

## بررسی تأثیر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق

محسن نصرآبادی<sup>۱\*</sup> - محمد حسین امید<sup>۲</sup> - جواد فرهودی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۲۴

### چکیده

در تحقیق حاضر، تأثیر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق شامل نسبت استغراق، طول جریان غلطان، عمق استغراق روی دریچه، افت انرژی، توزیع سرعت و همچنین توزیع غلظت مورد بررسی قرار گرفته است. از یک فلووم آزمایشگاهی با عرض ۰/۲، ارتفاع ۰/۳ و طول ۷ متر جهت انجام آزمایش‌ها استفاده گردید. برای ایجاد جریان رسوبی از ذرات با قطر متوسط ۰/۰۳ و ۰/۱۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۶ در محدوده‌ی غلظت‌های ۰/۴۲۵ تا ۱۶/۱۵ درصد استفاده گردید. محدوده‌ی اعداد فرود در آزمایشات این تحقیق بین ۱/۹۳ تا ۴/۹۶ می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی در محدوده‌ی این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش غلظت رسوبات معلق طول جریان غلطان کاهش یافته و عمق استغراق روی دریچه و افت انرژی جهش تغییر نمی‌کنند. حضور رسوبات معلق باعث افزایش اندازه حرکت بین ذرات آب و رسوب شده و باعث کاهش تلاطم در جریان شده و در نتیجه از سرعت جریان می‌کاهند. همچنین تلاطم ایجاد شده باعث می‌شود تا توزیع غلظت در انتهای جهش تقریباً عمودی باشد.

**واژه های کلیدی:** جهش هیدرولیکی مستغرق، غلظت بار رسوبی معلق، طول جریان غلطان، توزیع سرعت

### مقدمه

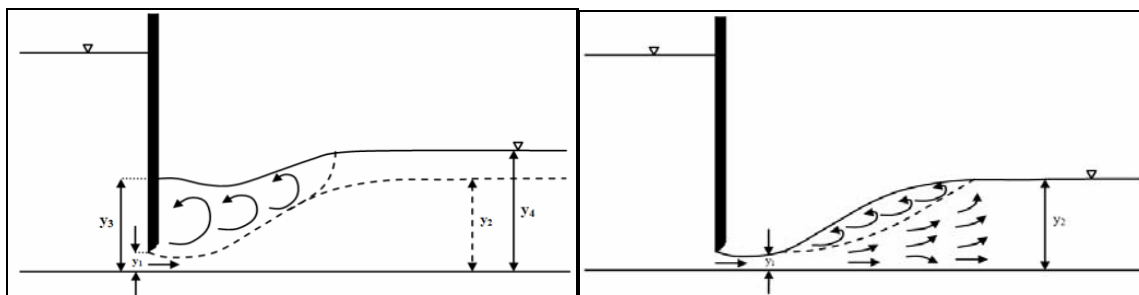
جریان خروجی مستغرق و یا جهش مستغرق گویند. جهش‌های آزاد و مستغرق به خاطر کاربردشان در استهلاک انرژی در پائین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها، سرریزها، شیب‌شکن‌ها و ... از پدیده‌های مهم در کانال‌های باز می‌باشد و به همین خاطر تا به حال مورد توجه دانشمندان و محققین زیادی قرار گرفته است (راجاراتنام (۱۹۶۷) و (۱۹۷۶)، لاندرو و رودی (۱۹۸۱) و (۱۹۸۳)، مک کورکودال (۱۹۸۶) و هاگر (۱۹۸۶)). اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌های این محققین مربوط به جهش در بسترهای صاف و زبر و همچنین آب صاف می‌باشد. اما در شرایطی که جریان دارای بار رسوبی معلق یا جریان غلیظ باشد، بسته به میزان دبی و سرعت جریان، غلظت و قطر ذرات رسوبی، توان حمل جریان و نیز اصطکاک داخلی ذرات آب و رسوب متفاوت خواهد بود. بنابراین غلظت بار رسوبی می‌تواند روی مشخصات جهش هیدرولیکی تأثیر گذاشته و این مشخصات را با شرایط آب صاف متفاوت سازد.

یکی از مهمترین اثرات رسوبات معلق بر روی جریان، تأثیر روی مقاومت در مقابل جریان و تلاطم جریان می‌باشد. تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده که غالباً به نتایج متفاوتی منجر شده است.

بطور کلی جهش‌های هیدرولیکی به دو دسته‌ی کلی آزاد<sup>۴</sup> و مستغرق<sup>۵</sup> تقسیم می‌شوند. در جهش هیدرولیکی آزاد اعماق اولیه و ثانویه‌ی و شکل جهش قابل رویت است. در صورتیکه در جهش هیدرولیکی مستغرق، جهش کاملاً در زیر آب قرار دارد (شکل ۱). در جهش آزاد، عمق پایاب<sup>۶</sup> (y<sub>4</sub>) به گونه‌ای است که تأثیری بر دبی خروجی از دریچه ندارد. حال اگر با ثابت ماندن دبی، عمق پایاب افزایش یابد، جهش هیدرولیکی به تدریج به سمت بالادست حرکت کرده تا زمانیکه شروع جهش به محل کوچکترین عمق جریان (y<sub>1</sub>) برسد. در این حالت هر مقدار افزایش اضافی در عمق پایاب باعث غرق شدن جهش گشته و چنانچه بخواهیم شدت جریان ثابت بماند می‌بایست مقدار عمق بالادست دریچه افزایش یابد که به این حالت

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: nasrabadi@ut.ac.ir)

4- Classic hydraulic jump  
5- Submerged hydraulic jump  
6- Tail water



شکل ۱- جهش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در پائین دست دریچه‌های کشویی

بر طبق مطالعات ونونی (۲۷)، اینشتین و شن (۱۱)، ونونی و نومیکوس (۲۶)، ایتاکورا و کیشی (۱۷) و سلینو و گرف (۶) با افزایش غلظت بار معلق مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان کاهش می‌یابد. از طرفی یانو و دایگو (۲۹)، تاگارت و همکاران (۲۵) و لین (۲۲) نشان دادند که با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان افزایش می‌یابد. اگرچه سیمونز و همکاران (۲۴)، کیکاوا و فوکوکا (۱۹)، پولیا (۲۳)، آرورا و همکاران (۱۹۸۶) نشان دادند که فاکتور اصطکاکی با افزایش غلظت بار رسوبی معلق هم افزایش و هم کاهش می‌یابد. خولار و همکاران (۱۸) نشان دادند که در کانال‌های با بستر متحرک، مقاومت هیدرولیکی با افزایش غلظت بار معلق کاهش می‌یابد و در کانال‌های با بستر زبر (بستر ثابت)، مقاومت در مقابل جریان با افزایش غلظت بار رسوبی معلق هم افزایش و هم کاهش می‌یابد. در مورد اثر رسوبات معلق بر تلاطم جریان، بوهلن (۵) نشان داد که تلاطم جریان در حضور رسوبات ریزدانه‌ی معلق افزایش می‌یابد. از طرف دیگر هینو (۱۶) نشان داد که افزایش غلظت بار رسوبی معلق می‌تواند باعث کاهش تلاطم جریان شود.

در مورد جهش هیدرولیکی در جریان‌های غلیظ و یا حاوی رسوبات معلق مطالعات محدودی انجام گرفته است. الیسون و ترنر (۱۲) پارامتری به نام عدد ریچاردسون<sup>۱</sup> بصورت زیر معرفی کردند:

بر طبق مطالعات ونونی (۲۷)، اینشتین و شن (۱۱)، ونونی و نومیکوس (۲۶)، ایتاکورا و کیشی (۱۷) و سلینو و گرف (۶) با افزایش غلظت بار معلق مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان کاهش می‌یابد. از طرفی یانو و دایگو (۲۹)، تاگارت و همکاران (۲۵) و لین (۲۲) نشان دادند که با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان افزایش می‌یابد. اگرچه سیمونز و همکاران (۲۴)، کیکاوا و فوکوکا (۱۹)، پولیا (۲۳)، آرورا و همکاران (۱۹۸۶) نشان دادند که فاکتور اصطکاکی با افزایش غلظت بار رسوبی معلق هم افزایش و هم کاهش می‌یابد. خولار و همکاران (۱۸) نشان دادند که در کانال‌های با بستر متحرک، مقاومت هیدرولیکی با افزایش غلظت بار معلق کاهش می‌یابد و در کانال‌های با بستر زبر (بستر ثابت)، مقاومت در مقابل جریان با افزایش غلظت بار رسوبی معلق هم افزایش و هم کاهش می‌یابد. در مورد اثر رسوبات معلق بر تلاطم جریان، بوهلن (۵) نشان داد که تلاطم جریان در حضور رسوبات ریزدانه‌ی معلق افزایش می‌یابد. از طرف دیگر هینو (۱۶) نشان داد که افزایش غلظت بار رسوبی معلق می‌تواند باعث کاهش تلاطم جریان شود.

در مورد جهش هیدرولیکی در جریان‌های غلیظ و یا حاوی رسوبات معلق مطالعات محدودی انجام گرفته است. الیسون و ترنر (۱۲) پارامتری به نام عدد ریچاردسون<sup>۱</sup> بصورت زیر معرفی کردند:

$$Ri = \frac{RCgy}{v^2} = \frac{1}{Fr^2} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $R = (\rho_s/\rho) - 1$  وزن مخصوص مستغرق رسوبات و  $C$  غلظت رسوبات و  $v$  سرعت متوسط جریان در عمق  $y$  می‌باشد. با استفاده از این پارامتر رابطه نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی آزاد در جریان‌های غلیظ و یا حاوی رسوبات معلق بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8Ri_1^{-1}}) \quad (2)$$

در صورتیکه  $Ri_1 > 1$  جریان گل‌آلود زیربحرانی و در صورتیکه

$$\frac{y_3}{y_1} = \left[ (1 + S_r)^2 \phi^2 - 2Fr_1^2 + \frac{2Fr_1^2}{(1 + S_r)\phi} \right]^{0.5} \quad (3)$$

1- Richardson number

نشان دادند زمانیکه عمق پایاب محدود باشد نیروی اندازه حرکت رو به جلوی جریان با افزایش فاصله از دریچه ورودی بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل جریان‌های برگشتی<sup>۴</sup> می‌باشد که دارای مومنتوم منفی بوده و باعث پائین افتادگی سطح آب در نزدیکی دریچه می‌شود. همچنین طول جریان برگشتی (ناحیه‌ی غلطان) در جهش هیدرولیکی مستغرق به دو پارامتر عمق پایاب و عدد فرود وابسته است. با تحلیل داده‌های توزیع سرعت در مقاطع مختلف نشان دادند که توزیع بدون بعد سرعت هم در ناحیه‌ی در حال توسعه و هم در ناحیه‌ی توسعه یافته شبیه به هم هستند.

عبدل آل (۱۳) با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم و با استفاده از روابط رگرسیونی معادلاتی برای عمق نسبی  $y_4/y_1$  طول نسبی جهش مستغرق  $L_j/y_1$  و افت نسبی جهش مستغرق  $E_1/E_1$  ارائه داد.

$$\frac{L_j}{y_1} = -0.862 + 3.59S_r + 5.28Fr_1 \quad (۸)$$

$$Y_0 = \frac{y_4}{y_1} = 0.178 + 0.839S_r + 0.701Fr_1 \quad (۹)$$

$$\frac{E_L}{E_1} = -5.026 - 1.225S_r + 19.44Fr_1 - 3.013Fr_1^{1.5} \quad (۱۰)$$

دی و سرکار (۷)، (۸) و (۹) مطالعات آزمایشگاهی روی میدان جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق تشکیل شده روی کانال‌های مستطیلی افقی با بستر صاف و زیر انجام دادند. اندازه‌گیری‌های آنان شامل توزیع سرعت در فواصل مختلف از بازشدگی دریچه، شدت تلاطم، توزیع تنش رینولدزی و تنش برشی بستر روی بسترهای صاف و زبر است. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که نرخ کاهش سرعت جت انتشار یافته از زیر دریچه با افزایش ارتفاع زبری‌ها افزایش می‌یابد. تنش برشی بستر نیز با افزایش فاصله از دریچه کاهش و با افزایش ارتفاع زبری افزایش می‌یابد. همچنین ضخامت لایه درونی توزیع سرعت افقی و توزیع شدت تلاطم با افزایش زبری بستر افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر نحوه‌ی تشکیل جهش هیدرولیکی مستغرق و مشخصات آن شامل عمق استغراق روی دریچه، طول جهش مستغرق، میزان استهلاک انرژی، توزیع سرعت و همچنین توزیع غلظت رسوبات بررسی شده است که در مجموع ۵۵ آزمایش در محدوده غلظت‌ها و اعداد فرود مختلف انجام گردید.

در این معادله،  $y_3$  عمق استغراق روی دریچه،  $y_1$  عمق جریان فوق-بحرانی،  $Fr_1$  عدد فرود مربوط به عمق  $y_1$ ،  $\phi$  نسبت عمق ثانویه در جهش آزاد و  $S$  فاکتور استغراق بوده که طبق روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\phi = \frac{y_2}{y_1} = 0.5(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (۴)$$

$$S_r = \frac{y_4 - y_2}{y_2} \quad (۵)$$

آنها همچنین روابط تجربی زیر را برای افت انرژی و طول جهش مستغرق ارائه دادند:

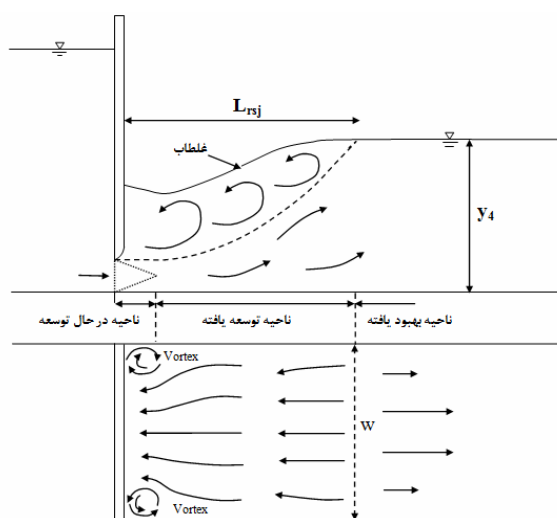
$$\frac{E_L}{E_1} = \left[ \left( \frac{y_3}{y_1} - (1 + S_r)\phi \right) + 0.5Fr_1^2 \left( 1 - \frac{1}{(1 + S_r)^2 \phi^2} \right) \right] \left[ \frac{y_3}{y_1} + \frac{Fr_1^2}{2} \right]^{-1} \quad (۶)$$

$$\frac{L_j}{y_2} = 4.9S_r + 6.1 \quad (۷)$$

در معادلات فوق، اعماق  $y_1$ ،  $y_2$ ،  $y_3$  و  $y_4$  در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. لانگ و همکاران (۲۱) به مطالعه‌ی جهش هیدرولیکی مستغرق در پائین دست یک دریچه‌ی کشویی در کانال مستطیلی با بستر صاف پرداختند. آنها مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق شامل نیمرخ سطح آب، توزیع سرعت و نوسانات آن، تنش برشی ناشی از تلاطم و شدت تلاطم را بررسی کردند و جهش مستغرق را از نظر توسعه‌ی جریان به سه قسمت: ناحیه‌ی در حال توسعه<sup>۱</sup>، ناحیه توسعه یافته<sup>۲</sup> و ناحیه‌ی بهبود یافته<sup>۳</sup> تقسیم کردند (شکل ۲). همچنین فاصله‌ی بین دریچه و انتهای ناحیه‌ی توسعه یافته را طول جهش هیدرولیکی مستغرق (طول جریان غلطان)  $L_{rsj}$  در نظر گرفتند. در این تقسیم‌بندی ناحیه‌ی در حال توسعه ۱۵٪ و ناحیه‌ی توسعه یافته ۸۵٪ طول جهش مستغرق را تشکیل می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که در ناحیه‌ی توسعه یافته‌ی جهش مستغرق خصوصیات جریان از جمله توزیع سرعت و نوسانات آن و شدت تلاطم جریان شبیه به هم می‌باشد. وو و راجاراتنام (۲۸) شباهت‌ها و تفاوت‌های جهش هیدرولیکی آزاد و جت دیواره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آنها جهش مستغرق را به عنوان مرحله‌ی انتقالی بین جهش آزاد و جت دیواره‌ای توصیف کردند.

اید و راجاراتنم (۱۰) خصوصیات جت دیواره‌ای را در عمق‌های پایاب کم بصورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها

- 1- Developing Region
- 2- Developed Region
- 3- Recovering Region



شکل ۲- جهش هیدرولیکی مستغرق

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور بررسی آزمایشگاهی اثر بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق، از یک مدل آزمایشگاهی که در مرکز تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده‌ی مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران ساخته شده بود، استفاده گردید. این مدل مشتمل بر یک مخزن تنظیم ارتفاع مجهز به یک دریچه‌ی تحتانی لبه‌تیز با باز شدگی ثابت ۲ سانتی‌متر در بالادست، یک کانال مستطیلی به طول ۷ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر و با شیب ثابت ۰/۰۲ می‌باشد. جنس بدنه و کف این کانال پلکسی گلاس می‌باشد. با توجه به اینکه جمع‌آوری رسوبات ریزدانه مشکل می‌باشد و همچنین به منظور ایجاد بار معلق در جریان به نحوی که در طول آزمایشات غلظت جریان ثابت بوده و سیستم در طول آزمایشات در حال تعادل باقی بماند، از یک سیستم گردشی جریان رسوبی استفاده گردید. این سیستم شامل یک دستگاه پمپ با ظرفیت اسمی ۲۵ لیتر در ثانیه، مخزن بالادست با حجم ۱۰۰۰ لیتر و مخزن پایین‌دست با حجم ۶۰۰ لیتر می‌باشد. دبی جریان در این تحقیق توسط روزنه‌ی تحت فشار<sup>۱</sup> که قبلاً به روش حجمی واسنجی شده بود اندازه‌گیری شد. جریان ورودی به سیستم نیز به کمک یک شیر فلکه‌ی کشویی قابل تنظیم بود. از یک دریچه‌ی کشویی در فاصله‌ی ۴ متری از ابتدای کانال جهت تنظیم موقعیت جهش استفاده گردید. طرح کلی مجموعه کانال و متعلقات آن در شکل (۳) رسم شده است. مواد رسوبی مورد استفاده در این تحقیق شامل دو نوع ماسه‌ی

استاندارد آزمایشگاهی با وزن مخصوص ۲/۶ و قطر متوسط ۰/۰۳ میلی‌متر و ۰/۱۵ میلی‌متر می‌باشند که در آزمایشگاه دانه‌بندی شده‌اند. عمل تزریق رسوب به صورت وزنی انجام گردید. به عنوان مثال برای ایجاد غلظت ۱٪، به مقدار ۱۰ کیلوگرم رسوب به ۱۰۰۰ لیتر آب موجود در سیستم گردشی جریان رسوبی اضافه گردید.

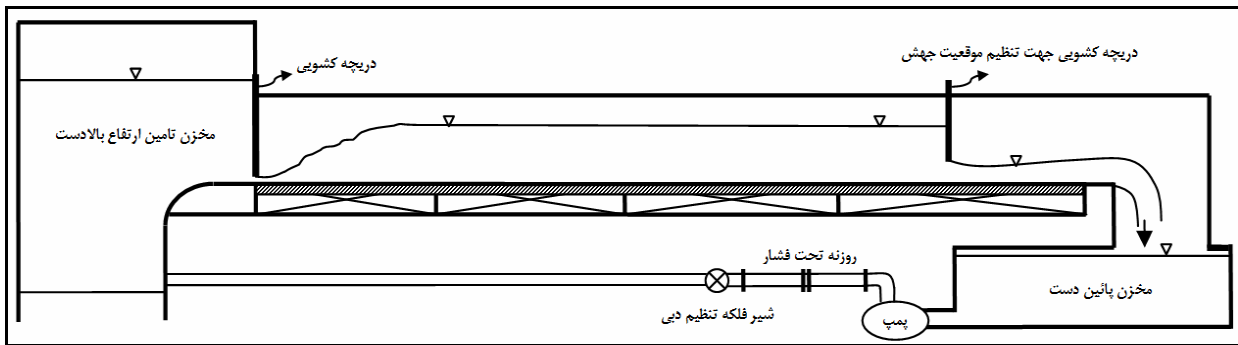
اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق شامل اندازه‌گیری عمق پایاب، عمق استغراق روی دریچه، طول جهش، توزیع سرعت در فواصل مختلف از بازشدگی دریچه و توزیع غلظت رسوبات در انتهای جهش مستغرق می‌باشد. جهت افزایش دقت، اعماق موردنظر هم توسط عمق‌سنج<sup>۲</sup> و هم توسط پیژومترهایی که در کف کانال نصب شده بود اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری سرعت افقی در اعماق مختلف از کف از یک لوله‌ی پیتوت<sup>۳</sup> استفاده گردید که محل اندازه‌گیری این سرعت‌ها در محور مرکزی کانال و در سه مقطع در طول جهش مستغرق بود. غلظت جریان نیز توسط یک سری لوله‌های اشکل شیشه‌ای که در ارتفاع‌های ۰، ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۱ و ۱۵ سانتی‌متری از کف کانال تثبیت شده بودند، اندازه‌گیری می‌شد. نمونه‌های موردنظر توسط شیلنگ‌های پلاستیکی که به انتهای این لوله‌ها متصل شده بودند جمع‌آوری می‌شدند. جهت اندازه‌گیری غلظت نمونه‌ها نیز از روش خشک کردن استفاده گردید.

### نحوه انجام آزمایش‌ها

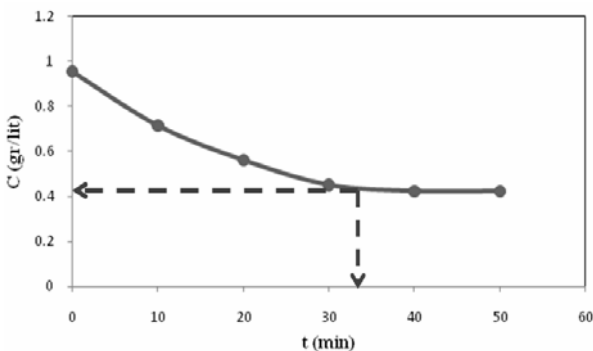
همانطور که گفته شد هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق می‌باشد.

2- Point gage  
3- Pitot tube

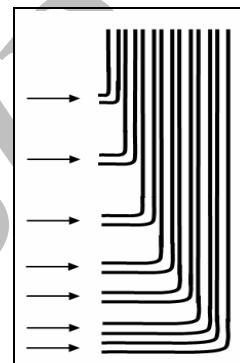
1- Orifice meter



شکل ۳- طرح کلی کانال آزمایشگاهی و متعلقات آن



نمودار ۱- تعیین زمان به تعادل رسیدن غلظت رسوبات



شکل ۴- ابزار اندازه گیری توزیع غلظت

همانطور که در نمودار نشان داده شده است، زمان به تعادل رسیدن غلظت ۳۳ دقیقه و غلظت واقعی جریان نیز ۰/۴۲۵ گرم بر لیتر است. به همین منظور در هر آزمایش پس از تزریق رسوب و به تعادل رسیدن غلظت سیستم، در یک چهارم انتهائی کانال نمونه‌ای به منظور تعیین غلظت واقعی جریان در سیستم گرفته می‌شد. به دلیل اینکه برای محاسبه‌ی برخی از پارامترها (مانند نسبت استغراق) نیاز به مشخصات جهش هیدرولیکی آزاد نیز می‌باشد، ابتدا جهش را بصورت آزاد توسعه داده و پارامترهایی از قبیل عمق اولیه، عمق ثانویه اندازه‌گیری می‌شد. سپس با مانور دریچه‌ی تنظیم جهش، عمق پایاب به میزان موردنظر افزایش داده می‌شد. در این تحقیق به منظور مشاهده‌ی میزان تغییرات مشخصات جهش مستغرق با افزایش غلظت، عمق پایاب در هر عدد فرود، یکسان در نظر گرفته شد. پس از تثبیت عمق پایاب مشخصات جهش مستغرق شامل طول جهش مستغرق، عمق استغراق روی دریچه، توزیع سرعت در سه مقطع داخل جهش و در نهایت توزیع غلظت در انتهای جهش مستغرق اندازه‌گیری می‌شد. برای اندازه‌گیری طول جهش از معیار لانگ و همکاران (۲۱) استفاده گردید که با اندازه‌گیری فاصله‌ی بین دریچه و انتهای جریان‌های برگشتی (انتهای ناحیه‌ی توسعه یافته)، طول جهش مستغرق بدست می‌آید.

به منظور مقایسه‌ی نتایج و قبل از شروع آزمایشات اصلی، یک سری آزمایشات مربوط به آب صاف و بدون تزریق رسوب انجام گردید. پس از انجام آزمایشات مربوط به آب صاف، آزمایشات با تزریق رسوب انجام گرفت. هدف از انجام این آزمایشات بررسی اثر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق می‌باشد. جهت رسیدن به این هدف، در آزمایشات از دو نوع ماسه‌ی آزمایشگاهی به قطرهای ۰/۱۵ و ۰/۰۳ میلی‌متر استفاده گردید که در غلظت‌های متفاوت ۱ تا ۱۰ درصد به جریان تزریق شده است. لازم به ذکر است که محدوده‌ی اعداد فرود در تمامی آزمایشات بین ۱/۹۳ تا ۴/۹۶ تنظیم شده است. در هر آزمایش ابتدا جریان ورودی به سیستم به میزان موردنظر برقرار و سپس جهت ایجاد غلظت مورد نظر، تزریق رسوب بصورت وزنی انجام می‌شد. پس از تزریق رسوب به جریان، سیستم تقریباً ۰/۵ تا ۱ ساعت (بسته به میزان غلظت رسوب) کار می‌کرد تا به تعادل برسد. برای بدست آوردن زمان به تعادل رسیدن غلظت رسوبات در سیستم، در یکی از آزمایشات، پس از تزریق رسوب و در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه از مکانی از سیستم که در آنجا اختلاط بطور کامل صورت می‌گرفت (بعد از دریچه‌ی تنظیم موقعیت جهش) نمونه‌هایی گرفته شد که نتایج آن در نمودار زیر آورده شده است:

## نتایج و بحث

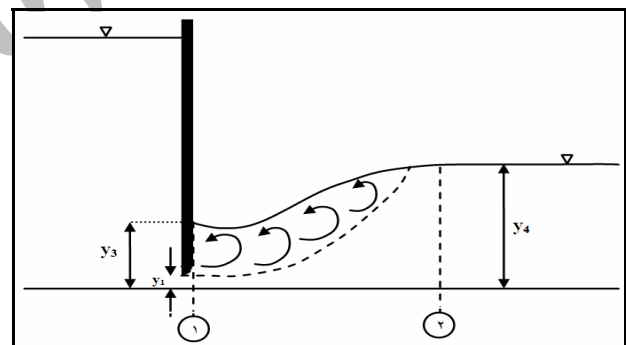
جهت بررسی صحت انجام آزمایش‌ها و همچنین جهت مقایسه‌ی نتایج، ابتدا آزمایشات مربوط به آب صاف و بدون تزریق رسوب انجام گردید. سپس با تزریق رسوب به میزان موردنظر، غلظت‌های ۱ تا ۱۰٪ ایجاد گردید. در زیر نتایج بررسی اثر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق شامل عمق استغراق روی دریاچه، افت انرژی، طول جهش مستغرق، توزیع سرعت و همچنین توزیع غلظت آورده شده است.

### عمق استغراق روی دریاچه

چاو (۱۹۵۹) با بکار بردن رابطه‌ی پیوستگی و مومنوم بین مقاطع ۱ و ۲ (شکل ۵) رابطه‌ی تئوری زیر را برای محاسبه‌ی عمق استغراق روی دریاچه ارائه داد:

$$y_3 = y_4 \left( 1 + 2Fr_4^2 \left( 1 - \frac{y_4}{y_1} \right) \right)^{0.5} \quad (11)$$

که در این رابطه، اعماق  $y_1$ ،  $y_3$  و  $y_4$  در شکل (۵) نشان داده شده‌اند و  $Fr_4$  عدد فرود مربوط به عمق  $y_4$  می‌باشد.



شکل ۵

در نمودار (۲) نتایج اندازه‌گیری عمق استغراق روی دریاچه برای آب صاف و همچنین با افزایش غلظت رسوبات نشان داده شده است. در این شکل در کنار نتایج آزمایشگاهی، خط ممتد نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی تئوری چاو (۱۹۵۹) می‌باشد. همچنین  $Fr_j$  عدد فرود مربوط به ارتفاع جت انتشار یافته (بازشدگی دریاچه) می‌باشد.

همچنین در نمودار (۳) داده‌های آزمایشگاهی با رابطه‌ی تجربی گوینداراو و راجاراتنام (۱۵) مقایسه شده است. (معادله ۳) توجه به نمودارهای فوق نشان‌دهنده‌ی سازگاری داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده با روابط تجربی و تئوری می‌باشد. همچنین در این نمودارها مشاهده می‌شود که غلظت‌های مختلف بار رسوبی بر عمق استغراق روی دریاچه تاثیر قابل توجهی ندارد.

### افت انرژی نسبی

افت انرژی نسبی ناشی از جهش  $\Delta E/E_1$  می‌باشد که در آن  $\Delta E$  تفاوت بین انرژی مخصوص ابتدا  $E_1$  (مقطع ۱ در شکل ۵) و انتهای جهش  $E_2$  (مقطع ۲ در شکل ۵) می‌باشد. در نتیجه افت انرژی نسبی در جهش هیدرولیکی مستغرق بصورت زیر محاسبه گردید.

$$E_1 = y_3 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (12)$$

$$E_2 = y_4 + \frac{v_4^2}{2g} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \quad (14)$$

در نمودار زیر تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد فرود جت به ازای غلظت‌های مختلف بار رسوبی معلق رسم شده است. در کنار نتایج آزمایشگاهی، خط ممتد نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی تجربی گوینداراو و راجاراتنام (۱۵) می‌باشد.

در نمودارهای فوق نیز مشاهده می‌گردد که با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، افت انرژی نسبی جهش مستغرق تغییر نخواهد کرد. که این می‌تواند ناشی از تغییر نکردن عمق استغراق روی دریاچه با افزایش غلظت باشد.

### طول جهش مستغرق

همانطور که گفته شد، در این تحقیق، جهت اندازه‌گیری طول جهش از معیار لانگ و همکاران (۲۱) استفاده گردید. بطوریکه فاصله‌ی بین دریاچه تا انتهای ناحیه‌ی توسعه یافته (انتهای جریان-های برگشتی) به عنوان طول جهش در نظر گرفته شده است. در نمودار زیر تغییرات طول نسبی جهش مستغرق در مقابل عدد فرود جت نشان داده شده است. در این نمودارها خط ممتد نشان‌دهنده داده‌های مربوط به آب صاف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت بار رسوبی معلق طول جهش مستغرق کاهش می‌یابد. بطوریکه به ازای تمامی اعداد فرود و در غلظت‌های حداکثر، میزان کاهش طول جهش مستغرق ۷/۵٪ و ۱۲٪ برای ذرات با قطر ۰/۱۵ و ۰/۰۳ میلی‌متر می‌باشد.

همانطور که گفته شد، گوینداراو و راجاراتنام (۱۵) رابطه تجربی زیر را برای تعیین طول جهش مستغرق ارائه دادند:

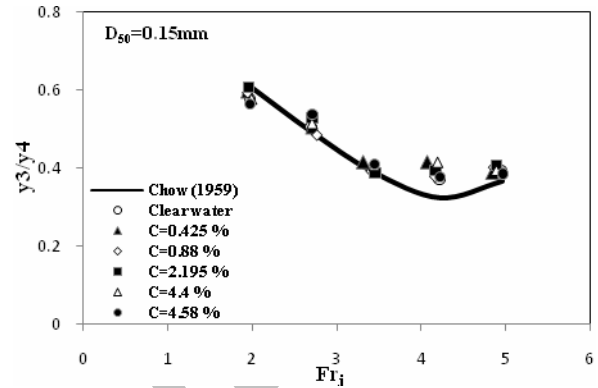
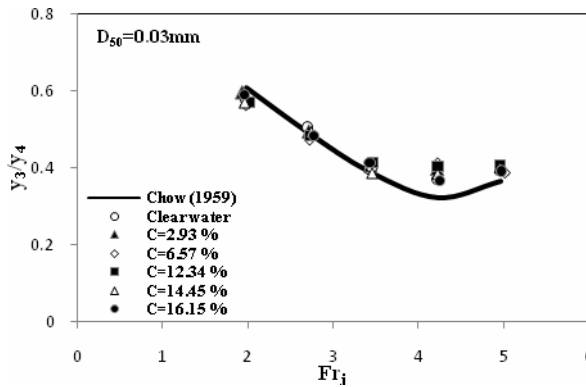
$$\frac{L_j}{y_2} = 4.9S_r + 6.1 \quad (15)$$

که در آن  $y_2$  عمق ثانویه مربوط به جهش آزاد و  $S_r$  نسبت استغراق بوده که برابر با اختلاف نسبی عمق پایاب در حالت مستغرق و عمق ثانویه‌ی جهش آزاد می‌باشد:

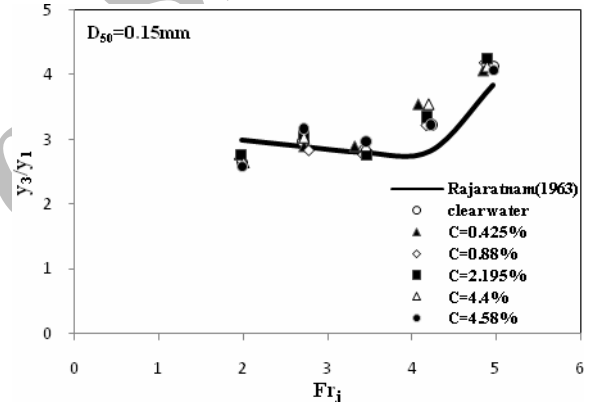
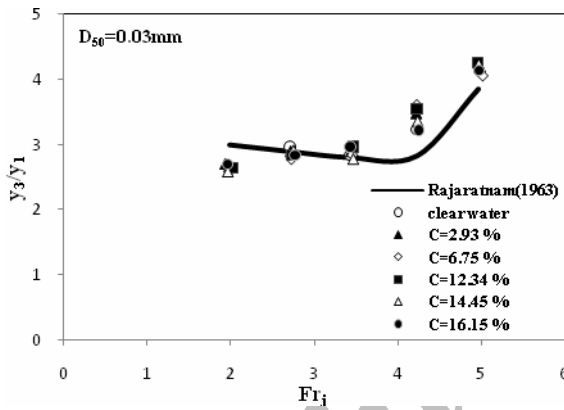
داده و اعماق اولیه و ثانویه جهش آزاد اندازه گیری می شد که نتایج آن در نمودار زیر آورده شده است.

$$S_r = \frac{y_4 - y_2}{y_2} \quad (16)$$

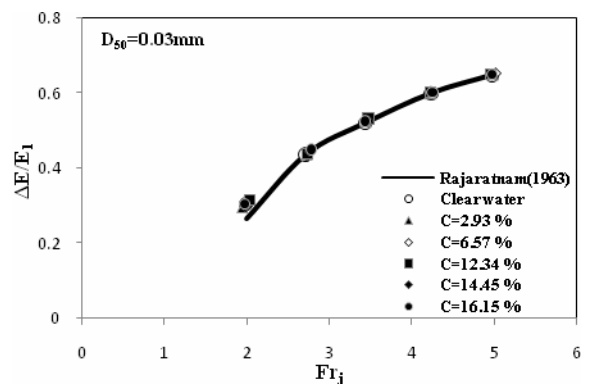
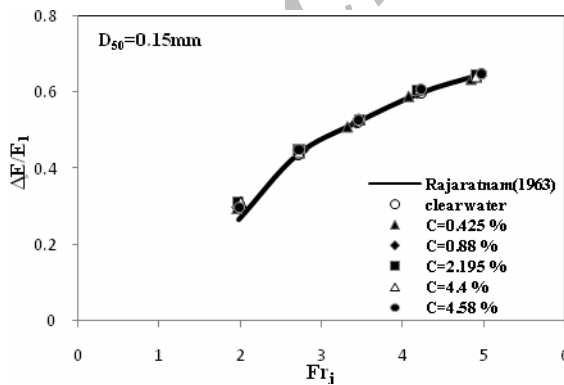
قبل از تشکیل جهش مستغرق، ابتدا جهش بصورت آزاد توسعه



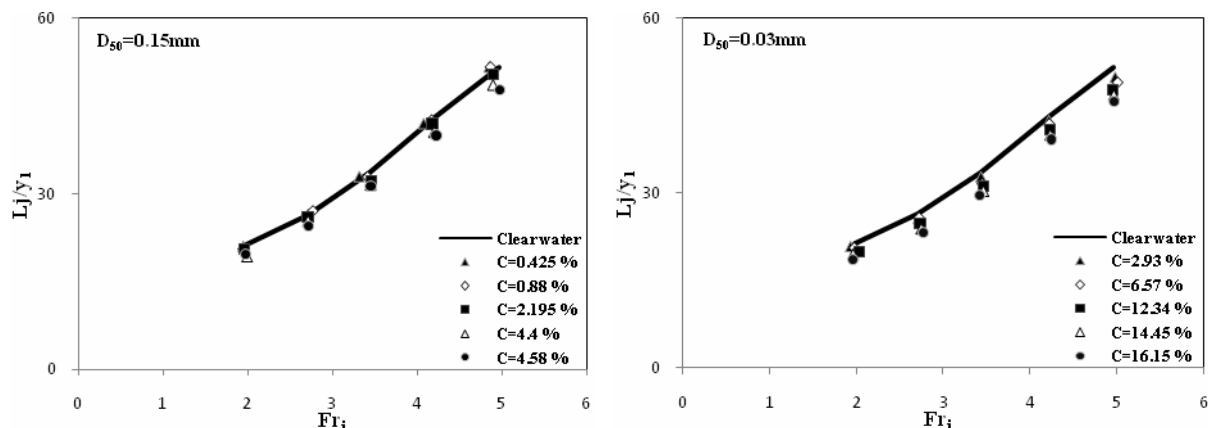
نمودار ۲- تغییرات  $y_3/y_4$  در مقابل عدد فرود جت  $Fr_j$



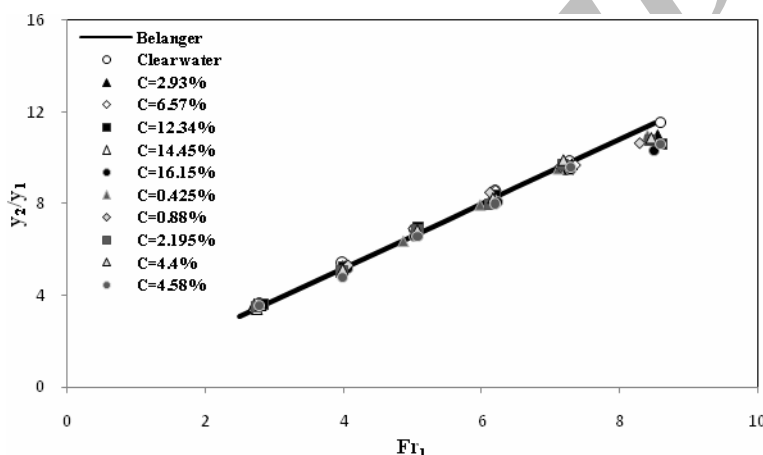
نمودار ۳- تغییرات  $y_3/y_1$  در مقابل عدد فرود جت  $Fr_j$



نمودار ۴- تغییرات افت انرژی نسبی  $\Delta E/E_1$  در مقابل عدد فرود جت  $Fr_j$



نمودار ۵- تغییرات طول نسبی جهش مستغرق  $L_j/y_1$  در مقابل عدد فرود جت  $Fr_1$



نمودار ۶- تغییرات نسبت عمق ثانویه جهش آزاد  $y_2/y_1$  در مقابل عدد فرود  $Fr_1$  به ازای غلظت‌های مختلف

ریچاردسون تغییرات طول جهش مستغرق را بهتر از عدد فرود نشان می‌دهد. که این می‌تواند به دلیل وجود پارامتر غلظت در رابطه‌ی عدد ریچاردسون باشد.

#### توزیع سرعت

در این تحقیق، در بعضی از آزمایش‌ها توزیع سرعت با اندازه‌گیری سرعت در اعماق مختلف جریان و در سه مقطع در طول جهش و به ازای غلظت‌های مختلف بدست آمد. به منظور اندازه‌گیری سرعت در اعماق مختلف، از لوله پیتو استفاده گردید. در نمودارهای زیر نمونه‌های از این توزیع‌ها آورده شده است.

در این نمودارها x فاصله از بازشدگی دریچه می‌باشد. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که سرعت ماکزیمم در هر مقطع با افزایش فاصله از دریچه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت رسوبات، نرخ کاهش سرعت جت انتشار یافته از زیر دریچه افزایش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش سرعت ماکزیمم مربوط

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، نسبت عمق ثانویه جهش آزاد به ازای اعداد فرود بیشتر از ۷ کاهش می‌یابد.

در نمودار زیر تغییرات طول نسبی جهش مستغرق  $L_j/y_2$  در مقابل عدد فرود جت به ازای غلظت‌های مختلف بار رسوبی معلق رسم شده است. در این نمودار خط ممتد نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی گویندار او و راجاراتنام (۱۵) می‌باشد. اختلاف موجود بین رابطه‌ی تئوری و نتایج آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از تفاوت در معیار اندازه‌گیری طول جهش مستغرق باشد.

در این نمودار نیز مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، طول جهش مستغرق کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان برای بهتر نشان دادن تغییرات طول جهش با افزایش غلظت، از عدد ریچاردسون به جای عدد فرود استفاده کرد.

در این نمودار  $R_{ij}$  عدد ریچاردسون جت انتشار یافته از زیر دریچه (بازشدگی دریچه) می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، عدد



### توزیع غلظت

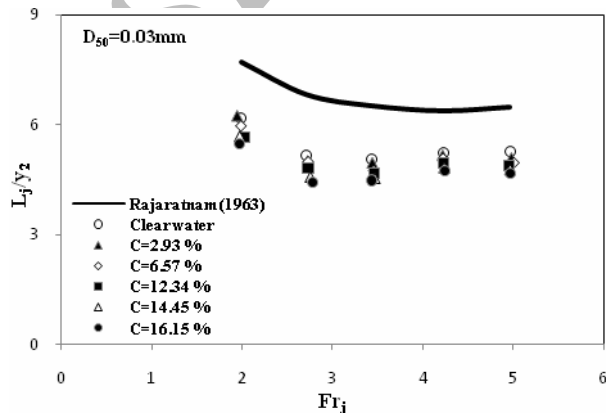
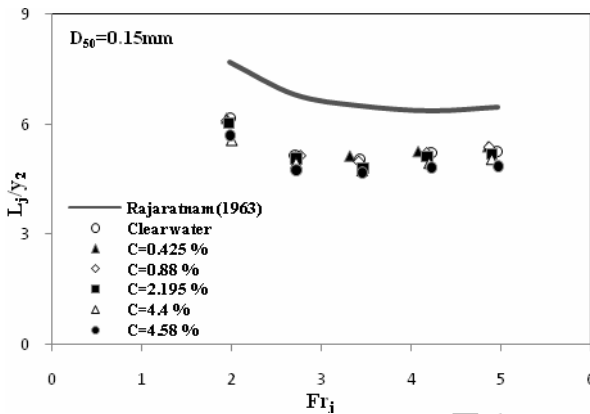
توزیع غلظت رسوبات معلق با اندازه‌گیری مقدار غلظت در فواصل مختلف از کف کانال و در انتهای جهش مستغرق بدست آمد. در زیر نمونه‌هایی از این توزیع‌ها آورده شده است:

در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که توزیع غلظت در انتهای جهش تقریباً عمودی خواهد بود. اما در غلظت‌های حداکثر رسوبات با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر، توزیع غلظت عمودی نخواهد بود. در توجیه این تغییرات می‌توان گفت که تلاطم ناشی از جهش مستغرق باعث می‌شود که توزیع غلظت رسوبات معلق عمودی باشد. در جریان‌های رسوبی با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر، سرعت ته‌نشینی ذرات بیشتر از سرعت ناشی از نوسانات رو به بالای تلاطم خواهد شد و توزیع غلظت عمودی نخواهد بود.

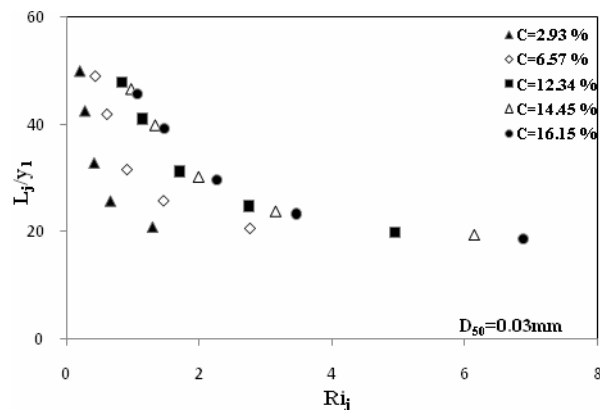
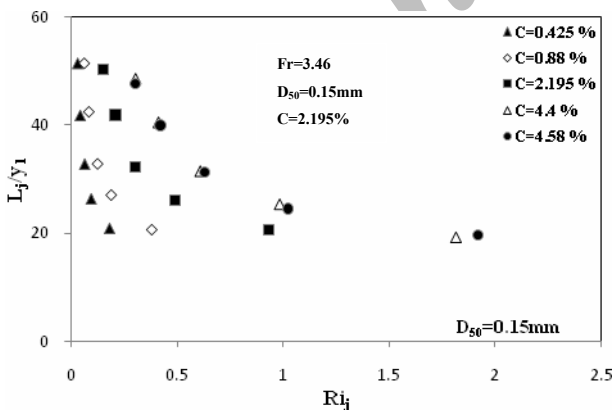
به مقطع سوم (انتهای جهش) می‌باشد. بطوریکه در غلظت‌های بیشتر از ۸٪، سرعت ماکزیمم تا حدود ۱۰٪ و ۱۷٪ به ازای قطرهای ۰/۱۵ و ۰/۰۳ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در توجیه این تغییرات می‌توان گفت که افزایش گرانشی آب و تاثیر آن بر روی نیروی مومنتوم می‌تواند عامل اصلی باشد، بطوریکه باعث کاهش سرعت جریان خواهند شد.

همچنین در شکل زیر توزیع بدون بعد سرعت رسم شده است. در این نمودار  $y$  ارتفاع از کف،  $y_{max}$  حداکثر ارتفاع در هر مقطع،  $v$  سرعت افقی در ارتفاع  $y$  و  $v_{max}$  حداکثر سرعت در هر مقطع می‌باشد.

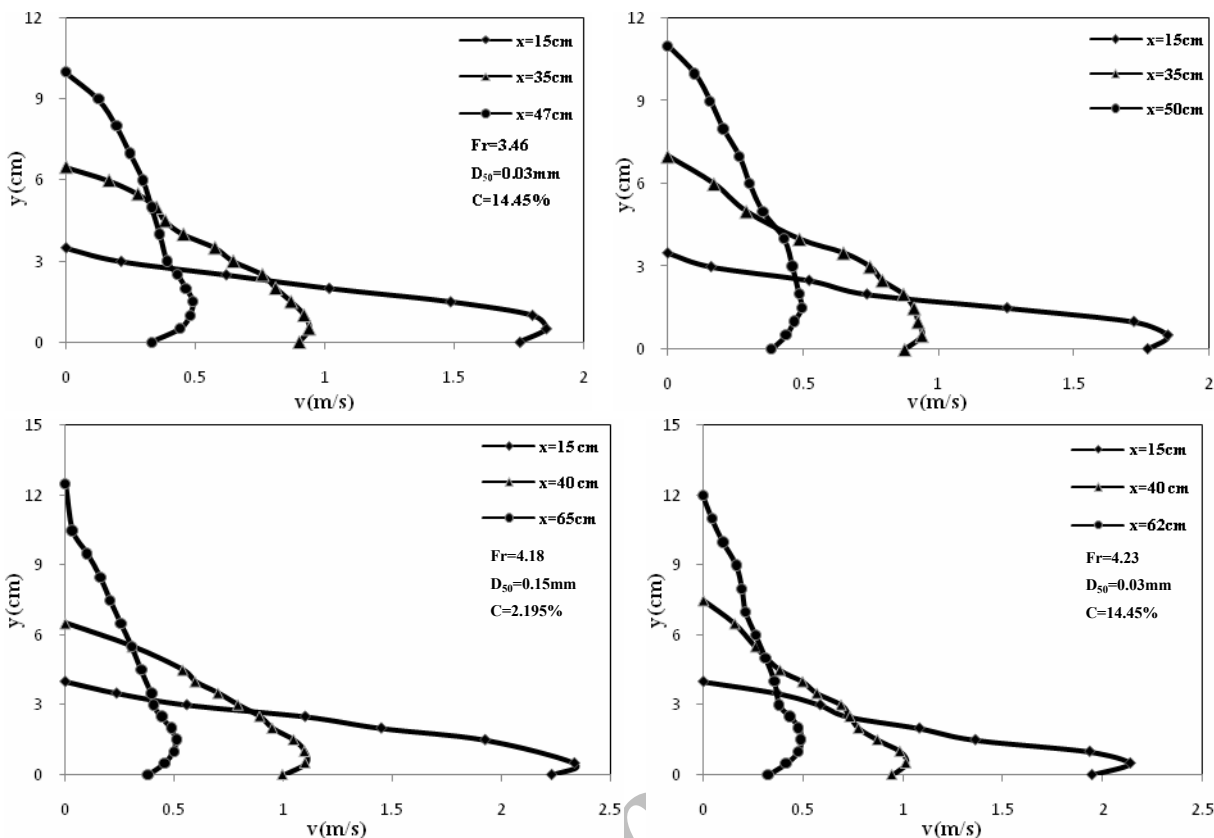
در این نمودار مشاهده می‌شود که توزیع بدون بعد سرعت شبیه به هم هستند. محققین مختلف از جمله لانگ و همکاران (۲۱) و اید و راجاراتنام (۱۰) نیز به این نتیجه رسیده بودند.



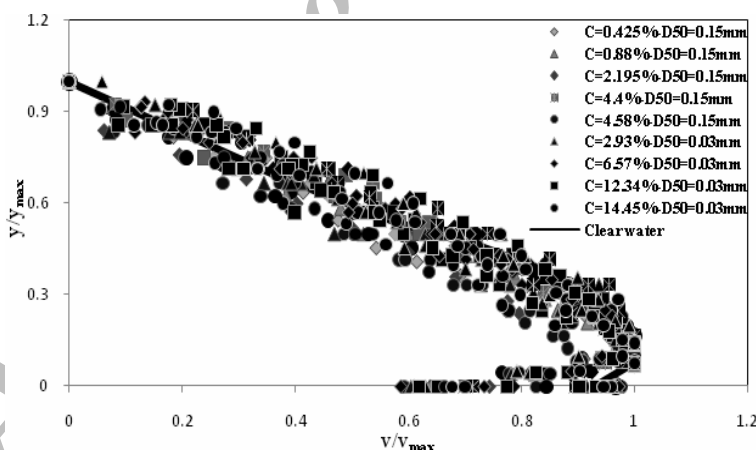
نمودار ۷- تغییرات طول نسبی جهش مستغرق  $L_j/y_2$  در مقابل عدد فرود جت  $Fr_j$



نمودار ۸- تغییرات طول نسبی جهش مستغرق  $L_j/y_1$  در مقابل عدد ریچاردسون  $Ri_j$



نمودار ۹- توزیع سرعت در مقاطع مختلف در طول جهش مستغرق



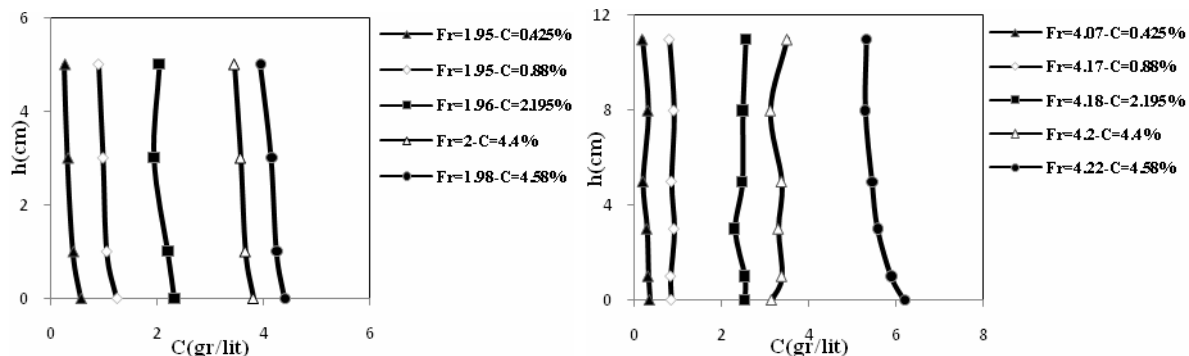
نمودار ۱۰- توزیع بدون بعد سرعت

## نتایج

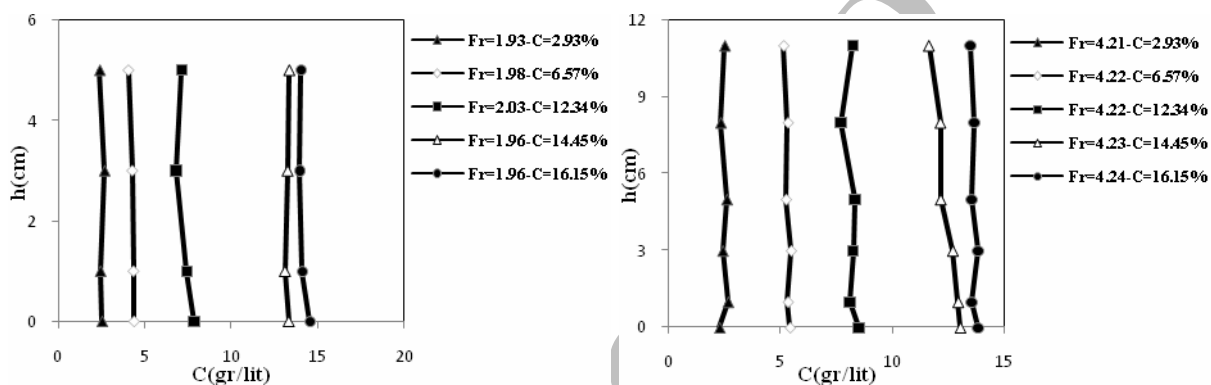
تحقیق، تاثیر قابل توجهی بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق شامل عمق استغراق روی دریاچه و افت انرژی نسبی ندارد. که با توجه به مشکل بودن اندازه‌گیری عمق استغراق روی دریاچه، پیشنهاد می‌شود مطالعات دقیقتری در این زمینه انجام گردد.

در تحقیق حاضر، اثر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق شامل عمق استغراق روی دریاچه، افت انرژی نسبی، طول جهش مستغرق، توزیع سرعت و توزیع غلظت بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که:

- بار رسوبی در محدوده‌ی غلظت‌های آزمایش شده در این



نمودار ۱۱- توزیع غلظت رسوبات معلق به ازای ذرات با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر



نمودار ۱۲- توزیع غلظت رسوبات معلق به ازای ذرات با قطر ۰/۰۳ میلی‌متر

می‌یابد.

- همچنین نتایج حاصل از بررسی توزیع بدون بعد سرعت، نظریه-ی مبنی بر مشابه بودن توزیع سرعت در ناحیه‌ی توسعه یافته‌ی جهش مستغرق را تایید می‌کند. این نظریه قبلاً توسط محققین مختلف از جمله لانگ و همکاران (۲۱) و اید راجاراتنم (۱۰) تایید شده بود.
- تلاطم ناشی از جهش مستغرق باعث می‌شود که توزیع غلظت در انتهای جهش عمودی باشد. در مورد رسوبات با قطر ۰/۱۵ میلی‌متر، با توجه اینکه سرعت ته‌نشینی ذرات بیشتر از سرعت ناشی از نوسانات رو به بالای تلاطم می‌باشد، این حالت مشاهده نگردید. در این مورد نیز پیشنهاد می‌شود که مطالعات دقیق‌تری انجام گردد.
- در غلظت‌های بیشتر از ۱۰٪، جریان توان حمل تمام رسوبات را نداشته و در نتیجه سبب ته‌نشین شدن آنها در ناحیه‌ی زیر بحرانی و در پشت دریچه خواهد شد.

- در این تحقیق، در هر آزمایش، به منظور اندازه‌گیری عمق ثانویه، ابتدا جهش بصورت آزاد توسعه داده می‌شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت بار معلق، عمق ثانویه‌ی جهش آزاد تا ۱۰٪ به ازای اعداد فرود بزرگتر از ۷ و غلظت‌های بیشتر از ۸٪ کاهش می‌یابد.
- با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، طول جهش مستغرق کاهش می‌یابد. بطوریکه در تمامی اعداد فرود و در غلظت‌های بیشتر از ۸٪، طول جهش تا حدود ۷ و ۱۲٪ ازای قطرهای ۰/۱۵ و ۰/۰۳ میلی‌متر کاهش یافت.
- با بررسی داده‌های توزیع سرعت در مقاطع مختلف، در طول جهش مشخص گردید سرعت ماکزیمم در هر مقطع با افزایش فاصله از دریچه کاهش می‌یابد. همچنین نرخ کاهش سرعت جت انتشار یافته از زیر دریچه با افزایش غلظت رسوبات افزایش می‌یابد. حداکثر میزان کاهش سرعت ماکزیمم در انتهای جهش رخ داد بطوریکه در غلظت‌های بیشتر از ۸٪، سرعت ماکزیمم ۱۰٪ و ۱۷٪ به ازای قطرهای ۰/۱۵ و ۰/۰۳ میلی‌متر کاهش

## منابع

- ۱- حسینی م.، و ابریشمی ج. ۱۳۸۵. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا. چاپ چهاردهم. ۶۱۳ صفحه.
- ۲- نصرآبادی م.، امید م. ح.، و فرهودی ج. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی. هشتمین کنفرانس بین-المللی مهندسی رودخانه. اهواز. ایران.
- ۳- نوذری ح.، امید م. ح.، و کوچک زاده ص. ۱۳۸۲. اثر بار بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی در حوضچه‌ی آرامش مستطیلی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۵: ۱۸.
- 4- Arora A.K., Ranga Raju K.G. and Garde R.J. 1984. Resistance to flow and velocity distribution in rigid boundary channels carrying sediment-laden flow, *Water Resources Research*, 22(6):943-951.
- 5- Bohlen W.P. 1970. Experimental studies of turbulence in liquid solid flows, *Transactions of AGU*, 51:1-6.
- 6- Cellino M., Graf W.H. 1999. Sediment laden flow in open channels under non capacity and capacity condition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(5):455- 462.
- 7- Dey S., and Sarkar A. 2006. Response of velocity and turbulence in submerged wall jets to abrupt changes from smooth to rough beds and its application to scour downstream of an apron, *Journal of Fluid Mech*, 556:387-419.
- 8- Dey S., and Sarkar A. 2007. Computation of Reynolds and boundary shear stress in submerged jets on rough boundaries, *Journal of Hydro-environment Research*, 1:110-117
- 9- Dey S., and Sarkar A. 2008. Characteristics of Turbulent Flow in Submerged Jumps on Rough Beds, *Journal of engineering mechanics*, 134(1):49-59.
- 10- Ead S. A., and Rajaratnam N. 2002. Plane turbulent wall jets in shallow tailwater, *J. Eng. Mech*, 128(2):143-155.
- 11- Einstein H. A. Chein N. 1955. Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution, MRD Sediment Series No. 8. Univ. of California, Institute of Engineering Research, Berkeley, CA.
- 12- Ellison T.H. and Turner J.S. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 6:423-448.
- 13- Gamal M.M. Abdel-Aal. 2004. Modeling of rectangular submerged hydraulic jumps. *Journal of Alexandria Engineering*, 43(6):847-855.
- 14- Garcia M. 1993. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(10):1-24.
- 15- Govinda Rao N.S., and Rajaratnam N. 1963. The Submerged Hydraulic Jump, *Journal of Hydraulic Div*, 89 (1):139-162.
- 16- Hino M. 1963. Turbulent flow with suspended particles, *Journal of Hydraulic Engineering*, 89(4):161-185.
- 17- Itakura T., Kishi T. 1980. Open channel flow with suspended sediments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 106(8):1325-1343.
- 18- Khullar N.K., Kothiyari U.C. and Ranga Raju K.G. 2002. The Effect of suspended sediment on flow resistance, 5<sup>th</sup> Conf on Hydro-Science and Engineering, Warsaw, Poland.
- 19- Kikkawa H., Fukuoka S. 1969. The characteristics of flow with wash load, Proc 13<sup>th</sup> Congress, IAHR, 2:233-240.
- 20- Komar P.D. 1971. Hydraulic jumps in turbidity currents, *Geol. Soc. Am. Bull*, 82(1):477-88.
- 21- Long D., Steffler P.M. and Rajaratnam N. 1990. LDA study of flow structure in submerged Hydraulic jumps, *J. of Hydraulic Res*, 28(4):437-460.
- 22- Lyn D.A. 1991. Resistance in flat-bed sediment-laden flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1):94-114.
- 23- Pullaiah V. 1978. Transport of fine suspended sediment in smooth bed channels, Ph.D thesis, University of Roorkee, Roorkee.
- 24- Simons D.B., Richardson E.V. and Haushid W.L. 1963. Some effects of fine sediments on flow phenomenon, Water Supply Paper no. 1498G. United States Geological Survey, Washington DC.
- 25- Taggart W.C., Yermoli C.A., Montes S. and Ippen, A.T. 1972. Effects of sediment size and gradation on concentration profiles for turbulent flow, M.I.T, cambridge M.A, Report. No. 152.
- 26- Vanoni V.A. and Nomicos G.N. 1960. Resistance properties of sediment laden streams, *Trans ASCE*, 125:1140-1175.
- 27- Vanoni V.A. 1946. Transportation of suspended sediment by water, *Trans. ASCE*, 111: 67-133.
- 28- Wu S., and Rajaratnam N. 1995. Free jumps, submerged jumps, and wall jets, *J. Hydraul. Res*, 33(2):197-212.
- 29- Yano K., Daido A. 1964. Fundamental study on mud flow, Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 7:340-347.

## Suspended Sediment Effects on Submerged Hydraulic Jump Characteristics

M. Nasrabadi<sup>1\*</sup> - M.H. Omid<sup>2</sup> - J. Farhoudi<sup>3</sup>

Received: 18-4-2010

Accepted: 15-7-2010

### Abstract

In this study, the effect of suspended load transport on the characteristics of submerged hydraulic jump (SHJ) in a rectangular channel was investigated experimentally. Sediment concentration and jet Froude numbers in the range of 0.424%-16.15% and 1.93-4.96, respectively, were considered. Two grain sizes 0.15 and 0.03 mm were used in the experiments. Characteristics of submerged hydraulic jump including velocity and concentration distribution, length of jump, the submergence depth on the gate and the energy dissipation were studied. The results showed that the submergence depth on the gate and the energy dissipation are constant by increasing of sediment concentration. The length of the jump at the presence of suspended sediment is smaller than those due to clear water flow. Also, suspended sediment by decreasing of flow resistance is made to decrease flow velocity.

**Keywords:** Submerged hydraulic jump, Sediment concentration, Length of jump, Velocity distribution

1,2,3- MSc Student, Associate Prof. and Professor, respectively, Department of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture & Natural Resources, Department of Irrigation and Reclamation, Karaj  
(\* - Corresponding Author Email: nasrabadim@ut.ac.ir)