بررسی تأثیر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق

محسن نصر آبادی <sup>۱\*\*</sup> – محمد حسین امید <sup>۲</sup> – جواد فرهودی <sup>۳</sup> تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۲۹ تاریخ پذیرش:۸۹/۵/۲۴

چکیدہ

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 فلوم آزمایشگاهی با عرض ۲/۰ ، ارتفاع ۳/۰ و طول ۷ متر جهت انجام آزمایش ها استفاده گردید. برای ایجاد جریان رسوبی از ذرات با قطر متوسط ۲۰۲۳ و ۲/۱۵ میلیمتر و وزن مخصوص ۲/۶ در محدودهی غلظتهای ۲/۴۵ تا ۱۶/۱۵ درصد استفاده گردید. محدودهی اعداد فرود در آزمایشات این تحقیق بین ۱۹۹۳ تا ۲/۹۶ 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 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 نمی کنند. 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 می کاهند. 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

بطورکلی جه شهای هیدرولیکی به دو دسته یکلی آزاد و مستغرق<sup> $^{0}</sup> تقسیم می شوند. در جهش هیدرولیکی آزاد اعماق اولیه و$ ثانویه و شکل جهش قابل رؤیت است. در صورتیکه در جه شهیدرولیکی مستغرق، جهش کاملاً در زیر آب قرار دارد (شکل۱). در $جهش آزاد، عمق پایاب<sup>2</sup> (<math>y_4$ ) 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 ( $y_1$ ) برسد. در این حالت هر مقدار افزایش اضافی در عمق پایاب باعث غرق شدن جهش گشته و چنانچه بخواهیم شدت جریان ثابت بماند می بایست مقدار عمق بالادست دریچه افزایش یابد که به این حالت</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد سازههای آبی، دانشیار و استاد
گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
(#- نویسنده مسئول: Email: nasrabadim@ut.ac.ir)

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

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)، لاندر و رودی (۱۹۸۱) و (۱۹۸۳)، مککورکودال (۱۹۸۶) و هاگر (۱۹۷۶)). اندازهگیریها و آزمایشهای این محققین مربوط به جهش در بسترهای صاف و زبر و موچنین 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 رسوبی میتواند روی مشخصات جهش هیدرولیکی تأثیر گذاشته و این مشخصات را با شرابط 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.



شکل ۱- جهش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در پائیندست دریچههای کشوئی

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 هيدروليكي در مقابل جريان كاهش مىيابد. از طرفی یانو و دایگو (۲۹)، تاگارت و همکاران (۲۵) و لین(۲۲) نـشان دادند که با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان افزایش می یابد. 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 می یابد. خولار و همکاران (۱۸) نشان دادند که در کانال های با بستر متحرك، مقاومت هيدروليكي بـا افـزايش غلظـت بـار معلـق کاهش می یابد و در کانالهای با بستر زبر (بـستر ثابـت)، مقاومـت در مقابل جریان با افزایش غلظت بار رسوبی معلق هم افزایش و هم کاهش می یابد. در مورد اثر رسوبات معلق بر تلاطم جریان، بوهلن (۵) نشان داد که تلاطم جریان در حضور رسوبات ریزدانهی معلق افزایش می یابد. از طرف دیگر هینو (۱۶) نشان داد که افزایش غلظت بار رسوبي معلق مي تواند باعث كاهش تلاطم جريان شود.

در مورد جهش هیدرولیکی در جریان های غلیظ و یا حاوی رسوبات معلق مطالعات محدودی انجام گرفته است. الیسون و ترنر (۱۲) پارامتری به نام عدد ریچاردسون (۱۲)

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

C که در این رابطه،  $1-(\rho_s/\rho)=R$  وزن مخصوص مستغرق رسوبات و 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:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8Ri_1^{-1}} \right)$$
(7)  
در صورتیکه 1<*Ri*<sub>1</sub>>1 جریان گلاًلود زیربحرانی و در صورتیکه

*Ri*<sub>1</sub><1 رژیم جریان گلآلود فوق بحرانی خواهد بود. پائول (۱۹۷۱)، جهش هیدرولیکی را در جریانهای غلیظ زمانیکه از روی یک تبدیل شيبدار عبور مي كند بررسي كرد. او نشان داد كه ورود جريان غليظ از میان جهش هیدرولیکی باعث کاهش غلظت در پائیندست جهس خواهد شد که میزان این تغییر به عدد فرود در ابتدای جهش بـستگی دارد، بطوریکه با افزایش عدد فرود، غلظت جریان در پائیندست بیشتر کاهش می یابد. گارسیا (۱۴)، مطالعات آزمایشگاهی خود را جهت بررسی رفتار جریان غلیظ در کانالهای آبرفتی (کانال با رسوبات بستر متحرک) انجام داد و شباهت بین جهش های هیدرولیکی همراه با نمک و جهش هیدرولیکی همراه با رسوبات معلق را مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که ساختار عمودی(توزیع سرعت و توزیع غلظت) جریان های نمکی و گل آلود با دانه های ریز رسوب (کوچکتر از ۴ میکرومتر) قبل و بعد از جهش شبیه به هم می باشد. نوذری و امید (۱۳۸۳) در یک مطالعه یآزمایشگاهی اثر رسوبات درشتدانه ی بستر روی مشخصات جهش هیدرولیکی در کانالهای باز را بررسی کردند. نتایج مطالعهی آنها نشان داد که جریان توأم با بار رسوبی تغییر قابـل ملاحظهای در مشخصات جه ش هیدرولیکی مانند طول جه ش و نسبت عمق ثانویه ایجاد نمی کند. نصرآبادی و امید (۲) در یک مطالعهی آزمایشگاهی اثر بار رسوبی معلق را بر مشخصات جهش هیدرولیکی آزاد شامل نسبت عمق ثانویه، طول جهش و افت انرژی در کانالهای مستطیلی بررسی کردند. آنها نشان دادند که با افزایش غلظت بار رسوبي معلق نسبت عمق ثانويه تا حدود ٧٪ و طول جهش تا حدود ۷٪ کاهش و افت انرژی نسبی تا حدود ۴ ٪ افزایش می یابد.

همچنین مطالعاتی نیز در مورد جهش هیدرولیکی مستغرق انجام شده و برخی از آنها روابطی برای تعیین مشخصات جهش مستغرق ارائه دادهاند. گوینداراو و راجاراتنام (۱۵) خصوصیات جهش هیدرولیکی مستغرق را در کانالهای مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم معادلات زیر را بدست آوردند:

$$\frac{y_3}{y_1} = \left[ (1+S_r)^2 \phi^2 - 2Fr_1^2 + \frac{2Fr_1^2}{(1+S_r)\phi} \right]^{0.3} \tag{(7)}$$

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

$$\varphi = \frac{y_2}{y_1} = 0.5(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \tag{(f)}$$

$$S_r = \frac{y_4 - y_2}{y_2} \tag{(a)}$$

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

$$\frac{E_L}{E_1} = \left[ \left( \frac{y_3}{y_1} - (1 + S_r)\phi \right) + 0.5Fr_1^2 \left( 1 - \frac{1}{(1 + S_r)^2 \phi^2} \right) \right] \frac{y_3}{y_1} + \frac{Fr_1^2}{2} \right]$$
(\$)  
$$\frac{L_j}{y_2} = 4.9S_r + 6.1$$
(Y)

در معادلات فوق، اعماق<sub>1</sub>y<sub>2</sub>، y<sub>2</sub>، و <sub>4</sub>y در شکل (۱) نشان داده شدهاند. لانگ و همکاران (۲۱) به مطالعه ی جهش هیدرولیکی مستغرق در پائیندست یک دریچهی کشویی در کانال مستطیلی با بستر صاف پرداختند. أنهما مشخصات جهمش هيدروليكي مستغرق شامل نیمرخ سطح آب، توزیـع سـرعت و نوسـانات آن، تــنش برشـی ناشی از تلاطم و شدت تلاطم را بررسی کردند و جهش مستغرق را از نظر توسعهی جریان به سه قسمت: ناحیهی در حال توسعه'، ناحیه توسعه یافته و ناحیه ی بهبود یافته تقسیم کردند (شکل۲). همچنین فاصلهی بین دریچه و انتهای ناحیهی توسعه یافته را طول جهش هیدرولیکی مستغرق (طول جریان غلطان) L<sub>rsj</sub> در نظر گرفتند. در این تقسیمبندی ناحیهی در حال توسعه ۱۵٪ و ناحیهی توسعه یافتـه ۸۵٪ طول جهش مستغرق را تشکیل میدهد. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که در ناحیهی توسعه یافتهی جهش مستغرق خصوصیات جریان از جمله توزيع سرعت و نوسانات آن و شدت تلاطم جريان شبيه به هم میباشد. وو و راجاراتنام (۲۸) شباهت ها و تفاوت های جهش هیدرولیکی آزاد و جت دیوارهای را مورد بررسی قرار دادند. آنها جهش مستغرق را به عنوان مرحلهی انتقالی بین جهش آزاد و جت دیـوارهای توصيف كردند.

اید و راجاراتنم (۱۰) خصوصیات جت دیـوارهای را در عمـقهـای پایاب کم بصورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادنـد. آنهـا

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

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>1</sup> میباشد که دارای مومنتوم منفی بوده و باعث پائینافتادگی 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 نـسبی<sub>1</sub>/y<sub>4</sub>/y طول نسبی جهش مستغرقL<sub>1</sub>/y<sub>1</sub> و افت نسبی جهش مـستغرقE<sub>L</sub>/E<sub>1</sub> ارائـه داد.

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

$$Y_0 = \frac{y_4}{y_1} = 0.178 + 0.839S_r + 0.701Fr_1$$
(9)

$$\frac{E_L}{E_1} = -5.026 - 1.225S_r + 19.44Fr_1 - 3.013Fr_1^{1.5}$$
(1.)

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 زبر انجام دادند. اندازه گیریهای آنان شامل توزیع سرعت در فواصل مختلف از بازشدگی دریچه، شدت 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 جه ش هیدرولیکی مستغرق و مشخصات آن شامل عمق استغراق روی دریچه، طول جه ش 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.

4- Return flow



شکل ۲- جهش هیدرولیکی مستغرق

# مواد و روش ها

## تجهيزات آزمايشگاهی

به منظور بررسی آزمایشگاهی اثر بار رسوبی معلق بــر مشخـصات جهش هیدرولیکی مستغرق، از یک مـدل آزمایـشگاهی کـه در مرکـز تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانـشکدهی مهندسـی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران ساخته شده بود، استفاده گردید. ایـن مدل مشتمل بر یک مخزن تنظیم ارتفاع مجهز به یک دریچهی تحتانی لبه تیز با باز شدگی ثابت ۲ سانتی متر در بالادست، یک کانال مستطیلی به طول ۷ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۳ متر و با شیب ثابت ۰/۰۰۲ میباشد. جنس بدنه و کف این کانال پلکسی گلاس مى باشد. با توجه به اينكه جمع آورى رسوبات ريزدانه مشكل مى باشد 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 می باشد. دبی جریان در این تحقیق توسط روزنه ی تحت فشار که قبلا به روش حجمی واسنجی شده بود اندازه گیری شد. جریان ورودی به سیستم نیز به کمک یک شیر فلک می کشویی قابل تنظیم بود. از یک دریچهی کشویی در فاصله ی 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 ۱۵/۰ 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.

اندازه گیری های انجام شده در این تحقیق شامل اندازه گیری عمق پایاب، عمق استغراق روی دریچه، طول جهش، توزیع سرعت در فواصل مختلف از بازشدگی دریچه و توزیع غلظت رسوبات در انتهای جهش مستغرق مي باشد. جهت افزايش دقت، اعماق موردنظر هم توسط عمق سنج و هم توسط پیزومترهایی که در کف کانال نصب شده بود اندازه گیری شدند. جهت اندازه گیری سرعت افقی در اعماق مختلف از کف از یک لولهی پیتوت استفاده گردید که محل اندازه گیری این سرعتها در محور مرکزی کانال و در سه مقطع در طول جهش مستغرق بود. غلظت جریان نیز توسط یک سری لولههای لشکل شیــشهای کـه در ارتفاع هـای ۰، ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۱ و ۱۵ L سانتیمتری از کف کانال تثبیت شده بودند، اندازه گیری می شد. نمونه-های موردنظر توسط شیلنگهای پلاستیکی که به انتهای این لولهها متصل شده بودند جمع آوری می شدند. جهت اندازه گیری غلظت نمونهها نیز از روش خشک کردن استفاده گردید.

# نحوه انجام آزمايشها

همانطور که گفته شد هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر غلظت بار رسوبي معلق بر مشخصات جهش هيدروليكي مستغرق ميباشد.

<sup>1-</sup> Orifice meter

<sup>2-</sup> Point gage

<sup>3-</sup> Pitot tube



شکل ۳- طرح کلی کانال آزمایشگاهی و متعلقات آن



به منظور مقایسه ی نتایج و قبل از شروع آزمایشات اصلی، یک سرى آزمايشات مربوط به آب صاف و بدون تزريق رسوب انجام گردید. پس از انجام آزمایشات مربوط به آب صاف، آزمایشات با تزریق رسوب انجام گرفت. هدف از انجام این آزمایـشات بررسـی اثـر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق می باشد. جهت رسیدن به این هدف، در آزمایشات از دو نوع ماسه ی آزمایشگاهی به قطرهای ۱۵/۰۵ و ۰/۰۳ میلیمتر استفاده گردید کـه 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 هـر آزمایش ابتـدا جریـان ورودی بـه سیستم به میزان موردنظر برقرار و سیس جهت ایجاد غلظت مورد نظر، تزریق رسوب بصورت وزنی انجام می شد. پس از تزریق رسوب به جریان، سیستم تقریبا ۰/۵ تـا ۱ ساعت (بسته بـه میـزان غلظـت رسوب) کار می کرد 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 می گرفت (بعد از دریچه ی تنظیم موقعیت جهش) نمونههائی گرفته شد که نتایج آن در نمودار زیر آورده شده است:



همانطور که در نمودار نشان داده شده است، زمان به تعادل رسيدن غلظت ٣٣ دقيقه و غلظت واقعى جريان نيز ٠/۴٢۵ گرم بر لیتر است. به همین منظور در هر آزمایش پس از تزریق رسوب و به تعادل رسیدن غلظت سیستم، در یکچهارم 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 اندازه-گیری می شد. سپس با مانور دریچه ی تنظیم جهش، عمق پایاب به میزان موردنظر افزایش داده می شد. در این تحقیق به منظور مشاهده-ی میزان تغییرات مشخصات جهش مستغرق با افزایش غلظت، عمـق پایاب در هر عدد فرود، یکسان در نظر گرفته شد. پس از تثبیت عمق ياياب 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 اندازه گیری میشد. برای اندازه گیری طول جهش از معیار لانگ و همکاران (۲۱) استفاده گردید که با اندازه گیری فاصله ی بین دریچه و انتهای جریان های برگشتی (انتهای ناحیهی توسعه یافته)، طول جهش مستغرق بدست مىأيد.

## نتايج 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 دریچه، افت انرژی، طول جهش مستغرق، توزیع سرعت و همچنین توزیع غلظت آورده شده است.

### عمق استغراق روی دریچه

چاو (۱۹۵۹) با بکار بردن رابطهی پیوستگی و مومنتوم بین مقاطع ۱ و ۲ (شکل۵) رابطهی تئوری زیر را برای محاسبهی عمق استغراق روی دریچه ارائه داد:

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

که در این رابطـه، اعمـاق <sub>ا</sub>y، <sub>y</sub><sub>3</sub> و y<sub>4</sub> در شـکل (۵) نـشان داده شدهاند و Fr4 عدد فرود مربوط به عمق <sub>4</sub>y میباشد.



در نمودار (۲) نتایج اندازه گیری عمق استغراق روی دریچه برای آب صاف و همچنین با افزایش غلظت رسوبات نشان داده شده است. در این شکل در کنار نتایج آزمایشگاهی، خط ممتد نشان دهندهی رابطهی تئوری چاو (۱۹۵۹) میباشد. همچنین *Fr<sub>i</sub>* عدد فرود مربوط به ارتفاع جت انتشار یافته (بازشدگی دریچه) میباشد.

همچنین در نمودار (۳) دادههای آزمایشگاهی با رابطـهی تجربـی 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 دریچه تاثیر قابل توجهی ندارد.

#### افت انرژی نسبی

 $\Delta E$  افت انرژی نسبی ناشی از جهش  $\Delta E/E_1$  میباشد که در آن  $\overline{AE}$  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.

$$E_1 = y_3 + \frac{v_1^2}{2g}$$
(17)

$$E_2 = y_4 + \frac{v_4^2}{2g}$$
(17)

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \tag{14}$$

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 نشان دهندهی رابطهی تجربی گوینداراو و راجاراتنام (۱۵) می باشد.

در نمودار های فوق نیز مشاهده می گردد که با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، افت انرژی نسبی جهش مستغرق تغییر نخواهد کرد. که این می تواند ناشی از تغییر نکردن عمق استغراق روی دریچـه با افزایش غلظت باشد.

# طول جهش مستغرق

همانطور که گفته شد، در این تحقیق، جهت اندازه گیری طول جهش از معیار لانگ و همکاران (۲۱) استفاده گردید. بطوریکه فاصلهی بین دریچه 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 می شود با افزایش غلظت بار رسوبی معلق طول جهش مستغرق کاهش می-یابد. بطوریکه به ازای تمامی اعداد فرود و در غلظت های حداکثر، میزان کاهش طول جهش مستغرق ۲/۵ ٪ و ۱۲ ٪ برای ذرات با قطر میزان کاهش طول جهش مستغرق ۸/۷ ٪ و ۲۰ ٪ برای ذرات با قطر

همانطور که گفته شد، گوینداراو و راجاراتن<mark>ا</mark>م (۱۵) رابطـه تجربـی زیر را برای تعیین طول جهش مستغرق ارائه دادند:

$$\frac{L_j}{y_2} = 4.9S_r + 6.1 \tag{10}$$

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

$$S_r = \frac{y_4 - y_2}{y_2}$$
 (15)

قبل از تشکیل جهش مستغرق، ابتدا جه ش بصورت آزاد توسعه

داده و اعماق اولیه و ثانویهی جهش آزاد اندازهگیری میشد که نتایج آن در نمودار زیر آورده شده است.



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



نمودار ۲- تغییرات نسبت عمق ثانویه جهش آزاد <mark>y2/y1 در</mark> مقابل عدد فرود Fr<sub>1</sub> به ازای غظتهای مختلف

همانطور که مشاهده می شود 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 2/ر/L در مقابل عدد فرود جت به ازای غلظتهای مختلف بار رسوبی معلق رسم شده است. در این نمودار خط ممتد نشاندهندهی رابطهی گوینداراو و راجاراتنام (۱۵) میباشد. اختلاف موجود بین رابطهی تئوری و نتایج آزمایشگاهی میتواند ناشی از تفاوت در معیار اندازه گیری طول جهش مستغرق باشد.

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

در این نمودار *Ri<sub>j</sub> عدد ر*یچاردسون جت انتشار یافته از زیر دریچه (بازشدگی دریچه) می باشـد. همانطور کـه مـشاهده مـیشـود، عـدد

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

### توزيع سرعت

در این تحقیق، در بعضی از آزمایش ها توزیع سرعت با اندازه گیری سرعت در اعماق مختلف جریان و در سه مقطع در طول جهش و به ازای غلظت های مختلف بدست آمد. به منظور اندازه گیری سرعت در اعماق مختلف، از لوله پیتو استفاده گردید. در نمودارهای زیر نمونه های از این توزیع ها 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

به مقطع سوم (انتهای جهش) می اشد. بطوریکه در غلظتهای بیشتر از ۸ ٪، سرعت ماکزیمم تا حدود ۱۰ ٪ و ۱۲ ٪ به ازای قطره ای ۱۰/۵ و ۲۰/۳ میلیمتر کاهش می یابد. در توجیه این تغییرات می توان گفت که افزایش گرانروی آب و تاثیر آن بر روی نیروی مومنتوم می تواند 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<sub>max</sub> حداکثر ارتفاع در هر مقطع، y سرعت افقی در ارتفاع y و y<sub>max</sub> حدااکثر سرعت در هر مقطع میباشد.

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

#### توزيع غلظت

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

در نمودارهای فوق مشاهده می شود که توزیع غلظت در انتهای جهش تقریبا عمودی خواهد بود. اما در غلظتهای حداکثر رسوبات با قطر ۲/۱۵ میلیمتر، توزیع غلظت عمودی نخواهد بود. در توجیه این تغییرات می توان گفت که تلاطم ناشی از جهش مستغرق باعث می-شود که توزیع غلظت رسوبات معلق عمودی باشد. در جریانهای رسوبی با قطر ۲/۱۵ میلیمتر، سرعت ته نشینی ذرات بیشتر از سرعت ناشی از نوسانات رو به بالای تلاطم خواهد شد و توزیع غلظت عمودی نخواهد بود.



نمودار۸- تغییرات طول نسبی جهش مستغرقL<sub>j</sub>/y<sub>1</sub> در مقابل عدد ریچاردسون Ri<sub>j</sub>



# نتايج

در تحقیق حاضر، اثر غلظت بار رسوبی معلق بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق شامل عمق استغراق روی دریچه، 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 محدوده ی غلظت های آزمایش شده در این

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



- در این تحقیق، در هر آزمایش، به منظور اندازه گیری عمق ثانویه، ابتدا جهش بصورت آزاد توسعه داده می شد. 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 می یابد.
- با افزایش غلظت بار رسوبی معلق، طول جهش مستغرق کهش مییابد. بطوریکه در تمامی اعداد فرود و در غلظتهای بیشتر از ۸٪، طول جهش تا حدود ۲ و ۱۲ ٪ ازای قطرهای ۰/۱۵ و ۰/۰۳ میلی متر 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 رخ داد بطوریکه در غلظتهای بیشتر از ۰٪ سرعت ماکزیمم

بى يابد.

- 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 قبلا توسط محققین مختلف از جمله لانگ و همکاران (۲۱) و اید راجاراتنم (۱۰) تایید شده بود.
- تلاطم ناشی از جهش مستغرق باعث می شود که توزیع غلظت در انتهای جهش عمودی باشد. در مورد رسوبات با قطر ۰/۱۵ میلی متر، با توجه اینکه سرعت ته نشینی ذرات بی شتر از سرعت ناشی از نوسانات رو به بالای تلاطم می باشد، این حالت مشاهده نگردید. در این مورد نیز پیشنهاد می شود که مطالعات دقیق تری انجام گردد.
- در غلظتهای بیشتر از ۱۰٪، جریان توان حمل تمام رسوبات را نداشته و درنتیجه سبب تـهنـشین شـدن آنهـا در ناحیـهی زیـر بحرانی و در پشت دریچه خواهد شد.

منابع

۱۳۸۵ 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., Kothyari 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 13th 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.
- 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. Tow grain size 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



<sup>1,2,3-</sup> MSc Student, Associate Prof. and Professor, respectively, Department of Irrigation and Reclamation, College of Agriculture & Natural Resources, Department of Irrigation and Reclamation, Karaj

<sup>(\*-</sup> Corresponding Author Email: nasrabadim@ut.ac.ir)