



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

بررسی تأثیر لایه سپری در آب‌شستگی تکیه‌گاه‌ها

پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی

مهرنوش ماهرانی

اساتید راهنما

دکتر حسین افضل‌مهر

دکتر عبدالرضا کیبیری



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی خانم مهرنوش ماهرانی  
تحت عنوان

### بررسی تأثیر لایه سپری در آب شستگی تکیه گاه‌ها

در تاریخ ۸۷/۱۲/۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر حسین افضلی مهر

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر عبدالرضا کبیری

۳- استاد مشاور پایان نامه دکتر منوچهر حیدریپور

۴- استاد داور دکتر فرهاد موسوی

۵- استاد داور دکتر علی اسحق بیگی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر فرشید نوربخش

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوریها ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب.....	شش
فهرست شکل‌ها.....	هشت
فهرست جداول.....	یازده
چکیده.....	۱

### فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- انواع آب‌شستگی.....	۳
۳-۱- انواع مختلف آب‌شستگی موضعی در پایه‌های پل.....	۳
۱-۳-۱- آب‌شستگی آب زلال.....	۳
۲-۳-۱- آب‌شستگی بستر زنده.....	۴
۴-۱- الگوی جریان و مکانیزم آب‌شستگی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای.....	۴
۱-۴-۱- جریان رو به پایین در جلوی پایه.....	۵
۲-۴-۱- گرداب نعل اسبی.....	۵
۳-۴-۱- گرداب برخاستگی.....	۶
۵-۱- آنالیز پارامترهای آب‌شستگی.....	۷
۶-۱- روش‌های مختلف کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی.....	۷
۱-۶-۱- بالا بردن مقاومت مواد تشکیل دهنده بستر.....	۷
۲-۶-۱- کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی.....	۸
۳-۶-۱- افزایش مقاومت مواد بستر هم‌زمان با استفاده از عوامل کاهش دهنده فرسایش موضعی.....	۱۱

### فصل دوم: بررسی منابع

۱-۲- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- تعیین شرایط آستانه حرکت ذرات رسوب بستر در بالادست پایه.....	۱۲
۳-۲- مطالعات مربوط به بررسی پدیده آب‌شستگی.....	۱۸
۴-۲- مطالعات انجام شده در مورد مکانیزم آب‌شستگی موضعی.....	۲۲
۵-۲- مطالعات انجام شده در مورد مکانیزم آب‌شستگی تکیه‌گاه‌ها.....	۳۳
۶-۲- روش‌های کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی.....	۳۷
۱-۶-۲- استفاده از سنگ‌چین.....	۳۷
۲-۶-۲- استفاده از طوق.....	۳۷
۳-۶-۲- استفاده از شکاف پایه.....	۴۲
۴-۶-۲- استفاده هم‌زمان از طوق و شکاف.....	۴۴
۵-۶-۲- استفاده از لایه سپری.....	۴۵

۷-۲- معرفی اهداف تحقیق..... ۴۷

### فصل سوم: مواد و روش‌ها

۱-۳- کانال آزمایشگاهی..... ۴۸

۲-۳- انتخاب پارامترهای آزمایش..... ۵۲

۱-۲-۳- مدل و اندازه پایه‌های تکیه‌گاه..... ۵۲

۲-۲-۳- اندازه ذرات، توزیع دانه‌بندی و شکل دانه‌ها..... ۵۳

۳-۲-۳- ضخامت مصالح بستر..... ۵۴

۴-۲-۳- عمق جریان..... ۵۵

۵-۲-۳- سرعت جریان..... ۵۵

۳-۳- لوازم اندازه‌گیری..... ۵۶

۴-۳- آماده‌سازی کانال و مدل‌های آزمایشگاهی..... ۵۷

۵-۳- آنالیز ابعادی و پارامترهای مؤثر..... ۵۹

### فصل چهارم: نتایج و بحث

۱-۴- مقدمه..... ۶۲

۲-۴- صحت سنجی نتایج آب‌شستگی بدون لایه سپر..... ۶۲

۳-۴- پدیده آب‌شستگی بدون حضور لایه سپری..... ۶۲

۴-۴- صحت سنجی مطالعات آب‌شستگی با لایه سپر..... ۶۶

۵-۴- پدیده آب‌شستگی در حضور لایه سپری..... ۶۷

۱-۵-۴- تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق آب‌شستگی..... ۷۲

۲-۵-۴- رابطه تعیین عمق آب‌شستگی ( $d_{sa}$ )..... ۹۰

۳-۵-۴- تحلیل آماری نتایج SPSS..... ۹۷

### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۵- خلاصه نتایج..... ۱۰۰

۲-۵- پیشنهادها..... ۱۰۲

منابع..... ۱۰۳

چکیده انگلیسی..... ۱۰۷

## فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۴.....	۱-۱- تغییرات عمق آب‌شستگی بر حسب سرعت برشی (سرعت جریان).....
۵.....	۲-۱- مکانیزم آب‌شستگی در پایه‌های استوانه‌ای.....
۶.....	۳-۱- محل تشکیل گرداب‌های برخاستگی.....
۱۰.....	۴-۱- استفاده از طوق جهت مقابله با آب‌شستگی.....
۱۰.....	۵-۱- استفاده از شکاف جهت مقابله با آب‌شستگی.....
۱۱.....	۶-۱- تأثیر شکل آئرو دینامیک پایه بر کنترل گرداب‌های برخاستگی.....
۱۷.....	۱-۲- دیاگرام شیلدز برای تعیین تنش برشی بحرانی (نقل از Vannoni, ۱۹۷۵).....
۱۸.....	۲-۲- دیاگرام شیلدز اصلاح شده توسط هندرسون.....
۱۹.....	۳-۲- دیاگرام شیلدز اصلاح شده نقل از (گاورز ۱۹۸۷).....
۲۲.....	۴-۲- تأثیر نسبت سرعت بحرانی بر روی توسعه زمانی حفره آب‌شستگی بدون وجود طوق.....
۲۹.....	۵-۲- ضریب $k_{\sigma}$ .....
۳۰.....	۶-۲- ضریب عمق جریان $k_{\gamma}$ .....
۳۰.....	۷-۲- ضریب اندازه ذرات $k_D$ .....
۳۱.....	۸-۲- ضریب زاویه برخورد آب به پایه $k_{\sigma}$ .....
۳۴.....	۹-۲- دیاگرام آب‌شستگی در تکیه‌گاه.....
۳۵.....	۱۰-۲- تغییرات عمق آب‌شستگی $d_s$ با نسبت سرعت برشی $u/u_{*c}$ .....
۳۶.....	۱۱-۲- تغییرات عمق آب‌شستگی $d_s$ با نسبت سرعت برشی $h$ .....
۳۷.....	۱۲-۲- تغییرات عمق آب‌شستگی $d_s$ با نسبت سرعت برشی $d_{50}$ .....
۳۸.....	۱۳-۲- اثر طوقه بر آب‌شستگی موضعی پایه استوانه‌ای.....
۳۹.....	۱۴-۲- نمایی از موقعیت طوقه روی پایه استوانه‌ای.....
۴۰.....	۱۵-۲- توسعه زمانی آب‌شستگی دور پایه کناری بدون طوق و با طوق در ارتفاعات مختلف $Z_c$ .....
۴۱.....	۱۶-۲- تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در گروه پایه دوتایی.....
۴۱.....	۱۷-۲- تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در گروه پایه سه‌تایی.....
۴۲.....	۱۸-۲- شکاف روی پایه: (الف) شکاف نزدیک بستر و (ب) شکاف نزدیک سطح آب.....
۴۳.....	۱۹-۲- اثر شکاف بر آب‌شستگی پایه استوانه‌ای.....
۴۴.....	۲۰-۲- گودال آب‌شستگی دور پایه با طوق ۲/۵ برابر پایه در تراز بستر، (الف) پروفیل طولی، (ب) پروفیل عرضی.....
۴۹.....	۱-۳- مقطع طولی کانال آزمایشگاهی.....
۵۰.....	۲-۳- شمایی از کانال آزمایشگاه مکانیک سیالات.....
۵۱.....	۳-۳- الف- پروفیل سرعت در فاصله ۱ متری از ابتدای کانال.....
۵۱.....	۳-۳- ب- پروفیل سرعت در فاصله ۲ متری از ابتدای کانال.....
۵۱.....	۳-۳- ج- پروفیل سرعت در فاصله ۳ متری از ابتدای کانال.....
۵۲.....	۴-۳- شکل تکیه‌گاه نیم دایره.....
۵۲.....	۵-۳- شکل تکیه‌گاه نیم بیضی.....
۵۳.....	۶-۳- شمایی از تکیه‌گاه نیم دایره و نیم بیضی در کانال.....

- ۷-۳- شکل ذرات استفاده شده در لایه سپر..... ۵۴
- ۸-۳- شمایی از دستگاه لیمنومتر (عمق سنج)..... ۵۷
- ۹-۳- نحوه آب بندی سکوی شیشه‌ای..... ۵۸
- ۱-۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج دی-باربویا و ملویل..... ۶۳
- ۲-۴- نمودار تغییرات  $d_s$  با  $d$ ، بدون حضور لایه سپری..... ۶۴
- ۳-۴- تغییرات  $d_s$  با  $U$ ، بدون حضور لایه سپری و در تکیه گاه..... ۶۵
- ۴-۴- نمودار تغییرات  $\hat{d}_s$  با  $Fr$ ، بدون حضور لایه سپری در تکیه گاه..... ۶۵
- ۵-۴- تغییرات  $d_s$  با  $d$ ، در حضور لایه سپری با  $d_a=4mm$ ..... ۶۷
- ۶-۴- مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج دی و باربویا..... ۶۷
- ۷-۴- شماتیک گودال آب شستگی در  $u/u_{*ca}=0.7$ ..... ۶۸
- ۸-۴- شماتیک گودال آب شستگی در  $u/u_{*ca}=0.8$ ..... ۶۸
- ۹-۴- شکل شماتیک گودال آب شستگی در  $u/u_{*ca}=0.9$ ..... ۶۹
- ۱۰-۴- پروفیل سطح آب شستگی در  $d=0.52mm$ ،  $d_a=2.36mm$  و  $u/u_{*ca}=0.7$ ..... ۷۰
- ۱۱-۴- پروفیل سطح آب شستگی در  $d=0.52mm$ ،  $d_a=4mm$  و  $u/u_{*ca}=0.8$ ..... ۷۰
- ۱۲-۴- پروفیل سطح آب شستگی در  $d=0.52mm$ ،  $d_a=2.36mm$  و  $u/u_{*ca}=0.9$ ..... ۷۱
- ۱۳-۴- تأثیر لایه سپری بر عمق آب شستگی..... ۷۱
- ۱۴-۴- تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی در  $d_a=1.15mm$ ..... ۷۲
- ۱۵-۴- نمودار تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی در  $d_a=2.36mm$ ..... ۷۳
- ۱۶-۴- تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی در  $d_a=4mm$ ..... ۷۳
- ۱۷-۴- تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی در  $d=0.26mm$ ..... ۷۴
- ۱۸-۴- تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی در  $d=0.52mm$ ..... ۷۵
- ۱۹-۴- تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی در  $d=0.84mm$ ..... ۷۵
- ۲۰-۴- نمودار تغییرات  $d_{sa}$  با  $t$  در  $d=0.26mm$ ..... ۸۰
- ۲۱-۴- الف- نمودار تغییرات  $d_{sa}$  با  $t$  در  $d=0.52mm$  و تکیه گاه نیم دایره..... ۸۰
- ۲۱-۴- ب- نمودار تغییرات  $d_{sa}$  با  $t$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۱
- ۲۲-۴- الف- نمودار تغییرات  $d_{sa}$  با  $t$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم دایره..... ۸۱
- ۲۲-۴- ب- نمودار تغییرات  $d_{sa}$  با  $t$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۱
- ۲۳-۴- الف- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{d}$  در  $d=0.26mm$ ..... ۸۴
- ۲۴-۴- الف- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{d}$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم دایره..... ۸۴
- ۲۴-۴- ب- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{d}$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۵
- ۲۵-۴- الف- نمودار تغییرات  $\hat{d}_a$  با  $\hat{d}$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم دایره..... ۸۵
- ۲۵-۴- ب- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{d}$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۶
- ۲۶-۴- نمودار تغییرات  $\delta$  با  $d_a$  در  $d=0.26mm$ ..... ۸۷
- ۲۷-۴- الف- نمودار تغییرات  $\delta$  با  $d_a$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم دایره..... ۸۷
- ۲۷-۴- ب- تغییرات  $\delta$  با  $d_a$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۸
- ۲۸-۴- الف- نمودار تغییرات  $\delta$  با  $d_a$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۸

- ۲۸-۴-ب- نمودار تغییرات  $\delta$  با  $d_a$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۸۹
- ۲۹-۴- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $Fr$  در  $d_a=1.15mm$ ..... ۹۱
- ۳۰-۴- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $Fr$  در  $d_a=2.36mm$ ..... ۹۲
- ۳۱-۴- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $Fr$  در تکیه گاه  $d_a=4mm$ ..... ۹۳
- ۳۲-۴- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{t}$  در  $d=0.26mm$ ..... ۹۳
- ۳۳-۴- الف- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{t}$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم دایره..... ۹۴
- ۳۳-۴- ب- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{t}$  در  $d=0.52mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۹۴
- ۳۴-۴- الف- نمودار تغییرات  $\hat{d}_a$  با  $\hat{t}$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم دایره..... ۹۵
- ۳۴-۴- ب- نمودار تغییرات  $\hat{d}_{sa}$  با  $\hat{t}$  در  $d=0.84mm$  تکیه گاه نیم بیضی..... ۹۵
- ۳۵-۴- الف- مقایسه مقادیر محاسباتی و اندازه گیری عمق آب ششستگی در تکیه گاه نیم دایره..... ۹۷
- ۳۵-۴- ب- مقایسه مقادیر محاسباتی و اندازه گیری عمق آب ششستگی در تکیه گاه نیم بیضی..... ۹۸



## فهرست جداول

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۶	۱-۲- معیار آستانه حرکت به روش سرعت بحرانی.....
۲۳	۲-۲- روابط محاسبه عمق آب شستگی از دانشمندان مختلف.....
۲۶	۳-۲- ضرایب شکل برای پایه‌های مختلف.....
۲۸	۴-۲- مقادیر توان‌ها در معادله جین (۱۹۸۱).....
۳۱	۵-۲- ضریب شکل پایه $k_s$ .....
۴۴	۶-۲- انواع مختلف ترکیب طوق و شکاف آزمایش شده.....
۴۵	۷-۲- اثر طول شکاف بر عمق آب شستگی بی بعد شده.....
۵۵	۱-۳- سرعت برشی بحرانی ذرات.....
۵۶	۲-۳- سرعت جریان برای $\frac{u_*}{u_{*ca}} = 0/9, 0/8, 0/7$ بدون حضور لایه سپر.....
۵۶	۳-۳- سرعت جریان برای $\frac{u_*}{u_{*ca}} = 0/9, 0/8, 0/7$ در حضور لایه سپر.....
۶۳	۱-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره، بدون لایه سپر و $u^*/u_{*c} = 0.7$ .....
۶۳	۲-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره، بدون لایه سپر و $u^*/u_{*c} = 0.8$ .....
۶۳	۳-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره، بدون لایه سپر و $u^*/u_{*c} = 0.9$ .....
۶۳	۴-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم بیضی، بدون لایه سپر و $u^*/u_{*c} = 0.7$ .....
۶۶	۵-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم بیضی، بدون لایه سپر و $u^*/u_{*c} = 0.8$ .....
۶۶	۶-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم بیضی، بدون لایه سپر و $u^*/u_{*c} = 0.9$ .....
۶۷	۷-۴- نتایج به دست آمده از این تحقیق.....
۶۷	۸-۴- نتایج به دست آمده از تحقیق دی و باریویا.....
۶۷	۹-۴- درصد کاهش (-) و افزایش (+) مقدار $d_{sa}$ در این تحقیق نسبت به تحقیق دی و باریویا.....
۷۹	۱۰-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره با حضور لایه سپر و با عبور جریانی بر اساس آستانه حرکت ذرات سپر.....
۷۹	۱۱-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره بدون حضور لایه سپر و با عبور جریانی بر اساس آستانه حرکت ذرات بستر.....
۷۹	۱۲-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره با حضور لایه سپر و با عبور جریانی بر اساس آستانه حرکت ذرات بستر.....
۸۲	۱۳-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره و $u^*/u_{*ca} = 0.7$ .....
۸۳	۱۴-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره و $u^*/u_{*ca} = 0.8$ .....
۸۳	۱۵-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم دایره و $u^*/u_{*ca} = 0.9$ .....
۸۳	۱۶-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم بیضی و $u^*/u_{*ca} = 0.7$ .....
۸۳	۱۷-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم بیضی و $u^*/u_{*ca} = 0.8$ .....
۸۳	۱۸-۴- مشخصات جریان در تکیه گاه نیم بیضی و $u^*/u_{*ca} = 0.9$ .....
۹۰	۱۹-۴- مقادیر فاکتور شکل برای مدل‌های مختلف تکیه گاه.....

## چکیده

آب شستگی پدیده‌ای است طبیعی که در نتیجه عمل فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد جدا شده از آن به وسیله این جریان رخ می‌دهد. این پدیده باعث فرو ریختن پل‌ها شده و به خصوص در مواقع سیلاب در اثر وجود جریان‌های ناپایدار و حرکت اجسام شناور و معلق در آب، باعث صدمه زدن به پایه‌های پل‌ها و گرفتگی در مقطع سیلابی و افزایش عمق و سرعت جریان می‌شود. آب شستگی به سه نوع آب شستگی عمومی، آب شستگی انقباضی (تنگ شدگی) و آب شستگی موضعی تقسیم می‌شود. از روش‌های کنترل و کاهش میزان آب شستگی موضعی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بالا بردن مقاومت مواد تشکیل دهنده بستر (استفاده از سنگ چین یا لایه سپری)، کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی (استفاده از طوق و یا پای ستون، استفاده از شکاف و پایه‌های آئرو دینامیکی و استفاده هم‌زمان از طوق و شکاف) و افزایش مقاومت مواد بستر هم‌زمان با استفاده از عوامل کاهش دهنده فرسایش موضعی. اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه به صورت تجربی و آزمایشگاهی بوده است که علت این امر پیچیدگی این پدیده در اثر بروز جریان‌های ثانویه در اطراف پایه، ثابت نبودن مشخصات هیدرولیکی نسبت به زمان، تغییر شرایط مرزی و اندرکنش سه فاز مختلف آب، هوا و رسوب می‌باشد. در تحقیق حاضر اثر لایه سپری بر آب شستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور کلی اهداف مورد نظر در این تحقیق شامل مطالعه و شناخت توسعه آب شستگی آب زلال در لایه سپری در تکیه‌گاه‌ها، مطالعه و شناخت تأثیر شکل تکیه‌گاه‌ها بر آب شستگی واقع در لایه سپری، بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی نظیر عدد فرود بر حداکثر عمق آب شستگی در لایه سپری و بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی نظیر قطر ذرات سپر، قطر ذرات بستر و ضخامت لایه سپری بر روند و میزان آب شستگی اطراف تکیه‌گاه در حضور لایه سپری با استفاده از مدل آزمایشگاهی بوده است. آزمایش‌ها در یک کانال به طول ۵/۶ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر با سطح مقطع مستطیلی انجام گرفته است. فاصله مورد نیاز به منظور فراهم آمدن شرایط لازم جهت توسعه کامل جریان در مقطع مورد آزمایش با اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت از ورودی کانال تعیین شده است. آزمایش‌ها روی دو نوع تکیه‌گاه به شکل‌های نیم‌بیضی و نیم‌دایره و به ابعاد  $b/L=3$  برای نیم‌بیضی و  $b/L=2$  برای نیم‌دایره انجام گرفت (b: عرض تکیه‌گاه و L: جلو آمده‌گی تکیه‌گاه). تکیه‌گاه‌ها در مقطعی از کانال به طول ۱ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴ متر که با دو لایه از رسوبات یکنواخت (بستر و سپر) پوشیده شده است، قرار گرفته و قطرهای مختلف ذرات رسوب بستر و لایه سپری مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها نشان داد که سرعت جریان نقش بسزایی در نحوه گسترش گودال آب شستگی دارد. با افزایش قطر ذرات بستر در حضور یک لایه سپری ثابت، عمق آب شستگی افزایش می‌یابد. با افزایش قطر ذرات لایه سپری در حضور بستر ثابت، عمق آب شستگی کاهش می‌یابد. در ضخامت لایه سپری ثابت با افزایش قطر ذرات بستر، عمق آب شستگی افزایش می‌یابد. در قطرهای کوچک بستر که بیشتر تحت اثر حفاظتی لایه سپری قرار دارند، افزایش سرعت تا زمانی که لایه سپر را تحت تأثیر قرار ندهد، سبب افزایش عمق لایه سپری ثانویه می‌گردد. عمق آب شستگی کیه‌گاه نیم‌بیضی کمتر از تکیه‌گاه نیم‌دایره است.

**واژه‌های کلیدی:** آب شستگی، فرسایش، تکیه‌گاه، لایه سپری، رسوب

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- مقدمه

یکی از مهمترین سازه‌هایی که از دیر باز مورد توجه همگان قرار داشته، پل است. با توجه به اینکه جهت عبور از رودخانه‌ها وجود چنین سازه‌ای اجتناب‌ناپذیر است، علی‌رغم وجود محاسبات دقیق و اعمال ضرایب اطمینان بالا همچنان پل‌های متعددی دچار تخریب می‌شوند. تخریب پل‌ها علاوه بر مسائل اقتصادی، باعث ایجاد معضلات اجتماعی و حتی مخاطرات جانی می‌گردد [۵۵].

مطالعات پل‌های تخریب شده نشان می‌دهد که عامل اساسی تخریب اکثر آنها عدم رعایت مسائل هیدرولیکی است. یکی از مهمترین این عوامل، آب‌شستگی پایه‌های پل است. آب‌شستگی پدیده‌ای است طبیعی که در نتیجه عمل فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد جدا شده از آن به وسیله این جریان رخ می‌دهد. این پدیده که باعث فرو ریختن پل‌ها می‌شود، در مواقع سیلاب که نیاز به استفاده از پل‌ها بیشتر احساس می‌شود، اتفاق می‌افتد. دلیل این امر در درجه اول، وجود جریان‌های ناپایدار در مواقع سیل و تغییر جهت جریان اصلی رودخانه و در درجه دوم وجود اجسام شناور و معلق در آب مانند سنگ، چوب و یخ‌های شناور است که علاوه بر صدمه زدن بر پایه‌های پل، در بعضی مواقع باعث گرفتگی در مقطع سیلابی و افزایش عمق و سرعت جریان می‌شوند. آب‌شستگی به دو طریق موجب صدمه رساندن به پل می‌شود [۳۱].

۱- آب‌شستگی باعث کاهش مقاومت پایه‌ها در مقابل جریان می‌شود. به عبارت دیگر در اثر شسته شدن مصالح در پی، اصطکاک بین پی و مصالح بستر کاسته می‌شود و کف پایه نسبت به بالای آن حرکت نسبی پیدا می‌کند. در نتیجه این حرکت، لنگر شدیدی به بالای پایه اعمال می‌شود که موجب تخریب پایه و در نهایت عرشه پل می‌شود.

۲- شسته شدن مصالح، که باعث کاهش نیروی مقاوم در پی و در نتیجه نشست پی می‌گردد. چون این نشست به صورت غیر یکنواخت در طول عرشه پل رخ می‌دهد، موجب شکست عرشه پل‌ها می‌شود.

در این فصل، پس از معرفی انواع آب‌شستگی و همچنین علل وقوع این پدیده، به روش‌های مقابله با آن پرداخته

می‌شود.

#### ۱-۲- انواع آب‌شستگی

انواع آب شستگی که ممکن است در محدوده یک پایه پل اتفاق بیفتد شامل :

- ۱- آب شستگی عمومی<sup>۱</sup> که صرف نظر از وجود یا عدم وجود پل در بستر رودخانه ایجاد می شود.
- ۲- آب شستگی انقباضی (تنگ شدگی)<sup>۲</sup> که به دلیل تنگ شدگی مقطع در اثر وجود سازه‌هایی چون پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل در مسیر آبراهه بوجود می آید.

۳- آب شستگی موضعی<sup>۳</sup> که توسط میدان جریان موضعی در اطراف پایه‌های پل ایجاد می شود [۳۱].  
 آب شستگی موضعی در اطراف پایه‌ها به عنوان مهمترین عامل تخریب پل‌ها گزارش شده است به طوری که طی ۳۰ سال گذشته، ۱۰۰۰ مورد از مجموع ۵۰۰۰۰۰ پل ساخته شده روی رودخانه‌های آمریکا تخریب شده است که ۶۰٪ آنها در اثر آب شستگی موضعی بوده است. در حالی که، سهم زلزله در این تخریب‌ها تنها ۲٪ می باشد. متوسط خسارت تخریب پل‌ها که بر اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا<sup>۴</sup> تحمیل می شود، سالانه در حدود ۵۰ میلیون دلار است [۲۱]. در کشور ما به دلیل عدم درک صحیح از هیدرولیک جریان اطراف پایه و رعایت نکردن ملاحظات فنی در طراحی و اجرای پل‌ها، هر ساله ده‌ها پل تخریب می شود که دلیل عمده آن آب شستگی موضعی است. این امر علاوه بر تحمیل خسارات فراوان، باعث اختلال در سیستم حمل و نقل شده است. بنابراین شناخت این پدیده، پیش‌بینی میزان آب شستگی، لحاظ کردن آن در طراحی پل‌ها و مهمتر از همه، به کار بردن تمهیدات لازم برای کنترل و کاهش آب شستگی بسیار ضروری است.

مشخصه اصلی آب شستگی موضعی در پایه‌های پل، عمق آب شستگی یعنی  $d_s$  می باشد که این عمق، بیشترین عمق فرسایش یافته اطراف پایه است و عمدتاً در بالادست پایه در محل برخورد جریان آب به پایه تشکیل می شود.

### ۳-۱- انواع مختلف آب شستگی موضعی در پایه‌های پل

#### ۱-۳-۱- آب شستگی آب زلال<sup>۵</sup>

آب شستگی آب زلال در شرایطی اتفاق می افتد که مواد بستر در بالادست حفره آب شستگی، ساکن هستند. در این حالت، در فاصله‌ای دورتر از حفره آب شستگی<sup>۶</sup>، تنش برشی یا سرعت برشی بستر  $u_*$  (سرعت متوسط جریان،  $U$ ) کمتر یا مساوی تنش برشی یا سرعت برشی بحرانی  $u_{*c}$  (سرعت متوسط بحرانی،  $U$ ) آستانه حرکت<sup>۷</sup> ذرات می باشد. روند افزایش عمق آب شستگی در شرایط آب زلال تا زمانی است که جریان دیگر توانایی جابجایی ذرات بستر را نداشته باشد که در این زمان عمق آب شستگی حداکثر رخ می دهد، شکل (۱-۱).

#### ۱-۳-۲- آب شستگی بستر زنده<sup>۸</sup>

۱-General Scour

۲-Localized or Constriction Scour

۳-Local Scour

۴-F.H.W.A

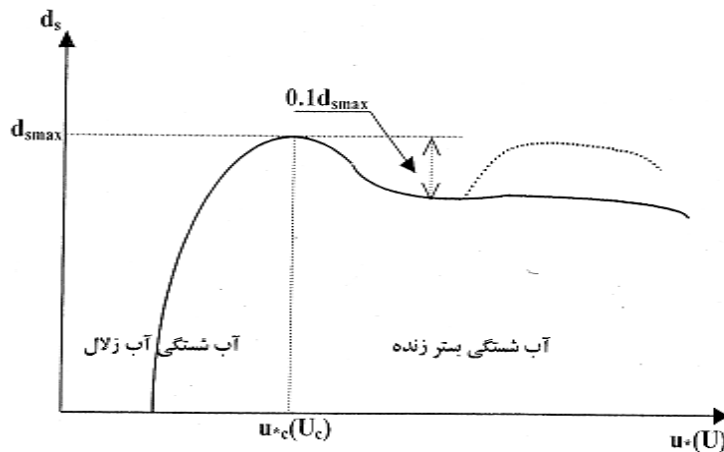
۵-Clear-Water Scour

۶-Scour Hole

۷-Threshold of Movement

۸-Live-bed Scour

آب شستگی بستر زنده که به آن آب شستگی همراه با انتقال رسوب نیز گفته می‌شود در شرایطی اتفاق می‌افتد که انتقال بار بستر عمومی توسط رودخانه وجود دارد. در این حالت، تنش برشی بستر (سرعت متوسط جریان) بیشتر از تنش برشی (سرعت متوسط) بحرانی آستانه حرکت ذرات است. عمق آب شستگی متعادل<sup>۵</sup>، زمانی اتفاق می‌افتد که در یک دوره زمانی، مقدار ذرات خارج شده از حفره آب شستگی با میزان تأمین شده از بالادست حفره توسط جریان برابر باشد (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱) - تغییرات عمق آب شستگی بر حسب سرعت برشی (سرعت جریان)

تشخیص تفاوت این دو نوع آب شستگی مهم است، زیرا گسترش زمانی حفره آب شستگی و ارتباط میان عمق آب شستگی و سرعت جریان وابسته به نوع آب شستگی است. در شرایط آب زلال، عمق آب شستگی با زمان افزایش می‌یابد، در حالی که در شرایط بستر زنده، این عمق طی زمان به صورت نوسانی کم و زیاد می‌شود [۵۵].

#### ۴-۱- الگوی جریان و مکانیزم آب شستگی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای

به طور کلی در محل پایه‌های پل دو عامل اساسی موجب تشکیل گرداب‌هایی در اطراف پایه می‌شود که این گرداب‌ها خود باعث آب شستگی می‌شوند. این دو عامل عبارتند از: برخورد جریان به پایه‌ی پل و جدایی جریان<sup>۱</sup> آب از پایه پل تمامی جریان‌هایی که در اطراف پایه تولید می‌شوند به نحوی به طور مستقیم یا غیر مستقیم با یکی از این دو عامل مرتبط هستند [۱۷].

برخورد آب به پایه موجب جریان رو به پایین<sup>۱۱</sup> و در نتیجه گرداب نعل اسبی<sup>۱۲</sup> می‌شود و جدایی جریان در پشت پایه موجب گرداب‌هایی می‌شود که به گرداب‌های برخاستگی<sup>۱۳</sup> معروف است. شکل (۲-۱) الگوی جریان و گرداب‌های مذکور را به خوبی نشان می‌دهد [۱۷].

۵-Equilibrium Scour Depth

۱-Flow Separation

۲-Down Flow

۳-Horse-Shoe Vortex

۴-Wake Vortices



به پایین در حفره آب شستگی مستهلک شود. در این لحظه عمق آب شستگی به تعادل می‌رسد و دیگر رشد محسوسی نمی‌کند [۵۵].

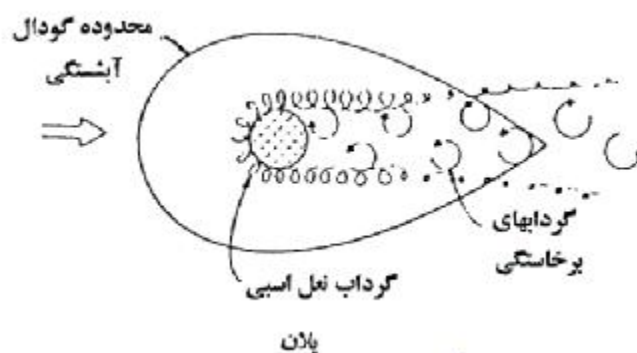
طبق نظر اکثر محققین همچون رود کیوی و اتما<sup>۱۷</sup> (۱۹۸۳) و پارسا بصیر (۱۳۸۳) گرداب نعل اسبی زمانی آغاز می‌شود که در اثر جریان رو به پایین، گودال آب شستگی در جلوی پایه تشکیل شده باشد. به عبارت دیگر، اگر جلوی جریان رو به پایین گرفته شود خود به خود گرداب نعل اسبی نیز کنترل می‌گردد [۲].

محققین دیگری همچون درگاهی<sup>۱۸</sup> (۱۹۹۱) مخالف این نظریه هستند و معتقدند که گرداب نعل اسبی مستقل از بقیه جریان‌ها از ابتدا تشکیل می‌شود [۲۴]. با توجه به فیزیک مسأله و شواهد موجود به نظر می‌رسد که دیدگاه اول به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

### ۱-۴-۳- گرداب برخاستگی

جریان آب پس از عبور از پایه دچار پدیده جدایی می‌شود. از طرفی به علت کاهش فشار در پشت پایه، جریان و لایه برشی به سمت داخل متمایل می‌شوند و این دو عامل سبب ایجاد اغتشاش و گرداب‌های نامنظم می‌شوند. علت دقیق حرکت این گرداب‌ها به سمت بالا هنوز کاملاً مشخص نیست ولی به نظر می‌رسد دلیل آن است که درست در پشت پایه فشار منفی بسیار شدید است و شدت این فشار منفی در مسیر جریان به تدریج کاسته شده و این گرداب به تدریج از محدوده فشار منفی خارج می‌شود و تحت تأثیر توزیع سرعت در مقطع جریان قرار می‌گیرد. حال چون سرعت در لایه‌های بالا بیشتر است گرداب‌ها به سمت لایه‌های بالا حرکت می‌کنند. در شکل (۱-۳) منطقه تشکیل گرداب‌های برخاستگی در پلان نشان داده شده است.

گرداب‌های برخاستگی مهم‌ترین عامل آب شستگی در پشت پایه هستند و هر چه شکل پایه، آئرو دینامیکی تر باشد این گرداب‌ها ضعیف‌تر و در نتیجه آب شستگی پشت پایه کمتر می‌شود. علت این امر آن است که در پایه‌های آئرو دینامیکی پدیده جدایی یا تشکیل نمی‌شود و یا با شدت کمتری انجام می‌شود و عامل اولیه‌ی این گرداب‌ها فراهم نمی‌شود [۷].



شکل (۱-۳) - محل تشکیل گرداب‌های برخاستگی [۵۴].

### ۱-۵- آنالیز پارامترهای آب‌شستگی

در طراحی پل‌ها محاسبه عمق فونداسیون بسیار مهم و اساسی است و طراح جهت تعیین این عمق، نیازمند دانستن ماکزیمم عمق آب‌شستگی است. به همین دلیل، اکثر مطالعات موجود به محاسبه ماکزیمم عمق آب‌شستگی ( $d_s$ ) پس از رسیدن به تعادل، محدود شده است. با فرض جریان یکنواخت و پایدار در یک رودخانه و با در نظر گرفتن یک پایه منفرد، پارامترهای بسیاری که ممکن است پدیده آب‌شستگی را تحت تأثیر قرار دهند، بقرار زیر می‌باشند.

- پارامترهای مشخصه سیال:  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  دانسیته سیال و  $v$  لزجت سینماتیکی سیال.
  - پارامترهای مشخصه بستر:  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر، توزیع اندازه ذرات، شکل ذرات و چسبندگی آنها
  - پارامترهای مشخصه جریان:  $y_o$  عمق جریان،  $U$  سرعت متوسط جریان و  $k$  ضریب زبری جریان.
  - پارامترهای مشخصه پایه پل: شکل،  $b$  عرض، شرایط سطح و سیستم‌های محافظتی اطراف پایه.
- لیست پارامترها طولانی است و کمی کردن برخی از آنها مانند توزیع اندازه ذرات، شکل دانه‌ها و چسبندگی ذرات بستر مشکل است. لذا، برای تحلیل جریان موارد زیر مد نظر قرار می‌گیرند:
- مواد بستر: رسوبات، غیر چسبنده با اندازه یکنواخت ذرات برابر  $d$  می‌باشند.
  - جریان: کانال به اندازه کافی عریض اختیار می‌شود تا وجود پایه باعث انقباض قابل ملاحظه مقطع نگردد.
  - همچنین بستر بدون تپه ماهور و موج در نظر گرفته می‌شود. بنابراین،  $k$  تنها تابعی از  $d$  خواهد بود و جریان از قانون مقاومت برشی از سرعت متوسط جریان نسبت به گرادیان هیدرولیکی  $S$  تبعیت می‌کند. در نهایت، آب‌شستگی در حالت پایدار مد نظر است.
  - تکیه‌گاه پل: نیم استوانه‌ای دایره‌ای کاملاً صاف، نیم استوانه‌ای بیضی کاملاً صاف

### ۱-۶- روشهای مختلف کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی

#### ۱-۶-۱- بالا بردن مقاومت مواد تشکیل دهنده بستر

##### الف- استفاده از سنگ‌چین

اولین روش که از دیر باز کاربرد فراوانی دارد، بالا بردن مقاومت مصالح بستر در برابر جریان آب است. طبق نظریه شیلدز<sup>۱۹</sup> هر چه قطر مصالح بیشتر باشد، برای از جا کردن و به حرکت در آوردن مصالح بستر به سرعت برشی<sup>۲۰</sup> بیشتری نیاز است. اگر بستر با ذرات درشت دانه‌تر جایگزین شود، در این صورت احتمال شسته شدن بستر بسیار کم می‌شود. این عمل را اصطلاحاً سنگ‌چین کردن<sup>۲۱</sup> می‌گویند [۵۵]. سنگ‌چین می‌تواند از مصالح شکسته و یا رودخانه‌ای تشکیل شده باشد. به علت اصطکاک بالا، مصالح شکسته شده مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. شکل سنگ‌دانه‌ها هم از این لحاظ که میزان اصطکاک و تراکم اشکال مختلف متفاوت است، در طراحی سنگ‌چین بسیار مهم است. برای طراحی سنگ‌چین با توجه به شکل، وزن مخصوص و جنس سنگ‌ها، دو شاخصه مهم اندازه

۱-Sheilds

۲-Shearing Velocity

۳-Riprap



دانه‌ها و محدودی سنگ‌چینی تعیین می‌شود. منظور از محدوده، وسعت قرارگیری سنگ‌چین در پلان رودخانه و عمق لایه سنگ‌چین است.

علاوه بر آن، تورهای گابیون فلزی یا تورهای بافته شده از شاخه‌های درخت بید و پر کردن آنها با سنگ در اطراف پایه در بسیاری از پل‌ها استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به پل‌های ساخته شده بر روی رود می‌سی‌سی‌پی و دیگر رودخانه‌های بزرگ اشاره کرد. برای جلوگیری از پدیده قوس زدگی<sup>۲۲</sup> و شسته شدن ذرات ریز به داخل این محافظ‌ها از فیلتر وارونه ترزاقی در زیر آنها استفاده می‌شود [۲۲].

#### ب- استفاده از لایه سپری<sup>۲۳</sup>

هنگامی که توانایی انتقال رسوب یک آبراهه بر میزان رسوب انتقالی از بالا دست آن فزونی یابد، بستر آبراهه شروع به فرو افتادن می‌نماید. به علت غیر یکنواختی اندازه مصالح بستر، ذرات کوچکتر با آهنگ سریعتری نسبت به ذرات درشت‌تر انتقال می‌یابند و این پدیده منجر به باقیماندن ذرات درشت‌تر بر سطح بستر خواهد شد. هنگامی که یک لایه از ذرات درشت رسوب به طور کامل بستر را بپوشاند، ذرات ریز در پناه آنها از انتقال به پایین دست باز می‌مانند. در این موقع فرآیند درشت‌تر شدن ذرات سطح بستر به تعادل رسیده و بستر تا تغییر شدید رژیم جریان پایدار باقی می‌ماند. پس از استقرار این فرآیند ذرات درشت بستر آبراهه را به صورت سپر درآورده و لایه متشکل از این ذرات درشت، لایه سپری خوانده می‌شود. به علت تغییر شرایط طبیعی جریان یک رودخانه، غالباً بیش از یک لایه مصالح سپر برای محافظت ذرات زیرین از فرسایش مورد نیاز است [۴].

توسعه لایه سپری مانعی در برابر انتقال رسوب خواهد بود. علاوه بر آن لایه سپری باعث افزایش مقدار سرعت برشی بحرانی برای ذرات بستر که در آستانه حرکت هستند، می‌باشد.

هنگامی که سرعت برشی جریان به طور تقریبی معادل ۵۰٪ سرعت برشی بحرانی برای ذرات لایه سپری باشد، آب‌شستگی تکیه گاه با حضور لایه سپری آغاز می‌شود. با توسعه گودال آب‌شستگی، لایه سپری ثانویه با ضخامتی معادل قطر ذرات لایه سپری در گودال آب‌شستگی و پیرامون تکیه گاه شکل خواهد گرفت که مانعی در برابر آب‌شستگی خواهد شد [۲۷].

#### ۱-۶-۲- کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی

در این روش بر خلاف روش قبلی هدف کاهش قدرت فرسایش جریان است به طوری که مصالح بستر با هر کیفیتی دچار آب‌شستگی نشوند. با توجه به مطالب ارائه شده در قسمت‌های قبلی، مهمترین عوامل فرسایش جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستگی هستند. هر عملی که این عوامل را از بین ببرد و یا حداقل قدرت آنها را کم کند، در این دسته قرار می‌گیرد. جهت مقابله با آب‌شستگی به طریقه‌ی کاهش عوامل فرسایش سه روش اساسی وجود دارد که در زیر به شرح آنها پرداخته می‌شود.

#### الف- استفاده از طوق و یا پای ستون

طوق<sup>۲۴</sup> یک صفحه با ضخامت کم است که اطراف پایه را می پوشاند و به طور عمود بر پایه در تراز بستر یا نزدیک آن قرار می گیرد، شکل (۱-۶). نقش اصلی طوق جلوگیری از برخورد جریان رو به پایین به بستر رودخانه است. طرز عمل به این شکل است که جریان رو به پایین پس از برخورد با طوق به اطراف منحرف می شود و در جلوی پایه، گودال تشکیل نمی گردد. با توجه به مطالب ارائه شده در بخش (۱-۴) تا زمانی که گودال ایجاد نشود، گرداب نعل اسبی تشکیل نمی شود. بنابراین طوق روشی مناسب برای مقابله با اثر دو عامل اول آب شستگی یعنی جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی است. البته تا زمانی که گرداب برخاستگی وارد عمل نشده است و گودال آب شستگی از پشت پایه به جلوی آن پیشروی نکرده است، با طوق مناسب می توان آب شستگی جلوی پایه را کاملاً از بین برد [۲].

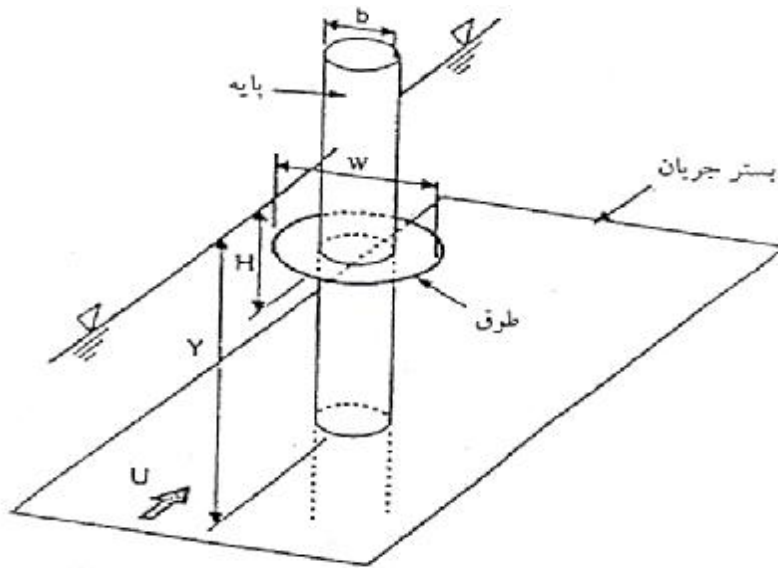
مهمترین شاخصه در طراحی طوق ها، ابعاد، ضخامت و تراز قرار گرفتن آن است. به طور کلی هر چه ضخامت طوق کمتر باشد عملکرد بهتری دارد، چون خود طوق در مقابل جریان، مقاومتی از خود نشان نمی دهد. ولی در عین حال اگر صفحه طوق خیلی نازک انتخاب شود، ممکن است در مقابل جریان های رو به پایین گسیخته شود و یا به قدری شکل پذیر شود که نقش خود را از دست بدهد. در مورد شکل طوق تا به حال آزمایش های زیادی صورت نگرفته است و تنها در پایه های استوانه ای و مستطیلی با ابعاد دو و سه برابر قطر پایه آزمایش ها انجام شده است. مزیت طوق آن است که پس از احداث پل حتی زمانی که آب در رودخانه جریان دارد قابل اجرا است. طریقه ای اجرا به این شکل است که دو نیم صفحه از طوق را در محل مربوطه از دو طرف مقابل هم قرار می دهند و سپس آن دو را به هم جوش می دهند. تجربه نشان داده است که طوق در سیلاب های شدید آسیب نمی بیند در صورتی که سنگ چین توانایی تحمل سیلاب بیشتر از سیلاب طرح را ندارد. از معایب این روش آن است که طوق آب شستگی را به طور کامل برطرف نمی کند و نصب آن نیز احتیاج به دقتی به مراتب بالاتر از سنگ چین دارد. به هر حال باید آنالیز اقتصادی انجام گردد، چون ممکن است در شرایطی سنگ چین گزینه مناسب تر باشد ولی در شرایط دیگر طوق بهتر باشد.

پای ستون<sup>۲۵</sup> یا به عبارت دیگر صندوقه نیز مانند طوق جلوی جریان رو به پایین را می گیرد، ولی مشکل اساسی در پای ستون ضخامت آن است. زمانی این مسأله مشکل ساز می شود که بستر در اثر فرسایش عمومی از کف پای ستون پایین تر آید. در این صورت گرداب نعل اسبی تشدید می شود و به سرعت آب شستگی به سرعت رشد می کند.

---

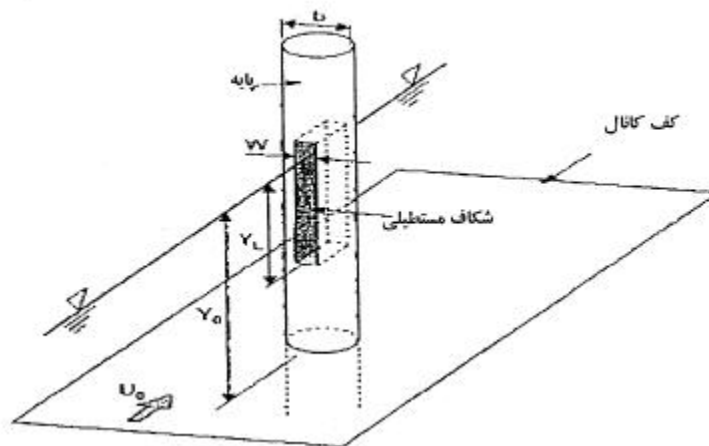
۱-Collar

۱-Caisson



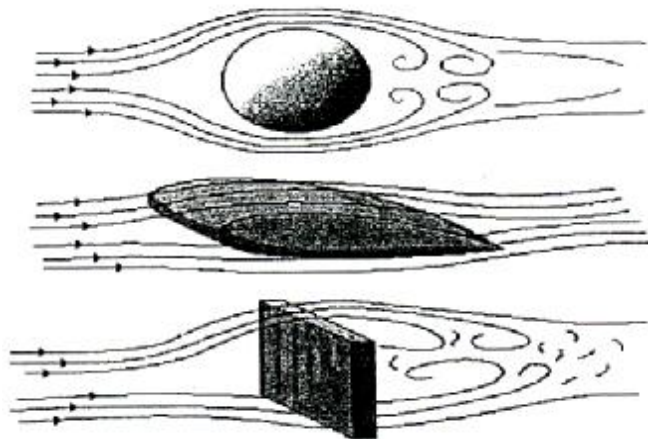
شکل (۴-۱) - استفاده از طوق جهت مقابله با آب‌شستگی [۴۲]

چنانچه به هر شکلی جهت شکاف نسبت به جریان انحراف پیدا کند، کارایی شکاف به شدت کاهش می‌یابد. یکی دیگر از معایب شکاف لزوم بازرسی متناوب آن است. علت این امر پر شدن احتمالی شکاف توسط شاخ و برگ و مواد معلق در آب است. از معایب دیگر شکاف کاهش مقاومت سازه‌ای پل است.



شکل (۵-۱) - استفاده از شکاف جهت مقابله با آب‌شستگی [۴۲]

پایه آئرو دینامیک<sup>۳۶</sup> از پدیده جدایی جریان جلوگیری می‌کند و یا حداقل باعث تعدیل این پدیده می‌شود. به علاوه شکل پایه به جریان اجازه عبور در پیرامون خود را می‌دهد و در نتیجه گرادیان فشار به شدت کاهش می‌یابد و جریان رو به پایین هم تا حدی کنترل می‌شود. مشکل این پایه‌ها دشواری در ساخت و پر هزینه بودن اجرای آنها است. شکل (۶-۱) اثر شکل پایه را بر روی گرداب‌های برخاستگی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هرچه پایه آئرو دینامیک‌تر باشد، گرداب‌های برخاستگی کمتر و شدت اثر تخریبی آنها کاهش می‌یابد.



شکل (۱-۶) - تأثیر شکل آئرو دینامیک پایه بر کنترل گرداب‌های برخاستگی

### ج - استفاده هم‌زمان از طوق و شکاف

این روش که اولین بار توسط چپو (۱۹۹۲) بررسی شد، نتایج بسیار خوبی داشته است. از نکات مهم این روش آن است که اگر به درستی اجرا شود، می‌تواند در شرایطی حتی آب‌شستگی را به طور کامل مهار کند [۲۲].

#### ۱-۶-۳ - افزایش مقاومت مواد بستر هم‌زمان با استفاده از عوامل کاهش دهنده فرسایش موضعی

تجربه نشان داده است که با طوقه و یا شکاف به تنهایی نمی‌توان آب‌شستگی را به طور کامل مهار کرد [۲۲]. به علاوه احداث سنگ‌چین در بعضی شرایط بسیار پرهزینه می‌شود. رایج‌ترین گزینه‌ها در این روش استفاده توأم از طوقه و سنگ‌چین و یا شکاف و سنگ‌چین است. در صورت استفاده هم‌زمان از طوق و سنگ‌چین یا شکاف و سنگ‌چین علاوه بر مهار کامل آب‌شستگی می‌توان محدوده و قطر پوشش سنگ‌چین را کاهش داد و از سنگ‌های کمتری استفاده نمود. مسلماً در مواردی که سنگ‌چین مناسب در منطقه وجود نداشته و یا هزینه احداث زیادی داشته باشد، این روش گزینه مناسبی است.

با توجه به مطالب ارائه شده در بالا این نتیجه حاصل می‌گردد که تحقیق در مورد مسأله آب‌شستگی از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق، از میان راه‌های مختلف مهار آب‌شستگی، به بررسی پدیده سپرشدگی در مجاورت تکیه‌گاه‌ها پرداخته می‌شود.