اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبشستگی در حوضچه استغراق

بابک لشکرآرا*[1]، ایراندخت دهقانی[2] و محمد ذاکرمشفق[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، Lashkarara@jsu.ac.ir

۲- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

تاریخ دریافت : ۹۴/۲/۹ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۲۲

چکیده

در این مقاله نتایج مطالعه آزمایشگاهی تعیین ابعاد حفره آبشستگی حاصل از جت دایره‌ای مستغرق در حوضچه‌های استغراق با مصالح غیر چسبنده ارائه شده است. برای این منظور اثر پارامترهای سرعت جریان خروجی از نازل، ارتفاع نصب نازل و اندازه قطر ذرات بستر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق از مصالح غیر چسبنده با متوسط قطر ٤/٠٦، ٧/١٤ و ٨/٧٣ میلی متر استفاده شده است. رقوم نصب جت نسبت به سطح تسطیح شده مصالح کف حوضچه استغراق، ارتفاع‌های ٢٤ ، ٣٥/٥ و ٤٤ سانتی‌متر را تجربه نموده است. سرعت جریان خروجی از نازل حدودا بین دو الی ده متر بر ثانیه تغییر یافته است. مقایسه نتایج مشاهداتی این تحقیق با محققین پیشین گویای این مطلب است که پارامتر فرسایش به‌طور مطلق قادر به نرمال سازی اثر قطر مصالح، رقوم نصب جت و سرعت جت خروجی از نازل بر ابعاد نسبی حفره آبشستگی نمی‌باشد. تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روابط عمومی معرفی شده در این تحقیق حاکی از آن است که تغییرات سرعت جریان و رقوم نصب جت در مقابل تغییر دانه بندی مصالح در تخمین ابعاد حفره آبشستگی از اثری دوچندان برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد که جوشنی شدن بستر حوضچه استغراق نقش به سزایی در تخمین پارامترهای نسبی آبشستگی ایفا می‌نماید.

کلید واژه‌ها: جت دایره‌ای مستغرق، قطر مصالح، عمق جت، پارامتر فرسایش، ابعاد چاله آبشستگی.

Interaction of Erosion Parameter and Scour Pattern in the Plunge Pool

B. Lashkar-Ara[1*], I. Dehghani[2] and M. Zakermoshfegh[3]

1*- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

2- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

3- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Received :29 April 2015 Accepted:14 October 2015

Abstract

Experimental results of determining scour hole dimensions resulted from submerged circular jet in a plunge pool containing non-cohesive materials are presented in this paper. The effect of nozzle flow velocity, the height of nozzle installation and the bed particle diameters, are evaluated toward this end. Non-cohesive materials with average diameter of 4.06, 7.14, and 8.73 mm are used in this study. The elevation of jet installation toward the surface of plunge pool bed is changed with the values of 24, 35.5 and 44 cm. The nozzle flow velocity was differentiated between 2 and 10 meter per second. The comparison of observed results with previous studies show that the erosion parameter absolutely unable to normalized the effect of particle diameters, jet installation effect and nozzle flow velocity on the relative scour dimensions. The sensitive analysis on general introduced relations in this paper indicates that the variations of flow velocity and jet installation elevations has a double effect on estimating scour hole dimension in comparison to the material size and grading variations. The results also showed that armoring of the plunge bed has an important role in estimating relative parameters of scouring.

Keywords: Submerged circular jet, Material diameters, Jet depth, Erosion parameter, Scour hole dimensions.

مقدمه

آبشستگی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی همانند خروجی کالورت‌ها، سرریزها، سازه‌های مستهلک کننده انرژی و دیگر سازه‌های پایانه‌ای از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است، به گونه‌ای که آبشستگی بیش از حد، پایداری و ایمنی این سازه‌ها را به مخاطره می‌اندازد. حوضچه‌های استغراق یکی از رایج ترین روش‌های استهلاک انرژی در سیستم‌های تخلیه سیلاب می‌باشند که آبشستگی بستر آنها همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. به طور کلی فرآیند استهلاک، در این‌گونه سازه‌های مستهلک کننده انرژی به ارتفاع ریزش، ضخامت جریان جت و همچنین شرایط محیطی بستگی دارد. محققین در این راستا تحقیقات متنوعی انجام داده‌اند. برخی از محققین همچون دودیاه و همکاران[1] (۱۹۵۳)، راجارتنام[2] (۱۹۸۲)، راجارتنام و بلتوس[3](۱۹۷۷)، میه و کبیر[4] (۱۹۸۳)، بروشرز و رادکیوی[5] (۱۹۹۱)، سارما و سیواسانکار[6] (۱۹۶۷)، انصاری و همکاران[7] (۲۰۰۳)، آدربیگب و راجاراتنام[8] (۱۹۹۶) و چاکاوارتی و همکاران[9] (۲۰۱۴) شاخص‌های فرسایش مصالح غیر چسبنده در حوضچه استغراق تحت اثر جت مستغرق دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که ابعاد چاله آبشستگی تحت اثر جت‌های مستغرق به ارتفاع جت تا سطح مصالح وابسته است. راجارتنام و مازورک (۲۰۰۶) در تحقیقات خود نشان دادند که پروفیل انباشت رسوبات در خارج حفره آبشستگی اگر به صورت بی بعد نمایش داده شوند به همدیگر شبیه خواهند بود.

یه و همکاران[10] (۲۰۰۹) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از نتایج آدربیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) و روابط تجربی دیگر نشان دادند که حداکثر عمق وشعاع چاله آبشستگی و ارتفاع انباشت رسوبات خارج از چاله آبشستگی تابعی از نسبت سرعت خروجی جت به سرعت انتقال یافته به بستر می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی ایشان حاکی از آن بود که پس از برخورد جت عمودی به بستر، آبشستگی آغاز شده و ابتدا جت با زاویه حدود ۱۸۰ درجه به اطراف منحرف می‌شود. پس از آن توسعه و افزایش عمق آبشستگی باعث افزایش فاصله برخورد جت به بستر (ارتفاع ریزش جت) شده و جت از مرز حفره آبشستگی تبعیت کرده و با زاویه انحراف کمتری به اطراف منحرف می‌شود. در جت عمودی شکل حفره آبشستگی در پلان متقارن بوده و رسوبات خارج شده ازحفره آبشستگی در اطراف حفره ته نشین می‌شود.

لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف) به بررسی ابعاد حفره آبشستگی تحت اثر جت‌های قائم دایره‌ای مستغرق پرداخته‌اند. آنان در تحقیقات خود از مصالح شن ریز یکنواخت با قطر متوسط ۱۱/۱ میلی‌متر استفاده نمودند. آنان برای انجام آزمایش‌ها، سناریوهای مختلفی با تغییر در ارتفاع ریزش جت مستغرق نسبت به بستر اولیه رسوبات و همچنین تغییر در سرعت جریان خروجی از جت تدوین نمودند. آنان در تحقیقات خود نشان دادند که روند تغییرات عمق وطول نسبی متعادل شده آبشستگی در مقابل عدد فرود جت در حوضچه استغراق، با افزایش عدد فرود جت، افزایش می‌یابد. از طرفی نتایج تحقیقات آنان نشان می‌دهد که افزایش یک درصد به ارتفاع نصب جت، منجر به کاهش ۰/۳۳درصدی در مابه التفاوت عمق نسبی آبشستگی دینامیکی و استاتیکی خواهد شد.

لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ ب) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی نظیر میزان اختلاط هوا و عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت‌های قائم مستغرق پرداختند. در این تحقیق با حفظ شرایط هیدرولیکی یکسان، الگوی حفره آبشستگی که تحت شرایط هوادهی و بدون‌هوادهی ایجاد شده بود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که غلظت هوا در میزان ابعاد حفره آبشستگی مؤثر است و عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. همچنین آنان نشان دادند که به ازای اعداد فرود پایاب بزرگ‌تر از ۸/۷۸ ، چنانچه میزان غلظت هوای وارده به جت کوچک‌تر از ۳/۲۵ درصد باشد، تأثیری بر میزان حداکثر عمق نسبی حفره آبشستگی نخواهد داشت.

ارمغانی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای عمق پایاب، سرعت جت و زاویه جت بر ابعاد حفره آبشستگی و برآمدگی نسبی رسوبات، تحت جت دایره‌ای مستغرق پرداختند. آنان در تحقیقات خود زاویه جت را در دو حالت ۴۵ و ۶۰ درجه تغییر دادند. بر اساس مشاهدات آنان 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 بزرگ‌تر از ۲/۸۲ و ۱/۹۷ ، از جت با زاویه ۴۵ درجه بیشتر مشاهده شد. همچنین آنان نشان دادند که که با کاهش زاویه جت خروجی از نازل نسبت به افق، پهنه تنش مازاد بر تنش بحرانی در سطح رسوبات توسعه یافته و منجر به گستردگی ابعاد حفره آبشستگی و برآمدگی رسوبات در پلان می‌گردد.

مقاله حاضر به مطالعه آزمایشگاهی روی پاسخ بسترغیر چسبنده شنی به جت دایره‌ای، مستغرق و عمودی پرداخته است. این مطالعه گستره مطالعات آزمایشگاهی موجود را در راستای توسعه دامنه کاربرد قطر ذرات، ارتفاع نصب جت و سرعت جت جریان خروجی از نازل، گسترش چشمگیری داده و اندرکنش پارامتر فرسایش را بر الگوی آبشستگی مورد ارزیابی قرار داده است.

1 -Doddiah *et al.*
2 -Rajaratnam
3 Rajaratnam and Beltaos
4 - Mih and Kabir
5 - Breusers and Raudkivi
6 - Sarma and Sivasankar
7 -Ansari *et al*.
8 - Aderibigbe and Rajaratnam
9 - Chakravarti *et al.*
10 - Yeh *et al.*

روش تحقیق

در این تحقیق برای شبیه سازی مصالح بستر در آزمایشگاه از مصالح شنی و با سه قطر مختلف ۴/۰۶، ۷/۱۴ و ۸/۷۳ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور شبیه سازی حوضچه استغراق از یک محفظه با ابعاد ۱/۶ متر طول، یک متر عرض و با عمق یک متر استفاده گردید. این حوضچه تا عمق ۵۰ سانتی‌متر با مصالح پوشیده شد. نازل خروجی جت با مقطع دایره‌ای و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به بستر آبرفتی نصب گردید تا شرایط شبیه سازی جت قائم فراهم گردد. به‌منظور ارزیابی اثر ارتفاع نصب جت بر الگوی فرسایش در حوضچه استغراق، رقوم نصب جت در ارتفاع‌های ۲۴، ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی‌متر طی سناریوهای متفاوتی نسبت به بستر آبرفتی تغییر یافت. در انتهای محفظه یک دریچه کشویی برای تنظیم تراز پایاب قرار گرفته است که برای مستغرق نمودن جت در رقوم نصب ذکر شده، این دریچه در حالتی تنظیم شد که، سر نازل حدود یک سانتی‌متر در زیر آب قرار گرفت. در نتیجه تمام شبیه سازی‌ها برای فراهم آوردن مراحل آبشستگی تحت جت قائم دایره‌ای مستغرق در آزمایشگاه فراهم گردید. برای برآورد زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها، عمق دینامیکی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری گردید. مقایسه تغییرات اعماق دینامیک در مقابل زمان و تثبیت تغییرات در عمق آبشستگی در زمان‌های بیشتر از ۱۲۰ دقیقه گویای این مطلب است که اعمال زمان ۱۲۰ دقیقه در آزمایش‌ها می‌تواند به‌عنوان یک تقریب واقع گرایانه ملاک عمل قرار گیرد.

در این تحقیق برای بررسی اثر شدت جریان بر الگوی فرسایش درون حوضچه استغراق، سرعت خروجی جریان از نازل در محدوده ۲/۰۴ الی ۱۰/۳۶ متر بر ثانیه نمو داده شد. جهت اندازه گیری شدت جریان از یک‌دستگاه کنتور الکترومغناطیس با دقت ۰/۲ ± تا ۰/۵ ± درصد نسبت به مقیاس اصلی استفاده گردید.جدول (۱) محدوده تغییر پارامترهای مؤثر بر آبشستگی در تحقیق حاضر و مطالعه محققین پیشین را در بر می‌گیرد. جهت انجام آزمایش‌ها با تغییر در میزان ارتفاع نصب جت نسبت به سطح تسطیح شده مصالح بستر آبرفتی ، سه سناریو تدوین گردید. برای این منظور رقوم نصب جت در سناریوی اول ۲۴، در سناریوی دوم ۳۵/۵ و در سناریوی سوم ۴۴ سانتی متر نسبت به سطح مصالح آبرفتی مستقر گردید. در مجموع در هر سه سناریو با تغییر در میزان اندازه متوسط مصالح آبرفتی، ۱۱۴ مرحله آزمایش به مرحله اجرا گذاشته شد. پس از بررسی‌های به‌عمل آمده و غربالگری داده‌ها در سطح اطمینان $\mu\pm3\sigma$ در سناریوی اول ۱۸ مرحله آزمون، در سناریوی دوم ۲۷ مرحله و در سناریوی سوم ۳۹ مرحله از آزمون‌های انجام شده مناسب تحلیل ارزیابی شدند. بنابراین تحلیل نتایج بر روی ۸۴ مرحله از آزمایش‌ها صورت پذیرفت. برای تعیین پروفیل بستر از متر لیزری مدل Leica D8 بهره‌گیری شد. پس از ترسیم پروفیل چاله فرسایش نسبت به تعیین ابعاد چاله از جمله عمق، شعاع و حجم آبشستگی اقدام گردید.

به‌منظور استخراج روابط حاکم بر فضای تحقیق از تحلیل ابعادی استفاده گردید. برای این منظور متغیرهای موثر بر ابعاد حفره آبشستگی تحت اثر جت خروجی از نازل به شرح زیر لیست گردید:

$$f\left(V_j, d_n, B, h_{tw}, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s-\rho_w, d_s, r_o, \forall,\right)=0 \quad (۱)$$

که در آن V_j: سرعت خروجی از نازل، d_n: قطر نازل، B: عرض حوضچه رسوب، h_{tw}: عمق پایاب، h_j: ارتفاع نصب جت نسبت به سطح مصالح بستر، D_{50}: قطر متوسط ذرات بستر، g: شتاب ثقل، μ: لزجت سیال، ρ_w: جرم مخصوص آب، $\rho_s-\rho_w$: جرم مخصوص مستغرق ذرات رسوب، d_s: حداکثر عمق آبشستگی متعادل شده، r_0: شعاع توسعه آبشستگی و $\forall$: حجم چاله آبشستگی می‌باشد.

با استفاده از تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن پارامترهای ρ, V_j, h_j به عنوان متغیرهای تکراری، معادله‌های بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره آبشستگی در حوضچه استغراق را می‌توان به صورت روابط (۲) الی (۴) نوشت:

$$\frac{d_s}{h_j}=f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g\,(G_s-1)\,D_{50}}}\right) \quad (۲)$$

$$\frac{r_o}{h_j}=f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g\,(G_s-1)\,D_{50}}}\right) \quad (۳)$$

$$\frac{\forall}{h_j^3}=f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g\,(G_s-1)\,D_{50}}}\right) \quad (۴)$$

در روابط فوق پارامتر $V_j/\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}$ عدد فرود دنسیومتریک نامیده شد. لازم به توضیح است که از حاصل‌ضرب پارامتر عدد فرود دنسیومتریک در پارامتر d_n/h_j، پارامتر جدیدی به‌صورت $V_j/\sqrt{g(G_s-1)D_{50}}\times d_n/h_j$ حاصل می‌شود که در تحقیقات آدربیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) از آن تحت عنوان پارامتر فرسایش[1] یاد شده است و با نماد Ec نمایش داده می‌شود. پس از انجام تحلیل ابعادی و تعیین شکل عمومی معادله‌های حاکم بر فضای تحقیق، ضرائب روابط مذکور با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین شدند. برای ارزیابی نتایج روابط پیشنهادی از تحلیل آماری بهره‌گیری شد. توابع خطای مهمی که جهت ارزیابی نتایج حاصل از روابط پیشنهادی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند به‌شرح زیر می‌باشند:

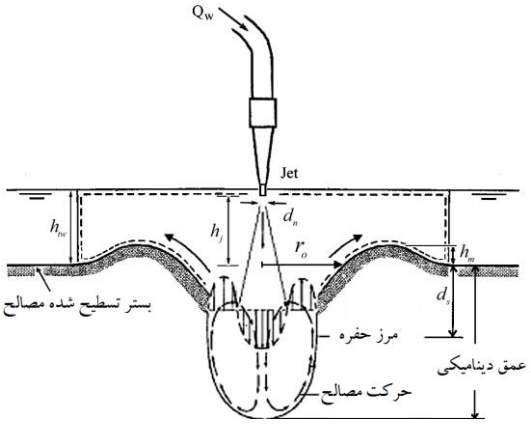
میانگین خطای مطلق

$$MAE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|O_i-P_i| \quad (۵)$$

1 - Erosion coefficient

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای مطالعات پیشین و حاضر

نام محقق	متوسط قطر ذرات D_{50} (mm)	متوسط قطر نازل d_n (mm)	سرعت جت V_j (m/s)	ارتفاع نازل h_j (m)
سارما و ساویسانکارا (۱۹۶۷)	۰/۵۳ – ۰/۷۵	۸/۲۶ – ۱۶/۵	۰/۶۶ – ۲/۸۳	۰/۲۴
کوبس و همکاران (۱۹۷۹)	۱/۵	۲۰ – ۴۰	۰/۷ – ۳/۷	۰ – ۰/۸۲
راجاراتنام (۱۹۸۲)	۱/۲ – ۲/۳۸	۹/۸	۲/۹۹ – ۴/۶	۰/۱۴ – ۰/۲۸
آدربیگ و راجاراتنام (۱۹۹۶)	۰/۸۸ – ۲/۴۲	۴ – ۱۲	۲/۶۵ – ۴/۴۵	۰/۰۰۴ – ۰/۵۲۳
انصاری و همکاران (۲۰۰۳)	۰/۲۷	۸ – ۱۲/۵	۱/۳ – ۵/۷۵	۰/۱۵ – ۰/۳۰
چکوارتی و همکاران (۲۰۱۳)	۲/۸	۸ – ۱۲/۵	۵/۱۲ – ۹/۸۴	۰/۱۵ – ۰/۳۰
لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف)	۱۱/۱	۲۵	۴/۰۷ – ۸/۱۴	۰/۳۱۵ – ۰/۴۲۵
تحقیق حاضر	۴/۰۶ ، ۷/۱۴ ، ۸/۷۳	۲۵	۲/۰۴ – ۱۰/۳۶	۰/۲۴ – ۰/۴۴



شکل ۱- نمای شماتیک مشخصات و پروفیل آبشستگی

خطای استاندارد تخمین

$$SEE=\sqrt{\frac{1}{(n-2)}\times\left[\sum_{i=1}^{n}(P_i-\overline{P})^2-\left[\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})(P_i-\overline{P})\right]^2\Big/\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2\right]} \quad (۶)$$

ریشه میانگین مربعات خطا

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (۷)$$

ضریب وزن باقیمانده

$$CRM=\left(\sum_{i=1}^{n}O_i-\sum_{i=1}^{n}P_i\right)\Big/\sum_{i=1}^{n}O_i \quad (۸)$$

ضریب تعیین

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2} \quad (۹)$$

که در این روابط O: نشانگر پارامتر مشاهده شده، P: نشانگر پارامتر پیش بینی شده، $\overline{O}$: متوسط پارامترهای مشاهداتی، $\overline{P}$: متوسط پارامترهای محاسباتی و n: تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در اثر برخورد جریان به آب درون حوضچه استغراق، لایه مرزی که در اطراف جت تشکیل می‌گردد به تدریج الگوی خطوط جریان را تغییر داده و جریان آشفته می‌گردد. همان گونه که در شکل (۱) نمایش داده شده است به‌دلیل آشفتگی جریان، یک‌سری گردابه در محدوده بستر آبرفتی و پایین دست جت تشکیل می‌شود که این گردابه‌ها در کندن، معلق کردن و انتقال رسوبات نقش کلیدی بازی می‌نمایند. برخورد جت آب به بستر سبب افزایش تنش برشی در مجاورت بستر شده و در نتیجه ذرات رسوب از سطح بستر جدا و

به صورت بار بستر و بار معلق جابجا می‌شوند. در ابتدای آبشستگی، رسوبات به طور بسیار نامنظم و با اغتشاش زیاد از حفره خارج شده، به نحوی که تا سطح آب نیز بالا آمده و به کناره‌های حفره و پایین دست منتقل می‌شوند. در این حالت تشخیص جهت حرکت رسوباتی که از سطح بستر بلند می‌شوند، تقریبا غیر ممکن بوده و این حرکت به صورت کاملا تصادفی صورت می‌پذیرد.

با گذشت زمان نحوه خروج رسوبات از حفره بدین صورت است که قسمت عمده‌ای از ذرات درشت در فضای بالای حفره به حالت شناور درآمده و تنها درصد کمی از آنها به خارج حفره منتقل می‌شوند. در نهایت به علت مستهلک شدن انرژی سیال، از شدت گردابه‌ها و تنش برشی مؤثر بر ذرات کف بستر در حفره آبشستگی کاسته شده و پروفیل بستر به حالت پایدار می‌رسد. نمونه‌هایی از نتایج تشکیل حفره آبشستگی تحت سناریوهای معرفی شده در شکل‌های (۲) الی (۴) نمایش داده شده‌اند.

در این بخش از تحقیق نسبت به ارائه نتایج حاصل از اعمال اثر هر دوپارامتر دانه بندی مصالح و عمق نصب جت بر ابعاد حفره آبشستگی اقدام شده است. برای این منظور از پارامتر فرسایش بهره گیری شده است.

برای استخراج روابط حاکم بر فضای تحقیق و بررسی چگونگی تغییر آهنگ پارامترهای عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_j)، شعاع نسبی آبشستگی (r_o/h_j) ،حجم نسبی آبشستگی ($\forall/h_j^3$) در مقابل پارامتر فرسایش (Ec) از مشاهدات آزمایشگاهی غربالگری شده و نرم افزار SPSS استفاده گردید.

بر اساس نتایج نمایش داده در جدول (۱) محدوده تغییرات پارامترهای مطالعات پیشین و تحقیق حاضر از هم‌پوشانی برخوردار نیستند لذا این امر ایجاب می‌نماید تا معادله‌های حاکم بر فضای تحقیق به‌گونه‌ای استخراج شوند که امکان صحت سنجی نتایج آنها فراهم گردد. لذا عملیات واسنجی به‌دلیل عدم وجود تحقیقات با شرایط آزمایشگاهی مشابه، تقریباً با استفاده از ۱۵ درصد از نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر صورت پذیرفت. برای این منظور از ۸۵ درصد داده‌های آزمایشگاهی امکان سنجش قابلیت اعتماد روابط معرفی شده فراهم شد. لذا ۱۲ مرحله از آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی برای واسنجی کنار گذاشته شدند و آموزش روابط توسط ۷۲ مرحله از نتایج آزمایشگاهی صورت پذیرفت. قابل ذکر است که داده‌های مورد استفاده در مرحله صحت سنجی هیچ نقشی در تعیین ضرائب روابط معرفی شده نداشته‌اند.

به‌منظور ارضاء شرایط آستانه حدی روابط خطوط برازش شده برای تخمین شعاع و عمق نسبی، از معادله‌های با شکل عمومی توانی و جهت تخمین حجم نسبی از معادله با شکل عمومی تپه‌ای استفاده گردید. نتایج حاصل در شکل‌های (۵) الی (۷) به نمایش گذاشته شده‌اند. بهترین خط برازش داده شده از بین نتایج عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_j)، شعاع نسبی آبشستگی (r_o/h_j)،حجم نسبی آبشستگی ($\forall/h_j^3$) در مقابل پارامتر فرسایش به‌ترتیب توسط روابط (۱۰) الی (۱۲) نمایش داده شده‌اند:

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.2277\, Ec^{0.0857} - 1 \qquad (۱۰)$$

$$\frac{r_0}{h_j} = 1.3257\, Ec^{0.1198} - 1 \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\forall}{h_j^3} = \left(0.0035 + Ec^{1.6}\right) \Big/ \left(43.2215 + Ec\right) \qquad (۱۲)$$

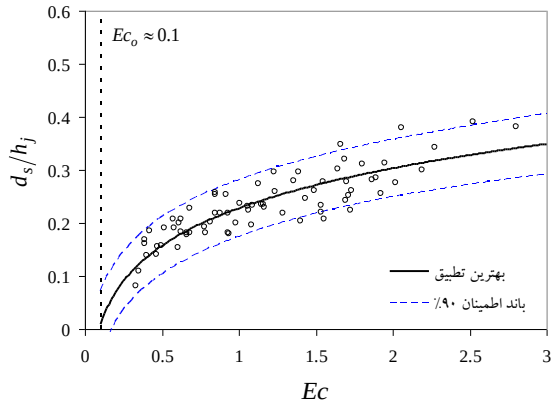
نحوه برازش روابط (۱۰) الی (۱۲) از بین نتایج مشاهداتی در شکل‌های (۵) الی (۷) نمایش داده شده‌اند. با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و به‌کارگیری توابع خطای معرفی شده در بخش روش تحقیق، پارامترهای خطای حاصل از به‌کارگیری روابط (۱۰) الی (۱۲) محاسبه و نتایج آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.

این روابط به‌ترتیب دارای ضرایب تعیین ۰/۸۲۷، ۰/۸۶۷ و ۰/۸۱ می‌باشند. همچنین این روابط به‌ترتیب دارای ریشه میانگین مربعات خطایی معادل ۰/۰۳۲۸، ۰/۰۳۱۷، ۰/۰۰۸۳ می‌باشند.

شکل ۲ –شکل چاله آبشستگی با ارتفاع نصب جت ٤٤ سانتی‌متر و دانه بندی مصالح ٤/٠٦ میلی‌متر

شکل ۳ –شکل چاله آبشستگی با ارتفاع نصب جت ۳۵/۵ سانتی‌متر و دانه بندی مصالح ۷/۱٤ میلی‌متر

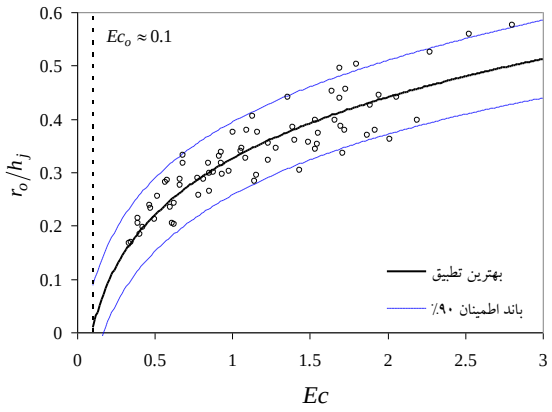
شکل ٤ –شکل چاله آبشستگی با ارتفاع نصب جت ۲٤ سانتی‌متر و دانه بندی مصالح ۸/۷۳ میلی‌متر



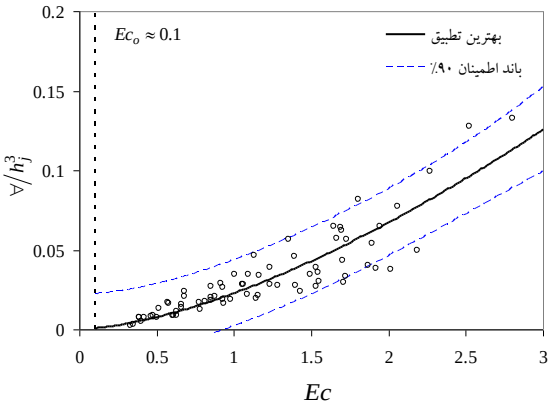
شکل۵- تغییرات عمق نسبی آبشستگی در مقابل پارامتر فرسایش

جدول ۲-تحلیل آماری خطای روابط (۱۰) الی (۱۲)

پارامتر	مرحله آموزش			مرحله آزمون		
	d_s/h_j	r_o/h_j	$\forall/h_j^3$	d_s/h_j	r_o/h_j	$\forall/h_j^3$
میانگین خطای مطلق	۰/۰۲۵۵	۰/۰۳۲۲	۰/۰۰۸۶	۰/۰۲۷۵	۰/۰۲۵۸	۰/۰۰۶۵
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۳۱۵	۰/۰۴۰۳	۰/۰۱۱۶	۰/۰۳۲۸	۰/۰۳۱۷	۰/۰۰۸۳
ضریب وزن باقیمانده	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۳۹	۰/۰۴۹۶	-۰/۰۰۹۴	-۰/۰۰۵۷
خطای استاندارد تخمین	۰/۰۲۸۹	۰/۰۳۸	۰/۰۱۰۸	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۹۱
ضریب تعیین	۰/۷۳۷	۰/۷۹۹	۰/۷۹۷	۰/۸۲۷	۰/۸۶۷	۰/۸۱
شیب خط بین مشاهدات و تخمین	۰/۹۸۲۵	۰/۹۸۶۱	۰/۹۲۱۶	۰/۹۳۴۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹۸۹



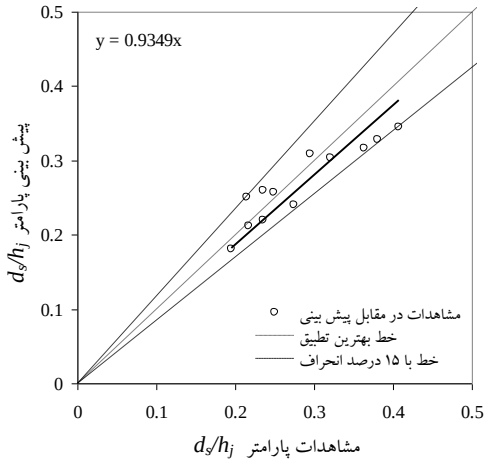
شکل٦- تغییرات شعاع نسبی آبشستگی در مقابل پارامتر فرسایش



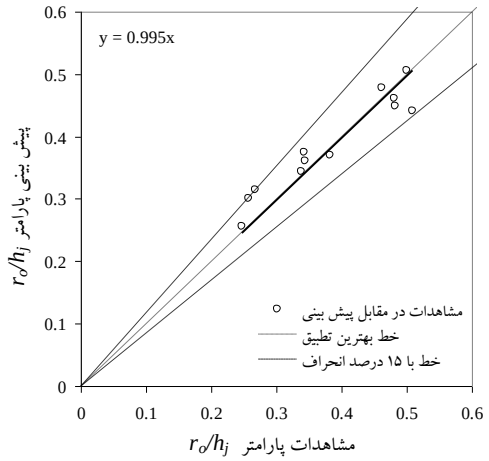
شکل۷- تغییرات حجم نسبی آبشستگی در مقابل پارامتر فرسایش

به منظور برآورد شرایط آستانه حرکت (شرایطی که نیروی ناشی از جت بر وزن مستغرق ذرات غلبه می‌کند) حرکت اولین ذرات بستر مشاهده گردید و با ثبت دبی جریان و دیگر پارامترهای دخیل در پدیده آبشستگی این شرایط تخمین زده شد. همچنین روابط مذکور برای برآورد این مقدار تجزیه و تحلیل گردید. بررسی‌های انجام شده گویای این مطلب است که هردو شرایط آستانه حرکت مدل فیزیکی و روابط برازش شده یکسان می‌باشد. همچنین این مقدار در کلیه روابط (۱۰) الی (۱۲) دارای شرایط اولیه تقریباً یکسان و از طول از مبداءای برابر ۰/۱ برخوردارند. وجود وحدت رویه در آغاز آستانه حدی روابط پیشنهادی، می‌تواند گواهی بر صحت نحوه برازش منحنی‌ها باشد. به‌منظور صحت سنجی توانایی نتایج روابط (۱۰) الی (۱۲) در تخمین پارامترهای (d_s/h_j)، (r_o/h_j) و ($\forall/h_j^3$) از ۲۰ درصدِ باقیماندهِ داده‌های مشاهداتی که در تعیین ضرائب روابط مذکور مشارکت نداشته‌اند استفاده گردید. نتایج حاصل از این صحت سنجی در شکل‌های (۸) الی (۱۰) نمایش داده شده‌اند. ضریب زاویه خط برازش داده شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی پارامتر ناپذیر بود. به‌منظور مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین از نتایج تحقیقات لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف)، راجارتنام (۱۹۸۲) و آدربیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) (d_s/h_j) در شکل (۸) نشان می‌دهد که رابطه (۱۰) در پیش بینی عمق نسبی آبشستگی به‌طور متوسط با ۶/۵- درصد خطا همراه است. به‌طور مشابه از بررسی شیب خط برازش شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی پارامترهای (r_o/h_j) و ($\forall/h_j^3$) در شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان دریافت که روابط (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب با خطای متوسط ۰/۵ و ۰/۱ درصد قادرند تا شعاع نسبی و حجم نسبی چاله آبشستگی را پیش‌بینی نمایند. علت اختلاف دقت رابطه (۱۰) را در تخمین عمق نسبی آبشستگی در مقایسه با دقت روابط (۱۱) و (۱۲) می‌توان در نحوه روند آزمایش‌ها ریشه یابی نمود. پس از سپری شدن زمان آزمایش و بستن شیر جریان ورودی به نازل، ابتدا حفره حاصل از آبشستگی دینامیکی شروع به پر شدن می‌نماید و این امر به نوعی منجر به بر هم خوردن نسبی عمق آبشستگی استاتیکی می‌گردد. هرچند که در تمام مراحل آزمایش‌ها نهایت دقت به‌عمل آمد که با آهسته بستن شیر این منشأ خطا به حداقل مقدار خود کاهش یابد ولی جلوگیری از وقوع آن در سرعت‌های جت زیاد اجتناب استفاده گردید. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نتایج حاصل از تحقیق حاضر را برای تخمین عمق بدون بعد آبشستگی (d_s/h_j) و شعاع بدون بعد آبشستگی (r_o/h_j) در مقابل نتایج حاصل از تحقیقات

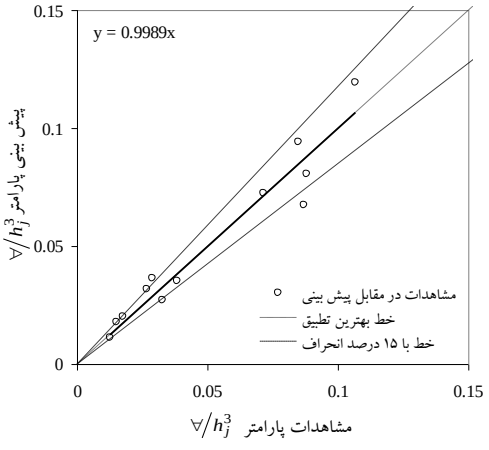
پیشین نشان می‌دهند. نتایج به‌دست آمده از تجزیه و تحلیل آماری بین نتایج این تحقیق در مقابل نتایج تحقیقات لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف)، راجاراتنام (۱۹۸۲) و آدربیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) در جدول (۳) خلاصه شده است



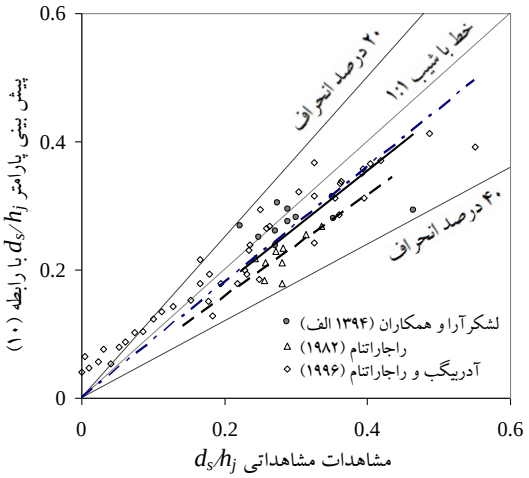
شکل ۸- نتایج رابطه (۱۰) در تخمین (d_s/h_j) در مقایسه با نتایج نظیر مشاهداتی



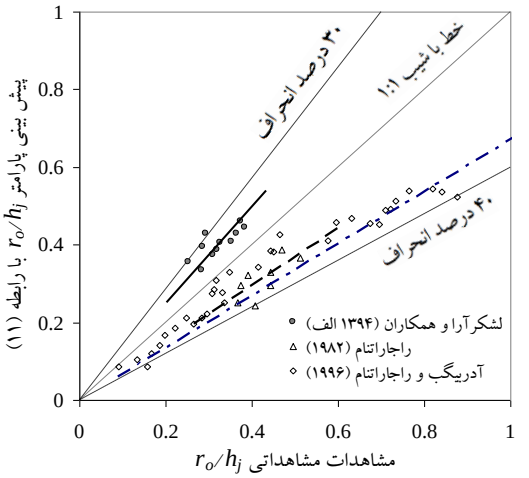
شکل ۹- نتایج رابطه (۱۱) در تخمین (r_o/h_j) در مقایسه با نتایج نظیر مشاهداتی



شکل ۱۰- نتایج رابطه (۱۲) در تخمین ($\forall/h_j^3$) در مقایسه با نتایج نظیر مشاهداتی



شکل۱۱- مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی محققین پیشین با مقادیر پیش بینی شده (d_s/h_j) توسط رابطه (۱۰)

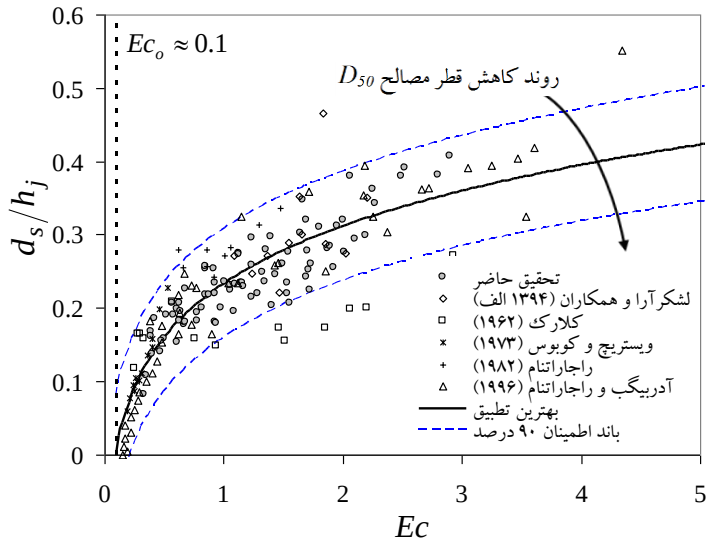


شکل۱۲- مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی محققین پیشین با مقادیر پیش بینی شده (r_o/h_j) توسط رابطه (۱۱)

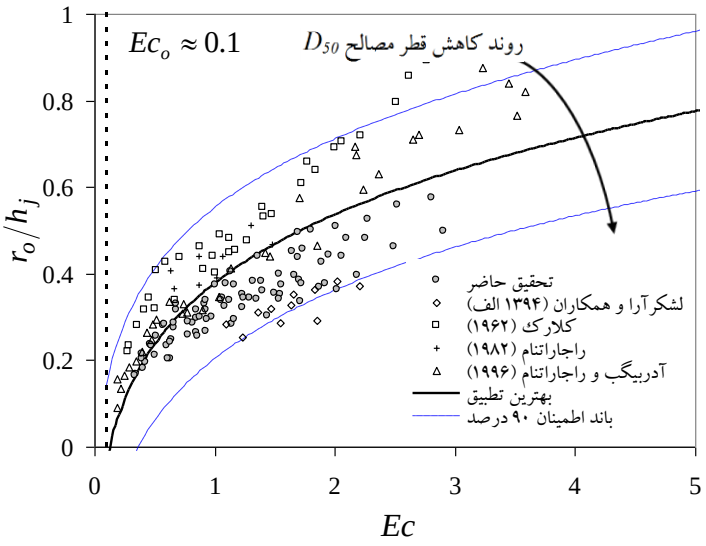
جدول۳- توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی محققین پیشین با روابط (۱۰) و (۱۱)

محققین پیشین	پارامتر	میانگین خطای مطلق	ریشه میانگین مربعات خطا	ضریب وزن باقیمانده	خطای استاندارد تخمین	ضریب زاویه
لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف)	d_s/h_j	۰/۰۴۰۶	۰/۰۶۱۳	۰/۰۸۳۵	۰/۰۲۱۳	۰/۸۸۵
	r_o/h_j	۰/۰۸۰۶	۰/۰۸۴۶	-۰/۲۵۰۱	۰/۰۲۵۱	۱/۲۴۲
راجاراتنام (۱۹۸۲)	d_s/h_j	۰/۰۵۸۷	۰/۰۶۲۲	۰/۲۰۹۷	۰/۰۲۱۹	۰/۷۸۹
	r_o/h_j	۰/۱۱۴۱	۰/۱۱۸۹	۰/۲۶۷۹	۰/۰۳۶۶	۰/۷۳۲
آدربیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶)	d_s/h_j	۰/۰۳۶۳	۰/۰۴۵۸	۰/۰۴۱۷	۰/۰۲۹۲	۰/۹۰۱
	r_o/h_j	۰/۱۳۷۴	۰/۱۹۵	۰/۲۸۴۸	۰/۰۴۸۶	۰/۶۶۹

مقایسه شیب خط برازش داده شده در جدول (۳) از بین نتایج حاصل از روابط (۱۰) و (۱۱) در تخمین پارامترهای (d_s/h_j) و (r_o/h_j) و همچنین ضریب وزن باقیمانده در مقابل تحقیقات پیشین گویای این مطلب است که قطر مصالح و رقوم نصب جت تأثیر به‌سزایی در خروجی تحقیقات مختلف ایفا نموده و به نوعی می‌توان چنین بیان کرد که پارامتر فرسایش به‌طور مطلق قادر به نرمال سازی اثر پارامترهای قطر دانه‌بندی مصالح، رقوم نصب جت و سرعت جریان خروجی از نازل نمی‌باشد.



شکل ۱۳- تغییرات عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_j) در مقابل پارامتر فرسایش حاصل از ترکیب مطالعات پیشین و تحقیق حاضر



شکل ١٤- تغییرات شعاع نسبی آبشستگی (r_o/h_j) در مقابل پارامتر فرسایش حاصل از ترکیب مطالعات پیشین و تحقیق حاضر

لذا به منظور توسعه مرزهای علوم مرتبط با تحقیق حاضر از ترکیب نتایج تحقیق حاضر با کلیه‌ی داده‌های آزمایشگاهی محققین پیشین که با دانه بندی متفاوتی به اجرا درآمده، تلاش گردید تا نسبت به ارائه روابط عمومی برای تخمین ابعاد حفره آبشستگی مبادرت ورزیده شود.

در این راستا از نتایج آزمایشگاهی کلارک (۱۹۶۲)، وستریچ و کوبس(۱۹۷۳)، راجاراتنام(۱۹۸۲)، آدربیگب و راجارتنام(۱۹۹۶) و لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف) استفاده گردید. تغییرات پارامتر عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_j) و شعاع نسبی آبشستگی (r_o/h_j) در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به‌تصویر کشیده شده‌اند.

روابط (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب از بین کلیه نتایج نمایش داده شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) برای تخمین عمق و شعاع نسبی حفره آبشستگی برازش داده شد. تجزیه و تحلیل آماری روابط (۱۳) و (۱۴) نشان دهنده آن است که این روابط دارای طول از مبداء ی تقریبا یکسان و معادل ۰/۱ می‌باشند.

$$d_s/h_j = 1.233 Ec^{0.0886} - 1 \qquad (۱۳)$$

$$r_o/h_j = 1.378 Ec^{0.1573} - 1 \qquad (۱۴)$$

تحلیل آماری خطای روابط (۱۳) و (۱۴) در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول ٤-تحلیل آماری خطای روابط (۱۳) و (١٤)

پارامتر	d_s/h_j	r_o/h_j
میانگین خطای مطلق	۰/۰۳۴	۰/۰۸۲۸
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۰۴۴۹	۰/۱۰۵۲
ضریب وزن باقیمانده	۰/۰۰۰۵	-۰/۰۰۱۵
خطای استاندارد تخمین	۰/۰۳۹۹	۰/۰۸۵۶
ضریب تعیین	۰/۸۰۲	۰/۶۸۳

به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر روابط عمومی معرفی شده در تخمین عمق و شعاع نسبی حفره آبشستگی، نسبت به تحلیل حساسیت روابط (۱۳) و (۱۴) اقدام گردید. برای این منظور ابتدا تعدادی از آزمایش‌ها که از شاخص تطبیق مناسبی نسبت به رابطه برازش شده برخوردار هستند انتخاب و مقادیر پارامترهای (V_j)، (D_{50}) و (h_j) در آنها به میزان ۲۰ ± درصد نمو داده شده و نتیجه این تغییرات بر عملکرد روابط (۱۳) و (۱۴) در تخمین پارامترهای نسبی (d_s/h_j) و (r_o/h_j) مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نمونه‌های از تحلیل حساسیت صورت گرفته را در یکی از آزمون‌ها با متوسط قطر مصالح ۷/۱۴ میلی‌متر، سرعت جت ۵/۰۴ متر بر ثانیه و رقوم نصب جت ۲۴ سانتی‌متر تحت پارامتر فرسایش ۱/۵۴۵ را نشان می‌دهد.

خاطر نشان می‌سازد که تحلیل حساسیت در چندین مرحله از آزمایش‌ها به اجرا در آمد ولی به‌دلیل تشابه نتایج صرفاً نمونه‌ای از آن در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به نمایش گذاشته شده است.

تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش ۲۰ درصدی در سرعت جت منجر به رشد ۷/۳۱ درصد در پارامتر (d_s/h_j) می‌گردد و در نقطه مقابل با کاهش ۲۰ درصدی سرعت جت، عمق نسبی آبشستگی با کاهشی معادل ۸/۷۹ درصد روبه‌رو خواهد بود. در تحلیلی مشابه در خصوص متوسط قطر مصالح آبرفتی می‌توان چنین بیان نمود که افزایش ۲۰ درصدی در (D_{50}) منجر به کاهش ۳/۶۱ درصدی در پارامتر (d_s/h_j) می‌گردد و در نقطه مقابل با کاهش ۲۰ درصدی (D_{50})، عمق آبشستگی با رشدی معادل ۴/۴۶ درصد مواجه خواهد بود.

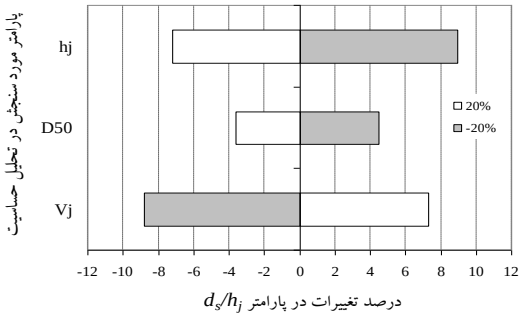
تغییرات اعمال شده در رقوم نصب جت از آهنگ تغییراتی مخالف سرعت جت برخوردار است. نتایج حاصل از کاهش ۲۰ درصد از رقوم نصب جت نسبت به رقوم تسطیح شده مصالح آبرفتی در آزمون مورد بحث نشان داد که پارامتر (d_s/h_j) با رشدی معادل ۸/۹۶ درصد مواجه است. در نقطه مقابل، با افزایش ۲۰ درصد به پارامتر (h_j) میزان عمق نسبی آبشستگی با کاهش ۷/۲ درصدی مواجه است.

متقابلاً تغییرات اعمال شده در سرعت جت، بر شعاع نسبی حفره آبشستگی نیز موثر است. در مرحله نمو افزایشی سرعت جت تا سر حد ۲۰ درصدِ سرعت مورد آزمون مشاهده گردید که پارامتر (r_o/h_j) تا ۹/۰۲ درصد از خود رشد نشان می‌دهد. در نقطه مقابل با کاهش ۲۰ درصدی از سرعت جت در آزمون مربوطه، شعاع نسبی آبشستگی با کاهشی معادل ۱۰/۷ درصد روبه‌رو خواهد بود. نتایج حاصل از تکرار تغییرات اعمال شده در (D_{50}) مصالح آبرفتی مشاهده گردید که افزایش ۲۰ درصدی در متوسط قطر مصالح منجر به کاهش ۴/۴۱ درصدی در پارامتر (r_o/h_j) می‌گردد و در نقطه مقابل با کاهش ۲۰ درصدی (D_{50})، عمق آبشستگی با رشدی معادل ۵/۴۹ درصد مواجه خواهد بود. تحلیل حساسیت رقوم نصب جت بر پارامتر (r_o/h_j) نشان داد که هنگامی که رقوم نصب جت تا ۲۰ درصد مقدار اولیه رشد یابد، میزان پارامتر (r_o/h_j) تا ۸/۷۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش ۲۰ درصدی در رقوم نصب جت، شعاع نسبی حفره آبشستگی ۱۱/۰۸ درصد افزایش می‌یابد.

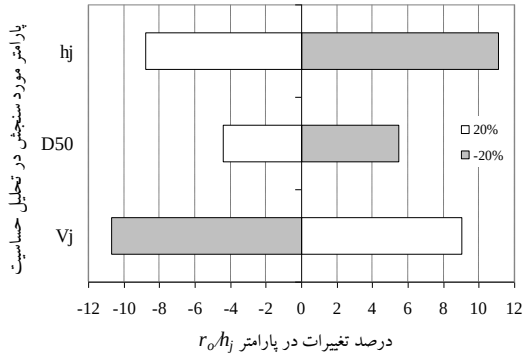
در یک ارزیابی کلی می‌توان چنین بیان نمود که اعمال ۲۰ ± درصد تغییرات در پارامترهای سرعت جت (V_j)، متوسط قطر دانه‌بندی مصالح (D_{50}) و رقوم نصب جت (h_j) در مجموع عمق نسبی آبشستگی (d_s/h_j) را به ترتیب ۱۶/۱ ، ۸/۰۷ و ۱۶/۱۶ درصد و شعاع نسبی آبشستگی (r_o/h_j) را به ترتیب ۱۹/۷۲، ۹/۹ و ۱۹/۸۵ درصد تحت تأثیر خود قرار می‌دهند.

علت این امر را می‌توان در شکل ظاهری رابطه ارائه شده برای پارامتر فرسایش جستجو نمود. علی‌رغم آنکه در روابط (۲) الی (۴) متوسط قطر مصالح (D_{50}) از توان ۰/۵ برخوردار است و این امر منجر به کاهش اثر این پارامتر در مقابل رقوم نصب جت و سرعت جت گشته است، ولی چولگی نتایج مندرج در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) حاکی از آن است که دانه‌بندی مصالح، همچنان عامل تعیین کننده پارامتر فرسایش بوده و انتظاری که از پارامتر فرسایش در راستای کاهش اثر عوامل مؤثر در پدیده آبشستگی می‌رفت را همچنان تأمین نمی‌نماید.

از طرفی با این علم و آگاهی که تشکیل لایه جوشنی در چاله آبشستگی می‌تواند عامل مؤثری بر تعیین ابعاد حفره آبشستگی گردد ولی به‌دلیل عدم وجود اطلاعات کافی در خصوص (D_{90}) ذرات مورد استفاده در تحقیقات پیشین امکان جایگزینی این پارامتر به جای (D_{50}) در رابطه پارامتر فرسایش میسر نگردید و احتمال آن می‌رود که این جایگزینی منجر به کاهش چولگی مورد اشاره در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و ایجاد یک وحدت رویه بین نتایج این تحقیق و تحقیقات پیشین گردد.



شکل ۱۵-تحلیل حساسیت پارامتر (d_s/h_j) در مقابل پارامترهای (V_j) ، (D_{50}) و (h_j)



شکل ۱۶-تحلیل حساسیت پارامتر (L_s/h_j) در مقابل پارامترهای (V_j) ، (D_{50}) و (h_j)

نتیجه گیری

تحقیق حاضر به‌منظور بررسی آزمایشگاهی تخمین مشخصات ابعاد حفره آبشستگی استاتیکی درون حوضچه استغراق تحت جت قائم دایره‌ای مستغرق انجام شده است. تفاوت عمده مشخصات تحقیق حاضر را با تحقیقات پیشین، می‌توان در قطر مصالح آبرفتی مورد استفاده در حوضچه استغراق و سرعت جریان خروجی از نازل جستجو کرد. عمده نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به شرح زیر بیان نمود :

به‌منظور تحلیل کلی نتایج و با ترکیب ۸۴ مرحله آزمایشگاهی روابطی بدون بعد برای تخمین ابعاد نسبی حفره آبشستگی ارائه گردید. تغییرات عمق نسبی آبشستگی در مقابل پارامتر فرسایش از شیب ۶/۶ درصدی برخوردار است. همچنین تغییرات شعاع نسبی آبشستگی در مقابل این پارامتر دارای شیب ۹/۴۲ درصدی می‌باشد و در نهایت حجم نسبی آبشستگی دارای شیب ۵/۳۴ در مقابل پارامتر فرسایش می‌باشد.

مقادیر عمق نسبی، شعاع نسبی و حجم نسبی آبشستگی تخمین زده شده توسط روابط پیشنهادی تحقیق حاضر در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی به‌ترتیب دارای ضرایب تعیین ۰/۸۲۷، ۰/۸۶۷ و ۰/۸۱ می‌باشد. همچنین این روابط بترتیب دارای ریشه میانگین مربعات خطایی معادل ۰/۰۳۲۸، ۰/۰۳۱۷، ۰/۰۰۸۳ می‌باشند.

مهمترین دست‌آورد این تحقیق از ترکیب نتایج مشاهداتی آن با تحقیقات کلارک (۱۹۶۲)، راجارتنام (۱۹۸۲) و آدربیگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) حاصل شده است. معرفی روابط عمومی گویای این مطلب است که قطر مصالح و رقوم نصب جت تأثیر به‌سزایی در خروجی تحقیقات مختلف ایفا نموده و به نوعی می‌توان چنین بیان کرد که پارامتر فرسایش به‌طور مطلق قادر به نرمال سازی اثر پارامترهای قطر دانه‌بندی مصالح، رقوم نصب جت و سرعت جریان خروجی از نازل نمی‌باشد. علت این امر را می‌توان در تشکیل لایه جوشنی در چاله آبشستگی جستجو نمود.

آنالیز حساسیت صورت گرفته بر روابط معرفی شده در این تحقیق نشان داد که اعمال ۲۰ ± درصد تغییر بترتیب در پارامترهای سرعت جت (V_j)، متوسط قطر دانه‌بندی مصالح (D_{50}) و رقوم نصب جت (h_j) در مجموع عمق نسبی آبشستگی d_s/h_j را به ترتیب ۱۶/۱ ، ۸/۰۷ و ۱۶/۱۶ درصد تحت تاثیر قرار می‌دهد. آنالیز مشابه صورت گرفته در خصوص بررسی اثر تغییر ۲۰ ± درصد در پارامترهای (V_j) ، (D_{50}) و (h_j) حاکی از آن است که شعاع نسبی آبشستگی (r_o/h_j) در مجموع به ترتیب ۱۹/۷۲، ۹/۹ و ۱۹/۸۵ درصد تغییر خواهد نمود. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حاکی از آن است که سرعت جت و رقوم نصب جت اثری دوچندان نسبت به قطر مصالح در تعیین پارامترهای (d_s/h_j) و (r_o/h_j) ایفا می‌نماید.

سپاسگزاری

بدینوسیله نگارندگان از دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفـول بـه پاس تأمین منابع مالی و فراهم آوردن امکان اسـتفاده از آزمایشـگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه گروه مهندسی عمران کمال تشکر را دارند.

منابع

۱- ارمغانی، ا.، لشکرآرا، ب.، آخوندعلی، ع.م. و ع. لشکرآرا. ۱۳۹۴. مقایسه مشخصات حفره آبشستگی پایین‌دست جت دایره‌ای مستغرق تحت زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه، مجله پژوهش آب ایران، ۹(۳): ۱۷۰-۱۶۳.

۲- لشکرآرا، ب.، لشکرآرا، ع. و م. فتحی مقدم. ۱۳۹۴ الف. تخمین ابعاد حفره آبشستگی تحت اثر جت قائم دایره‌ای مستغرق. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱(۷۸): ۵۰-۴۱.

۳- لشکرآرا، ب.، لشکرآرا، ع. و م. فتحی مقدم. ۱۳۹۴ ب. بررسی آزمایشگاهی اثر هوادهی به جت‌های قائم بر ابعاد حفره آبشستگی. نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۷(۱): ۷۶-۶۷.

4- Aderibigbe, O. and N. Rajaratnam. 1996. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. Journal of Hydraulic Research, 34(1): 19-33.

5- Ansari, S.A., Kothyari, U.C. and K.G.R. Raju. 2003. Influence of cohesion on scour under submerged circular vertical jets. Journal of hydraulic engineering,129(12): 1014-1019.

6- Breusers, H. and A. Raudkivi. 1991. Scouring, hydraulic structures design manual. IAHR, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, p.143.

7- Clarke, F.R.W. 1962. The action of submerged jets on moveable material, Master Thesis, Department of Civil Engineering, Imperial College, London.

8- Chakravarti, A., Jain R.K. and U.C. Kothyari. 2014. Scour under submerged circular vertical jets in cohesionless sediments. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 20(1):32-37.

9- Doddiah, D., Albertson M.L. and R.A. Thomas. 1953. Scour from jets. Proceedings of the Minnesota International Hydraulic Convention, Minneapolis, pp 161-169.

10- Kobus, H., Leister P. and B. Westrich. 1979. Flow field and scouring effects of steady and pulsating jets impinging on a movable bed. Journal of Hydraulic Research, 17(3): 175-192.

11- Mih, W.C. and J. Kabir. 1983. Impingement of water jets on nonuniform streambed. Journal of Hydraulic Engineering, 109(4): 536-548.

12- Rajaratnam, N. 1982. Erosion by submerged circular jets. Journal of the Hydraulics Division, 108(2): 262-267.

13- Rajaratnam, N. and S. Beltaos. 1977. Erosion by impinging circular turbulent jets. Journal of the Hydraulics Division, 103(10): 1191-1205.

14- Rajaratnam, N. and K. Mazurek. 2006. An experimental study of sand deposition from sediment laden water jets. Journal of Hydraulic Research, 44(4): 560-566.

15- Sarma, K.V.N. and R. Sivasankar. 1967. Scour under vertical circular jets, Journal of The Institution of Engineers (India), 48(3): 568-579.

16- Westrich, B. and H. Kobus. 1973. Erosion of a Uniform Sand Bed by Continuous and Pulsating Jets" the 15th IAHR Congress, Istanbul, Turkey, (1): A13.1-A13.8.

17- Yeh, P.H., Chang, K.A., Henriksen, J., Edge, B., Chang, P., Silver, A. and A. Vargas. 2009. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets. Ocean Engineering, 36(3): 248-255.