مجله علمی- پژوهشی
دوره 9، شماره 4، زمستان 1393

بررسی اثرات شکافنده‌ها بر گستره و شیب حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای ریزشی

محمد احسان اسدی[1*]، امیر رضا زراتی[2]، خداداد صفوی[3]

1- کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- کارشناس ارشد گروه سازه‌های هیدرولیکی، موسسه تحقیقات آب، تهران

zarrati@aut.ac.ir

چکیده- آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای ریزشی در سدهای بلند، یکی از مسائل اساسی در طراحی حوضچه‌های استغراق و سدهای پایاب می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش قدرت فرسایش جت آب ریزشی از این سرریزها، استفاده از شکافنده‌ها بر روی وجه پایین‌دست سرریز است. در پژوهش حاضر گستره و شیب حفره آبشستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد در شرایط وجود و عدم وجود شکافنده، با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس به ارتفاع 6 متر، مورد مطالعه قرار گرفت. در پایان مشخص شد که وجود شکافنده اثرات زیادی بر گستره (طول و عرض) حفره آبشستگی می‌گذارد و به طور کلی سبب کاهش شیب‌ها و همچنین کاهش حداکثر طول و عرض حفره آبشستگی می‌شود. به طور میانگین در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده، حداکثر طول حفره آبشستگی 20 درصد و حداکثر عرض حفره آبشستگی 17 درصد کاهش یافته است. از طرفی به طور میانگین در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده، نسبت حداکثر طول به حداکثر عمق حفره (L_S/D_S) 12 درصد و نسبت حداکثر عرض به حداکثر عمق حفره (W_S/D_S) 14 درصد افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که در تمامی حالات وجود شکافنده سبب کاهش شیب حفره آبشستگی می‌شود.

کلیدواژگان: آبشستگی، سدهای بلند، سرریز ریزشی، شکافنده[1].

1- مقدمه

پدیده فرسایش یکی از مسائل اساسی در سازه‌های آبی است که در بسیاری از موقعیت‌ها امکان رخداد آن وجود دارد. برخورد جت آب خارج شده از خروجی سازه‌های هیدرولیکی، به ویژه سدها، با کف رودخانه در پایین‌دست این سازه‌ها سبب فرسایش وجابه‌جایی مصالح بستر رودخانه می‌شود. این امر اثرات منفی بسیاری می‌تواند به دنبال داشته باشد که در رأس آن‌ها ناپایداری بدنه سد و در نتیجه احتمال تخریب آن در اثر گسترش ابعاد حفره آبشستگی می‌باشد. پیش‌بینی و تخمین میزان آبشستگی همواره یکی از زمینه‌های پژوهشی محققان در علم هیدرولیک بوده است. Schoklitsch (1932) اولین کسی بود که برای ارزیابی حداکثر عمق آبشستگی در پایین-دست جت‌های ریزشی، رابطه‌ای تجربی ارائه نمود. Veronese (1937) روابطی برای تخمین عمق آبشستگی ارائه داده است، به طوری که تاکنون نیز از پرکاربردترین روابط موجود می‌باشد. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه ارزیابی میزان آبشستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی صورت گرفته است.

1. Splitter.

Mason and Arumugam (1985) برخی از روابطی که پژوهشگران برای حداکثر عمق آبشستگی ارائه نموده‌اند را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمودند. بر اساس مطالعات این محققان، روابطی که از دبی جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی استفاده می‌کنند، به قدر کافی دقت داشته و وارد کردن پارامترهای دیگر، پیش‌بینی‌ها را در حد قابل قبولی بهبود نمی‌بخشد. این محققان رابطه (1) را برای ارزیابی حداکثر عمق حفره آبشستگی ارائه داده‌اند.

$$D_s + h = k\frac{q^x H^y h^w}{g^v d_{50}^z}\ ,\ k = (6.42 - 3.10H^{0.1})\ ,$$
$$x = (0.6 - \frac{H}{300})\ ,\quad y = (0.15 - \frac{H}{200})\ ,$$
$$v = 0.30\ ,\ w = 0.15\ ,\quad z = 0.10 \qquad (1)$$

در این رابطه، D_s نشان دهنده حداکثر عمق حفره آبشستگی از بستر اولیه (m)، q نشان دهنده دبی ویژه (دبی در واحد عرض) ($m^3/m.s$)، h عمق پایاب (m)، H ارتفاع ریزش از مخزن تا پایاب (m)، g شتاب ثقل، d_m قطر مشخصه مصالح (m)، ρ_s جرم مخصوص مصالح بستر (kg/m^3) و ρ جرم مخصوص سیال (kg/m^3) می‌باشد.

Rajaratnam et al. (1977) متغیر عدد فرود ذرات بستر (Fr_d)[1] را به عنوان پارامتری مناسب برای استفاده در روابط معرفی نمودند. این پارامتر از طریق رابطه (2) بدست می‌آید.

$$(Fr_{d50} = \frac{V}{\sqrt{gd_{50}}}) \qquad (2)$$

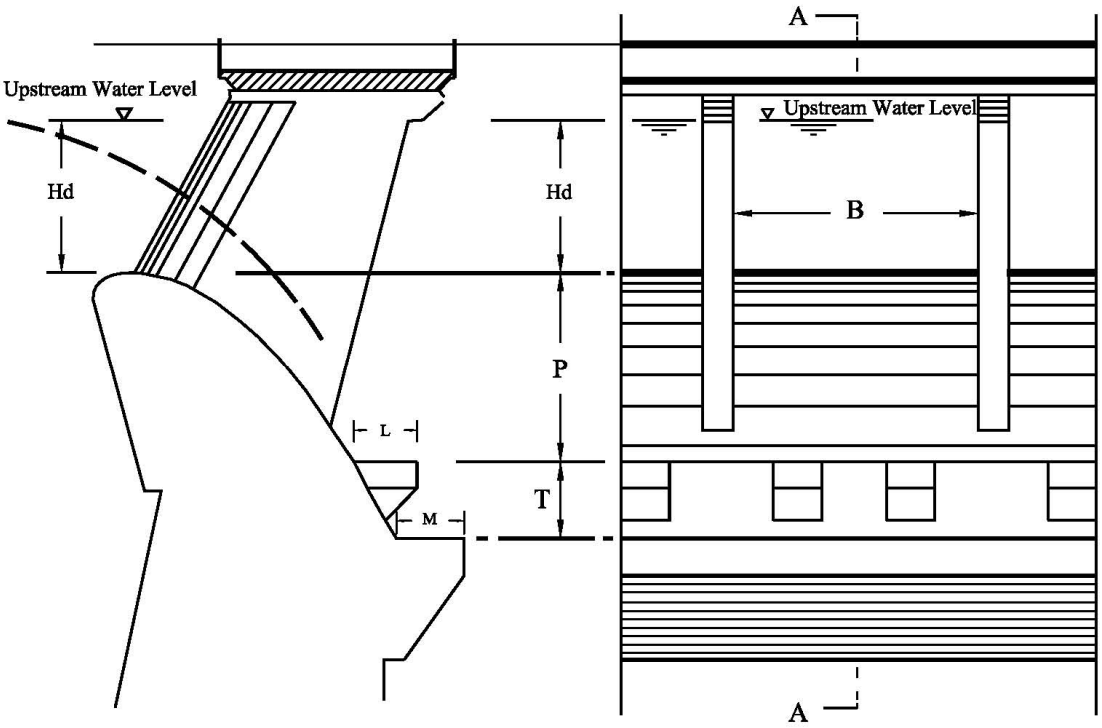
اهمیت این پارامتر توسط بسیاری از محققان دیگر نیز به اثبات رسیده است. Mazurek and Rajaratnam (2003) آبشستگی ناشی از جت مدور با ریزش قائم برروی مصالح غیرچسبنده با پایاب‌های کوچک را بررسی کردند و این‌گونه نتیجه‌گیری کردند که عمق آبشستگی تابعی از عدد فرود ذرات بستر (Fr_d) است. این مسأله توسط محققان دیگری از جمله Dey and Raikar (2007)، Pagliara et al., (2009) و Bollaert and Schleiss (2003) نیز به اثبات رسیده است.

Dey and Raikar (2007) آبشستگی پایین‌دست فروافتادگی قائم بلند را با در نظر گرفتن اثرات پارامترهای مختلف از جمله عمق پایاب، دبی ویژه، ارتفاع ریزش و دانه‌بندی مصالح بستر مورد بررسی قرار دادند.

Pagliara et al. (2009) پدیده آبشستگی را در حوضچه‌های استغراق ناشی از جت‌های مدور در شرایط حضور و عدم حضور سازه محافظ آبشستگی، مورد بررسی قرار دادند و روابطی برای تخمین حداکثر عمق، طول و عرض حفره آبشستگی و همچنین محل شروع آبشستگی بر حسب پارامترهای اصلی موثر بر آبشستگی، از جمله عدد فرود ذرات بستر ارائه نمودند. تاکنون راه‌کارهای متنوعی برای مقابله با پدیده آبشستگی بیان شده است. یکی از روش‌های کاهش اثرات منفی پدیده آبشستگی، کاهش قدرت فرسایش جت خروجی از سرریز است. یکی از روش‌های کاهش قدرت فرسایش جت آب خروجی از سرریزهای ریزشی، استفاده از شکافنده‌ها برای هوادهی در سرریز می‌باشد (شکل 1). عملکرد این سیستم به‌گونه‌ای است که جریان عبوری از روی سرریز، با یک مانع دندانه‌ای شکل مواجه می‌شود. این امر سبب گسستگی جریان و در نتیجه آن افزایش ورود هوا به درون جت می‌گردد. افزایش هوای داخل جت سبب افزایش سطح مقطع جت و از این رو کاهش قدرت فرسایش‌دهندگی آن می‌شود که در نتیجه آن، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد (Mason, 1983). ایده استفاده از این شکافنده‌ها بر روی سرریز ریزشی آزاد برای اولین بار توسط Roberts (1943) در طراحی دو سد در آفریقای جنوبی ارائه شد و پس از آن این سیستم مورد استقبال طراحان در نقاط مختلف جهان قرار گرفت (Mason, 1983).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه طراحی شکافنده‌ها صورت نگرفته است. Roberts (1943) بر اساس آزمایش‌هایی که در زمینه فشار دینامیکی وارد بر بستر حوضچه استغراق انجام داد، معیاری برای طراحی ابعاد و چیدمان شکافنده‌ها بیان کرد. بر اساس این معیار، ابتدا پارامتر اختلاف تراز تاج سرریز با شکافنده (P) بر اساس میزان ارتفاع لازم برای ریزش آب بدست می‌آید. سپس عرض شکافنده (W) بر اساس منحنی‌هایی که به صورت تجربی بین پارامتر (P/W) و پارامتر ($1.2H_d/P$) رسم شده است، بدست می‌آید.

1. Densimetric Froude Number.



شکل 1 طرح هندسی شکافنده‌ها بر اساس ایده Roberts (Mason, 1983)

در پایان بر اساس روابط (3) مقادیر پارامترهای دیگر بدست می‌آید:

$$S = L = 1.33W \ , \ 1.25L \le M \le 1.5L \qquad (3)$$

در این روابط، H_d عمق آب عبوری از روی تاج سرریز، S فاصله بین شکافنده‌ها، W عرض شکافنده و L طول شکافنده است. Mason (1983) با بررسی فشارهای دینامیکی وارد بر کف حوضچه استغراق، طرحی بهینه برای ابعاد شکافنده‌ها در راستای کاهش فشارهای دینامیکی وارد بر کف حوضچه ارائه نمود. وی برای مقاصد عملی توصیه کرد که مقدار P برابر با مقدار H_d و فاصله بین شکافنده‌ها (S)، برابر با عرض شکافنده‌ها در نظر گرفته شود. در نهایت معیار بهینه طراحی را به صورت رابطه (4) بیان کرد:

$$P = H_d \ , \ L = 0.4P \ , \ W = 0.3P \ , \ S = W \qquad (4)$$

Safavi et al. (2011) پس از انجام مطالعات بر روی یک مدل هیدرولیکی بزرگ مقیاس، معیارهایی ارائه دادند که منجر به کاهش بیشتر عمق آبشستگی نسبت به معیار Mason (1983) شد. این محققان با بررسی حداکثر عمق حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریز ریزشی، تاثیر شکافنده بر میزان کاهش حداکثر عمق آبشستگی را بررسی نمودند. بر اساس این پژوهش چیدمان بهینه برای شکافنده‌ها به منظور حداقل کردن میزان آبشستگی به صورت رابطه (5) می‌باشد:

$$\frac{L}{H_d} = 0.67 \ , \ \frac{W}{H_d} = 0.5 \ , \ W = S \qquad (5)$$

در صورت استفاده از شکافنده‌ها بر روی سرریزهای ریزشی، ضمن کاهش حداکثر طول و عرض حفره آبشستگی نسبت به حالت بدون شکافنده، الگوی آبشستگی نیز تغییر می‌کند. تاکنون در مورد الگوی آبشستگی پایاب با وجود شکافنده‌ها و ارتباط این الگو با هندسه شکافنده‌ها پژوهشی صورت نگرفته و اطلاعات موجود پیرامون این موضوع بسیار محدود است. از این رو در این پژوهش هدف بررسی الگوی حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد در شرایط وجود شکافنده بر روی سرریز می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

تمام آزمایش‌های این پژوهش بر روی یک مدل

هیدرولیکی بزرگ‌مقیاس، واقع در مؤسسه تحقیقات آب، وابسته به وزارت نیرو، انجام شده‌اند. در شکل 2 نمایی از این مدل نشان داده شده است.

این مدل که سرریز آن از نوع ریزشی آزاد می‌باشد، دارای ارتفاعی برابر با 6 متر و عرضی برابر با 11 متر بوده و در پایین‌دست سرریز ریزشی آن کانال پایاب با بستر فرسایش‌پذیر به طول 13 متر و عرض 4 متر قرار دارد که تا عمق 1/5 متر از مصالح فرسایش‌پذیر پر شده است. در بستر مدل، از دو نوع مصالح دانه‌ای غیر چسبنده استفاده شده است که مشخصات آنها در جدول 1 بیان شده‌اند.

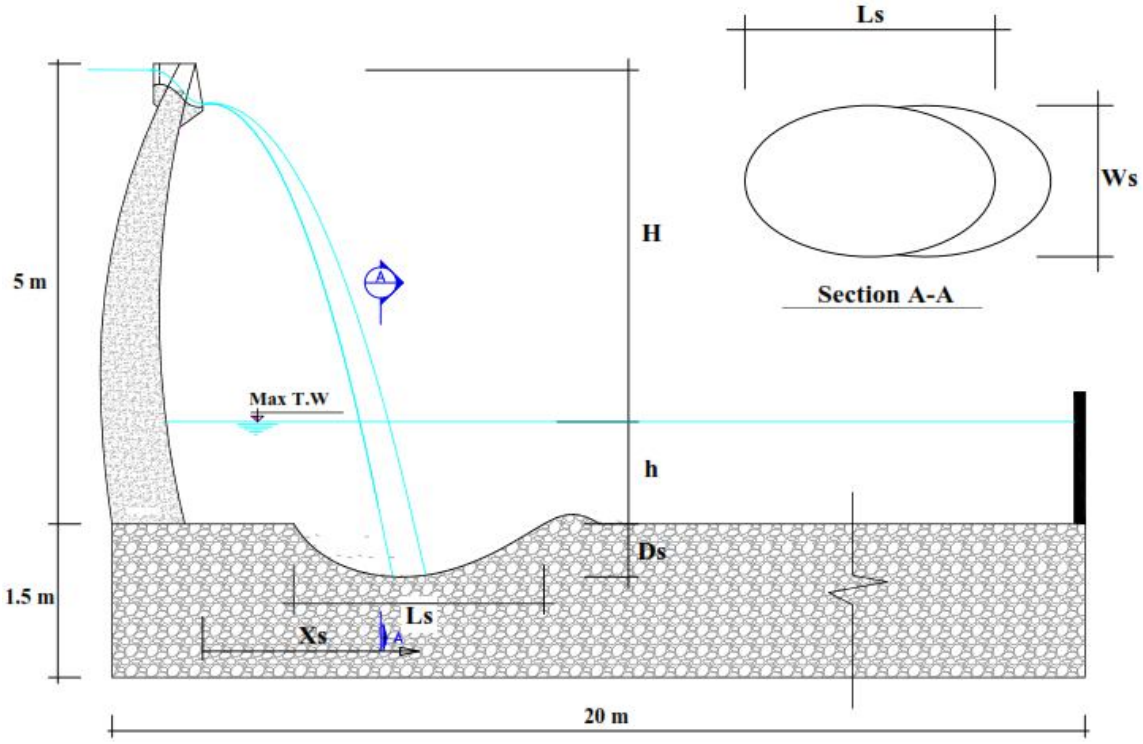
جدول 1 مصالح بستر مورد استفاده در این پژوهش

نوع مصالح	d_{50} (mm)	زاویه ایستایی (Φ) (درجه)	جرم مخصوص ذرات (kg/m^3)
A	8	32	2650
B	6	32	2650

در این مدل عمق پایاب (h) را می‌توان در محدوده 20 تا 80 سانتی‌متری تنظیم نمود. با توجه به شرایط هندسی سرریز و با توجه به امکانات آزمایشگاهی در این پژوهش دبی جریان می‌تواند در محدودهٔ 0/02 تا 0/16 مترمکعب در ثانیه و معادل دبی ویژه در محدودهٔ 0/04 تا 0/235 متر مکعب در ثانیه بر متر باشد. منظور از ارتفاع ریزش (H) در اینجا، اختلاف بین تراز سطح آب مخزن و تراز سطح آب پایاب است که با توجه به ابعاد این مدل، محدودهٔ ارتفاع آب روی سرریز و محدودهٔ عمق پایاب، دامنه ارتفاع ریزش در این پژوهش بین 3/5 تا 4/5 متر می‌باشد.

2-1- محدودهٔ هندسی شکافنده‌های مورد استفاده

برای بررسی الگوی کیفی جریان و الگوی آبشستگی، طرح‌های متنوعی از شکافنده‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند (اسدی، 1392). پارامترهای هندسی شکافنده‌ها که در تعیین الگوی آبشستگی موثرند، عبارتند از: طول شکافنده (L)، عرض شکافنده (W) و ارتفاع قرارگیری شکافنده (P) (شکل 1). دامنه تغییرات این پارامترها برای این مدل به شرح ذکر شده در جدول 2 می‌باشند.



شکل 2 نمایی از مدل فیزیکی استفاده شده در پژوهش

نحوه انتخاب این ابعاد به‌گونه‌ای بوده است که بتواند محدوده وسیعی از حالت‌های پیشنهاد شده بر اساس معیارهای طراحی محققان قبلی را پوشش دهد.

جدول 2 دامنه ابعاد بی‌بعد شکافنده‌های مورد استفاده

پارامتر	L/W	L/P	W/P
حداقل مقدار	0/5	0/25	0/2
حداکثر مقدار	4	1/6	1

2-2- زمان تعادل در آزمایش‌ها

یکی از مسائل مهم در ارزیابی آبشستگی، بحث زمان تعادل حفره آبشستگی است. برای مقاصد عملی تعدادی آزمایش در شرایط یکسان تنها با متغیر بودن زمان آبشستگی انجام می‌گیرد و با توجه به لگاریتمی بودن تغییرات حفره آبشستگی نسبت به زمان، مدت زمان مشخصی به عنوان زمان تعادل آبشستگی معرفی می‌شود. در این پژوهش برای بدست آوردن زمان تعادل حفره آبشستگی، هفت آزمایش با شرایط کاملاً یکسان برای تمامی متغیرها برای زمان‌های مختلف (0/5، 1، 2، 3، 5، 7 و 10 ساعت) صورت گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، در این پژوهش زمان تعادل، 3 ساعت در نظر گرفته شد.

2-3- روند آزمایش‌ها

با توجه به هدفی که برای این پژوهش مورد انتظار بوده است و نیاز به برداشت نقاط زیاد از پروفیل حفره آبشستگی بستر، با دقت بالا و همچنین با توجه به ابعاد بزرگ مدل آزمایشگاهی، شبکه‌ای برای برداشت پروفیل بستر مکانیکی[1] (MLBP) ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت. سیستم کار این شبکه به این صورت است که با تعریف محدوده‌ای از مختصات از پیش تعیین شده، پروفیل بستر حفره آبشستگی، با کمک متر لیزری، برداشت می‌شود. از این شبکه همچنین برای تراز کردن بستر حوضچه استغراق، قبل از انجام آزمایش نیز استفاده شد. روند آزمایش‌ها به این گونه بود که ابتدا پایاب با استفاده از پمپی که برای این منظور تعبیه شده بود، آبگیری می‌شد و با تنظیم ارتفاع دریچهٔ کانال پایین‌دست تراز پایاب به تراز مورد نظر می‌رسید. برای تنظیم ارتفاع پایاب، دیواره پایاب که با استفاده از دوربین ترازیاب مدرج شده بود، خوانده می‌شد.

در این پژوهش آزمایش‌ها در دو وضعیت انجام گرفته‌اند: نخست آزمایش آبشستگی بدون وجود شکافنده و سپس انجام آزمایش‌هایی با وجود شکافنده. برای عمق پایاب (h) و ارتفاع آب روی سرریز (H_d) هرکدام شش مقدار در نظر گرفته شد. در جدول 3 دامنه پارامتر بی بعد (H_d/h) ذکر شده است.

جدول 3 محدوده به‌کار گرفته شده برای (H_d/h)

متغیر	حداقل	حداکثر
(H_d/h)	0/0875	0/67

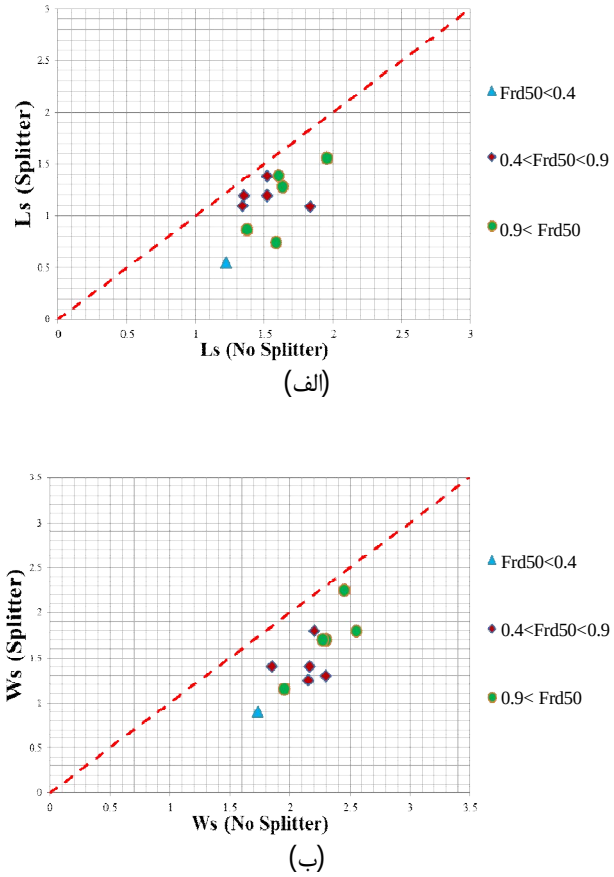
3- تحلیل نتایج

تغییرات ایجاد شده در قدرت فرسایش جت و همچنین ابعاد سطح مقطع آن در اثر وجود شکافنده، باعث تغییر الگوی حفره آبشستگی شامل، شیب‌های پروفیل طولی و پروفیل عرضی و همچنین حداکثر طول و عرض حفره آبشستگی می‌شود.

3-1- مقایسه گستره حفره آبشستگی در حالات استفاده و عدم استفاده از شکافنده

استفاده از شکافنده بر روی سرریز سبب هوادهی جت و در نتیجه کاهش قدرت فرسایش‌دهندگی جریان می‌شود. در شکل 3- الف تغییرات حداکثر طول حفره آبشستگی در حالت وجود شکافنده، در مقابل حداکثر طول حفره آبشستگی در حالت عدم وجود شکافنده ارائه شده است و در شکل 3- ب تغییرات حداکثر عرض حفره آبشستگی در حالت وجود و عدم وجود شکافنده ارائه شده است. به طور کلی مشاهده می‌شود که در تمامی حالت‌ها از شرایط هیدرولیکی جریان، وجود شکافنده سبب کاهش حداکثر طول و عرض حفره آبشستگی می‌شود.

1. Manual Laser Bed Profiler



شکل 3 نمودار پراکندگی در حالت وجود شکافنده در مقابل حالت عدم وجود شکافنده، برای الف) حداکثر طول حفره و ب) حداکثر عرض حفره

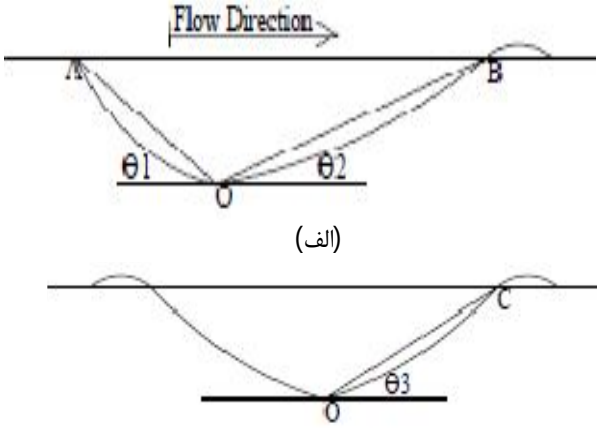
به طور میانگین در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده، حداکثر طول حفره آبشستگی 20 درصد و حداکثر عرض حفره آبشستگی 17 درصد کاهش یافته است.

3-2- مقایسه شیب‌های پروفیل طولی و عرضی حفره آبشستگی در حالت وجود و عدم وجود شکافنده

به منظور بررسی پروفیل طولی و عرضی حفره آبشستگی، این پروفیل‌ها بر اساس شکل 4 به سه قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول پروفیل بالادست می‌باشد که عبارت است از پروفیل بین محل وقوع حداکثر عمق حفره آبشستگی و محل شروع آبشستگی (OA). قسمت دوم عبارت است از پروفیل بین محل وقوع حداکثر عمق حفره آبشستگی و محل همتراز با سطح اولیه بستر قبل از وقوع آبشستگی در راستای جریان (OB) که به آن پروفیل پایین‌دست گفته می‌شود و قست سوم عبارت است از پروفیل عرضی بین محل وقوع حداکثر عمق حفره آبشستگی و محل هم‌تراز با سطح مصالح قبل از وقوع آبشستگی عمود بر جریان (OC). برای استفاده در مقاصد عملی این سه پروفیل به صورت سه خط رسم شده در شکل 4 تخمین زده می‌شوند. شیب خط بالادست (OA) (θ_1)، شیب پایین دست (OB) (θ_2)، و شیب خط عرضی (OC) (θ_3) نامیده می‌شود.

با توجه به اینکه وجود شکافنده سبب تغییر الگوی حفره آبشستگی می‌شود، شیب‌های پروفیل طولی و عرضی دچار تغییراتی می‌شوند. به منظور بررسی و مقایسه شیب‌های حفره آبشستگی با زاویه ایستایی خاک (ϕ)، یعنی زاویه‌ای

که خاک در شرایط طبیعی نسبت به سطح بستر دارد، از پارامتر بی‌بعد نسبت شیب حفره به شیب ایستایی خاک $Tan\theta_i/Tan\phi$ استفاده می‌شود. در شکل 5 محدوده این پارامتر برای شیب پروفیل عرضی و همچنین شیب‌های بالادست و پایین‌دست پروفیل طولی، رسم شده است. همانگونه که از این نمودار بر می‌آید، در تمام حالت‌ها مقدار پارامتر $Tan\theta_i/Tan\phi$ کمتر از 1 می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در تمام حالت‌ها شیب حفره از شیب ایستایی خاک کمتر است.



(الف)

(ب)

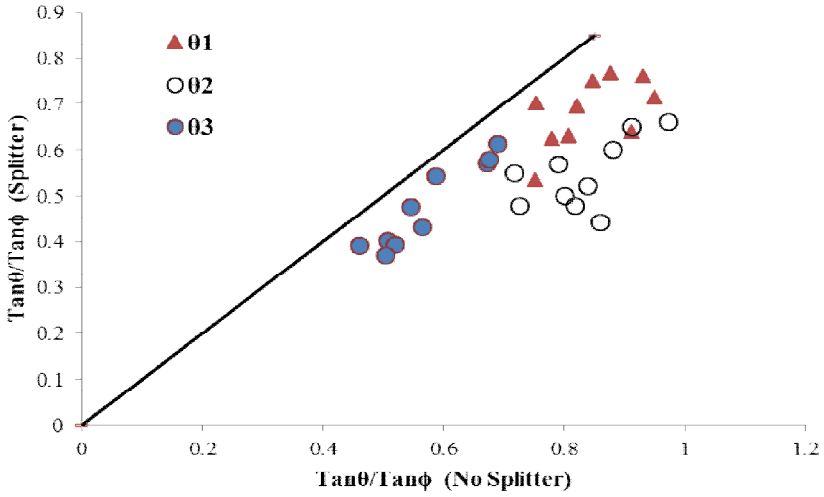
شکل 4 معرفی شیب‌های پروفیل الف) عرضی و ب) طولی

همچنین مشاهده می‌شود که در تمامی حالت‌ها وجود شکافنده سبب کاهش شیب حفره آبشستگی می‌شود.

نسبت شیب بالادست پروفیل طولی به شیب ایستایی خاک در حالت بدون شکافنده در محدوده 0/6 تا 0/9 و در حالت وجود شکافنده در محدوده 0/4 تا 0/75 قرار دارد. به طور میانگین وجود شکافنده سبب کاهش شیب بالادست پروفیل طولی (Tan θ_1) به میزان 28 درصد می‌شود. نسبت شیب پایین‌دست پروفیل طولی به شیب ایستایی خاک در حالت بدون شکافنده در محدوده 0/65 تا 0/85 و در حالت وجود شکافنده در محدوده 0/4 تا 0/65 قرار دارد. به طور میانگین وجود شکافنده سبب کاهش شیب پایین‌دست پروفیل طولی (Tan θ_2) به میزان 30 درصد می‌شود. نسبت شیب پروفیل عرضی به شیب ایستایی خاک در حالت بدون شکافنده در محدوده 0/45 تا 0/7 و در حالت وجود شکافنده در محدوده 0/35 تا 0/65 قرار دارد. به طور میانگین وجود شکافنده سبب کاهش شیب پروفیل عرضی (Tan θ_3) به میزان 21 درصد می‌شود.

3-3- مقایسه نسبت حداکثر طول به حداکثر عمق حفره آبشستگی (L_s/D_s) در حالت وجود و عدم وجود شکافنده

برای بررسی این موضوع، پارامتر نسبت حداکثر طول حفره آبشستگی به حداکثر عمق حفره آبشستگی (L_s/D_s) در دو حالت وجود شکافنده و بدون شکافنده مورد بررسی قرار گرفت.

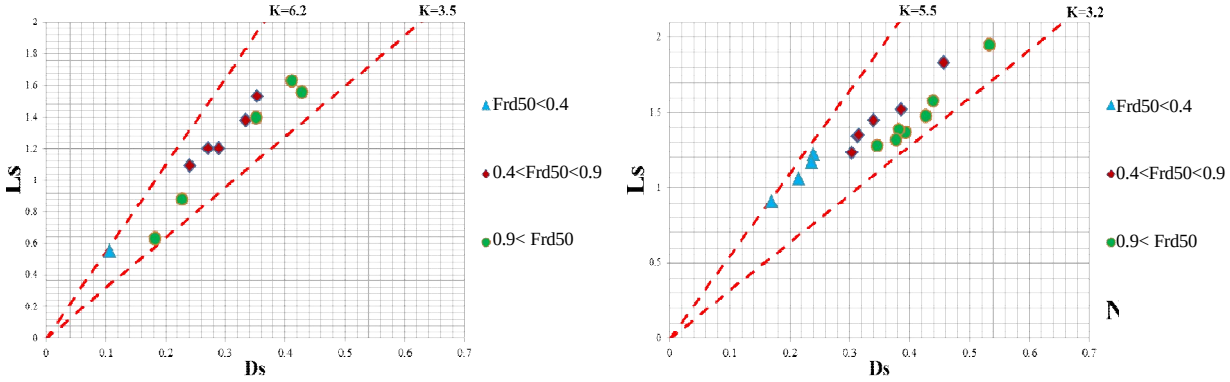


شکل 5 نمودار پراکندگی شیب پروفیل عرضی برای حالت بدون شکافنده و با شکافنده

در شکل 6 نمودار پراکندگی حداکثر طول حفره آبشستگی در مقابل حداکثر عمق حفره آبشستگی برای حالت بدون شکافنده (6- الف) و حالت وجود شکافنده بر روی سرریز (6- ب) نشان داده شده است. در محدوده مطالعاتی این پژوهش نسبت (L_s/D_s)=K در حالت بدون شکافنده در محدوده 3/2 تا 5/5 قرار دارد و در حالت وجود شکافنده در محدوده 3/5 تا 6/2 قرار دارد. به طور میانگین نسبت حداکثر طول حفره به حداکثر عمق حفره (L_s/D_s) در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده 12 درصد افزایش یافته است. می بایست توجه کرد که افزایش (L_s/D_s) در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده به معنی افزایش حداکثر طول حفره (L_s) نیست، زیرا وجود شکافنده از طرفی باعث کاهش عمق آبشستگی نیز می‌شود.

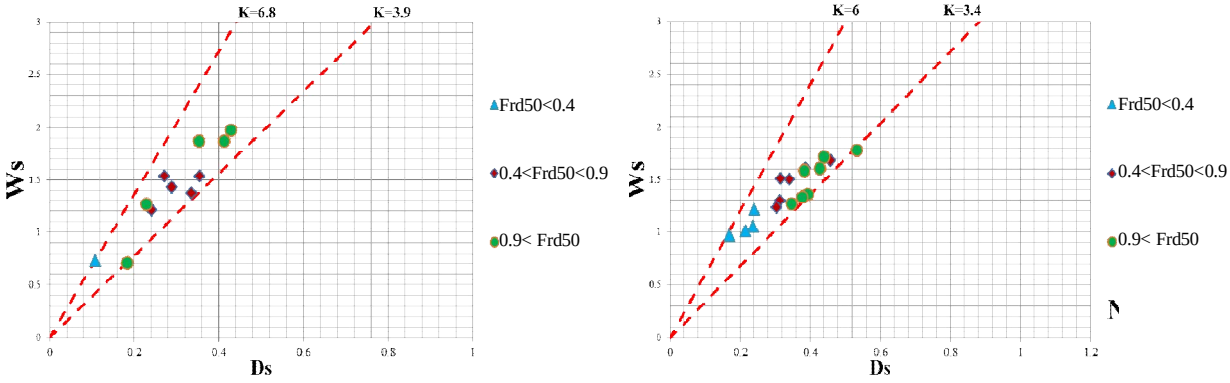
4-3- مقایسه نسبت حداکثر عرض به حداکثر عمق حفره آبشستگی (w_s/D_s) در حالت وجود و عدم وجود شکافنده

برای بررسی این موضوع پارامتر نسبت حداکثر عرض حفره آبشستگی به حداکثر عمق حفره آبشستگی (w_s/D_s) در دو حالت وجود شکافنده و بدون شکافنده مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 7 نمودار پراکندگی حداکثر عرض حفره آبشستگی در مقابل حداکثر عمق حفره آبشستگی برای حالت بدون شکافنده (7- الف) و حالت وجود شکافنده بر روی سرریز (7- ب) نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل 6 نمودار پراکندگی حداکثر طول حفره آبشستگی در مقابل حداکثر عمق حفره آبشستگی برای حالت الف) بدون شکافنده و ب) وجود شکافنده



(الف) (ب)

شکل 7 نمودار پراکندگی حداکثر عرض حفره آبشستگی در مقابل حداکثر عمق حفره آبشستگی برای حالت الف) بدون شکافنده و ب) وجود شکافنده

در محدوده مطالعاتی این پژوهش نسبت (w_s/D_s) در حالت بدون شکافنده در محدوده 3/4 تا 6 قرار دارد و در حالت وجود شکافنده در محدوده 3/9 تا 6/8 قرار دارد. به طور میانگین نسبت حداکثر عرض حفره به حداکثر عمق حفره (w_s/D_s) در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده 14 درصد افزایش یافته است. باید توجه کرد که افزایش (w_s/D_s) در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده به معنی افزایش حداکثر عرض حفره (W_s) نیست، زیرا وجود شکافنده از طرفی باعث کاهش عمق آبشستگی نیز می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق الگوی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد در شرایط وجود و عدم وجود شکافنده، با استفاده از یک مدل بزرگ‌مقیاس به ارتفاع 6 متر، مورد بررسی قرار گرفته شد.

- با توجه به آزمایش‌های انجام شده و تحلیل‌های صورت گرفته شده، نتایج زیر قابل بیان می‌باشند:

- به طور کلی وجود شکافنده بر روی سرریز در تمامی حالت‌ها از شرایط هیدرولیکی جریان، سبب کاهش حداکثر طول و عرض حفره آبشستگی و همچنین شیب-های آن می‌شود.

- به طور میانگین در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده، حداکثر طول حفره آبشستگی 20 درصد و حداکثر عرض حفره آبشستگی 17 درصد کاهش یافته است.

- نسبت شیب بالادست پروفیل طولی به شیب ایستایی خاک، در حالت بدون شکافنده در محدوده 0/6 تا 0/9 و در حالت وجود شکافنده در محدوده 0/4 تا 0/75 قرار دارد.

- نسبت شیب پایین دست پروفیل طولی به شیب ایستایی خاک، در حالت بدون شکافنده در محدوده 0/65 تا 0/85 و در حالت وجود شکافنده در محدوده 0/4 تا 0/65 قرار دارد.

- نسبت شیب پروفیل عرضی به شیب ایستایی خاک، در حالت بدون شکافنده در محدوده 0/45 تا 0/7 و در حالت وجود شکافنده در محدوده 0/35 تا 0/65 قرار دارد.

- وجود شکافنده به طور میانگین سبب کاهش شیب بالادست پروفیل طولی به میزان 28 درصد، شیب پایین‌دست پروفیل طولی به میزان 30 درصد و شیب پروفیل عرضی به میزان 21 درصد، نسبت به حالت بدون شکافنده می‌شود.

- به طور میانگین نسبت حداکثر طول به حداکثر عمق حفره (L_s/D_s) در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده 12 درصد افزایش می‌یابد.

- به طور میانگین نسبت حداکثر عرض به حداکثر عمق حفره (w_s/D_s) در حالت وجود شکافنده نسبت به حالت بدون شکافنده 14 درصد افزایش می‌یابد.

4- فهرست علایم

D_s	حداکثر عمق حفره آبشستگی (m)
D	مجموع مقادیر h و D_s (m)
d_{50}	قطر متوسط مصالح بستر (m)
Fr_{d50}	عدد فرود مصالح بستر
H	ارتفاع ریزش (m)
H_d	عمق آب روی تاج سرریز (m)
h	عمق آب در کانال پایاب (m)
L_s	حداکثر طول حفره آبشستگی (m)
L	طول شکافنده (m)
$MAPE$	میانگین قدر مطلق خطا
P	اختلاف تراز راس تاج سرریز و وجه بالایی شکافنده (m)
q	دبی ویژه جریان (m^2/s)
R^2	ضریب همبستگی
$RMSE$	مجذور میانگین مربعات خطا
S	فاصله بین شکافنده‌ها (m)
W_s	حداکثر عرض حفره آبشستگی (m)
W	عرض شکافنده (m)

5- منابع

اسدی، م.، (1392). بهینه‌سازی ابعاد شکافنده‌ها برای کاهش انرژی و آبشستگی در سرریزهای ریزشی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

Bollaert, E.F., and Schleiss, R. (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review", J. of Hyd. Res., 41(5), pp. 451-464.

Dey, S., and Raikar R. V. (2007). "Scour below a high vertical drop", Journal of Hydraulic Engineering, 133(5), pp. 564-568.

Mason, P.J. (1983). "Energy dissipating crest splitters for concrete dams", Water Power and Dam Construction, 35(10), pp. 37-40.

Mason, P. J. and Arumugam K. (1985). "Free jet scour below dams and flip buckets", Journal of Hydraulic Engineering, 111(2), 220-235.

Mazurek, K.A. and Rajaratnam, N. (2003). "Erosion of sand by circular impinging water jets whit small tailwater", J. Hydraul. Eng., 139 (3), pp. 225-229.

Pagliara, S., Roy, D. and Palermo, M. (2009). "3D plunge pool scour with protection measures", J of Hyd. – Env. Res., 4, pp. 225-233.

Roberts, D. F. (1943). "The dissipation of the energy of a flood passing over a high dam." Proceedings of the South African Society of Civil Engineers.

Schoklitsch, A. (1932). "Kolkbildung unter uberfallstrahlen", Wasserwirtschaft, 24, pp. 341–343.

Safavi, K., Zarrati, A.R., Ghafoori, S., and Karaminejad, A.R., (2011). "Optimization of splitters to reduce scouring downstream of overflow spillways", Proc. of 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia, pp. 2562-2568.

Veronese, A. (1937), "Erosioni de fondo a valle di uno scarico," Annali dei Lavori Publicci, Vol. 75, No. 9, pp. 717-726.