نشريه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۱، فروردين ماه ۱۳۹۰، از صفحه ۸۷ تا ۹۷

مطالعة آزمايشگاهی پرش هيدروليکی بر روی پله با استفاده از PIV

مجتبی مهرآيين[1] و سيد علی اکبر صالحی نيشابوری[2*]

[1]دانش آموخته كارشناسي ارشد سازه هاي هيدروليكي - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربيت مدرس

[2]استاد گروه سازه هاي هيدروليكي دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربيت مدرس

(تاريخ دريافت ۸۶/۶/۲۴ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۹/۷/۲۷، تاريخ تصويب ۸۹/۸/۲۵)

چکيده

در برخي موارد پرش‌هاي هيدروليكي بر روي پله هاي منفي درون حوضچه هاي آرامش سدها ايجاد مي شوند. در مقالة حاضر به بررسي هيدروليکی و هيدرودیناميکی پرش هيدروليكي بر روی پلة منفي پرداخته شده است. براي انجام آزمايش‌ها از كانالي به عرض 0/47 m ، و طول 6m استفاده شده است. ارتفاع پله‌هاي مورد استفاده در انجام آزمايش‌ها 2/5,4,7cm بود. پارامترهای متغير در مطالعات هيدروليکی عبارتند از:۱. عدد فرود جريان بالا دست ۲.نسبت عمق ثانوية پرش به عمق ابتدايي پرش ۳. نسبت ارتفاع پله به عمق ابتدايي پرش. با تغيير شرايط جريان خروجي از زير دريچه، ارتفاع پله و عمق پاياب شكل‌هاي مختلفي از پرش هيدروليكي بر روي پله ايجاد مي شود. در مطالعات هيدروليكي نمودارهایی براي تعيين نوع پرش تشكيل شده بر روي پله ارايه شده است و در ادامة اين مطالعات بررسي در مورد مقادير ضريب تصحيح كنندة فشار انجام شده است. براي انجام مطالعات هيدرودیناميكي از دستگاه PIV استفاده شده است. اين دستگاه توانايي برداشت همزمان ميدان جريان را دارد. انجام مطالعات هيدرودیناميكي كه شامل بررسي ميدان جريان متوسط جريان و بررسي پارامترهاي آشفتگي ميدان جريان مي باشد به دليل محدوديت‌هاي استفاده از دستگاه PIV تنها براي دو پرش مواج و يك پرش نوع A انجام شده است.

واژه هاي كليدي: مطالعات آزمايشگاهي، پرش هيدروليكي، پلة منفي،PIV

مقدمه

پرش هيدروليكي جريان متغير سريعي است كه جريان فوق بحراني را به زير بحراني تبديل مي كند. در طول جريان پرش هيدروليكي مقداري از انرژي جريان توسط گردابه‌هاي ايجاد شده و آشفتگي موجود در جريان از آن گرفته مي‌شود، بنابراين از اين پديده در اتلاف انرژي جريان‌هاي فوق بحراني در پايين دست سدها استفاده مي‌شود. در پايين دست سدها در شرايطي كه عمق آب درون رودخانه كمتر از عمق ثانوية پرش باشد، پرش به رودخانه وارد شده و باعث آبشستگي شديد پايين دست حوضچة آرامش و نهايتاً موجب آسيب ديدگي حوضچة آرامش مي‌شود. در چنين شرايطي براي تثبيت پرش در درون حوضچة آرامش از يك پله منفي استفاده مي شود تا عمق ثانوية پرش با عمق جريان درون رودخانه برابر شود [۱]. شناخت نوع پرش هيدروليكي تشكيل شده در درون حوضچه هاي آرامش امكان طراحي مناسب حوضچة آرامش را فراهم مي سازد. تحقيقات محققين مختلف در مورد نوع پرش هيدروليكي مناسب تشكيل شده بر روي پلة منفي نتايج متفاوتي داشته است. به اعتقاد تعدادي از محققين از ايجاد پرش مواج بر روي پله بدليل ارتفاع زياد مورد نياز براي ديواره هاي حوضچة آرامش بايد جلوگيري كرد[۲]. در حالی که توصية تعداد ديگري از محققين اين است كه ايجاد پرش مواج بر روي پله مناسب می باشد [۳]، زيرا كمترين نوسانات فشار ايجاد شده در كف حوضچة آرامش مربوط به اين نوع پرش‌ها مي باشد.

بررسي ميدان جريان درون پرش هيدروليكي بر روي سطوح صاف و بدون پله توسط محققين مختلف با استفاده از روش‌هاي عددي و آزمايشگاهي انجام شده است[۸-۴]. تحقيقات انجام شده در مورد پرش‌هاي هيدروليكي مستغرق نيز نشان دهندة تشابه پروفيل‌هاي بي‌بعد شدة سرعت وپارامترهاي آشفتگي درون اين جريان‌ها مي‌باشد[۵].

تحقيقات انجام شده نشان داده است كه استفاده از روش انتگرال نواري به عنوان يكي از روش‌هاي مدل‌سازي جريان مي‌تواند براي تعيين ميدان جريان درون پرش هيدروليكي مورد استفاده قرار گيرد[۶].

استفاده از مدل آشفتگي $k-\varepsilon$ نيز به عنوان يكي از روش‌هــاي ديگر مدل‌ســازي ميــدان جريان درون پرش هيدروليكي مورد استفاده قرار گرفته است[۷].

* نويسنده مسئول : تلفن : ۸۲۸۸۰۰۰۰ , فاكس : ۸۲۸۸۳۳۸۱ , Email: salehi@modares.ac.ir

تحقيقات انجام شده با استفاده از دستگاه Micro ADV نيز نشان داده است كه تشابه پروفيل‌هاي سرعت بي بعد و نيز پارامترهاي آشفتگي در پرش‌هاي هيدروليكي ضعيف نيز وجود دارد و روابطي نيز براي تعيين اين پارمترها ارايه شده است[۹].

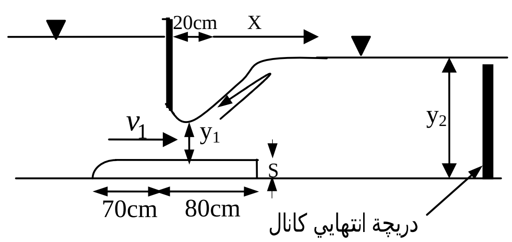
تحقيقاتي نيز در سال‌هاي اخير به منظور بررسي قابليت برداشت ميدان جريان پرش‌هاي هيدروليكي توسط دستگاه PIV انجام شده است[۱۰]. اين تحقيقات نشان داده است كه PIV توانايي برداشت ميدان جريان جت‌هاي با عدد فرود كم را دارد همچنين مي توان با استفاده از اين دستگاه به دليل توانايي برداشت ميدان نزديك كف تنش‌هاي برشي نزديك بستر را با استفاده از اين دستگاه به دست آورد.

با وجود تحقيقات وسيعي كه در مورد پرش‌هاي هيدروليكي بر روي سطوح بدون پله انجام شده است، تاكنون تحقيقي در مورد ميدان جريان درون پرش‌هاي هيدروليكي بر روي پلة منفي انجام نشده است و بررسي اين ميدان جريان براي اولين بار در تحقيق حاضر انجام مي شود. شناسايي ميدان جريان پرش‌هاي هيدروليكي امكان درك مناسبي از رفتار پرشهاي هيدروليكي را ايجاد مي‌كند همچنين اطلاعات مورد نياز براي مدل‌سازي عددي ميدان جريان را در اختيار محققين قرار مي دهد.

تنظيم وسايل آزمايشگاهي

آزمايش‌ها در آزمايشگاه هيدروليك دانشگاه تربيت مدرس در كانالي به طول ۶m، عرض47cm و ارتفاع 50cm انجام شده است. مخزن بالا دست كانال از جنس ورق گالوانيزه به ابعاد (عرض) ۰/۴۷ m × (طول) ۲/۵ m × (ارتفاع) ۱/۲ m مي باشد. آرام شدن جريان ورودي در اين مخزن توسط ورق‌هاي مشبک كه داراي ارتفاع ۱ متر بودند و در سه مكان با فواصل يكسان از ابتداي مخزن قرار گرفته بودند انجام شد. ارتفاع پلة مورد استفاده براي انجام آزمايشات ۲/۵cm، ۴cm و 7cm و نيز طول پله ۱/۵mاست كه ۷۰cm از آن در داخل مخزن و ۸۰cm باقي‌مانده در درون كانال مي‌باشد (شكل۱).

برای جلوگيری ازتاثيرات جدايی جريان عبوري از لبة پلة قرار گرفته در داخل مخزن بر روی جريان ورودی به داخل كانال، ۷۰cm ابتدايی پله در داخل مخزن قرار گرفت. تنظيم عمق فوق بحراني پرش توسط دريچة كشويي واقع در ابتداي كانال انجام مي‌شود. عمق پاياب توسط دريچة قرار گرفته در انتهاي كانال تنظيم گرديد.



شكل۱: شكل شماتيك از وسايل آزمايشگاهي.

براي برداشت‌هاي ميدان جريان از دستگاه PIV استفاده شده است اين دستگاه شامل دو منبع ليزر مجزا مي باشد كه مجهز به flash lamp وQ_switch مي باشد. نوع ليزر توليد شده توسط اين منابع از نوع Nd-YAG و به رنگ سبز مي باشد. قدرت ليزر توليد شده ۴۰۰ mj وطول موج آن ۵۳۲ nm مي باشد. اين نوع ليزر براي جريان‌هاي با سرعت زياد و مخلوط آب و هوا توصيه شده است. دوربين هاي مورد استفاده در اين تحقيق از نوعHigh Sence با كيفيت۱۰۲۴*۱۰۴۸پيكسل ساخت شركت DANTEC DYNAMICS مي باشد. حداكثر سرعت عكسبرداري اين نوع دوربين‌ها ۹ عكس در ثانيه مي باشد.نرم افزار مورد استفاده براي بررسي عكس‌هاي گرفته شده flow manager۱/۴۴ و مربوط به شركت سازنده دستگاه PIV مي باشد.

براي اندازه گيري سرعت از نوعي ماده رزيني بنام Pliolite استفاده شده است كه انواع مختلف اين ماده از جمله vtacl, S5E,vtca در برداشت‌هاي با PIV كاربرد دارد [۸]. pliolite مورد استفاده در اين تحقيق از نوع vtach بود. جرم مخصوص اين ماده $1/03\ gr/cm^3$ و بسيار نزديك به جرم مخصوص آب مي باشد. اين ماده داراي قابليت بازتابش مناسب نور ليزر مي باشد.

مقدار دبي در كانال با دبي‌سنج fluxus ADM 6725 ساخت شركتFlxim اندازه گيری شد. عمق سنج مورد استفاده در اين تحقيق از نوع SD- 12”A و ساخت شركت Mitutoyo ژاپن بود اين دستگاه داراي دقت ۰/۰۱mm مي‌باشد.

آناليز ابعادي

عمق ثانوية پرش y_2 را مي توان بصورت تابعي از پارامترهاي زير بيان كرد:

$$y_2 = f(y_1, v_1, \mu, g, \rho, s) \qquad (1)$$

كه:

μ : لزجت ديناميكي سيال

g : شتاب ثقل زمين

ρ : چگالي سيال

مي باشد و ساير پارامترهاي مورد نظر در شكل (۱) ارايه شده اند

با توجه به تعريف اعداد رينولدز Re_1 وعدد فرود Fr_1

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \times y_1}} \qquad (2)$$

$$\mathrm{Re}_1 = \frac{v_1 \times y_1}{(\frac{\mu}{\rho})} \qquad (3)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = f(\mathrm{Re}_1, Fr_1, \frac{s}{y_1}) \qquad (4)$$

با توجه به اينكه جريان جت كاملا آشفته مى باشد مى توان عدد رينولدز جت را از بين اعداد بى بعد حاصل شده حذف كرد بنابر اين:

$$\frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{s}{y_1}) \qquad (5)$$

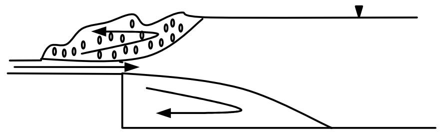
انجام آزمايش‌ها و بحث در مورد نتايج

براي بررسي اثر پارامترهاي مختلف بر نوع پرش هيدروليكي تشكيل شده بر روي پلة منفي و تعيين شرايط ايجاد هركدام از انواع پرش‌ها آزمايش‌های متعددي طرح ريزي شد. تعداد ۱۰۰ آزمايش براي بررسي اين شرايط انجام گرديد (جدول ۱).

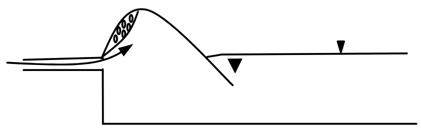
جدول ۱: محدوده تغيير پارامترهاي مورد مطالعه.

پارامتر	s/y_1	Fr_1	$\frac{y_2}{y_1}$
محدوده تغييرات	0/9-5/4	1-7/5	3-17

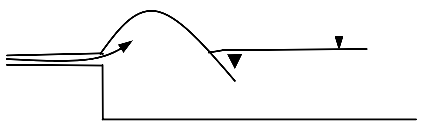
آزمايش‌ها به اين ترتيب انجام شد، ابتدا عمق پاياب موجود در كانال افزايش مي يافت تا جريان فوق بحراني به طـــور



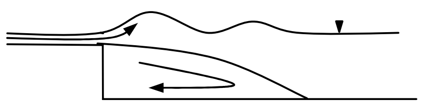
الف: پرش نوع A



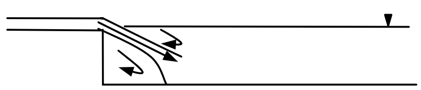
ب: پرش حد واسط



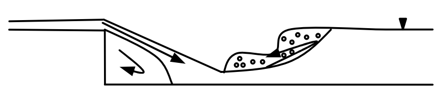
ج: پرش مواج



د: پرش موج قطاري



و: پرش نوع B



ي: پرش حدي

شكل۲: انواع پرش‌هاي تشكيل شده بر روي پلة منفي.

كامل در زير پاياب موجود غرق شود با كاهش عمق پاياب پاشنة پرش بتدريج تشكيل شده و جريان فوق بحرانی بر روی پله شكل می گيرد. با كاهش تدريجی عمق پاياب پاشنة پرش به سمت لبة پله حركت می كند تا زمانی كه پاشنة پرش به لبة پله نرسيده است پرش بعنوان پرش نوع A شناخته می شود[۲] (شكل ۲- الف). با كاهش مجدد سطح پاياب يک موج در لبة پله مشاهده می شود كه بر روي اين موج يك جريان برگشتي (جرياني مخلوط از آب و هوا) اين نوع پرش را پرش حد واسط گويند[۲] (شكل ۲-ب) با كاهش عمق پاياب جريان برگشتي بر روي موج پرش حد واسط از بين رفته و پرش مواج بر روي پله تشكيل مي‌شود[۲] (شكل ۲-ج). با كاهش مجدد عمق پاياب تک موج ايجاد شده به بعد از لبة پله منتقل شده و به تعدادی موج كه در امتداد يكديگر در حال نوسان

هستند تبدیل می شوند[۲] (شکل ۲- د) . با کاهش مجدد عمق پایاب انحنای جریان عبوری از لبة پله که در پرش مواج به سمت سطح پایاب بوده عوض شده و به سمت کف کانال تغییر مسیر مي دهد، در این حالت پرش نوع B شکل می گیرد [۲] (شکل ۲- و) . با کاهش مجدد میزان عمق پایاب، جریان عبوری از لبة پله به کف کانال برخورد کرده و پرش هیدرولیکی در پایین دست پله ایجاد می‌شود این پرش را پرش حدي گویند[۲] (شکل ۲-ي).

انحناي خطوط جریان در لبة پله که به سمت بالا (در پرش مواج و پرش نوع A) و به سمت پایین (در پرش نوع B و پرش حدي) مي باشد بر توزیع فشار وارد شده بر دیوارة پله تاثیر دارد، به طوري که در حالتي که انحناي جریان به سمت بالا مي باشد، مقدار فشار وارد بردیوارة پله از حالت فشار هیدرواستاتیکي بیشتر مي باشد و در حالتي که انحناي جریان در لبة پله به سمت پایین مي‌باشد مقدار فشار وارد بر دیوارة پله از حالت فشار هیدرواستاتیکي کمتر مي باشد [۲].

با توجه به خطي بودن فشار وارد بر دیوارة پله[۲] ، مقدار نیروي وارد بر لبة پله از رابطة (۶) محاسبه مي شود.

$$p_s = k \times \gamma \times s \times (y_1 + \frac{s}{2}) \qquad (۶)$$

ضریب k ضریب تصحیح‌کننده‌اي است که نسبت فشار واقعي وارد بر دیوارة پله را به فشار هیدرواستاتیکي بیان مي‌کند. نیروي وارد بر مقاطع فوق بحراني (مقطع ۱) و زیر بحراني (مقطع ۲) پرش هیدرولیکي با فرض خطي بودن فشار موجود در مقطع ۱ و ۲ از روابط ۷ و ۸ محاسبه مي‌شود.

$$p_1 = \frac{\gamma \times y_1^2}{2} \qquad (۷)$$

$$p_2 = \frac{\gamma \times y_2^2}{2} \qquad (۸)$$

γ : وزن واحد حجم سیال

با توجه به نوع انحراف خطوط جریان در لبة پله از نظر چگونگي حرکت نسبت به افق، سه حالت براي k بوجود مي آید:

۱- خطوط جریان به صورت تقریباً موازي با افق حرکت مي‌کنند($k = 1$)

۲- انحراف به سمت بالا دارند (براي پرش‌هاي حد واسط، مواج و موج قطاري $k > 1$)

۳- انحراف به سمت پائین دارند (براي پرش‌هاي نوع B وحدي $k < 1$)

با استفاده از رابطة مومنتم و با جایگزیني روابط ۲ و ۳ و ۴ در رابطة مومنتم رابطة ۹ به دست مي آید.

$$k = \frac{(2 \times Fr_1^2 \times (1 - 1/(y_2/y_1)) - (y_2/y_1)^2 + 1)}{\left[-(\frac{s}{y_1})^2 - 2 \times (\frac{s}{y_1})\right]} \qquad (۹)$$

که:

Fr_1 :عدد فرود جریان در مقطع فوق بحراني

رابطة بلانژ که از ترکیب روابط مومنتم و پیوستگي بین مقاطع فوق بحراني و زیر بحراني بر روي سطوح بدون پله حاصل شده است به صورت رابطة ۱۰ مي باشد.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} - 1\right) \qquad (۱۰)$$

اگر:

$X_1 = \frac{y_2}{y_1}$: در شرایطي که پله وجود نداشته باشد

$X_2 = \frac{y_2}{y_1}$:در شرایطي که پله وجود داشته باشد

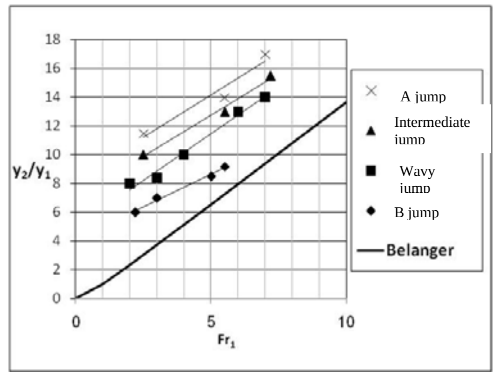
و $D = X_2 - X_1$

رابطة ۹ به رابطة ۱۱ تبدیل مي شود.

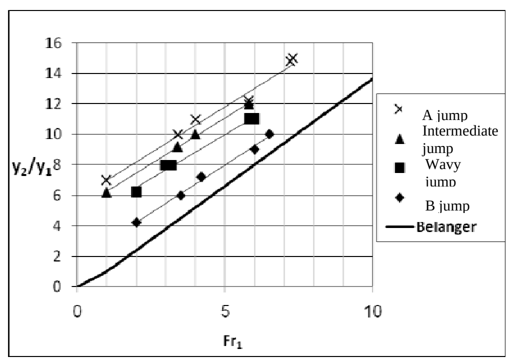
$$k = \frac{\left[-D^3 - 3 \times D^2 \times X_1 - 2 \times X_1^2 \times D + X_1 \times D + D\right]}{\left[-(\frac{s}{h_1})^2 - 2 \times (\frac{s}{h_1})\right]} \qquad (۱۱)$$

با تعیین علامت رابطة ۱۱ مي توان به این نتیجه رسید که در شرایطي که مقدارk>0، مقدارD>0 مي باشد. در شرایطي که k<0 مي باشد مقدار D<0 است و در نتیجه میزان افت انرژي در این شرایط براي پرش تشکیل شده بر روي سطوح بدون پله بیشتر از شرایطي است که پرش بر روي پله تشکیل شود. براي تشخیص نوع پرش هیدرولیکي تشکیل شده بر روي پلة منفي براي شرایط مختلف مي توان از شکل‌هاي (۳ الف- د) استفاده کرد. در تحقیقات قبلي محدودة پرش هاي هیدرولیکي نوع A ,B، مواج و حدي ارایه شده است[۲] در تحقیق حاضر محدودة تشکیل پرش حد وسط براي اولین بار ارایه شده است. در شکل (۳- د) نمودارهاي ارایه شده براي پرش موجي و پرش نوع A بسیار به یکدیگر نزدیك هستند و پرش حد واسط هم بسیار به نمودار پرش مواج نزدیك است که نشان مي دهد که شرایط تشکیل هر کدام از پرشها نسبت به تغییر عمق پایاب حساس مي‌باشد. با افزایش عدد فرود

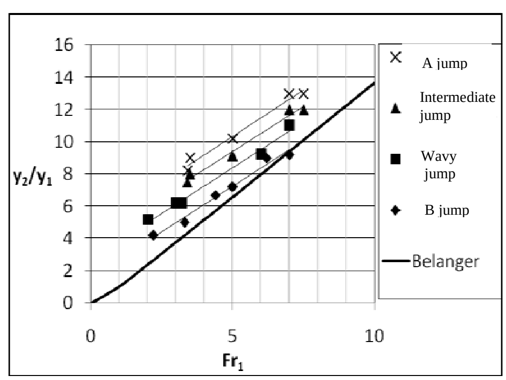
جريان اصلي (Fr_1) و ارتفاع پله (s/y_1) عمق پاياب مورد نياز براي تشكيل هر كدام از انواع پرش‌هاي هيدروليكي افزايش مي يابد. تحقيقات پيشين انجام شده توسط Ohtsu و همكاران نيز Mossa و همكاران نشان داد كه عرض كانال بر نوع پرش هيدروليكي تشكيل شده بر روي پله منفي تاثير گذار مي باشد[۱۱،۲]. با توجه به اينكه عرض كانال مورد استفاده در تحقيق حاضر با عرض كانال تحقيقات پيشين متفاوت مي باشد امكان مقايسه با تحقيقات پشين نبوده و براي بررسي اثر عرض كانال بر نوع پرش هيدروليكي تشكيل شده بر روي پله منفي نياز به تحقيقات بيشتر در آينده مي باشد.



الف: $s/y_1=5/4$

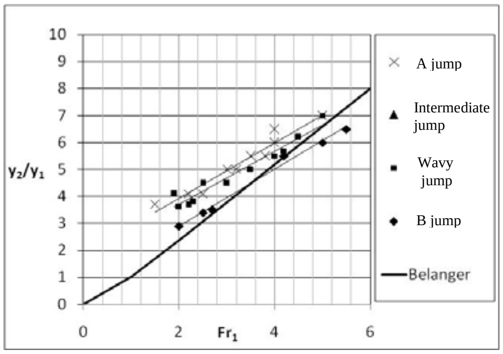


ب: $s/y_1=4/6$



ج: $s/y_1=3$

شكل۳ : تعيين نوع پرش هيدروليكي بر روي پلة منفي.



د: $s/y_1=0/9$

ادامه شكل۳ : تعيين نوع پرش هيدروليكي بر روي پلة منفي.

در شكل‌هاي (۳ الف- د) نمودار مربوط به شرايط $s/y_1=2/8$ بدليل شباهت بسيار زياد آن با شرايط $s/y_1=3$ حذف شده است.

محل تقاطع نمودار پرش نوع B با نمودار بلانژ از شكل‌هاي (۳ الف- د) استخراج شده و در جدول (۲) ارايه شده است. نتايج ارائه شده در جدول (۲) نشان مي دهد كه هر چه ميزان $\frac{s}{y_1}$ كمتر باشد محل تقاطع نمودارهاي پرش نوع B با نمودار بلانژ، در اعداد فرود كمتر می باشد. هدف از مشخص كردن اين نقاط تلاقي نشان دادن شرايط هيدروليكي مي‌باشد كه ميزان افت انرژي در پرش بر روي پله با پرش آزاد (رابطة بلانژ) يكسان مي‌باشد.

جدول ۲ : محل تقاطع نمودار بلانژ با پرش های نوع **B** تشكيل شده بر روی پله.

s/y_1	./۹	۲/۸	۳
Fr_1	۴	۵/۳	۷/۱
$\frac{y_2}{y_1}$	۴/۵	۶/۱	۸/۱

در شكل‌هاي (۳ - ج) و (۳ – د) تعدادي از نقاط مربوط به پرش هيدروليكي نوع B پايين تر از نمودار بلانژ قرار گرفته اند. با توجه به تعيين علامت عبارت k در رابطه ۷ فشار بر روي اين پله ها بايد بسيار كم باشد، بنابر اين از ايجاد پرش‌هاي نوع B بر روي پله منفي، بخصوص براي اعداد فرود بالا، بايد جلوگيري كرد.

مطالعات هيدروديناميكي

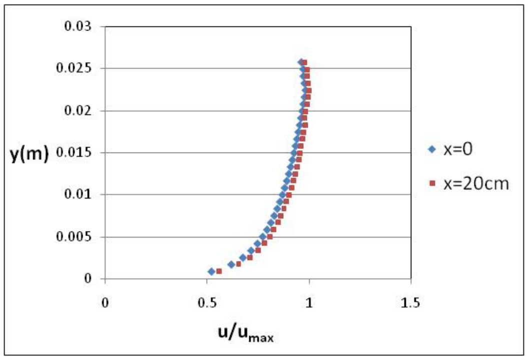
از آنجايي كه پرش‌هاي هيدروليكي داراي پاشنة نوساني مي با[۹]، براي برداشت‌هاي ميدان سرعت تا آنجا كه امكان دارد بايد پرشي انتخاب شود كه حداقل نوسانات پاشنة پرش را داشته باشد. با توجه به اين موضوع با آزمايش‌هاي متعدد سه نوع پرش انتخاب شد كه دو پرش نوع مواج و يك نوع پرش نوع A بوده است در پرش مواج ۱و۲ و پرش A عمق آب در مقطع فوق بحراني به ترتيب 0/026m، 0/0217m و 0/028m و سرعت متوسط در مقطع فوق بحراني به ترتيب 1/14m/s، 0/89m/sو 1/44m/s مي باشد. در تحقيق حاضر اطلاعات جمع‌آوري شده براي پرش‌هاي مختلف در ۱۲ تا ۱۵ مقطع جمع‌آوري شدند. عكس‌هاي گرفته شده از مناطق متوالي در طول جريان داراي همپوشاني در مرزها مي‌باشند. به دليل اينكه حداكثر نور تابيده شده به منطقة مورد مطالعه در مركز محل تابش ايجاد می شود لذا اين همپوشاني تاثير مثبتي در اطلاعات ضبط شده توسط PIV خواهد داشت فاصلة زماني بين عكسبرداري در اين تحقيق ۱/۹ ثانيه مي‌باشد. عكس‌هاي گرفته شده به صورت عكس‌هاي ۸bit ذخيره مي‌شوند. ابعاد منطقة بررسي ۲۵۶×۲۵۶ پيكسل انتخاب گرديد.

پس از برداشت سرعت‌ها بوسيلة PIV مناطقي از جريان كه در آن جريان آب و هوا وجود داشت توسط روش ماسك[۱] از محاسبات ميدان جريان خارج شد و سپس فرآيند پردازش عكس‌ها انجام شد. همچنين از روش ماسك براي جدا كردن مناطقي از ميدان جريان كه انعكاس نور سطح آب باعث بالاتر به نظر رسيدن سطح آب مي گرديد، استفاده شد.

سرعت متوسط در مقاطع قبل از پله

اولين مقطعي كه سرعت در آن اندازه گيري شده است به فاصلة 20cm از دريچه فاصله دارد (شكل ۱).

پروفيل سرعت بي بعد شده براي پرش نوع A در دو مقطع به فاصلة 20cm در شكل (۴) آمده است. پروفيل‌هاي سرعت نشان داده شده در شكل (۴) نشان مي‌دهد كه جريان به سمت توسعه يافتگي در اين دو مقطع ميل مي كند و مقدار سرعت در مقطع 20cm مقداري كاهش پيدا كرده است. بدليل انعكاس نور ليزر از سطح آب امكان بر داشت سرعت در نزديكي سطح آب وجود نداشت و نزديكترين نقطه براي اندازه گيري سرعت 2mm تا سطح آب فاصله دارد.



شكل۴: پروفيل بي بعد سرعت در عمق براي پرش **A**.

در پيش بيني پروفيل سرعت در ناحية قبل از پاشه پرش از قانون پرانتل (رابطة ۱۲) و قانون كل (رابطة ۱۳) استفاده شد.

$$u^{+}=\frac{u}{u_*}=\frac{1}{k}\times\ln(\frac{y\times u_*}{\upsilon})+B \qquad (۱۲)$$

كه:

$$\eta=\frac{y}{\delta}$$

υ: لزجت سيال

δ: ضخامت لاية مرزي

قانون پرانتل همان‌طور كه انتظار مي رفت در فاصلة محدودي از كف $(30<y^{+}=\frac{y\times u_*}{\upsilon}<350)$ با نتايج آزمايشگاهي تطابق مناسبي داشته است ولي نتايج قانون كل كه از رابطة (۸) به دست مي آيد با توجه به وجود ضريب موجود قابل كاليبراسيون (Π) نتايج مناسب‌تري را براي سرعت ميانگين در عمق جريان ارايه داده است.

$$u_*=\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$u^{+}=\frac{u}{u_*}=\frac{1}{k}\times\ln(\frac{y\times u_*}{\upsilon})+B+\frac{2\times\Pi}{k}\times f(\eta)$$

$$f(\eta)=\sin^2(\frac{\pi}{2}\times\frac{y}{\delta})\cong3\times\eta^2-2\times\eta^3 \qquad (۱۳)$$

دو پارامتر در رابطة كل مجهول مي باشند، سرعت برشي(u_*) و مقدار Π. براي تعيين مقدار u_* با توجه به اينكه مقدار سرعت در نزديك كف موجود مي باشد و

فاصلة آن تا كف نيز مشخص است مي توان با استفاده از رابطة پرانتل مقدار u_* را مشخص كرد (جدول۲). براي محاسبة مقادير Π مي توان از دو روش استفاده نمود. روش اول با استفاده از نمودارهايي است كه براي بدست آوردن Π ارائه شده و با توجه به ميزان گراديان فشار در طول جريان مي توان مقدار Π را محاسبه كرد [۱۲]. روش ديگر كمينه كردن ميانگين خطاهاي بين پروفيل سرعت آزمايشگاهي و سرعت به دست آمده از رابطة كل، به ازاي مقادير مختلف Π، مي باشد كه به اين روش مي‌توان مقادير Π را كاليبره كرد.

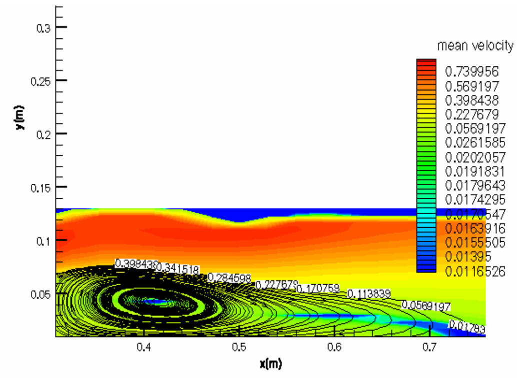
جدول ۳: پارمترهاي محاسباتي در رابطة كل.

پرش / پارامتر	پرش A	پرش مواج نوع ۱	پرش مواج نوع ۲
u_*	۰/۰۶۶۷	۰/۰۵	۰/۰۴۳۳
Π	۰/۵	۰/۳۵۶	۰/۳۶۸

در مقالة حاضر با استفاده از روش دوم مقادير Π محاسبه شده و در جدول (۳) ارايه شده است. با استفاده از نمودارهاي ارايه شده مقدار $\Pi = 0.4$ براي جريان بدون گراديان فشار طولي مي باشد كه به مقادير ارايه شده در جدول (۲) نزديك مي باشد.

سرعت متوسط در منطقة بعد از پله

در منطقة بعد از پله گردابه اي بزرگ بلافاصله بعد از لبة پله مشاهده مي شود. اين گردابه نقش مهمي دركاهش ميزان انرژي جريان عبوري از لبة پله دارد. در پرش نوعA با مقايسة ميزان انرژي جريان در نقاط قبل و بعد از لبة پله ميزان افت انرژي در قبل از لبة پله ۸۰% و در منطقة بعد از پله ۲۰% كل افت انرژي جريان فوق بحراني پرش مي باشد. در گوشة گردابة بزرگ ايجاد شده بعد از پله گردابه اي كوچك در گوشة پله، نيز وجود دارد كه وجود اين گردابه با توجه به صفر بودن سرعت در نقطه اي بر روي ديوارة پله اثبات مي شود. فاصلة اين نقطه تا كف كانال حدود1cm مي باشد. بدليل انعكاس نور ليزر در گوشة پله امكان برداشت دقيق اين گردابه در گوشة پله وجود نداشت. تنش برشي ايجاد شده بين كف كانال و ديوارة پله با گردابه موجب كاهش سرعت گردابه در نزديكي ديواره مي شود. ولي در وجه ديگر گردابه كه گردابه با جريان عبوري از روي پله در ارتباط است، مقدار حداكثر سرعت درلاية خارجي گردابه ديده مي شود.



شكل ۵: سرعت و خطوط جريان در منطقة بعد از پلة پرش مواج ۲.

بر روي مرز گردابه با جريان اصلي بدليل تبادل مومنتوم بين گردابه با جريان اصلي سرعت كاهش مي يابد. مقدار سرعت حداكثرجريان در سطح آب اتفاق نمي افتد كه علت آن تاثير تنش برشي هوا با جريان در روي سطح آزاد مي باشد. در منطقة برخورد جريان عبوري از روي پله با كف كانال يك نقطة ايستايي مشاهده مي شود كه جهت جريان در دو طرف اين نقطه متفاوت مي باشد. در اين نقطه بدليل صفر شدن سرعت جريان، هد سرعت جريان به هد فشاري تبديل مي شود و فشار در اين نقطه افزايش مي يابد (نقطه ايستايي در شكل۵).

بررسي پارامترهاي آشفتگي

پارامترهاي آشفتگي بررسي شده در مقاله حاضر عبارتند از:

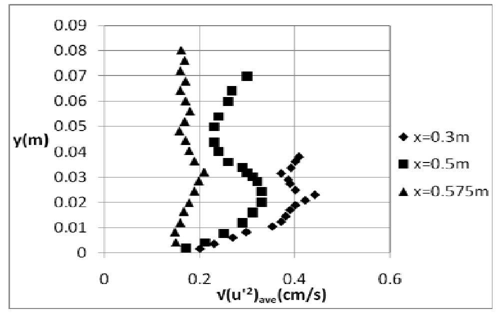
u' :نوسانات سرعت در جهت جريان

v':نوسانات سرعت در جهت عمود بر جريان

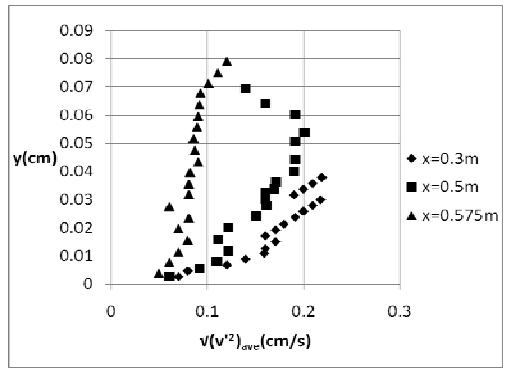
$-\rho\overline{u'v'}$:تنش رينولدز

k : انرژي جنبشی آشفتگي

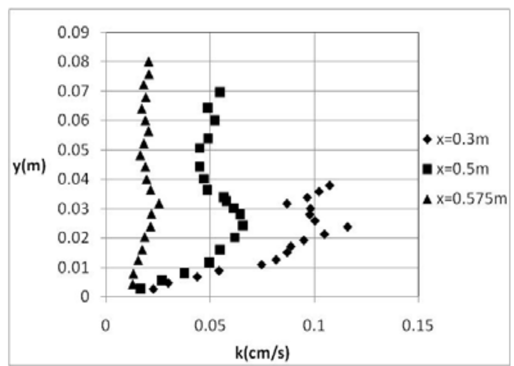
شكل‌هاي (۶ الف- ج) نشان دهندة نوسانات سرعت در جهت جريان و در جهت عمود بر جهت جريان و انرژي آشفتگي در فواصل مختلف طولي مي باشد. با توجه به اين شكل‌ها مشخص است كه ميزان نوسانات سرعت در راستاي جريان بيشتر از نوسانات سرعت در جهت عمود بر جريان مي باشد و با افزايش فاصله از پاشنة پرش از ميزان



الف- نوسانات سرعت در راستای جريان



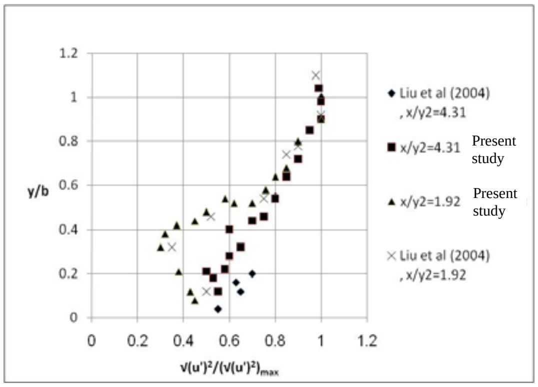
ب- نوسانات سرعت در راستای عمود برجريان



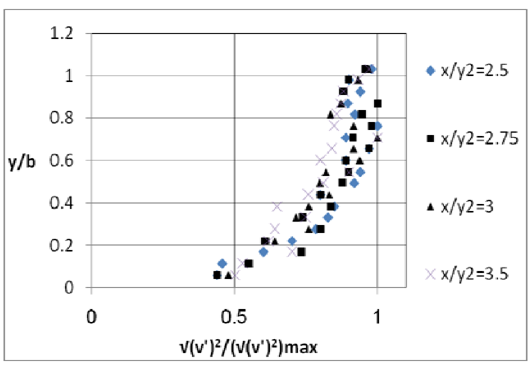
ج- انرژي آشفتگي جريان

شكل ۶: پارامترهای آشفتگی جريان در مقاطع قبل از پله در پرش A.

آشفتگي كاسته مي شود. در پرش نوع ۳ مقادير انرژي آشفتگي در مقاطع مختلف بر روي پله اندازه گيري شد (شكل۶-ج). مشاهده می شود كه با افزايش فاصله از پاشنة پرش مقدار انرژی آشفتگی كاهش می يابد. اين كاهش بدليل كاهش مقدار پارامترهای آشفتگی (u', v') می باشد. شكل (۷) نشان دهندة نوسانهاي سرعت بي بعد شده در چند مقطع از پرش هيدروليكي A مي باشد. مقدار $\sqrt{\overline{u'^2}}$ توسط مقدار $(\sqrt{\overline{u'^2}})_{max}$ بی بعد شده كه $(\sqrt{\overline{u'^2}})_{max}$ حداكثر $\sqrt{\overline{u'^2}}$ در هر مقطع می باشد. مقادير فاصله از كف(y) نيز بوسيلة b بي بعد شده است كه b فاصلة نقطه اي از كف كانال مي باشد كه سرعت در در تحقيق حاضر پارامترهای مختلفی برای ارايه پروفيل بدون بعد نوسانات سرعت در جهت جريان مورد بررسی قرار گرفت ولی پارامتری مناسب حاصل نشد و پخش شدگی بسياری بين داده ها به خصوص در نواحي نزديك كف كانال مشاهده شد (شكل ۷).



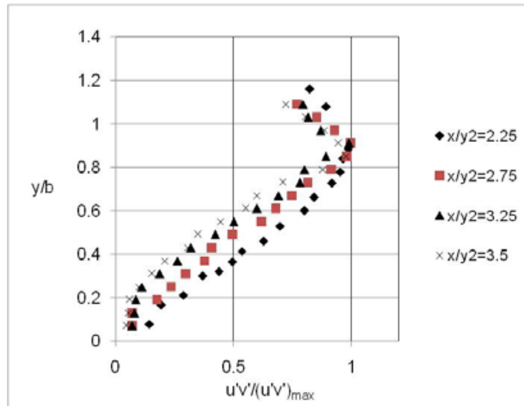
شكل ۷: نوسانات سرعت طولی در پرش A.



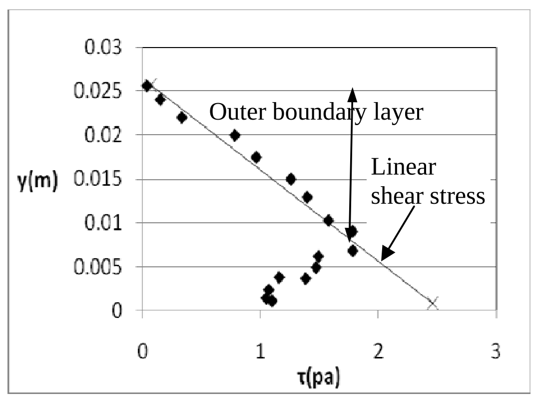
شكل۸: نوسانات سرعت عمود بر جهت جريان در پرش A.

شكل(۸) نشان دهندة متوسط نوسانات سرعت عمود بر جهت حركت جريان مي باشد. آن نصف سرعت حداكثر در آن مقطع مي باشد. علامت ¯ مقدار متوسط زماني در آن نقطه مي باشد. براي مقايسة بين داده هاي موجود و داده هاي ساير محققين داده هاي مربوط به Liu و همكاران نيز براي مقايسه در اين شكل ارايه شده است [9]. تحقيق Liu و همكاران در مورد پرش هيدروليكي تشكيل شده بر روي سطوح بدون پله انجام شده بود و از آنجا كه در پرش نوع A گردابة تشكيل شده در بالاي سطح آب، بر روي پله تشكيل مي شود پارامترهاي نوساني سرعت نيز براي اين مقاطع (مقاطع قبل از پله) با داده‌هاي اين محققين مقايسه شده است.

اين شكل نشان مي دهد كه انتخاب پارامترهاي b و $(\sqrt{v'^2})_{max}$ براي ارائة پروفيل بدون بعد براي نوسانات سرعت مناسب مي باشد. شكل (۹) نشان دهندة تنش‌هاي رينولدز در مقاطع قبل از پله براي پرش A مي باشد. مانند آنچه در شكل (۹) مشاهده شد، در شكل (۹) نيز انتخاب پارامتر b و $(\overline{u'v'})_{max}$ براي ارائة پروفيل‌هاي بدون بعد تنش‌هاي رينولدز مناسب مي باشد.

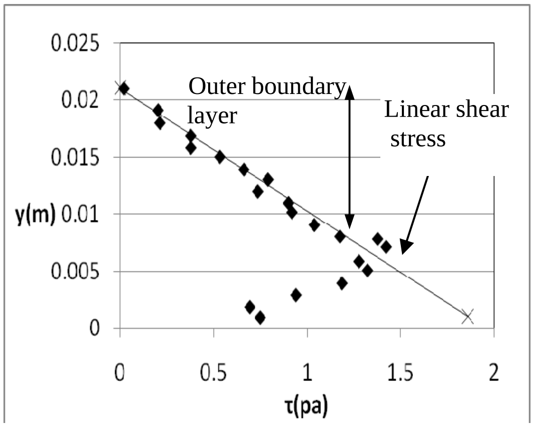


شكل۹ :تنش هاي رينولدز در مقاطع قبل از لبة پله (پرش**A**).



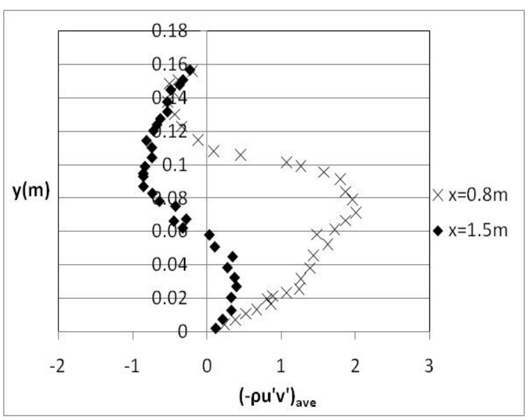
شكل۱۰: تنش برشي در ناحية فوق بحراني
در پرش مواج نوع ۱.

در مقطع فوق بحراني از روش توزيع خطي تنش برشي در عمق براي تعيين تنش برشي نزديك كف استفاده شده است. با داشتن مقدار تنش در دو نقطة نزديك سطح آب و كف كانال خطي رسم شد. مقدار تنش برشي آشفتگي نيز با توجه به مقادير $-\rho\overline{u'v'}$ به دست آمد. با توجه به نقطة جدايي تنش برشي كل از تنش برشي آشفتگي ضخامت لاية خارجي مرزي از روی شكل‌هاي (۱۰) و (۱۱) مشخص است.



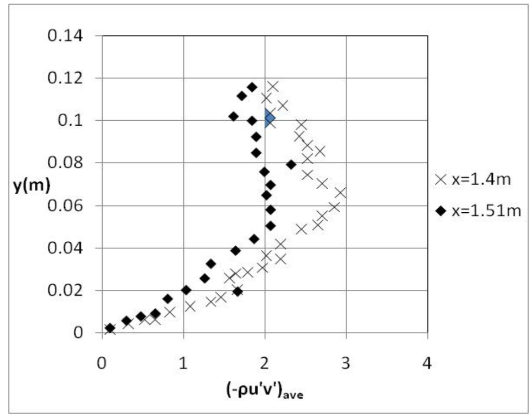
شكل۱۱ : تنش برشي در ناحية فوق بحراني
در پرش مواج نوع ۲.

آناليز و توصيف مقدار تنش برشي رينولدز در منطقة بعد از پله مشكل مي‌باشد ولي در مقاطعي كه گردابه وجود دارد، حداكثر تنش برشي در مرز بين جريان عبوري از لبة پله و گردابه مشاهده مي‌شود. شكل (۱۲) نشان دهندة تنش‌هاي رينولدز موجود در دو مقطع مربوط به محل قرار گيري گردابة تشكيل شده بعد از پله در پرش A و بعد از آن مي باشد. چنانچه از شكل (۱۲) مشخص است با خارج شدن از منطقة گردابه به شدت از ميزان تنش‌هاي رينولدز كاسته مي شود.



شكل۱۲: تنش رينولدز در ناحية بعد از پله در پرش **A**.

شكل (۱۳) نيز نشان دهندة تنش هاي رينولدز ايجاد شده در منطقة خارج از گردابه در پرش مواج نوع ۲ مـي باشد. چنانچه از شكل (۱)۳ مشخص اسـت با فاصله گرفـتن از منطقة گردابه نيز تنش‌هاي رينولدز كاهش مي يابند.



شکل۱۳: تنش رینولدز در ناحیة بعد از پله در پرش مواج نوع ۲.

نتیجه گیري

میزان افت انرژی در پرش‌های تشکیل شده بر روی پله همیشه بیشتر از پرش‌های تشکیل شده بر روی سطح آزاد نیست. محل تلاقی نمودار بلانژ با پرش نوعB برای مقادیر مختلف s/y_1 تعیین شد و مشخص شد که با افزایش مقدار s/y_1 محل تلاقی در مقادیر بیشتر y_2/y_1 و Fr_1 می باشد. در اعداد فرود مورد مطالعه نقطة تلاقی بین پرشA و مواج و معادلة بلانژ مشاهده نشد. البته به دلیل این که در پرش A و مواج $k>1$ این مطلب توجیه می شود. نمودارهايي براي تعيين پرش حد واسط در مقالة حاضر ارايه شده است. در برداشت‌هاي هيدروديناميکي توسط PIV در پرش A در مناطق قبل از پله تشابه پروفيل‌هاي بي بعد نوسانات سرعت در راستاي عمود بر جريان و تنش‌هاي رينولدز مشاهده شد. در پرش نوع ۳ ميزان حداکثر rms سرعت‌هاي افقي و عمودي در نزديک پاشنة پرش می باشد و با افزایش فاصله از پاشنة پرش مقادیر آن کاهش می یابد. مقدار حداکثر تنش رینولدز در مرز گردابه با جریان عبوری از روی پله ایجاد می شود. دلیل این مساله وجود گرادیان شدید سرعت در ناحیة مرز گردابه می باشد بدلیل کاهش گرادیان سرعت در ناحیة بعد از گردابه مقادیر تنش رینولدز در ناحیة گردابه بیشتر از ناحیة خارج از گردابه می باشد. و با افزایش فاصله از منطقة ايستايي انتهاي گردابه ميزان تنش رينولدز در مقاطع كاهش مي يابد.

فهرست علائم

s: ارتفاع پله
Y_t: عمق پایاب
u: سرعت در جهت جريان اصلي
v: سرعت در جهت عمود بر جريان اصلي
u': نوسانات سرعت در جهت جريان اصلي
v': نوسانات سرعت عمود برجهت جريان اصلي
k: انرژي جنبشي آشفتگي
δ: ضخامت لايه مرزي
$-\rho\overline{u'v'}$: تنش رينولدز
γ: چگالي آب
y_1: عمق اوليه پرش
y_2: عمق ثانويه پرش
Fr_1: عدد فرود جريان پرش هيدروليكي در مقطع ۱
Re_1: عدد رينولدز پرش هيدروليكي در مقطع ۱
μ: لزجت ديناميكي آب
ν: لزجت سينماتيكي آب

مراجع

1 - United States department of the interior. (1987). Design of small dams . 3th . Ed., A Water Resources Technical Publication, New York.

2 - Ohtsu, I. and Yasuda,Y. (1991). “Transition from Supercritical to Subcritical Flow at an abrupt drop.” *IAHR, J. of Hyd Res.*, Vol. 29, No. 3, PP. 309-327.

3 - Armeni, P., Tpscano, P. and Fiorotto,V. (2000). “On the effect of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump.” *IAHR J. of Hyd Res.*, Vol. 38, No. 5, PP. 359-368.

4 - Long, D., Steffler, P, M. and Rajaratnam, N. (1991). “A numerical study of submerged jumps.” *IAHR, J. of Hyd Res.*, Vol. 29, N. 3, PP. 293-307.

5 - Long, D., Steffler, P. M. and Rajaratnam, N. (1990). "LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump." *IAHR, J. of Hyd Res,* Vol. 28, No. 4, PP.437-460.

6 - McCorquodale, A. and Khalifa, A. (1983). "Internal flow in hydraulic jump." *ASCE. J. of Hyd Eng.*, Vol. 109, No. 5, PP. 684-701.

7 - Qingchao, L. and Drewes, U. (1994). "Turbulence characteristics in free and forced hydraulic jumps." *IAHR. J. of Hyd Res.*, Vol. 32, No. 6, PP. 877-897.

8 - Svendsen, I, A., Veeramony, J., Bakunin, J. and Kirby, J. T. (2000). "Flow in weak turbulent hydraulic jumps." *Journal of Fluid Mechanics.* Vol. 418, PP. 25–57.

9 - Liu, M., Rajaratnam, N. and Zh, D. Z. (2004). "Turbulance structure of hydraulic jumps of low froud numbers." *ASCE. J. of Hyd Eng.,* Vol. 130, No. 6, PP. 511-520.

10 - Lennon, J. (2004). *Application of particle image vlocimetry to the hydraulic jump.* Msc thesis, College of Engineering, The Pennsilvania State University.

11 - Mossa, M., Petrillo, A. and Chansson, H. (2003). "Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop." *IAHR. J. of Hyd Res.*, Vol. 41, No 1, PP. 39-51.

12 - White, F. M. (1991). *Fluid Mechanics,* Mc Graw Hill, Fifth Edition, New York.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Mask