

مقاله علمی-پژوهشی

اثر جت و زبری نیم استوانه‌ای بر مشخصات پرش هیدرولیکی

بنفشه اسلام منش<sup>۱</sup>، مهدی دستورانی<sup>۲\*</sup>، یوسف رمضانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱

چکیده

پژوهش حاضر جهت بررسی هم‌زمان اثر جت آزاد مستطیلی و زبری نیم‌استوانه‌ای بر مشخصات پرش هیدرولیکی انجام گرفته است. این پژوهش داخل یک فلوم به شکل یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتیمتر انجام گرفت. سپس جت با دبی‌های ۲، ۲/۵، ۳/۲ لیتر بر ثانیه با زاویه حداکثر اثر جابه‌جایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش به انتهای پرش هیدرولیکی وارد گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در زاویه مشخصی از برخورد جت به پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه جابه‌جایی در پرش ایجاد نمی‌شود که این زاویه را به عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شد و با افزایش زاویه جت پرش به سمت بالا دست حرکت می‌کند و از یک زاویه به بعد پرش هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالا ندارد که این زاویه به عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی نامگذاری گردید تغییر در زاویه و دبی جت موجب کاهش یا افزایش، طول پرش، عمق ثانویه افت انرژی نسبی و نیروی تنش برشی بستر می‌گردد استفاده از جت با حداکثر زاویه ۱۴۵ درجه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و کمترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان و زبری نیم استوانه‌ای کاهش تا حدود ۳۲/۳ درصدی نسبت عمق ثانویه به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. به کارگیری جت با زاویه ۱۲۷ (زاویه بی اثر) درجه، حداکثر عدد فرود (۹/۶۴) جریان و زبری نیم استوانه‌ای موجب کاهش تا ۰/۱۲ درصد نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف می‌باشد. بیشترین میزان کاهش طول پرش (۳۴/۷) درصد زمانی رخ می‌دهد که از جت با زاویه حداکثر و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و در شرایط کمترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان و بیشترین افزایش در حالت زاویه ۷۰ درجه، حداکثر دبی جت و حداکثر عدد فرود در بستر صاف ۸/۱۶ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جت آزاد مستطیلی، زبری نیم استوانه‌ای، طول پرش

مقدمه

راور و همکاران (۱۳۹۱) عنوان کردند، پرش یا جهش هیدرولیکی، جریان متغیر سریع در کانال‌های روباز است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تبدیل می‌شود. در چنین حالتی و به تناسب شدت پرش، آشفتگی‌هایی در سطح آب دیده می‌شود به تدریج و بانزدیک شدن به سمت انتهای پرش از شدت آن‌ها کاسته شده و متناسب با آن، انرژی آب نیز کم می‌شود سازه‌هایی که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت به حد قابل قبولی می‌شوند، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی نامیده می‌شوند. که در ایجاد موانع و جت آبی در استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی نقش دارد.

پارسا مهر و همکاران (۱۳۹۱) پژوهش خود را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیمه استوانه‌ای شکل و آب پایه مستطیلی بر روی دو بستر با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و بستر افقی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد بر روی آب پایه به طور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زبر به طور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد.

ایریشمی و حسینی (۱۳۸۷) عنوان کردند، پرش هیدرولیکی، معمولی -ترین روش استهلاک انرژی در جهت افقی می‌باشد. تغییر جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی می‌باشد، به طور کلی پرش هیدرولیکی به دو نوع آزاد و مستغرق تقسیم‌بندی می‌شود در پرش هیدرولیکی آزاد عمق اولیه و ثانویه مشخص می‌باشند در صورتی که در پرش هیدرولیکی مستغرق پرش به طور کامل در زیر آب قرار دارد.

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: mdatourani@birjand.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.2021.15.4.9.9

بسترهای زبر پژوهش کردند، نتایج مطالعات آنها نشان داد که ناهمواری‌های مرزی به طور حتمی طول پرش و طول غلتاب پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهند و میزان این کاهش به عدد فرود اولیه و میزان ناهمواری نسبی مربوط است (Hughes, w.c. flake, J.E., 1983).

یوکسل و همکاران شباهت بین پیشانی یک موج شکسته و پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند. موج مستغرق به وسیله یک پرش هیدرولیکی، تحت تماس جت آبی با یک زاویه مشخص به پنجه آن، شبیه‌سازی گردید. مطالعات عددی و آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات جریان و اتلاف انرژی انجام شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که جت آبی می‌تواند باعث افزایش اتلاف انرژی در موج مستغرق شود. (Yuksel et al., 2004)

پاگیارا پرش هیدرولیکی بستر زبر، با زبری‌های یکنواخت، غیریکنواخت و بلورهای حمل شده در بستر زبر یکنواخت را مطالعه نمود. اندازه زبری در محدوده  $۴۵/۶ - ۶/۲۶$  میلی‌متر می‌باشد در این مطالعه فرمول‌هایی برای پرش ارائه شده است (Pagliara., 2008).

ایزدجو و شفاعی بجزستان با انجام ۴۲ آزمایش روی ۶ نوع بستر با زبری‌های دوزنقه‌ای شکل در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ نشان دادند که تحت تأثیر زبری‌های با مقطع دوزنقه‌ای، طول پرش ۵۰ درصد و عمق مزدوج پرش، ۲۰ درصد کاهش می‌یابد (Izadjoo, F. Shafai-Bejestan., 2005)

در پژوهش‌های انجام شده اثر جت و بسترهای زبر مختلف بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر این پارامترها در پرش هیدرولیکی مورد مقایسه قرار گرفت. از جمله تفاوت‌های این پژوهش با سایر پژوهش‌های علمی انجام شده، اثر جت و زبری نیم استوانه‌ای بر مشخصات پرش هیدرولیکی می‌باشد، که مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم بر بررسی تنش برشی کف در پرش هیدرولیکی

#### بر روی سطوح زبر

تنش برشی کف در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با استفاده از رابطه مومنت محاسبه می‌شود. برای حجم کنترل، معادله مومنت روی پرش هیدرولیکی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$(M_2 + F_{p2} \cdot S_2) = (M_1 + F_{p1} \cdot S_1 - \int_{x_1}^{x_2} dx \tau_b) \quad (1)$$

که رابطه فوق  $M$ ،  $F_p$  و  $S$  به ترتیب نیروهای فشاری، مومنت و تنش نرمال در واحد طول و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نمایانگر مقاطع قبل و بعد پرش هیدرولیکی می‌باشند. با صرف نظر کردن از نیروی تنش نرمال، مجموع نیروهای برشی بستر از رابطه زیر به دست می‌آید.

پورعبدا... و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل طول پرش و طول غلتاب پرش در حوضچه آرامش با شیب کف منفی مختلف، با سه نوع زبری متفاوت یک، چهار و ده میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقادیر طول پرش و طول غلتاب پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف منفی و با بستر زبر نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. این زبری‌ها در شرایط متفاوت با عددهای فرود در محدوده بین  $۹/۴$  تا  $۸/۷$  آزمایش شدند. در این پژوهش به طور متوسط کاهش طول پرش  $۶/۳۹$  درصد و طول غلتاب پرش  $۳/۳۲$  درصد به دست آمد.

نیسی (۱۳۸۸) به مطالعه بر روی زبری‌های لوزی شکل پرداخت و نتایج کار وی نشان داد که زبری‌های لوزی شکل طول پرش هیدرولیکی را می‌تواند حدود  $۴۰\%$  کاهش دهد و در مقایسه با حوضچه‌های USBR، در صورتی که اعداد فرود بین  $۴/۵$  تا  $۶/۸$  باشد به منحنی تیپ USBR2 و در صورتی که اعداد فرود بین  $۶/۸$  تا  $۱۲/۴$  باشد به منحنی تیپ USBR III نزدیک می‌شود با این تفاوت که در صورت عدم استفاده از بلوک مشکل کایتاسیون ندارد.

دستورانی و نصرآبادی (۱۳۹۰) در پژوهش خود، اثر توأم زبری بستر و شیب معکوس کانال‌های مستطیلی را بر مشخصات جهش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. برای آزمایش‌های از یک فلوم با عرض  $۰/۷$ ، ارتفاع  $۰/۶$  و طول  $۱۵$  متر استفاده شد. آزمایشها در محدوده‌ی اعداد فرود بین سه تا شش، شیب‌های معکوس  $۰/۰۰۱/۰۰۵$ ،  $۰/۰۰۲$  و چهار ضریب زبری  $۰/۰۱۱۴$ ،  $۰/۰۱۴۵$ ،  $۰/۰۱۷۲$  و  $۰/۰۱۹۱$  انجام گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه و طول جهش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس روی طول جهش می‌شود. در توجیه این تغییرات می‌توان تأثیر مؤلفه رو به پایین نیروی وزن در روی شیب معکوس و افزایش تنش برشی در روی بستر زبر را عامل اصلی تغییرات دانست. همچنین افت انرژی جهش با افزایش شیب معکوس و ارتفاع زبری افزایش می‌یابد.

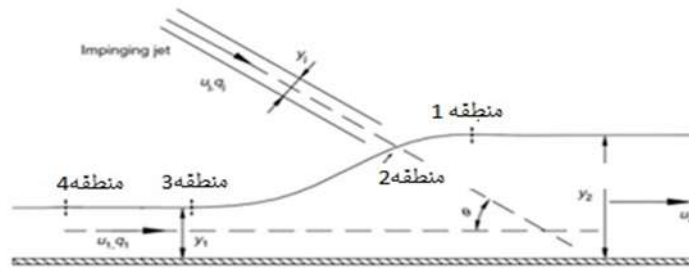
دستورانی و همکاران (۱۳۹۵) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج این آزمایش نشان داد که وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگتر از زاویه بی‌اثر باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش افت انرژی و نیروهای برشی کف می‌گردد.

موریس به این نتیجه رسید که اگر فاصله زبری زیاد باشد جریان‌های گردابی به صورت مستقل تشکیل می‌شوند و اگر فاصله زبری‌ها کم باشد این جریان‌ها در هم تداخل ایجاد می‌کنند و اگر فاصله زبری‌ها خیلی به هم نزدیک باشد، سطح زبر مانند یک سطح صاف عمل می‌کند (Morris, H.M., 1955).

هاگزر و فلک نیز در خصوص پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی

**معادلات حاکم بر پرش هیدرولیکی در حالت برخورد جت آبی**

شکل ۱ شمای ساده از چگونگی برخورد یک جت سریع مستطیلی را به یک پرش هیدرولیکی نشان می دهد. زمانیکه جت به انتهای پرش (منطقه ۱) و بین پرش (منطقه ۲) برخورد می کند معادله تک بعدی مقدار اندازه حرکت به صورت رابطه (۷) خواهد بود.



شکل ۱- تصویر ساده ای از نحوه برخورد جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی

پایه ها، موانع، بلوک های پای تندآب، بستر زیر و غیره اشاره نمود. بستر زیر به بستری اطلاق می شود که سطح آن از ناهمواری های منظم یا نا منظم تشکیل شده باشد. زبری بستر می تواند بصورت دوزنقه ای، زبری نیم استوانه ای، لوزی و شش ضلعی و یا حتی سنگچین باشد.

**تحلیل ابعادی**

پارامترهای وابسته مؤثر برای آنالیز ابعادی هر جریان کانال روباز باید شامل خصوصیات فیزیکی سیال، مشخصه های جریان و مؤلفه های هندسی بستر و شرایط مرزی جریان مانند هندسه کانال و شرایط جریان ورودی باشد. بر این اساس، تحلیل ابعادی مسأله، به صورت رابطه زیر نشان داده شده است.

$$f(Lj, y1, y2, s, r, \rho, \nu, g, vI) = 0 \quad (11)$$

که در این رابطه Lj طول پرش هیدرولیکی، s فاصله بین زبری ها، g شتاب ثقل، \nu لزجت سینماتیکی، \rho جرم مخصوص و r ارتفاع زبری، v1 سرعت اولیه، y1 عمق اولیه، y2 عمق ثانویه پرش می باشند.

$$\frac{y2}{y1} = f_2 \left( \frac{y2}{y1}, Fr_1 = \frac{v1}{\sqrt{gy1}}, Re = \frac{v1 y1}{\nu}, \frac{l_j}{y1}, \frac{s}{y1}, \frac{r}{y1} \right) \quad (12)$$

با توجه به بالا بودن عدد رینولدز (Re) در آزمایش های انجام گرفته می توان از اثر لزجت چشم پوشی کرد و رابطه (۱۰) را به صورت زیر ساده می شود:

$$F_{\tau} = \int_{x1}^{x2} dx \tau_b = (F_{p1} - F_{p2}) + (M_1 - M_2) \quad (2)$$

$$F_{p1} = 0.5 \gamma y_1^2 \quad (3)$$

$$F_{p2} = 0.5 \gamma y_2^2 \quad (4)$$

$$M_1 = \rho y_1 v_1^2 \quad (5)$$

$$M_2 = \rho y_2 v_2^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho(q_1 + q_j)u_2 - \rho q_1 u_1 \\ - \rho q_j u_j \cos \theta + F + F_f \\ = \frac{1}{2} \rho g y_1^2 - \frac{1}{2} \rho g y_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

که در رابطه های بالا u1 و y1 به ترتیب سرعت و عمق بالا دست پرش u1 و y2 نیز به ترتیب سرعت و عمق پایین دست پرش می باشد. u\_j و y\_j به ترتیب سرعت و ضخامت جت است. \theta زاویه جت نسبت به افق، \rho جرم مخصوص آب، F\_f نیروی اصطکاک در کف کانال در اثر وجود زبری و F نیروی ناشی از تلاطم اضافی ایجاد شده در اثر اعمال جت ورودی می باشد. بنابراین q\_1 = y\_1 u\_1, q\_2 = y\_2 u\_2 و q\_j = y\_j u\_j با تقسیم معادله ی حرکت \rho g y\_2^2 (1/2) رابطه ۷ تبدیل می گردد:

$$\begin{aligned} \frac{y_2^3}{y_1^3} - \frac{y_2}{y_1} \left[ 2 Fr_1^2 \left( 1 + \frac{q_j^2 y_1}{q_1^2 y_j} \cos \theta \right) - 1 \right] \\ - 2 Fr_1^2 \left( 1 + \frac{q_j}{q_1} \right)^2 + \frac{2F}{g y_1^2 \rho} \\ = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Fr\_1 = u\_1 / \sqrt{g y\_1} برابر است با عدد فرود بالادست پرش جریان.

برای q\_j = 0 رابطه ۸ به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد تغییر می کند.

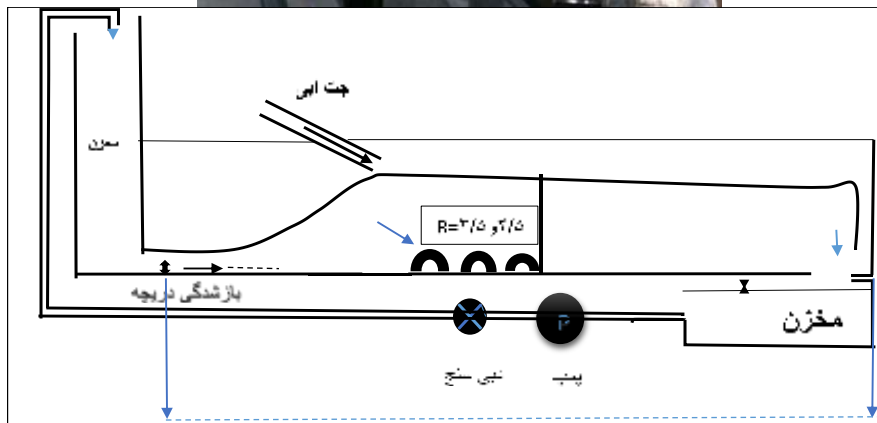
**پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر**

به منظور تثبیت پرش در داخل حوضچه آرامش و کاهش خصوصیات پرش هیدرولیکی نظیر عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی از زائده های مختلفی استفاده می شود که می توان به آب

یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. جریان آب توسط یک الکتروپمپ گریز از مرکز به قدرت ۵/۵ kw از مخزن اصلی وارد فلوم می‌گردد. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left( f r_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{l_j}{y_1}, \frac{r}{s} \right) \quad (13)$$

آزمایشات این پژوهش در یک فلوم به شکل یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر صورت گرفت. در این پژوهش جهت تنظیم و تثبیت موقعیت آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در فاصله ۲۷۲ سانتی متری (حداکثر میزان جابه‌جایی پرش هیدرولیکی) از



شکل ۲- برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی زبری نیم استوانه‌ای، مخزن و کانال آزمایشگاهی

یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. سپس جت آبی آزاد با مشخصاتی که در بالا ذکر شده، با سه عدد فرود متفاوت اندازه‌گیری شد. در پایان نتایج حاصل از این آزمایشات با داده‌های پارامترهای هیدرولیکی بدون زبری نیم استوانه‌ای و بدون جت آبی مقایسه شد.

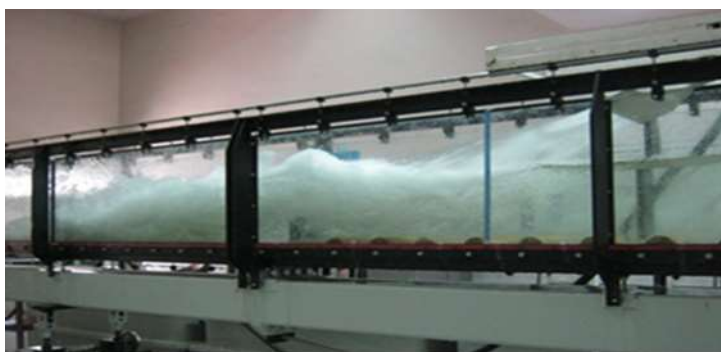
برای تعیین مختصات سطح جریان در کانال آزمایشگاهی شامل طول پرش (Lj) و عمق پرش (Y) و قرائت متر پارچه‌ای نصب شده روی دیواره کانال، علاوه بر این بهره‌گیری از نرم افزار گرافر ۱۵ که توسط این نرم افزار عکس‌های گرفته شده از مقطع طولی کانال شیشه‌ای هنگام عبور جریان را با دو مختصات مرجع جانمایی کرده با رقومی کردن تصویر، مختصات خط پروفیل سطح آب در زاویه حداکثر و زاویه حداقل از درون یابی به دست آمد.

جت آبی از طریق نازلی با مقطع مستطیلی که تصویر آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود تولید می‌گردد. از یک پمپ قوی که قابلیت تولید یک جت صفحه‌ای را دارد جهت این که ضخامت جریان در تمام سطح خروجی یکسان باشد مورد استفاده قرار گرفت. تنظیم زاویه برخورد توسط سیستم مکانیکی ساخته شده که موقعیت قرارگیری نازل را بر روی یک اشل (نقاله) نشان می‌دهد انجام می‌گرفت.

در ادامه آزمایشات، ابتدا زبری‌های نیم استوانه‌ای از جنس چوب با عرض ۳۰ سانتی متر (هم عرض کانال) و دو ارتفاع زبری (۳/۵ و ۲/۵) (r=۲d و s=۲d) نصب و این زبری‌ها در کانال طوری قرار داده شد که قسمت مسطح هم تراز با کف بستر و قسمت نیم‌دایره روبه بالا و جهت تنظیم و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری (بیشترین فاصله پرش در این نقطه) از



شکل ۳- جت آبی مستطیلی (دستورانی وهمکاران، ۱۳۹۶)



شکل ۴- نمایی از زوایای حداکثر و حداقل برخورد جت

## نتایج و بحث

### اثر جت بر تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی

شکل ۵ اثر زاویه برخورد جت آبی بر جابه‌جایی پرش هیدرولیکی در زبری و دبی‌ها مختلف و محل اثر متفاوت در عدد فرود و دبی جت یکسان را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌کنید، پرش هیدرولیکی در تمام نمودارها و در دبی‌ها و زبری نیم‌استوانه‌ای با ابعاد مختلف در یکی از زاویه‌های استفاده شده برای جت سریع هیچ‌گونه جابه‌جایی صورت نمی‌گیرد که به عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری گردید با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالا دست تغییر مکان می‌دهد و از یک زاویه به بعد هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست انجام نمی‌گیرد که به عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی پرش نامگذاری گردید حداکثر جابه‌جایی پرش در تمام زبری‌ها به سمت بالادست جریان مربوط به حداقل عدد فرود (۶/۶۴)، حداکثر دبی جت (۳٫۲ لیتر بر ثانیه)، زاویه حداکثر (۱۴۵ درجه) در حالت بدون زبری به میزان ۲۷۲ سانتی‌متر و حداقل جابه‌جایی پرش در تمام زبری‌ها به سمت بالادست جریان مربوط به حداکثر عدد فرود (۹/۶۲)، حداقل دبی جت (۲ لیتر بر ثانیه)، زاویه ۹۰ درجه و در زبری نیم‌استوانه‌ای (به ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر) به میزان ۱۱ سانتی‌متر و حداکثر جابه‌جایی پرش به

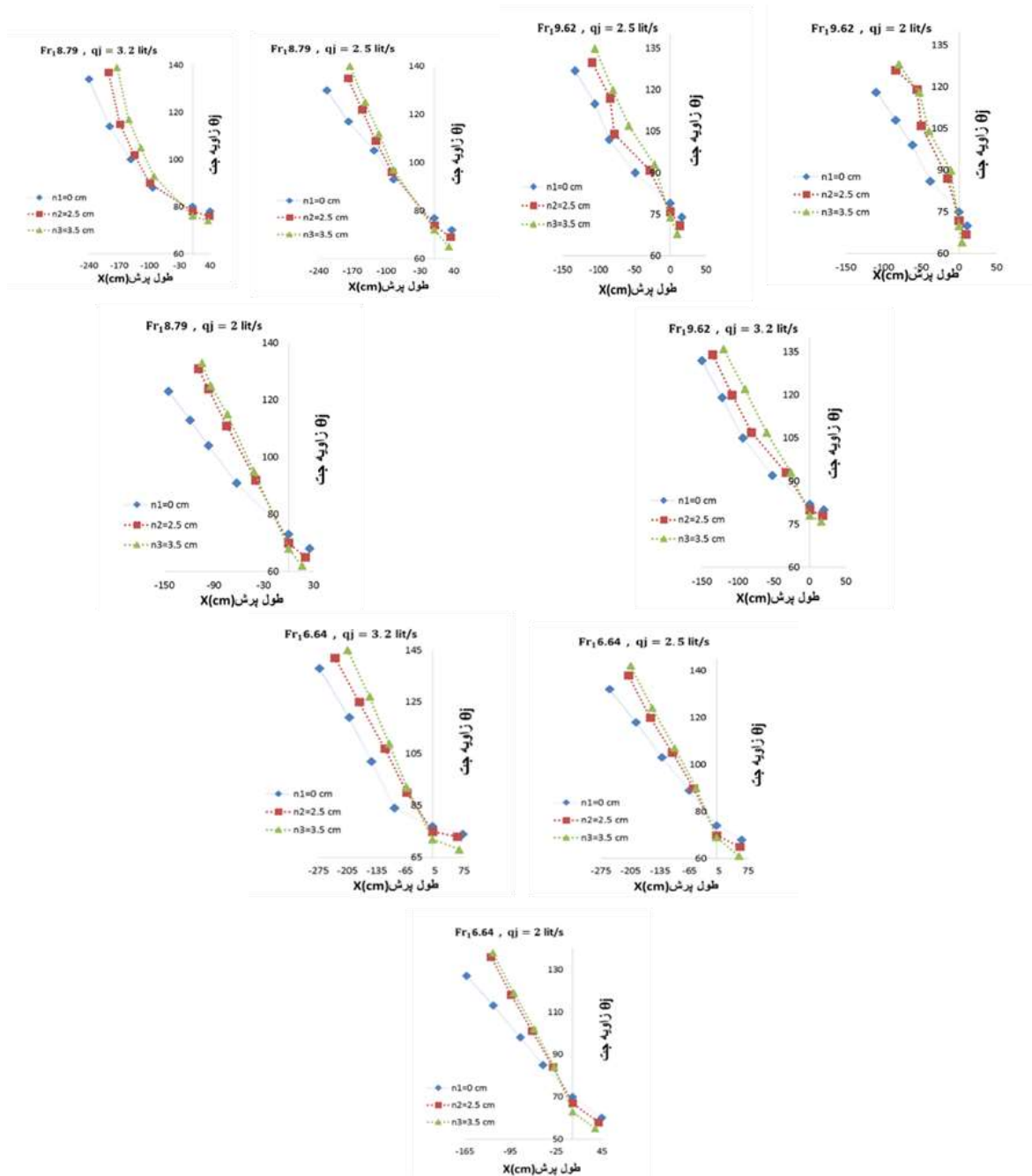
سمت پایین دست جریان مربوط به حداقل عدد فرود (۶/۶۴) و حداکثر دبی جت (۳٫۲ لیتر بر ثانیه) و در زاویه ۷۴ درجه و در حالت بدون زبری به میزان ۷۳ سانتی‌متر مشاهده گردید. هرچه عدد فرود افزایش، میزان جابه‌جایی پرش به سمت بالادست کاهش و همچنین با افزایش عدد فرود زاویه بی‌اثر افزایش و زاویه حداکثر کاهش می‌یابد.

### نسبت اعماق مزدوج بر پرش هیدرولیکی

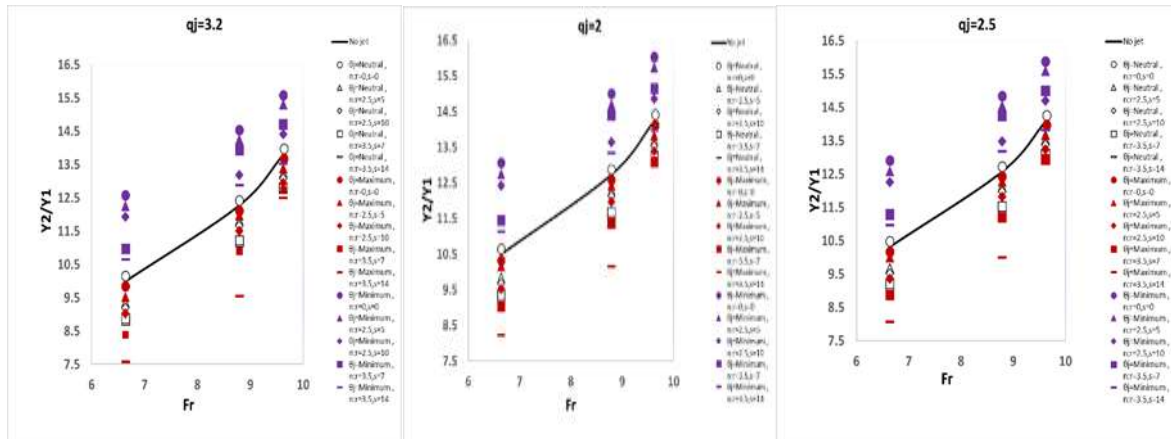
شکل ۶ نمودار تغییرات نسبت عمق ثانویه با تغییرات در فواصل زبری نیم‌استوانه‌ای و افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای مشاهده می‌کنید، با افزایش دبی جت، نسبت عمق ثانویه در قسمت‌های بالادست (زاویه‌های بیشتر از بی‌اثر) و پایین دست (زاویه‌های کمتر از بی‌اثر) کاهش می‌یابد با افزایش عدد فرود نسبت عمق ثانویه افزایش می‌یابد (رابطه مستقیم). با افزودن زبری نیم‌استوانه‌ای با ابعاد بزرگتر در کف کانال عمق ثانویه کاهش می‌یابد استفاده از جت با دبی (۳/۲ لیتر بر ثانیه)، حداکثر زاویه (۱۴۵ درجه) و حداقل عدد فرود (۶/۶۴) جریان برای زبری نیم‌استوانه‌ای (ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر) موجب بیشترین مقدار کاهش (۳۲/۳ درصد) نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. به کارگیری جت با زاویه حداکثر (۱۲۷ درجه)، حداکثر

برای بستر صاف موجب بیشترین مقدار افزایش (۶/۵ درصد) نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. دلیل کاهش یا افزایش نسبت اعماق مزدوج را می‌توان به کاهش و افزایش نیروی برشی در اثر جت آبی نسبت داد.

عدد فرود (۹/۶۲)، دبی جت (۲/۵ لیتر بر ثانیه) جریان برای بستر صاف موجب کمترین مقدار کاهش تا ۰/۱۲ درصد نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. استفاده از جت با دبی حداقل (۲ لیتر بر ثانیه)، حداقل زاویه (۶۰ درجه) و حداقل عدد فرود (۶/۶۴) جریان



شکل ۵- تغییرات ابتدایی پرش نسبت به زاویه برخورد



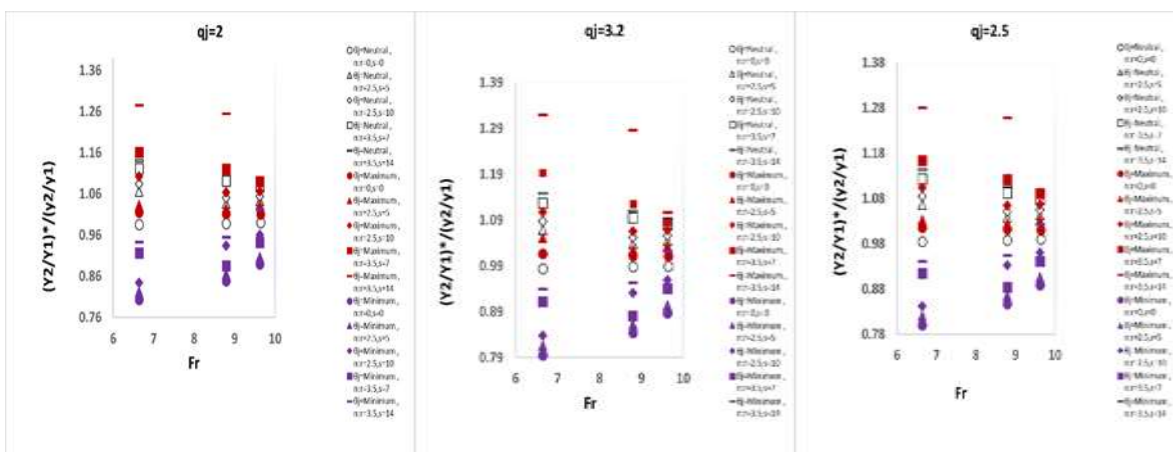
شکل ۶. تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه در مقابل عدد فرود در زبری نیم استوانه‌ای با زاویه‌های متفاوت

**کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی**

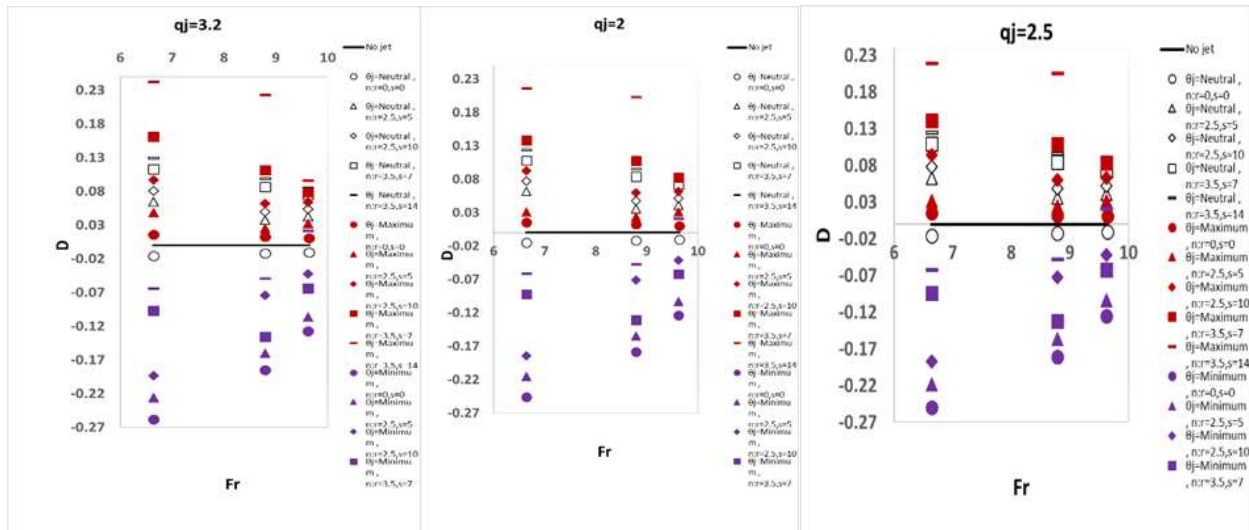
شکل ۸ نمودار میزان اختلاف عمق ثانویه با اعمال جت آبی در زبری نیم استوانه‌ای  $Y_2$  و پرش کلاسیک  $Y_2^*$  و پارامتر کاهش عمق  $D = \frac{Y_2^* - Y_2}{Y_2^*}$  بیان می‌شود.

مقدار  $D$  در زاویه‌هایی کمتر از زاویه بی اثر منفی می‌باشد که نشان می‌دهد عمق ثانویه پرش در این زاویه‌ها بزرگتر از پرش کلاسیک است و حداقل مقدار آن  $(-۰/۲۶)$ ، مربوط به زاویه ۷۴ درجه و حداکثر دبی جت و حداقل عدد فرود در حالت بستر صاف است. و زاویه‌های بیشتر از زاویه بی اثر مقدار  $D$  مثبت است؛ که نشان‌دهنده این است که عمق ثانویه پرش کمتر از پرش کلاسیک است و حداکثر آن  $(۰/۲۴)$  مربوط به زاویه حداکثر  $(۱۴۵)$  درجه و دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود در حالت زبری نیم استوانه‌ای (ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر) است.

برای بهتر نشان دادن تغییرات نسبت اعماق مزدوج در شکل ۷ نسبت  $(y_2/y_1) / (y_2/y_1)^*$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با دبی‌های متفاوت جت ترسیم گردیده است، که  $(y_2/y_1)^*$  نسبت اعماق ثانویه اندازه‌گیری شده با استفاده از جت آبی و  $(y_2/y_1)$  نسبت اعماق ثانویه در بستر صاف بدون جت آبی می‌باشد. هر چه دبی جت افزایش، اثر آن در کاهش و افزایش عمق ثانویه نیز بیشتر خواهد بود. کمترین مقدار کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری در زاویه حداکثر  $(۱۲۷)$  درجه) با دبی ۲٫۵ لیتر بر ثانیه جت و حداکثر عدد فرود و در حالت زبری نیم استوانه (ارتفاع ۳/۵ سانتی-متر) به میزان ۰/۱۲ درصد می‌باشد. بیشترین مقدار افزایش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری در زاویه حداقل  $(۶۰)$  درجه) با دبی حداقل جت و حداقل عدد فرود در حالت بستر صاف به میزان ۶/۵ درصد می‌باشد.



شکل ۷. تغییرات نسبت  $(y_2/y_1) / (y_2/y_1)^*$  با افزایش زاویه جت

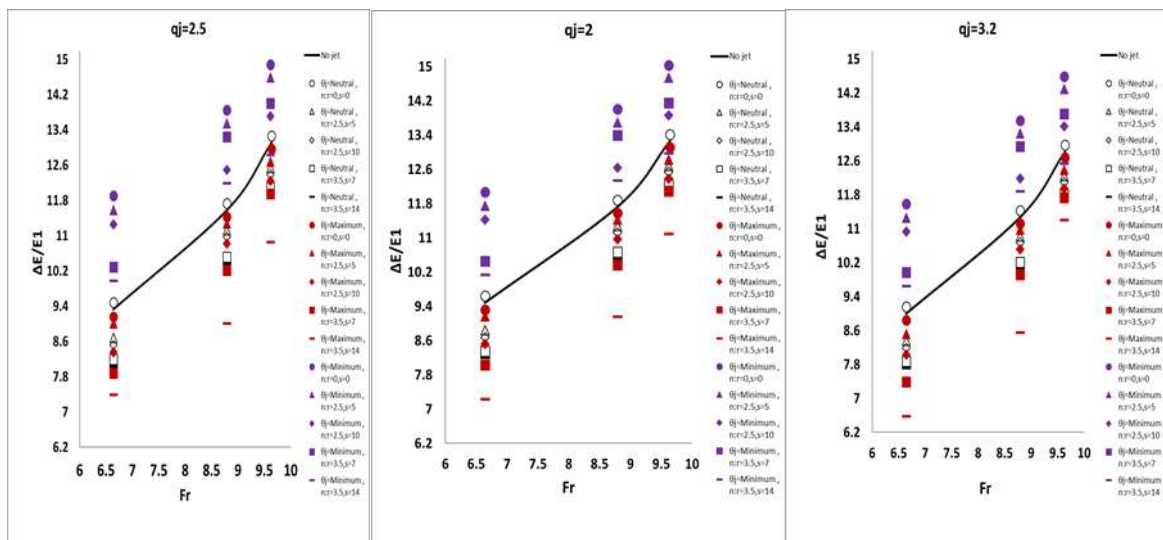


شکل ۸ تغییرات پارامتر D کاهش عمق در مقابل عدد فرود در زبری نیم استوانه‌ای با زاویه‌های متفاوت

می‌یابد. بیشترین مقدار افت نسبی انرژی مربوط به دبی جت حداقل، حداکثر عدد فرود و زاویه‌ای حداقل (۷۰ درجه) در حالت بستر صاف به میزان ۱۵/۰۳ می‌باشد. بیشترین مقدار افزایش افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری مربوط به دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود و حداقل زاویه (۷۴ درجه) در حالت بستر صاف به میزان ۲۸/۶۶ درصد می‌باشد. کمترین مقدار افت نسبی انرژی مربوط به دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود و زاویه‌ای حداکثر (۱۴۵ درجه) در حالت زبری نیم استوانه‌ای به میزان ۶/۵۸ می‌باشد و بیشترین مقدار کاهش افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری به میزان ۲۶/۸۹ درصد دارد.

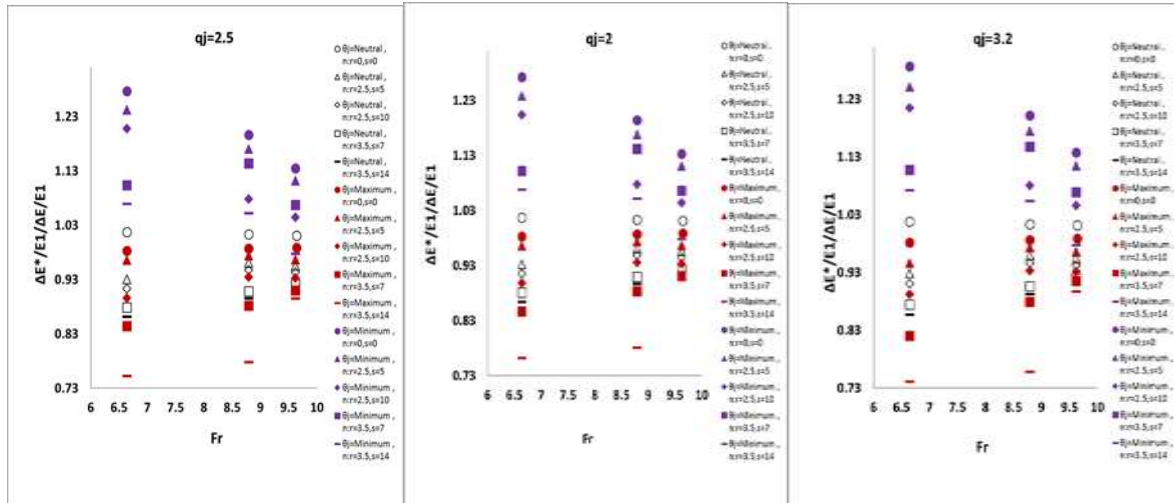
### افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی

شکل ۹ نمودار تغییرات افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی عبارتند از  $\Delta E/E_1$  که  $\Delta E$  اختلاف انرژی مخصوص در ابتدا (E1) و انتهای پرش (E2) و در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با زبری و محل اثر متفاوت جت را نشان می‌دهد. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت و بدون زبری است. در بستر زبری نیم استوانه‌ای افت نسبی انرژی، درحالی که جت با زاویه‌ای بیشتر از زاویه بی‌اثر بر پرش وارد می‌شود کمتر از پرش بدون جت می‌باشد، و برای حالتی که جت با زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر بر پرش وارد می‌شود بیشتر از بدون جت می‌باشد. نیز با افزایش عدد فرود افت نسبی انرژی افزایش و با افزایش دبی جت افت نسبی انرژی کاهش



شکل ۹ تغییرات افت انرژی نسبی پرش با افزایش زاویه جت





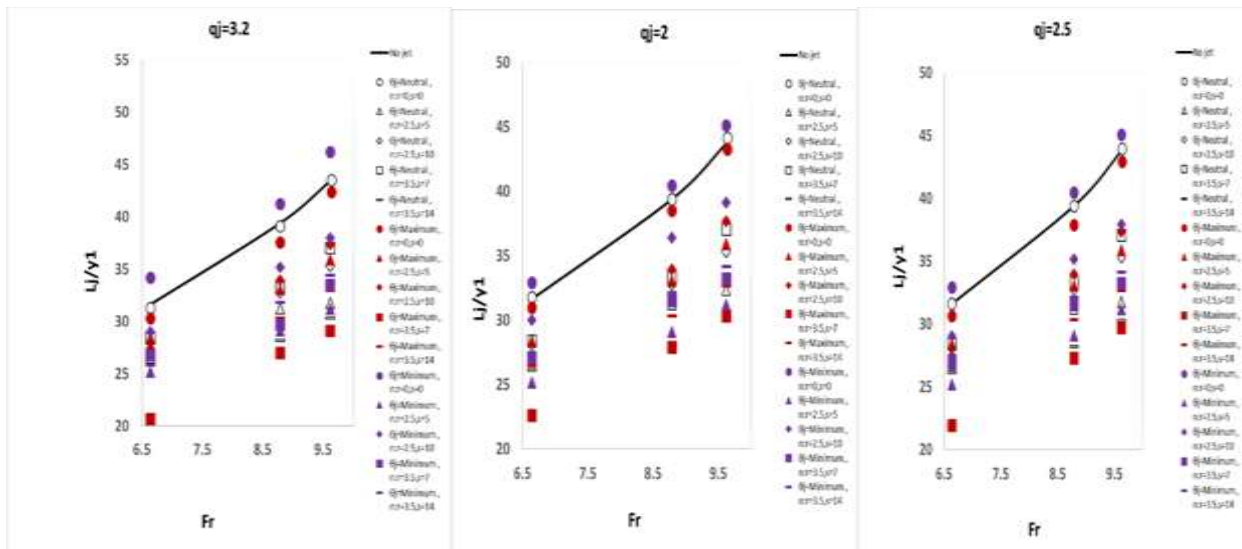
شکل ۱۰ تغییرات نسبت  $(\Delta E/E1)^*/(\Delta E/E1)$  در مقابل عدد فرود.

بی‌اثر در تمام اعداد فرود طول نسبی پرش کمتر از حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد، به طوری که در بیش‌ترین دبی جت، حداقل عدد فرود با زاویه حداکثر زاویه جت (۱۴۵ درجه) به میزان ۳۴/۷ درصد کاهش و بیشترین افزایش در حالت زاویه ۷۰ درجه، حداکثر دبی جت و حداقل عدد فرود در بستر صاف ۸/۱۶ درصد می‌باشد. دلیل کاهش و افزایش طول پرش در اثر تغییر در عمق ثانویه پرش می‌باشد. با توجه به افزایش ارتفاع موج آب طول موج آب نیز افزایش می‌یابد می‌توان گفت طول پرش با عمق ثانویه پرش رابطه مستقیم دارد. هرچه ابعاد زبری بیشتر باشد طول پرش بیشتر می‌شود.

برای بهتر نشان دادن تغییرات، افت نسبی پرش در حالت اعمال جت  $(\Delta E/E1)^*$  و افت نسبی پرش بدون جت  $(\Delta E/E1)$  پارامتر افزایش افت نسبی پرش  $(\Delta E/E1)^*/(\Delta E/E1)$  در مقابل عدد فرود در شکل ۱۰ رسم شده است.

### طول پرش هیدرولیکی

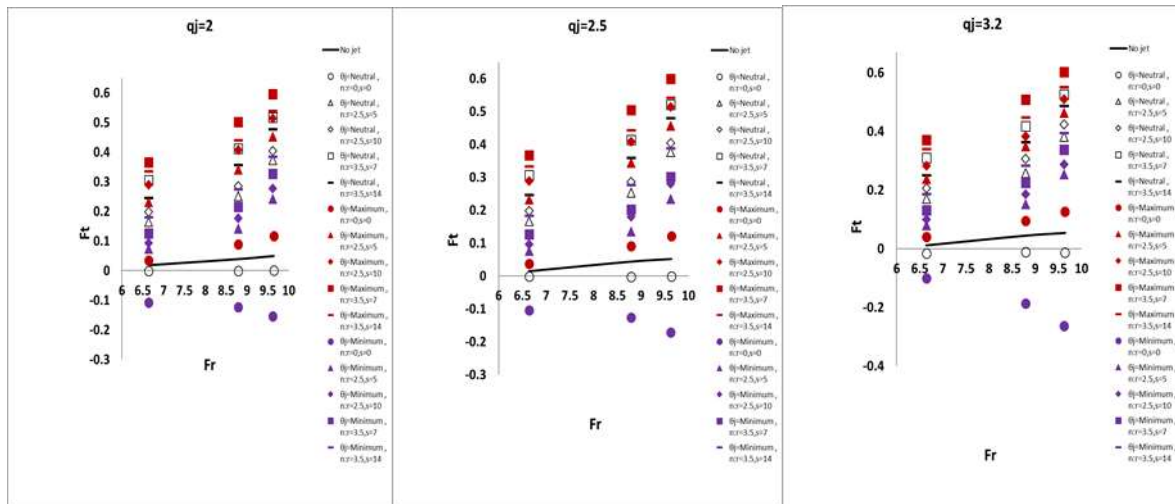
شکل ۱۱ تغییرات طول نسبی پرش با زبری نیم استوانه‌ای در روی شیب افقی را نشان می‌دهد که با افزایش زاویه جت طول نسبی پرش در حالت های زبری کاهش می‌یابد. در زاویه‌های بیشتر از زاویه



شکل ۱۱ تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش زاویه برخورد جت

که در آن P و M مقادیر نیروی فشار و مومنتوم و اندیس های ۱ و ۲ به ترتیب نشانگر مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشند. شکل ۱۲ نمودار تغییرات  $F_T$  با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در زبری نیم استوانه‌ای را نشان می‌دهد. خط ممتد نشان دهنده‌ی نیروهای برشی بستر قبل از اعمال جت می‌باشند.

**نیروهای تنش برشی**  
 $F_T = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2)$   
 از دلایل اصلی افزایش و کاهش عمق ثانویه در پرش آبی با اعمال جت در مقایسه با پرش بدون جت، وجود تنش برشی اضافی است که در اثر اعمال جت ایجاد می‌شود. با استفاده از معادله‌ی مومنتوم در صورتی که جمع نیروهای برشی بستر بر روی سطح افقی، نیروهای تنش برشی رینولدز و اثر نیروی جت در طول پرش باشد، می‌توان بیان کرد:



شکل ۱۲ تغییرات نیروهای تنش برشی بستر با افزایش زاویه برخورد جت

اولیه، عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی برای بستر زبری نیم-استوانه‌ای در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

### نتیجه‌گیری

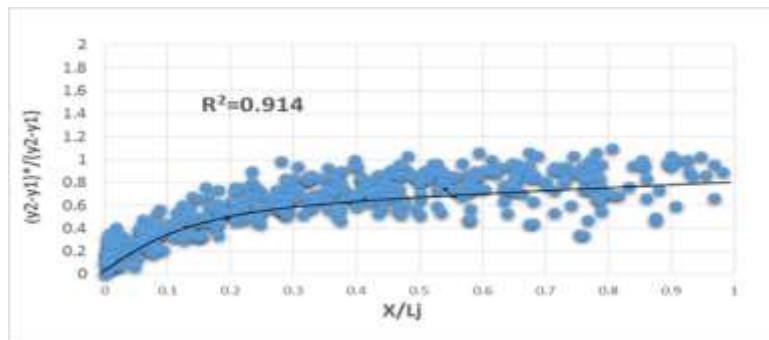
در این پژوهش، اثر جت و زبری نیم‌استوانه‌ای بر مشخصات پرش هیدرولیکی در دبی‌ها و فواصل مختلف زبری مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالا دست تغییر مکان می‌دهد و از یک زاویه به بعد هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست انجام نمی‌گیرد که این موقعیت به عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی پرش نامگذاری گردید. در نتیجه با افزایش دبی جت و افزایش ابعاد زبری و همراه با هم زاویه حداکثر افزایش می‌یابد. که حداکثر جابه‌جایی پرش در بالا دست در زاویه حداکثر ۱۴۵ درجه در حالت بدون زبری به میزان ۲۷۲ سانتی‌متر می‌باشد. و حداقل جابه‌جایی پرش در پایین‌دست در زاویه ۹۰ درجه و در زبری نیم‌استوانه‌ای به میزان ۱۱ سانتی‌متر می‌باشد. سرعت و دبی جت با فاصله پرش هیدرولیکی رابطه مستقیم دارد. در نتیجه در کنترل پرش موثر می‌باشد.

با افزایش عدد فرود نیروی برشی در بستر بدون زبری کاهش می‌یابد و افزایش دبی جت، افزایش زاویه جت و بستر زبر باعث افزایش نیروهای برشی می‌گردد. بیشترین مقدار افزایش نیروی تنش برشی در زاویه‌ای حداکثر زاویه (۱۴۵ درجه)، حداکثر عدد فرود، حداکثر دبی جت در بستر زبری نیم استوانه‌ای به میزان ۰/۶۰۲ می‌باشد که ۱۱/۳۵ برابر نسبت به حالت بدون زبری و بدون جت می‌باشد. این نیروها در زمانی که جت با زاویه بی اثر اعمال می‌شود تقریباً نزدیک به صفر و ثابت می‌شوند.

می‌توان چنین در یافت که اگر زاویه جت کمتر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل کاهش نیروهای برشی، پرش به سمت پایین دست و در صورتی که زاویه جت بیشتر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل افزایش نیروهای برشی نسبت به حالت بدون جت، پرش به سمت بالادست حرکت می‌نماید.

### پروفیل سطح آب

پروفیل بی‌بعد سطح آب که با استفاده از داده‌های بدست آمده از نرم‌افزار گرافر در تمام زبری‌های نیم‌استوانه‌ای با زاویه‌های متفاوت بدست آمده است در شکل ۱۳ ترسیم شده است. و نتایج نشان داد که پروفیل بی‌بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی برای تعیین میزان عمق



شکل ۱۳ پروفیل بی بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی با اعمال جت به انتهای پرش بر روی بستر زبر نیم استوانه‌ای برای کلیه آزمایش‌ها

زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳ (۳): ۲۲۵-۲۳۹.

دستورانی، م و نصرآبادی، م. ۱۳۹۰. اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۵: ۹۱-۱۰۰.

پورعبدالله، ن، هنر، ت. و فتاحی، ر. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری بستر بر طول پرش و غلتاب در حوضچه‌های آرامش با شیب کف معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۱۴: ۱۶۴ - ۱۵۵.

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): ۷۸۵-۷۷۵.

Hughes, W. C. and Flake, J.E. 1983. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(12): 1755-1771.

Pagliara, S. Lotti, I. and Palermo, M. 2008. Hydraulic Jump on rough bed of stream rehabilitation structure. *J. of Hydro-environment research*, DOI:10. 1016/j.jher, 20(08): 29-38.

Izadjoo, F. Shafai-Bejestan, M. and Bina, M. 2005. Hydraulic jump properties over a corrugated trapezoidal shape bed. *J. Shahid Chamran University of Ahvaz*. 27: 107-122.

Morris, H.M. 1995. A New Concept of Flow in Rough Conduits. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 120, pp. 373-398.

YüKSEL, Y. Günal, M. Bostan, T. Çevik, E. and Çelikoğlu, Y. 2004. The Influence of Imping Jets on Hydraulic Jumps. *Process of the Institution of Civil Engineering, Water Management*. 157: 63-76.

مهم‌ترین دلیل کاهش یا افزایش نسبت اعماق مزدوج را می‌توان به کاهش و افزایش نیروی برشی در اثر جت آبی نسبت داد. در نتیجه هر چه دبی جت افزایش، اثر آن در کاهش و افزایش عمق ثانویه نیز بیشتر خواهد بود و در نهایت تغییرات در زاویه جت باعث افزایش و کاهش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌شوند. مقدار  $D$  در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر، منفی می‌باشد در نتیجه حداقل مقدار آن  $(-0/26)$  که نشان می‌دهد عمق ثانویه پرش در این زاویه‌ها بزرگتر از پرش کلاسیک است. افت نسبی انرژی برای حالتی که جت با زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر بر پرش وارد می‌شود بیشتر از بدون جت می‌باشد. در نتیجه بیشترین مقدار افت نسبی انرژی به میزان  $15/03$  می‌باشد. دلیل کاهش و افزایش طول پرش در اثر تغییر در عمق ثانویه پرش می‌باشد. با توجه به افزایش ارتفاع موج آب طول موج آب نیز افزایش می‌یابد می‌توان گفت طول پرش با عمق ثانویه پرش رابطه مستقیم دارد. هرچه ابعاد زبری بیشتر باشد طول پرش بیشتر می‌شود.

## منابع

ابریشمی، ج. و حسینی، م. ۱۳۸۷. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات قدس رضوی، چاپ نوزدهم.

راور، ز، فرهودی، ج. و نژندعلی، ع. ۱۳۹۱. تأثیر بستر دوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶ (۱): ۸۵-۹۴.

نیسی، ک. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی شکل زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش (پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی). دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دستورانی، م، اسماعیلی، ک. و خداشناس، س. ۱۳۹۵. بررسی اثر

## Influence of Jet and Half Cylindrical Roughness on Hydraulic Jump Characteristics

B. eslammanesh<sup>1</sup>, M. Dastourani<sup>2\*</sup>, Y. Ramezani<sup>3</sup>

Received: May. 15, 2021

Accepted: Apr. 21, 2021

### Abstract

The present study was conducted to simultaneously investigate the effect of rectangular free jet and semi-cylindrical roughness on hydraulic jump characteristics. This study was performed inside a flume in the form of a rectangular channel 10 meters long and 30 centimeters wide. Then the jet with flows of 3/2, 2, 2/5 Liters per second with the maximum displacement effect of the beginning of the jump and the angle without changing the beginning of the jump to the end of the hydraulic jump. Take this angle as The angle was named ineffective and with the increase of the jet angle, the jump moves upwards and from one angle onwards, the jump does not move upwards. This angle was named as the maximum displacement angle. Decrease or increase, jump length, The secondary depth of the relative energy drop and shear stress force of the bed is used. The secondary was smoothed to a jetless state. Deployment The jet with an angle of 127 (inertial angle) degree, maximum landing number (9.64) flow and semi-cylindrical roughness reduces to 0.12% compared to the state without jet and smooth bed. The highest reduction in jump length (34.7%) occurs when the maximum flow angle from the jet and the flow rate is 3.2 liters per second and in the conditions of the lowest landing number (6.64) and the maximum increase in the 70 degree angle mode, the maximum jet flow And the maximum landing number in a flat bed is 8.16%.

**Key words:** Jump length, Rectangular free jet, Semi-cylindrical roughness

1- Graduate student of Water Structures, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, University of Birjand, Birjand, Iran

(\*- Corresponding Author Email: mdatourani@birjand.ac.ir)