

## بررسی اثر غلظت و دانه بندی بار رسوبی بر پارامترهای پرش هیدرولیکی و الگوی رسوبگذاری در پایین دست آن

حامد نوذری<sup>۱\*</sup> و محمد حسین امید<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر غلظت و دانه بندی بار رسوبی بر پرش هیدرولیکی و نحوه تشکیل و گسترش امواج ماسه‌ای در پایین دست پرش هیدرولیکی که غالباً در حوضچه‌های آرامش دریچه‌های تخلیه رسوب در تأسیسات انحراف آب از رودخانه‌ها پدید می‌آید، بررسی شده است. آزمایش‌ها در یک حوضچه آرامش مستطیلی با بستر صاف به طول ۳ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر اجرا شد. در این آزمایش‌ها از ماسه‌های یکنواخت به قطرهای ۰/۶، ۱/۴، ۴/۱ و ۵/۶ میلیمتر با غلظت‌های مختلف بین ۰/۲ الی ۰/۶ و برای اعداد فرود بین ۳ تا ۹ استفاده شد. نتایج نشان داد که وجود بار رسوبی با دانه بندی‌های مختلف تغییر زیادی در مشخصات جهش هیدرولیکی ایجاد نمی‌کند و افزایش غلظت رسوبات نیز تأثیر چندانی بر روی این پارامترها ندارد. لیکن رسوبات ورودی به جریان، پس از عبور از ناحیه فوق بحرانی، در ناحیه زیر بحرانی ته نشین می‌شود و با تشکیل یک موج ماسه‌ای، همانند یک آبپایه انتهایی عمل می‌کند. این موج ماسه‌ای در کنترل موقعیت جهش مؤثر است و جهش را در محدوده حوضچه تثبیت می‌کند. موقعیت تشکیل این موج ماسه‌ای و زمان توسعه آن، تابعی از شرایط جریان و خصوصیات رسوب است. ارتفاع این موج ماسه‌ای بسیار نزدیک به ارتفاع آبپایه انتهایی است و مقدار آن را می‌توان به کمک انرژی مخصوص جریان ورودی پیش بینی کرد.

**واژه‌های کلیدی:** آبپایه انتهایی، بار رسوبی، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش و موج ماسه‌ای

**ارجاع:** نوذری ح. و امید م. ح. ۱۳۹. بررسی اثر غلظت و دانه بندی بار رسوبی بر پارامترهای پرش هیدرولیکی و الگوی رسوبگذاری در پایین دست آن. مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۰): ۱۶۷-۱۷۶.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران

\* نویسنده مسئول: [h.nozari@basu.ac.ir](mailto:h.nozari@basu.ac.ir), [hanozari@yahoo.com](mailto:hanozari@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷

## مقدمه

انتقال مواد رسوبی به صورت بار بستر که پدیده‌ای غالب در آبراهه‌های طبیعی است، در مواردی از جمله سیستم‌های انحراف آب، کانال‌ها و سازه‌های با بستر ثابت نیز وجود دارد. در حالی که نرخ ذرات انتقال یافته توسط جریان تابع مشخصات جریان می‌باشد، حضور ذرات نیز می‌تواند ساختار و خصوصیات جریان را تغییر دهد. تحقیق در مورد ارتباط متقابل جریان آب و رسوب در کانال‌های روباز به خوبی توسط اینشتین (۱۹۴۲)، میرپیترو و مولر (۱۹۴۸) و بگنولد (۱۹۶۶) انجام شده است. تحقیقات زیادی نیز در مورد مجاری با بستر ثابت توسط محققینی نظیر نواک و نالوری (۱۹۷۵ و ۱۹۸۴) و دیگران صورت گرفته است. در این مطالعات که غالباً در مورد جریان‌های یکنواخت زیر بحرانی صورت گرفته است، حرکت، میزان انتقال، رسوبگذاری و فرسایش ذرات رسوبی مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد جریان‌های فوق بحرانی و بویژه جریان‌های متغیر سریع که اهمیت زیادی در سازه‌های هیدرولیکی دارند، مطالعات زیادی انجام نشده است.

با بررسی‌های بعمل آمده مشخص شد که تاکنون فقط تحقیقات اندکی در مورد جریان‌های دوفازی اعم از فوق بحرانی و زیر بحرانی صورت گرفته است و شامل موارد زیر است:

ترنر (۱۹۷۳)، با استفاده از یک سطح شیبدار، جهش هیدرولیکی در جریان غلیظ را ایجاد کرد و با استفاده از عدد ریچاردسون که عکس مجذور عدد فرود است معادله ۱ را برای محاسبه نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه جهش در جریان‌های غلیظ بدست آورد.

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

$$R_i = \frac{g\Delta Cy}{U^2} \quad (2)$$

در این معادلات  $R_i$  عدد ریچاردسون،  $\Delta = (S_s - 1)$  که در آن  $S_s$  وزن مخصوص ذرات رسوبی می‌باشد،  $C$  غلظت رسوبات،  $y$  ضخامت جریان غلیظ،  $U$  میانگین سرعت جریان و  $g$  شتاب ثقل است.

گارسیا (۱۹۹۳)، مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی رفتار جریان غلیظ در یک کانال فرسایش پذیر متمرکز کرد و شباهت بین جهش هیدرولیکی همراه با نمک و جهش هیدرولیکی با جریان غلیظ در زیر جریان آب صاف را بررسی کرد. نتایج حاصل از تحقیقات این محقق نشان داد ساختار عمودی (توزیع غلظت و سرعت) جریان‌های نمکی و جریان‌های گل‌آلود با دانه‌های ریز ( $4 \mu m$ )، قبل و بعد از جهش شبیه به هم است. در فاصله‌های مساوی از قسمت ورودی جریان، مواد درشت دانه ضخامت ته نشینی بیشتری نسبت به مواد ریزدانه دارند. همچنین تنش برشی در پایین دست جهش کاهش می‌یابد و به همین دلیل ته نشینی رسوبات در پایین دست جهش افزایش می‌یابد.

برگرون و همکاران (۱۹۹۹)، با انجام آزمایش‌هایی اثر غلظت بار بستر بر فاکتور اصطکاکی و سرعت برشی را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش غلظت رسوب در جریان، باعث ایجاد یک کاهش کلی در سرعت متوسط جریان می‌شود که این کاهش سرعت با افزایش غلظت رسوب افزایش می‌یابد. در این تحقیق مشخص شد که غلظت‌های کم بار بستر فقط بخش نزدیک به کف جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب کاهش ناچیزی در سرعت متوسط می‌شود.

خولار و همکاران (۲۰۰۲)، در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر بار رسوبی بر روی مقاومت در مقابل جریان در آبراهه‌های آبرفتی را بررسی کردند. آنالیز این داده‌ها و دیگر داده‌های کانال‌های آبرفتی بعلاوه کارهایی که قبلاً در زمینه کانال‌های با بستر ثابت انجام شده بود نشان داد که اثر حضور بار معلق بر مقاومت در مقابل جریان در دو حالت (بستر ثابت و متحرک) یکسان نیست. در این مطالعه نشان داده شد که بار معلق با تأثیر بر آشفستگی جریان و توزیع سرعت، روی فاکتور اصطکاکی تأثیر می‌گذارد.

نوذری و همکاران (۱۳۸۳)، نشان دادند که وجود بار رسوبی تغییری در مشخصات جهش هیدرولیکی ایجاد نمی‌کند لیکن ته نشین شدن ذرات رسوبی در منطقه زیر بحرانی جهش منجر به تشکیل امواج ماسه‌ای

غلظت‌های مختلف و دانه‌بندی‌های متفاوت را داشت طراحی و ساخته شد.

در این مرحله برای بررسی اثر بار رسوبی روی پارامترهای جهش هیدرولیکی و نحوه تشکیل موج ماسه‌ای ناشی از آن، آزمایش‌هایی با تزریق ذرات ماسه و شن یکنواخت به قطرهای ۰/۶، ۱/۴، ۴/۱ و ۵/۶ میلیمتر به جریان انجام شد. در این سری از آزمایش‌ها، جهش‌هایی با اعداد فرود ۳، ۴/۵، ۶، ۷/۸ و ۹ تشکیل شد و در هر یک از این اعداد فرود از چهار غلظت رسوب بین ۰/۲ تا ۰/۶ درصد استفاده شد سپس مشخصات جهش، فاصله پیشانی موج ماسه‌ای تشکیل شده از دریچه ورودی و ارتفاع آن اندازه‌گیری شد. در اجرای هر آزمایش ابتدا دبی جریان ورودی به کانال تنظیم و موقعیت جهش هیدرولیکی به کمک دریچه انتهایی کانال تثبیت شد. در این مرحله عمق‌های ابتدا و انتهایی جهش به کمک دستگاه عمق سنج و طول جهش به وسیله متر اندازه‌گیری شد. پس از آن بار رسوبی مورد نظر به جریان تزریق و در همان لحظه عمق‌های ابتدایی و انتهایی و طول جهش مجدداً اندازه‌گیری شد.

برای محاسبه غلظت بار رسوبی از معادله ۳ استفاده شد.

$$C = \frac{Q_s}{Q} \quad (3)$$

که در آن  $Q$ ، دبی جریان و  $Q_s$ ، دبی حجمی بار بستر می‌باشد و به صورت معادله ۴ تعریف می‌شود.

$$Q_s = \frac{I}{\rho_s} \quad (4)$$

در این معادله  $I$ ، نرخ تزریق، برحسب  $kg/s$  و  $\rho_s$ ، چگالی ذرات، برحسب  $kg/m^3$  است.

شکل ۱ نمای کلی مخزن تأمین ارتفاع، حوضچه آرامش مستطیلی و مخزن تزریق رسوب را نشان می‌دهد.

می‌گردد که همانند آب پایه انتهایی در کنترل جهش هیدرولیکی موثر می‌باشند.

در تحقیق حاضر، اثر غلظت و دانه‌بندی ذرات رسوبی بر نحوه تشکیل موج ماسه‌ای و اثر آن بر جهش هیدرولیکی در جریان‌های با بار رسوبی بررسی شده است. با توجه به این که، در اغلب طرح‌های انحراف آب از رودخانه‌ها در کشور، مشکل رسوبگذاری در دهانه‌های آبگیر و لزوم رسوب زدایی از جلوی دریچه‌ها که غالباً با تخلیه آنها به حوضچه‌های آرامش صورت می‌گیرد وجود دارد، انجام این تحقیق ضروری به نظر می‌رسد و نتایج آن می‌تواند در طراحی اینگونه سازه‌ها مورد استفاده مهندسين قرار گیرد.

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از یک مدل آزمایشگاهی که در مرکز تحقیقات آب گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران ساخته شده بود استفاده شد. این مدل شامل یک مخزن آرام کننده مجهز به یک سرریز مستطیلی لبه تیز و یک مخزن تنظیم ارتفاع مجهز به یک دریچه تحتانی لبه تیز در بالادست، یک حوضچه آرامش مستطیلی به طول ۳ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر و یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۶ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر در پایین دست است. اندازه‌گیری دبی جریان عبوری به کمک سرریز لبه تیز که قبلاً به روش حجمی واسنجی شده بود صورت گرفت. دریچه کشویی لبه تیز از جنس پلاکسی گلاس به ارتفاع ۱/۵ متر و عرض ۰/۵ متر با ارتفاع بازشدگی ۳۰ میلیمتر در انتهای مخزن تنظیم ارتفاع و در قسمت ورودی کانال قرار داشت. ارتفاع آب پشت دریچه به کمک یک چاهک شیشه‌ای مدرج اندازه‌گیری شد. برای ایجاد جریان با بار رسوبی، یک دستگاه تزریق رسوب که توانایی تزریق یکنواخت با

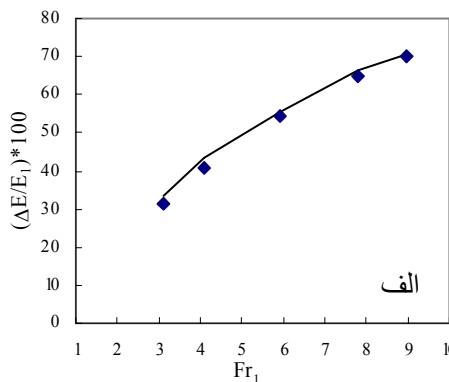
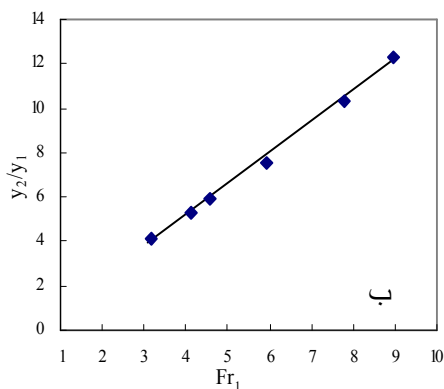
**نتایج و بحث**

**الف- اثر بار رسوبی بر مشخصات جهش**

در این قسمت، ابتدا یک سری آزمایش شاهد بدون تزریق رسوب صورت گرفت و مشخصات جهش از قبیل طول، نسبت عمق ثانویه و افت انرژی نسبی جهش تعیین شد. نتایج حاصله از این آزمایشها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

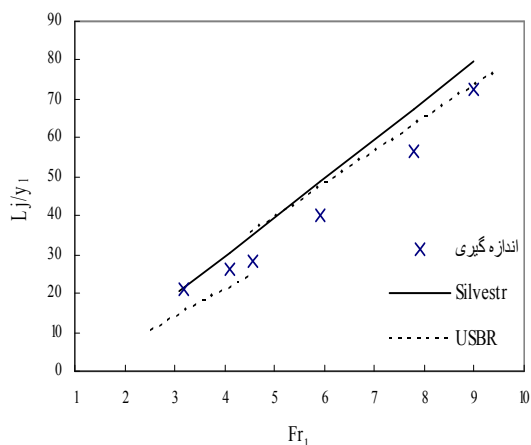


شکل ۱- نمای کلی مخزن و حوضچه آرامش مستطیلی



شکل ۲- (الف) درصد افت انرژی در برابر عدد فرود اولیه برای جریان آب صاف و (ب) نسبت عمق ثانویه در مقابل عدد فرود اولیه

**برای جریان آب صاف**

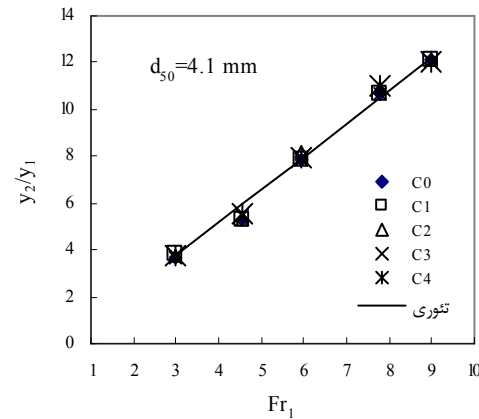
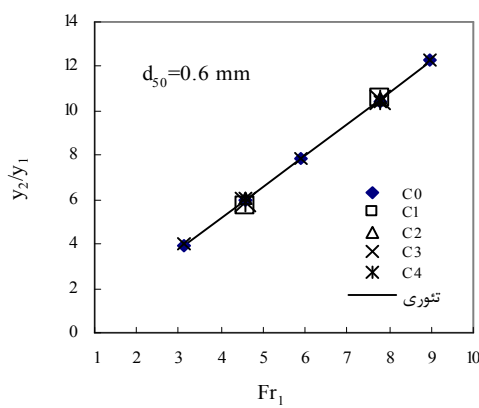


شکل ۳- طول جهش در مقابل  $Fr_1$  برای جریان آب صاف

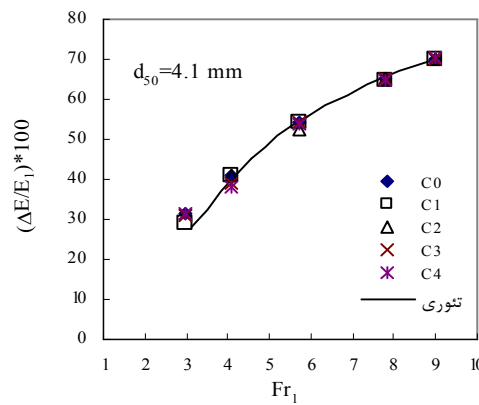
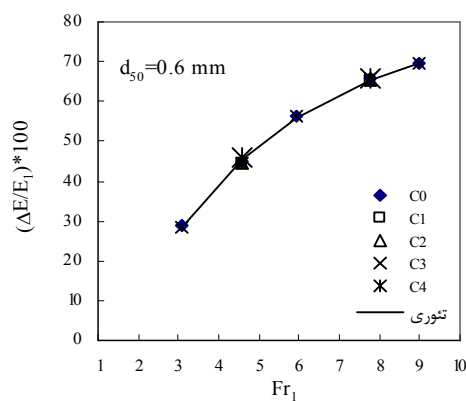
در شکل ۲، خطوط ممتد نشان‌دهنده نتایج تئوری است که از روابط تئوری نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی جهش بدست آمده‌اند. همانگونه که از این شکل‌ها مشخص است، نتایج حاصل آزمایشها با نتایج حاصل از روابط تئوری مطابقت دارند. در شکل ۳، علاوه بر طول جهش اندازه‌گیری شده، نتایج مربوط به طول پیشنهادی سیلوستر (۱۹۶۴) (خط ممتد) و نتایج مربوط به طول پیشنهادی USBR (خط چین) برای جهش در مقاطع مستطیلی نیز نشان داده شده است.

است در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. خطوط ممتد در این شکل‌ها نشان دهنده نتایج حاصل از روابط تئوری برای جریان بدون رسوب است. در این شکل‌ها علائم  $C_0$  تا  $C_4$  به ترتیب نشان دهنده غلظت‌های ۰ تا ۰/۶ است.

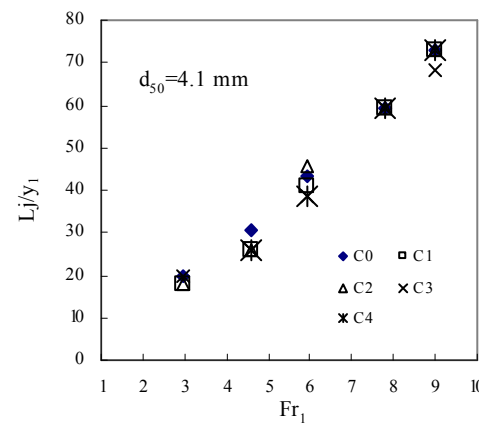
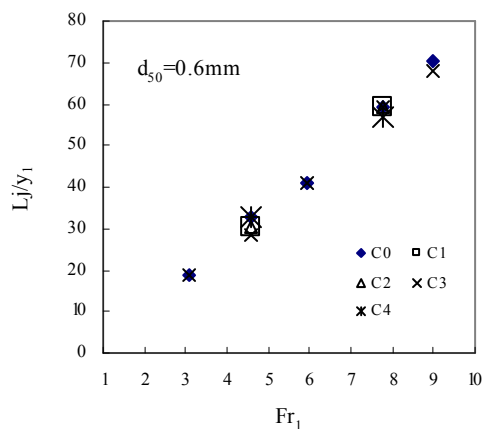
در این مرحله برای مقایسه روند تغییرات مشخصات جهش هیدرولیکی با آب دارای بار رسوبی، آزمایش‌هایی با افزایش مواد رسوبی یکنواخت به جریان انجام و مشخصات جهش اندازه‌گیری شد. نمونه‌هایی از نتایج این آزمایش‌ها که با غلظت‌های مختلف صورت گرفته



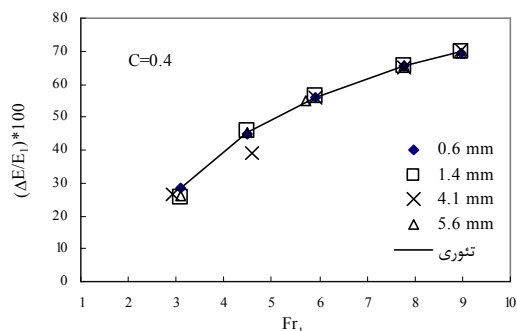
شکل ۴- نسبت عمق ثانویه در برابر اعداد فرود اولیه برای قطرهای مختلف و غلظت‌های متفاوت



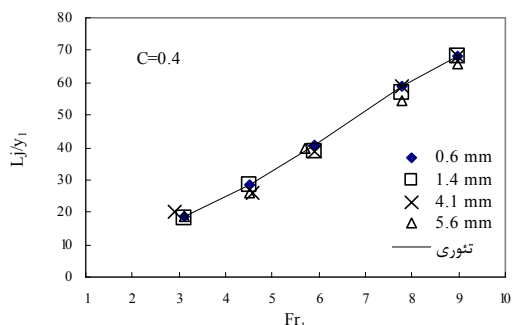
شکل ۵- میزان افت نسبی انرژی در برابر اعداد فرود اولیه برای قطرهای مختلف و غلظت‌های متفاوت



شکل ۶- نسبت طول جهش به عمق اولیه در برابر اعداد فرود اولیه برای قطرهای مختلف



شکل ۸- افت نسبی انرژی در مقابل اعداد فرود اولیه جهش با آب رسوبی برای قطرهای مختلف

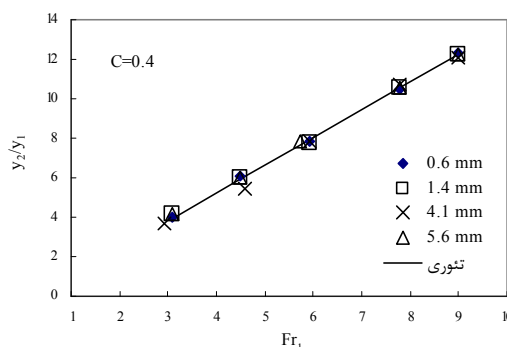


شکل ۹- نسبت طول جهش به عمق اولیه در مقابل اعداد فرود اولیه جهش برای قطرهای مختلف ذرات

#### ب- تشکیل موج ماسه‌ای

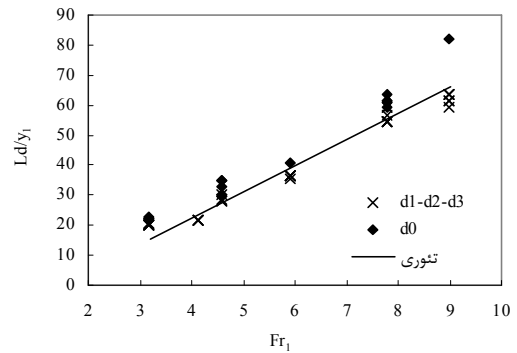
همانطور که گفته شد، در همه آزمایش‌ها پس از تزریق رسوب به جریان، ذرات رسوب از منطقه جریان فوق بحرانی عبور کرده و در ناحیه جریان زیر بحرانی ته‌نشین می‌شدند. فرونشست ذرات در این ناحیه، ایجاد می‌کرد یک موج ماسه‌ای ایستا که شبیه یک آب‌پایه انتهایی در کنترل موقعیت جهش در حوضچه آرامش موثر بود. فاصله پیشانی این موج ماسه‌ای از دریچه ورودی به شرایط هیدرولیکی جریان و عدد فرود اولیه بستگی داشت. شکل شماره ۱۰ فاصله پیشانی موج ماسه‌ای تشکیل شده از ذرات رسوب را نشان می‌دهد. خط نشان داده شده در این شکل، نسبت طول جهش به عمق اولیه در آب صاف را نشان می‌دهد.

توجه به این اشکال بی‌اثر بودن میزان غلظت بار رسوبی را بر نسبت عمق ثانویه، میزان افت نسبی انرژی و طول جهش نشان می‌دهد. در تمام آزمایش‌ها، هنگام تزریق رسوب به جریان، ابتدا جهش به سمت پایین دست حرکت می‌کرد و پس از ته‌نشینی رسوبات در ناحیه عمق ثانویه و تشکیل یک موج ماسه‌ای، شاهد حرکت جهش به سمت بالادست بودیم. در توجیه این پدیده، می‌توان گفت که در منطقه جریان فوق بحرانی و در ناحیه چرخشی جهش که جریان کاملاً آشفته است و دارای گردابه‌های زیادی است، در هنگام تزریق رسوب، ذرات ماسه با برخورد با گردابه‌ها موجب شکسته شدن آنها و کاهش آشفتگی جریان و در نتیجه کاهش افت انرژی می‌شوند. پس از عبور ذرات رسوب از ناحیه چرخشی، بدلیل کاهش انرژی جریان و کاهش تنش برشی، این ذرات در محل عمق ثانویه ته‌نشین شده و تجمع آنها در کف حوضچه یک موج ماسه‌ای ایستا را بوجود می‌آورد. این پدیده با نتایج خولار و همکاران (۲۰۰۲) در مورد اثر بار رسوبی بر مشخصات جریان مطابقت دارد. همچنین برای مشاهده اثر تغییر قطر ذرات رسوبی بر روی مشخصات جهش، نسبت عمق ثانویه، افت انرژی و طول جهش در مقابل اعداد فرود اولیه برای قطرهای مختلف و جریان با غلظت ۰/۴ در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها، خطوط ممتد نشان دهنده نتایج تئوری مربوط به آب صاف است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، افزایش قطر رسوبات نیز تأثیری بر روی مشخصات جهش ندارد.



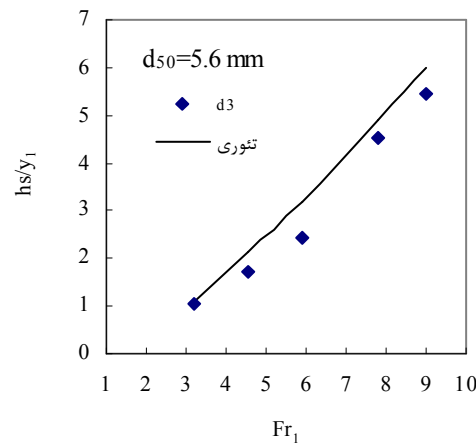
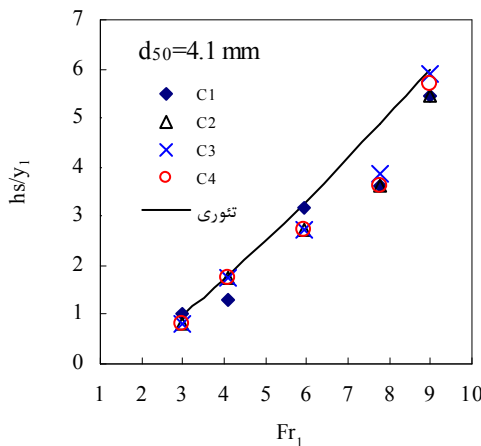
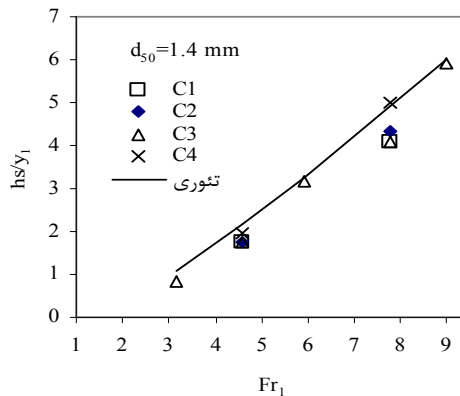
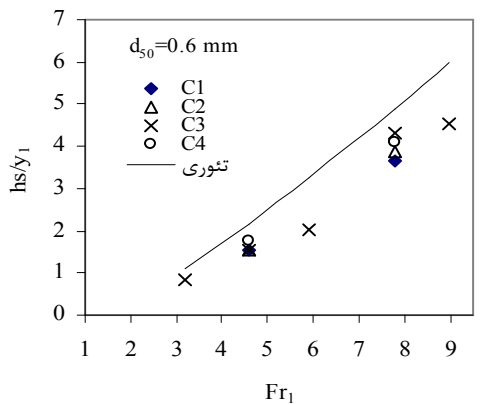
شکل ۷- نسبت عمق ثانویه در مقابل اعداد فرود اولیه جهش با آب رسوبی برای قطرهای مختلف

در هنگام تزریق رسوب به جریان، ارتفاع موج ماسه‌ای تشکیل شده بسته به شرایط جریان و نرخ تزریق رسوب با گذشت زمان افزایش می‌یافت. زمانی که این ارتفاع به مقدار مشخصی می‌رسید، جهش هیدرولیکی را از حالت آزاد خارج و به تدریج مستغرق می‌ساخت. در این سری از آزمایش‌ها میزان ارتفاع موج ماسه‌ای در لحظه‌ای که جهش از حالت آزاد خارج می‌شد، اندازه‌گیری شد (شکل ۱۱). خط ممتد در شکل ۱۱، مربوط به ارتفاع آب‌پایه انتهایی است که از روش تئوری بدست آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود به غیر از آزمایش مربوط به قطر ۰/۶ میلیمتر، مطابقت خوبی بین داده‌ها و خط تئوری وجود دارد.

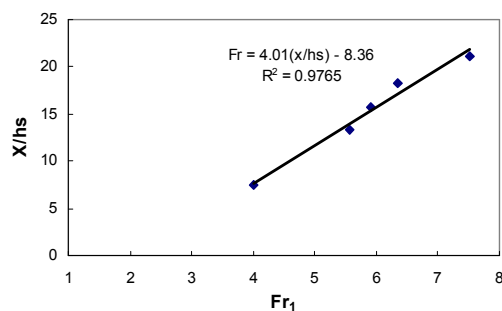


شکل ۱۰- فاصله پیشانی موج ماسه‌ای از دریچه در برابر عدد فرود اولیه

همانطور که ملاحظه می‌شود، فاصله پیشانی موج ماسه‌ای از دریچه ورودی جریان در اعداد فرود متفاوت و برای ذرات مختلف تقریباً برابر با طول پرش است. این موضوع نشان می‌دهد که ذرات رسوبی درست در انتهای پرش و در محل عمق ثانویه ته نشین شده‌اند.



شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع موج ماسه‌ای با اندازه متوسط ذرات مختلف در مقابل اعداد فرود اولیه جهش



شکل ۱۲- نسبت فاصله بین امواج به ارتفاع آنها در مقابل اعداد فرود اولیه

بطور کلی ضخامت موج ماسه‌ای تشکیل شده در کف کانال‌های با بستر ثابت به مشخصات هیدرولیکی جریان از قبیل عمق آب، سرعت جریان یا سرعت برشی و شیب بستر و مشخصات ذرات رسوب بستگی دارد. امید و همکاران (۲۰۰۲)، نشان دادند که ضخامت و سرعت حرکت امواج ماسه‌ای در کانال‌های با بستر ثابت را می‌توان به صورت توابعی از انرژی مخصوص جریان بالادست بدست آورد. این محققین با انجام آزمایش‌های متعدد در دامنه وسیعی از شرایط جریان و ذرات رسوبی، معادله ۵ را برای برآورد ارتفاع امواج ماسه‌ای در کانال‌های ثابت و جریان زیر بحرانی ارائه کردند.

$$\frac{h_s}{d_{50}} = 0.26 \left( \frac{E_s}{d_{50}} \right)^{0.93} \quad (5)$$

در این معادله که برای جریان‌های زیر بحرانی و کانال‌های با بستر ثابت ارائه شده است،  $h_s$  ضخامت رسوبات ته‌نشین شده در کانال،  $d_{50}$  قطر میانه ذرات و  $E_s$  انرژی جریان ورودی به کانال می‌باشد. با استفاده از مدل پیشنهادی امید و همکاران (۲۰۰۲)، داده‌های تحقیق حاضر ارزیابی شد.

در تحقیق حاضر شرایط جریان در بالادست فوق بحرانی و در پایین دست زیر بحرانی بوده و ذرات رسوب استفاده شده در آن از ماسه ریز تا شن درشت‌دانه است. نتایج حاصل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. خط ممتد در این شکل خط برازش شده از داده‌های این آزمایش‌ها با ضریب همبستگی ۰/۹۸ است. در این شکل، خط چین مربوط به معادله پیشنهادی امید و

در این آزمایش‌ها، پس از مستغرق شدن جهش، تزریق رسوب ادامه یافت و مشاهده شد که ارتفاع موج ماسه‌ای تشکیل شده، بسته به میزان غلظت تزریق افزایش، و به تبع آن میزان ارتفاع پایاب نیز افزایش می‌یافت. پس از اندازه‌گیری مشخصات این موج ماسه‌ای، تزریق رسوب متوقف شد. در این هنگام بدلیل افزایش توان حمل رسوب توسط جریان، موج ماسه‌ای تشکیل شده در کف حوضچه به سمت پایین دست حرکت می‌کرد. ابتدا سرعت این جابجایی به سمت پایین دست زیاد بود، ولی با گذشت زمان، ارتفاع موج ماسه‌ای کاهش می‌یافت و از سرعت انتقال آن به سمت پایین دست نیز کاسته می‌شد. هرچه قطر ذرات بزرگتر بود، سرعت حرکت موج ماسه‌ای به سمت پایین دست نیز کاهش می‌یافت. در مورد ذرات ریز دانه به قطر متوسط ۰/۶ میلی‌متر، موج ماسه‌ای به چندین تلماسه تقسیم می‌شد و تلماسه‌ها با سرعت بیشتری به سمت پایین دست حرکت می‌کردند. در یک سری از آزمایش‌ها، جهش هیدرولیکی ابتدا در فاصله دورتری از دریچه ورودی و در کانال پایین دست حوضچه ایجاد شد تا پس از تزریق رسوب، میزان جابجایی جهش بررسی شود. در اینگونه آزمایش‌ها نیز مشاهده شد که پس از تزریق رسوب و فرونشست ذرات در ناحیه زیر بحرانی، موج ماسه‌ای تشکیل شده و به مرور زمان تکامل می‌یابد. زمانیکه ارتفاع این موج ماسه‌ای به مقدار مشخصی می‌رسد، جهش هیدرولیکی را به سمت بالادست هدایت می‌کند و موجب ته نشین شدن ذرات و تشکیل موج جدید ماسه‌ای با همان مشخصات موج قبلی در موقعیت جدیدی که در بالا دست موج اولیه است می‌شود. در این سری از آزمایش‌ها فاصله بین موج‌های ماسه‌ای تشکیل شده اندازه‌گیری شد. شکل شماره ۱۲ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل X، فاصله بین دو موج ماسه‌ای و  $h_s$ ، ارتفاع موج می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود فاصله بین امواج تابع شرایط جریان بالادست است.



هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی و طول جهش هیدرولیکی ندارد.

- موقعیت جهش تشکیل شده در محل حوضچه آرامش، پس از تزریق رسوب تغییر می‌کند و ابتدا به سمت پایین دست منتقل می‌شود و پس از مدت زمان کوتاهی دوباره به طرف بالادست باز می‌گردد.

- موج ماسه‌ای ایستا که در ناحیه عمق ثانویه جهش تشکیل می‌شود، مانند یک آبپایه انتهایی عمل کرده و جهش را به سمت بالادست هدایت می‌کند. ارتفاع این موج ماسه‌ای تابع مشخصات جهش هیدرولیکی است.

- تداوم تزریق رسوب به جریان سبب تشکیل موجهای ماسه‌ای متعدد و مشابه با موج اولیه می‌گردد که با فاصله‌های مشخص به سمت بالا دست ادامه می‌یابند تا زمانی که جهش هیدرولیکی را به ابتدای دریچه رسانده و جهش را از حالت آزاد خارج و مستغرق کند. فاصله بین موجهای ماسه‌ای تشکیل شده تابع شرایط جریان و غلظت مواد رسوبی است.

- آزمایش‌ها نشان داد که قبل از مستغرق شدن جهش، بین انرژی مخصوص جریان بالادست و ضخامت ته نشینی رسوبات در کف حوضچه معادله‌ای برقرار است که این معادله از ضریب همبستگی خوبی برخوردار است.

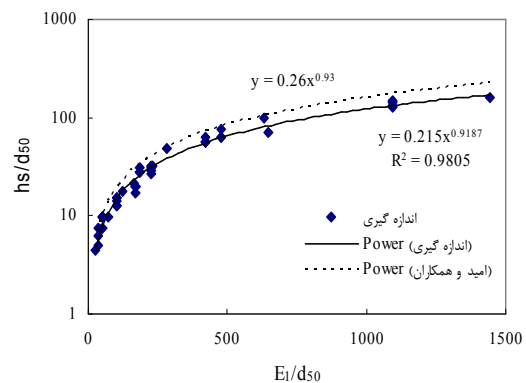
## منابع

- ۱- نوذری ح. امید م. ح. و کوچک زاده ص ۱۳۸۳. اثر بار بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستطیلی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۵ (۱۸): ۹۱-۱۰۲.
- 2- Bagnold R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics: U.S. Geol. Survey Prof. Paper: 422-I.
- 3- Bergeron N. E. and Carboneau, P. 1999. The Effect of Sediment Concentration on Bed Load roughness. J. Hydrological Processes. 13(16): 2583-2589
- 4- Chanson H. 1997. Air bubble entrainment in open channels: Flow structure and bubble size distributions. Int. J. Multiphase Flow. 23(1): 193-203

همکاران (۲۰۰۲) نیز نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نتایج حاصل از معادله فوق نزدیک است. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که بدلیل تشکیل موج ماسه‌ای در ناحیه جریان زیربحرانی و استفاده از انرژی مخصوص قبل از جهش که هنوز افت نداشته است، عملاً شرایط یکسانی برای جریان زیربحرانی و جریان متغییر سریع از نظر تشکیل و حرکت موج ماسه‌ای وجود دارد.

$$\frac{h_s}{d_{50}} = 0.215 \left( \frac{E_s}{d_{50}} \right)^{0.9187} \quad (6)$$

با توجه به شکل ۱۳، معادله بین ضخامت موج ماسه‌ای و انرژی بالادست کانال برای شرایطی که رژیم جریان بالادست فوق بحرانی می‌باشد به صورت زیر معرفی می‌شود.



شکل ۱۳- ضخامت موج ماسه‌ای در برابر انرژی بالادست کانال

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر بار رسوبی ذرات ماسه و شن یکنواخت به قطرهای ۰/۶، ۱/۴، ۴/۱ و ۵/۶ میلیمتر با غلظت‌های مختلف، بر مشخصات جهش هیدرولیکی در یک مطالعه آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که:

- بار رسوبی در محدوده دانه بندی و غلظت‌های آزمایش شده در این تحقیق، تأثیر زیادی بر مشخصات جهش

- 11- Novak P. and Nalluri C. 1975. Sediment transport in smooth fixed bed channels. Journal (I f Hydraulics Division. ASCE 101 (HY9): 1139-1154.
- 12- Novak P. and Nalluri C. 1984. Incipient motion of sediment particles over fixed beds. Journal of Hydraulic Research. 22(4): 191-197.
- 13- Omid M.H. Narayanan R. and Nalluri C. 2002. Erosion of a sediment deposits from a rigid rectangular channel by clear water. Journal of Water and Maritime Engineering. ICE 154(1).
- 14- Sylvester R. 1964. Hydraulic Jump in All Shapes of Horizontal Channels. Journal Hydraulics Division ASCE 90 (HY1): 23-55.
- 15- Turner J.S. 1973. Buoyancy Effects in Fluids: Cambridge, U.K. Cambridge University Press, 368.
- 5- Chanson H. and Brattberg T. 2000. Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump. Int. J. Multiphase Flow: 583-607.
- 6- Einstein H. A. 1942. Formula for the transportation of bed load. Trans. ASCE (107): 561-597.
- 7- Garcia M. H. 1993. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. J. Hyd. Eng.119(10):1094-1117.
- 8- Khullar N. K. Kothiyari U. C. and Ranga Raju K. G. 2002. The effect of suspended sediment on flow resistance, 5<sup>th</sup> International conference on hydro-science and engineering. September. 18-21, Warsaw, Poland.
- 9- Lyn D. A. 1991. Resistance in Flat-Bed Sediment-Laden Flows. J. Hyd. Eng. 117(1): 94-114.
- 10- Meyer-Peter E. and Muller R. 1948. Formulas for bed-load transport. In Proceedings of the 2nd conference: 39-45.