

## تأثیر بستر موج دار سینوسی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی

اکرم عباسپور<sup>۱\*</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۲</sup>، داود فرسادی زاده<sup>۲</sup> و علی اشرف صدرالدینی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۷/۷/۲۸

۱- دانشجوی دکتری، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه [E-mail:akabbaspour@yahoo.com](mailto:akabbaspour@yahoo.com)

### چکیده

در این تحقیق بررسی تجربی پرش هیدرولیکی در محدوده وسیع تری نسبت به محققان دیگر بر روی 6 نوع بستر موج دار با شیب موج مختلف انجام گرفت. شیب موج در محدوده 0/286 تا 0/625 و عدد فرود در محدوده 3/8 تا 8/6 قرار داشت. تأثیر ارتفاع و طول موج بستر موج دار بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با تحلیل موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت، تنش برشی بستر و استهلاك انرژی بررسی شد. پارامترهای بی بعد هیدرولیکی نیز به صورت تابعی از عدد فرود تعیین گردید. نتایج نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج-دار نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان کوچکتر است. بررسی پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد که این پروفیل‌ها مشابه بوده و با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف متفاوت می‌باشند. همچنین مقدار ضخامت لایه مرزی بی بعد بر روی بستر موج دار برابر 0/57 به دست آمد که با ضخامت لایه مرزی در بستر صاف برابر 0/16 مقایسه گردید. بررسی و مقایسه نیروی برشی و ضریب تنش برشی نشان داد که تنش برشی در بستر موج‌دار حداقل 10 برابر بستر صاف است. نتایج این تحقیق با تایید نتایج محققان قبلی نشان می‌دهد که از بسترهای موج‌دار برای استهلاك انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با کارایی بهتر می‌توان استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: اتلاف انرژی، بستر موج دار، پرش هیدرولیکی، عدد فرود

**Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics****A Abbaspour<sup>1\*</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>2</sup>, D Farsadizadeh<sup>2</sup> and AA Sadraddini<sup>2</sup>**<sup>1</sup>PhD Student Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran<sup>2</sup>Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran\*Corresponding author: [E-mail:akabbaspour@yahoo.com](mailto:akabbaspour@yahoo.com)**Abstract**

In the present research, the experimental study of the hydraulic jump within a wide scope rather than those of other researchers was implemented on six corrugated beds with different wave steepness. The wave steepness of corrugations and the Froude number were in the range of 0.286 to 0.625 and 3.8 to 8.6, respectively. The effects of wave height and length of corrugations on the basic character of the hydraulic jump such as free surface location, velocity, shear stress distribution and energy dissipation were studied for different Froude numbers. The dimensionless hydraulic parameters were determined as functions of the Froude number. The results showed that the tailwater depth and the length of the jump on corrugated beds were smaller than those of the corresponding jump on a smooth bed. The analysis of velocity profiles at different sections of the jump showed that the velocity profiles were similar and differed from the profile of the simple plane wall jet. The normalized boundary layer thickness, was equal to 0.57 for the jumps on corrugated bed compared to 0.16 for the simple wall jet. The analysis and comparison of the bed shear force and shear stress coefficients showed that the shear stress on the corrugated bed was about 10 times greater than that of the smooth bed. The results of this study are in good agreement with the previous results and showed that the corrugated beds could be used to dissipate efficiently the excessive energy of the hydraulic jump in stilling basins.

**Keywords:** Corrugated bed, Energy dissipation, Froud number, Hydraulic jump

معمولاً جهت تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از بلوکها و آب پایه ها استفاده می شود. استفاده از اجزای زیر در حوضچه آرامش موجب افزایش کارایی حوضچه، کاهش عمق ثانویه و طول پرش می‌گردد. در مورد پرش هیدرولیکی روی بستر زیر مطالعات مفصلی توسط محققان انجام گرفته است (هیوز و فلک 1984).

محل تشکیل پرش هیدرولیکی باید مقاوم به فرسایش و کاویتاسیون باشد. به عبارت دیگر حوضچه آرامش ممکن است در اثر کاویتاسیون یا

**مقدمه**

پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و افقی توسط پیتزکا در سال 1958، راجاراتنام در سال 1967 و هاگر و برمن در سال 1989 (ویشر و هاگر 1995) بررسی شده است. عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک  $y_2^*$  به ازای عمق فوق بحرانی  $y_1$  و سرعت اولیه  $u_1$  از رابطه بلانگر بدست می آید.

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

در این رابطه  $Fr_1 = u_1 / \sqrt{gy_1}$  عدد فرود در بالادست و  $g$  شتاب ثقل زمین است (محمد علی 1991).

اولیه  $Fr_1$  بررسی گردید. همچنین طول و استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی بررسی و داده‌های تجربی موجود بر روی بسترهای موج دار و صاف مقایسه گردید.

با وجود مطالعات انجام شده در مورد پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار سینوسی در سال‌های اخیر، اثرات موج دار بودن بستر و شکل موج بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی به طور کامل بررسی نشده است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر بستر موج دار سینوسی شکل بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در محدوده وسیع تری از شیب موج بستر ( $t/s$ ) نسبت به تحقیقات قبلی و با ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  در بازه 0/32 تا 1/67 و  $s/y_1$  در بازه 0/85 تا 3/33 و مقایسه نتایج آن با مطالعات انجام گرفته در مورد پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف می باشد.

## مواد و روش‌ها

### 1- تحلیل ابعادی

مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج-دار تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می باشد. عمق ثانویه پرش  $y_2$ ، در بسترهای موج دار به ارتفاع موج  $t$ ، طول موج بستر  $s$ ، شتاب ثقل زمین  $g$ ، عمق اولیه  $y_1$  و سرعت اولیه جریان  $u_1$  بستگی دارد. پارامترهای موثر در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار را به صورت تابع زیر می توان نشان داد (اید و راجاراتنام 2002).

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

با استفاده از روش با کینگهام تابع زیر را می‌توان بدست آورد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2\left(\text{Re}, Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}\right) \quad [3]$$

سایش جریان آب تخریب شود. جهت جلوگیری از کاویتاسیون، بستر حوضچه باید صاف باشد و یا اجزای زیر طوری قرار گرفته باشد که تاج آنها هم تراز با کف بستر بالادست باشد (اید و همکاران 2000).

مطالعات اخیر توسط اید و همکاران (2000) در کالورت با بستر موج دار نشان می‌دهد که تنش‌های برشی رینولدز بر روی بسترهای موج دار به وجود آمده و این مسئله کاهش قابل توجهی در میدان‌های سرعت روی بستر را موجب می‌گردد. با توجه به اینکه تاج سطح موج دار هم تراز با کف کانال است بنابراین مشکل کاویتاسیون نیز تا حدودی برطرف می‌گردد.

اید و راجاراتنام (2002) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار سینوسی شکل را در بازه عدد فرود 4-10 و ارتفاع نسبی موج  $t/y_1$  (ارتفاع موج بستر و  $y_1$  عمق اولیه پرش) برابر 0/25، 0/43 و 0/5 بررسی نمودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول آن روی بستر صاف است. همچنین تغییرات عمق ثانویه  $y_2$  با محاسبه کاهش عمق بدون بعد  $D$  به فرم  $(y_2^* - y_2)/y_2^*$  بررسی گردید که  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش بر روی بستر صاف می‌باشد. نتایج نشان داد که عمق بدون بعد  $D$  در بستر موج دار تقریباً برابر 0/25 می‌باشد.

ایزدجو و همکاران (1383) مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار دوزنقه‌ای شکل را مطالعه کردند. مطالعات بر روی چهار بستر موج دار دوزنقه‌ای شکل در بازه عدد فرود 4 تا 12 و مقادیر  $t/y_1$  در بازه 0/371 تا 1/733 و  $s/y_1$  در بازه 0/971 تا 8/333 انجام گرفت. نتایج نشان داد که موج دار بودن بستر در استهلاک انرژی و کاهش هزینه‌های حوضچه آرامش تأثیر قابل توجهی دارد. توکیای (2005) اثرات بستر موج دار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت تجربی بررسی نمود. شیب موج  $t/s$  برابر 0/1، 0/2 و 0/26 بوده و مطالعات در محدوده اعداد فرود 5 تا 12 انجام گرفت. در این تحقیق تغییرات عمق ثانویه به عمق اولیه ( $y_2/y_1$ ) به صورت تابعی از عدد فرود

التراسونیک در قسمت های مختلف کانال انجام گرفت که داده ها با استفاده از نرم افزار Visi DAQ قابل نمایش و ذخیره بر روی کامپیوتر است. در این تحقیق دقت اندازه گیری عمق آب 0/1 میلی متر و دبی جریان 0/1 لیتر بر ثانیه است.

برای ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش  $y_1$  از یک دریچه کشویی قابل تنظیم استفاده گردید. با توجه به اینکه دیواره کانال بلافاصله پس از دریچه، شیشه ای نمی باشد لذا امکان اندازه گیری پروفیل های عمق و سرعت وجود نداشت. دیواره های کانال در فاصله دو متری از دریچه کشویی شیشه ای است در نتیجه بستر موج دار در فاصله 2 متری از دریچه نصب گردید و عمق اولیه پرش در فاصله تقریباً 0/5 متری بالادست بستر موج دار (ابتدای پرش هیدرولیکی) اندازه گیری شد. ورق های موج دار سینوسی به ابعاد مختلف مطابق جدول 1 در کف کانال نصب شد. به طوری که کف کانال در محل بستر موج دار بصورت افقی بود. طرح شماتیک پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار در شکل 1 نشان داده شده است. پرش هیدرولیکی با اعداد فرود مختلف  $Fr_1$  بر روی بسترهای موج دار ایجاد و مشخصات پرش برای 100 آزمون اندازه گیری شد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی بخشی از آزمون ها در جدول 1 ارائه شده است.

در رابطه فوق  $Fr_1$  عدد فرود اولیه و  $Re$  عدد رینولدز جریان می باشد. با صرف نظر کردن از اثر لزوجت با توجه به عدد رینولدز بالا رابطه (2) به صورت زیر ساده می گردد.

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

در رابطه فوق  $\frac{t}{y_1}$  و  $\frac{s}{y_1}$  به ترتیب ارتفاع و طول موج بی بعد می باشند.

رابطه فوق به فرم زیر ساده می گردد.

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

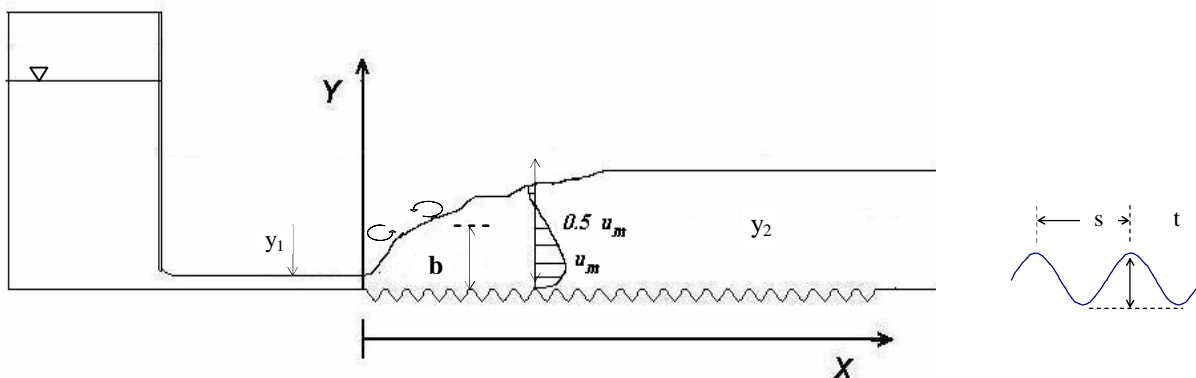
که پارامتر  $t/s$  شیب موج بستر است و تاثیر موج بستر بر روی پرش هیدرولیکی را نشان می دهد.

به طور مشابه طول پرش هیدرولیکی  $L_j$  با استفاده از تحلیل ابعادی به فرم زیر است.

$$\frac{L_j}{y_2^*} = f_4\left(Fr_1, \frac{t}{s}\right) \quad [6]$$

## 2- بررسی تجربی

در این تحقیق آزمایش ها در یک فلوم مستطیلی به عرض 0/25 متر ارتفاع 0/4 متر و طول 10 متر با شیب کف 0/002 انجام گرفت. کانال مجهز به دریچه تنظیم جریان در ابتدای ورودی کانال و سرریز لبه تیز مثلثی با زاویه 53 درجه برای اندازه گیری دبی جریان در خروجی فلوم است. اندازه گیری عمق و دبی جریان با استفاده از حس گرهای



شکل 1- طرح شماتیک پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار

جدول 1- مشخصات پرش هیدرولیکی در آزمون های انجام شده بر روی بسترهای موج دار

آزمون	نوع بستر	S (mm)	t (mm)	Fr <sub>1</sub>	q (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	u <sub>1</sub> (ms <sup>-1</sup> )	y <sub>1</sub> (mm)	y <sub>2</sub> (m)	L <sub>j</sub> (m)
A <sub>1</sub>	I	40	15	7/2	0/074	3/36	22	0/171	0/85
A <sub>2</sub>	I	40	15	5/8	0/109	3/3	33	0/209	0/7
A <sub>3</sub>	I	40	15	4	0/121	4/55	45,5	0/207	0/53
B <sub>1</sub>	II	40	20	8/1	0/085	3/8	22/5	0/193	0/75
B <sub>2</sub>	II	40	20	5/2	0/106	3/05	35	0/209	0/65
B <sub>3</sub>	II	40	20	5/2	0/157	3/48	45	0/273	0/9
C <sub>1</sub>	III	40	25	6/8	0/06	3	20	0/15	0/7
C <sub>2</sub>	III	40	25	5/2	0/086	2/83	30/5	0/19	0/71
C <sub>3</sub>	III	40	25	4/4	0/110	2/76	40	0/211	0/73
D <sub>1</sub>	IV	70	20	5/8	0/068	2/82	24	0/155	0/55
D <sub>2</sub>	IV	70	20	6/3	0/13	3/71	35	0/238	0/74
D <sub>3</sub>	IV	70	20	5/1	0/128	3/2	40	0/212	0/65
E <sub>1</sub>	V	70	25	7/2	0/071	3/29	21/5	0/162	0/64
E <sub>2</sub>	V	70	25	6/1	0/11	3/42	33	0/206	0/66
E <sub>3</sub>	V	70	25	4/7	0/136	3/09	44	0/227	0/6
F <sub>1</sub>	VI	70	35	7/7	0/068	3/42	20	0/173	0/72
F <sub>2</sub>	VI	70	35	5/2	0/098	2/97	33	0/197	0/7
F <sub>3</sub>	VI	70	35	4/7	0/112	2/88	39	0/214	0/66

های سرعت در مقاطع مختلف پرش و تنش برشی بستر ارزیابی گردید. در این تحقیق شیب موج بستر t/s در محدوده 0/286 تا 0/625 و اعداد فرود در محدوده 3/6 تا 8/6 قرار داشت.

#### 1- پروفیل سطح آب

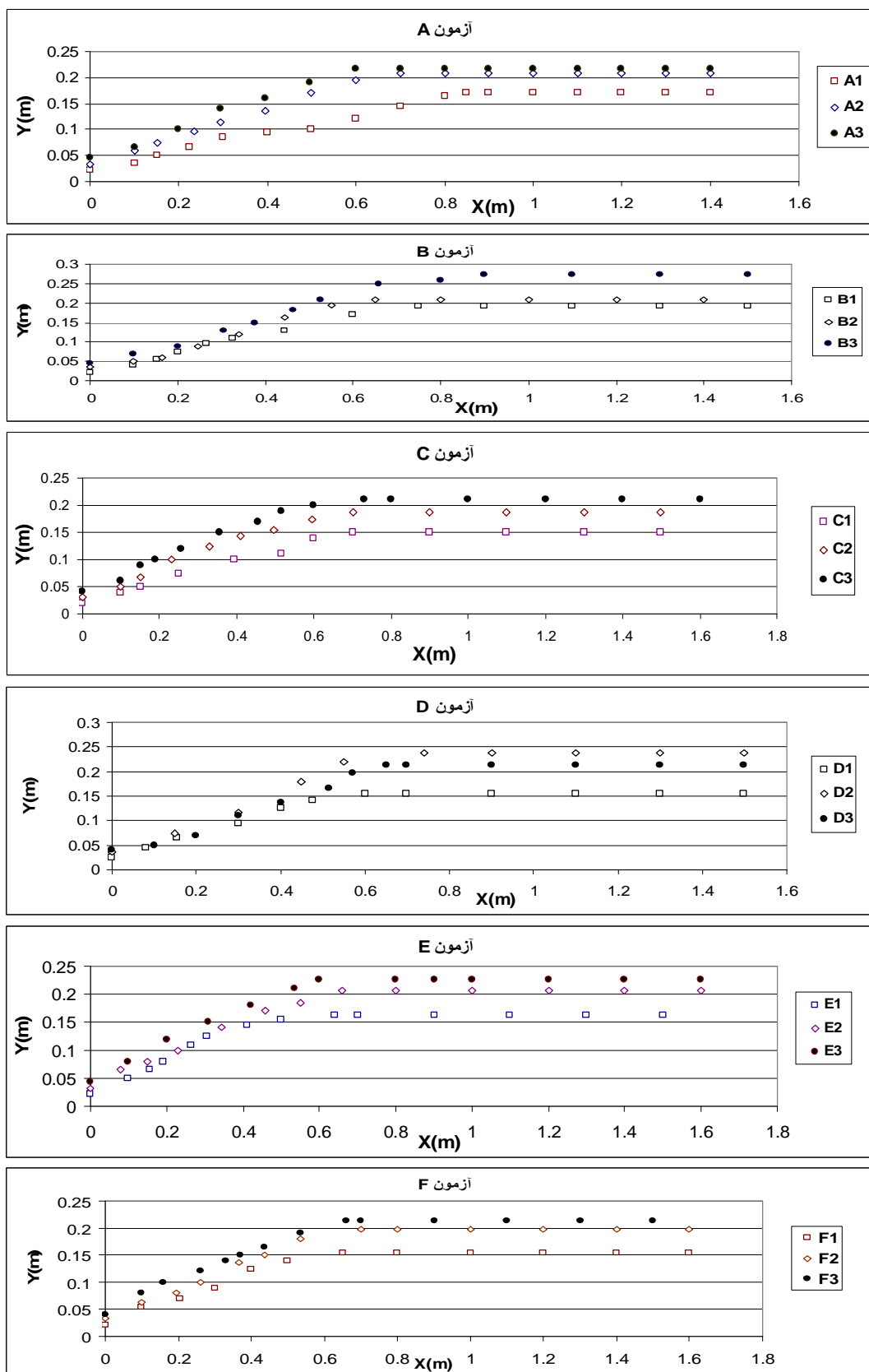
از پروفیل های سطح آب برای تعیین عمق اولیه y<sub>1</sub>، عمق ثانویه y<sub>2</sub> و طول پرش هیدرولیکی L<sub>j</sub> استفاده شد. در شکل 2 پروفیل های سطح آزاد آب در آزمون های مختلف نمایش داده شده است.

در شکل 3 پروفیل های بدون بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی برای تمامی آزمون ها رسم شده است. این شکل نشان می دهد پروفیل های سطح آب مشابه یکدیگر می باشند و یک منحنی متوسط را برای پروفیل های سطح آب در پرش هیدرولیکی می توان ارائه نمود.

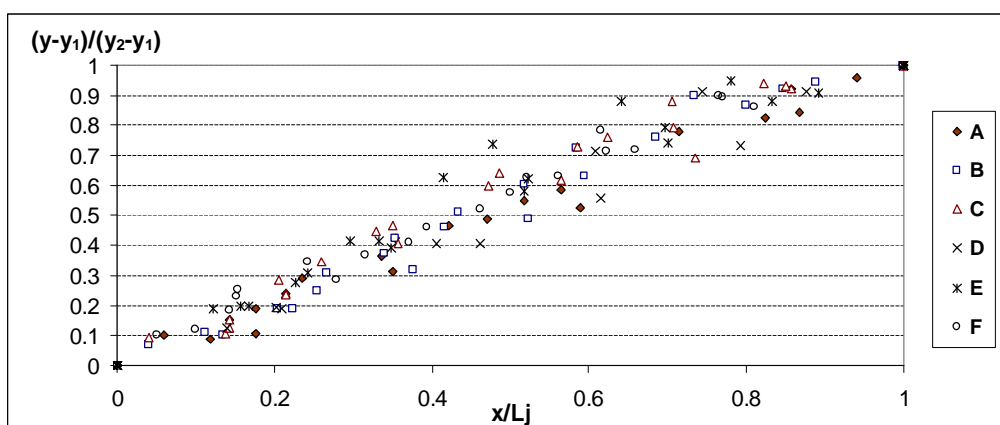
در این تحقیق پروفیل سطح آب در طول کانال توسط عمق سنج با دقت 0/1 میلی متر و در فواصل 10-5 سانتی متری اندازه گیری شده است. پروفیل طولی سرعت با استفاده از سرعت سنج پره ای میکرو به قطر 6 میلی متر با دقت 0/1 سانتی متر بر ثانیه در عمق های مختلف اندازه گیری گردید. همچنین در همه آزمایش ها عمق اولیه جریان y<sub>1</sub>، عمق ثانویه y<sub>2</sub>، طول پرش L<sub>j</sub> و عمق پایاب y<sub>t</sub> ثبت شد. عمق پایاب در فلوم نیز با استفاده از دریچه کشویی انتهای فلوم کنترل گردید. این دریچه در هر آزمایش طوری تنظیم می شد که پرش هیدرولیکی در ابتدای بستر موج دار به فاصله 6 متر در بالادست دریچه انتهایی تشکیل گردد.

#### نتایج و بحث

برای بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار مشخصات آن، شامل پروفیل سطح آب، طول پرش، پروفیل



شکل ۲- پروفیل های سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دار



شکل 3- پروفیل‌های بدون بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دار

## 2- نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش

$$\frac{y_2}{y_1} = Fr_1 \quad [8]$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1223 Fr_1 + 0.0365 \quad [9]$$

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.047 Fr_1 + 0.5902 \quad [10]$$

همچنین در شکل 4 عمق نسبی پرش بر روی بستر موج دار با مقادیر عمق نسبی بستر صاف (معادله بلانگر) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق پایاب پرش هیدرولیکی در بستر موج دار کمتر از بستر صاف می‌باشد.

پارامتر کاهش عمق نسبی  $D$  توسط آید و راجاراتنام (2002) بفرم زیر ارائه شده است.

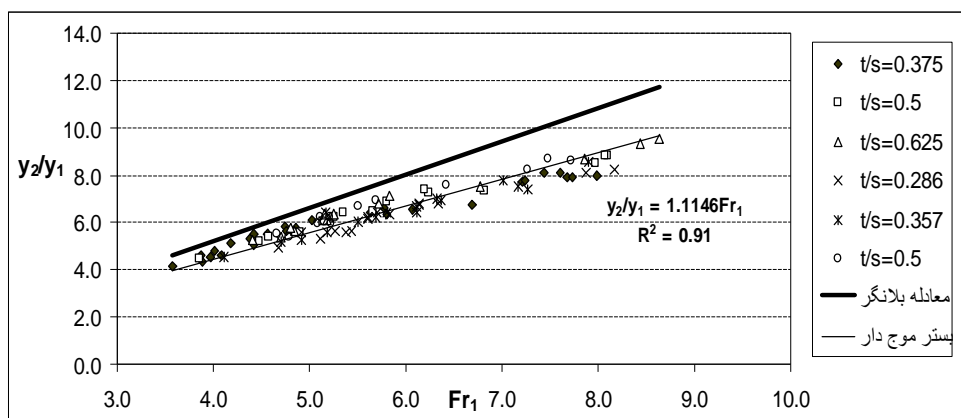
$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad [11]$$

در این رابطه  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش در بستر صاف به ازای عمق اولیه  $y_1$  و عدد فرود اولیه  $Fr_1$  یکسان با بستر موج دار می‌باشد. در شکل 5 تغییرات مقادیر کاهش عمق نسبی  $D$  به ازای اعداد فرود نمایش داده شده است. مطابق این شکل در محدوده اعداد فرود  $3/6$  تا  $8/6$  و شیب موج بستر  $0/286 \leq t/s \leq 0/625$  متوسط کاهش عمق نسبی  $D$  برابر  $0/2$  است که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

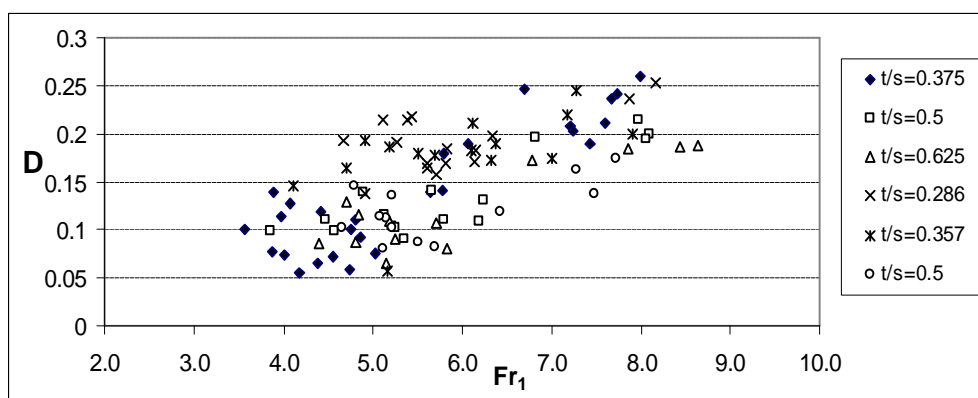
با توجه به رابطه 5 عمق نسبی پرش هیدرولیکی  $y_2/y_1$  تابعی از عدد فرود اولیه جریان  $Fr_1$  و شیب موج بستر  $t/s$  می‌باشد. جهت بررسی تأثیر شیب موج بستر  $t/s$ ، مطابق شکل 4 نمودار عمق نسبی پرش  $y_2/y_1$  به ازای اعداد فرود اولیه رسم شده است. شکل 4 نشان می‌دهد که در بازه شیب موج بستر  $0/286 \leq t/s \leq 0/625$  مقادیر عمق نسبی پرش تابعی از عدد فرود اولیه می‌باشد و به شیب موج بستر بستگی ندارد. این مسئله ناشی از این است که تاج سطح موج دار هم تراز با کف کانال است و بستر موج دار مانند حفره عمل می‌کند.

رابطه بین عمق نسبی پرش هیدرولیکی و عدد فرود در بستر موج دار با استفاده از رگرسیون خطی بررسی شد و رابطه 7 با ضریب تبیین  $0/91$  بدست آمد. این رابطه در مقایسه با رابطه 8 (آید و راجاراتنام 2002)، رابطه 9 توکیای (2005) و رابطه 10 (ایزدجو و همکاران 1383) اختلاف کمی را نشان می‌دهد. مقایسه روابط فوق نشان می‌دهد که عمق نسبی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با بررسی‌های تجربی محققان قبلی تطابق خوبی دارد.

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.1146 Fr_1 \quad [7]$$



شکل 4- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به اعداد فرود اولیه



شکل 5- تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی نسبت به اعداد فرود اولیه

### 3- طول نسبی پرش هیدرولیکی

جهت بررسی طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار، طول پرش  $L_z$  اندازه‌گیری شده و با استفاده از مقادیر محاسباتی عمق ثانویه  $y_2^*$  بدون بعد گردید. در شکل 6 مقادیر طول نسبی پرش  $L_z/y_2^*$  به ازای اعداد فرود اولیه نمایش داده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که به ازای اعداد فرود کمتر از 6 نسبت  $L_z/y_2^*$  در حدود 3 و به ازای اعداد فرود بالاتر از 6 نسبت  $L_z/y_2^*$  در حدود 3/5 است. طول نسبی پرش هیدرولیکی  $L_z/y_2^*$  در بررسی‌های اید و راجاراتنام (2002) و ایزدجو و همکاران (1383) تقریباً برابر 3 بوده و این مقدار در تحقیق توکیای (2005) برابر 4 بدست آمده است. بنابراین مقدار طول نسبی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار با بررسی‌های تجربی

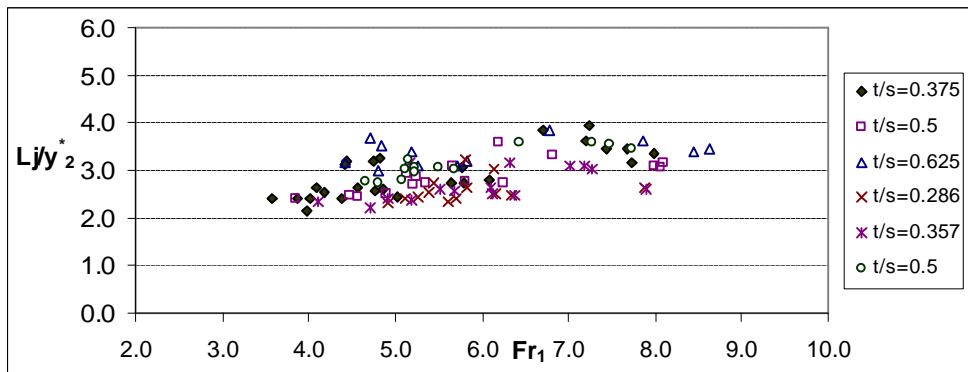
محققان قبلی همخوانی دارد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که طول پرش بر روی بستر موج‌دار تقریباً نصف طول پرش بر روی بستر صاف است.

### 4- اتلاف انرژی

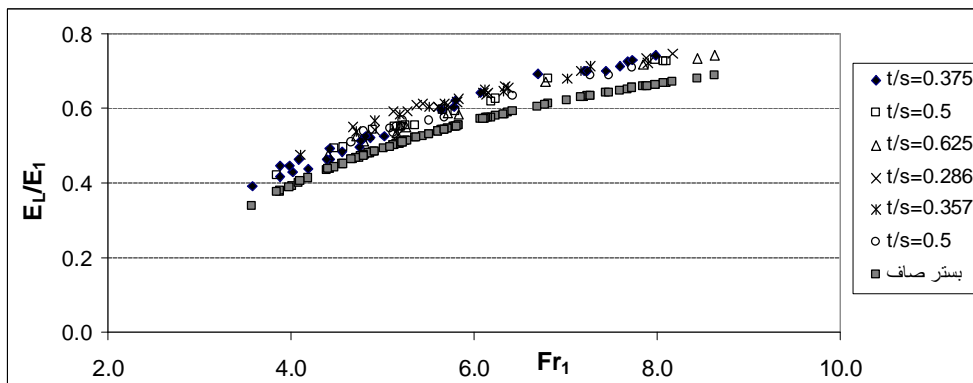
اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی  $E_L$  برابر با اختلاف انرژی مخصوص قبل و بعد از پرش هیدرولیکی  $E_2 - E_1$  می‌باشد. در شکل 7 اتلاف انرژی نسبی  $E_L/E_1$  به ازای اعداد فرود مختلف رسم شده است. در این تحقیق اتلاف انرژی نسبی در بستر صاف نیز تعیین گردید. که نمودار آن در شکل 7 نشان داده شده است. مطابق این نمودار به ازای عدد فرود یکسان اتلاف انرژی در بسترهای موج‌دار بیشتر از بسترهای صاف است.



$$G = \frac{E_L - E_L^*}{E_L^*} \times 100 \quad [12] \quad \text{نرخ اتلاف انرژی } G \text{ به فرم رابطه زیر تعریف گردید.}$$



شکل 6- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج دار به ازای اعداد فرود اولیه



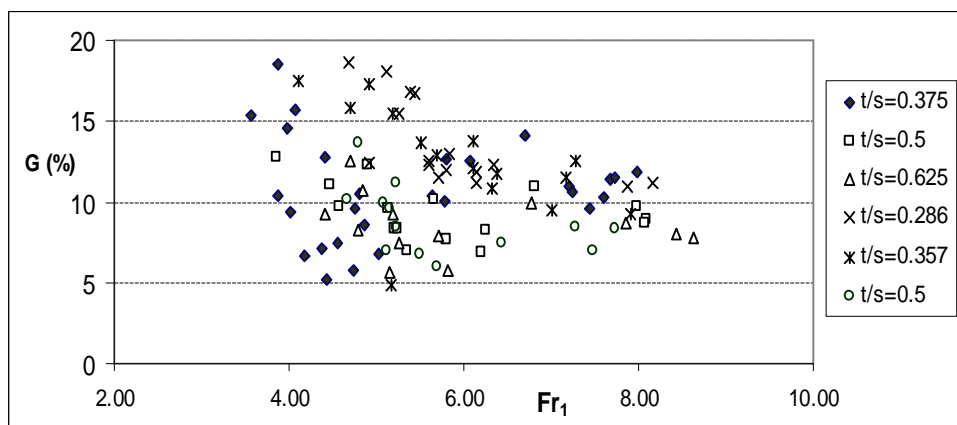
شکل 7- تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج دار به ازای اعداد فرود اولیه

شکل 9 پروفیل های اندازه گیری شده در مقاطع مختلف پرش نمایش داده شده است. در این پروفیل ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره است به طوری که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می یابد.

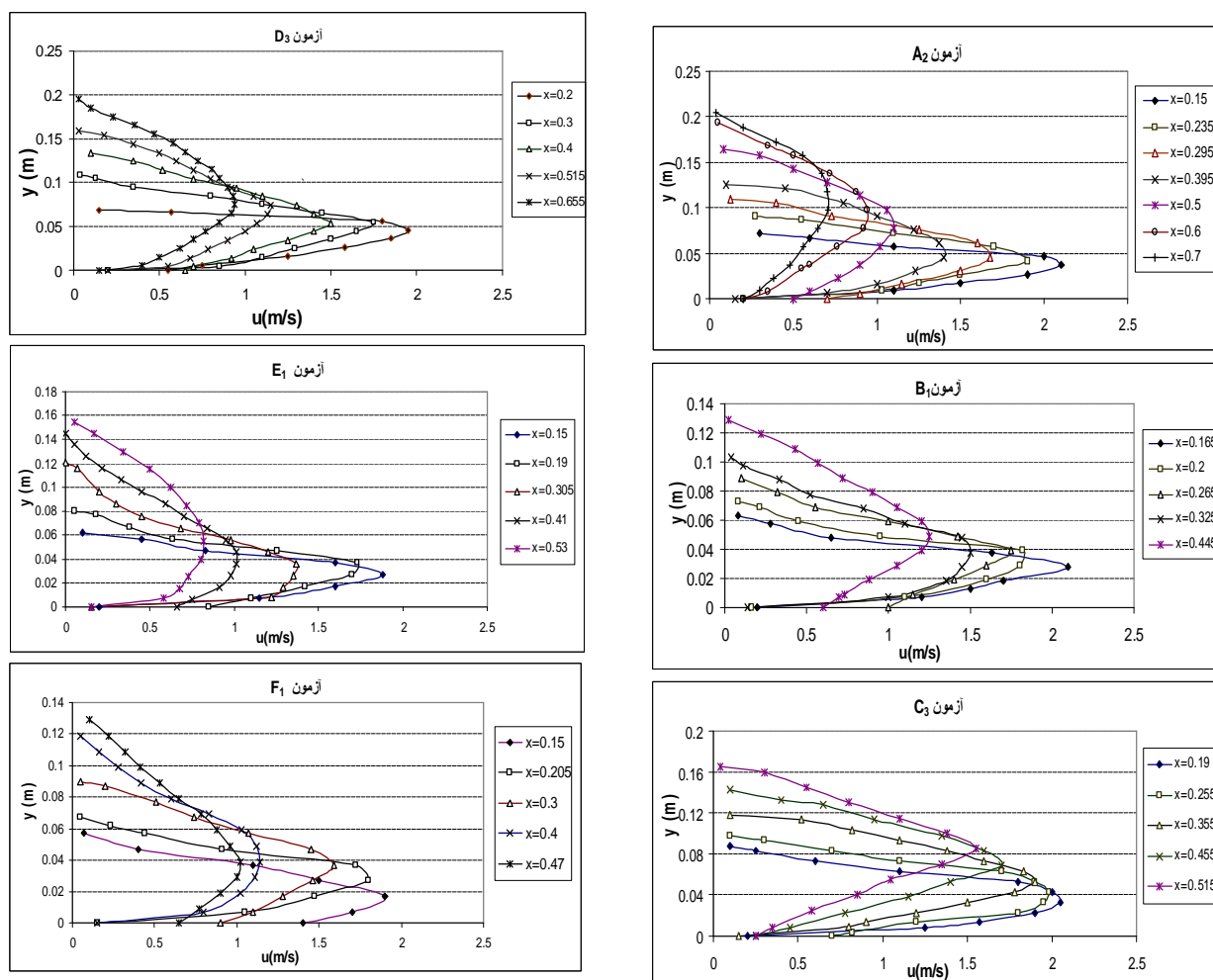
در این رابطه  $E_L^*$  اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی در بستر صاف و  $E_L$  اتلاف انرژی در بستر موج دار به ازای عمق و عدد فرود اولیه یکسان می باشد. در شکل 8 تغییرات نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که نرخ افت انرژی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج دار با افزایش عدد فرود کاهش می یابد

5- پروفیل های سرعت

در این تحقیق پروفیل های سرعت در 20 آزمون پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار اندازه گیری شد. در



شکل ۸- تغییرات نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه



شکل ۹- پروفیل های سرعت در طول پرش هیدرولیکی مربوط به آزمون های  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $C_3$ ,  $D_3$ ,  $E_1$ ,  $F_1$

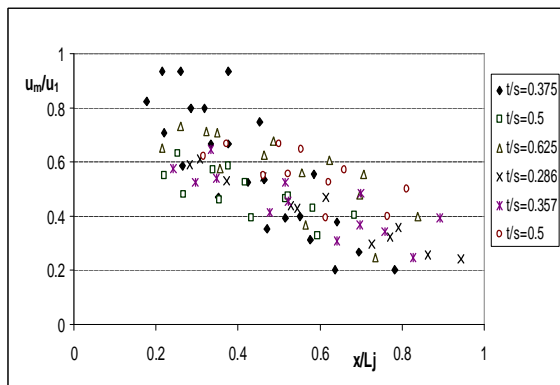
به ازای  $x/L$  وابستگی بالایی داشته و با افزایش  $x/L$  اختلاف آن با مقادیر بستر صاف بیشتر می گردد.

شکل 14 تغییرات مقیاس طولی بی بعد  $b$  به ازای فواصل مختلف  $x$  را نشان می دهد. رابطه رگرسیون خطی  $b/y_1$  و  $x/y_1$  در بسترهای موج دار و صاف به ترتیب به فرم زیر است.

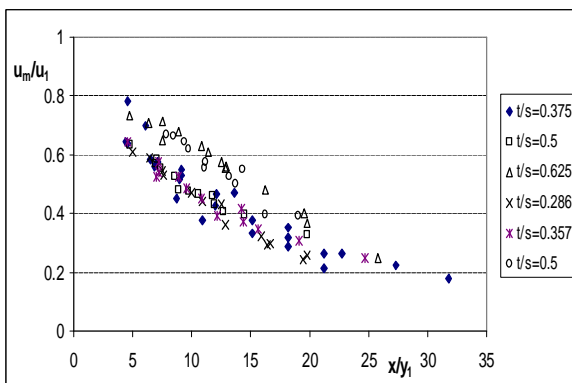
$$\frac{b}{y_1} = 0.168 \left( \frac{x}{y_1} \right) + 0.88 \quad (r^2=0.83) \quad [13]$$

$$\frac{b}{y_1} = 0.07 \left( \frac{x}{y_1} \right) + 1.25 \quad (r^2=0.78) \quad [14]$$

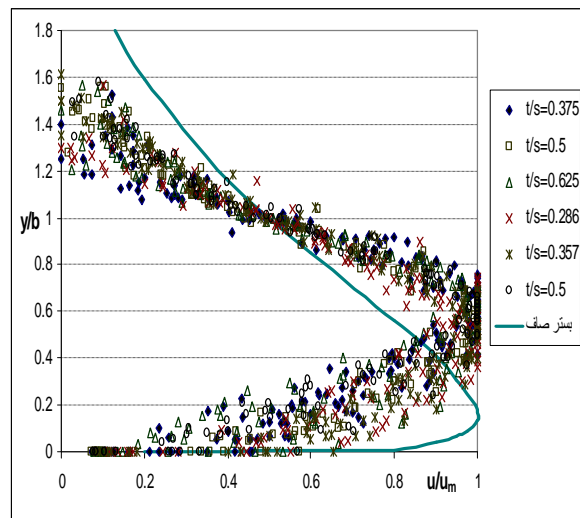
ضخامت لایه مرزی  $\delta$  در هر مقطع از پرش هیدرولیکی برابر عمقی است که در آن سرعت ماکزیمم است. شکل 15 و 16 تغییرات مقادیر ضخامت لایه مرزی بی بعد  $\delta/b$  و  $\delta/y_1$  به ازای  $x/y_1$  نمایش داده شده است. روابط زیر برای ضخامت لایه مرزی بی بعد در امتداد طولی پرش



شکل 11- تغییرات  $u_m/u_1$  به ازای  $x/L_j$



شکل 12- تغییرات  $u_m/u_1$  به ازای  $x/y_1$



شکل 10- پروفیل‌های بی بعد سرعت در طول پرش

جهت بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت مقیاس طولی  $b$  برابر مقادیر  $y$  در شرایط  $u_m = 0.5u_1$  و  $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$  تعیین گردید. به عبارت دیگر  $b$  عمق آب در مقاطع مختلف پرش است که در آن سرعت حداکثر  $u_m$  با نصف سرعت اولیه  $u_1$  برابر است. در شکل 10 پروفیل‌های بدون بعد سرعت طولی برای 20 آزمون نشان داده شده است. مطابق شکل پروفیل‌های سرعت در امتداد پرش هیدرولیکی مشابه می باشند ولی با پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی در بستر صاف متفاوت است. در پروفیل‌های سرعت اندازه گیری شده، سرعت اولیه  $u_1$  در محدوده  $3/8 - 2/65$  و سرعت حداکثر  $u_m$  در مقاطع مختلف پرش در محدوده  $2/7 - 0/7$  می باشد.

در شکل 11 و 12 تغییرات  $u_m/u_1$  به ازای  $x/L_j$  و  $x/y_1$  نشان داده شده است. مطابق این شکل  $f$  داده ها به صورت پراکنده بوده، بنابراین از مقیاس طولی  $L$  فاصله طولی از ابتدای پرش با  $u_m = 0.5u_1$  استفاده گردید. در شکل 13 تغییرات  $u_m/u_1$  به ازای مقیاس طولی بی بعد  $x/L$  نشان داده شده است. مقیاس طولی  $L$  در بررسی پرش بر روی بسترهای صاف توسط (اید و راجاراتنام 2002) استفاده گردید. با توجه به شکل 13 مقادیر سرعت بدون بعد  $u_m/u_1$

هیدرولیکی تعیین شد. ضخامت لایه مرزی بی بعد  $\delta/b$  در بستر صاف برابر 0/16 می باشد

$$\frac{d}{y_1} = 0.078 \left( \frac{x}{y_1} \right) + 0.73 \quad (r^2=0.7) \quad [15]$$

$$\frac{d}{b} = 0.57 \quad [16]$$

6- تنش برشی بستر

تنش برشی بستر در پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار با استفاده از رابطه مومنتم تعیین می‌شود. معادله مومنتم در بازه ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی به فرم زیر است.

$$(M_2 + P_2 - S_2) = (M_1 + P_1 - S_1) - \int_{x_1}^{x_2} t_b dx \quad [17]$$

در این رابطه  $P_1, P_2, M_1, M_2, S_1$  و  $S_2$  به ترتیب نیروهای فشاری، مومنتم و نیروهای تنش نرمال در واحد طول در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی است. با صرفنظر نمودن از نیروهای تنش نرمال در رابطه 17، مجموع نیروهای برشی بستر با استفاده از رابطه زیر به دست می آید (کان و اشتفلر 1996).

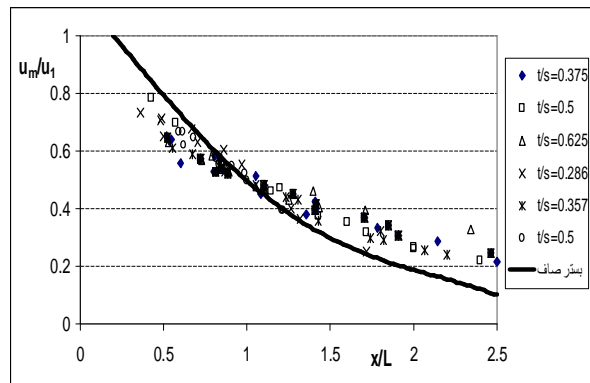
$$F_t = \int_{x_1}^{x_2} t_b dx = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad [18]$$

در رابطه فوق  $P_1 = 0.5g y_1^2$ ،  $P_2 = 0.5g y_2^2$ ،  $M_1 = r u_1^2 y_1$  و  $M_2 = r u_2^2 y_2$  بوده و به ازای مقادیر عمق و سرعت در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی به دست می آید.

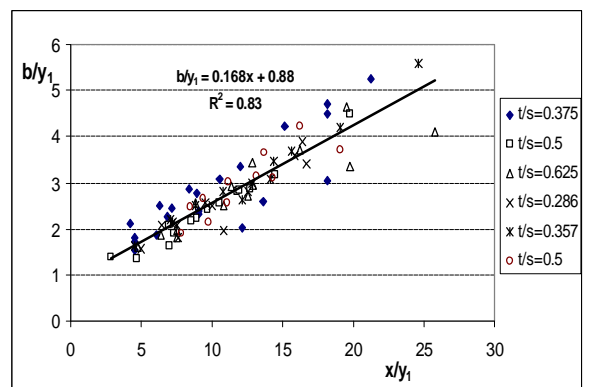
مقدار ضریب نیروی برشی  $\epsilon$  در بستر موج دار و صاف از رابطه زیر قابل ارزیابی است. (آید و راجاراتنام 2002).

$$e = \frac{F_t}{g y_1^2 / 2} \quad [19]$$

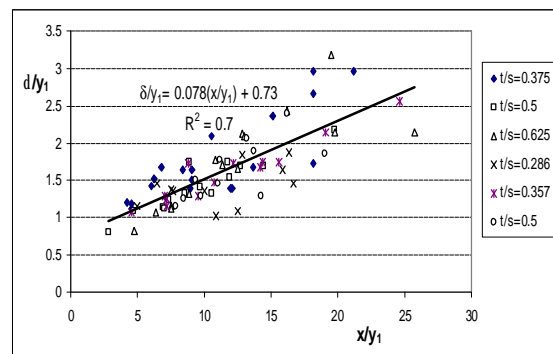
نمودار ضریب نیروی برشی به ازای اعداد فرود اولیه در شکل 17 نمایش داده شده است. ضریب نیروی برشی در بستر موج دار از رابطه رگرسیونی 20 تعیین گردید و با نتایج تحقیقات راجاراتنام



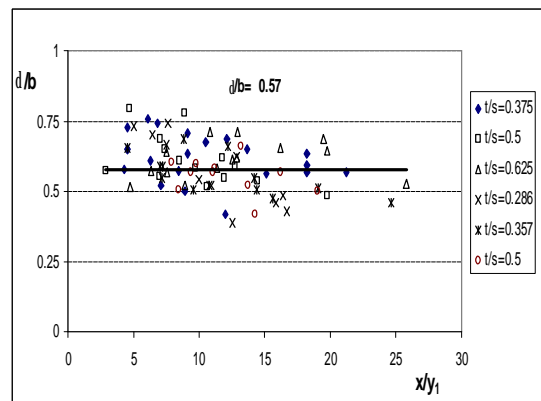
شکل 13- تغییرات  $u_m/u_1$  به ازای  $x/L$



شکل 14- تغییرات مقیاس طولی  $b/y_1$  به ازای  $x/y_1$



شکل 15- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی بعد  $d/y_1$  به ازای  $x/y_1$



شکل 16- تغییرات ضخامت لایه مرزی بی بعد  $d/b$  به ازای  $x/y_1$

1. نتایج نشان می دهد که به ازای عمق اولیه و عدد فرود معین عمق ثانویه پرش بر روی بستر موج دار در محدوده اعداد فرود  $3/6$  تا  $8/6$  و شیب موج بستر  $0/286 \leq t/s \leq 0/625$  در حدود 20% کمتر از بستر صاف است.

2. به ازای اعداد فرود کمتر از 6 نسبت  $L_j/y_2^*$  در حدود 3 و به ازای اعداد فرود بیشتر این نسبت  $3/5$  می باشد. همچنین در مقایسه با نتایج تحقیقات انجام گرفته بر روی بسترهای صاف مقدار طول پرش در بسترهای موج دار تقریباً نصف بستر صاف می باشد.

سال 1995 (به نقل از اید و راجاراتنام 2002) بر روی بستر صاف به صورت معادله 21 مقایسه شد.

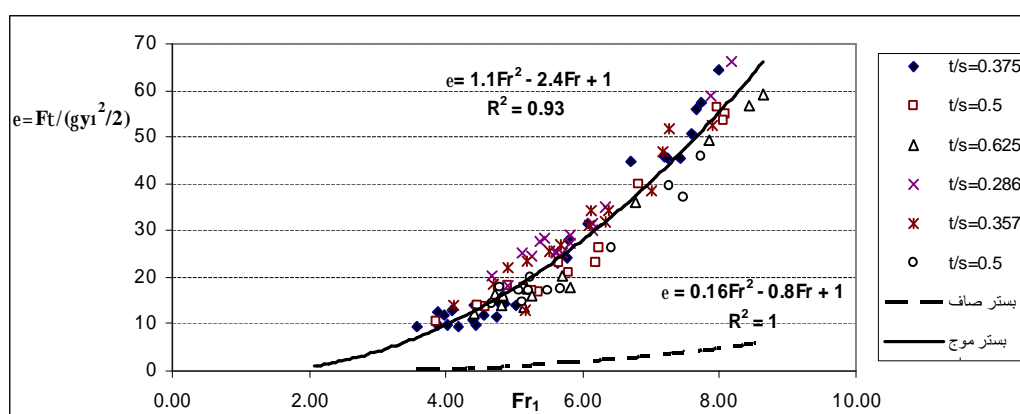
$$e = 1.1Fr_1^2 - 2.4Fr_1 + 1 \quad (r^2=0.93) \quad [20]$$

$$e = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad (r^2=1) \quad [21]$$

با توجه به این شکل می توان نتیجه گرفت که ضریب نیروی برشی در بسترهای موج دار حداقل 10 برابر بستر صاف است. که با نتایج تحقیقات اید و راجاراتنام (2002) و ایزدجو و همکاران (1383) همخوانی دارد.

### نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر بستر موج دار بر روی پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق به صورت خلاصه در زیر ارائه می گردد.



شکل 17- مقایسه تغییرات ضریب نیروی برشی  $e$  در بستر موج دار و صاف

5. ضخامت لایه مرزی بی بعد  $\delta/b$  در بسترهای موج دار برابر  $0/57$  به دست آمد که این مقدار در پرش بر روی بستر صاف برابر  $0/16$  می باشد.

6. مقادیر ضریب نیروی برشی  $e$  در بسترهای موج دار به ازای عدد فرود 4 در حدود 10 برابر بستر صاف است. با افزایش عدد فرود ضریب نیروی برشی در مقایسه با بستر صاف افزایش بیشتری را نشان می دهد.

3. اتلاف انرژی در بسترهای موج دار بیشتر از بسترهای صاف است. با افزایش عدد فرود نرخ افت انرژی  $G$  کاهش می یابد.

4. پروفیل‌های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار مشابه بوده ولی این پروفیل‌ها با پرش هیدرولیکی در بستر صاف مقداری متفاوت می باشد. بر اساس روابط بدست آمده، مقیاس طولی بی بعد  $b/y_1$  در بستر موج دار در مقایسه با بستر صاف نرخ افزایش بیشتری را نشان می دهد.

## سیاسگزاری

اعتبارات پژوهشی دانشگاه اجرا شده است. بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه تبریز تشکر و قدردانی می‌گردد.

این مقاله مستخرج از گزارش نهایی طرح پژوهشی به شماره ۲۷/۱۲۳۶/د مورخ ۸۷/۲/۳۱ می‌باشد که از محل

## منابع مورد استفاده

ایزدجو ف، شفاعی بجستان م و بینا م، ۱۳۸۳. مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار نوزنقه‌ای شکل. مجله علمی کشاورزی، جلد ۲۷، دانشگاه شهید چمران اهواز، صفحه‌های ۱۰۷ تا ۱۲۲.

Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jump on corrugated bed. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 128(7): 656-663.

Ead SA, Rajaratnam N, Katopodis C and Ade F, 2000. Turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 126(10): 750-757.

Hughes WC and Flack JE, 1984. Hydraulic jump properties over rough bed. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(12): 1751-1771.

Khan AA and Steffler PM, 1996. Physically based hydraulic jump model for depth-averaged computation. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 122(10): 540-548.

Mohammad Ali HS, 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(1): 83-93.

Tokyay ND, 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI, Water & Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, USA.

Vischer DL and Hager WH, 1995. Energy dissipators. Hydraulic Structures Design Manual, IAHR.