

# آبشستگی در پایه‌های پل‌های عریض<sup>۱</sup> (بزرگ)

مترجم: مهندس علیرضا محب زاده فتاحی، کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی  
۱- استرلینگ جونز، مهندس تحقیقات هیدرولیک، اداره فدرال بزرگراه‌ها.  
۲- پروفیسور شپارد، گروه مهندسی عمران و سواحل، دانشگاه فلوریدا.

## مکیده:

اغلب معادلات تخمین آبشستگی موضعی، عمق آبشستگی‌های موضعی را در سازه‌هایی که در مقایسه با عمق آب، عریض می‌باشند، بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کنند. در این مقاله تلاش محققان مختلف درباره این مسأله مورد بحث قرار می‌گیرد.

روش‌ها و معادلات به‌کاررفته به وسیله چندین کشور اروپای غربی (به‌دست آمده در طول FWA, 1998, European Scanning Tour on Bridge Scour) به انضمام کار انجام شده در ایالات متحده در این مقاله آورده شده است.

## مقدمه:

مهندسان مدت‌هاست بر این عقیده هستند که معادلات تجربی تخمین آبشستگی که براساس داده‌های آزمایشگاهی هستند، عمق آبشستگی برای سازه‌های بزرگ را بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند. این مسأله برای سازه‌های وزنی فراساحلی<sup>۲</sup> همانند سازه‌های ساحلی بزرگ<sup>۳</sup> و پایه‌های پل‌های واقع در خشکی و بنابراین مسایل با عنوان «پایه عریض» یا «سازه عریض» صادق است. این مسأله به

ویژه برای پل‌های ساحلی بزرگ مهم است، زیرا به عنوان نمونه، معادلات آبشستگی موضعی عمق آبشستگی را به صورت ضربی از عرض پایه نشان می‌دهند. عمق آبشستگی‌های با  $1/5$  تا  $2/4$  برابر عرض پایه برای یک پایه کوچک پل که ممکن است به عرض یک متر یا در همین حدود باشد، چندان بحرانی نمی‌باشند. اما عمق‌های آبشستگی برای پل‌های بزرگ دارای پایه‌هایی به عرض ده‌ها متر که پیش‌بینی بیش از مقدار واقعی منجر به طراحی‌های بسیار پرهزینه پی می‌شود، بحرانی هستند. مسایل مربوطه برای پل‌های ساحلی و پل‌های رودخانه‌ای بزرگ می‌باشند؛ برای مثال بارهای جانبی محاسبه شده برای ضربه کشتی، هزینه‌های پی‌سازی را حتی از حالتی که تکیه‌گاه‌های جانبی فراهم شده به وسیله خاک با تخمین‌های غیرواقعی عمق آبشستگی کاهش می‌یابد، بالاتر می‌برد.

تعدادی روش و معادله برای تخمین آبشستگی موضعی در پایه‌های پل‌های واقع در رسوبات بدون چسبندگی وجود دارد. اغلب این معادلات، اگر نگوئیم همه آنها، تجربی بوده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی از آزمایش‌های جریان دائمی به‌دست آمده‌اند. بنا به پیچیدگی جریان و انتقال رسوب مرتبط با فرآیندهای





آبشستگی موضعی، تعدادی گروه بدون بعد برای شناسایی کامل آبشستگی مورد نیاز است. بسیاری از این گروه‌ها، از قبیل نسبت عمق آب به قطر سازه را می‌توان بین مدل آزمایشگاهی و سازه پروتوتیپ<sup>۴</sup> ثابت نگه داشت. اما، از آنجاکه یک حد پایین برای اندازه ذره رسوب، قبل از اینکه نیروهای چسبندگی قابل توجه شوند، وجود دارد، گروه‌هایی را که شامل اندازه رسوب هستند نمی‌توان بین مدل و پروتوتیپ ثابت نگه داشت. در واقع، اغلب آزمایش‌های آزمایشگاهی با رسوب نزدیک به مقیاس رسوب پروتوتیپ انجام می‌شوند. اگر مقیاس‌های رسوب نسبت به طول سازه، به طور کامل در معادلات پیش‌بینی‌کننده به حساب نیایند، آنگاه مسائل مربوطه، زمانی که معادلات با موقعیت‌های متفاوت با شرایط آزمایشگاهی به‌کار گرفته شوند، تشدید می‌شوند. مسائل مرتبط با حالت‌های عدم توانایی نگهداری مقیاس ثابت بین رسوب مدل و پروتوتیپ با بزرگتر شدن اندازه سازه پروتوتیپ، افزایش می‌یابند. مهندسان، مسائل و مشکلات پیش‌بینی عمق‌های آبشستگی موضعی در سازه‌های بزرگ را شناسایی کرده‌اند (با استفاده از معادلات به‌دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی) و از آن به عنوان «مسئله آبشستگی پایه عریض» یا «مسئله آبشستگی سازه بزرگ» یاد می‌کنند. این معادلات، معمولاً عمق‌های آبشستگی را تحت این شرایط بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند.

بخش مهمی از این بحث، معادله آبشستگی پایه HEC-18 و مجموعه داده‌هایی است که معادله از آنها به‌دست آمده است تا تعیین شود که معادله تحت چه شرایطی دارای نتایج منطقی است. مجموعه داده‌های بکار رفته برای به‌دست آوردن معادله اصلی C آبشستگی پایه CSU/HEC-18 به عنوان بخشی از کار در این مقاله گردآوری شده است. این داده‌ها از طریق مؤلفان موجود است.

این مقاله چند روش را برای بحث در مورد مسئله‌ای که پایه عریض نام گرفته، شامل روش‌هایی است که در طول FHWA 1998, European Scanning Tour on Bridge Scour (Johnson) شناسایی شده‌اند. تحقیقات در امریکا به وسیله جانسون (Johnson) که منجر به تصحیح «پایه عریض» در معادله HEC-18 شده، ارایه گردیده است. محققان در هلند و انگلستان هنگامی که عرض پایه نسبت به عمق جریان بزرگ می‌شود، یک تابع تانژانت هیپربولیک را که اساساً بعد طول مشخصه را از عرض پایه به عمق جریان عوض می‌کند، به‌کار می‌برند. هم‌چنین محققان در سوئیس روشی را برای تخمین آبشستگی سازه توسعه داده‌اند که به نظر می‌رسد مربوط به مسئله «پایه عریض» باشد.

شپارد (Sheppard)، مؤلف نخست این مقاله، نتیجه گرفته است که عرض پایه، عمق آبشستگی تعادل را به دو روش تحت تأثیر قرار

می‌دهد: نخست، نسبت اندازه پایه به عمق جریان مهم است و آن را می‌توان به بهترین شکل به وسیله یک تابع تانژانت هیپربولیک، که عمق آبشستگی را اساساً تابعی از اندازه پایه برای پایه‌های نسبتاً باریک، اما تابعی از عمق جریان برای پایه‌های نسبتاً عریض معرفی می‌کند، نمایش داد. دوم، نسبت اندازه پایه به اندازه رسوب است که حتی می‌تواند تأثیر بزرگ‌تری بر تخمین آبشستگی داشته باشد. آزمایش‌های آزمایشگاهی با مقیاس بزرگ که به وسیله مؤلفان انجام شده است، برای آزمایش فرضیات شپارد (Sheppard) و فراهم کردن داده‌های آبشستگی آب زلال برای سازه‌های بزرگ‌تر طراحی شده‌اند؛ آنگاه آزمایش‌های آبشستگی بار زنده بعد از انجام آزمایش‌های آب زلال، برنامه ریزی شده‌اند.

### مروری بر منابع<sup>۵</sup>

مسئله پایه عریض، معمولاً هنگامی که عمق نسبی  $y/b$  بسیار کوچک بوده و اجازه می‌دهد گردابه‌ها به طور کامل توسعه یابند، نوعی نگرانی به حساب می‌آید. « $y$ » عمق جریان و « $b$ » عرض پایه است. بررسی‌های اولیه و وابستگی عمق آبشستگی به  $y/b$ ، با شمع (پایه) های کوتاه و عمق‌های آب بسیار کم انجام شدند. اتما (Ettema) (۱۹۸۰) و ملویل (Melville) یک آستانه فوقانی در  $y/b = 3$ ، که بیرون (بالا تر) از این محدوده، عمق آبشستگی نسبتاً مستقل از عمق نسبی است، ایجاد کرده‌اند. داده‌های اخیر به‌دست آمده از آزمایش‌های پایه‌های عریض، توسط مؤلفان نشان می‌دهند که این آستانه - به جای عدد ۳ - باید به عدد ۲ نزدیک‌تر باشد.

به هر حال، این نسبت را می‌توان مدل سازی کرد و داده‌های کم‌تر از این مقادیر آستانه در تعدادی از معادلات تجربی موجود آورده شده‌اند که عمق‌های آبشستگی پروتوتیپ را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند. اغلب کاربران، مسئله پایه عریض را با عمق‌های نسبی در حدود ۱/۰ مرتبط می‌سازند.

### معادله آبشستگی پایه HEC-18

FHWA HEC-18، استاندارد مورد استفاده به وسیله اغلب آژانس‌های بزرگراه‌ها برای ارزیابی آبشستگی در پل‌ها می‌باشد. معادله آبشستگی پایه از داده‌های آزمایشگاهی محققان در دانشگاه ایالتی کلرادو به‌دست آمده و به عنوان معادله CSU در یک نسخه قدیمی تر FHWA، با عنوان «Highways in the River Environment» ارایه شده است.

تعیین محدوده کاربرد معادله مذکور با استفاده از بررسی داده‌های بکار رفته در به‌دست آوردن آن، باید محتاطانه و محافظه‌کارانه انجام گیرد. معادله CSU از داده‌های آزمایشگاهی منتشر شده به وسیله

اعمال کرد. به هر حال قسمت دوم سؤال، این است که آیا داده‌های عمق‌های نسبی کوتاه به طور سازگار زیر خط همبستگی هستند؟ نقاط داده‌ها برای  $y/b$  کمتر از ۱ با نشان‌های متفاوت در شکل ۱ رسم شده و تقریباً همه آنها زیر خط همبستگی قرار می‌گیرند که نشان می‌دهد معادله را حداقل بایستی برای پایه‌های عریض یا عمق‌های نسبی کم تصحیح کرد.

### تصمیم جانسون (Johnson)

جانسون (Johnson) یک پایه عریض را به صورت پایه‌ای واقع در جریان‌های کم عمق و با سرعت کم به طوری که  $Fr < 0.8$  و  $y/b < 0.8$  تعریف کرد. او داده‌هایی را که دارای این شرایط در مجموعه داده‌های اصلی به‌کار گرفته در معادله CSU بودند، جداسازی کرد و داده‌هایی از سایر منابع برای به‌دست آوردن یک معادله جدید برای پایه‌های عریض با استفاده از پارامترهای یکسان با معادله CSU اضافه کرد. معادله مذکور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{y_s}{y} = 2.08 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{b}{y} \right)^{0.504} Fr^{0.639}$$

سپس او معادله پایه عریض را به معادله HEC-18 تقسیم کرد تا اختلاف را به صورت ضریب تصحیح دیگری به نام Kw برای معادله HEC-18 بیان کند:

$$K_w = 1.04 \left( \frac{b}{y} \right)^{-0.15} Fr^{0.21}$$

چابرت (Chabert) و انگلدینگر (Engeldinger) و داده‌های CSU منتشر شده به وسیله شن (Shen)، اشنایدر (Schneider) و کاراکی (Karaki) بدست آمده است. اگرچه منابع داده‌های به‌کار رفته در به‌دست آوردن معادله به خوبی مورد استناد واقع شده‌اند، ولی داده‌های واقعی قبل از ارایه این مقاله، طبقه بندی نشده و پشتیبانی از مفهوم خصوصیات مجموعه داده‌ها مشکل است. پس از انجام مقداری جستجو و تحقیقات، مولفان قادر به شبیه‌سازی داده‌های به‌کار رفته برای توسعه معادله CSU شدند. تحلیل همبستگی این داده‌ها معادله‌ای بسیار نزدیک به معادله اصلی به صورت نشان داده شده در شکل ۱ تولید کرد. تمامی داده‌های به‌کار رفته برای معادله اصلی برای پایه‌های دایره‌ای واقع در ماسه‌های دانه‌ای ریز نسبتاً یک‌نواخت است. ضرایب تصحیح بعداً برای به حساب آوردن شکل‌های گوناگون پایه، زاویه جریان، اشکال بستر و کسرهای ماده بستر درشت، برای تولید معادله آبشستگی پایه مشابه با معادله موجود در HEC-18 (معادله زیر) اضافه شده‌اند.

$$\frac{y_s}{y} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{b}{y} \right)^{0.65} Fr^{0.43}$$

که  $y_s$  عمق آبشستگی تعادل،  $y$  عمق جریان،  $b$  عرض پایه،  $Fr$  عدد فرود و  $K_1$ ،  $K_2$ ،  $K_3$  و  $K_4$  ضرایب تصحیح می‌باشند. آزمایش داده‌ها روشن می‌کند که چندین داده با  $y/b$  کمتر از ۱ وجود دارد. از این نظر می‌توان اظهار نمود که معادله را می‌توان به پایه‌های عریض





که آن را می توان به معادله HEC-80 در حالتی که  $y/b < 0.8$  و  $Fr < 0.8$  باشد اعمال کرد.

اگر هر دو این شرایط هم زمان به وجود آیند،  $K_w$  تقریباً ۰/۹۵ است، به این معنی که کاهش به میزان ۵٪ در عمق آبشستگی تخمین زده شده وجود دارد. اما اگر  $y/b = 0.8$  و  $Fr = 0.8$  باشد، آنگاه  $K_w = 0.81$  می باشد که یک کاهش ۱۹٪ است.

### اعمال تمقیقات آبشستگی ساختمان<sup>۶</sup>

محققان در سويس معادلاتی را برای تخمین آبشستگی، دور ساختمان هایی که آبراهه ها را مسدود می کنند، توسعه دادند. به نظر می رسد چنین موقعیتی برای یک پایه خیلی عریض تا اندازه ای مشابه است و این معادلات برای تخمین آبشستگی در پایه های عریض دارای ارزش توجه می باشند. نتایج این تحقیق در اکتبر ۱۹۹۸ به عنوان یک مقاله توسط ویلی هاگر (Willi Hager) از موسسه تکنولوژی فدرال سويس<sup>۷</sup> واقع در زوریخ به تیم مرور آبشستگی پل ایالات متحده<sup>۸</sup> ارائه شده است. معادله تخمین آبشستگی سازه به صورت زیر است:

$$\frac{y_s}{y} = 0.10 \times F_d^2 \times \log(0.10T)$$

$$\frac{y_s}{y} = 0.10 \times F_d^2 \times \log(0.10T)$$

$$T = \frac{\sqrt{(S_s - 1)gD_{50}}}{y_0} \times t$$

$$F_d = \frac{V_0}{\sqrt{(S_s - 1)gD_{50}}}$$

که در معادلات فوق:

$$F_d = \text{عدد فرود وزن دار.}$$

$$y_s = \text{عمق آبشستگی.}$$

$$b = \text{عرض سازه.}$$

$$y_0 = \text{عمق جریان.}$$

$$V_0 = \text{سرعت جریان.}$$

$$S_s = \text{وزن مخصوص رسوب.}$$

$D_{50}$  = قطری که ۵۰٪ از دانه های خاک بستر دارای قطری کمتر از آن می باشند.

$$D_{SED} = \text{اندازه مشخصه رسوب.}$$

$$T = \text{زمان مقیاس دار شده.}$$

$$t = \text{زمان (واحد زمان سازگار با واحد شتاب ثقل، g).}$$

$$\theta = \text{زاویه انحراف جریان عبوری از سازه}$$

$$D_{SED} = D_{50} + \left[ 1 - \frac{1}{e^{10^3 T^2}} \right] (D_{90} - D_{50})$$

این روند با محدوده تجربی عدد فرود وزن دار که به طور واضح

تقریباً ۰ تا ۳ است، محدود شده است. این عدد می تواند برای بسیاری از سایت های پل، به سادگی برابر با ۱۵ تا ۲۰ باشد و واضح است که برون یابی معادله ای که دورتر از محدوده داده های تجربی است، استعمال نادرست و ناخالصی از نتایج می باشد.

### معادله UK

ریچارد می (Richard May) از H.R.Wallingford نسخه انگلیسی<sup>۹</sup> یک معادله را برای محاسبه آبشستگی پایه عریض به صورت زیر ارائه داد:

$$\frac{y_s}{y} = K \left[ 0.55 \left( \frac{b}{y} \right)^{0.40} \right]_{Max=1.0} \left[ 0.6 \left( \frac{2.07 \times V_0}{V_c} - 1 \right) \right]_{Max=1.0}$$

که  $K = 3.2$  برای پایه های مستطیلی،  $K = 2.4$  برای پایه های گرد و حداکثر مقدار در هر دو جزء پیرانتز برابر با ۱ است.  $V_c$ ، سرعت بحرانی، سرعت مورد نیاز برای آغاز حرکت رسوب با قطر میانه روی بستر صاف در بالادست سازه می باشد. معادله فوق به این معنی است که دو پیرانتز هیچ آبشستگی اضافی در حالتی که  $b/y$  بیش تر از ۴/۴۵ ( $y/b = 0.22$ ) باشد، در نظر نمی گیرند و آبشستگی پیک (ماکزیمم) در  $V_0/V_c = 0.80$  رخ می دهد.

### معادله هلند

در هلند معادله آبشستگی پایه برسرز (Breusers) به سایر معادلات ترجیح داده می شود که به صورت اشاره شده در یادداشت های پیش نویس «تجربه های آبشستگی هیدرولیک دلف در خارج از کشور<sup>۱۰</sup>» می باشد. این معادله برای تور مرور آبشستگی<sup>۱۱</sup> تهیه شده و توسط هنک ورهیک (Henk Verheig) به تاریخ ۹۸/۳۰/۱۰ صفحه ۸ و به شکل زیر است:

$$y_s = k \times b \times \tanh\left(\frac{y}{b}\right)$$

به نظر می رسد تابع تانژانت هیپربولیک رابطه عرض پایه را به خوبی منعکس کند. برای پایه های باریک،  $b/y < 1$ ، تانژانت هیپربولیک  $y/b$  به مقدار ۱ می رسد، و

$$y_s \approx k \times b$$

برای پایه های عریض،  $b/y > 1$ ، تانژانت هیپربولیک  $y/b$  به مقدار

$$y/b \text{ می رسد و}$$

$$y_s \approx k \times y$$

### معادلات شپارد (Sheppard) در دانشگاه فلوریدا

نویسنده اول این مقاله تعدادی از مطالعات مدل های ویژه میدانی را

برای پایه های خیلی بزرگ واقع در ماسه های ریز هدایت کرده و دانش موجود را برای یافتن دلایل تناقض هایی<sup>۱۲</sup> که در معادلات تخمین آبخستگی وجود دارد، مطالعه کرده است. او نتیجه گرفته که مساله پایه عریض به آن اندازه که به علت نقص مقیاس بندی رسوب در آزمایشهای آزمایشگاهی است، تحت تاثیر عمق نسبی آب،  $y/b$ ، نمی باشد. داده های آزمایشگاهی که در اغلب آنها، اگر نگوئیم همه شان، معادلات تجربی عمق آبخستگی موضعی مبنای محاسبه می باشند، عمق نسبی آب را به طور کامل مقیاس بندی<sup>۱۳</sup> می کنند. کمیتی که در آزمایش های آزمایشگاهی مقیاس بندی نمی شود، اندازه رسوب است. از آنجا که نیروهای چسبندگی بین ذرات هنگامی که اندازه ذره رسوب کمتر از  $0.074\text{mm}$  (الک شماره ۲۰۰) باشد، قابل توجه هستند، اندازه رسوب مدل در کارهای آزمایشگاهی به ندرت کمتر از  $0.1\text{mm}$  می باشد. بسیاری از کارهای آزمایشگاهی با رسوبات بسیار بزرگتر، به بزرگی  $5\text{mm}$  هدایت و انجام می شوند؛ در حالی که عرض سازه ها بنا به عرض فلوم های آزمایشگاهی نسبتاً کوچک بوده اند. برای آبخستگی موضعی نرمال سازی<sup>۱۴</sup> اندازه رسوب با مقیاس طول سازه (عرض پایه) منطقی است. بنابراین  $D_{50}/b$  یا به طور ساده تر  $b/D_{50}$  به وسیله تعدادی از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. باید توجه شود که اگر رسوب پروتوتیپ در آزمایش های مدل مورد استفاده قرار گیرد، این پارامتر ( $b/D_{50}$ )، برای مدل و پروتوتیپ به طور فاحشی متفاوت می باشد.

محدوده نسبت  $b/D_{50}$  موجود در داده های مورد استفاده برای به دست آوردن معادله آبخستگی پایه HEC-18 از ۹۶ تا ۶۳۳ بوده و دوسوم داده ها دارای مقادیر کمتر از ۲۰۰ می باشند. برای  $284$  اندازه گیری میدانی طبقه بندی شده به وسیله لندرز (Landers) و مولر (Mueller)، نسبت های  $b/D_{50}$  در محدوده  $8/5$  تا  $19763$  با مقدار میانگین  $2145$  و با مقدار میانه  $1024$ <sup>۱۵</sup> واقع شده اند. شپارد (Sheppard) نشان داده است که حداکثر آبخستگی نسبی آب زلال زمانی اتفاق می افتد که نسبت  $b/D_{50}$  در حدود ۴۶ بوده و آبخستگی مذکور در هر دو طرف این مقدار برای مقادیر ثابت  $y/b$  و  $V/V_C$ ، به صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده تمایل به کم شدن دارد. از آنجا که  $b/D_{50}$  را نمی توان به طور کامل در آزمایشگاه مقیاس بندی کرد، در صورتی که عمق های آبخستگی پروتوتیپ از معادلات توسعه یافته از داده های آزمایشگاهی پیش بینی شده باشد، وابستگی عمق آبخستگی تعادل<sup>۱۶</sup> به این کمیت، باید شناسایی شده و رابطه ریاضی آن ایجاد شود.

محدوده این نسبت که در آزمایشگاه می توان به دست آورد بنا به محدودیت اندازه های فلوم های موجود، محدود است. تجارب به دست آمده به وسیله نویسندگان، محدوده داده های تجربی را با

انجام آزمایش های آبخستگی موضعی آب زلال با استفاده از پایه های به قطر  $0.91\text{m}$  (3ft) در ماسه با مقدار  $D_{50}$  برابر با  $0.22$  ( $b/D_{50}=4136$ )  $\text{mm}$  گسترش داده است. گرچه تعداد زیادی از داده های آبخستگی موضعی برای شمع (پایه) های دایره ای گزارش شده در دانش موجود وجود دارد، ولی بسیاری از این داده ها قابل استفاده نمی باشد. برای مثال، دوام (مدت) بسیاری از این آزمایش ها برای رسیدن (یا حتی برون یابی شدن) به یک مقدار عمق آبخستگی تعادل کافی نیست؛ در موقعیت های دیگر نیز اطلاعات حیاتی درباره جریان، رسوب و یا سازه نامعلوم است. یک مرور کامل از دانش موجود  $215$  داده قابل استفاده از نه منبع مختلف را برای شرایط آبخستگی آب زلال و  $244$  داده برای شرایط آبخستگی بستر زنده را نتیجه داد. زیر مجموعه ای از این مجموعه داده ها، داده هایی از آزمایش های اخیر هدایت شده توسط نویسندگان در مرکز تحقیق USG-BRD Conte<sup>۱۷</sup> با استفاده از شمع های به قطر  $0.914\text{m}$ ،  $0.305\text{m}$  و  $0.11\text{m}$  واقع در ماسه به قطر  $2/9\text{mm}$ ،  $2/8\text{mm}$  و  $0.22\text{mm}$  است؛ این داده ها در توسعه معادلات آبخستگی موضعی شپارد (Sheppard) به کار گرفته شده اند.

معادلات شپارد (Sheppard) شامل نسبت عرض سازه به اندازه رسوب می باشد و بنابراین باید به صورت مستقیم، به سازه های بزرگ (پایه های عریض) قابل اعمال باشد. این معادلات برای محدوده نسبت های اندازه سازه به رسوب قابل حصول در آزمایشگاه که تا مقداری به بزرگی  $4168$  گسترش یافته است، به خوبی جواب می دهد. این معادلات هم چنین به سازه های پروتوتیپ برنامه اندازه گیری <sup>۱۸</sup>UDGS که عرضشان در محدوده  $1\text{m}$  تا  $10\text{m}$  واقع است با موافقت خوبی اعمال شده است. از تعداد زیادی گروه بی بعد که عمق های آبخستگی تعادل را تحت تاثیر قرار می دهند، شپارد (Sheppard) سه گروه  $y/b$ ،  $V_0/V_C$  و  $b/D_{50}$  را برای شمع (پایه) های دایره ای مهم تر دانست، به عبارت دیگر:

$$\frac{y_s}{b} = f \left\{ \frac{y}{b}, \frac{V_0}{V_C}, \frac{b}{D_{50}} \right\}$$

که:

$y_s$  = عمق آب در بالادست

$b$  = قطر شمع

$V_0$  = سرعت در بالادست شمع (پایه)

$V_C$  = سرعت بحرانی در بالادست شمع (پایه) و

$D_{50}$  = اندازه میانه رسوب

در محدوده آبخستگی بستر زنده یک پارامتر اضافی،  $V_{LP}/V_C$ ،



وجود دارد که  $V_{LP}$  سرعتی است که در آن بستر بالادست سازه صاف می شود و به یک بستر مسطح تبدیل می شود (شکل ۳ و ۵ را ببینید). این سرعت، سرعتی فرض می شود که در آن آبشستگی پیک (حداکثر) بستر زنده اتفاق می افتد.

### آبشستگی آب زلال

$$\left(0.4 \leq \frac{V_0}{V_C} \leq 1.0\right)$$

$$\frac{y_s}{b} = c_1 \left[ \frac{5}{2} \left( \frac{V_0}{V_C} \right) - 1.0 \right]$$

که  $c_1 = \frac{2}{3}k$  و

$$k = \tanh \left[ 2.18 \left( \frac{y}{b} \right)^{0.66} \right] \left[ -0.279 + 0.049 \exp \left( \log_{10} \frac{b}{D_{50}} \right) + \frac{0.78}{\log_{10} \frac{b}{D_{50}}} \right]^{-1}$$

اگر سرعت طراحی در محدوده رژیم بار زنده است، آنگاه سرعت باید در پیک آبشستگی بار زنده (VLP) تعیین شود (نقطه ۳ در شکل ۵). تعیین VLP نیازمند دست‌رسی به دانش خصوصیات رسوب و عمق آب است. لذا عمق آبشستگی موضعی تعادل (بار زنده) را می‌توان با استفاده از معادلات زیر محاسبه کرد.

### آبشستگی بار زنده

$$\left(1.0 < \frac{V_0}{V_C} \leq \frac{V_{LP}}{V_C}\right)$$

$$\frac{y_s}{b} = c_2 \left( \frac{V_{LP} - V_0}{V_C} \right) + c_3$$

باید توجه شود که بزرگی عمق آبشستگی در انتقال از شرایط آب زلال به بستر زنده (پیک آب زلال) به شدت به نسبت  $b/D_{50}$  - بر خلاف پیک آبشستگی در محدوده بستر زنده که به نظر می‌رسد مستقل از این نسبت باشد - وابسته است. اما، مقادیر  $V_0$  و  $V_C$  که پیک بار زنده اتفاق می‌افتد به پارامترهای رسوب و جریان بستگی دارند. مقالات متعددی درباره اشکال بستر وجود دارند که شرایطی را ارائه می‌دهند که تحت این شرایط تل ماسه‌ها<sup>۱۹</sup> محو شده و بستر مسطح‌تر می‌شود برای مثال نگاه کنید به سیمونز و ریچاردسون (Simons and Richardson) (1966)، اسنامنسکایا (Snamenskaya) (1969)، فون رایان (Van Rijn) (1993). مقادیر سرعت‌های مسطح‌کننده بستر که به وسیله این روش‌های گوناگون پیش بینی شده‌اند، تفاوت دارند. نتایج ارایه شده در اسنامنسکایا (Snamenskaya) (1966) در معادلات شپارد (Sheppard) مورد استفاده قرار گرفته و توافق خوبی با اندازه‌گیری‌های میدانی اشاره شده در بالا، نتیجه داده است.

استقلال عمق‌های آبشستگی تعادل نرمال سازی شده ( $y_s/b$ ) از سه گروه بدون بعد  $y/b$ ،  $V_0/V_C$  و  $b/D_{50}$  به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. توجه کنید که در هر حالت دو گروه از سه گروه مذکور ثابت نگه داشته می‌شوند، در حالی که گروه سوم (گروه متغیر) را می‌توان برای اهداف طراحی عمق آبشستگی موضعی به رابطه ساده نشان داده شده در شکل ۵ و ارائه شده در معادلات زیر



که:

$$c_2 = \frac{k - 2.4 \tanh \left[ 2.18 \left( \frac{y}{b} \right)^{0.66} \right]}{\left( \frac{V_{LP}}{V_C} - 1 \right)} \quad \text{and} \quad c_3 = 2.4 \tanh \left[ 2.18 \left( \frac{y}{b} \right)^{0.66} \right]$$

اگر،  $\frac{V_0}{V_C} > \frac{V_{LP}}{V_C}$  آنگاه:

$$\frac{y_S}{b} = 2.4 \tanh \left[ 2.18 \left( \frac{y}{b} \right)^{0.66} \right]$$

### نتیجه:

● اگرچه معادله HEC-18 از داده‌هایی که شامل پایه‌های عریض با اشکال گوناگون می‌باشند، به‌دست آمده است، زیر مجموعه‌ای از داده‌های پایه‌های عریض هنگام رسم نمودار، پایین‌ترین برازش<sup>۲۲</sup> داده‌ها رسم می‌شوند (شکل ۱).

● در این نقطه‌ها (داده‌های پایه‌های عریض اشاره شده در بالا)، شناخته شده‌ترین رابطه تعدیل پایه عریض در امریکا، رابطه به‌دست آمده توسط جانسون (Johnson) می‌باشد.

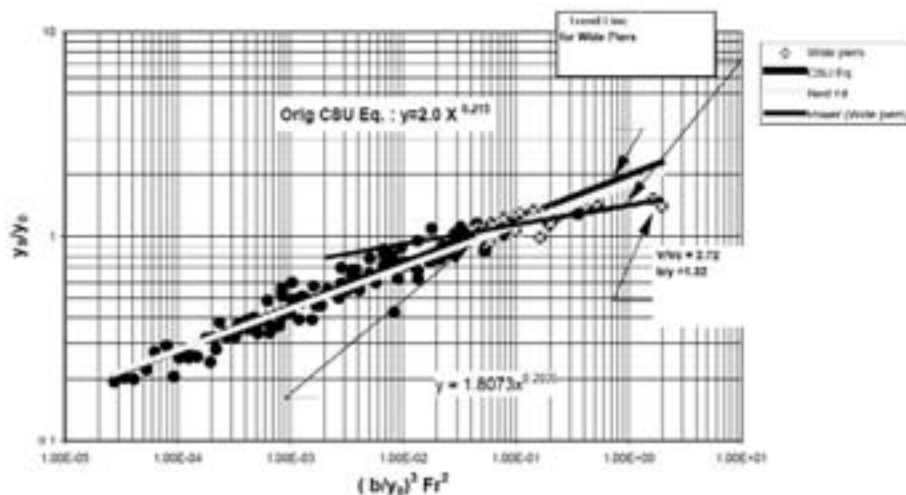
● معادلات متعددی در دانش موجود نوعی تابع تانژانت هیپربولیک را برای تعریف یک تابع پیوسته برای پایه‌های عریض تا باریک، به‌کار می‌برند. محققان در هلند مزایای این تابع را برای مساله پایه‌های عریض در طول تور مرور<sup>۲۳</sup> ۱۹۹۹ تشریح کرده‌اند.

● معادلات آبشستگی پایه شپارد (Sheppard) شامل تابع تانژانت هیپربولیک برای  $y/b$  و نیز پارامتر مقیاس رسوب،  $b/D50$  می‌باشد که تغییرات اندازه‌گیری‌های آبشستگی را در سرعت‌های حرکت ابتدایی<sup>۲۴</sup> تشریح می‌کند. تخمین عمق‌های آبشستگی پایه پروتوتیپ برای پایه‌هایی به عرض ۱۰m در عمق‌های آب به اندازه ۲۲m با استفاده از این معادلات، توافق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. هدف از تحقیق حاضر در این مقاله، صحت سنجی<sup>۲۵</sup> سهم بسترزنده در معادلات آبشستگی در آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در پایان از آقایان مهندس احتشامی و مهندس پناهی از مدیران مهندسان مشاور اتحادراه که با راهنمایی‌های خود بنده را در تهیه این مقاله یاری نمودند سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایم.

عمق آبشستگی برای یک شمع (پایه) تکی غیر دایره‌ای را می‌توان با ضرب عمق‌های آبشستگی محاسبه شده با معادلات بالا به ضریب شکل مقتضی موجود در HEC-18 محاسبه کرد.

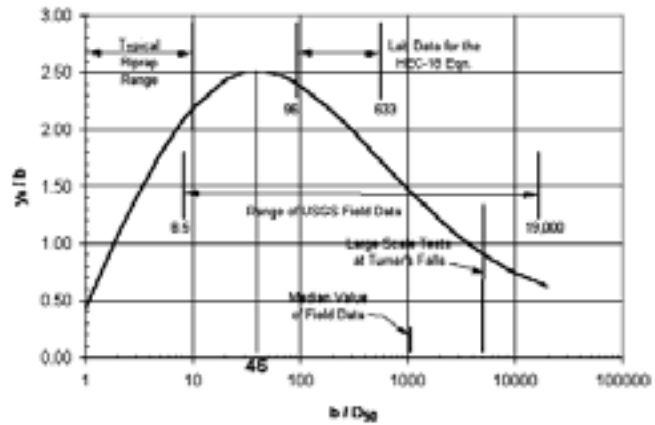
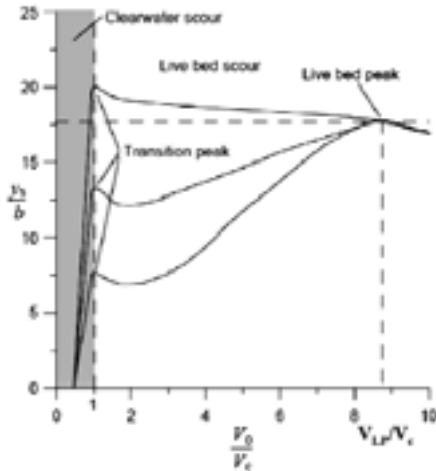
اطلاعات زیر برای ارزیابی و تحلیل آبشستگی با استفاده از معادلات شپارد (Sheppard) مورد نیاز است:

۱. خصوصیات رسوب (اندازه میانه، چگالی جرمی)؛
۲. خصوصیات آب (چگالی جرمی<sup>۲۰</sup> و لزجت<sup>۲۱</sup>)
۳. عمق آب طراحی و سرعت جریان میانگین عمقی؛
۴. قطر سازه (در حالت شمع (پایه) های تکی) یا قطر موثر در حالت سازه‌های پیچیده (در این ارتباط مقاله جونز (Jones) و شپارد (Sheppard) را ببینید).



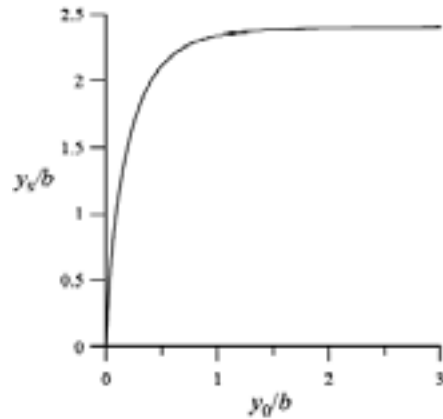
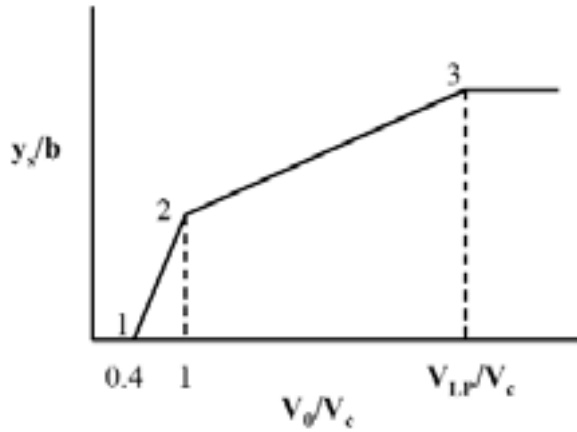
شکل ۱. داده‌های به‌کاررفته برای به‌دست آوردن معادله HEC-18 در CSU





شکل ۳. وابستگی عمق آبستگي نرمال سازي شده به نسبت سرعت  $(V_0/V_C)$  و  $b/D_{50}$  برای یک شمع (پایه) دایره ای. هر منحنی برای مقدار متفاوتی از  $b/D_{50}$  بوده و  $y_0/b$  ثابت و بزرگتر از ۲ می باشد.

شکل ۲. وابستگی عمق آبستگي نرمال سازي شده  $(y_s/b)$  به  $b/D_{50}$  برای یک پایه دایره ای. در منحنی نشان داده شده  $V_0/V_C=1$  و  $y_0/b>2$ .



شکل ۵. نمودار عمق آبستگي نرمال سازي شده در مقابل نسبت سرعت  $(V_0/V_C)$  (رایه شده در شکل ۳ برای استفاده در طراحی در این شکل ساده سازی شده است.

شکل ۴. وابستگی عمق آبستگي نرمال سازي شده به نسبت منظر\* (نسبت عمق آب به قطر پایه) برای یک شمع (پایه) دایره ای. در این نمودار  $V_0/V_C=1$  و  $b/D_{50}=46.4$  \*aspect ratio

پی نوشت ها:

1. Wide Bridges
2. offshore gravity structures
3. large coastal structures
4. prototype
5. Literature Review
6. Building Scour Research
7. Swiss Federal Institute of Technology
8. US Bridge Scour Scanning team
9. U.K. Version
10. Scour Experience of Delft Hydraulics Abroad
11. Scour Scanning tour
12. inconsistency
13. scaling
14. to normalize
15. median
16. equilibrium scour depth
17. USGS-BRD Conte Research Center
18. USGS measurement Program
19. dune
20. mass density
21. viscosity
22. fit
23. 1999 Scanning tour
24. incipient
25. validating