

# بررسی تشابه هندسی پروفیل‌های آبشستگی پائین دست جت افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی

پژمان علی‌حسینی<sup>۱</sup> مجتبی صانعی<sup>۲</sup> کیومرث ابراهیمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران. [pejman13\\_a@yahoo.com](mailto:pejman13_a@yahoo.com)

۲- استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور. [mojtabasaneie@yahoo.com](mailto:mojtabasaneie@yahoo.com)

۳- استادیار گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. [EbrahimiK@ut.ac.ir](mailto:EbrahimiK@ut.ac.ir)

## چکیده

هر ساله هزینه‌های سنگینی برای کنترل و جلوگیری از تخریب ناشی از آبشستگی در پایین دست سازه‌های آبی، در مواقع سیلابی و غیر سیلابی، صرف می‌شود. از این رو پدیده آبشستگی در سازه‌ها بسیار حائز اهمیت است و پیش‌بینی آن قبل از ساخت سازه امری ضروری برای هر طرحی می‌باشد. گسترش این پدیده می‌تواند پایداری سازه را به خطر اندازد ضمن اینکه تجمع مواد فرسایش یافته با تغییر رقوم پایاب بر عملکرد خروجی سازه تأثیر می‌گذارد. در این مقاله نتایج بررسی آزمایشگاهی پدیده آبشستگی در بستر با مصالح غیر چسبنده در پائین دست یک کف بند، در اثر یک جت افقی مستغرق ناشی از بازشدگی دریچه ارائه شده است. در این تحقیق با انجام شبیه سازی فیزیکی، پروفیل حفره آبشستگی بانضمام تپه پایین دست حفره در زمان‌های مختلف ثبت شد. تحلیل نتایج بدست آمده به صورت کمی و کیفی نشان دهنده تشابه هندسی بین پروفیل‌های طولی آبشستگی بود. به عبارت دیگر پس از بررسی پارامترهای مختلف مانند ضخامت جت (میزان بازشدگی دریچه کشویی)، دبی و سرعت جت، عمق پایاب، زمان و قطر دانه‌بندی ذرات رسوبی، انطباق بسیار خوبی بین منحنی‌های بی‌بعد مشاهده شد. این امر نشان دهنده این است که پروفیل‌های آبشستگی ماهیتاً شبیه به هم بوده و در حالت بی‌بعد مستقل از تمامی پارامترها و عوامل ذکر شده می‌باشند. تغییرات طولی و عرضی پروفیل حفره آبشستگی و تپه پایین دست آن به صورت یک رابطه ترکیبی سینوسی و کسینوسی بیان شد. با مشخص شدن منحنی پروفیل آبشستگی، ویژگی‌های اصلی این پروفیل‌ها مانند ماکزیمم عمق فرسایش، محدوده ایجاد حفره و ارتفاع تپه پایین دست حفره آبشستگی تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، جت افقی مستغرق، کف‌بند، تشابه هندسی، مدل آزمایشگاهی.

## مقدمه

به فرسایش بستر و کناره آبراهه در اثر عبور جریان آب، و نیز به فرسایش بستر در پائین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا به فرسایش بستر در اثر بوجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، آبشستگی<sup>۱</sup> گویند [۱].  
معادله تفاضلی انتقال بار بستر (سیمونز و همکاران- ۱۹۶۵)<sup>۲</sup> در جریان دو بعدی در کانال مستطیلی با محور X فرض شده در جهت پایاب، در طول بستر می‌تواند به شکل زیر نوشته شود [۲]:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{k} \frac{\partial i}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

که در آن:

$Z$  = برآمدگی بستر رودخانه از سطح مفروض،  $k$  = وزن واحد توده مواد بستر،  $i$  = میزان جریان وزنی رسوبات به ازای واحد عرض و  $t$  = طول مدت زمانی.

آبشستگی گاهی به صورت غیر طبیعی و به دلیل تغییرات ایجاد شده توسط بشر مانند ایجاد سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، کالورت‌ها، دریچه‌های کشویی و ... که جریان خروجی از آن‌ها اغلب به صورت جت است، ایجاد می‌شود. حفره‌های ایجاد شده در اثر آبشستگی در پایین دست این سازه‌ها ممکن است خطرات جدی را به همراه داشته باشد. تجربه نشان داده که شکست‌های برشی و تراوش ایجاد شده در اثر پدیده آبشستگی سبب خرابی در انتهای بستر حفاظت شده (کف‌بند) می‌شود، ضمن اینکه تجمع مواد فرسایش یافته با تغییر رقوم پایاب بر عملکرد خروجی سازه تأثیر می‌گذارد. از این رو مطالعه مکانیزم آبشستگی و همچنین بررسی هندسی پروفیل‌های ایجاد شده شامل حفره آبشستگی و تپه تشکیل شده در پایین دست آن به ویژه در پایین دست دریچه کشویی و جت‌های افقی مستغرق خروجی از آن بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اینکه جریان در محل وقوع فرسایش یک جریان دوفازی (آب و رسوب) می‌باشد، لذا بررسی مسأله آبشستگی در پائین دست سازه‌های آبی یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های هیدرودینامیکی است. به همین جهت این پدیده اغلب به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. عوامل مختلفی را می‌توان بر پدیده آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مؤثر دانست مانند هندسه این نوع سازه‌ها و شرایط هیدرولیکی ایجاد شده توسط آن‌ها،

<sup>1</sup> scouring

<sup>2</sup> Simons et al. 1965

مشخصات دانه‌بندی ذرات بستر و ... در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آبستنگی پایین‌دست کف‌بند، ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از یک دریچه کشویی، با هدف بررسی هندسه پروفیل‌های آبستنگی ایجاد شده در اثر تغییر عوامل مؤثر بر این پدیده نظیر ضخامت جت (میزان بازشدگی دریچه کشویی)، دبی و سرعت خروجی جت افقی، عمق پایاب، زمان و قطر متوسط دانه‌بندی ذرات رسوبی ارائه شده است.

### پیشینه تحقیق

شاید بتوان گفت که اولین مطالعات در زمینه آبستنگی جت دیواره‌ای را لارسن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۲ میلادی انجام داده است. وی آزمایش‌های بسیاری با سه نوع مواد بستر و چندین سرعت جت انجام داد. وی نتیجه گرفت که شکل پروفیل حفره آبستنگی در تمام حالات مشابه می‌باشند، بنابراین با استفاده از پارامتر طول  $X_D$  (فاصله افقی از خروجی جت تا تاج تپه پائین دست حفره آبستنگی) پروفیل بدون بعدی برای پروفیل آبستنگی بدست آورد [۳]. راجاراتنام<sup>۴</sup> (۱۹۸۱)، با مطالعه بر روی آبستنگی ناشی از جت دیواره‌ای مستغرق نشان داد که در حالت حدی پروفیل بدون بعد آبستنگی که با استفاده از  $d_{m0}$  (عمق حفره آبستنگی در حالت تعادل) و  $X_{D0}$  (فاصله افقی از خروجی جت تا تاج تپه پائین دست حفره آبستنگی در حالت تعادل) بدون بعد شده باشد، با  $F_0$  های متفاوت مشابه هستند ( $F_0 = \text{عدد فرود ذره}$ ) [۴]. حسن و نارایانان<sup>۵</sup> (۱۹۸۵)، گسترش آبستنگی پایین دست جت‌های دوبعدی منتشر شده از زیر دریچه را در زمان‌های مختلف بررسی کرده و نتیجه گرفتند که پروفیل‌های آبستنگی در زمان‌های مختلف مشابه می‌باشند [۵]. چاترجی و قوش<sup>۶</sup> (۱۹۹۴)، با برداشت پروفیل آبستنگی ناشی از جت‌های افقی مستغرق، به تشابه آنها و هماهنگ بودن آن با داده‌های حسن و نارایانان (۱۹۸۵) رسیدند. آنان با بی بعد کردن پارامتر طول پروفیل‌ها ( $X$ ) به صورت  $X/X_D$  و عرض پروفیل‌ها ( $h$ ) به صورت  $h/X_D$ ، اظهار کردند که پروفیل‌های آبستنگی در طبیعت خود مشابه و مستقل از زمان بوده اما بستگی به خصوصیات و اندازه دانه بستر دارند [۲]. دی و سارکار<sup>۷</sup> (۲۰۰۶) نتایج یک بررسی آزمایشگاهی بر روی آبستنگی بسترهای رسوبی یکنواخت و غیر یکنواخت در پایین‌دست کف‌بند با طول‌های مختلف، در اثر جت افقی مستغرق که از یک دریچه کشویی منتشر شده بود را ارائه کردند [۶]. آنها با بی بعد کردن پارامتر طول پروفیل‌ها ( $X$ ) به صورت  $X/d_s$  و عرض پروفیل‌ها ( $y$ ) به صورت  $y/d_s$  (= عمق حفره آبستنگی در هر زمان)، اظهار داشتند پروفیل‌های آبستنگی (شامل حفره و تپه تشکیل شده در پایین دست آن) در زمان‌های مختلف شباهت خاصی به هم دارند و مستقل از تمامی پارامترهای مؤثر از جمله زمان، نوع دانه‌بندی مصالح، ضخامت و سرعت جت و همچنین عمق پایاب هستند. آنها از این طریق توانستند حجم حفره آبستنگی و همچنین حجم تپه تشکیل شده در پایین دست آن را در واحد عرض و در هر زمان تخمین زنند. موسوی‌خندان و برقی<sup>۸</sup> (۱۳۸۶.ش) به کمک یک مدل آزمایشگاهی و با استفاده از یک دریچه کشویی و جت افقی (به منظور تشکیل پرش هیدرولیکی)، تأثیر زاویه واگرایی دیواره‌های جانبی حوضچه‌های آرامش و اگر بر روی پدیده آبستنگی در پائین دست این نوع حوضچه‌ها بررسی کردند [۷]. آنها اظهار داشتند نتایج تحقیق بدست آمده به صورت کمی و کیفی نشان دهنده تشابه هندسی بین منحنی‌های گودال آبستنگی می‌باشد. به این صورت که پس از بررسی پارامترهای مختلف مانند دبی، زمان و زاویه واگرایی دیواره‌های جانبی حوضچه آرامش، شاهد انطباق نسبتاً خوبی بین منحنی‌های بی‌بعد بودند. یعنی منحنی بی‌بعد شده گودال آبستنگی مستقل از پارامترهای یاد شده است. انطباق منحنی‌های بی‌بعد به آن‌ها کمک کرد با برازش رابطه زیر بر این منحنی‌ها، بتوانند منحنی گودال آبستنگی را پیش‌بینی کنند:

$$\frac{Y}{d_s} = 1.067 \sin \left( 0.256 \frac{X}{d_s} \right) - 0.3117 \cos \left( 0.386 \frac{X}{d_s} \right) \quad (2)$$

که در آن:

$X$ : آبستنگی در جهت افقی،  $Y$ : آبستنگی در جهت قائم و  $d_s$ : عمق حفره آبستنگی است. آنها توانستند با مشخص شدن منحنی گودال آبستنگی، ویژگی‌های اصلی این گودال مانند محل ایجاد ماکزیمم فرسایش، محدوده ایجاد گودال و شیب بالا دست گودال را تعیین کنند. همچنین آنها با استفاده از منحنی برازش داده شده بر منحنی‌های بی‌بعد شده گودال آبستنگی توانستند حجم مصالح حمل شده از داخل گودال به خارج را محاسبه کنند. همچنین آنها نتیجه گرفتند که فاصله افقی محل ایجاد ماکزیمم فرسایش از انتهای حوضچه آرامش بین ۳ تا ۵ برابر مقدار ماکزیمم عمق فرسایش متغیر است و طول محدوده‌ای که فرسایش در آن رخ می‌دهد (طول گودال آبستنگی در امتداد جریان) بین ۱۲ تا ۱۴ برابر مقدار عمق فرسایش می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی انجام شده است. برای رسیدن به اهداف این تحقیق مدل آزمایشگاهی مطابق شکل (۱) ساخته شد. جریان آب از یک مخزن زیرزمینی با لوله‌ای به قطر ۲ اینچ توسط پمپی

<sup>3</sup> Larsen

<sup>4</sup> Rajaratnam

<sup>5</sup> Hassan & Narayanan

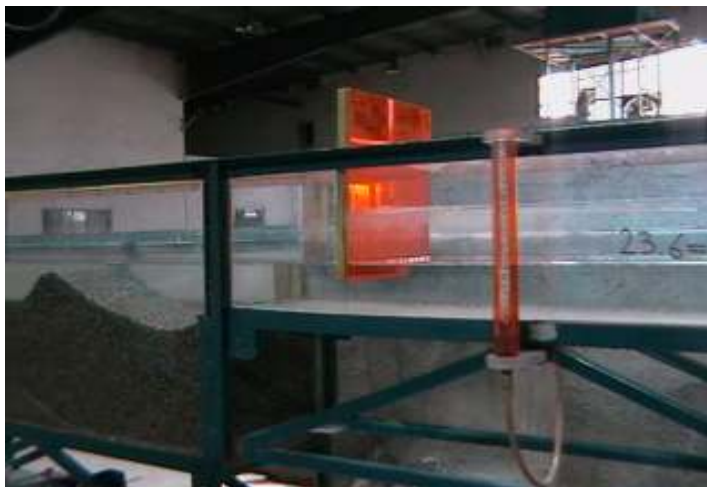
<sup>6</sup> Chatterjee & Ghosh

<sup>7</sup> Dey & Sarkar

که نیروی محرکه آن توسط یک الکتروموتور تأمین می‌شد وارد مخزن فلزی روبازی به ابعاد (۱۰۰×۵۰×۵۰) سانتی‌متر می‌شد و از آنجا به داخل فلوم جریان می‌یافت. یک شیر کنترلی برای تأمین مقدار جریان مورد نیاز به لوله متصل بود که به کمک آن می‌شد جریان از ۱ تا ۷ لیتر بر ثانیه را وارد فلوم کرد. وجوه فلوم از قاب فلزی و دیواره‌ها و کف آن با مصالح شفاف از جنس پلکسی گلاس بود تا بتوان به خوبی داخل فلوم و بخصوص تغییرات سطح مواد بستر و همچنین تغییرات پروفیل سطح آب را مشاهده کرد. طول فلوم ۸ متر، عرض فلوم ۲۵۵ میلی‌متر، عمق آن ۲۵۰ میلی‌متر و ارتفاع آن از کف آزمایشگاه ۱۳۰ سانتی‌متر بود. به منظور ایجاد جت افقی آب و همچنین پرش هیدرولیکی از یک دریچه کشویی استفاده شد. دریچه کشویی ساخته شده از جنس پلکسی گلاس و در فاصله ۲۷۵ سانتی متری از ابتدای فلوم کار گذاشته شد. طول دریچه ۳۰۰ میلی متر و عرض دریچه ۲۵۵ میلی متر و همانند عرض فلوم بود. دریچه قابلیت بالا و پائین رفتن روی دیواره‌های فلوم به منظور ایجاد ضخامت‌های مختلف جت افقی (بازشدگی‌های مختلف دریچه) آزمایشی را داشت. در دو طرف دریچه دو نوار از جنس فیبر فشرده به منظور ثابت نگاه داشتن دریچه در جای مورد نظر و همچنین آب بندی آن استفاده شد. بعد از کارگذاری دریچه و تنظیم ضخامت جت افقی مورد نظر، دریچه کاملاً تراز می‌شد تا به صورت کاملاً عمودی نسبت به کف و دیواره‌های فلوم قرار داشته باشد، همچنین زیر دریچه بصورت مورب بریده شد تا لبه زیر دریچه تیز شده و جت کاملاً به صورت مستطیلی در آید. لازم به ذکر است چنانچه تغییرات اندکی در ابعاد و زوایای کارگذاری دریچه ایجاد می‌شد تغییرات بسیار زیادی در پروفیل آبشستگی به وجود می‌آمد. بنابراین لازم بود دریچه در عرض فلوم کاملاً یکنواخت باشد تا پروفیل آبشستگی دو بعدی قابل قبولی داشته باشیم. جت افقی بعد از عبور از دریچه روی کف بندی به طول ۲۵ سانتی‌متر که همان کف فلوم و از جنس پلکسی گلاس است حرکت کرده و سپس به رسوبات قابل فرسایش به منظور ایجاد پروفیل‌های آبشستگی برخورد می‌کرد. به منظور کنترل سطح آب داخل فلوم (عمق پایاب) از یک سرریز کنترلی در انتهای فلوم استفاده شد. عمق جریان در پایاب توسط ژرف سنجی (point gage) با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. جریان آب بعد از عبور از سرریز کنترلی تنظیم عمق پایاب به یک کانال بتنی تعبیه شده در کف آزمایشگاه به طول تقریبی ۳ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ریزش کرده که در انتهای این کانال یک سرریز مثلثی شکل فلزی لبه تیز استاندارد با زاویه ۹۰ درجه برای اندازه‌گیری دبی قرار داشت. ارتفاع آب در فاصله حدوداً ۵۰ سانتی‌متری بالادست این سرریز توسط یک ژرف سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر قرائت و با تعیین ارتفاع آب بالا دست سرریز و استفاده از رابطه سرریزهای مثلثی، مقدار دبی تعیین می‌شد. لازم به ذکر است سرریز مثلثی بعد از کالیبره شدن مورد استفاده قرار گرفت. مصالح و

رسوبات به کار رفته در این تحقیق دارای دو نوع دانه بندی کاملاً یکنواخت با قطر متوسط ۱ و ۳ میلی‌متر و چگالی  $\frac{gr}{cm^3}$  ۲/۵۶ بودند.

اندازه‌گیری‌ها در راستای قائم (Z در محور مختصات) به منظور برداشت توپوگرافی بستر و پروفیل ابعاد آبشستگی در زمان‌های مختلف، توسط یک کاغذ شفاف نصب شده بر روی دیواره شفاف فلوم و خط کش (گونیا) صورت گرفت. بدین صورت که به دلیل شفاف بودن دیواره فلوم و نمایان بودن سطح بستر و مصالح و پروفیل آبشستگی و همچنین تشابه پروفیل طولی آبشستگی در کل عرض کانال، کاغذی شفاف در یک طرف دیواره کانال نصب شد و در زمان‌های مختلف و مورد نظر، پروفیل آبشستگی و تغییرات بستر با مداد و با رنگ‌های مختلف به منظور تفکیک پروفیل‌ها در زمان‌های مختلف روی آن کشیده شد. سپس با خط کش (گونیا) با دقت ۱ میلی‌متر اندازه ابعاد هر یک از پروفیل‌های آبشستگی برداشت شد. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دریچه کشویی در جای مد نظر کاملاً تراز و ضخامت جت (بازشدگی دریچه) مورد نظر به صورت دقیق تنظیم می‌شد. سپس عمق پایاب مورد نظر به وسیله سرریز کنترلی کاملاً تنظیم شده و جهت اجتناب از آبشستگی ناخواسته و برای آنکه جریان اولیه آبشستگی در مصالح ایجاد نکند الکتروپمپ را روشن و فلوم را پر از آب کرده، سپس پمپ را خاموش و بستر رسوبی پائین دست دریچه کشویی کاملاً تسطیح



شکل ۱- نمایی از مدل آزمایشگاهی و دریچه کشویی تعبیه شده در آن

می‌شد. سپس کاغذ شفاف را روی دیواره فلوم چسبانده و سطح تسطیح شده بستر روی کاغذ علامت گذاری شد. بوسیله شیر کنترلی تعبیه شده در مسیر لوله ورودی به مخزن بالا دست فلوم، ارتفاع آب بالا دست دریاچه کشویی به منظور ایجاد دبی (سرعت جت) مورد نظر تنظیم می‌شد. پمپ را روشن کرده، از این لحظه آزمایش شروع و زمان ثبت می‌شد. با گذشت زمان، به سرعت پروفیل‌های آبشستگی شامل حفره و تپه پائین دست آن ایجاد شد. پروفیل‌های آبشستگی در فواصل زمانی منظم بر روی کاغذ شفاف رسم شد، همچنین تا پایان هر آزمایش چندین مرتبه مقدار دبی (ارتفاع آب در پشت سرریز مثلثی)، عمق پایاب و همچنین سطح آب بالا دست دریاچه کشویی اندازه‌گیری و کنترل شد تا شرایط آزمایش در طول آزمایش ثابت بوده و تغییری نداشته باشد. آزمایش‌ها تا زمانی که عمق حفره آبشستگی به تعادل نسبی برسد ادامه داشت. منظور از تعادل نسبی زمانی است که پروفیل ابعاد حفره آبشستگی شامل طول، عرض و عمق بعد از گذشت مدت زمانی تغییر نکند. که در این تحقیق عمق حفره آبشستگی به عنوان پارامتر تعیین کننده در زمان تعادل نسبی محسوب شد. در واقع تعادل نسبی پروفیل آبشستگی وقتی صورت می‌پذیرد که پروفیل‌های زمانی حفره آبشستگی تقریباً روی هم منطبق شود. در این لحظه پمپ را خاموش کرده و شرایط هیدرولیکی، تسطیح بستر و ... برای انجام آزمایش بعدی آماده می‌شد. در شکل ۲ نمونه‌ای از پروفیل‌های آبشستگی تشکیل شده مشاهده می‌شود. در کل ۶۸ آزمایش با شرایط هیدرولیکی مختلف و به منظور بررسی هندسه پروفیل‌های آبشستگی ایجاد شده در اثر تغییر عوامل مؤثر بر این پدیده نظیر ضخامت جت (میزان بازشدگی دریاچه کشویی)، دبی و سرعت خروجی جت افقی، عمق پایاب، زمان و قطر متوسط دانه‌بندی ذرات رسوبی انجام شد.



شکل ۲- نمونه‌ای از پروفیل‌های آبشستگی تشکیل شده شامل حفره و تپه پایین دست آن

## نتایج

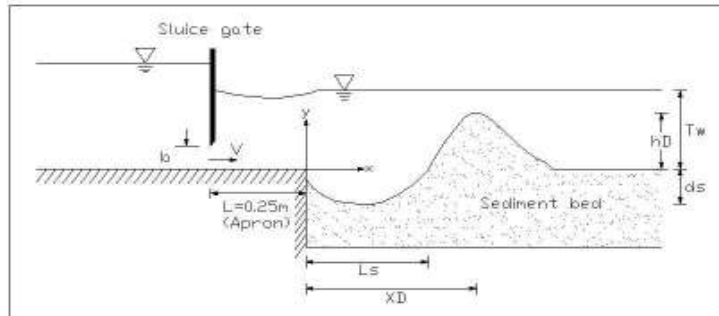
در شکل ۳ نمایی شماتیک از پروفیل طولی آبشستگی تشکیل شده در پایین دست کف‌بند به طول  $L=0/25$  متر، ناشی از بازشدگی دریاچه کشویی به میزان  $b$  و سرعت جت افقی آب به اندازه  $V$  نشان داده شده است. در این شکل، پارامترهای مشخص کننده ابعاد پروفیل آبشستگی شامل عمق حفره آبشستگی ( $d_s$ )، طول حفره آبشستگی ( $L_s$ )، ارتفاع برآمدگی پایین دست حفره آبشستگی ( $h_D$ ) و همچنین فاصله اوج برآمدگی پایین دست حفره آبشستگی تا کف‌بند ( $X_D$ ) به خوبی نمایان است.

با توجه به توپوگرافی‌های برداشت شده از پروفیل طولی ۶۸ آزمایش انجام شده، تحلیل نتایج بدست آمده به صورت کمی و کیفی نشان دهنده تشابه هندسی بین پروفیل‌های طولی آبشستگی می‌باشد. به عبارت دیگر پس از بررسی پارامترهای مختلف مانند ضخامت جت، دبی و سرعت جت، عمق پایاب، زمان و قطر متوسط ذرات رسوبی، انطباق بسیار خوبی بین منحنی‌های بی‌بعد مشاهده شد. این امر نشان دهنده این است که پروفیل‌های آبشستگی ماهیتاً شبیه به هم بوده و در حالت بی‌بعد مستقل از تمامی پارامترها و عوامل ذکر شده می‌باشند.

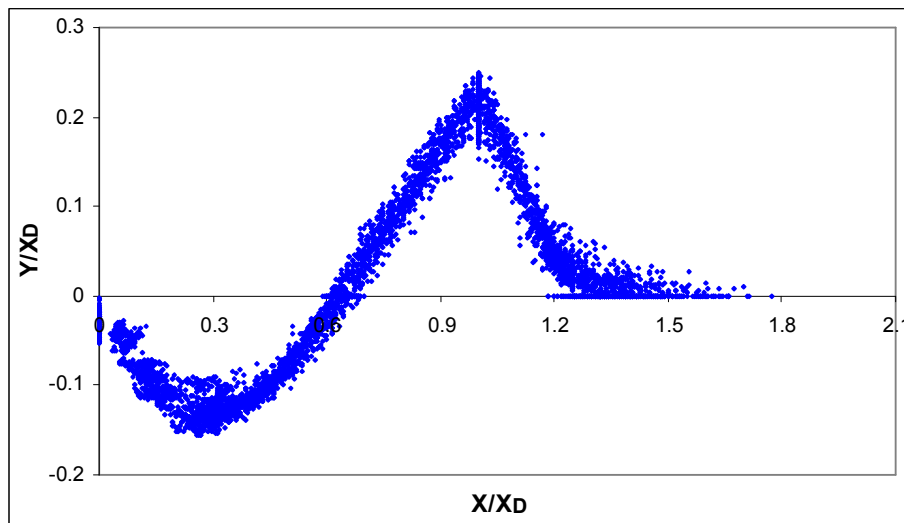
برای بی‌بعد کردن پروفیل‌های طولی آبشستگی، اطلاعات داده‌های برداشت شده از پروفیل‌ها به صورت بی‌بعد مشابه شکل ۴ نشان داده می‌شود.

برای این منظور داده‌های مربوط به طول ( $X$ ) و عرض ( $Y$ ) پروفیل‌ها، به پارامتر  $X_D$  (فاصله افقی نقطه اوج تپه تا کف بند) به صورت  $\frac{X}{X_D}$  و  $\frac{Y}{X_D}$  بدون بعد شده‌اند.

در شکل ۴ نقاط مشاهده شده، مربوط به منحنی‌های بی‌بعد شده پروفیل‌های آبشستگی تمامی آزمایش‌های انجام شده و متغیر بودن سایر پارامترها اعم از ضخامت جت، دبی و سرعت جت، عمق پایاب، زمان و قطر متوسط ذرات رسوبی می‌شوند، با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با وجود متغیر بودن سایر پارامترهای ذکر شده، انطباق بسیار خوبی بین منحنی‌های بی‌بعد وجود دارد و در نتیجه می‌توان گفت که پروفیل‌های آبشستگی ماهیتاً شبیه به هم بوده و در حالت بی‌بعد مستقل از تمامی پارامترها و عوامل ذکر شده می‌باشند.



شکل ۳ - نمایی شماتیک از پروفیل آبشستگی تشکیل شده در پایین دست کف بند، ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه کشویی



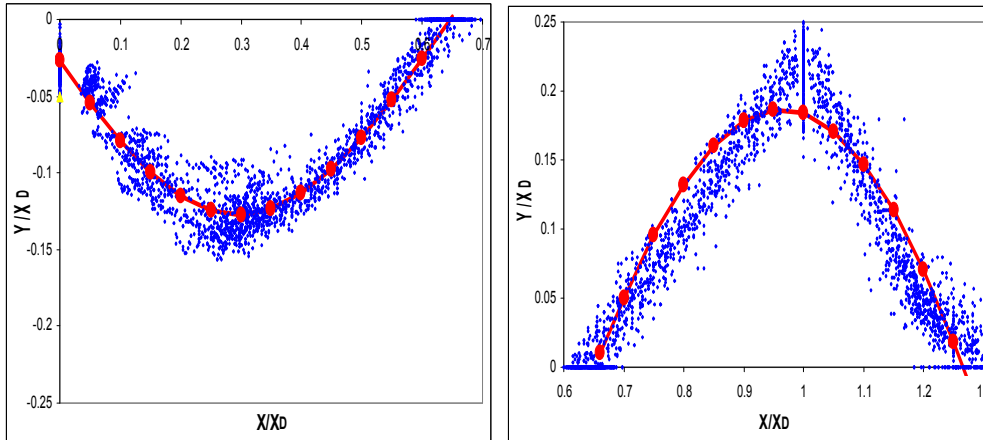
شکل ۴ - پروفیل بی بعد شده آبشستگی

لازم به ذکر است که پروفیل بی بعد شده آبشستگی بدست آمده (شکل ۴)، تطابق بسیار خوبی با پروفیل بی بعد شده آبشستگی بدست آمده توسط چاترجی و قوش (۱۹۹۴) و همچنین حسن و نارایانان (۱۹۸۵) دارد [۵ و ۲].

با توجه به شکل (۴)، می توان پروفیل بی بعد شده آبشستگی را به دو قسمت تقسیم کرد. یک قسمت مربوط به پروفیل حفره آبشستگی (شکل ۵-الف) و قسمت دوم مربوط به پروفیل تپه تشکیل شده در پایین دست حفره (شکل ۵-ب)، که در اینجا معادلات منحنی های برازش داده شده به هر کدام از قسمت ها جداگانه بیان می شود:

برای هر دو قسمت پروفیل آبشستگی، می توان تغییرات طولی و عرضی پروفیل آبشستگی در پایین دست کف بند را به صورت یک رابطه ترکیبی سینوسی و کسینوسی به فرم زیر بیان کرد:

$$\frac{Y}{X_D} = \alpha \sin \left( \beta \left( \frac{X}{X_D} \right) \right) + \gamma \cos \left( \lambda \left( \frac{X}{X_D} \right) \right) \quad (۳)$$



(الف)

(ب)

شکل ۵ - پروفیل بی بعد و منحنی برازش داده شده: الف) حفره آبستگي ب) تپه پایین دست حفره

که در آن:

$X$ : آبستگي در جهت افقي

$Y$ : آبستگي در جهت قائم

$X_D$ : فاصله افقي نقطه اوج تپه تا کف بند

و  $\alpha, \beta, \gamma, \lambda$  ضرایب تجربی هستند که مقدار آن ها از طریق تحلیل رگرسیون داده‌ها به دست می‌آید.

در این تحقیق، برای پروفیل قسمت حفره آبستگي، با توجه به منحنی شکل (۵-الف)، رابطه‌ای به صورت زیر و با ضریب همبستگی  $R^2 = 0.93$  بر نقاط برازش داده شد:

$$\frac{Y}{X_D} = -0.128 \sin\left(4.541 \frac{X}{X_D}\right) - 0.0264 \cos\left(4.988 \frac{X}{X_D}\right) \quad (۴)$$

برای پروفیل قسمت تپه آبستگي نیز، با توجه به منحنی شکل (۵-ب)، رابطه‌ای به صورت زیر و با ضریب همبستگی  $R^2 = 0.87$  بر نقاط برازش داده شد:

$$\frac{Y}{X_D} = -0.305 \sin\left(1.277 \frac{X}{X_D}\right) - 0.476 \cos\left(3.172 \frac{X}{X_D}\right) \quad (۵)$$

لازم به ذکر است که برای پروفیل بی بعد قسمت تپه، به منظور به دست آوردن معادله‌ای دقیق تر، منحنی تا  $X=1.3X_D$  داده‌ها برازش داده شد.

با استفاده از معادلات کلی پروفیل‌های طولی و عرضی حفره و تپه آبستگي می‌توان به سادگی حجم حفره و تپه آبستگي را نیز محاسبه کرد. همچنین با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده روی هندسه پروفیل آبستگي و با مشاهده نمودارهای شکل ۶، می‌توان به برخی از خصوصیات پروفیل‌های آبستگي به صورت زیر اشاره کرد:

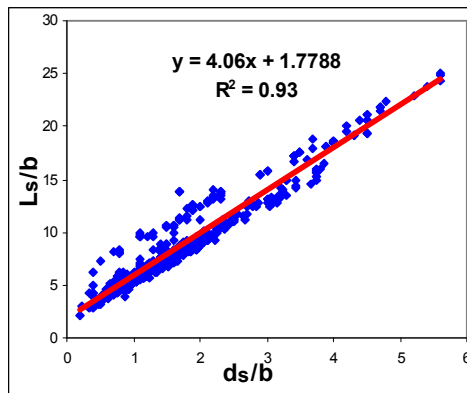
- طول حفره آبستگي مطابق تعریف عبارت است از فاصله افقی از انتهای کف بند تا محل تقاطع پروفیل آبستگي با سطح بستر مینا، که همان طول محدوده‌ای است که فرسایش در آن اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود تغییرات طول حفره آبستگي ( $L_s$ ) با عمق حفره آبستگي ( $d_s$ ) به صورت خطی است. با توجه به شکل نسبت طول حفره آبستگي به عمق آبستگي بین  $3/5$  تا  $4/5$  برآورد می‌شود.

- با مشاهده شکل (۶-ب) می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فاصله عمودی نقطه اوج تپه تا سطح بستر مینا ( $h_D$ ) با عمق حفره آبستگي ( $d_s$ ) به صورت خطی است. با توجه به شکل نسبت ارتفاع تپه تشکیل شده در پایین دست حفره آبستگي به عمق آبستگي بین  $1/2$  تا  $1/8$  برآورد می‌شود.

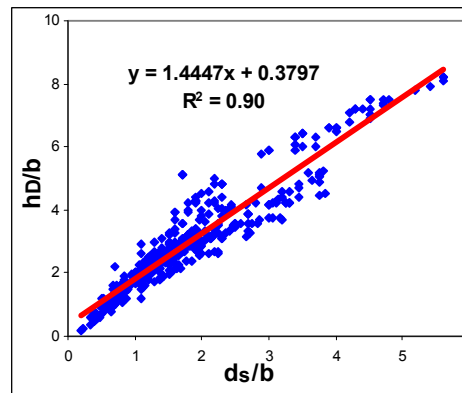
- همچنین با توجه به شکل (۶-ج)، فاصله عمودی نقطه اوج تپه تا سطح بستر مینا ( $h_D$ ) توسط یک رابطه خطی با فاصله افقی نقطه اوج تپه تا انتهای کف بند ( $X_D$ ) تغییر می‌کند. با توجه به شکل نسبت  $X_D$  به  $h_D$  بین  $4$  تا  $5$  برآورد شده است ( $b$  مقدار بازشدگی دریچه یا همان ضخامت جت می باشد).

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

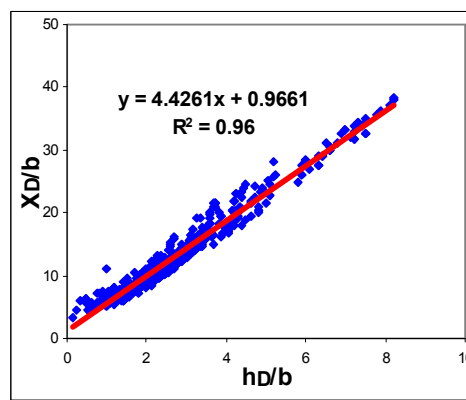
تحلیل نتایج بدست آمده به صورت کمی و کیفی نشان دهنده تشابه هندسی بین پروفیل‌های طولی آبستگي است. بدین معنی که در شرایط هیدرولیکی و آزمایشی مختلف، انطباق بسیار خوبی بین منحنی پروفیل‌های بی بعد آبستگي وجود دارد. در نتیجه پروفیل‌های آبستگي ماهیتاً



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- تغییرات پارامترهای ابعاد پروفیل آبستگي نسبت به یکدیگر

شبيهه به هم بوده و در حالت بی بعد مستقل از تغییرات کلیه پارامترهای مؤثر در مکانیزم آبستگي مانند ضخامت جت (میزان بازشدگی دریچه)، دبي و سرعت جت، عمق پایاب، زمان و قطر ذرات رسوبی می باشند.

### قدردانی و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور که این تحقیق با پشتیبانی آنها تهیه شده است تشکر می شود.

### منابع

- [۱] شفای بجستان، م. (۱۳۸۴) "هیدرولیک رسوب"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ویرایش دوم. چاپ سوم.
- [2] chatterjee, S. S. and Ghosh, S. N and chatterjee, M (1994), "Local scour due to submerged horizontal jet" journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 120, No, 8 p.p. No, 3296.
- [۳] مسعودیان، محسن (۱۳۷۴) "پیش بینی آبستگي ناشی از جت دیواره ای" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی.
- [4] Rajaratnam, N. (1981). "Erosion by plane turbulent jets" Journal of Hydraulic Research, Vol.19, No.4, pp.339-358.
- [5] Hassan, N.M.K.N., and Narayanan, R. (1985). " Local scour downstream of an apron", J. Hydraul. Eng., 111(11), 1371-1385.
- [6] Dey, S. and Sarkar, A. (2006), "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets" journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol.132, No 3.March, 2006.
- [۷] موسوی خندان، سیدابراهیم (۱۳۸۶)، "آبستگي پایین دست دریچه ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.