

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی زراعی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه شمع‌ها و فونداسیون بر روی آبشستگی  
اطراف گروه پایه کج

سیده سمیرا حسینی بستی

استاد راهنما:

دکتر رامین فضل‌اولی

استاد مشاور

دکتر مهدی اسمعیلی ورکی

بهمن ۱۳۹۳

## چکیده

با قرارگیری پایه‌های پل در مقابل جریان، گردابه‌هایی در مقابل آن شکل گرفته که در نتیجه فعالیت آنها مواد بستر پیرامون پایه فرسایش یافته و چاله آبشستگی شکل می‌گیرد و در صورت کافی نبودن عمق پی و شمع‌های پایه پل، شکست پل را به دنبال خواهد داشت. در تحقیق حاضر تاثیر ضخامت و تراز کارگذاری سرشمع و نیز هندسه گروه شمع بر مقدار آبشستگی اطراف گروه پایه کج بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی و به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۹۲ و عمق ۱ متر که دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف پلکسی‌گلاس بود، انجام شد. گروه پایه مورد بررسی متشکل از دو پایه کج مستطیلی با ابعاد ۲/۵ در ۳/۵ سانتیمتر که با زاویه ۲۸ درجه بر روی فونداسیونی (سر شمع) با ابعاد ۱۰ در ۱۶ سانتیمتر نصب گردید. آزمایش‌ها روی گروه شمع‌ها با قطرهای ۲ و ۳ سانتی‌متر در آرایش ۲×۲ و ۲×۳ و برای دو ضخامت سر شمع ۳ و ۵ سانتی‌متر و نیز رقوم نسبی مختلف کارگذاری فونداسیون (فاصله سر شمع تا سطح بستر نسبت به ضخامت سر شمع)، ۱/۵، ۱، صفر و در حالت مدفون ۰/۷-۱/۲- انجام شد. در مجموع به منظور بررسی تاثیر هندسه شمع‌ها و سرشمع و نیز رقوم کارگذاری بر توسعه آبشستگی اطراف گروه پایه کج ۴۰ آزمایش انجام شد. مقایسه تغییرات توسعه زمانی آبشستگی گروه‌شمع‌ها با آرایش و قطرهای مختلف در رقوم‌های کارگذاری مورد بررسی نشان داد زمانی که سر شمع بالای سطح بستر قرار گیرد ( $Z/T_{pc}$ ، ۱/۵ و ۱) به جهت امکان عبور جریان از فضای زیر شمع، هندسه شمع‌های تاثیر معنی‌داری بر توسعه زمانی عمق آبشستگی و حداکثر آن دارد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری در تراز کارگذاری  $Z/T_p = 1.5$  مشابه تراز  $Z/T_p = 1$  بوده و مقدار عمق آبشستگی بطور متوسط ۵ درصد کاهش یافته، که دلیل آن را می‌توان افزایش مساحت مقطع عبوری جریان در زیر سر شمع بیان نمود. در تراز  $Z/T_{pc} = 0$  مقدار عمق آبشستگی با افزایش قطر و تعداد شمع‌ها نسبت به تراز  $Z/T_{pc} = -0.5$  به میزان ۴ درصد کاهش یافت. تغییرات توسعه زمانی آبشستگی در تراز کارگذاری سر شمع  $Z/T_{pc}$ ، ۰/۷- و ۱/۲- حاکی از آن است، چاله آبشستگی در مدت زمان کمتر از ۱۰ درصد زمان تعادل (۴۰ دقیقه ابتدایی) به روی سر شمع رسیده و متوقف می‌شود. مقایسه تاثیر ضخامت سر شمع بر حداکثر عمق آبشستگی در هر ترازگذاری نشان می‌دهد، در تراز کارگذاری ۱/۵، آرایش ۲×۳، و قطر نسبی ۰/۶، با افزایش ضخامت نسبی از ۰/۹ به ۱/۴ بیشترین تغییر آبشستگی به میزان ۲۳ درصد و در تراز کارگذاری ۰/۵- کمترین مقدار تغییر آبشستگی به میزان ۱۲ درصد می‌باشد. در ترازهای بالای بستر با افزایش قطر به طور متوسط ۸ درصد مقدار عمق آبشستگی افزایش یافته و در ترازهای صفر و ۰/۵- مقدار آبشستگی به طور متوسط ۶ درصد کاهش می‌گردد. زمانی که فونداسیون پایین‌تر از بستر قرار گیرد گروه شمع تاثیری بر مقدار آبشستگی ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** آبشستگی، گروه پایه کج، گروه شمع، تراز کارگذاری

## فهرست مطالب

### عنوان

### فصل اول - مقدمه و کلیات

### شماره صفحه

۱-۱-مقدمه.....	۱
۲-۲-تعاریف مقدماتی.....	۱
۱-۲-۱-تعریف آبشستگی.....	۱
۲-۲-۱-انواع آبشستگی.....	۲
۱-۲-۲-۱-آبشستگی عمومی.....	۳
۲-۲-۲-۱-آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی.....	۵
۳-۲-۲-۱-آبشستگی موضعی.....	۵
۴-۲-۲-۱-آبشستگی در آب زلال و آب حاوی رسوب.....	۶
۵-۲-۲-۱-آبشستگی استاتیکی و دینامیکی.....	۶
۶-۲-۲-۱-آبشستگی دریایی.....	۶
۷-۲-۲-۱-آبشستگی ناشی از قایقرانی.....	۷
۳-۱-الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل.....	۷
۴-۱-مکانیزم آبشستگی گروه پایه.....	۱۰
۵-۱-تغییرات زمان آبشستگی.....	۱۰
۶-۱-ضرورت انجام تحقیق.....	۱۱
۷-۱-فرضیات این تحقیق.....	۱۲
۸-۱-روش انجام تحقیق و نحوه تدوین پایان نامه.....	۱۲

### فصل دوم - بررسی منابع

۱-۲-مقدمه.....	۱۴
۲-۲-مروری بر مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی آبشستگی اطراف پایه‌های پل.....	۱۴
۳-۲-مروری بر مطالعات تجربی و آزمایشگاهی در خصوص بررسی تاثیر گروه شمع بر عمق آبشستگی.....	۳۰

### فصل سوم - مواد و روش‌ها

۱-۳-مقدمه.....	۳۹
۲-۳-تجزیه و تحلیل ابعادی.....	۳۹
۳-۳-تجهیزات آزمایشگاهی.....	۴۰
۱-۳-۳-فلوم آزمایشگاهی.....	۴۰
۲-۳-۳-سیستم تامین آب و اندازه‌گیری جریان.....	۴۱

۴۲	.....سیستم اندازه‌گیری عمق.....	۳-۳-۳
۴۳	.....دانه‌بندی رسوبات بستر.....	۳-۳-۴
۴۴	.....هندسه پایه پل.....	۳-۳-۵
۴۵	.....گروه شمع.....	۳-۳-۶
۴۵	.....روش انجام آزمایش.....	۳-۴-۴
۴۵	.....مقدمه.....	۳-۴-۱
۴۵	.....آزمایش تعیین آستانه حرکت.....	۳-۴-۲
۴۷	.....دامنه پارامترهای مورد بررسی.....	۳-۴-۳
۴۷	.....روش انجام آزمایش‌ها.....	۳-۴-۴
۴۹	.....تزریق مواد رنگی.....	۳-۴-۵

#### فصل چهارم - نتایج

۵۱	.....مقدمه.....	۴-۱-۱
۵۱	.....بررسی تغییرات چاله آبستگي در تراز نسبي کارگذاری $(Z/T_{pc})$ ، $-۰/۷$ و $-۱/۲$ .....	۴-۲-۲
۵۵	.....بررسی تغییرات چاله آبستگي در تراز نسبي کارگذاری $(Z/T_{pc})$ ، $-۰/۵$ .....	۴-۳-۳
۵۹	.....بررسی تغییرات چاله آبستگي در تراز نسبي کارگذاری $(Z/T_{pc})$ ، صفر.....	۴-۳-۳
۶۳	.....بررسی تغییرات چاله آبستگي در تراز نسبي کارگذاری $(Z/T_{pc})$ ، ۱.....	۴-۴-۴
۶۷	.....بررسی تغییرات چاله آبستگي در تراز نسبي کارگذاری $(Z/T_{pc})$ ، $۱/۵$ .....	۴-۵-۴

#### فصل پنجم - بحث و نتیجه‌گیری

۷۵	.....مقدمه.....	۵-۱-۱
۷۵	.....جمع‌بندی نتایج توسعه زمانی آبستگي.....	۵-۲-۲
۷۶	.....جمع‌بندی نتایج تاثیر تراز کارگذاری سر شمع بر حداکثر عمق آبستگي.....	۵-۳-۳
۷۸	.....جمع‌بندی نتایج تاثیر ضخامت سر شمع بر حداکثر عمق آبستگي.....	۵-۴-۴
۸۱	.....جمع‌بندی نتایج تاثیر تغییر قطر شمع‌ها بر حداکثر عمق آبستگي.....	۵-۵-۵
۸۲	.....ارائه پیشنهادات.....	۵-۶-۵

## فهرست تصاویر

شماره صفحه	عنوان
۲	شکل ۱-۱- مراحل توسعه حفره آبخستگی.....
۳	شکل ۱-۲- اجزای آبخستگی (ماسون، ۱۹۹۳).....
۴	شکل ۱-۳- فرسایش ساحل و بستر رودخانه در محل قوس یک رودخانه.....
۴	شکل ۱-۴- نمایی از آبخستگی جداره خارجی خم رودخانه و جریان ثانویه (ماسون، ۱۹۹۳).....
۵	شکل ۱-۵- الگوی جریان، رسوب گذاری و فرسایش در تقاطع دو رودخانه.....
۹	شکل ۱-۶- الگوی جریان در اطراف یک پایه استوانه‌ای (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱).....
۹	شکل ۱-۷- محل تشکیل گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه‌های استوانه‌ای و جهت تشکیل این گرداب‌ها.....
۸	شکل ۱-۸- الگوی سه بعدی جریان اطراف پایه پل.....
۱۱	شکل ۱-۹- بررسی تغییرات عمق آبخستگی با زمان و سرعت جریان بین آبخستگی آب زلال و آبخستگی بستر متحرک (رادکیوی و اتما ۱۹۸۳).....
۱۲	شکل ۱-۱۰- نمایی از پل هشتم اهواز.....
۱۶	شکل ۲-۱- حالت‌های مختلف شکل‌های پایه پل.....
۱۶	شکل ۲-۲- زاویه محور پایه با جهت جریان.....
۱۸	شکل ۲-۳- تصحیح برای نسبت قطر پایه به قطر متوسط رسوبات (اتما ۱۹۸۰).....
۱۹	شکل ۲-۴- ضریب $K_{\sigma}$ به‌عنوان تابعی از انحراف استاندارد هندسی $\delta g$ ذرات (رادکیوی و اتما ۱۹۸۳).....
۲۰	شکل ۲-۵- نمودار ضریب تصحیح زاویه برخورد جریان (ملویل و ساترلند ۱۹۸۸).....
۲۲	شکل ۲-۶- چگونگی تخمین پارامتر $T_1$ .....
۲۵	شکل ۲-۷- توصیف پارامترهای هندسی شمع و فونداسیون.....
۲۶	شکل ۲-۸- مقایسه تاثیر ارتباط بین ارتفاع و توسعه طولی فونداسیون در عمق آبخستگی با استفاده از معادله ملویل و ساترلند (۱۹۸۸) در $a_p / a_f = 0.5$ و $y_s / a_f = 2$ .....
۲۶	شکل ۲-۹- داده‌های تجربی برای برهمکنش پایه و توسعه بالادست با $y_s / a_f = 2$ و $z / a_f = 0.07$ .....
۳۰	شکل ۲-۱۰- اجزای پایه‌های مرکب.....
۳۱	شکل ۲-۱۱- نسبت آبخستگی پایه پل معلق.....
۳۲	شکل ۲-۱۲- سرشمع هم‌تراز با بستر.....
۳۳	شکل ۲-۱۳- توصیف شماتیک پارامترهای موثر در حالت قرارگیری سرشمع روی بستر.....
۳۳	شکل ۲-۱۴- عرض تصویر شده شمع برای حالت کلی از جریان اریب.....
۳۴	شکل ۲-۱۵- ضریب فاصله شمع‌ها (زیچاردسون و دیویس، ۱۹۹۵).....
۳۴	شکل ۲-۱۶- همسازی ضریب برای همراستا بودن ردیف شمع‌ها (زیچاردسون و دیویس، ۱۹۹۵).....
۳۵	شکل ۲-۱۷- همسازی ارتفاع سر شمع با ضریب (زیچاردسون و دیویس، ۱۹۹۵).....
۳۶	شکل ۲-۱۸- مولفه‌های پایه واقع شده در مسیر جریان با ارتفاع مختلف سر شمع.....

- شکل ۲-۱۹- نمودار تغییرات شماتیک آبخستگی بر حسب (۷) ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۰- مدل پایه مرکب مورد استفاده در تحقیق‌های کلمن (۲۰۰۵) ..... ۳۸
- شکل ۲-۲۱- تعریف قطر موثر اجزاء یک پایه مرکب ..... ۳۸
- شکل ۳-۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده الف) طرح کلی فلوم و ب) نمای داخل فلوم ..... ۴۰
- شکل ۳-۲- نمایی از پمپ سانتریفیوژ ..... ۴۱
- شکل ۳-۳- نمایی از سرریز لبه تیز مثلی ..... ۴۱
- شکل ۳-۴- منحنی دبی- اشل سرریز فلوم آزمایشگاهی ..... ۴۲
- شکل ۳-۵- نمایی از متر لیزری ..... ۴۲
- شکل ۳-۶- تصویری از دستگاه عمق سنج لحظه‌ای ..... ۴۳
- شکل ۳-۷- نمایی از ترازهای مختلف کارگذاری در حالت آرایش شمع‌های ۲×۳ ..... ۴۴
- شکل ۳-۸- نمایی از مراحل تراز نمودن بستر و فونداسیون ..... ۴۳
- شکل ۳-۹- نحوه قرارگیری شمع در حالت‌های مختلف در یک تراز آرایش و قطر و ضخامت سر شمع ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۰- دیاگرام شیلدز ..... ۴۶
- شکل ۳-۱۱- توسعه زمانی آبخستگی در تراز  $Z/T_p = 1$  ..... ۴۹
- شکل ۳-۱۲- نحوه ورود اولیه آب به فلوم ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۳- نمایی از آشکار سازی الگوی جریان در ترازهای مختلف ..... ۴۹
- شکل ۴-۱- توسعه زمانی آبخستگی در آرایش و قطر مختلف در  $Z/T_p = 0.7, 1.2$  ..... ۵۲
- شکل ۴-۲- آشکار سازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = 0.7, 1.2$  ..... ۵۲
- شکل ۴-۳- نیمرخ نهایی آبخستگی و حداکثر مقدار آبخستگی برای آرایش و قطر مختلف ..... ۵۳
- شکل ۴-۴- توپوگرافی بستر نهایی آبخستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 3\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0.7, 1.2$  ..... ۵۳
- شکل ۴-۵- توپوگرافی بستر نهایی آبخستگی برای هندسه شمع  $2 \times 3$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 5\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0.7, 1.2$  ..... ۵۴
- شکل ۴-۶- توپوگرافی بستر نهایی آبخستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 2\text{cm}$ ,  $PC = 3\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0.7, 1.2$  ..... ۵۴
- شکل ۴-۷- توپوگرافی بستر نهایی آبخستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 5\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0.7, 1.2$  ..... ۵۴
- شکل ۴-۸- توسعه زمانی آبخستگی در آرایش و قطر مختلف در  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۹- آشکار سازی الگوی جریان با ضخامت سر شمع ۳ سانتیمتر در تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۰- آشکار سازی الگوی جریان با ضخامت سر شمع ۵ سانتیمتر در تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۱- نیمرخ نهایی و حداکثر مقدار آبخستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۳ سانتیمتر ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۲- نیمرخ نهایی آبخستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۵ سانتیمتر ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۳- توپوگرافی بستر نهایی آبخستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 3\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۴- توپوگرافی بستر نهایی آبخستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 5\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۸

- شکل ۴-۱۵- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 3cm, d_p = 3cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۶- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 5cm, d_p = 2cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = -0.5$  ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۷- توسعه زمانی آبشستگی در آرایش و قطر مختلف در  $Z/T_p = 0$  ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۸- آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = 0$  ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۹- نیمرخ نهایی آبشستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۳ سانتیمتر ..... ۶۶۱
- شکل ۴-۲۰- نیمرخ نهایی آبشستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۵ سانتیمتر ..... ۶۱
- شکل ۴-۲۱- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 3cm, d_p = 3cm, 2 \times 2$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۲- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 5cm, d_p = 3cm, 2 \times 2$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۳- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 3cm, d_p = 2cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۴- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 5cm, d_p = 3cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 0$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۵- توسعه زمانی آبشستگی در آرایش و قطر مختلف در  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۶۳
- شکل ۴-۲۶- آشکارسازی الگوی جریان در ضخامت ۳ سانتی متر برای تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۷- آشکارسازی الگوی جریان در ضخامت ۵ سانتی متر برای تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۸- نیمرخ نهایی و حداکثر مقدار آبشستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۳ سانتیمتر ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۹- نیمرخ نهایی و حداکثر مقدار آبشستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۵ سانتیمتر ..... ۶۵
- شکل ۴-۳۰- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 3cm, d_p = 3cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۱- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 5cm, d_p = 3cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۲- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 3cm, d_p = 3cm, 2 \times 2$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۳- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 5cm, d_p = 3cm, 2 \times 2$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 1$  ..... ۶۷
- شکل ۴-۳۴- توسعه زمانی آبشستگی در آرایش و قطر مختلف در  $Z/T_p = 1.5$  ..... ۶۷
- شکل ۴-۳۵- آشکارسازی الگوی جریان در تراز نسبی کارگذاری  $Z/T_p = 1.5$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۳۶- نیمرخ نهایی و حداکثر مقدار آبشستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۳ سانتیمتر ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۷- نیمرخ نهایی و حداکثر مقدار آبشستگی برای آرایش و قطر مختلف در سر شمع ۵ سانتیمتر ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۸- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 3cm, d_p = 3cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 1.5$  ..... ۷۰
- شکل ۴-۳۹- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $PC = 5cm, d_p = 3cm, 2 \times 3$  در عمق کارگذاری  $Z/T_p = 1.5$  ..... ۷۰



- شکل ۴-۴۰- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 3\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z / T_p = 1.5$  ..... ۷۰
- شکل ۴-۴۱- توپوگرافی بستر نهایی آبشستگی برای هندسه شمع  $2 \times 2$ ,  $d_p = 3\text{cm}$ ,  $PC = 5\text{cm}$  در عمق کارگذاری  $Z / T_p = 1.5$  ..... ۷۱
- شکل ۵-۱- حداکثر عمق آبشستگی در آرایش  $2 \times 2$  در ضخامت ۳ سانتی‌متر ..... ۷۷
- شکل ۵-۲- حداکثر عمق آبشستگی در آرایش  $2 \times 3$  در ضخامت ۳ سانتی‌متر ..... ۷۴
- شکل ۵-۳- حداکثر عمق آبشستگی در آرایش  $2 \times 2$  در ضخامت ۵ سانتی‌متر ..... ۷۷
- شکل ۵-۴- حداکثر عمق آبشستگی در آرایش  $2 \times 3$  در ضخامت ۵ سانتی‌متر ..... ۷۸
- شکل ۵-۵- تاثیر ضخامت سر شمع بر حداکثر عمق آبشستگی در تراز  $Z / T_p = 1.5$  ..... ۷۹
- شکل ۵-۶- تاثیر ضخامت سر شمع بر حداکثر عمق آبشستگی در تراز  $Z / T_p = 1$  ..... ۷۹
- شکل ۵-۷- تاثیر ضخامت سر شمع با حداکثر عمق آبشستگی در تراز  $Z / T_p = 0$  ..... ۷۹
- شکل ۵-۸- تاثیر ضخامت سر شمع بر حداکثر عمق آبشستگی در تراز  $Z / T_p = -0.5$  ..... ۷۹
- شکل ۵-۹- تاثیر ضخامت سر شمع بر حداکثر عمق آبشستگی در تراز  $Z / T_p = -0.7, -1.2$  ..... ۸۰

## فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۲- شکل $k_s$ برای پایه با شکل‌های مختلف (ساترلندو ملویل ۱۹۸۸).....	۲۱
جدول ۱-۳- دامنه پارامترهای مورد بررسی.....	۴۷
جدول ۱-۵- توسعه زمانی آبشستگی برای شرایط مختلف هندسی در زمان‌های مشخص.....	۷۶
جدول ۲-۵- حداکثر عمق آبشستگی در در ترازهای مختلف.....	۷۸
جدول ۳-۵- مقایسه تاثیر ضخامت بر حداکثر عمق نسبی.....	۸۰
جدول ۴-۵- مقایسه تاثیر قطر بر حداکثر عمق نسبی.....	۸۱

# فصل اول

## مقدمه و کلیات

## ۱-۱- مقدمه

بحث آبشستگی قدمتی طولانی در علم هیدرولیک داشته و به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و همچنین به دلیل نبودن رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد، همچنان مورد توجه خاص محققین علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه می‌باشد.

با احداث سازه‌ها در مسیر حرکت آب، الگوی جریان در مجاورت سازه تغییر یافته و در نتیجه در صورت فرسایش‌پذیر بودن بستر، آبشستگی رخ می‌دهد. اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبشستگی قابل ملاحظه باشد به گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای رسیده و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار دهد یا موجب تخریب آن‌ها گردد.

روش‌ها که معمولاً برای تعیین میزان عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌باشد.

از مدل‌های فیزیکی به عنوان یک کمک برای طراحی در مراحل اولیه استفاده می‌گردد. بسیاری از پدیده‌های هیدرولیک که در طبیعت رخ می‌دهد، بیش از حد پیچیده بوده و نیاز است با مدل‌سازی فیزیکی آن‌ها پارامترهای مهم شناسایی و مکانیزم‌های مهم حاکم بر پدیده مطالعه شوند (ریچاردسون، ۱۹۸۹).

مدل‌های عددی اساساً مبتنی بر تئوری‌ها و روابط ریاضی می‌باشد. در ابتدا با استفاده از روابط مربوط به فرسایش و تئوری‌های ارائه شده در رابطه با هیدرولیک پل‌ها و آبشستگی، یک مدل ریاضی تهیه می‌گردد. پس از این مرحله و با توجه به مدل ریاضی تهیه شده، یک مدل کامپیوتری که قابل انطباق با شرایط و حالات مختلف آبشستگی باشد، ساخته می‌شود (ریچاردسون، ۱۹۸۹).

با بازرسی صحرایی پل‌های ساخته شده، ارزیابی و ضمن گردآوری داده‌های آبشستگی، سازه موردنظر در برابر تهدیدات آبشستگی، طرح حفاظتی تدوین می‌گردد. البته باید توجه داشت که تجهیزات دارای قابلیت رفتارسنجی آبشستگی مورد استفاده در این روش، بسیار گران و پرهزینه می‌باشند (پیس و هی، ۱۹۹۳).

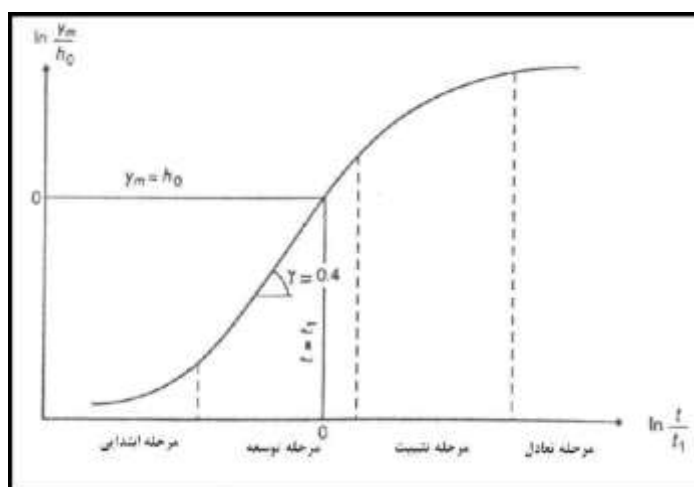
## ۱-۲- تعاریف مقدماتی

### ۱-۲-۱- تعریف آبشستگی

آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به طور کلی آبشستگی در اثر اندرکنش نیروی محرک ناشی از جریان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می‌کند و نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن ذره که در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می‌شود، می‌باشد (ریچاردسون، ۱۹۸۹).

حرکت یک ذره هنگامی آغاز می‌شود که نیروهای اعمال شده توسط جریان یعنی نیروی کششی و بالابرنده که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروی مقاوم ذره غالب آید.

بر اساس مطالعاتی که توسط محققینی نظیر بروسرز (۱۹۶۶)، دیتز (۱۹۶۹) و زنک (۱۹۷۸) انجام گرفته است، پدیده آبشستگی به طور کلی دارای چهار مرحله ابتدایی<sup>۱</sup>، توسعه<sup>۲</sup>، تثبیت<sup>۳</sup> و تعادل<sup>۴</sup> است (شکل ۱-۱). مرحله اول ظرفیت آبشستگی بالایی دارد و حفره آبشستگی در این مرحله آغاز می‌شود. در مرحله دوم عمق و ابعاد حفره آبشستگی گسترش می‌یابد. در مرحله سوم روند تغییرات نیمرخ بستر کاهش می‌یابد. در این مرحله، دیواره پایین دست حفره آبشستگی دستخوش تغییرات محسوسی می‌شود. در مرحله چهارم که مرحله تعادل است، تنها حرکت ذرات ممکن است درون حفره آبشستگی صورت گیرد به طوری که ذراتی که حرکت غلطشی دارند از درون حفره آبشستگی خارج نمی‌شوند. در این مرحله، با توجه به شرایط جریان، ممکن است حتی جابجایی ذرات نیز متوقف شود.



شکل ۱-۱- مراحل توسعه حفره آبشستگی

### ۱-۲-۲- انواع آبشستگی

آبشستگی از جنبه‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. از نظر علت به وجود آمدن، آبشستگی به سه دسته عمومی، آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع و آبشستگی موضعی، طبقه‌بندی می‌گردد. از مجموع این سه آبشستگی، عمق آبشستگی کل به دست می‌آید (شکل ۱-۲).

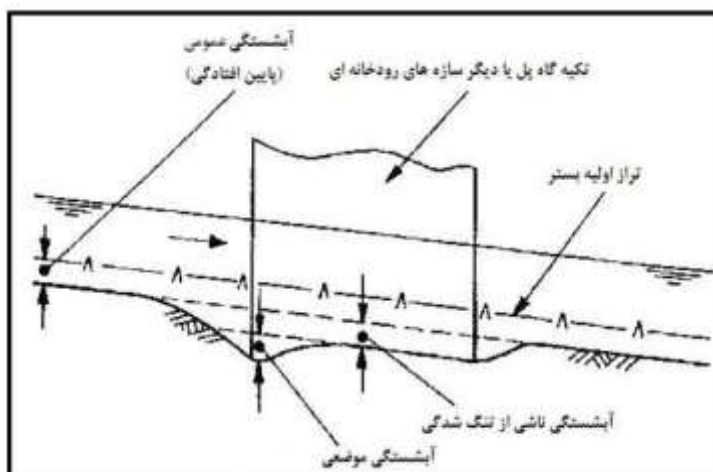
آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب، به حالت آب زلال و آب حاوی رسوب دسته‌بندی می‌شود، همچنین آبشستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره آبشستگی به آبشستگی استاتیکی و دینامیکی طبقه‌بندی می‌شود. علاوه بر این، موارد دیگری از انواع آبشستگی مانند آبشستگی دریایی و آبشستگی ناشی از قایقرانی نیز وجود دارد. در ادامه هر یک از انواع دسته‌بندی‌های آبشستگی تشریح می‌گردد.

<sup>1</sup> Initial Phase

<sup>2</sup> Development Phase

<sup>3</sup> Stabilization Phase

<sup>4</sup> Equilibrium Phase



شکل ۱-۲-۱- اجزای آبشستگی (ماسون، ۱۹۹۳)

### ۱-۲-۲-۱- آبشستگی عمومی<sup>۱</sup>

این نوع آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که جریان در بازه‌ای از رودخانه قادر باشد ذرات بستر را در طول مسیر جابجا و با خود حمل کند و در نتیجه باعث کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه می‌شود. آبشستگی عمومی شامل پایین‌افتادگی تراز رودخانه، مهاجرت جانبی رودخانه (جابجایی رودخانه در پلان)، آبشستگی در قوس رودخانه‌ها و پیچان‌رودها و آبشستگی در محل اتصال رودخانه‌ها و انشعاب‌ها، می‌شود. این نوع از آبشستگی‌ها به طور مستقیم به مشخصات حوضه آبریز و شکل رودخانه وابسته‌اند (کوتیاری و همکاران، ۱۹۹۲).

پایین‌افتادگی<sup>۲</sup> بستر رودخانه‌ها، در اثر فرسایش طولانی مدت در بستر رودخانه‌ها می‌باشد. پایین‌افتادگی تراز بستر به صورت یک پایین‌افتادگی کلی در بازه‌ای از رودخانه ظاهر می‌شود. این پایین‌افتادگی سبب می‌شود که رودخانه شیب طولی خود را به منظور تطبیق با نیازهای جریان و بار رسوبی حمل شده توسط جریان، تنظیم نماید. اگر بار رسوبی ورودی به بازه مورد نظر کم‌تر از ظرفیت حمل واقعی در آن بازه باشد، پایین‌افتادگی بستر از بالادست بازه آغاز شده و به پایین‌دست توسعه می‌یابد و منجر به کاهش شیب طولی کلی بازه می‌گردد. اما اگر آبراهه در پایین‌دست بازه مورد بحث، دارای ظرفیت حمل رسوب بیش‌تری باشد، پایین‌افتادگی از قسمت پایین‌دست بازه مورد نظر شروع و به بالادست پیشروی می‌نماید و موجب افزایش شیب بازه مورد نظر می‌گردد.

جابجایی آبراهه ممکن است به طور طبیعی یا در نتیجه فعالیت‌های بشری اتفاق بیفتد. جابجایی بخشی از آبراهه به عنوان قسمتی از فرآیند پیشروی پیچان‌رود یا جابجایی بخش عمیق آبراهه به سمت جداره‌های آبراهه، می‌تواند مشکلاتی را برای رودخانه و سازه‌های هیدرولیکی مربوط به همراه داشته باشد. نمونه‌ای از فرسایش ساحل و بستر رودخانه در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. در بعضی موارد مانند وقوع سیلاب، جابجایی آبراهه ممکن است به سرعت اتفاق افتد. ولی در موارد دیگر ممکن است این امر به صورت تدریجی حادث شود. در نظر گرفتن پتانسیل جابجایی آبراهه، بخش مهمی از طراحی سازه‌های مرتبط با رودخانه است

<sup>۱</sup> General Scour

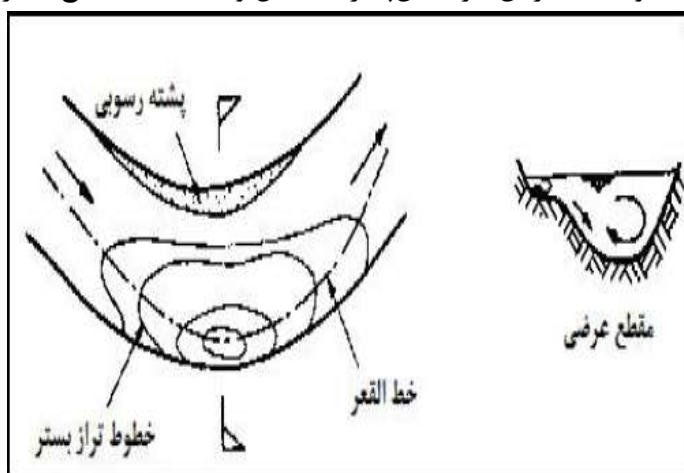
<sup>۲</sup> Degradation

به‌طور کلی اگر پتانسیل جابجایی رودخانه وجود داشته باشد، پی‌ها باید بر اساس جابجایی آبی بستر رودخانه طراحی شوند. همچنین با بررسی احتمال جابجایی بستر رودخانه در آینده، روش‌های حفاظتی و ساماندهی رودخانه می‌تواند جهت جلوگیری یا محدود کردن جابجایی‌های بستر رودخانه انجام گیرد.



شکل ۱-۳- فرسایش ساحل و بستر رودخانه در محل قوس یک رودخانه

یکی از مشخصه‌های جریان در قوس رودخانه‌ها، وجود جریان‌های حلزونی است که موجب افزایش آبشستگی در ساحل خارجی خم می‌گردد. آبشستگی در خم‌ها ممکن است مربوط به پیش‌روی پیچان رود<sup>۱</sup> نیز باشد. آبشستگی خم که در شکل (۱-۴) نشان داده شد یک فرآیند پیچیده است و به پارامترهای انحنای خم، نسبت عرض به عمق جریان، خصوصیات جریان، فرسایش‌پذیری ساحل و دانه‌بندی مصالح بستر بستگی دارد.



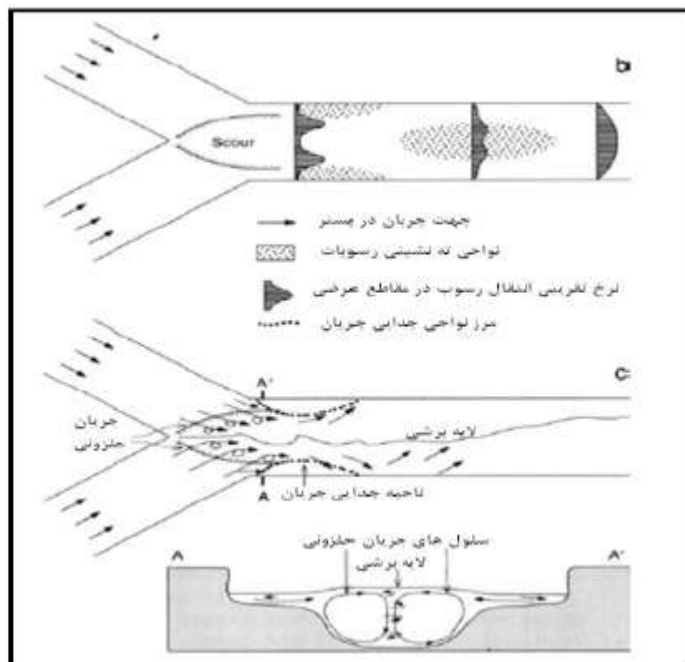
شکل ۱-۴- نمایی از آبشستگی جداره خارجی خم رودخانه و جریان ثانویه (ماسون، ۱۹۹۳)

آبشستگی در محل اتصال آبراهه‌ها<sup>۲</sup>، نوعی آبشستگی است که در محل تقاطع دو رودخانه یا تقاطع آبراهه‌ها در یک رودخانه شریانی ایجاد می‌شود. ملویل و کلمن (۲۰۰۰) فرآیند آبشستگی در تقاطع آبراهه‌ها را چنین

<sup>1</sup> Meander

<sup>2</sup> Confluence Scour

عنوان نمودند: جریان‌های عبوری از دو رودخانه همگرا در محور مرکزی تقاطع با یکدیگر برخورد کرده و به سمت بستر منحرف می‌شوند. این جریان پس از برخورد با بستر با حرکت در جهت پایین‌دست به سمت سطح آب برمی‌گردند (می و همکاران، ۲۰۰۲). شکل (۵-۱) چگونگی فرآیند حاصل از برخورد دو جریان و آبشستگی حاصل از آن نشان داده شده است.



شکل ۱-۵- الگوی جریان، رسوب‌گذاری و فرسایش در تقاطع دو رودخانه

### ۱-۲-۲- آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی<sup>۱</sup>

وجود تنگ‌شدگی مقطع در مسیر جریان باعث افزایش سرعت و بالا رفتن قدرت فرسایشی جریان در این محل می‌شود. آبشستگی ایجادشده در این حالت را آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی می‌گویند. آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی به طور معمول نتیجه محدود کردن عرض رودخانه می‌باشد. به عنوان مثال تکیه‌گاه‌های کناری پل‌ها و پایه‌های پل که در وسط آبراهه احداث می‌گردند، باعث کاهش عرض مجرا و در نتیجه آبشستگی می‌شوند.

### ۱-۲-۳- آبشستگی موضعی<sup>۲</sup>

این نوع آبشستگی ناشی از اثر موضعی سازه بر روی الگوی جریان می‌باشد که به صورت موضعی در پایین‌دست و یا اطراف سازه موردنظر رخ می‌دهد. این نوع آبشستگی ممکن است به تنهایی و یا به همراه آبشستگی‌های دیگر باشد.

آبشستگی موضعی بر اثر ایجاد موانعی مانند پایه‌های پل‌ها، تکیه‌گاه‌های کناری و آبشکن‌ها در مسیر جریان و در اطراف این موانع رخ می‌دهد. این موانع می‌توانند سرعت موضعی جریان و آشفتگی آن را افزایش دهند و

<sup>1</sup> Contraction scour

<sup>2</sup> Local scour



بسته به شکل سازه می‌توانند گردابه‌هایی ایجاد نمایند که نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد.

#### ۱-۲-۴- آبشستگی در آب زلال<sup>۱</sup> و آب حاوی رسوب<sup>۲</sup>

آبشستگی در آب زلال در شرایطی اتفاق می‌افتد که مواد بستر در بالادست محدوده آبشستگی در جای خود ثابت باشند و به آستانه حرکت نرسیده باشند. به عبارت دیگر جریان ورودی از بالادست حاوی رسوب نباشد. هنگامی که سرعت جریان افزایش می‌یابد، میزان آبشستگی آب زلال تا زمان آغاز حرکت کلی مصالح بستر افزایش می‌یابد. از این زمان به بعد، تغذیه رسوبات از بالادست آغاز می‌شود. در این حالت جریان از بالادست حاوی رسوب است.

آبشستگی در آب حاوی رسوب سریع‌تر به مقدار حداکثر می‌رسد. در جریان‌های حاوی رسوب، عمق آبشستگی حول یک مقدار و در شرایط میانگین (تعادلی) نوسان می‌نماید. آبشستگی موضعی برای رسوبات یکنواخت، در شرایط آب زلال و حمل رسوب به ترتیب در حالت  $u/u_c < 1$  و  $u/u_c > 1$  رخ می‌دهد و مقدار حداکثر عمق آبشستگی در حالت  $u/u_c = 1$  اتفاق می‌افتد، که در آن  $u$  سرعت متوسط جریان و  $u_c$  سرعت بحرانی در آستانه حرکت است (کوتیاری و همکاران، ۱۹۹۲).

#### ۱-۲-۵- آبشستگی استاتیکی و دینامیکی

اندازه‌گیری عمق حفره آبشستگی بعد از وقوع سیلاب می‌تواند گمراه‌کننده باشد. زیرا حداکثر عمق آبشستگی معمولاً در زمان حداکثر سیلاب اتفاق می‌افتد و در خلال فروکش نمودن سیلاب قسمتی از حفره آبشستگی ممکن است پر شود. کاهش عمق آبشستگی ممکن است در اثر ته‌نشینی مصالح معلق شده در حفره آبشستگی یا ریزش شیب‌های دیواره حفره آبشستگی اتفاق افتد. در تحقیقات آزمایشگاهی معمولاً دو نوع آبشستگی با عناوین آبشستگی استاتیکی و آبشستگی دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. معمولاً عمق آبشستگی استاتیکی را عمق حفره در پایان آزمایش در نظر می‌گیرند که پس از ته‌نشینی احتمالی ذرات در حفره آبشستگی به جای می‌ماند و عمق آبشستگی دینامیکی، عمقی است که در هنگام انجام آزمایش و قبل از ته‌نشینی رسوبات در حفره آبشستگی وجود دارد.

#### ۱-۲-۶- آبشستگی دریایی

به طور کلی آبشستگی در محیط‌های دریایی تحت کنترل همان فرآیندهایی است که در آبشستگی محیط‌های رودخانه‌ای وجود دارد و می‌تواند در دسته‌های آبشستگی عمومی و آبشستگی موضعی مورد ملاحظه قرار گیرد. البته در آبشستگی دریایی موضوعات دیگری مانند جریانات جزر و مدی، فرآیندهای ساحلی، اندرکنش جریان‌های جزر و مدی و جریان‌های رسوبی رودخانه‌ای در خورها و نیروهای ناشی از امواج را نیز باید مدنظر قرارداد.

<sup>1</sup> Clear Water Scour

<sup>2</sup> Live Bed scour

### ۱-۲-۲-۷-آبشستگی ناشی از قایقرانی

قایقرانی و کشتیرانی در رودخانه‌ها در اثر افزایش موضعی سرعت در اطراف کشتی، جریان‌های ایجاد شده توسط پروانه کشتی و موج‌های سطحی (دنباله‌ای) ایجاد شده توسط کشتی که اثرهای بیش‌تری را بر سواحل دارد، ایجاد می‌شود.

تأثیرات کشتیرانی بر میزان آبشستگی ممکن است با افزودن سرعت‌های جریان ناشی از کشتیرانی به سرعت جریان در حالت طبیعی (نبودن کشتی) در نظر گرفته‌شود. در بعضی حالات این تأثیرات به دلیل دوره کوتاه و کم‌بودن سرعت جریان حاصل از کشتیرانی بسیار اندک است.

### ۱-۳-الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل

الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده بوده که این پیچیدگی با تشکیل حفره آبشستگی در اطراف پایه تشدید می‌شود. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید که عملکرد آن‌ها باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه این گودال در اطراف پایه‌ها باعث خالی شدن زیر پی‌ها و در نتیجه تخریب پل می‌شود. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شود. یکی برخورد جریان به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه پل می‌باشد. الگوی جریانی که در اطراف پایه پل شکل می‌گیرد به طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط می‌باشد. برخورد جریان به پایه گرداب نعل اسبی<sup>۱</sup> را شکل داده و جدایی جریان از پایه باعث به وجود آمدن گرداب‌هایی که به گرداب برخاستگی<sup>۲</sup> موسومند، می‌شود. گرداب نعل اسبی عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در اطراف پایه به ویژه در جلو آن می‌باشد. الگوی جریان در اطراف یک پایه در شکل (۱-۶) نشان داده شد.

پس از برخورد جریان آب به دماغه پل، روی پایه به تناسب سرعت جریان، فشار ایجاد می‌شود و به دلیل توزیع سرعت عمودی جریان که سرعت از بستر رودخانه به طرف سطح آب زیاد می‌شود، فشار دینامیکی بیش‌تری نیز در ترازهای بالاتر به پایه وارد شده که باعث به وجود آمدن گرادیان فشار روی پایه از بالا به پایین می‌شود. این گرادیان فشار باعث ایجاد یک جریان رو به پایین<sup>۳</sup> در جلو پایه می‌گردد. همچنین در رودخانه، سرعت در سطح آب حداکثر نمی‌باشد، بلکه حداکثر مقدار آن کمی پایین‌تر از سطح آب به وجود می‌آید. در نتیجه در این قسمت نیز یک توزیع سرعت و به تبع آن توزیع فشار ایجاد می‌شود که باعث حرکت آب رو به بالا شده و در سطح آب در مجاورت پایه، موجی به نام موج کمانی<sup>۴</sup> ایجاد می‌شود.

سرعت جریان رو به پایین در عمق یکنواخت نمی‌باشد و به دلیل متغیر بودن گرادیان فشار در عمق، از سطح آب به سمت کف بیش‌تر می‌شود. جریان رو به پایین در حین برخورد به بستر رودخانه، ضمن حفر بستر به اطراف پایه پراکنده می‌شود. با حفر بستر در جلوی پایه، بعد این جریان وارد حفره شده و بخشی از آن به سمت بالادست برمی‌گردد. جریان روبه‌پایین در فاصله ۲ الی ۵ درصد قطر پایه در بالادست آن اتفاق می‌افتد. سرعت جریان روی پایه صفر است. مقدار حداکثر این سرعت در داخل حفره آبشستگی و در عمقی به اندازه

<sup>۱</sup> Horseshoe Vortex

<sup>۲</sup> Wake Vortex

<sup>۳</sup> Down Flow

<sup>۴</sup> Bow Wave

قطر پایه، پایین‌تر از بستر به اندازه  $0/8$  برابر سرعت متوسط جریان می‌باشد. چرخش جریان در دور پایه نیز باعث افزایش سرعت موضعی و تمرکز تنش در دو طرف پایه می‌شود و در نتیجه دو شیار در دو طرف پایه توسعه می‌یابد که این دو شیار خود به حمل مصالح کنده شده از جلو پایه و عمیق‌تر شدن حفره آبشستگی کمک می‌کنند. در نهایت در برخورد با جریان اصلی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود.

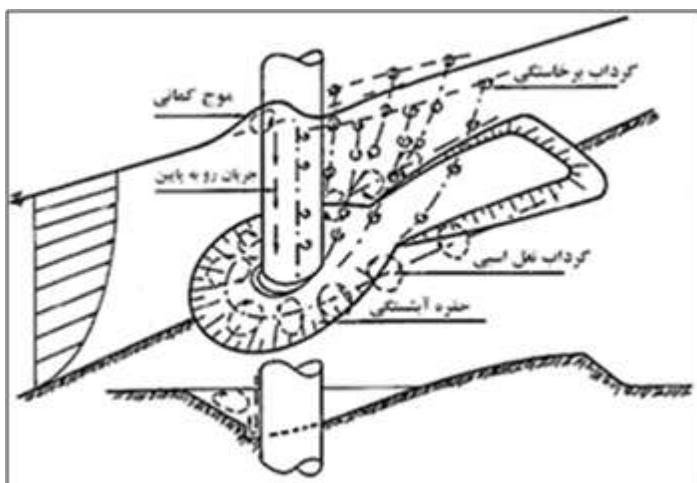
از نظر بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱) گرداب نعل اسبی نتیجه آبشستگی می‌باشد نه علت آن. برخی از محققین دیگر همچون درگاهی (۱۹۹۰) معتقدند که گرداب نعل اسبی اول به وجود می‌آید و باعث ایجاد آبشستگی اطراف پایه می‌شود. در واقع جریان رو به پایین کاملاً چرخیده و گردابه‌ای را ایجاد می‌کند. با به‌وجود آمدن این گردابه، عمل حفر چاله تسریع شده و رفته‌رفته عمیق‌تر می‌شود. چرخش آب داخل حفره جلو پایه به دو طرف پایه نیز کشیده می‌شود و در مجموع گردابی را ایجاد می‌نماید که در پلان به نعل اسب شبیه است و از آن رو به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند.

جریانی که به صورت عمودی به نوک پایه برخورد می‌کند، روندی مشابه روند اشاره شده در بالا را طی می‌کند، ولی جریانی که به کناره‌های پایه برخورد می‌کند، بردار سرعت آن به دو مولفه شعاعی (عمود بر سطح) و مماسی (روی سطح) تفکیک می‌شود. مؤلفه شعاعی سرعت مانند آنچه در مورد نوک دماغه پایه به آن اشاره شد باعث تشکیل جریان رو به پایین و رو به بالا می‌شود. سرعت‌های بالای گرداب نعل اسبی که باعث ایجاد تنش برشی در سطح تماس آن با کف حفره می‌شود، باعث تسریع در ایجاد حفره شده و مصالحی را که توسط آن از بستر جدا شده، در اختیار جریان عمومی رودخانه قرار می‌دهد. البته طبیعی است که با دور شدن محل برخورد آب از دماغه پایه، تصویر بردار سرعت در جهت شعاعی کوچک و کوچک‌تر شده و تصویر آن در جهت مماسی بزرگ‌تر می‌شود.

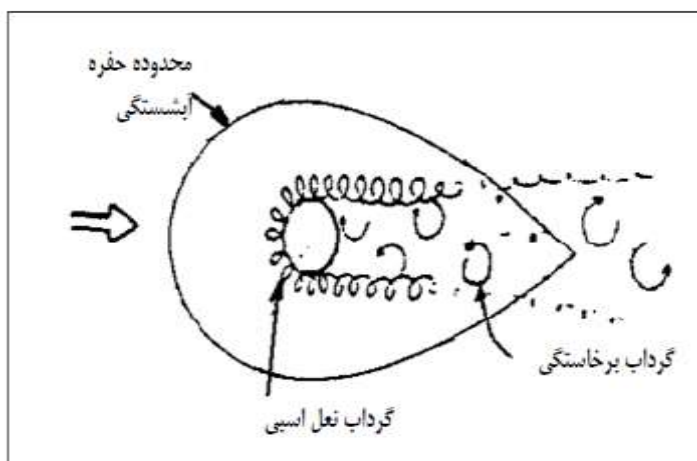
در این حالت جریان روبه‌پایین حاصل شده، در برخورد با جریان اصلی بالادست به طرفین منحرف می‌شود. مؤلفه مماسی بردار سرعت، گرداب نعل اسبی را به سمت پایین دست حرکت می‌دهد و در کناره‌های پایه به برداشت مصالح بستر کمک می‌کند. اصطکاک گردابه نعل اسبی با پایه پل و بستر به تضعیف آن در طول مسیر خود کمک می‌کند. هنگامی که جریان از کناره‌های پایه پل عبور می‌کند، در طول جداره پایه تحت تاثیر گردابیان فشار از آن جدا می‌شود. حفره آبشستگی توسط گردابه نعل اسبی آن قدر ادامه می‌یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گردابه را مستهلک نماید (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱).

همچنین در پشت پایه به دلیل کاهش فشار، جریان و لایه برشی به سمت داخل متمایل شده و ایجاد گردابه‌های برخاستگی می‌کنند. محور این گردابه‌ها عمود بر بستر رودخانه می‌باشد.

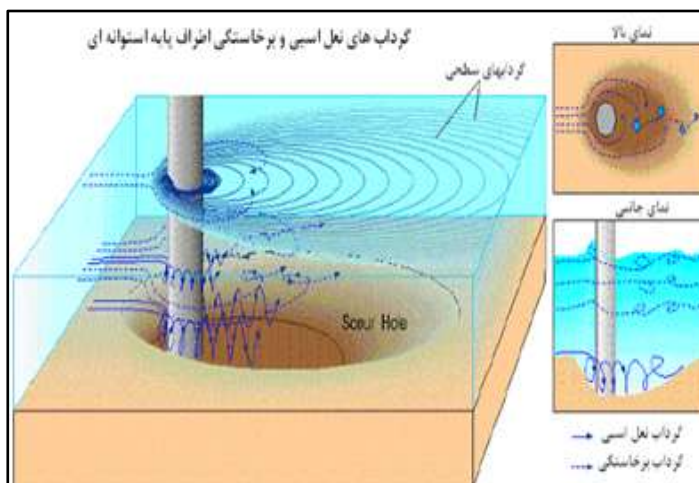
شکل (۷-۱) وضعیت این گردابه‌ها را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، جهت گردابه‌ها به سمت داخل بوده و در دو طرف خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند. گرداب برخاستگی در نزدیکی کف با گردابه نعل اسبی باقی‌مانده از بالادست که در حال نوسان عمودی و افقی می‌باشد، اندرکنش دارد. این گردابه‌ها با محور عمودی و مرکز کم‌فشار، مانند یک گردباد، ذرات بستر را به سمت بالا مکیده و در معرض جریان قرار می‌دهند. به این ترتیب گردابه‌های برخاستگی به حمل مصالح کنده شده از جلو و اطراف پایه به سمت پایین دست کمک کرده و در عین حال یک حفره آبشستگی مستقل در پایین دست پایه ایجاد می‌کند (راجاراتنام و بری، ۱۹۷۷). الگوی سه بعدی آبشستگی حول یک پایه پل در شکل (۸-۱) نشان داده شد.



شکل ۱-۶- الگوی جریان در اطراف یک پایه استوانه‌ای (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱)



شکل ۱-۷- محل تشکیل گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه‌های استوانه‌ای و جهت تشکیل این گرداب‌ها (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱)



شکل ۱-۸- الگوی سه بعدی جریان اطراف پایه پل (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱)