

بررسی آزمایشگاهی اثر غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفرة آبستگي پایین دست جت‌های ریزشی آزاد

مجتبی مهرآیین^۱، مسعود قدسیان^{۲*} و حمیدرضا رنجبر^۳

^۱ دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استاد هیدرولیک پژوهشکده آب - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

^۳ کارشناس ارشد هیدرولیک دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۷/۳/۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۰/۳، تاریخ تصویب ۸۹/۱/۲۳)

چکیده

با توجه به اینکه تا کنون تحقیقی کامل درباره چگونگی تأثیر غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفرة آبستگي ایجاد شده توسط جت‌های آزاد ریزشی انجام نشده است، در مقاله حاضر اثر این متغیر بررسی شده است. برای این هدف آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نتایج نشان داد که با استفاده از d_{90} به جای d_{50} به عنوان قطر مشخصه مصالح در عدد فرود مصالح، همبستگی مناسب‌تری بین عدد فرود مصالح و ابعاد حفرة آبستگي به دست می‌آید. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی سایر محققان و داده‌های به دست آمده از تحقیق حاضر، ارزیابی روابط موجود برای ابعاد حفرة آبستگي انجام و روابط جدیدی برای تخمین ابعاد حفرة آبستگي ارائه شده است. با استفاده از Fr_{d90} و حذف متغیرهای نسبت قطر مشخصه مصالح به ارتفاع ریزش و نیز ضریب غیر یکنواختی مصالح، تغییر چندانی در میزان دقت روابط ارائه شده، ایجاد نشد. بنابراین در محدوده داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، عامل d_{90} اثر غیر یکنواختی مصالح را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این متغیر، نسبت قطر مشخصه مصالح به ارتفاع ریزش نیز درجه اهمیت کمتری نسبت به سایر متغیرهای در نظر گرفته شده در این تحقیق دارد. نتایج همچنین نشان داد که روابط ارائه شده نتایج مناسبی برای داده‌های نمونه اصلی دارد و از دقت بیشتری در مقایسه با روابط قبلی بهره‌مند است.

واژه‌های کلیدی: آبستگي، جت ریزشی، مطالعات آزمایشگاهی، روابط تجربی، نمونه آزمایشگاهی، نمونه اصلی

مقدمه

آبستگي انجام شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ریزش، ابعاد حفرة آبستگي افزایش می‌یابد [۳،۲]. اگر چه ابعاد حفرة آبستگي (حداکثر عمق حفرة، ارتفاع برآمدگی بعد از حفرة و طول حفرة آبستگي) ایجاد شده در اثر جت‌های مایل مستقل از زاویه جت برخوردی است، ولی فاصله بین نقطه برخورد جت به کف تا محل حداکثر عمق حفرة آبستگي با افزایش زاویه جت برخوردی کاهش می‌یابد و محل قرارگیری حداکثر عمق حفرة آبستگي با افزایش زاویه جت نسبت به دهانه نازل افزایش می‌یابد [۵،۴].

تأثیر عمق پایاب بر ابعاد حفرة آبستگي تأثیری دوگانه است، به طوری که با افزایش و کاهش عمق پایاب از یک مقدار حدی، ابعاد حفرة آبستگي کاهش می‌یابد [۶]. به طور معمول اثر سرعت جت در متغیر عدد فرود مصالح در نظر گرفته می‌شود. دانه‌بندی مصالح یکی

جت‌های خروجی از بدنه سد سرعت زیادی دارند و سبب آبستگي پایین دست سدها می‌شود. برای تعیین صحیح عمق قرارگیری پی سدها، اطمینان از پایداری شیب‌های کناره رودخانه و سازه‌های قرارگرفته در پایین دست سد و تخمین صحیح از حد مورد نیاز نیروگاه، تخمین صحیح ابعاد حفرة آبستگي ایجاد شده در اثر جت‌های خروجی از بدنه سد، الزامی است. تحقیقات بسیار زیادی درباره آبستگي ایجاد شده در اثر جت‌های برخوردی، دیواره‌ای و آفست انجام شده است [۱].

عوامل مختلفی بر ابعاد حفرة آبستگي ایجاد شده در اثر جت‌های ریزشی تأثیر دارند که از جمله این عوامل می‌توان به عمق پایاب، ارتفاع ریزش، سرعت جریان، سطح مقطع و زاویه برخورد جت، دانه‌بندی، قطر و چگالی مصالح، میزان هوای ورودی به جت اشاره کرد. تحقیقات متعددی درباره نحوه تأثیر این متغیرها بر ابعاد حفرة

5mm باشد، قابل صرف نظر کردن است، بنابراین این محقق رابطه Veronese-b را که مستقل از قطر مصالح است نیز ارائه داد. رابطه Veronese-b به عنوان رابطه‌ای برای تخمین حداکثر عمق حفره آبخستگی توسط BIS (1985)^۱ پذیرفته شده است [۲۴]. Martins (1973) علاوه بر رابطه ارائه شده در جدول (۱)، رابطه (۲) را برای تعیین حداکثر عمق حفره آبخستگی ایجاد شده در بلوک‌های مکعبی قرار گرفته در زیر جریان جت‌های ریزشی ارائه داده است [۱۲].

$$Y_s + Y_t = 0.14N - 0.73 \frac{h^2}{N} + 1.7h \quad (۲)$$

$$N = 7 \times \sqrt{\frac{Q^3 \times H^{1.5}}{a^2}}$$

a : بعد مکعب قرار گرفته در زیر جریان جت

Q : دبی کل عبوری از روی سرریز

Mason و Aumugam (۱۹۸۵) با استفاده داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های موجود برای نمونه اصلی و مدل روابط (۳) و (۴) را برای تخمین حداکثر عمق آبخستگی ارائه کردند [۱۰].

$$Y_s = 3.27 \frac{q^{0.6} H^{0.05} Y_t^{0.15}}{g^{0.2} d_{50}^{0.1}} \quad (۳)$$

$$Y_s = (4.42 - 3.1H^{0.1}) \times q^{(0.600-0.0033H)} \times H^{(15-0.005H)Y_t^{0.15}} \times g^{-0.2} \times d_{50}^{-0.1} \quad (۴)$$

D'Agostino and Ferro در سال (۲۰۰۴) رابطه (۵) را با استفاده از داده‌های مربوط به جت ریزشی از روی سرریز و سازه‌های تثبیت‌کننده شیب بستر به دست آورد [۱۳].

$$\frac{Y_s}{Z} = 0.54 \times \left(\frac{t}{z}\right)^{0.593} \times \left(\frac{Y_t}{H}\right)^{-0.126} \times A_{50}^{0.544} \times \left(\frac{d_{90}}{d_{50}}\right)^{-0.856} \times \left(\frac{b}{B}\right)^{-0.751} \quad (۵)$$

$$Q, A_{50} = \frac{Q}{t \times z \times \sqrt{g \times (\rho_s - 1) \times d_{50}}}$$

d_{50}, d_{90} : قطر مشخصه مصالح که به ترتیب ۵۰ درصد و ۹۰ درصد وزنی مصالح از آن ریزتر هستند. سایر متغیرها در شکل (۱) مشخص شده‌اند.

از عوامل تأثیرگذار بر ابعاد حفره آبخستگی است و از آنجا که بیشتر مصالح موجود در طبیعت، دانه‌بندی غیر یکنواخت دارند، بنابراین بررسی اثر غیریکنواختی بر ابعاد حفره آبخستگی بسیار مهم است. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که ابعاد حفره آبخستگی ایجاد شده در اثر انواع جت‌ها با افزایش ضریب غیر یکنواختی مصالح کاهش می‌یابد [۹، ۸، ۷]. در مقاله حاضر با استفاده از داده‌های به دست آمده در این تحقیق و داده‌های محققان قبلی تأثیر غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفره آبخستگی ایجاد شده در اثر جت‌های ریزشی بررسی شده است.

تا به حال روابط زیادی برای تعیین ابعاد حفره آبخستگی ایجاد شده به وسیله جت‌های ریزشی ارائه شده است. بیشتر روابط ارائه شده در سال‌های قبل از دهه ۹۰ میلادی به شکل بعددار ارائه شده‌اند، ولی در سال‌های اخیر بیشتر این روابط به شکل بدون بعد هستند. شکل عمومی روابط بعددار ارائه شده قبل از دهه ۹۰ میلادی به شکل رابطه (۱) است [۱۰].

$$Y_s + Y_t = e \times \frac{q^x H^y}{d_m^z} \quad (۱)$$

در این رابطه:

e, x, y, z : ضرایب ثابت

q : دبی در واحد عرض جت $\left(\frac{m^3}{s.m}\right)$

H : ارتفاع ریزش (اختلاف تراز سطح جریان قبل و بعد از محل ریزش جت) (m)

Y_s : حداکثر عمق حفره آبخستگی از سطح بستر رسوبات (m)

d_m : قطر مشخصه مصالح (m)

Y_t : عمق پایاب (m)

g : شتاب ثقل زمین

ضرایب e, x, y, z توسط محققان مختلف به دست آمده و در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۱۱] در کانالی به عرض 0/5m و دبی در واحد عرض 0/01-0/07 m²/s برای مصالح با قطر 9-36mm انجام شده است. در رابطه Veronese-a تأثیر متغیر قطر مصالح در نظر گرفته شده است. ایشان طبق آزمایش‌های تکمیلی اعلام کرد که تأثیر قطر مصالح، در شرایطی که قطر میانگین مصالح کمتر از

جدول ۱: ضرایب ارائه شده توسط محققین مختلف در رابطه (۱).

\hat{q}	محقق	e	x	y	z	d_m
۱	Veronese-a	0/2	0/54	0/225	0/42	d_{50}
۲	Veronese-b	1/9	0/54	0/225	0	-
۳	Martins-A	1/5	0/6	0/1	0	-

جدول ۲: مقادیر ضرایب ارائه شده در رابطه (۶).

ضرایب متغیر	a	b	c
Y_s	1/925	-0/66	0/3
L_s	8/432	-0/9	1

روش انجام آزمایشها و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایشها در مخزن پایین دست یک کانال ۱۳ متری، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. طول مخزن 2/5m و عرض و ارتفاع آن 1/5m است. عرض جت ریزشی ایجاد شده در کانال 0/18m بود. مصالح مورد استفاده در آزمایشها قطری برابر با $d_{50} = 1.23mm$ دارد. برای بررسی اثر غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفرة آبشستگی، از چهار نوع مصالح با توجه به محدودیت های موجود با ضرایب غیریکنواختی ($k = 1.3 - 2.7$) استفاده شده است (شکل ۲). تعداد سه دبی در انجام آزمایشها استفاده شد. برای اندازه گیری دبی از یک سرریز مثلثی که در ابتدای کانال قرار گرفته بود استفاده شد. عمق پایاب در آزمایشها ثابت (برابر ۳۰ سانتی متر) در نظر گرفته شد. ارتفاع ریزش در نظر گرفته شده برای جت، چهار مقدار متفاوت نسبت به کف رسوبات بود. محدوده متغیرهای مورد مطالعه در جدول (۳) آمده است.

برای برداشت توپوگرافی بستر از دستگاه Bed Profiler استفاده شد. برای اندازه گیری عمق آب از عمق سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی متر استفاده شد. برای انجام آزمایشها ابتدا مخزن تا عمق پایاب مورد نظر از آب پر شده و دبی مورد نظر تنظیم شد. برای جلوگیری از آبشستگی، قبل از رسیدن دبی جریان جت به مقدار

قدسیان و همکاران (۲۰۰۶) روابطی را برای تخمین ابعاد حفرة آبشستگی در اثر جت های ریزشی دایره ای و مستطیلی ارائه کردند که شکل کلی آن به این شکل است [۶].

$$\frac{\phi}{Y_t} = a \left(\frac{Y_t}{H_c} \right)^b \left(Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^c \quad (۶)$$

در این رابطه:

R : شعاع هیدرولیکی جت

ϕ : یکی از ابعاد حفرة آبشستگی (طول، عرض، عمق آبشستگی) در پایین دست حفرة است.

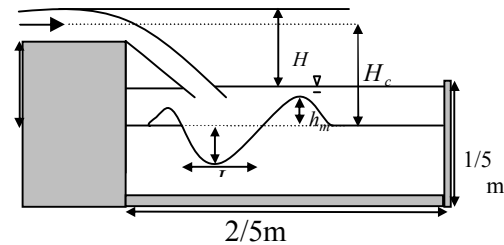
$$Fr_{d50} = \frac{v}{\sqrt{g \times d_{50} \times (s-1)}}$$

v : سرعت جت خروجی

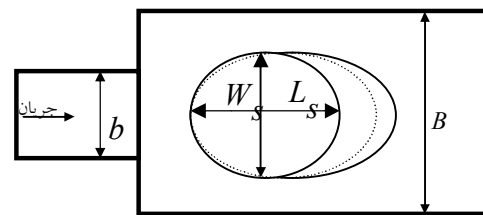
s : نسبت چگالی مصالح به چگالی آب

a, b, c : ضرایب ثابتی هستند که مقادیر آنها در

جدول (۲) ارائه شده است.



الف- مقطع طولی



ب- پلان

شکل ۱: طرح شماتیک از حفرة آبشستگی ایجاد شده در اثر جت های ریزشی عبوری از کالورت یا از روی سرریز.

با توجه به اینکه بسیاری از مصالح موجود در طبیعت دانه بندی غیر یکنواخت دارند، لازم است اثر این متغیر بر ابعاد حفرة آبشستگی به طور کامل تر بررسی شود. بنابراین در تحقیق حاضر اثر غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفرة آبشستگی بررسی می شود و برای تعیین ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده توسط این نوع جت ها روابطی مناسب ارائه خواهد شد.

U : ویسکوزیته سیال

R : شعاع هیدرولیکی جت در محل جدا شدن از لبه

کالورت یا سرریز

$$k = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad \text{ضریب غیر یکنواختی مصالح}$$

با استفاده از قضیه باکینگهام و با انتخاب متغیرهای

(v, Y_t, ρ_s) به عنوان متغیرهای تکراری، ۱۰ متغیر بدون

بعد به دست خواهد آمد که عبارتند از:

$$\left(\begin{array}{l} \pi_1 = \frac{d_{90}}{Y_t}, \pi_2 = k, \pi_3 = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \\ \pi_4 = \frac{v}{\sqrt{g \times Y_t}}, \pi_5 = \frac{v \times Y_t}{U}, \pi_6 = \frac{Y_t}{R}, \pi_7 = \frac{b}{Y_t} \\ \pi_8 = \frac{B}{Y_t}, \pi_9 = \frac{H_c}{Y_t}, \pi_{10} = \frac{\phi}{Y_t} \end{array} \right) \quad (\lambda)$$

از متغیر بی بعد π_5 که عدد رینولدز جریان است، به دلیل آشفته بودن جریان و ناچیز بودن اثر آن می توان صرف نظر کرد. با ترکیب متغیرهای بدون بعد π_9, π_6 به

متغیر بدون بعد $\pi_{11} = \frac{H_c}{R}$ ، با ترکیب π_7, π_8 متغیر

بدون بعد $\pi_{12} = \frac{B}{b}$ ، با ترکیب π_1, π_3, π_4 متغیر بی بعد

$\pi_{13} = \frac{v}{\sqrt{g \times d_{90} \times (\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1)}}$ و با ترکیب متغیرهای

بی بعد π_1, π_9 متغیر بی بعد $\pi_{14} = \frac{d_{90}}{H_c}$ به دست می آید.

بنابراین می توان رابطه (۸) را به شکل رابطه (۹) بازنویسی کرد:

$$\frac{\phi}{Y_t} = f\left(k, \frac{Y_t}{H_c}, \frac{v}{\sqrt{g \times (\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1) \times d_{90}}}\right) \quad (\lambda)$$

$$\left(\frac{H_c}{R}, \frac{d_{90}}{H_c}, \frac{B}{b} \right)$$

$$\text{که در آن: } Fr_{d90} = \frac{v}{\sqrt{g \times (\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1) \times d_{90}}}$$

معرفی داده های آزمایشگاهی مورد استفاده

در استخراج روابط

داده های مورد استفاده در این تحقیق شامل ۳۶۴ داده

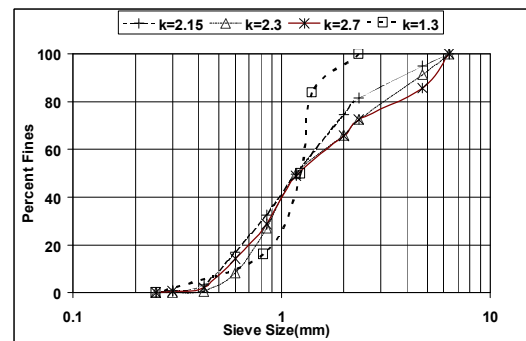
آزمایشگاهی است. کلیه داده های مورد استفاده در این

تحقیق مربوط به آبشستگی ایجاد شده توسط جت های

مورد نظر، صفحه های مخصوص در محل ریزش جت روی بستر قرار داده شد. پس از تنظیم دبی، این صفحه از محل خود خارج شده و آبشستگی آغاز می شد. برای تعیین زمان تعادل یک آزمایش ۶۴ ساعته برای بحرانی ترین شرایط (دانه بندی یکنواخت و بیشترین سرعت جت) انجام شد. در این آزمایش ۹۰ درصد آبشستگی در ۲۰ ساعت اول آزمایش ایجاد شد و این زمان به عنوان زمان تعادل حفره آبشستگی در نظر گرفته شد.

جدول ۳: محدوده متغیرهای در نظر گرفته شده در آزمایش ها.

متغیر	Y_t (cm)	t (cm)	H_c (cm)	k
تعداد تغییر برای هر متغیر	۱	متنوع	۴	۴
محدوده تغییرات	۳۰	۴/۱۹-۲/۹۴	۶۶-۸۷	۲/۷ ۲/۳ ۲/۱۵ ۱/۳
متغیر	b (cm)	$\frac{b}{B}$	$Q(Lit/s)$	
تعداد تغییر برای هر متغیر	۱	۱	۳	
محدوده تغییرات	۳۰	۰/۱۲	۱۰/۱۱۷ ۷/۴۷۱ ۴/۳۶۱	



شکل ۲: منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده در آزمایش ها.

متغیرهای در نظر گرفته شده و آنالیز ابعادی

متغیرهای در نظر گرفته شده، به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر ابعاد حفره آبشستگی ایجاد شده در اثر جت های ریزشی عبارتند از (شکل ۱):

$$\phi = f(v, R, d_{90}, k, \rho_s, \rho_w, g, U, Y_t, b, B, H_c) \quad (\gamma)$$

ρ_s : چگالی ذرات رسوب

ρ_w : چگالی آب

g: شتاب ثقل زمین

ابعاد حفرة آبستنگی طرح‌ریزی شده بود، با مصالح با دانه‌بندی یکنواخت انجام شد [۱۴].

ارزیابی روابط موجود

برای بررسی میزان دقت روابط ارائه شده در قسمت (۱) از دو متغیر آماری ضریب همبستگی (R) و میانگین قدرمطلق خطاها (MRD) استفاده شد که مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آیند.

$$MRD = \frac{1}{n} \times \sum \left[\frac{|Observed - Computed|}{observed} \times 100 \right] \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum (observed - \overline{observed}) \times (computed - \overline{computed})}{\sqrt{\sum (observed - \overline{observed})^2 \times \sum (computed - \overline{computed})^2}} \quad (11)$$

علامت - نشان‌دهنده مقدار میانگین است. با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول (۴)، جدول (۵) قابل دسترس است.

با توجه به جدول (۵) می‌توان نتیجه گرفت که روابط ارائه شده با رابطه‌ای به شکل کلی رابطه (۱) دقت مناسبی برای تخمین حداکثر عمق حفرة آبستنگی در شرایط آزمایشگاهی ندارند.

ریزشی در مصالح غیر چسبنده است. محدوده داده‌های مورد استفاده در این مقاله در جدول (۴) آمده است. (D'Agostino and Ferro (1994) از سرریز لبه تیز برای ایجاد جت ریزشی استفاده کردند.

کانال مورد استفاده در این آزمایش‌ها عرضی برابر 50cm داشته و سرریز به طور عمودی در داخل کانال قرار گرفت. آزمایش‌های ایشان برای دو عرض مختلف سرریز انجام شد [۱۳]. تحقیقات Veronese (1937) نیز برای بررسی آبستنگی جت‌های ریزشی مستطیلی با استفاده از سرریز لبه تیز هم‌عرض کانال انجام شد ($b = B = 50cm$). رسوبات مورد استفاده در تحقیقات Veronese (1937) یکنواخت بوده و قطر میانگین مصالح 36/2 و 21 و 14/2 و 9/1 میلی‌متر بود [۱۱]. آذر (۱۳۷۷) نیز برای ایجاد جت ریزشی از سرریز لبه تیز که عرض آن 47cm بود و در داخل کانال به عرض 1/5 متر قرار گرفته بود، استفاده کرد [۱۵].

عرض جت مورد استفاده در تحقیقات سعیدی نژاد 21cm و طول و عرض پایاب به ترتیب 1/5m و 2m بود. تحقیقات سعیدی نژاد (۱۳۸۴) که برای بررسی اثر عمق پایاب ($Y_t = 20cm, 25cm, 35cm, 45cm, 50cm$) بر

جدول ۴: محدوده داده‌های آزمایشگاهی موجود.

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵
محقق / متغیر	سعیدی نژاد (۱۳۸۴) [14]	تحقیق حاضر [23]	آذر (۱۳۷۷) [15]	D'Agostino and Ferro (1994) [13]	Veronese (1937) [11]
نوع جت	جت خروجی از کالورت مستطیلی	جت ریزشی از سرریز لبه تیز مستطیلی			
σ	1/3	1/3 و 2/3 و 2/7 و 1/3	1/13	1/7 و 2/5	1/33
Fr_{d90}	1/59 - 7/41	2/77 - 7/68	0/45 - 1/95	1/19 - 8/011	0/634 - 1/51
$\frac{Y_t}{H_c}$	0/32 - 0/61	0/344 - 0/45	0/097 - 0/5	0/11 - 0/878	0/048 - 0/21
$\frac{H_c}{R}$	17/95 - 46/68	23/45 - 38/94	8/14 - 13/42	5/94 - 21/51	13/48 - 32/79
$\frac{d_{90}}{H_c}$	0/0009 - 0/008	0/002 - 0/008	0/04 - 0/41	0/008 - 0/04	0/008 - 0/034
$\frac{B}{b}$	7/14	8/33	3/19	1/67 و 3/33	1
تعداد داده ها	86	48	80	114	36
ابعاد حفرة آبستنگی که اندازه گیری شد	L_s, Y_s, W_s	L_s, Y_s, W_s, h_m	L_s, Y_s, W_s, h_m	Y_s, h_m	Y_s

جدول ۵: میزان دقت روابط ارائه شده در جدول ۴.

Martins b	Martins(1973)	Mason(model)	Mason(prototype)	Veronese)a	Veronese)b	محقق متغیر
0/144	0/438	0/22	0/371	0/254	0/111	-1<R<1
98	359	188	312/3	112	112/7	MRD

تجزیه و تحلیل

همان‌طور که پیشتر بیان شد، یکی از اهداف انجام این تحقیق بررسی اثر میزان غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفرة آبستگى است. متغیر بی‌بعد Fr_{dm} به عنوان عدد فرود مصالح شناخته می‌شود و به عنوان متغیری مهم در آبستگى ایجادشده توسط جت‌های دیواره‌ای، ریزشی و آفست در نظر گرفته می‌شود [۱۹،۹،۸].

شکل (۳) نشان‌دهنده اثر متغیر غیر یکنواختی مصالح بر حداکثر عمق حفرة آبستگى است. چنانچه در شکل (۳) ملاحظه می‌شود با افزایش میزان غیر یکنواختی مصالح و به دلیل پدیده قفل‌شدگی مصالح، حداکثر عمق حفرة آبستگى کاهش یافته است. روند کاهش ابعاد حفرة آبستگى با افزایش میزان غیر یکنواختی مصالح برای سایر ابعاد حفرة آبستگى نیز مشاهده شد که در این مقاله از آوردن نمودارها برای سایر ابعاد حفرة آبستگى خودداری شده است. شکل‌های (۳) و (۴) مقایسه‌ای بین همبستگی داده‌های آزمایشگاهی و عدد فرود مصالح (Fr_{d50} و Fr_{d90}) را در شرایطی که سایر متغیرهای بدون بعد معرفی شده در رابطه (۹) ثابت باشند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۳) و (۴) مشخص است که انتخاب متغیر Fr_{d90} به جای متغیر Fr_{d50} همبستگی بهتر بین داده‌های مربوط به حداکثر عمق حفرة آبستگى در مصالح با ضریب غیر یکنواختی متفاوت و عدد فرود مصالح ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر عامل d_{90} اثر غیر یکنواختی مصالح را به طور کافی در نظر می‌گیرد. برای سایر ابعاد حفرة آبستگى نیز انتخاب متغیر Fr_{d90} همبستگی مناسبی بین ابعاد حفرة آبستگى و عدد فرود مصالح Fr_{d90} ارائه می‌دهد (شکل‌های ۵ و ۶).

تحقیقات Lim (1995) نشان داد که عرض کانال پایین دست جت در آبستگى ایجادشده در اثر جریان خروجی از کالورت فقط در شرایطی که عرض کانال نسبت به

در تعدادی از این روابط، متغیرهای مهمی مانند قطر مصالح شرکت ندارد (روابط Martins و Veronese-b). در همه روابط ارائه‌شده در جدول (۱) متغیر بسیار مهمی مانند غیر یکنواختی مصالح و نسبت عرض جت ریزشی به عرض کانال ثانویه در نظر گرفته نشده است و به نظر می‌رسد دلیل اصلی اختلاف‌های موجود بین داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی و روابط با فرم کلی رابطه (۱) در نظر گرفته نشدن این متغیرها است. در روابط (۳ و ۴) متغیرهای قطر مصالح و شتاب ثقل به عنوان متغیرهایی جدید برای بهبود رابطه (۱) در نظر گرفته شده است [۱۰]. ولی در روابط ارائه‌شده توسط این محققان، متغیرهای غیر یکنواختی مصالح و نسبت عرض جت به عرض پایاب در نظر گرفته نشده است. در روابط جدیدتر ارائه‌شده که اغلب به شکل بدون بعد هستند، متغیر قطر مصالح و چگالی آنها همراه با سرعت جت و شتاب ثقل به شکل بدون بعد عدد فرود مصالح معرفی می‌شوند که از نظر فیزیکی نسبت نیروی وارد شده از طرف جریان جت به وزن مستغرق مصالح است [۱۳،۶]. ابعاد حفرة آبستگى تحت تأثیر عرض جت نیز هست [۱۷،۱۶].

اما تأثیر متغیر عرض جت ریزشی تنها در رابطه ارائه‌شده توسط D'Agostino and Ferro (2004) در نظر گرفته شده است [۱۳].

جدول ۶: میزان دقت روابط بی‌بعد ارائه شده با توجه به داده‌های آزمایشگاهی.

DAgostino and Ferro (2004) [13]	Ghodsian et al (2006) [6]	Ghodsian and Azar (2002) [18]	محقق متغیر
-0/023	0/4	-0/04	-1<R<1
44	106	69	MRD

تحقیقات Amanian (1993) نیز درباره جریان خروجی از جام‌های پرتابی نشان داد که در شرایطی که عرض کانال پایین دست کم باشد، ابعاد حفرة آبستنگی کاهش می‌یابد و میزان این کاهش در شرایطی که عمق پایاب کمتر و شدت جریان جت بیشتر باشد، افزایش می‌یابد [۱۷]. در تحقیق حاضر متغیر $\frac{B}{b}$ به عنوان متغیری تأثیرگذار بر ابعاد حفرة آبستنگی در نظر گرفته شده است.

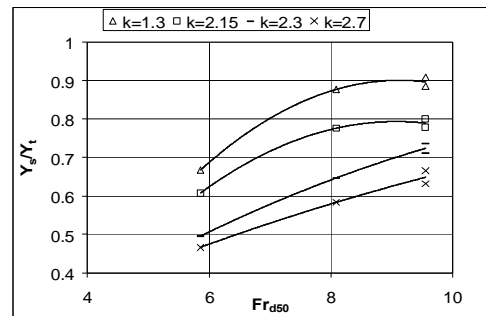
در تحقیقات انجام‌شده توسط Ghodsian et al. (2006) متغیر $\frac{H_c}{R}$ به شکل ترکیبی با عدد فرود مصالح (رابطه ۶) به عنوان متغیری تأثیرگذار بر ابعاد حفرة آبستنگی در نظر گرفته شد [۶]. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان داد که انتخاب مجزای این متغیر به عنوان متغیری تأثیرگذار بر ابعاد حفرة آبستنگی، نتایج مناسب‌تری (نسبت به شرایطی که این متغیر با عدد فرود مصالح ترکیب شود) ارائه می‌دهد. اثر متغیر $\frac{Y_t}{H_c}$ بر ابعاد حفرة آبستنگی توسط Ghodsian et al. (2006) بررسی و اثر دوگانه آن بر ابعاد حفرة آبستنگی معین شده است [۶].

در ادامه با توجه به رابطه (۹) و داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده در جدول (۴) روابطی را برای تخمین ابعاد حفرة آبستنگی در اثر جت‌های ریزشی ارائه می‌دهیم. رابطه (۹) را می‌توان به شکل رابطه (۱۲) بازنویسی کرد. ضرایب x_1 تا x_7 ضرایب مجهول رابطه (۱۲) هستند که از راه رگرسیون و کمینه کردن MRD و بیشینه کردن مقدار R برای داده‌های آزمایشگاهی معرفی شده در جدول (۴) به دست می‌آیند.

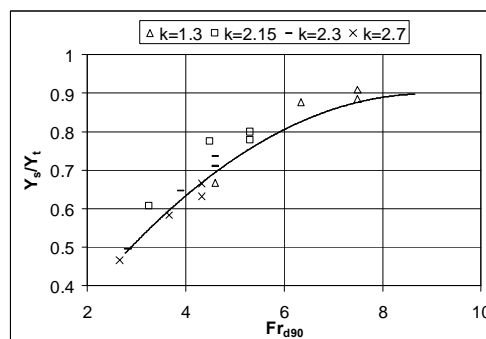
$$\frac{\phi}{Y_t} = x_1 k^{x_2} Fr_{d90}^{x_3} \left(\frac{H_c}{R}\right)^{x_4} \left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)^{x_5} \left(\frac{B}{b}\right)^{x_6} \left(\frac{Y_t}{H_c}\right)^{x_7} \quad (12)$$

مقادیر ضرایب بهینه شده برای ابعاد حفرة آبستنگی در جدول (۷) ارائه شده است. در ارتباط با اثر قطر مصالح بر ابعاد حفرة آبستنگی ناشی از جت‌های ریزشی، اطلاعات کمتری در دسترس است. به عنوان مثال دو نظر درباره تأثیرگذاری متغیر قطر

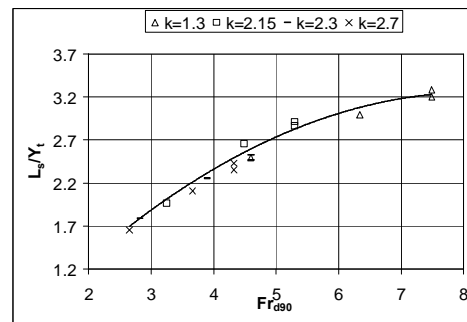
عرض جت خروجی از کالورت کمتر از ۱۰ باشد، بر ابعاد حفرة آبستنگی تأثیرگذار است [۱۶].



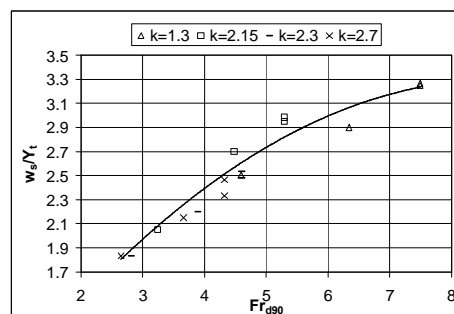
شکل ۳: تغییر حداکثر عمق حفرة آبستنگی با تغییرات عدد فرود مصالح Fr_{d50}



شکل ۴: تغییر حداکثر عمق حفرة آبستنگی با تغییرات عدد فرود مصالح Fr_{d90}



شکل ۵: تغییر حداکثر طول حفرة با تغییرات عدد فرود مصالح Fr_{d90}



شکل ۶: تغییر حداکثر عرض حفرة با تغییرات عدد فرود مصالح Fr_{d90}

عبارت دیگر عامل d_{90} به خوبی اثر غیر یکنواختی مصالح را در نظر می‌گیرد. چنانچه شکل‌های (۴ تا ۶) نیز این نظر را تأیید می‌کنند. اما در صورت استفاده از متغیر Fr_{d50} به عنوان عدد فرود مصالح، دقت روابط ارائه شده بدون در نظر گرفتن ضریب غیر یکنواختی مصالح، تغییر محسوسی (حدود ۱۱٪ برای MRD) دارد. میزان کاهش دقت رابطه (۱۳) در صورت استفاده از Fr_{d50} به جای Fr_{d90} در شرایطی که روابط برای داده‌های نمونه اصلی صحت سنجی شدند محسوس‌تر است (این مورد در بخش ۷ مقاله بررسی شده است). شکل (۷) نشان‌دهنده مقایسه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از رابطه (۱۳) برای متغیرهای آبهستگی است. روشن است که رابطه جدید ارائه شده در این تحقیق از دقت قابل قبولی بهره‌مند است و نسبت به روابط قبلی نتایج بهتری برای آبهستگی ارائه می‌دهد.

ارزیابی روابط ارائه شده با توجه به داده‌های نمونه اصلی

برای اطمینان از درستی روابط ارائه شده، مقایسه‌ای بین داده‌های نمونه اصلی و نتایج به دست آمده از رابطه (۱۳) ارائه می‌شود. تعداد زیادی از داده‌های نمونه اصلی مورد استفاده در این تحقیق مربوط به تحقیق (1978) Falciai and Giacomini است [۲۱]. ایشان حداکثر عمق حفرة آبهستگی ایجاد شده در اثر سیل‌های ده ساله را برای ۲۹ سد در کشور ایتالیا بررسی کردند. سه داده دیگر نیز برای نمونه اصلی مربوط به مراجع [۲۲، ۲۰، ۱۱] است. Veronese (1937) حداکثر عمق حفرة آبهستگی

سد Rochetta در ایتالیا را ارائه داده است. مصالح قرار گرفته در محل ریزش جت دارای $d_{50} = 0.1m$ و یکنواخت است [۱۱]. اطلاعاتی درباره سد Cabora Bassa در موزامبیک نیز ارائه شده است [۲۰]. دبی خروجی از این سد $13100m^3/s$ است و طول سرریز این سد $47/6m$ است. رسوبات پایین دست سد قطرهایی برابر با $d_{85} = 2.625m, d_{50} = 2.1m, d_{15} = 0.975m$ دارند.

تعداد کل داده‌های مورد استفاده در مقاله حاضر که مربوط به نمونه اصلی است، ۳۲ عدد است. داده‌های گزارش شده مربوط به نمونه اصلی مربوط به حداکثر عمق حفرة آبهستگی است. نتایج به دست آمده از روابط ارائه شده توسط محققان قبلی برای حداکثر عمق حفرة

مصالح بر ابعاد حفرة آبهستگی وجود دارد [۲۰]. نظر اول که قطر مصالح را به شکل متغیری با بعد بر ابعاد حفرة آبهستگی تأثیرگذار می‌داند، مانند تحقیقات Veronese-b که قطر مصالح را در صورتی که بزرگ‌تر از 5mm باشد، بر ابعاد حفرة آبهستگی تأثیرگذار می‌داند. نظر دوم متغیر قطر مصالح را به شکل بی‌بعد بر ابعاد حفرة آبهستگی تأثیرگذار می‌داند. به عنوان مثال اگر نسبت ارتفاع ریزش به قطر مصالح بیشتر از ۲۰۰ باشد، حداکثر عمق حفرة آبهستگی مستقل از قطر مصالح خواهد بود [۲۰]. اما نادرستی این مقدار توسط قدسیان و آذر (۲۰۰۲) نشان داده شده است [۱۸]. همان‌طور که در شکل‌های (۴ تا ۶) نشان داده شد، با حذف متغیر $\left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)$ در رابطه (۱۲) و کالیبره کردن توان‌های باقی‌مانده در رابطه (۱۲)، تغییر زیادی در مقدار R و MRD نسبت به شرایطی که $\left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)$ در رابطه (۱۲) وجود داشته باشد، ایجاد نمی‌شود. به عنوان مثال برای حداکثر عمق حفرة آبهستگی مقدار $MRD=25/7$ و $R=0/93$ می‌شود. بنابراین متغیر $\left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)$ نسبت به سایر متغیرهای ارائه شده در رابطه (۱۲) اهمیت کمتری دارد. با توجه به مطالب قبلی مبنی بر اینکه d_{90} اثر غیر یکنواختی مصالح را در نظر می‌گیرد، می‌توان متغیر k را از رابطه (۱۲) حذف و آن را به شکل رابطه (۱۳) نوشت. مقادیر ضرایب رابطه (۱۳)، با توجه به کمینه کردن مقدار MRD و بیشینه کردن R، در جدول (۸) ارائه شده است.

$$\frac{\phi}{Y_t} = x_1 Fr_{d90}^{x_3} \left(\frac{H_c}{R}\right)^{x_4} \left(\frac{B}{b}\right)^{x_6} \left(\frac{Y_t}{H_c}\right)^{x_7} \quad (13)$$

مقدار MRD و R روابط (۱۲ و ۱۳) با توجه به ضرایب ارائه شده در جداول (۷ و ۸)، در جدول (۹) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۹) تغییر قابل توجهی در مقدار MRD و R به دست آمده از رابطه (۱۳) (که با حذف متغیر $\left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)$ از رابطه ۱۲ ایجاد شده است) نسبت به رابطه (۱۲) ایجاد نمی‌شود. درباره حذف متغیر k و تغییری نکردن قابل توجه دقت روابط ارائه شده، می‌توان گفت که اثر این متغیر در شرایطی که Fr_{d90} به جای Fr_{d50} به کار می‌رود، در متغیر Fr_{d90} مستتر است. به

نمونه اصلی خطایی کمتر از ۵۰ درصد دارند. ۴۰ درصد داده‌ها خطای مثبت دارند (مقادیر بیشتری را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در نمونه اصلی ارایه می‌دهند). رابطه (۱۳) با توجه به اعمال ضرایب ارایه شده در جدول (۶) خطای ۴۳ درصد برای طول حفرة آبخستگی ایجاد شده در سد Caborra-Bassa است. بنابراین رابطه ارایه شده در این تحقیق به مراتب بهتر از روابط ارایه شده در تحقیقات قبلی است و نتایج آن در طبیعت نیز کاربرد خواهد داشت. لازم به ذکر است که استفاده از Fr_{d50} به جای Fr_{d90} در رابطه (۱۳) نتایج مناسبی را ارایه نداد ($MRD=63\%$). یعنی در ارایه رابطه مناسب برای تعیین ابعاد حفرة آبخستگی در صورت استفاده از متغیر Fr_{d50} نیاز است که تأثیر غیر یکنواختی مصالح در متغیری جداگانه در نظر گرفته شود.

آبخستگی دارای خطای بسیار زیادی نسبت به داده‌های نمونه اصلی هستند. خطای MRD برای داده‌های نمونه اصلی استفاده شده برای رابطه Veronese-b ۱۲۰ درصد است. کمترین خطا مربوط به رابطه D'Agostino and Ferro(2004) است که مقدار $MRD=54$ و ضریب همبستگی آن 0/66 است. شکل (۸) نشان‌دهنده مقایسه بین داده‌های نمونه اصلی موجود و رابطه (۱۳) برای حداکثر عمق حفرة آبخستگی است. برای مقایسه نتایج به دست آمده از رابطه (۱۳) با روابط ارایه شده توسط محققان قبلی، نتایج به دست آمده از رابطه D'Agostino and Ferro(2004) که کمترین خطا را نسبت به داده‌های نمونه اصلی دارد نیز در شکل (۹) آورده شده است. با مقایسه نتایج ناشی از رابطه (۱۳) با داده‌های موجود برای نمونه اصلی مقادیر $MRD = 33$ و $R=0/97$ است. علاوه بر این 95% نتایج به دست آمده از رابطه (۱۳) برای

جدول ۷: ضرایب و توان‌های رابطه ۱۲.

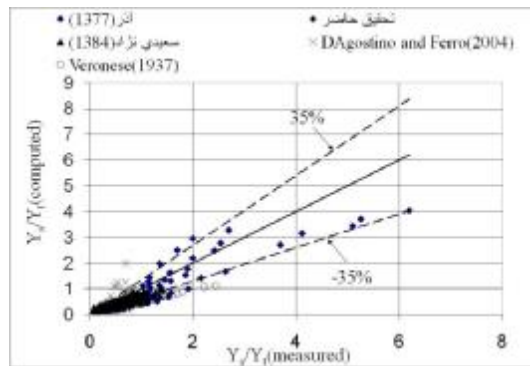
کل داده ها	x_7	x_6	x_5	x_4	x_3	x_2	x_1	ضریب ابعاد
366	-1/08	0/55	-0/04	-0/77	0/34	-0/05	0.49	$\frac{Y_s}{Y_t}$
216	-1/09	0/26	-0/04	-0/93	0/17	-0/03	8.4	$\frac{W_s}{Y_t}$
216	-1/09	0/32	-0/05	-0/94	0/56	-0/02	4.9	$\frac{L_s}{Y_t}$

جدول ۸: ضرایب کالیبره شده برای تخمین ابعاد حفرة آبخستگی در رابطه ۱۳.

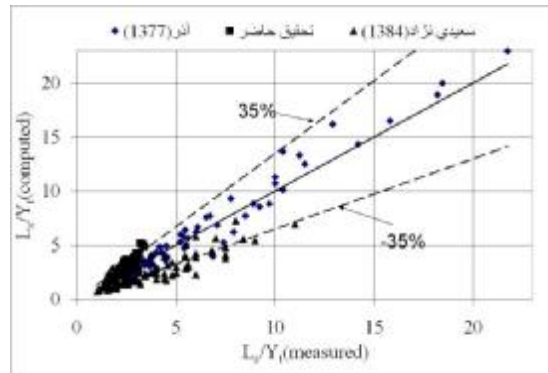
کل داده ها	x_7	x_6	x_4	x_3	x_1	ضریب ابعاد
366	-1.07	0.56	-0.76	0.35	0.53	$\frac{Y_s}{Y_t}$
216	-1.01	0.06	-0.77	0.25	9.3	$\frac{W_s}{Y_t}$
216	-0.89	0.38	-0.31	0.5	5.89	$\frac{L_s}{Y_t}$

جدول ۹: بررسی تأثیر متغیر $\left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)$ و $Fr_{dm} k$ بر ابعاد حفره آبستگي.

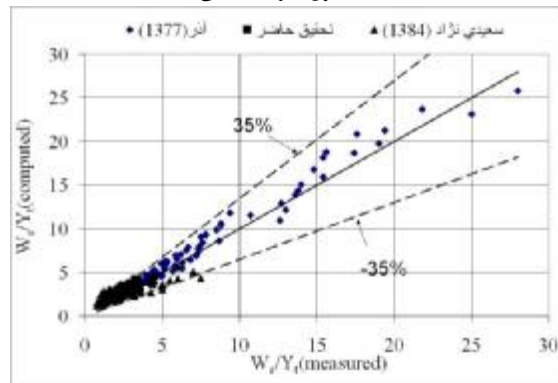
R	MRD	استفاده از Fr_{d50} و Fr_{d90} در رابطه (۱۳)	R	MRD	رابطه (۱۳)	R	MRD	متغیر آماری ابعاد حفره	رابطه (۱۳)
			0/93	۲۵		0/95	23	$\frac{Y_s}{Y_t}$	
0/91	۳۴		0/93	۲۵	رابطه (۱۳)	0/95	23	$\frac{Y_s}{Y_t}$	رابطه (۱۳)
0/94	۲۵		0/976	14		0/98	12	$\frac{W_s}{Y_t}$	
0/87	۲۵		0/93	17		0/95	15	$\frac{L_s}{Y_t}$	



الف - حداکثر عمق حفره آبستگي



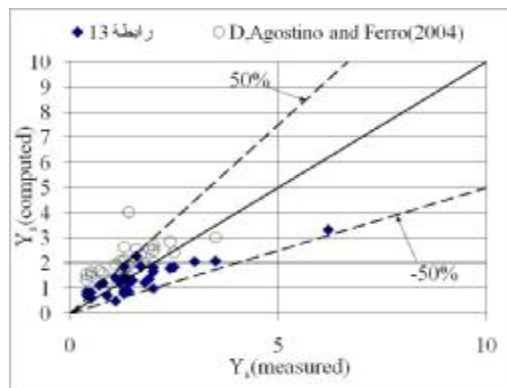
ب - طول حفره آبستگي



ج - عرض حفره آبستگي

شکل ۷: مقایسه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و رابطه (۱۳) برای ابعاد مختلف حفره آبستگي .

انتخاب Fr_{d90} همبستگی مناسبتری بین داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. متغیر d_{90} اثر غیریکنواختی مصالح را در خود در نظر می‌گیرد. رابطه (۱۳) تقریب خوبی از رابطه (۱۲) است. نتایج نشان داد متغیر $\left(\frac{d_{90}}{H_c}\right)$ در محدوده داده‌های مورد استفاده نسبت به سایر متغیرهای ارایه‌شده در رابطه (۹) اهمیت کمی دارد و می‌تواند از رابطه نهایی نیز حذف شود. برای بررسی درستی روابط ارایه‌شده، مقایسه‌ای بین داده‌های به دست آمده از نمونه‌های اصلی و نتایج به دست آمده از رابطه (۱۳) شده است. از بین روابط که توسط محققان قبلی ارایه شده است، رابطه D'Agostino and Ferro(2004) خطای کمتری نسبت به داده‌های نمونه اصلی نشان می‌دهد. حداکثر عمق حفرة آبشستگی که توسط رابطه (۱۳) ارایه شده است نتایج مناسبتری نسبت به رابطه D'Agostino and Ferro(2004) and Ferro(2004) ارایه داده است. داده‌های موجود برای طول حفرة آبشستگی ایجادشده در سد Caborra Bassa نیز نشان داد که رابطه (۱۳) می‌تواند با تقریب خوبی این ابعاد را پیش‌بینی کند.



شکل ۸: مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از رابطه (۱۳) برای حداکثر عمق حفرة آبشستگی در نمونه اصلی.

نتیجه‌گیری

ارزیابی روابط تجربی موجود برای تخمین حداکثر عمق حفرة آبشستگی نشان داد که این روابط نتایج خوبی را برای برآورد ابعاد حفرة آبشستگی ارایه نمی‌دهد. با توجه به اطلاعات آزمایشگاهی متنوع در دسترس و با استفاده از آنالیز ابعادی، روابطی برای تخمین ابعاد حفرة آبشستگی ارایه شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان غیریکنواختی مصالح ابعاد حفرة آبشستگی کاهش می‌یابد.

مراجع

- 1 - Dey, S. and Sarkar, A. (2004). "Review on local scour due to jets." *International Journal of Sediment Research*, Vol. 19, No. 3, PP. 210-238.
- 2 - Ojha, p. (1999). "Outlet scour modeling for drop height influence." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 125, No. 1, PP. 83- 85.
- 3 - Doehring, K.F. and Abt, S. (1994). "Drop height influence on outlet scour." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 120, No. 12, PP. 1470-1476.
- 4 - Rajaratnam, N., Aderibigbe, O. and Pochylko, D. (1995). "Erosion of sand beds by oblique plane water jets." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*, Paper. 1382, PP. 31-38.
- 5 - Rajaratnam, N. and Mazurek, K.A. (2002). "Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets." *J. of Hydraulic Res.*, Vol. 40, No. 6, PP. 709-716.
- 6 - Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D. (2006). "Scour Due to Free Overfall Jet." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*, Paper: 14427, PP. 253-260.
- 7 - Mih, W. C. and J. Kabir. (1983). "Impingement of water jets on non uniform streambed." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 109, No. 4, PP. 536-548.
- 8 - Aderibigbe, O., and Rajaratnam, N. (1998). "Effect of Sediment Gradation on the Erosion by Plane Turbulent Wall jets." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 124, No. 10, PP. 1034-1042.
- 9 - Ali, K. H. M. and Salehi Neyshaboury, A. A. (1991). "Localized Scour Downstream of Deeply Submerged Horizontal Jet." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 91, PP. 1-18.

- 10 - Mason, P. J. and Arumugan, K. (1985). "Free jet scour below dams and flip buckets." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 111, No. 2, PP. 220-235.
- 11 - Veronese, A. (1937). "Erosioni di fondo a valle di uno scarico." *Annal.Lavori Pubbl.*, Vol. 75, No. 91, PP. 717-726 (in Italian).
- 12 - Martins, F. (1973) "Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds." *Trans. 11th International Congress of Large Dams*, 441, R. 44, PP. 799-814.
- 13 - D'Agostino, V and Ferro, V (2004). "Scour on Alluvial Bed Downstream of Grade-Control structures." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 130, No. 1, PP. 24-37.
- 14 - Saeidi Nezhad, M. R. (2005). *Scour study downstream of free over fall jets*. Msc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- 15 - Azar Faradanbeh, A. (1998). *Sediment non-uniformity effect on scour hole due to free fall jets*. Msc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran- Iran.
- 16 - Lim, S. Y. (1995). "Scour below unsubmerged full-flowing culvert outlets." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 112, No. 2, PP. 136-149.
- 17 - Amanian, N. (1993). *Scour below flip-bucket spillway*. Ph.D Thesis, Utah State University.
- 18 - Ghodsian, M. and Azar, A. (2002). "Scour hole characteristics below free overfall spillway." *International journal of sediment research.*, Vol. 17, No. 4, PP. 304-313.
- 19 - Ade, F. and Rajaratnam, N. (1998). "Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets." *J. of Hydraulic Res.*, Vol. 36, No. 4, PP. 613- 635.
- 20- Whittaker, J. G. and Schleiss, A. (1984). "Scour related to energy dissipators for high head structures." *Mitt. Nr. 73 VAW/ETH, Zurich*.
- 21 - Falciai, M. and Giacomini, A. (1978). "Indagine sui gorghi che si formano a valle delle traverse torrentizie." *Italia Forestale Montana.*, Vol. 23, No.3, PP. 111-123 (in Italian).
- 22 - Scimemi, E. (1939). "Sulla Relazione Che Intercede fra gli Scavi Osservati Nelle opere Idrauliche Originali e nei Modelli." *Energ. Elettr.*, Vol. 16, No. 11, PP. 3-8 (in Italian).
- 23 - Ranjbar, H. R. (2007) *Scour study due to free fall jets in non-uniform sediment*. Msc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran- Iran.
- 24 - Bureau of Indian Standards (BIS). (1985). *Criteria of Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipaters*. BIS: 7365- New Delhi, India.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Bureau of Indian Standards