

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

کیمیا اخوان^۱، منوچهر حیدرپور^{۲*} و ناهید پورعبدالله^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۵)

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 غیرممتد 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° ، 75° و 90° 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° 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° 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. سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. 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 سریعاً از حالت پایدار خارج شده و به یک حالت ناپایدار تغییر می‌کند. این پدیده در مخازن آب، سدها، رودخانه‌ها و سایر تاسیسات 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.

به دلیل 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 شده است (۲۵).

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. به طور کلی، بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی نیازمند توجه به همه‌ی این عوامل بوده و تلفیق مؤثر آن‌ها می‌تواند به بهبود مشخصات پرش و دستیابی به نتایج ایمن و مقرون به صرفه اقتصادی کمک کند. از این رو 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 (۹ و ۱۰ و ۲۱). عده زیادی به بررسی اثر زبری بستر اعم از طبیعی و مصنوعی پرداخته‌اند (۱۱ و ۲۲). اولین کسی که مطالعات سینماتیک خود را درباره پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر انجام داد، راجاراتنام در سال ۱۹۶۸ بود (۲۶). نتایج مطالعات 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 (۱۸).

یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی، استفاده از زبری مصنوعی است. زبری‌های مصنوعی به ترتیب در انواع نواری، سینوسی، دندان‌های، متراکم و صفحات مقاوم‌تری ابداع و بررسی شده‌اند. اید و راجاراتنام نشان دادند که طول پرش بر روی بستر موجدار سینوسی شکل تقریباً نصف طول آن، بر روی بستر صاف است. آن‌ها در ارتفاع نسبی موج ۰/۲۵ و ۰/۴۳ و ۰/۵ و دامنه عدد فرود ۴-۱۰ تحقیق کرده‌اند (۱۲). اوکیمین با قرار دادن نوارهای منشوری مستطیلی به موازات بستر کانال خواص پرش هیدرولیکی را با افزایش زبری بستر در کانال‌های دوزنقه‌ای 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 بر 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 (۱۴ و ۱۵). 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 بر 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

۱۰/۹۴ درصد است (۲۴).

اسدی و همکاران، با انجام آزمایش بر ۲۴ بستر زیر مکعبی با آرایش زیگزاگی و ردیفی، با ردیف‌ها و زاویه‌های مختلف در محدوده اعداد فرود ۵/۵ 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، به‌عنوان 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 امکان‌پذیر شده است. صدیقی هرسینی (۱۳۹۶)، حبیب زاده (۱۳۹۴)، عزیززی (۱۳۹۱)، سلطانی سامانی (۱۳۹۲)، سلمانی مطبوع (۱۴۰۰) و محمدزاده (۱۴۰۰) از جمله کسانی هستند که با صفحات مقاومتی پژوهش کرده‌اند. در ایران باقری برای اولین بار بر روی اثر صفحات مستغرق (با تعداد محدود) بر بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی پرداخته است (۴). وی به بررسی تأثیر شیب معکوس و ورقه‌های مستغرق بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی پرداخته و نتیجه گرفته 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 ۶۰ 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 آنجا که مهندسی این صفحات با طراحی دو عنصر هندسه

انرژی و کاهش عمق پایاب و طول پرش دارد (۲۸). غزالی و همکاران به بررسی تأثیر زبری‌های مثلثی 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 به‌طور متوسط ۵/۸ برابر بستر صاف است (۱۶). ایزدجو و شفاعی بجستان بر 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 (۲۷). عباسپور و همکاران آزمایش‌های خود را بر روی زبری‌های سینوسی شکل انجام داده‌اند. این محققین نسبت به بسترهای صاف حدود ۲۰ درصد کاهش عمق پایاب (در یک عمق فوق بحرانی و عدد فرود مشخص) گزارش کرده‌اند. محدوده اعداد فرود $1/6 < Fr_1 < 3/6$ و برای ۶ شیب موج مختلف در محدوده $0/286 \leq t/s \leq 0/625$ بوده است (۱). نتایج پژوهش‌های السبایه و شبایک بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر در مقایسه با پرش بر روی بستر صاف بوده است. آن‌ها در محدوده عدد فرود ۳ تا ۷/۵ بر روی پنج نوع بستر زبر شامل زبری‌های سینوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای با دو شیب متفاوت و مستطیلی مطالعه آزمایشگاهی انجام داده‌اند (۱۳). پارسامهر و همکاران مشخصات پرش هیدرولیکی با تراکم و آرایش‌های مختلف زبری را بررسی کرده‌اند و آزمایش‌هایی در محدوده اعداد فرود ۳/۴ تا ۱۲/۴ 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 ۱۰/۶۷ درصد، بیشترین مقدار کاهش عمق ثانویه برابر با ۲۹/۳۹ درصد مشاهده شده است. همچنین میزان افزایش استهلاک انرژی نسبت به بستر صاف به‌طور متوسط

آب از آنجا نیز به سمت منبع ذخیره هدایت شده و مجدداً این چرخه تکرار می‌شود.

اندازه‌گیری دبی جریان: دبی سنج الکترونیکی پس از پمپ گریز از مرکز و هم‌سطح با کانال آزمایشگاهی واقع شده که دبی جریان به کمک آن اندازه‌گیری شده است.

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 بالا آمده در لوله‌های چسبیده به تخته نشان دهنده ارتفاع معادل سرعت در رابطه برنولی بوده است.

صفحات مستغرق: از این صفحات به عنوان زبری در بستر کانال آزمایشگاهی استفاده شده است. هندسه یک صفحه مستغرق از جمله پارامترهای موثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی است و شامل عرض (w)، ضخامت (t)، زاویه‌ی برخورد (θ) و طول ورقه‌ها (L) می‌شود. در این پژوهش زاویه‌ی برخورد صفحات بررسی شد. این صفحات از جنس تفلون انتخاب شدند که هندسه و چیدمان آن‌ها با توجه به مشخصات جدول ۱ و شکل‌های ۲ و ۳ بوده است. نحوه چیدمان و فاصله بهینه صفحات مستغرق، با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی زبری نواری و صفحات مستغرق، گرفته شده است (۶، ۱۴ و ۲۸).

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 بر 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 (μ)، سرعت اولیه جریان (V_1)، جرم مخصوص آب (ρ) و زاویه برخورد

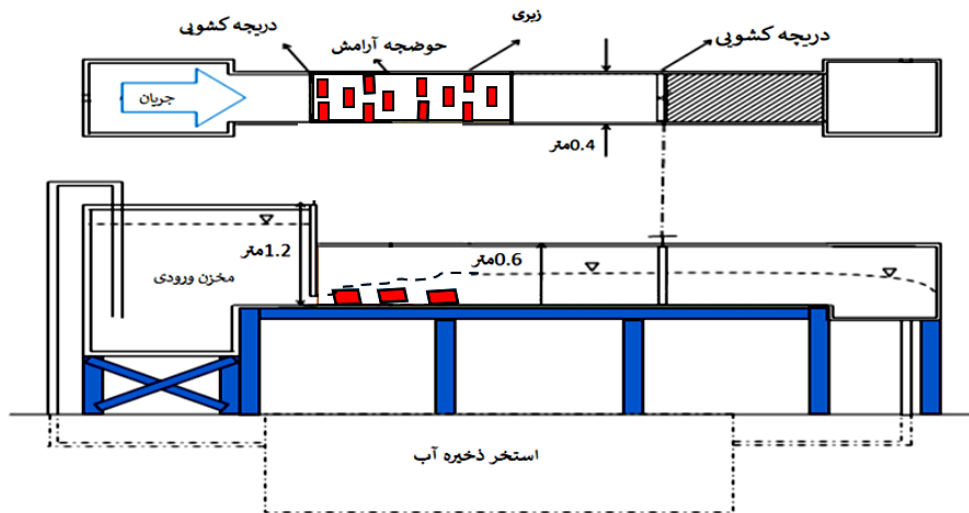
و چیدمان به سهولت امکان‌پذیر و قابل‌قیاس است این صفحات را می‌توان هدفمند استفاده کرد و اثر تغییر هندسه این صفحات یعنی شکل، ابعاد و زاویه برخورد (زاویه حمله) را در شرایط آزمایش مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش به تغییر زاویه برخورد و تأثیر آن بر روی بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت اعماق مزدوج و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

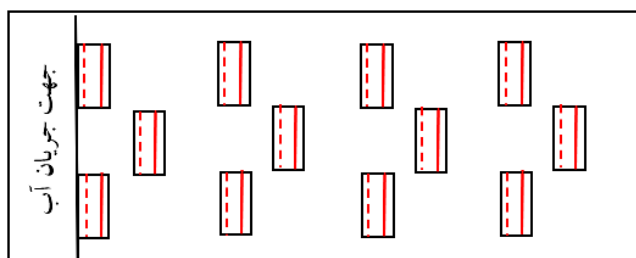
آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان، در کانالی با مقطع مستطیل شکل، با مشخصات فیزیکی طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. دیواره‌ها و کف کانال از جنس ورق پلکسی‌گلس شفاف بوده و موجب سهولت در برداشت داده‌ها شده است. کانال شامل دو دریچه یکی در ابتدا و دیگری در انتها بود که دریچه ابتدایی (بالادست)، میزان آب ورودی به کانال را تنظیم کرده و عدد فرود اولیه‌ی 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 پمپ گریز از مرکز، استفاده شده بود.



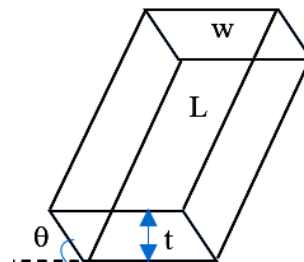
شکل ۱. نمای کانال به کار رفته در پژوهش

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

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

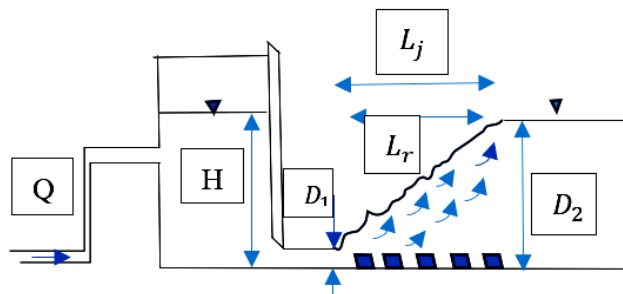


(ب)



(الف)

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



شکل ۳. کیفیت پرش هیدرولیکی بر روی بستر با صفحات مستغرق

از زبری که در مقابل جریان آب قرار می‌گیرد، V سرعت، q دبی در واحد عرض جریان، β_1 و β_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:

$$B = y_2 - y_1 \quad (۸)$$

$$C = \left(1 - \frac{c(n \times w \times t \times Fr_1^2 L)}{\sin \alpha \cdot K^2 \cdot B} + 2Fr_1^2 \right) \quad (۹)$$

$$D = \left(\frac{c(n \times w \times t \times Fr_1^2 L)}{\sin \alpha \cdot K^2 \cdot B} - 2Fr_1^2 \right) \quad (۱۰)$$

$$-\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + C\left(\frac{y_2}{y_1}\right) + D = 0 \quad (۱۱)$$

که K ضریب تصحیح نیمرخ سطح آب، n تعداد زبری‌ها، w عرض نمونه‌ها، t طول نمونه‌ها و α 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 ذکر 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° درجه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است مقادیر داده‌های آزمایشگاهی 30° و 60° در تمام مقایسه‌ها از رابطه آنالیز ابعادی با در نظر گرفتن مقدار شیب صفر استخراج شده است (۴ و ۵).

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

$$D_2 = f_1(D_1, V_1, B, g, \rho, \mu, \tan \alpha) \quad (۱)$$

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

$$\frac{D_2}{D_1} = f_2\left(\text{Re} = \frac{\rho V_1 D_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (۲)$$

در معادله (۲) مقدار عدد رینولدز بیشتر از 5000 است اثر لزجت در آن‌ها نادیده گرفته می‌شود و بنابراین (۱۹):

$$\frac{D_2}{D_1} = f_3\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (۳)$$

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

$$\frac{L_j}{D_1} = f_4\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (۴)$$

$$\frac{L_r}{D_1} = f_5\left(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g D_1}}, \tan \alpha\right) \quad (۵)$$

برای مثال، تعدادی از محاسبات عدد رینولدز در تحقیق 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.

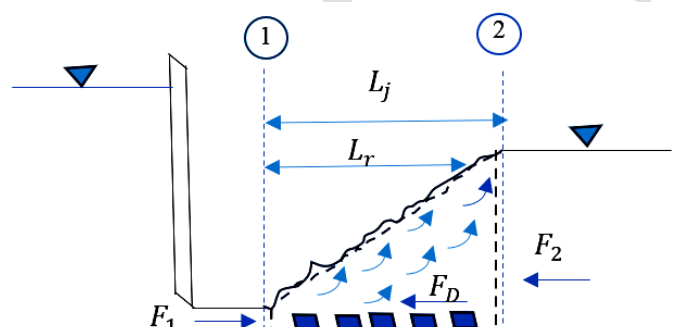
$$F_1 - F_2 - F_D + w \sin \theta = \rho q (\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2) \quad (۶)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho c A V^2 \quad (۷)$$

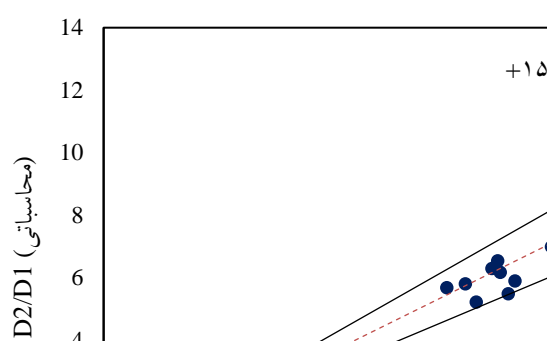
که در این معادله F_1 و F_2 نیروی فشاری وارد بر مقطع اولیه و ثانویه و w وزن آب محصور بین دو مقطع او ۲ بوده که در اینجا به دلیل نداشتن شیب (یا $\theta = 0$) مقدار $w \sin \theta$ صفر است، F_D نیز نیروی پسا است که در اثر زبری مصنوعی ایجاد می‌شود، ρ جرم مخصوص آب، c ضریب نیروی دراگ، A سطحی

جدول ۲. نمونه‌های از محاسبات انجام شده جهت محاسبه عدد رینولدز

Re(20°C)	D ₁ (m)	V ₁ ($\frac{m}{s}$)	A(m ²)	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

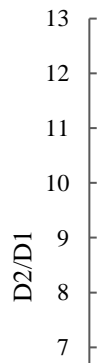


شکل ۵. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی اعماق مزدوج و نتایج تحلیلی

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه برخورد روند کاهشی این نسبت بیشتر شده است. 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.

در طی آزمایشات مشاهده شد که هنگام برخورد جریان با صفحات مستغرق در زوایای برخورد مختلف، یک نکته اساسی است تغییر در الگوی حرکت جریان رخ می‌دهد. 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 یافته است.



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، تاجایی 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.

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

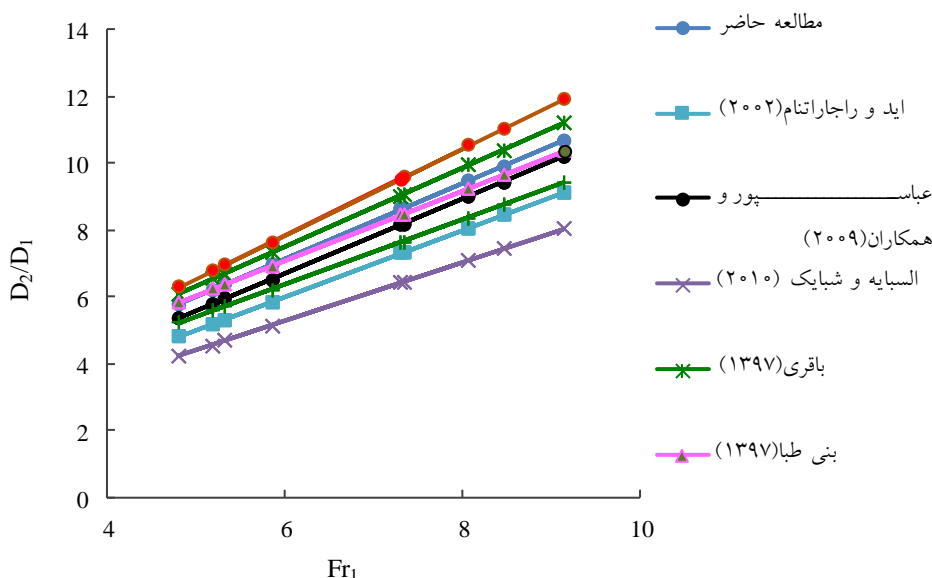
در این معادله D_2^* عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی کلاسیک و D_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در آزمایش‌های انجام شده است. در آزمایش‌های انجام شده مقدار Y حاصل برای بسترهای دارای صفحات مستغرق 45° و 75° و 90° به ترتیب برابر با $6/9$ ، $10/5$ ، $10/7$ درصد است و به‌طور میانگین برای تمامی حالات $9/4$ درصد است.

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، مشاهده 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 به صورت جداگانه نپرداخته‌اند همچنین نوع، ابعاد، هندسه، تعداد و چیدمان زبری و شکل و ابعاد کانال این پژوهش با مطالعات آن‌ها متفاوت بوده است از طرفی در این پژوهش بحث کاربردی و اقتصادی بودن به صورت همزمان در کنار بهینه کردن مشخصه‌های پرش هیدرولیکی جزو 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 بر حسب Fr_1 در $Z=45,75,90$ در مقایسه با تحقیقات پیشین

طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقایسه با حالت کلاسیک شده است. زاویه برخورد ۷۵ درجه نسبت به سایر زوایا تأثیر بیشتری روی این متغیر داشته است. به طور 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 شده است. همان‌طور که مشاهده 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 داده است (۱۴).

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

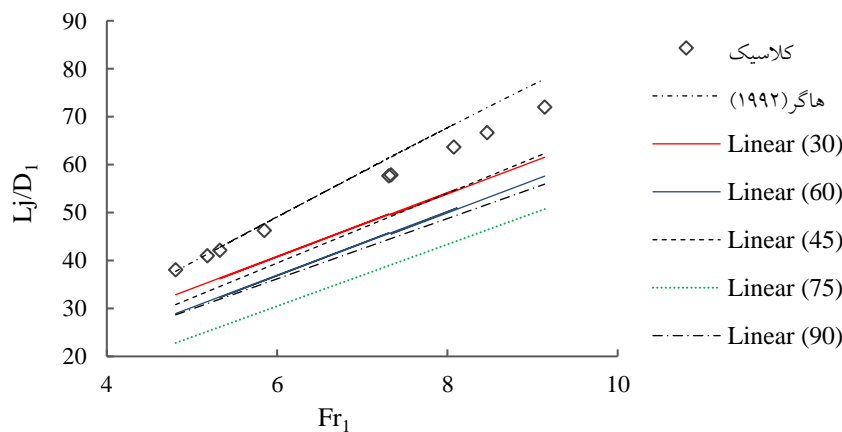
$$\frac{L_j}{D_1} = 7.179Fr_1 - 4.579 \tan \alpha + 3.26 \quad (14)$$

با توجه به تلاطم و غلتاب‌هایی 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 به عنوان متغیر وابسته و Fr_1 و $\tan \alpha$ به عنوان پارامترهای مستقل ضرایب معادله (۱۳) برای آرایش مورد نظر محاسبه شده است:

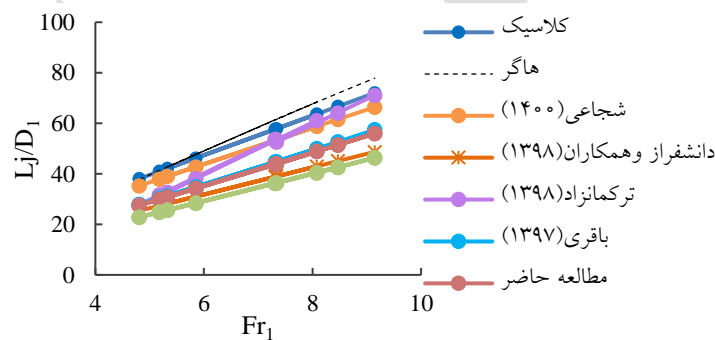
$$\frac{D_2}{D_1} = 1.171Fr_1 - 0.23 \tan \alpha + 0.764, \quad R^2 = 0.981 \quad (13)$$

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° ، 75° و 90° به ترتیب $16/0$ ، $34/4$ و $23/3$ درصد نسبت به حالت کلاسیک بود که افزایش زاویه صفحات مستغرق با ایجاد غلتاب در خلاف جهت جریان، باعث کاهش



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



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

طول نسبی غلتاب

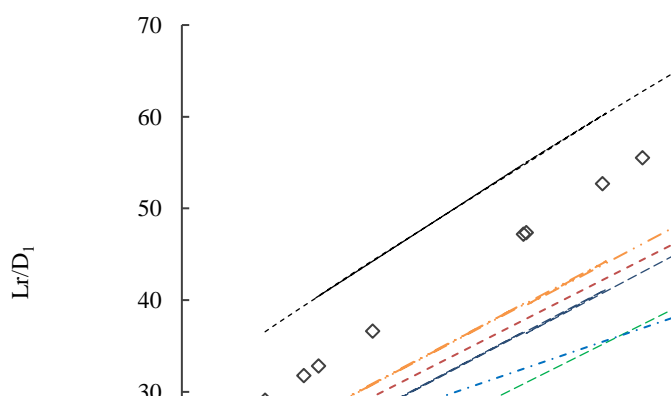
شکل ۱۰ تغییرات نسبی طول غلتاب در بستر صفحات مستغرق با زاویه برخورد مختلف را نشان می‌دهد. مقدار کاهش نسبی طول غلتاب برای سه زاویه برخورد 90° ، 75° و 45° نسبت به حالت کلاسیک به ترتیب برابر با $19/8$ ، $36/5$ و $28/8$ درصد است. به طور میانگین استفاده از صفحات مستغرق توانسته است $28/4$ درصد از طول نسبی غلتاب پرش بکاهد. با افزایش عدد فرود طول نسبی غلتاب پرش نیز افزایش می‌یابد. همچنین هر چه زاویه برخورد صفحات مستغرق به 90° 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° 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 بر حسب درجه و به عنوان متغیرهای مستقل ضرایب معادله (۱۵) محاسبه شده است.

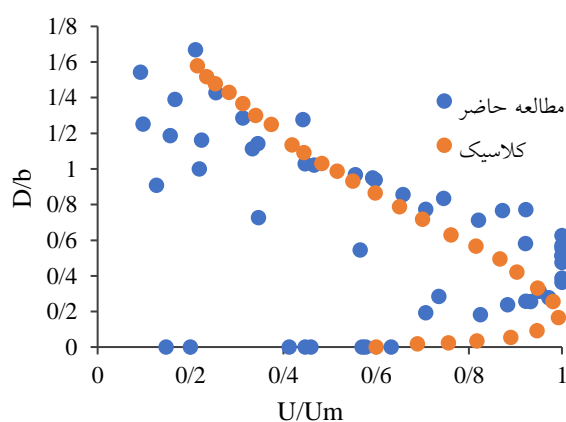
$$\frac{L_r}{D_1} = 6.187Fr - 3.822 \tan \alpha - 0.606 \quad (15)$$

پروفیل سرعت در پرش هیدرولیکی

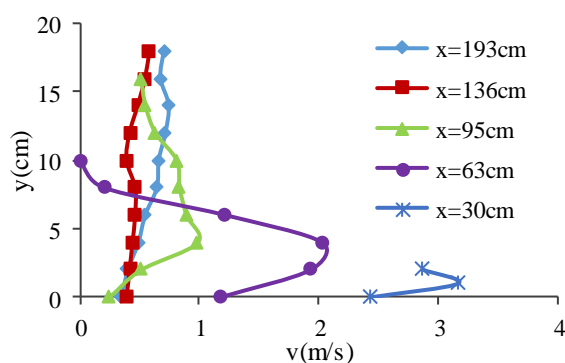
شکل ۱۱ قسمت (الف) پروفیل عمقی سرعت در طول حوضچه آرامش به طور نمونه در آزمایش A1a45 و قسمت (ب) پروفیل بدون بعد سرعت در تمامی آزمایش‌ها برای مقطع



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



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. الف) نمودار عمقی سرعت در طول حوضچه آرامش در آزمایش A1a45 (ب) نمودار عمقی بدون بعد سرعت در طول حوضچه آرامش

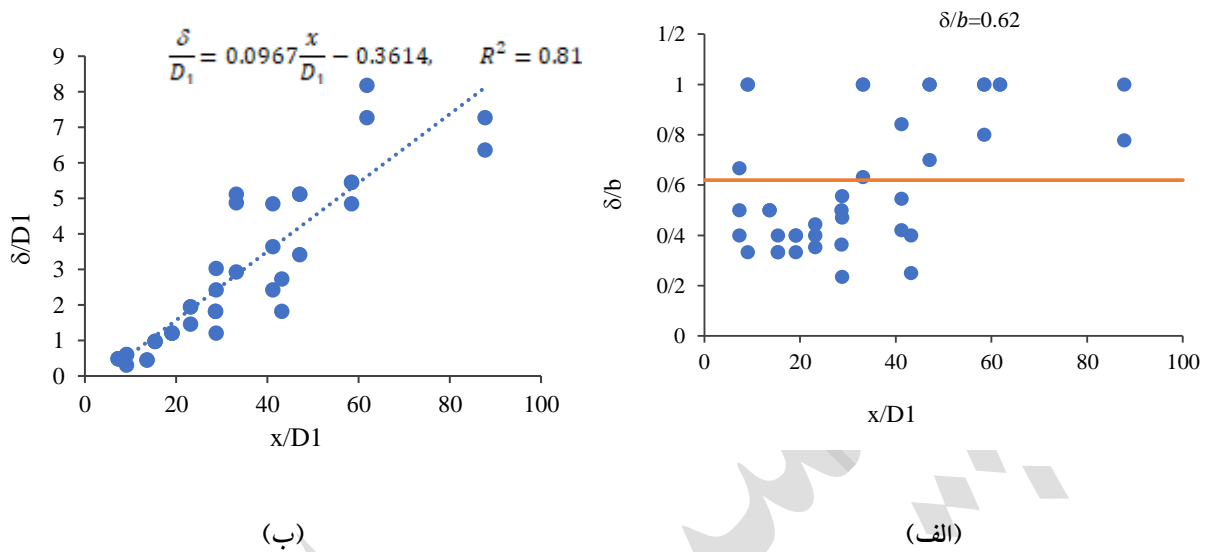
است و برای $\delta/b, x/D_1 > 50^\circ$ از خط میانگین بالاتر واقع می‌شود. به دلیل کم بودن اثر آشفتگی و جریانات ثانویه ناشی از وجود صفحات مستغرق، ضخامت لایه مرزی در قسمت‌های آرام جریان (جاهایی با سرعت کمتر) بیشتر است. در مقادیر کمتر از $\delta/b, 50^\circ$ نسبت به خط میانگین کاهش می‌یابد و در قسمت (ب)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

افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی

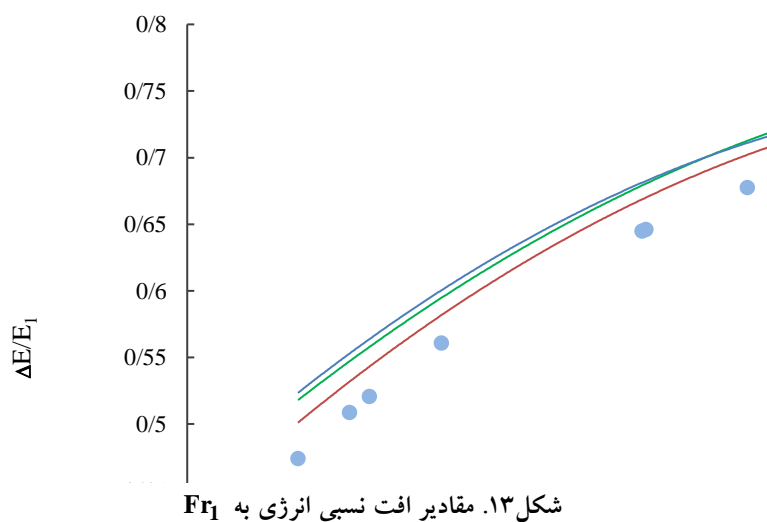
شکل ۱۳ مقادیر نسبی افت انرژی را نشان می‌دهد که از قرار دادن مقادیر در رابطه بلانگر (۱۸۲۸) محاسبه شده است (۷). افزایش عدد فرود اولیه منجر به افزایش بیشتر افت نسبی انرژی شده

تاج پرش نشان می‌دهد. همان‌طور که از قسمت الف شکل مشخص است مقدار بیشینه سرعت در آغاز پرش بوده و هرچه به انتهای آن 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 δ/b به‌طور میانگین برابر با ۰/۶۲



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

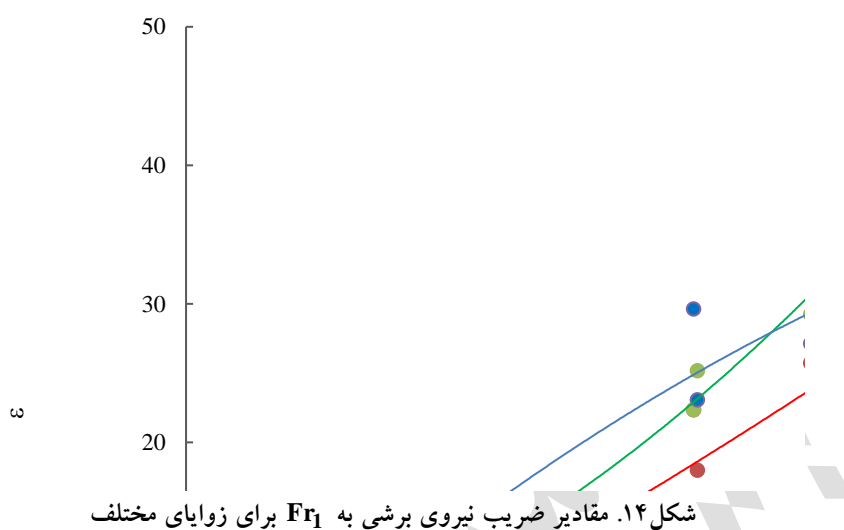


شکل ۱۳. مقادیر افت نسبی انرژی به Fr_1

تنش برشی بستر پرش هیدرولیکی

شکل ۱۴ مقادیر ضریب نیروی برشی برای زوایای مختلف را نشان می‌دهد. افزایش تنش برشی τ دلیل مهم کاهش عمق ثانویه و طول پرش بر 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 45° ، 75° و 90° به ترتیب $4/6$ و $6/4$ و $6/7$ برابر نسبت به بستر صاف

به طوری که میانگین افت نسبی انرژی برای صفحات مستغرق با زوایای برخورد 45° ، 75° و 90° به ترتیب برابر با $4/0$ ، $6/2$ و $6/5$ درصد است. همان‌گونه که دیده می‌شود افت نسبی انرژی در زاویه برخورد 90° 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 باز شدن حباب‌ها و غلتاب‌های موجود در پرش هیدرولیکی و آزاد شدن انرژی ذخیره شده در آن‌ها می‌شود.



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

انتخاب کند. به طور مثال 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 بالایی دارند کمتر است.

- به دلیل مقاومت مکانیکی بالای 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 تحقیقات 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 بر روی بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی در جدول ۳ و مشخصه های اصلی پرش هیدرولیکی بر 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.

بطور خلاصه استفاده از صفحات مستغرق تأثیر قابل توجهی بر روی بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی داشته و بیشترین تأثیر آنها بر 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 بکارگیری 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 باد نقطه ی بهینه این دو اثر را

جدول ۳. درصد بهبود مشخصات پرش هیدرولیکی در زوایای برخورد مختلف (۴ و ۵)

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 بر روی بستر زبر در پژوهش‌های اخیر (۱۶)

بسترها	محققین پژوهشگران	Fr ₁	y ₂ /y ₁	L _j /y ₁
	اید و راجاراتنام (۱۲)	۴-۱۰	۴.۱-۱۰.۴	۱۶.۱-۴۲.۹
	اوکیمین (۱۴)	۷.۳-۱۵.۹	۸.۷-۱۸	۳۲.۴-۷۸.۵
	سیمسک (۲۸)	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	السیایه و شبایک (۱۳)	۳-۷.۵	۲.۲-۶.۴	۴-۲۶
	اوکیمین (۱۵)	۳.۹-۱۳.۳	۴.۲-۱۴.۹	۳۸.۱-۱۵۱.۹
	نلوالا و همکاران (۲۳)	۳-۴	۳-۴.۴	—
	ولی اوغلو و همکاران (۲۹)	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 (۸)	۱.۹-۹.۹	۲.۸-۹.۷	—

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, A., A. Hosseinzadeh Dalir, D. Farsadizadeh 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. 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, University of Fars-Shiraz.
5. 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.
6. 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.
7. Belanger, J. B. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilan-Goeury, Paris.
8. Carollo, F.G., V. Ferro and V. Pampalone. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*,

133, 989–999

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Ead, S. A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128: 656-663
13. Elsebaie, I. H. and Sh. Shabayek. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 10: 37-47.
14. Evcimen, T. U. 2005. The effect of prismatic roughness elements on hydraulic jump, Master thesis. Middle East Technological University, Ankara, Turkey.
15. Evcimen, T.U. 2012. Effect of prismatic roughness on hydraulic jump in trapezoidal channels. PhD. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
16. 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.
17. Hager W. H. 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Springer Science and Business Media dordrecht.
18. Hughes, W. C and J. E. Flack. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110: 1755-1771.
19. Madani, H. 1383. Fluid mechanics and hydraulics. Academic Jahad Publications of Allameh Tabatabai branch.
20. Mahtabi, Gh., B. Chaplot, H. M. Azamathulla and M Pal. 2020. Classification of hydraulic jump in rough beds. *Water* 2020, 12(8)2249: 1-11.
21. 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.
22. 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.
23. 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, 1
24. 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: 13-24.
25. Peterka, A.J. 1958. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators; USA Bureau of Reclamation: Washington, DC, USA
26. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transactions of the Engineering Institute of Canada*, 11: 1-8
27. Izadjoo, F and M. Shafai Bajestan. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*. 7: 1164-69.
28. Şimşek, Ç. 2006. Forced hydraulic jump on artificially roughened beds. Ankara, Turkey. Master. thesis, department of Civil Engineering, Middle East Technical University.
29. 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 July.