

## بر آورد عمق آبشستگی در پایین دست سازه‌های شیب‌شکن

سیدمجتبی رضوی نبوی\*، محمود شفاعی بجستان و سیدمحمود کاشفی پور\*\*

\* نگارنده مسئول، نشانی: تهران، خیابان فلسطین شمالی، پلاک ۵۱۷، شرکت مدیریت منابع آب، تلفن: ۸۸۹۲۰۸۰۷ (۰۲۱)،

پیام نگار: smrnabavi@yahoo.com

\*\* به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ استادان هیدرولیک، دانشکده مهندسی و علوم آب، دانشگاه شهید چمران

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۳/۲۷

### چکیده

سازه شیب‌شکن از جمله سازه‌های هیدرولیکی است که در تثبیت بستر رودخانه کاربرد زیادی دارد؛ آبشستگی موضعی پایین دست آن عامل اصلی تخریب سازه است. مطالعات زیاد در این خصوص به ارائه روابط متعددی برای پیش‌بینی عمق حفرة آبشستگی انجامیده است. نتایج به دست آمده همواره برای طراحان این نگرانی را به وجود آورده که برای طراحی، کدام رابطه دقت بیشتری دارد. در این تحقیق از طریق ساخت مدل فیزیکی، آزمایش برای جت مستغرق، با سه نوع دانه‌بندی (۱/۵، ۲/۴، ۳/۱ میلی‌متر) در پایین دست سرریز و با دبی‌هایی شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر ثانیه به اجرا درآمد. برای تحلیل داده‌ها و رگرسیون چند متغیره گروه‌های بدون بعد، از نرم‌افزار Minitab استفاده شد. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، دقت پیش‌بینی عمق آبشستگی با تعدادی از روابط موجود مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که رابطه‌های پیشنهادی ورنس A، میسون و آروموگام، آگوستینو و فررو، و چی و پادیار دقیق ترند. علاوه بر این، رابطه‌ای جدید پیشنهاد شد که با مقایسه شاخص‌های ضریب همبستگی ( $R = 94\%$ ) و جذر متوسط مربعات خطا ( $RMSE = 0.15$ )، نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

تثبیت بستر، سازه شیب‌شکن، حفرة آبشستگی، مدل فیزیکی، رودخانه

### مقدمه

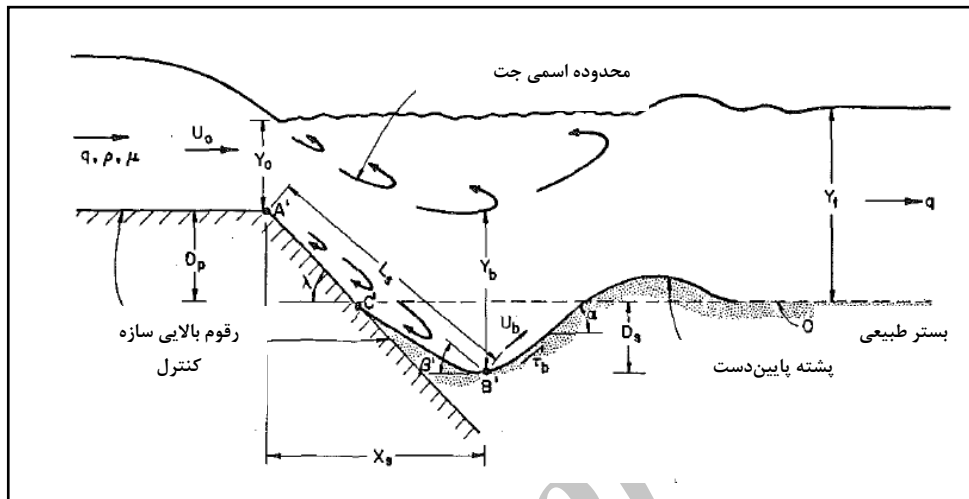
لازم را به منظور پایداری این سازه‌ها در نظر بگیرند

(Shafai Bejestan M., 2010).

برای تبیین فرآیند کلی آبشستگی با بهره‌گیری از مقاله بورمن و جولین (Bormann & Julien, 1991)، در شکل ۱ مشاهده می‌شود که جت مایل با سرعت  $U_0$  و ضخامت  $Y_0$  پس از ورود در نقطه  $A'$  به داخل آب پایاب با عمق  $Y_t$  به صورت مستغرق درمی‌آید (این وضعیت برای جت قائم نیز قابل تعمیم است). این جت در حد فاصل نقاط  $A'$  تا  $B'$  حالت پخشیدگی پیدا می‌کند. جت در نقطه  $A'$  از سازه جدا می‌شود و در همین منطقه گردابه شکل می‌گیرد. به موازات کاهش فشار در حد فاصل نقاط

آبشستگی پدیده‌ای است که معمولاً در پایین دست سازه‌های آبی تقاطعی در رودخانه‌ها، از جمله سازه شیب‌شکن، دیده می‌شود. این پدیده ناشی از انرژی جنبشی زیاد آب و بالا بودن سرعت برشی موضعی است. در فرآیند آبشستگی، ذرات رسوبی از بستر جدا و به پایین دست منتقل می‌شوند. اثر فرسایشی آب باعث ایجاد آبشستگی در پایین دست این سازه‌ها و در مواردی تخریب سازه‌ها بوده است. بنابراین، لازم است طراحان اطلاعات کاملی از مکانیک ذرات و موقعیت و ابعاد حفرة آبشستگی پایین دست در دسترس داشته باشند تا بتوانند تمهیدات

$A'$  تا  $C'$  به دلیل تأثیر فشار منفی، جت ورودی به سمت مرز منحرف می‌شود (Newman, 1961). نیروهای هیدرودینامیک در اثر سرعت جریان متلاطم  $U_b$  در نقطه  $B'$  باعث کنده شدن و جابه‌جایی ذرات می‌شود و بدین ترتیب ابعاد هندسی حفره آبستگي، و به خصوص عمق آن، توسعه می‌یابد.



شکل ۱- نمایش برخورد جت مایل مستغرق با سطح بستر و ایجاد حفره آبستگي (Bormann & Julien, 1991).

در شرایطی که عمق آب پایاب افزایش یابد، به دلیل طولانی‌تر شدن مسیر جت ورودی تا بستر و به لحاظ استهلاک انرژی ناشی از پخشیدگی جت، تنش برشی موضعی در مجاورت ذرات بستر کاهش می‌یابد، از عمق حفره کاسته می‌شود، و حالت تعادل در حفره آبستگي در شرایطی به وجود می‌آید که نیروهای وارده به ذره قدرت انتقال ذرات را نداشته باشند. حداکثر عمق آبستگي به طول مسیر جت و زاویه برخورد آن با بستر بستگی دارد. بر این اساس رابطه ۱ را می‌توان نوشت:

$$D_s = L_s \sin \beta' - D_p \quad (1)$$

که در آن،  $D_s =$  حداکثر عمق آبستگي؛  $L_s =$  طول پخشیدگی؛

شیب‌شکن است. یوان (Yuen, 1984) معتقد است که زاویه جت آب با امتداد بستر؛ و  $D_p =$  ارتفاع سازه  $(\beta')$  با زاویه‌ای که با سطح آب می‌سازد، تقریباً برابر است. راجاراتنام (Rajaratnam, 1981) دریافت که زاویه شیب پایین دست حفره آبستگي  $(\alpha)$  تقریباً با زاویه جت آب برابر است. محققانی همچون بورمن و جولین (Bormann & Julien, 1991) و آلبرتسون (Shafai Bejestan & Albertson, 1992) تلاش کردند تا با به کار بردن تئوری پخشیدگی جت و ترکیب با نظریه آستانه حرکت، مقدار  $L_s$  را در شرایط تعادلی استخراج کنند که به روابطی به شکل کلی زیر انجامید:

$$D_s = \left\{ \left[ \frac{\gamma \sin \phi}{\sin(\phi + \alpha) B (\gamma_s - \gamma) g} \right]^{0.8} \frac{C_d^2 Y_0^{0.6} U_0^{1.6}}{d_{50}^{0.4}} \sin \beta' \right\} - D_p \quad (2)$$

که تا سال ۱۹۸۵ منتشر شده است، رابطه کلی ۳ را برای مقایسه رابطه پیشنهادی خود و سایر محققان ارائه دادند. در جدول ۱ مقادیر ضریب K و توانی  $a, b, c, d, e, f, i$  برای هر رابطه در سیستم متریک درج شده است.

$$D_s + D_p = K \frac{q^a U_o^b \Delta H^c Y_t^d \beta'^e}{g^f d_s^i} \quad (3)$$

که در آن،  $q$  = دبی در واحد عرض سرریز (مترمکعب بر ثانیه)؛  $Y_t$  = عمق پایاب (متر)؛  $\Delta H$  = اختلاف انرژی موجود در بالادست و پايين دست سازه (متر)؛ و  $d_s$  = قطر مؤثر ذرات خاک (متر) است (سایر پارامترها در روابط قبل معرفی شده‌اند).

که در آن،  $\gamma_s$  و  $\gamma$  = به ترتیب وزن واحد حجم آب و ذرات رسوبي؛  $\phi$  = زاویه ایستایی ذرات رسوبي؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $C_d$  = ضریب پخشیدگی جت؛  $B$  = ضریب اصطحکاک موضعی؛  $d_{50}$  = قطر ذرات کوچکتر از ۵۰ درصد نمونه؛  $Y_0$  و  $U_0$  = به ترتیب عمق و سرعت جریان بحرانی است. به استثنای رابطه فوق که نیمه تجربی است، محققان دیگر با به کار بردن آنالیز ابعادی و تحلیل رگرسیون، روابطی برای تعیین حداکثر عمق آبستگي موضعی ناشی از جت خروجی در پايين دست سرریزها و آبشارها ارائه داده‌اند. بورمن و جولین (Bormann & Julien, 1991) با استناد به مقاله میسون و آروم-وگام (Mason & Arumugam, 1985) با مقایسه و مروری جامع بر منابعی

جدول ۱- مقادیر ضریب و نما در معادله ۳ برای معادلات مختلف تعیین عمق آبستگي (Mason & Arumugam, 1985)

$d_s$	i	f	e	d	c	B	a	K	محقق	ردیف
	(9)	(8)	(7)	(6)	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)	
$d_1$	۰/۳۲	-	-	-	۰/۲	۰	۰/۵۷	۰/۵	Schoklitsch (1932)	۱
$d_2$	۰/۴۲	-	-	-	۰/۲۲۵	۰	۰/۵۴	۰/۲	Veronese (1937 A)	۲
-	-	-	-	-	۰/۲۲۵	۰	۰/۵۴	۱/۹	Veronese (1937 B)	۳
-	۰/۳۳	-	-	-	۰/۳۳	۰	۰/۵۰	۰/۶	Jaeger (1939)	۴
$d_4$	۰/۴۰	-	-	-	۰/۵۰	۰	۰/۶۰	۱/۴	Eggenberger (1943)	۵
-	۰/۴۰	۰/۸	-	-	۰/۵۰	۰	۰/۶۰	I	Mueller and Eggenberger (1944)	۶
$d_{1.5}$	۰/۳۲	-	-	-	۰/۳۶	۰	۰/۶۴	۱/۴	Hartung (1959)	۷
-	-	-	-	-	۰/۵۰	۰	۰/۵۰	۰/۶	Damle et al. (1966)	۸
$d_5$	۰/۰۶	-	-	-	۰/۱۸	۰	۰/۶۷	۲/۱	Chee and padiyar (1969)	۹
$d_5$	۰/۱۰	-	-	-	۰/۲۰	۰	۰/۶۰	۱/۷	Chee and Kung (1971)	۱۰
$d_1$	۰/۰۶۴۵	-	-	-	۰/۳۴۵	۰	۰/۵	۱/۳۵	Machado (1980)	۱۱
-	-	-	-	-	۰/۱۰	۰	۰/۶۰	۱/۵	Martins (1975)	۱۲
-	۰/۱۰	۰/۳۰	-	۰/۱۵	۰/۰۵	۰	۰/۶۰	۳/۲۷	Mason and Arumugam (1985)	۱۳
-	-	-	-	-	۰/۱	۰	۰/۶	۲/۳	Sofrelec (1980)	۱۴
-	۰/۴	۰/۸	۱/۰ II	-	-	۱/۰	۰/۶۰	III	Bormann & Julien (1991)	۱۵

۱:  $k$  بستگی به شکل جت دارد، II: ضروری است  $\sin \beta'$  استفاده شود، III: مقادیر ثابت بستگی دارد به شکل سازه ورودی و خصوصیات رسوبات.

بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۱، نتایج زیر به دست می‌آید:

۱- مقادیر  $a$  در بیشتر روابط مذکور به یکدیگر نزدیک هستند.

۲- مقادیر  $i$  در نیمی از روابط نزدیک به هم هستند و در سایر موارد مقدار آن در حدود ۰/۱ است.

۳- رابطه به دست آمده در شرایط بزرگ مقیاس (معادله ردیف ۱۵) با سایر روابط به دست آمده در شرایط کوچک مقیاس شباهت زیادی دارد.

محققان، از جمله قدسیان و آذرفرانبه

بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۱، نتایج زیر به دست می‌آید:

۱- مقادیر  $a$  در بیشتر روابط مذکور به یکدیگر نزدیک هستند.

۲- مقادیر  $i$  در نیمی از روابط نزدیک به هم هستند و در سایر موارد مقدار آن در حدود ۰/۱ است.

۳- رابطه به دست آمده در شرایط بزرگ مقیاس (معادله ردیف ۱۵) با سایر روابط به دست آمده در شرایط کوچک مقیاس شباهت زیادی دارد.

محققان، از جمله قدسیان و آذرفرانبه

$$\frac{D_s}{D_p} = 0.54 \left( \frac{b}{D_p} \right)^{0.593} \left( \frac{Y_t}{H} \right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left( \frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{-0.856} \left( \frac{b}{B} \right)^{-0.751} \quad (4)$$

با توجه به اینکه با استفاده از روابط پیشنهاد شده، نتایج مختلفی به دست می‌آید، در این تحقیق سعی شده است که با تکیه بر نتایج به دست آمده از مدل فیزیکی، روابط مذکور را بررسی و مقایسه کند و در نهایت ضمن معرفی مناسب‌ترین رابطه‌ها، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه جدیدی پیشنهاد نماید.

$$A_{50} = \frac{Q}{bD_p \left[ gd_{50} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{0.5}} \quad (5)$$

### مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این تحقیق و اجرای آزمایش‌ها، مدل فیزیکی با ابعاد بزرگ در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو طراحی و ساخته شد. فلوم آزمایشگاهی از دو قسمت تشکیل شده است: در قسمت اول فلوم به طول ۷ متر سرریز لبه پهن با ارتفاع ۶۲/۱ سانتی‌متر نسبت به کف فلوم با پوشش پلکسی‌گلاس نصب شد که در پایین دست آن ذرات با دانه‌بندی مشخص تحت تأثیر آبشستگی ناشی از دبی عبوری از سرریز قرار گرفت. یادآوری می‌شود که در انتهای قسمت اول فلوم، دریچه متحرک جهت تنظیم و کنترل سطح پایاب ( $Y_t$ )

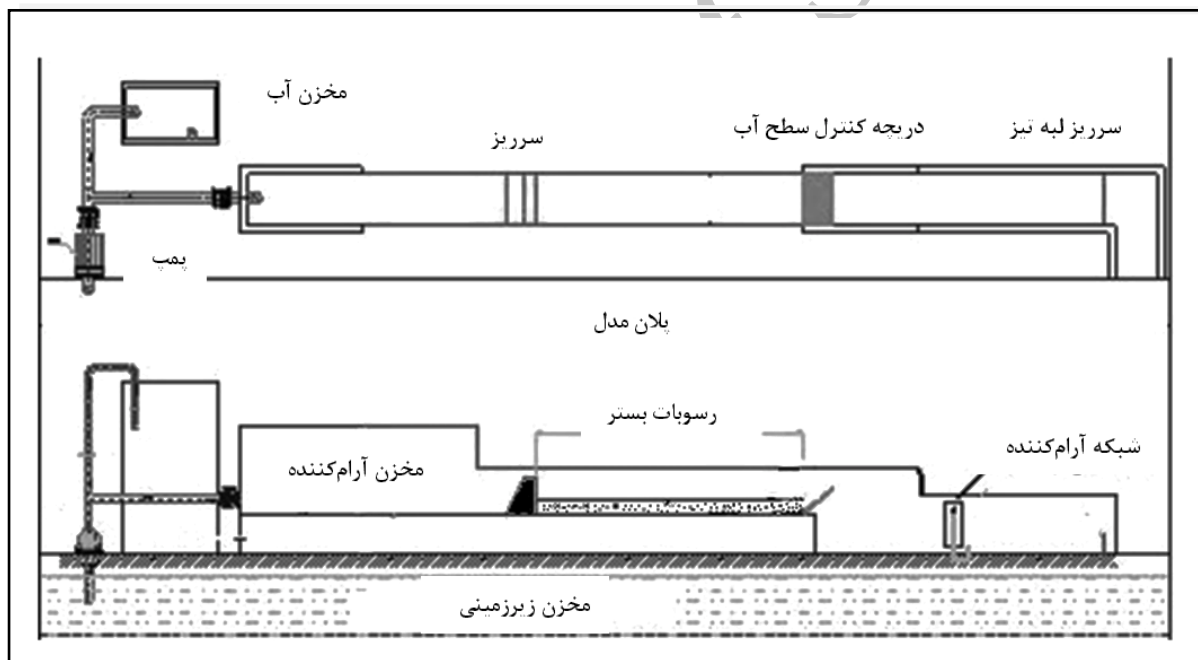
که در آن‌ها،  $H$  = بار آبی یا اختلاف انرژی بالادست و پایین دست سازه (متر)؛  $d_{90}$  = قطر ذرات کوچکتر از ۹۰ درصد نمونه؛  $Q$  = دبی جریان آب (مترمکعب بر ثانیه)؛ و  $\rho$  و  $\rho_s$  = به ترتیب وزن مخصوص آب و ذرات جامد (کیلوگرم بر مترمکعب) است (سایر پارامترها در روابط قبل معرفی شده‌اند). ویژگی رابطه مذکور این است که در مواردی که عرض سازه سرریز شونده ( $b$ ) با عرض رودخانه ( $B$ ) مساوی نباشد نیز قابل استفاده است. همچنین، عظمت‌اله و همکاران (Azamathullah et al., 2005) در پایاب سرریز جامی، و گوون و همکاران (Guvén et al., 2008) برای تعیین عمق آبشستگی در پایاب سازه‌های کنترل شیب مطالعاتی انجام داده‌اند. این محققان با استفاده از داده‌های مندرج در مقالات منتشر شده و به کارگیری روش الگوریتم عصبی، روابطی دیگری را پیشنهاد کرده‌اند.

برآورد عمق آبشستگی در پایین دست...

کف فلوم قرار داده شد و با استفاده از متر لیزری که روی لوله‌های ریلی و چارچوب فلزی متحرک نصب شده بود، توپوگرافی سطح رسوبات به منظور اطمینان از مسطح بودن آن کنترل گردید. از این سیستم، پس از تخلیه آب، برای برداشت توپوگرافی بستر در انتهای هر آزمایش نیز استفاده شد.

رقوم تاج سرریز، رقوم کف فلوم، رقوم بستر رسوبی فلوم، رقوم محل استقرار متر لیزری و رقوم صفر لیمینیمترها با عملیات نقشه‌برداری تعیین شد. برای اجرای آزمایش‌ها از آب بدون ذرات معلق استفاده گردید.

قرار دارد. وظیفه شبکه آرام‌کننده در بالادست سرریز، عبور دبی با سطح آب ثابت و بدون موج را به عهده دارد. قسمت دوم فلوم با کاهش ارتفاع حدود ۷۰ سانتی‌متر در امتداد قسمت اول قرار دارد که در انتهای آن سرریز مستطیلی لبه‌تیز به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و طول ۹۰ سانتی‌متر جهت اندازه‌گیری دبی نصب شده است. شکل ۲ پلان و مقطع طولی فلوم را نشان می‌دهد. سه نوع ذرات رسوبی با دانه‌بندی و مشخصات فیزیکی مختلف نظیر وزن حجمی ( $G_s$ ) و ضریب یکنواختی ( $\delta_s$ ) مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). قبل از هر آزمایش، ذرات رسوبی به ضخامت ۲۶ سانتی‌متر روی



شکل ۲- پلان و مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی.

جدول ۲- خصوصیات دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده (میلی متر)

نمونه	$G_s$	$\delta_s$	$d_{10}$	$d_{50}$	$d_{90}$
الف	۲/۵۷	۱/۳۲	۱.۰۰	۱/۵۰	۲/۳۰
ب	۲/۵۲	۱/۲۰	۱/۸۰	۲/۴۰	۳/۱۰
ج	۲/۵۶	۱/۳۹	۲/۲۰	۳/۱۵	۵/۱۰

## روش تحقیق و آزمایش

مراحل اجرای آزمایش‌ها به ترتیب زیر است:

۴- به منظور جلوگیری از شسته شدن ناخواسته مصالح پایین دست سرریز، ابتدا سطح آب پایاب ثابت گردید (حدود ۲۰ سانتی متر آب بر رقوم بالای مصالح قرار می گرفت). پس از برقراری شرایط تعادل سطح آب پایاب، مقادیر دبی مورد نظر از روی سرریز تنظیم می شد و جریان می یافت.

۵- پس از اتمام هر آزمایش، ابتدا آب داخل فلوم به صورت کامل تخلیه و سپس رقوم سطح مصالح با متر لیزری (مستقر بر روی چارچوب فلزی با حرکات عرضی و طولی) به صورت شبکه‌ای (با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی متر) برداشت و ذخیره شد.

۶- به منظور تعیین زمان بهینه آزمایش‌ها، با استفاده از دانه بندی نمونه ج جدول ۲، با دبی عبوری ۲۰ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۲۱ سانتی متر، مدت زمان ۶ ساعت روند آبخستگی به دقت بررسی و مشاهده شد که در پایان آزمایش فرآیند آبخستگی تقریباً متوقف می شود. برای حصول اطمینان از زمان انتخاب شده، آزمایش با شرایط قبلی به مدت ۱۲ ساعت تکرار شد.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که در فرآیند فرسایش و رسوب گذاری، شیب پایین دست، عمق آبخستگی تغییرات قابل توجهی نداشته است.

۱- به منظور تعیین عمق بهینه ضخامت مصالح غیرچسبنده مورد استفاده در فلوم و حدود تغییرات دبی سرریز، پس از مراحل آماده سازی، اولین آزمایش آبخستگی با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه روی دانه بندی نمونه الف جدول ۲ اجرا شد. مشاهدات نشان داد که پس از گذشت حدود ۴۰ دقیقه، مصالح پایین دست سرریز شسته شد و اندازه گیری عمق آبخستگی امکان پذیر نگردید. پس از بررسی نتایج، مقادیر دبی عبوری کاهش داده شد و در نهایت دبی های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه انتخاب گردید.

۲- ابتدا با استفاده از سرریز مستطیلی لبه تیز پایین دست، با اندازه گیری دبی عبوری، برای سرریز لبه پهن بالادست منحنی دبی- اشل تهیه شد. سپس در شروع هر آزمایش، پس از ثابت شدن مقدار جریان از روی سرریز لبه پهن، تراز سطح آب بالادست سرریز به کمک لیمینیمتر با دقت ۰/۱ میلی متر قرائت و مقادیر دبی انتخابی تنظیم و برقرار شد.

۳- ماتریس برنامه آزمایش‌ها بر روی سه نوع دانه بندی و با مقادیر دبی به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر در ثانیه و سه رقوم مختلف برای تراز آب پایاب به ترتیب ۱۶، ۲۱ و ۲۶ سانتی متر نسبت به سطح رسوبات تهیه و اجرا شد.



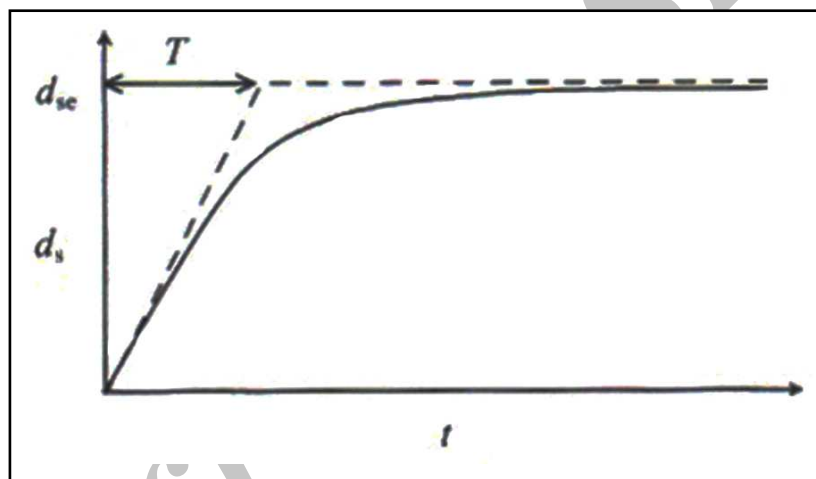
شکل ۳- مقایسه پروفیل آبخستگی دو آزمایش مستقل در زمان های ۶ و ۱۲ ساعت.

برآورد عمق آبشستگی در پایین دست...

سارکار و دی (Sarkar & Dey, 2007) با توجه به روند زمانی تغییرات عمق آبشستگی و با ارائه شکل ۴ نشان دادند که میزان افزایش عمق آبشستگی با تبعیت از رابطه ۶ در ابتدا زیاد است و سپس روندی کند می‌یابد (Mason & Arumugam, 1985).

همان‌طور که در شکل ۴ به صورت شماتیکی نشان داده شده است،  $T$  مقیاس زمان<sup>۱</sup> و  $d_{se}$  با رسم مماس بر منحنی در زمان  $t=0$  به دست می‌آیند.

$$D_s = d_{se} [1 - \exp(-t/T)] \quad (۶)$$



شکل ۴- تغییرات زمانی عمق آبشستگی.

(T و  $d_{se}$  به صورت شماتیک در شکل نشان داده شده است) (Sarkar & Day 2007).

که در آن،  $K_1$  و  $K_2 =$  مقادیر ثابت و  $b:$  عرض سرریز است. با بررسی جامع و فراگیر تحقیقات و تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده توسط میسون و آروم‌وگام (Mason & Arumugam, 1985) اثبات گردید که مفهوم برآورد حداکثر عمق آبشستگی برای مقاصد عملی قابل قبول است.

محققان در خصوص انتخاب زمان آزمایش‌ها اختلاف نظر داشته‌اند. برای نمونه، میسون و آروم‌وگام (Mason & Arumugam, 1985) می‌گویند، به رغم اینکه برخی محققان زمان بیشتری را برای اجرای هر آزمایش جهت ارائه روابط برآورد حداکثر آبشستگی صرف کردند، روابطی که چی و پادیار (Chee & Padiyar, 1969) ارائه داده‌اند، بر اساس اجرای آزمایش‌ها روی مدل با طول زمان آزمایش ۲ ساعت، دقت بالایی دارند و بدان معنی است که افزایش عمق آبشستگی به صورت کامل متوقف نمی‌شود.

اگوستینو و فررو (Agostino & Ferro, 2004) متذکر شده‌اند که بر اساس تحقیقات (Doddiah, 1953; Rouse, 1940) عمق آبشستگی  $D_s$  با متوسط هندسی زمان  $T^2$  بر اساس رابطه ۷ افزایش می‌یابد.

$$\frac{D_s}{Y_t} = K_1 + K_2 \log\left(\frac{QT}{bD_p^2}\right) \quad (۷)$$

1- time scale

2- geometric mean of the time

**نتایج و بحث**

حفره آبشستگی با میزان فرسایش کمتر جابه‌جا و بر سطح رسوبات پایین دست جمع می‌شدند. شیب پایین دست حفره آبشستگی نسبتاً پایدار بود و با گذر زمان بعضاً ضمن قرارگیری دانه‌ها، ریزش ذرات ادامه می‌یافت ولی با ترمیم مجدد، مقدار شیب تغییری چشمگیری نداشت.

**استخراج رابطه**

به منظور ارائه رابطه‌ای جدید، با استفاده از متغیرهایی که در پیدایش این پدیده موثر هستند و به کار بردن قضیه باکینگهام، رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد به شکل زیر استخراج شد:

$$D_s / H = f(H / Y_t, Q / \sqrt{gH^5}, H / D_{50}) \quad (8)$$

بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار Minitab رابطه زیر به دست آمد.

$$D_s / H = 0/0522 \left[ \frac{Q^2}{gH^5} \right]^{0.353} \left[ \frac{H}{Y_t} \right]^{-0.432} \left[ \frac{H}{d_{50}} \right]^{0.789} \quad (9)$$

پیشنهادی و رابطه سایر محققان، محاسبات زیر انجام گرفت:

ابتدا اختلاف عمق آبشستگی به دست آمده با استفاده از هر یک از رابطه‌های مورد اشاره، با اطلاعات آزمایشگاهی تعیین و پس از آن مقادیر متوسط مربعات خطا (MSE) و حداکثر خطا (MAX E) محاسبه شد. سپس به منظور مقایسه روابط مذکور، جذر متوسط مربعات خطا (RMSE)

مشاهده شد که در انتهای آزمایش‌ها حفره آبشستگی به صورت هرم ناقص و معکوس شکل می‌گرفت. در تراز کمتر عمق پایاب، رسوبات فرسایش یافته از حفره آبشستگی، به شکل پشته (هرم ناقص) و با افزایش تراز سطح آب پایاب، با مقطع دوزنقه متساوی‌الساقین، در پایین دست حفره آبشستگی تشکیل می‌گردید.

فرآیند فرسایش پذیری و تشکیل حفره آبشستگی بیشتر در حدود یک سوم زمان آزمایش‌ها (دو ساعت اول بعد از شروع آزمایش) رخ داد و در زمان باقیمانده سرعت تغییرات کمتر بود. گفتنی است که حجم حفره آبشستگی معادل حجم رسوب گذاری در پایین دست حفره آبشستگی است.

در حین آزمایش، حرکت ذرات بستر در فضای حفره آبشستگی به صورت متلاطم و نامنظم برقرار می‌گردید. بعد از گذشت یک سوم از زمان شروع آزمایش، ذرات از

بر اساس رابطه نمایی فوق رابطه زیر در سیستم متریک برای تخمین عمق آبشستگی پیشنهاد می‌گردد:

$$D_s = 0.023 * Q^{0.706} * H^{0.456} * Y_t^{-0.432} * d_{50}^{-0.789} \quad (10)$$

**مقایسه با رابطه سایر محققان**

به منظور مقایسه اطلاعات آزمایشگاهی با نتایج رابطه



(شکل ۵ و جدول ۴). یکی از دلایل این همبستگی را می‌توان مشابه بودن شرایط آزمایشگاهی این تحقیق با تحقیقات آن‌ها دانست. ضمن این‌که در بیشتر تحقیقات قبلی از مصالحی با چگالی ۲/۶۵ استفاده شده و در روابط فوق این ضریب منظور شده است. یادآوری می‌شود که چگالی مصالح تحقیق حاضر کمتر از ۲/۶۵ است.

با توجه به اینکه رابطه پیشنهادی میسون و آروموگام (Mason & Arumugam, 1985) و آگوستینو و فررو (Agostino & Ferro, 2004) از موارد استناد بیشتری برخوردار شده‌اند، در شکل ۶ نتایج محاسباتی این دو رابطه با نتایج پیش‌بینی شده با رابطه پیشنهاد شده در این تحقیق (رابطه ۱۰) مقایسه شده است.

در شرایطی که نتایج رابطه ۱۰ و خط رگرسیون آن به خط با زاویه ۴۵ درجه نزدیک‌تر است، خط رگرسیون دو رابطه دیگر که در دامنه قابل قبول قرار دارند، با زاویه بیشتر نسبت به خط با زاویه ۴۵ درجه به ترتیب عمق آبستنگی را بیشتر و کمتر برآورد کرده‌اند.

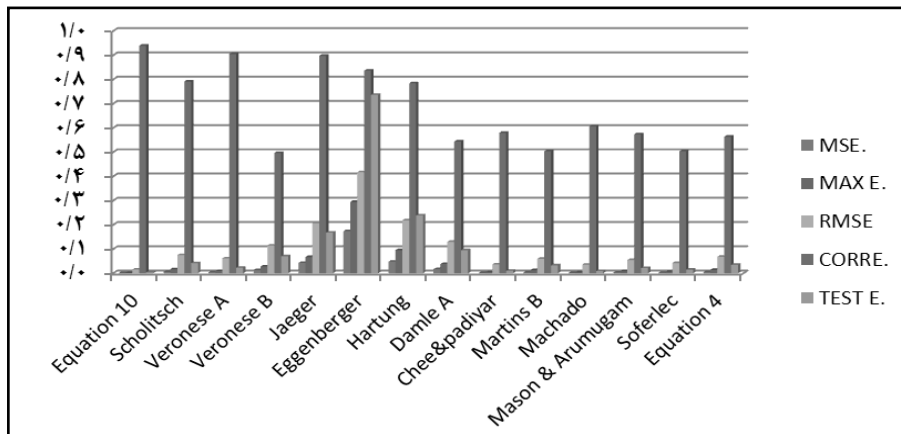
و ضریب همبستگی<sup>۱</sup> محاسبه شد. جهت حصول اطمینان، حداکثر مقدار خطای مجاز (TEST) نیز به دست آمده است. نتایج محاسبات فوق در جدول ۴ درج و در شکل ۵ نمایش داده شده است.

با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی مذکور و برازش و آزمون‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقدار جذر متوسط مربعات خطا (RMSE) برای روابط مختلف بین ۰/۰۱۵ برای رابطه ۱۰، تا ۰/۴۱۷ برای رابطه آگنبرگر (Eggenberger, 1943)، ردیف ۵ جدول ۱، متغیر است. با در نظر گرفتن معیارهای بیشترین همبستگی و کمترین مقدار جذر متوسط مربعات خطا (RMSE) مشاهده می‌شود که رابطه ورنس (Veronese A, 1937)، ردیف ۲ جدول ۱، رابطه میسون و آروموگام (Mason & Arumugam, 1985)، ردیف ۱۳ جدول ۱، رابطه ۴ آگوستینو و فررو (Agostino & Ferro, 2004) و رابطه چی و پادیار (Chee & padiyar, 1969)، ردیف ۹ جدول ۱، به داده‌های این تحقیق نزدیک‌تر است

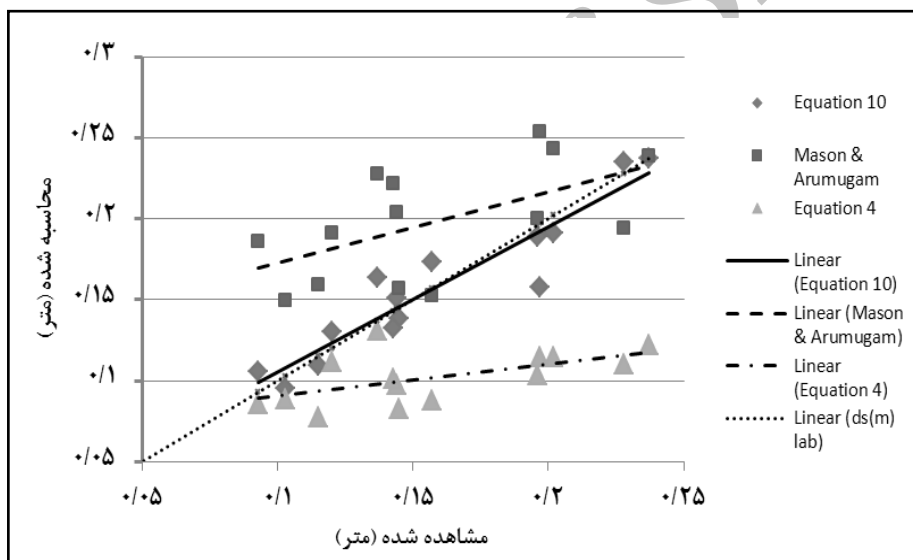
جدول ۴ - استفاده از شاخص‌ها به منظور مقایسه نتایج حاصل از رابطه‌های مختلف برآورد آبستتگی

INDEX	Equation 10	Scholitsch	Veronese A	Veronese B	Jaeger	Eggenberger	Hartung	Damle A	Chee & padiyar	Martins B	Machado	Mason & Arumugam	Soferlec	Equation 4
M.S.E.	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۴۳	۰/۱۷۴	۰/۰۴۸	۰/۰۱۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
MAX E.	۰/۰۰۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۰/۰۲۸	۰/۰۶۷	۰/۳۹۵	۰/۰۹۶	۰/۰۳۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴
RMSE	۰/۰۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۶۳	۰/۱۱۵	۰/۲۰۷	۰/۴۱۷	۰/۲۱۸	۰/۱۳۰	۰/۰۳۷	۰/۰۶۰	۰/۰۳۶	۰/۰۵۵	۰/۰۴۲	۰/۰۶۸
Correl. Coeff.	۰/۹۴	۰/۷۹	۰/۹	۰/۵۰	۰/۹۰	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۵۰	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۵۰	۰/۵۶
TEST	۰/۰۰۴	۰/۰۴۲	۰/۰۲۳	۰/۰۷۰	۰/۱۶۸	۰/۳۷۳	۰/۲۳۹	۰/۰۹۶	۰/۰۱۱	۰/۰۳۳	۰/۰۰۹	۰/۰۲۲	۰/۰۱۵	۰/۰۳۵

برآورد عمق آبشستگی در پایین دست...



شکل ۵ - مقایسه بیشترین مقدار، متوسط، جذر متوسط مربعات و حد مجاز خطا، و ضریب همبستگی روابط مختلف.



شکل ۶ - مقایسه نتایج آزمایشگاهی عمق آبشستگی با نتایج برآورد سه رابطه.

بدون بعد با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین شد. همچنین در این تحقیق مقادیر برآورد حداکثر عمق آبشستگی به وسیله روابط سایر محققان با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس معیارهای مقایسه‌ای، روابط ورنس A، میسون و آروموگام، اگوستینو و فررو و چی و پادیار مقادیر عمق آبشستگی را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کنند. با استفاده از نتایج

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق داده‌های آزمایشگاهی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سازه کنترل شیب برای سه نوع مصالح بستری و تحت شرایط هیدرولیکی مختلف به دست آمد. سپس با به کار بردن آنالیز ابعادی گروه‌های بدون بعد استخراج و سپس با رگرسیون چندمتغیره و کاربرد نرم‌افزار Minitab ضریب و مقادیر نمای گروه‌های

**قدردانی** داده‌های آزمایشگاهی و روابط بدون بعد بین پارامترهای مختلف، برای تخمین عمق آبشستگی رابطه‌ای جدید ارائه شد. با مقایسه شاخص‌ها، مشاهده می‌شود که رابطه پیشنهاد شده در این تحقیق از دقت بالایی برخوردار است.

این تحقیق با حمایت سازمان آب و برق خوزستان در آزمایشگاه‌های مؤسسه تحقیقات آب و با همکاری آقای مهندس خراسانی‌زاده اجرا شد که بدین وسیله تقدیر و تشکر می‌شود.

## مراجع

- Anon. 2008. Guideline of Local Scour Calculation. Report Number: 549. Water Resources Management Company. Iran. (in Farsi).
- Azmathullah, H. Md., Deo, M. C. and Deolalikar, P. B. 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of a ski-jump bucket. *J. Hydraul. Eng.* 131(10): 898-908.
- Bormann, N. E. and Julien, P. Y. 1991. Scour Downstream of Grade-Control Structures. *J. Hydraul. Eng.* 117(5): 579-594.
- D' Agostino, V. and Ferro, V. 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. *J. Hydraul. Eng.* 130(1): 24-37.
- Gaudio, R. and Marion, A. 2003. Time evolution of scouring downstream of bed sills. *J. Hydraul. Res.* 41(3): 271-284.
- Ghodsian, M. and Azar Faradonbeh, A. 1999. Scour Downstream of Free Overfall Spillway. M. Sc. Thesis. Tarbiat Modarres University. Tehran. Iran.
- Guyen, A. and Gunal, M. 2008. Prediction of Scour Downstream of Grade-Control Structures Using Neural Networks. *J. Hydraul. Eng.* 134(11): 1656-1660.
- Mason, P. and Arumugam, K. 1985. Free jet scour below dams and flip buckets. *J. Hydraul. Eng.* 111(2): 220-235.
- Mehraein, M., Ghodsian, M. and Ranjbar, H. 2010. Laboratorial Investigation of effect of non isotropy Particles on scour dimensions at downstream of free falling jets. *J. Civil Eng. Topography.* 44(2): 253-264. (in Farsi)
- Momeni Vesalian, R., Mousavi Jahromi, H. and Shafai Bejestan, M. 2008. Local scour due to rectangular jet downstream of flip-bucket spillways with no uniform bed sediment. *J. Agric. Sci. Natur. Res.* 15(2): 203-216 (in Farsi)
- Newman, B. G. 1961. The Deflection of Plan Jets by Adjacent Boundaries-Conada Effect. In: Lachman, G. V. (Ed.) *Bonudary Layer and Flow Control*. Pergamon Press. New York.
- Rajaratnam, N. 1981. Erosion by plane turbulent jets. *J. Hydraul. Res.* 19(4): 339-358
- Sarkar, A. and Dey, S. 2007. Effect of seepage on scour due to submerged jets and resulting flow field. *J. Hydraul. Eng.* 45(3): 357-364.

برآورد عمق آبستنگی در پایین دست...

Shafai Bejestan, M. and Albertson M. L. 1992. Discussion on scour downstream of grade-control structures. J. Hydraul. Eng. 118(7): 1066-1068.

Shafai Bejestan, M. 2010. Principal Theory & Practice of Sediment Hydraulics Transport. Shahid Chamran University Press. (in Farsi)

Yuen, E. M. 1984. Clear water scour by high velocity jets. M. Sc. Thesis. University of Windsor. Ontario. Canada.

Archive of SID

## **Estimation of Scour Depth Downstream of Grade-Control Structures**

**S. M. Razavi Nabavi\*, M. Shafai-Bejestan and M. Kashefipour**

\* Corresponding Author: Ph. D Student of Water Structures. Iranian Company of Water Resources Management, No. 517, North Felestin Street, Tehran, Iran. Email: smrnabavi@yahoo.com  
Received: 2 July 2011, Accepted: 16 June 2012

Grade control structures are hydraulic structures used to stabilize a river bed. Scour downstream of this structure is the main cause of its failure. Studies have developed numerous empirical relations for scour depth prediction that designers must choose between to decide the most effective equation for a specific application. This study tested the condition of submerged jets over beds of sediments (median size = 1.5, 2.4, 3.15 mm) downstream of a weir for discharges of 10, 15, 20 l/sec and tail water depths of 16, 21, 26 cm. The analysis applied multi-dimensionless group regression using Minitab software to predict maximum scour depth. All previous relations were compared to the data and it was found that the relations developed by Veronese A, Mason and Arumugam, Agostino and Ferro, and Chee and Padiyar predict the scour depth better than do other relations. In addition, a new relation was developed that produced better results at RMSE = 0.015 and coefficient correlation = 94%.

**Keyword:** Bed stabilizer, Grade control structure, Hydraulic model, River, Scour