

## آبشستگی موضعی بستر در پایین دست دریاچه کشویی

حسین حمیدی فر<sup>۱\*</sup> - محمدحسین امید<sup>۲</sup> - محسن نصرآبادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۲

### چکیده

به منظور پیشگیری از آبشستگی گسترده ناشی از جریان پرسرعت خروجی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مانند دریاچه‌های کشویی، معمولاً از یک کفبند صلب استفاده می‌شود. اگرچه وجود کفبند تا حد زیادی منجر به حفاظت بستر می‌گردد، اما به علت مستهلک نشدن کامل انرژی مازاد جریان، در انتهای کفبند آبشستگی موضعی اتفاق می‌افتد که شکل و ابعاد حفرة آبشستگی تشکیل شده بایستی در طراحی‌ها پیش‌بینی گردد. در این تحقیق، ابتدا مهمترین عوامل موثر بر فرآیند آبشستگی در پایین دست کفبند شناسایی و با استفاده از تحلیل ابعادی بصورت بدون بعد تنظیم گردیدند. سپس ۲۲ آزمایش با مدت زمان ۱۲ ساعت، بر مبنای پارامترهای بدون بعد دست آمده از جمله پارامتر بدون بعد جدیدی که در برگزیده تأثیر پارامترهای مختلف است، در یک مدل آزمایشگاهی که شامل یک دریاچه کشویی و یک کانال مستطیلی به طول ۹/۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر بود انجام شد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روابط و نمودارهای بدون بعد جدیدی برای محاسبه طول‌های مشخصه حفرة آبشستگی از قبیل حداکثر عمق آبشستگی و محل وقوع آن، مقدار آبشستگی بستر در مجاورت کفبند، حداکثر گسترش حفرة، فاصله افقی انتهای کفبند تا تاج تلماسه و ارتفاع تلماسه ارائه و با مطالعات پیشین مقایسه گردید. با توجه به وجود تشابه بین پروفیل‌های بی‌بعد حفرة آبشستگی که از آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد و با استفاده از رابطه ساده ارائه شده، می‌توان شکل گودال را در شرایط مختلف تعیین کرد و برای کاهش خسارات احتمالی، اقدامات لازم را انجام داد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، دریاچه کشویی، کف بند صلب، تشابه هندسی

### مقدمه

آبشستگی موضعی یکی از موضوعات مهم و قابل توجه در مهندسی رودخانه و هیدرولیک جریان در بسترهای آبرفتی می‌باشد. چنانچه در یک بازه مورد بررسی، مقدار رسوب وارد شده کمتر از مقدار رسوب خارج شده باشد، عمل فرسایش کف رودخانه و یا بدنه آن رخ می‌دهد و کف رودخانه بتدریج گود می‌شود. از جمله اثرات منفی گود شدن بستر رودخانه، می‌توان به شکست برشی و لغزش در بستر و نیز افزایش گرادیان هیدرولیکی خروجی اشاره کرد که در نهایت، افزایش فشار بالا برنده و ایجاد پدیده تراوش را در پی دارد.

جریان در محل وقوع آبشستگی، یک فرایند دوفازی (آب و رسوب) است. بنابراین آبشستگی متأثر از متغیرهای بسیاری از قبیل پارامترهای جریان، مشخصات بستر آبرفتی، زمان و هندسه آبراهه می‌باشد. به همین دلیل محققین، هر یک به مطالعه بخشی از این

وقایع پرداخته و آن را به صورت آزمایشگاهی و تجربی بررسی کرده‌اند. نکته مهمی که در مورد بستر فرسایش یافته باید اشاره نمود این است که اگر پروفیل‌ها بر اساس یک پارامتر مناسب بی‌بعد گردند، شکل آنها از نظر هندسی مشابه و مستقل از زمان خواهد بود و همچنین اندازه ذرات بر روی آن تأثیرگذار نیست (۱۱ و ۷، ۹). عدم وابستگی پروفیل‌های بی‌بعد حفرة آبشستگی به زمان و اندازه رسوبات، قابلیت کاربرد نتایج آزمایشگاهی در شرایط میدانی را بسیار افزایش می‌دهد. با این وجود، درگاهی (۵) هیچگونه تشابهی بین پروفیل‌های آبشستگی مشاهده نکرد. روابط تجربی و نیمه تجربی بسیاری برای پارامترهای مختلف آبشستگی از قبیل حداکثر عمق حفرة در حالت تعادل، توسط محققین مختلف ارائه شده است. اغلب این روابط، حداکثر عمق آبشستگی را به عمق و دبی جریان و اندازه متوسط ذرات ارتباط می‌دهند. اما این روابط نتایج بسیار متفاوتی را به ازای شرایط یکسان جریان نشان می‌دهند. اینگونه تضادها در بحث آبشستگی در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی، لزوم انجام تحقیقات بیشتر برای افزایش دانش و آگاهی موجود در راستای برنامه‌ریزی مناسب و کاهش خسارات ناشی از آبشستگی را ضروری می‌سازد.

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

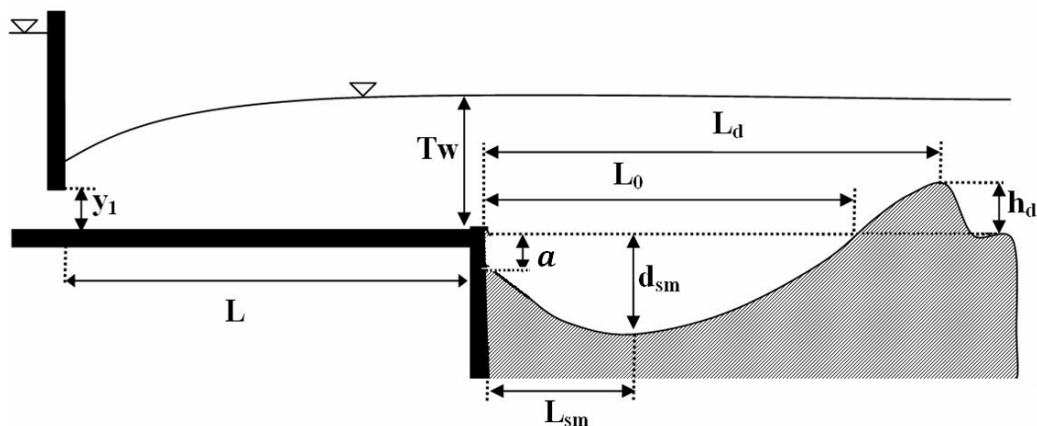
دانشگاه تهران استفاده شد. نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل (۲) آورده شده است.

آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی به طول ۹/۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر از جنس پلکسی‌گلاس انجام شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به سیستم از یک سرریز مستطیلی واسنجی شده بدون فشردگی جانبی استفاده گردید. با نصب یک دریاچه کشویی در ابتدای کانال مستطیلی، شرایط ایجاد ارتفاع اولیه برای تشکیل جهش هیدرولیکی فراهم گردید. بازشدگی دریاچه در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲/۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. طول کفبند صلب طبق معیار طول پرش ارائه شده توسط برادلی و پترکا (۳)، معادل ۰/۹۲ متر بدست آمد که این مقدار برابر ۱/۰ متر و عمق مخزن رسوبات برابر ۲۰/۰ سانتی‌متر و طول آن برابر ۱۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

علیرغم روابطی که برای پارامترهای تعادلی حفره ارائه گردیده است، برخی گزارشات حاکی از آن است که مدت زمان لازم برای حصول شرایط تعادل برای حفره آبشستگی می‌تواند بسیار طولانی باشد و حتی در بعضی شرایط ممکن است حفره اصلاً به تعادل نرسد (۴). طرحواره‌ای از حفره آبشستگی در رسوبات غیرچسبنده همراه با پارامترهای مشخصه حفره در شکل (۱) آورده شده است. هدف از انجام این تحقیق، شناخت مهمترین عوامل موثر بر پدیده آبشستگی رسوبات غیرچسبنده در پایین‌دست یک کفبند افقی با تکیه بر دانش موجود و بررسی تاثیر این عوامل با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی است.

### مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های این تحقیق، از مدل یک دریاچه کشویی در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی



شکل ۱ - طرحواره‌ای از حفره آبشستگی و پارامترهای مشخصه آن



شکل ۲ - مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش‌ها

غیریکنواختی پروفیل در عرض حفره را به آشفته بودن جریان در پایاب پرش هیدرولیکی و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت داده است. با انجام تحلیل ابعادی و استفاده از تئوری باکینگهام ( $\pi$ ) و ثابت نگه داشتن همه پارامترها بجز دبی جریان و عمق پایاب، دو پارامتر بی بعد موثر بر پدیده آبستگي در انتهای کف بند با طول ثابت، به صورت زیر تعیین شدند:

$$\frac{d_{sm}}{y_1} = f\left(F_0, \frac{Tw}{y_1}\right) \quad (1)$$

در این رابطه،  $d_{sm}$  حداکثر عمق آبستگي،  $y_1$  بازشدگی دریچه،  $F_0 = U_0 / (gd_{50}(Sg-1))^{0.5}$  عدد فرود ذره،  $U_0$  سرعت جت ورودی،  $g$  شتاب ثقل،  $d_{50}$  اندازه متوسط رسوبات،  $S_g = \rho_s / \rho_w$  نسبت جرم مخصوص ذرات رسوب،  $\rho_w$  جرم مخصوص آب و  $Tw$  عمق پایاب می باشد.

مطالعات انجام شده نشان می دهد که تاثیر عمق پایاب به مقدار عدد فرود ذره بستگی دارد (۱). بنابراین با ضرب کردن دو پارامتر بدون بعد  $F_0$  و  $Tw/y_1$  می توان پارامتر جدیدی به صورت  $F_0 Tw/y_1$  تعریف کرد. این پارامتر می تواند تا حد زیادی تناقض موجود در مطالعات پیشین را برطرف کند. زیرا تاثیر پارامترهایی مانند عدد فرود ذره و عمق پایاب را به طور مستقیم و تاثیر پارامترهایی مانند اندازه ذره، سرعت جریان ورودی و وزن مخصوص ذرات رسوب را به طور غیرمستقیم در بر می گیرد. با توجه به توضیحات ذکر شده، می توان روابط و نمودارهای جدیدی را برای محاسبه پارامترهای مشخصه حفره آبستگي بر اساس پارامتر جدید معرفی شده در بالا ارائه کرد.

با بررسی پروفیل های حفره آبستگي در آزمایش های مختلف، مشاهده شد که شکل پروفیل ها با یکدیگر مشابه می باشند. براین اساس، چنانچه حداکثر عمق آبستگي ( $d_{sm}$ ) به عنوان عامل بی بعد کننده در نظر گرفته شود، شکل حفره های آبستگي در آزمایش های مختلف با کمی پراکندگی در تاج تلماسه مشابه می باشند که در شکل (۴) نشان داده شده است. با آزمون پارامترهای مختلف برای بی بعد کردن پروفیل های حفره آبستگي، در نهایت پارامترهای  $d_{sm}$  و  $L_d$  به ترتیب برای بی بعد کردن گسترش عمقی و طولی حفره آبستگي انتخاب شدند که نتایج آن در شکل (۴) آورده شده است.  $L_d$  فاصله افقی انتهای کفبند تا تاج تلماسه است. پروفیل بی بعد بدست آمده حاصل از رگرسیون بین داده های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، از یک معادله درجه سه بصورت زیر پیروی می کند که نسبت به معادله درجه شش ارائه شده توسط موسوی خندان (۲) و نیز رابطه مثلثاتی فهودی و اسمیت (۷) شکل ساده تری دارد.

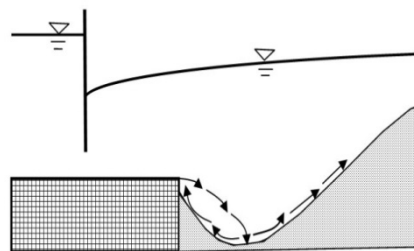
$$\frac{d_x}{d_{sm}} = a + b\left(\frac{x}{L_d}\right) + c\left(\frac{x}{L_d}\right)^2 + d\left(\frac{x}{L_d}\right)^3 \quad (2)$$

در این رابطه  $d_{sm}$  عمق آبستگي در فاصله  $x$  از انتهای کفبند می باشد و ثابت های  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ، و  $d$  به ترتیب برابر هستند با  $-۰/۳۲$ ،

در این تحقیق از دو نوع ماسه یکنواخت با دانه بندی متفاوت و به ترتیب با اندازه متوسط  $d_{50} = 0/73$  و  $d_{50} = 1/85$  میلی متر و انحراف معیار هندسی  $1/1$  و  $1/12$  استفاده شده است. عمق پایاب بوسیله یک دریچه کشویی که در انتهای مدل آزمایشگاهی تعبیه شده است تنظیم می گردید. در پایان مدت زمان آزمایش (۱۲ ساعت)، برداشت پروفیل بستر توسط عمق سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی متر انجام و نهایتاً جریان قطع و فرآیند فوق برای انجام آزمایش بعدی تکرار می شد.

### مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج

با برخورد جت سیال به ذرات رسوب، آبستگي آغاز و با توسعه حفره آبستگي، فرسایش و رسوبگذاری بطور متناوب انجام می شد. در طول فاز فرسایشی، جت سیال که بطور مستقیم به بستر برخورد می کند منجر به آبستگي سریع و قابل توجه مصالح بستر می شود. بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی در حد چند ثانیه از فرآیند فرسایش، جت سیال به سمت بالا منحرف و به یک جت سطحی تبدیل می گردد و قسمتی از حفره مجدداً پر می شود (فاز رسوبگذاری). در لبه انتهایی کفبند، جداسازی جریان اتفاق می افتد و جت افقی منتشر شده پس از ورود به حفره در عمیق ترین نقطه حفره آبستگي به دو قسمت تقسیم می شود که این تقسیم شدن را می توان از نحوه حرکت رسوبات درون حفره مشاهده کرد. بگونه ای که مقداری از رسوبات کنده شده، به سمت پایین دست حرکت کرده و از حفره خارج می شوند و باقیمانده رسوبات در اثر جریان برگشتی به سمت لبه کفبند جابجا شده و در یک ناحیه با جریان چرخشی قرار می گیرند (شکل ۳). در انتهای حفره، در اثر تجمع رسوبات فرسایش یافته که از حفره خارج شده اند، یک تلماسه تشکیل می شود. با عمیق تر شدن حفره آبستگي، ارتفاع تلماسه نیز افزایش می یابد. ذراتی که به راس تلماسه می رسیدند به پایین لغزیده و باعث گسترش آبستگي در راستای طولی می شدند.



شکل ۳- تقسیم شدن جریان درون حفره آبستگي

بنابر آزمایش های انجام شده در این تحقیق، مشخص شد که پروفیل آبستگي در عرض کانال متغیر و به صورت سه بعدی می باشد. متغیر بودن پروفیل آبستگي در عرض کانال، در برخی از مطالعات قبلی نیز گزارش شده است. بطور مثال موسوی خندان (۲)

مقدار آبشستگی بستر در مجاورت کفبند را پیش‌بینی کرد. با جایگزینی  $x=0/0$  در رابطه (۲)، طول مشخصه  $a$  که در شکل (۱) نشان داده شده است، بدست می‌آید:

$$x = 0.0, \quad d_s = a \rightarrow \frac{d_s}{d_{sm}} = \frac{a}{d_{sm}} = -0.32 \quad (۳)$$

بنابراین بعد از حصول شرایط تعادلی، تراز اولیه بستر بلافاصله بعد از کفبند به اندازه  $0/32$  برابر حداکثر عمق آبشستگی پایین می‌افتد. بر اساس یافته‌های این تحقیق، پارامتر  $L_d$  را می‌توان از رابطه (۴) که از رگرسیون بین پارامترهای بدون‌بعد حاصل شده است، محاسبه کرد:

$$\frac{L_d}{y_1} = a_1 + b_1 \cdot \ln \left( \frac{F_0 T W}{y_1} \right) \quad (۴)$$

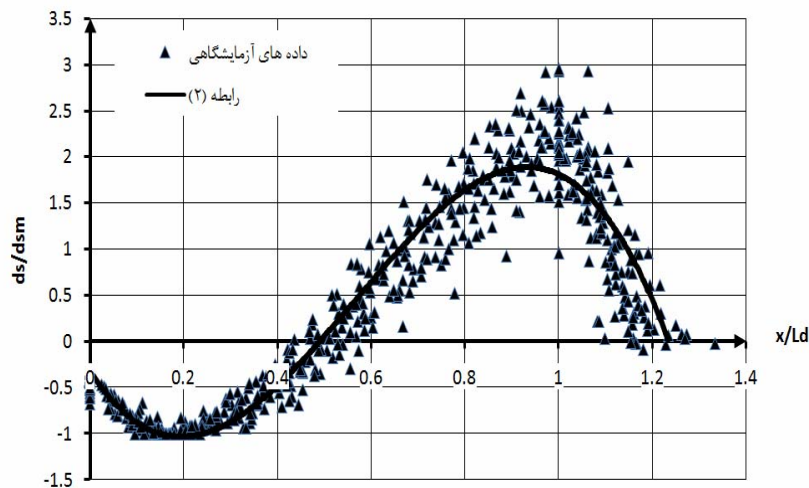
در این رابطه ثابت‌های  $a_1$  و  $b_1$  به ترتیب عبارتند از  $-126/86$  و  $34/75$  و ضریب همبستگی این رابطه  $R^2=0/95$  می‌باشد. همچنین تغییرات  $L_d/y_1$  در مقابل  $F_0 T W/y_1$  در کنار رابطه (۴) در شکل (۵) آورده شده است.

از دیدگاه طراحی سازه‌های هیدرولیکی که در معرض آبشستگی موضعی هستند، دو پارامتر حداکثر عمق آبشستگی و محل وقوع آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. حداکثر عمق آبشستگی، در کنترل گرادیان خروجی جریان نشی از زیر سازه‌های هیدرولیکی بسیار تاثیرگذار است. در شکل (۶) تغییرات  $d_{sm}/y_1$  در مقابل پارامتر بدون بعد  $F_0 T W/y_1$  ترسیم شده است. همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش  $F_0 T W/y_1$  که می‌تواند در اثر زیاد شدن عمق پایاب و یا سرعت جت رخ دهد، حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

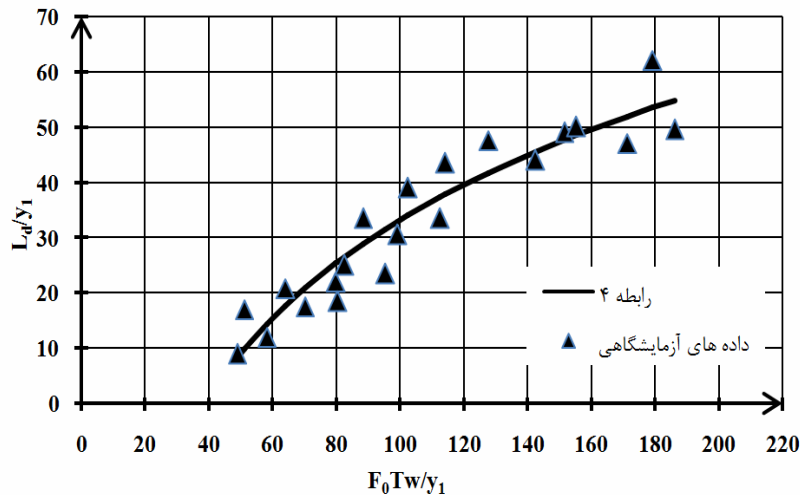
$0/95$ ،  $7/88$ ،  $24/57$ ،  $14/56$  - ضریب همبستگی این رابطه  $R^2=0/95$  می‌باشد. لازم به ذکر است که این رابطه برای  $x/L_d < 1/24$  معتبر است. چگونگی تعیین پارامترهای  $L_d$  و  $d_{sm}$  در ادامه آورده شده است.

از آنجا که پارامترهای بکار رفته برای بی‌بعد کردن طول‌های مشخصه حفره آبشستگی در تحقیق حاضر، کمتر توسط محققین پیشین مورد استفاده قرار گرفته است بنابراین امکان مقایسه مستقیم با نتایج پیشین چندان وجود ندارد ولی با این وجود در موارد ممکن مقایسه صورت گرفته است. به طور مثال، در نمودارهای بی‌بعد ارائه شده توسط نیک‌حسن و نارایانان (۹)، حداکثر گسترش طولی حفره آبشستگی ( $L_0$ ) در محدوده  $0/7-0/6$  برابر  $L_d$  قرار دارد که با توجه به شکل (۴) این مقدار در تحقیق حاضر معادل  $L_d/5$  بدست آمده است. یک علت برای این اختلاف‌ها می‌تواند تفاوت در طول کفبند مورد استفاده در این دو تحقیق باشد. زیرا در آزمایش‌های نیک‌حسن و نارایانان (۹) از کفبند با طول کمتری نسبت به تحقیق حاضر استفاده شده است. بنابراین، آشفستگی بیشتری در اثر پرش هیدرولیکی به پایین دست منتقل شده که منجر به ایجاد حفره با ابعاد بزرگتر می‌گردد. همچنین لارسن (۸) نیز در شرایط عدم حضور کفبند، به نتیجه  $L_0=0/7 L_d$  دست یافت.

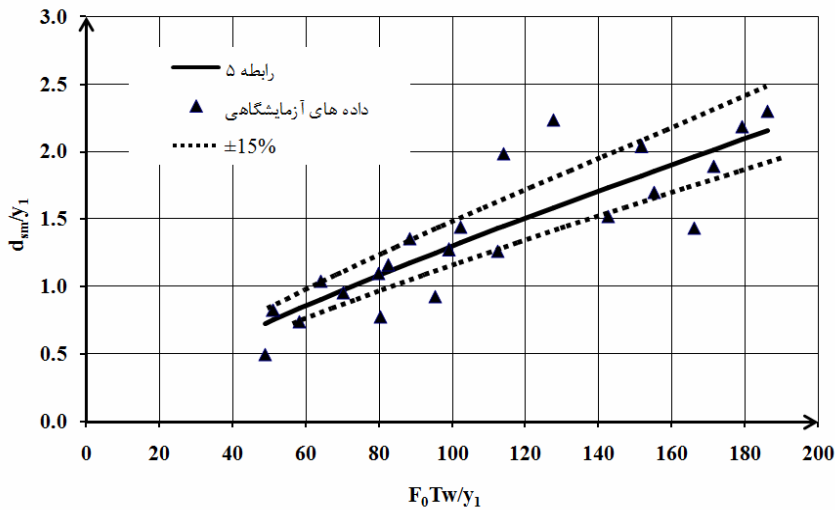
همانطور که پیش از این ذکر شد جریان برگشتی درون حفره، رسوبات را از مقطع با حداکثر عمق آبشستگی به سمت بالادست جابجا می‌کند. این جریان برگشتی، در هنگام برخورد با دیواره عمودی کفبند، رسوبات را از این ناحیه جدا کرده و منجر به از بین رفتن پوشش خاکی و آشکار شدن دیواره می‌شود که می‌تواند پایداری سازه را با خطر جدی مواجه کند. بنابراین بایستی در هنگام طراحی سازه،



شکل ۴ - پروفیل بی بعد حفره آبشستگی در رسوبات غیرچسبنده



شکل ۵ - تغییرات  $L_d/y_1$  بر حسب پارامتر  $F_0Tw/y_1$



شکل ۶ - تغییرات حداکثر عمق آبستنگی بر حسب پارامتر  $F_0Tw/y_1$

مقادیر محاسبه شده هستند که این امر می‌تواند ناشی از طول کوتاه کفبند (حداکثر ۰/۵ متر) در تحقیقات سرکار و دی (۱۲) باشد که منجر به آبستنگی بیشتر می‌شود.

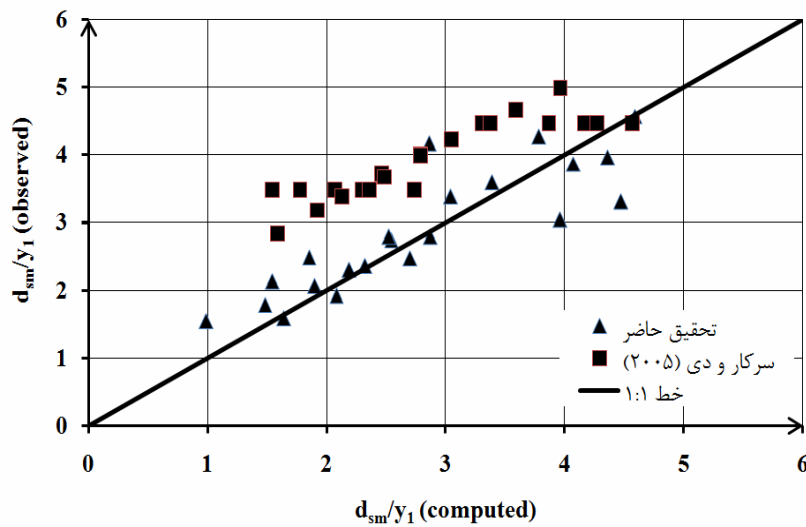
همچنین با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، رابطه‌ای خطی به صورت زیر برای محاسبه موقعیت رخداد حداکثر عمق آبستنگی نسبت به لبه کفبند  $L_{SM}$  با ضریب همبستگی ۰/۹۰،  $R^2 =$  بدست آمد که در شکل (۸) همراه با نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است:

$$\frac{L_{SM}}{y_1} = 0.055 \left( F_0 \frac{Tw}{y_1} \right) - 0.203 \quad (۶)$$

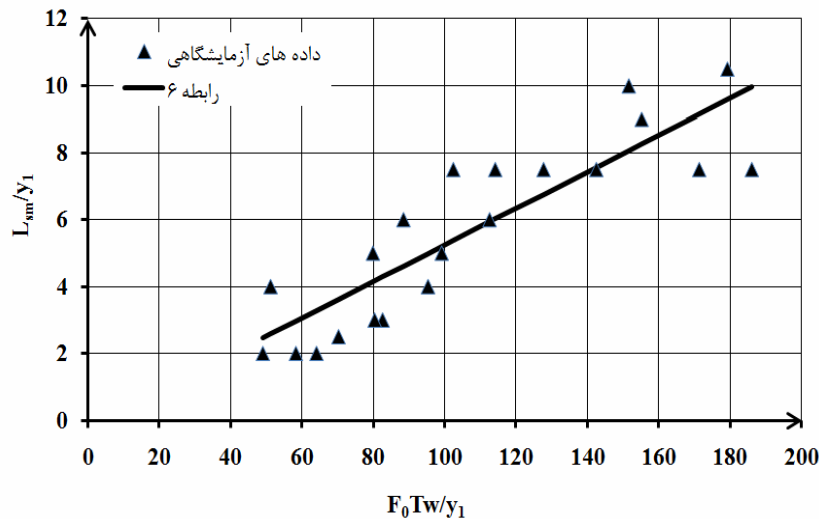
همچنین با استفاده از داده‌های حاصل از تحقیق حاضر، رابطه‌ای نمایی (۵) با ضریب همبستگی  $R^2 = ۰/۹۴$  بدست آمد که در شکل (۶) ترسیم شده است در این رابطه ثابت‌های  $a_2$  و  $b_2$  به ترتیب عبارتند از ۰/۰۳۱ و ۰/۸۱.

$$\frac{d_{SM}}{y_1} = a_2 \left( F_0 \frac{Tw}{y_1} \right)^{b_2} \quad (۵)$$

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که بیش از ۷۳ درصد از داده‌های آزمایشگاهی در محدوده خطای  $\pm 15\%$  مقادیر محاسبه شده از رابطه (۵) قرار دارند. برای مقایسه رابطه بدست آمده با تحقیقات پیشین، در شکل (۷) مقادیر محاسبه شده از رابطه (۵) در کنار داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سرکار و دی (۱۲) آورده شده است. همانطور که مشخص است، مقادیر اندازه‌گیری شده تا حدی بیشتر از



شکل ۷ - مقایسه مقادیر حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده و اندازه گیری شده



شکل ۸ - نمودار محاسبه موقعیت رخداد حداکثر عمق آبشستگی

رسوبی که از حفره خارج شده‌اند بر روی هم انباشته شده و یک تلماسه تشکیل می‌دهند. از آنجا که حضور تلماسه بر چگونگی جریان در حفره آبشستگی و در نتیجه بر سازوکار آبشستگی تاثیرگذار است، بررسی تغییرات ارتفاع تلماسه نیز در شرایط مختلف ضروری به نظر می‌رسد. در شکل (۱۰) تغییرات ارتفاع بدون بعد تلماسه بر حسب پارامتر  $F_0Tw/y_1$  ترسیم شده است. همچنین با استفاده از داده‌های بدست آمده، رابطه‌ای به فرم زیر برای تعیین ارتفاع تلماسه بدست آمد که در شکل (۱۰) در کنار داده‌های جمع‌آوری شده ترسیم شده است:

$$\frac{h_4}{y_2} = a_4 + b_4 \cdot \ln \left( \frac{F_0Tw}{y_2} \right) \quad (۸)$$

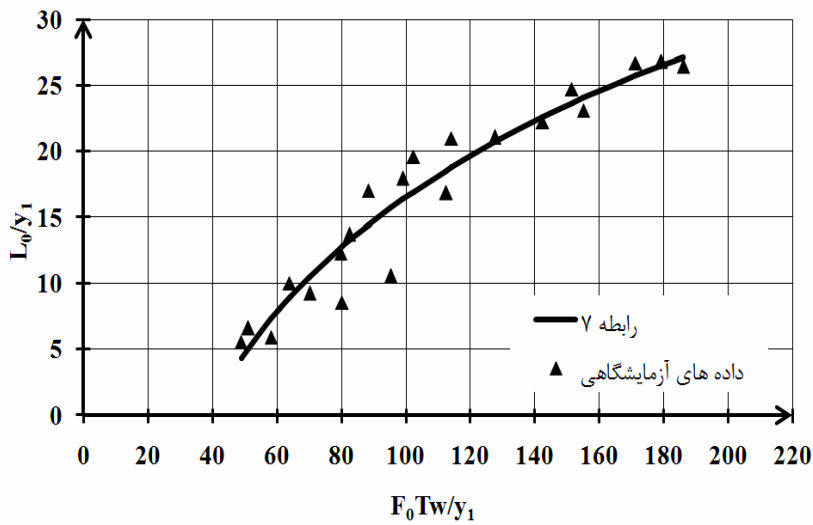
در این رابطه ثابت‌های  $a_4$  و  $b_4$  به ترتیب عبارتند از  $-۹/۲۱$  و  $۰.۲/۶۶$ . ضریب همبستگی این رابطه  $R^2=۰/۹۳$  می‌باشد.

از دیگر پارامترهای آبشستگی، حداکثر گسترش حفره  $L_0$  است که نشاندهنده مکانی است که حفره آبشستگی به تراز اولیه بستر برخورد می‌کند. پیش‌بینی تقریبی این طول مشخصه به طراحان در انتخاب طولی از بستر که به حفاظت نیاز دارد کمک می‌کند. در شکل (۹) تغییرات طول بی‌بعد حفره آبشستگی در برابر پارامتر  $F_0Tw/y_1$  در رسوبات غیرچسبنده که نشاندهنده روند صعودی آن است، آورده شده است. همچنین معادله‌ای لگاریتمی به صورت زیر با ضریب همبستگی  $R^2=۰/۹۶$  بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد:

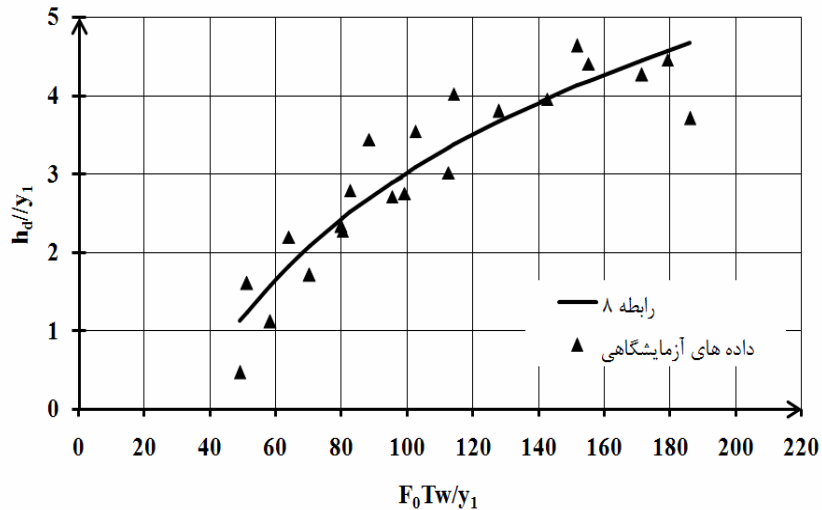
$$\frac{L_0}{y_2} = a_3 + b_3 \cdot \ln \left( \frac{F_0Tw}{y_2} \right) \quad (۷)$$

در این رابطه ثابت‌های  $a_3$  و  $b_3$  به ترتیب عبارتند از  $-۶۲/۲۹$  و  $۰.۱۷/۱۲$ .

معمولاً در انتهای حفره آبشستگی رسوبات غیرچسبنده، ذرات



شکل ۹ - تغییرات حداکثر طول حفره آبستگي بر حسب پارامتر  $F_0Tw/y_1$



شکل ۱۰ - تغییرات ارتفاع بدون بعد تلماسه در مقابل پارامتر  $F_0Tw/y_1$

یک پروفیل بی بعد منفرد که همه آزمایش‌های این تحقیق را پوشش می‌دهد، ارائه گردید. با معرفی یک پارامتر بدون بعد جدید به صورت  $F_0Tw/y_1$  که تاثیر پارامترهای مختلف را به صورت مستقیم و یا غیرمستقیم در بر می‌گیرد، روابط و نمودارهای جدیدی برای محاسبه تمامی طول‌های مشخصه حفره آبستگي و تلماسه بعد از حفره که می‌توان در طراحی‌ها برای پیش‌بینی ابعاد حفره آبستگي به منظور کاهش خسارات احتمالی از آنها استفاده کرد.

## بحث و نتیجه‌گیری

با بررسی جامع مطالعات پیشین و انجام آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد موثر بر پدیده آبستگي شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آنها طرح‌ریزی شد. در زیر نتایج تحقیق بصورت خلاصه آورده شده است. مشاهده شد که در طول توسعه گودال آبستگي، یک جریان برگشتی درون حفره ایجاد می‌شود که رسوبات را به سمت بالادست جابجا می‌کند. با بررسی پروفیل‌های آبستگي در آزمایش‌های مختلف، مشخص شد که پروفیل‌ها از تشابه هندسی خاصی پیروی می‌کنند.

## منابع

- ۱- امید م.ح، حمیدی فرح. و رئیسی ع. ۱۳۸۸. بررسی تاثیر عمق پایاب بر هندسه گودال آبشستگی در پایین دست کفبند. DVD مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه شیراز، ایران.
- ۲- موسوی خندان ا. ۱۳۷۹. بررسی پروفیل آبشستگی پایین دست پرش هیدرولیکی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- 3- Bradley J.N., and Peterka A.J. 1957. Hydraulic design of stilling basins. Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 83, 1-24.
- 4- Brusers H.W.C., and Raudkivi A. 1991. Scouring. Design Manual, No. 2, Vol. 2, IAHR.
- 5- Dargahi B. 2003. Scour development downstream of a spillway. Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No. 4, 417-426.
- 6- Dey S., and Sarkar A. 2005. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 3, 246-257.
- 7- Farhoudi J., and Smith K. 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. Journal of Hydraulic Research, Vol. 23, No. 4, 343-359.
- 8- Laursen E.M. 1952. Observations on the nature of scour. Proceedings of the Fifth Hydraulic Conference, Bulletin 34, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- 9- Nik Hassan N., and Narayanan R. 1985. Local scour downstream of an apron. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No. 11, 1371-1385.
- 10- Rajaranam N., and Macdougall R. 1983. Erosion by plane wall jets with minimum tailwater. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, No. 7, 1061-1064.
- 11- Rajaratnam N. 1981. Erosion by plane turbulent jets. Journal of Hydraulic Research, Vol. 19, No. 4, 339-358.
- 12- Sarkar A., and Dey S. 2005. Scour Downstream of aprons caused by sluices. Proceedings of the ICE - Water Management, Vol. 158, Issue 2, 55-64.



## Bed Scour Downstream of Sluice Gates

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

### Abstract

In this research, the dynamics of local scour processes is studied in the context of the erosion that takes place downstream from a submerged sluice gate. The most important factors, which affect the local scour processes downstream of the sluice gate are identified and grouped by dimensional analysis to obtain the dimensionless parameters. Experiments were carried out in a horizontal rectangular flume of 9 m long, 0.5 m wide and 0.6 m height. Two gradations of uniform non-cohesive bed material were used for various tailwater depths and flow rate conditions. A total of 22 tests were carried out, each for a period of 12 h. An equilibrium scour condition was not attained over this time period for any of the tests, although a similarity in the bed profiles is observed in the region close to the rigid apron. Based on the experimental data, new dimensionless equations and graphs are presented to determine the shape and dimensions of characteristic lengths of scour hole such as maximum depth of hole and its position, brink scour depth, maximum extension of hole, dune height and its distance from the end of apron. Also, the results are compared with previous researches.

**Keywords:** Local scour, Sluice gate, Rigid apron, Geometrical similarity

---

1,2,3 - Ph.D. Student, and Associate Professor & MSc. Student Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran

(\* -Corresponding Author Email: [hhamidifar@ut.ac.ir](mailto:hhamidifar@ut.ac.ir))