

بررسی آزمایشگاهی اثر هوادهی به جت‌های قائم بر ابعاد حفره‌ی آبستگی*

بابک لشکرآرا^(۱) علی لشکرآرا^(۲) منوچهر فتحی مقدم^(۳)

چکیده عموماً مطالعات پیرامون آبستگی توسط مدل‌های فیزیکی انجام می‌شود. تحقیقات نشان داده‌است که میزان هوای ورودی به جت خروجی از سرریزها در مدل کمتر از اصل است. لذا تأثیر هوادهی بر حفره‌ی آبستگی نیازمند مطالعه می‌باشد. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی نظیر میزان اختلاط هوا و عمق پایاب بر ابعاد حفره‌ی آبستگی ناشی از جت‌های قائم مستغرق پرداخته شده است. حفره‌ی آبستگی که تحت شرایط هوادهی و بدون هوادهی ایجاد شده، تحت شرایط هیدرولیکی یکسان از قبیل سرعت جت و عمق پایاب مورد مقایسه قرار گرفته است. پروفیل حفره‌ی آبستگی تحت شرایط یکسان قطر ذرات مصالح بستر و عمق پایاب اساساً به عمق آبستگی وابسته است. تحقیق حاضر نشان داد که غلظت هوا در میزان ابعاد حفره آبستگی مؤثر است و عمق آبستگی را کاهش می‌دهد. از بررسی روند تغییرات حداکثر عمق و طول نسبی آبستگی d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} ناشی از جت‌های قائم پیش هوادهی شده در حوضچه‌ی استغراق ملاحظه گردید که با افزایش غلظت هوای وارد به جت، میزان حداکثر عمق و طول نسبی حفره‌ی آبستگی کاهش می‌یابد. این میزان تغییرات در ابعاد حفره‌ی آبستگی دارای آستانه‌ی حدی می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که به ازای اعداد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۸/۷۸، در صورتی که میزان غلظت هوای وارد به جت کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد باشد، تأثیری بر میزان حداکثر عمق نسبی حفره‌ی آبستگی مشاهده نمی‌گردد. هم‌چنین به ازای عدد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۸/۴۵، چنانچه میزان غلظت هوای وارد به جت کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد باشد اثری بر حداکثر طول نسبی حفره‌ی آبستگی مشاهده نمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی: جت پیش هوادهی، نازل، آبستگی، عدد فرود پایاب.

Experimental Investigation of the Effect of Air Entrained on the Vertical Jet Scour Hole

B. Lashkar-Ara A. Lashkar-Ara M. Fathi Moghadam

Abstract Many experimental studies have been conducted on development of the scour hole as a result of vertical jet impaction. Research has shown that aeration of the nappe flow in the model is much weaker than that in the prototype. Therefore, the influence of aeration on scour holes needs further study. Experimental investigation of the effects of air entrainment and tail water depth on the scour hole developed by a vertical submerged jet impaction is carried out in this study. The scour holes with and without air entraining conditions were investigated while hydraulic parameters like jet velocity and tail-water depth were kept constant. The results showed that air entrainment effectively reduces the scour depth and dimension. Variation of maximum relative depth and length of scouring i.e. d_s/h_{tw} and L_s/h_{tw} versus tail-water Froude number parameter, i.e. Fr_{tw} were analyzed. By increasing the air concentration, maximum relative depth and length of scour hole reduced. The changes in scour hole dimension has a threshold. Results indicated that for Fr_{tw} more than 8.78, no meaningful effect on maximum scour hole depth (d_s/h_{tw}) and length (L_s/h_{tw}) was seen for air concentration of less than 3.25 percent.

Keywords pre-air entrained jet, nozzle, scour, tail-water Froude number.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۶ می باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

(۳) استاد، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

مقدمه

چگونگی تخلیه‌ی سیلاب سدهای بزرگ و نحوه‌ی انتقال آب به دره‌ی پایین دست و نیز استهلاک انرژی در برخی از سازه‌های پایانی از اهمیت بسیاری برخوردار است. یکی از این سازه‌های پایانی در جهت استهلاک انرژی، حوضچه‌ی استغراق می‌باشد. به‌طور کلی فرآیند استهلاک انرژی در حوضچه‌ی استغراق از طریق تلاطم رخ می‌دهد. میزان انرژی جت آب خروجی از سدهای بزرگ که به حوضچه‌ی استغراق برخورد می‌نماید به پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع ریزش، ضخامت جریان جت و هم‌چنین شرایط محیطی بستگی دارد. مطالعه‌ی رفتار جت آب در اتمسفر و حوضچه‌ی استغراق به مشخصه‌ی جریان جت از جمله تجزیه، فرآیند هواگیری و نحوه‌ی پخش جت، تأثیر نیروی کشش سطحی و انرژی جنبشی در تجزیه‌ی جت، عمق پایاب و پتانسیل فرسایش مصالح بستر بستگی دارد. آبستگی ناشی از برخورد جت با بستر فرسایش‌پذیر را می‌توان با توجه به نوع جت به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی نمود. در این میان می‌توان به آبستگی 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 تقسیم‌بندی نمود.

فرسایش موضعی کف حوضچه‌های استغراق با بستر آبرفتی، پدیده‌ای پیچیده است و تخمین مشخصات هندسی حفره‌ی آبستگی ایجاد شده دشوار است. تحقیقات نشان داده است که پس از اصابت جت با سطح بستر، بخشی از رسوبات معلق می‌شود 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 ته‌نشین شده‌ی درون حفره ادامه می‌یابد تا حفره شکل پایدار و

نهایی خود را پیدا نماید.

از آنجایی که جریان خروجی از سرریز سدهای بلند در طی مسیر به واسطه‌ی اغتشاش جت با هوای اطراف مخلوط می‌شود و سپس با زاویه‌ای تقریباً قائم به سطح حوضچه‌ی 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 حفره‌ی آبستگی نیازمند مطالعه می‌باشد.

تحقیقات وسیعی توسط محققان مختلف برای تعیین مشخصات آبستگی موضعی حول سازه‌های هیدرولیکی انجام گرفته است و در اکثر موارد نتایج به صورت معادلات تجربی ارائه شده است. راس (۱۹۴۰) تغییرات ابعاد حفره‌ی آبستگی با گذشت زمان از شروع تا تعادل نهایی را بررسی نمود. بورمن و ژولین (۱۹۹۱) با بررسی جت وارد به حفره‌ی آبستگی معادلاتی برای ابعاد حفره‌ی فرسایشی ارائه نمودند. رابینسون و همکاران (۱۹۹۸) به بررسی پیچیدگی‌های تنش برشی جریان درون حفره‌ی آبستگی پرداخته‌اند. مطالعات انجام شده توسط کلارک (۱۹۶۲) 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 [1].

میسون (۱۹۸۹) با جمع‌آوری روابط تجربی محققان پیشین دریافت که درصد هوای وارد به جت می‌تواند بر عمق حفره‌ی آبستگی مؤثر باشد. میسون با ارائه‌ی رابطه‌ی (۱) توانست میزان عمق آبستگی را با احتساب هوای وارد به جت تخمین بزند.

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

که در آن d_s عمق آبستگی؛ q دبی در واحد عرض، h_{tw} عمق پایاب، g شتاب ثقل، D اندازه‌ی

طرفی تحقیقات نشان داد که غلظت هوای وارد به جت‌های پیش‌هواده‌ی شده به‌ازای مقادیر بیشتر از ۲۵ درصد اثری بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی نخواهد داشت [8].

هدف از انجام این تحقیق معرفی رابطه‌ی عمومی برای تخمین ابعاد حفره‌ی آبشستگی، تحت اثر جت‌های قائم پیش‌هواده‌ی شده می‌باشد.

روش تحقیق

به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان عمق پایاب و میزان هوای وارد به جت قائم بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی در حوضچه‌ی استغراق، ساخت یک مدل فیزیکی مناسب در دستور کار تحقیق قرار گرفت. مدل فیزیکی مورد نظر از قابلیت تزریق هوا به جت، تغییر مکان نازل و تغییر در میزان عمق پایاب برخوردار است.

به‌منظور شبیه‌سازی حوضچه‌ی استغراق از یک مخزن با طول ۲ متر، عرض ۱ متر و عمق یک متر استفاده گردید. شکل (۱) سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. جریان آب از طریق یک لوله با قطر ۴ اینچ با مقطع دایره‌ای به‌سمت نازل با قطر ۲۵ میلی‌متر انتقال می‌یابد. سیستم افشانک به‌گونه‌ای طراحی گردیده‌است 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 لوله‌ی ونتوری که مجهز به یک ترانسدیوسر تفاضلی است اندازه‌گیری گردید. دبی آب به‌وسیله‌ی یک کنتور الکترومغناطیس با دقت مضاعف اندازه‌گیری شد.

به‌منظور شبیه‌سازی شرایط یک جت‌های قائم، زاویه‌ی ارابه‌ی نازل در حالت ۹۰ درجه تنظیم گردید. رسوبات مورد استفاده شامل مصالح آبرفتی رودخانه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت $\sigma = 1/26$ و با D_{50} معادل ۱۱/۱ میلی‌متر می‌باشد. چگالی ذرات رسوب معادل ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. عمق پایاب در

متوسط مواد بستر و β نسبت هوا به آب می‌باشد که توسط اروین (۱۹۷۶) پیشنهاد شده است [2]. در رابطه‌ی (۱) β به عنوان فاکتوری برای تعریف فرآیند آبشستگی جایگزین H ارتفاع سقوط جت شده است و از رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود.

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

که در آن t ضخامت جت به‌هنگام برخورد با حوضچه‌ی استغراق، v سرعت برخورد جت و v_e حداقل سرعت مورد نیاز جت برای ورود هوا می‌باشد. براساس مطالعات بین (۱۹۸۴) و وان د ساندر (۱۹۸۱) رابطه‌ی (۲) مناسب جت‌های دایره‌ای نیست و بیشتر در جت‌های تیغه‌ای و مستطیلی کاربرد دارد [۳ و ۴]. اروین (۱۹۷۶) در تحقیقات خود مقدار v_e در رابطه‌ی (۲) را معادل ۱/۱ متر بر ثانیه توصیه نمود.

بورر و همکاران (۱۹۹۸) روند کاهش 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 [5]. کانپا و هگر در سال (۲۰۰۳)، تأثیر برهم‌کنش آب و هوا بر روی آبشستگی را مطالعه کردند و نشان دادند که با هواده‌ی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد [6].

زو و همکاران (۲۰۰۴) اثرات هواده‌ی بر روی آبشستگی ناشی از جت ریزشی را مورد آزمایش قرار دادند و یک رابطه‌ی کمی بین غلظت هوای جت و عمق آبشستگی نسبی به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که هواده‌ی روی شکل حفره‌ی آبشستگی اثر می‌گذارد و اساساً عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد [7].

ارمغانی (۱۳۹۲) با تغییر در زاویه‌ی جت از ۴۵ الی ۷۵ درجه و با تغییر در میزان هوای وارد به جت از صفر تا ۲۵ درصد نسبت به تحلیل تغییرات حفره‌ی آبشستگی اقدام نمود. وی نشان داد که با کم شدن زاویه‌ی جت ابعاد حفره‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد. از

وزن مخصوص آب، ρ_s وزن مخصوص ذرات رسوب در نظر گرفته شدند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$f(Q_w, Q_a, d_n, V_o, B, h_{tw}, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s) = 0 \quad (3)$$

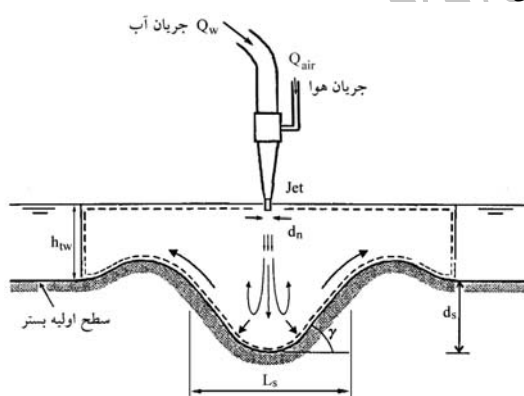
با استفاده از تئوری باکینگهام π و با در نظر گرفتن پارامترهای ρ, g, h به عنوان متغیرهای تکراری، و حذف پارامترهای ثابت هم‌چون قطر ذرات رسوب D_{50} ، قطر نازل d_n ، عرض مخزن B و وزن مخصوص ذرات رسوبی ρ_s ، معادلات بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی ناشی از جت در حوضچه‌ی استغراق را می‌توان به صورت روابط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

$$d_s/h_{tw} = f(V_o/\sqrt{g h_{tw}}, \rho_w V_o h_{tw}/\mu, C_a) \quad (4)$$

$$L_s/h_{tw} = f(V_o/\sqrt{g h_{tw}}, \rho_w V_o h_{tw}/\mu, C_a) \quad (5)$$

پارامتر C_a معرف غلظت هوای وارد به جت می‌باشد و از رابطه‌ی $C_a = (Q_{air}/Q_w + Q_{air}) \times 100$ تقریب زده می‌شود.

پارامترهای اول و دوم ظاهر شده در معادلات (۴) و (۵) به ترتیب معرف اعداد فرود و رینولدز می‌باشند.



شکل ۱ پارامترهای وابسته به نیم‌رخ طولی حفره‌ی آبشستگی

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

سه سناریوی مختلف به ترتیب برابر $0/325$ ، $0/385$ ، $0/435$ متر تغییر نمود. دبی آب خروجی از نازل از $3/95$ الی $6/12$ لیتر بر ثانیه تغییر یافت. دبی هوا نیز از صفر تا $1/91$ لیتر بر ثانیه نمود که این امر منجر به تجربه‌ی غلظت هوای ورودی به نازل از صفر تا 26 درصد گردید. دماغه‌ی نازل حدود یک سانتی‌متر مستغرق گردید تا با این عمل از ورود هوای اطراف به جت جریان جلوگیری گردد. زیرا امکان اندازه‌گیری هوای وارد 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.

به منظور 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 آبشستگی به اجرا درآمد. نتایج حاکی از آن بود که به‌طور متوسط پس از گذشت تقریباً 300 دقیقه تغییرات عمق آبشستگی محسوس نمی‌باشد، لذا زمان آزمایش‌ها برابر 5 ساعت در نظر گرفته شده‌است. پس از سپری شدن زمان مذکور در هر یک از آزمایش‌ها و خروج جریان آب از حوضچه‌ی استغراق، پروفیل آبشستگی تشکیل شده با استفاده از یک دستگاه متر لیزری مدل Leica Disto D8 برداشت گردید و سپس با استفاده از پروفیل مربوط مشخصات چاله‌ی آبشستگی استخراج شد. در شکل (۱) پارامترهای وابسته به نیم‌رخ طولی حفره‌ی آبشستگی نشان داده شده‌اند.

جهت تعیین رابطه‌ی میان پارامترهای مؤثر بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی و یافتن تابع حاکم بر فضای نگاشت آنها، از تئوری باکینگهام π استفاده گردید. برای این منظور ابعاد حفره‌ی آبشستگی (d_s, L_s) به عنوان 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

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 غلظت هوای وارد 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 حفره‌ی آبشستگی، نحوه‌ی تغییرات اعماق آبشستگی نسبی d_s/d_{s0} و طول آبشستگی نسبی L_s/L_{s0} در مقابل غلظت هوای جت C_a ، ترسیم گردیدند (شکل‌های ۲ و ۳). در نسبت‌های بدون بعد اخیر پارامتر d_s و d_{s0} به‌ترتیب معرف عمق حفره‌ی آبشستگی ایجادشده بر اثر هوادهی و بدون هوادهی می‌باشند که از سطح اولیه‌ی بستر سنجیده شده‌اند.

برای استخراج روابط حاکم بر فضای تحقیق و بررسی چگونگی تغییر آهنگ پارامترهای d_s/d_{s0} و L_s/L_{s0} 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 مرحله‌ی صحت‌سنجی هیچ نقشی در تعیین ضرایب معادلات معرفی شده نداشته‌اند.

چشم‌پوشی نمود. پارامتر $V_o/\sqrt{gh_{tw}}$ که از جنس عدد فرود می‌باشد، معرف میزان نیروی درگ وارد به ذرات رسوبی است و در ادامه‌ی تحقیق تحت عنوان عدد فرود پایاب Fr_{tw} نامیده شده‌است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که محدوده‌ی تغییرات عدد فرود پایاب در طول تحقیق حاضر از ۳/۹۸ الی ۸/۹۹ تغییر یافته‌است.

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، لازم است تا روند تغییر پارامترهای مستقل ارزیابی گردند. برای این منظور لازم است تا تجزیه و تحلیل آماری صورت پذیرد. توابع خطای مهمی که به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از معادلات پیشنهادی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند به‌شرح زیر می‌باشند.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

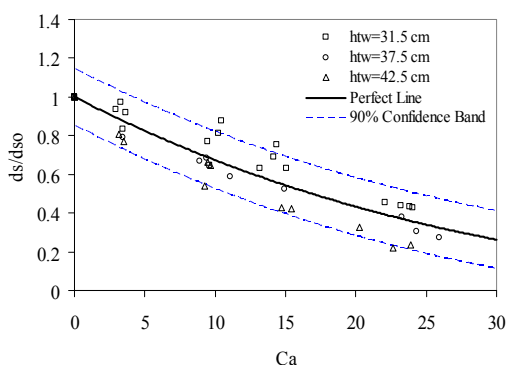
ضریب وزن باقی مانده

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (10)$$

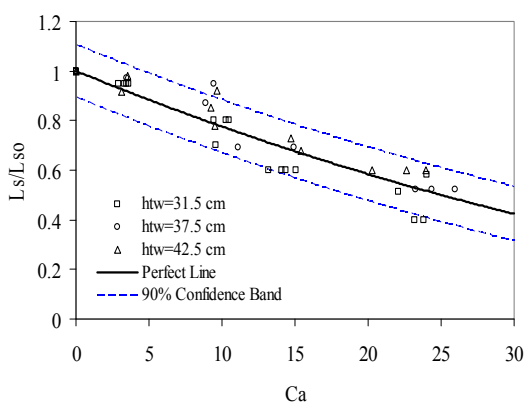
ضریب هم‌بستگی

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

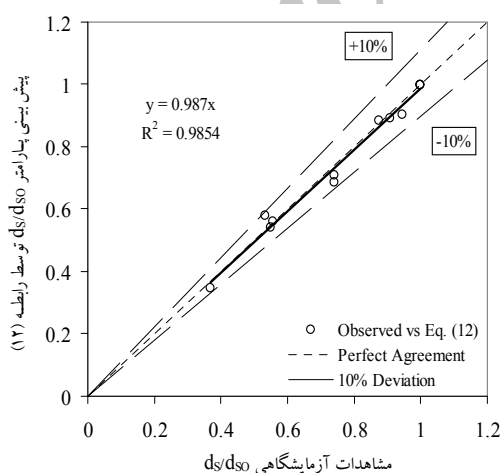
که در این روابط O نشانگر پارامتر مشاهده شده، P نشانگر پارامتر پیش‌بینی شده و \bar{O} متوسط پارامترهای مشاهداتی و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۲ طول نسبی آبشستگی d_s/d_{s0} در مقابل غلظت هوای ورودی به جت C_a در سناریوهای مختلف عمق پایاب



شکل ۳ طول نسبی آبشستگی L_s/L_{s0} در مقابل غلظت هوای ورودی به جت C_a در سناریوهای مختلف عمق پایاب



شکل ۴ صحت‌سنجی معادله‌ی (۱۲) در تخمین d_s/d_{s0}

نتایج توسط روابط (۱۲) و (۱۳) ارائه شده‌اند.

$$d_s/d_{s0} = \left(1 - C_a/100\right)^{3.758} \quad (12)$$

$$L_s/L_{s0} = \left(1 - C_a/100\right)^{2.407} \quad (13)$$

نوعی برازش روابط (۱۲) و (۱۳) از بین نتایج مشاهداتی در شکل‌های (۳ و ۲) نمایش داده شده‌اند. با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و به‌کارگیری توابع خطای معرفی‌شده در بخش روش تحقیق، پارامترهای خطای حاصل از به‌کارگیری روابط (۱۲) و (۱۳) در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

جدول ۱ تحلیل آماری خطای روابط (۱۲) و (۱۳)

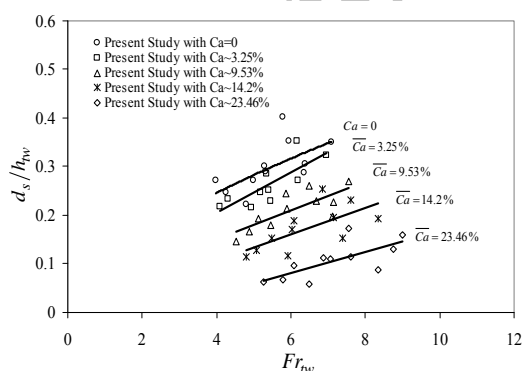
پارامتر	d_s/d_{s0}	L_s/L_{s0}
میانگین خطای مطلق MAE	۰/۰۲۰۲	۰/۰۱۴۶
ریشه‌ی میانگین مربعات خطا RMSE	۰/۰۵۰۷	۰/۰۳۵۹
ضریب وزن باقیمانده CRM	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۷۷
ضریب همبستگی R^2	۰/۸۷۷	۰/۸۹۳

به‌منظور صحت‌سنجی روابط (۱۲) و (۱۳) در تخمین عمق و طول نسبی حفره‌ی آبشستگی، از ۲۰ درصد باقی‌مانده داده‌های مشاهداتی که در تعیین ضرایب روابط مذکور مشارکت نداشته‌اند استفاده گردید. نتایج حاصل از این صحت‌سنجی در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده‌اند. ضریب زاویه‌ی خط برازش داده شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد که روابط (۱۲) و (۱۳) با متوسط خطای ۲-٪ قادرند تا پارامترهای d_s/d_{s0} و L_s/L_{s0} را پیش‌بینی نمایند.

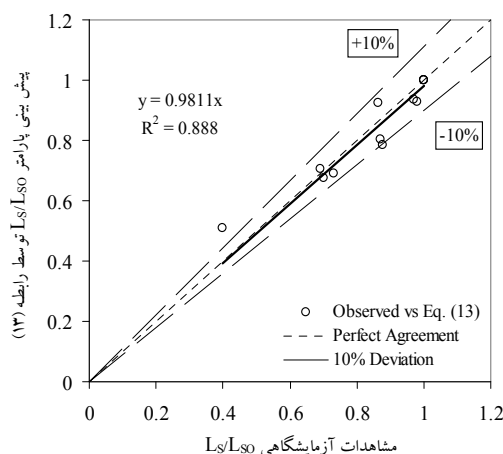
هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان تغییرات ابعاد حفره‌ی آبشستگی حداکثر در مقابل عدد فرود پایاب به‌ازای تغییر در میزان هوای تزریق شده به جریان خروجی از نازل می‌باشد. برای این منظور داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق با توجه به سناریوهای از پیش تعیین‌شده ترسیم گردیدند.

گرفته بر روی حداکثر طول نسبی آبستگي L_s/h_{tw} به ازای میزان هوای ورودی با غلظت متوسط $3/25$ درصد، اثری مشابه حداکثر عمق نسبی آبستگي را در پی خواهد داشت. با این تفاوت که حذف اثر میزان هوای وارد به جت در عدد فرود پایاب $8/5$ رخ خواهد داد. هم چنین شکل (۶) گویای این مطلب است که با افزایش میزان غلظت هوای ورودی به جت، حداکثر عمق نسبی آبستگي به صورت نسبی کاهش می یابد و این امر به علت متلاشی شدن مغزه‌ی جت می باشد. در یک تخمین دقیق تر می توان چنین ادعا نمود که با تزریق حدود 23% درصد هوا به جت خروجی از نازل در شرایط یکسان عدد فرود پایاب، میزان حداکثر عمق نسبی آبستگي حدود 67% درصد کاهش می یابد. ارزیابی های مشابه صورت گرفته بر روی شکل ۷ گویای این مطلب است که با تزریق حدود 23% درصد هوا به جت خروجی از نازل، حداکثر طول نسبی آبستگي به طور متوسط 55% 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 ۶ تغییرات حداکثر عمق نسبی آبستگي d_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} به ازای تغییر در میزان هوای وارد به جت C_a



شکل ۵ صحت سنجی معادله‌ی (۱۳) در تخمین L_s/L_{so}

شکل (۶) نحوه‌ی تغییر حداکثر عمق نسبی آبستگي در مقابل عدد فرود پایاب را به ازای مقادیر مختلف غلظت هوای ورودی به جت نشان می دهد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که امکان برآزش منحنی های با غلظت هوای ورودی صفر، $9/53$ ، $14/2$ ، $23/46$ درصد امکان پذیر است.

به طور مشابه نحوه‌ی تغییرات حداکثر طول نسبی آبستگي در مقابل تغییرات عدد فرود پایاب و میزان هوای وارد به جت، مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است.

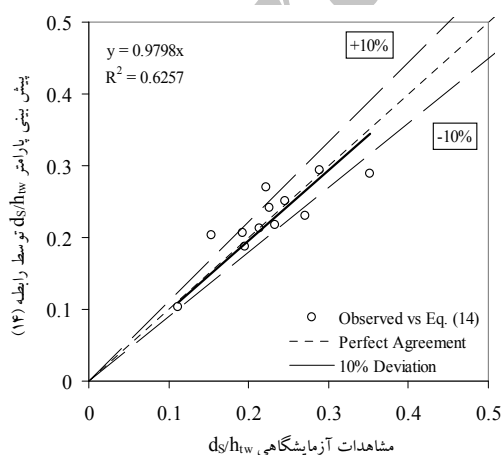
از تحلیل شکل (۶) می توان دریافت که به ازای عدد فرود پایاب بزرگ تر از ۹ و تحت شرایط عمق پایاب یکسان چنانچه میزان هوای وارد به جت کمتر از $3/25$ درصد باشد، میزان هوای وارد به جت بر عمق حفره‌ی آبستگي بی تأثیر خواهد بود. این موضوع بدین معنی است که به ازای عدد فرود پایاب بزرگ تر از ۹ میزان هوای وارد با غلظت متوسط $3/25$ درصد، اثری بر حداکثر عمق نسبی آبستگي نخواهد داشت و مغزه‌ی جت با این میزان هوا در شرایط هیدرولیکی یاد شده متلاشی نشده و با برخورد به سطح بستر مصالح باعث فراهم آوردن شرایط آبستگي مشابه شرایط بدون ورود هوا به نازل می باشد. ارزیابی های صورت

خطا، ضریب وزن باقی مانده و ضریب همبستگی استفاده گردید. نتایج در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

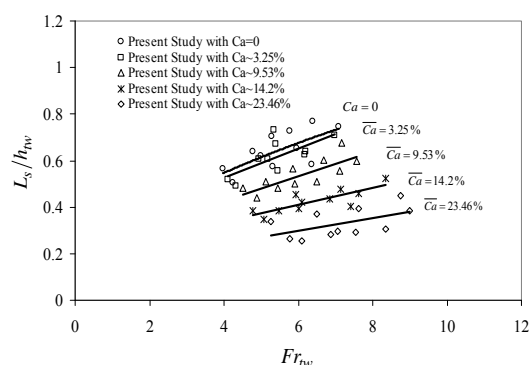
جدول ۲ تحلیل آماری خطای روابط (۱۰) و (۱۱)

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

در این مرحله از تحقیق با استفاده از ۲۰ درصد داده‌های مشاهداتی که نقشی در تعیین ضرایب روابط (۱۴) و (۱۵) نداشتند، نسبت به صحت‌سنجی روابط مذکور اقدام گردید. نتایج حاصل از مقایسه‌ی مقادیر مشاهداتی پارامترهای d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب در شکل‌های (۸ و ۹) نمایش داده شده‌اند. ضریب زاویه‌ی خطوط برازش شده در شکل‌های (۸ و ۹) نشان می‌دهند که روابط عمومی معرفی شده قادرند تا پارامترهای نسبی d_s/h_{tw} و L_s/h_{tw} را به ترتیب به‌طور متوسط با دقت $-۰/۰۲$ درصد و $+۰/۰۱۱$ درصد تخمین بزنند.



شکل ۸ صحت‌سنجی معادله‌ی (۱۴) در تخمین d_s/h_{tw}



شکل ۷ تغییرات حداکثر طول نسبی آبستگی L_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} به‌ازای تغییر در میزان هوای وارد به جت

به‌منظور حصول اطمینان از عملکرد روابط پیشنهادی لازم است تا نتایج حاصل از تخمین این روابط با نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی محققان دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد. براساس جستجوی به‌عمل آمده در مراجع معتبر علمی، مطالعات مشابهی که در آن وضعیت گسترش حفره‌ی آبستگی تحت اثر جت‌های هوادهی شده 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 باقی مانده میسر باشد. معادلات (۱۴) و (۱۵) معرف روابط عمومی حاکم بر فضای تحقیق می‌باشند.

$$d_s/h_{tw} = 0.0719 \left(1 - C_a/100\right)^{4.51} Fr_{tw}^{0.8446} \quad (14)$$

$$L_s/h_{tw} = 0.2934 \left(1 - C_a/100\right)^{3.1112} Fr_{tw}^{0.486t} \quad (15)$$

روابط (۱۴) و (۱۵) در محدوده‌ی عدد فرود پایاب $4 < Fr_{tw} < 9$ و غلظت هوای $0 < C_a < 26$ معتبر است.

به‌منظور ارزیابی دقت روابط (۱۴) و (۱۵) از توابع میانگین خطای مطلق، ریشه‌ی میانگین مربعات

نازل با غلظتی کوچک‌تر از $3/25$ درصد تأثیری بر پارامتر d_s/h_{tw} نخواهد داشت.

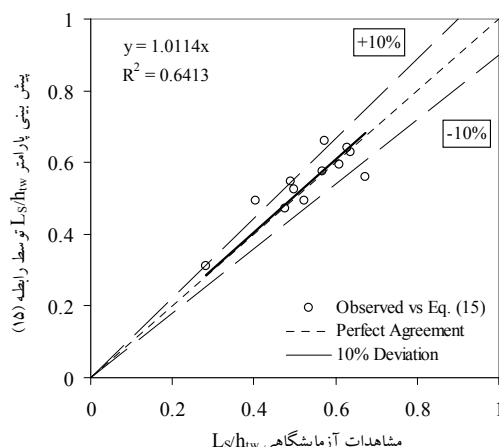
از بررسی روند تغییرات حداکثر طول نسبی آبستگی L_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} ناشی از جت‌های پیش‌هوادهی شده در حوضچه‌ی استغراق (شکل ۷) ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت هوای وارد به جت، آهنگ تغییرات پارامتر L_s/h_{tw} روند نزولی را در پیش می‌گیرد.

هم‌چنین می‌توان دریافت که به‌ازای اعداد فرود پایاب Fr_{tw} بزرگ‌تر از $8/45$ ، میزان غلظت هوای ورودی به نازل کوچک‌تر از $3/25$ درصد، تأثیری بر حداکثر عمق و طول نسبی حفره‌ی آبستگی نخواهد داشت. به‌ازای متوسط مقادیر درصد غلظت هوای ورودی به جت بین مقادیر $9.53 < \bar{C}_a < 23.46$ با افزایش هر یک درصد هوای وارد به جت به‌طور متوسط $4/38$ درصد از حداکثر عمق نسبی آبستگی کاسته خواهد شد. به‌طور مشابه به‌ازای افزایش میزان غلظت هوای ورودی به جت در محدوده‌ی مورد اشاره به‌طور متوسط $3/17$ درصد از حداکثر طول نسبی حفره‌ی آبستگی کم می‌شود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که روابط معرفی شده در تحقیق حاضر برای تخمین حداکثر عمق نسبی حفره‌ی آبستگی d_s/d_{s0} و حداکثر طول نسبی حفره‌ی آبستگی L_s/L_{s0} قادرند تا به‌طور متوسط با خطای $0.2-0$ درصد و $0.11+0$ درصد پارامترهای d_s/d_{s0} و L_s/L_{s0} را پیش‌بینی نمایند.

تقدیر و تشکر

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



شکل ۹ صحت‌سنجی معادله‌ی (۱۵) در تخمین L_s/h_{tw}

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

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

نتیجه‌گیری

از بررسی روند تغییرات حداکثر عمق نسبی آبستگی d_s/h_{tw} در مقابل عدد فرود پایاب Fr_{tw} ناشی از جت‌های قائم پیش‌هوادهی شده در حوضچه‌ی استغراق (شکل ۶) ملاحظه می‌گردد که با افزایش غلظت هوای وارد به جت، میزان حداکثر عمق و طول نسبی حفره‌ی آبستگی کاهش می‌یابد.

هم‌چنین می‌توان دریافت که به‌ازای اعداد فرود پایاب Fr_{tw} بزرگ‌تر از $8/78$ ، میزان هوای ورودی به

مراجع

1. Mason, P.J. "Effect of air entrainment on plunge Pool Scour.", *Journal of Hydraulic Engineering*., ASCE, Vol 115, No. 3, pp. 385-399. (1989).
2. Ervine, D. A. "The entrainment of air in water." *Institute of Water Power and Dam Construction*., 28(12), 27-30. (1976).
3. Bin, A. K. "Air entrainment by plunging liquid jets." presented at the Sept. 3-6, IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, held at Esslingen, Germany.(1984).
4. Van de Sande, E. "Air entrainment by plunging water jets," thesis presented to the Technische Hogeschool, at Delft, The Netherlands, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, (1981).
5. Bohrer, J.G., Abt, S.R., and Wittler, R. J., "Prediction plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No.10, Pp: 1043-1048. (1998).
6. Canepa, S. and Hager, W.H. "Effect of jet air content on plunge pool scour." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129. No. 5. Pp: 358-365. (2003).
7. Xu, W., Deng, J., Qu, J., Liu, S., and Wang, W., "Experimental Investigation on Influence of Aeration on Plane Jet Scour." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 2, February 1, 2004. ©ASCE, ISSN 0733-9429/2004/2- 160–164. (2004).
۸. ارمغانی، ا.، "بررسی آزمایشگاهی اثر جت پیش هوادهی شده بر عمق آبستگي حوضچه استغراق." پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول (۱۳۹۲).
9. Rahrneyer, W. "The effect of aeration on scour." *Proceedings of 1990 American Society of Civil Engineers National Hydraulic Engineering Conference*, ASCE, New York, 531–536. (1990).
10. Aderibigbe, O.O., and Rajaratnam, N. "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets." *Journal of Hydraulic Research*, 34(1), 19–33., (1996).