

## اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبشستگی در حوضچه استغراق

بابک لشکرآرا<sup>۱\*</sup>، ایراندخت دهقانی<sup>۲</sup> و محمد ذاکر مشفق<sup>۳</sup>

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

<sup>۲</sup> - دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

<sup>۳</sup> - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۹

### 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 ۴/۰۶، ۷/۱۴ و ۸/۷۳ میلی‌متر استفاده شده است. رقوم نصب جت نسبت به سطح تسطیح شده مصالح کف حوضچه استغراق، ارتفاع‌های ۲۴، ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی‌متر را تجربه نموده است. سرعت جریان خروجی از نازل حدوداً 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 به‌سزایی 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<sup>1\*</sup>, I. Dehghani<sup>2</sup> and M. Zakermoftegh<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> - Assistant Professor, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

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

<sup>3</sup> - 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.

لشکر آرا و همکاران: اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبستنگی...

### مقدمه

لشکر آرا و همکاران (۱۳۹۴ الف) به بررسی ابعاد حفره آبستنگی 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 و طول نسبی متعادل شده آبستنگی در مقابل عدد فرود جت در حوضچه استغراق، با افزایش عدد فرود جت، افزایش می‌یابد. از طرفی نتایج تحقیقات آنان نشان می‌دهد که ۰/۳۳ درصدی در مابه‌التفاوت عمق نسبی آبستنگی دینامیکی و استاتیکی خواهد شد.

لشکر آرا و همکاران (۱۳۹۴ ب) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی نظیر میزان اختلاط هوا و عمق پایاب بر ابعاد حفره آبستنگی ناشی از جت‌های قائم مستغرق پرداختند. در این تحقیق با حفظ شرایط هیدرولیکی یکسان، الگوی حفره آبستنگی که تحت شرایط هوادهی و بدون هوادهی ایجاد شده بود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که غلظت هوا در میزان ابعاد حفره آبستنگی مؤثر است و عمق آبستنگی 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 آبستنگی نخواهد داشت.

ارمغانی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای عمق پایاب، سرعت جت و زاویه جت بر ابعاد حفره آبستنگی 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 آبستنگی  $(d_s/h_{TV})$  و برآمدگی نسبی رسوبات  $(d_m/h_{TV})$  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 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 آبستنگی 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 آبستنگی مورد ارزیابی قرار داده است.

آبستنگی 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 آبستنگی 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 آبستنگی بستر آنها همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. به طور کلی فرآیند استهلاک، در این گونه 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<sup>۱</sup> (۱۹۵۳)، راجاراتنام<sup>۲</sup> (۱۹۸۲)، راجاراتنام و بلتوس<sup>۳</sup> (۱۹۷۷)، میه و کبیر<sup>۴</sup> (۱۹۸۳)، بروشور و رادکیوی<sup>۵</sup> (۱۹۹۱)، سارما و سیواسانکار<sup>۶</sup> (۱۹۶۷)، انصاری و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۳)، آدریبیگ و راجاراتنام<sup>۸</sup> (۱۹۹۶) و چاکاوارتی و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۴) شاخص‌های فرسایش مصالح غیر چسبنده در حوضچه استغراق تحت اثر جت مستغرق دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که ابعاد چاله آبستنگی تحت اثر جت‌های مستغرق به ارتفاع جت تا سطح مصالح وابسته است. راجاراتنام و مازورک (۲۰۰۶) در تحقیقات خود نشان دادند که پروفیل انباشت رسوبات در خارج حفره آبستنگی اگر به صورت بی بعد نمایش داده شوند به همدیگر شبیه خواهند بود.

یه و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۹) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از نتایج آدریبیگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) و روابط تجربی دیگر نشان دادند که حداکثر عمق وشعاع چاله آبستنگی و ارتفاع انباشت رسوبات خارج از چاله آبستنگی 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، آبستنگی آغاز شده و ابتدا جت با زاویه حدود ۱۸۰ درجه به اطراف منحرف می‌شود. پس از آن توسعه و افزایش عمق آبستنگی باعث افزایش فاصله برخورد جت به بستر (ارتفاع ریزش جت) شده و جت از مرز حفره آبستنگی تبعیت کرده و با زاویه انحراف کمتری به اطراف منحرف می‌شود. در جت عمودی شکل حفره آبستنگی در پلان متقارن بوده و رسوبات خارج شده از حفره آبستنگی در اطراف حفره ته نشین می‌شود.

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

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

$$f(V_j, d_n, B, h_w, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s - \rho_w, d_s, r_0, \nabla) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $V_j$ : سرعت خروجی از نازل،  $d_n$ : قطر نازل،  $B$ : عرض حوضچه رسوب،  $h_w$ : عمق پایاب،  $h_j$ : ارتفاع نصب جت نسبت به سطح مصالح بستر،  $D_{50}$ : قطر متوسط ذرات بستر،  $g$ : شتاب ثقل،  $\mu$ : لزجت سیال،  $\rho_w$ : جرم مخصوص آب،  $\rho_s - \rho_w$ : جرم مخصوص مستغرق ذرات رسوب،  $d_s$ : حداکثر عمق آبستنگی متعادل شده،  $r_0$ : شعاع توسعه آبستنگی و  $\nabla$ : حجم چاله آبستنگی می باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن پارامترهای  $\rho, V_j, h_j$  به عنوان متغیرهای تکراری، معادله های بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره آبستنگی در حوضچه استغراق را می توان به صورت روابط (۲) الی (۴) نوشت:

$$\frac{d_s}{h_j} = f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}}\right) \quad (2)$$

$$\frac{r_0}{h_j} = f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\nabla}{h_j^3} = f\left(\frac{d_n}{h_j}, \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}}\right) \quad (4)$$

در روابط فوق پارامتر  $V_j/\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}$  عدد فرود دنسیومتریکی نامیده شد. لازم به توضیح است که از حاصل ضرب پارامتر عدد فرود دنسیومتریکی در پارامتر  $d_n/h_j$ ، پارامتر جدیدی به صورت  $V_j/\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}} \times d_n/h_j$  حاصل می شود که در تحقیقات آدریگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) از آن تحت عنوان پارامتر فرسایش<sup>۱</sup> یاد شده است و با نماد  $Ec$  نمایش داده می شود. پس از انجام تحلیل ابعادی و تعیین شکل عمومی معادله های حاکم بر فضای تحقیق، ضرائب روابط مذکور با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین شدند. برای ارزیابی نتایج روابط پیشنهادی از تحلیل آماری بهره گیری شد. توابع خطای مهمی که جهت ارزیابی نتایج حاصل از روابط پیشنهادی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند به شرح زیر می باشند:

میانگین خطای مطلق

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (5)$$

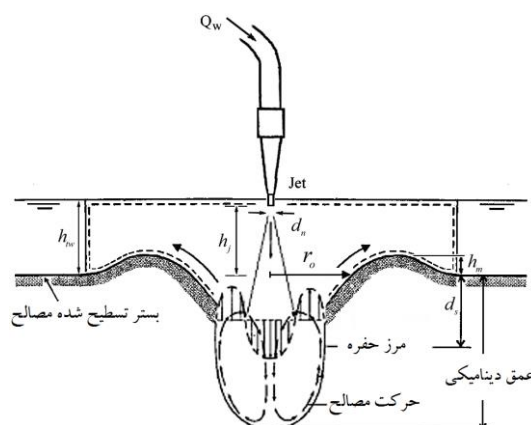
در این تحقیق برای شبیه سازی مصالح بستر در آزمایشگاه از مصالح شنی و با سه قطر مختلف ۴/۰۶، ۷/۱۴ و ۸/۷۳ میلی متر استفاده شده است. به منظور شبیه سازی حوضچه استغراق از یک محفظه با ابعاد ۱/۶ متر طول، یک متر عرض و با عمق یک متر استفاده گردید. این حوضچه تا عمق ۵۰ سانتی متر با مصالح پوشیده شد. نازل خروجی جت با مقطع دایره ای و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به بستر آبرفتی نصب گردید تا شرایط شبیه سازی جت قائم فراهم گردد. به منظور ارزیابی اثر ارتفاع نصب جت بر الگوی فرسایش در حوضچه استغراق، رقوم نصب جت در ارتفاع های ۲۴، ۳۵/۵ و ۴۴ سانتی متر 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 سانتی متر در زیر آب قرار گرفت. در نتیجه تمام شبیه سازی ها برای فراهم آوردن مراحل آبستنگی تحت جت قائم دایره ای مستغرق در آزمایشگاه فراهم گردید. برای برآورد زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش ها، عمق دینامیکی در زمان های مختلف اندازه گیری گردید. مقایسه تغییرات اعماق دینامیک در مقابل زمان و تثبیت تغییرات در عمق آبستنگی در زمان های بیشتر از ۱۲۰ دقیقه گویای این مطلب است که اعمال زمان ۱۲۰ دقیقه در آزمایش ها می تواند به عنوان 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 نمود داده شد. جهت اندازه گیری شدت جریان از یک دستگاه کنتور الکترومغناطیس با دقت  $\pm 0.2$  تا  $\pm 0.5$  درصد نسبت به مقیاس اصلی استفاده گردید. جدول (۱) محدوده تغییر پارامترهای مؤثر بر آبستنگی در تحقیق حاضر و مطالعه محققین پیشین را در بر می گیرد. جهت انجام آزمایش ها 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 بررسی های به عمل آمده و غربالگری داده ها در سطح اطمینان  $\mu \pm 3\sigma$  در سناریوی اول ۱۸ مرحله آزمون، در سناریوی دوم ۲۷ مرحله و در سناریوی سوم ۳۹ مرحله از آزمون های انجام شده مناسب تحلیل ارزیابی شدند. بنابراین تحلیل نتایج بر روی ۸۴ مرحله از آزمایش ها صورت پذیرفت. برای تعیین پروفیل بستر از متر لیزری مدل Leica D8 بهره گیری شد. پس از ترسیم پروفیل چاله فرسایش نسبت به تعیین ابعاد چاله از جمله عمق، شعاع و حجم آبستنگی اقدام گردید.

لشکر آرا و همکاران: اندر کنش پارامتر فرسایش و الگوی آبستگي...

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
آدریگب و راجاراتنام (۱۹۹۶)	۰/۸۸ - ۲/۴۲	۴ - ۱۲	۲/۶۵ - ۴/۴۵	۰/۰۴ - 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
لشکر آرا 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 آبستگي

خطای استاندارد تخمین

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

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

ریشه میانگین مربعات خطا

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

ضریب وزن باقیمانده

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

ضریب تعیین

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

### 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 به دلیل آشفته‌گی 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

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.

به منظور ارضاء شرایط آستانه حدی روابط خطوط برآزش 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 برآزش داده شده از بین نتایج عمق نسبی آبستگي  $(d_s/h_j)$ ، شعاع نسبی آبستگي  $(r_0/h_j)$ ، حجم نسبی آبستگي  $(\nabla/h_j^3)$  در مقابل پارامتر فرسایش به ترتیب توسط روابط (۱۰) الی (۱۲) نمایش داده شده‌اند:

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.2277Ec^{0.0857} - 1 \quad (10)$$

$$\frac{r_0}{h_j} = 1.3257Ec^{0.1198} - 1 \quad (11)$$

$$\frac{\nabla}{h_j^3} = (0.0035 + Ec^{1.6}) / (43.2215 + Ec) \quad (12)$$

نحوه برآزش روابط (۱۰) الی (۱۲) از بین نتایج مشاهداتی در شکل‌های (۵) الی (۷) 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 (۱۰) الی (۱۲) محاسبه و نتایج آنها در جدول ۲ نشان داده شده است.

این روابط به ترتیب دارای ضرایب تعیین  $0/827$ ،  $0/867$  و  $0/81$  می‌باشند. همچنین این روابط به ترتیب دارای ریشه میانگین مربعات خطایی معادل  $0/0328$ ،  $0/0317$ ،  $0/0083$  می‌باشند.

به صورت بار بستر و بار معلق جابجا می‌شوند. در ابتدای آبستگي، 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، تقریباً غیر ممکن بوده و این حرکت به صورت کاملاً 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 آبستگي کاسته شده و پروفیل بستر به حالت پایدار می‌رسد. نمونه‌هایی از نتایج تشکیل حفره آبستگي 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 دو پارامتر دانه بندی مصالح و عمق نصب جت بر ابعاد حفره آبستگي 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 آبستگي  $(d_s/h_j)$ ، شعاع نسبی آبستگي  $(r_0/h_j)$ ، حجم نسبی آبستگي  $(\nabla/h_j^3)$  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 به گونه‌ای استخراج شوند که امکان صحت سنجی نتایج آنها فراهم گردد. لذا عملیات واسنجی به دلیل 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 به صورت تصادفی برای واسنجی کنار گذاشته شدند و آموزش روابط توسط ۷۲ مرحله



شکل ۲- شکل چاله آبستگي با ارتفاع نصب جت ۴۴ سانتی متر و دانه بندی مصالح ۴/۰۶ میلی متر

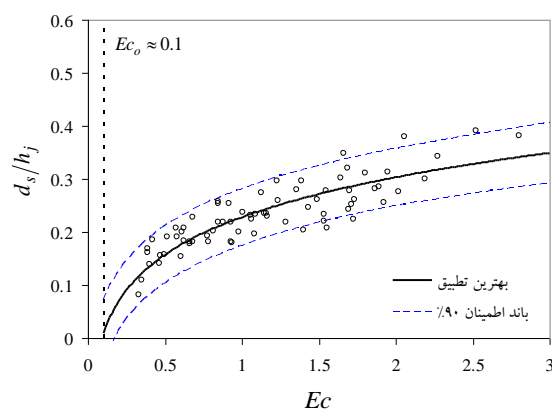
لشکر آرا و همکاران: اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبستگی...



شکل ۳- چاله آبستگی با ارتفاع نصب جت ۳۵/۵ سانتی متر و دانه بندی مصالح ۷/۱۴ میلی متر



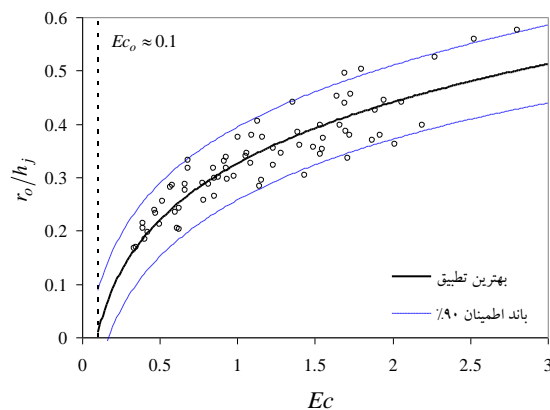
شکل ۴- چاله آبستگی با ارتفاع نصب جت ۲۴ سانتی متر و دانه بندی مصالح ۸/۷۳ میلی متر



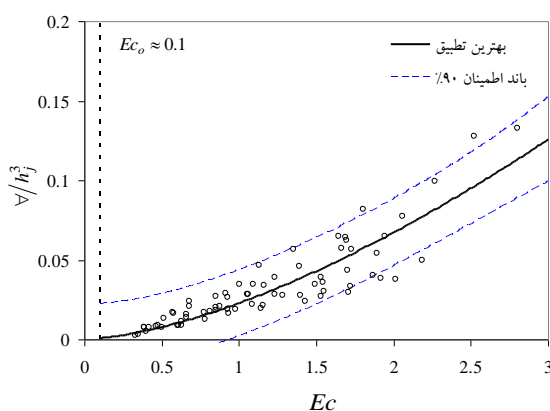
شکل ۵- تغییرات عمق نسبی آبستگی در مقابل پارامتر فرسایش

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

مرحله آزمون			مرحله آموزش			پارامتر
$\sqrt[3]{V}/h_j^3$	$r/h_j$	$d_s/h_j$	$\sqrt[3]{V}/h_j^3$	$r/h_j$	$d_s/h_j$	
۰/۰۰۶۵	۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۷۵	۰/۰۰۸۶	۰/۰۳۲۲	۰/۰۲۵۵	میانگین خطای مطلق
۰/۰۰۸۳	۰/۰۳۱۷	۰/۰۳۲۸	۰/۰۱۱۶	۰/۰۴۰۳	۰/۰۳۱۵	ریشه میانگین مربعات خطا
-۰/۰۰۵۷	-۰/۰۰۹۴	۰/۰۴۹۶	۰/۰۱۳۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۳۶	ضریب وزن باقیمانده
۰/۰۰۹۱	۰/۰۲۳۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۰۸	۰/۰۳۸	۰/۰۲۸۹	خطای استاندارد تخمین
۰/۸۱	۰/۸۶۷	۰/۸۳۷	۰/۷۹۷	۰/۷۹۹	۰/۷۳۷	ضریب تعیین
۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۵	۰/۹۳۴۹	۰/۹۲۱۶	۰/۹۸۶۱	۰/۹۸۲۵	شیب خط بین مشاهدات و تخمین



شکل ۶- تغییرات شعاع نسبی آبستگی در مقابل پارامتر فرسایش



شکل ۷- تغییرات حجم نسبی آبستگی در مقابل پارامتر فرسایش

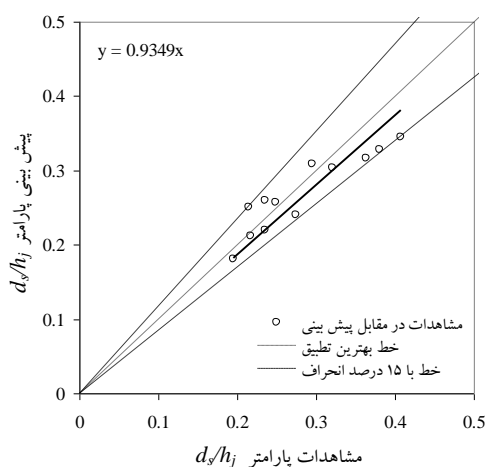
به منظور برآورد شرایط آستانه حرکت (شرایطی که نیروی ناشی از جت بر وزن مستغرق ذرات غلبه می‌کند) حرکت اولین ذرات بستر مشاهده گردید و با ثبت دبی جریان و دیگر پارامترهای دخیل در پدیده آبستگی این شرایط تخمین زده شد. همچنین روابط مذکور برای برآورد این مقدار تجزیه و تحلیل گردید. بررسی‌های انجام شده گویای این مطلب است که هر دو 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 ۰/۸ برخوردارند. وجود وحدت رویه در آغاز آستانه حدی روابط پیشنهادی، می‌تواند گواهی بر صحت نحوه برازش منحنی‌ها باشد. به منظور صحت سنجی توانایی نتایج روابط (۱۰) الی (۱۲) در تخمین پارامترهای  $(d_s/h_j)$ ،  $(r_o/h_j)$  و  $(V/h_j^3)$  از ۲۰ درصد باقیمانده 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. به منظور مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین از نتایج تحقیقات لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف)، راجارتنام (۱۹۸۲) و آدریگب و راجارتنام (۱۹۹۶)

در شکل (۸) نشان می‌دهد که رابطه (۱۰) در پیش بینی عمق نسبی آبستگی 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  $(V/h_j^3)$  در شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان دریافت که روابط (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب با خطای متوسط ۰/۵ و ۰/۸ درصد قادرند تا شعاع نسبی و حجم نسبی چاله آبستگی را پیش‌بینی نمایند. علت اختلاف دقت رابطه (۱۰) را در تخمین عمق نسبی آبستگی در مقایسه با دقت روابط (۱۱) و (۱۲) می‌توان در نحوه روند آزمایش‌ها ریشه‌یابی نمود. پس از سپری شدن زمان آزمایش و بستن شیر جریان ورودی به نازل، ابتدا حفره حاصل از آبستگی دینامیکی شروع به پر شدن می‌نماید و این امر به نوعی منجر به پر هم خوردن نسبی عمق آبستگی 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 آبستگی  $(d_s/h_j)$  و شعاع بدون بعد آبستگی  $(r_o/h_j)$  در مقابل نتایج حاصل از تحقیقات

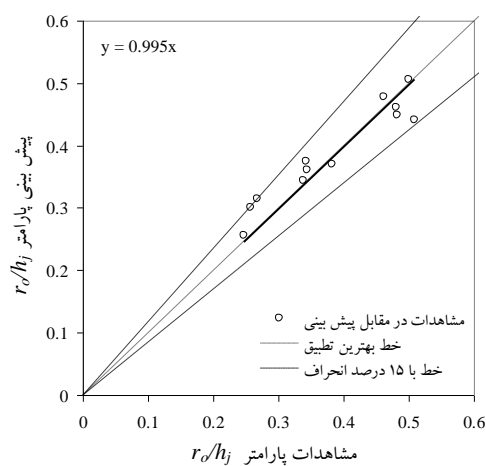
لشکر آرا و همکاران: اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبستنگی...

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

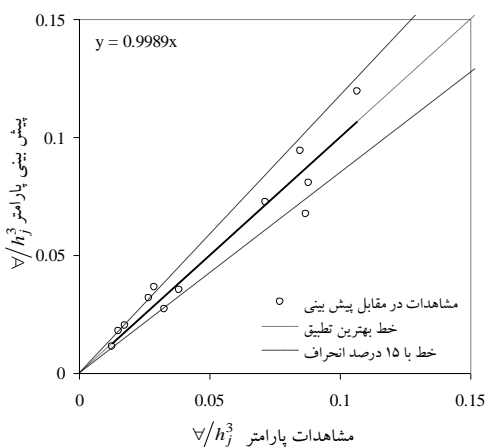
پیشین نشان می‌دهند. نتایج به‌دست آمده از تجزیه و تحلیل آماری  
 بین نتایج این تحقیق در مقابل نتایج تحقیقات لشکر آرا و همکاران



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

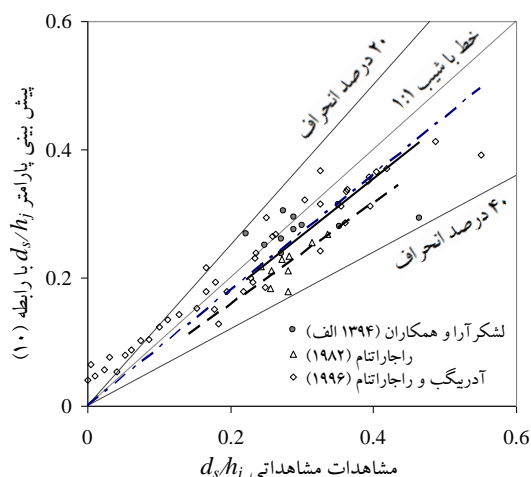


شکل ۹- نتایج رابطه (۱۱) در تخمین  $(r_s/h_j)$  در مقایسه با نتایج نظیر مشاهداتی

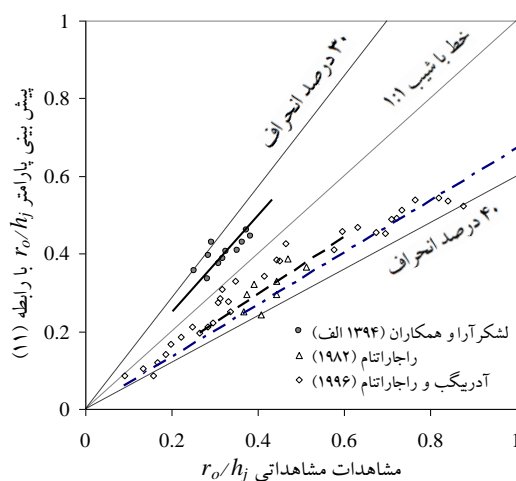


شکل ۱۰- نتایج رابطه (۱۲) در تخمین  $(\sqrt[3]{b/h_j^3})$  در مقایسه با نتایج نظیر مشاهداتی





شکل ۱۱- مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی محققین پیشین با مقادیر پیش بینی شده ( $d_s/h_j$ ) توسط رابطه (۱۰)



شکل ۱۲- مقایسه مشاهدات آزمایشگاهی محققین پیشین با مقادیر پیش بینی شده ( $r_o/h_j$ ) توسط رابطه (۱۱)

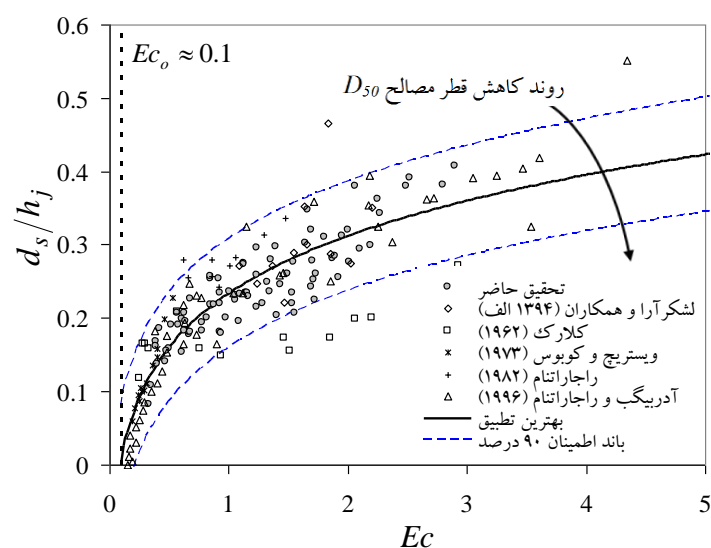
جدول ۳- توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج آزمایشگاهی محققین پیشین با روابط (۱۰) و (۱۱)

محققین پیشین	پارامتر	میانگین خطای مطلق	ریشه میانگین مربعات خطا	ضریب وزن باقیمانده	خطای استاندارد تخمین	ضریب 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
آدریگب 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

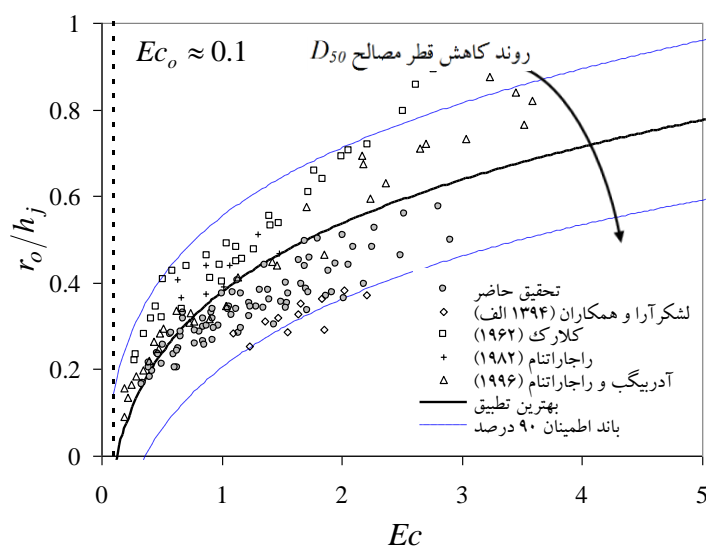
به سزایی در خروجی تحقیقات مختلف ایفا نموده و به نوعی می توان چنین بیان کرد که پارامتر فرسایش به طور مطلق قادر به نرمال سازی اثر پارامترهای قطر دانه بندی مصالح، رقوم نصب جت و سرعت جریان خروجی از نازل نمی باشد.

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

لشکرآرا و همکاران: اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبستگي...



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



شکل ۱۴- تغییرات شعاع نسبی آبستگي ( $r_o/h_j$ ) در مقابل پارامتر فرسایش حاصل از ترکیب مطالعات پیشین و تحقیق حاضر

روابط (۱۲) و (۱۳) به ترتیب از بین کلیه نتایج نمایش داده شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) برای تخمین عمق و شعاع نسبی حفره آبستگي برآزش داده شد. تجزیه و تحلیل آماری روابط (۱۳) و (۱۴) نشان دهنده آن است که این روابط دارای طول از مبدأ ی تقریباً یکسان و معادل ۰/۱ می‌باشند.

$$d_s/h_j = 1.233 Ec^{0.0886} - 1 \quad (13)$$

$$r_o/h_j = 1.378 Ec^{0.1573} - 1 \quad (14)$$

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

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

در این راستا از نتایج آزمایشگاهی کلارک (۱۹۶۲)، وستریج و کوبس (۱۹۷۳)، راجاراتنام (۱۹۸۲)، آدریگب و راجاراتنام (۱۹۹۶) و لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴ الف) استفاده گردید. تغییرات پارامتر عمق نسبی آبستگي ( $d_s/h_j$ ) و شعاع نسبی آبستگي ( $r_o/h_j$ ) در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به تصویر کشیده شده‌اند.

## جدول ۴-تحلیل آماری خطای روابط (۱۳) و (۱۴)

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

کاهش 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 آبستگي 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 آبستگي ۱۱/۰۸ درصد افزایش می‌یابد.

در یک ارزیابی کلی می‌توان چنین بیان نمود که اعمال  $\pm 20\%$  درصد تغییرات در پارامترهای سرعت جت  $(V_j)$ ، متوسط قطر دانه‌بندی مصالح  $(D_{50})$  و رقوم نصب جت  $(h_j)$  در مجموع عمق نسبی آبستگي  $(d_s/h_j)$  را به ترتیب ۱۶/۱، ۸/۰۷ و ۱۶/۱۶ درصد و شعاع نسبی آبستگي  $(r_o/h_j)$  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 راستای کاهش اثر عوامل مؤثر در پدیده آبستگي می‌رفت را همچنان تأمین نمی‌نماید.

از طرفی با این علم و آگاهی که تشکیل لایه جوشنی در چاله آبستگي می‌تواند عامل مؤثری بر تعیین ابعاد حفره آبستگي گردد ولی به دلیل 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.

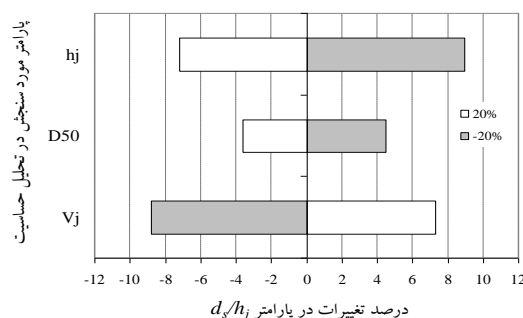
به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر روابط عمومی معرفی شده در تخمین عمق و شعاع نسبی حفره آبستگي، نسبت به تحلیل حساسیت روابط (۱۳) و (۱۴) اقدام گردید. برای این منظور ابتدا تعدادی از آزمایش‌ها که از شاخص تطبیق مناسبی نسبت به رابطه برازش شده برخوردار هستند انتخاب و مقادیر پارامترهای  $(V_j)$ ،  $(D_{50})$  و  $(h_j)$  در آنها به میزان  $\pm 20\%$  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 به دلیل 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 آبستگي با کاهش 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 آبستگي با رشدی معادل ۴/۴۶ درصد مواجه خواهد بود.

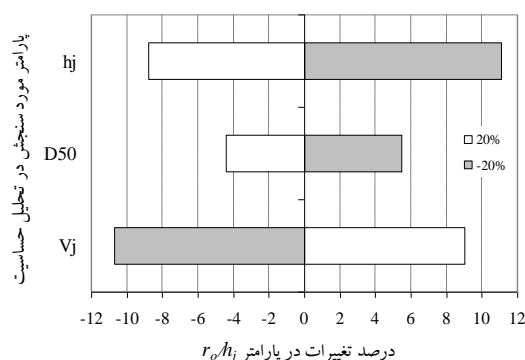
تغییرات اعمال شده در رقوم نصب جت از آهنگ تغییراتی مخالف سرعت جت برخوردار است. نتایج حاصل از کاهش ۲۰ درصدی از رقوم نصب جت نسبت به رقوم تسطیح شده مصالح آبرفتی در آزمون مورد بحث نشان داد که پارامتر  $(d_s/h_j)$  با رشدی معادل ۸/۹۶ درصد مواجه است. در نقطه مقابل، با افزایش ۲۰ درصدی پارامتر  $(h_j)$  میزان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

متقابلاً تغییرات اعمال شده در سرعت جت، بر شعاع نسبی حفره آبستگي نیز مؤثر است. در مرحله نمو افزایشی سرعت جت تا سر حد ۲۰ درصد 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 آبستگي با

لشکر آرا و همکاران: اندرکنش پارامتر فرسایش و الگوی آبستگي...



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  $(h_j)$

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 آبستگي جستجو نمود.

آنالیز حساسیت صورت گرفته بر روابط معرفی شده در این تحقیق نشان داد که اعمال  $\pm 20\%$  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 آبستگي  $d_s/h_j$  را به ترتیب  $16/1$ ،  $8/07$  و  $16/16$  درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد. آنالیز مشابه صورت گرفته در خصوص بررسی اثر تغییر  $\pm 20\%$  درصد در پارامترهای  $(V_j)$ ،  $(D_{50})$  و  $(h_j)$  حاکی از آن است که شعاع نسبی آبستگي  $(r_o/h_j)$  در مجموع به ترتیب  $19/72$ ،  $9/9$  و  $19/85$  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 می‌نمایند.

### نتیجه گیری

تحقیق حاضر به‌منظور بررسی آزمایشگاهی تخمین مشخصات ابعاد حفره آبستگي 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 آبستگي ارائه گردید. تغییرات عمق نسبی آبستگي در مقابل پارامتر فرسایش از شیب  $6/6$  درصدی برخوردار است. همچنین تغییرات شعاع نسبی آبستگي در مقابل این پارامتر دارای شیب  $9/42$  درصدی می‌باشد و در نهایت حجم نسبی آبستگي دارای شیب  $5/34$  در مقابل پارامتر فرسایش می‌باشد.

مقادیر عمق نسبی، شعاع نسبی و حجم نسبی آبستگي تخمین زده شده توسط روابط پیشنهادی تحقیق حاضر در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی به‌ترتیب دارای ضرایب تعیین  $0/867$ ،  $0/827$  و  $0/81$  می‌باشد. همچنین این روابط بترتیب دارای ریشه میانگین مربعات خطایی معادل  $0/328$ ،  $0/317$ ،  $0/083$  می‌باشند.

مهمترین دست‌آورد این تحقیق از ترکیب نتایج مشاهداتی آن با تحقیقات کلارک (۱۹۶۲)، راجاراتنام (۱۹۸۲) و آدریگب و

هیدرولیک و مهندسی رودخانه گروه مهندسی عمران کمال  
تشکر را دارند.

### سپاسگزارى

بدینوسیله نگارندگان از دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول به پاس تأمین منابع مالی و فراهم آوردن امکان استفاده از آزمایشگاه

### منابع

- ۱- ارمغانی، ا.، لشکرآرا، ب.، آخوندعلی، م.ع. و ع. لشکرآرا. ۱۳۹۴. مقایسه مشخصات حفره آبستگي پایین دست 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 آبستگي 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 آبستگي. نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۱(۲۷): 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., Kothiyari, 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. Kothiyari. 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 15<sup>th</sup> 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.