

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی عمران

بررسی تاثیر لایه سپری بر آب‌نشستگی پایه پل تحت اثر جریان غیر دائمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب

صفر ابراهیمی

استاد راهنما

دکتر عبد الرضا کبیری سامانی

تقدیر قاسم:

توروشتر از مہروماہی معلم

ندانم کہ دیگر چرامی نویسم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های این پایان نامه متعلق
به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم بہ:

پدرم و مادرم

و

ہمہ استفادہ کنندگان

فهرست مطالب

2	فصل اول: پیشگفتار.....
2	1-1- مقدمه.....
3	2-1- تعریف آب شستگی.....
3	3-1- انواع آب شستگی.....
3	1-3-1- آب شستگی عمومی (کف کنی یا بالا آمدن بستر).....
4	1-2-3-1- آب شستگی در اثر کاهش مقطع.....
4	1-3-3-1- آب شستگی طبیعی.....
4	1-4-3-1- آب شستگی موضعی.....
5	الف- آب شستگی آب زلال.....
5	ب- آب شستگی بسترزنده.....
6	1-4-4- الگوی جریان و مکانیزم آب شستگی موضعی.....
6	1-4-1- جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی.....
7	1-2-4-1- گردابهای برخاستی.....
7	1-3-4-1- گرداب سطحی در جلو پایه.....
7	1-5-5- روش های مختلف کنترل و کاهش عمق آب شستگی.....
7	1-1-5-1- کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی.....
7	الف- استفاده از طوق یا پای ستون.....
8	ب- استفاده از شکاف.....
8	ج- استفاده هم زمان از طوق و شکاف.....
8	1-2-5-1- بالا بردن مقاومت مواد تشکیل دهنده بستر.....
8	الف- استفاده از سنگ چین.....
9	ب- استفاده از لایه سپر.....
9	1-6-1- آب شستگی در شرایط جریان غیردائمی.....
10	1-7- ساختار پایان نامه حاضر.....

11	فصل دوم: پیشینه تحقیق
11	1-2-1- مقدمه
12	2-2-2- مطالعات مربوط به پدیده آب شستگی
12	1-2-2-1- سیستم گردابها
13	2-2-2-2- زمان تعادل
13	2-2-3- عمق آب شستگی در جریان دائمی
25	2-2-4- آب شستگی تحت اثر جریان غیر دائمی
29	2-3-3- روش های کنترل و کاهش عمق آب شستگی موضعی
29	2-3-1- استفاده از سنگ چین
30	2-3-2- استفاده از طوقه
32	2-3-3- استفاده از شکاف
34	2-3-4- استفاده همزمان از شکاف و طوق
34	2-3-5- استفاده از لایه سپری
37	2-4- جمع بندی
38	فصل سوم: مدل سازی آزمایشگاهی
38	3-1-1- مقدمه
39	3-2- آنالیز ابعادی
40	3-3- معرفی کانال آزمایشگاهی
42	3-4- انتخاب پارامترهای آزمایش
43	3-4-1- شکل و اندازه پایه های مورد استفاده
43	3-4-2- اندازه ذرات، توزیع دانه بندی و شکل دانه ها
43	الف - اندازه ذرات
44	ب - توزیع دانه بندی ذرات
45	3-4-3- انتخاب ضخامت مصالح سپر و بستر
45	الف - ضخامت مصالح بستر
45	ب - ضخامت مصالح لایه سپر (s)
45	3-4-4- عمق جریان
46	3-4-5- سرعت جریان
46	3-5- آماده سازی کانال و مدل های آزمایشگاهی
47	3-6- اندازه گیری عمق جریان و عمق فرسایش

48	7-3- شرح آزمایشهای طراحی شده
48	1-7-3- آزمایشهای با جریان دائمی
49	2-7-3- آزمایشهای با جریان غیر دائمی
49	الف - ملاحظات طراحی هیدروگرافها
50	ب - نحوه ایجاد هیدروگرافها
51	8-3- جمع بندی فصل
52	فصل چهارم: تجزیه و تحلیل نتایج
52	1-4- مقدمه
52	2-4- آزمایشات با جریان دائمی
54	1-2-4- تهیه پروفیل فرسایش به کمک روش پردازش تصویر
58	2-2-4- بررسی مشاهدات آزمایشگاهی
58	الف - تشکیل لایه سپری ثانویه
58	ب - بررسی نمونه شکل فرسایش در بسترهای سپری شده
63	3-2-4- تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق تعادل آب شستگی
66	4-2-4- بررسی تاریخچه‌ی زمانی آب شستگی
67	5-2-4- بررسی تأثیر B^{\wedge} و نسبت اندازه ذرات بر تغییرات زمانی عمق فرسایش
69	3-4- آزمایشات با جریان غیردائمی
70	1-3-4- صحت سنجی نتایج آزمایشات در شرایط بدون لایه‌ی سپر
71	2-3-4- بررسی تأثیر نسبت اندازه ذرات بر عمق آب شستگی در حال جریان غیر دائمی
73	3-3-4- بررسی تأثیر شکل هیدروگراف بر عمق آب شستگی در بسترهای با پوشش سپر
73	4-3-4- تأثیر نوع هیدروگراف بر شکل ناحیه فرسایش یافته
78	5-3-4- بررسی اثر تکرار هیدروگراف
81	4-4- جمع بندی فصل
82	فصل پنجم: جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهادات
82	1-5- مقدمه
82	2-5- جمع بندی تحقیق
83	3-5- نتایج کلی تحقیق
84	4-5- پیشنهادات

86.....مراجع:

88.....پیوست: توسعه زمانی آبشستگی و روابط برآزش داده شده بر آنها توسط نرم افزار *SPSS15*.

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل (1-1): کاهش مقطع رودخانه که منجر به افزایش سرعت در مقطع پل می‌شود [1]..... 4
- شکل (2-1): تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی با زمان در شرایط آب زلال و بستر زنده [1]..... 5
- شکل (3-1): الگوی جریان در اطراف پایه 6
- شکل (1-2): منحنی شیلدز تعمیم یافته [2]..... 15
- شکل (2-2): ضریب عمق جریان K_y [11]..... 16
- شکل (3-2): محاسبه ضریب اندازه ذرات K_d [11]..... 16
- شکل (4-2): محاسبه ضریب K_α [11]..... 17
- شکل (5-2): الگوریتم محاسبه تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی [6]..... 20
- شکل (6-2): تأثیر نسبت سرعت بحرانی بر تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی [6]..... 21
- شکل (7-2): مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم چانگ و همکاران (2004) با نتایج آزمایشگاهی [12]..... 24
- شکل (8-2): مقایسه نتایج بدست آمده برای تغییرات زمانی آب‌شستگی در جریان غیر دائمی توسط الگوریتم پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی [6]..... 26
- شکل (9-2): آب‌شستگی در طول دو سیلاب متوالی [13]..... 26
- شکل (10-2): آب‌شستگی در طول دو سیلاب متوالی [13]..... 27
- شکل (11-2): مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی [3]..... 29
- شکل (12-2): نمایی از موقعیت طوقه روی پایه استوانه‌ای [4]..... 31
- شکل (13-2): طوق شماره 3 استفاده شده توسط بلوچی (1386) [5]..... 32
- شکل (14-2): شکاف روی پایه الف) شکاف نزدیک بستر و ب) شکاف نزدیک سطح آب 33
- شکل (15-2): حالات مختلف آب‌شستگی در بسترهای ماسه‌ای پوشیده شده توسط سپر شنی [20]..... 36
- شکل (1-3): دبی سنج مغناطیسی 41
- شکل (2-3): طرح شماتیک کانال آزمایشگاهی 41
- شکل (3-3): نحوه آب بندی سکوی فلزی و زهکشی بستر ماسه‌ای 47
- شکل (4-3): انواع هیدروگراف‌هایی که مورد استفاده قرار گرفتند 50
- شکل (1-4): تصویر خاکستری شده نهایی تصویر (1-4)..... 56
- شکل (2-4): هیستوگرام تصویر خاکستری رنگ تصویر (1-4)..... 57
- شکل (3-4): منحنی میزان سطح فرسایش یافته بدست آمده به کمک روش پردازش تصویر 57

- شکل (4-4): وضعیت کلی چاله فرسایش در هر یک از حالات مطرح شده در جدول (4-4)..... 60
- شکل (5-4): منحنی میزان سطح فرسایش یافته در حالت $B=42\text{ mm}$ ، $d_a=3/56$ و $d=0/26$ 61
- شکل (6-4): منحنی میزان سطح فرسایش یافته در حالت $B=42\text{ mm}$ ، $d_a=2/36$ و $d=0/26$ 62
- شکل (7-4): منحنی میزان سطح فرسایش یافته در حالت $B=42\text{ mm}$ ، $d_a=1/18$ و $d=0/26$ 62
- شکل (8-4): تغییرات d_{sa}^{\wedge} با B/d (دی و ریکر 2007) [5]..... 64
- شکل (9-4): تغییرات d_{sa}^{\wedge} با B/d برای بستر با قطر سپر $d_a=3.56\text{ mm}$ (تحقیق حاضر)..... 64
- شکل (10-4): تغییرات d_{sa}^{\wedge} با d^{\wedge} برای بستر با قطر ذرات $d=0.81\text{ mm}$ (دی و ریکر 2007)..... 65
- شکل (11-4): تغییرات d_{sa}^{\wedge} با d^{\wedge} برای بستر با قطر ذرات $d=0.26\text{ mm}$ (تحقیق حاضر)..... 65
- شکل (12-4): تغییرات عمق آب شستگی در جلو پایه با زمان در آزمایش S2..... 67
- شکل (13-4): تغییرات عمق آب شستگی در جلو پایه با زمان در آزمایش S5..... 68
- شکل (14-4): تغییرات عمق آب شستگی در جلو پایه با زمان در آزمایش S8..... 68
- شکل (15-4): مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با رابطه ارائه شده توسط بنی هاشم..... 71
- شکل (16-4): تغییرات عمق فرسایش با d^{\wedge} در پایه الف (ب 42) 33 میلی متری تحت هیدروگراف های مختلف در بستر با mm $d=0/26$ 72
- شکل (17-4): تأثیر شکل هیدروگراف بر عمق آب شستگی در هیدروگراف های 30 و 120 دقیقه ای..... 74
- شکل (18-4): شکل ناحیه فرسایش یافته تحت اثر هیدروگراف H1..... 75
- شکل (19-4): شکل ناحیه فرسایش یافته تحت اثر هیدروگراف H2..... 75
- شکل (20-4): شکل ناحیه فرسایش یافته تحت اثر هیدروگراف H3..... 76
- شکل (21-4): شکل ناحیه فرسایش یافته تحت اثر هیدروگراف H4..... 76
- شکل (22-4): شکل ناحیه فرسایش یافته تحت اثر هیدروگراف H6..... 77
- شکل (23-4): مقایسه نتایج عمق فرسایش ناشی از هیدروگراف H9 با هیدروگراف های 1 ساعته (H4, H5)..... 79
- شکل (24-4): مقایسه نتایج عمق فرسایش ناشی از هیدروگراف H10 با هیدروگراف های 2 ساعته (H6, H7, H8)..... 79
- شکل (25-4): مقایسه مقادیر عمق آب شستگی در هیدروگراف های H9, H10 و H11 با مقادیر بدست آمده از رابطه (7-4)..... 80

فهرست جداول

صفحه	عنوان
17	جدول (1-2): ضریب شکل پایه K_s [2].....
45	جدول (1-3): سرعت برشی آستانه حرکت ذرات رسوب.....
46	جدول (2-3): انواع ترکیبات سپر- بستر و سرعت محاسبه شده برای جریان در هر حالت.....
49	جدول (3-3): خلاصه پارامترهای دخیل در فرآیند آب‌شستگی در حالت جریان دائمی.....
51	جدول (4-3): مقادیر حداقل و حداکثر دبی در هر یک از هیدروگرافها برای اندازه های مختلف ذرات لایه سپر.....
53	جدول (1-4): پارامترهای مؤثر در آزمایش‌های با جریان دائمی.....
54	جدول (2-4): نتایج آزمایش‌های با جریان دائمی.....
56	جدول (3-4): عمق فرسایش قرائت شده و شدت رنگ خاکستری نظیر آن در نقاط کالیبراسیون.....
59	جدول (4-4): دسته‌بندی کلی آزمایشات با جریان دائمی.....
70	جدول (5-4): نتایج آزمایشات با جریان غیر دائمی.....
77	جدول (6-4): زاویه سطح در جلو و عقب پایه تحت اثر هیدروگراف‌های مختلف.....

فهرست تصاویر

صفحه

عنوان

- تصویر (1-3): نمایی از الف) بالادست و ب) پایین دست ناحیه آزمایش 42
- تصویر (2-3): انواع مصالح مورد استفاده در لایه‌های بستر و سپر 44
- تصویر (1-4): تزریق مایع رنگی در داخل چاله فرسایش در آزمایش S7 55

چکیده

هر ذره رسوبی دارای حد آستانه حرکتی است که اگر شرایط جریان به گونه‌ای باشد که ذره را به این حد یا بالاتر از آن برساند، در این صورت ذره شروع به حرکت و انتقال از یک ناحیه به ناحیه دیگر می‌کند. این پدیده مبنای فرآیندی است که منجر به فرسایش بستر یا وقوع پدیده آب‌شستگی می‌گردد که تاکنون خسارات بسیاری را به پل‌های واقع بر روی رودخانه‌ها وارد کرده است. آب‌شستگی به انواع مختلف؛ عمومی، آب‌شستگی در اثر کاهش مقطع، طبیعی و موضعی تقسیم می‌شود. روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش عمق آب‌شستگی وجود دارد که عبارتند از؛ بالا بردن مقاومت مواد تشکیل دهنده بستر، کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی و افزایش مقاومت مواد بستر هم زمان با استفاده از عوامل کاهنده فرسایش موضعی. رژیم غالب رودخانه‌ها معمولاً غیر دائمی است. لذا طراحی بر اساس اثرات هیدرولیکی چنین جریان‌هایی در حالت دائمی، امری غیرمنطقی و یقیناً غیر اقتصادی است. از طرف دیگر، غالباً مصالح سازنده بستر رودخانه‌ها دارای دانه‌بندی غیر یکنواخت هستند. این امر سبب تشکیل لایه سپری که نقش یک قشر محافظ در مقابل فرسایش را برای مصالح زیرین ایفا می‌کند، می‌گردد.

در تحقیق حاضر، به مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان غیر دائمی بر آب‌شستگی موضعی در بسترهای سپری پرداخته شده است. در این تحقیق، دو دسته آزمایش بر روی پایه‌های استوانه‌ای شکل، انجام گرفت. در دسته اول آزمایش‌هایی برای بدست آوردن عمق آب‌شستگی در شرایط جریان دائمی و در دسته دوم، آزمایشات در شرایط جریان غیر دائمی و هیدروگراف‌های مختلف (10 حالت مختلف از هیدروگراف‌های مثلثی) ترتیب داده شد. این آزمایش‌ها در کانالی به طول 8/5 متر و مقطع مستطیلی به عرض 0/405 متر، انجام گرفت. ناحیه آزمایش به وسیله دو لایه مصالح یکنواخت (مصالح یکنواخت زیرین که توسط لایه نازکی از مصالح درشت دانه محافظت می‌شود) پر می‌شود. در این تحقیق، از سه پایه استوانه‌ای به قطرهای 42 و 33 و 22 میلی‌متر استفاده شد. به منظور اعمال جریان غیر دائمی و برای ساده‌سازی کار، تغییرات دبی در بازه‌های زمانی 3 و 5 دقیقه‌ای و به شکل پله‌ای، اعمال گردید. بررسی‌ها نشان داد که در هیدروگراف‌های مثلثی و بسترهای پوشیده شده با لایه نازکی از ذرات سپر، عمق فرسایش مستقل از شکل هیدروگراف است و از سویی دیگر افزایش زمان پایه هیدروگراف، تأثیر ناچیزی بر پیشروی ناحیه فرسایش در جلو پایه دارد. بررسی اشکال فرسایش نشان داد که با افزایش زمان پایه هیدروگراف، چاله فرسایش در عرض کانال، توسعه ناچیزی پیدا می‌کند و پیشروی ناحیه فرسایش یافته، در عقب پایه نیز تقریباً مستقل از شکل هیدروگراف است. با افزایش زمان پایه، زاویه سطح اصلی فرسایش با افق در عقب پایه، روندی نزولی طی می‌کند که این به معنای گسترش ناحیه فرسایش در عقب پایه و تمایل به ایجاد سطحی تخت در پشت پایه است. از مجموع مشاهدات و نتایج می‌توان گفت که یک هیدروگراف مثلثی، با زمان پایه T با n تکرار اثری تقریباً معادل با یک هیدروگراف یکپارچه، با زمان پایه nT دارد.

کلمات کلیدی: آب‌شستگی، پایه‌ی پل، لایه سپر، جریان غیر دائمی، هیدروگراف مثلثی.

فصل اول

پیشگفتار

1-1- مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت و توسعه جوامع انسانی و عدم کفایت منابع و فرصت‌های بومی، تقاضا برای حمل و نقل و جابجایی هر روزه بیش از پیش افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، علیرغم روش‌های نوین حمل و نقل، هنوز حمل و نقل جاده‌ای یکی از پر تقاضاترین و ارزان‌ترین روش‌های حمل مسافر و کالا است. از این رو توسعه شبکه راه‌ها و جاده‌ها از اولویت‌های اساسی کشورهای است که در مسیر توسعه قرار دارند. با نگاهی گذرا به فرآیند و ملزومات توسعه راه‌ها می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین و البته پر هزینه‌ترین مراحل اجرای یک جاده، طراحی و اجرای پل‌های مسیر است. از سویی دیگر، تعداد زیادی از پل‌هایی که در مسیر راه‌ها و جاده‌ها احداث می‌شود، پل‌هایی است که صرفاً در محل تقاطع جاده با مسیل یا رودخانه قرار دارند و هدف از طراحی آنها، عبور جریان‌های سطحی (اعم از دائمی و غیردائمی)، به گونه‌ای امن و مطمئن از کنار جاده می‌باشد. در سال‌های اخیر بارها مشاهده شده است که این سازه‌ها، اهداف طراحی را آنگونه که باید، محقق نکرده‌اند. برای نمونه، این اشاره کافی است که در طول سال‌های 1973 تا 2003 بیش از 1000 پل در ایالات متحده تخریب شده‌اند که عامل 60 درصد از این تخریب‌ها لحاظ نکردن ملاحظات هیدرولیکی جریان-های عبوری است [6].

تحت شرایطی، عبور جریان آب از بین پایه‌های پل، سبب وقوع پدیده فرسایش در اطراف پایه می‌شود که در صورت عدم پیش‌بینی آن و پنهان ماندن آن در ملاحظات طراحی می‌تواند منجر به کاهش پایداری سازه و حتی در مواردی تخریب سازه پل گردد. در این فصل ضمن تعریف مختصر آب‌شستگی، اشاره ای به انواع و روش‌های محافظت سازه در برابر این پدیده خواهد شد.

1-2- تعریف آب‌شستگی¹

هر ذره رسوبی دارای حد آستانه حرکتی است (می‌توان این حد را با رویکردهایی چون سرعت و یا تنش برشی تعریف کرد) که اگر شرایط جریان به گونه‌ای باشد که ذره را به این حد یا بالاتر از آن برساند، در این صورت ذره شروع به حرکت و انتقال از یک ناحیه به ناحیه دیگر می‌کند. این پدیده مبنای فرآیندی است که منجر به فرسایش بستر یا وقوع پدیده آب‌شستگی می‌گردد.

1-3- انواع آب‌شستگی

1-3-1- آب‌شستگی عمومی² (کف کنی یا بالا آمدن بستر)

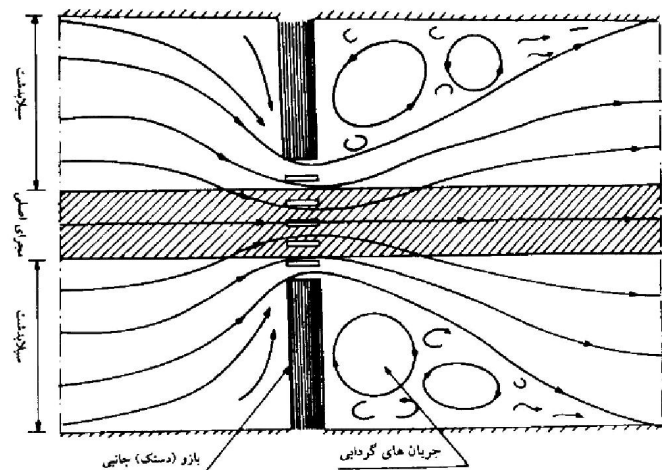
چنانچه شرایط جریان به گونه‌ای باشد که مقدار رسوب وارد شده به رودخانه و یا قسمتی از آن، از مقدار رسوب خارج شده کمتر باشد، فرسایش در کف یا دیواره رودخانه صورت می‌گیرد. در اثر این عمل، کف رودخانه به تدریج گود می‌شود، که آن را کف کنی می‌گویند. پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها از محل‌هایی هستند که همواره تحت تاثیر کف کنی قرار می‌گیرند. زیرا سدهای مخزنی مقدار زیادی از رسوبات حمل شده توسط رودخانه را در پشت خود ته‌نشین کرده و در نتیجه آب تقریباً بدون رسوب از سد خارج می‌شود. از آنجایی که این آب قدرت فرسایش و حمل رسوب بالایی را دارد، در صورت عدم وجود تمهیدات لازم، فرسایش صورت گرفته و در نتیجه با حمل مواد رسوب به پایین دست، به تدریج بستر رودخانه گود خواهد شد و کف کنی اتفاق می‌افتد. برعکس معمولاً در پشت سدها به علت کاهش سرعت جریان آب، مقدار زیادی از رسوبات ته‌نشین می‌شوند که این پدیده را افزایش یا بالا آمدن بستر می‌گویند. البته لازم به ذکر است علاوه بر شرایط فوق، در شرایطی نظیر عبور جریان‌های بزرگ (به ویژه در مواقع سیلابی) نیز این حالت فرسایش اتفاق خواهد افتاد [7].

¹ Scour

² General Scour

1-3-2- آب شستگی در اثر کاهش مقطع¹

کاهش سطح مقطع رودخانه به علت وجود تکیه گاه‌های پل یا علل دیگر موجب آب شستگی می‌گردد. تنگ شدن مسیر جریان در محل احداث پل، باعث بالا آمدن سطح آب در بالا دست پل و افزایش سرعت جریان می‌شود (شکل 1-1). در نتیجه این عمل، پتانسیل حمل رسوب و یا شدت فرسایش بستر افزایش می‌یابد [1].



شکل (1-1): کاهش مقطع رودخانه که منجر به افزایش سرعت در مقطع پل می‌شود [1]

1-3-3- آب شستگی طبیعی²

پدیده آب شستگی طبیعی در بسیاری از رودخانه‌ها با بستر متحرک بوجود می‌آید. مواردی نظیر فرسایش ناپذیر بودن کناره‌های رودخانه و یا یک انحنای مسیر رودخانه باعث تشدید آب شستگی طبیعی در بستر رودخانه می‌شود، زیرا در محل پیچ رودخانه، جریان آب مواد بستر و کناره‌ها را از قسمت خارجی خم شسته و در قسمت داخلی خم ترسیب می‌کند [7].

1-3-4- آب شستگی موضعی³

بطور کلی این نوع آب شستگی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، در محل پایه‌های پل و به طور کلی هر مکانی که آشفتگی جریان افزایش یابد، بوجود می‌آید. وجود پایه‌های پل در مسیر جریان باعث تغییر الگوی جریان و ایجاد یک حفره آب شستگی در اطراف پایه‌ها می‌شود. این نوع آب شستگی را آب شستگی موضعی می‌گویند [1].

¹ Contraction Scour

² Natural Scour

³ Local Scour

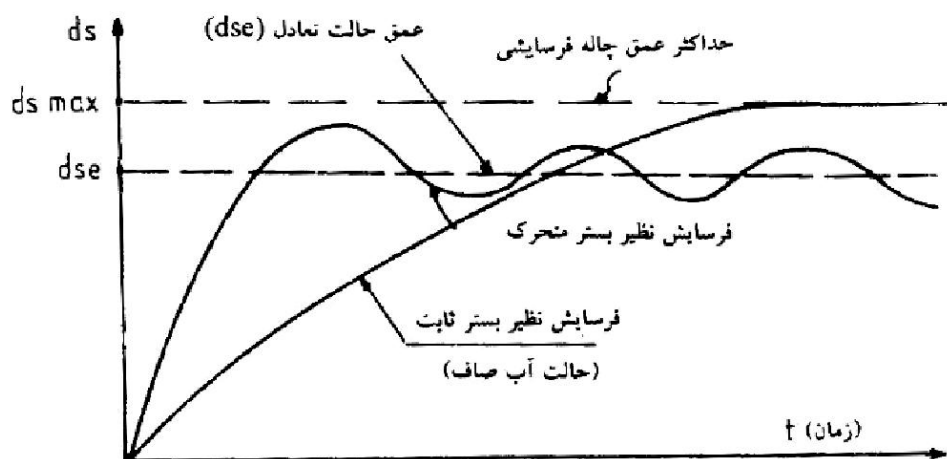
در شرایط آب‌شستگی موضعی یا انقباضی، بسته به شرایط انتقال رسوب از بالادست ناحیه مورد فرسایش، دو حالت وجود خواهد داشت.

الف- آب‌شستگی آب زلال¹

آب‌شستگی آب زلال موقعی اتفاق می‌افتد که مصالح بستر بالادست هیچگونه حرکتی ندارند یعنی اینکه شرایط جریان در بستر افقی به آستانه حرکت نرسیده است، اما شتاب جریان و گرداب‌های ایجاد شده در محل پایه‌های پل سبب حرکت مصالح از جای خود می‌شوند. چاپرت و انگل‌دینگر (1956) دریافتند که در آب‌شستگی آب زلال، عمق آب‌شستگی یک رابطه تقریباً خطی با نیروی برشی و یا سرعت جریان در بالادست دارد و هر چه سرعت جریان زیادتر شود عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد، تا اینکه سرعت به نقطه بحرانی خود که آستانه حرکت ذرات در بالادست است، می‌رسد. تا این لحظه رسوباتی از بالا دست وارد حفره نمی‌شود، ولی از این به بعد حرکت رسوبات از بالادست شروع می‌شود و مقداری از حفره توسط رسوبات بالادست پر می‌شود و عمق ماکزیمم کاهش می‌یابد [8].

ب- آب‌شستگی بستر زنده²

در این حالت، شرایط جریان در بستر افقی از شرایط آستانه حرکت عبور کرده و در نتیجه حرکت عمومی مصالح بستر وجود دارد. به دلیل وجود جریان‌های گردابی تولید شده در محل پایه‌های پل، مقدار فرسایش در ابتدا زیاد می‌باشد و پس از مدتی آب‌شستگی به حالت تعادل می‌رسد. در این حالت به دلیل انتقال رسوب از بالادست به داخل موضع آب‌شستگی، عمق آب‌شستگی نسبت به زمان، تغییرات تقریباً نوسانی حول عمق تعادل آب‌شستگی خواهد داشت (شکل 1-2) [8].



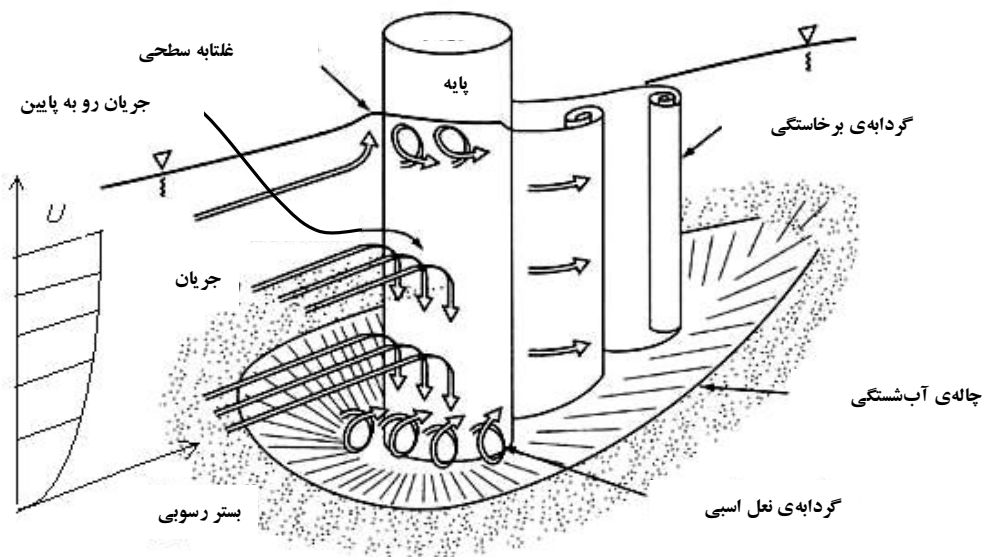
شکل (1-2): تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی با زمان در شرایط آب زلال و بستر زنده [1]

¹ Clear Water

² Live Bed

1-4-4- الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی موضعی

به طور کلی در محل پایه‌های پل دو عامل اساسی موجب تشکیل گرداب‌هایی در اطراف پایه می‌شود که این گرداب‌ها باعث آبشستگی می‌گردند. این دو عامل عبارتند از؛ برخورد جریان به پایه و جدایی جریان آب از پایه پل [6]. برخورد جریان به پایه موجب جریان رو به پایین و در نتیجه ایجاد گرداب نعل اسبی می‌شود و جدایی جریان در پشت پایه نیز موجب ایجاد گرداب‌هایی می‌شود که به گرداب‌های برخاستی معروفند. شکل (1-3) الگوی جریان و گرداب‌های مذکور را به وضوح نشان می‌دهد [6].



شکل (1-3): الگوی جریان در اطراف پایه

1-4-4-1- جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی¹

هنگامی که جریان آب به پایه برخورد می‌کند، سرعت جریان در نقاط تماس صفر می‌شود. این فرآیند موجب پدید آمدن گرادیان فشاری در جلو پایه می‌شود که منجر به جریان رو به پایینی در جلو پایه می‌گردد. جریان رو به پایین همانند یک جت عمودی آب، موجب حفر گودالی در جلوی پایه می‌شود. در اثر برخورد جریان به کف و مواجهه آن با جریان اصلی، گرداب اصلی به اطراف پراکنده می‌شود و سیستم گردابی را به وجود می‌آورد که به دلیل شباهت آن در پلان به نعل اسب به گرداب‌های نعل اسبی معروفند. قدرت این گرداب‌ها در ابتدا که عمق گودال آبشستگی کم است، کوچک است، اما به تدریج که عمق گودال افزایش پیدا می‌کند، شدت گرداب‌های نعل اسبی نیز فزونی می‌یابد،

¹ Horse Shoe Vortex

تا جایی که تمام انرژی جریان رو به پایین در حفره آب شستگی مستهلک شود. در این شرایط عمق آب شستگی به تعادل خود می‌رسد و دیگر رشد محسوسی نمی‌کند [6].

1-4-2- گرداب‌های برخاستی¹

به دلیل بالا بودن نسبی عدد رینولدز جریان در غالب جریان‌های مورد بحث، معمولاً گرادیان فشار کافی جهت وقوع پدیده جدایش لایه مرزی فراهم است و لذا تقریباً همیشه این پدیده در جریان اطراف پایه‌ها اتفاق می‌افتد. در اثر این جدایش جریان و نیز فشار منفی ایجاد شده در پشت پایه، گرداب‌هایی مطابق شکل (1-3) در پشت پایه تشکیل می‌شود. این ناحیه را ناحیه Wake و گرداب‌های بوجود آمده را گرداب‌های برخاستی می‌نامند. این گردابها عامل اصلی آب شستگی در پشت پایه‌اند. ترکیب اثر این گرداب‌ها و گرداب نعل اسبی موجب بروز یک حالت ناپایدار و نوسانی در جریان می‌شود. پر واضح است که هر چه شکل پایه آئرو دینامیکی تر باشد گرداب‌های برخاستی نیز ضعیف‌تر خواهند بود [7].

1-4-3- گرداب سطحی² در جلو پایه

همانطور که در شکل (1-3) دیده می‌شود گردابی نیز در نزدیکی سطح آب و در جلو پایه ایجاد می‌شود که جهت آن خلاف جهت گرداب نعل اسبی است. اهمیت این گرداب در جریان‌های کم عمق بیشتر می‌شود، چرا که به علت تداخل این گرداب با جریان اصلی، سرعت جریان و در نتیجه سرعت جریان رو به پایین کاهش می‌یابد [7].

1-5- روش‌های مختلف کنترل و کاهش عمق آب شستگی

1-5-1- کاهش قدرت فرسایش موضعی

در این روش، هدف کاهش قدرت فرسایش جریان است به طوری که مصالح با هر کیفیتی دچار فرسایش نشوند. با توجه به مطالب ارائه شده در قسمت‌های قبلی، مهمترین عوامل فرسایشی عبارتند از؛ جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستی. هر اقدامی که این عوامل را از بین ببرد و یا حداقل قدرت آنها را کم کند، در این دسته قرار می‌گیرد. جهت مقابله با آب شستگی به طریقه کاهش عوامل فرسایش سه روش اساسی وجود دارد که در زیر اجمالاً به آنها پرداخته می‌شود.

الف - استفاده از طوق³ یا پای ستون

طوق یک صفحه با ضخامت کم است که اطراف پایه را می‌پوشاند و به طور عمود بر پایه در تراز بستر یا نزدیک آن قرار می‌گیرد. نقش اصلی طوق جلوگیری از برخورد جریان رو به پایین به بستر رودخانه است. طرز عمل به این

¹ Wake Vortex

² Bow Wave

³ Collar