



دانشگاه آزاد اسلامی

عنوان :

بررسی پدیده آب شستگی در پایه پل ها

استاد راهنما :

نگارش:

صلى الله عليه وسلم

بررسی پدیده آب شستگی در پایه پل ها

تقديم به شما دو موهبت الهی

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده.....	۱
مقدمه.....	۲
فصل اول: سیمای کلی سمینار	
۱-۱- مقدمه.....	۳
۱-۲- هدف تحقیق.....	۳
۱-۳- پیشینه تحقیق.....	۳
۱-۴- روش کار و معرفی فصول.....	۴
فصل دوم: معرفی پدیده آب شستگی	
۲-۱- مقدمه.....	۵
۲-۲- انواع آب شستگی.....	۵
۲-۲-۱- آب شستگی عمومی (کلی).....	۵
۲-۲-۲- آب شستگی موضعی (محلی).....	۶
۲-۲-۲-۱- انواع آب شستگی موضعی.....	۸
۲-۲-۲-۲- آب شستگی در اثر تنگ شدگی.....	۱۰
۲-۲-۲-۳- آب شستگی در محل خمیدگی ها.....	۱۱
۲-۲-۲-۴- آب شستگی در محل چند شاخه ها.....	۱۱
۲-۳- بررسی عوامل کلی موثر بر آب شستگی.....	۱۱
۲-۳-۱- عوامل هیدرولیکی.....	۱۲
۲-۳-۲- شرایط ژئو تکنیکی.....	۱۲
۲-۳-۳- شرایط هندسی.....	۱۳
۲-۴- شیب های بحرانی بالا دست حفره آب شستگی.....	۱۳
۲-۵- بررسی مکانیسم شروع حرکات رسوب در پدیده آب شستگی پایه ی پلها.....	۱۴
۲-۶- بررسی کلی مراحل مختلف پدیده آب شستگی در پایه پل.....	۱۵

فصل سوم: پارامترهای موثر بر پدیده آب شستگی و روش های اندازه گیری عمق فرسایش

- ۱-۳-۱- مقدمه..... ۱۷
- ۳-۲- شیوه عمومی جهت تعیین روابط مربوط به پیش بینی عمق آب شستگی..... ۱۸
- ۳-۳- شدت تاثیر پارامترهای مختلف بر عمق آب شستگی پایه پل ها..... ۱۸
- ۳-۳-۱- اندازه رسوبات بستر..... ۱۸
- ۳-۳-۲- شکل پایه پل..... ۱۹
- ۳-۳-۳- زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل..... ۲۰
- ۳-۴- محاسبه ی عمق آب شستگی در پایه پل در مصالح چسبنده..... ۲۱
- ۳-۵- بررسی تاثیر زمان بر پدیده آب شستگی در آب صاف..... ۲۲
- ۳-۵-۱- روابط پیشنهاد شده جهت تعیین عمق آب شستگی با توجه به مقیاس زمان..... ۲۳
- ۳-۵-۱-۱- روش (Breusers (1967)..... ۲۳
- ۳-۵-۱-۲- روش (Melville (1999)..... ۲۵
- ۳-۵-۱-۳- روش (Hager & Dlivetto (2002)..... ۲۵
- ۳-۵-۱-۴- روش (Yanmaz (2006)..... ۲۶
- ۳-۶- روش های پیشنهادی جهت محاسبه عمق آب شستگی موضع پایه پل توسط محققان مختلف..... ۲۷
- ۳-۶-۱- روش پیشنهاد شده بر اساس مطالعات Breusers..... ۲۸
- ۳-۶-۲- رابطه پیشنهاد شده بر اساس مطالعات دانشگاه Auckland..... ۲۸
- ۳-۶-۳- رابطه پیشنهاد شده بر اساس مطالعات دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU)..... ۳۰
- ۳-۷- تخمین عمق آب شستگی موضعی در اطراف گروه پایه ها..... ۳۱
- ۳-۷-۱- مطالعات (Coleman (2005 در مورد گروه پایه پل..... ۳۲

فصل چهارم: راه کارهای مقابله با پدیده آب شستگی

- ۴-۱- مقدمه..... ۳۶
- ۴-۲- روش ها حفاظت از پایه پل در برابر آب شستگی..... ۳۶
- ۴-۲-۱- استفاده از سنگریز حفاظتی..... ۳۷

- ۴-۲-۲- استفاده از تشک حفاظتی..... ۳۸
- ۴-۲-۳- استفاده از طوقه دور پایه پل..... ۳۹
- ۴-۲-۴- استفاده از شکاف در پایه پل..... ۴۱
- ۴-۲-۵- تاثیر انحراف پایه های پل از حالت قائم در کاهش عمق آب شستگی..... ۴۴
- ۴-۵-۱- توسعه معادلات تجربی پیش بینی کاهش عمق آب شستگی در اثر انحراف پایه پل از حالت قائم..... ۴۷

فصل پنجم: نتیجه گیری .پیشنهادات

- ۵-۱- مقدمه..... ۵۰
- ۵-۲- تاثیر پارامترهای مختلف بر پدیده آب شستگی..... ۵۰
- ۵-۲-۱- اندازه متوسط رسوبات بستر..... ۵۰
- ۵-۲-۲- شکل پایه پل..... ۵۰
- ۵-۲-۳- زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل..... ۵۰
- ۵-۲-۴- طرز قرار گرفتن گروه پایه های پل..... ۵۱
- ۵-۲-۵- پیشنهادات جهت ادامه تحقیق..... ۵۱
- منابع و مآخذ..... ۵۲
- چکیده لاتین..... ۵۴

فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲): مقادیر بالایی از شیب های بالا دست آب شستگی برای ناپایداری مکانیکی خاک ها.....	۱۴
جدول (۱-۳): عامل شکل k_s	۲۰
جدول (۲-۳): روابط جهت تعیین عمق آب شستگی در خاک های چسبنده.....	۲۲
جدول (۳-۳): مقادیر k و α (ضرایب فرسایش).....	۲۴
جدول (۴-۳): مقادیر تقریبی u_c برای انواع خاک های چسبنده.....	۲۵
جدول (۵-۳): ضرایب تصحیح k_1 و k_2 مربوط به رابطه دانشگاه Auckland.....	۲۷
جدول (۶-۳): ضریب تصحیح k_1 مربوط به شکل پایه در رابطه دانشگاه (CSU).....	۳۱
جدول (۷-۳): ضریب تصحیح عمق آب شستگی برای پایه جلویی و عقبی در گروه دوتایی پایه پل.....	۳۲
جدول (۸-۳): درصد کاهش یا افزایش عمق آب شستگی نهایی در گروه پایه ها نسبت به تک پایه.....	۳۵
جدول (۱-۴): راه کارهای کلی حفاظت از بستر.....	۳۷

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۸.....	شکل (۱-۲): تشکیل گرداب نعل اسبی در پایه های استوانه ای پل ها.....
۱۰.....	شکل (۲-۲): تغییرات عمق آب شستگی با سرعت جریان بالا دست.....
۱۰.....	شکل (۳-۲): آستانه حرکت ذرات بستر (دیاگرام شیلدز).....
۱۹.....	شکل (۱-۳): عامل k_g به عنوان تابعی از σ_g
۲۱.....	شکل (۲-۳): تاثیر زاویه قرار گیری پایه نسبت به جهت جریان (k_w).....
۲۷.....	شکل (۳-۳): گراف محاسبه S مطابق روش Yanmaz $\left(s = \frac{d_s}{b}\right)$
۲۹.....	شکل (۴-۳): پارامترهای هندسی L و b برای پایه ها.....
۳۰.....	شکل (۵-۳): ضریب تصحیح k_3 مربوط به رابطه دانشگاه Auckland.....
۳۴.....	شکل (۶-۳): پارامترهای هندسی مربوط به گروه پایه های پل در مطالعات Coleman(2004).....
۳۷.....	شکل (۱-۴): سیستم سنگریز حفاظتی.....
۳۸.....	شکل (۲-۴): سیستم خود ترمیم شونده.....
۴۰.....	شکل (۳-۴): عمق آب شستگی برای کلاhek با قطر $2.5b$ در تراز بستر.....
۴۱.....	شکل (۴-۴): نمایش سیستم طوقه دور پایه پل جهت کاهش عمق آب شستگی.....
۴۱.....	شکل (۵-۴): d_{sc} محاسبه شده از رابطه (۶-۴) و مقایسه آن با d_{sc} واقعی اندازه گیری شده.....
۴۲.....	شکل (۶-۴): نمایش پایه پل با شکاف موجود در آن که در آزمایش استفاده شده است.....
۴۳.....	شکل (۷-۴): تاثیر طول شکاف بر عمق آب شستگی.....
۴۴.....	شکل (۸-۴): تاثیر زاویه برخورد جریان با شکاف بر عمق آب شستگی.....
۴۵.....	شکل (۹-۴): شکل کلی پایه پل مطالعه شده در تحقیقات Bozkus & Yildiz(2004).....
۴۵.....	شکل (۱۰-۴): تاثیر افزایش یا کاهش تدریجی عرض پایه پل بر عمق آب شستگی.....
۴۸.....	شکل (۱۱-۴): تاثیر عدد فرود بر مقدار عمق آب شستگی در زوایای انحراف مختلف.....
۴۸.....	شکل (۱۲-۴): تاثیر عمق تقرب آب بر مقدار عمق آب شستگی در زوایای انحراف مختلف.....
۴۹.....	شکل (۱۳-۴): تاثیر زاویه انحراف بر عمق آب شستگی در جریان با اعداد فرود متفاوت.....

چکیده:

بررسی پدیده آبشستگی در پایه پل ها

امروزه پدیده آب شستگی به عنوان یکی از مسائل مهم در طراحی پل ها وسازه های ساحلی مطرح می باشد. محققان به دنبال روش ها و مدل های مناسبی جهت تخمین عمق آب شستگی در اطراف این گونه سازه ها ونیز روش هایی جهت کاهش تبعات منفی این پدیده می باشند. این پدیده از آن جهت از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشد که اگر عمق آب شستگی در آنها با دقت تعیین نشده و تمهیدات لازم جهت مقابله با آنها اندیشیده نشود مستقیماً سازه را مورد تهدید قرار می دهد. از آنجا که پل ها به عنوان یک عامل کلیدی در سیستم حمل ونقلی وارتباطی یک کشور به شمار می روند ازاهمیت بالایی برخوردار هستند. از این رو حفاظت از آنها نه تنها حمل ونقل ایمن را به دنبال دارد بلکه از هزینه های سنگین اقتصادی و اجتماعی ناشی از تخریب آنها جلوگیری می کند. اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه از نتایج تجربی و آزمایشگاهی حاصل شده اند که نه تنها نمی توان یک مدل واقعی از محیط ایجاد نمود بلکه خود دارای مشکلات فراوانی هستند. بدین جهت صحت روابط بدست آمده از مدل های آزمایشگاهی باید با مطالعات صحرایی تحقیق گردند. باید توجه داشت که آب شستگی مستقیماً پی پایه های پل را تهدید می کند و از این رو تعیین دقیق عمق آب شستگی مسئله ای فوق العاده حیاتی است. به رغم مطالعات زیادی که امروزه راجع به این پدیده انجام شده است به دلیل پیچیدگی پارامترهای مؤثر برآن به ویژه در سازه های دریایی که در معرض امواج قرار دارند، هنوز مسائل مهمی در ارتباط با این پدیده وجود دارند که مطالعات وسیع تری را طلب می کنند. در این سمینار پس از یک معرفی کلی در مورد این پدیده، به بررسی چند روش جهت تعیین عمق آب شستگی که صحت آنها نیز با مطالعات صحرایی تأیید شده و مورد استفاده وسیع قرار گرفته اند پرداخته شده است. پس از این قسمت راهکارهایی که توسط محققان مختلف جهت کاهش تبعات نا مطلوب این پدیده ارائه شده اندمورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً در فصل آخر پیشنهاداتی جهت مقابله با این پدیده مخرب ارائه شده است.

مقدمه:

آب شستگی یکی از مهمترین مسائل مربوط به مهندسی رودخانه و سواحل می باشد. پایه های پل ها ، اسکله ها ، سکوهای نفتی و آب شکن ها و لوله های مدفون ازجمله مهمترین سازه هایی هستند که خطر آب شستگی آنها را تهدید می کند. در این میان پل ها که به عنوان یک سازه بسیار مهم در شریان هایی ارتباطی یک کشور به شمار می رود از اهمیت فوق العاده ای برخوردار هستند. تخریب این سازه ها تبعات اقتصادی و اجتماعی زیادی به دنبال خواهد داشت. از این رو حفاظت از این سازه در برابر آب شستگی نیز اهمیت زیادی دارد. پدیده آب شستگی در پایه ی پل ها بر پایداری سازه ی پل تاثیر منفی دارد و اگر تمهیدات لازم برای پیش گیری از این پدیده و یا کاهش اثرات آن اندیشیده نشود سازه پل با خطر انهدام مواجه خواهد بود.

آقای شفاهی بجستان پدیده آب شستگی را بصورت زیر تعریف نمود:

به فرسایش بستر و کناره آبراهه در اثر عبور جریان آب یا به فرسایش بستر در پایین دست سازه های هیدرولیکی به علت شدت زیاد جریان آب یا جریان های متلاطم و در نتیجه جریان های گردابی، آب شستگی می گویند.

این پدیده در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و مطالعات زیادی راجع به آن انجام شده است هرچند که این مطالعات در پاره ای از مسائل هنوز کافی به نظر نمی رسد، لیکن وسعت این مطالعات خود گواهی بر اهمیت این پدیده می باشد. به عنوان مثال می توان گفت که آب شستگی در سازه های مرتبط با سواحل به دلیل پیچیدگی جهت انتشار موج نسبت به جریان هنوز مشکلی اساسی برای این سازه ها به شمار می آید.

در این سمینار پس از تعاریف کلی مربوط به آب شستگی در پایه پل ها و مسائل و عوامل مرتبط آن، روابط مختلفی که توسط محققان مختلف به دست آمده مورد توجه قرار گرفته و نهایتاً چند روش برای کاهش عمق آب شستگی پیشنهاد شده است.

۱-۱- مقدمه:

در این فصل هدف از انجام عملیات مشخص شده و همچنین توضیحاتی در مورد فصول مختلف ارائه می گردد.

۱-۲- هدف از تحقیق:

هدف از انجام این تحقیق شناخت مسائل مرتبط با پدیده آب شستگی موضعی در پایه ی پل ها می باشد. پس از شناخت مسائل مرتبط با پدیده آب شستگی و مکانیسم آن روابطی که برای محاسبه ی عمق آب شستگی موضعی در پایه ی پل ها توسط محققان مختلف استفاده شده اند، ارائه شده است. درنهایت روش های مختلف مورد استفاده برای کاهش عمق آب شستگی نیز بررسی شده و در این تحقیق گردآوری شده اند.

۱-۳- پیشینه تحقیق:

از زمان توسعه شبکه راه ها بصورت مدرن و امروزی و احداث پل ها که سازه هایی کلیدی به ویژه در مناطق کوهستانی برای شبکه راه ها و همچنین راه آهن به شمار می روند این پدیده همواره به عنوان یک مشکل در طرح سازه های پل مطرح بوده است. ازجمله قدیمی ترین روابط تجربی پیشنهاد شده برای تعیین عمق آب شستگی ، رابطه ای است که توسط Ingils و همکاران در سال ۱۹۳۹ ارائه شد ولی با توجه به کاستی های این رابطه و نیز توسعه تئوری های مرتبط، پارامترهای بیشتری در روابط بعدی مورد توجه قرار گرفتند. البته باید گفت که با استفاده از تئوری باکینگهام نمی توان تاثیر تمام پارامترها را در نظر گرفت زیرا اولاً مشخص نیست که هر کدام از پارامترها واقعاً به چه اندازه تاثیرگذار هستند و نیز روابط بسیار پیچیده و غیر کاربردی خواهند شد، لذا تقریب های منطقی و معقول جهت ساده سازی روابط مورد توجه بوده و صحت این روابط را نیز بعداً باتوجه به مطالعات

صحرائی بررسی شدند که نهایتاً بعضی از این روابط به دلیل تطبیق بیشتر با واقعیت مورد توجه قرار گرفته اند.

۱-۴- معرفی فصول:

سمینار حاضر دارای پنج فصل کلی می باشد که در فصل اول هدف و سیمای کلی سمینار بیان شده است. فصل دوم به بررسی مسائل گوناگون مرتبط با پدیده آب شستگی در پایه ی پل ها می پردازد. فصل سوم روابط گوناگونی که توسط محققان گردآوری شده اند را مورد بررسی و ارزیابی قرار می دهد. فصل چهارم راه های متفاوتی که تاکنون جهت کاهش عمق آب شستگی در پایه پل ها پیشنهاد شده اند را مورد مطالعه قرار می دهد. نهایتاً در فصل پنجم سمینار حاضر جمع بندی و نتیجه گیری باتوجه به مطالعات گردآوری شده و پیشنهادات مرتبط با موضوع این سمینار مطرح گردیده اند.

۲-۱- مقدمه:

سازه های هیدرولیکی رژیم یکنواخت جریان و حمل رسوب را بهم می زنند. در پایاب این سازه ها سرعت جریان به دلیل تنگ شدن مجرا افزایش می یابد. سپس در مقاطعی که سرعت های جریان کاهش پیدا می کند، چون آشفتگی بیشتری بوجود می آیند، ظرفیت آب شستگی قوی تری مطرح می گردد. آنچه مهم است تخمین بیشینه عمق آب شستگی و شیب گودال آب شستگی می باشد. آب شستگی پدیده ای است که در ابتدا سریع پیش می رود ولی نهایتاً به تعادل می رسد. بطور کلی سه نوع عامل در آب شستگی مقاطع تاثیرگذار هستند ، نخست عوامل هیدرولیکی و سپس عوامل هندسی و نهایتاً عوامل ژئوتکنیکی . در این فصل به تفصیل در مورد این سه عامل توضیح داده می شود.

۲-۲- انواع آب شستگی :

آب شستگی می تواند در محل های مختلف و تحت شرایط گوناگونی ایجاد شود، از آن جمله آب شستگی در اثر تنگ شدگی (Contraction)، آب شستگی در محل خمیدگی ها (Curves)، آب شستگی در محل چند شاخه ها (Confluence). اما در مورد پایه پل ها می توان د انواع آب شستگی را تعریف کرد. که عبارتند از: آب شستگی موضعی (Local scouring) و آب شستگی عمومی (General scouring).

۲-۲-۱- آب شستگی عمومی (کلی)

اگر در بازه احداث پل بستر رودخانه شسته شده و نسبت به بستر طبیعی رودخانه در بالادست، در تراز پایین تری قرار بگیرد به آن آب شستگی عمومی گفته می شود. معمولاً زمان لازم برای آب شستگی عمومی بیش از آب شستگی موضعی خواهد بود. به هر حال در این حالت تغییر سراسری تراز

بستر رودخانه ایجاد می شود. علت ایجاد افت سراسری دورتر از بستر رودخانه می تواند در اثر تغییر جریان آب یا رسوب باشد که به علل زیر می تواند اتفاق بیفتد:

- احداث سیل بندها ، سیل برگردان ها، مخزن های تاخیرانداز سیل، سرریزها
- برنامه های اصلاح مجرای رودخانه شامل لایروبی، از بین بردن علف ها و نی ها، برداشت شن و ماسه

- اتصال دو یا چند شاخه به یکدیگر

- برنامه های انتقال آب بین حوضه ها

- از بین بردن پیچ های رودخانه

پایین آمدن سراسری تراز بستر رودخانه فونداسیون پایه های پل را مورد تهدید قرار می دهد، چون امکان خالی شدن زیر پی پل را فراهم می کند. البته تغییر رژیم رودخانه ممکن است منجر به بالآمدن تراز بستر رودخانه شود که این مسئله پایداری پایه پل را تقویت می کند. افت سراسری تراز بستر رودخانه می تواند در کیلومترها از طول رودخانه و در دوره زمانی چندساله رخ دهد. اگر عرض یک آبراهه به اندازه کافی پهن باشد که محدودیتی برای جریان معمول در رودخانه ایجاد نشود چنین رودخانه ای را محدود نشده (Unconfined) می نامند. این رودخانه با عمق طبیعی خود جریان خواهد یافت. بنابراین عمق ها در یک آبراهه محدود نشده در رودخانه ای با پیچ و خم، هنگامی که آبراهه اصلی جریان در عرض بستر کلی رودخانه جابجا می شود، تغییرات زیادی خواهد داشت. از طرفی اگر عرض یک آبراهه محدود شده باشد بطوریکه از جابجا شدن آن جلوگیری شود، به چنین رودخانه ای محدود شده (Confined) گویند و آبراهه آن تثبیت شده نامیده می شود.

۲-۲-۲- آب شستگی موضعی (محلی):

سازه های آبی که الگوی جریان را در اطراف خود تغییر می دهند ممکن است باعث بروز آب شستگی محلی شوند. زیرا تغییر ویژگی های جریان (سرعت و یا آشفتگی) به تغییرات ظرفیت حمل

رسوب می انجامد که این خود به عدم تعادل بین ظرفیت واقعی حمل رسوب و ظرفیتی که جریان رسوب را حمل می کند، منجر می شود. ممکن است یک تعادل جدید به دنبال شرایط هیدرولیکی، تطبیق یافته با آب شستگی نهایتاً به وجود آید. معمولاً مقیاس زمانی آب شستگی محلی نسبتاً کوتاه است، اما فرایند آب شستگی وابسته به زمان در شرایط اصلی ممکن است قابل توجه باشد. در هر حال تغییر الگوهای جریان در اطراف پایه های پل منجر به ایجاد جریان های متلاطم و در نتیجه جریان های گردابی (Vortex) می گردد. این جریان ها در دراز مدت باعث ایجاد حفره در محل پایه پل می گردد. باتوجه به نوع پایه و شرایط جریان، سیستم های گردابی ممکن است یک یا ترکیبی از سیستم های زیر باشد:

۱- سیستم گردابی نعل اسبی (Horseshoe vortex)

۲- سیستم گردابی شیاری (Wake vortex)

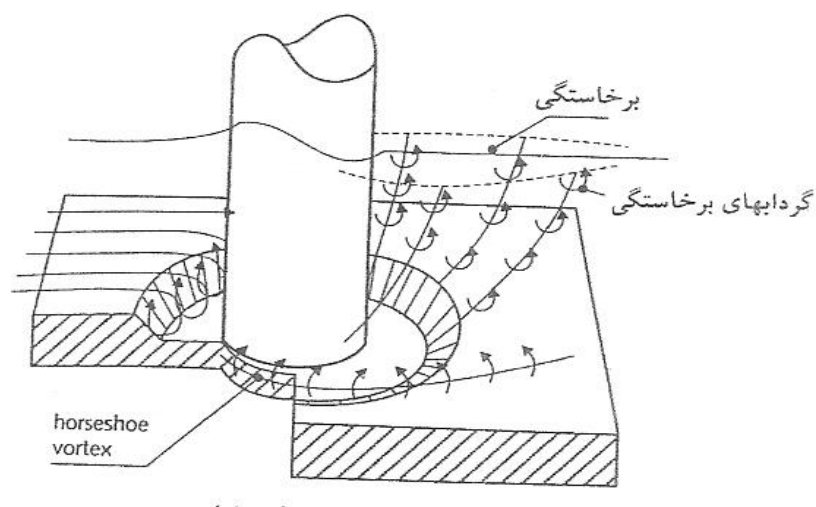
۳- سیستم گردابی دنباله دار (Trailing vortex)

۴- سیستم گردابی رو به پایین (Down flow)

۵- سیستم گردابی موج کمانی (Bow wave)

سیستم اصلی گردابی که به تشکیل حفره های آب شستگی کمک می کند از برخورد جریان به جلوی پایه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می شود که نظیر یک جت عمودی آب عمل کرده و مواد کناره پایه پل را بلند کرده و جریان معمولی آب، آن را می شوید. در نتیجه در جلوی پایه گودالی حفر می شود که در داخل این گودال جریان چرخشی ایجاد شده و به تدریج عمق حفره زیاد می شود. جریان چرخشی در جلو پایه به دوطرف پایه نیز امتداد می یابد و شکل نعل اسب را به خود می گیرد. طبق نظر بعضی از محققین این عامل در ابتدا ضعیف است ولی پس از تشکیل حفره ی آب شستگی سیستم جریان نعل اسبی از نظر قدرت و اندازه نیز رشد می کند. با زیاد شدن عمق آب شستگی مقدار جریان در نزدیک کف کم شده و آب شستگی متوقف می شود. اصولاً سیستم گردابی نعل اسبی در اثر

جداشدن خطوط جریان به علت وجود پایه ی پل در مسیر جریان بوجود می آید. قدرت این مجموعه سیستم های گردابی بستگی به شکل پایه و سرعت آب دارد. در پایه های با اشکال آیرودینامیکی جداشدگی جریان و در نتیجه سطح گردابی شیاری کاهش یافته و باعث تضعیف قدرت سیستم گردابی می شود و به تبع آن میزان آب شستگی موضعی به شدت کاهش می یابد درحالیکه در اطراف پایه های مستطیل شکل عمق آب شستگی به شدت نسبت به پایه های دایره ای شکل بیشتر است. در شکل زیر جریان گردابی نعل اسبی نشان داده شده است.



شکل (۱-۲): تشکیل گرداب نعل اسبی در پایه های استوانه ای پل ها.

۲-۲-۱- انواع آب شستگی موضعی:

الف) آب صاف: در این حالت حرکت بستر فقط در اطراف پایه ها وجود داشته و هیچگونه رسوبی در رودخانه حمل نمی شود در این حالت عمق تعادلی زمانی ایجاد می شود که تنش های روی سطح حفره قادر به حرکت دادن دانه ها نباشد.

ب) آب دارای رسوب: در این حالت عمق تعادلی زمانی ایجاد می شود که میزان رسوب ورودی به حفره آب شستگی برابر با میزان رسوب خروجی از آن باشد.

حداکثر عمق آب شستگی زمانی بوجود می آید که بستر رودخانه در آستانه حرکت باشد، این حالت مرز بین آب صاف و آب حامل رسوب می باشد. آستانه حرکت ذرات بستر در شرایطی ایجاد می شود که سرعت متوسط جریان در بالادست محل پل برابر با سرعت آستانه حرکت ذرات بستر باشد. برای آن که معلوم شود آیا بستر رودخانه در حرکت است یا جریان آب صاف در آن جریان دارد می توان از منحنی ارائه شده توسط شیلدز (Shields) استفاده نمود. این منحنی بعدها توسط اکرز و وایت (Ackers & White) کامل شد. چنانچه نقطه معرف شرایط جریان در زیر منحنی (۳-۲) قرار گیرد بستر رودخانه ثابت است ولی اگر نقطه در بالای منحنی قرار گرفت، حمل رسوب در رودخانه وجود خواهد داشت. شرایط در روی منحنی نشان دهنده حرکت ذرات بستر می باشد. پارامتر شیلدز بصورت زیر تعریف می شود:

$$F_E = \frac{RS}{D(s-1)} \quad (۱-۲)$$

که در آن R شعاع هیدرولیکی، S شیب طولی، D اندازه ذرات (معمولاً D_{50}) و s چگالی نسبی ذرات است. در صورتی که آبراهه عریض باشد می توان این رابطه را بصورت تقریبی زیر نوشت:

$$F_E = \frac{yS}{D(s-1)} \quad (۲-۲)$$

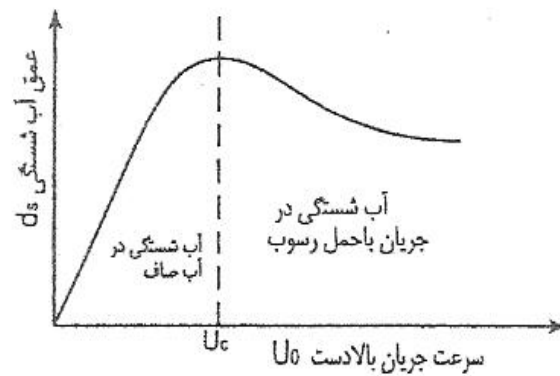
که در آن y عمق جریان آب است.

$$R^* = \frac{U * D}{v} \quad (۳-۲)$$

U^* سرعت برش برحسب m/s و لزجت ν سینماتیکی برحسب m^2/s است. در آبراهه های عریض رابطه (۳-۲) را می توان بصورت زیر تقریب زد:

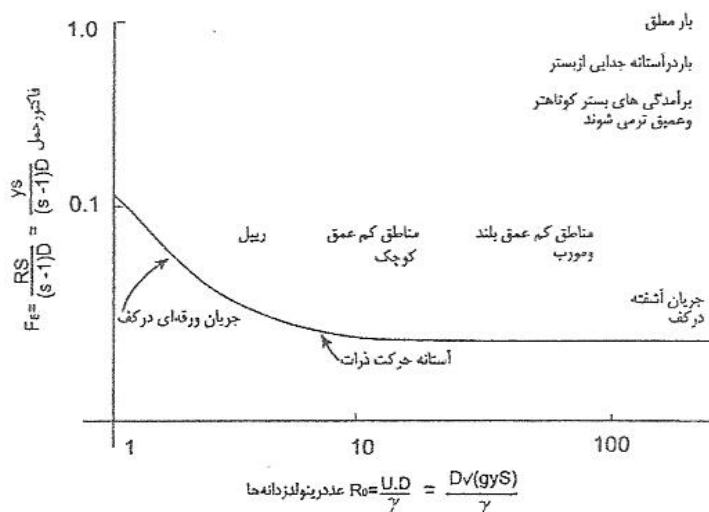
$$R^* = \frac{\sqrt{gysD}}{v} \quad (۴-۲)$$

با داشتن R^* و F_E می توان شرایط را با مراجعه به منحنی (۳-۲) چک کرد. از مشاهده ی شکل (۲-۲) به وضوح می توان دریافت که بیشترین عمق آب شستگی در شرایط سرعت بحرانی در بالا دست رخ می دهد که قبلاً به آن اشاره شد. منحنی نشان داده شده در شکل (۳-۲) در واقع همان



شکل (۲-۲): تغییرات عمق آب شستگی با سرعت جریان بالادست.

دیاگرام معروف شیلدز (Sheilds) می باشد که بر پایه تحقیقات (Rouse) حاصل شده است.



شکل (۳-۲): نمودار جهت تعیین آستانه حرکت ذرات بستر (دیاگرام شیلدز).

۳-۲-۲- آب شستگی در اثر تنگ شدگی:

در اثر تنگ شدگی سرعت جریان در آن محدوده خاص افزایش یافته ، ظرفیت محل رسوب بیشتر شده و سبب می شود تا بستر رودخانه در این محل فرسایش یابد. این عمل آن قدر ادامه می یابد تا سطح مقطع جریان به حدی زیاد شود که ظرفیت محل رسوب کاهش یافته و برابر ظرفیت

محل رسوب در مقاطع بالادست پل گردد. پدیده آب شستگی در این حالت می تواند تاثیر پس زدگی آب بالادست را کاهش دهد ولی این پدیده احتمال ریزش پل را افزایش می دهد.

۲-۲-۴- آب شستگی در محل خمیدگی ها:

آب شستگی در خمیدگی به پارامترهایی از قبیل شعاع خمیدگی، عمق جریان، دانه بندی مصالح، تاثیرات بالادست (توزیع مجدد جریان و حمل رسوب) بستگی دارد. در بخش بیرونی خمیدگی در اثر جریان مارپیچی آب، آب شستگی بیشتری رخ می دهد. شدت آب شستگی ناشی از همین جریان مارپیچی و یک پدیده رواندازی (Overshoot) می باشد. شدت رواندازی شدیداً بستگی به نسبت عرض به عمق داشته و با افزایش این نسبت رواندازی و به دنبال آن عمق آب شستگی افزایش می یابد. در این زمینه تعدادی رابطه تجربی نیز پیشنهاد شده اند که برخی از آنها تا عمق ۱۷ m و اندازه خاکدانه ها از ۰/۳mm تا ۶۳mm را پوشش می دهند و حداکثر خطای آنها در حدود ۰/۲۵ است. بطور محافظه کارانه در صورتی که نسبت شعاع خمیدگی بزرگ باشد می توان عمق آب شستگی را برابر با عمق جریان در نظر گرفت.

۲-۲-۵- آب شستگی در محل چندشاخه ها:

دو سرشاخه از رودخانه که بهم می رسند، ممکن است عمق و زاویه اتصال متفاوتی داشته باشند. برای تحلیل چنین شرایطی اگرچه مدل های ریاضی در حال حاضر در اختیار است ولی به دلیل یک بعدی بودن آنها از ارزش محدودی برخوردار هستند.

۲-۳- بررسی عوامل کلی موثر بر آب شستگی:

این عوامل شامل شرایط هیدرولیکی، شرایط ژئوتکنیکی و شرایط هندسی می باشد که به تفصیل درباره آنها توضیح داده خواهد شد.

۲-۳-۱- عوامل هیدرولیکی:

ساده ترین الگوی جریان، جریان یکنواخت و ماندگار است. اما شرایط دیگری از قبیل جریان شتابدار در یک واگرایی محلی، خم رودخانه با جریان خمیده کاملاً توسعه یافته، جریان غیرماندگار در اثر امواج سیل یا جابجایی های جزر و مدی یا وقتی که جهت جریان در پایاب سازه آبی متعادل یا متمایل با جهت جریان مصب رودخانه ای که به آن تخلیه صورت می گیرد باشد نقش عوامل هیدرولیکی بارز خواهد بود. بطور کلی می توان عوامل هیدرولیکی را شامل پارامترهای زیر دانست:

عمق جریان در بالادست، سرعت متوسط جریان در بالادست، شیب کانال، دبی در واحد عرض، سطح مقطع جریان و شکل آبراهه، ضریب زبری مانینگ، جرم واحد حجم سیال، شتاب ثقل، لزجت سینماتیکی.

۲-۳-۲- شرایط ژئوتکنیکی:

رسوب ها به دو گروه چسبنده و غیرچسبنده تقسیم می گردند. اما بین این دو گروه یک قسمت وسیع انتقالی هم وجود دارد. در مصالح غیرچسبنده مانند شن و ماسه اندازه خاکدانه ها و دانسیته مصالح، پارامترهای مناسب برای حمل رسوب هستند. مصالح بستر با دانه بندی خوب در مقابل آب شستگی بیش از مصالح یکنواخت با اندازه میانی مشابه مقاومت می کنند. در زمان وقوع سیل دانه های ریزتر شسته شده و درشت ها باقی می مانند و اندازه میانی افزایش می یابد. این پدیده را مسلح شدن (Armouring) می نامند. شکل خاکدانه ها و چگونگی قرارگیری آنها در کنار یکدیگر از جمله ی عوامل ثانویه هستند. در مورد رسوب های چسبنده خواص فیزیکو شیمیایی نقش قابل توجهی در مقاومت مصالح چسبنده در مقابل موج و کارنت برعهده دارند. این خواص به ویژگی های شیمیایی، کانی شناسی و لخته ای رسوبات بستگی شدید دارد. در پدیده آب شستگی عمق بیشینه آب شستگی تدریجاً افزایش یافته، شیب بالادست حفره تدریجاً تندتر شده یا حداقل بخش پرشیب تر طولانی تر گشته تا به مرحله تعادل برسد. این فرایند کم و بیش پیوسته بطور ناگهانی و در اثر ناپایداری های

ژئوتکنیکی در امتداد شیب بالا دست آب شستگی ممکن است بهم بخورد. هرچه شیب بالادست بیشتر باشد احتمال فروریزی شیروانی بیشتر است. از دیدگاه ژئوتکنیکی دو نوع مختلف از ناپایداری برای رسوبات غیرچسبنده قابل تشخیص می باشد که عبارتند از فروریزی برشی و لغزش جریانی. در ارتباط با فروریزی برشی تندی شیب شیروانی بالادست، مربوط به زاویه ی اصطکاک داخلی مصالح بستر بایستی مورد ارزیابی واقع گردد. لغزش جریانی یک پدیده ی ژئوتکنیکی بسیار پیچیده می باشد که فقط می تواند در ماسه های سست یا خیلی سست رخ دهد. به هر حال پایداری شیروانی بالادست در ارتباط با لغزش جریانی از اهمیت بیشتری نسبت به ناپایداری در ارتباط با فروریزش برشی برخوردار است. بطور کلی می توان عوامل ژئوتکنیکی را شامل پارامترهای مرتبط با رسوب زیر دانست:

اندازه متوسط ذرات رسوبی، جرم واحد حجم مواد کف بستر، توزیع دانه بندی و مواد کف بستر، شکل ذرات، زاویه ایستایی (اصطکاک داخلی)، چسبندگی خاک های چسبنده، طبقه بندی و لایه بندی ترکیب مواد کف بستر و لایه های زیر آن، تغییرات طبیعی یا مصنوعی در رژیم رسوبات.

۲-۳-۳- شرایط هندسی:

شرایط هندسی شامل پارامترهای مرتبط با شکل هندسی پایه ی پل می باشد که عبارتند از: قطر پایه یا عرض پایه عمود بر جریان آب، طول پایه در جهت جریان آب، شکل پایه، زاویه محور پل با جهت جریان، فاصله پایه ها، زبری و صافی سطح پایه، سیستم حفاظتی پایه ها، اجسام شناور که بوسیله جریان حمل می شوند.

۲-۴- شیب های بحرانی بالادست حفره آب شستگی:

بر اساس اندازه گیری های صحرایی از فروریزی بازوهای خاکی در جنوب غربی هلند، سیلویس معیار تجربی برای شیب های بحرانی را تعیین کرد که در جدول (۲-۴) ارائه شده اند. این مقادیر شیب هایی هستند که به ازاء آنها ناپایداری ژئوتکنیکی محتمل به ۱ می رسد (ضریب اطمینان ۱

است) اما این معیارها اثر بازدارنده حفاظ کف را لحاظ ننموده اند. بهمین دلیل شیب بالادست آب شستگی در مواردی که بستر در بالا دست گودال آب شستگی حفاظت شده باشد تا حدودی تندتر خواهد بود. شیب بحرانی برای ماسه پوک و خیلی پوک را ملایم تر از ۴:۱ (عمودی به افقی) بایستی به کار بست.

جدول (۱-۲): مقادیر بالایی از شیب های بالادست آب شستگی برای ناپایداری های مکانیکی خاکها.

پدیده مورد انتظار	زاویه شیب بحرانی β_c	زاویه اصطکاک داخلی ϕ'	دانسیتة کلی ماسه نرم
لغزش جریانی	24° (۲/۲۵:۱)	30° (۱/۷:۱)	خیلی پوک
لغزش جریانی	27° (۲/۰۰:۱)	33° (۱/۵:۱)	پوک
فروریزی برشی	30° (۱/۷۵:۱)	37° (۱/۳:۱)	متراکم
فروریزی برشی	34° (۱/۵:۱)	40° (۱/۲:۱)	خیلی متراکم

۲-۵- بررسی مکانیسم شروع حرکات رسوب در پدیده آب شستگی پایه ی پل ها:

اولین مقاله پیرامون شروع ناپایداری خاکدانه ها با استفاده از نظریه (Vonkarman) در مورد لایه مرزی توسط شیلدز (Shields) ارائه شد که مسئله را با استفاده از پارامترهای دانسیته سیال، دانسیته مواد رسوبی، گران روی دینامیکی، اندازه خاکدانه ها و تنش برشی بستر، تعریف کرد. زمانی که سرعت جریان عبوری از روی مصالح غیرچسبنده به اندازه کافی افزایش یابد، تک تک خاکدانه ها به طور تصادفی شروع به حرکت می کنند. وقوع ناپایداری بستر ناشی از اندرکنش دو متغیر تصادفی می باشد. هر خاکدانه در سطح بستر آماده پذیرش یک تنش بحرانی لحظه ای می باشد. خاکدانه ها در صورتی ناپایدار می گردد که تنش از مقدار بحرانی آن تجاوز کند. بدلیل تصادفی بودن شکل، وزن و محل قرارگرفتن هریک از خاکدانه ها، تنش برشی بحرانی دارای توزیع احتمالی خواهد بود. متغیر تصادفی دیگر تنش برشی لحظه ای بستر که توسط آب بوجود می آید، می باشد. احتمال آنکه تنش برش لحظه ای بستر، بزرگتر از تنش برش بحرانی باشد یک شاخص برای حمل رسوب خواهد بود.

برای مصالح چسبنده خواص فیزیکی شیمیایی، مقاومت آنها را در برابر فرسایش معین می کند. این خواص بستگی شدیدی به کانی شناسی، لخته ای بودن و ویژگی های شیمیایی مواد رسوبی دارد. تاکنون روابط مستقیم کمی بین خواص فیزیکوشیمیایی و آهنگ فرسایش برقرار نگردیده است. لذا مطالعات بیشتری در این زمینه باید انجام شود چون مهندسين طراح نیز به اطلاعاتی برای پیش بینی فرسایش در مصالح چسبنده به دلیل گستردگی این نوع خاک ها در بسیاری از مناطق دنیا، نیاز دارند. در سال ۱۹۳۶ شیلدر معیار پیشنهادی خویش برای شروع حرکات مصالح دانه ای واقع بر یک سطح صاف را منتشر کرد. داده های تجربی به کار گرفته شده توسط شیلدر عمدتاً از طریق برون یابی منحنی های حمل رسوب در مقابل تنش برش اعمال شده نسبت به شرایط بدون حمل بدست آمده بود. داده هایی که شیلدر (Shields) برای ترسیم منحنی (میانگین مقادیر بحرانی) به کار گرفت. اصالتاً توسط (Rouse) استخراج شده بود. در عمل به جهت توزیع غیریکنواخت مخلوط مصالح و تاثیر نحوه قرارگیری خاکدانه های در کنار یکدیگر شیلدر (Shields) ناچار به ترسیم گروهی از منحنی ها به جای یک منحنی شد، که در عمل تنش بحرانی را بطور گرافیکی مطابق آنچه در قسمت ۲-۲-۱-۲ شرح داده شد بدست می آورند.

۲-۶- بررسی کلی مراحل مختلف پدیده آب شستگی در پایه پل:

الف) مرحله اول (آغازین): جریان در گودال آب شستگی در راستای طولی تقریباً یکنواخت است. در این مرحله ظرفیت آب شستگی بسیار شدید است. مشاهدات انجام شده بر مصالح نرم و زبر نشان داده که در شروع شکل گیری گودال آب شستگی، بخشی از مصالح بستر نزدیک شیب بالادست آب شستگی به حالت تعلیق در می آیند. اغلب ذرات به تعلیق درآمده در داخل جریان از مسیرهای انتقامی عبور کرده و تحت تاثیر موازنه درونی بین وزن ذرات معلق و نیروهای بالابرنده، معلق باقی می مانند. برخی از ذرات که ته نشین می شوند به دلیل اعمال نیروی جریان آشفته نزدیک بستر، مجدداً

به حالت معلق درمی آیند. بخش دیگری از ذرات با ارتفاع جهش کمتر از یک مقدار مرجع تعریف شده بصورت بار بستر حمل می شوند.

ب) مرحله دوم (توسعه): در این مرحله عمق آب شستگی افزایش قابل توجهی پیدا می کند اما شکل گودال آب شستگی تغییر نمی یابد. در این مرحله فاصله از انتهای حفاظ کف تا نقطه ای که گودال آب شستگی بیشترین عمق را دارد تقریباً ثابت است. بخش بالایی شیب بالادست آب شستگی در تعادل می باشد، لیکن بخش پایینی آن همچنان در حال توسعه است. به دلیل کاهش سرعت های جریان در نزدیکی بستر در طول زمان، به رغم افزایش انرژی آشفتگی بار معلق نزدیک بستر در مقایسه با مرحله آغازین به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.

ج) مرحله سوم (ثبیت): آهنگ توسعه عمق بیشینه آب شستگی کند می شود. ظرفیت آب شستگی در عمیق ترین بخش گودال آب شستگی درمقایسه با ظرفیت آب شستگی در پایاب بسیار کوچک است ، بطوری که ابعاد گودال آب شستگی بیشتر درجهت طولی نسبت به جهت قائم توسعه می یابد. در مرحله تثبیت وضعیت تعادل هم برای شیب بالادست آب شستگی و هم برای شیب پایین دست آب شستگی و همچنین عمق بیشینه آب شستگی تقریباً حاصل نشده اند.

د) مرحله چهارم (تعادل): در این مرحله ابعاد گودال آب شستگی تغییر قابل ملاحظه ای نخواهد داشت.

پیش بینی عمق آب شستگی در پایه پل ها همواره به عنوان یکی از مهمترین و بحث انگیزترین مسائل درارتباط با ایمنی پل ها مطرح بوده است. محققان روش های مختلف جهت پیش بینی عمق آب شستگی ارائه دادند که باتوجه به گستردگی پارامترهای موثر بر تعیین عمق آب شستگی و اینکه هرکدام از آنها به نحوی با تاکید بیشتر بر یک دیدگاه رابطه خود را ارائه داده اند از جامعیت برخوردار نبوده اند. اغلب این روابط در آزمایشگاه و با مطالعه روی مدل توسعه یافته اند که باید صحت عملکرد این روابط باتوجه به آزمایش های صحرایی بررسی گردد. این خود فرآیندی پرهزینه و بسیار زمان بر است؛ خصوصاً اینکه عواملی چون شکل آبراهه، خصوصیات جریان، شکل و زاویه ای استقرار. پایه های پل نسبت به جهت جریان و خصوصیات رسوبات در محاسبه ی عمق آب شستگی درپایه پل نقش دارند. از جمله اولین روابط پیشنهاد شده برای تعیین عمق آب شستگی، رابطه ای بود که توسط Ingils و همکاران در ۱۹۳۹ ارائه گردید. این رابطه علی رغم سادگی، کاستی های زیادی داشت و تاثیر بسیار از پارامترها را بر عمق آب شستگی درنظر نگرفته بود. باید به این نکته توجه داشت که نباید صرفاً به دنبال یک رابطه محافظه کارانه بود، بلکه باید رابطه ای را بدست آورد که در تطابق هرچه بیشتر با داده های صحرایی باشد؛ زمانی که عمق آب شستگی و هزینه های احداث روابط معنی داری پیدا می کنند اهمیت این نکته بیش از پیش آشکار می گردد. پس از Inglis (1952)، Laursen (1958)، Brandely (1958) & Issard (1965)، Breusers (1981)، Jain (1986)، Gunyakti (1988)، Froehlich (1993) و Fotherby & Jones (2000)، Melville & Coleman و بسیاری از محققان روابط تجربی و یاروابط بر پایه مدل های آزمایشگاهی را پیشنهاد نمودند که میزان دقت و تطابق آنها با داده های صحرایی توسط تعدادی از محققان مورد مطالعه قرار گرفت. یک نرم افزار جهت محاسبه ی عمق آب شستگی به نام HEC-18 توسط Richardson & Davis نیز بعدها توسعه یافت که البته تطابق نتایج این نرم افزار با داده های صحرایی و نیز روابطی که صحت آنها مورد تایید واقع شده است نیاز به بررسی بیشتر بویژه درحالت گروه پایه های پل دارد.

۳-۲- شیوه عمومی جهت تعیین روابط مربوط به پیش بینی عمق آب شستگی :

رابطه کلی که از تئوری Π باکینگهام بدست می آید کاربردی نیست زیرا رابطه ای مبتنی بر پارامترهای متعدد بدست می آید. از این رو محققان با حذف بعضی از پارامترها که تأثیر زیادی بر عمق آب شستگی ندارند و انجام آزمایش، عمدتاً با استفاده از رگرسیون روابطی بدست آورده اند. تعداد زیادی از این روابط فرمی به شکل زیر دارند:

$$\frac{d_s}{b} = f(F_o, \frac{d_o}{b}) \quad (۱-۳)$$

که در آن $F_o = \frac{V_o}{\sqrt{gd_o}}$ عدد فرود و $\frac{d_o}{b}$ نسبت عمق جریان در بالادست به عرض پایه ی پل عمود بر جریان می باشد. در این روابط پارامترهای مهمی از قبیل شکل پایه، زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل و پارامترهای مرتبط با غیریکنواختی سایر ذرات رسوب در نظر گرفته نشده است. از این رو روش عمومی، تعیین عمق آب شستگی با یکی از روش های معمولی و سپس اصلاح آن باتوجه به ضرایب مربوط به پارامترهای فوق می باشد.

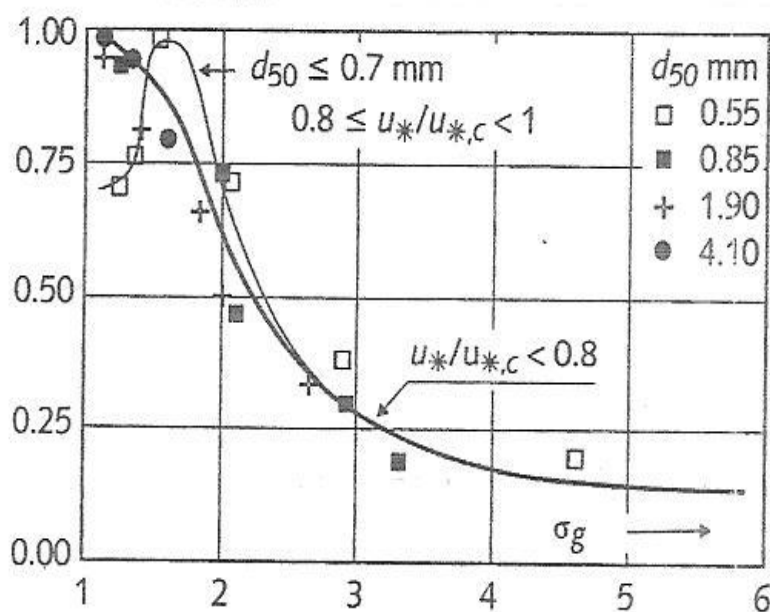
۳-۳- شدت تاثیر پارامترهای مختلف بر عمق آب شستگی پایه پل ها:

این پارامترها شامل اندازه رسوبات بستر، شکل پایه پل، زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل می باشند که به تفصیل در مورد آنها توضیح داده می شود.

۳-۳-۱- اندازه ی رسوبات بستر:

اندازه ی خاکدانه های مصالح بستر تأثیری بر عمق آب شستگی نخواهند داشت ولی بر زمان رسیدن به تعادل تاثیر دارند. آزمایش ها نشان می دهند که خاکدانه های بزرگتر گودال آب شستگی را مسلح کرده و به شرطی که $1 < \frac{b}{ho}$ (نسبت عرضی پایه ی پل به عمق جریان بالادست کمتر از ۱) تاثیر مستقیم بر عمق آب شستگی داشته و آن را کاهش می دهند. با افزایش عرض پایه پل (b)، عمق آب

شستگی نیز افزایش می یابد. برای پایه پل لاغر تاثیر عمق جریان حاشیه ای خواهد بود. بطور معمول تاثیر قطر خاکدانه های بستر با سرعت جریان بحرانی برای شروع حرکت بیان می شود. دانه بندی مصالح بستر را می توان با انحراف معیار هندسی آنها ($\sigma_g = \frac{d_{84}}{d_{50}}$) مشخص ساخت. دانه بندی مصالح بستر با تاثیر بر پارامتر شیلدز و تعیین تنش بحرانی (τ_c) و بیان آستانه حرکت برای مصالح بستر می تواند تاثیر در روابط عمق آب شستگی را مشخص سازد. برای ماسه های طبیعی رودخانه ها در حدود ۱/۸ ای ماسه یکنواخت ۱/۳ و برای ماسه های تک اندازه ۱ خواهد بود. داده های صحرایی برای تعیین کاهش عمق آب شستگی در یک مورد مقدماتی توسط Raudkivi & Ettema ارائه شد که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است به دلیل مقدماتی بودن این تحقیقات باید در استفاده از این نمودار محتاطانه عمل کرد.



شکل (۱-۳) : عامل k_g به عنوان تابعی از σ_g

۳-۲-۳- شکل پایه پل:

این ضریب برای مورد مقدماتی، مثلاً پایه منشوری شکل گرد، در برش افقی برابر یک است. مطالعات نشان داده است هراندازه شکل پایه ی پل آیرودینامیک تر باشد، عمق آب شستگی کمتر

خواهد بود. به عنوان مثال عمق آب شستگی پایه ای که در برش افقی بیضوی باشد کمتر از پایه ای است که در برش افقی مستطیل شکل باشد. آنچه مسلم است آن است که شکل پایه پل از جمله پارامترهای بسیار مهم می باشد. از این رو با توجه به به گفته های بالا باید سعی شود حتی الامکان شکل پایه پل به اشکال آیرودینامیک نزدیک باشد. در جدول (۳-۱) عامل k_s با توجه به اشکال مختلف پایه پل نشان داده شده است.

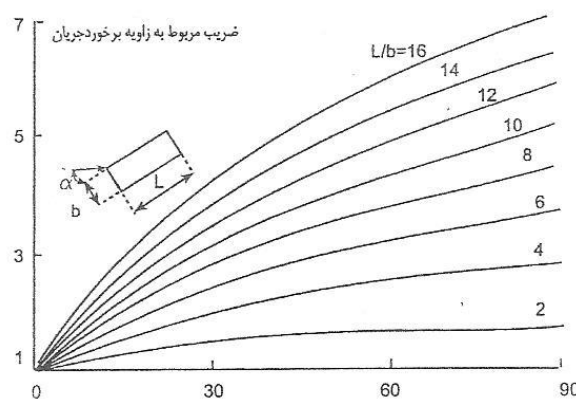
جدول (۳-۱): عامل شکل k_s .

شکل پایه در پلان	نسبت طول به عرض	k_s
استوانه ای	۱	۱
عدسی	۲	۰/۹۱
	۳	۰/۷۶
	۴	۰/۶۷
		۰/۷۳
	۷	۰/۴۱
دماغه سهموی		۰/۸
مثلثی ۶۰°		۰/۷۵
مثلثی ۹۰°		۱/۲۵
بیضوی	۲	۰/۹۱
	۳	۰/۸۳
	۴	۰/۸۶
طاق دیسی		۰/۹۲
مستطیلی	۲	۱/۱۱
	۴	۱/۴
	۶	۱/۱۱

۳-۳-۳- زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل:

هر اندازه زاویه برخورد جریان با پایه پل بیشتر باشد عمق آب شستگی بیشتر خواهد بود. در شرایط بستر فعال که یک تعادل دینامیک بین خارج شدن رسوب از گودال آب شستگی و وارد شدن به آن وجود دارد سرعت تاثیر قابل ملاحظه ای بر عمق آب شستگی نخواهد داشت. اگر پایه های پل در جهت جریان باشد طول پایه تاثیر قابل ملاحظه ای بر عمق آب شستگی نخواهد داشت اما اگر با جهت جریان زاویه بسازد، تاثیر فوق العاده ای در آب شستگی محلی خواهد داشت. اگر پایه های پل استوانه ای با یکدیگر فاصله ای بیش از 3b تا 11b (b پهنای پایه پل) داشته باشند لازم نیست اثر

زاویه حمله جریان (زاویه بین محور اصلی برش افقی پایه ها و جهت جریان) بر عمق بیشینه آب شستگی متعادل در نظر گرفته شود. اگر زاویه ی حمله صفر باشد فاکتور تاثیر جهت جریان نسبت به پایه ی پل برابر واحد خواهد بود. یک پژوهش در مورد آب شستگی در اطراف پایه مستطیلی با $\frac{l_p}{b}$ در حدود ۱/۷۵ انجام شد که در آن زاویه ی حمله بین صفر تا ۴۵ درجه بوده است. این آزمایش ها نشان دادند که آب شستگی نهایی برای زاویه ۳۰ درجه تقریباً برابر با مقدار مربوط به ۴۵ درجه بوده ولی مقدار مذکور بسیار بزرگتر از صفر درجه می باشد. شکل (۲-۳) چگونگی تاثیر نحوه ی قرارگیری پایه پل نسبت به جهت جریان را نشان می دهد.



شکل (۲-۳): تاثیر زاویه ی قرارگیری پایه نسبت به جهت جریان (k_w).

رابطه ی زیر برای محاسبه فاکتور تاثیر زاویه قرارگیری پایه نسبت به جهت جریان (k_w) استفاده می شود. که در آن l_p طول پایه پل، b پهنای پایه پل، w زاویه ی حمله بر حسب درجه می باشد.

$$k_w = (\cos w + \frac{l_p}{b} \sin w)^{0.62} \quad (2-3)$$

هروقت که زاویه ی حمله به ۹۰ درجه نزدیک می شود نتایج بدست آمده از رابطه ی (۲-۳) و شکل (۲-۳) مشکوک می باشند.

۳-۴- محاسبه ی عمق آب شستگی در پایه پل در مصالح چسبنده:

درباره ی عمق آب شستگی در خاک های چسبنده و تاثیر درجه ی تحکیم خاک روی مقاومت مصالح در مقابل آب شستگی اطلاعات اندکی وجود دارد. بنابراین توصیه می شود تا زمانی که

اطلاعات بیشتری در دسترس قرار گیرد از فرمول های ساده ای که عمق آب شستگی را بر مبنای عرض پایه بدست می آورند، استفاده شود. خلاصه ای از این روابط ساده در جدول (۲-۳) نشان داده شده است. در اینجا باید گفت که بیشتر مطالعات در مورد آب شستگی پیرامون پایه های منشوری گرد واقع بر روی ماسه غیرچسبنده و تحت تاثیر جریان یکنواخت، صورت گرفته است.

جدول (۲-۳): روابط جهت تعیین عمق آب شستگی در خاک های چسبنده.

شکل مقطع پایه	شیب وجوه پایه	عمق آب شستگی
استوانه ای	عمودی	۱/۵b
مستطیلی	عمودی	۲b
عدسی	عمودی	۱/۲b
مستطیلی با دماغه نیم دایره	عمودی	۱/۵b
مستطیلی با دماغه نیم دایره	وجوه پایه به طرف بالا و رو به داخل با زاویه ای بیشتر از 20° نسبت به قائم شیب دارند	b
مستطیلی با دماغه نیم دایره	وجوه پایه به طرف خارج و رو به بالا با زاویه ای بیشتر از 20° نسبت به قائم شیب دارند	۲b

۳-۵- بررسی تاثیر زمان بر پدیده آب شستگی در آب صاف:

طبق مطالعات قبلی انجام شده مشخص گردیده که جهت رسیدن به عمق آب شستگی متعادل زمان نسبتاً طولانی لازم می باشد. در شرایطی ما نیاز به دانستن عمق آب شستگی در زمان اوج هیدروگراف سیلاب داریم. زیرا در حالت مدنظر بودن استفاده کوتاه مدت از سازه پل عمق بیشینه آب شستگی متعادل خیلی بیشتر از عمق آب شستگی در زمان اوج سیلاب طرح می باشد و این خود هزینه های ساخت را افزایش خواهد داد. بویژه اگر آب صاف باشد این مسئله باتوجه به اینکه پارامتر زمان نیز برای وقوع آب شستگی متعادل افزایش می یابد اهمیت بیشتری خواهد داشت. بطور کلی مطالعات مربوط به تعیین عمق آب شستگی متعادل باتوجه به مقیاس زمان محدود است و یک رابطه کلی و عمومی پیشنهاد نگردیده است. مطالعات Yanmaz (2006) بر مبنای رویکرد جریان پیوسته رسوب، که تغییرات حجم گودال آب شستگی در واحد زمان را برابر نرخ حمل رسوب به خارج از حفره

آب شستگی می داند منجر به توسعه یک رابطه ی مفید در زمینه ی تعیین عمق آب شستگی در آب صاف شد که مشاهدات تجربی و نیز روابط پیشنهاد شده توسط محققانی چون (1999) Chiew & Melville و (2002) Hager & Olivetto با آن سازگاری خوبی دارند. اساس مطالعات (2006) Yanmaz بر مبنای رابطه زیر است:

$$\frac{dv}{dt} = Q_{so} \quad (3-3)$$

که در آن v حجم حفره ی آب شستگی و Q_{so} نرخ حمل شده رسوب به خارج از حفره آب شستگی است.

۳-۵-۱- روابط پیشنهاد شده جهت تعیین عمق آب شستگی باتوجه به مقیاس زمان:

در این مورد روابطی از سوی (1967) Breusers، (1999) Chiew & Melville، (2002) Olivetto و (2005) Yanmaz، پیشنهاد گردیده اند که در اینجا هرکدام از آنها به ترتیب قدمت زمانی توضیح داده خواهند شد.

۳-۵-۱-۱- روش (1967) Breusers:

این روش در ابتدا برای آستانه های با حفاظ کف توسعه یافت ولی بعدها در دهه ی هفتاد برای فرآیند آب شستگی در اطراف پایه ی پل نیز به کار برده شد. این رابطه در حالت پایه های پل لاغر $1 < \frac{b}{h_0}$ و با شرط $y_{me} > b$ برای کلیه مراحل آب شستگی معتبر است.

$$\frac{y_m}{y_{me}} = 1 - e^{-\ln(1 - \frac{b}{y_{me}})(\frac{t}{t_1})^\gamma} \quad (3-4)$$

که در آن b پهنای پایه پل، h_0 عمق اولیه جریان، t زمان، t_1 زمان مشخصه که در آن $y_m = b$ و y_m عمق بیشینه آب شستگی در زمان t ، y_{me} عمق بیشینه آب شستگی در مرحله تعادل، γ توان که

بین ۰/۲ تا ۰/۴ در تغییر است. در مرحله ی توسعه یعنی زمانی که $t < t_1$ باشد، معادله قبل بصورت زیر ساده می شود.

$$\frac{y_m}{b} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^\gamma \quad \gamma = 0.22 - 0.23 \quad (5-3)$$

$$t_1 = 29.2 \frac{b}{u_0 \sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{\Delta g d_{50}}}{\sqrt{2} u_0 - u_c} \right)^3 \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{1.9} \quad (6-3)$$

که در آن d_{50} قطر متوسط ذرات، g شتاب ثقل، u_c سرعت متوسط بحرانی، u_0 سرعت متوسط، و Δ دانسیته نسبی می باشد. در تمام روابط این قسمت و قسمت های بعدی واحدها در سیستم SI می باشند.

اگر پایه پل لاغر نباشد یعنی $1 < \frac{b}{h_o}$ رابطه ی Breusers بصورت زیر اصلاح خواهد شد:

$$\frac{y_m}{b} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^\gamma \quad \gamma = 0.4 \quad (7-3)$$

$$t_1 = \frac{kh_o^2 \Delta^{1.7}}{(\alpha u_0 - u_c)^{4/3}} \quad (8-3)$$

که در آن h_o عمق اولیه جریان، k ضریبی است که معمولاً ۳۳۰ ساعت در نظر گرفته شده و t_1 نیز بر حسب ساعت بدست می آید، u_c سرعت متوسط بحرانی، u_0 سرعت متوسط جریان، α ضریبی که به سرعت جریان و شدت آشفته گی بستگی دارد. مقادیر k و α در جدول (۳-۳) و مقادیر u_c در خاکهای چسبنده در جدول (۴-۳) آورده شده اند.

جدول (۳-۳): مقادیر k و α (ضرایب فرسایش).

مرجع داده ها	هندسه	b / h_o	α	K
اکرمین [۴]	پایه پل تطویل شده	۱/۲	۷/۸۵	۲۵۰
کانتز [۱۱۸]	پایه پل استوانه ای	۱/۲ - ۱/۹	۶/۰ - ۸/۰	۳۳۰
ون در وال [۱۹۹]	تکیه گاه دیوار قائم	۱/۰ - ۷/۵	۴/۰ - ۹/۰	۳۳۰
ون در وال [۱۹۹]	تکیه گاه درون گذر	۱/۰ - ۳/۰	۲/۰ - ۷/۰	۳۳۰

جدول (۳-۴): مقادیر تقریبی u_c برای انواع خاکهای چسبنده.

نوع خاک	عمق جریان (m)	U_c (m/s)
ماسه لومی، رس لومی سبک با تراکم اندک	۱	۰/۴
رس لومی سنگین با دانسیته پائین	۳	۰/۵
رس با دانسیته پائین	۱۰	۰/۶
رس لومی سبک با تراکم متوسط	۱	۰/۸
رس لومی سنگین با دانسیته متوسط	۳	۱/۰
رس با دانسیته متوسط	۱۰	۱/۳
رس لومی سبک (متراکم)	۱	۱/۲
رس لومی سنگین (متراکم)	۳	۱/۵
رس سخت	۱۰	۱/۹

۳-۵-۱-۲- روش Chiew & Melville(1999):

رابطه ی پیشنهادی این دو محقق بصورت زیر می باشد:

$$\frac{d_s}{d_{se}} = e^{\left[-0.03 \left| \left(\frac{u_c}{u} \ln \left(\frac{t}{t_c} \right) \right)^{1.6} \right| \right]} \quad (۳-۹)$$

که در آن d_{se} عمق آب شکستگی متعادل، t_e زمان لازم جهت ایجاد عمق آب شکستگی متعادل می باشد. d_{se} در یک پایه استوانه ای می تواند با k_{yb}, k_l, k_d مشخص گردد که در آن k_{yb} فاکتور تاثیر عمق جریان و عرض پایه استوانه ای شکل، k_l فاکتور پیوستگی جریان و k_d فاکتور تاثیر عرضی پایه و اندازه ذرات است. این دو محقق توضیحاتی پیرامون t_c بیان نمودند. دقت رابطه فوق به دقت d_{se} و t_c بستگی دارد.

۳-۵-۱-۳- روش Hager & Olivetto(2002):

رابطه ی پیشنهاد شده توسط این دو بصورت زیر می باشد:

$$\frac{d_s}{L_R} = 0.068 \sigma_g^{-0.5} F_d^{1.5} \log T_d \quad (۳-۱۰)$$

$$t_R = \frac{L_R}{(\Delta g D_{50})^{0.5}} \quad \text{و} \quad T_d = \frac{t}{t_R} \quad \text{و} \quad F_d = \frac{u}{(\Delta g D_{50})^{0.5}} \quad \text{و} \quad L_R = b^{\frac{2}{3}} y^{\frac{1}{3}} \quad (۳-۱۰) \quad \text{در رابطه ی}$$

می باشند. مزیت این رابطه نسبت به رابطه ی پیشنهادی توسط (Chiew & Melville (1999، مستقل بودن آن از آب شستگی متعادل است. تطابق روش Hager & Olivetto با واقعیات تجربی قابل مشاهده است. هر دوی روش های فوق به رغم داشتن تطابق نسبی با عمق های آب شستگی واقعی ولی عمق آب شستگی را بیش از مقدار واقعی در زمان دلخواه نشان می دهند.

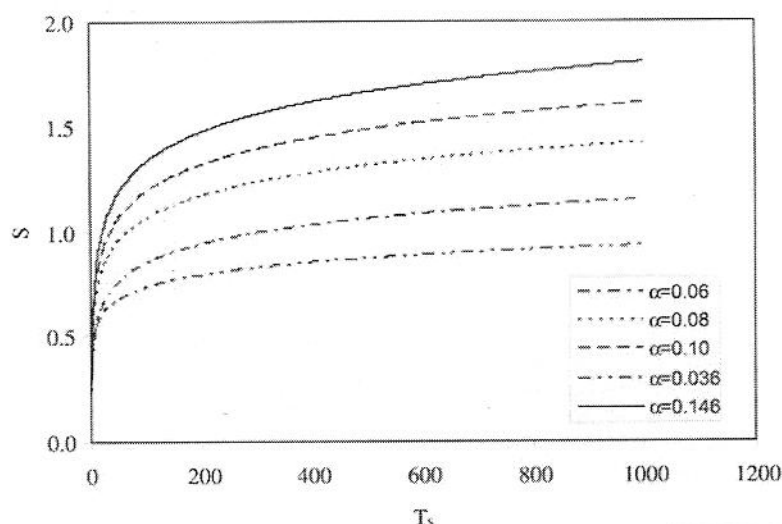
۳-۵-۱-۴- روش Yanmaz(2006):

پایه این روش براساس معادله (۳-۳) می باشد که پس از ساده سازی در نهایت دورابطه حاصل می گردند. روش حل آن ها براساس سعی و خطا است که باید مقادیر مناسب طوری انتخاب شوند که دو رابطه زیر اقناع گردند. این دو رابطه عبارتند از:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d_s}{dT_s} = \frac{\alpha s^{0.37} (2S \cot g\varphi + 1)}{T_s^{0.95} (S^2 \cot g\varphi + S)} \quad (11-3) \\ \alpha = 0.231(\tan \varphi)^{0.63} \left(\frac{U_s b}{D_{so} \sqrt{\Delta g D_{so}}} \right)^{-0.95} T D_s^{0.24} \sigma_g^{1.9} \quad (12-3) \end{array} \right.$$

در این روابط $S = \frac{d_s}{b}$ و $T_s = \frac{t D_{so} (\Delta g D_{so})^{0.5}}{b^2}$ پارامترهایی بی بعد هستند ، به علاوه جهت تسهیل در معادلات $\Delta = 1/65$ فرضی می گردد. رنج های کاربردی α بین 0.36×10^{-4} تا $1/46$ می باشد. جهت محاسبه عمق آب شستگی در زمان مورد نظر t که همان زمان رسیدن به اوج دبی سیلاب می باشد ، مقدار α از رابطه ی (۱۲-۳) محاسبه شده و T_s نیز محاسبه می گردد ، سپس باتوجه به چارت شکل (۳-۳) مقدار S و در نتیجه عمق آب شستگی بدست خواهد آمد. در این روابط D_{50} سایز متوسط ذرات که این رابطه به ازای $0.24 \leq D_{50} \leq 1.55$ معتبر است ، Δ دانسیته نسبی، g شتاب ثقل، ν ویسکوزیته سینماتیکی آب، $D_s = \frac{D_{50}}{\sqrt{\frac{\Delta g}{\nu^2}}}$ ، σ_g انحراف معیار سایز هندسی ذرات که این رابطه به ازای $1.03 \leq \sigma_g \leq 2.3$ معتبر می باشد ، b عرض پایه پل، $T = \frac{\tau_b - \tau_{bc}}{\tau_{bc}}$ که در آن

τ_b تنش برشی کف در حالت افقی، τ_{bc} تنش برشی در کف شیب دار که برابر با $\tau_c \Psi$ است و Ψ فاکتوری است که به نوسانات آشفته‌گی گرداب اولیه بستگی داشته و عمدتاً ۰/۵ فرض می‌شود، U_s سرعت برشی، φ زاویه ایستایی طبیعی خاک است. باید متذکر شد که رابطه اخیر Yanmaz برپایه‌ی مطالعات (2001) Debneath & Dey ارائه شده است. همچنین این رابطه در بازه‌های $0.63 \leq \frac{u}{u_c} \leq 0.93$ و $0.29 \leq \frac{b}{y} \leq 1.03$ و محدوده $0.036 \leq \alpha \leq 0.146$ معتبر است. با رعایت این شرایط، رابطه Yammaz نتایجی تقریباً مشابه با نتایج تجربی حاصل از آزمایشات بدست می‌دهد.



شکل (۳-۳): گراف محاسبه S مطابق روش $(S = \frac{d_s}{b})$ Yanmaz

۳-۶- روش‌های پیشنهادی جهت محاسبه عمق آب شستگی موضعی پایه پل توسط محققان مختلف:

در این قسمت روش Breusers، روش پیشنهادی دانشگاه Auckland و روش دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۶-۱- رابطه پیشنهاد شده براساس مطالعات Breusers :

روابط آب شستگی همه براساس رگرسیون بدست می آیند. یکی از این روابط، رابطه ای بود که توسط Laursen & Toch ارائه شد. این رابطه محافظه کارانه بوده و تاثیر زاویه حمله ، شکل پایه پل، عمق جریان، سرعت و اندازه رسوب را لحاظ کرده بود. Breusers بر مبنای مطالعات آنها رابطه ای را برای پایه پل های استوانه ای پیشنهاد نمود که بصورت زیر است:

$$y_{mc} = 1.35k_i b^{0.7} h_o^{0.3} \quad (۱۳-۳)$$

که در آن b عرض پایه پل ، h_o عمق جریان ، k_i عامل تصحیح که برای پایه های استوانه ای $k_i=1$ است ، y_{me} عمق آب شستگی متعادل می باشد. در آب شستگی بستر فعال ، عمق آب شستگی متعادل با زمان نوسان می کند. از این رو Breusers توصیه کرد که برای اهداف طراحی y_{me} به علاوه نصف ارتفاع تلماسه اختیار شود. او همچنین با تکیه بر داده های آزمایشگاهی در شرایط $u_0 < u_c$ عمق آب شستگی در اطراف پایه های پل گرد را با رابطه ی زیر پیش بینی کرد:

$$y_{mc} = 1.5k_i b \tanh\left(\frac{h_o}{b}\right) \quad (۱۴-۳)$$

همچنین در شرایطی که $1 < \frac{u_0}{u_c} < 0.5$ او پیشنهاد داد تا از رابطه ی زیر استفاده گردد:

$$y_{me} = 2k_i b \left(\frac{2u_0}{u_c} - 1\right) \tanh\left(\frac{h_o}{b}\right) \quad (۱۵-۳)$$

طبق نظر او اگر سرعت تقرب کوچکتر از نصف سرعت بحرانی باشد فرسایش پیش بینی نمی گردد.

تحقیقات Johanson نشان داد به جز در مواردی که $0.5 < \frac{u_0}{u_c}$ برای کلیه مقادیر، $\frac{u_0}{u_c}$ رابطه Breusers جواب های خوبی می دهد. مقدار u_c برای چند نوع خاک در جدول (۳-۴) نشان داده شده است.

۳-۶-۲- رابطه پیشنهاد شده براساس مطالعات دانشگاه Auckland :

دانشگاه Auckland مطالعات زیادی را در ارتباط با پدیده آب شستگی پایه پل ها انجام داده است.

معادلات زیر براساس نتایج مطالعات بدست آمده اند:

$$\frac{d_s}{b} = 2.1k_1.k_2.k_3 \quad \frac{b}{D_{50}} > 18 \quad (16-3)$$

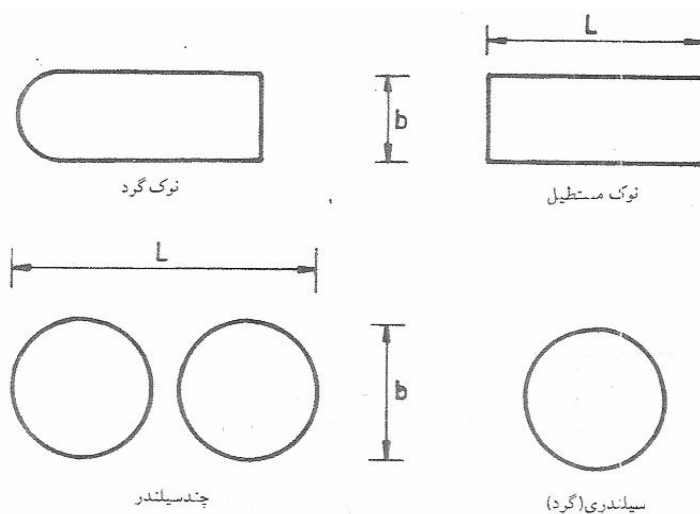
$$\frac{d_s}{b} = 0.45k_1.k_2.k_3 \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.53} \quad \frac{b}{D_{50}} < 18 \quad (17-3)$$

که در آن k_1 ضریب تاثیر شکل پایه که از جدول (۵-۳) بدست می آید ، k_2 ضریب تاثیر زاویه برخورد جریان به پایه که از جدول (۵-۳) بدست می آید، k_3 ضریب تصحیح با توجه به غیریکنواختی مصالح بستر رودخانه که از شکل (۵-۳) بدست می آید.

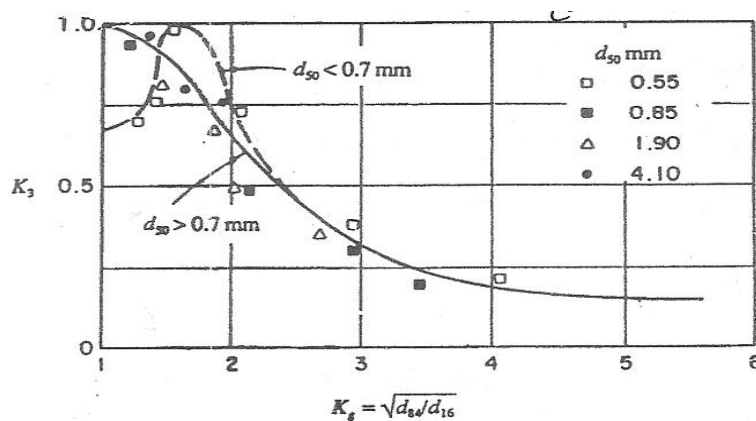
جدول (۵-۳): ضرایب تصحیح k_1 و k_2 مربوط به رابطه ی دانشگاه Auckland.

ضریب اصلاحی K_2				ضریب اصلاحی	نوع پایه
$L/b = 12$	$L/b = 8$	$L/b = 4$	θ	K_1	
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۱	نوک مستطیل
۲/۵	۲/۰	۱/۵	۱۵	۱/۰	نوک گرد
۳/۵	۲/۵	۲/۰	۳۰	۱/۰	سیلندری
۴/۳	۳/۳	۲/۳	۴۵	۰/۹	نوک تیز
۵/۰	۳/۹	۲/۵	۹۰	۱/۰	چند سیلندر

در این جدول L و B با توجه به اشکال زیر قابل تصور خواهد بود.



شکل (۴-۳): پارمترهای هندسی L و b برای پایه ها.



شکل (۳-۵): ضریب تصحیح k_3 مربوط به رابطه ی دانشگاه Auckland.

۳-۶-۳- رابطه پیشنهاد شده براساس مطالعات دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU):

این رابطه به کمک تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر آب شستگی پایه پل و تحلیل داده های آزمایشگاهی توسعه داده شده است. رابطه بصورت زیر می باشد:

$$y_{me} = 2.0k_i h_o F_r^{0.43} \left(\frac{b}{h_o}\right)^{0.65} \quad (۱۸-۳)$$

که در آن $F_r = \frac{u_0}{\sqrt{gh_o}}$ و h_o و u_0 به ترتیب سرعت آب و عمق آب در بالادست پایه پل، b عرض پایه پل، k_i ضرایب تصحیح مرتبط به شکل پایه، زاویه برخورد جریان و غیریکنواختی مصالح بستر می باشد. ضریب بدست آمده از رگرسیون به ۲ تبدیل شده تا منحنی پوش را توسعه داده و ضریب اطمینانی را با خود داشته باشد. پل های زیادی در ایالات متحده به دلیل آب شستگی پی در اطراف پایه پل ها تضعیف شده اند از این روایالات متحده یک روش احتمالاتی در مهندسی را توسعه داده و مدل بهترین برازش که شبیه رابطه CSU است ارائه است.

$$y_{me} = 2.02k_i h_o F_r^{0.21} \sigma_d^{-0.24} \left(\frac{b}{h_o}\right)^{0.98} \quad (۱۹-۳)$$

که در آن $\sigma_d = \frac{d_{84}}{d_{50}}$ که معرف دانه بندی رسوب می باشد. ضریب تصحیح k_i که مشتمل بر ضرایب تصحیح k_1 و k_2 است را می توان از جدول (۳-۶) و شکل (۳-۲) بدست آورد. روابط زیاد

دیگری نیز جهت پیش بینی عمق آب شستگی وجود دارند که می توان آنها را از مراجع مختلف یافت ولی این سه روش با آزمایش های صحرایی جواب های منطقی را به دست داده اند و از جامعیت بیشتری برخوردار هستند.

جدول (۳-۶) : ضریب تصحیح K_1 مربوط به شکل پایه در رابطه دانشگاه (CSU).

K_s	شکل پایه در برش افقی یا قائم
	۱- افقی:
۰/۷ تا ۰/۸	عدسی شکل
۰/۶ تا ۰/۸	بیضوی
۱/۰	گرد
۱/۰ تا ۱/۲	مستطیلی
۰/۹	مستطیلی با دماغه نیم دایره
۱/۰۱	مستطیلی با گوشه های پهن زده
۰/۸۶	دماغه مستطیلی با دنباله لبه تیز
۰/۶۵ تا ۰/۷۶	مستطیلی با دماغه تیز ۱:۲ تا ۱:۴
	۲- قائم:
۰/۷۶	هرمی شکل
۱/۲	هرمی شکل معکوس

۳-۷- تخمین عمق آب شستگی موضعی در اطراف گروه پایه ها :

مطالعات در مورد پایه های منفرد با دقت بیشتری نسبت به گروه پایه ها ، انجام شده است. در اغلب موارد وقتی پایه ای یک پارچه به تعدادی پایه تقسیم می شود آب شستگی کاهش می یابد ولی این کاهش شدیداً به فاصله بین پایه ها وابسته است. اگر نسبت فاصله بین پایه ها به پهنای پایه از ۱:۴ به ۱:۸ افزایش یابد عمق آب شستگی عموماً افزایش می یابد. آزمایش ها نشان داده اند که اگر فاصله بین پایه ها کمتر از ۳ برابر قطر پایه ها باشد، آب شستگی نسبت به یک پایه منفرد افزایش می یابد. باتوجه به اینکه پایه های پل معمولاً روی گروهی شمع به عنوان پی کار گذاشته می شوند،

کلاhek شمع (Pile cap) دارای ابعاد بزرگتری از پایه خواهد بود. اگر تراز آب شستگی به کلاhek شمع برسد، الگوی جریان درچنین حالتی با الگوی جریان مکانیزم آب شستگی دراطراف یک پایه استوانه ای از دولحاظ متفاوت می باشد. نخست اینکه جریان پایین رونده در امتداد پایه در برخورد با کلاhek شمع به صورت افقی منحرف شده و مانع تشکیل گرداب نعل اسبی می گردد و دوم اینکه الگوی جریان به مراتب پیچیده تری بین گروه شمع ها بوجود می آید. مطالعات درمورد آب شستگی گروه شمع ها محدود بوده و می توان بطور محافظه کارانه گروه شمع ها را بصورت یک پایه واحد با ابعادی برابر حد بیرونی گروه شمع ها درنظر گرفت.

مطالعات انجام شده توسط Raudkivi & Breusers در مورد گروه دوتایی پایه های دوتایی با آرایش های مختلف، به جدول (۳-۸) منجر گردید.

جدول (۳-۷): ضریب تصحیح عمق آب شستگی برای پایه جلویی و عقبی در گروه دوتایی پایه پل.

وضعیت پایه ها نسبت به راستای جریان	فاصله بین پایه ها	K_{gr} پایه جلویی	K_{gr} پایه جلویی
○ ○	۱ b	۱/۰	۰/۹
	۲ تا ۳ b	۱/۱۵	۰/۹
	> ۱۵ b	۱/۰	۰/۸
○ ○	۱ b	۱/۹	۱/۹
	۵ b	۱/۱۵	۱/۲
	> ۸ b	۱/۰	۱/۰
○ ○	۱ b	۱/۹	۱/۹
	۲ تا ۳ b	۱/۲	۱/۲
	> ۸ b	۱/۰	۱/۰

۳-۷-۱- مطالعات Coleman(2005) در مورد گروه پایه پل:

Coleman(2005) در مطالعات خود نشان داده که با توسعه عمق آب شستگی و تغییر ارتفاع کلاhek شمع (معمولاً پی کیسونی) نسبت به تراز بستر، عرض پایه موثر که به جای عرض تمام پایه ها ، در روابط مربوط به تخمین عمق آب شستگی استفاده می شود، متفاوت خواهد بود. او در این مطالعات نشان داد وقتی که حفره آب شستگی به کلاhek شمع می رسد، عمق حفره با سرعت

بیشتری افزایش می یابد ولی وقتی کف گودال آب شستگی به شمع های زیر پی کیسونی می رسد، کاهش عمق آب شستگی به دلیل وجود کلاhek شمع که مانند یک طوقه عمل می کند نامشخص است. اگر Y تراز سطح بالایی Pile cap نسبت به بستر باشد، عرض پایه معادل بصورت $b_e = f(Y)$ خواهد بود برای ارتفاع های مختلف تراز Pile cap نسبت به سطح بستر برای b_e مقادیر زیر را خواهیم داشت:

$$b_e = b_c \quad Y \geq b_c \quad (20-3)$$

$$b_e = b_c \left(\frac{b_c}{b_{pc}} \right) \left\{ \left(\frac{b_c}{b_{pc}} \right)^3 + 0.1 \left[0.47 \left(0.75 - \frac{Y}{b_c} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad 0 > Y \geq Y_T \quad (21-3)$$

$$b_e = \left[\frac{0.52 T b_{pc} + (y_0 - 0.52 T) b_{pg}}{y_0} \right] \quad Y = -Y_0 \quad (22-3)$$

$$b_e = b_{pg} \quad Y \leq (-y_b - T) \quad (23-3)$$

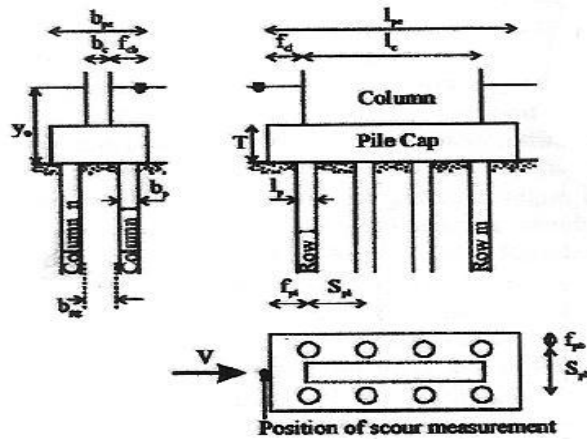
که در آن b_c عرضی پایه پل، b_{pc} عرض pile cap، b_{pg} عرض معادل داخل به داخل گروه شمع ها، T ضخامت Pile cap، y_0 عمق آب در بالادست در حال تقرب، Y_T تراز Y وقتی کلاhek شمع وارد عمل شده و شمع ها در معرض جریان باشد. باید متذکر شد که گستردگی کلاhek شمع به سمت بالا دست عمق آب شستگی را کاهش خواهد داد. Coleman(2005) با در نظر گرفتن اثر این پدیده یک

رابطه جهت تعیین عمق آب شستگی ارائه نمود.

$$\left\{ 1 - \left[\frac{d_s}{d_s \left(\frac{f_{cl}}{b_c} \right)} \right] \right\} = 0.083 \left(\frac{f_{cl}}{b_c} \right)^{2.76} \quad \frac{f_{cl}}{b_c} < 2.5 \quad (24-3)$$

$$d_s = 0 \quad \frac{f_{cl}}{b_c} \geq 2.5 \quad (25-3)$$

که در آن f_{cl} طول بیرون آمدگی pile cap از وجه بیرونی ستون می باشد. مطابق رابطه (۳-۲۵) در صورتی که طول بیرون زدگی زیاد باشد آب شستگی در بالادست سرشمع ایجاد نخواهد شد. البته روابط (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نیاز به مطالعه گسترده تری دارند.



شکل (۳-۶): پارامترهای هندسی مربوط به گروه پایه های پل در مطالعات (Coleman 2005).

در گروه پایه های هم امتداد بطور کلی دو فاکتور اساسی وجود دارد:

- ۱- عامل تقویت کننده: که باعث افزایش آب شستگی در پایه جلویی می گردد.
- ۲- عامل حفاظ بودن: وجود پایه بالادست باعث کاهش سرعت موثر جریان برای پایه پایین شده و در نتیجه منجر به کاهش آب شستگی در آن می شود. فاکتورهای فوق یعنی حفاظ و تقویت کننده با تغییر فاصله پایه و تعداد آن عکس العمل های متفاوتی را بر عمق آب شستگی می گذارند. به عنوان مثال در گروه پایه سه تایی پایه دوم تحت تاثیر پدیده حفاظ پایه اول و تقویت کننده پایه سوم می باشد. در این زمینه Hana (1978) نیز تحقیقاتی در مورد گروه دوتایی پایه های پل انجام داد. طبق نتایج حاصله زمانی که پایه ها دقیقا در کنار هم باشند $\frac{s}{b} = 1$ (s فاصله پایه ها و b قطر پایه)، عمق آب شستگی در پایه جلویی برابر با آب شستگی در تک پایه خواهد بود. اما با افزایش فاصله تاثیر عامل تقویت کننده در پایه اول افزایش یافته و در $\frac{s}{b} = 2.5$ به حداکثر خود رسیده و تا $\frac{s}{b} = 11$ وجود دارد. اگر $\frac{s}{b} > 11$ عمق آب شستگی در پایه جلویی برابر با مقدار آن در تک پایه خواهد بود. خلاصه

نتایج مطالعه آنها درمورد گروه پایه های دوتایی و سه تایی مثبت به تک پایه در جدول (۳-۸) نشان داده شده است.

جدول (۳-۸) : درصد کاهش یا افزایش عمق آب شستگی نهایی در گروه پایه ها نسبت به تک پایه.

گروه پایه سه تایی			گروه پایه دوتایی		فاصله
پایه عقبی	پایه وسطی	پایه جلوئی	پایه عقبی	پایه جلوئی	
-۸	-۴	۴	-۸	۲	$S=2b$
-۳/۵	-۲/۵	۲/۵	-۵	۱	$S=4b$

بطور کلی می توان گفت که عمق آب شستگی پایه جلوئی در گروه ۳ تایی بیش از گروه ۲ تایی است چون در گروه ۳ تایی پایه جلوئی تحت تاثیر فاکتور تقویت پایه وسطی و عقبی است. با افزایش فاصله از $s=2b$ به $s=4b$ تاثیر پدیده های حفاظ و تقویت بر پایه ی جلوئی کاهش می یابد و در مورد پایه دوم ، عمق آب شستگی در گروه ۳ تایی بیشتر از گروه ۲ تایی است و این به خاطر تاثیر بیشتر پدیده تقویت کننده پایه سوم نسبت به تاثیر پدیده حفاظ پایه اول در گروه ۳ تایی بر پایه دوم می باشد درحالیکه پایه دوم در گروه ۲ تایی صرفاً تحت تاثیر پدیده حفاظ پایه اول است.

۴-۱- مقدمه:

در فصول قبل در مورد مکانیزم آب شستگی و روابط مربوط به تعیین عمق آب شستگی در شرایط مختلف بحث گردید. آن چه برای ما پس از شناخت پدیده آب شستگی اهمیت می یابد، نحوه مقابله، کاهش و یا از بین بردن تبعات نامطلوب پدیده فوق است. دستیابی به هدف فوق نه تنها صرفه اقتصادی را به دنبال خواهد داشت، بلکه از نظر ایمنی نیز بسیار ارضاء کننده خواهد بود. تا کنون روش های متفاوتی جهت کاهش عمق آب شستگی پیشنهاد گردیده اند که البته هر کدام از آنها به رغم سودمند بودن دارای محدودیت هایی از نظر عملکرد هستند. البته شناخت دقیق عملکرد روش های فوق مطالعات بیشتری را طلب می کند. در این فصل سعی گردیده که روش های حفاظت پایه پل ها با جزئیات مربوط به آن ها ذکر گردد.

۴-۲- روش های حفاظت از پایه پل در برابر آب شستگی:

شاید یک راهکار محافظه کارانه قراردادن شالوده در چنان عمقی است که عمیق ترین گودال آب شستگی نیز به آن نرسیده و پایداری آن را به مخاطره نیندازد. البته مسلم خواهد بود که چنین روشی علی رغم اعتماد پذیری بالا، هزینه های اقتصادی سنگینی را تحمیل خواهد کرد. روش دیگر جلوگیری از رخ دادن گرداب های فرساینده می باشد. از این رو سعی می شود سازه آبی در آبراهه را طوری بسازند که نیروی وارده بر آن از طرف آب کاهش و آشفستگی جریان در اطراف پایه بصورت سازگار با خطوط جریان به کمک منحرف کننده ها و پره ها شده و تاثیر در جهت کاهش عمق آب شستگی داشته باشد. از این رو استفاده از حفاظ بستر در پایاب یا پیرامون سازه های آبی برای جلوگیری از آب شستگی متداولی است. در جدول (۴-۱) یک دیدگاه کلی در مورد روش های حفاظت بیان شده است.

جدول (۴-۱): راه کارهای کلی حفاظت از بستر.

کاهش بار	افزایش مقاومت
افزایش طول حفاظت بستر	متراکم سازی مصالح بستر
زیرترکردن حفاظ بستر	توزیع تحکیمی مصالح بستر
سازگار سازی با خطوط جریان	حفاظت از بستر و شیب بالادست آب شستگی
(پرده ها، طوقه ها، برگرداننده ها)	(کف پوش حفاظتی، کیسه شن و سنگ،
استفاده از سازه های پایانه	دال های بتونی مفصل دار، پوشش گیاهی
استفاده از آرام کننده های موج	مصنوعی، رادیه های انعطاف پذیر)

۴-۲-۱- استفاده از سنگریز حفاظتی:

اگر سرعت بیشینه بحرانی جریان معلوم باشد، اندازه سنگریزه را می توان با بهره گیری از معیار پایداری (Sheilds) محاسبه کرد. طبق نظریه جریان پتانسیل، تنش برش $\max(\tau_{\max})$ و سرعت بیشینه (u_{\max}) نزدیک پایه استوانه ای را می توان با روابط زیر محاسبه کرد:

$$\tau_{\max} = 4\tau \quad \tau \text{ دست نخورده} \quad (۴-۱)$$

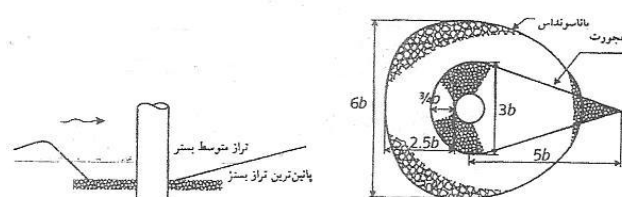
$$u_{\max} = 2u \quad u \text{ دست نخورده} \quad (۴-۲)$$

ضخامت لایه سنگریز حداقل باید به اندازه $2d_{50}$ باشد ولی ضخامت بیشتر توصیه می گردد. کیسه های سنگ در اطراف پایه نوعی حفاظت را تامین می کند که اتصالی انعطاف پذیر بین سنگریز و پایه می باشد. ماسه با شن تزریق شده برای تعمیر خسارات ایجاد شده در اثر آب شستگی بستر پی کیسونی هم مورد استفاده قرار گرفته است. طول حفاظت کف حداقل $2.5b$ (b عرض پایه پل) در بالا دست و پایین دست بوده و طول بحرانی فروریزی آن $L_s=4b$ می باشد. L_s وابسته به عمق بیشینه آب شستگی (y_m) نیز می باشد که با رابطه زیر بیان می گردد:

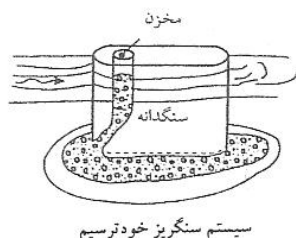
$$L_s = F_s y_m \cot \varphi \quad (۴-۳)$$

که در آن F_s ضریب اطمینان و φ زاویه ایستایی طبیعی مصالح بستر است. طول بحرانی گسیختگی در مورد اراضی ساحلی نیز توسط سیلویس مطالعه گردیده و روابطی را نیز پیشنهاد نموده

است. به هر حال طبق رابطه (۳-۴) با توجه به اینکه در خاک های غیر چسبنده $30^\circ < \varphi < 45^\circ$ می باشد با فرض $\varphi = 30^\circ$ و $F_s = 1.5$ مقدار محافظه کارانه ای برای L_s معادل $y_m \frac{2}{6}$ بدست می آید. بعضی از محققان از نوعی حفاظ سنگریز خود ترمیم شونده گزارش می دهند که از مخزن تغذیه کننده ای در پایه پل بهره می گیرد. بررسی مدل های فیزیکی نشان می دهد که این روش نتایج امیدوار کننده ای داشته است. سیستم سنگریز حفاظتی و سیستم خود ترمیم شونده در اشکال (۱-۴) و (۲-۴) نشان داده شده اند.



شکل (۱-۴): سیستم سنگریز حفاظتی.



شکل (۲-۴): سیستم خود ترمیم شونده.

۲-۲-۴- استفاده از تشک حفاظتی:

این روش برای حفاظت اطراف پایه پل های گرد و بزرگ واقع در ماسه نرم، ارائه شده است. این نوع حفاظ از تعداد زیادی بسته بندی های الیاف پلی استری تشکیل می شود که در زیر یک چارچوب آویخته از پایه پل به حالت معلق نگه داشته می شود. باید توجه شود بین پایه پل و تشک، اتصال

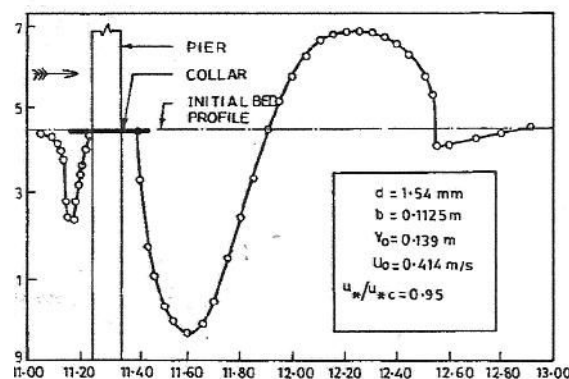
کاملی برقرار گردد زیرا حتی یک شکاف کوچک جریان روبه پایین می تواند موجب فرسایش شدید در زیر حفاظ شود این راهکار خیلی معمول نمی باشد.

۴-۲-۳- استفاده از طوقه دور پایه پل:

مطالعات Kummar et al. (1999) جهت بررسی اثر طوقه دور پایه پل استوانه ای در آب زلال و با رسوبات با اندازه های یکسان محدود شده است. به طور کلی بیشترین عمق آب شستگی در وجه بالا دست پایه پل برای کلاهک هایی با اندازه های کوچک تر که در ارتفاع بالاتری قرار گرفته اند ایجاد شده و هر اندازه سائز کلاهک بزرگتر شده و در ارتفاع پایین تر قرار گرفته باشد عمق آب شستگی نیز کاهش می یابد.

شکل (۳-۴) نتیجه تاثیر کلاهک با قطر $2/5b$ در تراز بستر را نمایش می دهد. این شکل نشان می دهد که عمق آب شستگی در جلوی پایه پل کمتر از کناره ها و پشت پایه پل است. آنها همچنین در آزمایش بر روی کلاهک با قطر $4b$ که بر روی تراز بستر واقع شده است مشاهده کردند که هیچ گونه آب شستگی در جلوی پایه پل و کناره ها ایجاد نشده ولی عمق آب شستگی بسیار زیادی در پشت پایه پل ایجاد شده است.

آن ها همچنین در روند بررسی خود رابطه ای جهت پیش بینی عمق آب شستگی در حضور کلاهک پیشنهاد نمودند. معادله (۴-۵) یک اساس جهت مطالعه تاثیرات اندازه کلاهک و ارتفاع آن بر روی عمق آب شستگی می دهد. در این رابطه d_{sp} عمق آب شستگی متعادل در پایه پل بدون متعلقات، d_{sc} عمق آب شستگی متعادل در پایه پل دارای طوقه، B قطر طوقه، H عمق طوقه از سطح آب آزاد، Y_0 عمق جریان، b قطر پایه پل بدون متعلقات می باشد.



شکل (۴-۳): عمق آب شستگی برای کلاهک با قطر $2.5b$ در تراز بستر.

$$\frac{d_{sc}}{d_{sp}} = f_3 \left(\frac{B}{b}, \frac{H}{Y_0} \right) \quad (4-4)$$

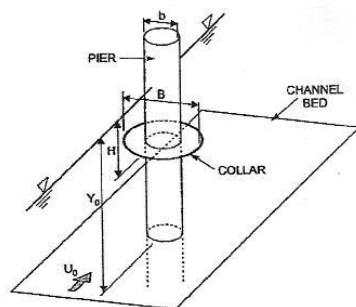
$$\frac{d_{sp} - d_{sc}}{d_{sp}} = f_4 \left(\frac{B}{b}, \frac{H}{Y_0} \right) \quad (5-4)$$

این رابطه پارامترهای اضافی مانند نسبت ضخامت کلاهک به عمق جریان را می دهد ولی در این مطالعات از ضخامت کلاهک چشم پوشی شده است. آنالیز اطلاعات گردآوری شده از مطالعات اخیر و نیز مطالعاتی که توسط دیگران انجام شده اند نهایتاً به رابطه زیر منجر می گردد.

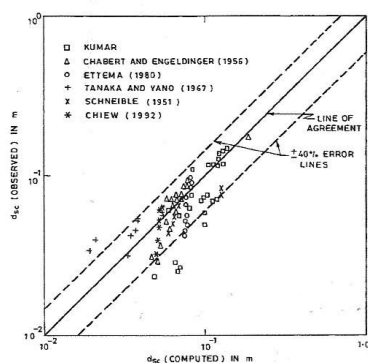
$$\frac{d_{sp} - d_{sc}}{d_{sp}} = 0.057 \left(\frac{B}{b} \right)^{1.612} \left(\frac{H}{Y_0} \right)^{0.837} \quad (6-4)$$

این رابطه به خوبی نشان می دهد در حالت پایه بدون کلاهک که $(H=0, B=b)$ $d_{sp}=d_{sc}$. مقادیر d_{sc} اندازه گیری شده با d_{sc} محاسبه شده در نمودار شکل (۵-۴) نشان داده شده است. این نمودار خطای $\pm 40\%$ برای عمق های آب شستگی محاسبه شده از رابطه (۶-۴) را به وضوح نشان می دهد و این خود نشان دهنده آن است که پارامترهای دیگری نیز در این پدیده نقش دارند از این رو جهت افزایش دقت رابطه (۶-۴) باید مطالعات بیشتری انجام گردد. به هر حال رابطه (۶-۴) به گونه ای کاهش عمق آب شستگی را در اثر استفاده از طوقه نشان می دهد. باید توجه داشت که رابطه (۴-۶) به ازای $H \leq Y_0 + d_{sp}$ قابل استفاده است و برای محاسبه d_{sp} می توان از یکی از روش های متداول

که در فصل قبل به آن ها اشاره شد استفاده کرد. به هر حال می توان گفت هر اندازه قطر کلاهک بزرگتر بوده و نزدیک سطح بستر باشد موثرتر خواهد بود.



شکل (۴-۴): نمایش سیستم طوقه دور پایه پل جهت کاهش عمق آب شستگی.



شکل (۵-۴): d_{sc} محاسبه شده از رابطه (۴-۶) و مقایسه آن با d_{sc} واقعی اندازه گیری شده.

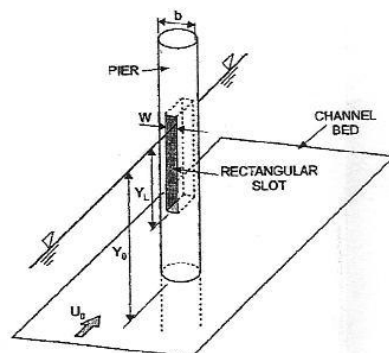
۴-۲-۴- استفاده از شکاف در پایه پل:

در اینجا باید تاثیر شکاف در پایه پل با طول های متفاوت و زوایای مختلف در برابر آب بررسی گردد. این مطالعات اولین بار توسط Thomas (1967)، Tanaka & Yano (1967) و Ettema (1980) صورت گرفت. پس از بررسی تاثیر شکاف با طول های متفاوت و زوایای مختلف نسبت به جهت جریان باید یک رابطه جهت پیشگویی میزان کاهش عمق آب شستگی با استفاده از شکاف ها با قطرهای متفاوت و زوایای مختلف نسبت به جهت جریان و با ارتفاعات مختلف بر روی بستر یا بالای بستر،

توسعه یابد. آزمایشات Kummar et al.(1999) در فلومی با طول ۳۰m، عرض ۱m، عمق ۰/۶m و شیب طولی 7.73×10^{-4} انجام گرفت.

در این آزمایشات از یک شکاف به عرض w که $w=0.25b$ و b قطر پایه پل است استفاده گردیده است. پایه های استفاده شده در این آزمایش دارای اقطار ۱۱۲/۵mm و ۶۱mm بودند که در آن ها از دو شکاف با طول $Y_L=Y_0$ و $Y_L=Y_0+d_{sp}$ استفاده گردید. در این روابط Y_0 عمق و جریان آب یکنواخت، d_{sp} عمق آب شستگی بدون وجود متعلقات و Y_L طول شکاف دور پایه پل می باشد. برای اندازه گیری عمق آب شستگی از یک وسیله الکترونیکی تعیین پروفیل سطح بستر که دقت آن تا حدود mm ۰/۲ بود به استفاده گردید. رنج تغییرات $\frac{u^*}{u_{*c}^*}$ از ۰/۷۵ تا ۰/۹۸ در آزمایش آن ها متغیر بوده و u^* و u_{*c}^* به ترتیب سرعت برش در جریان و سرعت برش بحرانی در جریان می باشند. تصویر شکل (۴-۶) نمایی از هندسه پایه پل و شکاف موجود در آن را نشان می دهد. همان طور که در فصل قبل گفته شد آب شستگی در اطراف پایه پل در اثر جریان پایین رونده در وجه بالا دست پایه پل و جریان ها گردابی نعل اسبی در پایه پل می باشد. بنابراین می توان با استفاده از شکاف در پایه پل از شکل گیری جریان پایین رونده و گردابی نعل اسبی جلوگیری نمود. اگر d_{ss} را عمق آب شستگی در پایه پل با یک شکاف و d_{sp} در حالت پایه پل بدون شکاف باشد می توان رابطه زیر را نوشت:

$$\frac{d_{sc}}{d_{sp}} = f_1\left(\frac{w}{b}, \frac{Y_L}{b}, \theta\right) \quad (۴-۷)$$

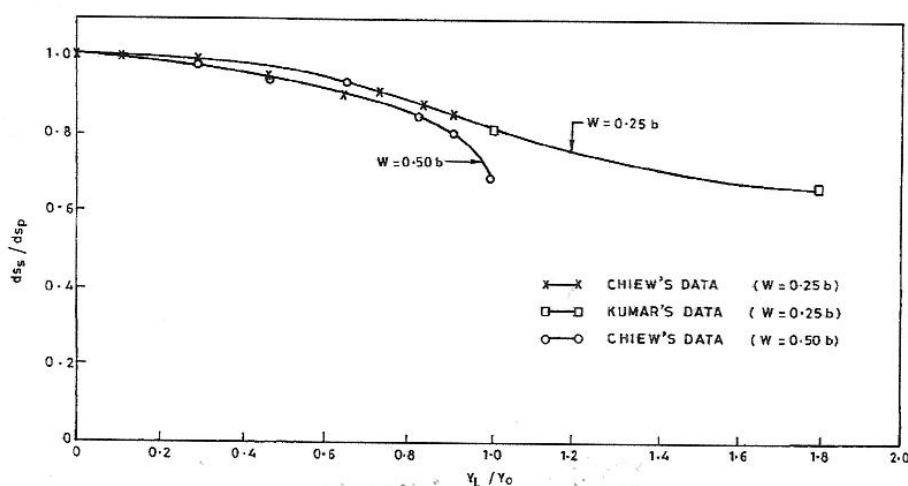


شکل (۴-۶): نمایش پایه پل با شکاف موجود در آن که در آزمایش استفاده شده است.

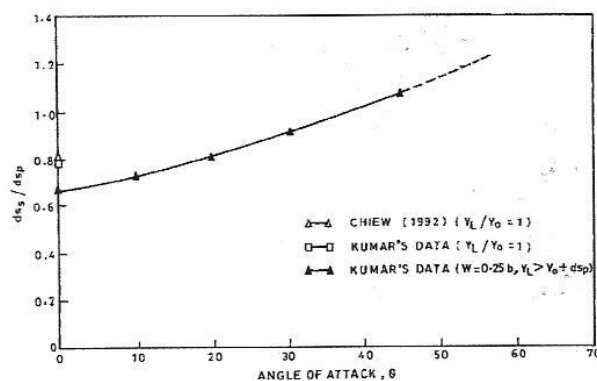
که در آن θ زاویه تقریب جریان با محور شکاف، w عرضی شکاف و Y_L نیز طول شکاف می باشد.

در این رابطه تاثیرات جریان و پارامترهای مرتبط با رسوب در d_{sp} مستتر است. (Chiew 1992)

تغییرات $\frac{d_{ss}}{d_{sp}}$ با $\frac{Y_L}{b}$ را برای یک مقدار $\frac{Y_0}{b}$ اندازه گیری کرد. به هر حال Vittal et al. (1994) در مطالعات خود متوجه شد که $\frac{d_{ss}}{d_{sp}}$ در برابر $\frac{Y_L}{Y_0}$ منحصر به فرد و برای $\frac{Y_0}{b}$ متفاوت است. Chiew (1992) آزمایشات خود را به ازای $\frac{w}{b} = 0.25$ و $\frac{w}{b} = 0.5$ انجام داد و تغییرات $\frac{d_{ss}}{d_{sp}}$ را در برابر $\frac{Y_L}{Y_0}$ رسم نمود. نتایج مطالعات (Chiew 1992) و محققان هندی در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. از روی این شکل می توان مشاهده نمود که با افزایش طول شکاف عمق آب شستگی موضعی کاهش می یابد. جهت بررسی تاثیر زاویه برخورد جریان با شکاف، مطالعات محققان هندی در شکاف با $\frac{w}{b} = 0.25$ و θ با زاویه ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۵ انجام گرفت که نشان می داد با افزایش زاویه برخورد، عمق آب شستگی افزایش می یابد. این نتایج در شکل (۴-۸) نشان داده شده است.



شکل (۴-۷): تاثیر طول شکاف بر عمق آب شستگی.

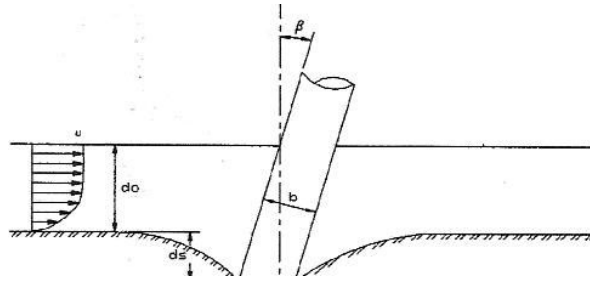


شکل (۴-۸): تاثیر زاویه برخورد جریان با شکاف بر عمق آب شستگی.

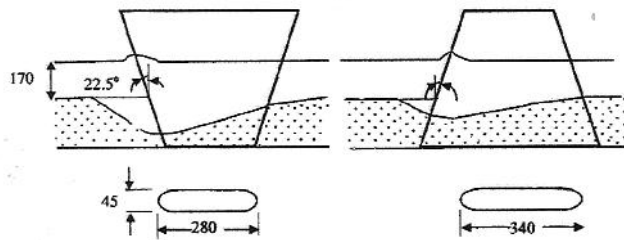
این آزمایشات به خوبی نشان داد که کاهش عمق آب شستگی به دلیل افزایش طول شکاف با زاویه برخورد جریان ۲۰ درجه کاملاً خنثی می‌گردد و گسترش طول شکاف در صورتی که زاویه برخورد جریان به ۴۵ درجه برسد بی‌تاثیر خواهد بود و در این حالت می‌توان عمق آب شستگی را با حالت بدون وجود شکاف مقایسه نمود. بنابراین واضح است که هر چند گسترش طول شکاف در کاهش عمق آب شستگی موثر است ولی انحراف جریان نسبت به شکاف می‌تواند آن را بی‌تاثیر سازد. در این حالت نیاز به مطالعات و اطلاعات بیشتری جهت توسعه یک رابطه طراحی وجود دارد.

۴-۲-۵- تاثیر انحراف پایه های پل از حالت قائم در کاهش عمق آب شستگی:

در این مورد اخیراً Bozkus & Yildiz (2004) مطالعاتی انجام دادند، هدف از این مطالعه بررسی تاثیر انحراف پایه پل به پایین دست با زاویه β بر عمق آب شستگی است. این حالت در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. این مطالعه صرفاً تاثیر انحراف یک پایه منفرد از حالت قائم را بررسی می‌کند ولی جهت مقاصد عملی باید انحراف پایه های پل بصورت گروهی در آینده مطالعه گردد. مطالعات Breusers & Raudkivi (1991) نشان داد که با افزایش تدریجی عرضی پایه پل به سمت بالا عمق آب شستگی افزایش و با کاهش آن عمق آب شستگی نیز کاهش خواهد یافت شکل (۴-۱۰).



شکل (۹-۴): شکل کلی پایه پل مطالعه شده در تحقیقات Bozkus & Yildiz(2004).



شکل (۱۰-۴): تاثیر افزایش و یا کاهش تدریجی عرض پایه پل بر عمق آب شستگی.

در صورتی که انحراف از حالت قائم پایه پل به سمت پائین دست در حالی که خود پایه پل نیز به تدریج به سمت بالا باریک می شود، سبب شود که عمق آب شستگی کاهش یابد صرفه جویی قابل توجهی در هزینه و زمان بوجود می آید. Bozkus & Yildiz(2004) برای این منظور بر اساس تئوری π باکینگهام معادله زیر را بدست آوردند:

$$\frac{d_s}{b} = f\left(\frac{d_0}{b}, F, \beta\right) \quad (۸-۴)$$

که در آن d_s عمق آب شستگی موضعی در اطراف پایه پل، d_0 عمق آب در حالت تقرب به پایه پل، b قطر پایه، β زاویه انحراف پایه پل از حالت قائم، F عدد فروود جریان که برابر با $\frac{u_0}{\sqrt{gd_0}}$ و u_0 سرعت متوسط تقرب جریان و g شتاب ثقل زمین است. آن ها در مطالعات خود فرضیاتی به شرح زیر داشتند:

۱- چون تک پایه مورد مطالعه بوده از اثر زاویه حمله جریان و نسبت طول به قطر پایه، K_g فاکتور تاثیر گروه پایه پل، K_s فاکتور تاثیر شکل پایه پل و K_f فاکتور تاثیر اصطکاک سطحی پایه پل صرف نظر شده است.

۲- چگالی آب و رسوب در تمام شرایط ثابت است.

۳- به دلیل یکنواخت بودن مصالح بستر d_{50} اندازه متوسط مصالح بستر، σ_g انحراف معیار اندازه قطر ذرات ثابت بوده و تاثیر عدد رینولدز $\frac{ud_{50}}{\nu}$ که در آن u سرعت متوسط تقرب جریان و ν ویسکوزیته سینماتیکی آب است صرف نظر گردیده است.

۴- به علت شیب ثابت بستر s_0 هیچ احتیاجی به مطالعه تاثیر u^*/u که در آن u^* سرعت متوسط برشی است نمی باشد.

۵- چون مصالح بستر غیر چسبنده انتخاب شده اند $C=0$.

۶- کانال عریض و مستقیم بوده بنابراین از k_a ضریب تاثیر فلوم، k_c ضریب تاثیر اصطکاک دیواره های فلوم، s_0 شیب طولی بستر و B عرض کانال چشم پوشی شده است. آن ها آزمایش خود را در فلومی به طول ۱۱ متر و عرض ۲ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دپارتمان تحقیقات صنعتی و کیفی آنکارا به انجام رساندند. قطر پایه های پل مدل استفاده شده در تحقیقات آن ها ۵۰ میلی متر و ۱۰۰ میلی متر بوده و نسبت عمق تقرب آب به عمق اولیه نیز بیش از ۲/۵ در نظر گرفته شد. $d_{50}=0.5\text{mm}$ و $d_{90}=1.00\text{mm}$ و وزن مخصوص مصالح نیز $\gamma_s = 26.5\text{KN/m}^3$ در آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. ضخامت بستر نیز ۲۰ سانتی متر در کف کانال بتنی و در قسمت آب شستگی این ضخامت به ۵۰ سانتی متر می رسید. زوایای انحراف از حالت قائم استفاده شده ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه بوده و زمان لازم برای رسیدن به عمق آب شستگی متعادل در مدل به ۲ ساعت محدود گردیده بود. هر چند که عمق آب شستگی نهایی در حالت مدل در ۲ ساعت حاصل نمی شود و مطالعات (Raud kivi 1986) حداقل ۵۰ ساعت زمان را برای رسیدن به این منظور معین می دارد ولی انجام آزمایش در این شرایط

بسیار زمان بر و غیر اقتصادی خواهد بود. خصوصاً اینکه بعد از ۲ ساعت نرخ افزایش عمق آب شستگی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

Melville & Chiew(1999) در آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که در ۱۰٪ زمان آب شستگی نهایی بین ۵۰٪ تا ۸۰٪ عمق آب شستگی متعادل حاصل می گردد که خود به سرعت تقرب جریان بستگی دارد. شکل (۴-۱۱) تغییرات عمق آب شستگی با زمان برای توجیه زمان ۲ ساعت را نشان می دهد. در تمام آزمایشات Bozkus & Yildiz(2004) نسبت V/V_c که در آن V_c سرعت بحرانی تقرب و V سرعت متوسط تقرب است بین $1/21$ تا $1/86$ تغییر می کرد. V_c نیز طبق پیشنهاد Melville(1997) از رابطه $\frac{V_c}{u_c^*} = 5.75 \log\left(\frac{5.53d_o}{d_{50}}\right)$ بدست می آید. u_c^* سرعت متوسط برش بحرانی است که از دیاگرام Shields بدست می آید.

۴-۲-۵-۱- توسعه معادلات تجربی جهت پیش بینی کاهش عمق آب شستگی

در اثر انحراف پایه پل از حالت قائم:

همان طور که در فصول قبل به آن اشاره شد جریان های گردابی نعل اسبی و پایین رونده سبب ایجاد آب شستگی در پایه پل می گردند. انحراف پایه پل از حالت قائم جریان های گردابی نعل اسبی (Horseshoe vortex) و پایین رونده را تضعیف می کنند. بر پایه معادله (۴-۸) و آنالیز رگرسیون معادلات زیر جهت پیش بینی عمق آب شستگی حاصل می گردند.

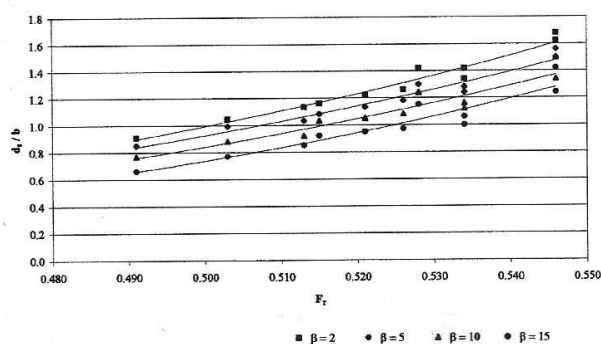
$$\frac{d_s}{b} = 14.182 \left(\frac{d_0}{b} \right)^{0.154} F^{3.745}, \quad \beta = 2^0 \quad (۹-۴)$$

$$\frac{d_s}{b} = 3.769 \left(\frac{d_0}{b} \right)^{0.223} F^{1.838}, \quad \beta = 5^0 \quad (۱۰-۴)$$

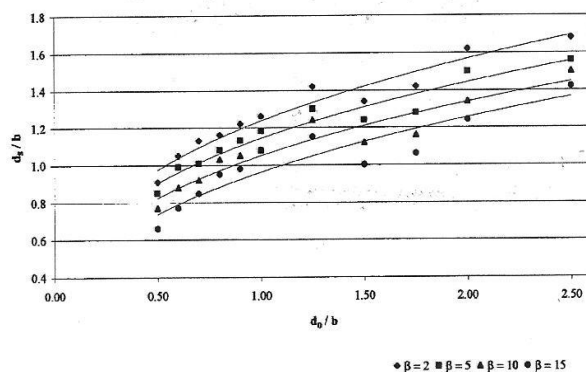
$$\frac{d_s}{b} = 5.743 \left(\frac{d_0}{b} \right)^{0.189} F^{2.62}, \quad \beta = 10^0 \quad (۱۱-۴)$$

$$\frac{d_s}{b} = 7.544 \left(\frac{d_0}{b} \right)^{0.163} F^{3.212}, \quad \beta = 15^0 \quad (12-4)$$

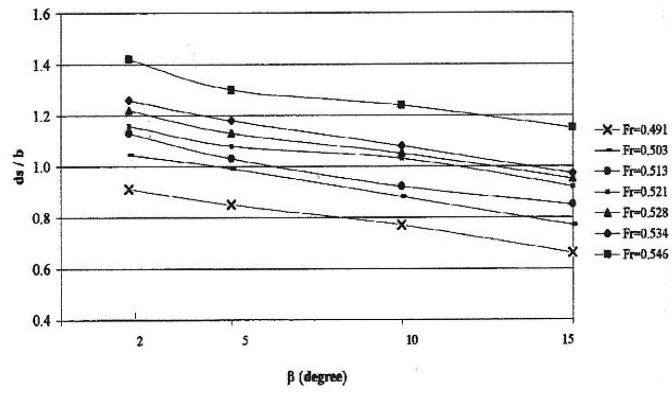
این روابط برای پیش بینی بیشترین عمق آب شستگی در حالت انحراف پایه پل از حالت قائم در محدوده $0.49 < F_r < 0.55$ قابل استفاده هستند. اشکال (۱۱-۴) و (۱۲-۴) و (۱۳-۴) تاثیر افزایش زاویه انحراف بر کاهش عمق آب شستگی را به طرق مختلف نشان می دهند. به هر حال باید توجه داشت که انحراف پایه پل از حالت قائم از نظر طراحی مهندسی پلی دارای محدودیت هایی می باشد. اشکال (۱۱-۴) و (۱۲-۴) و (۱۳-۴) به ترتیب تاثیر عدد فرود بر مقدار عمق آب شستگی در زوایای انحراف مختلف، تاثیر عمق تقریب آب بر عمق آب شستگی در زوایای انحراف مختلف و تاثیر زاویه انحراف بر عمق آب شستگی در جریان با اعداد فرود متفاوت را نشان می دهند.



شکل (۱۱-۴): تاثیر عدد فرود بر مقدار عمق آب شستگی در زوایای انحراف مختلف.



شکل (۱۲-۴): تاثیر عمق تقریب آب بر مقدار عمق آب شستگی در زوایای انحراف مختلف.



شکل (۴-۱۳): تاثیر زاویه انحراف بر عمق آب شستگی در جریان با اعداد فرود متفاوت.

۵-۱- مقدمه:

در این سمینار پس از تعاریف کلی در مورد پدیده آب شستگی به بررسی چند رابطه کاربردی برای تعیین عمق آب شستگی و پارامترهای موثر بر آنها پرداخته شده است. در فصل چهارم نیز راهکارهایی جهت کاهش تبعات منفی این پدیده پیشنهاد گردیده اند که همه آنها به نوعی در کاهش عمق آب شستگی موثرند ولی دارای ضعف هایی می باشند و برخی از آنها نیز مطالعات بیشتری را طلب می کنند. در این فصل نیز چند نتیجه و پیشنهاد جهت ادامه کار مطرح شده است.

۵-۲- تاثیر پارامترهای مختلف بر پدیده آب شستگی:

۵-۲-۱- اندازه متوسط رسوبات بستر:

در مورد پایه های پل لاغر که در آنها $\langle 1 \frac{b}{h_o} \rangle$ (نسبت عرض پایه پل به عمق جریان بالادست کمتر از ۱ است)، هر اندازه خاکدانه های مصالح بستر بزرگتر باشند عمق آب شستگی را کاهش می دهند. در مورد پایه های پل لاغر با افزایش عرض پایه عمق آب شستگی افزایش می یابد ولی تأثیر عمق جریان حاشیه ای خواهد بود.

۵-۲-۲- شکل پایه پل:

مطالعات انجام شده نشان داده است هر اندازه شکل پایه پل آیرودینامیک تر باشد عمق آب شستگی کمتر خواهد بود.

۵-۲-۳- زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل:

هر اندازه زاویه برخورد جریان به پایه پل بیشتر باشد عمق آب شستگی افزایش می یابد. حتی اگر از شکاف در پایه پل به جهت کاهش آب شستگی استفاده شود ولی زاویه برخورد جریان نسبت به پایه پل می تواند اثر آن را تعدیل کند.

۵-۲-۴- طرز قرار گرفتن گروه پایه های پل:

هر چند مطالعاتی در این زمینه انجام شده است ولی برای پیشنهاد یک رابطه کلی جهت گروه پایه های پل باید مطالعات بیشتری انجام گیرد. عمق آب شستگی در این حالت برای گروه پایه های پل به شدت به نوع آرایش و همچنین فاصله بین پایه های پل بستگی دارد.

۵-۲-۵- پیشنهادات جهت ادامه تحقیق:

۱- تعیین عمق آب شستگی در خاک های چسبنده. به رغم انجام پاره ای مطالعات، لیکن محدود بوده و مطالعات بیشتری مورد نیاز است چون در عمل بسیاری از پایه های پل در خاک های چسبنده قرار می گیرند در حالیکه تقریباً تمامی مطالعات تجربی و مدل های آزمایشگاهی برای خاک های غیر چسبنده بوده است.

۲- تعیین عمق آب شستگی به صورت تابعی از زمان. در این زمینه نیز به رغم انجام پاره ای مطالعات نیاز به تحقیقات گسترده تری می باشد. اهمیت اقتصادی این قضیه در تعیین ماکزیمم عمق آب شستگی در زمان وقوع سیلاب می باشد.

۳- مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی در مورد گروه پایه های پل که معمولاً برروی پی کیسونی به صورت کلاhek شمعها قرار می گیرند.

۴- مطالعات بیشتر به منظور بررسی عملکرد انواع سنگ چینی دور پایه های پل در کاهش عمق آب شستگی و سایر روش ها جهت تعدیل عمق آب شستگی پایه های پل نظیر استفاده از کلاhek دور پایه یا شکاف در پیشانی پایه پل.

۵- استفاده از روش های پیشرفته جدید جهت اندازه گیری دقیق عمق آب شستگی در پایه پل ها.

منابع و ماخذ:

فهرست منابع فارسی:

- ۱- شفاعی بجستان، محمود، هیدرولیک رسوب. ۱۳۸۴، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ سوم.
- ۲- زرّاتی، امیررضا، نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل. ۱۳۸۱، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم.
- ۳- بیات حبیب الله، اندرکنش سازه های آبی و فرسایش. ۱۳۷۹، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- ۴- حیدرپور، م. و کیخایی، م، بررسی روند تغییرات عمق آبستگي در گروه پایه ها. ۱۳۸۵، مجموعه مقالات هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.

فهرست منابع لاتین:

- 5- Coleman, S.E. (2005). "Clear water local scour at complex piers." J. Hydr. Engrg., ASCE, 131(4), 330-334.
- 6- Yanmaz, A.M. (2006). "Temporal variation of clear water scour at cylindrical bridge piers." Can. J. Eng, 33, 1908-1102.
- 7- Kummar, V., Ranga Raju, K.G., and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars." J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(12),1302-1305.
- 8- Bozkus, Z., and Yildiz, O. (2004). "Effects of inclination of bridge piers on scouring depth." J. Hydr. Engrg., ASCE, 130(8), 827-832.

Investigation of scouring around bridges' piers vicinity

Abstract

As we know scouring is one of the most prominent issues according to hydraulic and off-shore structures. Having no correct prediction of scouring depth or suitable solution to prevent scouring causes these types of structures to harm or to collapse. This happening results many undesirable social and economical consequences, therefore we should try to prevent this process. On the other hand bridges have important role in national transportation system, so much attention must be paid to protect them against scouring around piers vicinity. Approximately all of the researches relate to this event were done in labs without real environmental condition modeling. For example almost all of the investigations were experienced with cohesionless soils and as we know many bridges' piers are based in cohesive soils. Models have natural restrictions too and because of these negative points of experimental models, formulas that are derived from those models must be checked in real conditions. Scouring around bridges' piers vicinity threatens the stability of bridge's structure directly and it emphasizes on more consideration to this issue. Many researches were performed by focusing to this matter but because of very different parameters that affect this event, we have some unsolved problems according to this topic especially for off-shore structures considering to complex nature of waves. In this research after an overall introduction, some methods have been offered to predict scouring depth in the vicinity of bridges' piers that they were resulted from other researchers' investigations and were checked successfully in real conditions and have been used practically. Then different methods have been mentioned to reduce scouring depth and finally some suggestions in order to continue the researches are proposed.

