

بررسی تغییر پروفیل‌های سرعت نسبت به تغییر طول زبری در پرش هیدرولیکی

محمد بزاز^۱، بهزاد قربانی^{۲*}، حسین صمدی بروجنی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵

ghorbani@agr.sku.ac.ir

چکیده- در این تحقیق با انجام آزمایش‌هایی در یک فلوم به طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر، تغییر پروفیل سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی نسبت به تغییر طول زبری بستر زبر مطالعه شده است. برای این منظور برای سه مقدار عدد فرود و سه مقدار طول زبری (در مجموع نه آزمایش) تغییر پروفیل سرعت بررسی شد. در هر آزمایش چهار مقطع از پرش هیدرولیکی انتخاب و سرعت جریان در هر مقطع با فواصل یک سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. تغییر طول زبری در سه بازه برای طول‌های کوتاه، متوسط و بلند در محدوده طول مؤثر انجام شد. نتایج نشان داد که هرچند پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در بستر زبر مشابه هستند، اما شکل آنها با پروفیل بی‌بعد سرعت در بستر صاف متفاوت است. لایه مرزی موضوع دیگری بود که در این مطالعه بررسی شد و نتایج نشان داد که نرخ رشد لایه مرزی و ضخامت آن با افزایش طول زبری افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که ضخامت بی‌بعد لایه مرزی با تغییر طول زبری تغییر می‌کند. اندازه این متغیر برای زبری کوتاه برابر ۰/۲۶ و برای زبری متوسط و بلند برابر ۰/۳۷ به‌دست آمد.

کلید واژگان: پرش هیدرولیکی، بستر زبر، پروفیل سرعت.

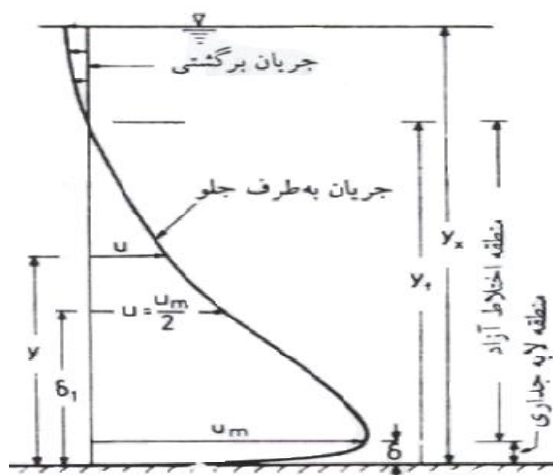
۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی^۱ پدیده‌ای است که در آن جریان از حالت فوق بحرانی^۲ به زیر بحرانی^۳ تغییر وضعیت می‌دهد. این پدیده با کاهش شدید انرژی جریان همراه است. از این

رو از آن در جایی استفاده می‌شود که به استهلاک انرژی اضافی آب نیاز باشد، مانند جریان پای سرریزها و تنداب‌ها. امواج سطحی، آشفته بودن جریان و سرعت بالای جریان در پرش هیدرولیکی باعث می‌شود تأسیسات آبیاری در محل پرش در معرض خطر تخریب و فرسایش قرار گیرند. بنابراین لازم است تأسیسات مجاور آبیاری در محل پرش مقاوم‌سازی شوند که این هزینه‌های ساخت

1. Hydraulic Jump
2. Super Critical
3. Sub Critical

پیش رونده با سرعت مثبت و جریان برگشتی با سرعت منفی تشکیل شده است. جریان برگشتی برای برقراری پیوستگی بوجود می‌آید. این جریان برگشتی باعث تولید غلتاب می‌شود (غزالی، ۱۳۸۹). از دیگر اجزای پروفیل سرعت می‌توان به ضخامت لایه مرزی^۱ (δ)، سرعت بیشینه (u_{max}) و پارامتر b اشاره کرد. b ارتفاع نقطه‌ای است که سرعت در آن نقطه، نصف سرعت بیشینه پروفیل باشد.



شکل ۱ طرح‌واره پروفیل سرعت (فرهودی، ۱۳۷۲)

ویو و راجاراتنام (۱۹۵۵) نشان دادند که یکسان نبودن توزیع سرعت در جریان فوق بحرانی پیش از پرش، تأثیر بسیار نامحسوسی بر روند کاهش سرعت دارد. راجاراتنام (۱۹۶۸) نشان داد که زبری بستر تأثیر محسوسی بر تغییر سرعت بیشینه در پروفیل‌های سرعت نسبت به بستر صاف نمی‌گذارد. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) تحقیقات مفصل‌تری را در زمینه پروفیل سرعت پرش بر روی بستر زبر انجام و نشان دادند که پروفیل‌های بی‌بعد سرعت با هم مشابه، اما با پروفیل بی‌بعد سرعت بر روی بستر زبر متفاوت هستند. تحقیقات آنان نشان داد که بر روی بستر زبر، ضخامت لایه مرزی^۳ بی‌بعد، اندازه بزرگتری نسبت به بستر صاف

تأسیسات را افزایش می‌دهد. از این رو بخش مهمی از تحقیقات در زمینه پرش هیدرولیکی با هدف یافتن راهکارهایی برای به وقوع پیوستن پرش‌هایی با ابعاد کوچکتر انجام شده است. مهمترین سازه طراحی شده بدین منظور، انواعی از حوضچه آرامش استاندارد است که بلوک‌هایی دارد که در برابر جریان قرار گرفته و باعث استهلاك انرژی پرش می‌شوند. انتخاب حوضچه به عدد فرود^۱ قبل از پرش وابسته است (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۷). یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر توجه محققان را جلب کرده زبر کردن بستر است. زبر کردن بستر عبارت است از تغییر شکل بستر پرش به شکل مثلی، دوزنقه‌ای، سینوسی و مانند آن. یکی از مهمترین ویژگی‌های بستر زبر همتراز بودن رأس زبری‌ها با بستر کانال در بالادست و پایین‌دست پرش هیدرولیکی است که از وقوع پدیده خلأزایی - که از مشکلات حوضچه‌های آرامش استاندارد در سرعت‌های بالای جریان است - جلوگیری می‌کند. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) با انجام پژوهش در زمینه پرش بر بستر زبر با ارتفاع زبری ۲/۵ سانتی‌متر برای بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ نشان دادند که بستر زبر طول پرش را ۵۰ درصد و عمق ثانویه^۲ را ۲۵ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌دهند. ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷)، با آزمایش بر روی بستر زبر دوزنقه‌ای در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ نشان دادند که بر اثر زبری - های موجی شکل با مقطع دوزنقه‌ای، طول پرش ۵۰ درصد و عمق مزدوج پرش ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به این نتایج زبر کردن بستر را می‌توان یکی از راهکارهای مؤثر برای کنترل پرش دانست. یکی از ویژگی‌هایی که توجه محققان پرش بر بستر زبر را جلب کرده، پروفیل سرعت پرش بر روی بستر زبر است. پروفیل سرعت اجزایی دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، پروفیل سرعت از دو بخش جریان

1. Froude Number

2. Secondary Depth

3. Boundary Layer

برای آرام کردن جریان ورودی از شبکه‌های توری فلزی و لاستیکی استفاده می‌شود. پس از طی کردن طول ۱۲ متری کانال و عبور از روی سر ریز متحرک انتهایی کانال و ریزش به حوضچه رسوب‌گیر، آب به صورت ثقلی به مخزن اصلی باز می‌گردد.

برای ایجاد پرش هیدرولیکی یک دریچه کشویی^۱ به ارتفاع ۹۰ سانتیمتر ساخته و در ابتدای فلوم نصب شد. همچنین دیواره‌های کانال قبل از دریچه تا ارتفاع ۹۰ سانتی‌متری بالا آورده شد تا ارتفاع آب مورد نیاز برای ایجاد پرش‌های هیدرولیکی با عدد فرود مورد نظر تأمین شود. وجود دریچه باعث کاهش عمق و افزایش سرعت جریان، بالا رفتن عدد فرود و در نتیجه فوق بحرانی شدن جریان می‌شود. از آنجا که شیب فلوم بعد از دریچه ملایم^۲ است، جریان تمایل دارد که به حالت زیر بحرانی تبدیل شود و در نتیجه پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. با تغییر دبی یا بازشدگی دریچه می‌توان پرش‌هایی با اعداد فرود متفاوت ایجاد کرد. همچنین با تغییر زاویه سرریز انتهایی فلوم می‌توان مکان وقوع پرش را تنظیم کرد: با افزایش زاویه سرریز، پرش به سمت بالادست و با کاهش زاویه، پرش به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. طرح‌واره فلوم مورد استفاده در آزمایشها در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای تغییر طول زبری‌ها، از ورق صاف گالوانیزه بر روی بخشی از طول زبری که مورد نیاز نبود استفاده می‌شد تا این زبری‌ها از مسیر جریان آب خارج شوند. این ورق به وسیله پایه‌هایی در جای خود ثابت می‌شد. این پایه‌ها متحرک بوده و در کشوهایی که در دیواره کانال نصب شده به جلو و عقب حرکت کرده و در مسیر جریان آب قرار نداشتند. طرح‌واره‌ای از روش کار در شکل ۳ نشان داده شده است. از این روش برای اندازه‌گیری طول مؤثر زبری‌ها نیز استفاده شده است. برای اندازه‌گیری طول

دارد. ایشان همچنین نشان دادند که زبری‌ها نرخ رشد لایه مرزی را افزایش می‌دهد و نرخ افزایش پارامتر b در بستر زیر نسبت به بستر صاف نیز افزایش می‌یابد. ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در تحقیقات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) ۰/۴۵ گزارش شده است. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) با تأیید نتایج اید و همکاران ضخامت لایه مرزی بی‌بعد را ۰/۵۷ گزارش کردند. غزالی (۱۳۸۹) این ضخامت را برابر ۰/۳۹ به دست آورد. لازم است ذکر شود که این محققان آزمایشها را در شرایطی انجام داده‌اند که زبری بستر، کل طول پرش را پوشش داده است. در تحقیق حاضر به بررسی تغییر پروفیل سرعت نسبت به افزایش طول زبری پرداخته شده است. به این منظور در آزمایشهایی طول مؤثر زبری‌ها تعیین شده است. بر طبق تعریف، طول مؤثر زبری اندازه‌ای است که اگر طول زبری از آن بیشتر شود تأثیری بر خواص پرش مانند طول پرش و عمق ثانویه نمی‌گذارد.

در این تحقیق به منظور یافتن طول مؤثر در هر عدد فرود، پنج آزمایش با طول‌های مختلف زبری انجام و سپس تغییر اندازه زبری برای بررسی تغییر پروفیل سرعت در محدوده طول مؤثر در نظر گرفته شد.

۲- مواد و روشها

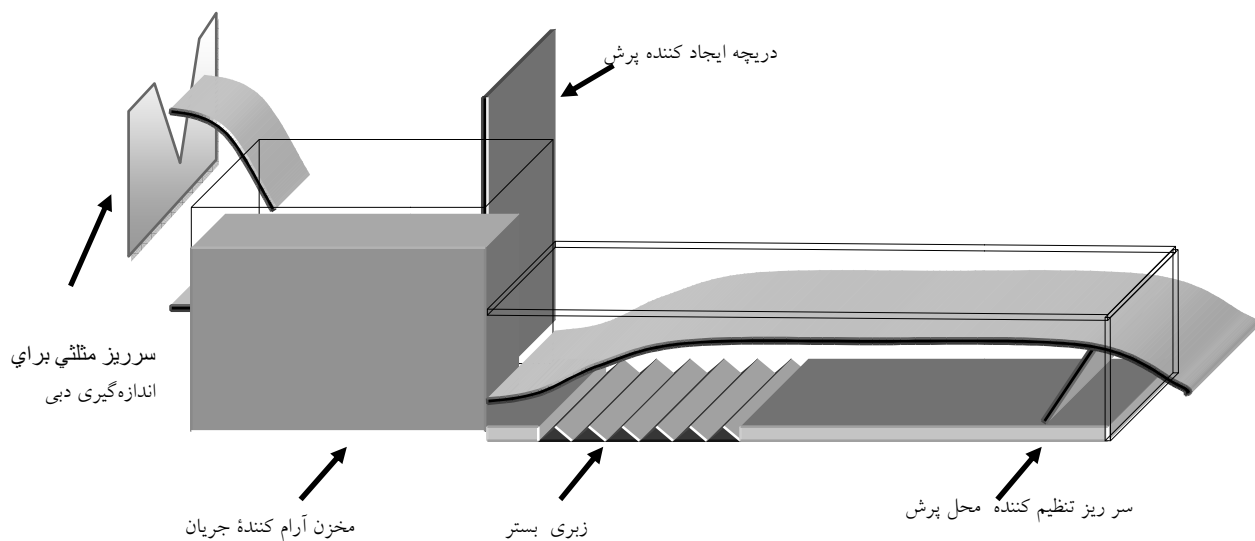
آزمایشها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. به منظور بررسی اهداف این مطالعه از فلومی به طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. دیواره فلوم از جنس پلاستیکی گلاس است که این امکان را می‌دهد که رفتار پرش از نزدیک مطالعه شود. در این کانال آب از یک منبع در بیرون آزمایشگاه، به کمک پمپ گریز از مرکز و از طریق لوله ورودی کانال به مخزن اول وارد می‌شود. در انتهای مخزن یک سرریز مثلثی قرار دارد که امکان اندازه‌گیری دبی را فراهم می‌آورد و آب پس از عبور از آن به حوضچه آرامش ابتدای فلوم وارد می‌شود.

1. Slide Gate

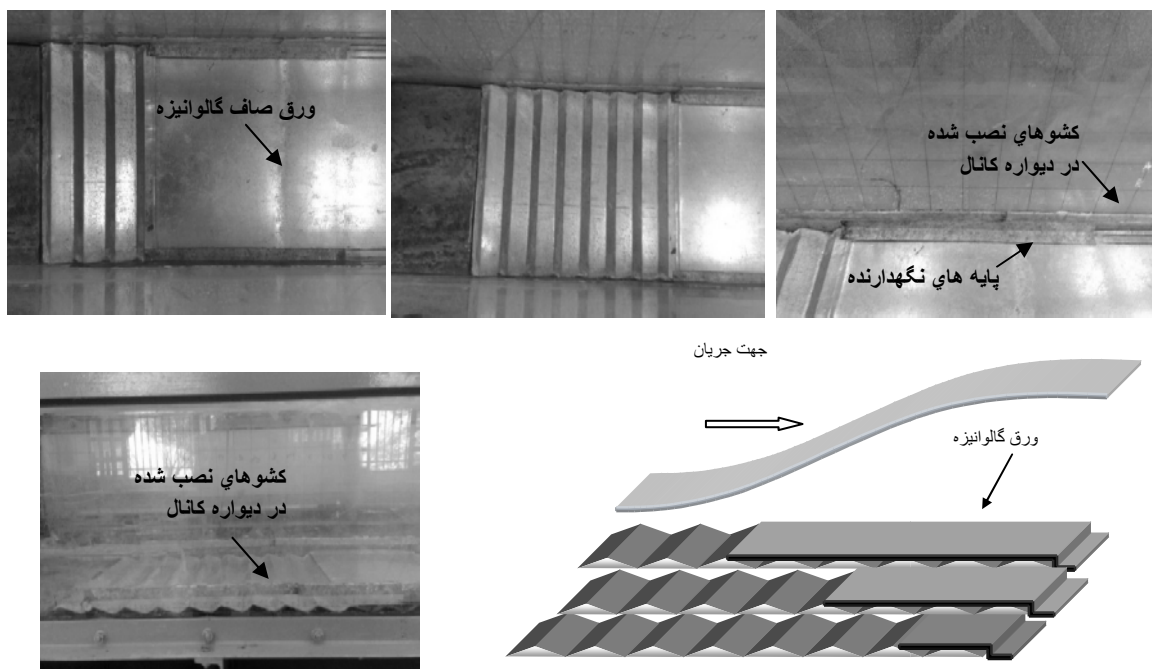
2. Mild

شده است. برای ایجاد زبری از کف بند گالوانیزه با موج‌های مثلثی استفاده شد. زبری به شکل مثلثی است که شیب ضلع رو به جریان در آن بیشتر از شیب ضلع پشت به جریان است. این شکل بر اساس نتایج تحقیقات غزالی (۱۳۸۹) انتخاب شد.

مؤثر، تغییر خواص پرش مانند طول پرش، طول غلتاب و عمق ثانویه بر اثر تغییر طول زبری مورد بررسی قرار گرفته و طولی از زبری که از آن به بعد، تأثیری در خواص پرش ایجاد نمی‌شود، به عنوان طول مؤثر انتخاب شد. آزمایشها برای سه مقدار عدد فرود $0.7/26$ ، $0.8/94$ و $1.0/13$ انجام شد. سایر مشخصات آزمایشها در جدول ۱ آورده



شکل ۲ طرحواره فلوم مورد استفاده در آزمایشها

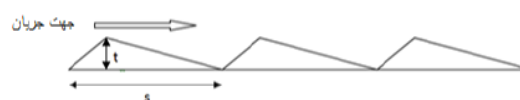


شکل ۳ طرحواره‌ای از روش تغییر طول زبری

در شکل ۵ طرح‌واره روش اندازه‌گیری پروفیل سرعت بر روی بستر زیر در مقاطع مختلف پرش، ارتفاع‌های مختلف مقطع و زبری‌های با طول مختلف نشان داده شده است. عمق‌های اولیه و ثانویه جریان با استفاده از عمق‌سنج^۱ و همچنین با استفاده از خط‌کشی نصب شده بر روی دیواره شیشه‌ای فلوم اندازه‌گیری شد. سرعت جریان با استفاده از لوله پیتوت^۲ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عمق‌های متناظر سرعت، با استفاده از لوله پیتوت که در فاصله‌های یک سانتی‌متری مدرج شده، اولین قرائت از رأس دندان‌ها انجام شد و لوله پیتوت به فاصله یک سانتی‌متر بالا آورده شده و قرائت‌های بعدی صورت پذیرفت.

وجود جریان متلاطم و ورود حباب هوا به درون لوله پیتوت باعث نوسان سطح آب و بروز خطا در قرائت ارتفاع آب در لوله پیتوت می‌شد. برای حل این مشکل، در هر نقطه اندازه‌گیری، به مدت ۲۰ تا ۳۰ ثانیه نوسانهای سطح آب در لوله پیتوت رصد شده و از میانگین بیشینه و کمینه ارتفاع آب به عنوان ارتفاع نظیر سرعت در نقطه مورد اندازه‌گیری استفاده شد.

غزالی (۱۳۸۹) با انجام آزمایشهایی به منظور بررسی خواص پرش بر روی پنج بستر زیر مثلثی با شکل‌های مختلف نشان داد که زبری مثلثی - که شیب ضلع بالادست آن نسبت به شیب ضلع پایین‌دست بیشتر باشد - تأثیر بهتری بر کاهش طول پرش و عمق ثانویه جریان دارد. نمای این مثلث‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. آزمایشها برای زبری مثلثی با طول موج (S) ۵/۵ سانتی‌متر و ارتفاع (t) ۱/۵ سانتی‌متر انجام شد. به منظور بررسی تأثیر تغییر طول زبری بر مشخصات پروفیل سرعت، طول زبری برای هر عدد فرود به سه دسته بلند کوتاه و متوسط تقسیم بندی شد. زبری کوتاه شامل طول‌های ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر، زبری متوسط شامل طول‌های ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و زبری بلند شامل طول‌های ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر است و این تغییرهای طول زبری در محدوده طول مؤثر هستند.



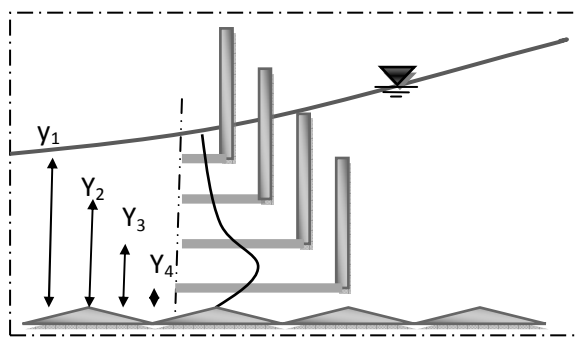
شکل ۴ مشخصات زبری بستر

جدول ۱ مشخصات آزمایشهای انجام شده بر روی پروفیل سرعت در پرش هیدرولیکی

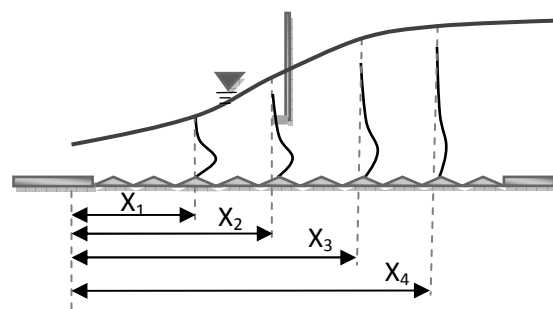
نام آزمایش	طول زبری (cm)	عنوان	عدد فرود	دبی (Litr/s)
A1	۱۴	زبری کوتاه	۸/۹۴	۱۹/۷۵
A2	۲۶	زبری متوسط		
A3	۳۸	زبری بلند		
A4	۱۴	زبری کوتاه	۱۰/۱۳	۲۳/۴۹
A5	۲۶	زبری متوسط		
A6	۴۴	زبری بلند		
A7	۲۰	زبری کوتاه	۷/۲۶	۳۳/۲۸
A8	۳۰	زبری متوسط		
A9	۵۰	زبری بلند		

1. Point Gage

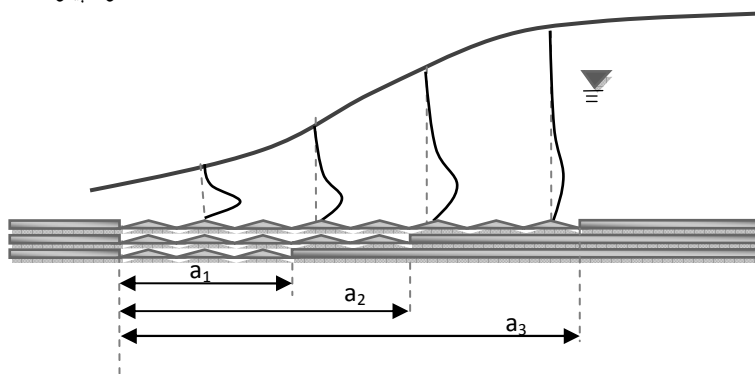
2. Pitot Tube



ب- طرح‌واره اندازه‌گیری سرعت در هر مقطع در ارتفاع‌های مختلف با لوله پیتوت



الف- طرح‌واره پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف



ج- طرح‌واره پروفیل‌های سرعت در پرش هیدرولیکی برای زبری‌های با طول‌های مختلف

شکل ۵ طرح‌واره روش اندازه‌گیری پروفیل سرعت

طول‌های زبری با عنوان بلند، کوتاه و متوسط در شکل ۷ نشان داده شده است. برای بی‌بعد کردن سرعت در هر مقطع، سرعت در هر نقطه بر سرعت بیشینه در همان مقطع تقسیم شده است (u/u_{max}) .

برای بی‌بعد کردن ارتفاع، اندازه ارتفاع هر نقطه بر b تقسیم شده که b ارتفاعی از پروفیل است که سرعت آن نصف سرعت بیشینه باشد و شیب منحنی در آن منفی است (y/b) . در این شکل برای مقایسه بهتر، نمودار پروفیل سرعت برای بستر صاف با خط پیوسته ترسیم شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود پروفیل‌های سرعت در زبری کوتاه تطابق بیشتری با پروفیل‌های سرعت بر روی بستر صاف دارند و با افزایش طول زبری در زبری‌های متوسط و بلند پروفیل‌های سرعت شکل متفاوتی نسبت به بستر صاف به خود می‌گیرند.

۳- بحث و نتایج

شکل ۶ پروفیل عمقی سرعت را در طول پرش برای آزمایش‌های A_1 تا A_9 نشان می‌دهد. فاصله مقطع اندازه‌گیری از ابتدای پرش برای هر مقطع، در شکل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با کاهش عمق جریان، مقدار سرعت در هر پروفیل ابتدا افزایش و سپس بعد از رسیدن به مقدار بیشینه (u_{max}) کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از ابتدای پرش سرعت بیشینه در هر مقطع کاهش و عمق جریان پیش رونده افزایش می‌یابد. این موضوع با توجه به ماندگار بودن جریان و شکل پرش هیدرولیکی کاملاً قابل تأیید است.

۳-۱- بررسی تغییر پروفیل‌های بی‌بعد سرعت با

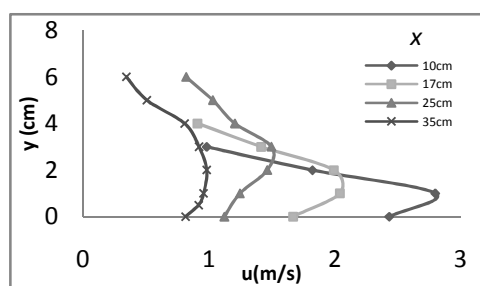
تغییر طول زبری

برای مقایسه تغییر مشخصات پروفیل سرعت با افزایش طول زبری، پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت برای

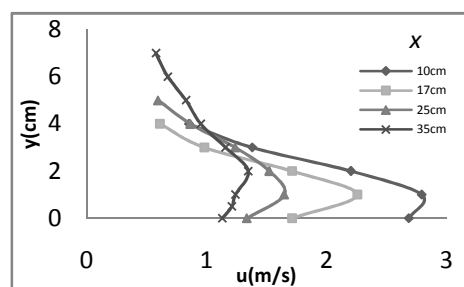
۲-۳- بررسی تغییر اجزای پروفیل سرعت

در شکل ۸ تغییر سرعت بیشینه بی بعد (u_{max}/u_1) نسبت به فاصله بی بعد (x/L) نشان داده شده است.

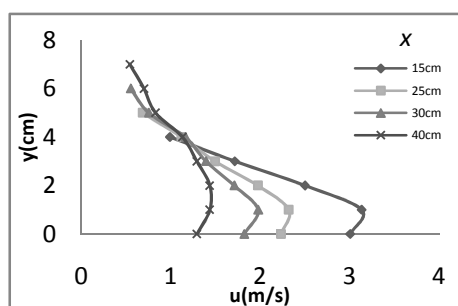
L فاصله از ابتدای پرش برای مقطعی است که در آن مقطع، سرعت بیشینه نصف سرعت جریان در ابتدای پرش باشد. u_1 سرعت جریان در ابتدای پرش می باشد.



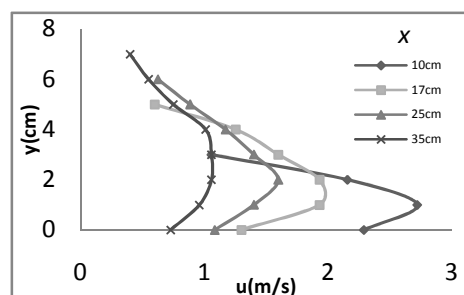
A₂ (ب)



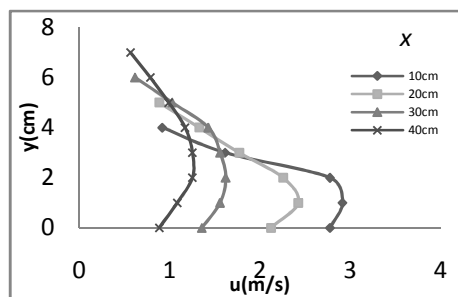
A₁ (الف)



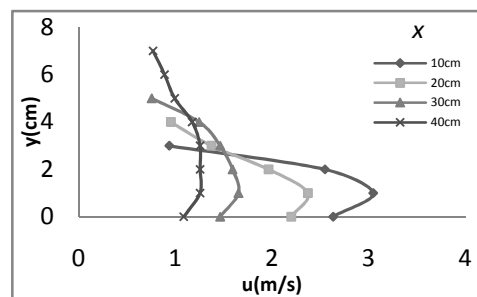
A₄ (د)



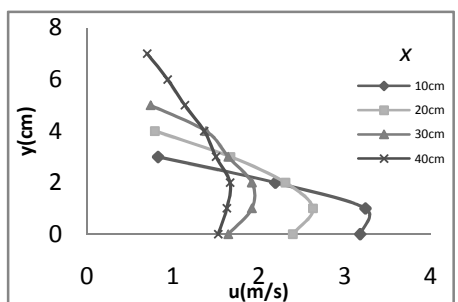
A₃ (ج)



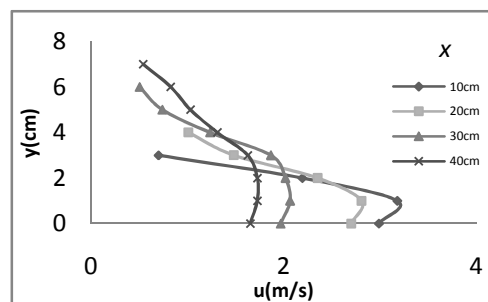
A₆ (و)



A₅ (ه)



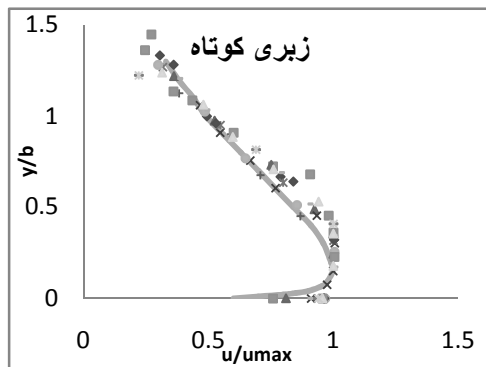
A₈ (ی)



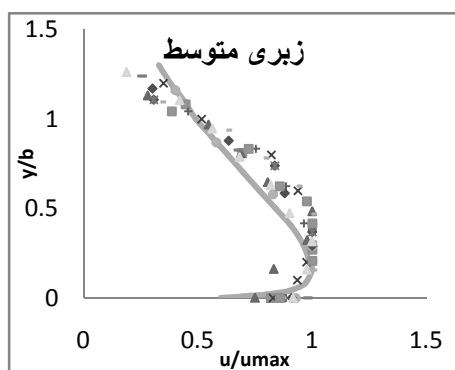
A₇ (ز)

شکل ۶ تغییر پروفیل سرعت پرش نسبت به افزایش فاصله از ابتدای پرش

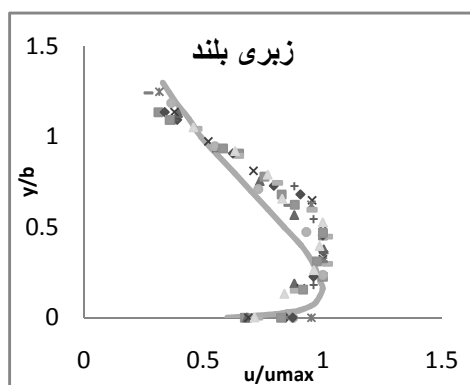
که زبری‌ها کل طول بستر پرش را پوشانده و معادل زبری بلند در تحقیق حاضر باشد، آورده شده است.



الف- آزمایش A_1 ، A_4 و A_7

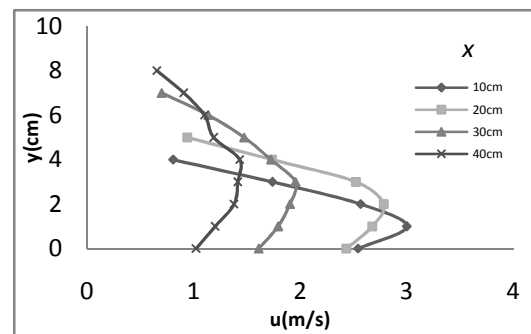


ب- آزمایش A_2 ، A_5 و A_8



ج- آزمایش A_3 ، A_6 و A_9

شکل ۷ نمایش پروفیل‌های بی‌بعد سرعت برای زبری‌های متفاوت



(ح) A_9

ادامه شکل ۶

برای مقایسه بهتر، نمودار تغییر این پارامتر بر روی بستر صاف نیز به صورت خط پیوسته ترسیم شده است. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش فاصله از ابتدای پرش سرعت بیشینه در هر مقطع کاهش می‌یابد. همچنین افزایش طول زبری تأثیری بر تغییر سرعت بیشینه ندارد و تغییر این پارامتر تقریباً بر منحنی بستر صاف منطبق است. این موضوع با نتایج به‌دست آمده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) هم‌خوانی دارد. در شکل ۹- الف تغییر δ/y_1 نسبت به تغییر فاصله بی‌بعد (x/y_1) از ابتدای پرش نشان داده شده است. y_1 عمق جریان قبل از پرش می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، ضخامت لایه مرزی با افزایش فاصله از ابتدای پرش حالت صعودی دارد و همچنین با افزایش طول زبری شیب نمودار بیشتر می‌شود.

اگر رابطه (۱) برای تغییر ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/y_1) نسبت به تغییر فاصله بی‌بعد (x/y_1) حاکم باشد، آنگاه ضرایب a و b به شرح جدول ۲ است.

$$\frac{\delta}{y_1} = a \frac{x}{y_1} + b \quad (1)$$

در جدول ۲ ضرایب مربوط به معادلات به‌دست آمده در این تحقیق برای طول‌های زبری مختلف و همچنین معادلات به‌دست آمده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و غزالی (۱۳۸۹) برای حالتی

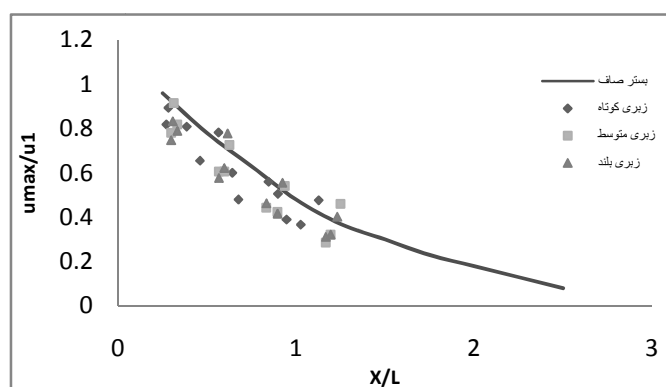
در نمودار ۹- ب تغییر ضخامت لایه مرزی بی بعد δ/y_1 به ازای x/y_1 برای زبری بلند در این تحقیق همراه با نمودار حاصل از نتایج سایر محققین آورده شده است. در این شکل دیده می شود که نمودار حاصل از این تحقیق به نمودار به دست آمده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) نزدیکتر است.

در شکل ۱۰- الف تغییر b نسبت به فاصله مشاهده می شود. برای مقایسه بهتر نمودار تغییرات بر روی بستر صاف نیز ترسیم شده است. همان طور که دیده می شود، b با افزایش طول فاصله از ابتدای پرش افزایش می یابد و با افزایش طول زبری ها نیز b بیشتر می شود. در ضمن نرخ افزایش b در بستر زبر نسبت به بستر صاف بیشتر است.

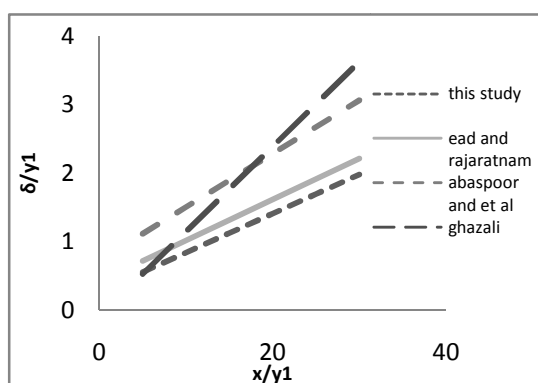
در شکل ۱۰- ب تغییر مقیاس طولی b/y_1 نسبت به x/y_1 برای زبری بلند در این تحقیق همراه با نتایج سایر محققان آورده شده است. با توجه به این شکل به نظر می رسد که نتایج این تحقیق به نتایج تحقیق اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) نزدیکتر است. شکل عمومی معادلات به دست آمده برای تغییر b/y_1 نسبت به تغییر فاصله بی بعد (x/y_1) برای زبری های کوتاه، متوسط و بلند به شکل معادله ۲ است.

$$\frac{b}{y_1} = a_1 \frac{x}{y_1} + b_1 \quad (2)$$

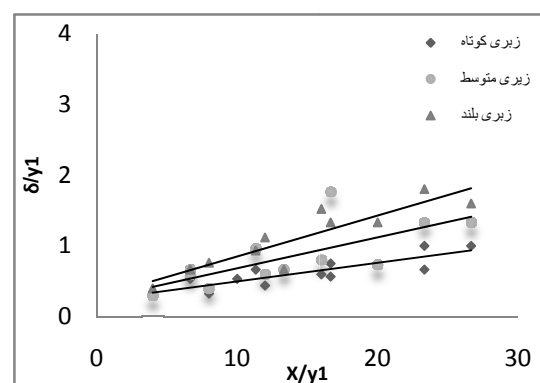
در جدول ۳ ضرایب a_1 و b_1 به دست آمده در این تحقیق و همچنین نتایج به دست آمده توسط سایر محققان آورده شده است.



شکل ۸ تغییر u_{max}/u_1 نسبت به x/L



ب- مقایسه تغییر δ/y_1 در برابر تغییر x/y_1 (زبری بلند)

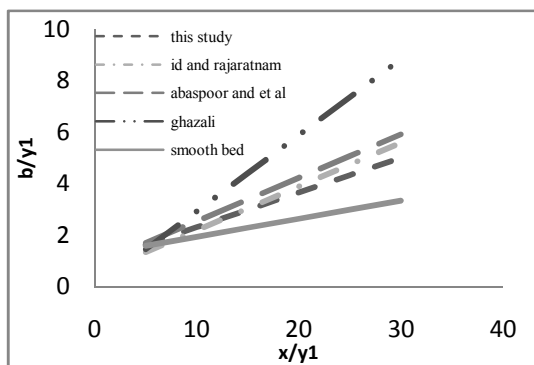
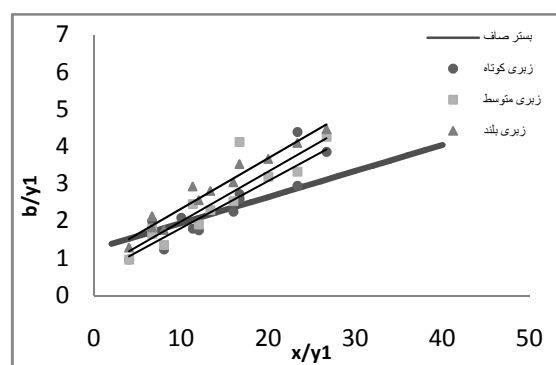


الف- تغییر δ/y_1 در برابر تغییر x/y_1

شکل ۹ تغییر δ/y_1 در برابر تغییر x/y_1 و مقایسه آن با نتایج سایر محققان

جدول ۲ پارامترهای a ، b و R^2 برای رابطه (۱)

R^2	b	a	محقق
۰/۷۳۴	۰/۲۳۵	۰/۰۲۶	زبری کوتاه
۰/۵۱۵	۰/۲۴۶	۰/۰۴۳	زبری متوسط
۰/۸۲۹	۰/۲۷۳	۰/۰۵۷	زبری بلند
۰/۷۸	۰/۴۲	۰/۰۶۰	اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)
۰/۷	۰/۷۳	۰/۰۷۸	عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)
۰/۸۳	-۰/۰۹۱۷	۰/۱۲۴۲	غزالی (۱۳۸۹)


 ب- مقایسه تغییر b/y_1 در برابر تغییر x/y_1 با نتایج سایر محققان (زبری بلند)

 الف- تغییر b/y_1 در برابر x/y_1

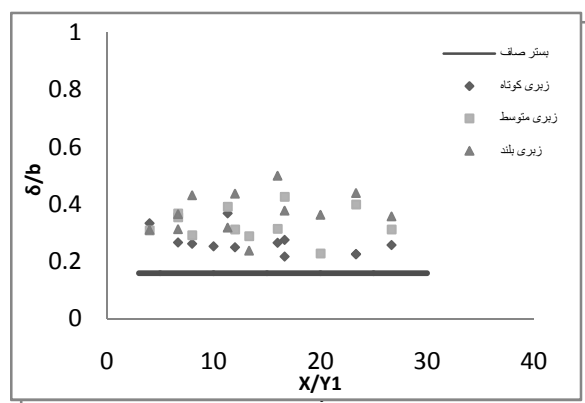
 شکل ۱۰ تغییر b/y_1 در برابر x/y_1 و مقایسه آن با نتایج سایر محققان

 جدول ۳ پارامترهای a_1 ، b_1 و R^2 در رابطه ۲

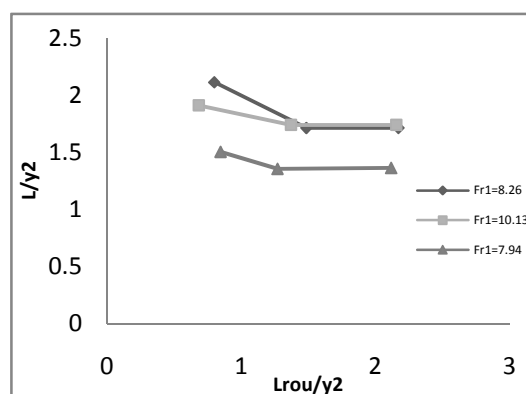
R^2	b_1	a_1	محقق
۰/۸۲۷	۰/۵۴۷	۰/۱۲۶	زبری کوتاه
۰/۸۰۹	۰/۶۶۰	۰/۱۳۳	زبری متوسط
۰/۹۵۲	۰/۹۷۲	۰/۱۳۵	زبری بلند
۰/۹۱	۰/۵	۰/۱۷	اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)
۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۱۶۸	عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)
۰/۸۳	۰/۰۰۱۷	۰/۲۹۴۵	غزالی (۱۳۸۹)

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش طول زبری، L کاهش پیدا می‌یابد. شکل ۱۱-ب تغییر ضخامت لایه مرزی بی‌بعد (δ/b) را نسبت به فاصله نشان می‌دهد.

در شکل ۱۱-الف تغییر L نسبت به افزایش طول زبری مشاهده می‌شود. L فاصله از ابتدای پرش برای مقطعی است که سرعت بیشینه در آن مقطع نصف سرعت جریان در ابتدای پرش (u_1) باشد.



ب- شکل تغییر δ/b نسبت به تغییر x/y_1



الف- تغییر L/y_2 نسبت به تغییر L_{rou}/y_2

شکل ۱۱ تغییر L/y_2 نسبت به L_{rou}/y_2 و δ/b نسبت به x/y_1

به دست آمده در این تحقیق تقریباً بر نمودار مربوط به بستر صاف منطبق است.

۳- نرخ افزایش لایه مرزی نسبت به فاصله از ابتدای پرش با افزایش طول زبری بیشتر می شود.

۴- نرخ افزایش پارامتر b نسبت به افزایش فاصله از ابتدای پرش برای تمامی طول های زبری در بستر صاف نسبت به بستر زبر بیشتر است و همچنین با افزایش طول زبری، نرخ افزایش آن بیشتر می شود.

۵- اندازه ضخامت لایه مرزی بی بعد با افزایش طول زبری افزایش می یابد. این اندازه برای زبری کوتاه برابر ۰/۲۶ و برای زبری متوسط و بلند برابر ۰/۳۷ به دست آمد.

۵- فهرست علائم

b ارتفاعی از پروفیل سرعت که در آن سرعت جریان نصف سرعت ماکزیمم در پروفیل و شیب منحنی سرعت منفی باشد

Fr_1 عدد فرود جریان قبل از پرش
 L فاصله افقی از ابتدای پرش برای مقطعی که سرعت ماکزیمم در آن مقطع نصف سرعت اولیه جریان باشد.

s ارتفاع موج زبری

t طول موج زبری

u سرعت جریان

این پارامتر در نمودار بی بعد پروفیل های سرعت، نشانگر ارتفاع سرعت بیشینه است. برای مقایسه بهتر، نمودار این مقدار بر روی بستر صاف نیز ترسیم شده که مقدار آن برابر ۰/۱۶ است.

نکته حایز اهمیت در شکل های مربوط به تغییر مشخصات پروفیل های سرعت بر روی بستر زبر در این تحقیق، کمتر بودن تغییر پارامترهای پروفیل سرعت مانند ضخامت لایه مرزی بی بعد یا تغییر لایه مرزی نسبت به افزایش فاصله از ابتدای پرش نسبت به تحقیقات سایر محققان بر روی بستر زبر است. دلیل این را می توان اختلاف ۴۰ درصدی ارتفاع زبری در این تحقیق نسبت به تحقیقات سایر محققان دانست. ارتفاع زبری ها در این تحقیق برابر ۱/۵ سانتی متر و در تحقیقات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و غزالی (۱۳۸۹) ۲/۵ سانتی متر است.

۴- نتیجه گیری

۱- پروفیل های بی بعد سرعت در پرش هیدرولیکی بر بستر زبر مشابه هستند، اما با پروفیل سرعت مربوط به بستر صاف تفاوت دارند.

۲- تغییر طول زبری تأثیری بر تغییر سرعت بیشینه نسبی نسبت به افزایش فاصله از ابتدای پرش ندارد و مقادیر

مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
غزالی م. (۱۳۸۹). تأثیر بستر موج دار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران، جلد ۷، صص. ۹۹-۱۰۷.

Abbaspour A., Hosseinzadeh Dalir A., Farsadizadeh D. and Sadraddini A.A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics, *Applied Sciences* 9(11), pp. 2045-2055.

Ead S.A. and Rajaratnam N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated bed, *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(2), pp. 656-663.

Izadjoo, F. and Shafai Bejestan M. (2007). Corrugated bed hydraulic jump stilling basin, *Applied Sciences* 7(8), pp. 1164-1169.

Rjaratnam N. (1968). Hydrulic jump on rough bed, *Trans. Eng. Inst. Canada* 11:18.

W u S. and Rajaratnam N. (1995). Free jumps supmerged jums and wall jets, *J. of Hydraulic Research*, 33(2), pp. 197-212.

u_l	سرعت جریان قبل از پرش
U_{max}	سرعت ماکزیمم در هر مقطع
x	فاصله از ابتدای جریان
y	عمق جریان
y_l	عمق اولیه جریان
δ	ضخامت لایه مرزی

۶- منابع

ابریشمی ج. و حسینی م. (۱۳۷۸). هیدرولیک کانال‌های باز (چاپ هفتم)، موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ایران.

فرهودی ج. (۱۳۷۲). جریان در آبراهه‌های روباز، انتشارات دانشگاه ارومیه، ارومیه.

غزالی م. (۱۳۸۹). تأثیر دندانه‌ای بودن بستر حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته