

## مقاله پژوهشی

# بررسی آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی کنترل شده توسط آستانه لبه تیز در حوضچه‌های آرامش واگرا

امیر گرد نوشهری<sup>۱\*</sup>، محمد حسین امید<sup>۲</sup> و صلاح کوچک زاده<sup>۳</sup>

### چکیده

حوضچه‌های آرامش واگرا بدلیل هماهنگی با مقاطع بالادست و پایین دست و داشتن نسبت عمق ثانویه و طول کمتر، دارای برتری نسبت به حوضچه‌های کلاسیک است. از طرفی این گونه حوضچه‌ها با مشکل ناپایداری و نامتقارن بودن جهش هیدرولیکی روبرو هستند. در این تحقیق اثر آستانه لبه تیز بر بهبود مشخصات جهش هیدرولیکی در یک حوضچه آرامش واگرا مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور آستانه‌هایی با ارتفاع‌های مختلف و موقعیت‌های متفاوت نسبت به پنجه جهش که در حوضچه‌هایی با زوایای واگرایی ۳، ۵ و ۹ درجه قرار داشتند، مورد استفاده قرار گرفتند. در مجموع ۲۲۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود اولیه ۳/۱ تا ۱۰/۳ انجام شد و در هر آزمایش مشخصات اصلی جهش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول نسبی و افت نسبی انرژی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که نصب آستانه لبه تیز تأثیر ناچیزی در نسبت عمق ثانویه و در نتیجه افت انرژی جهش هیدرولیکی واگرا دارد ولی باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در طول جهش هیدرولیکی می‌شود. همچنین مشخص شد که استفاده از آستانه لبه تیز باعث بهبود وضعیت عمومی جهش هیدرولیکی واگرا و تثبیت موقعیت آن می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** جهش هیدرولیکی کنترل شده، حوضچه آرامش واگرا، آستانه لبه تیز، جهش هیدرولیکی واگرا.

**ارجاع:** گرد نوشهری ا. امید م. ح و کوچک زاده ص. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی کنترل شده توسط آستانه لبه تیز در حوضچه‌های آرامش واگرا. مجله پژوهش آب ایران. ۳(۴)۳۱-۳۹.

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲ - دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳ - استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مسئول: [agnoshahri@yahoo.com](mailto:agnoshahri@yahoo.com)

## مقدمه

جهش هیدرولیکی پدیده‌ای است که در آن، جریان در فاصله کوتاهی از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌شود. طی این پدیده عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و در نتیجه ضمن ایجاد افت محسوس انرژی، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. به طور کلی جهش در مقاطع مستطیلی افقی را می‌توان به دو دسته جهش در مقطع مستقیم (جهش کلاسیک) و واگرا طبقه بندی کرد. هر کدام از این جهش‌ها خود می‌توانند بر اساس استفاده یا عدم استفاده از ضمایم کنترل کننده جهش (آستانه انتهایی یا بلوک‌های کف) به دو نوع جهش کنترل شده و آزاد تقسیم بندی شوند.

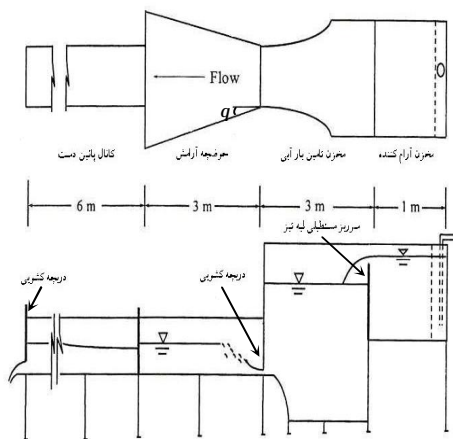
در یک سازه کنترل، اغلب از لحاظ اقتصادی به صرفه است تا عرض دریاچه را به حداقل رسانده و از عرض کامل کانال برای حوضچه آرامش استفاده کرد. ساده ترین حوضچه آرامش، شامل کانالی مستطیلی، مستقیم و تقریباً افقی است که در آن جهش در طول مشخصی اتفاق می‌افتد. ولی این نوع حوضچه آرامش دارای مشکلاتی نظیر نیاز به تراز نسبتاً زیاد پایین دست برای تضمین تشکیل جهش و پایداری نسبتاً ضعیف جهش، است. برای رفع این مشکلات، راه حل‌های مختلفی از جمله تغییر تدریجی عرض حوضچه در طول آن وجود دارد (هگر، ۱۹۸۵).

اولین آزمایش در مورد جهش‌های هیدرولیکی در مقاطع واگرا، توسط ریگل (۱۹۱۷) انجام گرفت. جاگر (۱۹۴۹) را باید به عنوان اولین محقق دانست که تیوری اندازه حرکت را برای مقاطع مستطیلی افقی و واگرا به درستی به کار برد (هگر، ۱۹۸۵). کلوسیوس و احمد (۱۹۶۹) جهش هیدرولیکی دایره ای را با فرض پروفیل خطی جهش بین عمق اولیه و ثانویه جهش مورد مطالعه قرار دادند. این دو محقق نشان دادند که با افزایش زاویه واگرایی، میزان عمق ثانویه و طول جهش در مقایسه با جهش در مقطع مستطیلی مستقیم کاهش می‌یابد و طول جهش در این حالت در حدود  $3/5$  تا  $4/5$  برابر عمق ثانویه است. اربهابیراما و ابلا (۱۹۷۱) با در نظر گرفتن پروفیل جهش به صورت ربعی از بیضی، مطالعه قبل را تکرار کردند. رابطه نسبت عمق ثانویه ارایه شده توسط این دو محقق برای زوایای واگرایی آزمایش شده ( $10^\circ$ )

تا  $26^\circ$  درجه) مطابقت خوبی با مشاهدات داشت. مقایسه بین روش آنها و روش کلوسیوس و احمد، مطابقت بهتر داده‌ها، زمانیکه پروفیل جهش غیر خطی در نظر گرفته می‌شود را نشان می‌دهد. امید و همکاران (۲۰۰۷) بر روی تأثیر توأم مقطع دوزنقه‌ای و واگرایی در جهش هیدرولیکی مطالعاتی را انجام دادند و دو رابطه تحلیلی با فرض پروفیل جهش ربع بیضی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارایه کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در هر شیب جانبی با افزایش زاویه واگرایی، طول نسبی جهش و نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد.

وجود آستانه‌ها یا بلوک‌ها در حوضچه‌های آرامش موجب افزایش میزان استهلاک انرژی و کاهش سرعت کف در جهش هیدرولیکی می‌شوند. مطالعات زیادی برای بررسی اثر آستانه‌ها در حوضچه‌های مستطیلی مستقیم انجام گرفته است. بر اساس نتایج این تحقیقات، اثر آستانه روی خصوصیات جهش بستگی به فاکتورهایی نظیر شکل، موقعیت و ارتفاع آستانه دارد.

اولین مطالعه در زمینه کنترل جهش به وسیله یک آستانه توسط شکری (۱۹۵۷) انجام گرفت. وی با انجام آزمایش‌هایی نشان داد که عدد فرود اولیه، فاصله قرار گیری آستانه از پنجه، ارتفاع نسبی آستانه و همچنین عمق پایاب، در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی آستانه موثرند. رند (۱۹۶۵) با قرار دادن یک آستانه در مسیر جریان نشان داد که با افزایش ارتفاع آستانه و کاهش فاصله قرار گیری آستانه نسبت به پنجه جهش، عمق آب در پایاب کاهش می‌یابد (بیرامی و ایلاقی، ۱۳۸۴). در زمینه طبقه بندی جهش بر اساس مشخصات آستانه نیز مطالعاتی به وسیله نارایانان و شویناس (۱۹۸۰)، اوتسو (۱۹۸۱) و هگر و لی (۱۹۹۲) انجام گرفته است. در حوضچه آرامش استاندارد USBR II که بوسیله دفتر آبادانی ایالات متحده آمریکا ارایه شده است نیز از آستانه انتهایی استفاده شده است. در این نوع حوضچه آرامش برای اعداد فرود اولیه در محدوده  $4/5$  تا  $9$  ارتفاع آستانه‌های به کار رفته در آزمایش‌ها برحسب عمق ثانویه جهش بدون آستانه ( $y_2^*$ ) طراحی شده است، بطوریکه همواره نسبت ارتفاع آستانه به عمق ثانویه جهش بدون آستانه در محدوده  $0/08$  تا  $0/37$  بوده است (پترکا، ۱۹۸۴).



شکل ۱- مشخصات پلان و مقطع طولی مدل آزمایشگاهی

برای تعیین ارتفاع آستانه ها، معیار USBR برای تعیین ارتفاع آستانه انتهایی حوضچه آرامش تیپ II که در بخش مقدمه ذکر شد، مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین با توجه به این معیار و همچنین با توجه به این که محدوده اعداد فرود اولیه مقدر برای آزمایش از  $3/1$  تا  $10/3$  بود، محل آستانه‌ها بر اساس طول جهش بدون آستانه برای اعداد فرود اولیه  $5/5$ ،  $8/5$  و  $11/5$  و ارتفاع آستانه‌ها به گونه ای انتخاب شدند تا  $s/y_2^* = 0.09, 0.22, 0.35$  باشد. در اینجا  $s$  ارتفاع آستانه و  $y_2^*$  عمق ثانویه مربوط به جهش بدون آستانه برای اعداد فرود اولیه ذکر شده در بالا می باشد. بر این اساس در هر زاویه واگرایی، آستانه‌ها در سه محل مختلف و در هر محل با سه ارتفاع مختلف نصب شدند و مشخصات جهش برای کل محدوده اعداد فرود قابل دستیابی اندازه گیری شد. برای ساخت آستانه لبه تیز، از ورقه های پلاکسی گلاس به ضخامت ۶ میلیمتر استفاده شد. با توجه به معیار لبه تیز بودن سرریز که به صورت  $H/L > 1.5$  (ارتفاع آب روی تاج سرریز و  $L$  طول سرریز) می باشد، همواره باید بیش از ۱۰ میلیمتر آب روی آستانه باشد که این شرط با توجه به شرایط جهش در محدوده آزمایشها برقرار بود.

با قرار گیری آستانه در انتها یا در داخل جهش، شرایط جهش متفاوت خواهد بود. چنانچه آستانه در انتهای جهش و بعد از امواج غلتنده سطحی قرار گیرد (شکل ۲-الف)، جهش مشابه جهش بدون آستانه بوده و اثر آستانه ناچیز خواهد بود و تنها موجب انحراف جریان تحتانی بعد از انتهای غلتنده می شود. در این حالت طول و عمق ثانویه جهش در مقطعی

از مجموع مطالعات گذشته می توان نتیجه گیری کرد که در جهش هیدرولیکی واگرا نسبت عمق ثانویه و طول جهش کمتر و افت نسبی انرژی بیشتر از جهش کلاسیک است. انتظار می رود که استفاده از آستانه لبه تیز موجب بهبود عملکرد جهش واگرا و کاهش بیشتر طول حوضچه شده و از این رو هزینه ساخت کاهش یابد. از آنجاییکه اثر آستانه لبه تیز در حوضچه‌های واگرا تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است، در این تحقیق مشخصات جهش هیدرولیکی واگرایی کنترل شده بوسیله یک آستانه لبه تیز به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش ها

آزمایش‌های این مطالعه در مدل آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام گرفت. مدل شامل مخزن آرام کننده با سرریز مستطیلی لبه تیز، مخزن تأمین بار آبی، دریچه کشویی لبه تیز با ارتفاع بازشدگی ثابت ۳ سانتیمتر، یک کانال مستطیلی با کف و دیواره های شیشه ای به عرض ۰/۵ متر، عمق ۰/۶ متر و طول ۹ متر و یک دریچه کشویی در انتهای کانال پایین دست برای تنظیم عمق مورد نیاز پایاب است (شکل ۱). بخشی از کانال مدل به طول ۳ متر که بلافاصله بعد از دریچه مخزن قرار دارد، به گونه ای طراحی و ساخته شده است که به عنوان حوضچه آرامش، امکان ایجاد واگرایی با زوایای متفاوت در دامنه وسیعی را فراهم می کند (امید و همکاران، ۲۰۰۷). در این مطالعه زوایای واگرایی دیواره جانبی حوضچه آرامش نسبت به محور مرکزی کانال ( $q$ ) معادل ۳، ۵ و ۹ درجه انتخاب شد. موقعیت جهش با تنظیم پایاب به کمک یک دریچه در انتهای کانال، بگونه ای تنظیم شد که پنجه جهش در ابتدای واگرایی کانال باشد.

برای قرائت عمق جریان در طول جهش، از یک عمق سنج که بر روی سیستم ریلی موجود بر روی حوضچه آرامش قرار داشت، استفاده شد. این عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلیمتر امکان قرائت عمق های اولیه و ثانویه جهش را فراهم می کرد. برای اندازه گیری طول جهش نیز از یک متر فلزی با دقت  $\pm 1$  میلیمتر که در امتداد یکی از ریل ها نصب شده بود، استفاده شد.

جریان، طول جهش، عمق آب بالادست دریچه و عمق ثانویه جهش پس از ایجاد شرایط پایدار بود. این مراحل برای دبی های مختلف تکرار می شدند.

### نتایج و بحث

در این مطالعه به منظور بررسی اثر آستانه لبه تیز بر روی مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا، در مجموع ۲۰۵ آزمایش بر روی ۳۰ آستانه لبه تیز با ارتفاع های مختلف انجام شد. به منظور تجزیه و تحلیل داده ها، برای هر موقعیت قرار گیری نمودارهای مربوط به نسبت عمق ثانویه، طول نسبی و افت نسبی انرژی جهش واگرای آزاد و جهش واگرای کنترل شده بوسیله آستانه لبه تیز ترسیم شده اند. نمونه ای از نتایج در شکل های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. برای مشخص کردن محل قرار گیری آستانه و ارتفاع آن از اعداد بدون بعد  $I_s = L_s/y_1$  و  $S = s/y_2^*$  استفاده شد، که  $L_s$  فاصله بین پنجه جهش و آستانه و  $y_1$  عمق اولیه جهش است.

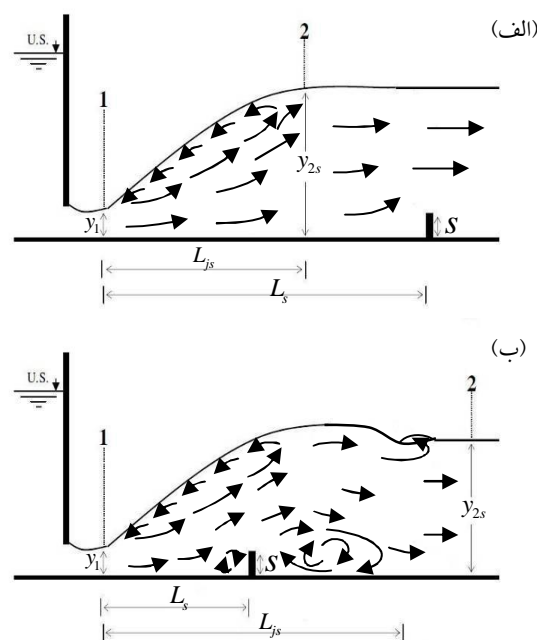
برای مقایسه نتایج بدست آمده با مشخصات جهش واگرا در حوضچه بدون آستانه، نسبت عمق ثانویه تیوری بدون آستانه نیز با رابطه زیر (امید و همکاران، ۲۰۰۷) محاسبه شده و در نمودارها نشان داده شده است. معادله اصلی با فرض پروفیل جهش ربع بیضی برای نسبت عمق ثانویه جهش در مقاطع واگرای دوزنقه ای ارایه شده که شکل ساده شده آن برای حوضچه های واگرای مستطیلی به صورت معادله ۱ است.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left[ Fr_1^2 \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} \right) + \frac{1}{2} \right] \frac{2A_1}{A_2} + \frac{4 L_j \operatorname{tg} q \left( \frac{y_2^2}{3} + 0.048 y_1^2 + 0.118 y_1 y_2 \right)}{A_2 y_1} \quad (1)$$

در این رابطه  $y_2$  عمق ثانویه جهش بدون آستانه،  $Fr_1$  عدد فرود اولیه،  $L_j$  طول جهش،  $A_1$  سطح مقطع در پنجه جهش و  $A_2$  سطح مقطع در انتهای جهش است. این رابطه یک رابطه نیمه تحلیلی است، زیرا در طرف دوم رابطه پارامتر طول جهش وجود دارد که تنها از طریق آزمایش بدست می آید و از طرفی دیگر به خاطر حضور عمق ثانویه در طرف دوم، یک رابطه ضمنی است که با روش آزمون و خطا قابل حل است. همچنین مشخصات جهش هیدرولیکی کلاسیک با استفاده از معادلات ۲ تا ۴ در شکل ها ترسیم شدند. برای محاسبه طول نسبی جهش کلاسیک نیز از

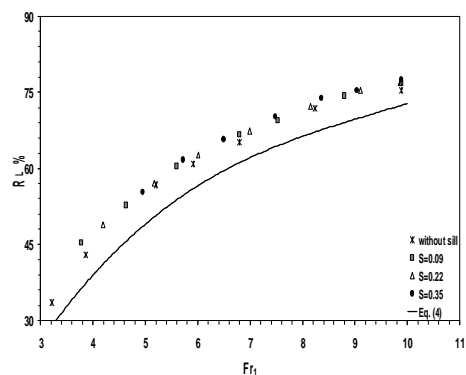
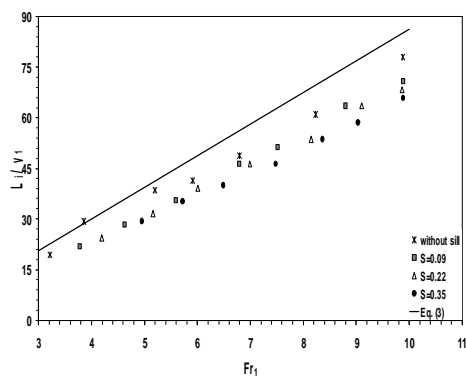
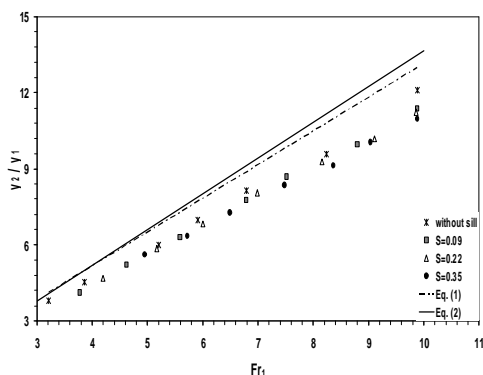
که در آن تغییرات عمق آب ناچیز بود، اندازه گیری می شد. درحالتی که آستانه در داخل محدوده موثر جهش قرار می گیرد (شکل ۲-ب) اثر آستانه افزایش یافته و جریان تحتانی به سمت سطح آب منحرف می شود و در نتیجه موج ساکنی در پایین دست آستانه بوجود می آید. در این حالت سه ناحیه گردابی قابل مشاهده است:

(۱) گرداب های سطحی تشکیل شده در بالادست آستانه،  
(۲) گرداب های کف تشکیل شده در پایین دست آستانه و  
(۳) گرداب های سطحی کوچک تشکیل شده در ابتدای شروع جریان یکنواخت پایین دست. با توجه به گرداب شدید در ناحیه اول و انحنای شدید خطوط جریان در ناحیه دوم، قسمت اعظم افت انرژی در اثر تشکیل گرداب های نوع اول و دوم است. بنابراین برای این حالت، مجموع طول گرداب کف و فاصله قرار گیری آستانه از پنجه جهش، به عنوان طول جهش و عمق جریان یکنواخت پایین دست به عنوان عمق ثانویه جهش در نظر گرفته شد (بیرامی و ایلاقی، ۱۳۸۴).



شکل ۲- مشخصات هیدرولیکی جهش کنترل شده توسط آستانه لبه تیز

فرآیند کلی آزمایش به صورت: (۱) نصب آستانه لبه تیز در محل مورد نظر، (۲) برقراری دبی مورد نظر، (۳) تنظیم دریچه انتهایی برای تشکیل جهش غیر مستغرق با پنجه قرار گرفته در ابتدای کانال واگرا و (۴) اندازه گیری مقادیر شدت



شکل ۳- تغییرات مشخصات جهش هیدرولیکی برای  $q = 3^0$   
 $Fr_{1d} = 5.5$  و  $I_s = 40.5$ .

در این شرایط افزایش ارتفاع آستانه نیز تأثیر چندانی بر روی مشخصات جهش واگرای نداشته. تنها تأثیر قابل مشاهده در این حالت بهبود وضع ظاهری و تثبیت موقعیت جهش هیدرولیکی بود. مطالعات قبلی نشان داده است که سرعت جریان در نزدیکی کف و پنجه جهش بطور قابل ملاحظه‌ای زیاد است و در انتهای جهش و نزدیک کف، سرعت کاهش می‌یابد. لذا در انتهای جهش تقریباً آستانه انتهایی اثری بر روی مشخصات هیدرولیکی جهش نخواهد داشت.

رابطه ارایه شده توسط هگر (نقل از هگر، ۱۹۹۲) استفاده شد.

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

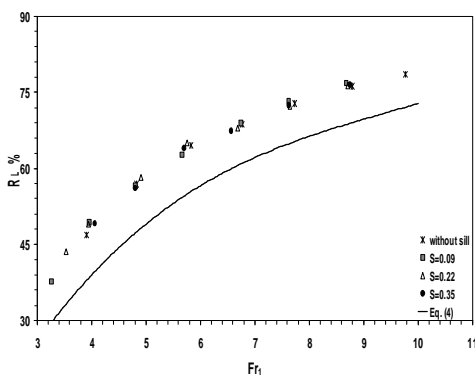
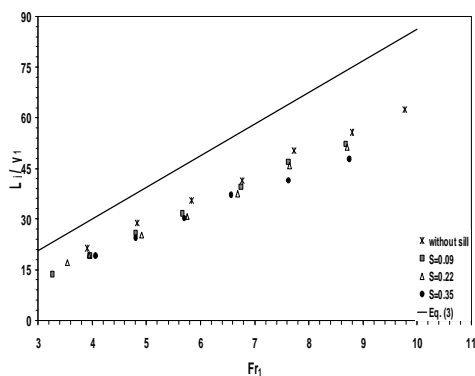
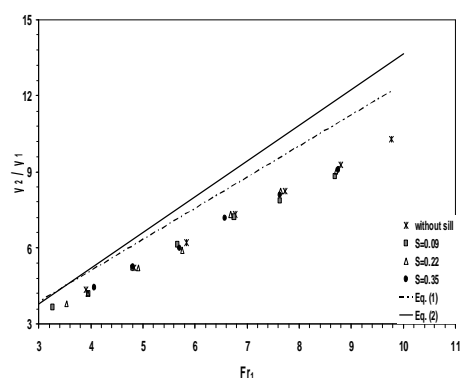
$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh \left( \frac{Fr_1 - 1}{22} \right) \quad (3)$$

$$R_L = \frac{\left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 3 \right)^3}{8(2 + Fr_1^2) \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)} \quad (4)$$

همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، در حوضچه با واگرایی ۳ درجه و  $I_s = 40.5$  که در آن آستانه برای عدد فرود اولیه ۵/۵ نصب شده است، بیشترین اثر آستانه بر روی مشخصات هیدرولیکی جهش مربوط به جریان های با عدد فرود اولیه بالاتر از ۵/۵ است یعنی هنگامی که آستانه بعد از انتهای جهش قرار می‌گیرد، اثر چندانی بر خصوصیات جهش نخواهد داشت و تنها در تثبیت و بهبود کیفیت جهش اثر گذار است. در این حالت با افزایش ارتفاع آستانه، بر میزان کاهش طول نسبی و نسبت عمق ثانویه و افزایش نسبتاً محسوس افت نسبی انرژی، افزوده می‌شود. برای  $S = 0.35$  که بلندترین آستانه به کار رفته است، بیشترین اثرات دیده می‌شود. برای این آستانه کاهش طول نسبی جهش نسبت به جهش واگرای بدون آستانه بین ۱۲ تا ۱۶ درصد، کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به جهش واگرای بدون آستانه بین ۵ تا ۸ درصد و میزان افزایش افت نسبی انرژی نسبت به جهش واگرای بدون آستانه در حدود ۳ درصد بوده است.

با افزایش فاصله قرار گیری آستانه از پنجه جهش در حوضچه با واگرایی ۳ درجه، از تأثیر آستانه بر روی مشخصات جهش کاسته می‌شود به طوری که برای  $I_s = 65.4$  و  $S = 0.35$ ، طول نسبی جهش به میزان ۷ تا ۱۱ درصد و نسبت عمق ثانویه در حدود ۵ درصد کاهش و افت نسبی انرژی در حدود ۲ درصد افزایش را نسبت به جهش واگرای بدون آستانه نشان می‌دهد.

در جایگذاری سوم آستانه لبه تیز در حوضچه با واگرایی ۳ درجه که انتهای جهش همواره قبل از آستانه بود، اثر محسوسی بر روی مشخصات جهش مشاهده نشد.

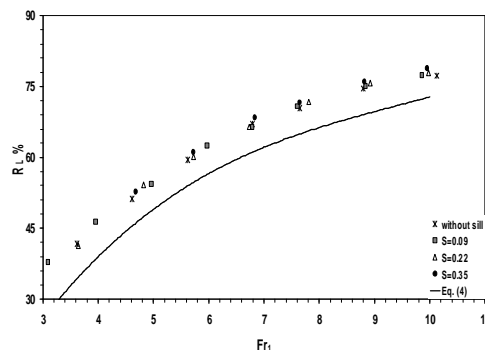
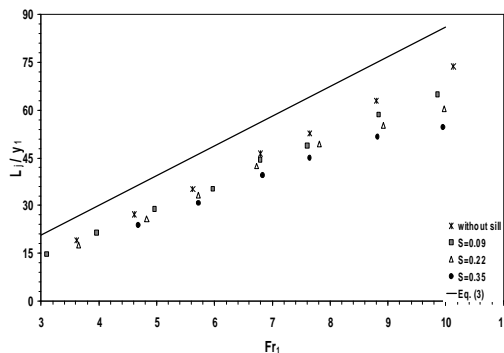
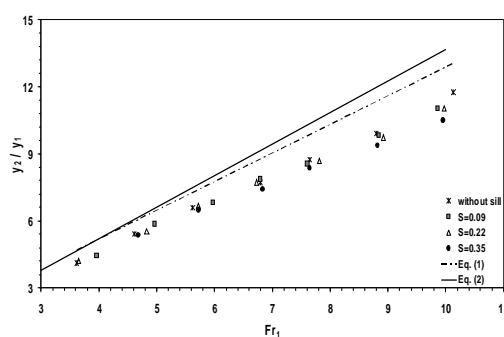


شکل ۵- تغییرات مشخصات جهش هیدرولیکی برای  $q = 9^0$  ،

$$Fr_{1d} = 5.5 \text{ و } I_s = 32.7$$

مسئله‌ای که در حوضچه‌های واگرا وجود دارد، تمایل به ایجاد جریان دوپایا<sup>۱</sup> است. در این حالت جریان از یک دیواره جدا شده و به دیواره دیگر برخورد می‌کند. در نتیجه جهشی نامتقارن به همراه یک ناحیه ساکن<sup>۲</sup> یا گردابه جانبی<sup>۳</sup> در طرف جدادگی و یک جت قوی در سمت دیگر، شکل می‌گیرد. این جت دوپایا تمایل به گسترش به سمت کانال پایین دست دارد و گاهی موجب فرسایش شدید کناره

در حوضچه‌های با واگرایی ۵ و ۹ درجه نیز رفتار مشابهی دیده می‌شود (شکل های ۴ و ۵). نکته قابل ذکر در اینجا این است که با افزایش زاویه واگرایی از اثر آستانه لبه تیز بر روی نسبت عمق ثانویه کاسته و به مقدار ناچیزی کاهش طول جهش افزایش می‌یابد، به طوری که در زاویه واگرایی ۹ درجه و برای  $I_s = 32.7$  و  $S = 0.35$  طول نسبی جهش به میزان ۱۲ تا ۱۸ درصد کاهش یافته است و تغییر محسوسی در نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی حاصل نشده است که می‌تواند ناشی از کاهش ذاتی عمق ثانویه با افزایش زاویه واگرایی باشد.



شکل ۴- تغییرات مشخصات جهش هیدرولیکی برای  $q = 5^0$  ،

$$Fr_{1d} = 5.5 \text{ و } I_s = 35.1$$

- 1 - Bi-stable flow
- 2 - Dead zone
- 3 - Side eddy



شکل ۶- پدیده جدا شدگی برای  $q = 9^\circ$ ،  $I_s = 54.6$  و  $Fr_1 = 4.8$  (الف)،  $Fr_1 = 8.7$  (ب)،  $S = 0.35$

با در نظر گرفتن پارامترهای موثر در جهش هیدرولیکی واگرایی کنترل شده بوسیله آستانه لبه تیز، در نهایت رابطه کمیت‌های بی بعد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$f_1\left(\text{Re}_1, Fr_1, \frac{y_{2s}}{y_1}, \frac{L_{js}}{y_1}, \frac{b_{2s}}{b_1}, q, \frac{L_s}{s}\right) = 0 \quad (5)$$

که  $L_{js}$  و  $y_{2s}$  به ترتیب طول و عمق ثانویه جهش هیدرولیکی واگرایی کنترل شده بوسیله آستانه، ثانویه جهش،  $b_1$  عرض حوضچه در پنجه جهش و  $\text{Re}_1$  عدد رینولدز در پنجه جهش است.

با توجه به اینکه مقادیر عدد رینولدز در این آزمایش‌ها زیاد بوده است لذا می‌توان از اثر لزوجت صرف نظر کرد. در نتیجه معادله ۵ به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$f\left(Fr_1, \frac{y_{2s}}{y_1}, \frac{L_{js}}{y_1}, \frac{b_{2s}}{b_1}, q, \frac{L_s}{s}\right) = 0 \quad (6)$$

با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های آماری انجام گرفته توسط نرم افزار LabFit بر روی داده‌های آزمایشگاهی، روابط زیر برای طول نسبی جهش و نسبت عمق ثانویه حاصل شدند:

$$\frac{L_{js}}{y_1} = \frac{8.43Fr_1 - 9.345}{1.77(s/L_s) + 2\tan q + 0.872} \quad R^2 = 0.979 \quad (7)$$

$$3.1 \leq Fr_1 \leq 10.3, \quad 13.43 \leq \frac{L_s}{s} \leq 94.12$$

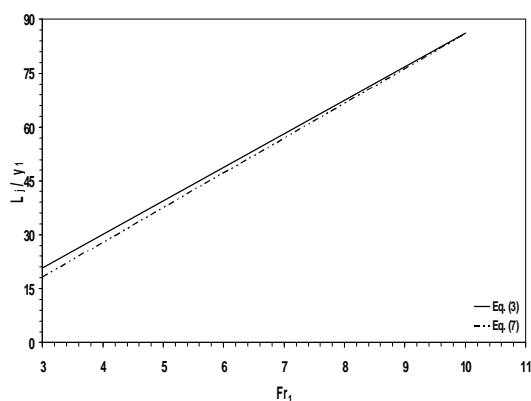
کانال می‌شود. این مسئله با افزایش زاویه واگرایی حوضچه بیشتر می‌شود. طبق توصیه USBR ترجیح داده می‌شود که زاویه انحراف ( $q$ ) کمتر از  $\tan^{-1}\left(\frac{1}{3}Fr_1\right)$  باشد تا پایداری جهش تضمین شود (نتلتون، ۱۹۸۳). در زاویه واگرایی ۹ درجه و در حالت بدون حضور آستانه از عدد فرود اولیه حدوداً ۳/۵ این پدیده به وضوح قابل مشاهده بود که با معیار ارایه شده توسط USBR مطابقت نسبتاً خوبی دارد. حضور آستانه در بهبود این پدیده بسیار تأثیرگذار بود، به طوری که با افزایش ارتفاع آستانه پدیده جداشدگی و ایجاد گرداب کناری به محدوده پنجه جهش تا آستانه محدود می‌شد. به عنوان مثال برای زاویه واگرایی ۹ درجه و برای  $I_s = 32.7$  و  $S = 0.35$  از عدد فرود اولیه حدوداً ۵، پدیده جدا شدگی رخ می‌داد. بنابراین اگر چه در زوایای واگرایی زیادتر تأثیر آستانه لبه تیز بر روی عمق ثانویه جهش کمتر می‌شود، ولی بر بهبود شرایط جهش همچنان تأثیر گذار می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد با افزایش زاویه واگرایی حوضچه، میزان کاهش طول جهش نسبت به جهش هیدرولیکی آزاد افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از همین کاهش اثر پدیده جریان دوپایا باشد.

در شکل ۶ دو عکس از جهش کنترل شده توسط آستانه در حوضچه آرامش با زاویه واگرایی ۹ درجه و برای  $I_s = 54.6$  و  $S = 0.35$  نشان داده شده است. شکل (۶-الف) مربوط به عدد فرود اولیه ۴/۸ و شکل (۶-ب) مربوط به عدد فرود اولیه ۸/۷ است که به وضوح مطلب اشاره شده را نشان می‌دهد.

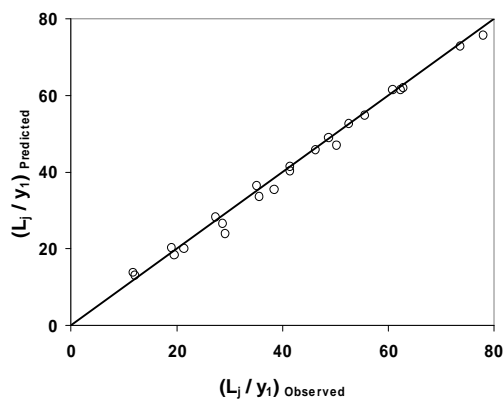


)

آزاد مورد مقایسه قرار گرفته است. بطوریکه در شکل ۹ مشاهده می شود، معادله ۷ در اعداد فرود پایین مقادیر طول نسبی جهش کلاسیک را کمتر از معادله ۳ برآورد می کند و دارای خطای نسبی حدوداً ۳/۶ درصد است. همچنین شکل ۱۰ نشان می دهد که معادله ۷ در برآورد طول نسبی جهش هیدرولیکی واگرای آزاد از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۹- مقایسه معادله ۷ با معادله ۳



شکل ۱۰- مقایسه معادله ۷ با نتایج آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرای آزاد

### نتیجه گیری

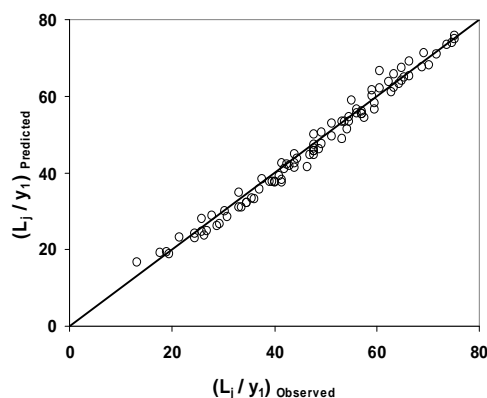
در این مطالعه اثر آستانه لبه تیز بر روی مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- به طور کلی می توان گفت که نصب آستانه در حوضچه آرامش واگرا موجب کاهش طول جهش و کاهش عمق ثانویه به مقدار ناچیز می شود.

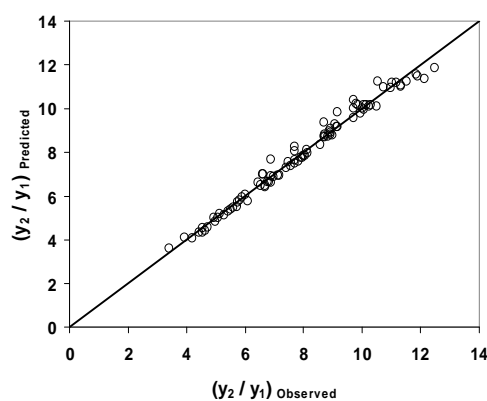
$$\frac{y_{2s}}{y_1} = 0.537 + 1.22F_{r1} - 0.73 \left( \frac{b_{2s}}{b_1} \right)^2 \quad R^2 = 0.99 \quad (\text{A})$$

$$3.1 \leq F_{r1} \leq 103, \quad 1.09 \leq \frac{b_{2s}}{b_1} \leq 1.8$$

برای بررسی دقت معادلات ۷ و ۸ از ۹۰ داده دیگر که در فرآیند تعیین روابط ارایه شده به کار نرفته بودند، استفاده شد. نتایج بررسی عملکرد این دو مدل رگرسیونی در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده اند.



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با معادله ۷



شکل ۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با معادله ۸

همانطور که در شکل های فوق مشخص است، مطابقت بسیار خوبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده های آزمایشگاهی وجود دارد. خطای نسبی معادلات ۷ و ۸ در تخمین پارامترهای موردنظر به ترتیب ۴/۳ و ۲/۶ درصد است.

در شکل های ۹ و ۱۰، نتایج معادله ۷ به ترتیب با معادله ۳ و نتایج آزمایشگاهی مربوط به جهش هیدرولیکی واگرای

- 10- Omid M.H. and EsmaeeliVaraki M. and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in trapezoidal channel J. Hydraulic Research, 45(4):512-518.
- 11- Peterka A.J. 1984. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, No.25, Denver, Co.

- با کاهش فاصله آستانه نسبت به پنجه جهش یا افزایش ارتفاع آن، اثر آستانه روی مشخصات هیدرولیکی جهش واگرا بیشتر می شود.
- با قرار گیری آستانه بعد از محل عمق ثانویه و خارج از محدوده موثر جهش، تأثیر بر روی مشخصات هیدرولیکی بسیار ناچیز است و تنها اثر آستانه در تثبیت و بهبود کیفیت جهش قابل ملاحظه است.
- با افزایش زاویه واگرایی حوضچه، از تأثیر آستانه بر روی عمق ثانویه جهش کاسته می شود ولی اثر آستانه در تثبیت جهش، بهبود شرایط جریان دوپایا و ایجاد جهش پایدار بسیار مطلوب است.
- با استفاده از تحلیل ابعادی، روابطی برای محاسبه طول نسبی و نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی واگرای کنترل شده بوسیله آستانه لبه تیز ارائه شد.

#### منابع

- ۱- بیرامی م.ک. و ایلاقی حسینی م. ۱۳۸۴. کنترل جهش هیدرولیکی با یک یا دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی مجله علمی - پژوهشی استقلال، ۱: ص ۷۳-۱۱۹.
- 1- Arabhabhrama A. and Abela A. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel J. Hydraulic Div. , 97(1):31-42.
  - 2- Hager W.H. 1985. Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels J. Hydraulic Research, 23(1):21-34.
  - 3- Hager W.H. and Li D. 1992. Sill-controlled energy dissipator J. Hydraulic Research, 30(2): 165-181.
  - 4- Hager W.H. 1992. Energy dissipators and hydraulic jump, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers.
  - 5- Kouluseus H.J. and Ahmad D. 1969. Circular hydraulic jump J. Hydraulic Div., 95(1):409-422.
  - 6- Narayanan R. and Schizas L.S. 1980a. Force fluctuations on sill of hydraulic jump J. Hydraulic Div. , 106(HY4),589-599.
  - 7- Narayanan R. and Schizas L.S. 1980b. Force on sill of forced jump J. Hydraulic Div., 106(HY7), 1159-1172.
  - 8- Nettleton P.C. 1983. The forced radial hydraulic jump M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Windsor.
  - 9- Ohtsu I. 1981. Forced hydraulic jump by a vertical sill Trans. JSCE, Hydraulic and Sanitary Engineering Division, 13:165-168.