



دانشگاه پیام نور  
واحد شمیرانات  
کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه های هیدرولیکی

## عنوان:

**مقایسه روشهای محاسبه آبستگي در پایه پلها با بکارگیری داده های اندازه گیری**

استاد راهنما:

دکتر امیر خسرو جردی

نگارش:

مسعود جعفرزاده زارع

**فصل اول: مقدمه**

مقدمه:	۹
موضوع و طرح	۹
روشهای بکار گرفته شده در طرح	۹
روش بکار گرفته شده در این رساله	۹
تقسیم موضوعی رساله	۹

**فصل دوم: آبشستگی**

مقدمه:	۱۲
تعریف آبشستگی	۱۲
انواع آبشستگی	۱۲
کف کنی و بالا آمدن بستر	۱۲
آبشستگی در اثر کاهش مقطع	۱۲
آبشستگی طبیعی	۱۳
آبشستگی موضعی	۱۳
آبشستگی آب زلال	۱۳
آبشستگی بستر زنده	۱۴
مکانیزم آبشستگی موضعی	۱۴
سیستم گردابی نعل اسبی	۱۵
سیستم گردابی شیاری	۱۶
سیستم گردابی دنباله دار	۱۶
سیستم موج کمانی	۱۶
جدایی و منطقه Wake	۱۷
جداشدگی خطوط جریان در اطراف پایه	۱۸
حرکت نخستین :	۱۹
پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی	۱۹
پارامترهای هندسی	۱۹
پارامترهای هیدرولیکی	۲۰
پارامترهای مربوط به سیال	۲۰
پارامترهای رسوب	۲۱

**فصل سوم: تاریخچه مطالب**

مقدمه:	۲۳
اینگیس پونا ۱ و ۲ (1949)	۲۳

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲۳.....	لارسن و تاچ (۱۹۵۶).....
۲۴.....	اینگلیس و لیس (۱۹۵۹).....
۲۴.....	ایزارد و برادلی (۱۹۵۹).....
۲۴.....	وارزیوتیس (۱۹۶۰).....
۲۵.....	بتا (۱۹۶۰).....
۲۵.....	لی و همکاران (۱۹۶۱).....
۲۷.....	چیتال (۱۹۶۲).....
۲۸.....	لارسن (۱۹۶۲).....
۲۸.....	احمد (۱۹۶۲).....
۲۹.....	لاراس (۱۹۶۳).....
۲۹.....	نیل (۱۹۶۴).....
۳۰.....	مازا و سانچز (۱۹۶۴).....
۳۰.....	بروزرس ( ۱۹۶۵ ) و ( ۱۹۷۷ ).....
۳۱.....	آرونچلام (۱۹۶۵).....
۳۰.....	بلنچ (۱۹۶۶).....
۳۲.....	کارستنز ( ۱۹۶۶ ).....
۳۲.....	شن ( ۱۹۶۹ ).....
۳۳.....	بلنچ-اینگلیس (۱۹۶۹).....
۳۳.....	شن - مازا (۱۹۶۹).....
۳۴.....	هانکو ( ۱۹۷۱ ).....
۳۴.....	کلمن ( ۱۹۷۱ ).....
۳۵.....	نورمن ( ۱۹۷۵ ) رادکیوی ( ۱۹۸۶ ) ملویل ( ۱۹۸۸ ).....
۳۵.....	روش دانشگاه ایالتی کلرادو ( ۱۹۷۵ ) - (CSU).....
۳۶.....	جین و فیشر ( ۱۹۷۹ ).....
۳۶.....	بیکر ( ۱۹۸۰ ).....
۳۷.....	کادار ( ۱۹۸۱ ).....
۳۷.....	روش جین ( ۱۹۸۱ ).....
۳۷.....	گارد و راجو ( ۱۹۸۵ ).....
۳۸.....	گاینکتی ( ۱۹۸۶ ).....
۳۹.....	فروهلچ ( ۱۹۸۸ ).....
۳۹.....	ملویل و ساترلند ( ۱۹۸۸ ).....
۴۱.....	حسونی زاده ( ۱۹۹۰ ).....
۴۱.....	جانسون ( ۱۹۹۵ ).....

صفحه	عنوان
۴۱	ریچاردسون (۱۹۹۱) - (HEC-18) .....
۴۲	جاو و همکاران (۱۹۹۳).....
۴۳	ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) - (HEC-18) .....
۴۳	جانسون (۱۹۹۶) .....
۴۴	ریچاردماو (۱۹۹۶) .....
۴۴	وله و باج (۱۹۹۹) .....
۴۴	ملویل و کلمن (۲۰۰۰) .....
۴۴	رابطه دانشگاه ایالتی کلرادو (۲۰۰۱) .....
۴۶	تامر (۲۰۰۵) .....
۴۶	معادلات آبشستگی موضعی.....

### فصل چهارم: ساختار معادلات حاکم بر آبشستگی

۵۲	مقدمه:.....
۵۲	آنالیز ابعادی.....
۵۲	تئوری $\pi$ باکینگهام .....
۵۳	آنالیز پارامترهای آبشستگی .....

### فصل پنجم: آمار و اطلاعات صحرائی

۵۹	مقدمه:.....
۵۹	داده‌های مورد استفاده در این تحقیق.....
۵۹	داده‌های صحرائی دکتر فروهلیچ.....
۶۳	اطلاعات مربوط پلهای آمریکا: .....
۷۱	آمار و اطلاعات پلهای منطقه نیوهامپشایر.....

### فصل ششم: مقایسه روابط آبشستگی

۷۴	مقدمه:.....
۷۴	آنالیز رابطه اینگلیس - پونا(۱۹۴۹) .....
۷۵	آنالیز رابطه لارسن و تاج (۱۹۵۶) .....
۷۵	آنالیز رابطه وارزیوتیس (۱۹۶۰) .....
۷۶	آنالیز رابطه چیتال (۱۹۶۲) .....
۷۶	آنالیز رابطه احمد (۱۹۶۲) .....
۷۷	آنالیز رابطه لاراس (۱۹۶۳) .....
۷۷	آنالیز رابطه بروزرس (۱۹۶۵) .....
۷۸	آنالیز رابطه آرونچلام (۱۹۶۵) .....
۷۸	آنالیز رابطه بلنچ (۱۹۶۶) .....

صفحه	عنوان
۷۹	آنالیز رابطه کارستنز ( ۱۹۶۶ )
۷۹	آنالیز رابطه بلنچ و اینگلیس ( ۱۹۶۹ )
۸۰	آنالیز رابطه هانکوا (1971)
۸۰	آنالیز رابطه II (1971)
۸۱	آنالیز رابطه کلمن ( ۱۹۷۱ )
۸۱	آنالیز رابطه نورمن ( ۱۹۷۵ )
۸۲	آنالیز رابطه CSU (1975)
۸۲	آنالیز رابطه بیکر ( ۱۹۸۰ )
۸۳	آنالیز رابطه کادار ( ۱۹۸۰ )
۸۳	آنالیز رابطه گایناکتی ( ۱۹۸۶ )
۸۴	آنالیز رابطه فروهلیچ ( ۱۹۸۸ )
۸۴	آنالیز رابطه ملویل و ساترلند ( ۱۹۸۸ )
۸۵	آنالیز رابطه جاو ( ۱۹۹۳ )
۸۵	آنالیز رابطه وله ویاچ ( ۱۹۹۹ )
۸۶	آنالیز رابطه CSU (2001)
۸۶	نتیجه گیری
<b>فصل هفتم: بررسی امکان یک رابطه جدید</b>	
۸۹	مقدمه:
۸۹	تعیین رابطه کلی با استفاده از آنالیز ابعادی
۹۰	رابطه جدید جهت تخمین عمق آبشستگی
۹۰	بررسی صحت رابطه جدید
۹۰	بررسی با داده‌های استفاده شده در آنالیز رگرسیون رابطه
۹۱	استفاده از آمار چند پل با بستر شنی و ماسه‌های
۹۵	عمق آبشستگی در مقابل پارامترهای بی بعد
۹۶	حل مثالهایی از آبشستگی پلها
۹۶	مقایسه با روابط انتخاب شده
۹۷	مقایسه با رابطه اینگلیس - پونا ( ۱۹۴۹ )
۹۸	مقایسه با رابطه لاراس ( ۱۹۶۳ )
۹۸	مقایسه با رابطه بروزرس ( ۱۹۶۵ )
۹۹	مقایسه با رابطه آرونچلام ( ۱۹۶۵ )
۹۹	مقایسه با رابطه گایناکتی ( ۱۹۸۶ )
۱۰۰	مقایسه با رابطه فروهلیچ ( ۱۹۸۸ )
۱۰۰	مقایسه با رابطه CSU (2001)

صفحه	عنوان
۱۰۲	تحلیل حساسیت رابطه جدید.....
۱۰۲	آنالیز حساسیت نسبت به عرض پایه.....
۱۰۲	آنالیز حساسیت نسبت به زاویه هجوم جریان به پایه.....
۱۰۳	آنالیز حساسیت نسبت به طول پایه .....
۱۰۳	آنالیز حساسیت نسبت به سرعت جریان بالا دست پایه .....
۱۰۴	آنالیز حساسیت نسبت به عمق جریان بالادست پایه.....
۱۰۴	آنالیز حساسیت نسبت به D .....
۱۰۵	آنالیز حساسیت نسبت به D .....
<b>فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>	
۱۰۷	مقدمه:.....
۱۰۷	نتیجه گیری .....
۱۰۷	ارائه پیشنهادات.....
۱۰۹	پیوست ۱ .....
۱۱۳	پیوست ۲ .....
۱۳۶	پیوست ۳ .....
<b>منابع</b>	
۱۴۹	الف - منابع فارسی:.....
۱۴۹	ب- منابع لاتین: .....

تقدیم به:

- پدر و مادر مهربانم که در راه پیشرفت من از هیچ کوششی دریغ نرزدند و دعای خیرشان از باریتعالی حافظ جان و روشنگر راهم بود.
- همسر عزیزم که با صبر و حمایت‌های دلگرم کننده اش در تمام مراحل زندگی و تحصیل مرا در استمرار طریق و رسیدن به هدف مصمم تر نمود.

## چکیده پایان نامه

عنوان پایان نامه: مقایسه روشهای محاسبه آبشستگی در پایه پلها با بکارگیری داده های اندازه گیری درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی عمران گرایش: سازه های هیدرولیکی دانشکده: فنی مهندسی پیام نور شمیرانات

واژه های کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه پل، معادلات آبشستگی، داده های صحرایی چون یکی از مهمترین دلایل تخریب پلها بخصوص در مواقع سیلابی، آبشستگی موضعی اطراف پایه پل می باشد. تعیین عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه های پل، نقش بسیار مهمی در طراحی پلها در مقابل این پدیده مخرب ایفا می کند. این مهم با استفاده از معادلات تجربی انجام می شود. این معادلات توسط محققان مختلف و با استفاده از آزمایشهای گوناگون و عمدتاً با روش رگرسیون بدست آمده اند. برای تعیین میزان دقیق عمق آبشستگی، استفاده از معادلاتی که خطای کمتری دارند لازم و ضروری بنظر می رسد.

در این پایان نامه، با استفاده از داده های صحرایی به مقایسه معادلات آبشستگی پرداخته شده است و معادلاتی که از خطای کمتری نسبت به بقیه روشها برخوردار هستند، انتخاب و جهت استفاده در کارهای عملی معرفی شده اند. همچنین بدلیل اینکه بیشتر معادلات آبشستگی با استفاده از داده های آزمایشگاهی بدست آمده اند، در این تحقیق با استفاده از داده های صحرایی، رابطه جدیدی جهت تخمین عمق آبشستگی ارائه شده است. این رابطه بیشتر پارامترهای مؤثر در آبشستگی را در بردارد و از دقت خوبی برخوردار می باشد. همچنین مقایسه نتایج این رابطه با روابط دیگر و آمار واقعی نشان می دهد که رابطه جدید از دقت بیشتری برخوردار است.



# فصل اول

## مقدمه

## مقدمه:

پل ها از جمله مهمترین و پرکارترین سازه های رودخانه ای هستند و به عنوان کلید راه های ارتباطی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از این پلها، درست زمانیکه بیشترین نیاز به آنها وجود دارد تخریب می گردند. یکی از مهمترین و مؤثرترین عوامل این تخریبها آبستگی اطراف پایه های پل می باشد. با اینکه مصالح ساختمانی و فنون سازه ای پیشرفت چشمگیری داشته است، تعداد پلهای تخریب شده بر اثر آبستگی اطراف پایه ها روز به روز بیشتر می شود.

### ۱-۱ موضوع و طرح

برای طراحی پلها با ضریب اطمینان بالا و به صورت اقتصادی، نیاز به برآورد دقیق ماکزیمم عمق آبستگی اطراف پایه ها م یباشد. این مهم با استفاده از معادلات تجربی که توسط محققان ارائه شده اند برآورده می شود. اما از آنجائیکه بیشتر این معادلات تجربی هستند، ممکن است همیشه از دقت خوبی برخوردار نباشند. بنابراین شناخت معادلات مناسب و با دقت بالا که با واقعیت اختلاف کمی دارند، کمک بسیار زیادی در تعیین مقدار ماکزیمم عمق آبستگی و در نتیجه طراحی مناسب پایه پل در مقابل آبستگی اطراف پایه ها خواهد کرد.

### ۱-۲ روشهای بکار گرفته شده در طرح

معادلات زیادی توسط محققان تا کنون ارائه گردیده است. اکثر این روابط با استفاده از داده های آزمایشگاهی و با روش رگرسیون بدست آمده اند. به همین دلیل ممکن است که در واقعیت جوابی مغایر با واقعیت داشته باشند. هر کدام از این روابط تعدادی از پارامترهای مؤثر در آبستگی را در بر گرفته اند. بعضی از محققان تأثیر یک یا دو پارامتر را در روابط خود در نظر گرفته اند و بعضی دیگر از پارامترهای بیشتری در روابط خود استفاده کرده اند.

### ۱-۳ روش بکار گرفته شده در این رساله

در این رساله ابتدا با استفاده از داده های واقعی روابط مختلف آبستگی با هم مقایسه شده و بهترین روابط انتخاب گردیده اند. همچنین با استفاده از آمار پلهای مختلف با روش رگرسیون، رابطه جدیدی جهت تخمین عمق آبستگی ارائه گردیده است. این رابطه با استفاده نرم افزار آماری (SPSS) بدست آمده است .

### ۱-۴ تقسیم موضوعی رساله

#### - فصل اول

در این فصل، به ذکر مقدمه ای از این پایان نامه پرداخته شده است و اهداف این رساله مشخص گردیده است.

#### - فصل دوم

در این فصل، برای شناخت موضوع آبستگی، به تعریف آبستگی و انواع آن پرداخته شده است. در ادامه مکانیزم آبستگی و عوامل هیدرولیکی مؤثر در ایجاد این پدیده شرح داده شده است. در پایان این فصل نیز پارامترهای مؤثر در آبستگی ذکر شده است.

#### - فصل سوم

در این فصل، به مرور کارهای دیگر محققان پرداخته شده است. این فصل شامل معادلات مختلفی است که توسط محققان در سالهای گذشته ارائه شده است. همچنین روش تحقیق و نوع داده های مورد استفاده این محققان ذکر گردیده است و در پایان روابط به همراه نام محقق و تاریخ در جدولی آورده شده است.

## فصل چهارم

در این فصل، با استفاده از آنالیز ابعادی و همچنین پارامترهای آبشستگی که در فصل اول شرح داده شده، رابطه کلی جهت تخمین عمق آبشستگی ارائه گردیده است.

### فصل پنجم

در این فصل، به ذکر داده‌های مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است. این داده‌ها شامل داده‌های صحرایی جمع‌آوری شده توسط فروهلیچ و همچنین داده‌های پلهای مختلف، در مناطق مختلف آمریکا می‌باشند.

### فصل ششم

در این فصل، با استفاده از داده‌های صحرایی فروهلیچ و پلهای منطقه نیوهمپشایر، به مقایسه روابط مختلف آبشستگی پرداخته شده است. و روابطی که از دقت بالاتری برخوردار هستند، جهت استفاده‌های عملی معرفی شده‌اند.

### فصل هفتم

در این فصل، با استفاده از داده‌های پلهای مناطق مختلف آمریکا و با استفاده از روش رگرسیون رابطه‌ای جهت تخمین عمق آبشستگی موضعی ارائه شده است و همچنین با استفاده از قسمتی از داده‌های صحرایی که در آنالیز رگرسیون استفاده نشده‌اند و ذکر مثالهای مختلف دقت این رابطه نشان داده شده است.

### فصل هشتم

در این فصل، نتایجی که از این تحقیق بدست آمده مختصراً بیان شده است و در انتها پیشنهادهای ارائه گردیده است.

### پیوست ۱

در این ضمیمه، به ذکر خلاص‌های از روش اسریکوس، که روشی جدید برای محاسبه عمق آبشستگی است، پرداخته شده است.

### پیوست ۲

در این ضمیمه، جداول نتایج مقایسه روابط آبشستگی محققان مختلف آورده شده است.

### پیوست ۳

در این ضمیمه، حل کامل مثالهایی از آبشستگی با استفاده از رابطه جدید آورده شده است.

# فصل دوم

## آبستگی

یکی از مهمترین عوامل تخریب پلها، آبشستگی اطراف آنها می باشد. لذا به منظور جلوگیری و کاهش اثرات آن، شناخت مکانیزم آن لازم و ضروری می باشد. مواد بستر رودخانه ها فرسایش پذیر هستند، اما شدت این فرسایش به زمان بستگی دارد. بطوریکه بستر رودخانه های پوشیده از گرانتیت سالهای زیادی طول می کشد تا فرسایش یابد، در حالیکه رودخانه هایی با بستر ماسه ای در فاصله زمانی بسیار کوتاه حداکثر عمق آبشستگی را دارا می باشد. علاوه بر ساختار زمین و رودخانه ها که یکی از عوامل مهم در فرسایش است، عوامل هیدرولیکی نیز نقش بسزایی در وقوع این پدیده ایفا می کنند. در این فصل آبشستگی و چگونگی وقوع آن شرح داده شده است.

## ۱-۲- تعریف آبشستگی<sup>۱</sup>

به فرسایش بستر و کناره آبراهه در اثر عبور جریان آب، فرسایش بستر در پایین دست سازه های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا به فرسایش بستر در اثر بوجود آمدن جریانهای متلاطم موضعی، آبشستگی گویند. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه را عمق آبشستگی<sup>۲</sup> می نامند.

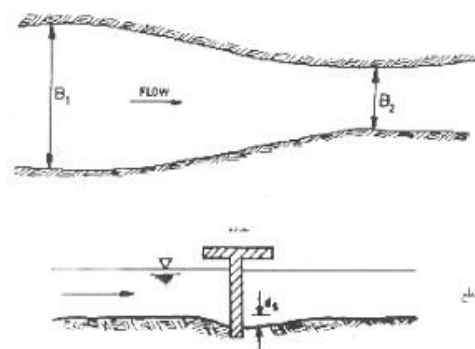
## ۲-۲- انواع آبشستگی

### ۱-۲-۲ کف کنی و بالا آمدن بستر<sup>۳</sup>

چنانچه 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 می گیرد. در اثر این عمل، کف رودخانه بتدریج گود می شود، که آن را کف کنی می گویند. محلهایی که بطور کلی تحت تاثیر کف کنی می باشند، پایین دست سازه های هیدرولیکی مانند سدها می باشند. زیرا سدهای مخزنی مقدار زیادی از رسوبات حمل شده توسط رودخانه را در پشت خود ته نشین کرده و در نتیجه آب تقریباً بدون رسوب از سد خارج می شود. از آنجائیکه 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، بتدریج بستر رودخانه گود خواهد شد و کف کنی اتفاق می افتد. بر عکس معمولاً در پشت سدها به علت کاهش سرعت جریان آب، مقدار زیادی از رسوبات ته نشین می شوند که این پدیده را افزایش یا بالا آمدن بستر می گویند.

### ۲-۲-۲ آبشستگی در اثر کاهش مقطع<sup>۴</sup>

کاهش سطح مقطع رودخانه به علت وجود تاسیسات یا علل دیگر موجب آبشستگی می گردد. تنگ شدن مسیر جریان در محل احداث پل، باعث بالا آمدن سطح آب در بالا دست پل و افزایش سرعت جریان می شود. در نتیجه این عمل، پتانسیل حمل رسوب و یا شدت فرسایش بستر افزایش می یابد (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲. آبشستگی به دلیل تنگ شدگی مقطع

1. Scour
2. Scour depth
3. Aggradation and Degradation
4. Contraction Scour

معمولا در اینگونه موارد، عمل فرسایش آنقدر ادامه خواهد داشت تا اینکه سطح مقطع جریان به اندازه ای افزایش یابد تا ظرفیت حمل رسوب کاهش یافته و برابر با ظرفیت حمل رسوب در مقاطع بالا دست محل پل گردد و در این حالت فرسایش تقریبا متوقف می گردد. هر چند این فرسایش موجب می شود که تاثیر پس زدگی آب در بالا کاهش یابد ولی به خاطر این موضوع نباید اجازه داده شود فرسایش صورت گیرد.

### ۲-۲-۳ آبشستگی طبیعی<sup>۱</sup>

پدیده آبشستگی طبیعی در بسیاری از رودخانه ها با بستر متحرک بوجود می آید. مواردی نظیر فرسایش ناپذیر بودن کناره های رودخانه و یا یک انحنای رودخانه باعث تشدید آبشستگی طبیعی در بستر رودخانه می شود، زیرا در محل پیچ رودخانه، جریان آب مواد بستر و کناره ها را از قسمت خارجی پیچ شسته و در قسمت داخلی پیچ رسوب می دهد.

### ۲-۲-۴ آبشستگی موضعی<sup>۲</sup>

بطور کلی این نوع آبشستگی در پایین دست سازه های هیدرولیکی، در محل پایه های پل و به طور کلی هر مکانی که شدت جریانهای درهم به طور موضعی افزایش یابد، بوجود می آید. وجود پایه های پل در مسیر جریان باعث تغییر الگوی جریان و ایجاد یک حفره آبشستگی در اطراف پایه ها می شود. این نوع آبشستگی را آبشستگی موضعی می گویند برای تخمین آبشستگی موضعی پایه پل به دلیل پیچیدگی مسئله و فاکتورهای متعددی که در مسئله دخیل می باشند، انجام آزمایشات آزمایشگاهی ضروری است. ولی جوابهایی که از این فرمولها بدست می آید متفاوت است. یکی از دلایل عدم تطابق جوابها، انتخاب فاکتورهای متعدد بعنوان فاکتورهای موثر و عدم تشخیص شرایط متفاوت انتقال رسوبات است. بنا به شرایط انتقال رسوب و بر اساس میزان رسوباتی که به حفره آبشستگی وارد یا خارج می شوند دو حالت وجود دارد:

حالت اول: آبشستگی آب زلال<sup>۳</sup>

حالت دوم: آبشستگی بستر زنده<sup>۴</sup>

### ۲-۲-۴-۱ آبشستگی آب زلال

آبشستگی آب زلال موثر اتفاق می افتد که مواد بستر بالادست محل پل هیچگونه حرکتی ندارند. یعنی اینکه شرایط جریان در بستر افقی به آستانه حرکت نرسیده است، اما شتاب جریان و گردابهای ایجاد شده در محل پایه های پل سبب حرکت مواد از جای خود می شوند. چابرت و انگل دینگر<sup>۵</sup> دریافتند که در آبشستگی آب زلال، عمق آبشستگی یک رابطه تقریبا خطی با نیروی برشی و یا سرعت جریان در بالادست دارد و هر چه سرعت جریان زیادتر شود عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد، تا اینکه سرعت به نقطه بحرانی خود که آستانه حرکت ذرات در بالادست باشد می رسد. تا این لحظه رسوباتی از بالا دست وارد حفره نمی شود، ولی از این به بعد حرکت رسوبات از بالادست شروع می شود و مقداری از حفره توسط رسوبات بالادست پر می شود و عمق ماکزیمم کاهش می یابد.

هنگامی که سرعت جریان و یا نیروی برشی از حد بحرانی گذشت عمق آبشستگی نسبت به زمان، تغییرات تقریبا نوسانی حول عمق تعادل آبشستگی خواهد داشت و علت این تغییرات حرکت توده های شنی است که از بالادست شروع می شود. شکل‌های شماره (۲-۲) و (۲-۳) توضیحات فوق را نشان می دهد.

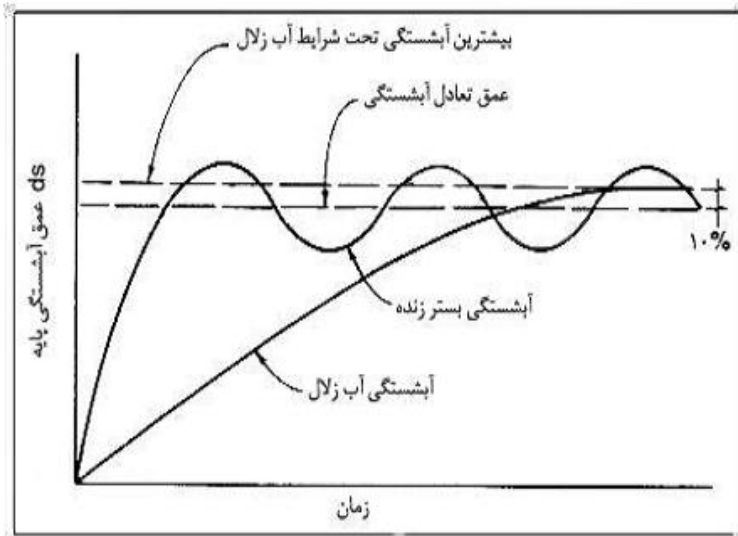
#### 1. Natural Scour

2- Local Scour

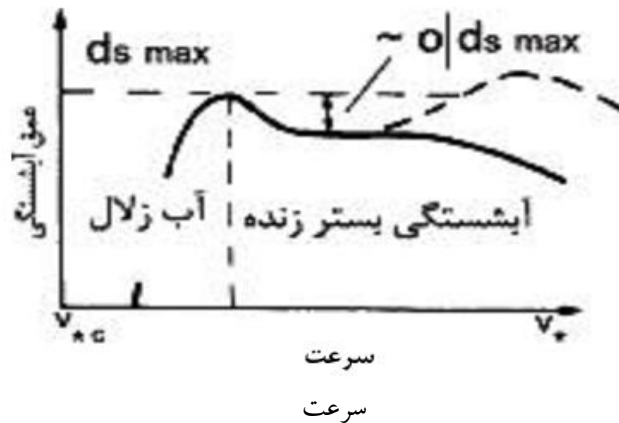
3. Clear- water Scour

4. Live bed Scour

<sup>1</sup> Chabert and Engeldinger



شکل ۲-۲. تغییرات نوسانی آبشستگی نسبت به زمان



شکل ۲-۳. تغییرات عمق آبشستگی نسبت به سرعت برشی یا سرعت نزدیکی به پایه

#### ۲-۲-۴-۲ آبشستگی بستر زنده

در این حالت، شرایط جریان در بستر افقی از آستانه حرکت عبور کرده و در نتیجه حرکت عمومی مواد رسوبی بستر وجود دارد. در این نوع آبشستگی حفره ایجاد شده به طور متوسط با رسوباتی که از بالا دست منتقل می شوند پر می شود. البته به دلیل وجود جریانهای گردابی تولید شده در محل پایه های پل، مقدار فرسایش در ابتدا زیاد می باشد و پس از مدتی آبشستگی به حالت تعادل می رسد. حالت تعادل در آبشستگی آب زلال زمانی اتفاق می افتد که عمق آبشستگی به حدی برسد که نیروهای بالابرنده توانایی بلند کردن ذرات و خارج کردن آنها از گودال حفر شده را ندارند. در حالیکه حالت تعادل در آبشستگی بستر زنده موقعی اتفاق می افتد که میزان رسوبات وارد شده به حفره مساوی رسوبات خارج شده باشد

#### ۲-۳ - مکانیزم آبشستگی موضعی

اگر پایه ای بطور عمودی در بستر رودخانه قرار گرفته باشد جریان آب در اطراف آن متلاطم شده و یک سلسله جریانهای گردابی ایجاد می کند. این سیستمهای گردابی مکانیزم اصلی آبشستگی به حساب می آیند که در دراز مدت باعث ایجاد حفره در محل پایه پل شده و ممکن است موجب ریزش پل گردد.

بسته به نوع پایه و شرایط جریان، سیستم گردابی ممکن است ترکیبی از سیستمهای زیر باشد.

\_سیستم گردابی نعل اسبی

\_سیستم گرداب شیاری یا برخاستگی

\_سیستم گردابی دنباله دار

\_سیستم گردابی رو به پایین

\_سیستم گردابی موج کمائی<sup>۱</sup>

### ۱-۳-۲ - سیستم گردابی نعل اسبی

پس از برخورد جریان با پایه، فشار موضعی بوجود آمده و در نتیجه باعث جدا شدن خطوط جریان خواهد شد. این خطوط جریان گردابی با جریان دست نخورده تداخل نموده و در جلوی پایه، متمرکز می شود و باعث حفر گودالی در جلوی پایه می شود. چرخش آب در داخل گودال جلوی پایه به دو طرف پایه نیز کشیده می شود و در مجموع، گردابی به نام گرداب نعل اسبی ایجاد می کند. چنانچه پایه حجیم باشد، گرادیان فشار کافی ایجاد می کند که موجب وقوع مرحله فوق می شود. زیرا برای پایه های نوک باریک، فشار تولید شده نسبتاً قوی نبوده تا باعث جدا شدگی<sup>۲</sup> خطوط جریان گردد و در نتیجه گرداب نعل اسبی بوجود نخواهد آمد. بقیه اشکال مانند پایه عدسی شکل بسته به نحوه قرار گرفتن محور پایه با جهت جریان ممکن است به صورت نوک تیز و یا جسم حجیم عمل کنند. بنحوی که اگر محور پایه با جهت جریان زاویه ای را تشکیل دهد که بیش از ۳۰ درجه باشد، می تواند زاویه حمله را تغییر دهد، بطوریکه پایه به صورت یک جسم حجیم عمل نماید.

همچنین اگر خار و خاشاک و الوار چوب در نوک پایه جمع شود، بصورت یک جسم حجیم عمل خواهد کرد و ضمن تشکیل جریانهای گردابی نعل اسبی میزان آبشستگی شدت خواهد یافت و حفره بزرگی در نوک پایه ایجاد خواهد شد. جریان گردابی بصورت عمودی و از بالا به پایین عمل می کند و محور این جریان افقی است و حوزه عمل این سیستم گردابی اطراف پایه است.

جریان گردابی نعل اسبی در نتیجه جدا شدگی جریان لبه بالایی حفره آبشستگی بوجود می آید و این سیستم از نتایج آبشستگی است.

گرداب نعل اسبی، گودال آبشستگی را گود می کند تا زمانی که تنش برشی بحرانی کمتر شود.

شتاب جریان در دو طرف پایه، دو شکاف در بستر ایجاد می کند که انتقال (پاک کردن) رسوب از گودال آبشستگی بالادست در پیرامون پایه را آسان می کند.

طبق نظر بعضی محققان، این سیستم در ابتدا کوچک و قدرت آن ضعیف است ولی پس از تشکیل حفره آبشستگی، سیستم جریان نعل اسبی از لحاظ اندازه و قدرت نیز رشد می یابد. با افزایش عمق آبشستگی (گود شدن حفره)، مقدار جریان رو به پایین در نزدیکی کف حفره کاهش یافته و زمانی که قدرت نیروهای محرک تقریباً برابر با نیروهای مقاوم (وزن اشباع ذره) گردید، آبشستگی متوقف می شود.

ملویل<sup>۳</sup> (۱۹۷۵)، جهت جریان، تنش برشی و سرعت جریان در اطراف پایه استوانه ای شکل را اندازه گیری کرد. او دریافت که جریان گردابی نعل اسبی با سرعت زیاد رو به پایین در جلوی پایه گسترش می یابد. اندازه چرخش این سیستم و بزرگ شدن این حفره به سرعت افزایش یافته، ولی پس از آنکه آبشستگی به حالت تعادل رسید، میزان چرخش، تنش برشی و سرعت کاهش می یابد.

### ۲-۳-۲ - سیستم گردابی شیاری

این سیستم به وسیله خود پایه به وجود می آید و جهت آن برعکس سیستم گردابی نعل اسبی، بطرف بالا است. این سیستم بر اثر غلتیدن لایه ها بطرف بالا که بر روی سطح پایه بوجود می آید، تشکیل می شود و در خط جدا شدگی از هر طرف پایه

6. Bow wave Vortex

7. Separation

8. Melville



جدا می شود. در مقادیر عدد رینولدز کم این سیستم گردابی، پایدار است و در پایین دست نزدیک پایه، سیستم مقاوم را تشکیل می دهد.

قدرت این سیستم به مقدار زیادی به شکل پایه و سرعت آب بستگی دارد. در پایه هایی که بصورت آیرودینامیکی ساخته می شوند، جداشدگی جریان و در نتیجه سطح گرداب شیاری کاهش یافته و قدرت سیستم گردابی ضعیف می شود. در نتیجه میزان آبشستگی موضعی بشدت کاهش می یابد. در حالیکه در پایه های مستطیل شکل، میزان آبشستگی موضعی از همه بیشتر است، زیرا میزان سطح گرداب شیاری به علت افزایش جداشدگی خطوط جریان، زیاد می شود.

### ۳-۳-۲- سیستم گردابی دنباله دار

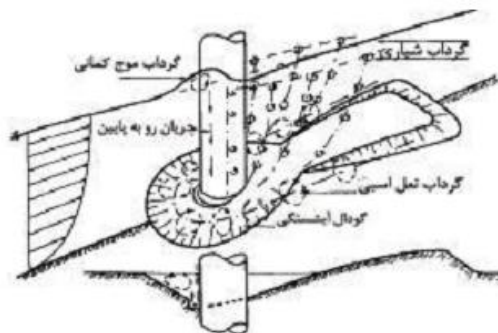
این سیستم فقط در جایی اتفاق می افتد که پایه مستغرق باشد. این سیستم از یک یا چند گرداب مجزا تشکیل شده است که از نوک پایه شروع شده و تا پایین ادامه می یابد. مکانیزم تشکیل این گرداب اختلاف فشار محدود بین دو سطح است، که در یک گوشه، یکدیگر را قطع می کنند (نوک پایه).

سرعت جریان آب بر روی سطح پایه استوانه ای در بالادست، در یک صفحه عمودی قرینه می شود و چون سرعت عادی جریان آب در آبراهه از سطح آب به کف آبراهه کاهش می یابد و به صفر می رسد، فشار ایستایی نیز نسبت به عمق کاهش می یابد و چون گرادیان فشار به طرف پایین است، باعث ایجاد جریان رو به پایین می شود. این جریان رو به پایین در هر ارتفاع و در همان صفحه قرینه، عمودی و برای هر عمق بخصوص از آبشستگی، یک توزیع سرعت دارد. این سرعت از صفر بر روی پایه و یا کمی دورتر از آن شروع و به یک مقدار ماکزیمم می رسد. این مقدار ماکزیمم حدود  $45\%$  سرعت جریان در آبراهه است و هر چه عمق آبشستگی بیشتر شود این سرعت نیز افزایش می یابد تا به  $80\%$  درصد سرعت عادی جریان در عمق آبشستگی ( $d_s = 2.3b$ ) برسد که در آن  $d_s$  و  $b$  به ترتیب عمق آبشستگی و عرض پایه می باشد.

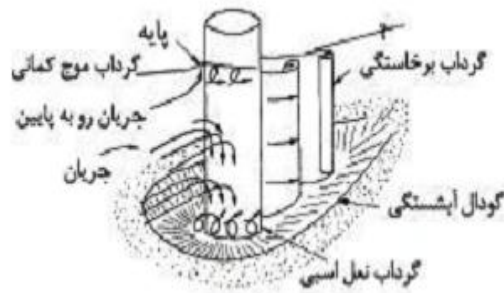
فشار ایستایی نه تنها موجب جریان رو به پایین می شود، بلکه باعث افزایش شتاب جریان در طرفین پایه می شود. گسیختگی جریان در اطراف پایه باعث می شود که در محل اتصال با جریان اصلی آبراهه، گردابهای دنباله دار ایجاد شود. سیستم گردابی دنباله دار به پایین دست منتقل شده و با سیستم نعل اسبی در کف آبراهه تداخل پیدا می کند. سیستم گردابی دنباله دار بصورت یک گرداب کوچک رسوبات را در کف آبراهه جدا می نماید.

### ۳-۳-۴- سیستم موج کمانی

سیستم موج کمانی در سطح آب تشکیل شده و جهت چرخش آن مخالف جهت چرخش جریان نعل اسبی است. جریان موج کمانی در جریانهای کم عمق اهمیت دارد. زیرا در جایی که این سیستم گردابی با جریان اصلی هماهنگ شود، بر حسب کاهش قدرت، سیستم رو به پایین می شود. اشکال (۲-۴) و (۲-۵) به خوبی توضیحات فوق را نمایش می دهند.



شکل ۲-۴. الگوی جریان در اطراف پایه استوانه های پل



شکل ۵-۲. جریان رو به پایین و سیستم‌های گردابی اطراف پایه استوان‌های پل

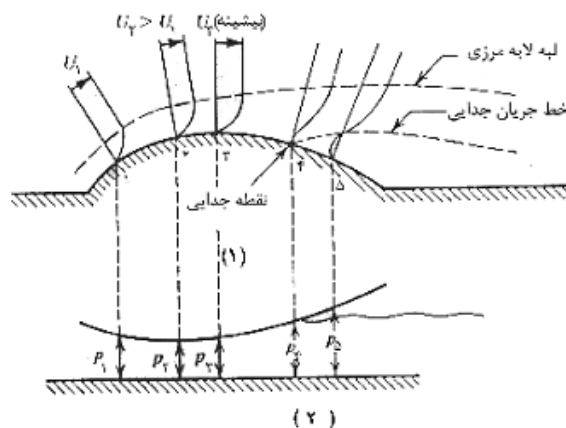
#### ۲-۴- جدایی و منطقه Wake

قرار داده شده مد نظر بگیرد  $U$  یک سطح منحنی که در مسیر جریان یک سیال با سرعت (شکل ۱-۶-۲). آن سطح جریان را منحرف می‌کند. در ناحیه باریک جریان، سرعت افزایش می‌یابد. افزایش سرعت باعث کاهش فشار می‌شود، فشار در تاج منحنی که سرعت بیشینه است به کمترین مقدار خود می‌رسد و بعد از آن دوباره فشار بالا می‌رود (شکل ۱-۶-۲).

گرادیان سرعت در نقاط ۱ و ۲ مثبت است. همچنین تا زمانی که فشار در حال کاهش است، تاثیر بسزایی روی لایه مرزی دارد. از اینرو رشد لایه مرزی در سطح منحنی در مقایسه با صفحه مسطح با گرادیان فشار صفر کندتر است. بعد از نقطه ۱. فشار در طول حرکت افزایش می‌یابد و در نتیجه با جریان مخالفت می‌کند و موجب می‌شود که حرکت ذرات سیال نزدیک سطح با یک وقفه مواجه شوند. بنابراین در نقطه ۲. گرادیان سرعت صفر می‌شود. در نقطه ۳ گرادیان جهت سرعت معکوس می‌شود. این بدان جهت است که جریان سیال نمی‌تواند در روی سطح ادامه پیدا کند و از آن جدا می‌شود. این پدیده که سیال قبل از آنکه به پایان سطح برسد از آن جدا می‌شود را، پدیده جدایی<sup>۱</sup> نامند.

جدایی باعث می‌شود که گرادیان سرعت صفر باشد ( $\frac{dU}{dy} = 0$ ) و زمانی رخ می‌دهد که گرادیان فشار مثبت در سطح وجود داشته باشد. خطی که در طول مسیر جریان، نقاط با سرعت صفر را بهم وصل می‌کند، خط جریان جدایی<sup>۲</sup> نامند. جدایی باعث می‌شود که گردابه‌های کوچکی در اثر کاهش انرژی بوجود آیند. این موضوع باعث می‌شود که فشار بعد از جدایی ثابت بماند و بیشتر نشود، تا جایی که دیگر جدایی نباشد.

ناحیه پایین دست جدایی که گردابه‌های کوچک زیادی در آن وجود دارد و فشار نیز ثابت است را، در هر دو لایه مرزی متلاطم و ورقه‌ای می‌تواند Wake گویند. جدایی و Wake ناحیه دنباله یا اتفاق بیافتد. در لایه ورقه‌ای که سرعت پایین است امکان جدایی بیشتر از لایه مرزی متلاطم است.

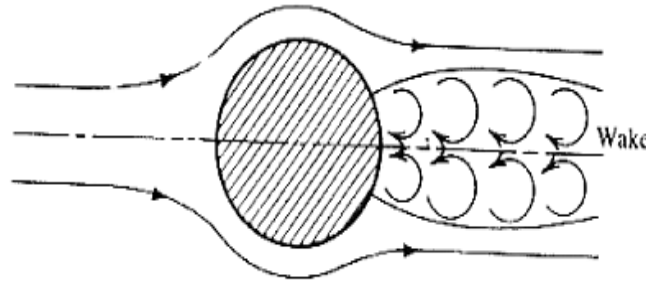


1. Separation
2. Separation Stream line

شکل ۶-۲. نمایش منطقه جدایی هنگام برخورد سیال با سطح منحنی

### ۲-۵- جداسدگی خطوط جریان در اطراف پایه

حال این موضوع در مورد پایه پل مورد Wake بعد از مشخص شدن مفهوم جدایی و بررسی قرار می گیرد. هنگامی که آب به پایه پل برخورد می کند سرعت آن صفر می شود، این نقطه را نقطه سکون می نامند. در نقطه سکون فشار بیشترین مقدار را دارد و هر چه از این نقطه دورتر شویم فشار کاهش یافته و سرعت افزایش پیدا می کند. از نقطه ای که سرعت کاهش می یابد، آب بتدریج انرژی جنبشی خود را از دست می دهد و دیگر قادر نیست بر افزایش فشار غلبه کند و لذا یک جداسدگی در جریان ایجاد می شود. نقطه ای که در آن جدایی آغاز می شود نقطه جداسدگی<sup>۱</sup> است Wake نامیده می شود و منطقه ای که در پشت پایه بوجود می آید، همان منطقه Wake است.



شکل ۷-۲. نمایش منطقه wake پشت پایه پل

جداسدگی باعث می شود که یک لایه مرزی جدید بوجود آید. برای یک جریان ورقه ای<sup>۲</sup> بزرگ می باشد و فشار در این Wake نقطه جداسدگی از کناره پایه شروع می شود، لذا منطقه منطقه، منفی، ثابت و مساوی فشار در نقطه جدایی می باشد. ولی اگر جریان متلاطم<sup>۳</sup> باشد، نقطه کوچک می شود و لذا فشار در این منطقه Wake جدایی رو به پایین منتقل می شود و منطقه کمی مثبت است. بنابراین مقدار نیروی کششی<sup>۴</sup> برای جریان ورقه ای بزرگتر از جریان متلاطم است و نیروی کششی از رابطه زیر بدست می آید.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (2-1)$$

$$(F_D)_{\text{Turbulence}} \approx \frac{1}{3} (F_D)_{\text{laminar}} \quad (2-2)$$

که در آن:

$F_D$ : نیروی کششی یا دراگ،

$C_D$ : ضریب دراگ،

$\rho$ : دانسیته مایع و

$V$ : سرعت جریان.

حداقل نیروی کششی بر روی یک استوانه زمانی اتفاق می افتد که لایه مرزی متلاطم باشد. به همین دلیل اگر سطح یک پایه زیر و ناصاف باشد، جریان متلاطم می شود و در نتیجه یک لایه مرزی متلاطم در پشت پایه بوجود می آید و لذا نیروی کششی بر روی پایه کاهش می یابد و در نتیجه آبستتگی را کاهش می دهد.

1. Separation point

2 1. Laminar

3 2. Turbulence Flow

4 3. Drag force

## ۶-۲- حرکت نخستین<sup>۱</sup>

در اثر حرکت آب، نیروهای هیدرودینامیک به ذرات رسوبی موجود در بستر رودخانه وارد می شود. چنانچه برآیند نیروها برابر وزن اشباع ذره رسوبی گردد، ذره در آستانه حرکت قرار گرفته و چنانچه شدت جریان افزایش یابد، نیروهای هیدرودینامیکی افزایش یافته، در نتیجه ذرات شروع به حرکت کرده و فرسایش عمومی بستر رودخانه شروع خواهد شد. لحظه ای که ذرات رسوبی بستر رودخانه شروع به حرکت نمایند، در اصطلاح، آستانه حرکت یا حرکت نخستین نام دارد. به عبارت دیگر هنگامی که نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر یک ذره از لحاظ مقدار به حدی برسند که به ازاء مقداری بیشتر از آن، ذره به حرکت درآید، آن حرکت اولیه را حرکت نخستین گویند. سرعت و تنش برشی در آستانه حرکت را سرعت و تنش بحرانی نامند. البته ممکن است ذرات قبل از رسیدن به آستانه حرکت بصورت بالا و پایین رفتن در محل خود دارای انرژی جنبشی باشند، ولی چنانچه شرایط جریان از آستانه حرکت عبور کند، ذرات به طرف پایین دست به حرکت در خواهند آمد.

تعریف شروع حرکت ذره در بین همه دانشمندان یکسان نمی باشد. بعضی محققان آستانه حرکت را شرایطی از جریان کلی دانسته که در آن حرکت یک یا چند ذره با چشم دیده شود. بعضی دانشمندان از جمله اینشتین<sup>۲</sup> و کالینسکی<sup>۳</sup>، وجود لحظه ای را به عنوان حرکت نخستین قبول ندارند، زیرا معتقدند که در جریانهای متلاطم<sup>۴</sup> نمی توان حد متوسطی را به عنوان شروع حرکت ذره در نظر گرفت. در جریانهای متلاطم، بدلیل اینکه نیروهای هیدرودینامیکی در هر لحظه نسبت به یک حد متوسط تغییر می کند، یک ذره ممکن است در لحظه ای شروع به حرکت نماید که شرایط جریان متوسط کمتر از حد شروع حرکت ذره باشد.

البته برای مهندسين هیدرولیک، تعیین یک حد متوسط، به عنوان شروع حرکت ذره بسیار اهمیت دارد. زیرا چنانچه شرایط هیدرولیکی را در این لحظه بتوان فرمول بندی کرد می توان از آن برای اهداف زیر استفاده کرد:

۱- طراحی کانالهای پایدار (کانالهای بدون فرسایش)

۲- محاسبه مقدار رسوب حمل شده توسط جریان رودخانه،

۳- محاسبه مقدار رسوب در مخزن سد

۴- مطالعه مسائل مربوط به فرسایش بستر رودخانه (فرسایش عمومی یا موضعی)

## ۷-۲- پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی

پارامترهای موثر بر آبشستگی موضعی را می توان به چهار گروه تقسیم کرد:

### ۱-۷-۲- پارامترهای هندسی

۱- عرض پایه [b]: قطر پایه تاثیر مستقیم روی عمق آبشستگی دارد، زیرا که با افزایش قطر پایه، سرعت جریان عبوری بین پایه ها افزایش و در نتیجه عمق آبشستگی افزایش پیدا می کند.

۲- طول پایه [l]: عموماً طول پایه تاثیر محسوسی روی عمق آبشستگی ندارد. بخصوص اگر پایه ها طول پایه موازی جریان باشند. ولی اگر پایه با زاویه ای نسبت به جریان قرار گرفته باشد، طول پایه تاثیر خیلی زیادی بر روی آبشستگی خواهد داشت.

۳- شکل پایه: شکل پایه تاثیر عمده ای روی آبشستگی دارد، بنحوی که یک پایه مربعی شکل، ماکزیمم عمق آبشستگی را دارد.

۴- زاویه محور پایه با جهت جریان (a)،

<sup>1</sup> 1. Threshold

1. Einstein

2. Kalinski

<sup>4</sup>3. Turbulent flow