

روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق ناشی از برخورد جت قائم بر رسوبات غیر چسبنده

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

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

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

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

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۲۴

چکیده

تغییر در شکل بستر حوضچه‌ی استغراق، ناشی از برخورد جت جریان خروجی از سیستم‌های تخلیه سیلاب به عوامل متعددی وابسته است. در این میان می‌توان به عدد فرود جت، اندازه و نوع ذرات در بستر آبرفت، هندسه آبراهه و همچنین ارتفاع ریزش و عمق پایاب اشاره نمود. هدف از این پژوهش بررسی روند تغییرات شکل بستر حوضچه‌ی استغراق تحت اثر برخورد جت‌های قائم می‌باشد. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق از نوع غیر چسبنده درشت دانه می‌باشد. اندازه ذرات آن به گونه‌ای است که در فضای بین دو الک شماره‌های یک دوم و سه هشتم اینچ به تله می‌افتند. سناریوهای مورد آزمون در این تحقیق با تغییر در ارتفاع ریزش جت و همچنین تغییر در سرعت جریان خروجی از جت تدوین شده‌اند. بررسی روند تغییرات شکل حوضچه نشان داد که با افزایش عدد فرود جت، میزان عمق و طول نسبی متعادل شده حفره آبخستگی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع نصب جت، منجر به کاهش عمق دینامیکی آبخستگی می‌گردد.

کلید واژه‌ها: آبخستگی دینامیکی، آبخستگی استاتیکی، جت قائم، نازل، عدد فرود جت.

مقدمه

آبخستگی گسترش می‌یابد. در مرحله تثبیت روند تغییرات پروفیل بستر کاهش می‌یابد و دیواره پایین دست حفره آبخستگی، دست خوش تغییرات محسوس می‌شود. در مرحله تعادل تنها حرکت ذرات ممکن است درون حفره آبخستگی صورت گیرد به طوری که ذراتی که حرکت غلطی دارند از درون حفره آبخستگی خارج نمی‌شوند. در این مرحله با توجه به شرایط جریان ممکن است حتی جابه‌جایی ذرات نیز متوقف شود.

با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مطالعات هیدرودینامیکی عدم امکان بررسی تمام متغیرهای مؤثر به طور هم زمان در چنین تحقیقاتی، محققین با استفاده از تعداد مشخصی داده در شرایط خاص، روابطی را برای تخمین ابعاد پروفیل آبخستگی ارائه داده‌اند که اغلب آن‌ها به تعیین عمق تعادلی بیشترین آبخستگی در شرایط معینی از جریان آب و رسوب متمرکز بوده است. در حالی که تعداد معدودی از این مطالعات به مسأله تغییرات زمانی آبخستگی پرداخته شده است.

ذکر این نکته ضروری است که در طبیعت اندازه‌گیری عمق حفره آبخستگی بعد از وقوع سیلاب می‌تواند گمراه کننده باشد، زیرا حداکثر عمق آبخستگی معمولاً در زمان حداکثر سیلاب اتفاق می‌افتد و در خلال فروکش نمودن سیلاب قسمتی از حفره آبخستگی ممکن است

به جابه‌جایی ذرات توسط جریان آب از محل استقرار خود و حمل آن به مکان دیگر، اصطلاحاً آبخستگی گویند. به طور کلی آبخستگی در اثر اندرکنش نیروی محرک ناشی از جریان در راستای جدا شدن ذرات از بستر در مقابل نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن رسوبات در برابر حرکت آن‌ها ایجاد می‌شود. رسوبات موقعی به حرکت واداشته می‌شوند که نیروی محرک اعمال شده توسط جریان بر نیروهای مقاوم غلبه یابد.

بر اساس مطالعاتی که توسط بروسرز (۱۹۶۶)، دیتز (۱۹۶۹) و زنک (۱۹۷۸) انجام گرفته است، پدیده آبخستگی به چهار مرحله ابتدایی^۱، مرحله توسعه^۲، مرحله تثبیت^۳ و مرحله تعادل^۴ تقسیم‌بندی می‌شود (به نقل از بروسرز و رادکیوی^۵، ۱۹۹۱).

مرحله ابتدایی ظرفیت آبخستگی بالایی دارد و حفره آبخستگی در این مرحله ایجاد می‌شود. در مرحله توسعه، عمق و ابعاد حفره

- 1 - Initial Phase
- 2 - Development Phase
- 3 - Stabilization Phase
- 4 - Equilibrium Phase
- 5 - Breusers and Raudkivi

که در آن، (V_b) سرعت جت در سطح مصالح بستر، (ω) : سرعت سقوط ذرات بستر، (d_n) : قطر جت، (V_j) : سرعت جت در خروجی، (g) : شتاب ثقل، (D_{50}) : قطر متوسط ذرات بستر، (h_j) : ارتفاع ریزش جت و (G_s) : چگالی نسبی می‌باشد. بر اساس مطالعات ادربربیگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) جت‌های با انحراف زیاد تحت شرایط $1.5 < K < 3$ و $E_c < 0.35$ ایجاد می‌شوند. در این حالت حفره آبستگي کم عمقی ایجاد می‌شود و جت پس از برخورد به بستر، انحرافی بین زاویه ۹۰ تا $90 + \varphi$ خواهد داشت. در اینجا φ زاویه استقرار داخلی ذرات بستر می‌باشد. جت دیواره‌ای حاصل از انحراف جریان، مسیر حفره را تا تاج برآمدگی اطراف حفره طی می‌کند. جدایی جریان در لبه حفره بر اثر تغییر شکل بستر حاصل می‌شود که البته تأثیری بر آبستگي داخل حفره ندارد. مواد فرسایش یافته، پس از انحراف جت، ته نشین شده و به صورت بار بستر در جهت شعاعی به سمت بیرون حمل می‌شوند. شعاع فرسایش (r_o) که حداکثر فاصله حمل رسوب می‌باشد، با گذشت زمان تغییر زیادی نمی‌کند، ولی حداکثر عمق فرسایش با افزایش هر دو پارامتر فشار و زمان فرسایش، افزایش می‌یابد تا در نهایت به مقدار تعادل برسد. در این جت، شیب کناره‌های حفره آبستگي نسبت به پارامتر فشار یا پارامتر فرسایش بسیار حساس بوده و با افزایش این پارامترها مقدار آن افزایش می‌یابد. تحقیقات ادربربیگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) نشان داد که حفره آبستگي ناشی از جت‌های با انحراف زیاد دارای یک فرورفتگی عمیق در مرکز است و با یک سطح شیب‌دار به برآمدگی اطراف حفره وصل می‌شود. این شرایط هنگامی محقق می‌گردد که $14 < K < 6.5$ و $E_c > 0.35$ باشد. در این حالت، جت با زاویه‌ای بین $90 + \varphi$ و 180 درجه وابسته به مقادیر K و E_c تغییر جهت می‌دهد. این انحراف جت، مواد فرسایش یافته درون حفره را به صورت معلق به خارج حفره انتقال می‌دهد و در نتیجه ظرفیت انتقال جت در فواصل شعاعی بزرگ‌تر، کاهش یافته و ذرات روی کناره‌های داخلی حفره آبستگي ته‌نشین شده و به تدریج به سمت مرکز حفره لغزش نموده و دوباره توسط جریان از جای خود بلند می‌شوند.

در این نوع جت، جریان داخل حفره آبستگي به صورت دورانی است و ذرات را به صورت معلق در حفره آبستگي می‌چرخاند و پس از توقف جت، ذرات معلق در حفره ته‌نشین می‌شوند. بنابراین عمق آبستگي استاتیکی (عمق آبستگي پس از قطع جریان) کم‌تر از عمق آبستگي دینامیکی (عمق آبستگي در هنگام انجام آزمایش) است. در این حالت شیب اطراف حفره آبستگي تقریباً برابر با زاویه استقرار ذرات در حالت مستغرق است.

پر شود. کاهش عمق آبستگي ممکن است در اثر ته نشینی مصالح معلق شده در حفره آبستگي یا ریزش شیب‌های دیوار حفره آبستگي اتفاق افتد. در مطالعه‌های آزمایشگاهی معمولاً دو نوع آبستگي در نظر گرفته می‌شود که با عناوین آبستگي استاتیکی و آبستگي دینامیکی نامیده می‌شوند. معمولاً عمق آبستگي استاتیکی را عمق حفره در پایان آزمایش در نظر می‌گیرند که پس از ته نشینی احتمالی ذرات در حفره آبستگي به جای می‌ماند و عمق آبستگي دینامیکی، عمقی است که در هنگام آزمایش و قبل از ته‌نشین رسوبات در حفره آبستگي وجود دارد. شکل (۱) الگوهای جریان و نیم‌رخ بستر ناشی از آبستگي استاتیکی و دینامیکی نمایش داده شده است.

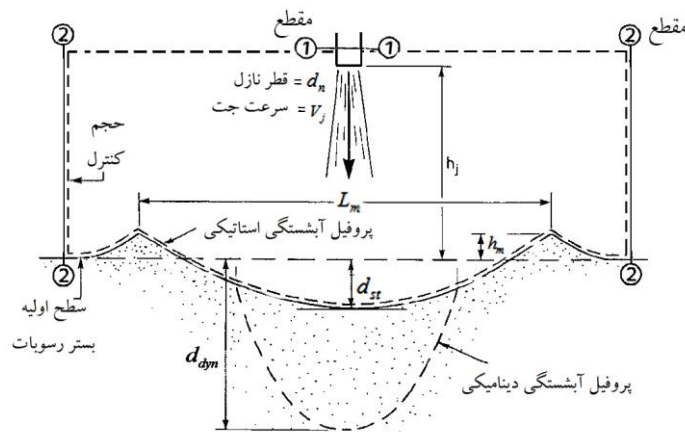
عمق پایاب یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در روند تغییرات فرم بستر در پایین دست جت‌ها می‌باشد و عامل اصلی ایجاد انواع دسته بندی جت‌های آزاد و مستغرق می‌گردد. در جت‌های آزاد، سیال مقداری از مسیر را در هوا و مقداری را در آب طی می‌کند تا به سطح بستر برسد، ولی در جت‌های مستغرق، سیال تمام مسیر را در آب طی می‌کند.

الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی با دیگر حالت مختلف جت متفاوت است. پس از برخورد جت عمودی به بستر، آبستگي آغاز شده و ابتدا جت با زاویه حدود 180 درجه به اطراف منحرف می‌شود. پس از آن توسعه و افزایش عمق آبستگي باعث افزایش فاصله برخورد جت با بستر (ارتفاع ریزش جت) شده و جت از مرز حفره آبستگي تبعیت کرده و با زاویه انحراف کم‌تری به اطراف منحرف می‌شود. در جت عمودی، شکل حفره آبستگي در پلان متقارن بوده و رسوبات خارج شده از حفره آبستگي در اطراف حفره ته نشین می‌شود.

ادربربیگ و راجاراتنام^۱ (۱۹۹۶) بر اساس مقادیر پارامتر فرسایش (Ec) و پارامتر فشار (K) جت‌های مستغرق عمودی را به دو دسته جت با انحراف زیاد $(SDJR^+)$ و جت با انحراف کم $(WDRJ^+)$ تقسیم‌بندی کردند. آن‌ها پارامترهای فرسایش و فشار را به صورت زیر تعریف نمودند.

$$E_c = \frac{V_j}{\sqrt{g D_{50} (G_s - 1)}} \times \frac{d_n}{h_j} \quad (1)$$

$$K = \left(\frac{V_b}{\omega} \right)^2 \quad (2)$$



شکل ۱- الگوی جریان و نیمرخ بستر تحت اثر آبستگي استاتیکی و دینامیکی

انصاری و همکاران^۱ (۲۰۰۳) در طی مطالعات خود نسبت به معرفی رابطه (۵) برای نمایش تغییرات (d_s/h_j) در مقابل پارامتر فرسایش اقدام نمودند:

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.3 E_c^{0.15} - 1 \quad (5)$$

نتایج تحقیقات انصاری و همکاران (۲۰۰۳)، کلارک^۲ (۱۹۶۲) و راجاراتنام (۱۹۸۲) نشان داد که میزان عمق دینامیکی آبستگي تقریباً در ۴۵ دقیقه اول آزمایش به ۸۰ درصد عمق نهایی خود می‌رسد.

چاکروارتی و همکاران^۳ (۲۰۱۳) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر آبستگي استاتیکی و دینامیکی در حوضچه‌های استغراق تحت اثر جت‌های قائم دایره‌ای مستغرق پرداختند. آنان در آزمایش‌های خود از ذرات غیر چسبنده با قطر متوسط ۲/۸ میلی‌متر استفاده نمودند. در این تحقیق از دو قطر مختلف نازل با قطرهای ۸ و ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده گردید. ارتفاع نصب جت تا سطح اولیه رسوبات در دو سناریو ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر تدوین گردید. نتایج کار آنان با نتایج تحقیق انصاری و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت مطلوبی نشان می‌دهد. آنان در تحقیق خود نشان دادند که تفاضل بین عمق آبستگي دینامیکی و استاتیکی به صورت خطی با پارامتر فرسایش معرفی شده توسط آدربیگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) و انصاری و همکاران (۲۰۰۳) افزایش می‌یابد.

ثابتی و همکاران (۱۳۹۰) با انجام آزمایش‌هایی بر روی حوضچه‌ی استغراق در پایین دست پرتابه‌های جامی شکل، تغییرات

در این نوع جت، جدایی جریان در لبه داخلی حفره آبستگي اتفاق می‌افتد. مواد فرسایش یافته از حفره آبستگي توسط جت دیواره‌ای به صورت معلق به سمت بیرون حمل شده و در نهایت ته نشین می‌شوند. با افزایش K یا E_c زاویه انحراف جت افزایش می‌یابد و ممکن است به ۱۸۰ درجه نیز برسد. هرچه زاویه جت منحرف شده بیشتر شود، قسمت بیشتری از مواد فرسایش یافته دوباره به داخل حفره آبستگي باز می‌گردند و نمی‌توانند خود را از جریان دورانی داخل حفره خارج ساخته و به نرخ فرسایش کمک کنند. تنها بخش کوچکی از ذرات از طریق جریان شعاعی به سمت لبه حفره، حمل شده و ته نشین می‌شوند. این روند تا زمانی که تعادل دینامیکی بین جریان و شکل بستر به وجود آید ادامه می‌یابد.

ادربیگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) با جمع‌آوری داده‌های مربوط به جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق روابط (۳) و (۴) را برای تخمین عمق و عرض حفره آبستگي ارائه نمودند:

$$\frac{d_s}{h_j} = 0.05(E_c - 0.14)^{0.6} \frac{G_s^{3.1}}{(G_s - 1)^{2.8}} \quad (3)$$

$$\frac{L_s}{h_j} = 11 E_c^{0.65} \frac{(G_s - 1)^{6.2}}{G_s^{6.6}} \quad (4)$$

که در آن d_s : حداکثر عمق آبستگي از سطح اولیه مصالح، E_c : پارامتر فرسایش که از رابطه (۱) به دست می‌آید و L_s : حداکثر عرض حفره آبستگي از محور جت می‌باشد.

1 - Ansari et al.

2 - Clarke

3 - Chakravarti et al.

ارمغانی و همکاران: روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق ناشی از ...

معادله‌های اعمال شده‌اند. مجموع نیروهای افقی و عمودی وارده در حجم کنترل به صورت روابط (۶) و (۷) ارائه شده اند:

$$-G + R \sin \delta - \rho q V_1 = 0 \quad (۶)$$

$$F_1 - F_2 - R \cos \delta - \rho q V_2 = 0 \quad (۷)$$

این تحلیل یک دستگاه دو معادله و سه مجهولی (δ, R, G) را نتیجه می‌دهد، به منظور حل آن یک فرض برای پارامتر مجهول در نظر گرفته می‌شود که باید به نوعی به عمق آبستستگی تعادلی ارتباط داده شود، در غیر این صورت ابعاد چاله آبستستگی قابل پیش‌بینی نخواهد بود.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد روندیابی تغییرات پارامترهای مؤثر در تعیین شکل بستر حوضچه استغراق به سهولت میسر نمی‌باشد و به دلیل سختی حل معادله‌های ریاضی حاکم بر آن منجر شده است تا پژوهشگران برای بررسی خصوصیات این پدیده از مدل‌های فیزیکی استفاده نمایند. در این تحقیق نیز روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق تحت جت قائم در بسترهای آبرفتی غیر چسبنده به کمک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

همان‌طوری که بیان شد روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق ناشی از برخورد جت قائم بر رسوبات غیر چسبنده به عنوان هدف اصلی این تحقیق می‌باشد. به منظور تحقق اهداف این پژوهش از یک مدل فیزیکی موجود در آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور بهره‌گیری شد. در این مدل با استفاده از یک کنتور الکترومغناطیس با دقت مضاعف ساخت شرکت ایران مدار نسبت میزان شدت جریان خروجی از نازل تعیین گردید.

فشارهای دینامیکی را در کف حوضچه مورد ارزیابی قرار دادند. آنان در تحقیق خود دریافتند که حوضچه‌ی استغراق موقعی بر میزان کاهش فشار دینامیکی وارده بر کف حوضچه مؤثر است که نسبت عمق آب درون حوضچه، سه برابر ضخامت جت در محل برخورد به آن باشد.

بیدار و همکاران (۱۳۹۵) با انجام مطالعات آزمایشگاهی به بررسی الگوی آبستستگی در پایین دست جت‌های مستغرق مرکب با هندسه‌های مختلف پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که شکل جت تأثیر به سزایی بر میزان ابعاد حفره آبستستگی دارد.

برای تعیین معادله‌های حاکم بر فضای پژوهش، در شکل (۱) یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است. دیاگرام آزاد برداری نیروها و شار ممتنم ورودی به حجم کنترل و خروجی از آن در شکل (۲) نمایش داده شده اند که در آن :

\vec{M}_1 : شار ممتنم ورودی جریان جت آب به حجم کنترل از مقطع یک

\vec{M}_a : شار ممتنم ورودی ناشی از هوای وارده از طرف جت به حجم کنترل از مقطع یک

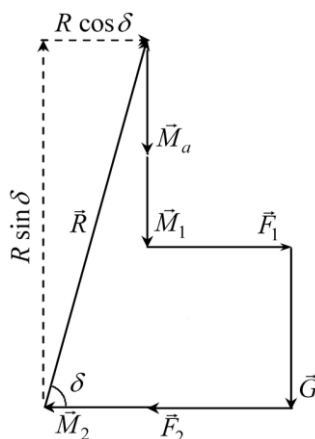
\vec{F}_1 و \vec{F}_2 نیروی هیدرواستاتیک

\vec{G} : وزن سیال درون حجم کنترل

δ : زاویه نیروی برآیند با افق

\vec{R} : نیروی برآیند یا نیروی دینامیکی وارده از طرف جت روی بستر در حفره آبستستگی می‌باشد. مقادیر $R \cos \delta$ و $R \sin \delta$ به ترتیب معرف نیروی پسا افقی و عمودی وارد بر حجم کنترل نمایش داده شده می‌باشند.

از آنجایی که جت مورد نظر برای تحلیل به صورت کاملاً توسعه یافته مد نظر می‌باشد لذا سرعت، ممتنم و وزن مخصوص آب در



شکل ۲- شماتیک دیاگرام آزاد نیروهای وارده به حجم کنترل

استفاده، مشخص گردید که اکثر پژوهش‌های انجام شده در گذشته روی بستر ماسه‌ای و در مقیاس‌های هیدرولیکی و ژئومتری کوچک به اجرا در آمده‌اند. لذا به منظور کاهش اثر مقیاس در اندازه مصالح بستر اصلاحاتی در پارامترهای مستقل اعمال گردید. برای این منظور مشخصات ژئومتری مصالح بستر، قطر نازل و ارتفاع ریزش جت تا سطح تسطیح شده‌ی بستر حوضچه استغراق مورد نظر قرار گرفت و مقرر شد تا رسوبات مورد استفاده در این تحقیق از مصالح بستر آبرفتی رودخانه‌ای غیرچسبنده که ذرات آن در فضای بین دو الک شماره‌های یک دوم و سه هشتم اینچ به تله بیافتند استفاده شود. چگالی ذرات برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید.

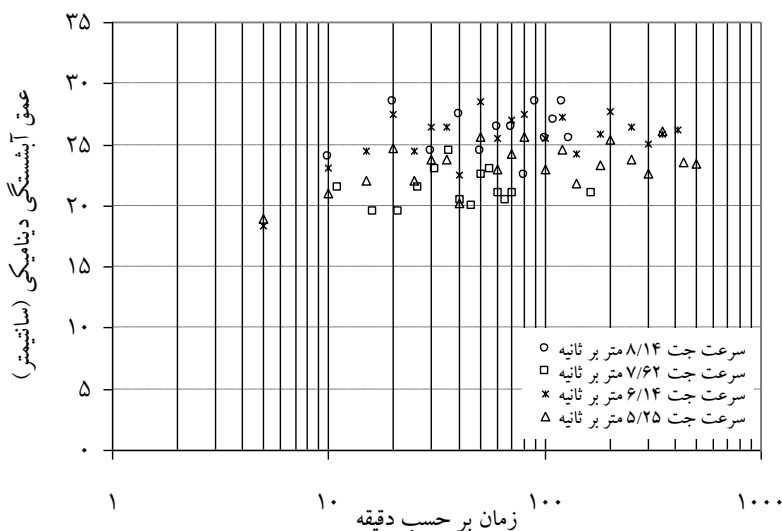
برای تعیین رابطه‌ی حاکم بر روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق و یافتن تابع حاکم بر فضای نداشت آن‌ها از تئوری باکینگهام π استفاده شده است. برای این منظور ابعاد شکل بستر حوضچه استغراق شامل طول و عمق حفره (d_s, L_s) به عنوان متغیرهای وابسته، و پارامترهای مهم مؤثر بر این پدیده شامل d_n : قطر نازل، V_j : سرعت جت، B : عرض مخزن، h_j : ارتفاع نصب جت، h_{nw} : عمق پایاب، D_{50} : عمق متوسط رسوبات آبرفتی، g : شتاب ثقل، μ : لزوجت آب، ρ_w : وزن مخصوص آب، ρ_s : وزن مخصوص رسوبات به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$f(V_j, d_n, B, h_{nw}, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_s, \rho_w) = 0 \quad (8)$$

آزمایش‌ها در یک فلوم با طول ۲ متر، عرض ۱ متر و عمق یک متر به اجرا درآمد. جریان آب از طریق یک لوله با قطر ۴ اینچ به سمت نازل انتقال یافت. تغییرات تراز عمق پایاب که به عنوان یکی از مؤثرترین پارامترهای حاکم بر فضای این پژوهش می‌باشد توسط یک دریچه‌ی کشویی در انتهای فلوم کنترل گردید. سناریوهای تدوین شده نشان داد که برای بررسی اثر عمق پایاب بر روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق این امکان را فراهم می‌سازد تا عمق پایاب در فلوم به ترتیب در اعماق ۳۲/۵، ۳۸/۵ و ۴۳/۵ سانتی‌متر نمونه نماید.

هم‌چنین با اندازه‌گیری عمق دینامیکی در بازه‌های زمانی متوالی مقادیر عمق آبستنگی دینامیکی نیز در مقابل زمان ثبت گردید. از ترسیم این اعماق در مقابل زمان تجمعی در طی چند آزمایش مختلف، تحت سرعت جت خروجی از مقدار ۵/۲۵ الی ۸/۱۴ متر بر ثانیه نشان داد که پس از سپری شدن ۲۰۰ ثانیه، تغییرات محسوس در عمق دینامیکی چاله آبستنگی رخ نمی‌دهد، لذا با اعمال ضریب اطمینان، زمان پنج ساعت به عنوان مبنای آزمایش‌ها انتخاب گردید. در شکل (۳) تغییرات زمانی عمق نسبی آبستنگی دینامیکی به تصویر کشیده شده است.

سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر در مقایسه با تحقیقات پیشین در دسته مدل‌های متوسط مقیاس قرار دارد. در این راستا می‌توان به کاهش اثر مقیاس و کاهش اثر دیواره‌ها بر فرآیند شکل گرفتن شکل بستر حوضچه استغراق اشاره نمود. با بررسی‌های به عمل آمده در تحقیقات پیشین و جمع‌آوری اطلاعات آزمایشگاهی انجام شده از جمله شرایط هیدرولیکی و مشخصات مصالح مورد



شکل ۳- تغییرات زمانی عمق نسبی آبستنگی دینامیکی

به گونه‌ای که با افزایش هر یک درصد عمق نصب جت نسبت به بستر اولیه رسوبات، ۰/۴۶۵ درصد از عدد فرود جت کاسته خواهد شد و به تناسب آن ۰/۳۳ درصد از تفاوت عمق آبستتگی دینامیکی و استاتیکی کسر خواهد گردید.

بررسی رابطه‌ی (۹) نشان می‌دهد که به دلیل آن که در این پژوهش قطر ذرات رسوب (D_{50})، قطر نازل (d_n)، عرض مخزن (B) و وزن مخصوص ذرات رسوبی (ρ_s) ثابت منظور شده‌اند، لذا امکان چشم‌پوشی از اثر آن‌ها بر نتایج تحقیق میسر است. از طرفی پارامترهای بدون بعد معروف ظاهر شده در رابطه (۹) نشانگر اعداد بدون بعد فرود و رینولدز می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان داد که به دلیل تلاطم بودن جریان می‌توان از اثر عدد رینولدز چشم‌پوشی نمود.

ذکر این نکته ضروری است که پارامتر $V_j/\sqrt{gh_j}$ که از جنس عدد فرود می‌باشد، معرف میزان نیروی وارده به ذرات بستر بوده و عامل اصلی تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق شناخته گردید. در این پژوهش این پارامتر تحت عنوان پارامتر فرود جت نامیده شده و با عبارت Fr_j نمایش داده خواهد شد. لازم به ذکر است که در تحقیق‌های پیشین ارزیابی‌ها بر اساس پارامتری تحت عنوان پارامتر فرسایش ارائه شده‌اند که به صورت رابطه (۱۱) نمایش داده شده است.

$$Ec = \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} \times \frac{d_n}{h_j} \quad (11)$$

همان‌طوری که قبلاً بیان شد، قطر مصالح به کار رفته در تحقیق‌های پیشین در محدوده ماسه ریز بوده و این در حالی است که در تحقیق حاضر از شن ریز استفاده شده است. لذا برای افزایش دقت رابطه‌ی حاکم بر فضای این تحقیق از یک سو و معرفی رابطه‌ی که از طیف گسترده‌ای از نتایج پژوهش‌های دیگران نیز برخوردار باشد از سوی دیگر، پس از تبدیل مشاهدات به پارامتر فرسایش، نتایج این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیقات سارما^۱ (۱۹۶۷)، وستریچ و کابوس^۲ (۱۹۷۳)، آدریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶)، انصاری و همکاران (۲۰۰۳)، چاکروارتی و همکاران (۲۰۱۳)، مورد مقایسه قرار گرفت و پس از تجزیه و تحلیل آماری نتایج، نسبت به برازش بهترین خط از بین نقاط اقدام گردید (رابطه ۱۲). نتایج حاصل از ارزیابی‌های صورت گرفته در شکل (۴) ارائه شده‌اند.

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.289E_c^{0.1508} - 1 \quad R^2 = 0.9122 \quad (12)$$

با توجه به اینکه ارتفاع رقوم نصب جت تا سطح بستر تسطیح شده‌ای مصالح آبرفتی با ارتفاع تراز عمق پایاب رابطه‌ی مستقیم دارد لذا برای ساده سازی در شرایط تحلیل رابطه (۸) مقرر گردید تا تنها یکی از پارامترهای h_{nw} و h_j را در رابطه (۸) مورد بررسی قرار گیرد. در اینجا ارتفاع جت h_j به عنوان یک متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود.

با در نظر گرفتن پارامترهای ρ, g, h_j به عنوان متغیرهای تکراری معادله‌ها بدون بعد حاکم بر ابعاد حفره آبستتگی ناشی از جت در حوضچه استغراق را می‌توان به صورت رابطه (۹) نوشت:

$$f(d_s/h_{nw}, L_s/h_{nw}, V_j/\sqrt{gh_j}, \rho_w V_j h_j / \mu, D_{50}/h_j, d_n/h_j, B/h_j, \rho_s/\rho_w) = 0 \quad (9)$$

پس از بررسی نتایج آزمایش‌ها در خصوص اعمال اثر و یا چشم‌پوشی از برخی از پارامترهای به دست آمده اظهار نظر خواهد شد.

نتایج آزمایشگاهی

پس از انجام آزمایش‌ها، تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق ناشی از برخورد جت قائم بر رسوبات غیر چسبنده مطابق با سناریوهای از پیش تدوین شده مورد روندیابی قرار گرفت. برای این منظور با اعمال تغییر در عمق پایاب در ترازهای ۳۲/۵، ۳۸/۵ و ۴۳/۵ سانتی‌متر، اندرکنش اثر عدد فرود جت بر شکل حوضچه استغراق مورد بررسی قرار گرفت.

پس از سپری شدن زمان تعادل، عمق دینامیکی آبستتگی با استفاده از عمق سنج اندازه‌گیری گردید. پس از قطع جریان جت و تخلیه آب مخزن، با استفاده از متر لیزری نسبت به ثبت تغییرات پروفیل بستر حوضچه استغراق اقدام شد.

مشاهدات آزمایشگاهی گویای آن بود که تغییرات دینامیکی بستر حوضچه استغراق تقریباً در ۳۰ دقیقه اول آزمایش به ۷۵ درصد عمق تعادل خود خواهد رسید. در راستای ارزیابی اثر عمق پایاب و سرعت جت بر میزان اختلاف عمق آبستتگی دینامیکی و استاتیکی، با تغییر در عدد فرود جت $Fr_j = V_j/\sqrt{gh_j}$ آزمایش‌هایی انجام گرفت.

نتایج این بررسی نشان داد که نسبت بدون بعد تفاوت عمق آبستتگی دینامیکی و استاتیکی $(d_d - d_s)/h_j$ به ازای تغییر در رقوم نصب جت معادل با ۳۱/۵، ۳۷/۵ و ۴۲/۵ سانتی‌متر از رابطه (۱۰) تبعیت می‌نماید:

$$(d_d - d_s)/h_j = 0.0351 Fr_j \quad (10)$$

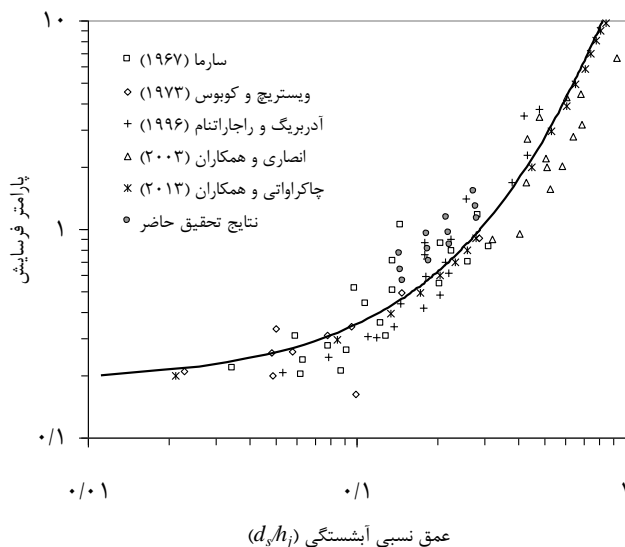
بررسی نتایج گویای آن است که افزایش ارتفاع جت (h_j) باعث کاهش تفاوت عمق آبستتگی دینامیکی و استاتیکی خواهد شد.

1 - Sarma

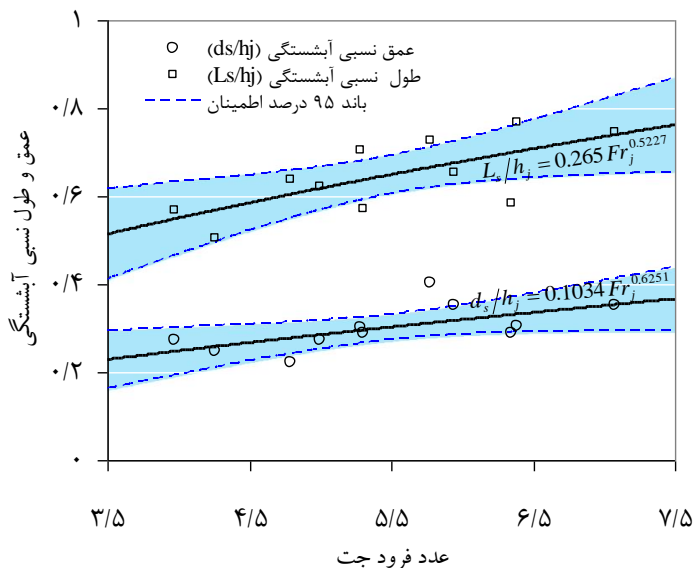
2 - Westrich and Kobus

بین داده‌های مشاهداتی اقدام گردید. همچنین خطوط با ۹۵ درصد باند اطمینان نیز در این شکل‌ها به تصویر کشیده شدند. بررسی‌ها نشان داد که معادله‌های خطوط برازش داده شده از نوع توانی از تناسب بهتری با نتایج مشاهداتی برخوردارند. روابط مربوط به هر یک از خطوط برازش داده شده در هر یک از شکل‌های (۵) و (۶) به تفکیک نمایش داده شده‌اند.

به منظور بررسی روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغرق شامل پارامترهای حفره آبستگي و پشته رسوب‌گذاري، مقادير عمق و عرض بدون بعد آبستگي استاتيكي (L_s/h_j و d_s/h_j) و ارتفاع و عرض پشته تشكيل شده در اطراف حفره آبستگي (h_m/h_j) و (L_m/h_j) در مقابل عدد فرود جت در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده‌اند. برای معرفی بهتر نتایج نسبت به برازش بهترین خط از

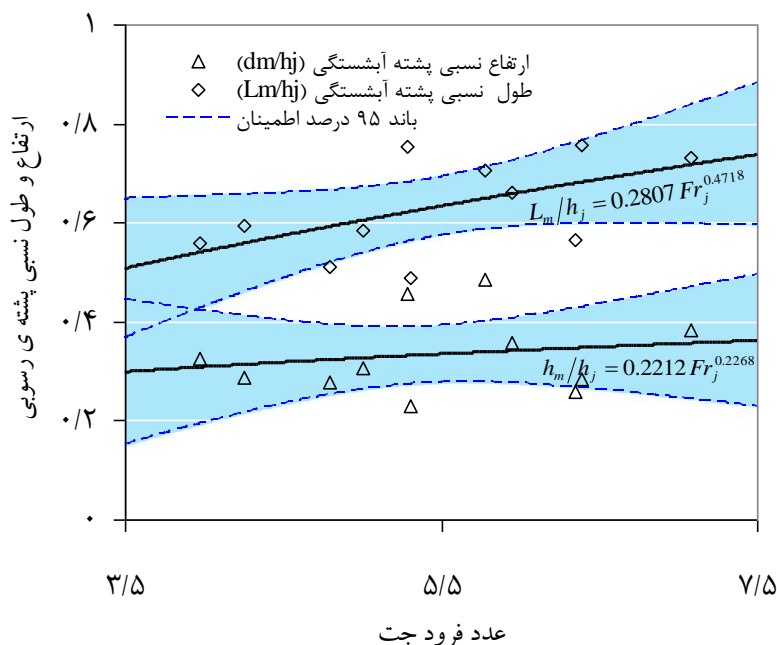


شکل ۴- تغییرات عمق نسبی آبستگي استاتيكي در مقابل پارامتر فرسایش Ec



شکل ۵ - تغییرات ابعاد بدون بعد حفره آبستگي در مقابل عدد فرود جت

ارمغانی و همکاران: روند تغییرات شکل بستر حوضچه استغراق ناشی از ...



شکل ۶- تغییرات ابعاد بدون بعد پشته رسوبی در مقابل عدد فرود جت

جدول ۱- توابع خطای حاصل از مقایسه نتایج با تحقیق آدریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶)

پارامتر	درصد میانگین خطا	میانگین خطای مطلق	ریشه میانگین مربعات خطا	ضریب زاویه
	MPE	MAE	RMSE	m
d_s/h_j	۷/۷۲۶	۰/۰۴۰۳	۰/۰۴۵۷	۱/۰۴۸
L_s/h_j	-۱۵/۸۷۸	۰/۱۰۴۴	۰/۱۱۵۱	۰/۸۳۶

نسبی معادل ۰/۰۴۵۷ و ۰/۱۱۵۱ می‌باشند. بررسی‌ها نشان داد که میانگین یافته‌های این تحقیق در مقایسه با نتایج آدریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) مقدار عمق بدون بعد آبستگي (d_s/h_j) را به میزان ۴/۸۵ درصد بیشتر نشان می‌دهد. به‌طور مشابه از بررسی‌ها گویای آن است که معادله توصیه شده برای طول بدون بعد آبستگي (L_s/h_j) توسط آدریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) حدود ۱۶/۳۴ درصد کمتر از مشاهدات آزمایشگاهی تحقیق حاضر پیش‌بینی می‌نماید.

نتیجه گیری

در این تحقیق نتایج حاصل از یک مطالعه تجربی برای تخمین روند تغییرات شکل بستر حوضچه‌های استغراق که تحت فرسایش جت‌های قائم برخوردی قرار دارند ارائه شده است. در این پژوهش از مصالح آبرفتی غیر چسبنده استفاده شده است. در این پژوهش تلاش شده است تا دامنه داده‌های تجربی موجود

به‌منظور ارزیابی چگونگی عملکرد توابع پیشنهادی در تخمین روند شکل بستر حوضچه استغراق نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج مطالعات آدریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحقیقات آنان طی روابط (۳) و (۴) در مقدمه معرفی شدند. پس از محاسبه مقادیر عمق و طول آبستگي استاتیکی متعادل شده توسط روابط (۳) و (۴)، مقادیر مذکور در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق حاضر مورد بررسی آماری قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری انجام شده شامل تعیین توابع خطا در جدول (۱) خلاصه شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط این تحقیق در مقایسه با نتایج آدریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) برای تخمین عمق و طول بدون بعد آبستگي به‌ترتیب ۷/۷۲۶ و ۱۵/۸۷- درصد دارای خطای میانگین می‌باشند. همچنین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا نشان‌گر آن است که مقادیر d_s/h_j و L_s/h_j مشاهداتی و محاسباتی به‌ترتیب دارای اختلاف

تغییرات عمق نسبی متعادل شده حفره آبستگي ایجاد شده در بستر حوضچه استغراق بین مقادیر $0.5 < d_s/h_j < 0.7$ و طول نسبی متعادل شده حفره آبستگي بین مقادیر $0.2 < L_s/h_j < 0.4$ نمو می‌نماید.

تشکر و قدردانی

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

در مقابل نتایج تحقیقات پیشین گسترش یابد. در این میان می‌توان به افزایش اندازه قطر متوسط ذرات رسوبات غیر چسبنده، افزایش در میزان تغییرات فاصله جت تا بستر اولیه رسوبات و در نتیجه تغییرات آبستگي استاتیکی و دینامیکی حاصله اشاره نمود. بررسی‌ها نشان داد که عمق دینامیکی آبستگي با افزایش ارتفاع جت (h_j)، کاهش می‌یابد. همچنین ابعاد شکل بستر حوضچه استغراق با پارامتر عدد فرود جت رابطه مستقیم دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌های توصیه شده در تحقیق حاضر علاوه بر برخورداری از شکلی ساده، قادر به توصیف شرایط آستانه حدی فرسایش می‌باشند. در این راستا نتایج نشان داد که به ازای تغییرات پارامتر فرود جت بین $4 < Fr_j < 7$ روند

منابع

- ۱- ثابتی، ا.، فتحی مقدم، م. و ز.، اولین چارسوقی. (۱۳۹۰). بررسی فشارهای دینامیکی ناشی از برخورد جت خروجی از پرتابه جامی شکل با در نظر گرفتن عمق پایاب. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۴ (۲): ۵۱-۶۰.
- ۲- بیدار، د.، اصغری پری، س.ا.، سجادی، س.م. و ه. حسونی زاده. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی اثر هندیه جتهای روزنه ای مستغرق بر الگوی آبستگي پایین دست. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۹ (۳): ۱۸۵-۱۷۳.
- 3- Aderibigbe, O.O. and N. Rajaratnam. 1996. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*, 34(1): 19–33.
- 4- Ansari, S.A., Kothiyari, U.C. and K.G. Ranga Raju. 2003. Influence of cohesion on scour under submerged circular vertical jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(12): 1014–1019.
- 5- Breusers, H.N.C. and A. J. Raudkivi. 1991. Scouring. *Hydraulic Structures Design Manual, Volume 2*, Balkema, Rotterdam.
- 6- Chakravarti, A., Jain, R.K. and U.C. Kothiyari. 2013. Scour under submerged circular vertical jets in cohesionless sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20(1): 32-37.
- 7- Clarke, F.R.W. 1962. The action of submerged jets on movable material. Ph.D. Thesis, Imperial College, London.
- 8- Rajaratnam, N. 1982. Erosion by submerged circular jets. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 108(HY2): 262–267.
- 9- Sarma, K.V.N. 1967. Study of scour phenomenon and its functional form. Ph.D. Thesis, Indian Institute of Sciences, Bangalore, India.
- 10- 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.

EXTENDED ABSTRACT

The Process of Plunge Pool Bed Form Changes by a Vertical Jet Impinging Upon Non-Cohesive Sediment

A. Armaghani¹, B. Lashkar-Ara^{2*} and A.M. Akhond-Ali³

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

2* - Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. *Lashkarara@jsu.ac.ir*.

3- Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 12 March 2016

Accepted: 13 June 2016

Keywords: Dynamic scour, Static scour, Vertical jet, Spray, Froude number of jet.

Introduction

The scour process induced by plunging jets is an important topic for hydraulic engineers. It is important to forecast the various scour hole characteristics for avoiding the failure of a hydraulic structure. Based on this evidence, this study aimed to investigate the equilibrium morphology caused by vertical circular impinging jet. Aderibigbe and Rajaratnam (1996) classified the flow patterns over asymptotic scour hole based on the values of the erosion parameter (Ec) and the pressure parameter (K) as either the strongly deflected Jet regime (SDJR) or the weakly deflected jet regime (WDJR). It appears that the two regimes are linked by a narrow transition regime. Chakravarti et al. (2013) conducted experiments to investigate the effect of static and dynamic scouring in plunge pool under submerged circular vertical jets. In this study, the process of changing the plunge pool bed form has been studied under vertical jet impinging upon non-cohesive sediment.

Methodology

Experimental tests were conducted in a flume with dimension of 1 m width, 2 m length, and 1 m deep at Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. By drawing the dynamic scour depth versus the cumulative scouring time, it was concluded that the dynamic depth of the scouring does not change after 200 seconds. Therefore, the testing time of the static scour depth was determined to be five hours with a 10% confidence interval. The π -Buckingham theorem has been used to determine the plunge pool bed form. Effective parameters on plunge pool bed deformation are shown in equation (1).

$$f(d_s, L_s, d_m, L_m, V_j, d_n, B, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_s, \rho_w) = 0 \quad (1)$$

In which d_n : Jet diameter, V_j : Jet velocity, B : Flume width, h_j : Jet height, D_{50} : Mean diameter of bed sand, ρ_w : Water density, ρ_s : Particle density of basin material, g : Gravity acceleration, d_s : Depth of scouring, L_s : Scour length, d_m : Sedimentary hill height and L_m : Sedimentary hill length. Given that the nozzle diameter, flume width, diameter and density of sediment particles are constant during all experiments, hence their effects can be ignored. Also, due to the jet's outflow turbulence, it can be ignored. After removing low effect parameters and pre-processing, the deformation equations of plunge pool bed are as follows:

$$d_s/h_j = f(V_j/\sqrt{gh_j}) \tag{2}$$

$$L_s/h_j = f(V_j/\sqrt{gh_j}) \tag{3}$$

$$d_m/h_j = f(V_j/\sqrt{gh_j}) \tag{4}$$

$$L_m/h_j = f(V_j/\sqrt{gh_j}) \tag{5}$$

Results

The experimental results were analyzed and the process of plunge pool bed form changes were shown in Figs (1) and (2). For this purpose, the interaction of the jet Froude number effect on plunge pool bed deformation was studied with a change in tail water depth at three levels of 32.5, 38.5, and 43.5 cm.

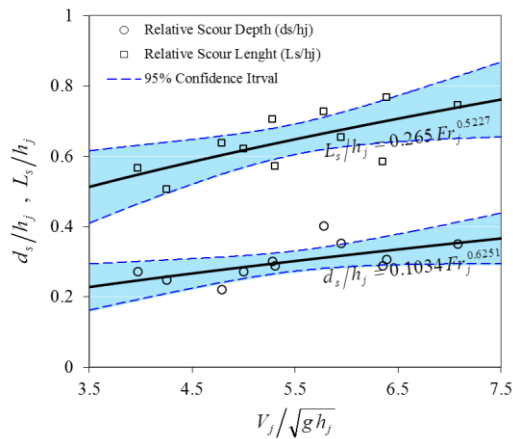


Fig 1- Changes in dimensionless parameters of scouring hole versus jet Froude number

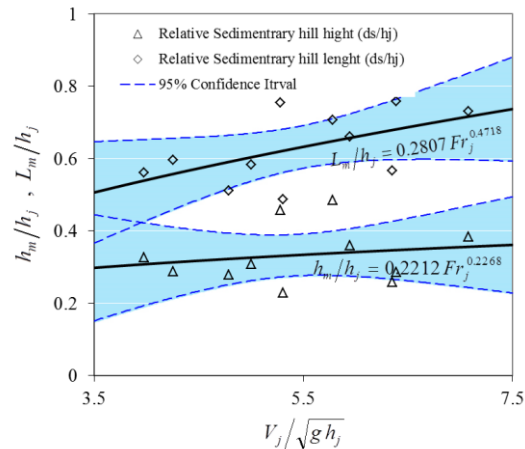


Fig 2- Changes in dimensionless parameters of sedimentary hill versus jet Froude number

Conclusions

In this research, it has been attempted to expand the scope of previous researches' experimental data by conducting new experiments. The average diameter of sediment particles increment, increasing of the jet height and tail water changes, and also static and dynamic scouring bed deformation recording have added new knowledge to the field. The results showed that the depth of the dynamic scour decreases by increasing of the jet height (h_j). Also, the dimensions of bed deformation in plunge pool are directly related to the jet Froude number parameter.

References

- 1- Aderibigbe, O.O. and N. Rajaratnam. 1996. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*, 34(1): 19–33.
- 2- Chakravarti,A., Jain, R.K.and U.C. Kothiyari. 2013. Scour under submerged circular vertical jets in cohesionless sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 20(1): 32-37.