

بررسی میزان آبستگي در حوضچه استغراق ناشی از جت قائم برخوردی هوادهی شده و هوادهی نشده

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

۱- دانش آموخته دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

۲- نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول. Lashkarara@jsu.ac.ir

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۱۱

چکیده

در این مقاله بررسی اثر میزان اختلاط هوای ورودی به مغزه‌ی جت قائم برخوردی بر الگوی آبستگي در حوضچه استغراق ارائه شده است. در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، الگوهای مختلف ورود هوا به ازای عمق‌های مختلف پایاب در مقابل شرایط بدون هوای ورودی به جت مورد مقایسه قرار گرفت. طرح آزمایش‌ها بگونه‌ای تدوین گردید که درصد غلظت هوای ورودی به جت مقادیر صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد را تجربه نماید. نتایج نشان داد که درصد غلظت هوا در میزان ابعاد حفره آبستگي تأثیر به‌سزایی دارد و ورود هوا منجر به کاهش میزان فرسایش در کف حوضچه‌ی استغراق خواهد شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش درصد غلظت هوای وارده به جت، میزان حداکثر عمق و طول نسبی سطح فرسایش یافته در کف بستر حوضچه‌ی استغراق کاهش می‌یابند. این میزان تغییرات در ابعاد حفره‌ی ایجاد شده در کف حوضچه ابتدا بدون تأثیر و با گذر عدد فرود جت از حد بحرانی خود شروع به فرسایش بستر می‌نماید. نتایج نشان داد که علاوه بر عدد فرود جت، میزان هوای ورودی به جت نیز از یک حد آستانه برخوردار است و با کم شدن از حد مرزی پنج درصد در افزایش تنش برشی مازاد وارده بر کف حوضچه بی تأثیر خواهد بود.

کلید واژه‌ها: آبستگي، پیش هوادهی، پایاب، اختلاط، استهلاک انرژی، سرریز.

مقدمه

چگونگی تخلیه سیلاب سدهای بزرگ و نحوه انتقال آب به دره پایین دست و نیز استهلاک انرژی در برخی از سازه‌های پایانی از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از این سازه‌های پایانی برای استهلاک انرژی، حوضچه استغراق می‌باشد. به طور کلی فرآیند استهلاک انرژی در حوضچه استغراق از طریق تلاطم رخ می‌دهد. میزان انرژی جت آب خروجی از سدهای بزرگ که به حوضچه استغراق برخورد می‌نماید به پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع ریزش، ضخامت جریان جت و هم‌چنین شرایط محیطی بستگی دارد. مطالعه رفتار جت آب در اتمسفر و حوضچه استغراق به مشخصه جریان جت از جمله تجزیه، فرآیند هواگیری و نحوه پخش جت، تأثیر نیروی کشش سطحی و انرژی جنبشی در تجزیه جت، عمق پایاب و پتانسیل فرساینده‌ی مصالح بستر بستگی دارد. آبستگي ناشی از برخورد جت با بستر فرسایش پذیر را می‌توان با توجه به نوع جت به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی نمود. در این میان می‌توان به آبستگي ناشی از جت‌های عمودی، جت‌های افقی و جت‌های پرتابی اشاره نمود. از طرفی با توجه به موقعیت استقرار جت نسبت به سطح پایاب می‌توان جت‌های مذکور را در گروه‌های جت مستغرق، جت آزاد، جت با ارتفاع ریزش زیاد، جت با ارتفاع ریزش کم، جت هوادهی شده و جت هوادهی نشده تقسیم بندی

نمود.

فرسایش موضعی کف حوضچه‌های استغراق با بستر آبرفتی، پدیده‌ای پیچیده بوده و تخمین مشخصات هندسی حفره آبستگي ایجاد شده دشوار است. تحقیقات نشان داده است که پس از اصابت جت با سطح بستر، بخشی از رسوبات معلق شده و شروع به حرکت می‌نمایند. طی فاز تکوین و تشکیل پروفیل فرسایش عمل انتقال موضعی رسوبات تا برقراری تعادل جرمی بین ذرات انتقال یافته و ته نشین شده‌ی درون حفره ادامه یافته تا حفره شکل پایدار و نهایی خود را پیدا نماید.

از آنجایی که جریان خروجی از سرریز سدهای بلند در طی مسیر به واسطه اغتشاش جت با هوای اطراف مخلوط شده و سپس با زاویه‌ای تقریباً قائم به سطح حوضچه استغراق برخورد می‌نماید. تحقیقات نشان داده است که میزان هوای ورودی به جت خروجی از سرریزها در مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از میزان آن در اصل می‌باشد. لذا تأثیر هوادهی بر حفره آبستگي نیازمند مطالعه می‌باشد.

تحقیقات وسیعی توسط محققین مختلف برای تعیین مشخصات آبستگي موضعی حول سازه‌های هیدرولیکی انجام گرفته و در اکثر موارد نتایج بصورت معادلات تجربی ارائه شده است. Rouse (1940) تغییرات ابعاد حفره آبستگي با گذشت زمان از شروع تا

Bollaert, Manso و Schleiss (2004) به بررسی اندرکنش شکل هندسی حوضچه استغراق با بستر سنگی بر میزان پخشیدگی جت ریزشی پرداختند. آنان آزمایش‌های خود را با جت‌های با قطر ۵/۵، ۱۱ و ۱۶/۵ برابر قطر سقوط جت ریزشی در بسترهای صاف و غیر صاف مورد آزمون قرار دادند و فشارهای دینامیکی را با فرکانس‌های ۱ الی ۲ کیلوهرتز ثبت نمودند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که شکل هندسی حوضچه تأثیر مستقیمی بر میزان پخشیدگی جت دارد.

Armaghani (2013) با تغییر در زاویه جت از ۴۵ الی ۷۵ درجه و با تغییر در میزان هوای وارده به جت از صفر تا ۲۵ درصد نسبت به تحلیل تغییرات حفره آبستگي اقدام نمود. وی نشان داد که با کم شدن زاویه جت ابعاد حفره آبستگي کاهش می‌یابد. از طرفی تحقیقات نشان داد که درصد غلظت هوای وارده به جت‌های پیش‌هوادهی شده به ازاء مقادیر بیشتر از ۲۵ درصد اثری بر ابعاد حفره آبستگي نخواهد داشت.

Schleiss، Duarte و Pinheiro (2015) در مطالعات خود به بررسی اثر هوای ورودی به جت بر فشار دینامیکی وارده بر کف حوضچه‌ی استغراق پرداختند. آنان در آزمایش‌های خود سرعت جت را تا ۲۲ متر بر ثانیه ارتقا دادند. نتایج نشان داد که ورود هوای به جت منجر به کاهش فشار وارده به کف حوضچه می‌شود. در این تحقیق به بررسی اثر میزان درصد هوای ورودی به جت قائم برخوردی و اندرکنش آن بر میزان فرسایش ایجاد شده در حوضچه‌های استغراق با بستر شنی پرداخته شده است. نتایج این تحقیق با شرایط جت‌های بدون هوادهی مورد ارزیابی قرار گرفته است و چگونگی عملکرد هوای وارده به جت بر تغییرات فرم بستر حوضچه استغراق مورد ارزیابی قرار گرفته است.

روش تحقیق

به‌منظور بررسی اثر همزمان عمق پایاب و میزان هوای وارده به جت قائم بر ابعاد حفره آبستگي در حوضچه استغراق، ساخت یک مدل فیزیکی مناسب در دستور کار تحقیق قرار گرفت. برای این منظور از آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور استفاده گردید. مدل فیزیکی مورد بحث به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شد که از قابلیت تزریق هوا به جت، تغییر مکان نازل و تغییر در میزان عمق پایاب برخوردار است. برای شبیه‌سازی حوضچه استغراق از یک نهرپایه دار به طول دو متر، عرض و عمق یک متر استفاده گردید. جریان آب از طریق یک لوله با قطر ۴ اینچ با مقطع دایره‌ای به سمت نازل با قطر ۲۵ میلی‌متر انتقال می‌یابد. سیستم افشانک بگونه‌ای طراحی گردیده است تا قبل از اینکه دبی آب از نازل خارج شود، هوای ورودی به نازل با آب مخلوط شود. میزان دبی هوای ورودی به افشانک با استفاده از یک لوله ونتوری که مجهز به یک ترانسدیوسر تفاضلی است اندازه‌گیری گردید. دبی آب به‌وسیله یک کنتور الکترومغناطیس با دقت مضاعف ساخت شرکت ایران مدار

تبادل نهائی را بررسی نمود. Julien و Bormann (1991) با بررسی جت وارده به حفره آبستگي معادلاتی برای ابعاد حفره فرسایشی ارائه نمودند. Robinson (1989) به بررسی پیچیدگی‌های تنش‌برشی جریان درون حفره آبستگي پرداخته‌اند. مطالعات انجام شده توسط Clarke (1962) بر روی جت عمودی از نوع استوانه‌ای مستغرق خروجی از یک روزنه نشان می‌دهد که اثر ارتفاع ریزش H وابسته به فشار دینامیکی جت می‌باشد به طوری که در فشارهای زیاد اثر ارتفاع ریزش ناچیز می‌باشد و برعکس در فشارهای کم اثر H محسوس می‌باشد.

Mason (1989) با جمع آوری روابط تجربی محققین پیشین دریافت که درصد هوای وارده به جت می‌تواند بر عمق حفره آبستگي مؤثر باشد. Mason با ارائه رابطه (۱) توانست میزان عمق آبستگي را با احتساب هوای وارده به جت تخمین بزند.

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

که در آن d_s عمق آبستگي؛ q دبی در واحد عرض، h_{nw} عمق پایاب، g شتاب ثقل، D اندازه متوسط مواد بستر و β نسبت هوا به آب می‌باشد که توسط Ervine در سال ۱۹۷۶ پیشنهاد شده است. در رابطه (۱) β به عنوان فاکتوری برای تعریف فرآیند آبستگي جایگزین H ارتفاع سقوط جت شده است و از رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$\beta = 0.13(1 - v_e/v)(H/t)^{0.466} \quad (2)$$

که در آن t ضخامت جت هنگام برخورد با حوضچه استغراق، v سرعت برخورد جت و v_e حداقل سرعت مورد نیاز جت برای ورود هوا می‌باشد. بر اساس مطالعات (Bin, 1984) و Van de Sande, (1981) رابطه (۲) مناسب جت‌های دایره‌ای نبوده و بیشتر در جت‌های تیغه‌ای و مستطیلی کاربرد دارد (Bin, 1984). Ervine در تحقیقات خود مقدار v_e در رابطه (۲) را معادل ۱/۸ متر بر ثانیه توصیه نمود (Ervine, 1976). Wittler و Abt-Bohrer (1998) روند کاهشی سرعت جت ریزشی در حوضچه استغراق را بررسی کردند. آنان در تحقیقات خود دو نوع جت را در حالت با هوای ورودی و بدون هوای ورودی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که هوادهی، سرعت جت آب را کاهش می‌دهد. Hager و Canepa (2003) تأثیر برهم‌کنش آب و هوا بر روی آبستگي را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که با هوادهی عمق آبستگي کاهش می‌یابد.

Xu et al. (2004) اثرات هوادهی بر روی آبستگي ناشی از جت ریزشی را مورد آزمایش قرار دادند و یک رابطه کمی بین درصد غلظت هوای جت و عمق آبستگي نسبی به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که هوادهی روی شکل حفره آبستگي اثر می‌گذارد و اساساً عمق آبستگي را کاهش می‌دهد.

اندازه‌گیری شد.

باکینگهام π استفاده گردید. برای این منظور ابعاد حفره آبستنگی (d_s, L_s) به‌عنوان متغیرهای وابسته، و پارامترهای مستقل مؤثر بر این پدیده شامل Q_w دبی خروجی از نازل، Q_a دبی هوا، d_n قطر نازل، V_o سرعت متوسط جریان مخلوط آب و هوای خروجی از نازل، B عرض مخزن، D_{50} قطر متوسط ذرات، g شتاب ثقل، μ لزوجت سیال، ρ_w وزن مخصوص آب، ρ_s وزن مخصوص ذرات رسوب در نظر گرفته شدند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$f(Q_w, Q_a, d_n, V_o, B, h_{tw}, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s) = 0 \quad (۳)$$

با استفاده از تئوری باکینگهام π و با در نظر گرفتن پارامترهای ρ, g, h به‌عنوان متغیرهای تکراری، و حذف پارامترهای ثابت هم‌چون قطر ذرات رسوب D_{50} ، قطر نازل d_n ، عرض مخزن B و وزن مخصوص ذرات رسوبی ρ_s ، معادلات بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره آبستنگی ناشی از جت در حوضچه استغراق را می‌توان به صورت روابط (۴) و (۵) نوشت:

$$d_s / h_{tw} = f(V_o / \sqrt{g h_{tw}}, \rho_w V_o h_{tw} / \mu, \%C_a) \quad (۴)$$

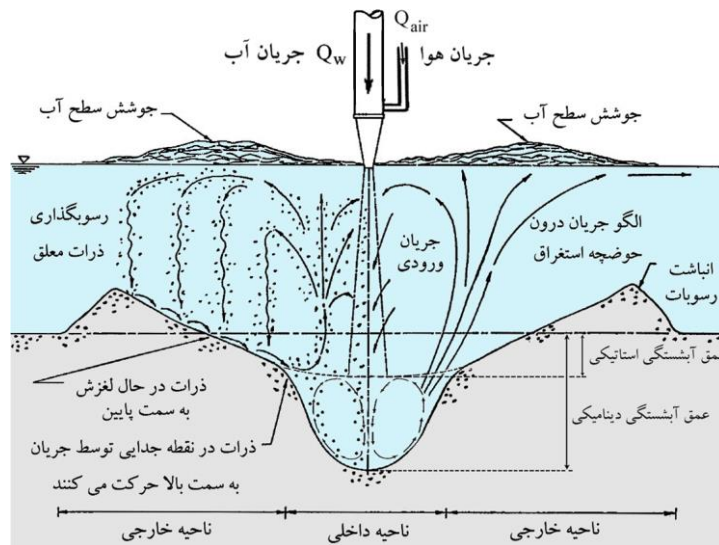
$$L_s / h_{tw} = f(V_o / \sqrt{g h_{tw}}, \rho_w V_o h_{tw} / \mu, \%C_a) \quad (۵)$$

پارامتر C_a معرف درصد غلظت هوای وارده به جت می‌باشد و از رابطه $C_a = (Q_{air} / Q_w + Q_{air}) \times 100$ تقریب زده می‌شود. پارامترهای اول و دوم ظاهر شده در معادلات (۴) و (۵) به ترتیب معرف اعداد فرود و رینولدز می‌باشند.

به منظور شبیه‌سازی شرایط جت‌های قائم، زاویه اراهه نازل در حالت ۹۰ درجه تنظیم گردید. مشخصات ژئومتری مصالح بستر، قطر نازل و ارتفاع ریزش جت تا سطح تسطیح شده‌ی بستر حوضچه استغراق مورد نظر قرار گرفت و مقرر شد تا رسوبات مورد استفاده در این تحقیق از مصالح بستر آبرفتی رودخانه‌ای غیرچسبنده که ذرات آن در فضای بین دو الک شماره‌های یک دوم و سه هشتم اینچ به تله بیافتند استفاده شود. چگالی ذرات برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید. عمق پایاب در سه سناریو مختلف به ترتیب برابر ۰/۳۲۵، ۰/۳۸۵، ۰/۴۳۵ متر تغییر نمود. دبی آب خروجی از نازل از ۳/۹۵ الی ۶/۱۲ لیتر بر ثانیه تغییر یافت. دبی هوا نیز از صفر تا ۱/۹۱ لیتر بر ثانیه نمود که این امر منجر به تجربه درصد غلظت هوای ورودی به نازل از صفر تا ۲۶ درصد گردید. دماغه نازل حدود یک سانتی‌متر مستغرق گردید تا با این عمل از ورود هوای اطراف به جت جریان جلوگیری گردد. زیرا امکان اندازه‌گیری هوای وارده به جریان مخلوط آب و هوای خروجی از نازل وجود نداشت. با این عمل تا حد چشم‌گیری از میزان خطای ورود هوا از اطراف به جت خروجی از نازل کاسته شد.

به‌منظور تعیین زمان انجام آزمایش‌ها در هر یک از سناریوهای تدوین شده مربوط به رقوم پایاب، دو آزمایش شاهد تحت شرایط جت هوادهی نشده و با ثبت تغییرات لحظه‌ای عمق آبستنگی به اجرا در آمد. نتایج حاکی از آن بود که به‌طور متوسط پس از گذشت تقریباً ۳۰۰ دقیقه تغییرات عمق آبستنگی محسوس نمی‌باشد، لذا زمان آزمایش‌ها برابر پنج ساعت در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) پارامترهای وابسته به نیم‌رخ طولی حفره آبستنگی نشان داده شده‌اند.

برای تعیین رابطه‌ی میان پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره آبستنگی و یافتن تابع حاکم بر فضای نگاهت آن‌ها، از تئوری



شکل ۱- پارامترهای وابسته به نیم‌رخ طولی حفره آبستنگی

ارمعانی و همکاران: بررسی میزان آبخستگی در حوضچه استغراق ناشی از..

پارامترهای مستقل ارزیابی گردند.

نتایج و بحث

آزمایش‌ها در دو سناریوی کلی جت‌های هوادهی شده و هوادهی نشده به اجرا در آمدند. در این دو سناریو جت‌های با هوادهی و بدون هوادهی تحت شرایط سرعت جریان خروجی از نازل و عمق پایاب یکسان و همچنین مخلوط دبی آب و هوای متغیر، مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از انجام آزمایش‌ها و ترسیم پروفیل طولی بستر در حالات مختلف درصد غلظت هوای وارده به نازل، اختلاف بین حفره‌های ایجاد شده با جت هوادهی شده و هوادهی نشده به‌وضوح قابل مشاهده بود.

برای به‌دست آوردن میزان کمیت اثر هوای ورودی به جت بر میزان ابعاد حفره آبخستگی، نحوه تغییرات اعماق آبخستگی نسبی d_s/d_{s0} و طول آبخستگی نسبی L_s/L_{s0} در مقابل درصد غلظت هوای جت $C_a\%$ ، در ترسیم گردیدند (شکل‌های ۲ و ۳). در نسبت‌های بدون بعد اخیر پارامتر d_s و d_{s0} به‌ترتیب معرف عمق حفره آبخستگی ایجاد شده بر اثر هوادهی و بدون هوادهی می‌باشند که از سطح اولیه بستر سنجیده شده‌اند.

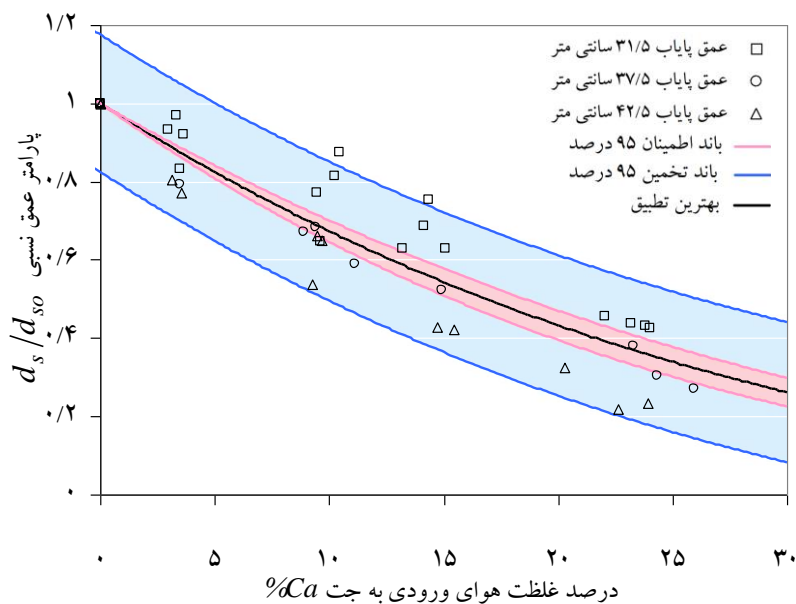
از آنجایی که جریان تحت فشار زیاد و کاملاً متلاطم با عدد رینولدز 203000 الی 400000 از نازل خارج می‌شود، لذا می‌توان از اثر عدد رینولدز چشم‌پوشی نمود. پارامتر $V_o/\sqrt{g h_{tw}}$ که از جنس عدد فرود می‌باشد، معرف میزان نیروی درگ وارده به ذرات رسوبی بوده و در ادامه تحقیق تحت عنوان عدد فرود پایاب Fr_{tw} نامیده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که محدوده تغییرات عدد فرود پایاب در طول تحقیق حاضر از $3/98$ الی $8/99$ تغییر یافته است.

در نهایت معادلات حاکم بر فضای تحقیق را می‌توان به‌صورت معادلات (۶) و (۷) نمایش داد.

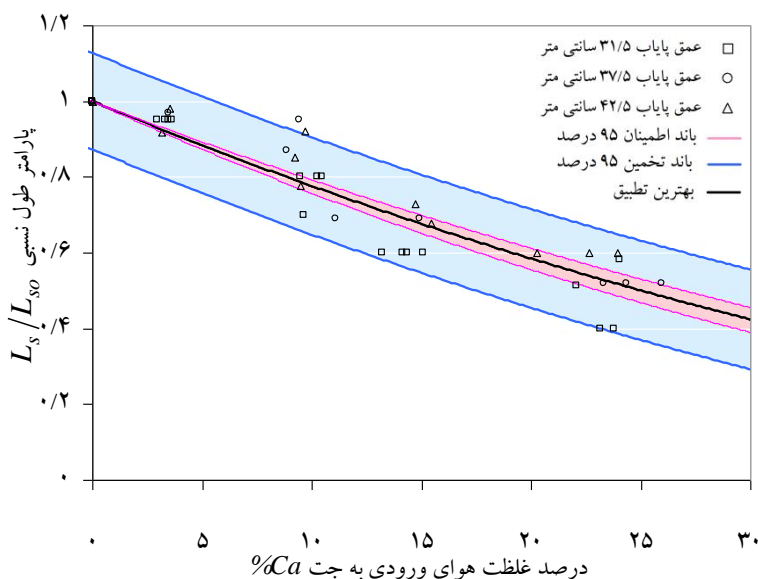
$$d_s/h_{tw} = f(Fr_{tw}, \%C_a) \quad (6)$$

$$L_s/h_{tw} = f(Fr_{tw}, \%C_a) \quad (7)$$

پس از تعیین فرم عمومی معادلات حاکم بر فضای تحقیق، با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری مقادیر میانگین خطای مطلق، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب وزن باقی‌مانده و ضریب همبستگی محاسبه خواهد شد تا با این عمل تا روند تغییر



شکل ۲- طول نسبی آبخستگی d_s/d_{s0} در مقابل درصد غلظت هوای ورودی به جت $C_a\%$ در سناریوهای مختلف عمق پایاب



شکل ۳- طول نسبی آبستگی L_s/L_{so} در مقابل درصد غلظت هوای ورودی به جت $C_a\%$ در سناریوهای مختلف عمق پایاب

جدول ۱- تجزیه و تحلیل توابع خطا روابط (۸) و (۹)

ضریب همبستگی	ضریب وزن باقیمانده	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین خطای مطلق	پارامتر
R^2	CRM	RMSE	MAE	
۰/۸۷۷	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۵۰۷	۰/۰۲۰۲	d_s/d_{so}
۰/۸۹۳	-۰/۰۰۷۷	۰/۰۳۵۹	۰/۰۱۴۶	L_s/L_{so}

نحوه برازش روابط (۸) و (۹) از بین نتایج مشاهداتی در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده‌اند.

با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و به کارگیری توابع خطای معرفی شده در بخش روش تحقیق، پارامترهای خطای حاصل از به کارگیری روابط (۸) و (۹) در جدول (۱) نشان داده شده است.

به منظور صحت‌سنجی روابط (۸) و (۹) در تخمین عمق و طول نسبی حفره آبستگی، از ۲۰ درصد باقی‌مانده داده‌های مشاهداتی که در تعیین ضرائب روابط مذکور مشارکت نداشته‌اند استفاده گردید. نتایج حاصل از این صحت‌سنجی در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. ضریب زاویه خط برازش داده شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد که روابط (۸) و (۹) با متوسط خطای ۲-٪ قادرند تا پارامترهای d_s/d_{so} و L_s/L_{so} را پیش‌بینی نمایند.

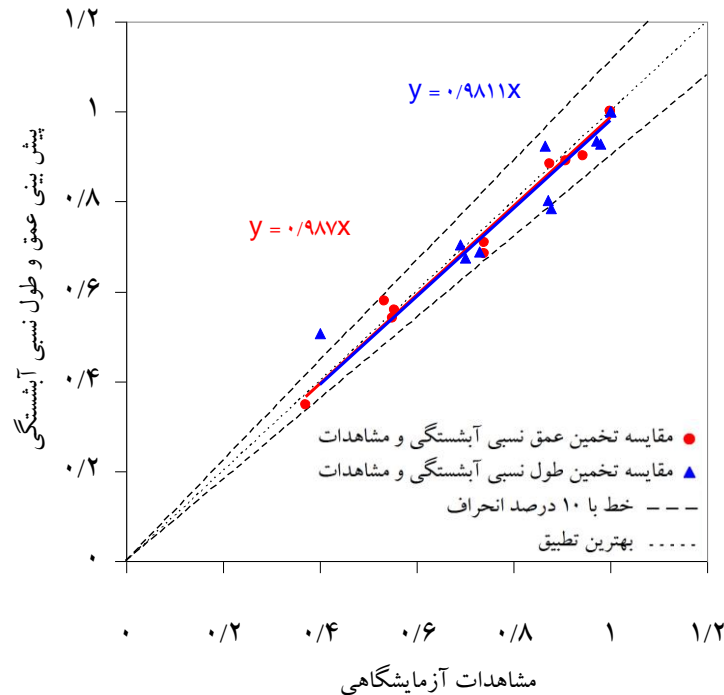
هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان تغییرات ابعاد حفره آبستگی حداکثر در مقابل عدد فرود پایاب به ازای تغییر در میزان هوای تزریق شده به جریان خروجی از نازل می‌باشد. برای این منظور داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق با توجه به سناریوهای از پیش تعیین شده ترسیم گردیدند.

برای استخراج روابط حاکم بر فضای تحقیق و بررسی چگونگی تغییر آهنگ پارامترهای d_s/d_{so} و L_s/L_{so} در مقابل $C_a\%$ ، با حفظ اثر عمق پایاب و تغییر در میزان سرعت جریان خروجی از نازل، داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. برای این منظور از ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی استفاده گردید تا امکان سنجش قابلیت اعتماد روابط معرفی شده با استفاده از ۲۰ درصد نتایج مشاهداتی باقی‌مانده میسر گردد. قابل ذکر است که داده‌های مورد استفاده در مرحله صحت‌سنجی هیچ نقشی در تعیین ضرائب معادلات معرفی شده نداشته‌اند. نتایج توسط روابط (۸) و (۹) ارائه شده‌اند.

$$d_s/d_{so} = (1 - \%C_a)^{3.758} \quad (۸)$$

$$L_s/L_{so} = (1 - \%C_a)^{2.407} \quad (۹)$$

ارمعانی و همکاران: بررسی میزان آبشستگی در حوضچه استغراق ناشی از..



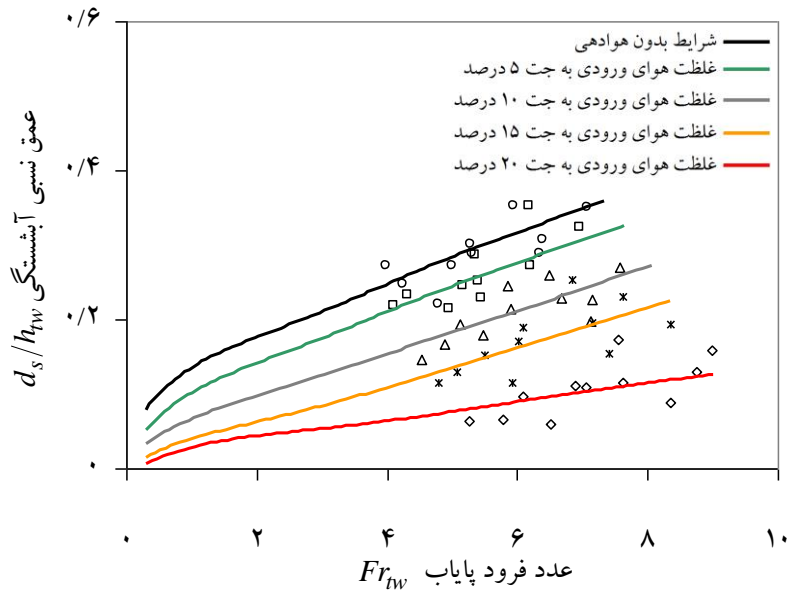
شکل ۴- صحت سنجی روابط (۸) و (۹) در تخمین پارامترهای نسبی L_s/L_{so} و d_s/d_{so}

آبشستگی L_s/h_{tw} به ازاء میزان هوای ورودی با غلظت متوسط پنج درصد، اثری مشابه حداکثر عمق نسبی آبشستگی را در پی خواهد داشت. با این تفاوت که حذف اثر میزان هوای وارده به جت در عدد فرود پایاب $8/5$ رخ خواهد داد. هم چنین شکل (۵) گویای این مطلب است که با افزایش میزان درصد غلظت هوای ورودی به جت، حداکثر عمق نسبی آبشستگی به صورت نسبی کاهش می یابد و این امر به علت متلاشی شدن مغزه جت می باشد. در یک تخمین دقیق تر می توان چنین ادعا نمود که با تزریق حدود ۲۰ درصد هوا به جت خروجی از نازل در شرایط یکسان عدد فرود پایاب، میزان حداکثر عمق نسبی آبشستگی حدود ۶۷ درصد کاهش می یابد. ارزیابی های مشابه صورت گرفته بر روی شکل (۶) گویای این مطلب است که با تزریق حدود ۲۰ درصد هوا به جت خروجی از نازل، حداکثر طول نسبی آبشستگی به طور متوسط ۵۵ درصد نسبت به شرایط مشابه جت بدون هوادهی کاهش می یابد.

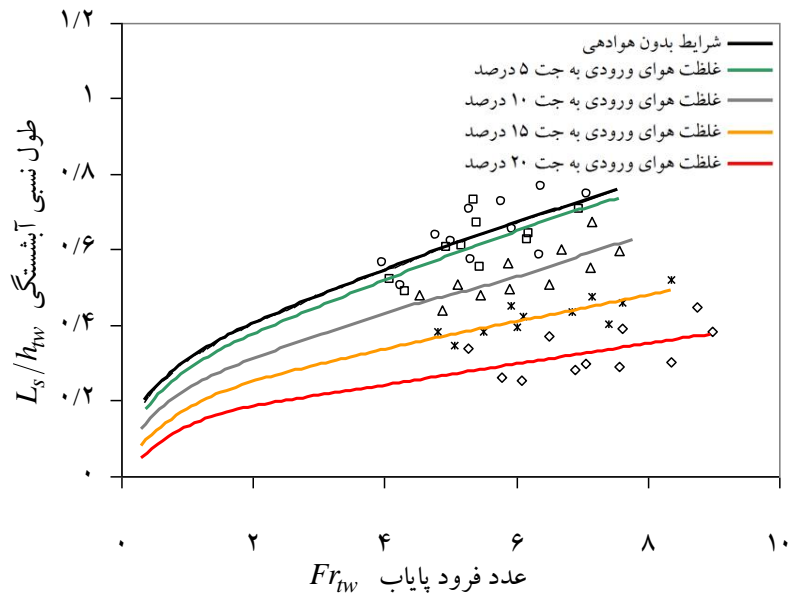
به منظور معرفی روابط عمومی حاکم بر فضای تحقیق، مطابق با نتایج حاصل از بخش آنالیز ابعادی، از نرم افزار SPSS بهره گیری شد.

شکل (۵) نحوه تغییر حداکثر عمق نسبی آبشستگی در مقابل عدد فرود پایاب را به ازاء مقادیر مختلف درصد غلظت هوای ورودی به جت نشان می دهد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که امکان برآزش منحنی های با متوسط درصد غلظت هوای ورودی صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد امکان پذیر است.

به طور مشابه نحوه تغییرات حداکثر طول نسبی آبشستگی در مقابل تغییرات عدد فرود پایاب و میزان هوای وارده به جت، مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است. از تحلیل شکل (۵) می توان دریافت که به ازای عدد فرود پایاب بزرگتر از ۹ و تحت شرایط عمق پایاب یکسان چنانچه میزان هوای وارده به جت کمتر از پنج درصد باشد، میزان هوای وارده به جت بر عمق حفره آبشستگی بی تأثیر خواهد بود. این موضوع بدین معنی است که به ازاء عدد فرود پایاب بزرگتر از ۹ میزان هوای وارده با غلظت متوسط پنج درصد، اثری بر حداکثر عمق نسبی آبشستگی نخواهد داشت و مغزه جت با این میزان هوا در شرایط هیدرولیکی یاد شده متلاشی نشده و با برخورد به سطح بستر مصالح باعث فراهم آوردن شرایط آبشستگی مشابه شرایط بدون ورود هوا به نازل می باشد. ارزیابی های صورت گرفته روی حداکثر طول نسبی



شکل ۵- تغییرات حداکثر عمق نسبی آبشستگی d_s/h_{fw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{fw} به ازاء تغییر در میزان درصد غلظت هوای وارده به جت C_a %



شکل ۶- تغییرات حداکثر طول نسبی آبشستگی L_s/h_{fw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{fw} به ازاء تغییر در میزان درصد غلظت هوای وارده به جت C_a %

شده قائم مورد مطالعه قرار گرفته باشد، یافت نگردید. لذا تعیین روابط حاکم بر فضای تحقیق با استفاده از ۸۰ درصد داده‌های مشاهداتی در همین تحقیق تعیین گردید تا امکان صحت‌سنجی روابط معرفی شده با ۲۰ درصد داده‌های باقی‌مانده میسر باشد. معادلات (۱۰) و (۱۱) معرف روابط عمومی حاکم بر فضای تحقیق

به منظور حصول اطمینان از عملکرد روابط پیشنهادی لازم است تا نتایج حاصل از تخمین این روابط با نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی محققین دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد. بر اساس جستجوی به عمل آمده در مراجع معتبر علمی، مطالعات مشابهی که در آن وضعیت گسترش حفره آبشستگی تحت اثر جت‌های هوادهی

ارمغانی و همکاران: بررسی میزان آبستگي در حوضچه استغراق ناشی از..

می‌باشند.

$$d_s/h_{tw} = 0.0719 (1 - \%C_a)^{4.51} Fr_{tw}^{0.8446} \quad (10)$$

$$L_s/h_{tw} = 0.2934 (1 - \%C_a)^{3.1112} Fr_{tw}^{0.4866} \quad (11)$$

روابط (۱۰) و (۱۱) در محدوده عدد فرود پایاب $4 < Fr_{tw} < 9$ و درصد غلظت هوای $0 < \%C_a < 26$ معتبر است.

به منظور ارزیابی دقت روابط (۱۰) و (۱۱) از توابع میانگین خطای مطلق، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب وزن باقی‌مانده و ضریب همبستگی استفاده گردید. نتایج در جدول (۲) خلاصه

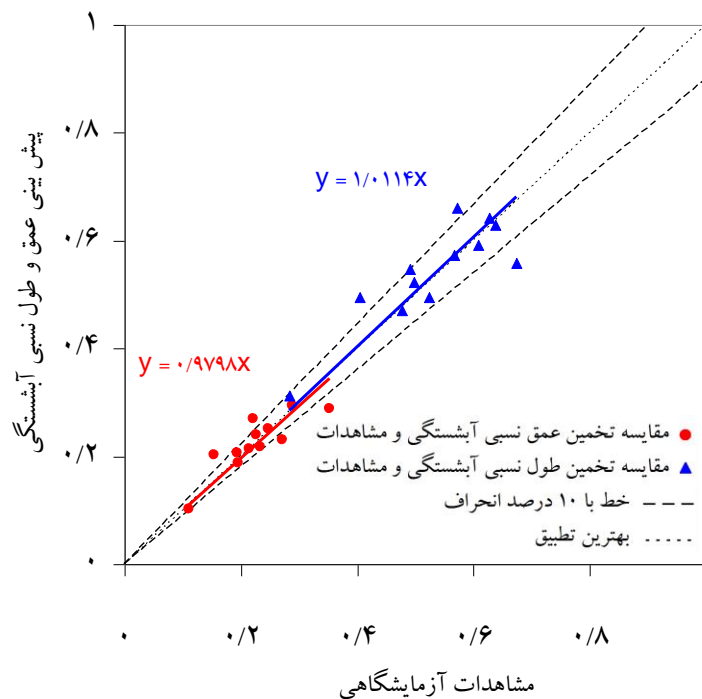
شده‌اند.

در این مرحله از تحقیق با استفاده از ۲۰ درصد داده‌های مشاهده‌ای که نقشی در تعیین ضرائب روابط (۱۰) و (۱۱) نداشتند، نسبت به صحت‌سنجی روابط مذکور اقدام گردید. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر مشاهده‌ای پارامترهای d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط (۱۰) و (۱۱) در شکل (۷) نمایش داده شده‌اند.

ضریب زاویه خطوط برازش شده در شکل (۷) نشان می‌دهد که روابط عمومی معرفی شده قادرند تا پارامترهای نسبی d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} به ترتیب به‌طور متوسط با دقت -0.02 درصد و $+0.11$ درصد تخمین بزنند.

جدول ۲- تجزیه و تحلیل توابع خطا روابط (۱۰) و (۱۱)

ضریب همبستگی	ضریب وزن باقیمانده	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین خطای مطلق	پارامتر
R^2	CRM	RMSE	MAE	
۰/۸۶۱	-۰/۰۰۲۹	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۷۸	d_s/h_{tw}
۰/۸۶۹	-۰/۰۰۰۲	۰/۰۲۳۶	۰/۰۱۱۱	L_s/h_{tw}



شکل ۷- صحت‌سنجی روابط (۱۰) و (۱۱) در تخمین پارامترهای نسبی d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw}

درصد غلظت هوای وارده به جت، آهنگ تغییرات پارامتر L_s/h_{TW} روند نزولی را در پیش می‌گیرد.

هم‌چنین می‌توان دریافت که به ازاء اعداد فرود پایاب L_s/h_{TW} بزرگتر از ۸/۴۵، میزان درصد غلظت هوای ورودی به نازل کوچکتر از پنج درصد، تأثیری بر حداکثر عمق و طول نسبی حفره آبستگي نخواهد داشت. به ازاء متوسط مقادیر ۱۰ الی ۲۵ درصد با افزایش هر یک درصد هوای وارده به جت بطور متوسط ۴/۳۸ درصد از حداکثر عمق نسبی آبستگي کاسته خواهد شد. به‌طور مشابه به ازاء افزایش میزان درصد غلظت هوای ورودی به جت در محدوده مورد اشاره به‌طور متوسط ۳/۱۷ درصد از حداکثر طول نسبی حفره آبستگي کم می‌شود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که روابط معرفی شده در تحقیق حاضر برای تخمین حداکثر عمق نسبی حفره آبستگي d_s/d_{SO} و حداکثر طول نسبی حفره آبستگي L_s/L_{SO} قادرند تا بطور متوسط با خطای ۰/۰۲- درصد و ۰/۱۱+ درصد پارامترهای d_s/d_{SO} و L_s/L_{SO} را پیش‌بینی نمایند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله نگارندگان از دانشگاه صنعتی جندی شاپور به پاس فراهم آوردن امکان استفاده از آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی و مهندسی رودخانه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

همان‌طوری که از شرایط هیدرولیکی و فرضیات حاکم بر تحقیق مشهود است با افزایش عمق پایاب میزان عمق آبستگي کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش عدد فرود پایاب، میزان حداکثر عمق نسبی آبستگي نیز افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر با افزایش میزان هوای وارده به جت به ازاء اعداد فرود پایاب یکسان، میزان حداکثر عمق نسبی آبستگي روند کاهشی به خود می‌گیرد. این روند تا جایی پیش خواهد رفت که مغزه جت در اثر ورود هوا به آن کاملاً متلاشی شده و جت ورودی به حوضچه استغراق دیگر بیش از آن میزان حدی، قادر به فرسایش بستر نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

از بررسی روند تغییرات حداکثر عمق نسبی آبستگي d_s/h_{TW} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{TW} ناشی از جت‌های قائم پیش‌روادهی شده در حوضچه استغراق ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد غلظت هوای وارده به جت، میزان حداکثر عمق و طول نسبی حفره آبستگي کاهش می‌یابد.

همچنین می‌توان دریافت که به ازاء اعداد فرود پایاب Fr_{TW} بزرگتر از ۸/۷۸، متوسط میزان هوای ورودی به نازل با غلظتی کوچکتر از پنج درصد تأثیری بر پارامتر d_s/h_{TW} نخواهد داشت.

از بررسی روند تغییرات حداکثر طول نسبی آبستگي L_s/h_{TW} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{TW} ناشی از جت‌های پیش‌روادهی شده در حوضچه استغراق ملاحظه می‌گردد که با افزایش

منابع

- 1- Armaghani, A., 2013. Experimental Study of the effect of pre-aerated jet on plunge pool scour depth. Master's thesis. Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran (In Persian).
- 2- Bin, A.K., 1984, September. Air entrainment by plunging liquid jets. In Proceedings of the IAHR Symposium on scale effects in modeling hydraulic structures (pp. 5-5).
- 3- 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), pp.1043-1048.
- 4- Bormann, N.E. and Julien, P.Y., 1991. Scour downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5), pp.579-594.
- 5- Canepa, S. and Hager, W.H., 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. *Journal of hydraulic engineering*, 129(5), pp.358-365.
- 6- Clarke, F.R.W., 1962. *The action of submerged jets on moveable material* (Doctoral dissertation, Imperial College London (University of London)).
- 7- Duarte, R., Schleiss, A.J. and Pinheiro, A., 2015. Influence of jet aeration on pressures around a block embedded in a plunge pool bottom. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(3), pp.673-693.
- 8- Ervine, D.A., 1976. The entrainment of air in water. *International Water Power and Dam Construction*, 28(12), pp.27-30.

- 9- Mason, P.J., 1989. Effects of air entrainment on plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(3), pp.385-399.
- 10- Manso, P.E.D.R.O., Bollaert, E.F.R. and Schleiss, A.J., 2004, November. Influence of rock scour geometry on dynamic pressures due to jet impact. In *2nd Int. Conf. on Scour and Erosion* (pp. 14-17).
- 11- Robinson, K.M., 1989. Stress distribution at an overfall. *Transactions of the ASAE*, 32(1), pp.75-0080.
- 12- Rouse, H., 1940. Criteria for Similarity in the Transportation of Sediment. *University of Iowa Studies in Engineering*, 20, pp.33-49.
- 13- Xu, W., Deng, J., Qu, J., Liu, S. and Wang, W., 2004. Experimental investigation on influence of aeration on plane jet scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(2), pp.160-164.
- 14- Van de Sande, E., 1981. *Air entrainment by plunging water jets* (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).

EXTENDED ABSTRACT**Investigating the Scouring Rate in Plunge Pools Resulting from Impinging Jets With and Without Aeration**A. Armaghani¹, B. Lashkar-Ara^{2*} and A.M. Akhond-Ali³

- 1- M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
- 2* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. (*Lashkarara@jsu.ac.ir*).
- 3- Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 12 June 2016

Accepted: 1 November 2016

Keywords: Scour, Pre-aeration, Tail water, Mixing, Energy dissipater, spillway.**Introduction**

draining the flood of enormous dams and transmitting the procedure to the downstream is one of the important issues regarding hydraulic structures. Plunge pools are the main structures to dissipate the high rate of energy. The amount of energy at an outlet jet depends on various parameters such as the dropping height, the thickness of the jet, and other environmental conditions. Local erosion in plunge pools with alluvial beds is a complex phenomenon and determining the geometric features of the scour hole is really difficult. The outlet flow mixes with the turbulence factor and hits the bed of the plunge pools with a semi-perpendicular condition. Therefore, the present study was conducted to determine the scour which was caused by inlet air along the middle water jet on the bottom of the plunge pools. Xu et al. (2004) tested the aeration effects on the scouring caused by the falling jet and obtained a small relationship between the percentage of air jet density and the relative scour depth. The results informed that aeration affects the shape of the scour hole and essentially reduces the scour depth. Manso et al. (2004) investigated the interaction of the geometric shape of the submerged pond with rocky bedding on the rate of diffusion of the falling jet. They tested various diameters of jets, 5.5, 11 and 16.5 times the diameter of falling jet, on the smooth and rough beds to investigate the dynamic pressures with frequencies between 1 to 2 KHZ. Their findings showed that the geometric shape of the pond has a direct impact on the jet diffusion rate. Duarte et al. (2015) studied the effects of air inlet to jet on the dynamical pressure on the floor of the submerged pond. They increased the jet's velocity to 22 m/s. The final results showed that the air inlet to the jet led to a decline in the total pressure on the floor of the pond.

Research Methodology

The experiments were carried out using a rectangular laboratory flume at the Hydraulics Laboratory of Jundi Shapur University of Technology. The rectangular flume was 2m long, 1m wide and 1m deep; it was designed to inject air into the water jet with several handles to control the water surface level at the downstream zone. The water was supplied through a 4-inch pipeline with a circular section to a handle with a diameter of 25 mm. The spray system was designed in way to let the air mix with the water before the water flow gets out of the nozzle. The air and water discharges were measured by a venture tube connected to a Differential transducer and an electromagnetic meter from Iran Madar Co., respectively. The sediments used

in this study were alluvial non-cohesive bedding material in which the particles were settled in the space between two sieves numbered one second and three eighth inches. Particle density was determined at 2650 kg / m³ and the depth of the downstream water level was changed in three different scenarios, i.e., 0.325, 0.385, 435.0 m, respectively. In addition, the water discharge increased from 0 to 1.91 lit/sec and it resulted in the percentage of air entering density into the nozzle from zero to 26 percent.

The final results of the aerated and non-aerated experiments showed that after about 300 minutes, the changes in the scour depth were not noticeable. Therefore, the entire time for any experiment was considered to be about 5 hours. Figure (1) shows the parameters related to the longitudinal profile of the scour hole. Equations (1, 2) resulted from the dimensional analysis to recognize the relation between the dependent and independent parameters of the current research.

$$d_s / h_{tw} = f (V_o / \sqrt{g h_{tw}}, \rho_w V_o h_{tw} / \mu, \%C_a) \quad (1)$$

$$L_s / h_{tw} = f (V_o / \sqrt{g h_{tw}}, \rho_w V_o h_{tw} / \mu, \%C_a) \quad (2)$$

where d_s and L_s are depth and scour length, h_{tw} is downstream depth, V_o is the mean speed of the mixture flow of the outlet from the nozzle, B is the tank width, g is the gravity acceleration, μ is the flow viscosity, ρ_w is the density of water and C_a is the discharge percentage of inlet air which was determined by $C_a = (Q_{air} / Q_w + Q_{air}) \times 100$. The outlet flow is very turbulent with a Reynolds number of 203,000 to 400,000. Therefore, the effect of Reynolds number has been neglected.

Results

The experiments were conducted in two general scenarios of aerated and non-aerated jets. Aerated and non-aerated jets were tested under several operating conditions. In the final longitudinal profiles of the bed under different states of air density to the nozzle, the difference between aerated and non-aerated jets was clearly visible. Figs. (1) and (2) show the depth and relative length of scouring against the landing number for the change in air flow rate into the jet.

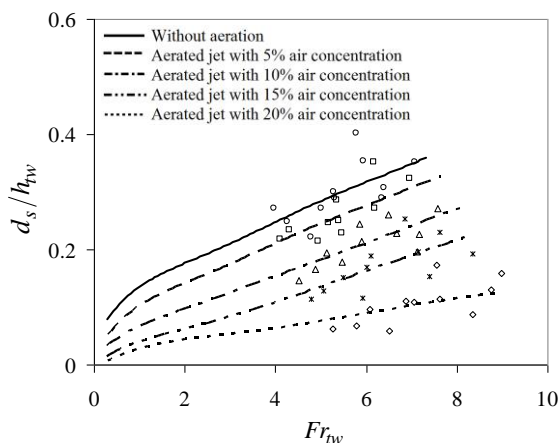


Figure 1- Changes in maximum depth of scour d_s/h_{tw} against downstream Froude Number Due to changes in the percentage of airborne density entering the jet C_a %

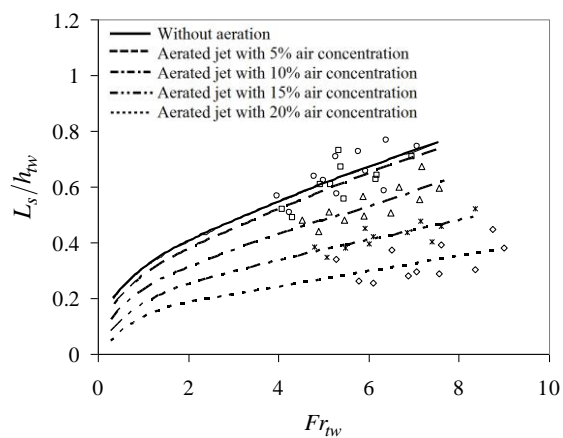


Figure 2- Changes in maximum relative length of scour L_s/h_{tw} against downstream Froude Number Due to changes in the percentage of airborne density entering the jet C_a %

It can be seen from the analysis of Figure (1) that for a Froude number greater than 9, under the same depth conditions, if the amount of air entering the jet is less than 5%, the amount of air entrained on the depth of the scour hole will be ineffective. This means that for a Froude number greater than 9, the amount of air incoming with the average density of 5% will have no effect on the maximum depth of the scour. At the mentioned situation, the jet core does not collapse and when it hits the bed surface, it creates conditions for scouring the same as in the non-aerated condition. Estimates on the maximum relative scour lengths for intake air with a mean density of 5% will have the same effect as the maximum scour depth with the only difference that the effect of the airborne deviation on the jet will occur at the Froude number of 8.5. To conclude, by injecting about 20% of the air into the outlet jet from the nozzle at the same downstream conditions, the maximum scour depth will be about 67% and the maximum relative length of scouring will be reduced as much as 55% .

Conclusion

According to the final results and figures, increasing the percentage of airborne density in the water-jet will reduce the maximum depth and the relative length of the scour hole. Moreover, for downstream Froude numbers greater than 8.78, the average amount of air entering the nozzle with a density of less than 5% will not have any effect on the value of d_s/h_{tw} .

Reference

- 1- Duarte, R., Schleiss, A.J. and A., Pinheiro. 2015. Influence of jet aeration on pressures around a block embedded in a plunge pool bottom. *Environmental Fluid Mechanics*. 15(3):673-693.
- 2- Manso, P., Bollaert, E., and A., Schleiss. 2004. Influence of Rock Scour Geometry on Dynamic Pressures due to Jet Impact. 2nd International Conference on Scour and Erosion. Singapore.
- 3- Xu, W., Deng, J., Qu, J., Liu, S., and W. Wang, 2004. Experimental Investigation on Influence of Aeration on Plane Jet Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (2), 160–164.