

## بررسی تاثیر عمق استغراق بر الگوی آبشستگی پایین دست جت آبی

فواد بروایه<sup>۱</sup>، محمد حیدر نژاد<sup>۲\*</sup> و حیدر علی کشکولی<sup>۳</sup>

(۱) دانش آموخته گروه سازه های آبی، واحد علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۲) گروه مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۳) گروه مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: mo\_he3197@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۳۱

### چکیده

هدف از این تحقیق بررسی الگوی آبشستگی پایین دست جت متاثر از تغییرات تراز سطح آب می باشد. همچنین در این تحقیق پارامترها و مؤلفه های مختلف پخشیدگی جریان جت مستغرق در سیال پذیرنده و ابعاد چاله آبشستگی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. برای نیل به اهداف یاد شده مدل فیزیکی متناسب با موضوع تحقیق ساخته شد. با افزایش عدد فرود در خروجی نازل، سرعت جریان در سیال پذیرنده نیز بیشتر شده، همچنین به همین میزان سرعت فلاکس کلی جریان با افزایش عدد فرود بیشتر می شد. بررسی تاثیر عمق استغراق سیال پذیرنده بر روی سرعت خروجی نازل آزمایشات سرعت سنجی در اعماق استغراق مختلف انجام شد. با توجه به سرعت خروجی نازل به ازاء اعماق استغراق ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ برابر قطر نازل مشخص شد که سرعت های اندازه گیری شده بر هم منطبق بوده و تغییرات عمق بر روی سرعت خروجی تأثیر گذار نمی باشد.

واژه های کلیدی: جت هیدرولیکی، چاله آبشستگی، اعماق استغراق، قطر نازل و سرریز نیلوفری.

## مقدمه

جت هیدرولیکی عبارت است از جریان متلاطمی که از یک منبع بطور مداوم ادامه می یابد، تاکنون علاوه بر وجود راهکارهای کنترل، انتقال و انباشت رسوبات، معضل رسوب گذاری در مخازن ذخیره آبهای سطحی، حوض های ته نشینی، مخازن سدها، آبگیرها، کانال های آبیاری و دریچه های کشتیرانی همیشه وجود داشته و می بایست راههای انحراف و شستشوی رسوبات نیز بررسی شود. در این راستا راهکارهای مختلفی ارائه شده است. از جمله جدیدترین این راهکارها استفاده از جت های آبی می باشد. کنترل و مدیریت رسوب با کمک جت های آبی می تواند باعث کاهش عملیات پر هزینه لایروبی و همچنین کاهش انباشت رسوبات در جلوی آبگیرها، خروجی مخازن و حوض های ته نشینی شود. امروزه کاربرد جت های هیدرولیکی در بخش های مختلف مهندسی و صنعت فراگیر شده است. به گونه ای که در تصفیه خانه های آب و فاضلاب، رقیق کننده های مواد، تزریق آلودگی به رودخانه ها و اقیانوس ها، کاهندگی انرژی آب و اخیراً لایروبی رسوبات رودخانه ای و مخازن قابل کاربرد است. یکی از راههای سریع برای رقیق نمودن آلودگی هایی که به رودخانه ها یا دریاها می ریزند استفاده از جت های مستغرق متلاطم است که می تواند در فاصله زمانی نسبتاً کوتاهی مقدار زیادی آب و جریان آلودگی را به علت شرایط تلاطمی بالای خود مخلوط نموده و اثرات مخرب آن را سریعاً کاهش دهد. از کاربردهای دیگر جت ها استفاده از آنها در استهلاک انرژی دینامیکی جریان می باشد. ضمناً از آنجا که ته نشینی رسوبات یکی از بزرگترین معضلات سازه های آبی و هیدرولیکی است دو راه برای کاهش این معضل وجود دارد اول اینکه سازه به گونه ای طراحی شود که حداقل رسوبات در سیستم آن ترسیب نمایند و دوم اینکه رسوبات ته نشین شده را به صورت مکانیکی یا هیدرولیکی از محل سازه دور نماییم. در صورتی که بتوان به صورت هیدرولیکی رسوبات را از محل سازه دور نماییم خسارت ناشی از عملیات فیزیکی خروج رسوبات را به بدنه سازه به حداقل رسانده ضمن اینکه در حین اینکه سازه در حال بهره برداری است، می توان عملیات پاکسازی را انجام نمود. جت های آب در صورتی که چیدمان، زاویه استقرار و همپوشانی صحیحی داشته باشند حداکثر کارایی را خواهند داشت. بدین صورت که با افزایش دامنه آبخستگی جت ها در اثر تغییر هندسه آنها می توان در کاهش تعداد جت ها، در ردیف های موازی و سری و نهایتاً بهینه سازی هزینه ها پرداخت. لذا شناخت خصوصیات جریان خروجی از جت و معادلات آن در شرایط مختلف جهت طراحی مناسب آنها لازم است.

با عنایت به سوابق تحقیقی که در این زمینه انجام شده است در این پژوهش با تغییر شرایطی که تاکنون برای معادلات جت انجام نشده اقدام به استخراج معادلات جریان خروجی از جت و آبخستگی پایین دست آن می نماییم. فرآیند این تحقیق که این امر توسط آن سنجیده می شود، محاسبه پارامترهای بی بعد دخیل در پدیده، ساخت مدل آزمایشگاهی و اندازه گیری پارامترهای مورد نظر بر روی آن و بدست آوردن روابطی به صورت بی بعد جهت تعمیم نتایج آزمایشگاهی

است. Hogg و همکاران (۱۹۹۷) سعی کردند تا برای الگوی نهایی آب شستگی (الگوی پایدار) ناشی از جت مستغرق مدلی تحلیلی (بر مبنای توزیع گوسین تنش برشی) ارائه کنند. Ali و Lim (۱۹۸۶) اثر عمق پایاب را بر ابعاد حفره آبشستگی بررسی کردند. بر طبق نظر آنها مقداری حدی برای عمق پایاب وجود دارد که در صورتی که عمق پایاب از این مقدار بیشتر و یا کمتر شود، حداکثر عمق حفره آبشستگی افزایش یا کاهش می‌یابد. Chen و همکاران (۲۰۰۱) اقدام به شبیه‌سازی آزمایشگاهی جت‌های ریزشی به حوضچه‌های مستهلک‌کننده کردند. هدف از انجام این آزمایش‌ها استخراج روابطی برای تعیین پوشش حفاظتی لازم در پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی بود. Peiqing و همکاران (۱۹۹۸) جت ریزشی به حوضچه مستهلک‌کننده را مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند. به کارگیری حوضچه‌های غوطه‌وری راهکاری ایمن و اقتصادی برای مستهلک کردن انرژی جنبشی جت‌های هیدرولیکی رها شده از نازل‌ها یا سرریزها محسوب می‌شوند. از این نوع مستهلک‌کننده مخصوصاً در پایین دست سدهای ساخته شده در دره‌های تنگ استفاده می‌شود. Adduce و همکاران (۲۰۰۴) به مطالعه آزمایشگاهی بر روی هیدرولیک جت و آبشستگی ناشی از جت‌های مستغرق صفحه‌ای پرداختند. در این آزمایش با عکس‌برداری سعی شد تا توسعه آبشستگی ناشی از جت صفحه‌ای به تصویر کشیده شود و به تبع آن زمان تعادل به خوبی قابل تشخیص بود. در این مطالعه هیدرولیک جت‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت و عمق سرعت در دو حالت بستر صلب و بستر فرسایش‌پذیر بوسیله آلتراسونیک پروفایلر برداشت شد. Ahadaian و Musavi jahromi (۲۰۰۸) عوامل مؤثر بر جریان جت‌های مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند با افزایش زاویه همگرایی جت از ۱۵ درجه به ۹۰ درجه مقدار طول نهایی مرز بالایی تراژکتوری در حدود ۲۵ درصد و مرز پایینی در حدود ۲۸ درصد افزایش داشته است. آنها سپس اقدام به شبیه‌سازی تغییرات مومنتم جریان جت ورودی در منابع آب پذیرنده کم عمق با استفاده از Flow-3D کردند. Ahadaian و Musavi jahromi (۲۰۰۹) خصوصیات هندسی تراژکتوری جت مستغرق را بررسی کردند. آنها معادلاتی را برای توجیه رفتار جت مستغرق ارائه کردند. در این مطالعه از نازل‌های دایره‌ای با قطرهای مختلف و غلظت‌های مختلف سیال جت استفاده شد آنها دریافتند که طول تراژکتوری با افزایش قطر از ۵ به ۸ میلی متر کاهش می‌یابد اما در عین حال این طول با افزایش قطر نازل از ۸ تا ۱۵ میلی متر افزایش می‌یابد. ضمناً مشاهدات آنها حاکی از افزایش طول تراژکتوری با افزایش غلظت سیال جت بود. Mehraein و همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه اثر زاویه جت با افق بر روی الگوی آبشستگی پایین دست آن پرداختند آنها نتیجه گرفتند که هر چه جت با افق زاویه کمتری داشته باشد الگوی آبشستگی وسیع‌تر می‌باشد. در تحقیقات دیگری در این زمینه در آزمایشگاه کارهای متفاوتی انجام گرفت و پارامترهای مختلفی مانند تغییراتی در نوع رسوبات، پارامترهای هندسی جت، تغییراتی در عدد فرود

و رینولدز جت انجام گرفت. در این تحقیق با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای جت و محیطی تغییراتی در عمق استغراق آن انجام گرفت و نتیجه تأثیر آن بر الگوی آبشستگی جت مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه مطالعه حاضر، مطالعه تئوری-آزمایشگاهی می‌باشد، مراحل ساخت مدل فیزیکی، آنالیز ابعادی، وسایل و دستگاه‌های اندازه‌گیری و برنامه آزمایشات به طور جامع پرداخته شده است. پارامترهای مؤثر در الگوی آبشستگی در اثر جت مستغرق را می‌توان به صورت رابطه ۱ برشمرد:

$$f = (H, U_0, \mu, \rho, x, y, d_0, U_m, X_{max}, X_m, y_m, x_{ym}, Z_m, H_m, d_{95}, B, \Delta\rho, g, N) = 0 \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن،  $H$  عمق استغراق جت یا هد آب روی جت،  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی سیال جت و لزوجت دینامیک،  $x$  و  $y$  به ترتیب مختصات طولی و عرضی،  $d_0$  قطر جت خروجی،  $U_0$  سرعت جریان خروجی از نازل،  $U_m$  سرعت جت روی خط مرکزی در طول محور  $x$ ،  $X_{max}$  حداکثر طول پروفیل آبشستگی،  $y_m$  حداکثر عرض آبشستگی،  $x_{ym}$  طول متناسب با  $y_m$ ،  $Z_m$  حداکثر عمق آبشستگی،  $H_m$  ارتفاع حداکثر پشته رسوبی،  $x_m$  طول متناسب با  $H_m$ ،  $d_{95}$  قطر ذرات رسوبی،  $\Delta\rho$  اختلاف جرم مخصوص ذرات بستر با جرم مخصوص آب،  $g$  شتاب ثقل،  $N$  تعداد جت و  $B$  ضخامت لایه رسوبی می‌باشد. پس از مشخص شدن متغیرهای مؤثر بر آبشستگی پایین دست جت با کمک آنالیز ابعادی پارامترهای بدون بعد در رابطه ۲ بدست آمد:

$$f \left( \frac{U_0 \rho d_0}{\mu}, \frac{U_0}{\sqrt{d d_0}}, \frac{U_0}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} d_{95}}}, \frac{H}{d_0}, \frac{X_{max}}{d_0}, \frac{y_{max}}{d_0}, \frac{Z_m}{d_0}, \frac{U_m}{U_0}, \frac{Z_{max}}{D_{95}}, \frac{Z_{max}}{D_{95}} \right) = 0 \quad \text{رابطه ۲:}$$

در رابطه ۲؛ پارامتر اول عدد رینولدز خروجی از جت، پارامتر دوم عدد فرود خروجی جت، پارامتر سوم عدد فرود دینامیک ذرات رسوبی، پارامتر چهارم عدد استغراق جت، پارامتر پنجم نسبت بدون بعد حداکثر طول پروفیل جت، پارامتر ششم نسبت حداکثر عرض آبشستگی، پارامتر هفتم نسبت حداکثر عمق آبشستگی، پارامتر هشتم نسبت بدون بعد سرعت خط مرکزی جریان جت به سرعت اولیه، پارامتر نهم نسبت حداکثر طول به قطر متوسط ذرات رسوبی، پارامتر دهم نسبت حداکثر عمق آبشستگی به قطر متوسط ذرات رسوبی است. لازم به توضیح است که برنامه‌ریزی آزمایش‌ها به گونه‌ای انجام شد که در تمامی آن‌ها عدد رینولدز جریان جت در محدوده جریان متلاطم قرار گیرد؛ بنابراین در ارائه نتایج از عدد رینولدز صرف نظر شده است.

## مراحل ساخت مدل فیزیکی

با توجه به هدف مطالعه حاضر که بررسی آبشستگی پایین دست جت با استفاده از مدل فیزیکی می باشد، اقدام به ساخت و بسط مدل آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش های این تحقیق گردید (شکل ۱). برنامه ریزی انجام آزمایش های این تحقیق بدین صورت پایه ریزی شد که کلیه آنها در یک قطر ثابت یک سانتی متر، در سه تراز استغراق ۱۰، ۳۰، ۵۰ سانتی متر برای دانه بندی  $d_{95}$  میلی متر با چهار دبی مختلف انجام شود. جدول ۱ برنامه آزمایش های انجام شده در این تحقیق را نمایش می دهد.



شکل ۱: شکل پایانی فلوم

جدول ۱: لیست سناریوهای آزمایشات

زاویه همگرایی	عمق استغراق	دبی جت	قطر ذرات رسوبی	تعداد جفت
۹۰	۱۰	۱/۶	D50	۱
	۳۰	۲		
	۵۰	۲/۵		
		۳		

با توجه به جدول فوق تعداد ۱۲ آزمایش آبشستگی و ۶ آزمایش سرعت سنجی در نظر گرفته شد. در این مرحله با توجه به سناریوهای آزمایش، در آزمایشگاه هیدرولیک سازمان آب و برق خوزستان، اقدام به ساخت یک فلوم آزمایشگاهی گردید. بخش های مختلف این مدل فیزیکی را می توان در چند مورد خلاصه نمود: مخازن تأمین آب و پمپ کف کش انتقال آب به فلوم آزمایش، مخزن تأمین کننده آب جت ها و پمپ تزریق جت؛ فلوم آزمایش، سرریز نیلوفری انتهایی فلوم و سیستم تخلیه و تجهیزات مربوطه، اراپه های دو و سه بعدی اندازه گیری های ابعاد آبشستگی و سرعت، نازل با قطر ۱۰ میلی متر، سیستم زهکش کف فلوم جهت زهکشی رسوبات کف، رسوبات بستر و سیستم توزیع جریان جت ها.

### فلوم آزمایشگاهی

با توجه به محاسبات اولیه انجام شده براساس مطالعات قبلی اقدام به ساخت فلوم به طول ۶/۰۰ متر و عرض ۱/۵۰ متر و به ارتفاع ۱/۰۰ متر گردید. اسکلت سازه‌های فلوم فلزی، جنس کف ورق فولادی و از شیشه جهت پوشش جداره‌ها استفاده شده است. شیب کف فلوم صفر و محل تخلیه نازل مماس بر رسوبات و در عمق ۲۰ سانتیمتری از کف فلوم در نظر گرفته شد و ارتفاع عمق استغراق اولیه آبروی آنها ۵۰ سانتی متر با کمک سرریز نیلوفری منظور شد.

### پمپ‌های تزریق جت

برای تزریق جت دو پمپ در نظر گرفته شد که بتوانند هدهای مختلفی ایجاد نمایند. برای این منظور از پمپ مدل CMA00/1M به ارتفاع آبدهی ۳۵ متر و دبی نهایی ۱/۵ لیتر بر ثانیه برای هر کدام استفاده شد. به منظور کنترل دبی خروجی جت علاوه بر تجهیزات اندازه‌گیری، از یک شیر قطع و وصل کشویی استفاده شد.

### خروجی فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات مربوطه

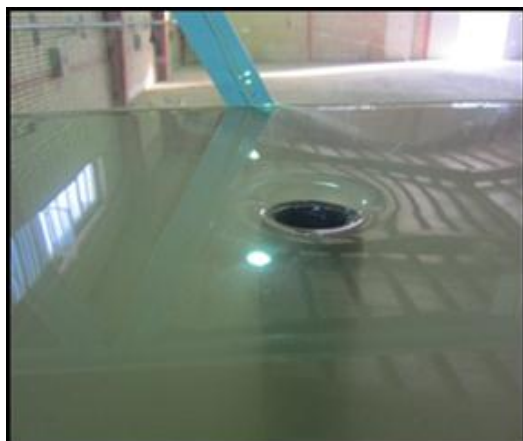
با توجه به برنامه‌ریزی انجام آزمایش‌ها و تزریق سیال جت به صورت مستغرق در سیال پذیرنده ساکن، برای اجرای هر آزمایش باید فلوم آزمایشات مطابق عمق مورد نظر آزمایش از آب شفاف و بدون کدورت پر می‌گردید، پس از پر شدن فلوم ورودی، فلوم بسته و چرخه آب توسط پمپاژ انجام می‌شد. در این مرحله آب خارج شده از جت‌ها پس از عبور از فلوم از سرریز نیلوفری انتهایی خارج و با کمک یک لوله به مخزن مکش پمپ‌های تزریق انتقال می‌یافت.



شکل ۲: ورودی قلوم و سرریز نهایی



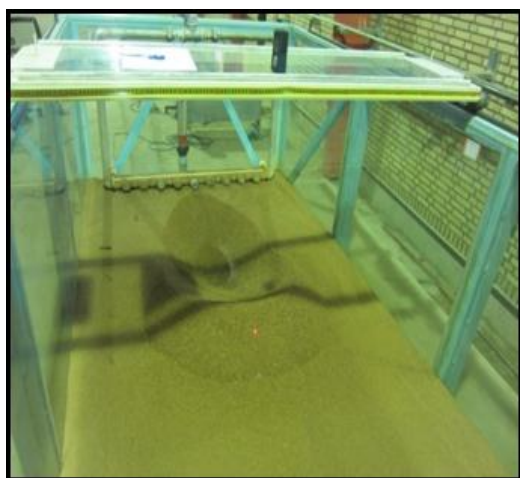
شکل ۳: تخلیه فلوم به سیستم زهکش کف آزمایشگاه



شکل ۴: سرریز انتهایی فلوم در حال کار

#### تجهیزات و ارایه سه بعدی اندازه‌گیری

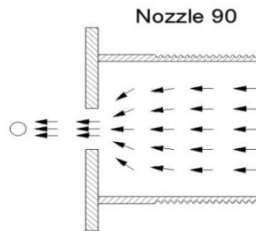
در این راستا برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف هیدرولیکی و آبشستگی نیاز می‌باشد که از وسیله‌ای به منظور هدایت دستگاه‌های اندازه‌گیری در طول الگوی آبشستگی استفاده شود؛ به همین منظور، ارایه اندازه‌گیری سه بعدی که قادر به حرکت در سه جهت برای برداشت موقعیت مختصاتی الگوی آبشستگی و دستگاه اندازه‌گیری سرعت است، ساخته شد. یکی از وظایف مهم این ارایه قرارگیری پروب دستگاه سرعت‌سنج و نصب متر لیزری بر روی آن می‌باشد. دستگاه سرعت‌سنج مورد استفاده در این تحقیق سرعت سنج الکترومغناطیس E.M Flow meter و متر لیزری استفاده می‌شود. همچنین برای برداشت الگوی آبشستگی با کمک متر لیزریک صفحه مختصاتی بر روی شیشه ترسیم شد تا به کمک آن بتوان الگوی آبشستگی را از روی ارایه سه بعدی با کمک متر لیزری برداشت نمود. مجموعه شکل ۵ این ارایه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۵: تجهیزات ارایه دو بعدی جهت برداشت الگوی آبشستگی

### نازل با قطر ۱۰ میلیمتر

آزمایش‌ها با یک نازل با قطر ثابت ۱۰ میلیمتر پایه‌گذاری شدند. برای تهیه جت با مشخصات مورد نیاز اقدام به ساخت آن از جنس آلومینیوم شد. شکل ۶ مقطع جت با قطر ۱۰ میلی‌متر را نمایش می‌دهد. نازل به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که بتوان بر روی لوله آب با قطر ۱/۵ اینچ نصب شود.



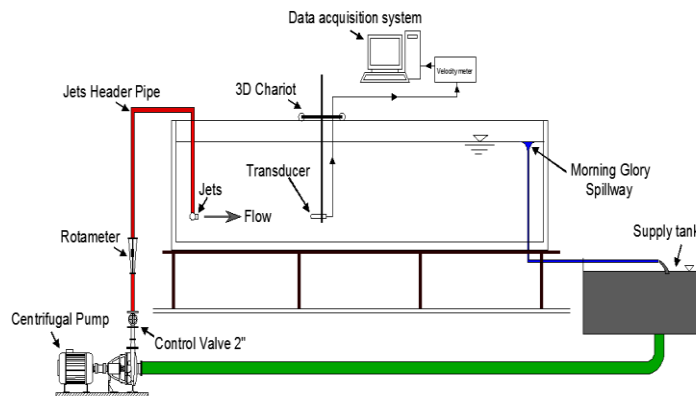
شکل ۶: مقطع طولی نازل

### سیستم زهکش کف فلوم جهت زهکشی رسوبات کف

با توجه به ابعاد فلوم در بخش ماسه‌ریزی شده به طول ۳ متر، عرض ۱/۵ متر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر پس از تخلیه آب، جهت دقت اندازه‌گیری عمق آبشستگی از بالا توسط متر لیزری نیاز بود تا آب درون چاله تخلیه شود. این امر با توجه به ابعاد ماسه‌ریزی شده و اندازه ذرات رسوبی (تقریباً کمتر از یک میلیمتر) ساعت‌ها به طول می‌انجامید. روش‌های مختلفی آزمایش شد که بهترین آنها بدون آشفتگی در سطح رسوبات نصب زهکش در کف فلوم بود.

### دیاگرام جریان فلوم

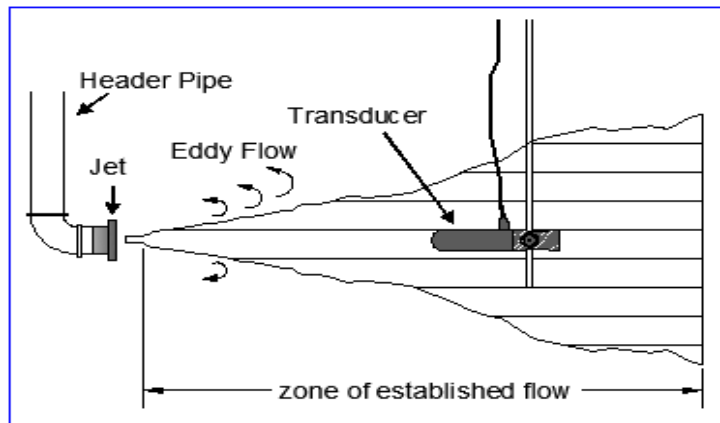
شکل ۷ دیاگرام جریان فلوم را براساس توضیحات نشان می‌دهد. در این شکل مسیر قرمز رنگ مسیر تزریق جت، بخش سبز رنگ خط، مکش پمپ‌ها و لوله‌های آبی رنگ سرریز نیلوفری و لوله‌های تخلیه آن را جهت ثابت نگهدارنده تراز سطح آب را نمایش می‌دهد.



شکل ۷: دیاگرام جریان تزریق جت

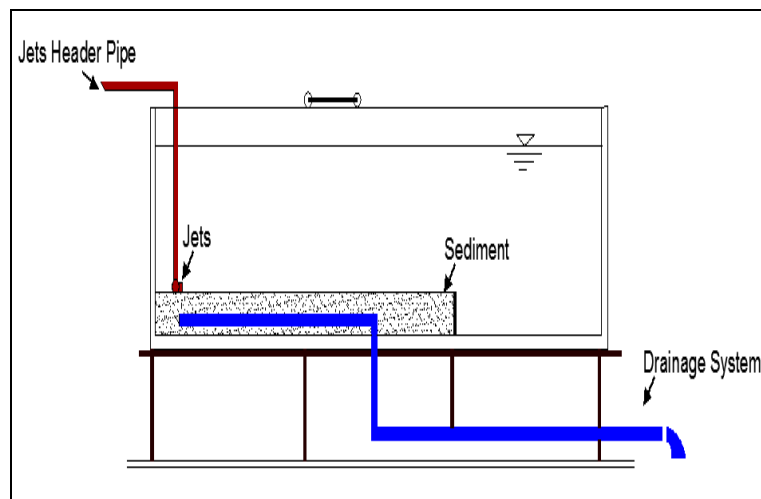


شکل ۸ بزرگنمایی جریان خروجی از جت را در مجاورت سنسور سرعت سنج الکترومغناطیس نمایش می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است جهت برداشت سرعت جریان بر روی خط مرکزی سنسور سرعت‌سنج در راستای محور جت بر روی مختصات حرکت می‌نماید. شکل ۸ دیاگرام برداشت سرعت جریان را نمایش می‌دهد.



شکل ۸: نحوه برداشت سرعت جریان

شکل ۹ دیاگرام جریان خروجی و سیستم زهکش کف فلوم را نشان می‌دهد. در این شکل سیستم تخلیه به رنگ آبی و پایپینگ سیستم زهکش به رنگ قرمز نشان داده شده است.



شکل ۹: دیاگرام جریان سیستم زهکش و تخلیه

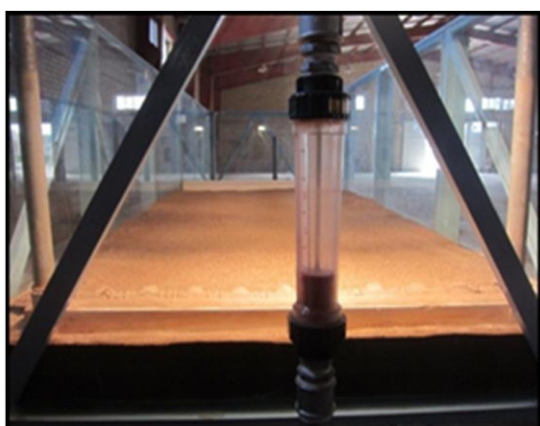
### اندازه‌گیری دبی

یکی از مهمترین بخش‌های این تحقیق دبی سنجی جریان برای بدست آوردن سرعت جریان خروجی از جت بود. لذا اقدام به تهیه روتامتر با ظرفیت ۱۶-۱/۶ مترمکعب بر ساعت شد. با توجه به کاتالوگ دقت این دستگاه از ۱ تا ۴ درصد خطا بود. با توجه به حساسیت و افزایش دقت کار و همچنین کنترل دبی قرائت شده توسط روتامتر اقدام به ساخت سیستم

اندازه‌گیری دبی حجمی شد، که پس از کنترل دبی‌های مدنظر این تحقیق میزان خطای روتامتر در این محدوده برابر ۲ درصد بود.



شکل ۱۰: دبی‌سنج حجمی جهت صحت‌سنجی دبی جریان



شکل ۱۱: دبی‌سنج روتامتر و شیر کنترل دبی جریان ورودی به فلوم

### اندازه‌گیری عمق آبشستگی

پس از تخلیه آب فلوم و زهکشی رسوبات کف، عمق آبشستگی با استفاده از متر لیزری از روی ارابه دو بعدی که بر روی فلوم نصب شده بود قرائت می‌شد. ارابه به گونه‌ای ساخته شد تا با نصب یک عدد شیشه شفاف و ترسیم شبکه مختصات  $(x, y)$  بر روی آن جهت استقرار متر لیزری، بتوان مختصات افقی و قائم چاله آبشستگی را برداشت نمود.

### اندازه‌گیری سرعت جریان

بررسی هیدرولیک جریان خروجی و الگوی توزیع سرعت در راستای محور مرکزی جت می‌تواند تغییرات توان جت تخلیه‌شونده در سیال پذیرنده را در اثر تغییر در پارامترهای جت بخوبی نشان دهد.

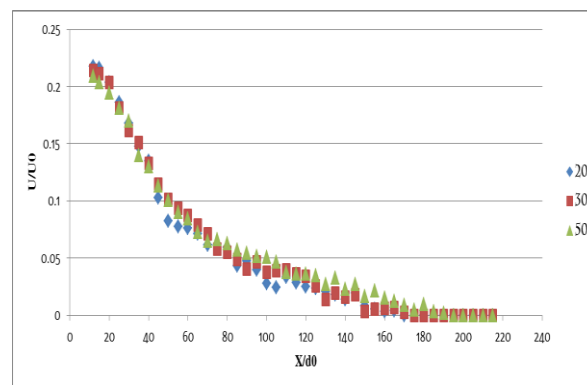
## روش انجام آزمایش‌ها

بر اساس آنچه که در برنامه آزمایش‌ها ارائه شد، تعداد کل آزمایش‌های مورد تحقیق در این مطالعه شامل ۱۸ آزمایش بوده که تعداد ۱۲ عدد آن مربوط به انجام آزمایشات رسوبی و ۶ عدد آن مربوط به آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت است. پس از رسیدن به شرایط پایدار جهت انجام آزمایش‌های مورد هدف در این تحقیق روش انجام، بصورت گام به گام صورت پذیرفت:

ابتدا با قرار دادن نازل موردنظر بر روی لوله تزریق، اقدام به پر کردن فلوم با کمک پمپ انتقال آب از مخازن تا تراز سطح موردنظر شدیم که پس از روشن نمودن پمپ‌های تزریق و با تنظیم دبی جریان با استفاده از شیر کنترل دبی ودبی سنج روتامتر نسبت به انجام آزمایش با توجه به زمان تعادل مورد نظر شدیم که پس از انجام آزمایش ابتدا شیر تزریق را بسته تا بتوانیم در سطح تراز معین و زمان تعادل مورد نظر آزمایش را انجام دهیم و بعد از آن اقدام به تخلیه آب فلوم کرده که با باز کردن شیر تخلیه زهکش کف فلوم را از آب تخلیه کرده و در انتها با تنظیم اریبه سه بعدی اندازه‌گیری عمق و ابعاد آبشستگی انجام و ثبت و اقدام به برداشت نتیجه آزمایشات می‌کنیم و سپس ماسه را دوباره برای آزمایش بعدی تسطیح کرده و فلوم را پر از آب و در سطح تراز بعدی بقیه آزمایشات را انجام می‌دهیم.

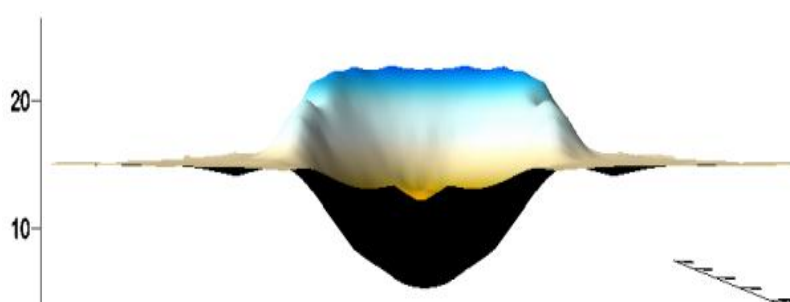
## نتایج و بحث

همانگونه که در نمودارها مشخص است با افزایش عدد فرود در خروجی نازل، سرعت جریان در سیال پذیرنده نیز بیشتر شده، به همین میزان سرعت فلاکس کلی جریان با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود. همچنین با دور شدن از نازل بر روی محور مرکزی آن سرعت جریان کاهش می‌یابد. برای بررسی تاثیر عمق استغراق سیال پذیرنده بر روی سرعت خروجی نازل آزمایشات سرعت‌سنجی در اعماق استغراق مختلف انجام شد که شکل ۱۲ نتایج این آزمایشات را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل ۱۲، سرعت خروجی نازل به‌ازای اعماق استغراق ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ برابر قطر نازل مشخص شد که سرعت‌های اندازه‌گیری شده بر هم منطبق بوده و تغییرات عمق بر روی سرعت خروجی تأثیرگذار نمی‌باشد.



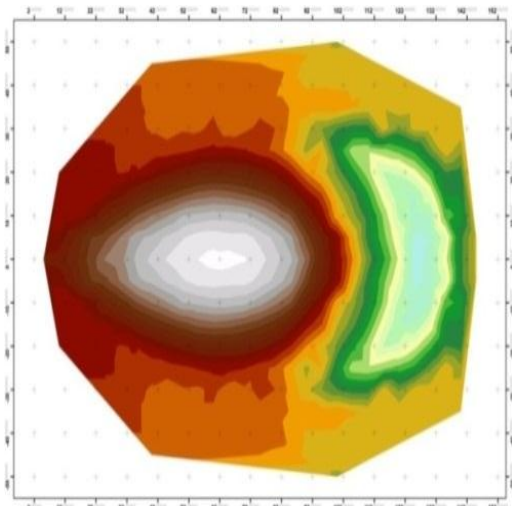
شکل ۱۲: تغییرات سرعت بدون بعد در اثر تغییر عمق استغراق در سیال پذیرنده به ازای عدد فرود  $Fr_0 = 4/22$

پس از انجام آزمایش زمان تعادل و مشخص شدن پارامترهای موثر طبق رابطه ۲، آزمایشات با عمق استغراق ۵۰ برابر قطر نازل شروع و عدد فرودهای مختلف برای این تراز آزمایش شد. شکل ۱۶، نمودار پروفیل طولی آبشستگی با عمق استغراق ۵۰ در راستای محور مرکزی جت نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲۰)، با افزایش عدد فرود عمق چاله آبشستگی و پشته رسوبی افزایش می‌یابد. با استفاده از متر لیزری الگوی آبشستگی پایین دست نازل برداشت شد و با استفاده از نرم افزارهای Surfer و GIS به ترتیب نمای سه بعدی و پلان الگوی آبشستگی ترسیم شد. شکل ۱۳ تصویر حفره و پشته رسوبی در الگوی آبشستگی جت در نمای پلان و روبرو در راستای محور جت را نشان می‌دهد.

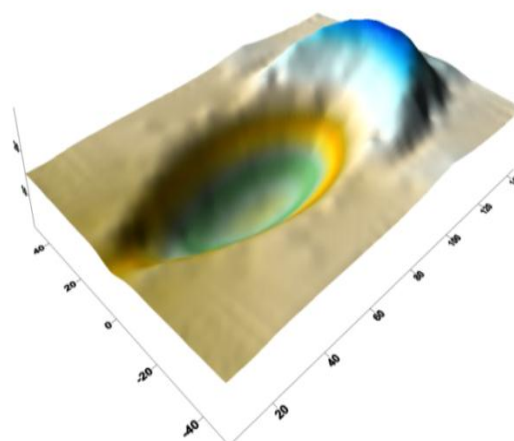


شکل ۱۳: پلان و نمای روبروی الگوی آبشستگی پایین دست چپ

شکل ۱۴ و ۱۵ خروجی نرم افزارهای surfer و GIS را برای فرود دنسیمتریک ۴۱ نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است الگوی آبشستگی از یک حفره آبشستگی و پشته رسوبی تشکیل شده است.

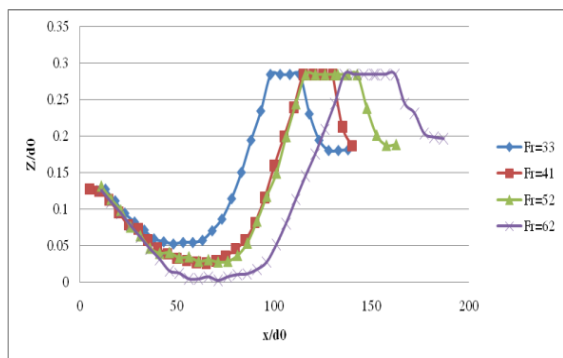


شکل ۱۵: خروجی نرم افزار GIS به ازای فرود ۴۱



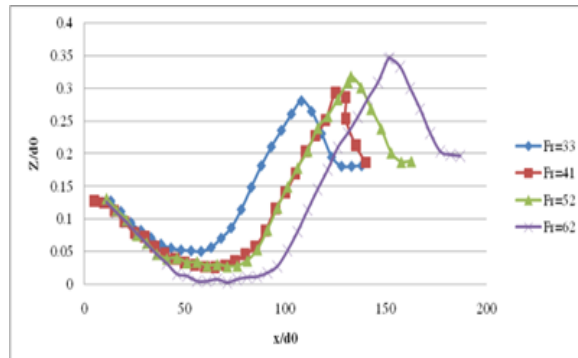
شکل ۱۴: خروجی نرم افزار surfer به ازای فرود ۴۱

جهت کمی نمودن، نمودار پروفیل طولی آبشستگی برای نازل با تراز استغراق و اعداد فرود ذرات مختلف در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است.



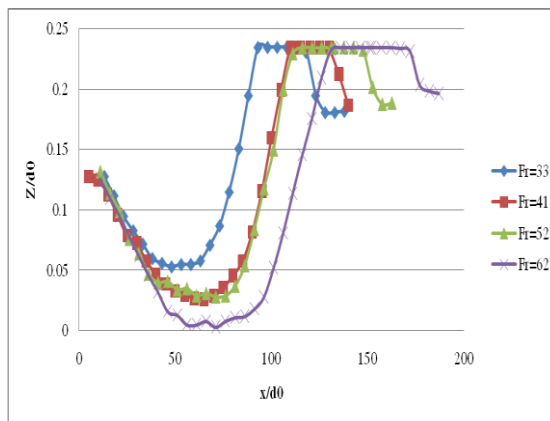
شکل ۱۷: مقایسه پروفیل طولی آبشستگی در راستای محور

$$\frac{H}{d_0} = 30 \text{ به ازای } x \text{ نازل}$$



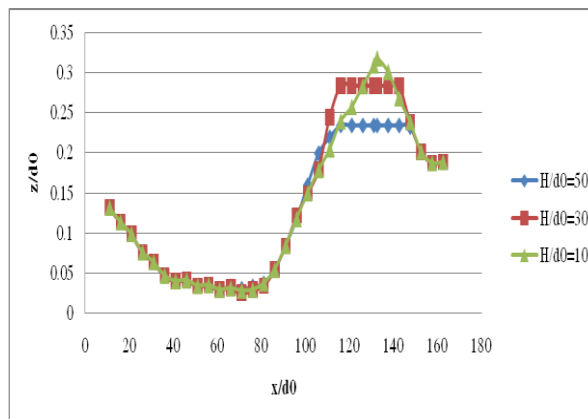
شکل ۱۶: پروفیل طولی آبشستگی در راستای محور نازل x

$$\frac{H}{d_0} = 50 \text{ به ازای } x \text{ نازل}$$



شکل ۱۸: مقایسه پروفیل طولی آبشستگی در راستای محور نازل به ازای  $\frac{H}{d_0} = 10$

با توجه به شکل‌های ۱۶ الی ۱۸ با تغییر عمق استغراق از ۵۰ به ۱۰ همانگونه که مشخص است حداکثر پشته رسوبی با تراز سطح آب برابری می‌نماید یعنی اینکه در شرایط جذرومدی در صورتی که تراز عمق استغراق کمتر از پشته رسوبی باشد، پشته رسوبی به صورت قله نخواهد بود و قله به صورت تخت صاف می‌شود.



شکل ۱۹: مقایسه پروفیل آبشستگی پایین دست نازل با تغییر در عمق استغراق به ازای فزود دندسیمیتریک ۵۲



شکل ۲۰: تصویر الگوی آبشستگی در عمق استغراق ۳۰

### نتیجه‌گیری

این تحقیق اختصاص به تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق دارد. در این قسمت تأثیر تغییرات عمق استغراق بر سرعت جریان خروجی نازل بر روی محور مرکزی و الگوی آبشستگی پایین دست بررسی و روابط حاکم بر الگوی آبشستگی استخراج شد. در محدوده عدد فرود جت  $Fr_0$  در این تحقیق (۳۴-۱۸) و فرود ذرات رسوب  $Fr_d$  برابر (۶۸-۳۵) می‌باشد و عدد رینولدز جت  $Re_0$  در زمان انجام آزمایشات در محدوده (۱۰۶۱۰۰-۵۶۰۰) قرار داشت و تعداد ۱۲ آزمایش آبشستگی و ۶ آزمایش سرعت‌سنجی انجام شد و با افزایش عدد فرود در خروجی نازل، سرعت جریان در سیال پذیرنده نیز بیشتر می‌شد، همچنین به همین میزان سرعت فلاکس کلی جریان با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شد و با بررسی تأثیر عمق استغراق سیال پذیرنده بر روی سرعت خروجی نازل آزمایشات سرعت‌سنجی در اعماق استغراق مختلف انجام شد. با دور شدن از منبع تولید مومنتوم یا نازل، سرعت جریان با یک گرادینان مشخص بر روی محور مرکزی کاهش می‌یابد. به همین نسبت دامنه جریان توسعه می‌یابد که باعث می‌شود دبی فلاسک جریان ثابت بماند. با تغییر عمق استغراق از ۵۰ به ۱۰ همانگونه که مشخص است حداکثر پشته رسوبی با تراز سطح آب برابری می‌نماید یعنی اینکه در شرایط جذر و مدی در صورتیکه تراز عمق استغراق کمتر از پشته رسوبی باشد پشته رسوبی به صورت قله نخواهد بود و قله به صورت تخت صاف می‌شود و عدم تأثیر معنادار عمق استغراق بر ابعاد حفره آبشستگی انجام آبشویی در رودخانه‌های جذر و مدی در حالت مد کامل توصیه می‌شود، دلیل این امر علاوه بر عدم تأثیر استغراق حرکت جریان غلیظ تولید شده به پایین دست در اثر آبشویی و شروع جذر می‌باشد و تأثیر عمق استغراق بر حفره آبشستگی تا ۵۰ برابر قطر نازل معنی‌دار نبود. بنابراین مدل‌های آماری در روابط ۳ و ۴ برای پارامترهای توسعه الگوی آبشستگی جت برای نازل با عمق استغراق ۵۰ ارائه شده است، استخراج شد.

$$R^2 = 0.852 \quad \frac{x_m}{d_0} = 13.173 Fr_d^{0.611} \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$R^2 = 0.836 \quad \frac{y_m}{d_0} = 2.7210 Fr_d^{0.814} \quad \text{رابطه ۴:}$$

## سیاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات مسئولین سازمان آب و برق خوزستان که در انجام این تحقیق یاری فرمودند تشکر و قدردانی نمایند.

## منابع

- Adduce, C., and Mele, P. (2004).** Local scour by submerged turbulent jets. paper presented at International Conference on Hydroscience and Engineering 2004, Intern. Association for Hydraulic Research and Engineering, Brisbane, Queensland, Australia, 31 May to 3 June, pp:147-154.
- Ahadian, J. and Musavi Jahromi, S. H. (2008).** Investigation of variation of efflux momentum in shallow receiving water by using FLOW-3D. Proceeding of the International Symposium of Water Resource Management, Tabriz, Iran, (ISWRMT), pp: 551-557.
- Ahadian, J. and Musavi Jahromi, S. H. (2009).** Effect of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jet in the static ambient flow. Journal of applied Sciences, 9 (21), pp: 3843-3849.
- Ali, K. H. M. and Lim, S. Y. (1986).** Local scour caused by submerged wall jet. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2 (81), pp: 607-645.
- Chen, J. Y. (2001).** Characteristics of check dam scour hole by free over-fall flow. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 24 (6), pp: 673-680.
- Hogg, A., Huppert, H. and Dade, W. B. (1997).** Erosion by planar turbulent wall jets. Journal of Fluid Mechanics, 338, pp: 317-340.
- Mehraein, M., Ghodsian, M. and Salehi Neyshaboury, S. A. A. (2009).** Effect of inclination of wall jet on scour. 33rd IAHR Congress, pp: 431-439.
- Peiqing, L., Jizhang, G. and Yongmei, L. (1998).** Experimental investigation of submerged impinging jets in a plunge pool downstream of large dams, Science in China Series E: Technological Sciences, 41(4), pp: 357-365.