

مقایسه مشخصات حفره آب‌شستگی پایین‌دست جت دایره‌ای مستغرق تحت زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه

اکبر ارمغانی^۱، بابک لشکرآرا^{۲*}، علی محمد آخوندعلی^۳ و علی لشکرآرا^۴

چکیده

جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی بیشتر به صورت جت است. بسته به عمق پایاب، جت می‌تواند به صورت آزاد یا مستغرق باشد. هرگاه مقدار تراز پایاب از تراز جت بیشتر باشد، جت مستغرق است. ابعاد و مشخصات حفره آب‌شستگی متأثر از متغیرهای زیادی از قبیل پارامترهای جریان، مشخصات بستر آبرفتی، زمان، هندسه آبراهه و ارتفاع ریزش است. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای عمق پایاب، سرعت جت و زاویه جت، در دو حالت ۴۵ و ۶۰ درجه، بر ابعاد حفره آب‌شستگی و برآمدگی نسبی رسوبات تحت جت دایره‌ای مستغرق پرداخته شده است. براساس مشاهدات آزمایشگاهی مقادیر عمق نسبی حفره آب‌شستگی d_s/h_{TW} و برآمدگی نسبی رسوبات d_m/h_{TW} تحت اثر زاویه جت ۶۰ درجه، به ترتیب به ازای پارامتر فرسایش $E_s > 2.82$ و $E_s > 1.97$ از جت با زاویه ۴۵ درجه بیشتر هستند. همچنین نتایج پژوهش نشان داد که با کاهش زاویه جت خروجی از نازل نسبت به افق، پهنه تنش مازاد بر تنش بحرانی در سطح رسوبات توسعه یافته و سبب گسترده‌گی ابعاد حفره آب‌شستگی و برآمدگی رسوبات در پلان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اثر زاویه، پارامتر فرسایش، تنش، جت، رسوبات.

ارجاع: ارمغانی ا. لشکرآرا ب. آخوندعلی ع. م. و لشکرآرا ع. ۱۳۹۴. مقایسه مشخصات حفره آب‌شستگی پایین‌دست جت دایره‌ای مستغرق تحت زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۱۶۳-۱۷۰.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران آب، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- دانش آموخته دوره کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی

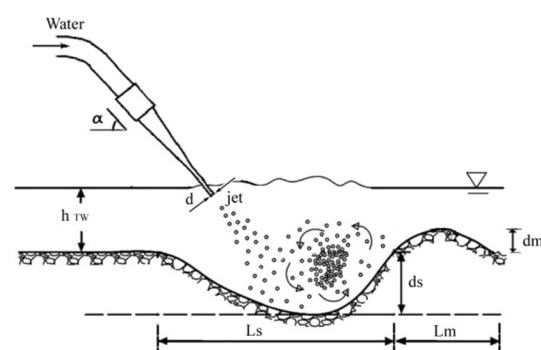
* نویسنده مسئول: Babak_Lashkarara@yahoo.com

مقدمه

پیش‌بینی ابعاد حفره آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌ها و تنظیم سطح آب یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مراحل در طراحی فونداسیون این سازه‌هاست. طراحی باید با توجه به ابعاد حفره ایجاد شده به‌صورتی باشد که احتمال شکست و واژگونی سازه کم شود. برخورد جت آب به بستر سبب افزایش تنش برشی در مجاورت بستر شده و منجر به جدایی ذرات رسوب می‌شود. در شروع این پدیده، در شرایطی که عمق پایاب در حداقل مقدار خود قرار دارد، جت ریزشی تا مجاورت بستر آبرفتی نفوذ کرده و سبب ایجاد گردابه‌هایی می‌شود. این گردابه‌ها در خلل و فرج ذرات بستر نفوذ کرده و سبب جدایی ذرات می‌شود.

با گذشت زمان و استهلاک بخشی از انرژی جریان، عمق موضعی جریان افزایش یافته و سبب کاهش شدت فرسایش می‌شود. در این حالت ذرات رسوبی به‌صورت بار بستر و معلق به پایین‌دست حمل شده و در فاصله به نسبت کوتاهی از محل برخورد جت ته‌نشین می‌شوند. در نتیجه تپه رسوبات در پایین‌دست حفره آب‌شستگی تشکیل می‌شود. ارتفاع این تپه تابعی از عمق پایاب است. تجربه نشان داده است که با کاهش عمق پایاب ارتفاع تپه نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با تغییر قطر نازل برای یک ارتفاع ریزش و عمق پایاب ثابت، ابعاد حفره نیز دستخوش تغییرات می‌شود.

در شکل ۱ مشخصات هندسی حفره ایجاد شده پس از حالت تعادل به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱- نمای شماتیک موقعیت جت ریزشی و چگونگی اثر آن بر ابعاد حفره آب‌شستگی در حوضچه استغراق

بررسی‌های زیادی توسط پژوهش‌گران مختلف برای تعیین مشخصات آب‌شستگی موضعی حول سازه‌های هیدرولیکی

انجام شده و در بیشتر موارد نتایج به‌صورت معادلات تجربی ارائه شده است. راس (۱۹۴۰) تغییرات ابعاد حفره آب‌شستگی با گذشت زمان از شروع تا تعادل نهایی را بررسی کرد. بورمن و ژولین (۱۹۹۱) با بررسی جت وارده به حفره آب‌شستگی معادلاتی برای ابعاد حفره فرسایشی ارائه کرده‌اند. رایبسون و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی پیچیدگی‌های تنش برشی جریان درون حفره آب‌شستگی پرداخته‌اند. ملیان و همکاران (۲۰۰۰) برای فاصله‌های مختلف برخورد جت از خروجی نازل، زوایای جت را بین ۴۵ تا ۹۰ درجه تغییر دادند. قطر نازل مورد استفاده در آزمایش‌ها ۲ میلی‌متر و مصالح بستر دارای قطر ۰/۵ تا ۰/۷ میلی‌متر بوده است. جت مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت مستغرق است. آنان نتیجه گرفتند در صورتی که سرعت خروجی جت از نازل کم باشد، حجم آب‌شستگی با افزایش زاویه‌ی جت افزایش می‌یابد. البته در سرعت‌های بالا میزان تأثیر زاویه جت کمتر خواهد بود. پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۶) با انجام آزمایش‌های وسیعی به بررسی اثرات شکل جت، زاویه جت، هوای وارده به جت، عمق پایاب و سرعت جت بر ابعاد حفره آب‌شستگی پرداختند. ایشان در پژوهش‌های خود از مصالح غیرچسبنده با دانه بندی یکنواخت استفاده کردند. متوسط قطر مصالح مورد استفاده ۶/۵ میلی‌متر و ضریب غیریکنواختی ۱/۲۲ گزارش شده است. ایشان در پژوهش‌های خود با تغییر در زاویه جت تحت زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه دریافتند که حداکثر عمق نسبی حفره آب‌شستگی را می‌توان از معادله زیر تقریب زد:

$$d_s/d_n = 0.38 \sin(\alpha + 22.5^\circ) \times F_{d90} \quad (1)$$

که در آن d_s حداکثر عمق متعادل شده آب‌شستگی، F_d عدد فرود ذره، d_n قطر نازل و α زاویه جت با افق است. معادله (۱) به ازای $2 < F_d < 20$ معتبر است. پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۸) با تغییر در زاویه جت تحت زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، قطر نازل، عدد فرود ذره، و عمق پایاب، تغییرات شکل هندسی حفره آب‌شستگی را در پلان ارزیابی کردند. ایشان با ترسیم تغییرات عمق نسبی استغراق پایاب (نسبت عمق پایاب به قطر نازل) در مقابل زاویه جت، یک طبقه‌بندی پنج‌گانه از تغییرات شکل حفره آب‌شستگی در پلان معرفی کردند.

ماسون (۱۹۸۹) بسیاری از فرمول‌های موجود جهت

رفته در پژوهش‌های پیشین در محدوده ماسه ریز تا شن ریز قرار دارد.

مواد و روش‌ها

برای رسیدن به هدف‌های پژوهش، یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور ساخته شد. این مدل دارای قابلیت تغییر در زاویه نازل، تغییر در محل استقرار نازل نسبت به تراز فوقانی رسوبات و همچنین قابلیت تغییر در میزان عمق پایاب است. بدین منظور ارباه‌ای ویژه برای استقرار نازل ساخته شد که به صورت افقی، عمودی و دورانی دارای قابلیت تغییر مکان است. در این پژوهش نازل در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه تثبیت شد. قطر نازل در تمام مراحل آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. با نصب این نازل در بالای یک مخزن فلزی به طول ۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۱ متر، شرایط لازم برای بررسی عمق آب‌شستگی در حوضچه استغراق فراهم شد. برای حذف اثر غلظت هوای وارده از اطراف جت در میزان عمق آب‌شستگی، لبه نازل به صورت مستغرق نصب شد. دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در این پژوهش مصالح آبرفتی یکنواخت غیرچسبنده عبوری از الک ۱/۲ اینچ و مانده روی الک ۳/۸ اینچ است. قطر متوسط ذرات معادل ۱۱/۱ میلی‌متر برآورد می‌شود. ضخامت لایه رسوب مورد استفاده برای تخمین عمق آب‌شستگی ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و در تمام مراحل مختلف آزمایش ثابت لحاظ شد. برای جلوگیری از فرسایش اولیه مصالح بستر، نسبت به نصب یک صفحه فلزی روی تراز فوقانی رسوبات اقدام شد. با این عمل امکان آب‌شستگی اولیه رسوبات قبل از شروع آزمایش صلب شد. سپس با استفاده از دریچه کشویی نصب شده در خروجی مخزن، عمق آب پایاب لازم در دبی مورد نظر آزمایش تنظیم شد. با استفاده از ادوات نصب شده روی ارباه استقرار نازل، دماغه نازل حدود یک سانتی‌متر مستغرق شد. این عمل سبب جلوگیری از اختلاط هوای اطراف جت و حذف اثر کاهنده آن بر میزان ابعاد حفره آب‌شستگی خواهد شد. پس از برقراری تعادل میان عمق پایاب و دبی مورد نظر آزمایش، نسبت به خروج صفحه فلزی از روی تراز رسوبات اقدام شد.

برای کنترل میزان دبی جریان از یک دستگاه دبی‌سنج الکترومغناطیس با قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر و با دقت دو

پیش‌بینی عمق آب‌شستگی را جمع‌بندی کرد و اختلافی بین مؤلفانی که روی ارتفاع ریزش H بین بالادست و پایین‌دست سطح آب تمرکز کرده بودند را پیدا کرد و به این نتیجه رسید که آب‌شستگی ممکن است تحت تأثیر درصدی از هوای ورودی باشد. از میان یک سری از آزمایش‌ها، برای عمق آب‌شستگی همراه با جت هوا معادله (۲) را ارائه کرد:

$$d_s = 3.39 q^{0.06} (1 + \beta)^{0.3} h_{TW}^{0.16} / (g^{0.3} D^{0.06}) \quad (2)$$

که در آن d_s عمق آب‌شستگی، q دبی در واحد عرض، h_{TW} عمق پایاب، g شتاب ثقل، D اندازه متوسط مواد بستر و β نسبت هوا به آب است که توسط اروین (۱۹۷۶) پیشنهاد شده است. در این معادله β به‌عنوان فاکتوری برای تعریف فرآیند آب‌شستگی جایگزین H شده است (ماسون ۱۹۸۹ و ماسون و آرماتوم، ۱۹۸۵).

بوه‌ر و همکاران (۱۹۹۸) روند کاهشی سرعت جت ریزشی در حوضچه استغراق را بررسی کردند. ایشان دو نوع جت را ارزیابی کردند: جت با هوای ورودی و جت بدون هوای وارده. نتایج نشان داد که هوادهی، سرعت جت آب را کاهش می‌دهد. کانپا و هگر (۲۰۰۳) تأثیر برهم‌کنش آب و هوا را بر روی آب‌شستگی بررسی کرده و نشان دادند که با هوادهی عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد.

زو و همکاران (۲۰۰۴) اثرات هوادهی روی آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی را آزمایش کردند و یک معادله کمی بین غلظت هوای جت و عمق آب‌شستگی نسبی به دست آوردند. نتایج نشان داد که پروفیل حفره آب‌شستگی بیشتر تابع عمق آب‌شستگی است و غلظت هوای ورودی به جت تأثیر کمی در شکل پروفیل دارد. هوادهی روی شکل حفره آب‌شستگی اثر دارد و عمق آب‌شستگی را کاهش می‌دهد. حفره آب‌شستگی که در شرایط هوادهی و بدون هوادهی تشکیل شده، خود متشابه هستند.

هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای هیدرلیکی جریان خروجی از جت‌های مستغرق و عمق پایاب و همچنین زاویه جت بر ابعاد حفره آب‌شستگی و تپه رسوب‌گذاری شده در حوضچه استغراق است. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به استفاده از مصالح آبرفتی غیرچسبنده با دانه‌بندی یکنواخت در محدوده شن متوسط اشاره نمود. شایان ذکر است که قطر مصالح به کار

منظور پس از بررسی‌های به عمل آمده چنانچه حداکثر ابعاد حفره آب‌شستگی W_s ، L_s و d_s و یا ابعاد برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره W_m ، L_m و d_m در حوضچه استغراق با پارامتر φ نمایش داده شوند، می‌توان φ را تابعی از پارامترهای زیر دانست:

$$\varphi = f(Q_w, Q_a, d_n, V_o, B, \alpha, h_{TW}, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s) \quad (3)$$

که در آن Q_w دبی آب خروجی از نازل، Q_a دبی هوای ورودی به جت آب، d_n قطر نازل، V_o سرعت خروجی جت از نازل، B عرض حوضچه، α زاویه نازل نسبت به افق، h_{TW} عمق پایاب، D_{50} متوسط قطر ذرات، g شتاب ثقل، μ لزوجت سیال، ρ_w جرم مخصوص سیال و ρ_s جرم مخصوص رسوبات است. در این بررسی از برخی متغیرها به دلیل‌های زیر صرف‌نظر شده است:

- از آنجایی که سرعت V_o تابعی از دبی است لذا از پارامتر Q_w صرف‌نظر شده است.

- به دلیل استغراق دهانه نازل از دبی هوای ورودی Q_a نیز صرف‌نظر شده است.

- چون عرض حوضچه رسوب ثابت در نظر گرفته شده است پس می‌توان از اثر B در آنالیز ابعادی چشم‌پوشی نمود.

- به دلیل ثابت بودن ρ_s ، D_{50} و d_n در محدوده آزمایش‌های انجام شده، اثر این پارامترها کم فرض شده است.

با استفاده از تئوری باکینگهام π و با در نظر گرفتن پارامترهای h_{TW} ، g و ρ به عنوان متغیرهای تکراری، معادلات بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره آب‌شستگی و برآمدگی رسوبات در حوضچه استغراق را می‌توان به صورت معادله (۴) نوشت:

$$\frac{\varphi}{h_{TW}} = f\left(\frac{V_o}{\sqrt{g h_{TW}}}, \frac{\rho_w V_o h_{TW}}{\mu}, \alpha\right) \quad (4)$$

پارامتر $\rho_w V_o h_{TW} / \mu$ معرف عدد رینولدز است که به دلیل آشفتگی جریان می‌توان از اثر آن صرف‌نظر کرد. پارامتر $V_o / \sqrt{g h_{TW}}$ که از جنس عدد فرود است در این پژوهش به عنوان پارامتر فرسایش E_c نامیده شده است. پس از تعیین پارامترهای مؤثر بر فضای پژوهش با تغییر در پارامترهای α ، h_{TW} و V_o حداکثر ابعاد حفره آب‌شستگی W_s ، L_s و d_s و حداکثر ابعاد برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره W_m ، L_m و d_m اندازه‌گیری

درصد مقیاس کامل FS 2% ساخت شرکت مگاب استفاده شده است. برای برداشت پروفیل بستر از یک دستگاه متر لیزری مدل Leica Disto-D8 استفاده شده است. شکل ۲ نمایی از مدل فیزیکی مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

برای تعیین زمان آزمایش در شرایط هیدرولیکی متفاوت جت و عمق پایاب، آزمایش‌هایی به عنوان شاهد در زمان‌های مختلف ۲ الی ۷ ساعت، در بازه‌های زمانی یک ساعت تکرار شد.



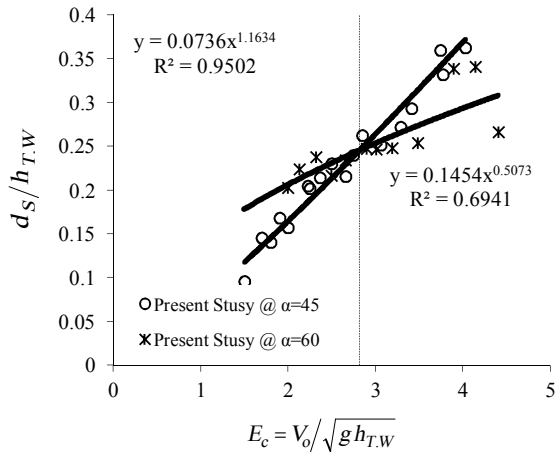
شکل ۲- مدل فیزیکی مورد استفاده در این پژوهش

بررسی نتایج نشان داد که مدت زمان پنج ساعت برای برقراری تعادل در عمق آب‌شستگی مناسب است. این عمل برای کلیه سناریوها تکرار شد. محدوده تغییرات پارامترهای مورد آزمون و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به شرح جدول ۱ هستند.

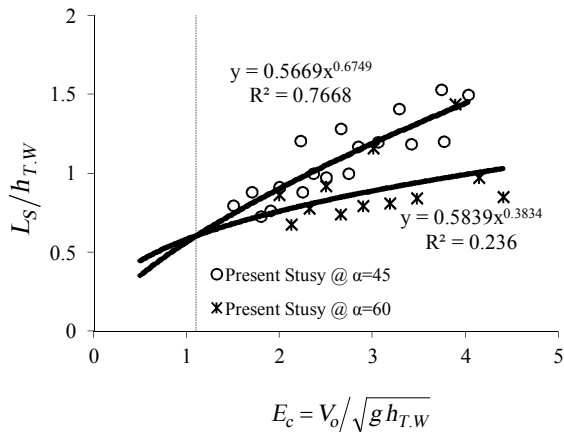
جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای قرائت شده در آزمایشگاه

پارامتر	واحد	محدوده تغییرات
سرعت خروجی جت	متر بر ثانیه	۱/۵-۳/۹۹
زاویه استقرار نازل با افق	درجه	۴۵ و ۶۰
عمق پایاب	متر	۰/۳۱۵-۰/۵۲۵
حداکثر عمق آب‌شستگی	متر	۰/۰۴۱-۰/۱۵۸
حداکثر طول آب‌شستگی	متر	۰/۲۴۵-۰/۶۵۲
حداکثر عرض آب‌شستگی	متر	۰/۵۴۱-۱/۴۲۶
حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات	متر	۰/۰۳۶-۰/۱۳۷
حداکثر طول برآمدگی رسوبات	متر	۰/۱۶۶-۰/۴۲۷
حداکثر طول برآمدگی رسوبات	متر	۰/۵۰۵-۱/۷۰۶

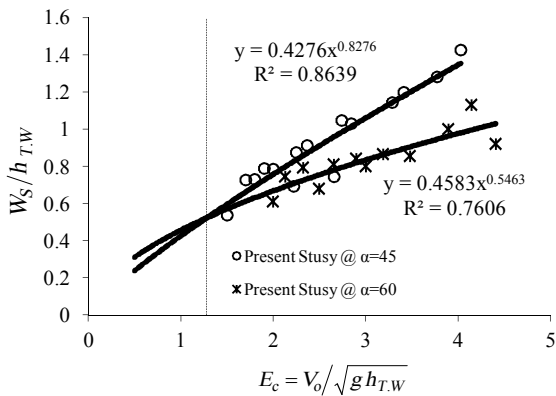
برای رسیدن به هدف‌های از پیش تعیین شده، شناخت پارامترهای مؤثر بر فضای پژوهش ضروری است. برای این



شکل ۴- تغییرات عمق نسبی حفره آب‌شستگی در مقابل پارامتر فرسایش به ازای زوایای مختلف جت



شکل ۵- تغییرات طول نسبی حفره آب‌شستگی در مقابل پارامتر فرسایش به ازای زوایای مختلف جت



شکل ۶- تغییرات عرض نسبی حفره آب‌شستگی در مقابل پارامتر فرسایش به ازای زوایای مختلف جت

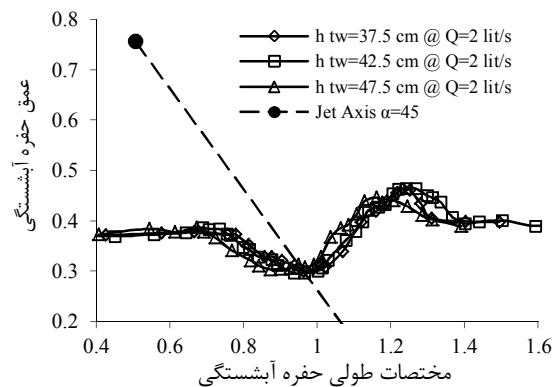
به بیان دیگر منحنی تغییرات پارامتر فرسایش E_c در مقابل پارامتر ϕ/h_{TW} به هنگام تغییر در زاویه جت با یکدیگر برخورد دارند. در این راستا به ازای پارامتر

شد. سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار اکسل ضریب‌های معادلات توانی بدون بعد تعیین گردید.

نتایج و بحث

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در این پژوهش علاوه بر تغییر در زاویه جت، اثر عمق پایاب بر میزان ابعاد حفره آب‌شستگی ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب، شکل و نحوه ته‌نشینی رسوبات در پایین‌دست حفره آب‌شستگی متفاوت است. در اعماق کم پایاب، نحوه ته‌نشینی رسوبات به طور تقریبی با ارتفاعی ثابت توزیع می‌شود. این در حالی است که با افزایش عمق پایاب، پارامتر فرسایش E_c کاهش یافته و این امر سبب آرام‌تر شدن الگوی آشفتگی در لایه‌های سیال نزدیک بستر می‌شود. بنابراین ذراتی که به هر شکل از جای خود حرکت کرده‌اند سریع‌تر انرژی جنبشی خود را از دست داده و ته‌نشین می‌شوند. تجربه نشان داده است که در شرایط یاد شده رسوبات در ناحیه برآمدگی به فرم یک قله ته‌نشین می‌شوند. شکل ۳ نشان دهنده تغییرات پروفیل طولی آب‌شستگی در مقابل تغییرات عمق پایاب به ازای دبی ثابت است.

شکل‌های ۴، ۵ و ۶ تأثیر پارامتر فرسایش را در مقابل ابعاد بدون بعد حفره آب‌شستگی نمایش می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود با افزایش عمق پایاب مقدار پارامتر فرسایش کاهش یافته و این عمل سبب کاهش نسبی عمق آب‌شستگی در هر دو زاویه خروجی جت می‌شود. همچنین دیده می‌شود که تغییر در زاویه جت، سبب تشکیل یک حد آستانه در خصوص روند تغییرات عمق نسبی آب‌شستگی خواهد شد.



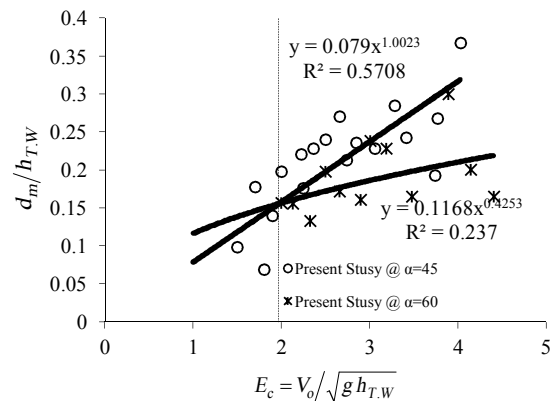
شکل ۳- تغییرات پروفیل طولی آب‌شستگی در مقابل تغییرات عمق پایاب به ازای دبی ثابت

می‌شود و این امر سبب گسترش طول و عرض حفره آب‌شستگی خواهد شد. از نقطه نظر دیگر جریان خروجی از نازل تحت زاویه ۶۰ درجه مسیر طولانی‌تری را در مقایسه با جت با زاویه ۴۵ درجه درون سیال طی می‌کند تا به سطح بستر برخورد کند که این امر موجب استهلاک بیشتر انرژی جنبشی جت توسط سیال پیرامون و کاهش پتانسیل فرسایش آن خواهد شد. از طرفی کاهش شیب الگوی جریان خروجی از حفره آب‌شستگی تحت زاویه ۶۰ درجه سبب انتقال بیشتر رسوبات به پایین دست حفره آب‌شستگی شده که این امر سبب گستردگی ابعاد حفره آب‌شستگی و تپه رسوبی را فراهم خواهد آورد. روند تغییرات در میزان طول و عرض حفره آب‌شستگی به ازای تغییر در زاویه جت در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

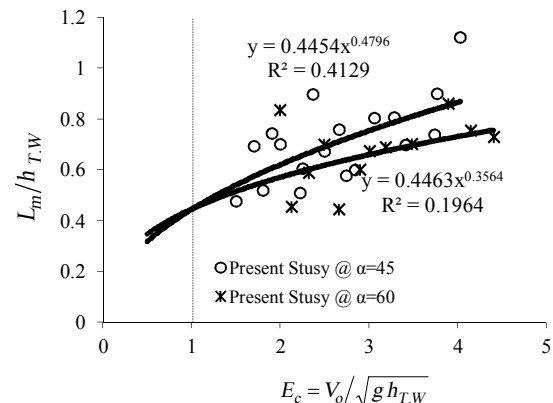
رسوباتی که کم‌کم از حفره آب‌شستگی خارج می‌شوند، به همراه جریان به پایین دست حفره انتقال می‌یابند. کاهش انرژی جنبشی رسوبات خارج شده از حفره سبب ته‌نشینی آن‌ها خواهد شد. فرم و ارتفاع برآمدگی رسوبات به عوامل مختلفی همچون سرعت خروجی جت، عمق پایاب، لزجت سیال، میزان آشفتنی جریان، چگالی و اندازه دانه بندی ذرات بستگی دارد. شکل ۷ تأثیر پارامتر فرسایش را در مقابل ارتفاع برآمدگی رسوبات تحت زاویه جت ۴۵ و ۶۰ درجه نشان می‌دهد. همچنین دیده می‌شود که روند تغییر در میزان ابعاد برآمدگی رسوبات در مقابل پارامتر فرسایش، مشابه روند تغییرات حفره آب‌شستگی است. تفاوت این امر را می‌توان در حدود آستانه فرسایش جستجو کرد. همان‌گونه که از شکل ۷ فهمیده می‌شود این حد به میزان ۱/۹۷ محدود می‌شود. در این حالت به ازای پارامتر فرسایش بزرگ‌تر از ۱/۹۷، میزان ارتفاع برآمدگی رسوبات در جت خروجی با زاویه ۴۵ درجه از زاویه ۶۰ درجه بیشتر است. روند تغییرات در میزان طول و عرض برآمدگی رسوبات به ازای تغییر در زاویه جت نیز در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است.

برای تحلیل بهتر نتایج این پژوهش، مشاهدات انجام شده با بررسی‌های پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۶) مقایسه شد. بدین منظور پارامتر نسبی عمق آب‌شستگی d_s/d_n مشاهده شده در این پژوهش در مقایسه با نتایج نظیر محاسبه شده با معادله (۱) ارزیابی شد (شکل ۱۰). از مقایسه شیب خطوط برازش شده از بین این نتایج با شیب

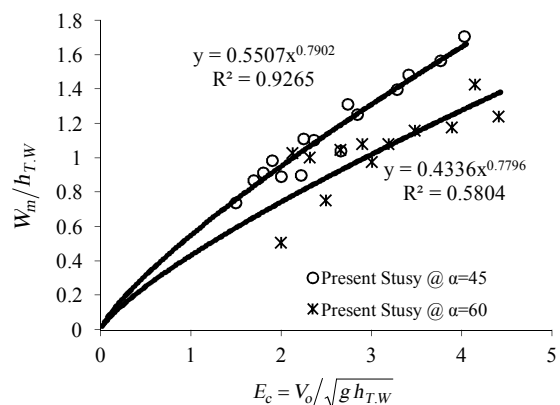
فرسایش $E_c > 2.82$ میزان عمق نسبی آب‌شستگی جت خروجی با زاویه ۴۵ درجه از ۶۰ درجه بیشتر است.



شکل ۷- تغییرات ارتفاع نسبی برآمدگی رسوبات در مقابل پارامتر فرسایش به ازای زوایای مختلف جت



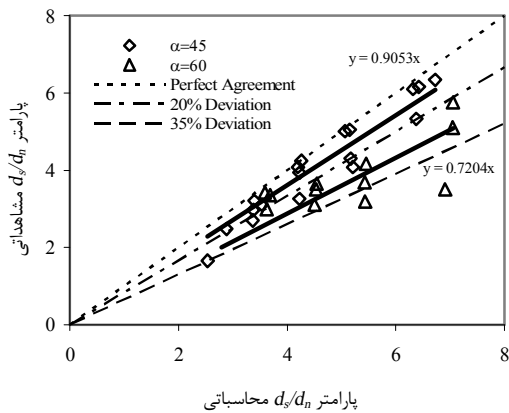
شکل ۸- تغییرات طول نسبی برآمدگی رسوبات در مقابل پارامتر فرسایش به ازای زوایای مختلف جت



شکل ۹- تغییرات عرض نسبی برآمدگی رسوبات در مقابل پارامتر فرسایش به ازای زوایای مختلف جت

نکته قابل توجه آن است که کاهش در زاویه جت خروجی سبب گستردگی پهنه تنش مازاد بر تنش بحرانی $\tau > \tau_c$

شده در هر دو زاویه بزرگتر از مقادیر اندازه‌گیری می‌باشند.



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر محاسباتی پارامتر d_s/d_n با رابطه (۱) در مقابل مشاهدات نظیر در این پژوهش

خط ۱: ۱ می‌توان دریافت که نتایج استفاده از معادله (۱) برای تخمین پارامتر d_s/d_n برای هر دو زاویه جت ۴۵ و ۶۰ درجه، مقادیری بیشتر از مشاهدات انجام شده در این پژوهش را گزارش می‌کند. این میزان در حالت شیب جت ۴۵ درجه حدود ۹/۵ درصد و در حالت شیب ۶۰ درجه حدود ۲۸ درصد بیشتر از مشاهدات انجام شده در این پژوهش است. ذکر این نکته ضروری است که قطر مصالح مورد استفاده در این پژوهش به طور تقریبی دو برابر قطر مصالح مورد استفاده در پژوهش‌های پاگلپارا و همکاران (۲۰۰۶) است. پس دلیل اصلی اختلاف نتایج مشاهدات این پژوهش با معادله (۱) را در این امر می‌توان جویا شد. همچنین از نتایج مندرج در جدول ۲ می‌توان دریافت که مقادیر عمق نسبی آب‌شستگی تخمین زده شده توسط پاگلپارا و همکاران (۲۰۰۶) در مقایسه با مشاهدات نظیر در این پژوهش دارای ضریب باقیمانده منفی بوده و این تأکیدی بر این مطلب است که مقادیر d_s/d_n پیش‌بینی

جدول ۲- توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با معادله (۱) حاصل از بررسی‌های پاگلپارا و همکاران (۲۰۰۶)

ضریب زاویه m	ضریب وزن باقیمانده CRM	خطای استاندارد تخمین SEE	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین خطای مطلق MAE	درصد میانگین خطا MPE	پایه d_s/d_n
۰/۹۰۵۳	-۰/۱۱۴۴	۰/۳۵۳۹	۰/۵۷۱	۰/۴۰۴۶	۲۰/۳۷۷	تحت زاویه ۴۵ درجه
۰/۷۲۰۴	-۰/۳۵۸۸	۰/۹۶۹۷	۱/۶۲۳۹	۱/۳۴۷۴	۳۹/۸۰۵	تحت زاویه ۶۰ درجه

کم، نحوه ته‌نشینی رسوبات به طور تقریبی با ارتفاعی ثابت توزیع می‌شود. با افزایش عمق پایاب فرم رسوبات ته‌نشین شده دارای فرم قله‌ای خواهد بود. با افزایش عمق پایاب مقدار پارامتر فرسایش کاهش می‌یابد و به تبع آن عمق نسبی آب‌شستگی نیز کاهش می‌یابد. این امر به ازای کلیه زوایای جت خروجی از نازل صادق است.

به ازای پارامتر فرسایش بزرگتر از $۲/۸۲$ ($E_c > 2.82$) میزان عمق نسبی آب‌شستگی جت خروجی با زاویه ۴۵ درجه از ۶۰ درجه بیشتر است.

به ازای پارامتر فرسایش بزرگتر از $۱/۹۷$ ($E_c > 1.97$) میزان برآمدگی نسبی رسوبات تحت جت خروجی با زاویه ۶۰ درجه از مشاهدات نظیر آن تحت شیب ۴۵ درجه

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج حاصل از یک بررسی تجربی برای تخمین میزان آب‌شستگی رسوبات غیرچسبنده درون حوضچه استغرق تحت جت دایره‌ای مستغرق شیب‌دار ارائه شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور به‌منظور بررسی میزان آب‌شستگی بسترهای شنی تحت جت‌های دایره‌ای مستغرق در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه به اجرا در آمد. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد: روند تغییرات کلیه پارامترهای وابسته به پدیده آب‌شستگی با پارامتر فرسایش (عدد فرود جت) رابطه مستقیم دارد. با افزایش عمق پایاب، شکل و نحوه ته‌نشینی رسوبات در پایین‌دست حفره آب‌شستگی متفاوت است. در عمق پایاب

9. Pagliara S. Amidei M. and Hager W. H. 2008. Hydraulics of 3D Plunge Pool Scour. Journal of Hydraulic Engineering. 134(9): 1275-1284.
10. Robinson K. M. Hanson G. J. and Cooke K. R. 1998. Velocity field measurements at an overfall, American Society of Agricultural Engineering., No.982063.
11. Rouse H. 1940. Criteria for Similarity in the transportation of sediment. Studies in Engineering Bullentin. University of IOWA. 20: 33-49.
12. Xu W. Deng J. Qu J. Liu S. Wang W. 2004. Experimental Investigation on Influence of Aeration on Plane Jet Scour. Journal of Hydraulic Engineering. 130(2): 160-164.

کمتر است.

با کاهش زاویه جت خروجی از نازل، پهنه تنش برشی مازاد بر تنش بحرانی $\tau > \tau_c$ گسترش می‌یابد و این امر باعث توسعه ابعاد دوبعدی در پلان حفره آبشستگی و برآمدگی رسوبات می‌شود.

از مقایسه نتایج این پژوهش در تخمین پارامتر حداکثر عمق آبشستگی نسبی d_s/d_n در مقایسه با معادله ارائه شده توسط پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۶) دیده می‌شود که مشاهدات این پژوهش در حالتی که شیب جت با افق زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه تشکیل دهد، به ترتیب حدود ۹/۵ درصد و ۲۸ درصد کمتر از معادله پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۶) است. در ضمن دیده می‌شود که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی جهت تخمین پارامتر عمق نسبی آبشستگی جهت هر دو زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب در باند اطمینان ۲۰- و ۳۵- درصد هستند.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله نگارندگان مقاله از دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور تقدیر و تشکر می‌کنند.

منابع

1. Borman N. E. and Julien P. Y. 1991. Scour Downstream of Grade-Control Structures. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 117(5): 579-594.
2. Bohrer J. G. Abt S. R. and Wittler R. J. 1998. Predicting plunge pool velocity decay of free falling, rectangular jet. Journal of Hydraulic Engineering. 124(10): 1043-1048.
3. Canepa S. and Hager W. H. 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering. 129(5): 358-365.
4. Ervine D. A. 1976. The entrainment of air in water. Int. Water Power Dam Construction. 28(12): 27-30.
5. Mason P. J. and Arumugam K. 1985. Free jet scour below dams and flip buckets. Journal of Hydraulic Engineering. 111(2): 220-235.
6. Mason P. J. 1989. Effects of air entrainment on plunge pool scour. Journal of Hydraulic Engineering. 115(3): 385-399.
7. Meilan Q. I. Fujisak K. and Tanaka K. 2000. Sediment re-suspension by turbulent jet in an intake pond. Journal of Hydraulic Research. 38(5): 323-330.
8. Pagliara S. Hager W. H. and Minor H. E. 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. Journal Hydraulic Engineering. 132(5): 450-461.