایی مختلف



شکل 17- تغییرات عمق مزدوج نسبی به ازای اعداد فرود اولیه در حالت حوضچه R<sub>2</sub>.4D با زوایای واگرایی مختلف

مخصوص قبل و بعد از پرش هیدرولیکی  $E_2-E_1$  می‌باشد. در این تحقیق اتلاف انرژی نسبی در بستر مکعب مستطیلی نواری تعیین گردید. افت نسبی انرژی برای زوایای 0، 2، 4، 6 و 8 درجه به ترتیب برابر 58/5، 62/4، 64/1، 65/9 و 67 درصد بدست آمده است. بالاترین افت انرژی مربوط به بستر R2.2D به ازای زاویه واگرایی 8 درجه و عدد فرود 7/7 برابر 83 درصد به دست آمد. در تحقیقات امید و اسمعیلی ورکی (1384) برای زاویه 9 درجه و عدد فرود 7/5 میزان افت انرژی 70% می‌باشد و در تحقیق حاضر افت انرژی برای زاویه 8 درجه و عدد فرود 7/5 در حدود 80% است.

مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج امید و اسمعیلی ورکی Omid (and EsmaeeliVaraki, 2004) که بر روی حوضچه دوزنقه‌ای واگرا انجام شده نشان می‌دهد که تغییرات کلی پارامترهای پرش با افزایش زاویه همگرایی در دو تحقیق مشابه می‌باشد. یعنی افزایش زاویه واگرایی موجب کاهش عمق مزدوج نسبی، طول پرش و افزایش افت انرژی می‌گردد.

### کاهش نسبی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی (D%)

پارامتر کاهش عمق نسبی D توسط امید و راجاراتنام به شکل رابطه 8 ارائه شده است. (Ead and Rajaratnam, 2002).

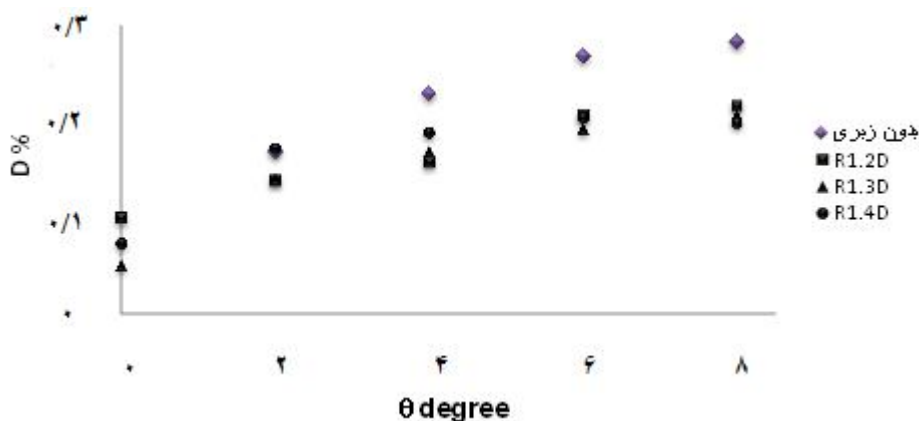
$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (8)$$

در این رابطه  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش در بستر صاف و  $y_2$  عمق ثانویه در بستر زبر می‌باشند.

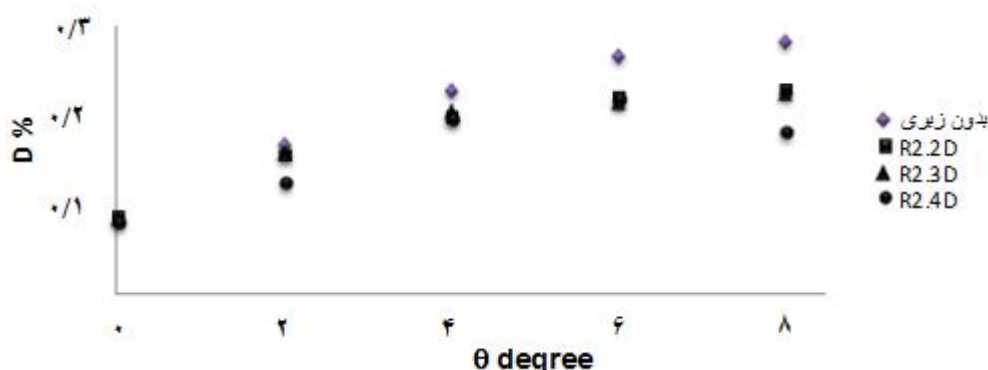
درصد کاهش نسبی عمق مزدوج پرش به ازای تغییرات اعداد فرود اولیه در شکل‌های 18 و 19 نشان داده شده‌اند. مقدار کاهش نسبی عمق مزدوج پرش به طور متوسط برای زوایای 0، 2، 4، 6 و 8 درجه به ترتیب برابر 10، 17/2، 22، 25 و 25/5 درصد بدست آمده است.

### اتلاف انرژی

اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی  $E_L$  برابر با اختلاف انرژی



شکل 18- درصد کاهش نسبی عمق مزدوج پرش به ازای زوایای واگرایی اولیه برای زبری R<sub>1</sub> با فواصل مختلف



شکل 19- درصد کاهش نسبی عمق مزدوج پرش به ازای زوایای واگرایی اولیه برای زبری  $R_2$  با فواصل مختلف

### نتیجه گیری

یکی از روش‌های کاهش ابعاد حوضچه آرامش استفاده توام واگرایی دیواره و زبری کف بستر حوضچه می‌باشد. با افزایش زاویه واگرایی عمق مزدوج نسبی و طول پرش کاهش و در نتیجه افت انرژی افزایش می‌یابد. همچنین زبری مکعب مستطیلی موجب کاهش عمق و طول نسبی پرش می‌گردد که زبری مکعب مستطیلی با ارتفاع  $2/5$  سانتی‌متری عملکرد بهتری را نسبت به زبری  $1/5$  سانتی‌متری داشته است. به طور کلی فواصل بین زبری تاثیر کم‌تری روی مشخصات هیدرولیکی پرش داشته و در حالت‌های  $2D$ ،  $3D$  و  $4D$  به ترتیب بهترین نتایج برای کاهش عمق مزدوج نسبی بدست آمد. مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج امید و اسمعیلی ورکی (1384) (Omid and Esmaeeli Varaki, 2004) و اسمعیلی ورکی و همکاران (1393) (Esmaeeli Varaki, 2014) نشان می‌دهد که تغییرات کلی پارامترهای پرش با افزایش زاویه واگرایی در هر دو تحقیق مشابه یکدیگر بوده است.

### منابع

- Fundamentals of Water Science and Engineering, Vancouver.
- Gord Noshahri, A., Omid, M.H and Kochakzadeh, S. 2009. Experimental study of hydraulic jump characteristics with sharp abutment in a expanding stilling basin, Journal of water Research. 3.4:3-31.
- Hager, W.H and Bremen, R. 1989. Classical hydraulic jump; sequent depths, Journal of Hydraulic Research. 27.5: 565-585.
- Hughes, W.C and Flack, J.E. 1984. Hydraulic jump properties over rough bed, Journal Hydraulic Engineering. 110.12: 1751-1771.
- Kashefpor, M and Bakhtiari, M. 2009. Hydraulic jump in a gradually expanding channel with different divergence angles, 33rd IAHR Congress. Advances in the Fundamentals of Water Science and Engineering, Vancouver.
- Koch, A and Carstanjen, M. 1926. Von der Bewegung des Wassers und den dabei auftretenden Kräfte, Hydrodynamin. Springer-Verlag, Berlin.
- Lindquist, E. 1927. Anordningar för effek tiv energiomvandling vid foten av över fallsdammar. Sartryck ur Skrifter utg ivna med anledning av Kungl. Tekniska Hogskolans. 100 - Ars Jubileum: Stockholm.
- Movahedan, B and Dadmehr, R. 2009. Effects of abrupt and gradual expansion of rectangular section on hydraulic jump characteristics, Iranian journal of Irrigation and Drainage, 3.1:101-112.
- Najandali, A., Esmaeili, K., Farhoudi, J and Ravar, Z. 2011. Effect of triangular blocks on the characteristics of hydraulic jump, Iranian Journal of irrigation and drainage. 2.5: 234-241.
- Omid, M.H and EsmaeeliVaraki, M. 2004. Theoretical and experimental study of the expanding hydraulic jump in trapezoidal channel, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science. 9.2:17-30
- اسمعیلی ورکی، م، صاحبی، ف، نوابیان، م و امیری، ز. 1393. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی گرگان. 49-70: 5. 21
- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D and Sadraddini, A.A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics, Journal of Hydro-environment Research. 3: 109-117.
- Ead, S.A., Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jump on corrugated bed, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 128.7: 656-663.
- Gohari, A and Farhoudi, J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins, 33rd IAHR Congress, 9 Agust. Advances in the

- momentum conservation in hydraulic jump in diverging channels. *Journal of Hydraulic Research*. 51.5: 601-607.
- Vischer, D.L and Hager, W.H. 1995. Energy Dissapaters, Hydraulic structure design manual IAHR.206.
- Rajaratnam, N. 1976. *Turbulent jets*. Elsevier Science, Amsterdam. The Netherlands.
- Safranez, K. 1927. Wechselsprung und die Energi evernichtung des Wassers. *Bauingenieur* 8.49: 898-905.
- Valiani, A. and Caleffi, V. 2011. Linear and angular

## Study of Hydraulic Jump Characteristics in Diverging Stilling Basins with Square Bars Roughness

A. Abbaspour<sup>1\*</sup>, M.R. Abdian Rokni<sup>2</sup>

Received: Mar.28, 2015

Accepted: Octo.17, 2016

### Abstract

Hydraulic jump is the most important phenomenon in the rapid variable flow is of interest to hydraulic engineers. It has been used for dissipation of kinetic energy downstream of hydraulic structures such as spillways, chutes and gates to protect stilling basin. This study the roughness of the bed and the divergence of basin have studied simultaneously. The experiments have done with the walls diverging angles of 0, 2, 4, 6 and 8 degrees for six different Froude numbers. In total, 190 tests were performed in the range of 5 to 8 Froude numbers. The relative depth reduction of jump in the angles of 0, 2, 4, 6 and 8 degrees have obtained 10, 17.2, 22, 25 and 25.5% respectively. The average reduction of length jump,  $T$ , for the angles of 0, 2, 4, 6 and 8 degrees with the rough bed have obtained 45.5, 55, 56.1, 64 and 66.2% respectively. The man reduction of length jump for the cube bars is 60.3%. The loss of energy in the jump  $E_L$  is equal to the difference between the specific energy before and after the jump,  $E_2 - E_1$ . The relative energy loss,  $E_L/E_1$ , for the angles of 0, 2, 4, 6 and 8 degrees have obtained 58.5, 62.4, 64.1, 65.9 and 67% respectively. In this study, the effect of the square ribs bed on hydraulic jumps was investigated. The divergence of basin without roughness effect also has influenced on reducing the relative length of jump about 37 to 47% and the relative length of jump is proportional to the angle of divergence basin. The results show that both the divergence angle of stilling basin wall and bed roughness of bed have reduced the length and depth of hydraulic jump. This makes it more economical to build a basin and control of jump is better.

**Key words:** Divergent basin, Hydraulic jump, Length of jump, Rough bed, Sequent depth

1- Assistant Professors, Department Water Engineering, University of Tabriz

2- Msc of Water Engineering , University of Tabriz

(\*-Corresponding Author Email: akabbaspour@yahoo.com)