مطالعة آزمايشگاهی پرش هيدروليکی بر روی پله با استفاده از PIV

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

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

[2]استاد گروه سازه هاي هيدروليکي 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 هيدروليکي بر روي پله هاي منفي درون حوضچه هاي آرامش سدها ايجاد مي شوند. در مقالة حاضر به بررسي هيدروليکی و هيدروديناميکی پرش هيدروليکي بر روی پلة منفي پرداخته شده است. براي انجام آزمايش‌ها از کانالي 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 شکل‌هاي مختلفي از پرش هيدروليکي بر روي پله ايجاد مي شود. در مطالعات هيدروليکي نمودارهايی براي تعيين نوع پرش تشکيل شده بر روي پله ارايه شده است و در ادامة اين مطالعات بررسي در مورد مقادير ضريب تصحيح کنندة فشار انجام شده است. براي انجام مطالعات هيدروديناميکي از دستگاه PIV استفاده شده است. اين دستگاه توانايي برداشت همزمان ميدان جريان را دارد. انجام مطالعات هيدروديناميکي که 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 های کليدي: مطالعات آزمايشگاهي، پرش هيدروليکي، پلة منفي،PIV

مقدمه

پرش هيدروليکي جريان متغير سريعي است که جريان فوق بحراني را به زير بحراني تبديل مي کند. در طول جريان پرش هيدروليکي 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 که عمق آب درون رودخانه کمتر 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 هيدروليکي تشکيل شده در درون حوضچه هاي آرامش امکان طراحي مناسب حوضچة آرامش را فراهم مي سازد. تحقيقات محققين مختلف در مورد نوع پرش هيدروليکي مناسب تشکيل 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 کرد[۲]. در حالی که توصية تعداد ديگري از محققين اين است که ايجاد پرش مواج بر روي پله مناسب می باشد [۳]، زيرا کمترين نوسانات فشار ايجاد شده در کف حوضچة آرامش مربوط به اين نوع پرش‌ها مي باشد.

بررسي ميدان جريان درون پرش هيدروليکي 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 هيدروليکي مستغرق نيز نشان دهندة تشابه پروفيل‌هاي بي‌بعد شدة سرعت وپارامترهاي آشفتگي درون اين جريان‌ها مي‌باشد[۵].

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

استفاده از مدل آشفتگي $k-\varepsilon$ نيز به عنوان يکي از روش‌هاي ديگر مدل‌سازي ميدان جريان درون پرش هيدروليکي مورد استفاده قرار گرفته است[۷].

* نويسنده مسئول : تلفن : ۸۲۸۸۰۰۰۰ , فاکس : 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 پارامترها ارايه شده است[۹].

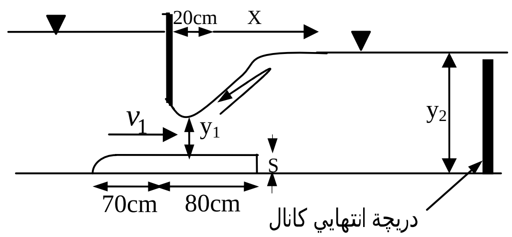
تحقيقاتي نيز در سال‌هاي اخير به منظور بررسي قابليت برداشت ميدان جريان پرش‌هاي هيدروليكي توسط دستگاه PIV انجام شده است[۱۰]. اين تحقيقات نشان داده است كه PIV توانايي برداشت ميدان جريان جت‌هاي با عدد فرود كم را دارد همچنين مي توان با استفاده از اين دستگاه به دليل توانايي برداشت ميدان نزديك كف تنش‌هاي برشي 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) m ۰/۴۷ × (طول) m ۲/۵ × (ارتفاع) m ۱/۲ مي باشد. آرام شدن جريان ورودي در اين مخزن توسط ورق‌هاي مشبك 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 mj ۴۰۰ وطول موج آن nm ۵۳۲ 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:

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

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

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

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

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

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

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

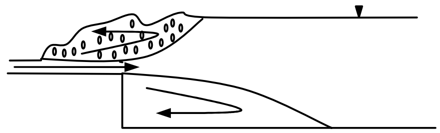
انجام آزمايش‌ها و بحث در مورد نتايج

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).

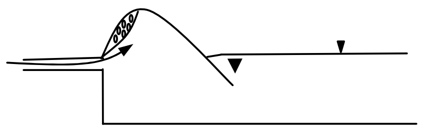
جدول ۱: محدوده تغيير پارامترهاي مورد مطالعه.

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

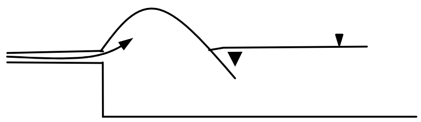
آزمايش‌ها به اين ترتيب انجام شد، ابتدا عمق پاياب موجود در كانال افزايش مي يافت تا جريان فوق بحراني به طـــور



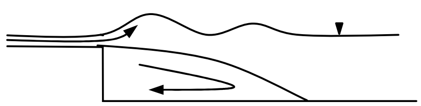
الف: پرش نوع A



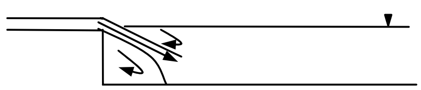
ب: پرش حد واسط



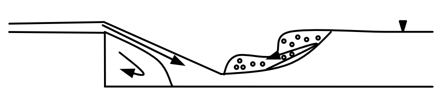
ج: پرش مواج



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 یک 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 تبديل می شوند[۲] (شكل ۲- د) . با كاهش مجدد عمق پاياب انحنای جريان عبوری از لبة پله كه در پرش مواج به سمت سطح پاياب بوده عوض شده و به سمت كف كانال تغيير مسير مي دهد، در اين حالت پرش نوع B شكل می گيرد [۲] (شكل ۲- و) . با كاهش مجدد ميزان عمق پاياب، جريان عبوری از لبة پله به كف كانال برخورد كرده و پرش هيدروليكی در پايين دست پله ايجاد می‌شود اين پرش را پرش حدي گويند[۲] (شكل ۲-ي).

انحناي خطوط جريان در لبة پله كه به سمت بالا (در پرش مواج و پرش نوع A) و به سمت پايين (در پرش نوع B و پرش حدي) مي باشد بر توزيع فشار وارد شده بر ديوارة پله تاثير دارد، به طوري كه در حالتي كه انحناي جريان به سمت بالا مي باشد، مقدار فشار وارد برديوارة پله از حالت فشار هيدرواستاتيكي بيشتر مي باشد و در حالتي كه انحناي جريان در لبة پله به سمت پايين مي‌باشد مقدار فشار وارد بر ديوارة پله از حالت فشار هيدرواستاتيكي كمتر مي باشد [۲].

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

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

ضريب k ضريب تصحيح‌كننده‌اي است كه نسبت فشار واقعي وارد بر ديوارة پله را به فشار هيدرواستاتيكي بيان مي‌كند. نيروي وارد بر مقاطع فوق بحراني (مقطع ۱) و زير بحراني (مقطع ۲) پرش هيدروليكي 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 سيال

با توجه به نوع انحراف خطوط جريان در لبة پله از نظر چگونگي حركت نسبت به افق، سه حالت براي k بوجود مي آيد:

۱- خطوط جريان به صورت تقريباً موازي با افق حركت مي‌كنند($k=1$)

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

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

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

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

كه:

Fr_1:عدد فرود جريان در مقطع فوق بحراني

رابطة بلانژ كه از تركيب روابط مومنتم و پيوستگي بين مقاطع فوق بحراني و زير 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 شرايطي كه پله وجود نداشته باشد

$X_2 = \frac{y_2}{y_1}$:در شرايطي كه پله وجود داشته باشد

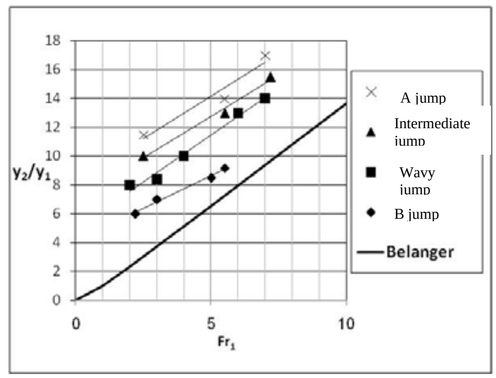
و $D = X_2 - X_1$

رابطة ۹ به رابطة ۱۱ تبديل مي شود.

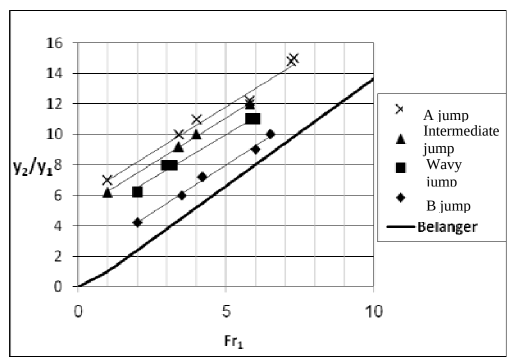
$$k = \frac{\left[-D^3 - 3\times D^2\times X_1 - 2\times X_1^2\times D + X_1\times D + D\right]}{\left[-(\frac{s}{h_1})^2 - 2\times(\frac{s}{h_1})\right]} \qquad (۱۱)$$

با تعيين علامت رابطة ۱۱ مي توان به اين نتيجه رسيد كه در شرايطي كه مقدارk>0، مقدارD>0 مي باشد. در شرايطي كه k<0 مي باشد مقدار D<0 است و در نتيجه ميزان افت انرژي در اين شرايط براي پرش تشكيل شده بر روي سطوح بدون پله بيشتر از شرايطي است كه پرش بر روي پله تشكيل شود. براي تشخيص نوع پرش هيدروليكي تشكيل شده بر روي پلة منفي براي شرايط مختلف مي توان از شكل‌هاي (۳ الف- د) استفاده كرد. در تحقيقات قبلي محدودة پرش هاي هيدروليكي نوع A ،B، مواج و حدي ارايه شده است[۲] در تحقيق حاضر محدودة تشكيل پرش حد وسط براي اولين بار ارايه شده است. در شكل (۳- د) نمودارهاي ارايه شده براي پرش موجي و پرش نوع A بسيار به يكديگر نزديك هستند و پرش حد واسط هم بسيار به نمودار پرش مواج نزديك است كه نشان مي دهد كه شرايط تشكيل هر كدام از پرشها نسبت به تغيير عمق پاياب حساس مي‌باشد. با افزايش عدد فرود

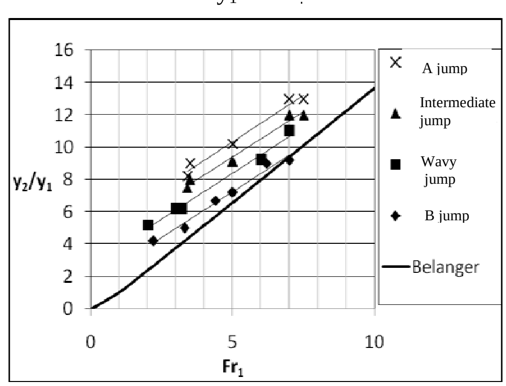
جريان اصلي (Fr_1) و ارتفاع پله (s/y_1) عمق پاياب مورد نياز براي تشكيل هر كدام از انواع پرش‌هاي هيدروليكي افزايش مي يابد. تحقيقات پيشين انجام شده توسط Ohtsu و همكاران نيز Mossa و همكاران نشان داد كه عرض كانال بر نوع پرش هيدروليكي تشكيل شده بر روي پله منفي تاثير گذار مي باشد[۱۱،۲]. با توجه به اينكه عرض 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: $s/y_1=5/4$

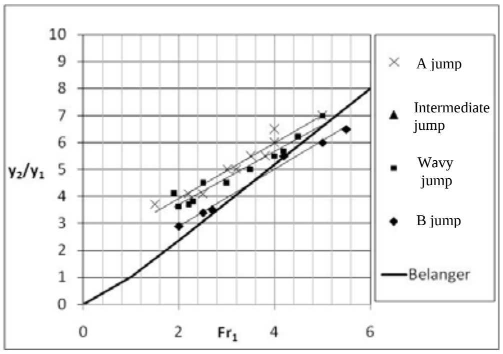


ب: $s/y_1=4/6$



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** تشکیل 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

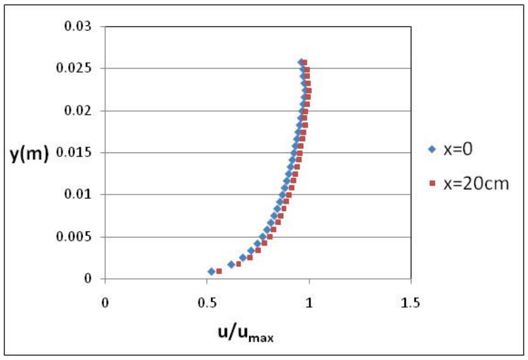
از آنجايي كه پرش‌هاي هيدروليكي داراي پاشنة نوساني مي با[۹]، براي برداشت‌هاي ميدان سرعت تا آنجا كه امكان دارد بايد پرشي انتخاب شود كه حداقل نوسانات پاشنة پرش را داشته باشد. با توجه به اين موضوع با آزمايش‌هاي متعدد سه نوع پرش انتخاب شد كه دو پرش نوع مواج و يك نوع پرش نوع A بوده است در پرش مواج ۱و۲ و پرش 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[1] 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.

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

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

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

(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 کف نیز مشخص است مي توان با استفاده از رابطة پرانتل مقدار u_* را مشخص کرد (جدول۲). براي محاسبة مقادير Π مي توان از دو روش استفاده نمود. روش اول با استفاده از نمودارهايي است که براي بدست آوردن Π ارائه شده و با توجه به ميزان گراديان فشار در طول جريان مي توان مقدار Π را محاسبه کرد [۱۲]. روش ديگر کمينه کردن ميانگين خطاهاي بين پروفيل سرعت آزمايشگاهي و سرعت به دست آمده از رابطة کل، به ازاي مقادير مختلف Π، مي باشد که به اين روش مي‌توان مقادير Π را کاليبره کرد.

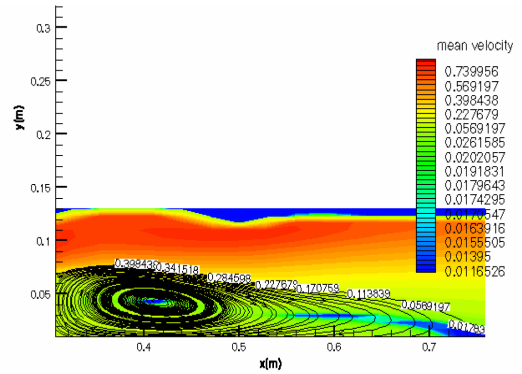
جدول ۳: پارمترهاي محاسباتي در رابطة کل.

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 که 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 درکاهش 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% کل افت انرژي جريان فوق بحراني پرش مي باشد. در گوشة گردابة بزرگ ايجاد شده بعد از پله گردابه اي کوچك در گوشة پله، نيز وجود دارد که وجود اين گردابه با توجه به صفر بودن سرعت در نقطه اي بر روي ديوارة پله اثبات مي شود. فاصلة اين نقطه تا کف کانال حدود1cm مي باشد. بدليل انعکاس نور ليزر در گوشة پله امکان برداشت دقيق اين گردابه در گوشة پله وجود نداشت. تنش برشي ايجاد شده بين کف کانال و ديوارة پله با گردابه موجب کاهش سرعت گردابه در نزديکي ديواره مي شود. ولي در وجه ديگر گردابه که گردابه با جريان عبوري از روي پله در ارتباط است، مقدار حداکثر سرعت درلاية خارجي گردابه ديده مي شود.



شکل ۵: سرعت و خطوط جريان در منطقة بعد از پله پرش مواج ۲.

بر روي مرز گردابه با جريان اصلي بدليل تبادل مومنتوم بين گردابه با جريان اصلي سرعت کاهش مي يابد. مقدار سرعت حداکثرجريان در سطح آب اتفاق نمي افتد که علت آن تاثير تنش برشي هوا با جريان در روي سطح آزاد مي باشد. در منطقة برخورد جريان عبوري از روي پله با کف کانال يك نقطة ايستايي مشاهده مي شود که 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 (نقطة ايستايي در شکل۵).

بررسي پارامترهاي آشفتگي

پارامترهاي آشفتگي بررسي شده در مقاله حاضر عبارتند از:

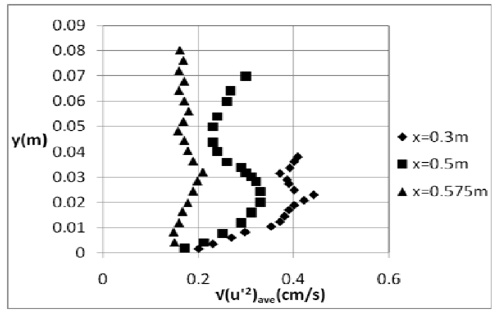
u' :نوسانات سرعت در جهت جريان

v':نوسانات سرعت در جهت عمود بر جريان

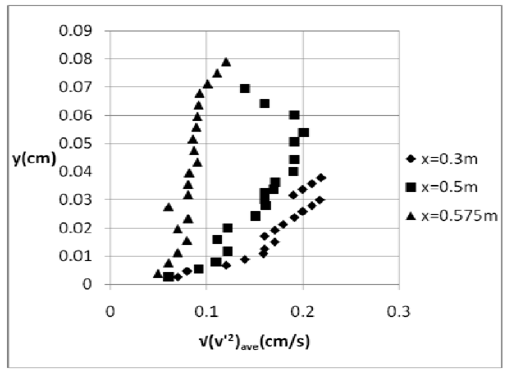
$-\rho\overline{u'v'}$:تنش رينولدز

k : انرژي جنبشی آشفتگي

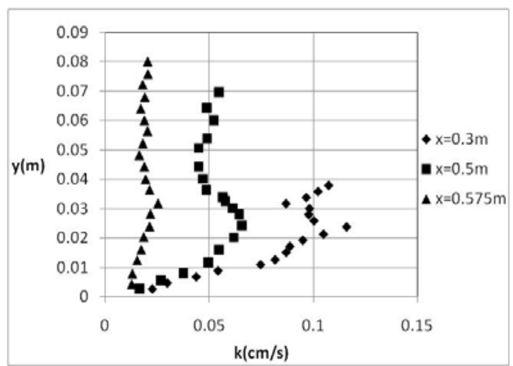
شکلهاي (۶ الف- ج) نشان دهندة نوسانات سرعت در جهت جريان و در جهت عمود بر جهت جريان و انرژي آشفتگي در فواصل مختلف طولي مي باشد. با توجه به اين شکل‌ها مشخص است که ميزان نوسانات سرعت در راستاي جريان بيشتر از نوسانات سرعت در جهت عمود بر جريان مي باشد و با افزايش فاصله از پاشنة پرش از ميزان



الف- نوسانات سرعت در راستاى جريان



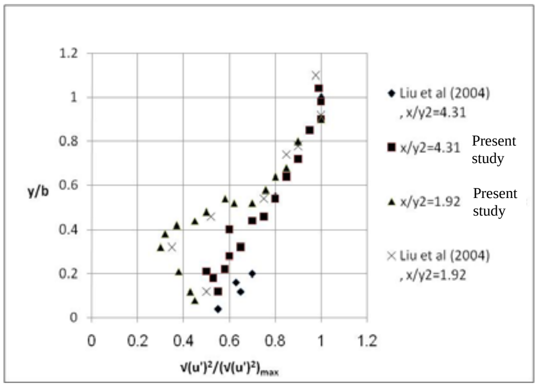
ب- نوسانات سرعت در راستاى عمود برجريان



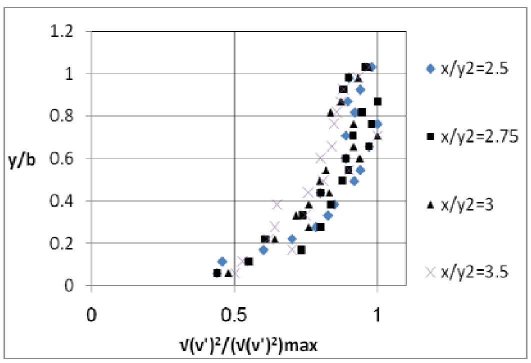
ج- انرژي آشفتگي جريان

شكل ۶: پارامترهاى آشفتگى 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 مى شود كه با افزايش فاصله از پاشنة پرش مقدار انرژى آشفتگى كاهش مى يابد. اين كاهش بدليل كاهش مقدار پارامترهاى آشفتگى (u', v') مى باشد. شكل (۷) نشان دهندة نوسانهاي سرعت بي بعد شده در چند مقطع از پرش هيدروليكي A مي باشد. مقدار $\sqrt{u'^2}$ توسط مقدار $(\sqrt{u'^2})_{max}$ بى بعد شده كه $(\sqrt{u'^2})_{max}$ حداكثر $\sqrt{u'^2}$ در هر مقطع مى 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 پارامترهاى مختلفى براى ارايه پروفيل بدون بعد نوسانات سرعت در جهت جريان مورد بررسى قرار گرفت ولى پارامترى مناسب حاصل نشد و پخش شدگى بسيارى بين داده ها به خصوص در نواحي نزديك كف كانال مشاهده شد (شكل ۷).



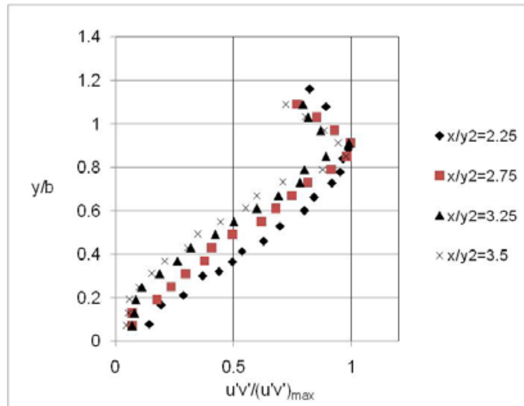
شكل ۷: نوسانات سرعت طولى در پرش A.



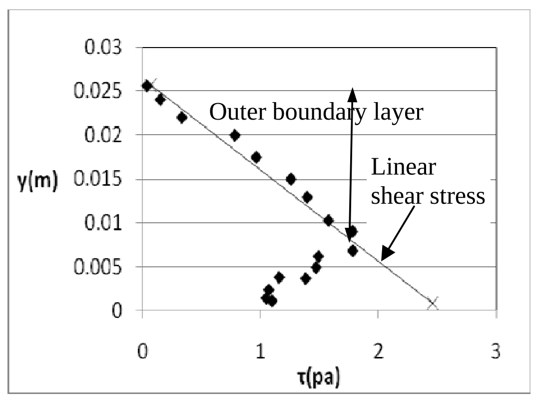
شكل۸: نوسانات سرعت عمود بر جهت جريان در پرش A .

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.

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

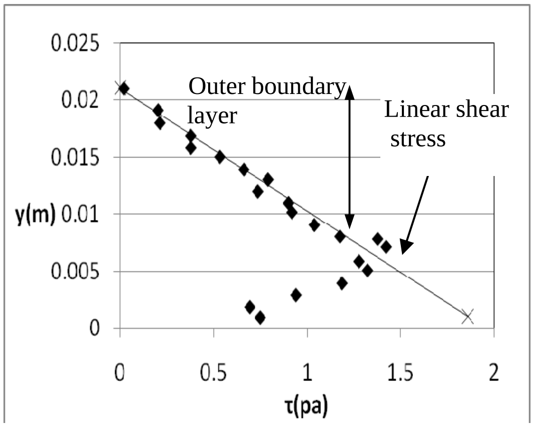


شکل۹ :تنش هاي رينولدز در مقاطع قبل از لبة پله (پرش **A**).



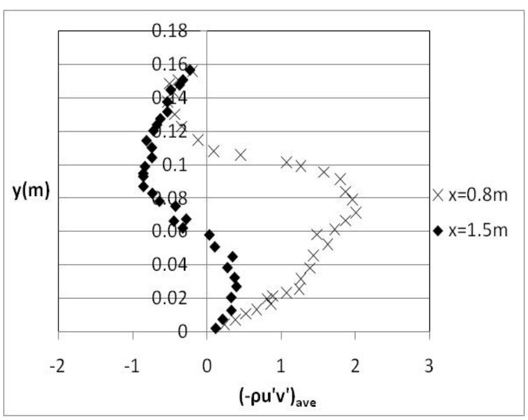
شکل۱۰: تنش برشي در ناحية فوق بحراني
در پرش مواج نوع ۱.

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.



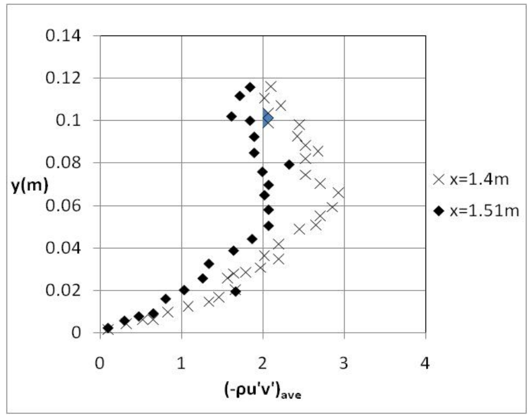
شکل۱۱ : تنش برشي در ناحية فوق بحراني
در پرش مواج نوع ۲.

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.



شکل۱۲: 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 مي باشد. چنانچه از شكل (۱)۳ مشخص است با فاصله گرفتن از منطقة گردابه نيز تنش‌هاي رينولدز كاهش مي يابند.



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

نتیجه گيري

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 هيدروديناميكي 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 حداكثر rms سرعت‌هاي افقي و عمودي در نزديک پاشنة پرش می باشد و با افزايش 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