

## اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس

مهدی دستورانی<sup>۱</sup> و محسن نصرآبادی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

ایجاد جهش آبی در مجاری شیبدار یکی از مسائل مورد توجه محققین بوده است. در تحقیق حاضر، اثر توأم زبری بستر و شیب معکوس کانال‌های مستطیلی بر مشخصات جهش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. برای آزمایشات از یک فلوم با عرض ۰/۷، ارتفاع ۰/۶ و طول ۱۵ متر استفاده شد. آزمایشات در محدوده‌ی اعداد فرود بین ۳ تا ۶، شیب‌های معکوس ۰، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ و چهار ضریب زبری ۰/۰۱۱۴، ۰/۰۱۴۵، ۰/۰۱۷۲ و ۰/۰۱۹۱ صورت گرفته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه و طول جهش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس روی طول جهش می‌شود. در توجیه این تغییرات می‌توان تأثیر مؤلفه رو به پایین نیروی وزن در روی شیب معکوس و افزایش تنش برشی در روی بستر زبر را عامل اصلی تغییرات دانست. همچنین افت انرژی جهش با افزایش شیب معکوس و ارتفاع زبری افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** جهش هیدرولیکی، دریچه کشوئی، شیب معکوس، ضریب زبری

**ارجاع:** دستورانی م. و نصرآبادی م. ۱۳۹۰. اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۹۱(۹): ۱۰۰-۹۱.

۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند  
۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

\* نویسنده مسئول: [nasrabadim@ut.ac.ir](mailto:nasrabadim@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۴

## مقدمه

جهش هیدرولیکی یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که هرگاه جریان در قسمتی از مسیر خود بنا به شرایط کانال از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌شود رخ می‌دهد. این پدیده باعث افزایش عمق جریان در فاصله‌ی نسبتاً کوتاه و همچنین افزایش تلاطم در جریان می‌شود، و ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت جریان به میزان قابل توجهی کاسته می‌شود. از این پدیده بطور وسیعی به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین‌دست اغلب سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌گردد. یکی از این سازه‌ها حوضچه‌های آرامش می‌باشند. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص نحوه‌ی تشکیل و خصوصیات جهش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش صورت گرفته و روش‌های متعدد تحلیلی و تجربی برای پیش‌بینی وضعیت و مشخصات جهش هیدرولیکی در شرایط مختلف جهت ارایه روش‌هایی برای طراحی بهینه و اقتصادی<sup>۱</sup> حوضچه‌های آرامش صورت گرفته است. روابط ارایه شده برای محاسبه‌ی مشخصات جهش هیدرولیکی، غالباً با فرضیاتی از قبیل صرف نظر کردن از اثر نیروی ناشی از اصطکاک بین سیال و جدار سازه‌ی موردنظر و همچنین صرف نظر کردن از نیروی ناشی از وزن بدست آمده‌اند. اما در صورتی که شرایط بستر از قبیل زبری و یا شیب کف تغییر کند، دیگر نمی‌توان از اثر اصطکاک بین سیال و بستر کانال و یا از اثر نیروی وزن صرف نظر کرد و بسته به شیب کف کانال، ارتفاع زبری، میزان دبی و در نتیجه عدد فرود جریان، مشخصات جریان شامل تنش برشی و پایداری آن با جریان روی بستر افقی و صاف متفاوت است و در نتیجه خصوصیات جهش هیدرولیکی نیز تغییر خواهند کرد.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی صورت گرفته است. راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین محقق بود که به مطالعه‌ی آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی در بسترهای زبر پرداخت. او نشان داد که جهش‌های تشکیل شده در بسترهای زبر کوتاهتر از جهش تشکیل شده در بسترهای صاف است. لوت هاوزر و اشکیلر (۱۹۷۵) نشان داد که جریان‌های

فوق بحرانی توسعه یافته در پایین‌دست دریاچه‌ها بر روی بسترهای زبر در مقایسه با بسترهای صاف به طول کمتری نیاز دارند. هیوز و فلاک (۱۹۸۴) نشان دادند که زبری کف باعث کاهش عمق ثانویه و طول جهش می‌گردد و میزان این کاهش به عدد فرود و زبری نسبی بستگی دارد. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) مطالعه آزمایشگاهی در خصوص جهش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار انجام دادند و نشان دادند که عمق پایاب لازم برای ایجاد جهش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار کمتر از عمق پایاب لازم برای تشکیل جهش بر روی بسترهای صاف است. همچنین آنها نشان دادند که طول جهش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار تقریباً نصف طول جهش در بسترهای صاف است و همچنین تنش برشی تقریباً ۱۰ برابر تنش در بسترهای صاف است. آنها افزایش تنش برشی بستر در نتیجه حضور زبری را عامل اصلی تغییرات دانستند. پالگیارا و همکاران (۲۰۰۸) ضمن معرفی پارامتر غیریکنواختی زبری، نشان دادند که میزان کاهش مشخصات جهش هیدرولیکی علاوه بر عدد فرود و زبری نسبی به پارامتر غیریکنواختی زبری نیز بستگی دارد، بطوریکه هرچه زبری بستر غیریکنواخت-تر باشد میزان کاهش مشخصات جهش بیشتر خواهد بود. اولین مطالعه در مورد جهش در بسترهای با شیب معکوس توسط راوس (۱۹۳۸) انجام شد و به این نتیجه رسید که جهش هیدرولیکی در اینگونه حوضچه‌ها، فقط در روی شیب‌های نزدیک به صفر پایدار خواهد بود. استیونس (۱۹۴۴) با تحلیل تئوری نظریه راوس را رد کرده و نشان داد که تشکیل جهش هیدرولیکی بر روی تمامی شیب‌های معکوس بدون هیچ‌گونه محدودیتی پایدار است و عمق ثانویه اینگونه جهش‌ها را تخمین زد. خدر و راجاگوپال (۱۹۷۲) با انجام آزمایشاتی روی جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس ۰/۰۲۵ به این نتیجه رسیدند که کنترل جهش هیدرولیکی در شیب‌های تندتر از این مقدار غیر ممکن است. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که طول جهش هیدرولیکی در روی بستر با شیب معکوس نسبت به بستر افقی کمتر می‌باشد. ابریشمی و صانعی (۱۹۹۴) نیز با انجام آزمایشاتی نتایج خدر و راجاگوپال را تأیید کردند. آنها همچنین هیچ تغییر محسوسی بین افت انرژی کل جهش هیدرولیکی روی شیب افقی و معکوس مشاهده نکردند. مک کورکودال و

۱- اقتصادی‌ترین حالت حوضچه‌های آرامش زمانی بوجود می‌آید که عمق پایاب (عمق ثانویه) و طول جهش حداقل و افت انرژی جهش بیشترین مقدار خود را داشته باشند.

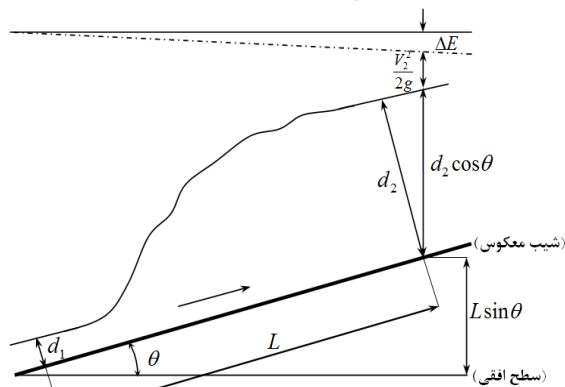
شامل نسبت عمق ثانویه، طول غلطاب و افت انرژی بطور آزمایشگاهی است.

### مواد و روش‌ها

#### تئوری جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس

در مجاری شیبدار مؤلفه افقی وزن سیال نیز در راستای حرکت به صورت  $W \sin \theta$  اثر می‌گذارد و این خود به پیچیده‌تر شدن مطالعه این گونه جهش‌های هیدرولیکی می‌شود که بایستی در استفاده از معادله اندازه حرکت در نظر گرفته شود.

در تحلیل جهش هیدرولیکی بر روی کانال‌های با شیب معکوس کف فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود. از جمله مهمترین آنها می‌توان به ناچیز دانستن انحنای خطوط جریان، صرف نظر کردن از افت ناشی از اصطکاک، یکنواخت فرض کردن جریان در مقاطع اولیه و ثانویه جهش، عدم شتاب در جریان و صرف نظر کردن از تأثیر اختلاط هوا در آب اشاره کرد. با کاربرد معادله اندازه حرکت در فاصله کوتاهی از یک کانال افقی با سطح مقطع مستطیلی (شکل ۱)، می‌توان از تأثیر اصطکاک و وزن مؤثر آب صرف نظر کرد و نیروی مخصوص در دو مقطع ۱ و ۲ را با هم برابر قرار داده و معادله‌ی بین اعماق مزدوج  $d_1$  و  $d_2$  را برای جهش کلاسیک بدست آورد.



شکل ۱- تحلیل جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس

$$\frac{\gamma q}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = P_1 - P_2 - W \sin \theta - F_f \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma d_1^2 \cos \theta \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma d_2^2 \cos \theta \quad (3)$$

محمد (۱۹۹۴) مطالعاتی را در مورد پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس ۰/۱، ۰/۱۶۷ و ۰/۲۰ انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که تثبیت جهش در اینگونه بسترها در اعداد فرود کمتر از ۹ مشکل است. ابریشمی و اسماعیلی در سال (۱۳۷۶) مطالعاتی را در مورد پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله مثبت انجام دادند. آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصل مقادیر  $d_2/d_1$ ،  $L_j/d_1$ ،  $L_j/d_2$  و  $\Delta E/E_1$  را در مقابل  $Fr_1$  رسم کرده و با منحنی‌های حاصل از معادله بلانژ و نیز نتایج کارهای خدر در شیب‌های منفی و بدون پله مقایسه کردند. ابریشمی و اسماعیلی (۱۳۷۹) پرش هیدرولیکی روی شیب‌های منفی و در حضور پله مثبت را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که حضور پله در انتهای حوضچه باعث کاهش نسبت عمق ثانویه می‌شود که با افزایش ارتفاع پله میزان کاهش بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش شیب معکوس از میزان تأثیر پله مثبت روی کاهش نسبت عمق ثانویه کاسته می‌گردد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش شیب معکوس و پله مثبت اختلاف زیادی در افت انرژی روی بسترهای افقی و معکوس ایجاد نمی‌کند. بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) با مطالعه جهش روی شیب معکوس در پایین دست سرریز اوجی، نوع جدیدی از جهش به نام B-F را معرفی کردند که در این نوع ابتدای جهش روی شیب مثبت و انتهای جهش روی شیب منفی تشکیل می‌گردد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش شیب معکوس، نسبت اعماق ثانویه کاهش می‌یابد. مشاهدات آنها نشان داد که در اعداد فرود بزرگتر مقادیر  $V_2/V_1$ ، به دلیل تشکیل پروفیل نوع A2 در انتها، به مقادیر جهش کلاسیک نزدیکتر می‌گردد. بیرامی و چمنی (۲۰۱۰) به مطالعه طول غلطاب و افت انرژی جهش هیدرولیکی در بسترهای شیبدار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که طول جهش هیدرولیکی تابعی از عدد فرود جریان ورودی، عدد فرود جریان خروجی، نسبت عمق ثانویه و شیب بستر کانال است. با توجه به مطالعات فوق‌الذکر، و همچنین با توجه به اینکه زبری و شیب معکوس بستر کانال هر دو به طراحی اقتصادی حوضچه‌ها کمک می‌کنند، هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر توأم زبری و شیب معکوس روی مشخصات جهش هیدرولیکی

انرژی مخصوص در مقاطع ۱ و ۲ با فرض ضریب تصحیح انرژی جنبشی برابر ۱ به صورت زیر است:

$$E_1 = d_1 \cos \theta + \frac{V_1^2}{2g} \quad (9)$$

$$E_2 = d_2 \cos \theta + \frac{V_2^2}{2g} + L_j \sin \theta \quad (10)$$

و افت انرژی نسبی جهش هیدرولیکی به صورت زیر است:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (11)$$

#### آنالیز ابعادی

بطور کلی خصوصیات جهش هیدرولیکی در بسترهای زبر و شیب معکوس به پارامترهای زیر بستگی دارد:

$$d_2 = f(\rho, g, \mu, v_1, d_1, S, k_s) \quad (12)$$

که در این معادله،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\mu$  گرانیوی سینماتیک،  $v_1$  سرعت در مقطع اولیه جهش،  $d_1$  عمق اولیه جهش،  $S$  شیب کف و  $k_s$  ارتفاع زبری می‌باشد. با استفاده از اصول آنالیز ابعادی نسبت عمق ثانویه به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{d_2}{d_1} = f(\text{Re}_1 = \frac{\rho v_1 d_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g d_1}}, S, \frac{k_s}{d_1}) \quad (13)$$

که در این معادله،  $Re_1$  عدد رینولدز در مقطع اولیه جهش،  $Fr_1$  عدد فرود در مقطع اولیه جهش و  $k_s/d_1$  زبری معادل می‌باشد. با توجه به اینکه در اعداد رینولدز بزرگ می‌توان از تأثیر لزجت و در نتیجه عدد رینولدز صرف نظر کرد، در نتیجه معادله ۱۳ به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{d_2}{d_1} = f(Fr_1, S, \frac{k_s}{d_1}) \quad (14)$$

دیگر خصوصیات جهش از جمله طول جهش و افت انرژی نسبی نیز تابعی از پارامترهای فوق خواهند بود. در این تحقیق، برای بررسی اثر زبری بستر از فاکتور اصطکاکی مانینگ  $n$  به جای زبری معادل استفاده می‌شود.

$$q = V_1 d_1 = V_2 d_2 \quad (4)$$

که در این معادلات،  $\gamma$  وزن مخصوص آب،  $\theta$  زاویه شیب کف،  $q$  دبی در واحد عرض،  $g$  شتاب ثقل،  $\beta$  ضریب توزیع سرعت در معادله اندازه حرکت،  $V$  سرعت متوسط،  $P$  مقدار فشار،  $W$  وزن آب محصور بین دو مقطع ۱ و ۲ و  $F_f$  نیروی اصطکاک می‌باشد. با صرفنظر کردن از نیروی اصطکاک و همچنین با فرض  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  و اینکه پروفیل سطح آب در جهش یک خط مستقیم می‌باشد، می‌توان وزن محصور بین دو مقطع را محاسبه کرد.

$$W = \frac{1}{2} \gamma KL (d_1 + d_2) \quad (5)$$

که در این معادله،  $K$  ضریب تصحیح نیروی وزن سیال می‌باشد. با جایگذاری معادلات ۲ تا ۵ در معادله ۱ داریم:

$$\frac{d_1}{d_2} \left( \frac{2 Fr_1^2}{\cos \theta + \frac{KL \sin \theta}{d_2 - d_1}} \right) = \frac{d_2}{d_1} - 1 \quad (6)$$

که با فرض:

$$G_1 = \frac{Fr_1}{\left[ \cos \theta + \frac{KL \sin \theta}{d_2 - d_1} \right]^{0.5}} \quad (7)$$

(حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۵) معادله عمومی جهش هیدرولیکی آزاد در بسترهای با شیب معکوس به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 G_1^2} - 1) \quad (8)$$

به دلیل اینکه محققین مختلف از معیارهای متفاوتی برای اندازه‌گیری طول جهش استفاده کرده‌اند نمی‌توان یک معادله عمومی برای محاسبه طول جهش هیدرولیکی ارائه داد. از طرفی در جهش کلاسیک انتهای جهش جایی است که جریان به حداکثر ارتفاع پایداری می‌رسد، اما این معیار را نمی‌توان برای جهش در روی شیب معکوس بکار برد، به دلیل اینکه در بیشتر اعداد فرود نیمرخ نوع A2 در انتها شکل می‌گیرد. در این حالت انتهای جهش مکانی است که غلطاب‌های سطحی به پایان می‌رسند. در زمینه جهش هیدرولیکی روی بستر زبر نیز مطالعات زیادی صورت گرفته است و تمامی محققین کاهش طول جهش را با افزایش زبری مشاهده کرده‌اند.

### بررسی آزمایشگاهی

برای بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر و شیب معکوس بر مشخصات جهش هیدرولیکی، از یک مدل آزمایشگاهی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز ساخته شده بود، استفاده شد. کانال مورد استفاده در این تحقیق، یک کانال فلزی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۱۵ متر، عرض ۰/۷ متر، و ارتفاع ۰/۶ متر است. برای تنظیم عمق پایاب و همچنین تثبیت موقعیت جهش در پایین دست دریاچه، از یک دریاچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان در سیستم، از سرریز لبه تیز مثلثی ۹۰ درجه که قبلاً واسنجی شده بود استفاده شد. برای تنظیم دبی نیز از یک شیر الکترونیکی که در ابتدای لوله انتقال آب به فلوم تعبیه شده بود استفاده گردید. برای اندازه‌گیری عمق آب در کانال از یک زبری‌سنج<sup>۱</sup> که بر روی شاسی متحرک نصب شده بود استفاده گردید. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.

روش آزمایش‌ها نیز به این صورت بود که پس از تنظیم دبی جریان به میزان ۵۰ لیتر بر ثانیه، با مانور دریاچه کشویی، اعداد فرود مورد نظر ایجاد شد و پس از تثبیت جهش در فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری دریاچه کشویی، مشخصات جهش شامل میزان بازشدگی دریاچه، عمق اولیه و ثانویه و طول جریان غلطان جهش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد.

در این تحقیق برای ایجاد بستر زبر، از ذرات شن با دانه-بندی یکنواخت استفاده شد و با استفاده از چسب مخصوص روی ورقه آهنی چسبانده شده و سپس ورقه در داخل کانال قرار داده شد. برای تعیین ضریب زبری مانینگ، قبل از قرار دادن دریاچه کشویی به منظور تشکیل جهش، جریان یکنواخت را در حضور ورق آهنی توسعه داده و با اندازه‌گیری پروفیل سطح آب و استفاده از فرمول زیر، ضریب مانینگ بدست می‌آمد:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{0.5} \quad (15)$$

که در این معادله،  $Q$ ، دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $A$ ، مساحت بر حسب متر مربع،  $R$ ، شعاع هیدرولیکی بر حسب متر و  $S$ ، شیب کانال بر حسب درصد است. بدین ترتیب مقادیر ضریب زبری مانینگ در این تحقیق، ۰/۱۱۴، ۰/۱۴۵، ۰/۱۷۲ و ۰/۱۹۱ بدست آمد که اولین مقدار مربوط به ضریب زبری بستر صاف و مقادیر دیگر مربوط به ضریب زبری با افزایش ارتفاع ذرات چسبانده شده روی بستر است. در مجموع تعداد ۸۰ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۶، شیب‌های معکوس ۰ تا ۰/۰۲ و مقادیر ضریب زبری ذکر شده انجام شد.

### نتایج و بحث

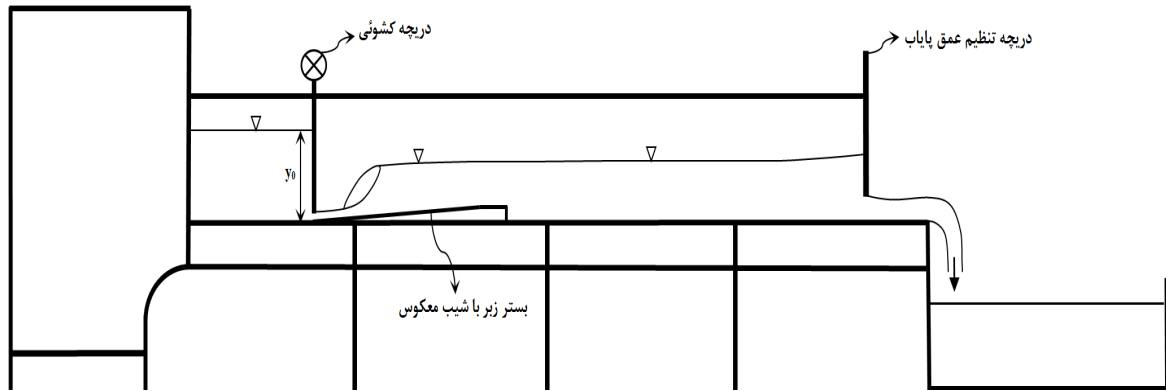
در زیر تغییرات مشاهده شده در مشخصات جهش هیدرولیکی با تغییر زبری و شیب معکوس ارائه شده است.

#### نسبت اعماق ثانویه

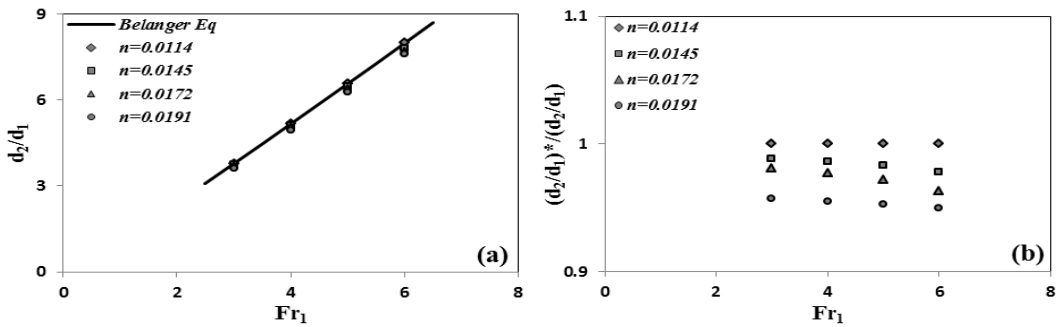
با توجه به نتایج آزمایش‌ها بر روی بسترهای با شیب کف صفر، نمودار تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش ضریب زبری در مقابل عدد فرود در شکل (۳a) رسم شده است. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده معادله‌ی بیلانگر<sup>۲</sup> است.

این شکل بیانگر این واقعیت است که زبری کف باعث کاهش ناچیز عمق ثانویه جهش هیدرولیکی می‌شود، به طوری که در حداکثر ضریب زبری و عدد فرود، نسبت عمق ثانویه تا حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد. ناچیز بودن اثر زبری کف روی نسبت عمق ثانویه قبلاً توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) به اثبات رسیده بود. برای بهتر نشان دادن تغییرات، در شکل ۳b نسبت  $(d_2/d_1) * (d_2/d_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه جهش رسم شده است، که  $(d_2/d_1) *$  نسبت عمق ثانویه اندازه‌گیری شده و  $(d_2/d_1)$  نسبت عمق ثانویه در بستر صاف است.

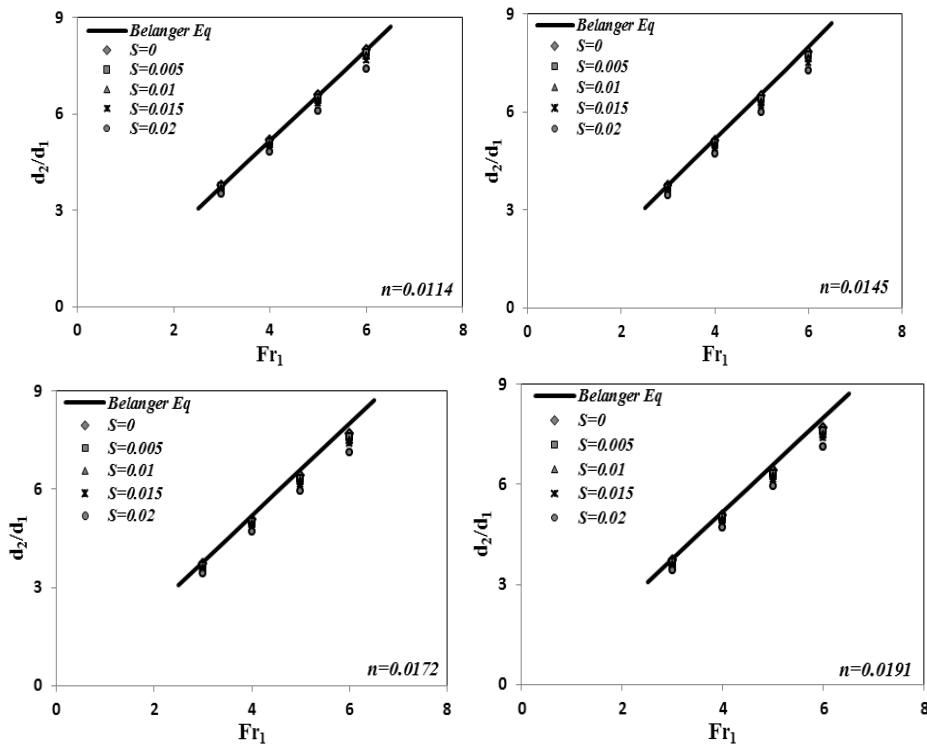
برای بررسی تأثیر شیب معکوس بر نسبت عمق ثانویه جهش در بستر زبر، نسبت  $d_2/d_1$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه جهش در نمودارهای شکل ۴ رسم گردیده است.



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۳- تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زبری در شیب افقی



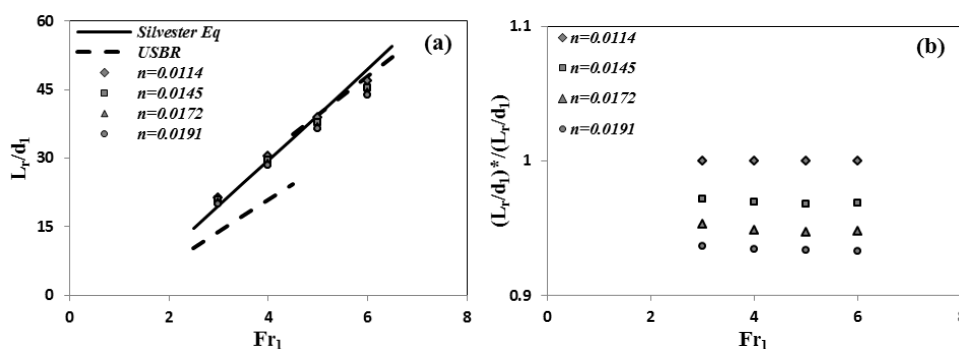
شکل ۴- تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش شیب معکوس به ازای ضرایب زبری مختلف

## طول جهش هیدرولیکی

در شکل ۵ تغییرات طول نسبی جهش با افزایش زبری در روی شیب افقی نشان داده شده است. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده معادله تجربی سیلوستر (۱۹۶۴) و خط چین مربوط به روابط تجربی USBR برای طول جهش در بسترهای صاف و افقی می‌باشند. معادله‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب مربوط به Silvester و USBR می‌باشند.

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.75(Fr_1 - 1)^{1.01} \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2.5 < Fr_1 < 4.5 \rightarrow L_j = 5(y_2 - y_1) \\ 4.5 < Fr_1 < 9 \rightarrow L_j = 6y_2 \end{array} \right\} \quad (17)$$

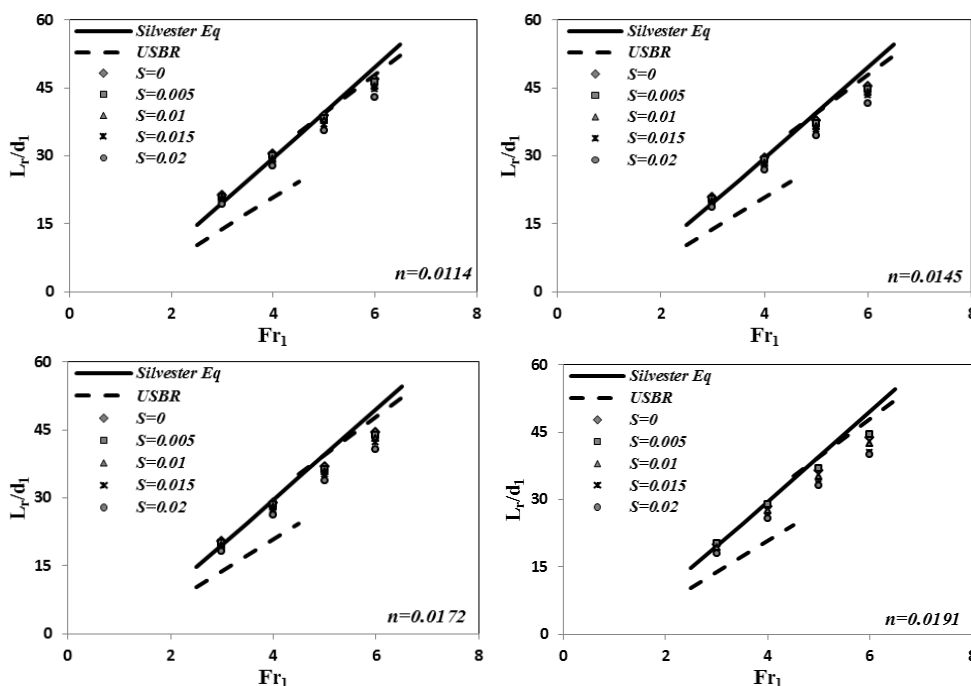


شکل ۵- تغییرات طول نسبی جهش هیدرولیکی با افزایش زبری در شیب افقی

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب معکوس طول نسبی جهش کاهش می‌یابد و زبری بستر میزان این تغییرات را تشدید می‌کند، به طوری که به ازای حداکثر شیب معکوس و حداکثر ضریب زبری، طول نسبی جهش تا حدود ۱۵ درصد نسبت به طول جهش کلاسیک کاهش می‌یابد. افزایش تنش برشی بستر در اثر حضور زبری و تأثیر مؤلفه روبه پایین وزن سیال در شیب معکوس از عوامل اصلی این تغییرات می‌باشند. با توجه به اینکه در اعداد فرود کم، مقدار نیروی برشی افزایش زیادی نخواهد داشت، و وزن سیال کمتر می‌باشد، طول جهش در اعداد فرود کم کاهش کمتری خواهد داشت.

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه کاهش می‌یابد. از طرفی افزایش ضریب زبری بستر باعث کاهش بیشتر این پارامتر می‌شود، بطوریکه در حداکثر شیب معکوس و ضریب زبری کف، این نسبت تا حدود ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. این تغییرات به دلیل اثر نیروی وزن و همچنین به این دلیل است نیروی فشاری بستر برخلاف جهت جریان عمل می‌کند ایجاد می‌شود. بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) دلیل اصلی این تغییرات را تشکیل پروفیل نوع A2 در انتهای جهش دانستند.

در شکل ۵a مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب زبری طول جهش نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. حداکثر میزان کاهش تا حدود ۷ درصد می‌باشد. برای بهتر نشان دادن تغییرات، نسبت  $(L_r/d_1)^*/(L_r/d_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه جهش در شکل (۵b) رسم شده است، که  $(L_r/d_1)^*$  طول نسبی اندازه‌گیری شده و  $(L_r/d_1)$  طول نسبی در بستر صاف ( $n=0.0114$ ) می‌باشد. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) دلیل اصلی این تغییرات را افزایش تنش برشی بستر در اثر حضور زبری‌های دانستند. در نمودارهای شکل ۶ تغییرات طول نسبی جهش با افزایش شیب معکوس و به ازای ضرایب زبری مختلف نشان داده شده است.

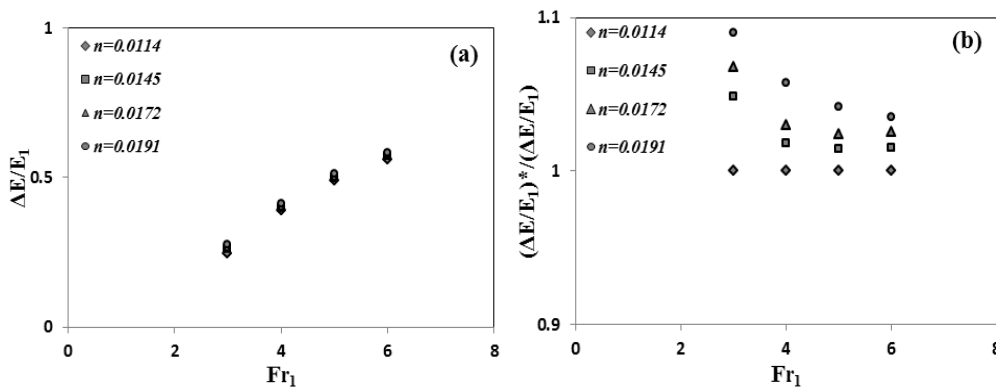


شکل ۶- تغییرات طول نسبی جهش هیدرولیکی با افزایش شیب معکوس به ازای ضرایب زبری مختلف

در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب زبری افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. میزان این تغییرات در اعداد فرود حداقل بیشتر است، به طوری که در حداقل عدد فرود افت انرژی نسبی تا حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. برای بررسی تأثیر شیب معکوس روی افت انرژی نسبی، در نمودارهای شکل ۸ تغییرات این پارامتر با افزایش شیب معکوس و به ازای ضرایب زبری مختلف نشان داده شده است.

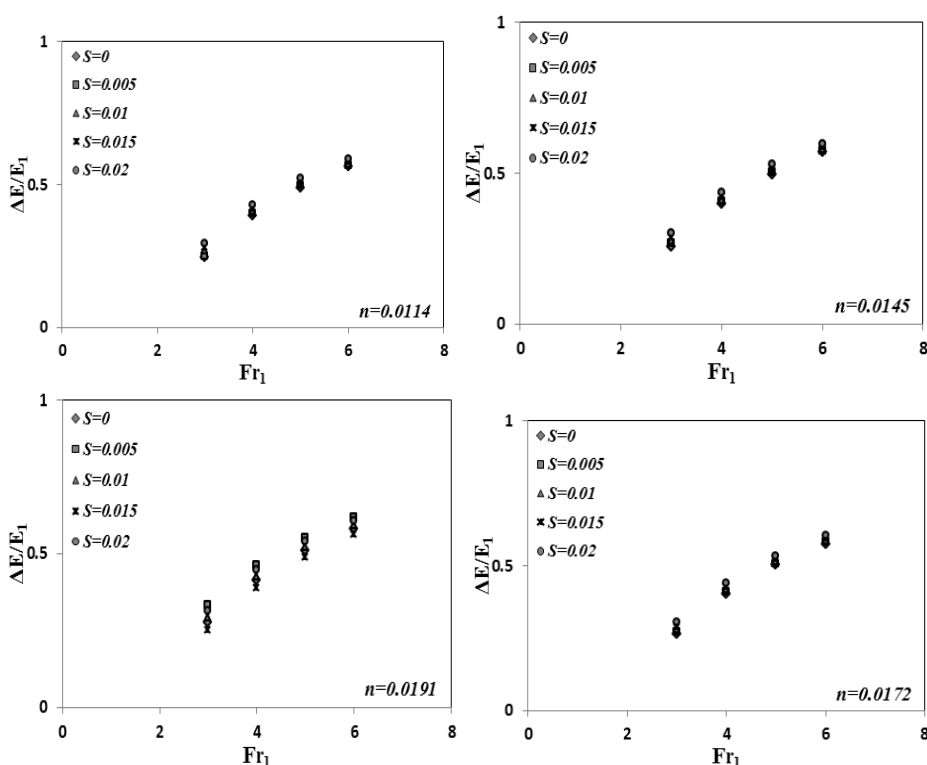
افت نسبی انرژی

افت نسبی انرژی جهش هیدرولیکی عبارتست از  $\Delta E/E_1$  که اختلاف انرژی مخصوص در ابتدا ( $E_1$ ) و انتهای جهش ( $E_2$ ) می‌باشد. در شکل ۷a تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه جهش با افزایش ضریب زبری نشان داده شده است. برای بهتر نشان دادن تغییرات، نسبت  $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه جهش در شکل ۷b رسم شده است.



شکل ۷- تغییرات افت نسبی انرژی جهش با افزایش زبری در شیب افقی





شکل ۸- تغییرات افت انرژی نسبی جهش با افزایش شیب معکوس به ازای ضرایب زبری مختلف

۱- با افزایش ضریب زبری بستر نسبت عمق ثانویه جهش به میزان ناچیزی کاهش می‌یابد، بطوریکه در حداکثر ضریب زبری و عدد فرود، این نسبت تا حدود ۵ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. با بررسی داده‌های آزمایشگاهی روی شیب معکوس نیز مشاهده گردید که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه کاهش می‌یابد. زبری بستر میزان کاهش را افزایش می‌دهد بطوریکه در حداکثر شیب معکوس و ضریب زبری این نسبت تا حدود ۱۲ درصد نسبت به جهش کلاسیک کاهش می‌یابد.

۲- طول جهش هیدرولیکی با افزایش ضریب زبری بستر کاهش یافت. میزان کاهش طول جهش به ازای حداکثر ضریب زبری تا حدود ۷ درصد می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی جهش روی شیب معکوس نشان داد که با افزایش شیب معکوس طول جهش کاهش می‌یابد به طوری که به ازای حداکثر عدد فرود و ضریب زبری تا حدود ۱۵ درصد کاهش در طول جهش مشاهده گردید. افزایش تنش برشی بستر

همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب معکوس افت نسبی انرژی جهش افزایش می‌یابد. به ازای حداکثر شیب و ضریب زبری، افت نسبی انرژی جهش تا حدود ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. در توجیه این تغییرات می‌توان گفت که با توجه به اینکه با افزایش شیب معکوس و همچنین افزایش ضریب زبری کف عمق ثانویه جهش کاهش می‌یابد و توجه به این موضوع که در جریان زیربحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیشتر است، با کاهش عمق ثانویه اختلاف انرژی در مقاطع اولیه و ثانویه جهش افزایش یافته و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد.

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر توأم زبری و شیب معکوس بر مشخصات جهش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول جهش و افت انرژی بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل خلاصه می‌گردد:

- length and energy loss. Journal of Canadian Civil Engineering. 37: 535-543.
- 7- Beirami M.K. Chamani M.R. 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. Journal of Hdraulic Engineering. 132(10): 1061-1068.
  - 8- Ead S.A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. Journal of Hydraulic Engineering. 128 (7): 656-663.
  - 9- Hughes W.C. and Flack J.E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. Journal of Hydraulic Engineering 110 (12): 1755-1771.
  - 10- Khadar M.H.A. and Rajagopal S. 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. Irrig. PWT. 29: 77-82.
  - 11- Leutheusser H.J. and Schiller E.J. 1975. Hydraulic jump in a rough channel. Water Power and Dam Construction. 27(5):186-191.
  - 12- McCorquodale J.A. and Mohamed M.S. 1994. Hydraulic jumps on adverse slope, Journal of Hydraulic Research. IAHR 32(1): 119-130.
  - 13- Pagliara S. Lotti I. and Palermo M. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. Journal of Hydro-environment Research 2: 29-38.
  - 14- Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. Trans. Eng. Inst. Canada, 11: 1-8.
  - 15- Rous H. 1938. Fluid mechanics for hydraulic engineers. McGraw Hill Book Company. New York.
  - 16- Silvester R. 1964. Hydraulic jump in all shapes or horizontal channels. Proceeding of the ASCE. Journal of Hydraulic Division. 90. 23-23.
  - 17- Stevens J.C. 1944. Discussion of the paper by Kindsvater. Hydraulic jump in sloping channel. Trans.of the ASCE 109:1125-1135.
- در اثر حضور زبری و تأثیر مؤلفه روبه پایین وزن سیال در شیب معکوس از عوامل اصلی این تغییرات است.
- ۳- با افزایش ضریب زبری افت انرژی نسبی جهش هیدرولیکی افزایش می‌یابد. میزان این تغییرات در اعداد فرود حداقل بیشتر می‌باشد به طوری که در حداقل عدد فرود، افت انرژی نسبی تا حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب معکوس افت انرژی نسبی جهش افزایش می‌یابد. به ازای حداکثر شیب معکوس و حداکثر ضریب زبری، افت انرژی نسبی جهش تا حدود ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.
- ### منابع
- ۱- ابریشمی ج. و اسماعیلی ک. ۱۳۷۶. پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله مثبت. امیر کبیر. ۱۹(۳۵): ۲۹۲-۲۷۶.
  - ۲- اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. ۱۳۷۹. پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی. استقلال. ۱۹(۲): ۹۷-۱۱۰.
  - ۳- حامدی م.ج. ۱۳۸۲. هیدرولیک مجاری باز. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. چاپ اول. جلد اول. ۶۶۰ صفحه.
  - ۴- حسینی م. و ابریشمی ج. ۱۳۸۵. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا. چاپ چهاردهم. ۶۱۳ صفحه.
  - 5- Abrishami J. and Saneie M. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. Iranian J. of Water Research Engineering. 2(1): 51-63.
  - 6- Beirami M.K. and Chamani M.R. 2010. Hydraulic jumps in sloping channels: roller