

## تأثیر صفحات مستغرق بر بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی و بررسی نقش زاویه برخورد

کیمیا اخوان، منوچهر حیدرپور\* و ناهید پورعبدالله<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۳)

### چکیده

یکی از روش‌های بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش، استفاده از زبری‌های طبیعی و مصنوعی است. اخیراً به دلیل مزایای صفحات مستغرق در مقایسه با سایر زبری‌های مصنوعی غیر ممتد از جمله تعداد کمتر این صفحات و قابلیت طراحی هندسه و چیدمان آنها، رویکرد بیشتری شده است. در این مقاله تأثیر صفحات مستغرق با سه زاویه برخورد  $45^\circ$ ،  $75^\circ$  و  $90^\circ$  بر بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی شده و اثر آن بر پارامترهایی نظیر نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی، میزان اتلاف انرژی و ضریب نیروی برشی بستر ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد، میانگین تأثیر صفحات مستغرق بر کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و طول غلتاب در مقایسه با حالت کلاسیک به ترتیب برابر  $9/4$ ،  $24/6$  و  $28/4$  درصد بوده و میانگین افزایش افت نسبی انرژی  $5/5$  درصد بوده که بیشینه افت نسبی انرژی در زاویه برخورد  $90^\circ$  درجه صفحات مستغرق با مقدار  $6/5$  درصد است. با در نظر گرفتن این نتایج و سایر شرایط نظیر سهولت ساخت و به کارگیری، تثبیت و کاهش هزینه‌های اقتصادی از میان انتخاب‌های موجود صفحات مستغرق، زاویه برخورد  $75^\circ$  گزینه مناسبی برای طراحی بهینه حوضچه آرامش است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، صفحات مستغرق، زاویه برخورد، نسبت اعماق مزدوج، طول پرش، افت انرژی

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: heidar@iut.ac.ir

## مقدمه

پرش هیدرولیکی، پدیده‌ای است که در جریان آب و سایر سیالات رخ می‌دهد. در این پدیده، جریان به‌سرعت از حالت پایدار خارج شده و به یک حالت ناپایدار تغییر می‌کند. این پدیده در مخازن آب، سدها، رودخانه‌ها و سایر تأسیسات هیدرولیکی مهم است و می‌تواند منجر به مشکلاتی همچون سرعت زیاد جریان، تنش‌های غیرهیدرولیکی و آسیب به سازه‌های محیطی شود. کاهش خطرات سیلاب، محافظت از سازه‌ها، بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی کارایی سیستم‌های هیدرولیکی برخی از دلایل اهمیت پرش هیدرولیکی و نیاز به کنترل مشخصات آن است.

به‌دلیل اهمیت کنترل و بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی در رخدادهای طبیعی و یا کاربردهای انتخابی آن، توجه متخصصان حوزه مهندسی علوم آب به عوامل مختلفی که می‌توانند بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی را تسهیل کنند، معطوف شده‌است (۲۹).

طراحی مناسب و انتخاب ابعاد بهینه سازه‌ها، ویژگی‌های جریان (مانند سرعت، شدت و رژیم جریان)، ویژگی‌های موادی که سازه‌ها از آن‌ها ساخته می‌شوند (مانند خواص هیدرودینامیکی مواد سازه‌ای از قبیل ضریب اصطکاک و سختی)، شرایط محیطی (مانند دما، فشار)، ویژگی‌های آب (مانند دانسیته و ویسکوزیته) و مداخله‌های مهندسی (مانند استفاده از زبری‌های مصنوعی، ساختارهای آبی و سیستم‌های کنترل جریان) می‌تواند بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی را فراهم کند.

تأثیرگذاری هر یک از این عوامل بستگی به شرایط مختلف و ویژگی‌های مشخصاتی هر پروژه دارد. به‌طورکلی، بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی نیازمند توجه به همه این عوامل بوده و تلفیق مؤثر آن‌ها می‌تواند به بهبود مشخصات پرش و دستیابی به نتایج ایمن و مقرون‌به‌صرفه اقتصادی کمک کند. ازاین‌رو، استفاده از بلوک‌های پای تندآب و بلوک‌های میانی در حوضچه آرامش رایج شد و پیرو آن بررسی عواملی نظیر واگرایی، پله و شیب معکوس در

پژوهش‌ها دیده شد (۱۰، ۱۱ و ۲۴). عده زیادی به بررسی اثر زبری بستر اعم از طبیعی و مصنوعی پرداخته‌اند (۱۲ و ۲۵). اولین کسی که مطالعات سینماتیک خود را درباره پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر انجام داد، راجاراتنام در سال ۱۹۶۸ بود (۳۰). نتایج مطالعه‌های هاگز و فلک نشان داد که اجزای زبری در کف حوضچه می‌توانند عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند و میزان کاهش به عدد فرود اولیه و زبری نسبی بستگی دارد (۲۰).

یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی، استفاده از زبری مصنوعی است. زبری‌های مصنوعی به‌ترتیب در انواع نواری، سینوسی، دندانه‌ای، متراکم و صفحات مقاوم‌تری ابداع و بررسی شده‌اند. اید و راجاراتنام نشان دادند که طول پرش روی بستر موجدار سینوسی شکل تقریباً نصف طول آن، روی بستر صاف است. آنها در ارتفاع نسبی موج ۰/۲۵، ۰/۴۳، ۰/۵ و دامنه عدد فرود ۱۰-۴ پژوهش کرده‌اند (۱۳). اوکیمین با قرار دادن نوارهای منشوری مستطیلی به موازات بستر کانال، خواص پرش هیدرولیکی را با افزایش زبری بستر در کانال‌های ذوزنقه‌ای بررسی کرد. ارتفاع، فاصله و اعداد فرود مختلفی در شکل‌گیری پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش زبری بستر، عمق متوسط پایاب حدود ۸۰٪ پرش آزاد روی سطح صاف و کاهش طول پرش هیدرولیکی حدود ۴۰٪ بود. همچنین میانگین افت انرژی در پرش‌های هیدرولیکی روی بسترهای زبر، ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از پرش‌های آزاد روی بسترهای صاف گزارش شد (۱۵ و ۱۶). سیمسک به بررسی اثر آرایش نوار غیر برجسته و زبری شطرنجی (صفحات مستغرق) بر مشخصات پرش هیدرولیکی با عدد فرود بین ۲/۱۳ و ۱۱/۹۲ پرداخته و نتیجه گرفته است که عناصر زبری غیر برجسته در مقایسه با پرش‌های ایجاد شده روی بسترهای صاف، اتلاف انرژی را ۳ تا ۷ درصد و عمق پایاب را ۷ تا ۱۵ درصد کاهش می‌دهند. همچنین آرایش زیگزاگی در مقایسه با آرایش نواری عملکرد بهتری در افت انرژی و کاهش عمق پایاب و طول

پرش دارد (۳۳). غزالی و همکاران به بررسی تأثیر زبری‌های مثلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق پایاب و طول پرش روی بسترهای زبر نسبت به بستر صاف به ترتیب ۲۵ و ۷/۵۴ درصد کوچکتر است و تنش برشی در بستر زبر به طور متوسط ۵/۸ برابر بستر صاف است (۱۷). ایزدجو و شفافی بجستان روی ۴ نوع بستر با زبری‌های دوزنقه‌ای شکل در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ آزمایش کرده و دریافتند که طول و عمق مزدوج پرش تحت تأثیر زبری‌های موجی شکل با مقطع دوزنقه‌ای به ترتیب ۵۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و مقدار تنش برشی بستر که تابعی از عدد فرود است، ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین بیان کردند که طول غلتاب پرش، به جای ارتفاع تا حد زیادی به فاصله موجدار بستگی دارد (۲۱). عباسپور و همکاران آزمایش‌های خود را روی زبری‌های سینوسی شکل انجام داده‌اند. این پژوهشگران نسبت به بسترهای صاف حدود ۲۰ درصد کاهش عمق پایاب (در یک عمق فوق‌بحرانی و عدد فرود مشخص) گزارش کرده‌اند. محدوده اعداد فرود  $8/6 < Fr_f < 3/6$  و برای  $0/286 \leq t/s \leq 0/625$  بوده است (۱). نتایج پژوهش‌های السبایه و شبایک بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش روی بستر زبر در مقایسه با پرش روی بستر صاف بوده است. آنها در محدوده عدد فرود ۳ تا ۷/۵، روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های سینوسی، مثلی و دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت و مستطیلی مطالعه آزمایشگاهی انجام داده‌اند (۱۴). پارسامهر و همکاران مشخصات پرش هیدرولیکی با تراکم و آرایش‌های مختلف زبری را بررسی کرده‌اند و آزمایش‌هایی در محدوده اعداد فرود  $3/4$  تا  $12/4$  با ۳ تراکم و ۴ شکل آرایش زبری لوزی غیرممتد انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که در آرایش ترکیب زبری ۳ تایی با تراکم  $10/67$  درصد، بیشترین مقدار کاهش عمق ثانویه برابر با  $29/39$  درصد دیده شده است. همچنین میزان افزایش استهلاك انرژی نسبت به بستر صاف، به طور متوسط  $10/94$  درصد است (۲۸).

اسدی و همکاران با انجام آزمایش بر ۲۴ بستر زبر مکعبی با آرایش زیگزاگی و ردیفی، با ردیف‌ها و زاویه‌های مختلف در محدوده اعداد فرود  $5/5$  تا ۹ در فلوم آزمایشگاهی نشان دادند، عمق و طول نسبی در آرایش زیگزاگی در مقایسه با ردیفی نسبت به بستر صاف کاهش بیشتری یافته است. ضریب نیروی برشی که عامل اصلی کاهش عمق و طول نسبی پرش است، در هر دو آرایش ۶ درصد بیشتر از بستر صاف به دست آمد (۳). اخیراً به استفاده از صفحات ایستاده یا زاویه‌دار (صفحات مقاومتی) و هم‌راستا با کف کانال (صفحات مستغرق) توجه شده است. صفحات مستغرق به عنوان یک نوع زبری مصنوعی، می‌توانند جریان آب را به نحوی تغییر دهند که پرش ناپایدار به پرش پایدار تبدیل شود. این صفحات معمولاً در مسیر جریان آب قرار داده می‌شوند و توانایی ایجاد تلفات انرژی در جریان را دارند که این امر به بهبود پرش کمک می‌کند.

استفاده از صفحات مستغرق به دو شیوه ابعاد ریز ولی تعداد زیاد یا ابعاد بزرگتر با تعداد کمتر امکان پذیر شده است. صدیقی هرسینی (۳۱)، حبیب زاده (۱۸)، عزیززی (۴)، سلطانی سامانی (۳۴)، سلمانی مطبوع (۳۲) و محمدزاده (۲۶) از جمله کسانی هستند که با صفحات مقاومتی پژوهش کرده‌اند. در ایران باقری برای اولین بار روی اثر صفحات مستغرق (با تعداد محدود) بر بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی پرداخته است (۵). وی به بررسی تأثیر شیب معکوس و ورقه‌های مستغرق روی مشخصات پرش هیدرولیکی پرداخته و نتیجه گرفته است که بیشترین کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و غلتاب مربوط به شیب ۳- درصد با آرایش گروه صفحات (d=2) که d فاصله بین گروه صفحات بوده و زاویه برخورد  $60^\circ$  درجه است و از میان انتخاب‌های موجود با توجه به شرایط محلی و وضعیت کانال، استفاده از صفحات مستغرق و شیب منفی بستر می‌تواند گزینه مناسبی برای طراحی بهینه حوضچه آرامش باشد.

از آنجاکه مهندسی این صفحات با طراحی دو عنصر هندسه و چیدمان به سهولت امکان پذیر و قابل قیاس است،

مرکز، استفاده شده بود. آب از آنجا نیز به سمت منبع ذخیره هدایت شده و مجدداً این چرخه تکرار می‌شد.

**اندازه‌گیری دبی جریان:** دبی‌سنج الکترونیکی پس از پمپ‌گریز از مرکز و هم‌سطح با کانال آزمایشگاهی واقع شده که دبی جریان به کمک آن اندازه‌گیری شده‌است.

**اندازه‌گیری عمق آب با عمق‌سنج ریلی:** اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی، توسط عمق‌سنج ریلی با دقت یک میلی‌متر انجام شد.

**اندازه‌گیری سرعت جریان با لوله پیتوت:** اختلاف ارتفاع سطح آب بالاآمده در لوله‌های چسبیده به تخته، نشان‌دهنده ارتفاع معادل سرعت در رابطه برنولی بوده‌است.

**صفحات مستغرق:** از این صفحات به‌عنوان زبری در بستر کانال آزمایشگاهی استفاده شده‌است. هندسه یک صفحه مستغرق از جمله پارامترهای مؤثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی است و شامل عرض ( $w$ )، ضخامت ( $t$ )، زاویه برخورد ( $\theta$ ) و طول ورقه‌ها ( $L$ ) می‌شود. در این پژوهش زاویه برخورد صفحات بررسی شد. این صفحات از جنس تفلون انتخاب شدند که هندسه و چیدمان آن‌ها باتوجه‌به مشخصات جدول ۱ و شکل‌های ۲ و ۳ بوده‌است. نحوه چیدمان و فاصله بهینه صفحات مستغرق، باتوجه‌به پژوهش‌های انجام‌شده روی زبری نواری و صفحات مستغرق، گرفته شده‌است (۷، ۱۵ و ۳۳).

#### تحلیل ابعادی

برای شناسایی متغیرهای اساسی، روابط بدون بعد و تعداد مناسب آزمایش‌ها (به‌خاطر محدودیت‌های مالی و زمانی)، تحلیل ابعادی انجام می‌شود. برای پرش هیدرولیکی روی بستری از صفحات مستغرق، مشخصات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان مهم هستند. در این شرایط، عمق ثانویه پرش ( $D_2$ )، عمق اولیه پرش ( $D_1$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، عرض کانال ( $B$ )، لزجت دینامیک سیال ( $\mu$ )، سرعت اولیه جریان ( $V_1$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho$ ) و زاویه برخورد

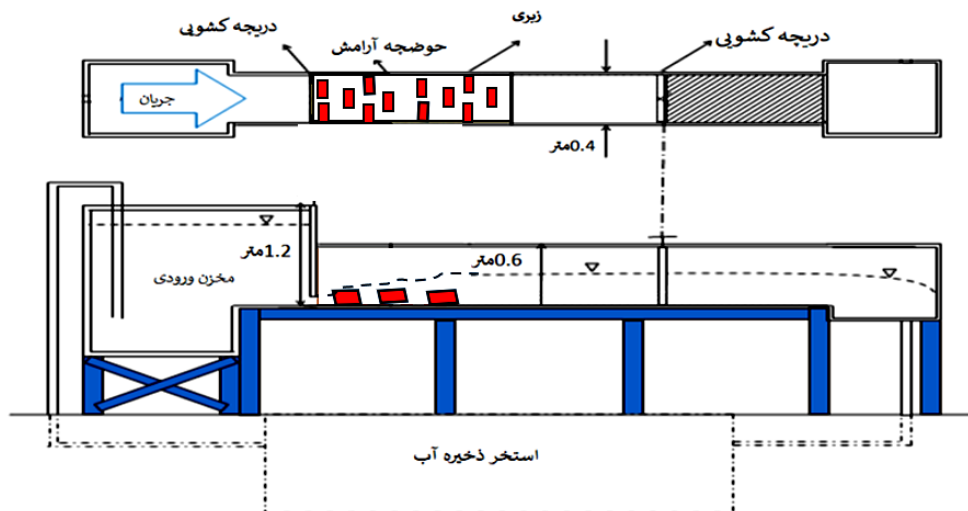
این صفحات را می‌توان هدفمند استفاده کرد و اثر تغییر هندسه این صفحات یعنی شکل، ابعاد و زاویه برخورد (زاویه حمله) را در شرایط آزمایش مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش به تغییر زاویه برخورد و تأثیر آن روی بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت اعماق مزدوج و طول پرش و طول غلتاب و سرعت و افت انرژی و ضریب نیروی برشی پرداخته شده‌است (۲).

با بهبود پرش می‌توانیم از مزایایی همچون کاهش خطرات سیلاب و آسیب به سازه‌ها، بهینه‌سازی استفاده از انرژی آب و افزایش کارایی سیستم‌های آبیاری و زهکشی بهره‌مند شویم.

#### مواد و روش‌ها

##### مشخصات فلوم آزمایشگاه

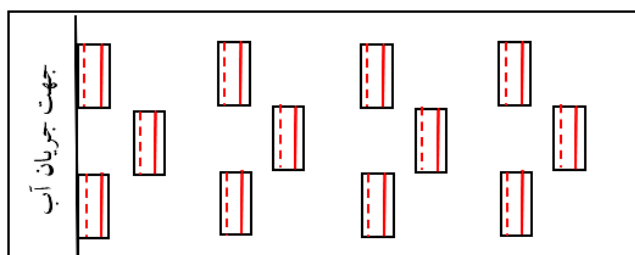
آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان، مطابق شکل ۱ در کانالی با مقطع مستطیل‌شکل، با مشخصات فیزیکی طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیواره‌ها و کف کانال از جنس ورق پلکسی‌گلس شفاف بوده و موجب سهولت در برداشت داده‌ها شده‌است. کانال شامل دو دریچه یکی در ابتدا و دیگری در انتها بود که دریچه ابتدایی (بالادست)، میزان آب ورودی به کانال را تنظیم کرده و عدد فرود اولیه لازم برای هر آزمایش را ایجاد می‌کرد. با استفاده از دریچه پایین‌دست کانال که به‌صورت مکانیکی و به‌واسطه چرخ‌دنده‌های اطراف آن بالا و پایین می‌شد، پرش هیدرولیکی در طول دلخواه کانال تثبیت شد. در کنار کانال دو مخزن قرار داشت که مخزن انتهایی در انتهای کانال و زیر آن، و مخزن ابتدایی هم‌سطح کانال و در ابتدای آن بود. آب توسط پمپ از منبعی که در زیر کانال تعبیه شده، به مخزن ابتدایی وارد و پس از عبور از دریچه ابتدایی در کانال جاری شده و در سوی دیگر از دریچه انتهایی گذشته وارد مخزن می‌شد. بلافاصله بعد از دریچه پایین‌دست و قبل از ریختن آب به مخزن انتهایی، یک شبکه فلزی برای جلوگیری از ورود تکه‌ها و قطعات احتمالی جدا شده به پمپ‌گریز از



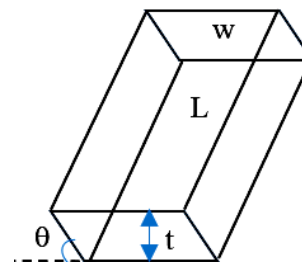
شکل ۱. نمای کانال به کار رفته در پژوهش

جدول ۱. مشخصات صفحات مستغرق به کار رفته در بستر کانال

$L$ (cm)	$w$ (cm)	$t$ (cm)	$z$ یا $\theta$ (°)
۱۲	۴	۱	۹۰ و ۷۵، ۴۵

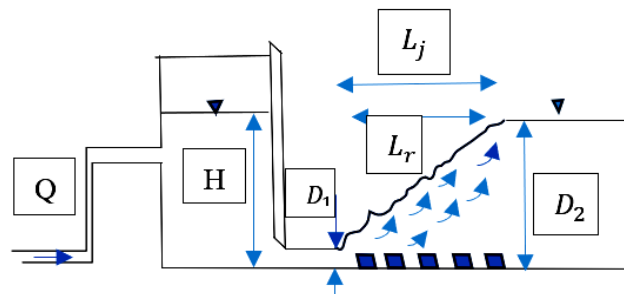


(ب)



(الف)

شکل ۲. صفحات مستغرق الف) نحوه چیدمان ب) نمای سه بعدی



شکل ۳. کیفیت پرش هیدرولیکی روی بستر با صفحات مستغرق

A سطحی از زبری که در مقابل جریان آب قرار می‌گیرد، V سرعت، q دبی در واحد عرض جریان،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضریب توزیع سرعت به ترتیب در مقطع اولیه و ثانویه  $V_1$  و  $V_2$  سرعت متوسط جریان در مقطع اولیه و ثانویه است. هریک از زبری‌هایی که در کف بستر قرار می‌گیرند، به تنهایی در مقابل جریان آب مقاومت دارند. به همین دلیل باعث ایجاد نیروی دراگ می‌شوند؛ بنابراین از معادله (۷) در طول پرش انتگرال گرفته می‌شود تا نیروی دراگی که تمام زبری‌ها به حجم کنترل وارد می‌کنند، بررسی شود. اگر مقدار پارامترهای  $D, C, B$  به صورت زیر تعریف شود:

$$B = y_2 - y_1 \quad (8)$$

$$C = \left( 1 - \frac{c(n \times w \times t \times Fr_1^2 L)}{\sin \alpha \cdot K^2 \cdot B} + 2Fr_1^2 \right) \quad (9)$$

$$D = \left( \frac{c(n \times w \times t \times Fr_1^2 L)}{\sin \alpha \cdot K^2 \cdot B} - 2Fr_1^2 \right) \quad (10)$$

$$-\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + C\left(\frac{y_2}{y_1}\right) + D = 0 \quad (11)$$

که K ضریب تصحیح نیمرخ سطح آب، n تعداد زبری‌ها، w عرض نمونه‌ها، t طول نمونه‌ها و  $\alpha$  زاویه برخورد صفحات مستغرق است.

شکل ۵ مقایسه بین نسبت اعماق مزدوج محاسباتی با استفاده از معادله (۱۱) و نتایج آزمایشگاهی حاصل را نشان می‌دهد. محدوده نقاط نشان داده شده به وسیله دو خط با شیب  $\pm 15\%$  محدود شده است که نشان‌دهنده دقت مطلوب است. در نتیجه این رابطه می‌تواند برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج این پژوهش در محدوده اعداد فرود یاد شده به کار برده شود.

شکل ۵ نسبت اعماق مزدوج برای صفحات مستغرق با ابعاد یکسان و زوایای برخورد صفر (حالت کلاسیک)،  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  و  $90^\circ$  درجه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. گفتنی است مقادیر داده‌های آزمایشگاهی  $30^\circ$  و  $60^\circ$  در تمام مقایسه‌ها از رابطه آنالیز ابعادی با در نظر گرفتن مقدار شیب صفر استخراج شده‌است (۵ و ۶).

صفحات مستغرق ( $\tan \alpha$ ) به عنوان متغیرهای اساسی مطرح می‌شوند؛ بنابراین، عمق ثانویه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D_2 = f_1(D_1, V_1, B, g, \rho, \mu, \tan \alpha) \quad (1)$$

و با استفاده از تئوری پی باکینگهام ( $\pi$  Buckingham) می‌توان به معادله (۲) زیر دست یافت:

$$\frac{D_2}{D_1} = f_2\left(\text{Re} = \frac{\rho V_1 D_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (2)$$

در معادله (۲) مقدار عدد رینولدز بیشتر از ۵۰۰۰ است. اثر لزجت در آنها نادیده گرفته می‌شود و بنابراین (۲۲):

$$\frac{D_2}{D_1} = f_3\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (3)$$

و به طور مشابه برای طول پرش و غلتاب نیز داریم:

$$\frac{L_j}{D_1} = f_4\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (4)$$

$$\frac{L_r}{D_1} = f_5\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (5)$$

برای مثال، تعدادی از محاسبات عدد رینولدز در پژوهش فعلی در جدول ۲ آورده شده است.

## نتایج و بحث

### نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی

رابطه تحلیلی: در ابتدا رابطه مومتم طبق شکل ۴ که یکی از مهم‌ترین روابط در پرش هیدرولیکی است، برای بستری زبر با صفحات مستغرق بررسی می‌شود. به دلیل وجود زبری ضروری است، نیروی پسا (نیروی مقاوم در برابر جریان آب  $F_D$ ) به رابطه مومتم اولیه اضافه شده و معادله (۶) ایجاد شود:

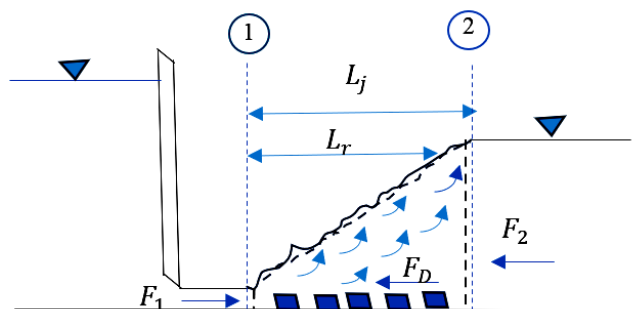
$$F_1 - F_2 - F_D + w \sin \theta = \rho q (\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2) \quad (6)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho c A V^2 \quad (7)$$

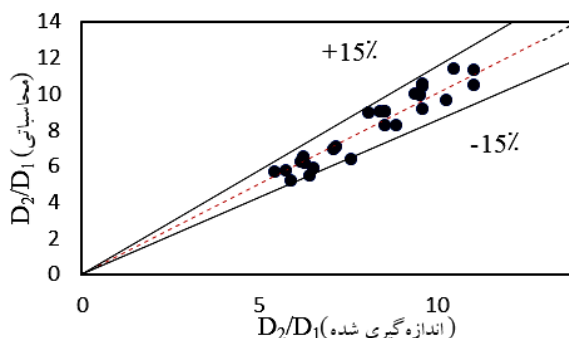
که در این معادله  $F_1$  و  $F_2$  نیروی فشاری وارد بر مقطع اولیه و ثانویه و w وزن آب محصور بین دو مقطع ۱ و ۲ بوده که در اینجا به دلیل نداشتن شیب (یا  $\theta=0$ )، مقدار  $w \sin \theta$  صفر است،  $F_D$  نیز نیروی پسا است که در اثر زبری مصنوعی ایجاد می‌شود.  $\rho$  جرم مخصوص آب، c ضریب نیروی دراگ،

جدول ۲. نمونه‌ای از محاسبات انجام شده برای محاسبه عدد رینولدز

Re(20° C)	D <sub>1</sub> (m)	V <sub>1</sub> ( $\frac{m}{s}$ )	A(m <sup>2</sup> )	P (m)	R(m)
۳۴۱۳۹۴	۰/۰۳	۲/۹۱	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۰۳
۴۱۴۳۶۴	۰/۰۴	۳/۰۲	۰/۰۲	۰/۴۸	۰/۰۳
۲۶۷۰۶۲	۰/۰۳	۳/۰۴	۰/۰۱	۰/۴۵	۰/۰۲



شکل ۴. حجم کنترل و نیروهای وارد بر آن در پرش هیدرولیکی مطالعه حاضر

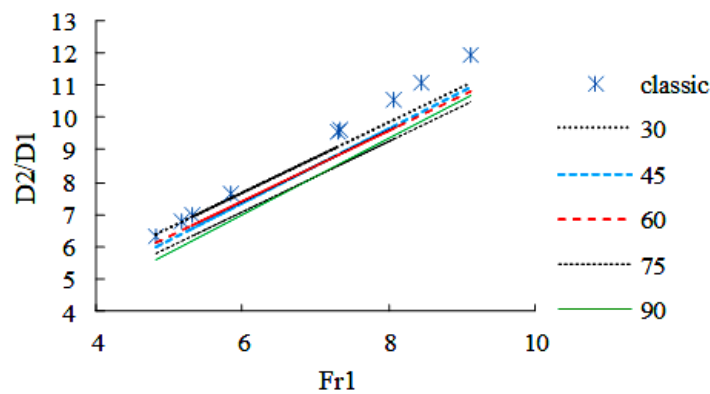


شکل ۵. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی اعماق مزدوج و نتایج تحلیلی

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، با افزایش زاویه برخورد روند کاهشی این نسبت بیشتر شده‌است. اما نکته مهم قابل توجه این است که زاویه برخورد ۹۰° در عمل مشکلات زیادی مانند شوت جریان (flow chute) را به همراه دارد و از نظر اجرایی کاربردی نیست و به همین خاطر زاویه ۷۵° بهترین گزینه ممکن خواهد بود.

طی آزمایش‌ها دیده شد که هنگام برخورد جریان با صفحات مستغرق در زوایای برخورد مختلف، نکته اساسی تغییر در الگوی حرکت جریان می‌باشد. یک جریان

مطابق شکل ۶ نتایج آزمایشگاهی نسبت اعماق مزدوج در تمام آزمایش‌ها، زیر حالت کلاسیک قرار می‌گیرد که به استهلاک انرژی توسط صفحات مستغرق در کف بر می‌شود. با افزایش عدد فرود، نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد. در اعداد فرود بزرگتر با توجه به انرژی جنبشی و تلاطم بیشتر جریان و بنابراین افزایش تأثیر صفحات مستغرق، فاصله دو نمودار از یکدیگر بیشتر است. با افزایش زوایای برخورد صفحات مستغرق، عمق مزدوج پرش نسبت به حالت کلاسیک کاهش یافته‌است.



شکل ۶. نسبت اعماق مزدوج برحسب  $Fr_1$  با زوایای برخورد گوناگون صفحات مستغرق

ناچیز است؛ اما کاربرد چنین حالتی در عمل بسیار کمتر است. برای انجام این مقایسه سعی شده تا جایی که ممکن است، پارامترهای مقایسه محدود شود؛ از این رو در صورتی که رابطه نسبت اعماق مزدوج با فرود بیان شده باشد، مقادیر آنها را در عدد فرودهای موضوع این آزمایش محاسبه کرده و خط برازش بر آن رسم می‌شود. در غیر این صورت، از معادله آنالیز ابعادی آنها استفاده شده و در شرایط این پژوهش، داده‌های پژوهشگران مشخص می‌شود.

#### ضریب کاهش عمق نسبی

میزان اختلاف عمق مزدوج پرش هیدرولیکی روی بستر دارای صفحات مستغرق و صاف را می‌توان در قالب یک ضریب بدون بعد به نام ضریب کاهش عمق نسبی ( $Y$ ) بیان کرد. این مؤلفه که در پرش‌های هیدرولیکی کلاسیک برابر صفر است، از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$Y = \frac{D_2^* - D_2}{D_2^*} \quad (12)$$

در این معادله،  $D_2^*$  عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی کلاسیک و  $D_2$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در آزمایش‌های انجام‌شده است. در آزمایش‌های انجام‌شده، مقدار  $Y$  حاصل برای بسترهای دارای صفحات مستغرق  $45^\circ$ ،  $75^\circ$  و  $90^\circ$  به ترتیب برابر با  $6/9$ ،  $10/5$  و  $10/7$  درصد است و به‌طور میانگین برای تمامی حالات  $9/4$  درصد است.

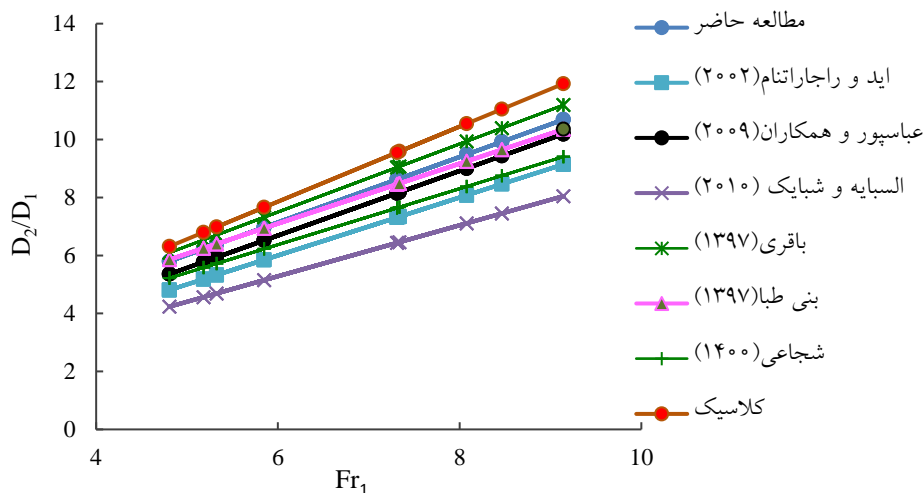
واژگونی قوی ایجاد می‌شود و حباب‌های هوا با سرعت بیشتری به سمت سطح آب حرکت می‌کنند. در این الگوی جریان که با آزاد شدن انرژی آب همراه است، دیده می‌شود که طول پرش هیدرولیکی و نسبت عمق‌های ثانویه پرش هیدرولیک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

با افزایش ارتفاع یا زاویه برخورد زبری، سطح مانع در برابر جریان آب افزایش یافته و در نتیجه نیروی دراگ در رابطه مومنتم از لحاظ عددی افزایش و نسبت اعماق مزدوج کاهش می‌یابد. از طرفی افزایش ارتفاع یا زاویه برخورد زبری باعث افزایش اصطکاک و افت انرژی در مقابل جریان آب شده که کاهش عمق ثانویه را در پی دارد.

شکل ۷ مقایسه نتایج نسبت اعماق مزدوج با سایر پژوهشگران را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که پژوهشگران دیگر از عوامل تأثیرگذار بیشتری در کار خود استفاده کرده‌اند یا به بررسی اثر زبری به‌صورت جداگانه نپرداخته‌اند. همچنین نوع، ابعاد، هندسه، تعداد و چیدمان زبری و شکل و ابعاد کانال این پژوهش با مطالعه‌های آنها متفاوت بوده است. از طرفی در این پژوهش بحث کاربردی و اقتصادی بودن به‌صورت همزمان در کنار بهینه کردن مشخصه‌های پرش هیدرولیکی، جزء اهداف طرح بوده است.

همچنین طریقه قرار دادن صفحات مستغرق در برخی از پژوهش‌ها به‌طور ایستاده است و بدیهی است که عامل اصلی نیروی پسا در این حالت، صفحه مقاومتی بوده و نقش اصطکاک سطح زبر





شکل ۷. نسبت اعماق مزدوج برحسب  $Fr_1$  در  $Z=45, 75, 90$  در مقایسه با پژوهش‌های پیشین

حالت کلاسیک شده‌است. زاویه برخورد ۷۵ درجه نسبت به سایر زوایا تأثیر بیشتری روی این متغیر داشته‌است. به‌طور میانگین، صفحات مستغرق توانسته است ۲۴/۶ درصد از طول نسبی پرش بکاهد.

در شکل ۹ تمامی طول‌های نسبی پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود اولیه جریان رسم و با پژوهش هاگر (۱۹۹۲) مقایسه شده‌است. همان‌طور که دیده می‌شود، پژوهش حاضر از نظر کاهش نسبی طول پرش در بین سایر پژوهشگران قرار گرفته و به پژوهش باقری (۱۳۹۷) نزدیک است. علت آنکه تعدادی از پژوهش‌ها منجر به کاهش بیشتری از طول نسبی پرش شده‌اند، این است که از سطح بیشتری در بستر استفاده کرده که نیروی اصطکاک ایجاد شده در مقابل جریان را افزایش داده‌است (۵).

از نرم‌افزار SPSS برای دستیابی به رابطه‌ای بین طول نسبی پرش، عدد فرود اولیه و زوایای برخورد صفحات مستغرق استفاده شده‌است. با در نظر گرفتن  $\frac{L_j}{D_1}$  به‌عنوان متغیر وابسته و  $Fr_1$  و  $\tan \alpha$  به‌عنوان متغیرهای مستقل، ضرایب معادله (۱۴) در آرایش مد نظر محاسبه شده‌است:

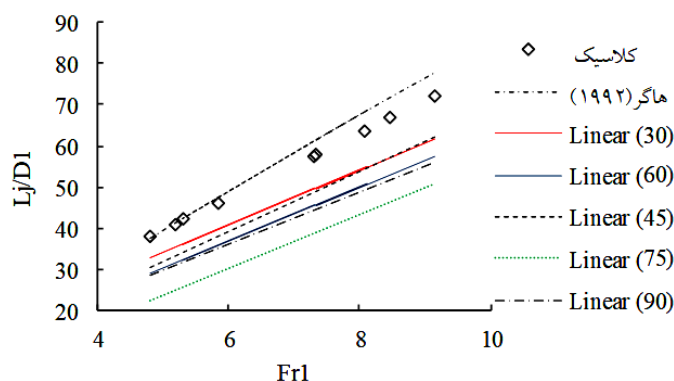
$$\frac{L_j}{D_1} = 7.179Fr_1 - 4.579 \tan \alpha + 3.26 \quad (14)$$

باتوجه‌به تلاطم و غلظت‌هایی که در اثر وجود صفحات مستغرق ایجاد می‌شود، اتلاف انرژی جنبشی پرش هیدرولیکی نیز افزایش یافته و در نتیجه عمق ثانویه کاهش می‌یابد. برای دستیابی به رابطه‌ای بین نسبت اعماق مزدوج، اثر عدد فرود اولیه و زوایای برخورد صفحات مستغرق از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و با در نظر گرفتن  $D_2/D_1$  به‌عنوان متغیر وابسته و  $Fr_1$  و  $\tan \alpha$  به‌عنوان پارامترهای مستقل، ضرایب معادله (۱۳) برای آرایش مد نظر محاسبه شده‌است:

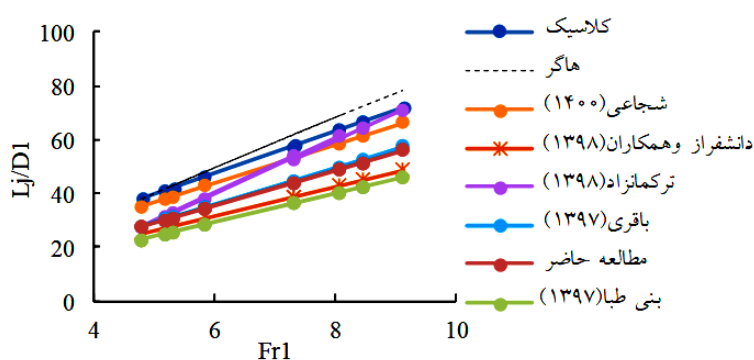
$$\frac{D_2}{D_1} = 1.171Fr_1 - 0.23 \tan \alpha + 0.764, \quad R^2 = 0.981 \quad (13)$$

### طول پرش هیدرولیکی

شکل ۸ تغییرات نسبی طول پرش برای صفحات مستغرق با زاویه برخورد مختلف را نشان می‌دهد. برای مقایسه طول نسبی پرش هیدرولیکی، می‌توان آن را با عمق اولیه بی‌بعد کرده و سپس در مقابل عدد فرود اولیه آنها رسم کرد. میانگین کاهش نسبی طول پرش در صفحات مستغرق با زوایای برخورد  $45^\circ$ ،  $75^\circ$  و  $90^\circ$  به ترتیب ۱۶/۰، ۳۴/۴ و ۲۳/۳ درصد نسبت به حالت کلاسیک بود که افزایش زاویه صفحات مستغرق با ایجاد غلظت در خلاف جهت جریان، باعث کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقایسه با



شکل ۸. تغییرات نسبی طول پرش به  $Fr_1$  برای صفحات مستغرق با زوایای برخورد مختلف



شکل ۹. مقایسه تغییرات نسبی طول پرش نسبت به  $Fr_1$  با سایر پژوهشگران

### طول نسبی غلتاب

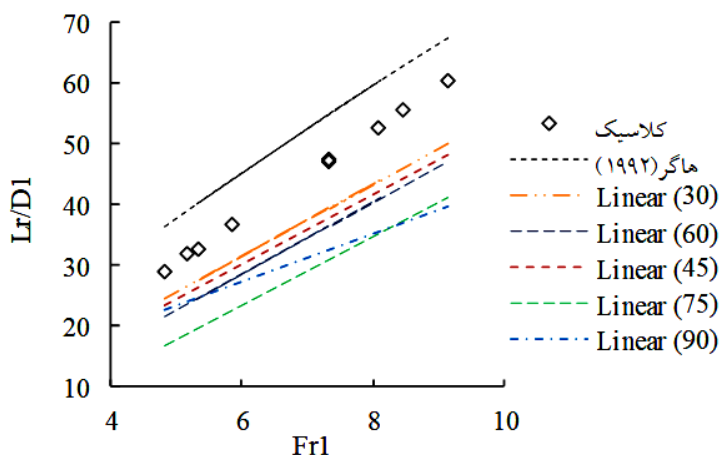
شکل ۱۰ تغییرات نسبی طول غلتاب در بستر صفحات مستغرق با زاویه برخورد مختلف را نشان می‌دهد. مقدار کاهش نسبی طول غلتاب برای سه زاویه برخورد  $45^\circ$ ،  $75^\circ$  و  $90^\circ$  نسبت به حالت کلاسیک به ترتیب برابر با  $19/8$ ،  $36/5$  و  $28/8$  درصد است. به طور میانگین استفاده از صفحات مستغرق توانسته است،  $28/4$  درصد از طول نسبی غلتاب پرش بکاهد. با افزایش عدد فرود، طول نسبی غلتاب پرش نیز افزایش می‌یابد. همچنین هر چه زاویه برخورد صفحات مستغرق به  $90^\circ$  درجه نزدیک شود، بر اثر افزایش تلاطم گردابی ایجاد شده و حبس شدن حباب‌های هوا در زیر سطح زاویه‌دار صفحات، مقدار کاهش نسبی طول غلتاب بیشتر است. زاویه  $90^\circ$  درجه بیشترین کاهش را در طول غلتاب داشته است. برای دستیابی به رابطه‌ای بین طول نسبی غلتاب پرش

هیدرولیکی و اثر عدد فرود اولیه، آرایش قرارگیری و زوایای برخورد صفحات مستغرق از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. با در نظر گرفتن  $\frac{L_r}{D_1}$  به عنوان متغیر وابسته و  $Fr_1$  و  $\tan \alpha$  زاویه برخورد صفحات مستغرق برحسب درجه و به عنوان متغیرهای مستقل، ضرایب معادله (۱۵) محاسبه شده است:

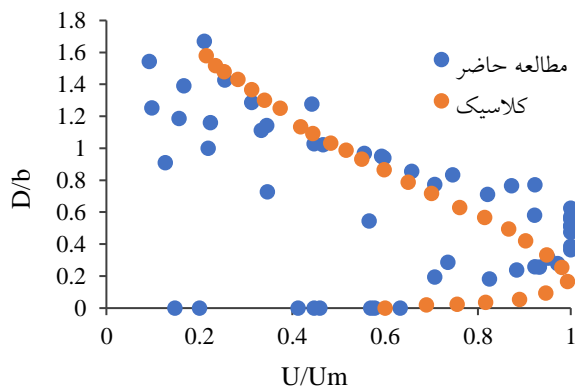
$$\frac{L_r}{D_1} = 6.187Fr - 3.822 \tan \alpha - 0.606 \quad (15)$$

### پروفیل سرعت در پرش هیدرولیکی

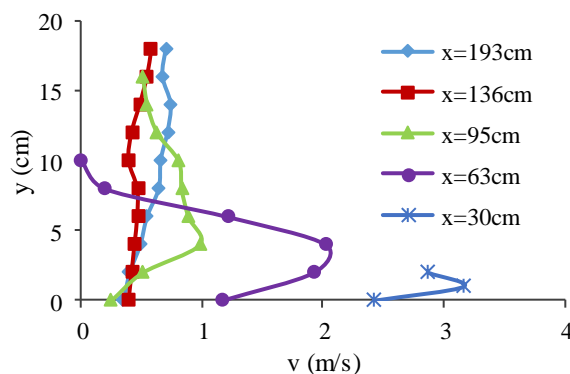
شکل ۱۱ قسمت (الف)، پروفیل عمقی سرعت در طول حوضچه آرامش به طور نمونه در آزمایش A1a45 و قسمت (ب)، پروفیل بدون بعد سرعت در تمامی آزمایش‌ها برای مقطع تاج پرش نشان می‌دهد. همان‌طور که از قسمت الف شکل مشخص است، مقدار بیشینه سرعت در آغاز پرش بوده و هرچه به انتهای آن



شکل ۱۰. تغییرات نسبی طول غلتاب به  $Fr_1$ ، در بستر صفحات مستغرق با زوایای برخورد مختلف



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. الف) نمودار عمقی سرعت در طول حوضچه آرامش در آزمایش A1a45 و

ب) نمودار عمقی بدون بعد سرعت در طول حوضچه آرامش

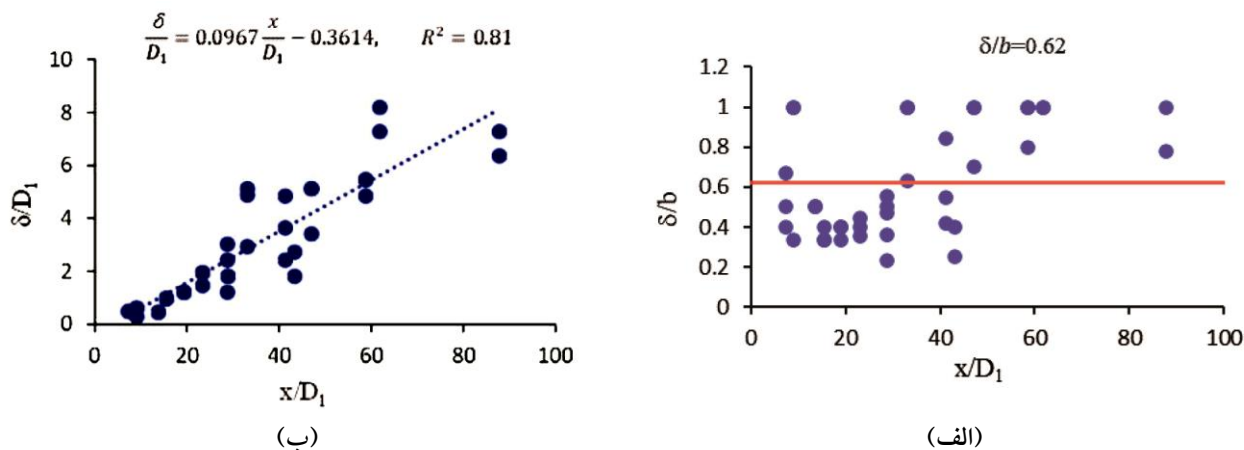
به دلیل کم بودن اثر آشفتگی و جریانات ثانویه ناشی از وجود صفحات مستغرق، ضخامت لایه مرزی در قسمت‌های آرام جریان (جاهایی با سرعت کمتر) بیشتر است. در مقادیر کمتر از  $\delta/b = 50^\circ$  نسبت به خط میانگین کاهش می‌یابد و در قسمت (ب)، رابطه‌ای برای روند  $\delta/D_1$  در مقاطع مختلف اندازه‌گیری سرعت بیان شده است.

#### افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی

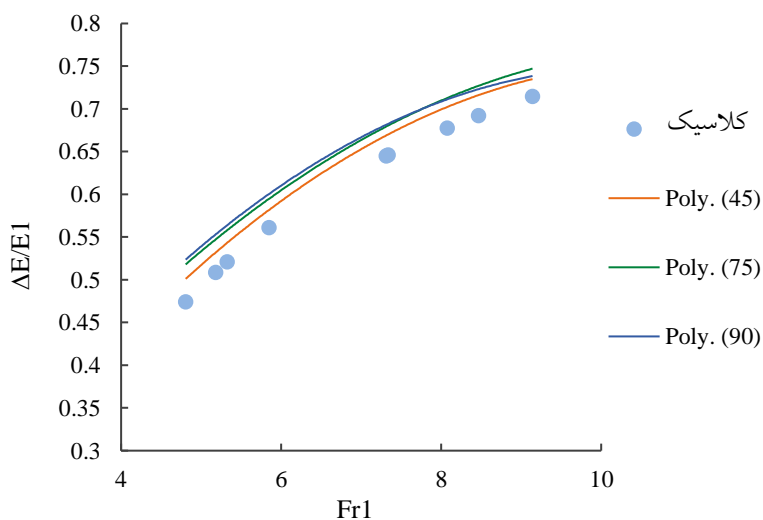
شکل ۱۳ مقادیر نسبی افت انرژی را نشان می‌دهد که از قرار دادن مقادیر در رابطه بلانگر (۱۸۲۸) محاسبه شده است (۸). افزایش عدد فرود اولیه منجر به افزایش بیشتر افت نسبی انرژی شده؛

نزدیک می‌شویم، مقدار آن کمتر شده و یکنواخت‌تر می‌شود که علت آن افت انرژی در طول پرش است. از طرفی در نمودار، سرعت از کف کانال به بالا افزایش یافته تا به نقطه بیشینه رسیده و دوباره به دلیل جریان‌های ثانویه سطحی، روند کاهشی دارد. به‌طور کلی مقدار بیشینه سرعت با دور شدن از آغاز پرش، کاهش یافته و در عمق پایین‌تری از سطح آب رخ می‌دهد. بستر صفحات مستغرق موجب کاهش مقدار سرعت جریان شده و مقدار بیشینه آن نسبت به پرش کلاسیک در نقاط بالاتر رخ می‌دهد.

شکل ۱۲ قسمت (الف)، مقدار  $\delta/b$  به‌طور میانگین برابر با  $0.62$  است و برای  $\delta/D_1 > 50^\circ$  از خط میانگین بالاتر واقع می‌شود.



شکل ۱۲. چگونگی تغییر معیار الف) عمق  $\delta/b$  و ب) ضخامت لایه مرزی  $\delta/D_1$  در برابر معیار طول  $x/D_1$

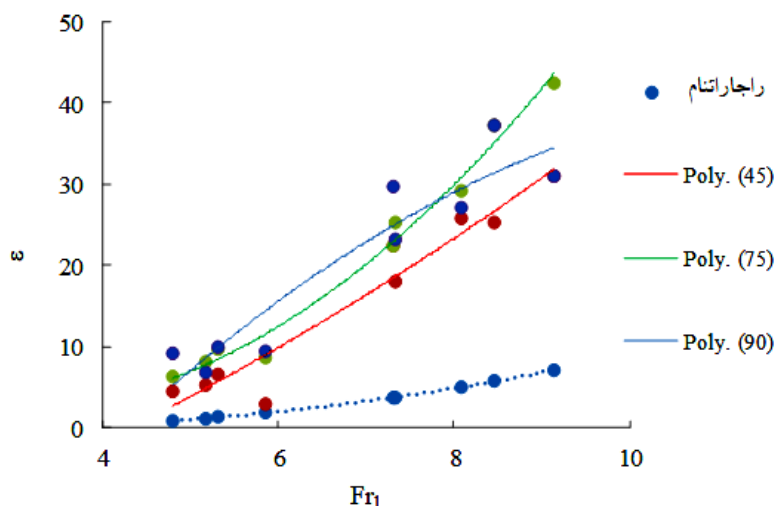


شکل ۱۳. مقادیر افت نسبی انرژی به  $Fr_1$

### تنش برشی بستر پرش هیدرولیکی

شکل ۱۴ مقادیر ضریب نیروی برشی برای زوایای مختلف را نشان می‌دهد. افزایش تنش برشی  $\tau$ ، دلیل مهم کاهش عمق ثانویه و طول پرش روی بستر صفحات مستغرق است. با استفاده از رابطه ضریب نیروی برشی در شرایط مختلف آزمایش‌ها محاسبه شد تا تأثیر زوایای برخورد و آرایش صفحات مستغرق ارزیابی شود. سپس منحنی تنش برشی بستر در مقابل عدد فرود اولیه جریان ترسیم شده است. ضریب نیروی برشی در زاویه برخورد ۴۵، ۷۵ و ۹۰ به ترتیب ۴/۶، ۶/۴ و ۶/۷ برابر نسبت به بستر صاف

به طوری که میانگین افت نسبی انرژی برای صفحات مستغرق با زوایای برخورد ۴۵، ۷۵ و ۹۰ به ترتیب برابر با ۴/۰، ۶/۲ و ۶/۵ درصد است. همان‌گونه که دیده می‌شود، افت نسبی انرژی در زاویه برخورد ۹۰ بیشینه است و دلیل آن هم افزایش سطح تماس غلتاب‌ها با زبری‌ها و ایجاد اصطکاک بیشتر در مقابل جریان آب با افزایش زاویه برخورد صفحات است. این فرایند باعث بازشدن حباب‌ها و غلتاب‌های موجود در پرش هیدرولیکی و آزادشدن انرژی ذخیره شده در آنها می‌شود.



شکل ۱۴. مقادیر ضریب نیروی برشی به  $Fr_1$  برای زوایای مختلف

را انتخاب کند. برای نمونه در کاربردهایی با عدد فرود جریان کمتر می توان از زوایای برخورد بیشتر استفاده کرد؛ اما این امکان در سازه های کنترل سیلاب که عدد فرود زیادی دارند، کمتر است.

- به دلیل مقاومت مکانیکی زیاد صفحات تفلون گرافیت و استفاده از تعداد محدود صفحات مستغرق در مقایسه با موانع غیر ممتد متراکم، استفاده از آنها در عمل مقرون به صرفه و آسان است.

مطالعه حاضر و روابط ارائه شده آن که حاصل ۲۷ آزمایش تجربی برای استفاده از صفحات مستغرق زاویه دار است، می توانند در طراحی سازه های هیدرولیکی استفاده شوند و همچنین زمینه ای برای پژوهش های بیشتر با موضوع صفحات مستغرق زاویه دار باشند و همچنین در روند توسعه پژوهش ها بررسی آرایش های چیدمان متفاوت گروه صفحات، تغییر در ابعاد صفحات و نصب تعداد صفحات بیشتر بر بستر پیشنهاد می شود. خلاصه نتایج پژوهش اثر زوایای برخورد صفحات مستغرق روی بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی در جدول ۳ و مشخصه های اصلی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر در پژوهش های اخیر در جدول ۴ آمده است.

معادله راجاراتنام (۱۹۶۸) است. با افزایش عدد فرود و تلاطم، ضریب نیروی برشی افزایش یافته؛ به طوری که این افزایش در حالتی که بستر زبر باشد، بیشتر از حالت کلاسیک و بدون زبری است. مقادیر ضریب نیروی برشی در بستر زبر بالاتر از این مقدار در حالت کلاسیک است.

به طور خلاصه استفاده از صفحات مستغرق تأثیر قابل توجهی روی بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی داشته و بیشترین تأثیر آن ها روی کاهش طول پرش و غلتاب است. میزان این تأثیر با افزایش عدد فرود جریان افزایش می یابد. با افزایش زاویه برخورد صفحات، میزان بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی بیشتر است.

### نتیجه گیری کلی

- انتخاب زاویه برخورد تحت شرایط به کارگیری صفحات مستغرق معلوم می شود و از متغیرهای طراحی آنها است؛ زیرا اگرچه با افزایش زاویه برخورد و عدد فرود جریان میزان بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی بیشتر می شود، ولی از سوی دیگر مزاحمت هایی نظیر شوت جریان، ایجاد جت و افزایش کاویتاسیون، میزان افزایش زاویه برخورد را متناسب با عدد فرود جریان کاهش می دهد و طراح باید نقطه بهینه این دو اثر

جدول ۳. درصد بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی در زوایای برخورد مختلف (۵ و ۶)

درصد تأثیر متغیرها	۳۰°	۴۵°	۶۰°	۷۵°	۹۰°
کاهش نسبت اعماق مزدوج	۴/۹	۶/۶	۷	۱۰/۵	۱۰/۷
کاهش طول پرش	۱۵/۵	۱۶	۲۰	۳۴/۴	۲۳/۳
کاهش طول غلتاب	۱۶/۲	۱۹/۸	۲۳/۶	۳۳/۳	۳۶/۴
افزایش افت انرژی	۳/۹	۴	—	۶/۲	۶/۵
افزایش ضریب نیروی برشی	—	۴/۶	—	۶/۴	۶/۷

جدول ۴. مشخصه‌های اصلی پرش هیدرولیکی روی بستر زبر در پژوهش‌های اخیر (۱۷ و ۲۳)

بسترها	محققین پژوهشگران	Fr <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> /y <sub>1</sub>	L <sub>j</sub> /y <sub>1</sub>
	اید و راجاراتنام (۱۳)	۴-۱۰	۴.۱-۱۰.۴	۱۶.۱-۴۲.۹
	اوکیمن (۱۵)	۷.۳-۱۵.۹	۸.۷-۱۸	۳۲.۴-۷۸.۵
	سیمسک (۳۳)	۲.۱-۱۱.۹	۲.۶-۱۴.۸	۸.۹-۷۶.۸
	عباسپور و همکاران (۱)	۴-۸	۴.۱-۸.۵	۱۶.۱-۳۳.۳
بستر زبر مصنوعی	السبایه و شبایک (۱۴)	۳-۷.۵	۲.۲-۶.۴	۴-۲۶
	اوکیمن (۱۶)	۳.۹-۱۳.۳	۴.۲-۱۴.۹	۳۸.۱-۱۵۱.۹
	نلوالا و همکاران (۲۷)	۳-۴	۳-۴.۴	—
	ولی اوغلو و همکاران (۳۵)	۸.۷-۱۳.۳	۱۰.۵-۱۵.۸	۴۰.۳-۷۲.۲
	اخوان (۲)	۴.۵-۹.۲	۵.۳-۱۰.۷	۲۶.۹-۵۶.۲
بستر زبر طبیعی	کارلو و همکاران (۹)	۱.۹-۹.۹	۲.۸-۹.۷	—

## منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, A., A. Hosseinzadeh Dalir, D. Farsadzadeh and A. A. Sadraddini. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environment Research* 3(2): 109-117.
2. Akhavan, K. 2024. Evaluation of hydraulic jump specifications and performance in the aeration stage of the treatment process by changing the specifications submerged vanes. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
3. Asadi, F., R. Fazl Ola and A. Emadi. 2019. Laboratory investigation of the effect of flow bed roughness on hydraulic jump characteristics. *Iranian Water Researches Journal* 13(4):39-49.
4. Azizi, A. 2012. Investigating the effect of submerged vanes on the characteristics of hydraulic jump in the stilling basin. Master thesis. Shahrekord University, Shahrekord I.R. Iran
5. Bagheri, H and M. Heidarpour. 2019. Investigating the effect of submerged vanes on conjugate depths and hydraulic jump length, Eleventh National Congress on Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.
6. Bagheri, H and M. Heidarpour. 2024. Laboratory investigations on hydraulic jump characteristics using submerged vanes with a certain angle of attack. *Iranian Water Researches Journal* 17(4): 51.
7. Bagheri, H., M. Heidarpour and F. Noghani. 2023. Laboratory investigations on hydraulic jump characteristics using submerged vanes and adverse slope. *Journal of Hydro-environment Research* 51:15-24.

8. Belanger, J. B. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilan-Goeury, Paris.
9. Carollo, F.G., V. Ferro and V. Pampalone. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(9): 989-999
10. Daneshfaraz, R., J. Chabokpour and H. Nezafat. 2019. Experimental investigation of the scouring due to hydraulic jump in screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(5): 1039-1051.
11. Daneshfaraz, R., S. Sadeghfam and O. Minaei. 2020. Experimental study of energy dissipation in the stilling basin with movable bed in the upstream of screens. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(9): 2113-2123.
12. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and R. Mirzaeereza. 2019. Experimental study of expanding effect and sand-roughened bed on hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4): 885-896.
13. Ead, S. A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(7): 656-663
14. Elsebaie, I. H. and Sh. Shabayek. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 10(1): 37-47.
15. Evcimen, T. U. 2005. The effect of prismatic roughness elements on hydraulic jump, Master thesis. Middle East Technological University, Ankara, Turkey.
16. Evcimen, T.U. 2012. Effect of prismatic roughness on hydraulic jump in trapezoidal channels. PhD. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
17. Ghazali, M., H. Samadi brojni, B. Ghorbani and A. Rahmati. 2012. A Laboratory study of velocity profile at hydraulic jump on triangular corrugated bed. *Irrigation and Water Engineering* 2(4): 117-128.
18. Habibzade, A. 2015. Hydraulic properties of jumping in sloping stilling basin with divergent sections and the use of submerged vanes. Master thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources Gorgan, I.R. Iran.
19. Hager W. H. 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Springer Science and Business Media Dordrecht, Switzerland.
20. Hughes, W. C and J. E. Flack. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(12): 1755-1771.
21. Izadjoo, F and M. Shafai Bajestan. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences* 7(8): 1164-69.
22. Madani, H. 1383. Fluid mechanics and hydraulics. Academic Jahad Publications of Allameh Tabatabai branch, Tehran.
23. Mahtabi, Gh., B. Chaplot, H. M. Azamathulla and M Pal. 2020. Classification of hydraulic jump in rough beds. *Water* 12(8): 2249: 1-11.
24. Majedi Asl, M., R. Daneshfaraz, N. Salehi. and E. Aminvash. 2021. Laboratory study of the effect of sill, submerged vanes and groyne on scour depth around the piers group. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(4): 1135-1148.
25. Majedi Asl, M., R. Daneshfaraz, J. chabokpour and B. Ghorbani. 2022. Experimental study of the effect of gabion structure on the energy dissipation of submerged hydraulic jump downstream of ogee spillway. *Journal of Water and Soil Science* 26 (2): 75-90.
26. Mohammad Zade, S. 2021. Investigating the effect of zigzag blocks on hydraulic jump. Master thesis, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, I.R. Iran.
27. Neluwala, N., K. Karunanayake, K. Sandaruwan and K. Pathirana. 2013. Characteristics of hydraulic jumps over rough beds-An experimental study *Engineer Journal of the Institution of Engineers*, Sri Lanka 46(3): 1-7.
28. Parsamehr, P., D. Farsadizadeh, A. Hosseinzadeh Dalir, A. Abbaspour and M.J. Nasr Esfahani. 2015. Investigation of hydraulic jump characteristics on rough bed with different density and arrangements of roughness elements. *Journal of Water and Soil Science* 26(4.1): 13-24.
29. Peterka, A.J. 1958. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators; USA Bureau of Reclamation: Washington.
30. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transactions of the Engineering Institute of Canada* 11(A-2): 1-8
31. Sadighi Hersini, H. 2017. Laboratory evaluation of the combined effect of submerged vanes and flow opening on hydraulic jump characteristics. Master thesis, Shahrekord University, Shahrekord, I.R. Iran
32. Salmani matbo, A. H. 2021. Investigating the effect of triangular obstacles on hydraulic jump characteristics. Master thesis, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, I.R. Iran.
33. Şimşek, Ç. 2006. Forced hydraulic jump on artificially roughened beds. Ankara, Turkey. Master. thesis, department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
34. Soltani samani, H. 2013. Investigating the effect of the dimensions of submerged vanes and the vertical angle of their placement on hydraulic jump characteristics. Master thesis, Shahrekord University, Shahrekord, I.R. Iran.
35. Velioglu, D and N.D. Tolyay. 2015. Dincer, A.E. A Numerical and experimental study on the characteristics of

hydraulic jumps on rough beds. In Proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands, 28 June–3 Jul



## The Effect of Submerged Vanes on Improving Hydraulic Jump Characteristics and Investigating the Role of Attack Angle

K. Akhavan, M. Heidarpour\* and N. Pourabdollah<sup>1</sup>

(Received: May 25-2024 ; Accepted: June 23-2024)

### Abstract

One of the ways to improve the characteristics of the hydraulic jump in the stilling basin is to use natural and artificial roughness. Recently, due to the advantages of immersed plates compared to other non-continuous artificial roughness, such as the smaller number of these and the vanes' ability to design their geometry and arrangement, it has been approached more. In this article, the effect of submerged vanes with three contact angles of  $45^\circ$ ,  $75^\circ$ , and  $90^\circ$  has been investigated on the improvement of the characteristics of a hydraulic jump and its effect on parameters such as the depth ratio, relative length, energy loss rate, and bed shear force coefficient has been evaluated. The results of this research showed that the average effect of submerged vanes on reducing the depth ratio, jump length, and roller length compared to the classical mode is 9.4%, 24.6%, and 28.4%, respectively and the average relative energy loss is 5.5% compared to the classical state and maximum relative energy loss at the angle of 90 degrees of submerged vanes is 6.5%. Considering these results and other conditions such as ease of construction and use, stabilization, and reduction of economic costs among the available choices of sunken vanes, the angle of incidence of  $75^\circ$  is a suitable option for the optimal design of the stilling basin.

**Keywords:** Hydraulic jump, Stilling basin, Submerged vanes, Angle of attack, Conjugated depths ratio, Jump length, Energy loss

---

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: Email: heidar@iut.ac.ir