

مقایسه مشخصات پرش هیدرولیکی روی انواع بسترهای موج دار

رضا بدیع زادگان^{۱*}، مجتبی صانعی^۲، کاظم اسماعیلی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۷

چکیده

پرش هیدرولیکی یکی از پدیده‌های مهم در استهلاك انرژی جنبشی جریان‌های فوق بحرانی می‌باشد. مطالعات قبلی نشان داده است که زبری موج دار بستر باعث افزایش استهلاك انرژی می‌گردد از این رو هدف از این تحقیق بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی انجام شده، پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار سینوسی افقی با نتایج سایر تحقیقات مشابه، روی انواع بسترهای موج دار افقی می‌باشد. از نتایج حاصل از این تحقیق رابطه خطی نسبت اعماق مزدوج با اعداد فرود بر روی کلیه بسترهای موج دار بود که مقادیر مختلف شیب موج زبری ها t/s ، تأثیر متفاوتی در کاهش این نسبت نداشته و انواع مختلف زبری‌ها حدوداً به یک میزان، باعث کاهش عمق ثانویه می‌شوند. عمده تغییرات، متوسط طول نسبی پرش L_j/y_2^* روی انواع بسترهای موج دار در بازه ۳ الی ۴ می‌باشد که میزان کاهش طول این نوع از پرش‌ها نسبت به پرش کلاسیک حدوداً ۳۵ الی ۵۰ درصد است. میزان اتلاف نسبی انرژی پرش $\Delta E/E_1$ روی انواع بسترهای موج دار، حدوداً ۵ درصد بیش تر از بستر صاف می‌باشد. از طرف دیگر با افزایش عدد فرود میزان ضریب نیروی برشی ε ، بسترهای موج دار افزایش می‌یابد که حدوداً ۶/۵ الی ۱۰ برابر بستر صاف است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، اعماق مزدوج، بستر موج دار سینوسی، ضریب نیروی برشی، طول نسبی پرش

مقدمه

بحرانی و v_1 ، y_1 و y_2^* به ترتیب متوسط سرعت اولیه و عمق اولیه جریان فوق بحرانی در بالادست پرش و عمق ثانویه پرش کلاسیک می‌باشند. همچنین براساس آزمایش‌های انجام شده‌ای که توسط اداره عمران و آبادانی ایالات متحده (USBR) روی پرش کلاسیک در حوضچه تیپ I انجام شد، نموداری برای برآورد طول این نوع از پرش ارائه گردید که در شکل (۳) نمایش داده شده است. از آنجایی که امروزه بهینه کردن سازه‌ها از نظر اقتصادی و پایداری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد لزوم تحقیقات گسترده در زمینه کاهش ابعاد حوضچه‌های آرامش و افزایش پایداری پرش در این نوع از حوضچه‌ها ضرورت یافته است که می‌توان به استفاده از بلوک‌ها و آب پایه‌ها در داخل حوضچه‌های آرامش تیپ III و II و USBR اشاره نمود که این تجهیزات خود عامل کاهش طول و عمق ثانویه پرش گشته و در نتیجه، کاهش ابعاد حوضچه‌های آرامش را به همراه دارند (Peterka, 1958).

از این رو هدف تحقیقات بعدی محققین، به‌کارگیری بسترهای موج دار در کف حوضچه‌های آرامش و بررسی تأثیر این نوع از زبری‌ها بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بوده است. حوضچه‌های آرامش با بسترهای موج دار، به حوضچه‌هایی اطلاق می‌شود که المان‌های زبری به صورت نوارهای موازی و یکنواخت، عمود بر جهت جریان در کف حوضچه قرار گرفته باشند و از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در

پرش هیدرولیکی یکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک بوده که محققین آن را در زمره جریان‌های متغیر سریع معرفی نموده‌اند. در اثر این پدیده، جریان در مسیر کوتاهی با تغییر وضعیت از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی، قسمت اعظم انرژی جنبشی خود را به انرژی گرمایی و پتانسیل تبدیل نموده و جریان سیال به آرامش می‌رسد. مطالعات اولیه در این زمینه، به پرش کلاسیک نوع A مربوط می‌شود در این ارتباط می‌توان به تحقیقات پترکا، راجاراتنام، هیگر و بریمن و ... (Peterka., 1958, Hager and Rajaratnam., 1965, Bremen., 1989) اشاره نمود. همچنین بلانگر، برای محاسبه عمق ثانویه پرش کلاسیک رابطه (۱) را ارائه نمود:

$$\frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (1)$$

که $Fr_1 = v_1 / \sqrt{gy_1}$ عدد فرود اولیه در مقطع جریان فوق

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشیار مرکز تحقیقات حفاظت آب و خاک استان تهران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* نویسنده مسئول: (Email: rbadizadegan@gmail.com)

کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه و طول پرش در مقایسه با پرش کلاسیک تأثیر دارد هم‌چنین وی علت کاهش عمق ثانویه و طول پرش را افزایش تنش برشی کف روی بسترهای زیر بیان کرد. از طرف دیگر، وی با مقایسه کار حاضر خود با مطالعات مشترکی که با راجاراتنام در سال ۲۰۰۲ انجام دادند شاهد اختلافات زیادی در میزان کاهش عمق ثانویه و طول پرش بوده که نتوانست دلیلی برای آن ذکر کند و تبیین این تفاوت‌ها را منوط به انجام تحقیقات بیشتر دانست. ایزدجو و شفافی بستان مطالعات خود را با زبری‌های ذوزنقه ای نواری با سه طول موج (s) $12/5$ ، $6/8$ و $3/4$ سانتی‌متر و دو عمق موج $1/3$ و $2/6$ سانتی‌متر ($t/s = 0.191, 0.208, 0.382$) در کانالی به عرض 0.5 متر در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۲ انجام دادند (Izadjoo and Shafai-Bejestan, 2007). آن‌ها نشان دادند که عمق مورد نیاز پایاب برای تشکیل پرش بر روی بسترهای زیر همانند مطالعات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و توکیا (۲۰۰۵) 20% کم‌تر از بستر صاف می‌باشد. هم‌چنین نتیجه گرفتند که طول پرش کلاسیک بیش از دو برابر طول پرش در بستر زیر می‌باشد. عباسپور و همکاران با انجام آزمایش‌هایی در محدوده اعداد فرود $3/8$ تا $8/6$ مشخصات پرش هیدرولیکی را در بستر موج‌دار سینوسی با دو طول موج ۴ و ۷ سانتی‌متر و چهار عمق موج $1/5$ ، 2 ، $2/5$ و $3/5$ سانتی‌متر ($0.375, 0.5, 0.625, 0.75$) - 0.357 ، $t/s = 0.286$) در کانالی به عرض 0.25 متر بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقادیر عمق ثانویه و طول پرش روی بستر موج‌دار به ترتیب 20% و 50% کم‌تر از بستر صاف است (Abbaspour et al, 2009). ضریب نیروی برشی در بستر موج‌دار به ازای عدد فرود ۴ در حدود ۱۰ برابر بیش‌تر از بستر صاف است و با افزایش عدد فرود این ضریب افزایش بیش‌تری را نشان می‌دهد. غزالی و همکاران (۱۳۸۹) تأثیر بسترهای موج‌دار با مقطعی مثلثی، بر مشخصات پرش هیدرولیکی در کانالی مستطیلی به عرض و ارتفاع 0.4 متر در بازه اعداد فرود $6/1$ تا $13/1$ را مورد بررسی قرار دادند. ارتفاع تمام زبری‌ها $2/5$ سانتی‌متر ولی شیب وجه‌های جانبی آن‌ها متفاوت بوده است. آن‌ها بیان نمودند که به‌طور متوسط میزان عمق ثانویه و طول پرش به ترتیب حدوداً برابر 25 و $54/7$ درصد کاهش می‌یابد.

براساس مطالعاتی که اید (۲۰۰۷) روی بسترهای موج‌دار با اشکال مختلف انجام داد السبایی و شبایک اقدام به انجام آزمایش‌های جدیدی در بازه اعداد فرود ۳ تا $7/5$ در زمینه به کارگیری زبری‌های موج‌دار در بستر پرش با اشکال سینوسی، مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای (با ضلع مجاور ۴۵ و ۶۰ درجه) نمودند (Elsebaie and Shabayek, 2010). آن‌ها بیان نمودند شکل زبری‌ها و میزان زبری نسبی، تأثیر متفاوتی روی کاهش عمق ثانویه نداشته و همه زبری‌ها به صورت یکنواخت باعث کاهش عمق ثانویه پرش می‌شوند. هم‌چنین آن‌ها بیان نمودند علت کاهش عمق ثانویه و طول پرش،

مقابل فرسایش و کویتاسیون حائز اهمیت می‌باشد، بر اساس نظر اید و راجاراتنام نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به نحوی قرار گیرند که تاج آن‌ها هم سطح بستر بالادست بوده و نقش گود افتادگی را ایفا نمایند (Ead and Rajaratnam, 2002).

اولین تحقیقات در زمینه به‌کارگیری زبری‌های نواری توسط راجاراتنام انجام شده که نشان داد عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش روی این نوع از بسترها کوچک‌تر از عمق مزدوج مشابه خود در بستر صاف می‌باشد (Rajaratnam, 1965). هم‌چنین وی پارامتری به نام زبری نسبی $k = k_e / y_1$ تعریف کرد که در آن k_e ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق جریان ورودی فوق بحرانی بر روی زبری‌ها است. وی نشان داد که طول غلطاب و طول پرش روی بسترهای زیر در مقایسه با بستر صاف کاهش قابل توجهی دارند. اید و راجاراتنام مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی با یک طول موج $6/8$ سانتی‌متر و دو عمق موج (t) $2/2$ و $1/3$ سانتی‌متر ($t/s = 0.32, 0.19$) در کانالی مستطیلی به عرض 0.446 متر در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند (Ead and Rajaratnam, 2002). آن‌ها مشاهده کردند که عمق پایاب مورد نیاز برای پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی کم‌تر از عمق مشابه آن در پرش روی بستر صاف است. هم‌چنین آن‌ها نتیجه گرفتند که طول پرش روی این نوع از بسترها تقریباً نصف طول متناظر آن در بستر صاف است. آن‌ها دلیل کاهش طول پرش را افزایش تنش برشی بستر بر اثر هم‌کنش جریان فوق بحرانی با زبری‌های بستر توضیح دادند. توکیای اثرات بسترهای موج‌دار سینوسی را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی در کانالی به عرض $25/3$ سانتی‌متر و عمقی برابر $43/2$ سانتی‌متر مورد بررسی قرار داد (Tokuyay, 2005). وی علاوه بر داده‌های به‌دست آمده از نتایج مطالعات اید و راجاراتنام آزمایش‌های جدید با طول موجی (s) برابر ۵ سانتی‌متر با دو عمق موج (t) ۱ و $1/3$ سانتی‌متر ($t/s = 0.26, 0.12$) در بازه عدد فرود ۵ تا ۱۲ انجام داد که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که طول پرش حدود 35% و نسبت عمق ثانویه به اولیه در حدود 20% کم‌تر از شرایط مشابه نسبت به پرش کلاسیک است. هم‌چنین توکیای اعلام نمود شاید بسترهای موج‌دار بتواند جایگزین مناسبی برای بلوک‌ها و آب پایه‌ها در داخل حوضچه‌های آرامش باشند. اید بعد از مطالعات مشترکی که با راجاراتنام در سال ۲۰۰۲ انجام دادند آزمایش‌های خود را در بازه اعداد فرود ۳ تا $7/5$ بر روی سه بستر موج‌دار سینوسی، مثلثی و ذوزنقه متساوی الساقین با طول موج (s) $6/5$ سانتی‌متر و عمق موج (t) $1/8$ سانتی‌متر ($t/s = 0.27$) در کانالی به عرض 0.295 متر و عمقی برابر 0.32 متر ادامه داد (Ead, 2007). او نتیجه گرفت مقادیر مختلف زبری نسبی و اشکال مختلف موج‌ها بستر، حدوداً به صورت یکسان در

عمق ثانویه پرش y_2 روی بسترهای موج دار سینوسی را می‌توان وابسته به ارتفاع موج t ، طول موج s ، عمق اولیه پرش y_1 ، سرعت متوسط جریان در پنجه پرش u_1 ، شتاب ثقل g ، لزجت دینامیک سیال μ و جرم مخصوص ρ دانست.

$$y_2 = f_1(y_1, u_1, t, s, g, \mu, \rho) \quad (2)$$

با به‌کارگیری روش پی‌باکینگهام گروه‌های بدون بعد، مؤثر بر جریان به صورت زیر به‌دست خواهند آمد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(\text{Re}_1 = \frac{\rho u_1 y_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) \quad (3)$$

در تابع فوق Fr_1 عدد فرود اولیه و Re_1 عدد رینولدز جریان می‌باشد. براساس نظر (Rajaratnam, 1976; Hager and Bremen, 1989) با توجه به محاسبات انجام شده، بازه اعداد رینولدز آزمایش‌های صورت گرفته در محدوده ۲۳۰۰۰ تا ۵۷۰۰۰ قرار داشته و از آنجا که میزان آن‌ها بیش‌تر از ۲۰۰۰ می‌باشند، می‌توان به همین خاطر از اثر لزجت صرف نظر نمود.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3 \left(Fr_1, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۳) t/y_1 و s/y_1 به ترتیب ارتفاع و طول موج بی‌بعد شده موج‌های بستر می‌باشند که از تقسیم آن‌ها بر یکدیگر، گروه جدید t/s حاصل می‌گردد که تأثیر موج‌دار بودن بستر را روی نسبت عمق ثانویه به اولیه در پرش هیدرولیکی بیان می‌نماید.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3 \left(Fr_1, \frac{t}{s} \right) \quad (5)$$

به‌طور مشابه می‌توان تغییرات طول پرش هیدرولیکی L_j را نیز وابسته به عدد فرود اولیه و شیب موج دانست.

$$\frac{L_j}{y_2} = f_3 \left(Fr_1, \frac{t}{s} \right) \quad (6)$$

در رابطه فوق y_2^* عمق ثانویه پرش کلاسیک با همان عدد فرود اولیه Fr_1 و عمق اولیه پرش y_1 می‌باشد برای مقایسه بهتر طول پرش و میزان درصد کاهش آن از نسبت بی‌بعد شده طول پرش L_j / y_2^* استفاده می‌شود.

مشخصات کانال آزمایشگاهی

برای مطالعه مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی از کانال آزمایشگاهی مستطیلی با عرض ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و طول ۱۲ متر استفاده شد. اندازه‌گیری دبی و تثبیت پرش در ابتدای حوضچه ۲۰ سانتی‌متر بعد از دریچه و با استفاده از سرریز مستطیلی واسنجی شده، هم‌عرض کانال که در

افزایش تنش برشی کف در اثر برهم‌کنش جریان فوق‌بحرانی و بستر موج‌دار می‌باشد.

نژندعلی و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعات آزمایشگاهی خودشان به بررسی تأثیر نوارهای زبری با مقطع مثلثی قائم‌الزاویه (زاویه اضلاع با افق ۴۵ درجه) بر پرش هیدرولیکی پرداختند. بازه تغییرات اعداد فرود در آزمایش‌های آن‌ها برابر ۴ تا ۱۳/۷ بود است. آن‌ها اعلام نمودن نسبت عمق‌های مزدوج پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی، شدت بیش‌تری می‌یابد هم‌چنین میزان کاهش طول پرش روی این نوع از زبری‌ها حدوداً برابر ۳۲ درصد نسبت به پرش کلاسیک می‌باشد. راور و همکاران (۱۳۹۱) مطالعاتی در زمینه تأثیر به‌کارگیری زبری‌های به شکل دوزنقه قائم‌الزاویه به صورت نواری در بستر پرش در کانالی به عرض ۰/۲۵ سانتی‌متر را انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌ها را در بازه اعداد فرود ۳/۹ تا ۱۳/۷ با ۱۲ نوع زبری با ابعاد مختلف ارائه نمودند و بیان داشتند که متوسط کاهش عمق ثانویه و طول پرش روی این نوع از بسترها به ترتیب حدوداً برابر ۲۲ و ۴۱ درصد می‌باشد هم‌چنین میزان ضریب تنش برشی بستر زبر بین ۳/۲ تا ۹/۶ برابر بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد. پارسامهر و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی زبری‌های نیم استوانه‌ای در کانالی به عرض ۰/۲۵ سانتی‌متر در بازه تغییرات اعداد فرود ۶/۴ تا ۷/۳ با سه ارتفاع زبری با شعاع (t) ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر و فاصله (s) یک تا چهار برابر قطر نیم استوانه‌ها پرداختند. آن‌ها اعلام داشتند حداکثر میزان کاهش عمق ثانویه و طول پرش به ترتیب روی این نوع از بسترها حدوداً ۳۳/۵ و ۴۷/۶ درصد می‌باشد و ضریب تنش برشی بستر زبر حدوداً ۱۱ الی ۱۷/۸ برابر، بیش‌تر از بستر صاف است.

از آنجا که تاکنون مطالعات متنوعی در زمینه به‌کارگیری زبری‌های نواری با اشکال گوناگون در بستر پرش هیدرولیکی صورت گرفته، اما هنوز مقایسه جامعی بین انواع مدل‌های مختلف زبری به‌کار رفته برای روشن نمودن خلاءهای اطلاعاتی موجود در این زمینه صورت نپذیرفته است. هدف از این تحقیق بررسی و مقایسه جامع نتایج آزمایشگاهی انجام شده در پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی با نتایج به‌دست آمده از سایر تحقیقات مشابه جمع‌بندی آن‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

در تحلیل ابعادی مشخصات پدیده پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی باید به سه پارامتر خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان توجه داشت.

هیدرولیکی، اعم از نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش، طول نسبی پرش هیدرولیکی، میزان اتلاف انرژی پرش و ضریب نیروی برشی در بستر پرش استفاده شده است.

بررسی صحت عملکرد سیستم آزمایشگاهی

برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم آزمایشگاهی تعداد ۱۵ آزمایش پرش روی بستر صاف افقی انجام شد و با معیارهای پرش هیدرولیکی کلاسیک مورد مقایسه قرار گرفت. برای مقایسه نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش تشکیل شده روی بستر صاف افقی در شرایط آزمایشگاهی حاضر با پرش کلاسیک، از رابطه‌ای ۱ استفاده گردید و نتایج حاصل از آن در شکل (۲) ترسیم گردیده است همچنین برای مقایسه طول پرش تشکیل شده روی بستر صاف افقی در شرایط آزمایشگاهی حاضر با پرش کلاسیک، از نمودار طول نسبی پرش L_j / y_2^* که توسط اداره عمران ایالات متحده آمریکا USBR ارائه گردیده، استفاده شده است. شکل (۳) مقایسه بین مقادیر طول نسبی پرش روی بسترهای صاف افقی با طول نسبی پرش کلاسیک را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۲) و (۳) مشاهده می‌شود نسبت اعماق ثانویه به اولیه و طول نسبی پرش تشکیل شده روی بستر صاف افقی در شرایط آزمایشگاهی حاضر با معیارهای پرش کلاسیک تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.

نسبت اعماق ثانویه به اولیه

براساس تحلیل ابعادی انجام شده در بخش ۲-۱، مشخص گردید که نسبت اعماق ثانویه به اولیه y_2/y_1 پرش‌های تشکیل شده روی بستر موج‌دار سینوسی افقی تابعی از دو پارامتر بدون بعد عدد فرود اولیه Fr_1 و شیب موج t/s می‌باشد (رابطه ۴). بعد از انجام آزمایش‌ها و به‌دست آوردن داده‌های مربوط به پرش‌ها، نسبت‌های مختلف اعماق ثانویه به اولیه y_2/y_1 پرش‌ها را به تفکیک شیب موج زبری‌های سینوسی t/s و عدد فرود اولیه آن‌ها وارد نرم افزار آماری SPSS نموده و با برازش خطی، معادله‌ای برای نسبت اعماق ثانویه به اولیه به‌دست آمد که ضرایب به‌دست آمده از این برازش در جدول (۲) ارائه شده است.

انتهای آن نصب شده بود صورت می‌گرفت. همچنین عمق جریان با استفاده از دستگاه عمق سنخ که دقت آن ± 0.1 سانتی‌متر بود اندازه‌گیری می‌شد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی از یک مخزن و دریچه کشویی نصب شده در ابتدای کانال استفاده شد (شکل ۱-الف). با ثابت نگه داشتن بازشدگی دریچه، به میزان ۲ سانتی‌متر و با تغییر ارتفاع آب در داخل مخزن میزان شدت جریان تغییر می‌نمود. حداکثر ارتفاع آب در مخزن ۱۰۵ سانتی‌متر نسبت به بستر بالادست پرش هیدرولیکی بوده که امکان تولید پرش‌هایی با عدد فرود ۱۲/۲۶ را فراهم می‌نمود.

آزمایش‌ها و مشخصات بسترهای موج‌دار سینوسی

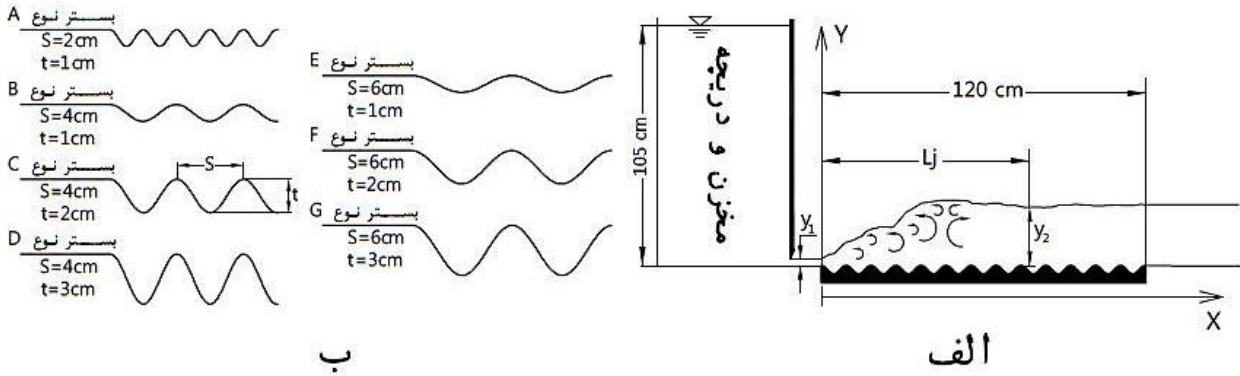
آزمایش‌ها با ۷ مدل بستر موج‌دار سینوسی از جنس بتن ساخته شد که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) و شکل (۱-ب) آمده است، انجام گرفت. براساس نظر اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) در صورتی که سطح بالای زبری‌ها هم تراز با بستر پرش باشد و زبری‌ها مانند فرورفتگی عمل کنند و از جداسدگی جریان از بستر جلوگیری نمایند پدیده کاویتاسیون اتفاق نمی‌افتد. شایان ذکر است که این شرایط در مطالعات سایر محققین که در این بررسی به آن‌ها ارجاع داده شده است نیز مد نظر قرار گرفته شده است. به‌منظور جلوگیری از اثر انقباض ناشی از دریچه بر جریان خروجی، اندازه‌گیری عمق اولیه در فاصله تقریبی ۲۰ سانتی‌متر بعد از دریچه صورت می‌گرفت. در تمامی آزمایش‌ها با ثابت نگه‌داشتن بازشدگی دریچه (۲ سانتی‌متر)، عمق اولیه تقریباً یکسان و برابر ۱۳ میلی‌متر بوده است. در تمامی آزمایش‌ها پروفیل سطح آب به صورت عکس برداری دیجیتال به‌دست آمده است تا به‌وسیله آن‌ها محل شروع و خاتمه پرش با توجه به تعاریف ثبت گردد. در این پژوهش تعداد ۷۰ آزمایش روی بستر صاف و بسترهای موج‌دار سینوسی انجام شده که محدوده‌ی اعداد فرود آن بین ۴/۶ تا ۱۲/۲۶ بوده و همچنین بازه تغییرات شیب موج بستر t/s در محدوده‌ی ۰/۱۶۷ تا ۰/۷۵ انتخاب شده است.

نتایج و بحث

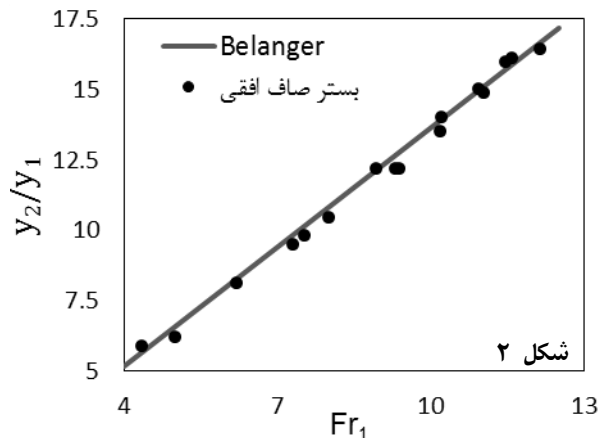
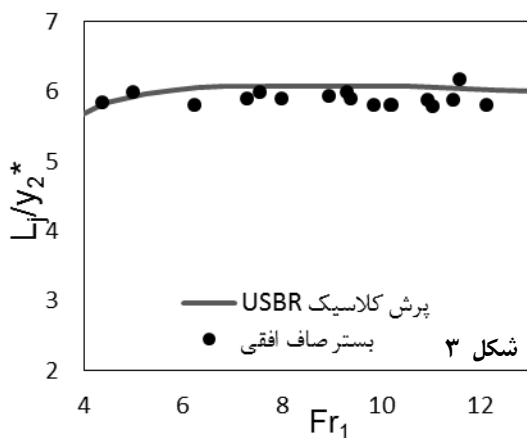
به منظور بررسی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی انجام شده پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی با نتایج به‌دست آمده از سایر تحقیقات مشابه و جمع‌بندی آن‌ها از چهار پارامتر مهم پرش

جدول ۱- مشخصات بسترهای موج‌دار سینوسی

شماره زبری	نام زبری	طول موج		شماره زبری	نام زبری	عمق موج	
		s (mm)	t (mm)			s (mm)	t (mm)
۱	A	۲۰	۱۰	۵	E	۶۰	۱۰
۲	B	۴۰	۱۰	۶	F	۶۰	۲۰
۳	C	۴۰	۲۰	۷	G	۶۰	۳۰
۴	D	۴۰	۳۰				



شکل ۱- الف : طرح شماتیک پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی ب : انواع بسترهای موج‌دار سینوسی



شکل ۲- مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش روی بستر صاف افقی با پرش کلاسیک

شکل ۳- مقایسه طول نسبی پرش روی بستر صاف افقی با پرش کلاسیک

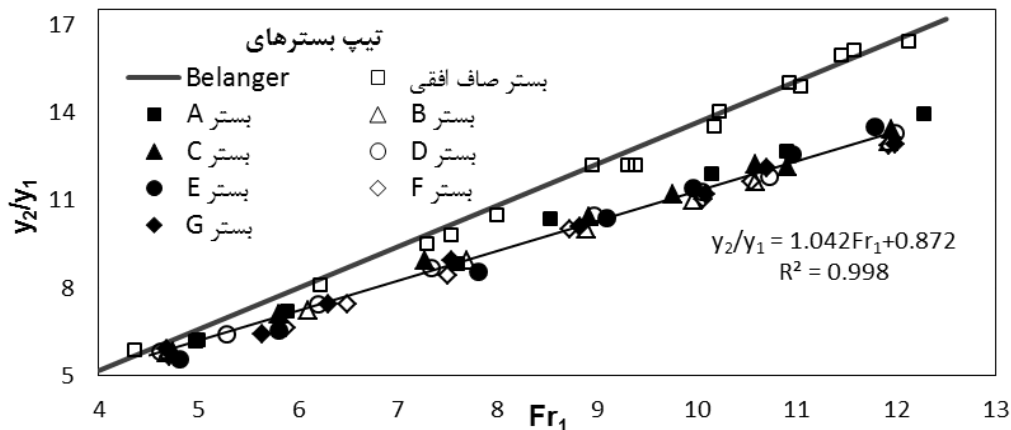
نموده‌اند. شکل (۴) تغییرات ناچیز نسبت اعماق ثانویه به اولیه را که ناشی از تغییرات شیب موج بسترها موج‌دار سینوسی می‌باشد را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) مقایسه تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه ارائه شده از طرف محققین مختلف که ناشی از به‌کارگیری بستر زبر موج‌دار در کف پرش هیدرولیک می‌باشد را نشان می‌دهد. از طرفی در جدول (۳) روابط نسبت اعماق ثانویه به اولیه این مطالعات ارائه گردیده شده است.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه در مطالعات انجام شده بر روی بسترهای سینوسی که توسط توکیای (۲۰۰۵)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و پژوهش اخیر انجام شده با هم متشابه بوده و میزان کاهش این نسبت در عدد فرود ۱۲ حدوداً برابر ۲۰ درصد می‌باشد. ولی میزان کاهش این نسبت در مطالعه مشابه روی زبری‌های سینوسی که توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) انجام شده با سایر مطالعات کمی متفاوت می‌باشد.

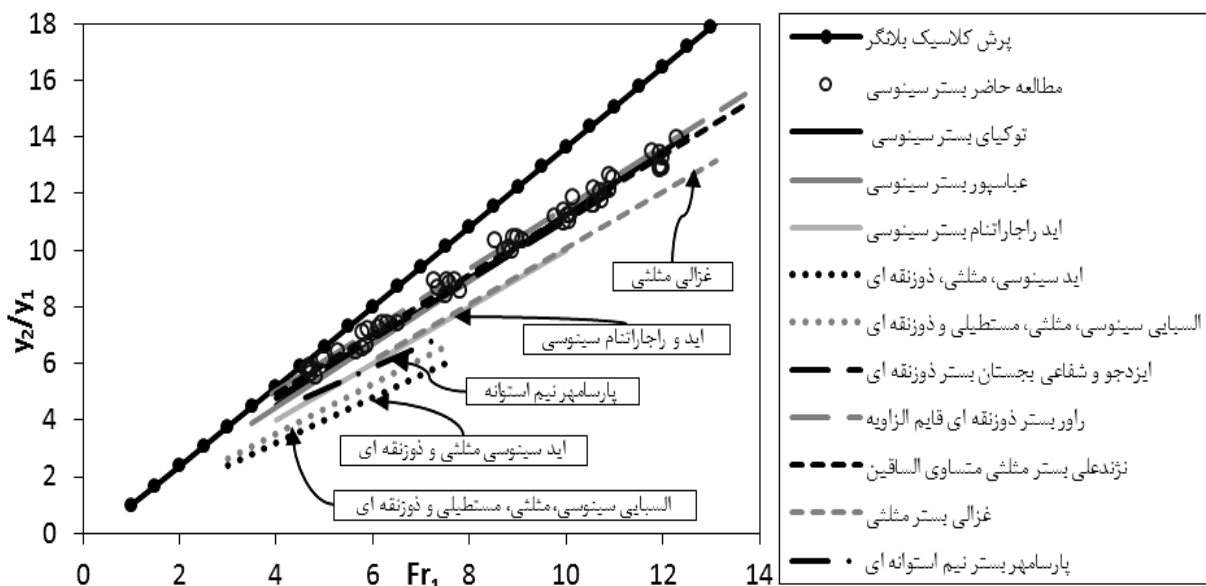
با بررسی ضریب استاندارد رگرسیونی و ضریب معناداری پارامترها روشن گردید که چون ضریب استاندارد شیب موج زبری‌های سینوسی t/s خیلی کم می‌باشد و مقدار ضریب معناداری آن از ۰/۰۵ بیش‌تر است، مقادیر مختلف t/s تأثیر محسوسی در کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه نداشته و تمام زبری‌ها حدوداً به یک نسبت، باعث کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه این نوع از پرش‌ها نسبت به پرش کلاسیک می‌شوند. همچنین سایر محققین همچون اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷)، توکیای (۲۰۰۵)، اید (۲۰۰۷)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، نژندعلی و همکاران (۱۳۹۰)، السبایی و شبایک (۲۰۱۰)، راور و همکاران (۱۳۹۱) و پارسامهر و همکاران (۱۳۹۱) نیز در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند و بدون انجام تحلیل آماری، دلیل این امر را قرارگیری زبری‌ها به صورت گودافتادگی و همسطح بودن تاج زبری‌های با کف بستر پرش بیان

جدول ۲- ضرایب بدست آمده از نرم افزار آماری SPSS برای رابطه ، نسبت y_2/y_1 روی بسترهای موج‌دار سینوسی

نوع بستر	متغیرهای مستقل	ضریب غیر استاندارد	ضریب استاندارد شده	ضریب معناداری	ضریب تعیین R^2
موج‌دار سینوسی افقی	عدد فرود اولیه Fr_1	۱/۰۴۴	۰/۹۹۶	۰/۰۰۰	۰/۹۹
	شیب موج t/s	۰/۳۸۶	۰/۰۲۷	۰/۰۸۵	
	مقدار ثابت معادله	۰/۶۹	-	۰/۰۰۰	



شکل ۴- تغییرات نسبت اعماق مزدوج در برابر عدد فرود برای مدل های مختلف زبری موج‌دار سینوسی در تحقیق حاضر



شکل ۵- مقایسه تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه ناشی از بکارگیری زبری های مختلف در بستر پرش هیدرولیکی

نتوانست دلیلی برای آن ذکر کند و روشن شدن این موضوع راه منوط به تحقیقات بیشتر دانست. علاوه بر این، تحقیقات مشابه‌ای بعداً توسط (Elsebaie and Shabayek, 2010) انجام شد ولی هنوز هم دلیل مشخصی جهت بیان این اختلاف‌ها در نتایج کار آن‌ها نیز بیان نشده است.

حدود ۵ سال بعد اید (۲۰۰۷) بررسی‌های جدیدی روی سه نوع زبری به اشکال سینوسی، مثلثی و دوزنقه متساوی الساقین انجام داد و نتیجه گرفت که تغییر شکل زبری‌ها تفاوتی در میزان نسبت اعماق ثانویه به اولیه ایجاد نمی‌کند و این سه نوع بستر زبر تأثیر یکسانی بر کاهش عمق ثانویه دارند. ولی با مقایسه که با نتایج کار مشترک خود با راجاراتنام انجام داده بود اختلاف زیادی را مشاهده نمود که

جدول ۳- روابط ارائه شده برای نسبت اعماق ثانویه به اولیه روی انواع بسترهای موج دار در مطالعات محققین مختلف

محقق	بستر	معادله	R ^۲	محقق	بستر	معادله	R ^۲
مطالعه حاضر	سینوسی	$y_2/y_1 = 1.042Fr_1 + 0.872$	۰/۹۹	ایزدجو شفاعی بجنستان	دوزنقه متساوی الساقین	$y_2/y_1 = 1.047Fr_1 + 0.5902$	۰/۹۸۶۴
اید راجاراتنام	سینوسی	$y_2/y_1 = Fr_1$	۰/۹۹	مثلی	مثلی	$y_2/y_1 = 0.993Fr_1 + 0.1538$	۰/۹۴۹۳
توکای	سینوسی	$y_2/y_1 = 1.1223Fr_1 + 0.0365$	۰/۹۳۷	نژندعلی الساقین	مثلی متساوی الساقین	$y_2/y_1 = 1.0533Fr_1 + 0.7135$	۰/۹۹۶۶
عباسپور	سینوسی	$y_2/y_1 = 1.1146Fr_1$	۰/۹۱	راور	دوزنقه قائم الزاویه	$y_2/y_1 = 1.081Fr_1 + 0.709$	۰/۹۸۸
اید	سینوسی مثلی دوزنقه متساوی الساقین	$y_2/y_1 = 0.8Fr_1$	۰/۹۵	پارسامهر	نیم استوانه	$y_2/y_1 = 0.7616Fr_1 + 1.2933$	۰/۹۱۵
السبایی شبایک	سینوسی مثلی دوزنقه مستطیلی	$y_2/y_1 = 0.88Fr_1$	۰/۹۴				

موج دار سینوسی در مطالعه حاضر با مطالعات مشابه دیگر محققین همخوانی مناسبی دارد. هم چنین به جهت مقایسه بیش تر طول نسبی پرش روی سایر بسترهای موج دار، متوسط طول نسبی این پرش ها در جدول (۴) و شکل (۷) نمایش داده شده است.

همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود بازه تغییرات طول نسبی پرش L_j/y_2^* روی بسترهای زبر در محدوده ۳ الی ۴ بوده که میزان کاهش طول این نوع از پرش ها نسبت به پرش کلاسیک در بازه ۳۵ الی ۵۰ درصد می باشد. از آنجا که شرایط مطالعات مورد بررسی، با هم متفاوت می باشند و اندازه گیری طول پرش براساس معیارهای تعریف شده به علت تلاطم زیاد جریان، کمی دشوار می باشد از این رو احتمال اختلاف ۱۵ درصدی در میزان کاهش طول پرش به نظر امری طبیعی بوده و برای برطرف کردن این اختلاف ها باید اندازه گیری ها در شرایط یکسان و توسط یک نفر صورت پذیرد.

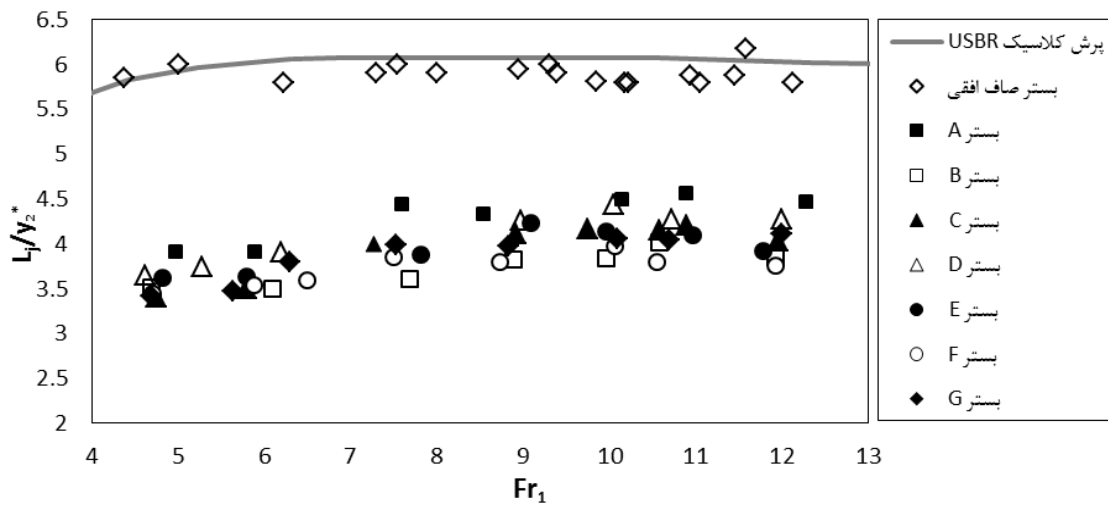
اتلاف انرژی

میزان استهلاک انرژی از پارامترهای مهم در زمینه مقایسه پرش ها در شرایط مختلف می باشد. در این حال، اختلاف میزان انرژی پرش در قسمت بالادست و پایین دست آن، معرف میزان اتلاف انرژی پرش می باشد.

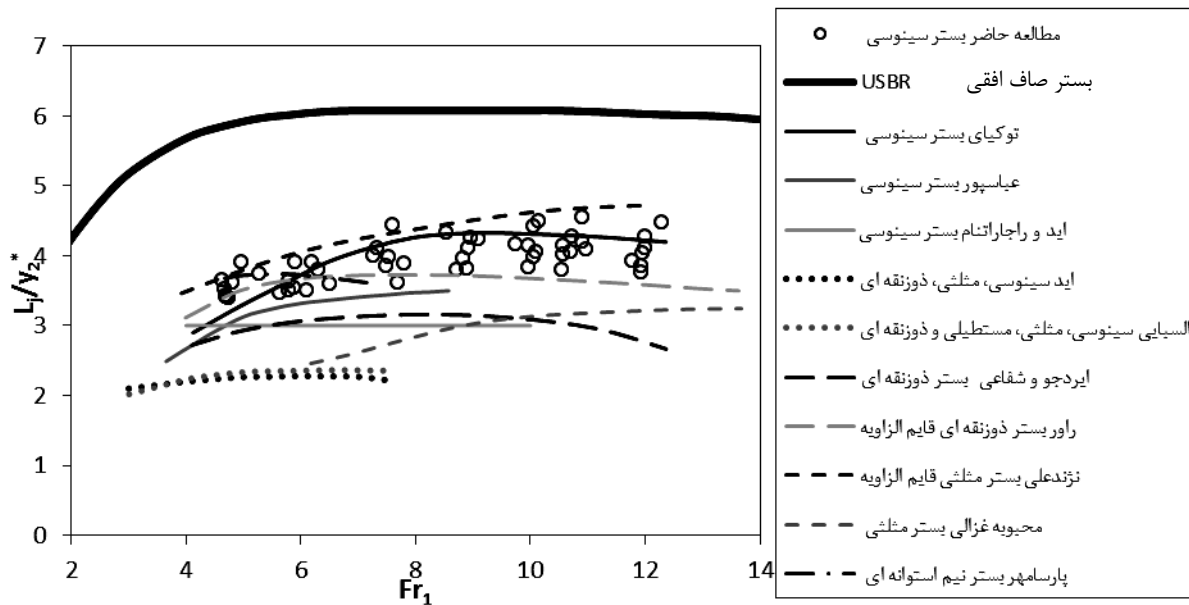
هم چنین در سایر بسترهای موج دار روند تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه با زبری سینوسی برابر بوده و کاهش این نسبت در مطالعات انجام شده توسط غزالی و همکاران (۱۳۸۹) در زبری مثلی و پارسامهر و همکاران (۱۳۹۱) در زبری نیم استوانه ای کمی بیش تر سایر مطالعات می باشد.

طول نسبی پرش هیدرولیکی

طول پرش یکی از پارامترهای مهم در طراحی حوضچه های آرامش می باشد. براساس تعریف، طول پرش فاصله افقی بین پنجه پرش تا محلی از سطح آب است که بلافاصله پس از آخرین موج غلطایی تقریباً برابر با ارتفاع پایاب بوده و افقی می شود. شکل (۶) طول بی بعد شده پرش L_j/y_2^* روی بسترهای موج دار سینوسی را در مقابل عدد فرود را نشان می دهد. مطابق این نمودار نسبت L_j/y_2^* در بازه اعداد فرود کم تر از ۶ معادل ۳/۵ و در بازه اعداد فرود بیش تر از ۶ معادل ۴ می باشد که می توان نتیجه گرفت کاهش طول پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار سینوسی نسبت به بستر صاف در حدود ۳۵٪ می باشد. متوسط طول نسبی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار سینوسی در بررسی های اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) در حدود ۳، توکای (۲۰۰۵) برابر ۴ و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) برای بازه عدد فرود کم تر از ۶ در حدود ۳ و به ازای اعداد فرود بالاتر از ۶ در حدود ۳/۵ بیان شده است. بنابراین همان طور که ملاحظه می شود مقدار طول نسبی پرش هیدرولیکی روی بسترهای



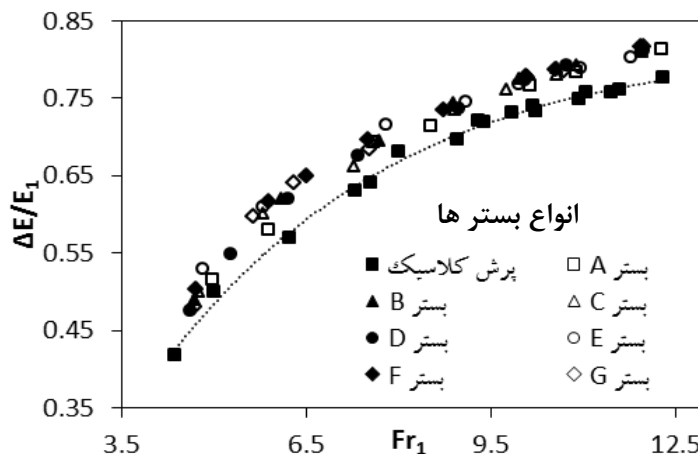
شکل ۶- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار سینوسی و صاف در برابر اعداد فرود اولیه



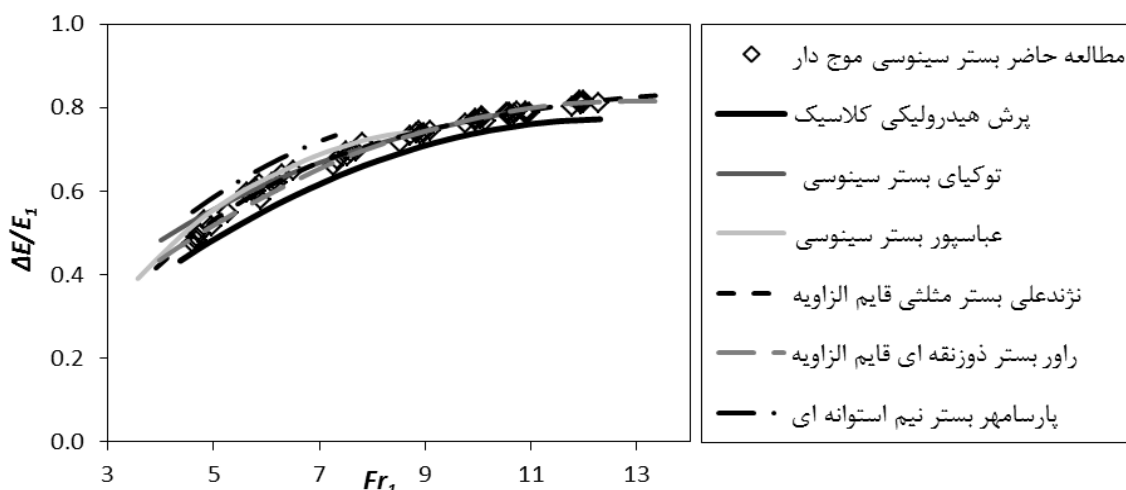
شکل ۷- مقایسه بین متوسط طول نسبی پرش روی زبرهای مختلف در مطالعات سایر محققین

جدول ۴- متوسط طول نسبی پرش روی بسترهای موج‌دار در مطالعات سایر محققین

محقق	نوع بستر	L_j/y_2^*	محقق	نوع بستر	L_j/y_2^*
مطالعه حاضر	سینوسی	$Fr_1 < 6$ ۴	ایزدجو و شفاعی بچستان	دوزنقه متساوی الساقین	۳
اید و راجاراتنام	سینوسی	۳	غزالی	مثلثی	۲/۷۲
توکیای	سینوسی	$Fr_1 < 6$ ۴	نژندعلی	مثلثی قائم الزاویه	$Fr_1 < 6$ ۴/۵
عباسپور	سینوسی	$Fr_1 > 6$ ۳/۵	راور	دوزنقه قائم الزاویه	$Fr_1 > 6$ ۳/۵
اید	سینوسی، مثلثی، دوزنقه متساوی الساقین	$Fr_1 < 6$ ۲/۲۵	پارسامهر	نیم استوانه	۳/۵
السیابی و شبایک	سینوسی مثلثی دوزنقه مستطیلی	$Fr_1 > 6$ ۳/۵			۲/۱



شکل ۸- اتلاف نسبی انرژی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی و بستر صاف



شکل ۹- متوسط میزان اتلاف نسبی انرژی پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر در مطالعات سایر محققین

نیروی برشی در بستر پرش

از جمله دلایل اصلی کاهش عمق ثانویه y_2 و کاهش طول پرش هیدرولیکی L_j در پرش‌های تشکیل شده روی بسترهای موج‌دار سینوسی، افزایش تنش برشی بدلیل فرم بستر است. بر اساس معادله اندازه حرکتی که برای پرش‌های تشکیل شده روی بستر موج‌دار سینوسی نوشته می‌شود می‌توان نیروی برشی متوسط وارد بر کف را محاسبه نمود.

$$Fp_1 - Fp_2 - F_\tau = \rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (7)$$

در رابطه (۷) F_τ متوسط نیروی برشی وارد بر بستر پرش، Fp_1 و Fp_2 نیروی فشار هیدرواستاتیک ابتدا و انتهای پرش V_1 و V_2 سرعت متوسط آب قبل و بعد از پرش هیدرولیکی و β_1 و β_2 ضرایب توزیع سرعت در معادله اندازه حرکت می‌باشند. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) ضریبی را به عنوان ضریب نیروی برشی \mathcal{E} برای بسترهای

شکل (۸) میزان افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی $\Delta E/E_1$

روی بسترهای موج‌دار سینوسی به همراه بستر صاف به ازای اعداد فرود اولیه مختلف را نشان می‌دهد. از طرف دیگر شکل (۹) متوسط میزان اتلاف انرژی در مطالعات مشابه در بسترهای موج‌دار مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود میزان اتلاف نسبی انرژی پرش در بسترهای موج‌دار سینوسی، حدوداً ۵ درصد بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد. همچنین از شکل (۹) نیز می‌توان نتیجه گرفت میزان اتلاف نسبی انرژی پرش روی سایر بسترهای همانند بسترها موج‌دار سینوسی حدوداً به یک مقدار می‌باشند. علاوه بر این شایان ذکر است متأسفانه غیر از محققین فوق سایر محققین، نموداری برای معرفی میزان اتلاف نسبی انرژی پرش برای تحقیقات خود ارائه ننموده‌اند.

انواع بسترهای موج‌دار، در مطالعات سایر محققین را نمایش می‌دهد. همچنین در جدول (۵) روابط حاصل از برآزش مقادیر ضریب نیروی برشی انواع بسترهای موج‌دار، که توسط محققین به‌دست آمده، ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود میزان ضریب نیروی برشی، بسترهای موج‌دار سینوسی نسبت به بستر صاف افزایش می‌یابد که می‌توان دلیل آن را تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در داخل زبری‌ها به علت اختلاف فشار ناشی از اختلاف سرعت، در ناحیه بستر پرش و داخل زبری‌ها دانست. شایان ذکر است میزان متوسط ضریب نیروی برشی در روی بسترهای موج‌دار سینوسی در مطالعه حاضر حدوداً ۶/۵ برابر بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد.

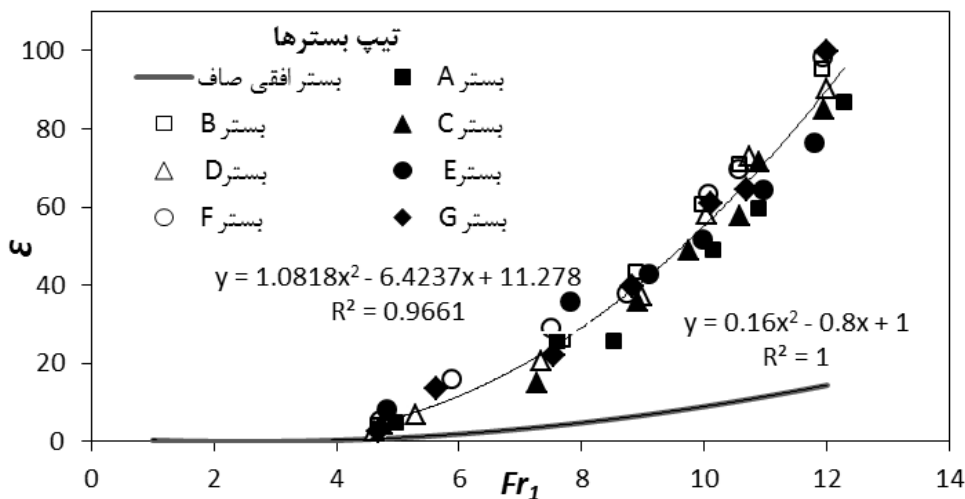
موج‌دار سینوسی ارائه نمودند که به صورت زیر بیان شده است :

$$\varepsilon = \frac{F_r}{\gamma y_1^2 / 2} \quad (8)$$

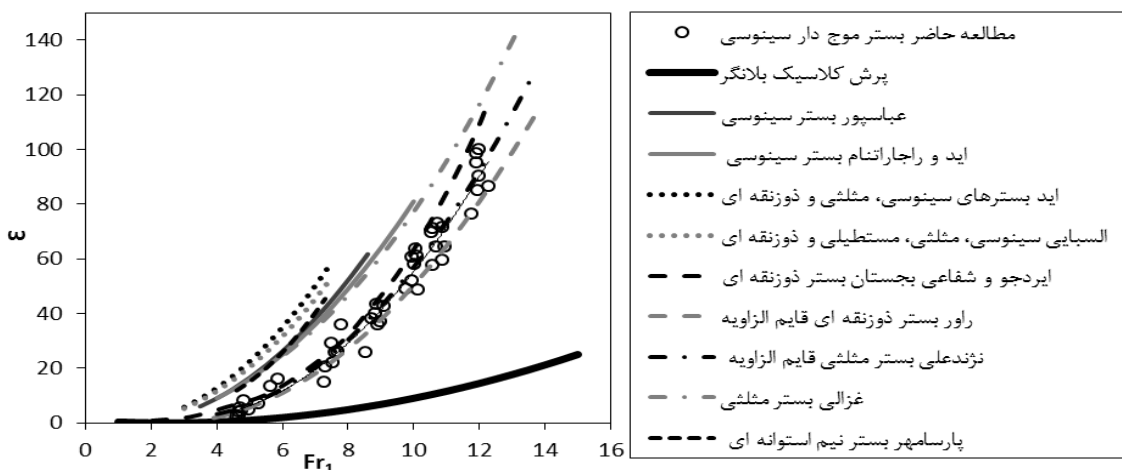
در رابطه (۸) y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، γ وزن مخصوص آب می‌باشند. راجاراتنام (۱۹۶۵) در تحقیقات خود رابطه ضریب نیروی برشی ε برای بستر صاف را بصورت زیر ارائه نموده است.

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad (9)$$

در شکل (۱۰) میزان ضریب نیروی برشی ε در مقابل عدد فرود اولیه پرش روی بسترهای موج‌دار سینوسی در تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد و همچنین شکل (۱۱) متوسط ضریب نیروی برشی روی



شکل ۱۰- ضریب نیروی برشی ε در مقابل عدد فرود اولیه پرش روی بسترهای موج‌دار سینوسی



شکل ۱۱- متوسط ضریب نیروی برشی در مطالعات سایر محققین با زبری‌های مختلف

جدول ۵- معادلات ضریب نیروی برشی برای زبری‌های مختلف

محقق	بستر	معادله	R ^۲	محقق	بستر	معادله	R ^۲
راجاراتنام	صاف	$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1$	۱	ایزدجو	دوزنقه		۰/۹۴۳
مطالعه حاضر	سینوسی	$\varepsilon = 1.0818Fr_1^2 - 6.4237Fr_1 + 11.278$	۰/۹۶	غزالی	مثلی		۰/۹۲
اید راجاراتنام	سینوسی	$\varepsilon = (Fr_1 + 1)^2$	۱	نژندعلی	مثلی		۰/۹۹
عباسپور	سینوسی	$\varepsilon = 1.1Fr_1^2 - 2.4Fr_1 + 1$	۰/۹۳	راور	دوزنقه		۰/۹۵۱
اید	مثلی	$\varepsilon = 1.36Fr_1^2 - 2.5Fr_1 + 1$	-	پارسامهر	نیم استوانه		۰/۹۶۵
السبایی و شبایک	مثلی	$\varepsilon = 1.23Fr_1^2 - 2.27Fr_1 + 1$	-				
	دوزنقه						
	سینوسی						
	مثلی						
	دوزنقه						
	مستطیلی						

۲- میزان تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه در مطالعات انجام شده روی بسترهای سینوسی که توسط توکیای (۲۰۰۵)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و پژوهش اخیر انجام شده با هم متشابه بوده و میزان کاهش این نسبت در عدد فرود ۱۲ حدوداً ۲۰ درصد می‌باشد.

۳- بازه تغییرات متوسط طول نسبی پرش L_j/y_2^* روی انواع بسترهای موج‌دار حدوداً در بازه ۳ الی ۴ بوده که میزان کاهش طول این نوع از پرش‌ها نسبت به پرش کلاسیک حدوداً ۳۵ الی ۵۰ درصد می‌باشد.

۴- میزان اتلاف نسبی انرژی پرش $\Delta E/E_1$ در بسترهای موج‌دار سینوسی، حدوداً ۵ درصد بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد. همچنین این پارامتر در سایر بسترهای موج‌دار نیز حدوداً به همین مقدار می‌باشد.

۵- با افزایش عدد فرود میزان ضریب نیروی برشی ε ، بسترهای موج‌دار نسبت به بستر صاف افزایش می‌یابد که می‌توان دلیل آن را تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در داخل زبری‌ها به علت اختلاف فشار ناشی از اختلاف سرعت، در ناحیه بستر پرش و داخل موج‌ها دانست.

۶- میزان متوسط ضریب نیروی برشی در روی بسترهای موج‌دار سینوسی در مطالعه حاضر حدوداً ۶/۵ برابر بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد. همچنین میزان این ضریب در مطالعات ایزدجو و شفافی بجزستان (۲۰۰۷) روی بسترهای موج‌دار دوزنقه‌ای، نژندعلی و

هم‌چنین با بررسی مطالعات سایر محققین در شکل (۱۱) می‌توان افزایش ضریب نیروی برشی روی سایر بسترهای موج‌دار که در اثر افزایش عدد فرود می‌باشد را نیز مشاهده کرد. با بررسی‌های بیش‌تر نیز می‌توان نتیجه گرفت، ضریب نیروی برشی در مطالعات ایزدجو و شفافی بجزستان (۲۰۰۷) روی بسترهای موج‌دار دوزنقه‌ای، نژندعلی و همکاران (۱۳۹۰) روی بسترهای موج‌دار مثلی قائم الزاویه و راور و همکاران (۱۳۹۱) روی بسترهای موج‌دار دوزنقه‌ای قائم الزاویه با مطالعه اخیر که روی بسترهای موج‌دار سینوسی صورت گرفته بیش‌ترین همخوانی و مطابقت را نسبت به سایر مطالعات دارند.

نتیجه‌گیری

مقایسه و بررسی نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در زمینه به کارگیری انواع زبری‌های موج‌دار در بستر پرش هیدرولیکی با مطالعه حاضر در زمینه استفاده از بسترهای موج‌دار سینوسی به نتایج کلی ذیل منجر شده است.

۱- تغییرات نسبت اعماق ثانویه به اولیه y_2/y_1 تنها به صورت خطی وابسته به تغییرات اعداد فرود بوده و مقادیر مختلف شیب موج زبری‌ها t/s تأثیر متفاوتی در کاهش این نسبت نداشته و تمام بسترهای موج‌دار به یک میزان، باعث کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه نسبت به پرش کلاسیک می‌شوند.

- Ead, S.A and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic Jump on Corrugated Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 128 (7) 656-663.
- Ead, S.A. 2007. Effect of Bed Corrugations on The Characteristics of Hydraulic Jump. King Saudi University College of Engineering Research Center.
- Elsebaie, I.H and Shabayek, Sh. 2010. Formation of Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS* 10(1) 40-50.
- Hager, W.H and Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump; sequent depths. *Journal Hydraulic Res.* 27(5), 565-585.
- Izadjoo, F and Shafai Bejestan, M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *Journal of applied sciences.* 7(8)1164-1169.
- Peterka, A.J. 1985. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. Monograph. No. 95. United States Department of the Interior.
- Rajaratnam, N. 1976. Turbulent Jets. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands
- Rajaratnam, N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet. *J. Hydraulic. Am. Soc. Civ. Eng.*, 107-132.
- Tokyay, N.D. 2005. Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps. Impacts of Global Climate Change Conference. EWRI. May. Anchorage. Alaska. USA.

همکاران (۱۳۹۰) روی بسترهای موج‌دار مثلثی قائم الزاویه و راور و همکاران (۱۳۹۱) روی بسترهای موج‌دار دوزنقه‌ای قائم الزاویه با مطالعه اخیر بیش‌ترین همخوانی و مطابقت را نسبت به سایر مطالعات دارد.

منابع

- پارسامهر، پ.، حسین زاده دلیر، ع.، فرسادی زاده، د. و عباسپور، ا. ۱۳۹۱. پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۶(۳): ۷۷۵-۷۸۵.
- راور، ز.، فرهودی، ج. و نژندعلی، ع. ۱۳۹۱. تأثیر بستر زبر دوزنقه‌ای قایم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۶(۱): ۸۵-۹۴.
- غزالی، م.، صمدی، ح.، قربانی، ب و فتاحی، ر. ۱۳۸۹. تأثیر بستر موج‌دار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران ۴(۷): ۹۹-۱۰۸.
- نژندعلی، ع.، اسماعیلی، ک.، فرهودی، ج. و راور، ز. ۱۳۹۰. تأثیر زبری‌های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران ۲(۵): ۲۳۴-۲۴۱.
- 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 (2) 109-117.

Comparison Of Hydraulic Jump Characteristics On Different Types of Corrugated Beds

R.Badizadegan^{۱*}, M.Saneie^۲, K.Esmaili^۳

Received: Jul.6, 2013

Accepted: Apr.16, 2014

Abstract

Hydraulic jump is the one of the most important phenomena for dissipation of the excess kinetic energy of the flow. The previous studies have proven that corrugated bed roughness increases more energy dissipation. Therefore the purpose of this study is comparison of the experimental results of hydraulic jump on sinusoidal corrugated beds with another similar result on different types of corrugated beds. From the results of this study it was found that conjugated depths relationship with the Froude numbers was linearly on all kinds of corrugated beds and different values of wave steepness (t/s) have no distinct effect on reduction of conjugate depths ratio, and all of the rough beds approximately cause the reduction of secondary depth in comparison with classic jump. The major variations of average relative jump length (L_j/y_2^*) in any types of roughness are form 3 to 4 that the value of these jumps length reduction is approximately 35% to 50% in compared with the classic jump. The value of relative reduction rate of jump energy on any types of the rough beds is approximately 5% higher than the smooth bed. One the other hand when the Froude number increases, the coefficient of shear stress increases too on the corrugated rough beds that it is about 6.5 to 10 times more than jump on the smooth bed.

Keyword: Hydraulic Jump, Conjugated Depth, Sinusoidal Corrugated Bed, Coefficient of Shear Stress, Relative Jump Length,

۱ - PhD. student of Hydraulic Structure, Ferdowsi University of Mashhad

۲ - Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Center, Tehran

۳ - Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

(* - Corresponding Author Email : rbadizadegan@gmail.com)