

جمهوری اسلامی ایران  
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور

# راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی

نشریه شماره ۵۴۹

وزارت نیرو

دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا

<http://seso.moe.org.ir>

معاونت نظارت راهبردی

دفتر نظام فنی اجرایی

<http://tec.mporg.ir>





بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

شماره:	۱۰۰/۱۶۹۲۴
تاریخ:	۱۳۹۰/۲/۲۷
بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	
موضوع: راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی	
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی - مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷-هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۴۹ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان «راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده کنند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنمای بهتری در اختیار داشته باشند، با ارسال نسخه‌ای از آن به دفتر نظام فنی اجرایی رعایت مفاد این بخشنامه الزامی نیست.</p>	
<p>ابراهیم عزیزی</p>	



## اصلاح مدارک فنی

### خواننده گرامی:

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر

گزارش فرمایید:

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی

[Email:tsb.dta@mporg.ir](mailto:tsb.dta@mporg.ir)

[web: http://tec.mporg.ir/](http://tec.mporg.ir)



## بسمه تعالی

### پیشگفتار

یکی از مهم‌ترین عوامل آسیب و خرابی سازه‌های هیدرولیکی، وقوع آبشستگی موضعی است. نظر به این که طراحی مطمئن و اقتصادی سازه‌های هیدرولیکی که در مسیر جریان قرار دارند مستلزم تخمین مناسبی از حداکثر عمق آبشستگی است، لذا تهیه راهنمایی برای تخمین آبشستگی موضعی ضروری است.

با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه نشریه "راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی" را با هماهنگی دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور در دستور کار قرار داد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی اجرایی کشور به معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (دفتر نظام فنی اجرایی) ارسال نمود که پس از بررسی، بر اساس ماده ۲۳ قانون برنامه و آیین‌نامه استانداردهای اجرایی مصوب هیات محترم وزیران و طبق نظام فنی اجرایی کشور (مصوب شماره ۳۳۴۹۷/ت/۴۲۳۳۹ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران) تصویب و ابلاغ گردید.

بدین وسیله معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور از تلاش و جدیت کارشناسان محترم دفتر نظام فنی اجرایی و نماینده مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور وزارت نیرو، جناب آقای مهندس محمد حاج رسولیها و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید و از ایزد منان توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران را آرزومند می‌باشد.

امید است متخصصان و کارشناسان با ابراز نظرات خود درخصوص این نشریه ما را در اصلاحات بعدی یاری فرمایند.

**معاون نظارت راهبردی**

**۱۳۹۰**

## ترکیب اعضای تهیه‌کننده، کمیته و ناظران تخصصی

این راهنما در معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و با مسوولیت آقای دکتر مسعود قدسیان و همکاری افراد زیر تهیه شده است. اسامی این افراد به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر می‌باشد:

آقای امیر رضا زراتی	دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکترای سازه‌های هیدرولیکی
آقای امیر احمد دهقانی	دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکترای هیدرولیک
آقای مسعود قدسیان	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای هیدرولیک
آقای حسین منتصری	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای هیدرولیک
<b>گروه نظارت</b> که مسوولیت نظارت تخصصی بر تدوین این راهنما را به‌عهده داشته‌اند، به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:		
آقای حسن احمدی	شرکت مهندسين مشاور تهران سحاب	دکترای هیدرولیک
آقای چنگیز فولادی	شرکت مهندسين مشاور پیماب	دکترای هیدرولیک
خانم کیان‌دخت کباری	کارشناس آزاد	لیسانس مهندسی راه و ساختمان

**اعضای کمیته تخصصی مهندسی رودخانه و سواحل طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور که بررسی و تایید راهنمای حاضر را برعهده داشته‌اند به‌ترتیب حروف الفبا عبارتند از:**

آقای محمود افسوس	شرکت مهندسين مشاور سازه‌پردازی ایران	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
آقای محمد ابراهیم بنی‌حیب	دانشگاه تهران	دکترای عمران - مهندسی آب
آقای محمدحسن چیتی	شرکت ساز آب‌پردازان	فوق لیسانس مهندسی سازه‌های آبی
آقای فریدون خزاعی	انجمن شرکت‌های ساختمانی	فوق لیسانس مهندسی راه و ساختمان
خانم نرگس دشتی	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو	لیسانس مهندسی آبیاری
آقای شکور سلطانی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	دکترای مهندسی آب
آقای علی فاخر	دانشگاه تهران	دکترای عمران
آقای حسام فولادفر	موسسه تحقیقات آب	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
آقای جبار وطن‌فدا	وزارت نیرو	فوق لیسانس مهندسی سازه‌های هیدرولیکی

### همکاران معاونت نظارت راهبردی:

آقای علیرضا دولتشاهی	دفتر نظام فنی اجرایی	لیسانس مهندسی کشاورزی
خانم فرزانه آقارمضانعلی	دفتر نظام فنی اجرایی	فوق لیسانس مهندسی صنایع
خانم ساناز سرافراز	دفتر نظام فنی اجرایی	فوق لیسانس مهندسی منابع آب



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۳	<b>فصل اول - انواع آبستگي</b>
۵	۱-۱- کلیات
۶	۲-۱- مراحل توسعه آبستگي
۶	۳-۱- انواع آبستگي
۷	۴-۱- آبستگي عمومي
۷	۱-۴-۱- پايين افتادگي تراز رودخانه
۸	۲-۴-۱- جابجايي آبراهه
۹	۳-۴-۱- آبستگي در خم رودخانهها
۹	۴-۴-۱- آبستگي در محل اتصال آبراههها
۹	۵-۱- آبستگي ناشي از تنگشدگي
۱۱	۶-۱- آبستگي موضعي
۱۱	۷-۱- آبستگي کل
۱۲	۸-۱- آبستگي در آب زلال و آب حاوي رسوب
۱۲	۹-۱- آبستگي استاتيكي و ديناميكي
۱۲	۱۰-۱- آبستگي دريائي
۱۲	۱۱-۱- آبستگي ناشي از قايقراني
۱۵	<b>فصل دوم - مباني فرسايش و رسوب در رودخانه</b>
۱۷	۱-۲- کلیات
۱۷	۲-۲- انواع رسوبات
۱۸	۳-۲- خواص فيزيكي رسوبات
۲۰	۴-۲- توزيع دانهبندی رسوبات
۲۰	۵-۲- پديده مسلح شدن بستر
۲۱	۶-۲- بررسی آستانه حرکت ذرات (پایداری و ناپایداری مجاری)
۲۱	۱-۶-۲- روش سرعت بحرانی
۲۱	۲-۶-۲- روش نیروی بالا برنده
۲۲	۳-۶-۲- روش تنش برشی بحرانی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲۵	۷-۲- شکل‌های مختلف بستر
۲۷	<b>فصل سوم - داده‌های لازم جهت تخمین عمق آبشستگی</b>
۲۹	۱-۳- کلیات
۲۹	۲-۳- بده جریان
۳۰	۳-۳- هندسه مقطع
۳۱	۴-۳- تراز سطح آب و عمق جریان
۳۳	۵-۳- سرعت جریان
۳۳	۶-۳- مصالح بستر
۳۴	۷-۳- خصوصیات سازه‌های مورد نظر
۳۵	<b>فصل چهارم - آبشستگی اطراف پایه پل‌ها</b>
۳۷	۱-۴- کلیات
۳۷	۲-۴- الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل
۴۱	۳-۴- تغییرات زمانی آبشستگی
۴۳	۴-۴- روابط تخمین حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل
۴۳	۱-۴-۴- روابط تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های منفرد
۴۶	۲-۴-۴- تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل با هندسه پیچیده
۵۲	۳-۴-۴- تخمین عمق آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها
۵۵	۴-۴-۴- مثال
۶۳	<b>فصل پنجم - آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها</b>
۶۵	۱-۵- کلیات
۶۵	۲-۵- الگوی جریان
۶۵	۱-۲-۵- الگوی جریان در اطراف یک آبشکن یا تکیه‌گاه
۶۷	۲-۲-۵- الگوی جریان بین دو آبشکن
۶۹	۳-۵- تغییرات زمانی آبشستگی
۷۰	۴-۵- تخمین حداکثر عمق آبشستگی
۷۴	۵-۵- مقایسه روابط ارائه شده
۷۴	۱-۵-۵- مثال
۷۷	<b>فصل ششم - آبشستگی پایین دست تثبیت کننده‌های بستر (آستانه)</b>
۷۹	۱-۶- کلیات

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۸۰	۲-۶- الگوی جریان
۸۰	۳-۶- تغییرات زمانی عمق آبستگی
۸۳	۴-۶- روابط تخمین حداکثر عمق آبستگی
۸۵	۱-۴-۶- مثال
۸۷	<b>فصل هفتم - آبستگی ناشی از جت‌های ریزشی</b>
۸۹	۱-۷- کلیات
۸۹	۲-۷- الگوی جریان
۹۰	۱-۲-۷- الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی
۹۲	۲-۲-۷- الگوی جریان در جت‌های ریزشی مایل
۹۳	۳-۷- تغییرات زمانی عمق آبستگی
۹۴	۴-۷- روابط تخمین ابعاد حفره آبستگی ناشی از جت‌های ریزشی
۹۴	۱-۴-۷- روابط آبستگی ناشی از جت‌های ریزشی عمودی
۹۶	۲-۴-۷- تخمین آبستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل
۱۰۰	۵-۷- مقایسه روابط ارائه شده
۱۰۱	۱-۵-۷- مثال
۱۰۳	<b>فصل هشتم - آبستگی ناشی از جت‌های افقی</b>
۱۰۵	۱-۸- کلیات
۱۰۵	۲-۸- الگوی جریان در جت‌های افقی
۱۰۵	۱-۲-۸- جت مستغرق عمیق
۱۰۶	۲-۲-۸- جت مستغرق کم عمق
۱۰۶	۳-۸- تغییرات زمانی ابعاد حفره آبستگی
۱۰۶	۱-۳-۸- پایاب کم عمق $y_t < 0.5D$
۱۰۶	۲-۳-۸- پایاب عمیق $y_t \geq 0.5D$
۱۰۷	۴-۸- تخمین ابعاد حفره آبستگی ناشی از جت‌های افقی
۱۰۷	۱-۴-۸- روابط مربوط به جت‌های دو بعدی
۱۱۰	۲-۴-۸- روابط مربوط به جت‌های سه بعدی
۱۱۲	۵-۸- مقایسه روابط ارائه شده
۱۱۳	۱-۵-۸- مثال

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۱۵	فصل نهم - آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش
۱۱۷	۱-۹- کلیات
۱۱۷	۲-۹- الگوی جریان
۱۱۷	۱-۲-۹- الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش معمولی
۱۱۸	۲-۲-۹- الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی
۱۲۰	۳-۹- تغییرات زمانی آبشستگی
۱۲۱	۴-۹- تخمین حداکثر عمق آبشستگی
۱۲۱	۱-۴-۹- روابط حداکثر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش معمولی
۱۲۲	۲-۴-۹- روابط حداکثر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی با آرایش‌های مختلف آستانه ۱۲۲
۱۲۵	۳-۴-۹- مثال
۱۲۷	منابع و مراجع

## فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵	شکل ۱-۱- آبشستگی موضعی پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی
۶	شکل ۲-۱- مراحل توسعه حفره آبشستگی
۸	شکل ۳-۱- فرسایش جداره و بستر رودخانه در محل قوس یک رودخانه
۸	شکل ۴-۱- فرسایش جداره و بستر رودخانه در اطراف پل در یک رودخانه
۹	شکل ۵-۱- نمایی از آبشستگی جداره خارجی خم رودخانه و جریان ثانویه
۱۰	شکل ۶-۱- تقاطع دو رودخانه تامپسون و فراسر در آمریکای جنوبی
۱۰	شکل ۷-۱- الگوی جریان، رسوب‌گذاری و فرسایش در تقاطع دو رودخانه
۱۱	شکل ۸-۱- اجزای آبشستگی
۱۹	شکل ۱-۲- ضریب دراگ تابعی از رینولدز ذره و ضریب شکل
۱۹	شکل ۲-۲- لزجت سینماتیکی آب
۲۳	شکل ۳-۲- منحنی شیلدز
۲۳	شکل ۴-۲- منحنی اصلاح شده شیلدز
۳۲	شکل ۱-۳- تعاریف شکل و هندسه مقطع رودخانه
۳۸	شکل ۱-۴- الگوی جریان در اطراف یک پایه استوانه‌ای
۳۹	شکل ۲-۴- محل تشکیل گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه‌های استوانه‌ای و جهت تشکیل این گرداب‌ها
۴۱	شکل ۳-۴- الگوی سه بعدی جریان اطراف پایه پل

## فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۴۲	شکل ۴-۴- نمودار میزان آبشستگی بر حسب: الف- زمان و ب- سرعت برشی
۴۷	شکل ۴-۵- اجزای پایه‌های پیچیده
۴۸	شکل ۴-۶- نمودار ضریب $k_{hpier}$ بر حسب $f/apier$ و $h1/aspier$
۴۹	شکل ۴-۷- عرض معادل سر شمع
۵۰	شکل ۴-۸- عرض تصویر شده شمع‌ها برای حالت کلی
۵۱	شکل ۴-۹- ضریب فاصله شمع‌ها
۵۱	شکل ۴-۱۰- ضریب ردیف‌های هم راستا برای حالت خاص
۵۲	شکل ۴-۱۱- ضریب ارتفاع گروه شمع‌ها
۵۳	شکل ۴-۱۲- نمودار بین تغییر میزان آبشستگی و فاصله‌ی نسبی دو پایه در حالت در امتداد جریان
۵۳	شکل ۴-۱۳- نمودار بین تغییرات میزان آبشستگی و فاصله‌ی نسبی دو پایه در دو حالت عمود بر جریان و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان
۵۴	شکل ۴-۱۴- نمودار بین زاویه‌ی برخورد جریان با عمق آبشستگی در دو پایه
۵۷	شکل ۴-۱۵- مربوط به مثال ۲
۵۹	شکل ۴-۱۶- شکل مربوط به مثال ۳
۶۶	شکل ۵-۱- انواع تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها
۶۷	شکل ۵-۲- الگوی جریان اطراف یک آبشکن
۶۸	شکل ۵-۳- الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه
۶۸	شکل ۵-۴- خط الراس و جدایی جریان در اطراف یک آبشکن منفرد در مسیر مستقیم (پلان)
۶۹	شکل ۵-۵- انواع الگوی جریان چرخشی بین آبشکن‌ها
۷۹	شکل ۶-۱- جریان روی آستانه و آبشستگی پایین‌دست آستانه با تاج کوتاه
۷۹	شکل ۶-۲- جریان روی آستانه و آبشستگی پایین‌دست آستانه با تاج پهن
۸۰	شکل ۶-۳- الگوی جریان پایین‌دست آستانه
۸۳	شکل ۶-۴- تغییرات $\alpha$ بر حسب $L/y_1$ و $D/y_1$
۸۴	شکل ۶-۵- معرفی پارامترهای آبشستگی پایین‌دست آستانه سنگ‌فرشی شبیدار
۸۹	شکل ۷-۱- نمای کلی از یک جت عمودی
۹۱	شکل ۷-۲- الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از آن برای جت عمودی
۹۲	شکل ۷-۳- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره آبشستگی
۹۳	شکل ۷-۴- شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل
۱۰۵	شکل ۸-۱- نمای کلی از یک جت مستغرق افقی
۱۰۹	شکل ۸-۲- مقادیر $\lambda$ بر حسب $d_{90}$
۱۰۹	شکل ۸-۳- نمای کلی یک دریچه همراه با کف بند به طول $L$
۱۱۷	شکل ۹-۱- آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش
۱۱۸	شکل ۹-۲- الگوی جریان در فرآیند آبشستگی پایین‌دست یک پرش هیدرولیکی

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۱۸	شکل ۹-۳- الگوی جریان در حالت بدون آستانه
۱۱۹	شکل ۹-۴- الگوی جریان در صورت وجود آستانه انتهایی
۱۱۹	شکل ۹-۵- الگوی جریان در سایر حالات قرارگیری آستانه
۱۲۰	شکل ۹-۶- نمای آزمایشات فرهودی و اسمیت (۱۹۸۲-۱۹۸۵)
۱۲۳	شکل ۹-۷- آبشستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی
۱۲۴	شکل ۹-۸- آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی و وجود آستانه میانی
۱۲۴	شکل ۹-۹- آبشستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی و وجود آستانه جانبی

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۰	جدول ۳-۱- ارتباط بین دوره بازگشت سیلاب و عمر مفید سازه با تغییرات ضریب احتمال
۳۱	جدول ۳-۲- فواصل توصیه شده بین مقاطع عرضی برای نقشه‌برداری
۴۴	جدول ۴-۱- ضریب تصحیح برای شکل‌های مختلف نوک پایه در رابطه CSU
۴۴	جدول ۴-۲- ضریب تصحیح برای زوایای مختلف برخورد جریان به پایه ( $K_2$ ) در رابطه CSU
۴۴	جدول ۴-۳- ضریب تصحیح برای شرایط مختلف بستر در رابطه CSU
۴۶	جدول ۴-۴- معرفی پارامترهای رابطه ملویل (۲۰۰۰)
۴۷	جدول ۴-۵- تعدادی از روابط آبشستگی حول پایه پل
۵۴	جدول ۴-۶- مقادیر نسبت عمق آبشستگی گروه پایه به عمق آبشستگی تک پایه
۷۰	جدول ۵-۱- پارامتر $\alpha$ برای تکیه‌گاه‌های با دیوار قائم و باله‌ای
۷۱	جدول ۵-۲- ضرایب تصحیح رابطه احمد
۷۲	جدول ۵-۳- معرفی ضرایب رابطه ملویل (۲۰۰۰)
۷۳	جدول ۵-۴- برخی از روابط ارائه شده برای حداکثر عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌های بسته
۷۳	جدول ۵-۵- برخی از روابط ارائه شده برای حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز
۷۴	جدول ۵-۶- ضریب $K_B$ در رابطه هافمن (۱۹۹۵)
۸۱	جدول ۶-۱- ضریب $\gamma$
۸۲	جدول ۶-۲- ضرایب تجربی و توان‌ها در معادله ۴-۶
۹۷	جدول ۷-۱- مقادیر مختلف ضرایب ثابت روابط موجود در گروه اول
۹۸	جدول ۷-۲- مقادیر $a, b, c$ و $d$ معادله (۲۰-۷)
۹۹	جدول ۷-۳- مقادیر $a, b, c$ و $d$ در رابطه (۲۱-۷)

## فهرست جدول‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۰۲	جدول ۷-۴- مقدار حداکثر عمق آبستنگی با استفاده از روابط مختلف
۱۱۰	جدول ۸-۱- ضریب و توان‌های معادله (۸-۱۴)
۱۱۱	جدول ۸-۲- ضرایب $a$ ، $b$ در معادله (۸-۲۴)
۱۱۲	جدول ۸-۳- مقایسه برخی از روابط ارائه شده
۱۲۵	جدول ۹-۱- ضرایب $a$ و $b$ در رابطه ۱۰-۱۴ بر حسب $X_s/L$ و $W/B$
۱۲۵	جدول ۹-۲- مشخصات مربوط به مثال





## مقدمه

بحث آبشستگی هر چند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن 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 است.

سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان قرار می‌گیرند، الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر می‌دهند و به صورت موضعی باعث آبشستگی در این محدوده می‌شوند. شکل (۱-۱) تعدادی از سازه‌های هیدرولیکی و آبشستگی موضعی پایین دست آنها را نشان می‌دهد.

اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی آشکار می‌گردد که عمق آبشستگی قابل ملاحظه باشد به گونه‌ای که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار دهد یا موجب تخریب آنها گردد.

روشی که معمولاً برای تعیین میزان عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌باشد. لازم به ذکر است علی‌رغم این که تاکنون مطالعات وسیعی جهت برآورد آبشستگی موضعی اطراف سازه‌های هیدرولیکی مختلف انجام شده است، اما هنوز رابطه‌ای عمومی و جامع برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی اطراف هیچ کدام از سازه‌های رودخانه‌ای ارائه نشده است. همچنین نظر به این که مبانی تئوری و تجربی روش‌های مختلف بعضاً متفاوت بوده است، لذا مقدار آبشستگی موضعی محاسبه شده براساس روش‌های مختلف، الزاماً یکسان و یا نزدیک به یکدیگر نمی‌باشد. علاوه بر این اکثر مطالعات در شرایط مختلف آزمایشگاهی روی بستر ماسه‌ای و برای شرایط تعادل آبشستگی ارائه شده است و کاربرد این روابط برای شرایط طبیعی رودخانه عدم اطمینان‌هایی را در برآورد مقدار آبشستگی به همراه دارد. بدیهی است استفاده از یک روش بدون توجه به شرایط حاکم بر آن روش، مناسب نمی‌باشد. معمولاً توصیه می‌شود محاسبه عمق آبشستگی با روش‌های مختلف انجام شود و در نهایت براساس قضاوت مهندسی، مقدار آبشستگی موضعی تعیین شود. در بسیاری از موارد نیز می‌توان از مدل‌های فیزیکی برای تخمین عمق آبشستگی کمک گرفت.

## - هدف

هدف عمده این راهنما فراهم آوردن مجموعه‌ای برای بررسی پدیده آبشستگی و ارائه نحوه محاسبه مقدار آبشستگی موضعی اطراف سازه‌های مختلف رودخانه‌ای، می‌باشد. در این راهنما ابتدا آبشستگی، انواع آن و مبانی فرسایش و رسوب و داده‌های لازم برای تخمین عمق آبشستگی معرفی شده، سپس روابطی برای محاسبه عمق آبشستگی اطراف انواع سازه‌های هیدرولیکی ارائه می‌گردد. مهندسیین مربوط می‌توانند با پیش‌بینی مقدار عمق آبشستگی موضعی به کمک این روابط، روش مناسبی را برای کاهش یا جلوگیری از خسارت‌های ناشی از این پدیده ارائه دهند.

## - دامنه کاربرد

این راهنما با فراهم آوردن امکان تخمین آبشستگی می‌تواند در طراحی، نگهداری سازه‌های هیدرولیکی و طرح‌های تثبیت بستر رودخانه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین آبشستگی پایین دست جت‌های ریزشی و مستهلک کننده‌های انرژی نیز توسط این راهنما

پوشش داده شده است. این راهنما به‌طور عمده بر روی محیط‌های آبرفتی و به‌خصوص آبستتگی ایجاد شده توسط جریان دائمی متمرکز شده است و آبستتگی‌های دریایی یا آبستتگی توسط موج و جزر و مد را در بر نمی‌گیرد. همچنین در این راهنما به موارد زیر پرداخته نمی‌شود:

- تخمین اوج سیلاب

- جزییات و روش‌های تخمین شرایط جریان در سازه‌ها (محاسبات فرآب، روندیابی سیلاب، ...)

- ساماندهی رودخانه<sup>۱</sup>

اگرچه سعی شده است حتی‌الامکان راهنمایی جامع در اختیار مهندسين قرار گیرد، ولی به ناچار بعضی از بخش‌های این راهنما نسبت به دیگر قسمت‌ها شامل جزییات کم‌تری می‌باشد.

# فصل ۱

---

---

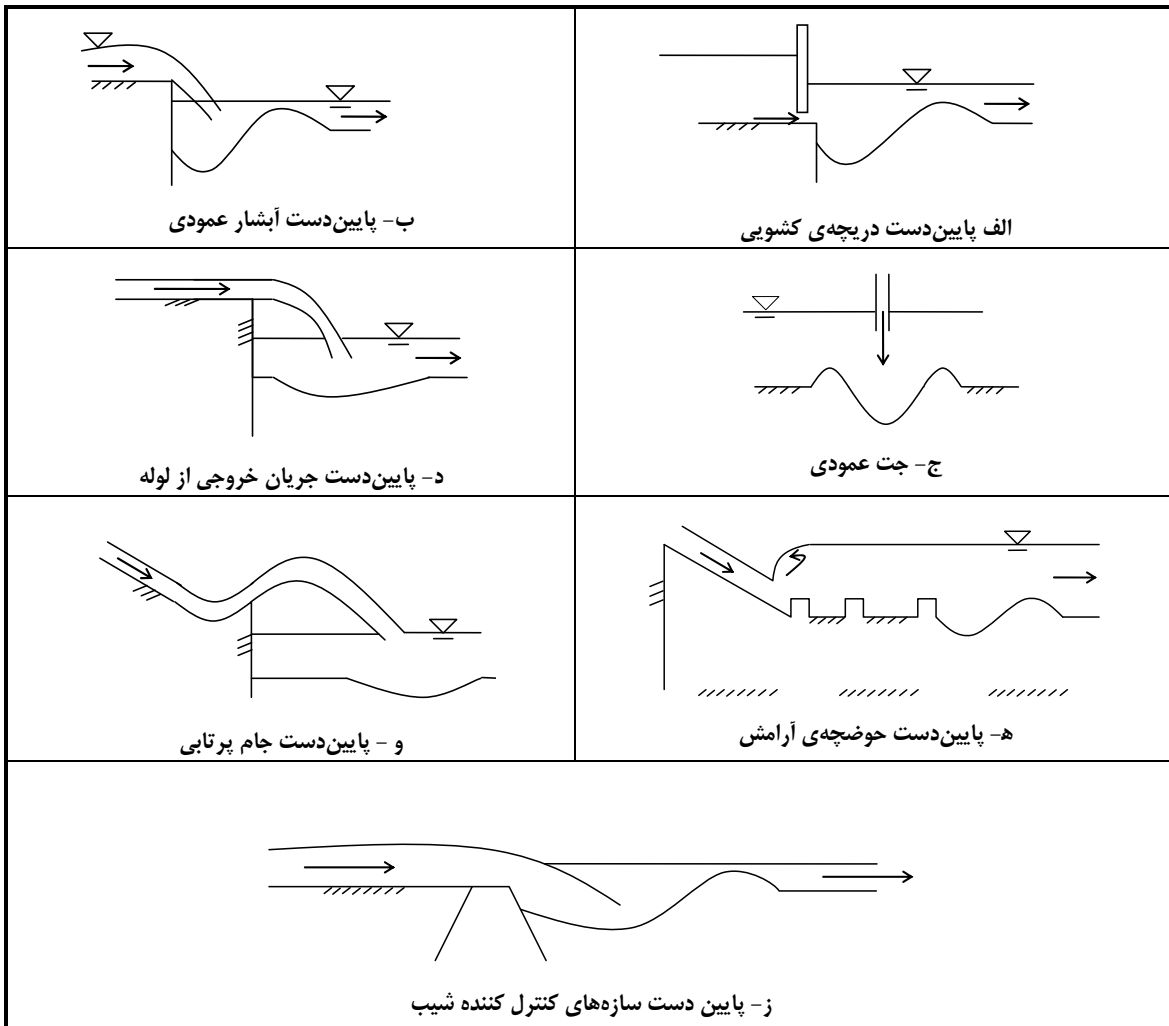
## انواع آبشستگی



## ۱-۱- کلیات

آبستگي در حقيقت جابجايي ذرات توسط جريان از محل استقرار اوليه آنها به مکان ديگري است. آبستگي ممکن است در نتيجه تغييرات طبيعي جريان در آبراهه يا در نتيجه فعاليت‌هاي انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسير جريان يا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به طور کلی آبستگي در اثر اندرکنش نيروهاي زیر حاصل می‌شود:

- ۱- نيروي محرک ناشي از جريان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می‌کند.
- ۲- نيروي مقاوم ناشي از اصطکاک ذرات و وزن ذره که در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می‌شود. حرکت یک ذره هنگامی آغاز می‌شود که نيروهاي اعمال شده توسط جريان یعنی نيروي کشسانی<sup>۱</sup> و بالابرنده<sup>۲</sup> که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نيروي مقاوم ذره غالب آید.



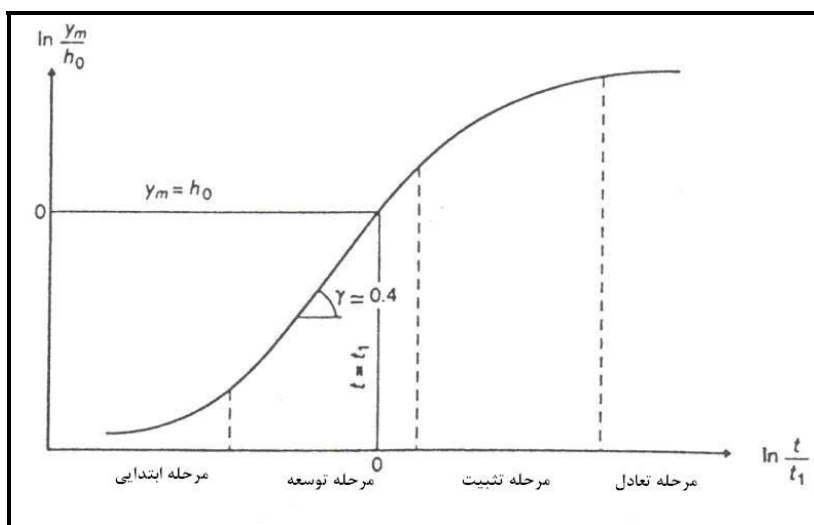
شکل ۱-۱- آبستگي موضعی پایین دست برخی از سازه‌های هیدروليکی

### ۲-۱- مراحل توسعه آبشستگی

براساس مطالعاتی که توسط محققینی نظیر بروسرز (۱۹۶۶)، دیتز (۱۹۶۹) و زنک (۱۹۷۸) انجام گرفته است، پدیده آبشستگی به طور کلی دارای چهار مرحله زیر است [۱۶]:

- مرحله ابتدایی<sup>۱</sup>
- مرحله توسعه<sup>۲</sup>
- مرحله تثبیت<sup>۳</sup>
- مرحله تعادل<sup>۴</sup>

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 هر کدام از مراحل آبشستگی در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- مراحل توسعه حفره آبشستگی

### ۳-۱- انواع آبشستگی

آبشستگی از جنبه‌های مختلف به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- 1- Initial Phase
- 2- Development Phase
- 3- Stabilization Phase
- 4- Equilibrium Phase

- آبستگي از نظر علت به وجود آمدن آن، که شامل آبستگي عمومي، آبستگي ناشي از تنگ شدگي مقطع و آبستگي موضعي است. از مجموع اين سه آبستگي، عمق آبستگي کل به دست مي آيد.
- آبستگي از نظر وضعيت حمل رسوب، که شامل آبستگي در حالت آب زلال و آبستگي در حالت آب حاوي رسوب است.
- آبستگي از نظر وضعيت ذرات رسوب در حفره آبستگي شامل آبستگي استاتيکي و ديناميکي مي شود. همچنين موارد ديگري از انواع آبستگي مانند آبستگي دريابي و آبستگي ناشي از قايقراني وجود دارد که در اين راهنما به آن پرداخته نمي شود و فقط به ذکر تعاريف آن بسنده مي شود. راهنماي حاضر بيش تر به محيط هاي رودخانه اي مربوط مي شود. دستورالعمل ها و راهنماهاي ديگري درباره آبستگي دريابي، به خصوص آبستگي در سازه هاي دريابي وجود دارد که براي اطلاعات بيش تر مي توان به آنها مراجعه نمود.

#### ۱-۴- آبستگي عمومي<sup>۱</sup>

اين نوع آبستگي زماني رخ مي دهد که جريان در بازه اي از رودخانه قادر باشد ذرات بستر را در طول مسير جابجا و با خود حمل کند که باعث کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه مي شود.

آبستگي عمومي شامل موارد زير مي شود [۴۳]:

- پايين افتادگي تراز رودخانه
  - مهاجرت جانبي رودخانه (جابجايي رودخانه در پلان)
  - آبستگي در قوس رودخانه ها و پيچانرودها
  - آبستگي در محل اتصال رودخانه ها و انشعابات
- پديده هاي فوق به طور مستقيم به مشخصات حوضه آبريز و شکل رودخانه وابسته اند.

#### ۱-۴-۱- پايين افتادگي تراز رودخانه

پايين افتادگي<sup>۲</sup> بستر رودخانه ها، ناشي از فرسايش طولاني مدت در بستر رودخانه ها مي باشد. پايين افتادگي تراز بستر به صورت يک پايين افتادگي کلي در بازه اي از رودخانه ظاهر مي شود. اين پايين افتادگي سبب مي شود بازه، شيب طولی خود را به منظور تطبيق با نيازهاي جريان و بار رسوبي حمل شده توسط جريان، تنظيم نمايد. اگر بار رسوبي ورودی به بازه مورد نظر کم تر از ظرفيت حمل واقعي در آن بازه باشد، پايين افتادگي بستر از بالادست بازه آغاز مي شود و به طرف پايين دست توسعه مي يابد، به گونه اي که شيب طولی کلي بازه را کاهش مي دهد. اما اگر آبراهه در پايين دست بازه مورد بحث، داراي ظرفيت حمل رسوب بيش تري باشد، پايين افتادگي از قسمت پايين دست بازه مورد نظر شروع مي شود و به بالادست پيشروي مي نمايد و موجب افزايش شيب بازه مورد نظر مي گردد.

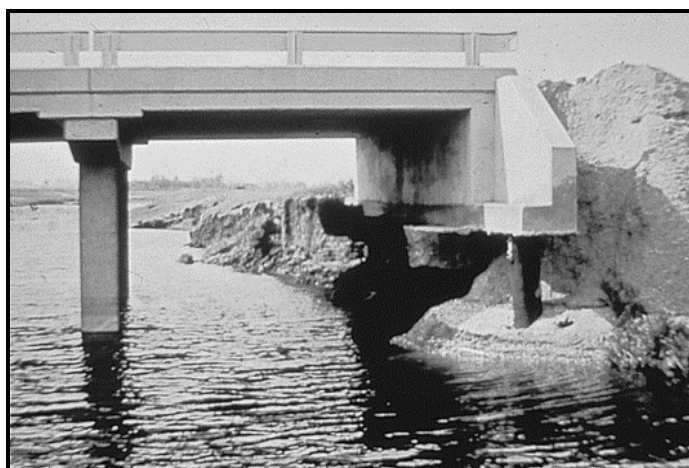
### ۱-۴-۲- جابجایی آبراهه

جابجایی آبراهه ممکن است به طور طبیعی، یا در نتیجه فعالیت‌های بشری اتفاق بیفتد. جابجایی بخشی از آبراهه به‌عنوان 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 جداره و بستر رودخانه در شکل‌های (۳-۱) و (۴-۱) 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 به‌صورت تدریجی حادث شود. در نظر گرفتن پتانسیل جابجایی آبراهه، بخش مهمی از طراحی سازه‌های مرتبط با رودخانه است. به‌طور کلی اگر پتانسیل جابجایی رودخانه وجود داشته باشد، پی‌ها باید براساس 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 جداره و بستر رودخانه در محل قوس یک رودخانه



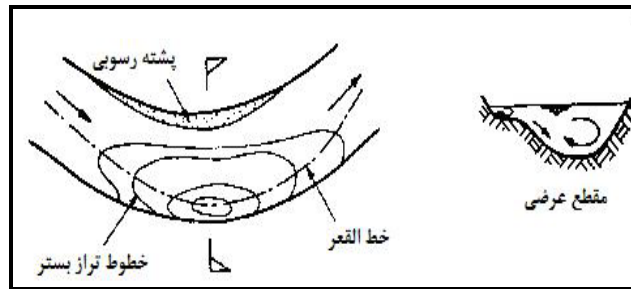
شکل ۱-۴- فرسایش جداره و بستر رودخانه در اطراف پل در یک رودخانه



### ۱-۴-۳- آبستگي در خم رودخانه‌ها<sup>۱</sup>

يکي از مشخصه‌هاي جريان در قوس رودخانه‌ها، وجود جريان‌هاي حلزوني است که موجب افزايش آبستگي در ساحل خارجي خم مي‌گردد. آبستگي در خم‌ها ممکن است مربوط به پيشروي پيچانرود<sup>۲</sup> نيز باشد. آبستگي خم که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است يک فرآيند پيچيده است و به پارامترهاي زير بستگي دارد:

- انحناي خم
- نسبت عرض به عمق جريان
- خصوصيات جريان
- فرسايش‌پذيري جداره
- دانه‌بندی مصالح بستر



شکل ۱-۵- نمایی از آبستگي جداره خارجي خم رودخانه و جريان ثانويه [۴۸]

### ۱-۴-۴- آبستگي در محل اتصال آبراهه‌ها<sup>۳</sup>

نوعي آبستگي است که در محل تقاطع دو رودخانه يا تقاطع آبراهه‌ها در يک رودخانه شرياني ايجاد مي‌شود. ملویل و کلمن (۲۰۰۰) فرآيند آبستگي در تقاطع آبراهه‌ها را چنين عنوان نمودند: جريان‌هاي عبوري از دو رودخانه همگرا در محور مرکزي تقاطع با يکديگر برخورد کرده و به سمت بستر منحرف مي‌شوند. اين جريان پس از برخورد با بستر با حرکت در جهت پايين دست به سمت سطح آب بر مي‌گردند [۴۹]. شکل (۱-۶) دو رودخانه تامپسون و فراسر در آمريکاي جنوبي و محل تقاطع آنها را نشان مي‌دهد. در شکل (۱-۷) چگونگي فرآيند حاصل از برخورد دو جريان و آبستگي حاصل از آن نشان داده شده است.

### ۱-۵-۱- آبستگي ناشي از تنگ‌شدگي<sup>۴</sup>

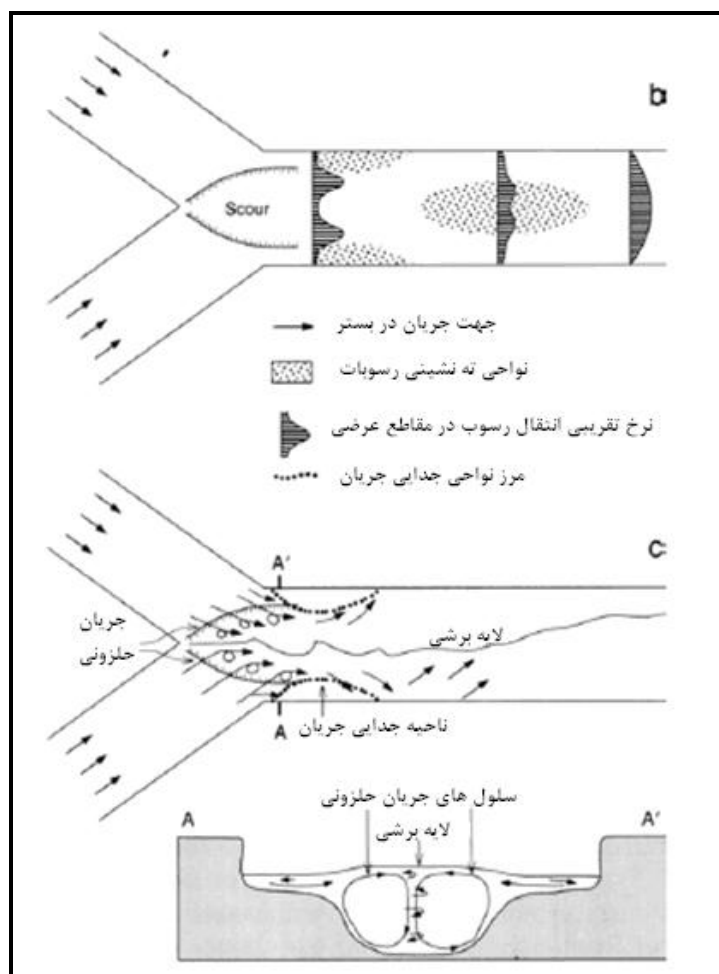
وجود تنگ‌شدگي مقطع در مسير جريان باعث افزايش سرعت جريان و بالا رفتن قدرت فرسايشي جريان در اين محل مي‌شود. آبستگي ايجاد شده در اين حالت را آبستگي ناشي از تنگ‌شدگي مي‌گویند. آبستگي ناشي از تنگ‌شدگي به‌طور معمول نتيجه

1- Bend Scour  
2- Meander  
3- Confluence Scour  
4- Contraction scour

محدود کردن عرض رودخانه می‌باشد. به‌عنوان مثال تکیه‌گاه‌های کناری پل‌ها و پایه‌های پل که در وسط آبراهه احداث می‌گردند، باعث کاهش عرض مجرا و در نتیجه آبشستگی می‌شوند.



شکل ۱-۶- تقاطع دو رودخانه تامپسون و فراسر در آمریکای جنوبی



شکل ۱-۷- الگوی جریان، رسوب‌گذاری و فرسایش در تقاطع دو رودخانه

۱-۶- آبستگي موضعي<sup>۱</sup>

اين نوع آبستگي ناشي از اثر موضعي سازه بر روي الگوي جريان مي باشد که به صورت موضعي در پايين دست و يا اطراف سازه مورد نظر رخ مي دهد. اين نوع آبستگي ممکن است به تنهائي و يا به همراه آبستگي هاي ديگر باشد. آبستگي موضعي بر اثر ايجاد موانعي مانند پايه هاي پل ها، تکیه گاه هاي کناري و آبشکن ها در مسير جريان و در اطراف اين موانع رخ مي دهد. اين موانع مي توانند سرعت موضعي جريان و آشفتگي آن را افزايش دهند و بسته به شکل سازه مي توانند گردابه هاي ايجاد نمايند که نيروهاي فرسايشي اضافي را بر بستر اطراف سازه اعمال نمايند. در نتيجه، نرخ حرکت رسوب و فرسايش به صورت موضعي در حوالی اين سازه ها افزايش مي يابد و منجر به پايين رفتن موضعي بستر نسبت به تراز عمومي بستر آبراهه مي گردد.

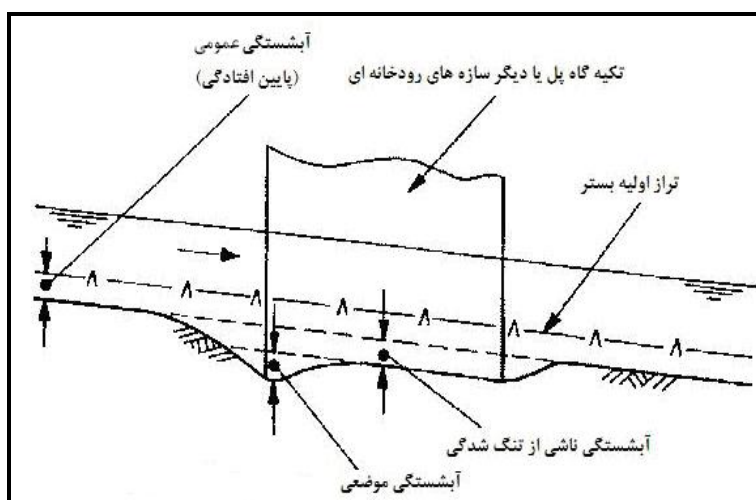
۱-۷- آبستگي کل<sup>۲</sup>

عمق آبستگي کل مرتبط با يك سازه مشخص، از مجموع سه آبستگي زير به دست مي آيد:

- آبستگي عمومي
- آبستگي ناشي از تنگ شدگي
- آبستگي موضعي

تراز موضعي بستر حاصل از هر کدام از آبستگي هاي فوق، به عنوان شرايط اوليه براي تخمين قسمت ديگر به کار مي رود [۴۳].

شکل (۸-۱) نمونه اي از سه قسمت آبستگي کل را نشان مي دهد.



شکل ۱-۸- اجزای آبستگي [۴۸]

### ۸-۱- آبخستگی در آب زلال<sup>۱</sup> و آب حاوی رسوب<sup>۲</sup>

آبخستگی در آب زلال در شرایطی اتفاق می‌افتد که مواد بستر در بالادست محدوده آبخستگی 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 آبخستگی 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.

آبخستگی در آب حاوی رسوب سریع‌تر به مقدار حداکثر می‌رسد. در جریان‌های حاوی رسوب عمق آبخستگی حول یک مقدار میانگین (تعادلی) نوسان می‌نماید. آبخستگی موضعی برای رسوبات یکنواخت در شرایط آب زلال در حالت  $u/u_c < 1$  و در شرایط حمل رسوب در  $u/u_c > 1$  و مقدار حداکثر عمق آبخستگی در  $u/u_c = 1$  رخ می‌دهد. در این جا  $u$  سرعت متوسط جریان و  $u_c$  سرعت بحرانی در آستانه حرکت است [۴۳].

### ۹-۱- آبخستگی استاتیکی و دینامیکی

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

### ۱۰-۱- آبخستگی دریایی

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

### ۱۱-۱- آبخستگی ناشی از قایقرانی

قایقرانی و کشتیرانی در رودخانه‌ها نیز می‌تواند موجب آبخستگی شود که دلایل آن عبارتند از:

- 1- Clear Water Scour
- 2- Live Bed Scour

- افزایش موضعی سرعت در اطراف کشتی
  - جریان‌های ایجاد شده توسط پروانه کشتی
  - موج‌های سطحی (دنباله‌ای) ایجاد شده توسط کشتی (که اثرهای بیش‌تری را بر سواحل دارد)
- تأثیرات کشتیرانی بر میزان آبشستگی ممکن است با افزودن سرعت‌های جریان ناشی از کشتیرانی به سرعت جریان در حالت طبیعی (نبودن کشتی) در نظر گرفته شود. در بعضی حالات این تأثیرات به دلیل پی‌ریز کوتاه و کم بودن سرعت جریان حاصل از کشتیرانی بسیار اندک است.



## فصل ۲

---

---

مبانی فرسایش و رسوب در رودخانه





## ۲-۱- کلیات

همان گونه که بیان گردید آبهستگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بسترهای فرسایش‌پذیر صورت می‌گیرد. مصالح بستر ممکن است از نوع غیرچسبنده مانند شن، ماسه و یا مصالح چسبنده مانند رس و لای باشد. به‌طور کلی نرخ آبهستگی در مصالح مختلف متفاوت است. مصالح دانه‌ای و سست توسط جریان آب سریع‌تر فرسایش می‌یابند، در صورتی که مصالح چسبنده مقاومت بیش‌تری در برابر فرسایش از خود نشان می‌دهند. البته آبهستگی نهایی در مصالح چسبنده می‌تواند بیش‌تر از آبهستگی در بسترهای ماسه‌ای باشد [۵۱]. در شرایط ثابت جریان، زمان وقوع حداکثر عمق آبهستگی در بسترهای ماسه‌ای برابر ضریبی از ساعت، در بسترهایی با مصالح چسبنده برابر ضریبی از روز و در بسترهای سنگی و شنی برابر ضریبی از ماه است [۵۱]. اندازه ذرات بستر و نحوه دانه‌بندی آن نیز روی مقدار آبهستگی تاثیر دارد. ابعاد حفره آبهستگی با افزایش اندازه ذرات بستر کاهش می‌یابد. هرچه دانه‌بندی ذرات یکنواخت‌تر باشد، ابعاد آبهستگی هم بزرگ‌تر خواهد بود. در رسوبات با دانه‌بندی غیریکنواخت، عمق آبهستگی از آنچه در مصالح یکنواخت وجود دارد معمولاً کم‌تر است. در ادامه این فصل، ابتدا به معرفی انواع و خصوصیات رسوبات پرداخته شده، سپس آستانه حرکت مصالح و شکل‌های بستر معرفی می‌شود.

## ۲-۲- انواع رسوبات

معیار رده‌بندی رسوبات شبیه معیار طبقه‌بندی خاک‌هاست و می‌تواند به زیر دسته‌های شن، ماسه، سیلت و رس تقسیم گردد. رسوبات رودخانه‌ای معمولاً به‌صورت مخلوطی از انواع رده‌ها می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان رسوبات را به دو دسته رسوبات چسبنده و غیر چسبنده تقسیم‌بندی نمود. رسوبات غیرچسبنده مانند شن یا ماسه دارای ساختار دانه‌ای هستند و هنگامی که نیروهای اعمالی از طرف جریان (دراگ یا لیفت) به ذرات به اندازه‌ای باشند که بتوانند بر نیروی مقاوم غلبه نمایند، ذرات شروع به حرکت می‌نمایند. رسوبات ریزدانه که در ترکیب آنها رس (با قطر متوسط ذرات کوچک‌تر از  $2\mu\text{m}$ ) وجود داشته باشد، در زمره رسوبات چسبنده هستند. در این حالت میزان چسبندگی براساس درصد رس متفاوت خواهد بود. بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱) اظهار داشتند در صورتی که مقدار رس موجود در مصالح بستر برابر ۱۰٪ باشد، مصالح از نوع چسبنده خواهند بود. ایشان همچنین اشاره کردند که رسوبات ریزدانه غوطه‌ور می‌توانند در اثر عمل بیولوژیکی مانند رشد جلبک‌ها به‌صورت چسبنده درآیند [۱۶]. در رسوبات چسبنده بر خلاف رسوبات غیرچسبنده، اندازه و وزن ذرات از اهمیت بالایی برخوردار نیست. زیرا در رسوبات چسبنده اندرکنش الکتریکی - شیمیایی بین ذرات حاکم است و موجب می‌شود رسوبات به‌صورت مجموعه‌های چسبیده به یکدیگر حرکت نمایند. لذا رسوبات چسبنده، معمولاً نیازمند نیروی بیش‌تری برای آغاز حرکت هستند اما در ادامه یک نیروی نسبتاً کوچک برای حمل و جابجایی ذرات لازم است. هافمن و وهیج (۱۹۹۷) در مورد چگونگی این فرآیند اظهار کردند که آبهستگی خاک رس با یک ساختار طبیعی در چند مرحله اتفاق می‌افتد. در مرحله اولیه ذرات سست شده و به‌صورت توده‌های جدا شده شسته خواهند شد. این فرآیند منجر به توسعه یک

سطح زبرتر می‌گردد و لذا نیروهای وارد بر بستر افزایش می‌یابند. در نتیجه اتصال بین توده‌های ذرات به تدریج از بین رفته تا توده ذرات در یک لحظه از سطح بستر جدا شده و توسط جریان به پایین دست حمل می‌گردد [۳۸].

در رابطه با آبخستگی در مصالح چسبنده مطالعات کم‌تری انجام شده است و آبخستگی موضعی در این نوع مصالح اطراف سازه‌های هیدرولیکی تاکنون به‌طور کامل بررسی نشده است.

### ۳-۲- خواص فیزیکی رسوبات

برخی از خصوصیات فیزیکی رسوبات غیرچسبنده به‌صورت زیر بیان می‌شود:

- چگالی ذرات،  $\rho_s$
- وزن مخصوص ذرات،  $\gamma_s$
- چگالی نسبی ذرات،  $s = \frac{\rho_s}{\rho}$  ( $\rho$  چگالی آب)
- زاویه قرارگیری ذرات
- تخلخل
- قطر اسمی: قطر ذره‌ای کروی شکل که حجمی برابر حجم ذره مورد نظر داشته باشد،  $d_n$
- قطر عبوری از الک: بزرگ‌ترین قطر ذره‌ای که به راحتی از بین بازشدگی الکی با قطر مشخص عبور می‌کند،  $d$
- قطر سقوط: قطر ذره‌ای که دارای چگالی ۲/۶۵ بوده و در آب استاندارد، سرعت سقوطی برابر سرعت سقوط ذره را داشته باشد.
- ضریب شکل: ضریب شکل ذرات به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SF = \frac{c}{(ab)^{0.5}} \quad (۱-۲)$$

که در این رابطه:

SF: ضریب شکل،  $a$ : طول ذره در امتداد بزرگ‌ترین محور عمود بر دو محور دیگر،  $b$ : طول ذره در امتداد محور متوسط ذره عمود بر دو محور دیگر و  $c$  طول ذره در امتداد کوچک‌ترین محور عمود بر دو محور دیگر می‌باشد. ضریب شکل ماسه طبیعی تقریباً برابر ۰/۷ می‌باشد.

- سرعت سقوط: سرعت سقوط یک ذره کروی در آب ساکن از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴۴]:

$$\omega_s = \left[ \frac{4 \times (s-1) \times g \times d}{3 \times C_D} \right]^{0.5} \quad (۲-۲)$$

که در این رابطه:

$\omega_s$ : سرعت سقوط،  $d$ : قطر ذره،  $s$ : چگالی نسبی ذرات و  $C_D$  ضریب دراگ می‌باشد. مطابق شکل (۱-۲) ضریب دراگ تابعی از رینولدز ذره،  $Re = \omega_s d / \nu$  و ضریب شکل ذره می‌باشد. در این جا  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال است که تابع دمای سیال می‌باشد. تغییرات لزجت سینماتیکی آب در دماهای مختلف در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.

ضریب دراگ برابر است با:

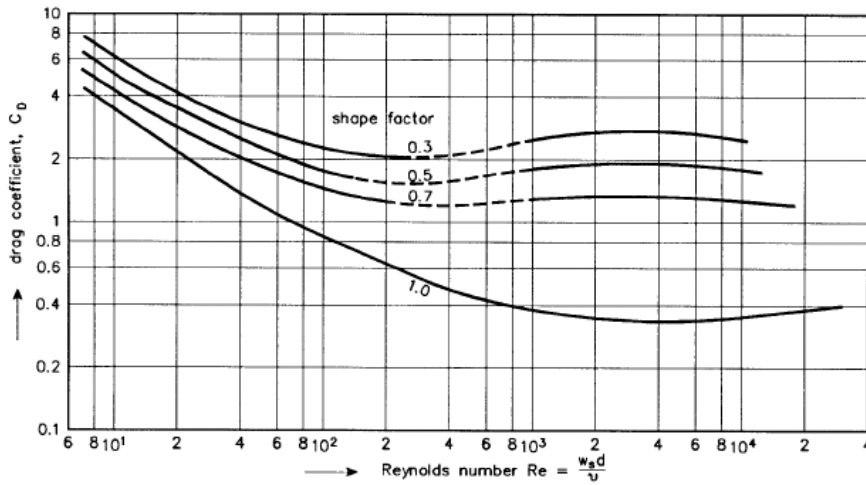
$$C_D = \frac{Re}{24} \quad \text{اگر} \quad Re < 0.5$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad \text{اگر} \quad Re > 0.5 \quad (3-2)$$

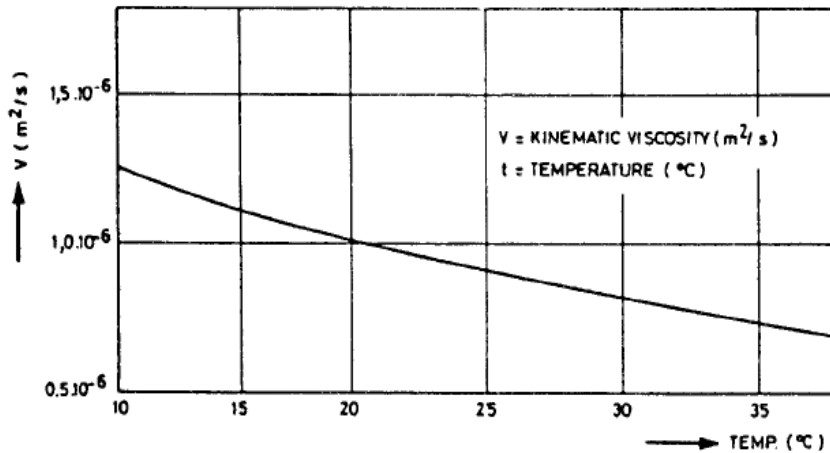
در نتیجه برای شرایطی که  $Re < 0.5$  داریم:

$$\omega_s = \frac{(s-1) \times g \times d^2}{18\nu} \quad (4-2)$$

در خارج از محدوده استوکس،  $C_D$  کاهش می‌یابد و در محدوده  $10^3 < Re < 10^5$  تقریباً ثابت می‌شود. روش‌های دیگر محاسبه سرعت سقوط ذرات در کتاب‌های هیدرولیک رسوب ارائه شده است.



شکل ۲-۱- ضریب دراگ تابعی از رینولدز ذره و ضریب شکل [۴۴]



شکل ۲-۲- لزجت سینماتیکی آب [۴۴]

لازم به ذکر است در بررسی خصوصیات فیزیکی رسوبات می‌توانیم خصوصیات دانه رسوب یا خصوصیات کل رسوبات را مورد بررسی قرار دهیم. همچنین توجه به نوع رسوب اعم از چسبنده یا غیرچسبنده برای تحلیل رسوبات امری ضروری است.

## ۲-۴- توزیع دانه‌بندی رسوبات

با استفاده از منحنی دانه‌بندی رسوبات، مقادیر زیر به‌دست می‌آید:

- قطر میانگین:  $d_{50}$  (قطری است که ۵۰٪ مصالح از آن کوچک‌تر است).

- قطر متوسط حسابی:  $d_a$ ، قطری است که از رابطه زیر برای مصالح غیریکنواخت به‌دست می‌آید:

$$d_a = \frac{\sum d_i \Delta p_i}{\sum \Delta p_i} \quad (۵-۲)$$

که  $d_i$  متوسط هندسی دو قطر مجاور ( $d_{j+1}$  و  $d_j$ ) با درصد  $\Delta p_i$  می‌باشد:

$$d_i = \sqrt{d_j \cdot d_{j+1}} \quad (۶-۲)$$

- قطر متوسط هندسی ذرات: به‌صورت جذر حاصل‌ضرب دو قطر  $d_{84}$  و  $d_{16}$  می‌باشد و به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$d_g = \sqrt{d_{84} \cdot d_{16}} \quad (۷-۲)$$

- انحراف معیار رسوبات  $\sigma_g$ : به‌صورت زیر تعریف می‌شود و معرف یکنواختی و غیریکنواختی ذرات است.

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (۸-۲)$$

اگر انحراف معیار رسوبات کم‌تر از ۱/۵ باشد، مصالح یکنواخت است و اگر بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد مصالح غیریکنواخت است. عمق آبشستگی در رسوبات غیریکنواخت کم‌تر از رسوبات یکنواخت می‌باشد. به‌طوری‌که با افزایش انحراف معیار رسوبات عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

## ۲-۵- پدیده مسلح شدن بستر

اگر بستر یک آبراهه دارای ذرات با قطرهای مختلف از ریز تا درشت باشد (رسوب غیریکنواخت)، بر اثر عبور جریان ممکن است ذرات ریزتر در لایه فوقانی شسته شده و ذرات درشت‌تر به تراز پایین‌تری نشست نمایند و یک سطح بستر مقاوم‌تر را تشکیل دهند. این پدیده را مسلح شدن بستر یا آرمورینگ گویند. اگر یک سیل بزرگ، شرایط جریان دیگری غیر از آنچه که آرمورینگ در آن توسعه یافته ایجاد کند، این خطر وجود دارد که لایه آرمور شسته شود و مصالح زیر آرمور در معرض جریان قرار گرفته و منجر به افزایش عمق آبشستگی گردد.

## ۲-۶- بررسی آستانه حرکت ذرات (پایداری و ناپایداری مجاری)

همان گونه که بیان گردید فرسایش از آستانه حرکت شروع شده و عبارت است از لحظه‌ای که حرکت دانه‌ها پس از آن ادامه می‌یابد. این حرکت منجر به جابجایی ذرات گردیده طوری که ذرات در نهایت به جای خود برنگردد. برای بررسی آستانه حرکت ذرات بستر سه روش کلی وجود دارد:

الف - روش سرعت بحرانی<sup>۱</sup>

ب - روش نیروی بالا برنده<sup>۲</sup>

ج - روش تنش برشی بحرانی<sup>۳</sup>

### ۲-۶-۱- روش سرعت بحرانی

در این روش یک سرعت بحرانی  $u_c$  برای شرایطی که در آن فرسایش بستر شروع می‌شود، تعریف شده و سرعت متوسط موجود با این سرعت مقایسه خواهد شد که در صورت تجاوز از سرعت بحرانی، بستر ناپایدار خواهد بود. معادلات تجربی متعددی برای یافتن سرعت بحرانی وجود دارد که از بین آنها به دو رابطه زیر اشاره می‌شود:

- رابطه گنچارف

$$\frac{u_c}{\sqrt{\frac{\Delta\gamma_s \cdot d}{\rho}}} = 1.143 \log \left( \frac{8.8y_1}{d} \right) \quad (9-2)$$

- رابطه نیل

$$\frac{u_c}{\sqrt{\frac{\Delta\gamma_s \cdot d}{\rho}}} = 1.44 \left( \frac{y_1}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (10-2)$$

که در روابط فوق  $y_1$ : عمق آب،  $\Delta\gamma_s$ : اختلاف وزن مخصوص رسوب و آب و  $d$  قطر مصالح بستر می‌باشد.

### ۲-۶-۲- روش نیروی بالا برنده

در این روش، اندرکنش وزن دانه و نیروی بالا برنده که در اثر اختلاف فشار بالا و پایین دانه به وجود می‌آید، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به علت این که به صورت دقیق نمی‌توان نیروی بالا برنده وارد بر ذره را تعیین نمود در عمل از این روش کمتر استفاده می‌شود.

## ۲-۶-۳- روش تنش برشی بحرانی

در این روش با معرفی تنش برشی بحرانی، تنش موجود در کف کانال با تنش برشی بحرانی مقایسه خواهد شد و در صورت تجاوز از تنش برشی بحرانی، حرکت مصالح بستر و ناپایداری آن به وجود می‌آید. روش‌های تجربی و نیمه نظری برای یافتن تنش برشی بحرانی وجود دارد که در ادامه به روش نیمه نظری شیلدز اشاره می‌شود.

هنگامی که نیروی وارد از طرف جریان بر ذره با مقاومت ذره در مقابل حرکت برابر شود، ذره در آستانه حرکت قرار می‌گیرد. شیلدز (۱۹۳۶) منحنی معروف خود را که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است ارائه نمود [۴۴]. محدوده زیر منحنی شیلدز نشان دهنده بستر پایدار و محدوده بالای منحنی نشان دهنده بستر ناپایدار و منحنی معرف آستانه حرکت می‌باشد. در این شکل، محور عمودی پارامتر شیلدز و محور افقی رینولدز زبری می‌باشد. پارامتر شیلدز از رابطه (۲-۱۱) و رینولدز زبری از رابطه (۲-۱۲) محاسبه می‌شود.

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (11-2)$$

$$Re_* = \frac{U_{*,cr} \times d}{\nu} \quad (12-2)$$

که در این روابط:

$\tau_{b,cr}$ : تنش برشی بحرانی بستر

$\theta$ : تنش برشی بی بعد یا پارامتر شیلدز

$U_{*,cr}$ : سرعت برشی بحرانی

$\nu$ : لزجت سینماتیک آب

بانفیل (۱۹۶۳) و یالین (۱۹۷۲) نشان دادند که منحنی شیلدز می‌تواند بر حسب پارامتر بی بعد شیلدز  $\theta_{cr}$  و پارامتر بی بعد ذره  $D_*$  به صورت زیر بیان شود [۴۴]:

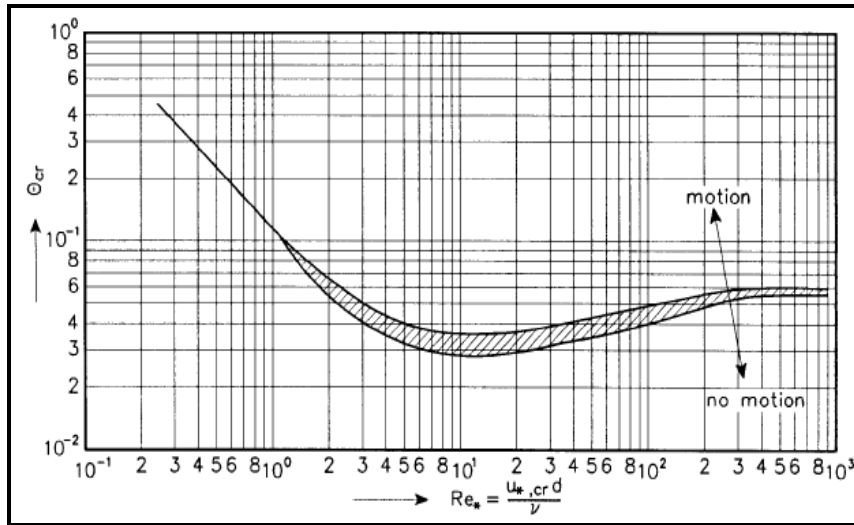
$$\begin{aligned} \theta_{cr} &= 0.24D_*^{-1} & \text{for } 1 < D_* \leq 4 \\ \theta_{cr} &= 0.14D_*^{-0.64} & \text{for } 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr} &= 0.04D_*^{-0.1} & \text{for } 10 < D_* \leq 20 \\ \theta_{cr} &= 0.013D_*^{0.29} & \text{for } 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr} &= 0.055 & \text{for } D_* > 150 \end{aligned} \quad (13-2)$$

که  $D_*$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

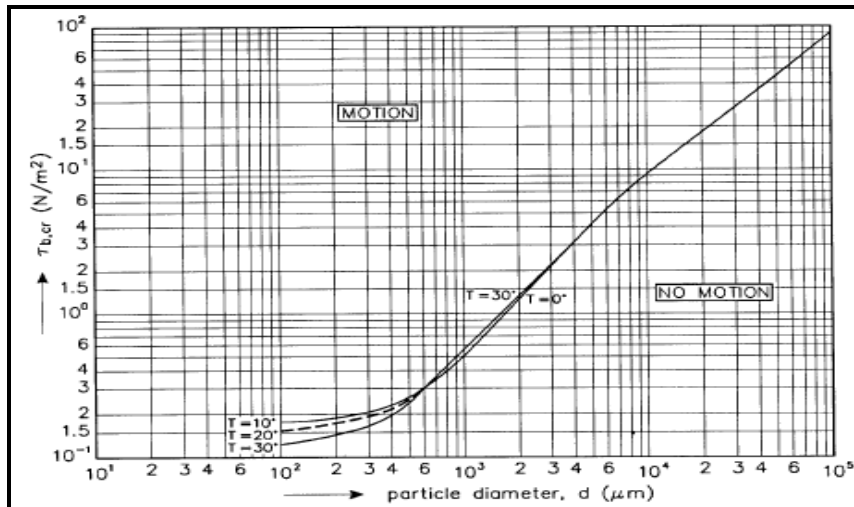
$$D_* = d_{50} \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (14-2)$$

در این رابطه  $s$  چگالی نسبی رسوب است.

محاسبه تنش برشی بحرانی با استفاده از شکل (۳-۲)، دارای روند سعی و خطایی است. به منظور تسریع در محاسبه و جلوگیری از سعی و خطا، منحنی اصلاح شده شیلدز که در آن محور عمودی تنش برشی بحرانی بستر و محور افقی قطر ذره است، به صورت شکل (۴-۲) ارائه گردید که با استفاده از آن به صورت مستقیم می‌توان تنش برشی بحرانی بستر را به دست آورد [۴۴]. در این شکل  $T$  درجه حرارت آب بر حسب درجه سانتی‌گراد است.



شکل ۲-۳- منحنی شیلدز [۴۴]



شکل ۲-۴- منحنی اصلاح شده شیلدز [۴۴]

با داشتن تنش برشی بحرانی بستر، سرعت بحرانی  $u_c$  در آستانه حرکت از روابط زیر نیز محاسبه می‌شود:

$$u_{*,c}^2 = \frac{\tau_{0,cr}}{\rho} \quad (۱۵-۲)$$

$$u_c = \frac{u_{*,cr} C}{\sqrt{g}} \quad (۱۶-۲)$$

که در این روابط  $u_{*,cr}$  سرعت برشی بحرانی و  $C$  ضریب شزی می‌باشد.

ضریب شزی بر حسب رژیم‌های جریان به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۴]:

$$c = 18 \times \log \left( \frac{12 \times y_1}{3.3 \times \frac{v}{u_*}} \right) \quad \text{رژیم هیدرولیکی صاف:}$$

$$c = 18 \times \log \left( \frac{12 \times y_1}{k_s} \right) \quad \text{رژیم هیدرولیکی زیر:} \quad (۱۷-۲)$$

$$c = 18 \log \left( \frac{12 y_1}{k_s + \frac{3.3 v}{u_{*,c}}} \right) \quad \text{رژیم هیدرولیکی انتقالی:}$$

که در این روابط  $y_1$  عمق جریان و  $k_s$  زبری معادل می‌باشد. برای رژیم هیدرولیکی زیر  $k_s = 3d_{90}$  و برای رژیم هیدرولیکی صاف  $k_s = 2d_{50}$  می‌باشد. رژیم‌های جریان به صورت زیر تعیین می‌گردند [۴۴]:

- برای رژیم هیدرولیکی صاف -

$$\frac{u_{*,c} k_s}{v} \leq 5 \quad (۱۸-۲)$$

- برای رژیم هیدرولیکی زیر -

$$\frac{u_{*,c} k_s}{v} \geq 70 \quad (۱۹-۲)$$

- برای رژیم هیدرولیکی انتقالی -

$$5 < \frac{u_{*,c} k_s}{v} < 70 \quad (۲۰-۲)$$

برای رژیم هیدرولیکی زیر رابطه سرعت بحرانی متوسط‌گیری شده در عمق به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$u_c = 5.75 u_{*,c} \log \left( \frac{12 y_1}{K_s} \right) \quad (۲۱-۲)$$

رابطه فوق را با استفاده از روابط (۱۱-۲) و (۱۵-۲) می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$u_c = 2.5 \sqrt{\theta_c \Delta g d} \ln \left( \frac{12 y_1}{K_s} \right) \quad (۲۲-۲)$$

در رابطه فوق  $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  می‌باشد.

در مسایل عملی شکل بستر ممکن است به صورت موج‌دار باشد که بر مقاومت بستر اثرگذار است و بنابراین سرعت‌های موضعی و تنش‌های برشی بستر و در نتیجه آستانه حرکت متغیر است. در ادامه مرور کوتاهی بر شکل‌های بستر در مجاری آبرفتی ارائه می‌شود.



## ۲-۷- شکل‌های مختلف بستر

اگر بستر رودخانه ناپایدار شود، شکل‌های مختلف بستر با توجه به شرایط مختلف جریان می‌تواند حاصل گردد. با افزایش سرعت جریان هنگامی که تنش برش کف از حد تنش برشی بحرانی تجاوز نماید، در روی بستر ناهمواری‌های کوچک مثلثی شکلی بنام ریپل شکل می‌گیرد و با ازدیاد تنش برشی ابعاد این ناهمواری‌ها بزرگ‌تر شده و به ناهمواری‌های مثلثی شکل بزرگ‌تری بنام دیون تبدیل می‌شود. با ازدیاد تنش برشی جریان، در یک فاز انتقالی، این ناهمواری‌ها محو شده و بستر صاف و هموار می‌شود و با ازدیاد مجدد تنش برشی ناهمواری‌های مثلثی شکلی که به لحاظ شکل شبیه دیون‌ها بوده ولی تاج آن در خلاف حرکت دیون‌ها حرکت می‌کند به وجود می‌آید که دیون معکوس نام دارند و در نهایت در اعداد فرود بالا با تنش برشی زیاد، موج‌های شنی به وجود می‌آید. تمامی شکل‌های بستر که در بالا به آنها اشاره شد بر میزان زبری کف اثرگذار می‌باشند و در محاسبات سرعت بحرانی باید زبری معادل بستر که از مجموع زبری دانه‌ها و زبری مربوط به شکل‌های بستر به دست می‌آید، به کار برده شود. برای اطلاع بیشتر در این زمینه به کتب انتقال رسوب مراجعه شود.



## فصل ۳

---

---

داده‌های لازم جهت تخمین عمق

آبشستگی



### ۳-۱ - کلیات

در این فصل منابع و داده‌های مورد نیاز برای تخمین عمق آبستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی معرفی می‌شود. داده‌های مورد نیاز عبارتند از بده جریان، هندسه مقطع آبراهه، عمق جریان، مشخصات مصالح بستر و خصوصیات سازه‌های هیدرولیکی که تعیین عمق آبستگی در اطراف آنها مورد نظر است. برای جمع‌آوری داده‌های فوق روش‌های متفاوت و منابع مختلفی وجود دارد که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

### ۳-۲ - بده جریان

در رودخانه‌ها لازم است تا ابتدا بده جریان برای سیلاب‌هایی با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه گردد. دوره بازگشت سیلاب، یک بازه متوسط زمانی بین سال‌هایی است که در آن بده برابر بده مشخصی یا بیش‌تر از آن باشد. عکس دوره بازگشت معرف درصد احتمال وقوع سیلابی بیش از یک حد مشخص در یک سال می‌باشد.

روش‌های محاسبه بده سیلاب به‌طور کلی عبارتند از (جزئیات محاسبه بده سیلاب در زمره اهداف این راهنما نمی‌باشد):

- اندازه‌گیری مستقیم بده براساس اندازه‌گیری سرعت جریان یکی از روش‌های تعیین بده جریان است. با توجه به این‌که این اندازه‌گیری‌ها اغلب در مواقع سیلابی صورت نمی‌گیرد، بنابراین بده محتمل سیلاب باید با استفاده از برون‌یابی تعیین شود که موجب خطا در محاسبه سیلاب خواهد شد.

- برای تعیین سیلاب محتمل، می‌توان از داده‌های قبلی موجود در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در منطقه مورد نظر، استفاده نمود. در این حالت نیز با توجه به این‌که معمولاً مدت ثبت داده‌ها از دوره بازگشت سیلاب کم‌تر است باید از روش‌های آماری و احتمالاتی برای تعیین بده‌های نادر استفاده کرد.

- روش‌های سیلاب منطقه‌ای نیز می‌تواند برای محاسبه بده جریان به کار گرفته شود. با استفاده از این روش‌ها یک ارتباط آماری بین بده و مشخصات حوضه آبریز، شیب رودخانه و متغیرهای دیگر برقرار می‌گردد. این روش‌ها مقدار بده اوج سیلاب را ارائه می‌دهند.

- روش‌های محاسبه رواناب با استفاده از داده‌های آماری بارندگی و اطلاعات حوضه آبریز را نیز می‌توان برای محاسبه بده استفاده کرد. در این روش‌ها ابتدا با استفاده از داده‌های بارندگی، هیدروگراف واحد تعیین شده و سپس شکل هیدروگراف اصلی و مقدار بده اوج سیلاب محاسبه می‌گردد.

- روش دیگر محاسبه بده، استفاده از بده‌های سیلابی درحوضه‌های مشابه با حوضه مورد نظر است. در این روش بده سیلاب براساس اطلاعات مربوط به حوضه یا حوضه‌های مشابه با حوضه مورد نظر به دست می‌آید.

در حالتی که داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود نباشد بهتر است از چند روش مختلف برای محاسبه بده سیلاب استفاده نمود و مقدار بده سیلاب را براساس قضاوت مهندسی مشخص نمود.

برای تعیین حداکثر سیلاب لازم است دوره بازگشت سیلاب مشخص شود. از این عامل برای تخمین شرایط جریان و تخمین عمق آبستگی استفاده می‌شود. برای پروژه‌های مهم، اغلب دوره بازگشت سیلاب ۱۰۰-۲۰۰ سال انتخاب می‌شود. اگر چه برای

پروژه‌هایی که تخریب آنها در اثر آبشستگی می‌تواند خسارات عمده‌ای به همراه آورد و یا منجر به قطع خطوط ارتباطی گردد، بررسی بیش‌تر و انتخاب مطمئن سیلاب طراحی توصیه می‌شود. دو عامل مهم در برآورد دوره بازگشت، عمر مفید سازه و ضریب احتمال است. ضریب اطمینان به صورت درصد احتمال تجاوز از حدی خاص بیان می‌شود. این عوامل با رابطه زیر با یکدیگر در ارتباط هستند [۴۸]:

$$P_r = 1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{L_y} \quad (1-3)$$

که در این رابطه:

$L_y$ : عمر مفید سازه (برحسب سال)

$P_r$ : ضریب احتمال

$N$ : دوره بازگشت سیلاب

ارتباط بین دوره بازگشت سیلاب و عمر مفید سازه با تغییرات ضریب احتمال به صورت جدول (۱-۳) است:

جدول ۱-۳- ارتباط بین دوره بازگشت سیلاب و عمر مفید سازه با تغییرات ضریب احتمال [۴۸]

ضریب احتمال	دوره بازگشت سیلاب
$P_r = 0.60$	$N \approx 1.1L_y$
$P_r = 0.50$	$N \approx 1.5L_y$
$P_r = 0.40$	$N \approx 2.0L_y$
$P_r = 0.30$	$N \approx 2.8L_y$
$P_r = 0.20$	$N \approx 4.5L_y$

باید توجه داشت که احتمال در نظر گرفته شده برای سیلاب طراحی برابر با احتمال شکست سازه در اثر آبشستگی نیست. عوامل زیاد دیگری مانند عدم اطمینان روش‌های پیش‌بینی تخمین عمق آبشستگی در این خصوص اثرگذار هستند. اطلاعات بیش‌تر راجع به تعیین دوره برگشت در نشریه شماره ۳۱۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور ارائه شده است [۶].

### ۳-۳- هندسه مقطع

برای ارزیابی آبشستگی محتمل اطراف سازه‌های هیدرولیکی، اطلاعات شکل سطح مقطع، هندسه پلان رودخانه و سیلابدشت‌ها لازم است. این اطلاعات می‌تواند از منابع زیر حاصل گردد:

- نقشه‌برداری جدید
- اطلاعات مربوط به نقشه‌برداری‌های قبلی
- نقشه‌های بزرگ مقیاس
- عکس‌های هوایی
- عکس‌های ماهواره‌ای

برای پروژه‌های بزرگ و مهم معمولاً جهت به‌دست آوردن اطلاعات مورد نیاز از وضعیت آبراهه لازم است عملیات نقشه‌برداری انجام پذیرد. البته مقایسه‌این اطلاعات با داده‌های قبلی به منظور تشخیص تغییرات دراز مدت شکل و موقعیت آبراهه اصلی، به خصوص برای رودخانه‌های پیچانرودی و شریانی می‌تواند مهم باشد. میزان اطلاعات و نقشه‌برداری مورد نیاز برای طراحی به وسعت و طبیعت پروژه بستگی دارد. به‌عنوان یک تقریب اولیه فواصل مقاطع عرضی در بالادست و پایین‌دست پروژه برابر ۵۰ متر توصیه می‌شود. برای سیلابدشت‌ها اگر شکل مقطع آنها منظم باشد، فواصل مقاطع عرضی حدود ۱۰۰-۱۵۰ متر مناسب است. اگر طراحی روش‌های حفاظتی مد نظر باشد، تهیه منحنی‌های هم‌تراز در جداره‌های رودخانه در محدوده سازه لازم خواهد بود.

برای بعضی از پروژه‌ها ممکن است لازم باشد تا محاسبات مربوط به برگشت آب برای تخمین تراز سطح آب در بالادست پروژه انجام گردد. فاصله مورد نیاز بین مقاطع عرضی در فواصل دورتر از محل پروژه براساس شیب رودخانه انتخاب می‌گردد. برخی از توصیه‌های مناسب در مورد این فواصل در جدول (۳-۲) آورده شده است. این مقادیر برای حالتی است که سطح مقطع مجرا نسبتاً منظم باشد، ولی چنانچه تغییرات ناگهانی یا مشخصه‌های ویژه‌ای مشاهده شود، باید مقاطع بیش‌تری بین بازه‌ها در نظر گرفت.

جدول ۳-۲- فواصل توصیه شده بین مقاطع عرضی برای نقشه‌برداری

فاصله توصیه شده	شیب طولی کانال
۷۵ تا ۱۰۰ متر	$\frac{1}{300} - \frac{1}{1000}$
۲۰۰ متر	$\frac{1}{1000} - \frac{1}{3000}$
۵۰۰ متر	$\frac{1}{3000} - \frac{1}{10000}$
۱۰۰۰ متر	کم‌تر از $\frac{1}{10000}$

### ۳-۴- تراز سطح آب و عمق جریان

روش‌های به‌دست آوردن تراز سطح آب عبارتند از:

- تحلیل آماری داده‌های تراز سطح آب مربوط به سال‌های قبل اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های نزدیک
  - براساس محاسبات هیدرولیکی، با استفاده از بده سیلاب محاسبه شده و داده‌های مربوط به هندسه مقاطع و شیب طولی رودخانه
  - اطلاعات محلی گزارش شده توسط افراد محلی در مورد تراز سطح آب در سیلاب‌های قبلی
- برای رودخانه‌هایی با مقطع تقریباً یکنواخت، یک روش مناسب برای تخمین تراز سطح آب، استفاده از رابطه مانینگ می‌باشد. اما اگر هندسه کانال در طول مسیر متغیر باشد و در پایین‌دست بازه مورد نظر سازه کنترلی شبیه سرریز وجود داشته باشد و یا یک شاخه فرعی به رودخانه بپیوندد، توصیه می‌شود محاسبات سطح آب توسط روش‌های کامپیوتری انجام گیرد.
- نرم‌افزارهای یک بعدی می‌توانند سرعت متوسط جریان و تراز سطح آب را در طول رودخانه محاسبه نمایند. همچنین نرم‌افزارهای دو بعدی قادر هستند تغییرات سرعت متوسط‌گیری شده در عمق را در مقطع عرضی کانال در نظر بگیرند. مدل‌های سه بعدی نیز می‌توانند اطلاعاتی راجع به تغییرات سرعت در عمق رودخانه را در اختیار ما قرار دهند. به‌طور کلی اهمیت پروژه و هزینه و

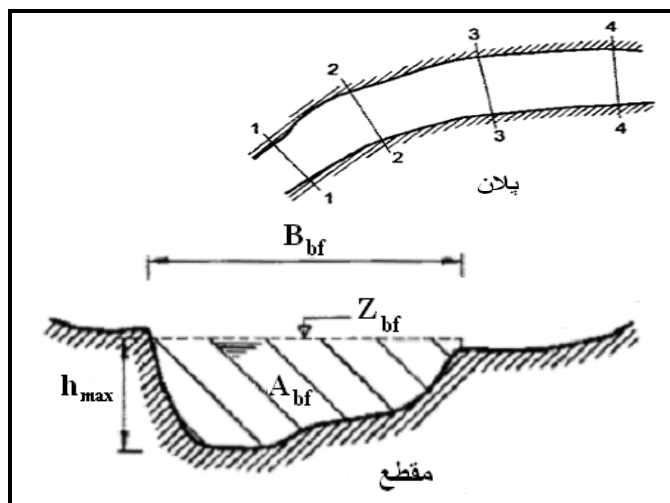
پیچیدگی تحقیق می‌تواند در انتخاب مدل‌های مزبور برای انجام محاسبات موثر باشد. معمولاً استفاده از مدل‌های یک بعدی برای رودخانه‌ها نتایج رضایت بخشی را می‌دهد. اگرچه برای رودخانه‌های رسوبی با هندسه پیچیده‌تر و همراه با سیلابدشت و همچنین در خورها بهتر است از مدل‌های دو بعدی یا مدل‌های فیزیکی استفاده شود. استفاده از مدل‌های سه بعدی معمولاً توصیه‌پذیر نبوده مگر این‌که اطلاعاتی با جزئیات بیشتر در مورد شرایط موضعی جریان در محلی خاص یا اطراف سازه‌ها مدنظر باشد.

روش‌های مختلفی برای تعیین عمق آب وجود دارد، در ادامه یکی از این روش‌ها آورده شده است:

نمونه‌ای از مقاطع عرضی در رودخانه در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. چنانچه تغییرات زیادی در مقاطع عرضی وجود نداشته باشد، مراحل تعیین عمق آب در حالت مقطع پر به‌صورت زیر است [۴۸]:

- در هر مقطع عرضی، تراز را که آب وارد محدوده سیلابدشت‌ها می‌شود (تراز متوسط در حالت مقطع پر  $Z_{bf}$ ) تعیین کنید.
- برای هر مقطع مقادیر زیر را تعیین نمایید:
  - عرض سطح جریان در حالت پر  $B_{bf}$
  - سطح مقطع جریان برای  $A_{bf}$  برای عرض  $B_{bf}$  و تراز  $Z_{bf}$
  - حداکثر عمق آب  $h_{max}$  بین  $Z_{bf}$  و پایین‌ترین نقطه سطح مقطع
- از مقادیر محاسبه شده برای  $B_{bf}$  و  $A_{bf}$  در مقاطع مختلف متوسط‌گیری نمایید. این متوسط‌ها ( $\bar{A}_{bf}$  و  $\bar{B}_{bf}$ ) می‌توانند به‌عنوان نماینده تمام مقاطع در محاسبات استفاده شوند.
- عمق متوسط آبراهه اصلی  $h_{bf}$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$h_{bf} = \frac{\bar{A}_{bf}}{\bar{B}_{bf}} \quad (۲-۳)$$



شکل ۳-۱- تعاریف شکل و هندسه مقطع رودخانه [۴۸]



### ۳-۵- سرعت جریان

اطلاع از سرعت جریان در اطراف سازه‌های هیدرولیکی واقع در مسیر جریان برای تخمین عمق آبشستگی و تعیین خصوصیات روش‌های حفاظتی ضروری است. در رودخانه سرعت متوسط جریان از بده طراحی  $Q$  و سطح مقطع جریان  $A$  و با استفاده از رابطه پیوستگی به دست می‌آید. سرعت جریان در آبراهه اصلی هنگامی که جریان آب در سیلابدشت‌ها نیز جریان دارد، تفاوت معنی داری با حالت مقطع پر ندارد و می‌توان اندازه‌گیری‌های مربوط به مقطع پر را برای شرایط سیلاب‌های بزرگ نیز استفاده نمود. اندازه‌گیری‌های سرعت در نقاط دیگری از عرض رودخانه نیز برای تعیین ارتباط سرعت موضعی با سرعت متوسط مقطع سودمند است. با استفاده از این اطلاعات می‌توان غیریکنواختی نیمرخ جریان را نیز در مقطع بررسی نمود. علاوه بر این می‌توان اطلاعات بسیار مفیدی راجع به جهت جریان در مقطع عرضی به دست آورد. از این اطلاعات می‌توان در نصب پایه‌های پل‌ها با زاویه مناسب نسبت به جهت جریان استفاده نمود تا عمق آبشستگی و خیزآب ناشی از وجود این سازه‌ها کاهش یابد. تعداد مقطعی که باید اندازه‌گیری سرعت و جهت جریان در آنها انجام گیرد، بستگی به هندسه رودخانه در محل و موقعیت سازه دارد. در رودخانه‌های با عمق کم‌تر از ۵ متر، اندازه‌گیری سرعت جریان در ارتفاعی برابر  $0/4$  عمق جریان بالاتر از بستر، تخمین خوبی برای سرعت متوسط در آن مقطع می‌باشد. برای آبراهه‌های عمیق‌تر، دو یا تعداد بیش‌تری اندازه‌گیری در راستای قائم در مقطع توصیه می‌شود. همچنین توصیه می‌شود تا اندازه‌گیری سرعت در تراز  $0/1$  عمق جریان بالاتر از بستر و در تراز  $0/9$  عمق آب انجام شود و از میانگین سرعت در این دو عمق، سرعت متوسط جریان در مقطع را به دست آورد. برای پروژه‌های مهم در شرایط جز و مدی توصیه بر اندازه‌گیری صحرائی است مگر این‌که مدل‌های کالیبره شده‌ای برای به دست آوردن اطلاعات مورد نظر در دسترس باشد. اندازه‌گیری‌ها باید در چند نقطه در راستای قائم انجام شود زیرا تاثیرات اینرسی و تفاوت بین چگالی در عمق (آب شیرین و شور) می‌تواند تاثیر عمده‌ای در سرعت و جهت جریان در عمق‌های متفاوت و در زمان‌های مختلف گذارد.

### ۳-۶- مصالح بستر

اطلاعات مربوط به مشخصات بستر و جداره‌ها نیز جهت تعیین عمق آبشستگی و طراحی روش‌های ساماندهی لازم است. برای رودخانه‌های شنی که در آنها رسوبات چسبنده وجود ندارد، مشخصات دانه رسوب با نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های دانه‌بندی به دست می‌آید. دانه‌بندی ذرات معمولاً در قالب درصد وزنی نمونه عبور کرده از الک‌های استاندارد انجام می‌پذیرد. نمونه‌ها باید از محل‌های مختلف جمع‌آوری شوند تا بتوان اطلاعاتی راجع به توزیع دانه‌بندی در طول بازه مورد نظر کسب نمود. معمولاً توصیه می‌گردد تا نمونه‌گیری از عمق  $0/5$  متری زیر سطح صورت پذیرد. اگر شرایط زمین با عمق به صورت مشخصی تغییر می‌کند، باید از سطح تا زیر تراز آبشستگی مورد نظر نمونه‌گیری انجام شود. برای رودخانه‌های با رسوبات دانه درشت و قلوه سنگی، اندازه بزرگ‌ترین، کوچک‌ترین و متوسط سنگ‌ها ثبت گردد. در خورها مصالح بستر معمولاً شامل ترکیبی از گل و ماسه است. مقاومت فرسایشی گل بستگی زیادی به عمق لایه و مدت زمان تحکیم این رسوبات دارد. برای تعیین چگالی و رطوبت مصالح باید نمونه‌هایی از بستر جمع‌آوری و تجزیه شود. اندازه اجزای درشت‌تر معمولاً با

تجزیه دانه‌بندی مشخص می‌شود، ولی برای رسوبات ریزدانه معمولاً این دسته‌بندی با آزمایش‌های خاص هیدرومتری تعیین می‌گردد.

اطلاعات بیش‌تری راجع به چگونگی جمع‌آوری و انجام آزمایش‌های دانه‌بندی مصالح در نشریه شماره ۲۶۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور وجود دارد [ ۵ ].

### ۳-۷- خصوصیات سازه‌های مورد نظر

برای محاسبه عمق آبستنگی نیاز به خصوصیات سازه مورد نظر است. این خصوصیات شامل نوع سازه، هندسه سازه (عرض یا ضخامت و ارتفاع)، شکل، جانمایی و موقعیت سازه می‌باشد.

# فصل ۴

---

---

## آبشستگی اطراف پایه پل‌ها



#### ۴-۱ - کلیات

پلها در محل احداث خود به چند دلیل باعث آبشستگی در رودخانهها می‌شوند. اول این که برای کوتاه کردن طول پل، مقطع پل تنگ‌تر از مقطع رودخانه در نظر گرفته می‌شود که باعث افزایش سرعت جریان و تنش برشی در بستر شده و موجب آبشستگی می‌شود (آبشستگی بر اثر تنگ‌شدگی). دوم به دلیل وجود پایه و تکیه‌گاه<sup>۱</sup>، یک سامانه سه بعدی جریان گردابی<sup>۲</sup> در اطراف آنها تولید شده که باعث جدانشدن دانه‌ها از بستر و آبشستگی موضعی می‌شود. این نوع آبشستگی به دلیل پیچیده بودن جریان‌های ایجاد شده دارای اهمیت زیادی می‌باشد. اگر آبشستگی عمومی در مسیر رودخانه وجود داشته باشد، آن هم به آبشستگی حاصل از احداث پل اضافه می‌شود.

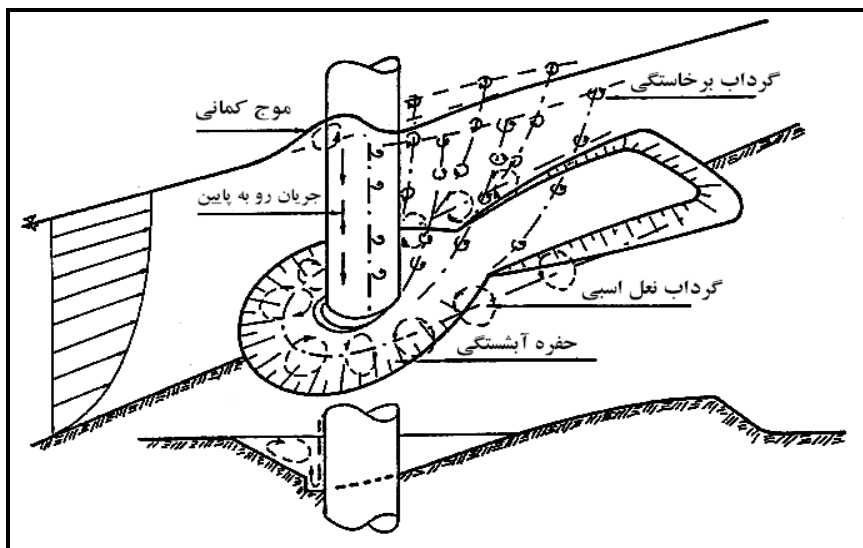
پایه‌های پل با توجه به نظر طراح آن می‌تواند به انواع شکل‌ها و آرایش‌ها ساخته شوند. مثلاً یک طراح می‌تواند پایه‌ها را به شکل مستطیلی، گرد یا به صورت تک پایه، یا گروه پایه با آرایش‌های مختلف طراحی کند. پایه‌های اکثر پل‌های بزرگی که در جهان ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، به صورت گروه پایه گرد طراحی شده‌اند. در پل‌های بزرگ برای نگه داشتن بدنه پل اگر از تک پایه استفاده شود، پایه ضخامت زیادی لازم دارد که افزایش ضخامت پایه باعث افزایش هزینه‌های اجرایی و افزایش عمق آبشستگی خواهد شد. ولی در صورت استفاده از گروه پایه، ضخامت زیاد تک پایه به ضخامت‌های کوچک‌تر تفکیک شده و هزینه‌ها و میزان آبشستگی را کاهش می‌دهد. در ادامه به بررسی الگوی جریان و آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل پرداخته می‌شود و روش‌های برآورد آبشستگی معرفی می‌گردد.

#### ۴-۲ - 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 خرابی آنها و خرابی پل می‌شود. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شود. یکی برخورد جریان به پایه و دیگری جدانشدن 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>۳</sup> را شکل داده و جدایی جریان از پایه باعث به وجود آمدن گرداب‌هایی که به گرداب برخاستگی<sup>۴</sup> موسومند، می‌شود. الگوی جریان در اطراف یک پایه در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. گرداب نعل اسبی عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در اطراف پایه به ویژه در جلو آن می‌باشد. به وجود آمدن چنین گردابی حاصل واکنش‌هایی به صورت زیر می‌باشد:

- 
- 1- Abutment
  - 2- Vortex
  - 3- Horseshoe Vortex
  - 4- Wake Vortex

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 به‌وجود آمدن گرادیان فشار روی پایه از بالا به پایین می‌شود. این گرادیان فشار باعث ایجاد یک جریان رو به پایین<sup>۱</sup> در جلو پایه می‌شود. همچنین در رودخانه، سرعت در سطح آب حداکثر نمی‌باشد، بلکه حداکثر مقدار آن کمی پایین‌تر از سطح آب به‌وجود 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 نوک پایه موجی به نام موج کمانی<sup>۲</sup> ایجاد می‌شود.



شکل ۴-۱- الگوی جریان در اطراف یک پایه استوانه‌ای [۱۶]

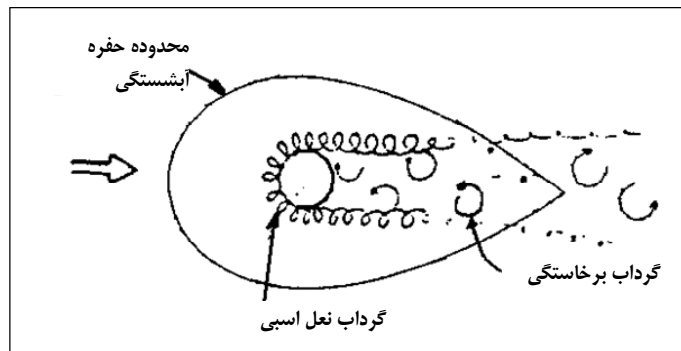
سرعت جریان رو به پایین در عمق یکنواخت نمی‌باشد و به دلیل متغیر بودن گرادیان فشار در عمق، از سطح آب به سمت کف بیش‌تر می‌شود. مقدار حداکثر این سرعت به اندازه  $0/8$  برابر سرعت متوسط جریان بوده و در عمقی به اندازه قطر پایه پایین‌تر از بستر و داخل حفره آبشستگی می‌باشد. سرعت جریان روی پایه صفر است و جریان رو به پایین در فاصله  $5\%$  الی  $2\%$  قطر پایه در بالادست آن اتفاق می‌افتد. جریان رو به پایین در حین برخورد به بستر رودخانه، ضمن حفر بستر به هر طرف پراکنده می‌شود. با حفر بستر در جلو پایه، این جریان وارد حفره شده و بخشی از آن به سمت بالادست برمی‌گردد. در نهایت در برخورد با جریان اصلی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود. در واقع جریان رو به پایین کاملاً چرخیده و گردابی را ایجاد می‌کند. با به‌وجود آمدن این گرداب، عمل حفر حفره تسریع شده و رفته رفته عمیق‌تر می‌شود. 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 کننده شده از جلو پایه و عمیق‌تر شدن حفره آبشستگی کمک می‌کنند. 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. از نظر بروسرز و

1- Down Flow  
2- Bow Wave

رادکیوی (۱۹۹۱) گرداب نعل اسبی نتیجه آبشستگی می‌باشد نه علت آن، برخی از محققین دیگر همچون درگاهی (۱۹۹۰) معتقدند که گرداب نعل اسبی اول به‌وجود می‌آید و باعث ایجاد آبشستگی اطراف پایه 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. جریانی که به‌صورت 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. مولفه شعاعی سرعت مانند آنچه در مورد نوک دماغه پایه به آن اشاره شد باعث تشکیل جریان رو به پایین و رو به بالا می‌شود. البته طبیعی است که با دورشدن 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 رو به پایین حاصل شده، در برخورد با جریان اصلی بالادست به طرفین منحرف می‌شود. مولفه مماسی بردار سرعت، گرداب نعل اسبی را به سمت پایین دست حرکت می‌دهد و در کناره‌های پایه به برداشت مصالح بستر کمک می‌کند. اصطکاک گرداب نعل اسبی با پایه پل و بستر به تضعیف آن در طول مسیر خود کمک می‌کند. حفره آبشستگی توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می‌یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک نماید [۱۶].

هنگامی که جریان از کناره‌های پایه پل عبور می‌کند، در طول جداره پایه تحت تاثیر گرادیان فشار از آن جدا می‌شود. همچنین در پشت پایه به دلیل کاهش فشار، جریان و لایه برشی به سمت داخل متمایل شده و ایجاد گرداب‌های برخاستگی می‌کنند. محور این گرداب‌ها عمود بر بستر رودخانه می‌باشد. شکل‌های (۱-۴) و (۲-۴) وضعیت این گرداب‌ها را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، جهت گرداب‌ها به سمت داخل بوده و در دو طرف خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند. گرداب برخاستگی در نزدیکی کف با گرداب نعل اسبی باقی‌مانده از بالادست که در حال نوسان عمودی و افقی می‌باشد، اندرکنش دارد. این گرداب‌ها با محور عمودی و مرکز کم فشار، مانند یک گرداب، ذرات بستر را به سمت بالا مکیده و در معرض جریان قرار می‌دهند. به این ترتیب گرداب‌های 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 [۶۷]. الگوی سه بعدی آبشستگی حول یک پایه پل در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- محل تشکیل گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه‌های استوانه‌ای و جهت تشکیل این گرداب‌ها

در صورت کاربرد گروه پایه، مکانیسم‌های دیگری نیز در میزان آبخستگی موثر هستند. مکانیسم‌های موثر در آبخستگی گروه پایه عبارتند از [۱۶]:

#### - اثر تقویت کردن<sup>۱</sup>

این عامل باعث افزایش عمق آبخستگی در پایه جلویی می‌شود. به علت وجود پایه پشتی، حفره‌های آبخستگی دو پایه ممکن است روی هم قرار گرفته و تراز بستر در پشت پایه جلویی پایین افتد. در نتیجه جریان به راحتی ذرات را از این حفره حرکت داده و حفره در جلو پایه عمیق‌تر شود. با افزایش فاصله پایه‌ها از یکدیگر، این اثر کاهش می‌یابد.

#### - اثر محافظت یا پناه دادن<sup>۲</sup>

پایه جلویی سبب کاهش سرعت موثر نزدیک شونده برای پایه عقبی می‌شود. این کاهش سرعت باعث کم شدن اثر گرداب نعل اسبی شده و در نتیجه آبخستگی در پایه پشتی کاهش می‌یابد. شکل دیگر اثر محافظت هنگامی اتفاق می‌افتد که مواد شسته شده از اطراف پایه جلویی در جلوی پایه عقبی جمع شوند.

#### - گرداب‌های جاری<sup>۳</sup>

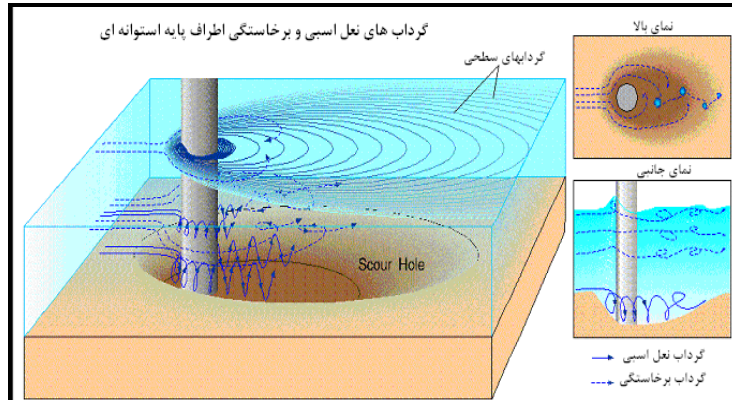
گرداب‌های جاری از پایه بالادست به سمت پایه‌های پایین دست حرکت می‌کنند. با وجود پایه دوم در مقابل این مسیر، گردابه‌ها به دلیل فشار منفی در مرکز خود به بلند کردن ذرات از حفره آبخستگی پایه‌های پایین دست کمک می‌کنند. پتانسیل آبخستگی گردابه‌های جاری، تابعی از اندازه سرعت انتقال آنها و فاصله بین مسیر گردابه‌ها و پایه پایین دستی می‌باشد.

#### - به هم فشردگی گردابه نعل اسبی<sup>۴</sup>

وقتی که چند پایه در برابر جریان واقع شده باشند، هر کدام از آنها گردابه نعل اسبی مخصوص خودشان را خواهند داشت. چنانچه فاصله بین پایه‌ها کاهش یابد، بازوهای داخلی گردابه نعل اسبی به هم فشرده می‌شوند. این عامل باعث افزایش سرعت موضعی و در نتیجه افزایش عمق آبخستگی می‌شود.

- 
- 1- Reinforcing
  - 2- Sheltering
  - 3- Shed Vortices
  - 4- Compressed Horseshoe Vortex





شکل ۴-۳- الگوی سه بعدی جریان اطراف پایه پل

### ۴-۳- تغییرات زمانی آبشستگی

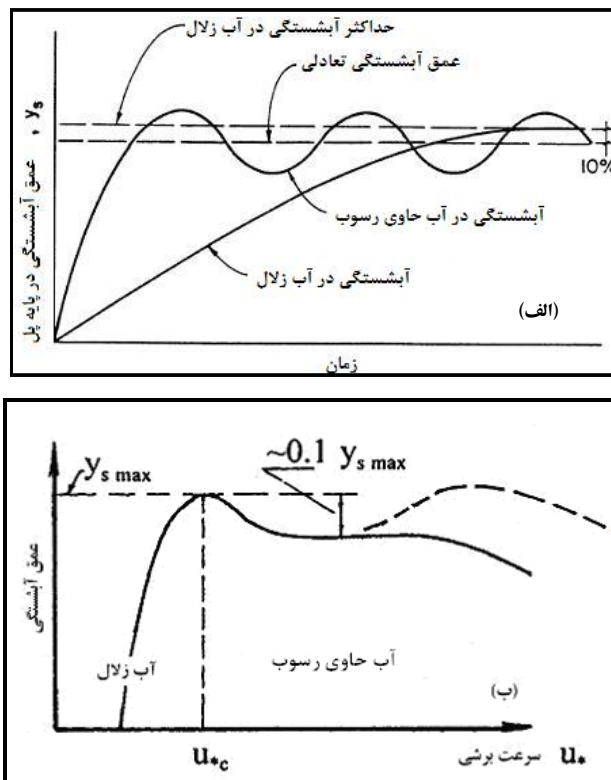
عمق آبشستگی موضعی در محل پایه‌های پل وابسته به زمان بوده و در طول زمان افزایش می‌یابد. در حالت جریان حاوی رسوب یا بستر متحرک، به علت حمل رسوب از بالا به سمت حفره‌ی آبشستگی، عمق حفره‌ی آبشستگی در طول زمان نوسان می‌کند. ولی در شرایط آب زلال به علت عدم حمل رسوب از بالادست، رسوب کنده شده از حفره‌ی آبشستگی جایگزین نشده و افزایش عمق آبشستگی تا رسیدن به تعادل همچنان ادامه می‌یابد.

شکل (۴-۴) نمودار عمق آبشستگی بر حسب زمان و سرعت برشی در اطراف یک پایه پل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-۴) الف)، در حالت آب حاوی رسوب عمق آبشستگی به سرعت با زمان افزایش می‌یابد و سپس حول یک مقدار متوسط که به عمق تعادل آبشستگی موسوم است، نوسان می‌کند. ولی در حالت آب زلال، سرعت آبشستگی در ابتدا نسبتاً زیاد بوده و سپس رفته رفته کاسته شده تا به حداکثر عمق آبشستگی برسد. ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) بیان نمودند که حداکثر عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه پل در حالت آب زلال حدود ۱۰٪ بزرگ‌تر از عمق تعادلی آبشستگی در آب حاوی رسوب است [۷۳].

شکل (۴-۴) ب) رابطه سرعت برشی را با عمق آبشستگی نشان می‌دهد. چنانچه دیده می‌شود وقتی سرعت برشی در بستر به حدود نصف سرعت برشی بحرانی  $u_{*c}$  برسد، آبشستگی آغاز می‌شود. با افزایش سرعت، عمق آبشستگی نیز افزوده شده و به حداکثر عمق آبشستگی در سرعت برشی بحرانی می‌رسد با بالا رفتن سرعت برشی، حمل مواد در بالادست نیز آغاز شده و رسوبات حمل شده وارد حفره آبشستگی می‌شوند که این باعث کاهش عمق آبشستگی می‌گردد. این حالت همان آبشستگی بستر متحرک می‌باشد. فرانزتی و همکاران (۱۹۸۲) تاثیر زمان آبشستگی بر عمق نهایی آبشستگی حول پایه‌های با مقطع دایره‌ای را مطالعه نمودند و یک تابع نمایی به صورت زیر را برای تغییرات زمانی عمق آبشستگی ارائه کردند [۱۸]:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = 1 - \exp \left[ -0.028 \left( \frac{ut}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (1-4)$$

که در این رابطه  $y_{s,t}$ : عمق آبشستگی در زمان  $t$ ;  $y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی و  $a$  قطر پایه است.



شکل ۴-۴- نمودار میزان آبخستگی بر حسب: الف- زمان و ب- سرعت برشی [۱۶]

ملویل و چپو (۱۹۹۹) توسعه‌ی زمانی عمق آبخستگی موضعی حول پایه‌های با مقطع دایره‌ای پل‌ها در حالت آب زلال و رسوبات یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند و رابطه زیر را برای تغییرات زمانی عمق آبخستگی ارائه نمودند [۱۵]:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{u}{u_c} \ln \left( \frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (۲-۴)$$

در این رابطه  $t_e$  زمان تعادل آبخستگی است. ملویل و چپو روابط زیر را برای تعیین زمان تعادل آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های پل ارائه کردند:

$$t_e = 48.26 \frac{a}{u} \left( \frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \quad \text{برای } y_1/a > 6 \quad (۳-۴)$$

$$t_e = 30.89 \frac{b}{u} \left( \frac{u}{u_c} - 0.4 \right) \left( \frac{y_1}{a} \right)^{0.25} \quad \text{برای } y_1/a \leq 6$$

که در این روابط:

$t_e$ : زمان تعادل بر حسب روز،  $u$ : سرعت جریان،  $u_c$ : سرعت بحرانی در آستانه حرکت بر حسب متر بر ثانیه،  $a$ : قطر پایه بر حسب متر و  $y_1$  عمق اولیه جریان می‌باشد. این دو رابطه برای محدوده‌ی  $0.4 < u/u_c < 1$  قابل قبول می‌باشند.

برای رسوباتی که  $d_{50}$  آنها بزرگ‌تر از  $0/6$  میلی‌متر می‌باشد، زمان تعادل  $t_e$  در شرایط آستانه‌ی حرکت ( $u = u_c$ ) و محدوده‌ی عمق جریان  $y_1/a < 6$ ، حداکثر می‌باشد که مقدار حداکثر  $t_{e,max}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_{e,max} = 28.96 \frac{a}{u} \quad (۴-۴)$$

که در آن  $a$  بر حسب متر،  $u$  بر حسب متر بر ثانیه و  $t_{e,max}$  بر حسب روز می‌باشد.  
بارکدول (۲۰۰۰) شکل تصحیح شده‌ای از معادله (۲-۴) را براساس داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر ارائه داد [۱۴]:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = \exp \left\{ -0.154 \frac{u}{u_c} \ln \left( \frac{t}{t_e} \right) \right\} \quad (۵-۵)$$

#### ۴-۴- روابط تخمین حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه‌های پل

##### ۴-۴-۱- روابط تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه‌های منفرد

روابط متعددی در ارتباط با تخمین عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل ارائه شده است. یکی از این روابط، فرمول CSU می‌باشد که مورد استفاده بسیاری از محققین و مهندسين می‌باشد و برای شرایط آب زلال و آب حاوی رسوب قابل کاربرد است. از جمله اداره بزرگراه‌های آمریکا این رابطه را برای تخمین عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل پیشنهاد کرده است [۵۱]. رابطه CSU عبارت است از [۷۴]:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad \text{یا} \quad (۶-۴)$$

$$\frac{y_s}{a} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{y_1}{a} \right)^{0.35} Fr_1^{0.43}$$

که در این رابطه:

$y_s$ : عمق آبشستگی (متر یا فوت)

$a$ : عرض یا قطر پایه (متر یا فوت)

$y_1$ : عمق جریان درست بالادست پایه (متر یا فوت)

$K_1$ : ضریب تصحیح اثر شکل نوک پایه که از جدول (۱-۴) به دست می‌آید.

$K_2$ : ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان که از جدول (۲-۴) و یا رابطه (۷-۴) به دست می‌آید.

$K_3$ : ضریب تصحیح برای شرایط بستر که از جدول (۳-۴) حاصل می‌شود.

$K_4$ : ضریب تصحیح برای مسلح شدن بستر توسط ذرات رسوب می‌باشد که از رابطه (۸-۴) محاسبه می‌شود.

$Fr_1$ : عدد فرود جریان در بالادست پایه،  $L$ : طول پایه و  $a$  قطر پایه است.

جدول ۴-۱- ضریب تصحیح برای شکل‌های مختلف نوک پایه در رابطه [۷۴] CSU

شکل نوک پایه	ضریب تصحیح ( $K_1$ )
مستطیلی نوک مربعی	۱/۱
مستطیلی نوک گرد	۱/۰
پایه گرد	۱/۰
نوک تیز	۰/۹

جدول ۴-۲- ضریب تصحیح برای زوایای مختلف برخورد جریان به پایه ( $K_2$ ) در رابطه [۷۴] CSU

زاویه برخورد (درجه)	L/a=4	L/a=8	L/a=12
۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۵	۱/۵	۲/۰	۲/۵
۳۰	۲/۰	۲/۷۵	۳/۵
۴۵	۲/۳	۳/۳	۴/۳
۹۰	۲/۵	۳/۹	۵/۰

جدول ۴-۳- ضریب تصحیح برای شرایط مختلف بستر در رابطه [۷۴] CSU

شرایط بستر	ارتفاع دیون بر حسب متر	ضریب تصحیح ( $K_3$ )
آبستنگی آب زلال	-	۱/۱
شرایط بستر صاف و آنتی دیون	-	۱/۱
دیون‌های کوچک	بین ۰/۶ و ۳ متر	۱/۱
دیون‌های متوسط	بین ۳ تا ۹ متر	۱/۱ تا ۱/۲
دیون‌های بزرگ	بزرگ‌تر از ۹ متر	۱/۳

برای به‌دست آوردن ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان به پایه از رابطه زیر نیز می‌توان استفاده کرد [۷۴]:

$$K_2 = \left( \cos \theta + \frac{L}{a \sin \theta} \right)^{0.65} \quad (۷-۴)$$

در این رابطه  $\theta$  زاویه برخورد جریان با پایه (یا زاویه امتداد پایه با ساحل پایین‌دست) و  $L$  طول پایه می‌باشد. اگر نسبت طول به عرض پایه،  $L/a$  بزرگ‌تر از ۱۲ باشد، برابر ۱۲ در نظر گرفته می‌شود.

روابط زیر که در نسخه سوم HEC-18 ارائه شده است، ضریب  $K_4$  را به‌دست می‌دهند:

اگر  $d_{50} < 2 \text{ mm}$  یا  $d_{95} < 20 \text{ mm}$  باشد، ضریب  $K_4$  برابر واحد خواهد بود.

اگر  $d_{50} \geq 2 \text{ mm}$  و  $d_{95} \geq 20 \text{ mm}$  باشد، آنگاه:

$$K_4 = 0.4(V_R)^{0.15} \quad (۸-۴)$$

که  $V_R = \frac{V_1 - V_{icd_{50}}}{V_{cd_{50}} - V_{icd_{95}}} > 0$  می‌باشد. در این رابطه:

$V_{icd_x}$ : سرعت جریان در بالادست پایه برای شروع آبستنگی برای قطر ذرات  $d_x$  (متر یا فوت) که از فرمول زیر محاسبه

می‌شود:

$$V_{icdX} = 0.645 \left( \frac{d_X}{a} \right)^{0.053} V_{cdX} \quad (9-4)$$

$V_{cdX}$ : سرعت بحرانی (متر بر ثانیه یا فوت بر ثانیه) برای آستانه حرکت ذرات با قطر  $d_X$  (متر یا فوت) می‌باشد.

$$V_{cdX} = K_U y_1^{1/6} d_X^{1/3} \quad (10-4)$$

که در این رابطه:

$y_1$ : عمق جریان بالادست پایه بر حسب متر یا فوت

$V_1$ : سرعت جریان بالادست پایه بر حسب متر بر ثانیه یا فوت بر ثانیه

$d_X$ : اندازه ذرات بستر که  $x$  درصد آن ریزتر باشند (متر یا فوت)

$K_U$ : برابر ۶/۱۹ در سامانه متریک و ۱۱/۱۷ در سامانه‌ی انگلیسی

باید توجه داشت که حداقل مقدار  $K_4$  برابر ۰/۴ می‌باشد.

ملویل و کولمن (۲۰۰۰) رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبخستگی اطراف پایه‌های پل ارائه نمود [۴۹]:

$$y_s = K_{ya} K_1 K_d K_s K_0 K_t \quad (11-4)$$

ضرایب رابطه فوق در جدول (۴-۴) معرفی شده‌اند. در این جدول:

$a$ : قطر پایه دایره‌ای یا طول پایه مستطیلی در امتداد جریان

$y_1$ : عمق اولیه جریان

$u$ : سرعت جریان

$u_c$ : سرعت بحرانی در آستانه حرکت

$u_a$ : برای مصالح یکنواخت  $u_a = u_c$  و برای مصالح غیریکنواخت  $u_a = u$

$l$ : عرض پایه در جهت عمود بر جریان، برای پایه دایره‌ای  $l = a$

$\theta$ : زاویه برخورد جریان با پایه پل (یا زاویه امتداد پایه پل با ساحل پایین‌دست)

$t$ : زمان از شروع فرسایش و  $t_c$  زمان تعادل است که از رابطه (۴-۳) محاسبه می‌گردد.

برخی از روابط برای پایه‌های دایره‌ای شکل، که بسیاری از آنها در کشورهای مختلف کاربرد دارند، در جدول (۴-۵) ارائه شده

است.

جدول ۴-۴- معرفی پارامترهای رابطه ملویل (۲۰۰۰) [۴۹]

روش محاسبه		تعریف	ضریب
$a/y_1 < 0.7$ $0.7 < a/y_1 < 5$ $a/y_1 > 5$	$K_{ya} = 2.4a$ $K_{ya} = 2\sqrt{y_1 L}$ $K_{ya} = 4.5y_1$	ضریب نسبت عمق جریان به اندازه قطر پایه	$K_{ya}$
$\frac{u - (u_a - u_c)}{V_c} < 1$ $\frac{u - (u_a - u_c)}{u_c} \geq 1$	$K_I = \frac{u - (u_a - u_c)}{u_c}$ $K = 1$	ضریب شدت جریان	$K_I$
$\frac{a}{d_{50}} \leq 25$ $\frac{a}{d_{50}} > 25$	$K_d = 0.57 \log(2.24 \frac{a}{d_{50}})$ $K_d = 1$	ضریب اندازه ذرات	$K_d$
$K_s$	شکل پایه پل	ضریب شکل	$K_s$
1.0	دایره‌ای		
1.0	دماغه گرد		
1.1	دماغه مربعی		
0.9	دماغه تیز		
پایه‌های غیر دایره‌ای: $K_\theta = (\frac{1}{a} \sin \theta + \cos \theta)^{0.65}$ پایه‌های دایره‌ای: $K_\theta = 1$		ضریب زاویه برخورد جریان با پایه پل	$K_\theta$
$u/u_c \leq 1$ $u/u_c > 1$	$K_t = \exp\{-0.03 \left  \frac{u}{u_c} \ln\left(\frac{t}{t_e}\right) \right ^{1.6}\}$ $K_t = 1$	ضریب مربوط به زمان	$K_t$

#### ۴-۴-۲- تخمین عمق آبخستگی اطراف پایه‌های پل با هندسه پیچیده

پایه‌های پل با هندسه پیچیده شامل ترکیب پایه پل، سرشمع (فونداسیون) و گروه شمع زیر آن می‌باشد. اجزای پایه‌های پیچیده در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. در نسخه سوم HEC-18 برای تخمین عمق آبخستگی در اطراف چنین پایه‌هایی پیشنهاد می‌شود از اصل برهم نهی استفاده شود [۷۴]. رابطه ارائه شده در این مرجع به شکل زیر می‌باشد:

$$Y_s = Y_{spier} + Y_{spc} + Y_{spg} \quad (۱۲-۴)$$

که در این رابطه:

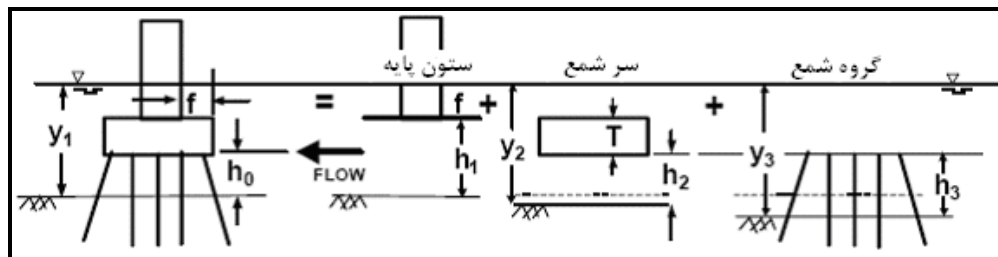
$Y_s$ : عمق آبخستگی کل در اطراف پایه پیچیده،  $Y_{spier}$ : عمق آبخستگی ناشی از وجود پایه،  $Y_{spc}$ : عمق آبخستگی برای سر شمع

واقع شده در برابر جریان و  $Y_{spg}$  عمق آبخستگی برای گروه شمع واقع شده در زیر سر شمع می‌باشد.

جدول ۴-۵ - تعدادی از روابط آبشستگی حول پایه پل [۴۹]

رابطه آبشستگی	محقق (سال انتشار)
$y_s = 0.946(Q/1.76\sqrt{d_{50}})^{1/3}$ ; $d_{50}$ in mm	Lacey and Inglis(1959)
$y_s / y_1 = 2.15(a / y_1)^{0.4} (u / \sqrt{gy_1})^{0.33}$	Liu et al.(1961)
$y_s / y_1 = 6.65Fr_1 - 0.51 - 5.49Fr_1^2$	Chitale-I(1962)
$y_s = 2.278(q^2 / 1.76\sqrt{d_{50}})^{1/3} + 2.5a$ ; $d_s$ in mm	Chitale-II(1988)
$y_s = 1.05a^{0.75}$	Larras(1963)
$y_s = 1.4a$	Breusers(1965)
$y_s / y_1 = 1.95(a / y_1)^{1/6} - 1$	Arunachlam(1965)
$y_s / y_1 = 2.43(a / y_1)^{1/4}$	Blench(1966)
$y_s / a = 3.3(d_{50} / a)^{0.2} (y_1 / a)^{0.13}$	Hancu-I(1971)
$y_s / a = 2.42(2\frac{u}{u_c} - 1)(\frac{u^2}{ga})^{1/3}$	Hancu-II(1971)
$y_s = 1.5a$	Neil(1973)
$y_s = 538(u_r r)^{1.28}$ , $d_{50} \leq 0.5mm$ $u_r = 0.092a^{-0.5} u^{0.83}$ , $r = 0.1a$	Qadar(1981)
$y_s / a = 1.41(y_1 / a)^{0.3} (u_c / \sqrt{gy_1})^{0.25}$	Jain(1981)
$y_s = 2.0a$ در ماسه یکنواخت $y_s = 2.3a$ در ماسه یکنواخت بدون تشکیل ریبیل	Raudkivi(1986)
$y_s / y_1 = 2.02Fr_1^{0.21} \sigma_g^{-0.24} (a / y_1)^{0.98}$	Johnson(1992)

در جدول فوق  $y_s$ : عمق آبشستگی،  $a$ : قطر پایه،  $y_1$ : عمق جریان،  $Fr_1$ : عدد فرود بالادست پایه،  $Q$ : بده جریان،  $q$ : بده واحد عرض،  $u$ : سرعت جریان و  $u_c$  سرعت بحرانی می‌باشد.



شکل ۴-۵ - اجزای پایه‌های پیچیده [۷۴]

متغیرهای معرفی شده در شکل (۴-۵) عبارتند از:

$f$ : فاصله بین وجه جلویی سر شمع با پایه

$h_0$ : ارتفاع سرشمع بالای بستر اولیه

$$h_1 : h_0 + T = \text{ارتفاع پایه در بالای بستر قبل از آبشستگی}$$

$$h_2 : h_0 + y_{\text{spier}} / 2 = \text{ارتفاع سر شمع با احتساب آبشستگی مربوط به پایه}$$

$$h_3 : h_0 + y_{\text{spier}} / 2 + y_{\text{spc}} / 2 = \text{ارتفاع گروه پایه با احتساب آبشستگی مربوط به پایه و سرشمع}$$

$S_p$ : فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها

$T$ : ضخامت سر شمع

$y_1$ : عمق جریان در بالادست

$$y_2 : y_1 + y_{\text{spier}} = \text{عمق به‌دست آمده برای محاسبات سر شمع}$$

$$y_3 : y_1 + y_{\text{spier}} / 2 + y_{\text{spc}} / 2 = \text{عمق به‌دست آمده برای محاسبات گروه شمع}$$

$v_1$ : سرعت جریان در بالادست

$$v_2 : v_1 (y_1 / y_2) = \text{سرعت جریان به‌دست آمده برای محاسبات سر شمع}$$

$$v_3 : v_1 (y_1 / y_3) = \text{سرعت جریان به‌دست آمده برای محاسبات گروه شمع}$$

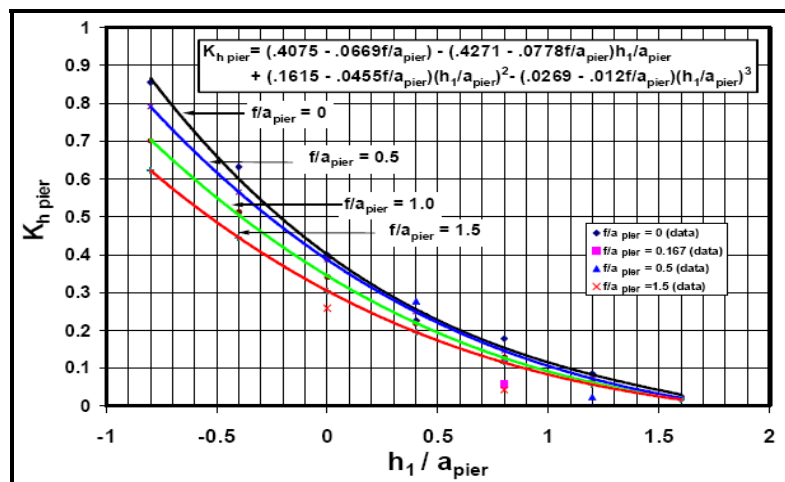
هر یک از اجزای آبشستگی در معادله آبشستگی پایه‌های پیچیده (رابطه ۴-۱۲) با استفاده از قطر موثر پایه، عمق جریان، سرعت و ارتفاع به‌دست آمده برای پایه و گروه شمع محاسبه می‌شود.

#### ۴-۲-۱- آبشستگی ناشی از پایه

آبشستگی ناشی از پایه از رابطه زیر تخمین زده می‌شود [۷۴]:

$$\frac{y_{\text{spier}}}{y_1} = K_{\text{hpier}} \times \left[ 2.0 \times k_1 k_2 k_3 k_4 \times \left( a_{\text{pier}} / y_1 \right)^{0.65} \times \left( \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}} \right)^{0.43} \right] \quad (۴-۱۳)$$

که در این معادله عرض پایه است متغیرهای  $K_1$  تا  $K_4$  در رابطه (۴-۶) تعریف شده است. ضریب  $K_{\text{hpier}}$  از شکل (۴-۶) که به‌صورت تابعی از  $h_1/a_{\text{pier}}$  و  $f/a_{\text{pier}}$  نشان داده شده است محاسبه می‌شود.



شکل ۴-۶- نمودار ضریب  $K_{\text{hpier}}$  بر حسب  $h_1/a_{\text{spier}}$  و  $f/a_{\text{pier}}$  [۷۴]



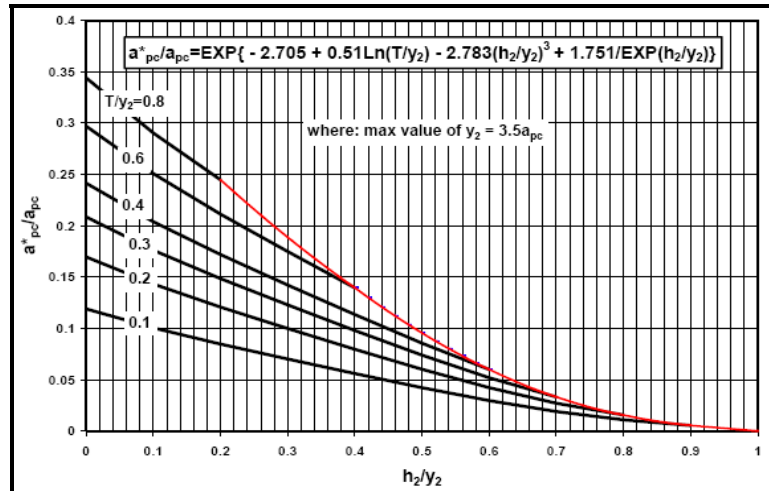
## ۴-۲-۲- آبشستگی ناشی از سر شمع

محاسبه آبشستگی ناشی از سر شمع هنگامی مورد نیاز است که سر شمع داخل جریان قرار گیرد. در این صورت ۲ حالت وجود دارد:

- ۱- کف سرشمع بالای بستر و داخل جریان قرار دارد.
- ۲- کف سرشمع روی سطح بستر یا زیر بستر قرار دارد.

برای حالت اول، عرض پایه معادل که کاملاً درون آب واقع شده است  $a_{pc}^*$ ، با استفاده از شکل (۴-۷) محاسبه شده و در رابطه (۴-۱۴) جایگزین می‌شود تا عمق آبشستگی ناشی از سر شمع به دست آید. در این رابطه  $K_w$  ضریب تصحیح برای پایه عریض است [۷۴].

$$\frac{y_{spier}}{y_2} = \left[ 2.0 \times k_1 k_2 k_3 k_4 k_w \times \left( \frac{a_{pc}^*}{y_2} \right)^{0.65} \times \left( \frac{v_2}{\sqrt{g y_2}} \right)^{0.43} \right] \quad (۴-۱۴)$$



شکل ۴-۷- عرض معادل سر شمع [۷۴]

هنگامی که نسبت عمق جریان به عرض پایه کم‌تر از  $0.8$  و نسبت عرض پایه به قطر رسوب بیش از  $50$  باشد، این ضریب در محاسبات لحاظ می‌گردد (رابطه ۴-۱۵).

$$k_w = 2.58 \times \left( \frac{y_1}{a} \right)^{0.34} \times Fr_1^{0.65} \quad : u/u_c \leq 1 \quad (۴-۱۵)$$

$$k_w = 1.0 \times \left( \frac{y_1}{a} \right)^{0.13} \times Fr_1^{0.25} \quad : u/u_c > 1$$

در حالت دوم، کل عرض سرشمع  $a_{pc}$ ، ارتفاع در معرض جریان سرشمع  $y_f$  و سرعت متوسط جریان در ناحیه‌ای از سر شمع که زیر سطح جریان قرار دارد  $V_f$ ، در معادله (۴-۱۶) جایگزین می‌شود [۷۴]:

$$\frac{y_{spc}}{y_f} = \left[ 2.0 \times k_1 k_2 k_3 k_4 k_w \times \left( \frac{a_{pc}}{y_f} \right)^{0.65} \times \left( \frac{V_f}{\sqrt{g y_f}} \right)^{0.43} \right] \quad (۴-۱۶)$$

$V_f$  با استفاده از رابطه (۱۷-۴) به دست می‌آید. در این حالت فرض می‌شود آبخستگی محاسبه شده برای سرشمع شامل سهم آبخستگی گروه پایه نیز می‌باشد [۷۴].

$$\frac{V_f}{v_2} = \frac{\ln\left(10.93 \times \frac{y_f}{k_s} + 1\right)}{\ln\left(10.93 \times \frac{y_2}{k_s} + 1\right)} \quad (17-4)$$

در این رابطه  $y_2 = y_1 + y_{spier} / 2$ ،  $y_f = h_1 + y_{spier} / 2$  و  $v_2 = v_1(y_1 / y_2)$  می‌باشد.

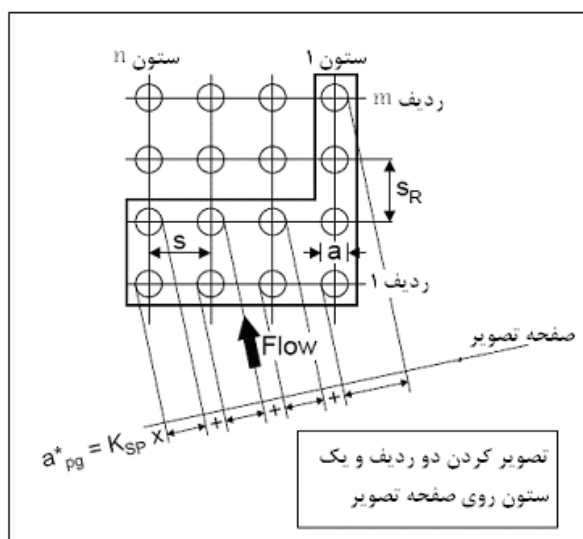
#### ۴-۲-۳- آبخستگی ناشی از گروه شمع

تحقیقاتی توسط سلیم (۱۹۹۵-۱۹۹۹) و جونز و اسمیت (۱۹۹۹) جهت مشخص کردن عمق آبخستگی در گروه شمع‌ها انجام شده است که فاصله بین شمع‌ها، تعداد ردیف‌ها و ضریب ارتفاع (برای محاسبه طولی از شمع که تحت تاثیر جریان است) را در نظر می‌گیرد. برای تحلیل مساله ۲ حالت وجود دارد:

۱- حالت خاص که شمع‌ها هم راستا با هم و هم راستا با جریان باشند.

۲- حالت کلی که گروه شمع نسبت به جهت جریان انحراف دارد یا شمع‌ها در ردیف‌های نامرتب قرار دارند.

روش تخمین عمق آبخستگی ناشی از گروه شمع‌ها در هر دو مورد یکسان است، ولی استفاده از تکنیک عرض تصویر شده شمع‌ها ( $a_{proj}$ )، برای حالت اول ساده‌تر است (شکل ۴-۸). در این شکل،  $a$  قطر و  $S$  فاصله مرکز تا مرکز شمع‌هاست [۷۴].



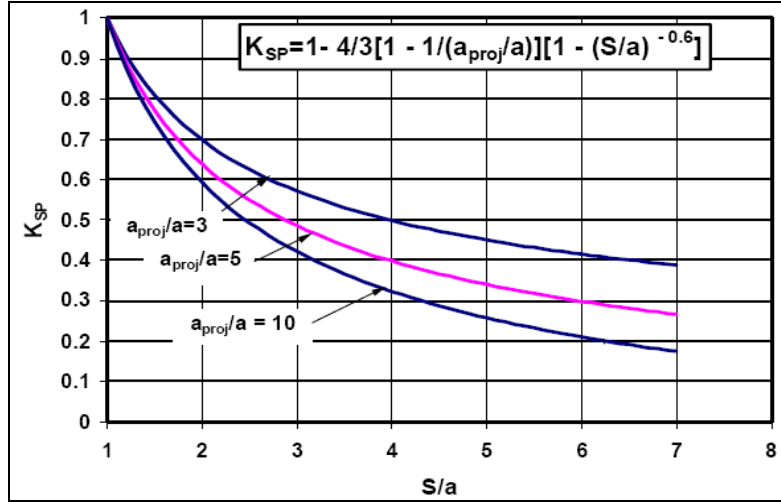
شکل ۴-۸- عرض تصویر شده شمع‌ها برای حالت کلی [۷۴]

عرض موثر معادل از رابطه (۱۸-۴) محاسبه می‌شود [۷۴]:

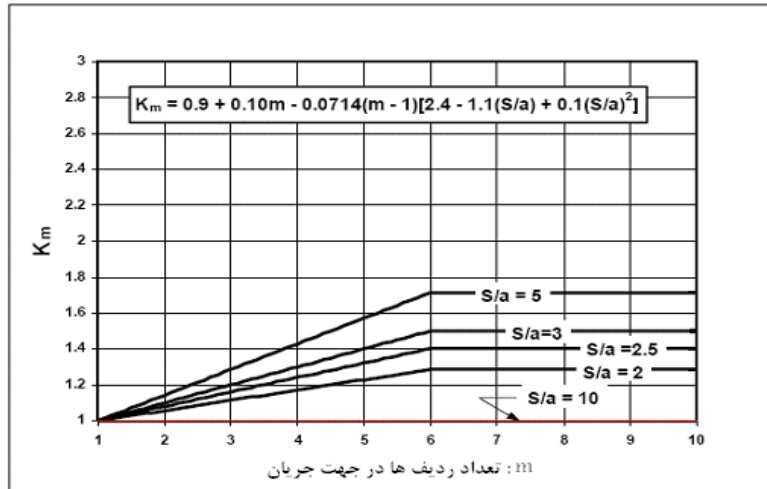
$$a_{pg}^* = a_{proj} \times K_{sp} \times K_m \quad (18-4)$$

$K_{sp}$ : ضریب فاصله شمع‌ها که از شکل (۹-۴) به دست می‌آید.

$K_m$ : ضریب تعداد ردیف‌های هم راستا که در حالت کلی برابر یک است و برای حالت خاص از شکل (۴-۱۰) تعیین می‌گردد.  $m$  معرف تعداد ردیف‌ها در جهت جریان است.



شکل ۴-۹- ضریب فاصله شمع‌ها [۷۴]

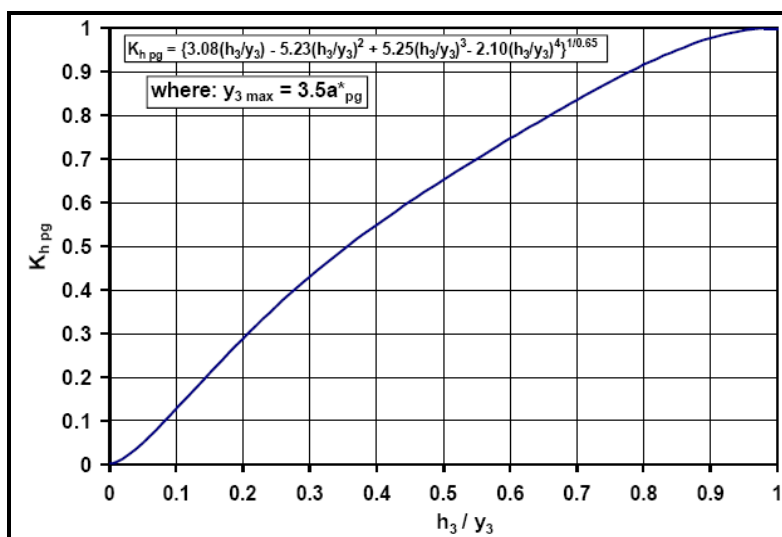


شکل ۴-۱۰- ضریب ردیف‌های هم راستا برای حالت خاص [۷۴]

در نهایت عمق آبخستگی برای گروه شمع‌ها از رابطه (۴-۱۹) به‌دست می‌آید [۷۴]:

$$\frac{y_{spg}}{y_3} = K_{hpg} \left[ 2.0 \times k_1 k_2 k_3 k_4 \times \left( \frac{a_{pc}^*}{y_3} \right)^{0.65} \times \left( \frac{v_3}{\sqrt{g y_3}} \right)^{0.43} \right] \quad (4-19)$$

که در این رابطه  $K_{hpa}$  ضریب ارتفاع گروه شمع‌هاست که از شکل (۴-۱۱) به‌دست می‌آید:



شکل ۴-۱۱ - ضریب ارتفاع گروه شمع‌ها [۷۴]

#### ۴-۳-۴- تخمین عمق آبستنگی اطراف گروه پایه‌ها

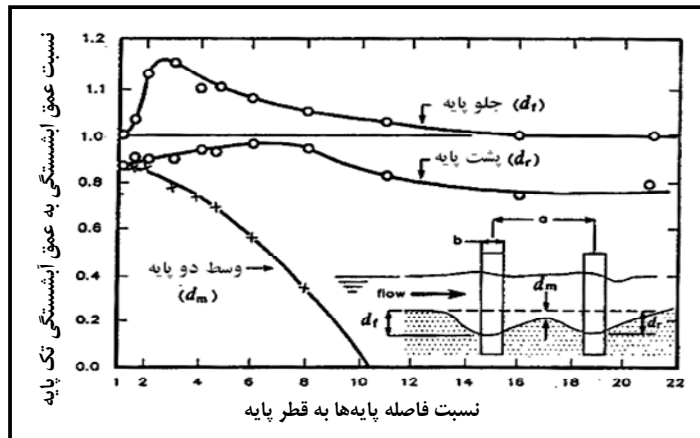
در این زمینه تحقیقات متعددی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات محقیینی چون هانا (۱۹۷۸) [۳۵]، نوح (۱۹۸۶) [۵۸]، کوتاری و همکاران (۱۹۹۲) [۴۳]، مشاهیر و همکاران (۲۰۰۶) [۴۶] و معدلی و فرهودی (۱۳۷۵) [۲] اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین تحقیقات در زمینه گروه پایه‌های پل توسط هانا (۱۹۷۸) انجام گردیده است [۳۵]. مطالعات ایشان به صورت آزمایشگاهی در شرایط آب زلال و با قطر مصالح مورد استفاده ۰/۷۵ میلی‌متر انجام شده است. در زیر نتایج ایشان ارائه می‌گردد:

#### ۴-۳-۴-۱- دو پایه در راستای جریان (در امتداد هم)

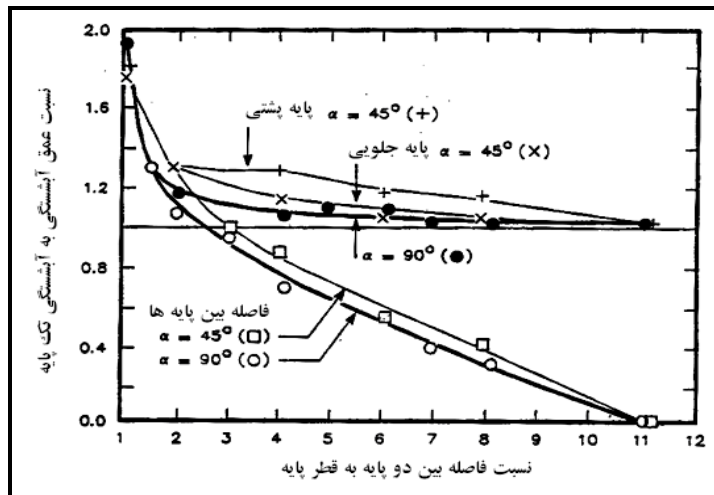
نتایج حاصل از این حالت در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عمق آبستنگی هر یک از پایه‌ها و تراز بستر بین پایه‌ها بستگی به نسبت فاصله پایه‌ها به قطر پایه ( $s/a$ ) دارد که  $s$  فاصله مرکز به مرکز دو پایه و  $a$  قطر پایه‌ها می‌باشد. برای دو پایه با  $s/a=1$  عمق آبستنگی در پایه جلویی  $d_f$  مانند حالت وجود یک پایه است. با افزایش فاصله دو پایه، پایه جلویی اثر تقویت شدن را تجربه کرده و در  $s/a=2.5$  این اثر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این اثر تا  $s/a=11$  دیده می‌شود. برای پایه‌های با فاصله زیاد از هم، عمق آبستنگی مثل حالت وجود یک پایه می‌باشد.

#### ۴-۳-۴-۲- دو پایه با زاویه ۹۰ درجه در برابر جریان (دو پایه در عرض جریان)

شکل (۴-۱۳) نتایج حاصل از این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت آبستنگی هر دو پایه یکسان بوده و نتایج برای هر کدام از پایه‌ها یکسان می‌باشد و برای حالت دو پایه در کنار هم با  $s/a=1$  عمق آبستنگی برابر  $1.93 d_f$  به دست می‌آید که تقریباً به این معنی است که عرض پایه دو برابر شده است. عمق آبستنگی در  $s/a=1.5$ ، به سرعت تا  $1.3 y_s$  کاهش یافته و در  $s/a > 2$ ، شکل گرداب نعل اسبی برای هر پایه متمایز می‌شود. در بین پایه‌ها، بازوهای گرداب نعل اسبی به هم فشرده شده و سرعت‌های بالا و در نتیجه پتانسیل آبستنگی بزرگ‌تری تولید می‌کنند. برای  $s/a > 8$ ، مثل حالت یک پایه عمل خواهد کرد. حفره آبستنگی هر کدام از پایه‌ها در  $s/a=11$  از یکدیگر جدا می‌شوند.



شکل ۴-۱۲- نمودار بین تغییر میزان آبشستگی و فاصله‌ی نسبی دو پایه در حالت در امتداد جریان [۳۵]



شکل ۴-۱۳- نمودار بین تغییرات میزان آبشستگی و فاصله‌ی نسبی دو پایه در دو حالت عمود

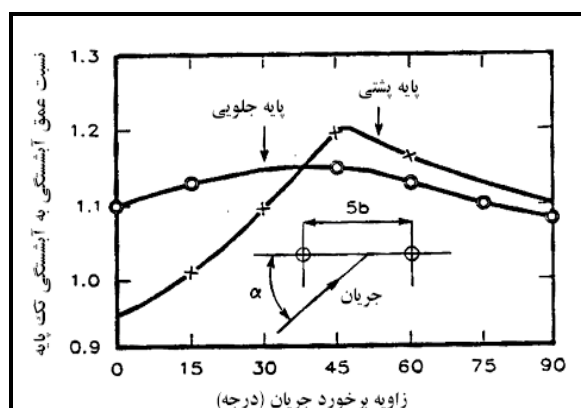
بر جریان و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان [۳۵]

#### ۴-۳-۳- دو پایه با ۴۵° نسبت به جریان

نتایج حاصل از این حالت نیز در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. عمق آبشستگی برای دو پایه در کنار هم برابر  $1.77d_f$  به دست می‌آید. عمق آبشستگی برای پایه پشتی در همه مقادیر  $s/a$  بین ۱ تا ۱۱، از پایه جلویی بیش تر است. در فواصل بزرگ‌تر، حفره آبشستگی هر یک از پایه‌ها جداگانه تشکیل شده و مثل حالت یک پایه عمل می‌کنند. در این فواصل بستر در وسط دو پایه بدون آبشستگی باقی می‌ماند. افزایش عمق آبشستگی برای پایه عقبی به علت ترکیب دو عامل گرداب‌های جاری شده از پایه جلویی و به هم فشردگی گرداب نعل اسبی بین دو پایه می‌باشد. بدیهی است که این دو عامل اثر محافظت پایه عقبی را از بین می‌برند. بیش‌ترین تاثیر این دو عامل در  $s/a = 4$  مشاهده می‌شود که اختلاف بین عمق آبشستگی پایه جلویی و عقبی بیش تر می‌باشد.

## ۴-۳-۴-۴- اثر زاویه برخورد جریان

برای مشاهده اثر زاویه برخورد جریان به پایه پل، آزمایشاتی نیز توسط هانا (۱۹۷۸) با  $s/a = 5$  برای زوایای بین صفر درجه و  $90^\circ$  درجه با فاصله‌های  $15^\circ$  انجام شده است که نتایج حاصل در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است. آبخستگی در پایه جلویی به زاویه برخورد زیاد حساس نبوده و کم‌تر از ۵٪ نسبت به  $\alpha = 0^\circ$  تغییر می‌کند. عمق آبخستگی در پایه عقبی شدیداً به زاویه برخورد جریان حساس می‌باشد. برای زوایای کوچک‌تر، ( $\alpha < 15^\circ$ )، عامل موثر بر عمق آبخستگی پایه عقبی، محافظت آن توسط پایه جلویی می‌باشد. با افزایش زاویه برخورد جریان، اثر محافظت کم شده و پایه تحت تاثیر گرداب‌های جاری شده از پایه جلویی و به هم فشردگی گرداب نعل اسبی قرار می‌گیرد. در نتیجه عمق آبخستگی افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود تقریباً در  $\alpha = 45^\circ$  می‌رسد (برای  $s/a = 5$ ). وقتی زاویه برخورد از  $45^\circ$  بیش‌تر شود، پایه پشتی دیگر تحت تاثیر گرداب‌های جاری شده نبوده و در نتیجه عمق آبخستگی کم خواهد شد.



شکل ۴-۱۴- نمودار بین زاویه‌ی برخورد جریان با عمق آبخستگی در دو پایه [۳۵]

تحقیقات دیگری در رابطه با گروه پایه‌ها توسط مشاهیر وهمکاران (۲۰۰۶) انجام شده است [۴۶]. در این تحقیقات دو پایه گرد با قطر ۴ سانتی‌متر در دو حالت قرارگیری در راستای جریان و در عرض جریان با فواصل مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. فواصل بین پایه‌ها در این آزمایشات ۲، ۳ و ۴ برابر قطر پایه‌ها بوده است. آزمایشات در شرایط آب زلال با نسبت سرعت برشی بستر به سرعت برشی بحرانی برابر با  $0.923$  انجام گرفته است. نتایج این آزمایشات در جدول (۴-۵) آورده شده است. با مقایسه داده‌های مندرج در این جدول با تحقیقات هانا (۱۹۷۸) می‌توان نتیجه گرفت که در حالت قرارگیری دو پایه در راستای جریان، عمق آبخستگی برای پایه جلویی مشابه یکدیگر بوده ولی برای پایه پشتی این عمق بیش‌تر می‌باشد.

جدول ۴-۶- مقادیر نسبت عمق آبخستگی گروه پایه به عمق آبخستگی تک پایه [۴۶]

نسبت فاصله به قطر پایه	دو پایه در راستای جریان	
	پایه جلویی	پایه پشتی
۲	۲/۵۸	۲/۳
۳	۲/۵۵	۲/۲۸
۴	۲/۵۳	۲/۲۵

نظری‌ها (۱۹۹۶) تحقیقاتی راجع به گروه پایه‌های ۴ و ۶ تایی انجام داد و روابطی برای تخمین عمق آبشستگی پایه جلویی و پایه‌های پشتی ارائه نمود [۵۳]. ایشان با انجام آزمایشات متعدد بر روی گروه پایه‌های گرد در شرایط آب زلال دو رابطه زیر را به ترتیب برای تخمین عمق آبشستگی پایه جلویی و پایه‌های پشتی ارائه کرد:

$$\frac{y_{SF}}{y_s} = 1.9 \left( \frac{s}{a} \right)^{-0.1} \quad (20-4)$$

$$\frac{y_{SR}}{y_s} = 1.65 \alpha^{0.13} \left( \frac{s}{a} \right)^{-0.07} \quad (21-4)$$

که در این روابط:

$y_{SF}$ : عمق آبشستگی پایه جلویی،  $y_s$ : عمق آبشستگی تک پایه گرد،  $y_{SR}$ : عمق آبشستگی پایه‌های پشتی،  $\alpha$ : زاویه برخورد جریان به گروه پایه،  $s$  فاصله مرکز به مرکز دو پایه و  $a$  قطر پایه‌ها می‌باشد. ایشان اشاره کرد که اثر زاویه برخورد جریان بر روی عمق آبشستگی پایه جلویی ناچیز بوده و همچنین در حالت زاویه برخورد صفر درجه،  $\alpha$  برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴-۴-۴- مثال

##### مثال ۱- آبشستگی حول یک پایه تک

الف- آبشستگی حول یک پایه پل تک را با استفاده از داده‌های زیر محاسبه نمایید.

هندسه پایه: دارای نوک مدور، طول ۱۸ متر و عرض ۱/۲۲ متر

متغیرهای جریان:  $y_1 = 3.12\text{m}$ ,  $V_1 = 3.36\text{m/s}$

زاویه برخورد جریان: صفر درجه

عدد فرود:  $3.36 / (9.81 \times 3.12)^{0.5} = 0.61$  غا

مصالح بستر:  $d_{95} = 7.3\text{mm}$  و  $d_{50} = 0.32\text{mm}$

شکل بستر: بستر صاف

حل: با استفاده از رابطه CSU (رابطه ۴-۶) و مقادیر  $k_4 = 1$  و  $k_3 = 1.1$ ،  $K_2 = 1$ ،  $k_1 = 1$  داریم:

$$\frac{y_s}{3.12} = 2 \times 1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times \left( \frac{a}{y_1} \right)^{0.65} \times Fr_1^{0.65}$$

$$y_s = 0.97 \times 3.12 = 3.03\text{m}$$

ب- در صورتی که زاویه برخورد جریان برابر ۲۰ درجه باشد، عمق آبشستگی را محاسبه نمایید.

حل: با استفاده از رابطه (۷-۴) داریم:

$$k_2 = \left( \cos\theta + \frac{L}{a \sin\theta} \right)^{0.65}$$

$$\frac{L}{a} = \frac{18}{1.22} = 14.8 > 12$$

$$k_2 = (\cos 20 + 12 \sin 20)^{0.65} = 2.86$$

$$y_s = 3.03 \times 2.86 = 8.7 \text{ m}$$

در این جا  $L/a$ ، با توجه به مطالب قبلی، برابر ۱۲ در نظر گرفته شده است.

ج- در صورتی که مصالح بستر از نوع درشت دانه با  $d_{50} = 17.8 \text{ mm}$  و  $d_{95} = 96.3 \text{ mm}$  باشد، عمق آبستنگی را محاسبه نمایید.

**حل:** با استفاده از روابط (۴-۸) تا (۴-۱۰) داریم:

$$k_4 = 0.4 \times (V_R)^{0.15}$$

$$V_R = \frac{V_1 - V_{icd50}}{V_{cd50} - V_{icd95}} > 0$$

$$V_{icd_x} = 0.645 \times \left( \frac{d_x}{a} \right)^{0.053} \times V_{cd_x}$$

$$V_{cd_x} = 6.19 \times y_1^{\frac{1}{6}} \times d_x^{\frac{1}{3}}$$

$$V_{cd50} = 6.19 \times (3.12)^{\frac{1}{6}} \times (0.0178)^{\frac{1}{3}} = 1.95$$

$$V_{cd95} = 6.19 \times (3.12)^{\frac{1}{6}} \times (0.0963)^{\frac{1}{3}} = 3.43$$

$$V_{icd50} = 0.645 \times \left( \frac{0.0178}{1.22} \right)^{0.053} \times 1.95 = 1.01$$

$$V_{icd95} = 0.645 \times \left( \frac{0.0963}{1.22} \right)^{0.053} \times 3.43 = 1.93$$

$$V_R = \frac{(3.36 - 1.01)}{(1.95 - 1.93)} = 117.5$$

بنابراین:

$$K_4 = 0.4 \times 117.5^{0.15} = 0.82$$

$$y_s = 0.82 \times 3.03 = 2.48 \text{ m}$$

در این حالت حداکثر عمق آبستنگی برابر است با:

## مثال ۲- آبستنگی حول پایه‌های پیچیده

یک پایه پل با مشخصات مثال ۱ روی یک پی یا سر شمع مربعی به عرض ۲.۴۴ m، ارتفاع ۱.۶ m و طول ۱۹.۸۱ m قرار دارد. پی توسط فرسایش دراز مدت به میزان ۱.۵ m نمایان می‌شود (شکل ۴-۱۵). حداکثر عمق آبستنگی را محاسبه نمایید.

مشخصات هندسی پایه، طول ۱۸ متر و عرض ۱/۲۲ متر با دماغه دایره‌ای شکل

مشخصات هندسی پی یا سر شمع:

$$a_{pc} \text{ (or } a_f) = 2.44 \text{ m, } L = 19.81 \text{ m, } T = 1.6 \text{ m, } f = 0.76 \text{ m}$$



$$v_1 = 3.36 \text{ m}, y_1 = 3.12 \text{ m}$$

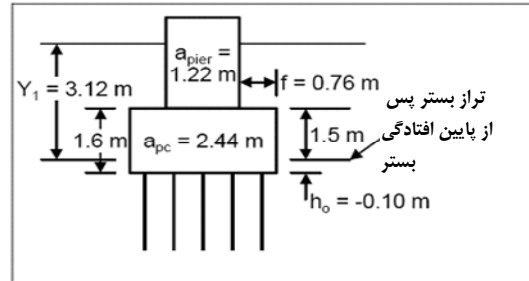
مشخصات جریان بالادست:

زاویه برخورد جریان: صفر درجه

$$\text{عدد فرود: } 3.36 / (9.81 \times 3.12)^{0.5} = 0.61$$

مصالح بستر:  $d_{84} = 7.3 \text{ mm}$  و  $d_{50} = 0.32 \text{ mm}$

شکل بستر: بستر صاف



شکل ۴-۱۵ - مربوط به مثال ۲

حل:

- آبشستگی موضعی ناشی از پایه

$$f = 0.76 \text{ m}$$

$$h_1 = h_0 + T = -0.1 + 1.6 = 1.5 \text{ m}$$

$$\frac{h_1}{a_{\text{pier}}} = \frac{1.5}{1.22} = 1.23$$

$$\frac{f}{a_{\text{pier}}} = \frac{0.76}{1.22} = 0.62$$

$$k_{\text{hpier}} = 0.06$$

مقدار  $K_{\text{hpier}}$  با استفاده از شکل (۴-۶) به دست آمده است.

با استفاده از رابطه (۴-۱۳) عمق آبشستگی ناشی از پایه به دست می‌آید:

$$\frac{y_{\text{spier}}}{y_1} = 0.06 \times \left[ 2.0 \times 1 \times 1 \times 1.1 \times \left( \frac{1.22}{3.12} \right)^{0.65} \times \left( \frac{3.36}{\sqrt{9.81 \times 3.12}} \right)^{0.43} \right]$$

$$y_{\text{spier}} = 0.06 \times 0.97 \times 3.12 = 0.18 \text{ m}$$

- عمق آبشستگی ناشی از پی یا سر شمع

$$y_2 = y_1 + \frac{y_{\text{spier}}}{2} = 3.12 + \frac{0.18}{2} = 3.21 \text{ m}$$

$$V_2 = V_1 \left( \frac{y_1}{y_2} \right) = 3.36 \times \left( \frac{3.12}{3.21} \right) = 3.26 \text{ m/s}$$

$$h_2 = h_0 + \frac{y_{\text{spier}}}{2} = -0.1 + 0.09 = -0.01$$

کف پی زیر بستر قرار دارد. در نتیجه از حالت دو برای پی نمایان استفاده می‌کنیم:

$$y_f = h_1 + \frac{y_{\text{spier}}}{2} = 1.5 + 0.09 = 1.59 \text{ m}$$

با فرض این‌که  $k_s = D_{84} = 7.3 \text{ mm}$  باشد سرعت روی پی عبارت است از:

$$\frac{V_f}{V_2} = \frac{\ln \left( 10.93 \times \frac{y_f}{k_s} + 1 \right)}{\ln \left( 10.93 \times \frac{y_2}{k_s} + 1 \right)} = \frac{\ln \left( 10.93 \times \frac{1.59}{0.0073} + 1 \right)}{\ln \left( 10.93 \times \frac{3.21}{0.0073} + 1 \right)} = 0.92$$

$$\frac{y_2}{a_f} = 1.31 (> 0.8); \quad \text{use } k_w = 1.0$$

با استفاده از رابطه (۴-۱۶):

$$V_f = 0.92 \times V_2 = 0.92 \times 3.26 = 2.99 \text{ m/s}$$

$$\frac{y_{\text{spc}}}{y_f} = 2 \times 1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times 1 \left( \frac{2.44}{1.59} \right)^{0.65} \times \left( \frac{2.99}{\sqrt{9.81 \times 1.59}} \right)^{0.43} = 2.83$$

بنابراین عمق آبشستگی ناشی از سر شمع ( $y_{\text{spc}}$ ) عبارت است از:

$$y_{\text{spc}} = 2.83 \times y_f = 2.83 \times 1.59 = 4.5 \text{ m}$$

در نتیجه عمق آبشستگی کل پایه برابر خواهد بود با:

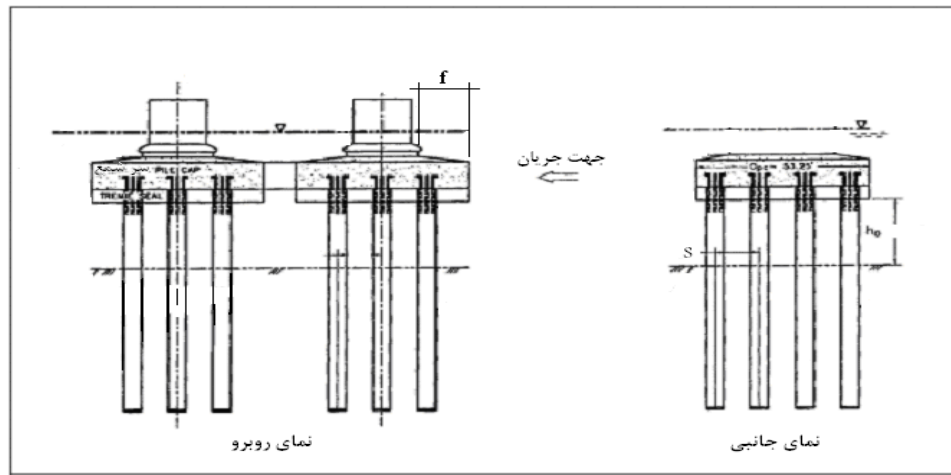
$$y_s = y_{\text{spier}} + y_{\text{spc}} = 0.18 + 4.5 = 4.68 \text{ m}$$

### مثال ۳- آبشستگی حول پایه‌های پیچیده با سر شمع داخل جریان

محاسبه عمق آبشستگی موضعی برای پایه‌های پیچیده نشان داده شده در شکل (۴-۱۶):

پارامترهای اولیه عبارتند از:

$y_1 = 15.79 \text{ m}$	$h_0 = 7.77 \text{ m}$
$v_1 = 3.41 \text{ m/s}$	$h_1 = h_0 + T = 12.65 \text{ m}$
$a_{\text{pier}} = 9.754 \text{ m}$	$S = 4.19 \text{ m}$
$a_{\text{pc}} = 16.23 \text{ m}$	$T = 4.88 \text{ m}$
$d_{50} = 0.32 \text{ mm}$	$f = 2.627 \text{ m}$
زاویه برخورد = صفر	$a = 1.676 \text{ m}$



شکل ۴-۱۶ - شکل مربوط به مثال ۳

حل:

- آبشستگی ناشی از ستون پایه

با استفاده از شکل (۴-۶):

$$\frac{f}{a_{\text{pier}}} = \frac{2.627}{9.754} = 0.27$$

$$\frac{h_1}{a_{\text{pier}}} = \frac{12.56}{9.754} = 1.3$$

$$K_{\text{hpier}} = 0.062$$

با استفاده از رابطه (۴-۱۳) داریم:

$$\frac{y_{\text{spier}}}{15.79} = 0.062 \times \left[ 2 \times 1.1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times \left( \frac{9.745}{15.79} \right)^{0.65} \times \left( \frac{3.41}{\sqrt{9.81 \times 15.79}} \right)^{-0.43} \right] = 0.0627$$

$$y_{\text{spier}} = 0.062 \times 15.79 = 0.99\text{m}$$

- آبشستگی ناشی از سر شمع

$$h_2 = h_0 + \frac{y_{\text{spier}}}{2} = 7.77 + 0.495 = 8.27\text{m}$$

$$y_2 = y_1 + \frac{y_{\text{spier}}}{2} = 15.79 + 0.495 = 16.28\text{m}$$

$$v_2 = v_1 \times \left( \frac{y_1}{y_2} \right) = 3.41 \times \left( \frac{15.79}{16.28} \right) = 3.31\text{m/s}$$

$$y_2 = 3.5 \times a_{\text{pc}} = 56.81 > 16.28; \quad \text{use } y_2 = 16.28\text{m}$$

با توجه به شکل (۷-۴) داریم:

$$\frac{h_2}{y_2} = 0.51$$

$$\frac{T}{y_2} = 0.3$$

$$\frac{a_{pc}^*}{a_{pc}} = 0.07$$

$$a_{pc}^* = 0.07 \times 16.23 = 1.1\text{m}$$

با استفاده از رابطه (۱۴-۴) داریم:

$$\frac{y_2}{a_{pc}^*} = 14.8 (> 0.8); \quad \text{use } k_w = 1.0$$

$$\frac{y_{spc}}{16.28} = 2 \times 1.1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times \left( \frac{1.1}{16.28} \right)^{0.65} \times \left( \frac{3.31}{\sqrt{9.81 \times 16.28}} \right)^{0.43} = 0.236$$

$$y_{spc} = 0.236 \times 16.28 = 3.84\text{m}$$

- آبشستگی ناشی از گروه شمع

$$h_3 = h_0 + \frac{1}{2}(y_{spier} + y_{spc}) = 7.77 + \frac{(0.99 + 3.84)}{2} = 10.19\text{m}$$

$$y_3 = y_1 + \frac{1}{2}(y_{spier} + y_{spc}) = 15.79 + \frac{(0.99 + 3.84)}{2} = 18.2\text{m}$$

$$v_3 = v_1 \times \left( \frac{y_1}{y_3} \right) = 3.41 \times \left( \frac{15.79}{18.2} \right) = 2.95\text{m/s}$$

از شکل (۸-۴) داریم:

$$a_{proj} = 4 \times 1.676 = 6.71\text{m}$$

$$\frac{a_{proj}}{a} = \frac{6.71}{1.676} = 4 \quad \text{تعداد سرشمع‌ها در جهت جریان}$$

$$\frac{S}{a} = \frac{4.19}{1.676} = 2.5$$

از شکل‌های (۹-۴) و (۱۰-۴) داریم:

$$k_{sp} = 0.58$$

$$k_m = 1.26$$

$$a_{pg}^* = k_{sp} \times k_m \times a_{proj} = 0.58 \times 1.26 \times 6.71 = 4.91\text{m}$$

با توجه به این که برای شکل (۱۱-۴) داریم:

$$y_{3max} = 3.5 \times a_{pg}^* = 15.79 < 18.2; \quad \text{use } y_3 = 15.79\text{m}$$

$$h_3 / y_3 = 0.65$$

$$k_{hpg} = 0.79$$

با استفاده از رابطه (۴-۱۹) داریم:

$$\frac{y_{spg}}{15.79} = 0.79 \times \left[ 2 \times 1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times \left( \frac{4.51}{15.79} \right)^{0.65} \times \left( \frac{2.95}{\sqrt{9.81 \times 15.79}} \right) \right]^{0.43} = 0.43$$

$$y_{spg} = 15.79 \times 0.43 = 6.78\text{m}$$

بنابراین برای آبشستگی کل داریم:

$$y_s = y_{spier} + y_{spc} + y_{spg} = 0.99 + 3.84 + 6.78 = 11.6\text{m}$$

روشن است که روابط مختلف، جوابهای متفاوتی دارند و نظر به این که نمی توان رابطه خاصی برای شرایط مختلف توصیه کرد،

انتخاب رابطه مناسب با توجه به اهمیت پروژه و قضاوت مهندسی صورت می گیرد.



# فصل ۵

---

---

آبشستگی اطراف تکیه گاه‌ها و

آبشکن‌ها





## ۵-۱- کلیات

ساخت تکیه‌گاه‌های پل و آبشکن‌ها اهداف متفاوتی دارد. اما به علت مشابه بودن شکل ظاهری و نیز تشابه مکانیسم آبستنگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌های بسته، آبستنگی در اطراف این سازه‌ها با هم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. با این حال این سازه‌ها تفاوت‌هایی با یکدیگر داشته که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

تکیه‌گاه‌های پل<sup>۱</sup> یا کوله‌های پل، پایه‌های پل چسبیده به ساحل رودخانه می‌باشند. درحالی‌که آبشکن‌ها<sup>۲</sup> سازه‌هایی هستند که برای ساماندهی و تثبیت کناره‌های رودخانه احداث می‌شوند. تکیه‌گاه‌ها معمولاً بتنی هستند، در صورتی‌که آبشکن‌ها بیش‌تر از مصالح رودخانه‌ای، توری سنگی و یا شمع کوبی ساخته می‌شوند. تکیه‌گاه‌ها معمولاً منفرد و در دو طرف رودخانه ساخته می‌شوند، اما آبشکن‌ها، بسته به هدف ساخت، در یک سمت رودخانه، در دو سمت رودخانه، به صورت ردیفی با طول‌ها و فواصل مختلف ساخته می‌شوند. با توجه به مطالب یاد شده باید در استفاده از روابط موجود برای محاسبه آبستنگی نهایت دقت را مبذول داشت.

در حالت کلی، تکیه‌گاه‌ها به تکیه‌گاه‌های خط جریانی<sup>۳</sup> و تکیه‌گاه‌های با دماغه تیز<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. هندسه تکیه‌گاه‌ها به انواع مختلفی نظیر دیوار باله‌ای، دیوار شیبدار و دیوار قائم تقسیم می‌شوند. آبشکن‌ها نیز به آبشکن‌های بسته (نفوذناپذیر) و باز (نفوذپذیر) تقسیم‌بندی می‌شوند. هندسه آبشکن‌های بسته می‌تواند شبیه هندسه تکیه‌گاه‌ها باشد. اما معمولاً به علت استفاده از مصالح رودخانه‌ای برای ساخت این سازه‌ها، هندسه آنها شبیه به تکیه‌گاه‌های با دیواره شیبدار خواهد بود. آبشکن‌های باز نیز به گونه‌ای است که قسمتی از جریان از درون این سازه‌ها عبور می‌کند [۳۴]. بسته به شرایط جریان گاهی اوقات بخشی از طول آبشکن در کناره رودخانه به صورت نفوذناپذیر و بخشی دیگر به صورت نفوذپذیر اجرا می‌شود که به این نوع، آبشکن مرکب گویند [۴۳]. در شکل (۵-۱) انواع تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند.

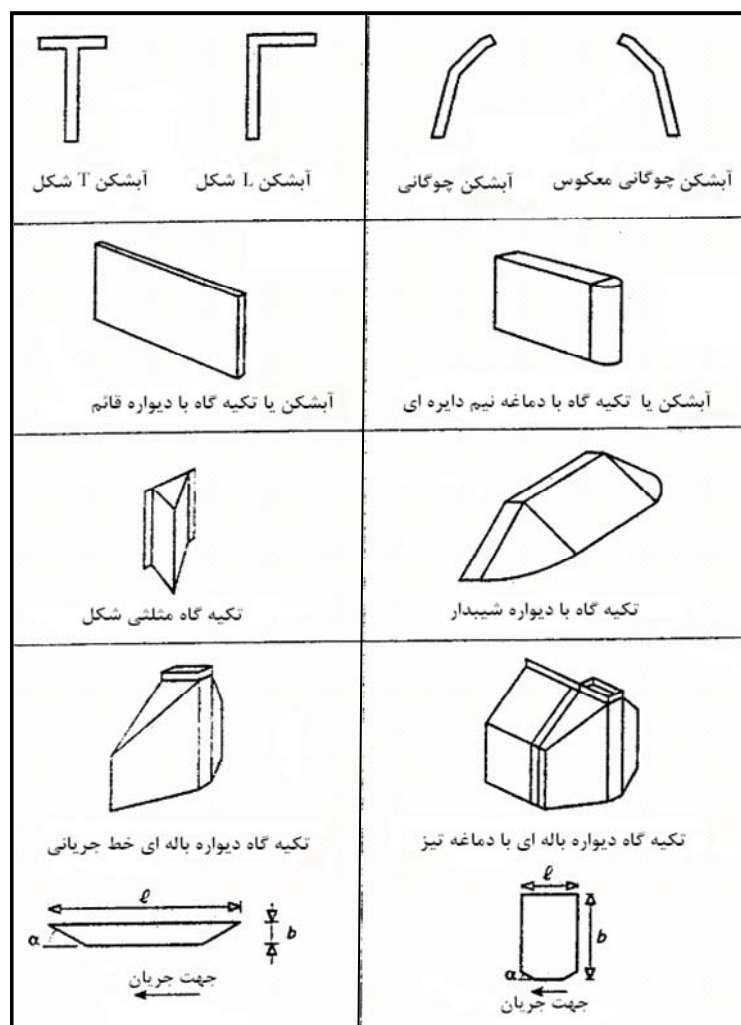
در ادامه به بررسی الگوی جریان و آبستنگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها پرداخته می‌شود و روش‌های برآورد آبستنگی اطراف آنها معرفی می‌گردد.

## ۵-۲- الگوی جریان

### ۵-۲-۱- الگوی جریان در اطراف یک آبشکن یا تکیه‌گاه

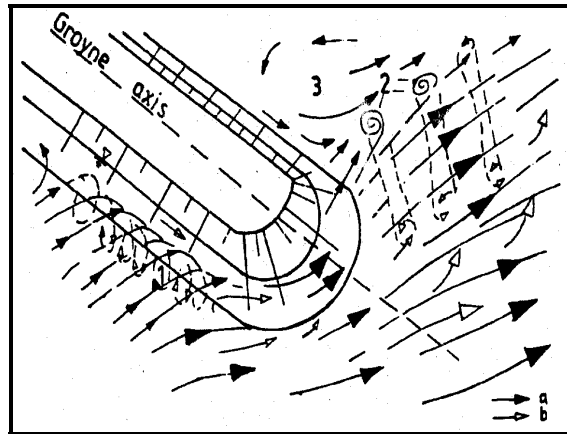
تکیه‌گاه یا آبشکن بخشی از مقطع رودخانه را محدود می‌کند و بر روی ساختار حرکتی جریان در مجاورت آن تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. سرعت متوسط و بده در واحد عرض در محل سازه افزایش می‌یابد که باعث آشفتگی بیش‌تر جریان در اطراف سازه می‌شود. الگوی جریان در اطراف سازه و شکل‌گیری گردابه‌ها بر روی مصالح بستر دلایل اصلی آبستنگی موضعی اطراف آبشکن می‌باشند.

- 
- 1- Abutments
  - 2- Spurs, Spur Dikes, Groins
  - 3- Stream Lined
  - 4- Blunt



شکل ۵-۱- انواع تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها [۳۷]

یک جریان چرخشی نیمه نعل اسبی نسبتاً بزرگ با محور افقی در اطراف آبشکن (شماره ۱ در شکل ۵-۲) در نتیجه برگشت آب ایجاد می‌شود. فوران‌های انتهایی گردابه از دماغه آبشکن با چرخش آب به طرف جریان اصلی حرکت می‌کند. تغییر جهت جریان و ایجاد نیروهای مرکزی ممکن است چرخش به سمت راست را ایجاد کند. به عبارت دیگر فوران‌های انتهایی به طرف دماغه آبشکن جریان می‌یابند. این جریان‌های چرخشی متضاد، یکدیگر را خنثی می‌کنند که در نتیجه آن از شدت فرسایش کاسته می‌شود. در پایین دست آبشکن، جریان‌های چرخشی با محور قائم (شماره ۲ در شکل ۵-۲) که بنام گرداب‌های فون کارمن معروف هستند ایجاد می‌شوند. این سامانه چرخشی به وسیله چرخش لایه‌های برشی بین جریان اصلی و یک گرداب با محور قائم (شماره ۳ در شکل ۵-۲) ایجاد می‌شود. گرداب‌های فون کارمن با مکیدن رسوبات به درون حفره‌های کم فشار، مشابه گردباد عمل می‌کنند. ساختار حرکتی جریان در اطراف آبشکن‌ها به میزان زیادی تحت تاثیر طول نسبی آنها، شکل (خصوصاً شیب دماغه و پهلوها) و محل قرارگیری آنها (به صورت ردیف آبشکن‌هایی که در روی سواحل محدب، مقعر و یا مستقیم رودخانه قرار می‌گیرند) می‌باشد [۷]. شکل (۵-۲) و (۵-۳) الگوی جریان ایجاد شده اطراف یک آبشکن و تکیه‌گاه را نشان می‌دهد.



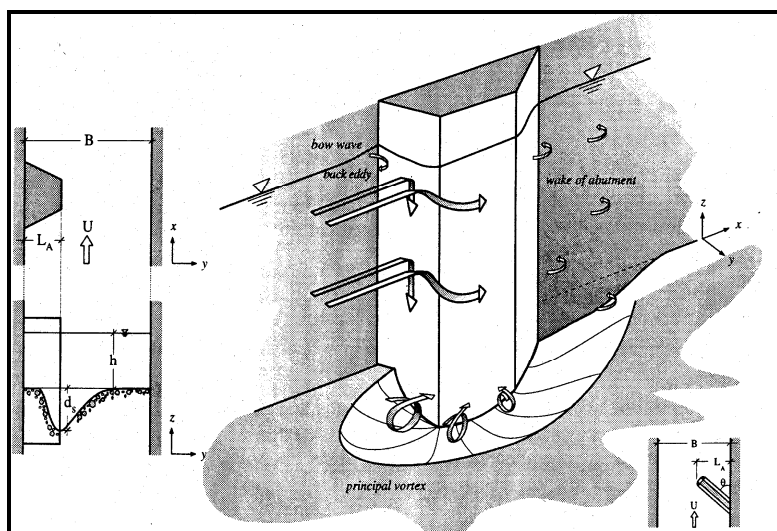
شکل ۵-۲- الگوی جریان اطراف یک آبشکن [۲۹]

در آبشکن‌های نفوذپذیر، بخشی از جریان از منافذ بین آبشکن‌ها عبور می‌کند که منطقه چرخشی در پایین دست آبشکن را یا به وجود نمی‌آورد و یا کاهش می‌دهد.

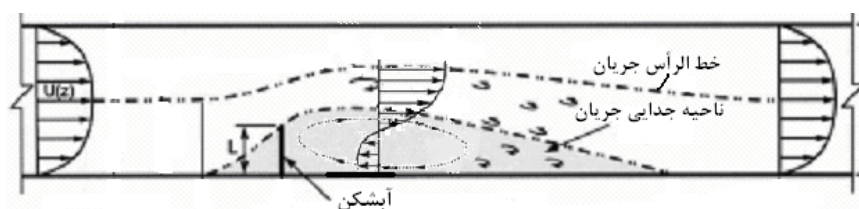
هنگامی که جریان به یک آبشکن در مسیر مستقیم می‌رسد، الگوی جریان به دلیل کاهش عرض مقطع تغییر می‌کند و در نتیجه آن توزیع تنش برشی در اطراف آبشکن دستخوش تغییر می‌شود. میدان جریان در اطراف یک آبشکن در مسیر مستقیم به دو ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول از بالادست تا مقطعی که بیشترین تنگ‌شدگی را دارد، جریان دارای یک شتاب تند شونده می‌باشد و در ناحیه دوم از مقطعی که بیشترین تنگ‌شدگی را دارد تا پایین دست، جریان با یک شتاب کند شونده دنبال می‌شود و یک نقطه جدایی جریان در راس آبشکن قرار دارد. در پایین دست آبشکن نیز جریان اصلی از یک گردابه‌ی بزرگ جدا و در پایین دست نقطه‌ی اتصال مجدد، جریان نرمال مجدداً برقرار می‌شود. البته در بالادست آبشکن نیز یک نقطه‌ی جدایی و گردابه‌های کوچک می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین در وجه بالادست آبشکن نیز یک نقطه‌ی اتصال مجدد وجود دارد. همچنین در نزدیکی دیواره‌های قائم آبشکن یک حرکت مارپیچی شدید ناشی از جریان‌های برگشتی در نزدیکی بستر تولید می‌گردد. شکل (۴-۵) ناحیه جدایی جریان و موقعیت خط جریان در بالادست و پایین دست آبشکن منفرد در یک کانال ارائه شده توسط اتما و مستو را نشان می‌دهد [۲۹].

### ۵-۲-۲- الگوی جریان بین دو آبشکن

اگرچه آبشکن‌های منفرد در بعضی مواقع مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما این سازه‌ها معمولاً به صورت گروهی استفاده می‌شوند. بر مبنای آزمایشات انجام شده بر روی مدل آبشکن‌هایی که در محل قوس یک رودخانه قرار دارند، شش نوع الگوی جریان چرخشی بین آبشکن‌ها تشخیص داده شده است که در شکل (۵-۵) نشان داده شده است. انواع الگوی جریان بین دو آبشکن به تفکیک در زیر ارائه شده است:



شکل ۵-۳- الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه [۱۳]



شکل ۵-۴- خط الرأس و جدایی جریان در اطراف یک آبشکن منفرد در مسیر مستقیم (پلان) [۲۹]

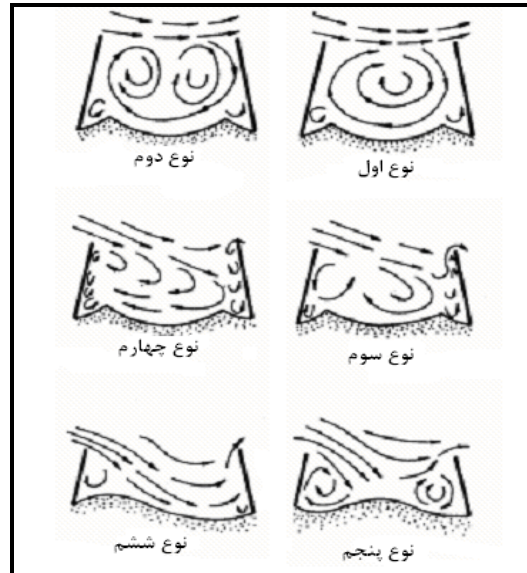
در الگوی نوع اول، جریان اصلی به بیرون از محدوده آبشکن منحرف شده و یک گردابه یا جریان چرخشی بین آبشکن‌ها توسعه می‌یابد. همچنین دو گردابه کوچک نیز در وجه پایین دست آبشکن اول و در وجه بالادست آبشکن دوم توسعه می‌یابد. در این حالت سرعت جریان در بین دو آبشکن به مراتب کم‌تر از سرعت جریان اصلی است. این الگو به دلیل ایجاد یک آبراهه عمیق در جلوی محوطه آبشکن، برای پروژه کشتیرانی مناسب است.

دومین الگوی جریان چرخشی بین آبشکن‌ها با افزایش فاصله بین آنها شکل می‌گیرد. در این الگو علاوه بر گردابه اصلی شکل گرفته در الگوی اول، گرداب ثانویه‌ای نیز شکل می‌گیرد. اما کماکان جریان اصلی به خارج از محدوده آبشکن منحرف می‌شود. در این الگو نیز دو گردابه کوچک شکل می‌گیرد.

با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، الگوی نوع سوم توسعه می‌یابد که در آن جریان اصلی به طرف خود آبشکن هدایت شده و جریان چرخشی قوی‌تری را در پشت آبشکن و تلاطم بیش‌تری را در بالادست و پایین دماغه آن به وجود می‌آورد. در این الگو علاوه بر الگوهای ایجاد شده شبیه الگوی دوم، گردابه‌هایی نیز در وجه بالادست آبشکن دوم شکل می‌گیرد و گردابه‌های اصلی به سمت وجه پایینی آبشکن اول رانده می‌شود. در این الگو جریان اصلی طول بیش‌تری از آبشکن دوم را مورد هجوم قرار می‌دهد. هنگامی که الگوی نوع چهارم شکل می‌گیرد، پایداری ایجاد شده در بالادست آبشکن از بین می‌رود و یک جریان برگشتی قوی بین آبشکن‌ها به وجود می‌آید. در این الگو گردابه‌های کوچک در وجه پایینی آبشکن اول و وجه بالایی آبشکن دوم شکل می‌گیرد.

در پنجمین الگوی جریان چرخشی، جریانی که در اثر آبشکن بالادست منحرف شده، در محوطه آبشکن به طرف ساحل هدایت می‌شود. در این الگو جریان‌های چرخشی ثانویه بزرگ‌تری در وجه پایینی آبشکن اول و وجه بالایی آبشکن دوم ایجاد می‌شوند. با افزایش فاصله، ششمین

نوع الگوی جریان ایجاد می‌شود. در این الگو، حفاظت دیواره توسط جریان‌های چرخشی پایین دست متوقف شده و جریان مستقیماً به دیواره برخورد می‌کند.



شکل ۵-۵- انواع الگوی جریان چرخشی بین آبشکن‌ها [۶۴]

### ۵-۳- تغییرات زمانی آبشستگی

فرآیند آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌ها نیز به چهار مرحله ابتدایی، توسعه، تثبیت و تعادل تقسیم می‌شود. برای به دست آوردن تغییرات زمانی عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها ( $b/y_1 > 1$ )، عرض تکیه‌گاه و  $y_1$  عمق جریان بالادست تکیه‌گاه می‌باشد) می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود که برای تمامی مراحل فرآیند آبشستگی معتبر است [۳۸]:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = 1 - e^{-\ln\left(1 - \frac{y}{y_s}\right) \left(\frac{t}{t_1}\right)^{\gamma}} \quad (1-5)$$

که در این رابطه:

$y_1$ : عمق جریان در بالادست

$t$ : زمان بر حسب ثانیه

$t_1$ : زمان مشخصه هنگامی که  $y_{s,t} = y_1$  بر حسب ثانیه است

$y_{s,t}$ : عمق آبشستگی در زمان  $t$

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی

$\gamma$ : ضریب ثابت برابر  $0.4$  می‌باشد.

تغییرات عمق آبشستگی در مرحله توسعه آبشستگی (زمانیکه  $t < t_1$ ) توسط بروسرز (۱۹۶۶) به صورت زیر ارائه شده است [۳۸]:

$$\frac{y_{s,t}}{y_1} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^{\gamma} \quad (2-5)$$

براساس آزمایش‌های متعدد، رابطه زیر برای زمان مشخصه  $t_1$  به دست آمده است [۳۸]:

$$t_1 = \frac{Ky_1^2(s-1)^{1.7}}{(\alpha u - u_c)^{4.3}} \quad (3-5)$$

که در این رابطه:

$K = 330 \text{ hours } m^{2.3} / s^{4.3}$  و  $t_1$  زمان مشخصه بر حسب ساعت

$u_c$ : سرعت بحرانی آستانه حرکت (m/s)

$Q/A$ : سرعت متوسط (m/s)،  $Q$  بده جریان ( $m^3/s$ ) و  $A$  سطح مقطع جریان ( $m^2$ ) می‌باشد.

$\alpha$ : ضریب وابسته به سرعت جریان و شدت آشفستگی

$s$ : چگالی نسبی مصالح ( $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ )،  $\rho_s$ : چگالی مصالح و  $\rho$ : چگالی آب می‌باشد.

برای تکیه‌گاه‌ها، پارامتر  $\alpha$  بستگی به نسبت تنگ‌شدگی مقطع دارد. مقادیر  $\alpha$  توسط وان دروال (۱۹۹۱) برای تکیه‌گاه‌های با دیوار قائم و تکیه‌گاه‌های باله‌ای در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۵-۱- پارامتر  $\alpha$  برای تکیه‌گاه‌های با دیوار قائم و باله‌ای [38]

$\alpha$	$b/y_1$	نوع تکیه‌گاه
۴-۹	۱-۷/۵	تکیه‌گاه‌های با دیوار قائم
۲-۷	۱-۳	تکیه‌گاه‌های باله‌ای

#### ۴-۵- تخمین حداکثر عمق آبستنگی

روابط نیمه تجربی متعددی برای تخمین عمق آبستنگی در تکیه‌گاه‌ها توسط محققین مختلف ارائه شده است.

انگلیس (۱۹۲۹) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبستنگی در تکیه‌گاه پل ارائه نمود:

$$y_s + y_1 = 2.32 \left( \frac{q \frac{2}{3}}{b} \right)^{0.78} \quad (4-5)$$

که در این رابطه:

$b$ : عرض تکیه‌گاه (بر حسب متر)

$y_1$ : عمق جریان بالادست تکیه‌گاه (بر حسب متر)

$q$ : بده واحد عرض در بالادست تکیه‌گاه ( $m^2/s$ )

$y_s$ : حداکثر عمق آبستنگی (بر حسب متر)

احمد (۱۹۵۳) براساس تجزیه آزمایشات متعدد، رابطه زیر را برای تخمین عمق آبستنگی به دست آورد [۳۸]:

$$y_s + y = K_A K'_A [q/(1-m)]^{2/3} \quad (5-5)$$

که در این رابطه:

$q$ : بده بالادست در واحد عرض ( $m^2/s$ )

$m: b/B$ , عرض تکیه‌گاه و  $B$  عرض رودخانه

$K'_A: 2.14g^{-1/3} s^{2/3} (\approx 1m^{-1/3} s^{2/3})$  و  $g = 9.81 m^2/s$  شتاب جاذبه

$K_A$ : ضریب تصحیح که به صورت زیر تعریف می‌گردد (جدول ۲-۵):

$$K_A = 2K_p K_s K_\theta K_\eta \quad (۶-۵)$$

$K_p$ : ضریب تصحیح اثر قوس آبراهه

$K_s$ : ضریب تصحیح اثر شکل سازه

$K_\theta$ : ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان با تکیه‌گاه (زاویه تکیه‌گاه با ساحل پایین‌دست)

$K_\eta$ : ضریب تصحیح اثر تخلخل سازه

جدول ۲-۵- ضرایب تصحیح رابطه احمد

$K_\theta$	زاویه برخورد جریان (درجه)	$K_p$	موقعیت سازه در قوس
۰/۸۰	۳۰	۱/۰۰	آبراهه مستقیم
۰/۹۰	۴۵	۱/۱۰	قوس خارجی
۰/۹۵	۶۰	۰/۸۵	قوس داخلی
۱/۰۰	۹۰	۱/۴۰	پایین‌دست قوس خارجی قوس تند
۱/۰۵	۱۲۰		
۱/۱۰	۱۵۰	۱/۱۰	قوس ملایم
$K_\eta$	تخلخل سازه	$K_s$	شکل سازه
۱/۰	۲۰٪	۱/۰۰	تکیه‌گاه دیواره قائم
۰/۹	۵۰٪ (با شیب 1V:2H)	۰/۸۵	تکیه‌گاه با دیواره شیبدار با شیب‌های ۴۵ درجه
۰/۶	۵۰٪ (با شیب 1V:3.5H)		

براساس مطالعات لیپو و همکاران (۱۹۶۱) روی تکیه‌گاه‌های با دیواره قائم و دیواره شیبدار (سازه‌های خط جریانی)، حداکثر عمق

آبشستگی به صورت زیر ارائه گردید:

$$y_s = K_L y_1 (b/y_1)^{0.4} Fr_1^{1/3} \quad (۷-۵)$$

که در این رابطه:

$Fr_1$ : عدد فرود بالادست ( $Fr = u/\sqrt{gy_1}$ ),  $u$ : سرعت متوسط جریان در بالادست ( $m/s$ ) و  $K_L$ : ضریبی ثابت است (برای

تکیه‌گاه‌های خط جریانی  $K_L = 1.1$  و برای تکیه‌گاه‌های دماغه تیز  $K_L = 2.15$ ).

ملویل و کولمن (۲۰۰۰) رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌های پل ارائه نمود [۴۹]:

$$y_s = K_{yL} K_I K_d K_s^* K_\theta^* \quad (۸-۵)$$

ضرایب رابطه فوق در جدول (۳-۵) معرفی شده‌اند.

جدول ۵-۳- معرفی ضرایب رابطه ملویل (۲۰۰۰) [۴۹]

روش محاسبه								تعریف	ضریب
$L/y_1 < 1$		$K_{yL} = 2.4L$						ضریب نسبت عمق جریان به اندازه طول تکیه‌گاه	$K_{yL}$
$1 < L/y_1 < 25$		$K_{yL} = 2\sqrt{y_1 L}$							
$L/y_1 > 25$		$K_{yL} = 10y_1$							
$\frac{u - (u_a - u_c)}{u_c} < 1$		$K_I = \frac{u - (u_a - u_c)}{u_c}$						ضریب شدت جریان	$K_I$
$\frac{u - (u_a - u_c)}{u_c} \geq 1$		$K_I = 1$							
$\frac{L}{d_{50}} \leq 25$		$K_d = 0.57 \log(2.24 \frac{L}{d_{50}})$						ضریب اندازه ذرات	$K_d$
$\frac{L}{d_{50}} > 25$		$K_d = 1$							
$K_s$		شکل تکیه‌گاه						ضریب شکل	$K_s$
1.0		دیواره قائم							
0.75		دیوار باله‌ای							
0.6		دیواره شیبدار 0.5H:1V							
0.5		دیواره شیبدار 1H:1V							
0.45		دیواره شیبدار 1.5H:1V							
$\frac{L}{y} \leq 10$		$K_s^* = K_s$						$K_s^*$	تدقیق شده $K_s$
$10 < \frac{L}{y} < 25$		$K_s^* = K_s + 0.667(1 - K_s)(0.1 \frac{L}{y_1} - 1)$							
$\frac{L}{y} \geq 25$		$K_s^* = 1$							
$\theta(^{\circ})$	30	45	60	90	120	135	150	ضریب راستای برخورد جریان با تکیه‌گاه	$K_{\theta}$
$K_{\theta}$	0.90	0.95	0.98	1.0	1.05	1.07	1.08		
$\frac{L}{y_1} \geq 3$		$K_{\theta}^* = K_{\theta}$						$K_{\theta}^*$	تدقیق شده $K_{\theta}$
$1 < \frac{L}{y_1} < 3$		$K_{\theta}^* = K_{\theta} + (1 - K_{\theta})(1.5 - 0.5 \frac{L}{y_1})$							
$\frac{L}{y_1} \leq 1$		$K_{\theta}^* = 1$							

در جدول فوق:

L: طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان

 $y_1$ : عمق جریان بالادست تکیه‌گاه $d_{50}$ : اندازه متوسط ذرات بستر

u: سرعت متوسط جریان

 $u_c$ : سرعت بحرانی در آستانه حرکت $u_a = u$  برای مصالح یکنواخت و  $u_a = u_c$  برای مصالح غیریکنواخت



$\theta$ : زاویه برخورد جریان با تکیه‌گاه (زاویه تکیه‌گاه با ساحل پایین‌دست) می‌باشد.  
برخی از روابط ارائه شده جهت محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در جداول (۴-۵) و (۵-۵) ارائه شده است.

جدول ۴-۵- برخی از روابط ارائه شده برای حداکثر عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌های بسته [۴۹]

مشخصات	معادله	محقق
$d_{50}$ بر حسب میلی‌متر و $q$ بده واحد عرض ( $m^2/s$ )	$y_s + y_1 = 2.75 \left( \frac{2.5q^2}{d_{50}^{0.318}} \right)^{0.333}$ $0.1 \leq d_{50} \leq 200mm$	Neill (1973), (1980)
$\left( \frac{b}{y_1} > 25 \right)$	$\frac{y_s}{y_1} = 4Fr_1^{0.33}$	Richardson (1975)
$F_0 = \frac{\rho u^2}{\Delta\gamma_s d_{50}}$ , $\Delta\gamma_s = g(\rho_s - \rho)$	$\frac{d_s + y_1}{y_1} = 3.50(F_0)^{0.75} \left( \frac{d_{50}}{y_1} \right)^{0.25} \left( \frac{L}{y_1} \right)^{0.29}$	Lim et al. (1992)
$Q$ : بده کل و $Q_0$ : بده قسمتی از جریان که از مقطعی معادل عرض باز شدگی عبور می‌کند.	$\frac{y_s}{y_1} = 7.70 \left[ \frac{Fr_1}{MFr_c} - 0.35 \right]$ $Fr_c$ : عدد فرود بحرانی در آستانه حرکت $Fr_1$ : عدد فرود در سیلابدشت، $M = Q_0 / Q$	Sturm et al. (1994)
$m = b/B$ , $B$ عرض رودخانه، ضریب $K_B$ در جدول (۶-۵) ارائه شده است.	$y_s = y_1 \left[ (1 - m)^{-2/3} - 1 \right] + K_B b \tanh \left( \frac{y_1}{b} \right)$ for $u/u_c > 1$	Hoffman (1995)

جدول ۵-۵- برخی از روابط ارائه شده برای حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن‌های باز [۶۴]

مشخصات	معادله	محقق
$d_{50} = 0.14mm$ $u$ : سرعت متوسط جریان $R_b$ : درصد بازشدگی آبشکن	$y_s = 50R_b^{1.5} \frac{u^2}{2g}$	Orlov (1951)
$k_2 = 1.75/d_{50}$ بستر صلب: $k_1 = 12.4$ بستر متحرک: $k_1 = 5$	$y_s = k_2 \Delta h$ $\Delta h = k_1 \frac{L}{B} R_b^{1/2} \frac{u^2}{2g}$	Altunin et al (1962)
$D$ و $S_d$ : به ترتیب قطر شمع‌ها و فاصله بین شمع‌هاست $C_s$ : غلظت رسوبات معلق	$y_s + h_0 = k_F \left( \frac{k_{qc} q}{3.7k_p d_{90}^{0.25}} \right)^{0.8}$ $k_F = (1 + \xi)^{0.25}$ , $k_{qc} = 1 + \xi^{0.50}$ $k_p = \sqrt{1 + 3c_s^{2/3}}$ , $\xi = k_v^2 - 1$ $k_v \approx 1.1 \left[ \left( 1.5 \frac{S_d}{D} + 1 \right)^{-2} + \left( 0.5 \frac{S_d}{D} + 1 \right)^{-2} \right] + 1$	Mukhmedov (1971)

جدول ۵-۶- ضریب  $K_B$  در رابطه هافمن (۱۹۹۵) [۴۹]

$K_B$	$\theta$ (درجه)	$b/L$	نوع
۳	-	-	تکیه‌گاه با دیواره قائم
۰/۷۵	۴۵	۰/۲	تکیه‌گاه دیواره باله‌ای (خط جریانی)
۱/۲۵	۴۵-۳۵	۰/۳	
۱/۵	۳۰	۱/۵-۰/۵	تکیه‌گاه دیواره باله‌ای (دماغه تیز)
۲	۳۰	۲/۵-۱/۵	
۰/۷۵	-	۰/۲	تکیه‌گاه با دیواره شیبدار 1.5H:1V
۱	-	۰/۲	تکیه‌گاه با دیواره شیبدار 1H:1V
۱	۴۵	-	تکیه‌گاه مثلثی شکل
۲/۲۵	-	۵-۳	تکیه‌گاه با دماغه نیم دایره
۳	-	>۵	

در جدول (۵-۶)،  $\theta$ : زاویه برخورد جریان،  $L$ : طول تکیه‌گاه عمود بر جهت جریان و  $b$  عرض تکیه‌گاه و  $K_B = \frac{S_d}{S_d + D}$  است.

### ۵-۵- مقایسه روابط ارائه شده

برای مقایسه و ارزیابی روابط ارائه شده نیاز به داده‌های میدانی و آزمایشگاهی می‌باشد. اما با توجه به فقدان داده‌های میدانی از داده‌های به‌دست آمده در آزمایشگاه استفاده شده است. مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده توسط محققین مختلف، شامل ۱۷ سری مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت و با استفاده از آنها روابط ارائه شده توسط محققین مختلف مقایسه و مشاهده گردید که روابط لیم (۱۹۹۲)، نیل (۱۸۷۳ و ۱۹۸۰)، احمد (۱۹۵۳)، لیو (۱۹۶۱) و هافمن و بروسرز (۱۹۹۵) نتایج بهتری از بقیه روابط داشتند [۱۶].

در نهایت لازم به ذکر است که اکثر روابط ارائه شده بر مبنای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بوده و تعداد بسیار کمی از آنها با استفاده از داده‌های میدانی صحت‌سنجی شده‌اند. بدیهی است که با مقایسه نتایج به‌دست آمده از روابط فوق و قضاوت مهندسی می‌توان مقدار حداکثر عمق آبخستگی را تخمین زد.

### ۵-۵-۱- مثال

یک تکیه‌گاه با دیواره شیبدار 1H:1V در رودخانه‌ای عریض ساخته شده است. سرعت متوسط جریان  $u = 1 \text{ m/s}$  سرعت بحرانی  $u_c = 0.8 \text{ m/s}$ ، عمق جریان  $y = 5 \text{ m}$ ، قطر متوسط ذرات رسوب  $d_{50} = 8 \text{ mm}$  با دانه‌بندی غیریکنواخت، زاویه قرارگیری تکیه‌گاه نسبت به پایین دست  $\theta = 50^\circ$  و طول تصویر شده تکیه‌گاه در جهت عمود بر جریان  $L = 50 \text{ m}$  می‌باشد. حداکثر عمق آبخستگی را محاسبه نمایید.

با استفاده از روش ملویل و کلمن (۲۰۰۰) داریم:

$$y_s = K_{yL} K_I K_d K_s^* K_\theta^*$$

$$\frac{L}{y_1} = \frac{50}{5} = 10 \Rightarrow 1 < \frac{L}{y_1} < 25 \rightarrow K_{yL} = 2\sqrt{y_1 L} = 2\sqrt{5 \times 50} = 31.6$$

برای مصالح یکنواخت  $u_a = u_c$ ، بنابراین:

$$\rightarrow K_I = 1 \quad \frac{u - (u_a - u_c)}{u_c} = \frac{1 - (0.8 - 0.8)}{0.8} = 1.25 > 1$$

$$\frac{L}{d_{50}} = \frac{50}{0.008} = 6250 > 25 \rightarrow K_d = 1$$

برای تکیه‌گاه با دیواره شیبدار 1V:1H و زاویه برخورد جریان برابر  $\theta = 50^\circ$  داریم:

$$\frac{L}{y_1} \leq 10 \rightarrow K_s^* = K_s = 0.5$$

$$\frac{L}{y_1} \geq 3 \rightarrow K_\theta^* = K_\theta = 0.95$$

با جایگذاری مقادیر فوق در رابطه (۵-۸)، حداکثر عمق آبستتگی محاسبه خواهد شد:

$$y_s = 31.6 \times 0.5 \times 0.95 = 15\text{m}$$

روشن است که روابط مختلف، جواب‌های متفاوتی دارند و نظر به این که نمی‌توان رابطه خاصی برای شرایط مختلف توصیه کرد،

انتخاب رابطه مناسب با توجه به اهمیت پروژه و قضاوت مهندسی صورت می‌گیرد.



## فصل ۶

---

---

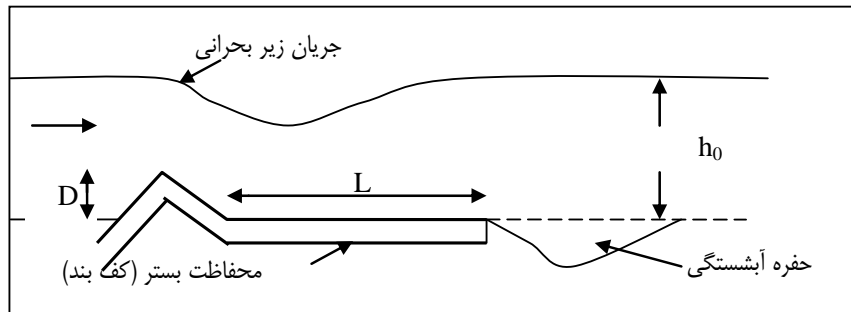
**آبشستگی پایین دست تثبیت کننده‌های**

**بستر (آستانه)**

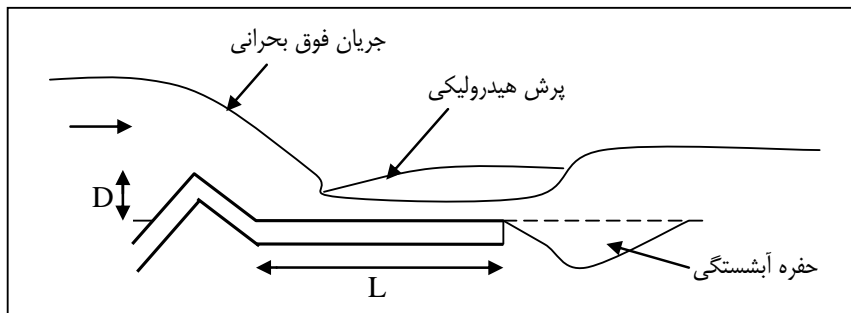


## ۱-۶- کلیات

آستانه ممکن است به عنوان بخشی از یک طرح نگهداری تراز آب یا کنترل تراز بستر در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. آستانه در عرض رودخانه معمولاً به گونه‌ای ساخته می‌شود که تراز تاج آن با تراز بستر تقریباً یکسان یا بالاتر و کف بستر در بالادست و پایین دست سازه تقریباً برابر باشد. این سازه ممکن است از مصالح سنگی، شمع کوبی یا سپری، بتنی، گابیون یا توری سنگی و یا به صورت ترکیبی از آنها ساخته شود. شکل‌های (۱-۶) و (۲-۶) نمونه‌ای از دو نوع آستانه با پوشش افقی بستر و آبشستگی پایین دست آنها را نشان می‌دهد [۳۸].

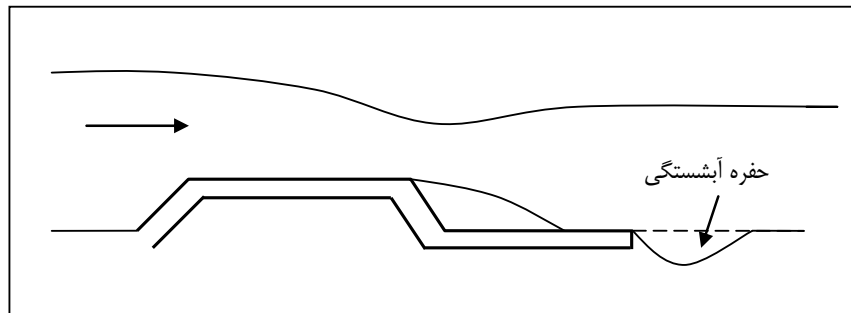


الف- جریان زیر بحرانی



ب- جریان فوق بحرانی

شکل ۱-۶- جریان روی آستانه و آبشستگی پایین دست آستانه با تاج کوتاه

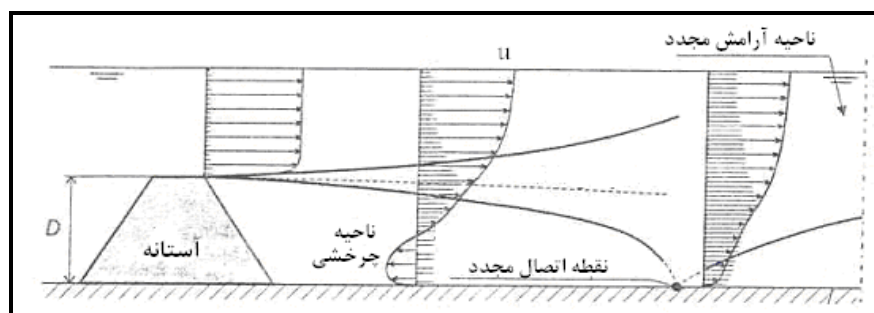


شکل ۲-۶- جریان روی آستانه و آبشستگی پایین دست آستانه با تاج پهن

## ۶-۲- الگوی جریان

نمونه‌ای از الگوی دو بعدی جریان در پایین دست یک آستانه هنگامی که جریان روی آستانه زیر بحرانی باشد، در شکل (۶-۳) نشان داده شده است. پایین دست آستانه و در حفرة آبشستگی، جدایی جریان (لایه برشی جداشده) و یک لایه اختلاطی صفحه‌ای<sup>۱</sup> پدید می‌آید. در ابتدا محور لایه اختلاطی به خاطر تاثیر بستر اندکی خمیده است. انحنای آن در جهت پایین دست به خصوص در نزدیکی نقطه اتصال مجدد<sup>۲</sup> (طول نقطه اتصال مجدد، تقریباً ۶ برابر ارتفاع آستانه می‌باشد) افزایش یافته و یک جریان برگشتی مخالف جهت جریان اصلی توسعه می‌یابد. در پایین دست آستانه گردابه‌های عمودی به وقوع می‌پیوندند و مصالح بستر توسط جریان بالارونده گردابه بلند شده و به کناره‌ها پرتاب می‌شوند. شدت این گردابه‌ها و آبشستگی ناشی از آن ممکن است به حدی برسد که پایداری سازه به خطر بیفتد مگر آن که از روش‌های حفاظتی استفاده شده باشد.

هنگامی که عرض جریان در بالادست و پایین دست آستانه برابر باشد، گرادیان‌های سرعت در جهت جانبی به طور نسبی کوچک و در نتیجه جریان درون حفرة آبشستگی تقریباً دو بعدی است. اما هنگامی که عرض جریان پایین دست آستانه دارای بازشدگی باشد، جریان درون حفرة آبشستگی سه بعدی است.



شکل ۶-۳- الگوی جریان پایین دست آستانه [۳۸]

## ۶-۳- تغییرات زمانی عمق آبشستگی

آزمایشات متعددی در شرایط آب زلال توسط موسسه هیدرولیک دلفت هلند (موسسه دلفت ۱۹۷۲ و ۱۹۷۹، باچکو و همکاران ۱۹۸۷) انجام شده است [۱۸ و ۲۴]. براساس نتایج این آزمایشات عمق آبشستگی پایین دست آستانه به صورت تابعی از زمان به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = 1 - e^{-\ln\left(1 - \frac{y_1}{y_s}\right) \left(\frac{t}{t_1}\right)^Y} \quad (1-6)$$

که در این رابطه:

t: زمان (ثانیه)

- 1- Separated Shear Layer
- 2- Simple Plane Mixing Layer
- 3- Reattachment Point



$t_1$ : زمان مشخصه که در آن  $y_{s,t} = y_1$  باشد (ثانيه)

$y_{s,t}$ : عمق آبستگي در زمان  $t$  (متر)

$y_s$ : حداکثر عمق آبستگي از سطح اوليه بستر (متر)

$y_1$ : عمق اوليه جريان (متر)

$\gamma$ : مقدار ثابتي که تابع شرايط جريان است

در مرحله توسعه آبستگي، هنگامي که  $t$  کوچک‌تر از  $t_1$  است، معادله (۱-۶) به شکل زير خلاصه مي‌شود:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^\gamma \quad (2-6)$$

بروسرز (۱۹۶۶) براساس آزمايشات گسترده با حداکثر عمق آبستگي در حدود  $0.5y_1$  مقدار متوسط ضريب  $\gamma$  را در آبستگي دو بعدی، حدود  $0.38$  گزارش نمود [۱۷]. تحقيقات موسوني و شاپمن (۱۹۶۸) و ديتز (۱۹۶۹) نشان داد ضريب  $\gamma$  در محدوده  $0.27$  تا  $0.40$  قرار دارد [۲۶ و ۵۲] درحالي که مطالعات وندرمولن و وينجي (۱۹۷۵) محدوده  $0.4$  تا  $0.8$  را براي ضريب  $\gamma$  نشان داد [۷۷] (جدول ۱-۶).

جدول ۱-۶ - ضريب  $\gamma$  [۷۷]

شرایط جريان	$\gamma$	محقق
دو بعدی	$0.38$	Breusers (1966)
دو بعدی	$0.35-0.27$	Mosonyi & Schoppmann (1968)
دو بعدی	$0.4-0.34$	Dietz (1969)
سه بعدی	$0.8-0.4$	Vander Meulen & Vinje (1975)

نتايج حدود  $110$  آزمايش از تحقيقات وندرمولن و وينج (۱۹۷۵) روی حداکثر عمق آبستگي و مقادير مختلف ارتفاع نسبي آستانه ( $0.6$ ،  $0.3$  و  $0$ )،  $D/h_0 = 0$ ،  $D$  ارتفاع آستانه می‌باشد) نشان داد که برای عمق‌های آبستگي کوچک، اگر ضريب  $\gamma$  بزرگ‌تر از  $0.8$  استفاده شود، تابع نمایی معادله (۲-۶) نتايج خوبی را نشان می‌دهد. در مرحله ابتدایی و توسعه آبستگي، اگر مقدار  $\gamma$  برابر  $0.4$  در نظر گرفته شود، مقدار حداکثر عمق آبستگي به‌صورت محافظه کارانه به‌دست می‌آید [۷۷].

براساس آزمايشات متعدد، زمان مشخصه  $t_1$  به‌صورت زير بيان می‌شود [۱۶]:

$$t_1 = \frac{Ky_1^2 (s-1)^{1.7}}{(\alpha u_0 - u_c)^{4.3}} \quad (3-6)$$

که در اين رابطه:

$t_1$ : زمان مشخصه بر حسب ساعت و  $K = 330 \text{ hours m}^{2.3} / \text{s}^{4.3}$

$\alpha$ : ضريبي وابسته به سرعت جريان و شدت آشفتگي

$s$ : چگالي نسبي ( $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ )

معادله (۳-۶) براساس اعداد بدون بعد فرود و رينولدز به‌صورت زير نیز ارائه می‌شود [۱۶]:

$$t_1 = \frac{y_1}{u_0} \frac{K_1 (s-1)^a}{\alpha_u^b Fr_1^c Re^d} \quad (4-6)$$

که در این رابطه:

$$Fr_1: \text{ عدد فرود } (Fr_1 = u / \sqrt{gy_1})$$

$$K_1: \text{ برحسب } (m^{2/3}/s^{3/3}) \text{ برحسب } (K) \quad K_1 = K / (g^{1.43} v^{0.43})$$

$$Re: \text{ عدد رینولدز } (Re = uy_1 / \nu)$$

$\alpha_u$ : ضریبی که به صورت  $\alpha_u = \alpha - u_c / u$  تعیین می‌شود

دیتز (۱۹۶۹) تحقیقات گسترده‌ای روی آبشستگی دو بعدی پایین‌دست بسترهای افقی و آستانه‌های کوتاه انجام داد. در این آزمایشات چند نوع مصالح غیرچسبنده (ماسه، زغال سنگ، پلی استرن) استفاده شد. عمق اولیه جریان در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۱۲۵ متغیر بود. مقادیر ارائه شده توسط دیتز برای ضریب تجربی  $K_1$  و توان‌های رابطه (۴-۶) در جدول (۲-۶) آورده شده است. در این جدول نتایج مطالعات سایر محققین برای مقادیر فوق نیز آورده شده است.

جدول ۲-۶- ضرایب تجربی و توان‌ها در معادله ۴-۶ [۱۶]

د	c	b	a	$K_1/10^6$	محقق
۰/۳	۲/۷	۴	۱/۶۲	۰/۹۴	Breusers (1966)
۰/۵	۲/۵	۴	۱/۵	۹/۹۶	Dietz (1969)
۰/۴۳	۲/۸۷	۴/۳	۱/۷	۱۲/۹	Van der Meulen & Vinje (1975)
۰/۴۳	۲/۸۷	۴/۳	۱/۷	۱۷/۱	de Graauw & Pilarczyk (1981)

روابط تجربی متعددی برای ضریب  $\alpha$  براساس آزمایشات انجام شده روی آبشستگی دو بعدی و سه بعدی ارائه شده است. طبق مطالعات بروسرز (۱۹۶۶)، ضریب  $\alpha$  به سرعت جریان و شدت آشفتگی بستگی دارد. بروسرز ضریب  $\alpha$  را به صورت زیر تعریف نمود [۱۷]:

$$\alpha = (1 + 3r_0)c_v \quad (5-6)$$

که در این رابطه  $r_0$ : شدت آشفتگی نسبی و  $c_v$ : ضریب تصحیح نیمرخ سرعت ( $c_v \approx 1$ ) می‌باشد.

جویرسن و ویلینگ (۱۹۸۹) برای شرایط جریان هیدرولیکی زیر، ضریب  $\alpha$  را به صورت زیر بیان نمودند [۴۱]:

$$\alpha = 1.5 + 5r_0 \quad (6-6)$$

یک رابطه کلی‌تر برای ضریب  $\alpha$  توسط هافمن و بوجی (۱۹۹۳) به صورت زیر ارائه شده است [۳۷]:

$$\alpha = 1.5 + 4.4r_0f_c \quad (7-6)$$

که در این رابطه:

$$f_c: \text{ تابع زبری مربوط به پوشش بستر، } f_c = C/C_0$$

$C$ : ضریب سزی مربوط به پوشش بستر بالادست حفره آبشستگی

$C_0$ : ضریب سزی پایه برابر با  $40m^{0.5}/s$ ، اگر  $C < C_0$  باشد، آنگاه  $f_c = 1$  در نظر گرفته می‌شود.

معادله (۷-۶) مبتنی بر ۲۵ اندازه‌گیری در جریان دو بعدی و سه بعدی برای  $r_0 > 0.05$  می‌باشد.

هافمن و بوجی (۱۹۹۳) با آزمایش روی بستر افقی و برای جریان زیر بحرانی روی آستانه، رابطه زیر را برای شدت آشفستگی نسبی  $r_0$  ارائه کردند [۳۷]:

$$r_0 = \sqrt{0.0225 \left(1 - \frac{D}{y_1}\right)^{-2} \left(\frac{L - 6D}{6.67y_1} + 1\right)^{-1.08} + 1.45 \frac{g}{C^2}} \quad L > 6D \quad (۸-۶)$$

که در این رابطه:

C: ضریب شزی پوشش بستر ( $m^{1/2}/s$ )

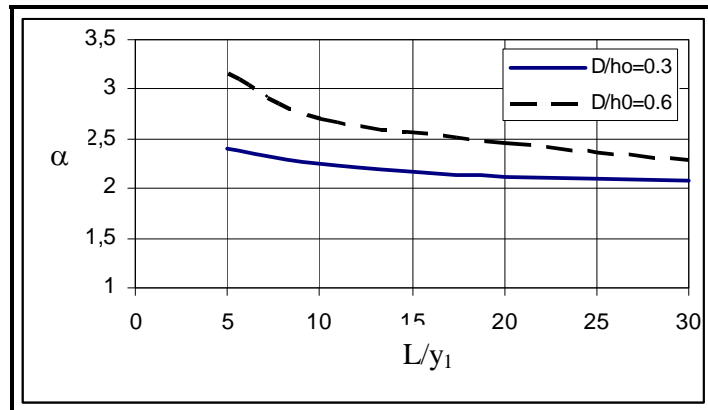
D: ارتفاع آستانه (متر)

g: شتاب ثقل ( $g = 9.81 m^2/s$ )

L: طول حفاظت بستر بر حسب متر ( $L > 6D$ )

اگرچه بعضی مشخصات جریان سه بعدی و پدیده‌های جانبی مانند گردابه‌های عمودی در معادله (۶-۶) در نظر گرفته نشده‌اند، اما این معادله نتایج قابل قبولی برای جریان‌های سه بعدی ارائه می‌دهند.

با ترکیب معادلات (۶-۷) و (۸-۶) ضریب  $\alpha$  به صورت تابعی از شرایط بالادست حفره آبشستگی بیان می‌شود. گراو و پیلازیک (۱۹۸۱) ضریب  $\alpha$  را برای جریان دو بعدی پایین دست آستانه به عنوان تابعی از  $L/y_1$  بیان کردند (شکل ۶-۴). همان گونه که در این شکل مشخص است با افزایش ارتفاع آستانه،  $\alpha$  افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش آبشستگی است. مقدار  $\alpha$  ممکن است با طولانی کردن حفاظت بستر یا با زبرتر کردن بستر کاهش یابد. برای یک بستر صاف از نظر هیدرولیکی،  $\alpha$  به میزان  $0.3$  تا  $0.5$  افزایش می‌یابد. (یعنی به طور متوسط داریم:  $\alpha_{smooth} = \alpha_{rough} + 0.4$ )



شکل ۶-۴ - تغییرات  $\alpha$  بر حسب  $L/y_1$  و  $D/y_1$  [۳۸]

#### ۶-۴ - روابط تخمین حداکثر عمق آبشستگی

دیتز (۱۹۶۰) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی پایین دست آستانه ارائه داد [۲۶].

$$\frac{y_s}{y_1} = \frac{\omega u - u_c}{u_c} \quad (۹-۶)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبخستگی

$u_c$ : سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات

$u_0$ :  $Q/A$ ، سرعت متوسط جریان ( $m/s$ )،  $Q$  بده ( $m^3/s$ ) و  $A$  سطح مقطع جریان ( $m^2$ )

$\omega$ : ضریب آشفستگی

مطالعات دیتز (۱۹۶۹) نشان داد که مقدار متوسط ضریب آشفستگی به صورت  $\omega = 2/3 + 2r_0$  و حداکثر مقدار آن  $\omega = 1 + 3r_0$  می‌باشد

که  $r_0$  شدت نسبی آشفستگی می‌باشد (رابطه ۶-۸). ضریب آشفستگی  $\omega$  توسط پوپوا (۱۹۸۱) به صورت رابطه زیر بیان شد. [۲۶]

$$\omega = 0.87 + 3.25Fr_1 + 0.3r_0 \quad (۱۰-۶)$$

در این رابطه  $Fr_1$  عدد فرود قبل از حفره آبخستگی می‌باشد. مقدار  $\omega$  در محدوده  $۱/۷-۱/۰۵$  قرار دارد. اگر جریان حاوی رسوب

باشد، حداکثر عمق آبخستگی کاهش می‌یابد و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله (۶-۹) محافظه کارانه خواهد بود.

لارسن و همکاران (۱۹۶۶، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۳) مطالعاتی نیز روی آستانه‌های شیبدار سنگ‌فرشی (شکل ۶-۵) انجام دادند و رابطه

زیر را برای محاسبه عمق آبخستگی ناشی از این نوع آستانه ارائه نمودند [۳۹]:

$$\frac{y_s}{y_c} = 4 \left( \frac{y_c}{d_m} \right)^{0.2} - 3 \left( \frac{D_{65}}{y_c} \right)^{0.1} \quad (۱۴-۶)$$

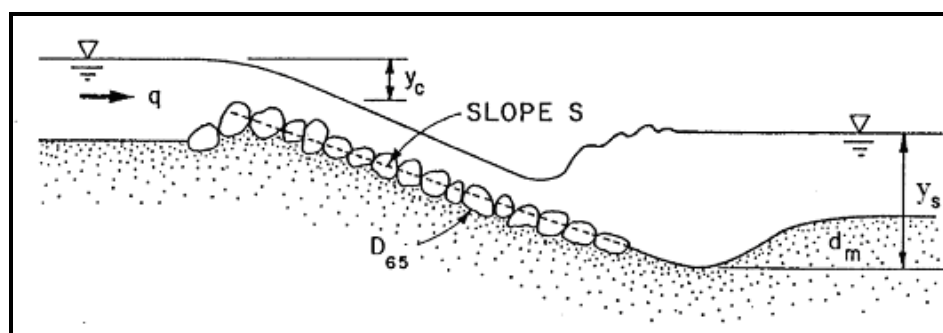
که در این رابطه:

$y_s$ : عمق آبخستگی نسبت به سطح جریان در پایین‌دست بر حسب متر

$y_c$ : عمق بحرانی جریان بر حسب متر

$D_{65}$ : اندازه سنگ آستانه شیبدار بر حسب متر که ۶۵ درصد قطر دانه‌ها از آن ریزتر می‌باشد

$d_m$ : اندازه متوسط ذرات بستر بر حسب متر ( $d_m = d_{50}$ )



شکل ۶-۵- معرفی پارامترهای آبخستگی پایین‌دست آستانه سنگ‌فرشی شیبدار [۳۹]

لارسن و همکاران دریافتند که  $D_{65}$  می‌تواند با  $۲/۸y_c$  تخمین زده شود. هنگامی که شیب آستانه برابر ۲۵٪ (یعنی ۴H:1V) و

$y_c$  در محدوده  $۰/۱۸-۰/۱۲m$  باشد، آستانه‌های سنگ‌فرشی شیبدار پایدار خواهند بود [۳۹].

ویتاکر و جگی (۱۹۸۶) رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبخستگی پایین‌دست آستانه‌های شیبدار سنگ‌فرشی ارائه کردند [۸۰]:

$$\frac{y_s}{y_c} = 1.05 S^{-0.83} \left( \frac{D_{65}}{y_c} \right) - 7.13 \left( \frac{d_m}{y_c} \right) \quad (۱۵-۶)$$

که در این رابطه:

S: شیب آستانه سنگ‌فرشی شیبدار

$D_{65}$ : اندازه سنگ‌های آستانه سنگ‌فرشی شیبدار

### ۶-۴-۱- مثال

در یک رودخانه با سرعت متوسط  $1 \text{ m/s}$  و عمق جریان  $2.5 \text{ m}$  یک آستانه تاج پهن با ارتفاع  $1 \text{ m}$  احداث می‌گردد. طول حفاظت بستر پایین دست آستانه برابر  $L = 50 \text{ m}$  و زبری موثر آن  $k_s = 0.05 \text{ m}$  تخمین زده می‌شود. مشخصات مصالح بستر عبارتند از:  $d_{35} = 1.8 \text{ mm}$ ،  $d_{50} = 2 \text{ mm}$  و  $d_{90} = 3 \text{ mm}$ . زاویه اصطکاک داخلی برابر  $\phi' = 35^\circ$  می‌باشد. دمای متوسط آب  $C = 15^\circ$ ،  $\nu = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ،  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$  و  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد.

الف- شدت آشفته‌گی نسبی در انتهای پوشش بستر چقدر است؟

ب- مقدار  $\alpha$  براساس روش‌های جورینسن و ویلینگ (۱۹۸۹) و هافمن و بوجی (۱۹۹۳) چقدر است؟

ج- زمان مشخصه که در آن حداکثر عمق آبخستگی برابر عمق جریان اولیه است، چقدر است؟

د- حداکثر عمق آبخستگی براساس روش دیتز (۱۹۶۹) چقدر است؟

حل:

الف- شدت آشفته‌گی نسبی در انتهای پوشش بستر:

$$C = \frac{\sqrt{g}}{k} \ln\left(\frac{12y_1}{k_s}\right) = \frac{\sqrt{9.81}}{0.4} \ln\left(\frac{12 \times 2.5}{0.05}\right) = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s} \quad \text{ضریب شزی:}$$

با استفاده از رابطه (۸-۶) برای شدت آشفته‌گی نسبی داریم:

$$r_0 = \sqrt{0.0225 \left(1 - \frac{1}{2.5}\right)^{-2} \left(\frac{50 - 6 \times 1}{6.67 \times 2.5} + 1\right)^{-1.08} + 1.45 \frac{9.81}{50^2}} = 0.15$$

ب- ضریب جریان و آشفته‌گی  $\alpha$ :

$$\alpha = 1.5 + 5r_0 = 1.5 + 5 \times 0.15 = 2.25$$

رابطه جورینسن و ویلینگ (۶-۶):

$$\alpha = 1.5 + \frac{4.4r_0C}{C_o} = 1.5 + \frac{4.4 \times 0.15 \times 50}{40} = 2.33$$

رابطه هافمن و بوجی (۷-۶):

ادامه محاسبات با  $\alpha = 2.3$  انجام می‌شود.

ج- زمان مشخصه  $t_1$

سرعت بحرانی با استفاده از روش شیلدز به صورت زیر به دست می‌آید (روابط ۲-۱۴ و ۲-۱۳):

$$D_* = d_{50} \times \left[ (s-1) \times g / \nu^2 \right]^{1/3} = 200 \times 10^{-3} \times (1.59 \times 9.81 / (1.1 \times 10^{-6})^2)^{1/3} = 46.9$$

$$\theta_c = 0.013 \times D_*^{0.29} = 0.013 \times 46.89^{0.29} = 0.0397 \quad (20 < D_* < 150)$$

با استفاده از رابطه (۲-۲۲) داریم:

$$u_c = 2.5\sqrt{\theta_c(s-1)gd} \ln\left(\frac{12y_1}{k_1}\right)$$

$$u_c = 2.5\sqrt{0.0397 \times 1.59 \times 9.81 \times 200 \times 10^{-3}} \ln(12 \times 2.5 / (3 \times 3 \times 10^{-3})) = 0.71 \text{ m/s}$$

با استفاده از رابطه (۳-۶) داریم:

$$t_1 = \frac{330y_1^2(s-1)^{1.7}}{(\alpha u_0 - u_c)^{4.3}} = \frac{330 \times 2.5^2 \times 1.59^{1.7}}{(2.3 \times 1 - 0.71)^{4.3}} = 617.67 \text{ hours}$$

د- حداکثر عمق آبخستگی: با استفاده از رابطه (۶-۹) داریم:

$$y_s = y_1 \times [\omega \times u_0 - u_c] / u_c = 2.5 \times [0.96 \times 1 - 0.71] / 0.71 = 0.9 \text{ m}$$

$$\omega = \frac{2}{3} + 2 \times r_0 = 0.96$$

بر طبق تحقیقات (۱۹۵۶) حداقل مقدار  $\omega$  برابر است با ۰/۲، با توجه به این فرض مقدار حداکثر عمق حفره‌ی آبخستگی برابر

۰/۹ می‌باشد. اگر رابطه‌ی پوپوا (۱۹۸۱) در نظر گرفته شود مقدار عمق حفره‌ی آبخستگی برابر ۰/۰۳m می‌باشد.

# فصل ۷

---

---

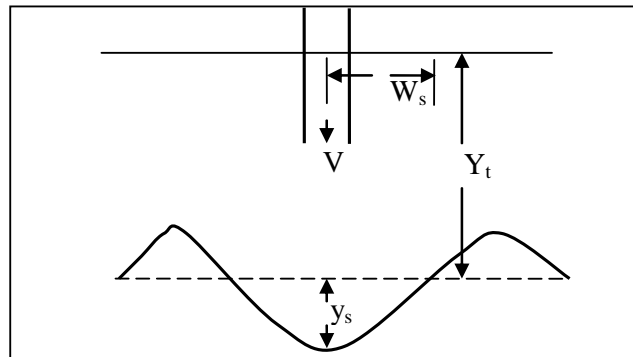
**آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی**



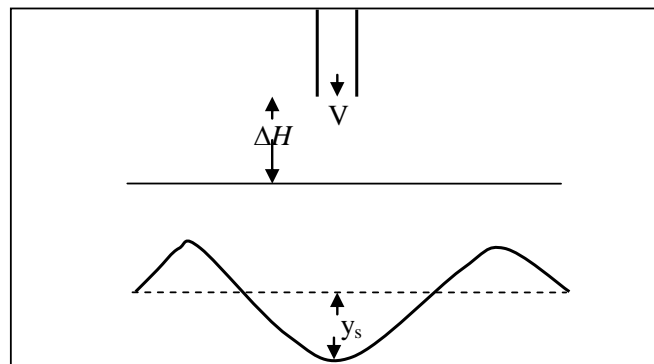


## ۷-۱- کلیات

جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی اغلب به صورت جت می‌باشد که ممکن است موجب تغییرات زیادی در توپوگرافی رودخانه و اطراف این سازه‌ها گردد و خسارت‌های سازه‌ای و زیست محیطی قابل توجهی به همراه داشته باشد. بسته به عمق پایاب، جت ریزشی می‌تواند به صورت آزاد یا مستغرق باشد. هرگاه مقدار عمق پایاب از مقدار ارتفاع ریزش بیش‌تر باشد، جت مستغرق است. شکل (۷-۱) جت عمودی مستغرق و آزاد را نشان می‌دهد. جت‌های ریزشی را می‌توان به دو دسته جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل نیز تقسیم‌بندی نمود. جریان در جت‌های عمودی، به‌طور عمودی با بستر برخورد می‌کند و حفره آبشستگی در جهت طولی و عرضی متقارن است، درحالی‌که در جت‌های ریزشی مایل، جت با زاویه به بستر برخورد می‌نماید و حفره آبشستگی فقط در جهت عرضی متقارن است. در ادامه توضیحات لازم راجع به جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل ارائه می‌شود.



الف - جت عمودی مستغرق



ب- جت عمودی آزاد

شکل ۷-۱- نمای کلی از یک جت عمودی

## ۷-۲- الگوی جریان

الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل متفاوت است که در ادامه به‌طور مجزا به هر یک پرداخته می‌شود.

### ۷-۲-۱- الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی

پس از برخورد جت عمودی به بستر، آبشستگی آغاز شده و ابتدا جت با زاویه حدود ۱۸۰ درجه به اطراف منحرف می‌شود. پس از آن توسعه و افزایش عمق آبشستگی باعث افزایش فاصله برخورد جت با بستر (ارتفاع ریزش جت) شده و جت از مرز حفره آبشستگی تبعیت کرده و با زاویه انحراف کم‌تری به اطراف منحرف می‌شود. در جت عمودی، شکل حفره آبشستگی در پلان متقارن بوده و رسوبات خارج شده از حفره آبشستگی در اطراف حفره ته‌نشین می‌شود.

ادربریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶)، براساس مقادیر پارامتر فرسایش  $E_c$  و پارامتر فشار  $K$  (روابط ۷-۱ و ۷-۲)، جت مستغرق عمودی را به دو دسته جت با انحراف زیاد<sup>۱</sup> (SDJR) و جت با انحراف کم<sup>۲</sup> (WDJR) تقسیم‌بندی کردند [۱۰]. شکل (۷-۳) الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از این دو نوع جت را نشان می‌دهد.

$$E_c = \frac{v \left( \frac{D}{H} \right)}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \quad (7-1)$$

$$K = \left( \frac{V_b}{w} \right)^2 \quad (7-2)$$

که در این رابطه:

$V_b$ : سرعت جت در برخورد با سطح مصالح بستر

$w$ : سرعت سقوط ذرات بستر

$D$ : قطر جت

$V$ : سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه)

$g$ : شتاب جاذبه زمین (متر بر مجذور ثانیه)

$d_{50}$ : قطر متوسط ذرات بستر (متر)

$H$ : ارتفاع ریزش جت (متر)

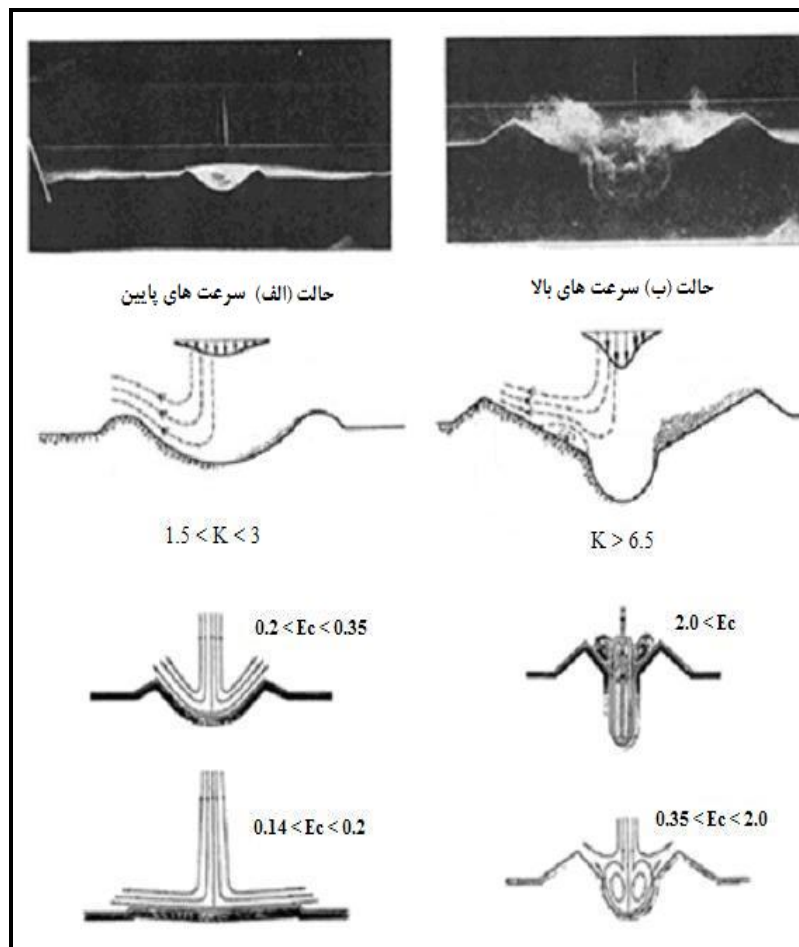
$s$ : چگالی نسبی ( $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ )

$\rho_s$ : چگالی ذرات بستر (کیلوگرم بر متر مکعب)

$\rho$ : چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)

## ۷-۲-۱-۱- جت با انحراف کم

این نوع جت در شرایط  $1.5 < K < 3$  ,  $E_c < 0.35$  ایجاد می‌شود. در این حالت حفره آبشستگی کم عمقی ایجاد می‌شود و جت پس از برخورد به بستر، انحراف کم‌تری (بین ۹۰ و  $90 + \phi$ ) خواهد داشت. در این جا  $\phi$  زاویه استقرار ذرات بستر می‌باشد. جت دیواره‌ای حاصل از انحراف جریان، مسیر حفره را تا تاج برآمدگی اطراف حفره طی می‌کند. جدایی جریان در لبه حفره بر اثر تغییر شکل بستر حاصل می‌شود که البته تاثیری بر آبشستگی داخل حفره ندارد. مواد فرسایش یافته، پس از انحراف جت ته‌نشین شده و به صورت بار بستر در جهت شعاعی به سمت بیرون حمل می‌شوند. شعاع فرسایش  $r_0$  که حداکثر فاصله حمل رسوبات می‌باشد، با گذشت زمان تغییر زیادی نمی‌کند، ولی حداکثر عمق فرسایش با افزایش هر دو پارامتر فشار و زمان فرسایش افزایش می‌یابد تا در نهایت به مقدار تعادل برسد. در این نوع جت، شیب کناره‌های حفره آبشستگی نسبت به  $K$  یا  $E_c$  بسیار حساس بوده و با افزایش این پارامترها مقدار آن افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۲- الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از آن برای جت عمودی [۱۰]

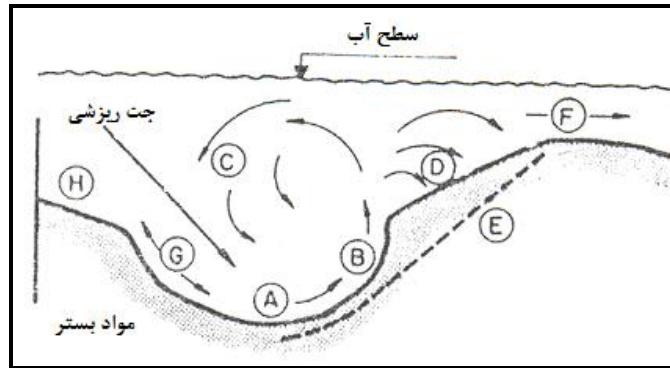
## ۷-۲-۱-۲- جت با انحراف زیاد

حفره آبخستگی ناشی از این نوع جت که دارای یک فرورفتگی عمیق در مرکز است و با یک سطح شیبدار به برآمدگی اطراف حفره وصل می‌شود، در شرایط  $6.5 < K < 14$  ,  $E_c > 0.35$  تشکیل می‌شود. در این حالت، جت با زاویه‌ای بین  $90^\circ + \phi$  و  $180^\circ$  درجه وابسته به  $K$  یا  $E_c$  تغییر جهت می‌دهد. این انحراف جت، مواد فرسایش یافته درون حفره را به صورت معلق به خارج حفره انتقال می‌دهد و در نتیجه ظرفیت انتقال جت در فواصل شعاعی بزرگ‌تر، کاهش یافته و ذرات بر روی کناره‌های داخلی حفره آبخستگی ته‌نشین شده و به تدریج به سمت مرکز حفره سر می‌خورند و دوباره توسط جریان برداشته می‌شوند. در این نوع جت، جریان داخل حفره آبخستگی به صورت دورانی است و ذرات را به صورت معلق در حفره آبخستگی می‌چرخاند و پس از توقف جت، ذرات معلق در حفره ته‌نشین می‌شوند. بنابراین عمق آبخستگی استاتیکی (عمق آبخستگی پس از قطع جریان) کمتر از عمق آبخستگی دینامیکی (عمق آبخستگی در هنگام انجام آزمایش) است. در این حالت شیب اطراف حفره آبخستگی تقریباً برابر با زاویه استقرار ذرات در حالت مستغرق است. در این نوع جت، جدایی جریان در لبه داخلی حفره آبخستگی اتفاق می‌افتد. مواد فرسایش یافته از حفره آبخستگی توسط جت دیواره‌ای به صورت معلق به سمت بیرون حمل شده و در نهایت ته‌نشین می‌شوند.

با افزایش  $K$  یا  $E_c$ ، زاویه انحراف جت افزایش می‌یابد و ممکن است به مقدار  $180^\circ$  درجه نیز برسد. هر چه زاویه جت منحرف شده بیش‌تر شود، قسمت بیش‌تری از مواد فرسایش یافته دوباره به داخل حفره آبخستگی باز می‌گردند و نمی‌توانند خود را از جریان دورانی داخل حفره خارج ساخته و به نرخ فرسایش کمک کنند. تنها بخش کوچکی از ذرات از طریق جریان شعاعی به سمت لبه حفره، حمل شده و ته‌نشین می‌شوند. این روند تا زمانی که تعادل دینامیکی بین جریان و شکل بستر به وجود آید ادامه می‌یابد.

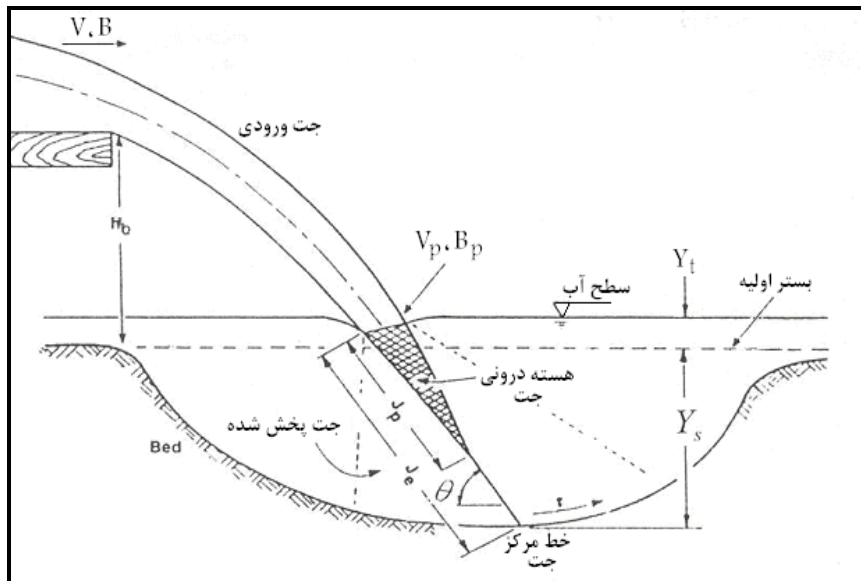
## ۷-۲-۲- الگوی جریان در جت‌های ریزشی مایل

در جت ریزشی مایل نیز فرآیند آبخستگی اولیه خیلی سریع است. شکل (۷-۳) الگوی جریان داخل حفره آبخستگی برای یک جت ریزشی مایل را نشان می‌دهد. در این حالت جت پس از برخورد با بستر، مواد فرسایش یافته را از ته حفره آبخستگی (محدوده A) شسته و همراه خود به سمت پایین دست (محدوده B) انتقال می‌دهد. در این محدوده بخشی از جت به همراه مصالح منحرف شده و تقریباً رو به بالا بلند می‌شود و قسمتی از جریان به سمت بالادست (محدوده C) بر می‌گردد و وارد جریان بالادست می‌شود. رسوبات همراه این جریان به صورت معلق داخل حفره باقی می‌مانند. بقیه جریان به سمت پایین دست منتقل شده و بخشی از مواد فرسایش یافته همراه خود را روی سطح شیبدار در محدوده D ته‌نشین می‌کند و همراه بقیه ذرات به سمت پایین دست (محدوده F) حرکت می‌کند. تراز بستر در محدوده D به طور متناوب افزایش می‌یابد و مواد ته‌نشین شده در این سطح به تدریج سر خورده به داخل حفره اصلی باز می‌گردد. در نتیجه با گذشت زمان، سطح D تغییر یافته و سطح E پدیدار می‌شود. در محدوده G قسمتی از مواد بستر دارای حرکت نوسانی می‌باشند، درحالی که در محدوده H مواد بستر بدون حرکت هستند. روند فوق تا زمانی که میزان فرسایش در محدوده A با نرخ مواد فرستاده شده به پایین دست برابر شود و شرایط تعادل حاصل شود پیوسته تکرار می‌شود. پس از قطع جریان، هر دو سطح بالادست و پایین دست حفره با زاویه قرارگیری مواد بستر  $\phi$ ، به داخل حفره ریزش خواهند کرد.



شکل ۷-۳- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره آبشستگی

هنگامی که جت آب جاری می‌شود، به دلیل اغتشاش داخلی، تنش برشی هوای اطراف آن و تاثیر کشش سطحی رو به انهدام می‌رود. حتی ممکن است جت به صورت اسپری متشکل از ذرات آب با قطره های گوناگون درآید. زاویه برخورد جت با سطح آب  $\theta$  در فرآیند آبشستگی به خصوص شکل حفره تاثیر می گذارد. مطابق شکل (۷-۴) جت پس از برخورد به سطح پایاب، به دو ناحیه مجزا تقسیم می‌شود. قسمت اول دارای یک هسته درونی به طول  $J_p$  از سطح پایاب است که ضخامت آن در جهت جت کاهش می‌یابد. در این ناحیه سرعت جت در طول خط مرکزی جت تقریباً ثابت می ماند و مقدار آن برابر با سرعت اولیه جت خروجی یعنی  $V$  در نظر گرفته می‌شود. در خارج از این ناحیه، سرعت جت به دلیل پخشیدگی کم می‌شود و انرژی آن در جهت جت کاهش چشمگیری دارد.



شکل ۷-۴- شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل [۳۷]

### ۷-۳- تغییرات زمانی عمق آبخستگی

کلارک (۱۹۶۲) مطالعاتی روی جت‌های مستغرق عمودی دایره‌ای انجام داد [۲۰]. ایشان بیان نمود که عمق آبخستگی دینامیکی  $y_{sd}$  از عمق آبخستگی استاتیکی  $y_{ss}$  بزرگ‌تر است. همچنین حدود ۷۰ درصد عمق نهایی حفره آبخستگی در زمان‌های اولیه تشکیل می‌شود. کلارک برای تغییرات زمانی آبخستگی ناشی از جت عمودی دایره‌ای شکل و مستغرق روابط زیر را ارائه داد [۲۰]:

$$y_{s,t} = (0.21 \pm 0.003) D_C \quad (۳-۷)$$

$$\frac{D_C}{D} = 5.5 \left( \frac{V}{\sqrt{gD}} \right)^{0.43} \left( \frac{V}{\omega_s} \right)^{0.05} \left( \frac{gt}{\omega_s} \right)^{0.05} \quad (۴-۷)$$

که در این روابط:

$D$ : قطر جت استوانه‌ای (متر)

$D_C$ : فاصله‌ی بین قله‌های ایجاد شده در دو طرف حفره‌ی آبخستگی (متر)

$y_{s,t}$ : عمق حفره‌ی آبخستگی اندازه‌گیری شده از سطح اولیه بستر در زمان  $t$  (متر)

$V$ : سرعت جت خروجی از روزنه (متر بر ثانیه)

$\omega_s$ : سرعت سقوط ذرات بستر (متر بر ثانیه)

$t$ : زمان (ثانیه) و  $g$ : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) می‌باشد.

هانتر و رویز (۱۹۵۰) مطالعاتی روی جت‌های ریزشی مایل انجام دادند. براساس نظریه هانتر و رویز آبخستگی به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته می‌شود و هیچ‌گاه به تعادل واقعی نخواهد رسید. ایشان عمق آبخستگی را به عنوان تابعی از زمان به صورت زیر ارائه کرد [۸۱].

$$y_s = \frac{1.9H^{0.35} q^{0.7}}{g^{0.35} d_{95}^{0.2}} \left[ 1 - \exp(0.55t^{0.2}) \right] \quad (۵-۷)$$

که در این رابطه  $t$ : زمان آبخستگی برحسب ثانیه،  $q$ : بده بر واحد عرض،  $H$ : ارتفاع ریزش و  $d$  قطر مصالح بستر می‌باشد.

### ۷-۴- روابط تخمین ابعاد حفره آبخستگی ناشی از جت‌های ریزشی

آبخستگی در جت‌های ریزشی در حالت مستغرق و آزاد اندکی متفاوت است، زیرا در جت‌های آزاد، سیال مقداری از مسیر را در هوا و مقداری را در آب طی می‌کند تا به سطح بستر برسد، ولی در جت‌های مستغرق، سیال تمام مسیر را در آب طی می‌کند. این مساله باعث می‌شود تاثیر برخی از پارامترهای موثر بر آبخستگی پایین دست جت‌های مستغرق نسبت به جت‌های آزاد متفاوت باشد. از جمله این پارامترها عمق پایاب می‌باشد که در آبخستگی پایین دست جت‌های مستغرق اثر کم‌تر ولی در جت‌های آزاد اثر بیش‌تری دارد.

## ۷-۴-۱- روابط آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی عمودی

مطالعات راجاراتنام (۱۹۸۱) روی جت‌های عمودی مستغرق با بستر ماسه‌ای به قطر متوسط ۱/۲ و ۲/۳۸ میلی‌متر منجر به رابطه زیر برای حداکثر عمق آبشستگی گردید [۶۸]:

$$\frac{y_s}{B} = 0.23 \left( \frac{V}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \right) \left( \frac{H}{B} \right)^{0.5} \quad (۶-۷)$$

که در این روابط:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه بستر (متر)

$B$ : ضخامت جت (متر)

$V$ : سرعت اولیه جت در خروجی (متر بر ثانیه)

$g$ : شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)

$d_{50}$ : قطر متوسط ذرات بستر (متر)

$H$ : ارتفاع ریزش جت (متر)

$s$ : چگالی نسبی ( $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ )

$\rho_s$ : چگالی ذرات بستر و  $\rho$ : چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)

راجاراتنام (۱۹۸۱) مطالعات دیگری با پایاب کم عمق روی جت‌های عمودی آزاد دایره‌ای انجام داد و رابطه‌ی زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ارائه کرد [۶۸]:

$$\frac{y_s}{D} = 0.13 \frac{V'}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad (۷-۷)$$

$$V' = (V^2 + 2gH)^{0.5} \quad (۸-۷)$$

که در این روابط:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه مصالح بستر (متر)

$D$ : قطر جت (متر)

$V$ : سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه)

$V'$ : سرعت برخورد جت با سطح آب (متر بر ثانیه)

$H$ : اختلاف تراز خروجی جت و سطح آب (متر)

راجاراتنام (۱۹۸۲) همچنین آزمایشاتی بر روی جت‌های صفحه‌ای عمودی آزاد با پایاب کم عمق انجام داد [۷۰]. حاصل نتایج این آزمایش‌ها رابطه زیر برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی است:

$$\frac{y_s}{B} = 0.182 \frac{V}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad \text{for:} \quad 17 < \frac{V}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} < 26 \quad (۹-۷)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه مصالح بستر (متر)

B: ضخامت جت (متر) می‌باشد.

ادریگ و راجاراتنام (۱۹۹۶) با جمع‌آوری داده‌های مربوط به جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق روابط زیر را به دست آوردند [۱۰].

$$\frac{y_s}{H} = 0.05(E_c - 0.14)^{0.6} \frac{(s)^{3.1}}{(s-1)^{2.8}} \quad \text{و} \quad E_c = \frac{V(D/H)}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad (10-7)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه مصالح

V: سرعت جت در خروجی

D: قطر جت خروجی

H: ارتفاع ریزش جت تا بستر

ایشان همچنین حداکثر عرض حفره آبشستگی از محور جت  $W_s$  را به شکل زیر تعریف کردند:

$$\frac{W_s}{H} = 11E_c^{0.65} \frac{(s-1)^{6.2}}{(s)^{6.6}} \quad (11-7)$$

مطالعات رادکیوی (۱۹۹۹) بر روی جت‌های دایره‌ای عمودی مستغرق منجر به روابط زیر شد [۱۶].

$$\frac{y_s}{D} = 0.075 \left( \frac{V}{u_{*c}} \right)^{1.0} \quad \text{اگر} \quad V/u_{*c} < 100 \quad (12-7)$$

$$\frac{y_s}{D} = 0.035 \left( \frac{V}{u_{*c}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{اگر} \quad V/u_{*c} > 100 \quad (13-7)$$

در روابط فوق V سرعت جت در خروجی و  $u_{*c}$  سرعت برشی بحرانی ذرات بستر می‌باشد.

#### ۷-۴-۲- تخمین آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل

با توجه به تقسیم‌بندی میسن (۱۹۸۹) روابط محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل در پنج گروه عمده

ارائه می‌گردد [۴۰]:

#### ۷-۴-۲-۱- گروه اول

شکل کلی روابط ارائه شده در این گروه به صورت زیر است:

$$y_s = \frac{Kq^x H^y}{d^z} \quad (14-7)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی از سطح پایاب (متر)



H: ارتفاع ریزش جت (متر)

q: بده بر واحد عرض سرریز (متر مکعب در ثانیه بر متر).

d: اندازه‌ی قطر مشخصه مصالح بستر (متر).

$z$ ،  $y$ ،  $x$ ،  $k$ : ضریب و توان‌های ثابتی هستند که مقادیر آنها در روابط مختلف این گروه متفاوت می‌باشند. مقادیر ضرایب  $k$ ،  $z$ ،  $y$ ،  $x$  و قطر مشخصه مصالح مربوط به هر کدام از روابط گروه اول در جدول (۷-۱) ارائه شده است. جدول (۷-۱) نشان می‌دهد که مقدار ضریب  $x$  در این روابط تقریباً حدود ۰/۶ است. ضریب  $y$  بین ۰/۱ تا ۰/۵ و مقدار  $z$  بین ۰ تا ۰/۶۵ تغییر می‌کند.

جدول ۷-۱- مقادیر مختلف ضرایب ثابت روابط موجود در گروه اول [۴۷]

d	z	y	x	k	محقق	ردیف
d <sub>50</sub>	۰/۳۲	۰/۲	۰/۵۷	۰/۵۲۱	Schoklitsch	۱
d <sub>50</sub>	۰/۴۲	۰/۲۲۵	۰/۵۴	۰/۲۰۲	Veronese-A	۲
-	۰	۰/۲۲۵	۰/۵۴	۱/۹	Veronese-B	۳
d <sub>90</sub>	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۱/۴۴	Eggenburger	۴
d <sub>85</sub>	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۶۴	۱/۴	Hartunge	۵
d <sub>90</sub>	۰/۵	۰/۵	۰/۶۷	۱/۱۳	Franke	۶
-	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۶۵۲	Damle_A	۷
-	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵۴۳	Damle_B	۸
-	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۳۶۵	Damle_C	۹
d <sub>50</sub>	۰/۰۶۳	۰/۱۸	۰/۶۷	۲/۱۲۶	Chee and Padiyar d90	۱۰
d <sub>90</sub>	۱	۰/۲۵	۰/۵	۲/۷۶	Bisaz and Tschopp	۱۱
d <sub>50</sub>	۰/۱	۰/۲	۰/۶	۱/۶۳۳	Chee and Kung	۱۲
-	۰	۰/۱	۰/۶	۱/۵	Martins-B	۱۳
-	۰	۰/۲۵	۰/۶۷	۰/۶۳۳	Taraimovich	۱۴
d <sub>90</sub>	۰/۰۶۴۵	۰/۳۴۵	۰/۵	۱/۳۵	Machado	۱۵
-	۰	۰/۱	۰/۶	۲/۳	Sofrelec	۱۶
-	۰	۰/۲۳۵	۰/۵۱	۱/۱۸	Chian Min Wu	۱۷

#### ۷-۴-۲-۲- گروم دوم

در این گروه از روابط، علاوه بر پارامترهای بده بر واحد عرض  $q$ ، ارتفاع ریزش  $H$  و قطر مصالح بستر  $d$ ، از عمق پایاب  $Y_t$  نیز استفاده شده است. اولین رابطه این گروه مربوط به جایگر (۱۹۳۹) می‌باشد که براساس مطالعات ورنزه، رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی ارائه کرد [۴۰]:

$$y_s = 0.6q^{0.5}H^{0.25} \left( \frac{Y_t}{d_{50}} \right)^{0.333} \quad (۷-۱۵)$$

که در این رابطه:

$Y_t$ : عمق پایاب بر حسب متر

$d_{50}$ : قطر میانگین ذرات بر حسب متر

H: اختلاف تراز سطح آب بین بالادست و پایین‌دست بر حسب متر و q بده در واحد عرض بر حسب  $\frac{m^2}{s}$  می‌باشد.

دومین رابطه از این گروه توسط مارتینز (۱۹۷۳) به صورت زیر ارائه شده است [۴۵].

$$y_s = 0.14N - 0.73 \frac{Y_t^2}{N} + 1.7Y_t \quad (۱۶-۷)$$

که در این رابطه:

$$N = 7(Q^3 H^{1.5} d_{50}^{-2})^{0.5} \quad (۱۷-۷)$$

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های موجود برای نمونه‌ی اصلی و مدل آزمایشگاهی رابطه‌ی (۱۸-۷) و (۱۹-۷) برای تخمین حداکثر عمق آبستنگی توسط میسن و آروموگان (۱۹۸۵) ارائه شده است [۴۷].

$$Y_s = 3.27 \frac{q^{0.6} H^{0.05} Y_t^{0.15}}{g^{0.2} d_{50}^{0.1}} - Y_t \quad (۱۸-۷)$$

$$Y_s = (4.42 - 3.1H^{0.1}) \times q^{(0.600-0.0033H)} \times H^{(15-0.005H)Y_t^{0.15}} \times g^{-0.2} \times d_{50}^{-0.1} - Y_t \quad (۱۹-۷)$$

قدسیان (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی دوه‌رینگ و ایت (۱۹۹۴)، رابطه زیر را برای پارامترهای بی بعد حفره آبستنگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی دایره‌ای ارائه داد [۳۳]:

$$\frac{\phi}{H} = a \left( \frac{H}{D} \right)^b \left( \frac{Q}{A\sqrt{gR}} \right)^c \left( \frac{H}{D} \right)^d \quad (۲۰-۷)$$

که در این رابطه:

$\phi$  نشانگر پارامتر مربوط به حفره آبستنگی و H ارتفاع ریزش تا بستر اولیه است. مقادیر a, b, c و d برای هر یک از پارامترهای حفره آبستنگی در جدول (۲-۷) ارائه شده است.

جدول ۲-۷ - مقادیر a, b, c و d معادله (۲۰-۷)

پارامترهای حفره آبستنگی	a	b	c	d
عمق $Y_s$	۱/۶۲۵	-۱/۰۵	۰/۴۹۷	۰/۲
عرض $W_s$	۲/۹۷۳	-۰/۶۴۲	۱/۴۲۸	-۰/۱۳۷
طول $L_s$	۵/۳۶۴	-۰/۹۱	-۱/۰۱۷	-۰/۰۴۱
حجم حفره	۱۱/۰۱۹	۲/۶۰۷	۲/۵۰۹	-۰/۰۵۸۲

نجفی (۱۳۸۱) براساس تحقیق آزمایشگاهی روی جت ریزشی دایره‌ای رابطه زیر را برای محاسبه ابعاد حفره آبستنگی ارائه داد [۴]:

$$\frac{\phi}{H_c} = a \left( \frac{Y_t}{D} \right)^b \left( \frac{F_0 D}{\sqrt{(s-1)H_c}} \right)^c \left( \frac{Y_t}{D} \right)^d \quad (۲۱-۷)$$

که در این رابطه:

$\phi$ : پارامترهای حفره آبستنگی

$H_c$ : ارتفاع ریزش از مرکز جت تا کف بستر اولیه

$Y_t$ : عمق پایاب

$F_0$ : عدد فرود ذرات ( $F_0 = V / \sqrt{gd_{50}}$ )

$V$ : سرعت جریان خروجی

$s$ : چگالی نسبی ( $s = \rho_s / \rho$ )

مقادیر  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  در جدول (۷-۳) ارائه شده است.

جدول ۷-۳ - مقادیر  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  در رابطه (۷-۲۱) [۴]

پارامترهای حفره آبشستگی	a	b	c	d
عمق $Y_s$	-۰/۲۷۱	-۰/۲۲۶	۰/۶۰۵	-۰/۴۸
عرض $W_s$	۱/۲۹	-۰/۱۲۵	۰/۹۲۶	-
طول $L_s$	۱/۹۵	-۰/۰۷۲	۱/۰۸۱	-

قدسیان و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی داده‌های آزمایشگاهی متعدد، روابط زیر را برای ابعاد حفره آبشستگی پایین دست جت‌های

ریزشی ارائه دادند [۳۷]:

$$\frac{y_s}{Y_t} = 1.925 \left( \frac{Y_t}{H_c} \right)^{-0.66} \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^{0.3} \quad (۷-۲۲)$$

$$\frac{L_s}{Y_t} = 8.432 \left( \frac{Y_t}{H_c} \right)^{-0.90} \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^{1.0} \quad (۷-۲۳)$$

$$\frac{W_s}{Y_t} = 10.126 \left( \frac{Y_t}{H_c} \right)^{-0.02} \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^{0.2} \quad (۷-۲۴)$$

$$\frac{h_m}{Y_t} = 0.549 \left( \frac{Y_t}{H_c} \right)^{-0.30} \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^{0.03} \quad (۷-۲۵)$$

که در این روابط:

$H_c$ : ارتفاع ریزش جت از مرکز آن تا بستر اولیه،  $h_m$ : حداکثر ارتفاع برآمدگی در انتهای حفره،  $R$ : شعاع هیدرولیکی جت و

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d_{50} (s-1)}} \text{ می‌باشد.}$$

#### ۷-۴-۲-۳ - گروه سوم

در این گروه رابطه خاصی وجود ندارد بلکه محققین با پدیده‌ی آبشستگی به صورت کیفی برخورد و توصیه‌هایی در مورد آبشستگی ارائه کرده‌اند. به عنوان مثال کولا (۱۹۶۵) بیان می‌دارد که حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی تقریباً ۴۰ برابر ضخامت جت در محل برخورد با بستر فرسایش پذیر است. همچنین دیویس و سورنسون (۱۹۶۹) بر این عقیده بودند که مقدار حداکثر

عمق آبستنگی ناشی از جت‌های ریزشی برابر  $\frac{2}{3}$  ارتفاع ریزش جت است. در این گروه همچنین هارتانگ و هاسلتر (۱۹۷۳) با توجه به مطالعات انجام شده توسط کولا، عقیده داشتند که حداکثر عمق آبستنگی ناشی از جت‌های ریزشی استوانه‌ای تقریباً حدود ۲۰ برابر قطر جت است [۳۶].

#### ۷-۴-۲-۴- گروه چهارم

این گروه از روابط توسط محققین روسی ارائه شده است. روابط این گروه اگر چه دارای پارامترهای زیادی هستند، اما تعیین برخی از این پارامترها به قضاوت شخصی مربوط می‌شوند و برای آنها تعریف مشخص و دقیقی ارائه نشده است. میسن اظهار می‌دارد که از میان این روابط تنها روابط میخالف (۱۹۶۰)، رابینستین (۱۸۶۵) و معادله‌ی میرتسخالف (۱۹۶۷) را با اطمینان بیش‌تر می‌توان به‌کار برد [۴۷]. این روابط به ترتیب به شرح زیر ارائه گردیده‌اند:

#### - رابطه میخالف

$$y_s = \left( \frac{1.804q \sin \alpha}{1 - 0.21 \cot \alpha} \right) \left( \frac{1}{d_{90}^{0.33} Y_t^{0.5}} - \frac{1.126}{H} \right) \quad (۲۶-۷)$$

#### - رابطه رابینستین

$$y_s = Y_t + 0.19 \left( \frac{H + Y_t}{d_{90}} \right)^{0.75} \left( \frac{q^{1.2}}{H^{0.37} Y_t^{0.33}} \right) \quad (۲۷-۷)$$

#### - رابطه میرتسخالف

$$y_s = \left( \frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \sin \alpha}{1 - 0.17 \cot \alpha} + 0.25 Y_t \quad (۲۸-۷)$$

در روابط فوق  $\alpha$  زاویه برخورد جت با سطح پایاب (درجه) و  $d_{90}$  قطر ذرات بستر است که ۹۰ درصد وزنی ذرات از آن کوچک‌تر هستند. بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

#### ۷-۴-۲-۵- گروه پنجم

در گروه پنجم، پارامتر زمان نیز به‌عنوان یکی از عوامل موثر در نظر گرفته شده است. از روابط این گروه می‌توان به رابطه هاتر و رویز (۱۹۵۰) (رابطه ۷-۸) اشاره نمود.

#### ۷-۵- مقایسه روابط ارائه شده

میسن با جمع‌آوری اطلاعات و نتایج آزمایشات مختلف به بررسی نتایج حاصل از روابط ارائه شده مربوط به جت‌های ریزشی مایل پرداخت [۴۷]. او بدین منظور ۴۷ سری داده‌ی آزمایشگاهی و ۲۶ سری داده‌ی صحرایی را انتخاب کرد. وی همچنین اظهار

می‌دارد که بهترین جواب‌ها برای داده‌های استفاده شده مربوط به مدل، روابط مارتینر (B)، چی و کانگ و سولفریک (۱۹۸۰) می‌باشد. برای داده‌های مربوط به نمونه اصلی روابط دامل (۱۹۶۶) بهترین نتیجه را داده است. میسن اظهار می‌دارد روابطی که از مشاهدات آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، معمولاً برای نمونه اصلی نتایج مناسبی نداشته‌اند. از روابط گروه دوم، رابطه مارتینز (A) برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در مدل از بقیه روابط گروه اول نیز بهتر جواب می‌دهد. ویتاکر و اشلیس (۱۹۸۴) در مقایسه‌ای تطبیقی در مورد حداکثر عمق آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که رابطه‌ی ارائه شده توسط مارتینز (A)، حداکثر عمق آبشستگی در سد کابورا-باسا در کشور مکزیک را با اطمینان خوبی برآورد می‌کند [۸۱]. نتایج حاصل شده از بررسی روابط گروه سوم نشان داد که هیچ کدام از این روابط مناسب نمی‌باشد. نتایج حاصل از روابط گروه چهارم با نتایج واقعی هیچ‌گونه مطابقی نشان نداد. در گروه پنجم، رابطه‌ای که توسط توماس (۱۹۵۳) ارائه شده است نیز نتایج نسبتاً ضعیفی ارائه کرده است. در نهایت توصیه می‌شود عمق آبشستگی از روابط مختلف محاسبه شود و سپس مقدار مناسب با توجه به قضاوت مهندسی و اهمیت پروژه انتخاب گردد.

### ۷-۵-۱- مثال

۱- مقدار حداکثر عمق آبشستگی را در جت عمودی مستغرق با خصوصیات زیر تعیین کنید.

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3, H = 30 \text{ cm}, Y_t = 1.0 \text{ m}, D = 0.3 \text{ m}$$

$$\phi = 40^\circ, V = 1.0 \text{ m/s}, d_{50} = 1.23 \text{ mm}$$

حل: با استفاده از رابطه (۷-۷):

$$y_s = D \times 0.13 \frac{\sqrt{V + 2gH}}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} = 0.3 \times 0.13 \times \frac{2.62}{\sqrt{1.65 \times 9.81 \times 0.00123}} = 0.72 \text{ m}$$

با استفاده از رابطه (۷-۱۰):

$$E_c = \frac{V(D/H)}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} = \frac{1 \times \left(\frac{0.3}{0.3}\right)}{\sqrt{9.81 \times 0.00123 \times 1.65}} = 7.09$$

$$y_s = H \times 0.05 (E_c - 0.14)^{0.6} \frac{(s)^{3.1}}{(s-1)^{2.8}} = 0.3 \times 0.05 \times (7.09 - 0.14)^{0.6} \frac{(2.65)^{3.1}}{1.65^{2.8}} = 0.24 \text{ m}$$

۲- حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی نسبت به سطح پایاب ایجاد شده در سد کابورا-باسا در موزامبیک در فوریه سال ۱۹۸۴

در اثر سیلی با بده  $275 \text{ m}^2/\text{s}$ ،  $68 \text{ m}$  اندازه‌گیری شده است. عمق پایاب در پایین دست سد  $40 \text{ m}$  و اختلاف عمق آب

بالادست و پایین دست سد  $100 \text{ m}$  و مصالح موجود در پایین دست این سد دارای خصوصیات زیر می‌باشد.

$$d_{15} = 1 \text{ m} \text{ و } d_{85} = 2/6 \text{ m} \text{ و } d_{50} = 2/1 \text{ m}$$

عمق حفره‌ی آبشستگی را با توجه به روابط Veronese و Chian Min Wu، Damle، Mason به دست آورید.

حل: جدول (۷-۴) مقدار حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده با استفاده از روابط مورد نظر را نشان می‌دهد.

جدول ۷-۴- مقدار حداکثر عمق آبشستگی با استفاده از روابط مختلف

سال	محقق	$y_s$ (m)	درصد خطا
۱۹۳۷	Veronese	۵۲	-۲۳
۱۹۳۷	Damle	۹۱	۳۳/۸
۱۹۳۷	Chian Min Wu	۶۱	-۱۰
۱۹۶۶	(Model) Mason	۹۸	۳۰
۱۹۶۶	Mason (Prototype)	۷۱	۴/۴۱

چنانچه ملاحظه می‌شود رابطه‌ی میسن تخمین مناسب و با ضریب اطمینان مناسبی برای تعیین حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی ارائه داده است.

# فصل ۸

---

---

## آبشستگی ناشی از جت‌های افقی



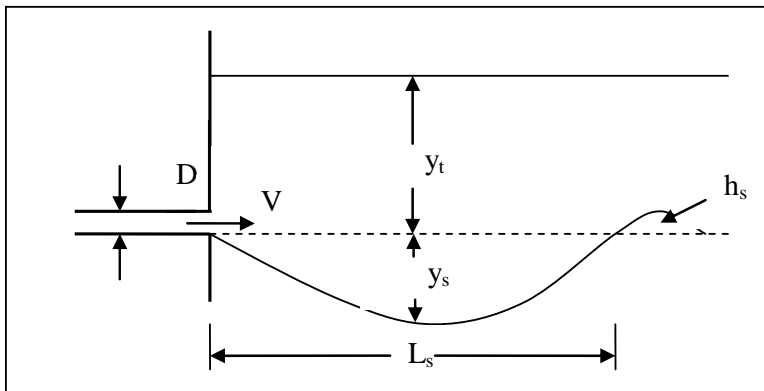


## ۸-۱- کلیات

جت‌های افقی معمولاً در پایین دست دریاچه‌ها یا پایین دست کالورت‌ها استفاده می‌شود. با توجه به عرض جت در مقایسه با عرض جریان در پایاب، جت‌ها را می‌توان به صورت جت‌های دو بعدی و سه بعدی تقسیم‌بندی نمود. در جت‌های دو بعدی، جت توسعه عرضی ندارد یا عرض جت خروجی برابر عرض جریان در پایین دست سازه است. در جت‌های سه بعدی عرض جت خروجی کمتر از عرض جریان در پایین دست است، لذا گسترش عرضی جت امکان‌پذیر می‌باشد.

## ۸-۲- الگوی جریان در جت‌های افقی

در جت‌های افقی، جریان موازی بستر اولیه بوده و معمولاً حفره آبشستگی در جهت عرضی متقارن است. در شکل (۸-۱) نمای کلی از یک جت مستغرق خروجی از یک کالورت افقی نشان داده شده است. در جت‌های افقی، سرعت زیاد جریان در برخورد با بستر فرسایش‌پذیر، باعث جدا شدن ذرات بستر شده و به خاطر گرداب‌های ایجاد شده، بخشی از ذرات به صورت معلق در آمده و به سمت پایین دست حمل می‌شود. در ابتدا و برای مدت کوتاهی، مصالح بیش‌تر به صورت بار بستر حرکت می‌کند [۱۶]. رسوبات حمل شده در پایین دست حفره آبشستگی ته‌نشین شده و تشکیل یک برآمدگی می‌دهند. روند جدا شدن ذرات، حمل آنها و رسوب‌گذاری در پایین دست حفره آبشستگی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان و خصوصیات رسوب است. براساس عمق پایاب، جت‌های افقی به دو حالت جت مستغرق عمیق و جت مستغرق کم عمق تقسیم می‌شوند.



شکل ۸-۱- نمای کلی از یک جت مستغرق افقی

## ۸-۲-۱- جت مستغرق عمیق

در حالت استغراق زیاد، روند توسعه آبشستگی مشخص و آبشستگی شامل یک حفره و برآمدگی در پایین دست آن است. عمق آب با توسعه آبشستگی افزایش می‌یابد، بنابراین سرعت موضعی در نزدیکی کف حفره با افزایش عمق، کاهش می‌یابد. در نتیجه نرخ فرسایش با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در پایین دست محل حداکثر عمق آبشستگی، سرعت جریان با افزایش فاصله افزایش می‌یابد. با گذشت زمان زیادی از شروع آبشستگی، سرعت جریان در نزدیکی بستر به مقداری که قادر به جابجایی مصالح نیست

کاهش می‌یابد. در این حالت هندسه حفره آبخستگی به حالت تعادل رسیده است. زمان رسیدن به حالت تعادل و ابعاد حفره آبخستگی تابعی از خصوصیات رسوب، سرعت جریان، ضخامت جت و عمق پایاب است.

ادریگ و راجاراتنام (۱۹۹۸)، برای زمانی که  $12 < y_t / b_u < 60$  باشد، مشاهده کردند که جت افقی خروجی از دریچه یا کالورت در امتداد بستر حرکت می‌کند و آبخستگی زیادی ایجاد می‌کند. در این جا  $b_u$  ضخامت جت خروجی و  $y_t$  عمق پایاب است [۱۱].

### ۸-۲-۲- جت مستغرق کم عمق

در حالت استغراق کم، جریان جت به صورت ناپایدار است که همراه با فرسایش بستر، چرخش مصالح و پر شدن بخشی از حفره آبخستگی به صورت متوالی می‌باشد [۱۳]. برای حالتی که  $y_t / b_u < 4.03$  باشد، جت افقی در تماس با بستر بوده و رشد سریع حفره آبخستگی را به همراه خواهد داشت. به این حالت جت بستری (جت نزدیک بستر) گفته می‌شود.

بالاچندرا و کلز (۱۹۹۷) با بررسی آبخستگی ناشی از جت دیواره‌ای خروجی از زیر دریچه کشویی، دو مرحله رژیم جریان را معرفی کردند: مرحله اول که به خاطر تشکیل جت نزدیک بستر همراه با فرسایش بستر است. مرحله دوم که جت به سمت سطح جریان منحرف می‌شود همراه با پر شدن بخشی از حفره آبخستگی است [۱۳].

### ۸-۳- تغییرات زمانی ابعاد حفره آبخستگی

اداره عمران ارتش آمریکا (۱۹۹۱) معادلاتی برای حداکثر عمق، عرض، طول و حجم حفره آبخستگی پایین دست کالورت لوله‌ای برای دو حالت پایاب کم عمق و پایاب عمیق به صورت زیر ارائه داد:

#### ۸-۳-۱- پایاب کم عمق $y_t < 0.5D$

$$\frac{y_s}{D} = 0.80 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^{0.375} t^{0.10} \quad (۱-۸)$$

$$\frac{W_s}{D} = 1.0 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^{0.915} t^{0.15} \quad (۲-۸)$$

$$\frac{L_s}{D} = 2.40 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^{0.71} t^{0.125} \quad (۳-۸)$$

$$\frac{V_s}{D^3} = 0.73 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^2 t^{0.375} \quad (۴-۸)$$

#### ۸-۳-۲- پایاب عمیق $y_t \geq 0.5D$

$$\frac{y_s}{D} = 0.74 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^{0.375} t^{0.10} \quad (۵-۸)$$

$$\frac{W_s}{D} = 0.72 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^{0.915} t^{0.15} \quad (۶-۸)$$

$$\frac{L_S}{D} = 4.10 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^{0.71} t^{0.125} \quad (7-8)$$

$$\frac{\forall_S}{D^3} = 0.62 \left( \frac{Q}{D^{2.5}} \right)^2 t^{0.375} \quad (8-8)$$

که در این روابط:

$y_t$ : عمق جریان در پایین دست کالورت

$D$ : قطر کالورت بر حسب فوت

$Q$ : بده جریان بر حسب فوت مکعب بر ثانیه

$t$ : زمان بر حسب دقیقه

$y_S$ : حداکثر عمق آبستگي

$W_S$ : حداکثر عرض حفره آبستگي

$L_S$ : حداکثر طول حفره آبستگي

$\forall_S$ : حداکثر حجم حفره آبستگي

#### ۸-۴- تخمین ابعاد حفره آبستگي ناشي از جت‌هاي افقي

##### ۸-۴-۱- روابط مربوط به جت‌هاي دو بعدی

قیوم (۱۹۶۰) رابطه تجربی زیر را جهت تخمین حداکثر عمق آبستگي در نتیجه عبور جریان از زیر دریچه ارائه داد [۱۶]:

$$y_S + y_t = 2.78 \frac{q^{0.4} \Delta H^{0.22} y_t^{0.4}}{g^{0.2} d_{90}^{0.22}} \quad (9-8)$$

که در این رابطه:

$y_S$ : حداکثر عمق آبستگي (متر)

$y_t$ : عمق پایاب (متر)

$q$ : بده بر واحد عرض (متر مربع بر ثانیه)

$\Delta H$ : اختلاف ارتفاع بین تراز آب بالادست و پایین دست دریچه (متر)

$d_{90}$ : قطر مصالحی که ۹۰ درصد ذرات از آن ریزتر باشد (متر)

آلتینیلیک و بساماسی (۱۹۷۳) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبستگي ناشي از جت‌هاي افقي مستغرق عبوری از زیر

یک دریچه پیشنهاد دادند [۱۰]:

$$y_S = b_u \sqrt{\frac{b_u}{d_{50}} \text{tg}\varphi} \left( \frac{F_r}{\sqrt{(s-1)}} \right)^{1.5} \quad (10-8)$$

که در این رابطه:

$\varphi$ : زاویه استقرار ذرات

$y_s$ : حداکثر عمق آبخستگی از سطح بستر

$b_u$ : ضخامت جت (متر)

$d_{50}$ : قطر متوسط ذرات

$F_T$ : عدد فرود ( $F_T = U/\sqrt{gb_u}$ )

$U$ : سرعت جت در خروجی جت

$g$ : شتاب جاذبه

$s$ : چگالی نسبی رسوبات ( $s = \rho_s / \rho$ )

$\rho_s$ : چگالی ذرات بستر و  $\rho$ : چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)

رادکیوی و بروسرز (۱۹۹۱) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبخستگی ناشی از جت‌های افقی مستغرق عبوری از زیر دریچه ارائه کردند [۱۶]:

$$y_s = 0.008b_u \left( \frac{U}{u_{*c}} \right)^2 \quad (۱۱-۸)$$

$$u_{*c} = \sqrt{\theta_c g d_{50} (s-1)} \quad (۱۲-۸)$$

که در این رابطه:

$u_{*c}$ : سرعت برشی بحرانی بستر

$\theta_c$ : پارامتر شیلدز بحرانی

$s$ : چگالی نسبی رسوب

هافمن (۱۹۹۷) رابطه زیر را برای تعیین حداکثر عمق آبخستگی ناشی از جریان زیر دریچه ارائه داد [۳۸]:

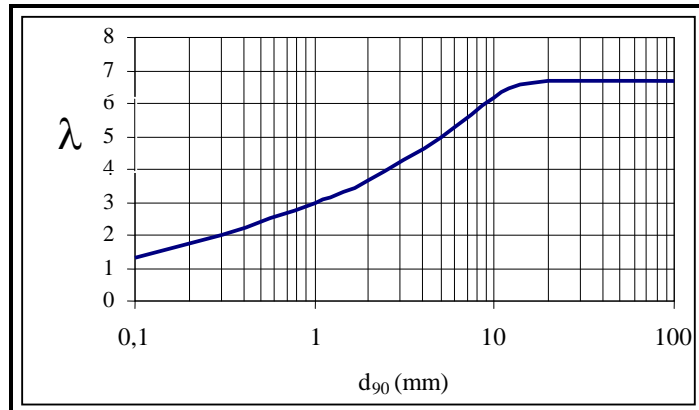
$$y_s = \frac{50}{\lambda} b_u \left( 1 - \frac{U_2}{U_1} \right) \quad (۱۳-۸)$$

که در این رابطه:

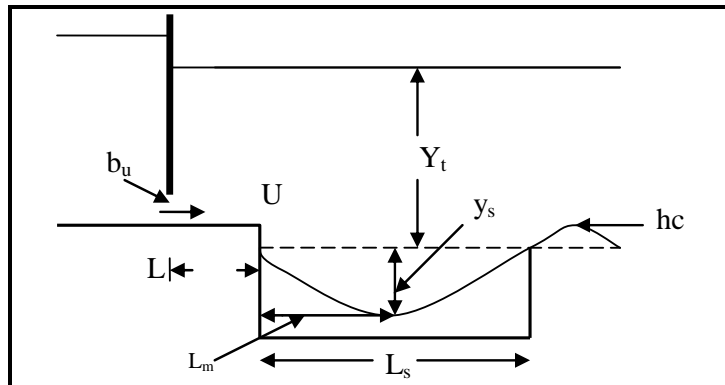
$U_1$ : سرعت جت در خروجی

$U_2$ : سرعت جریان در پایین دست حفره آبخستگی

$\lambda$ : ضریب مربوط به اندازه ذرات بستر است که از شکل (۲-۸) به دست می‌آید.

شکل ۸-۲- مقادير  $\lambda$  بر حسب  $d_{90}$  [۳۸]

سرکار و دی (۲۰۰۵) رابطه زیر را برای ابعاد حفره آبستگي ناشي از جریان عبوري از زیر دريچه که در پایین دست آن کفبندی به طول  $L$  قرار دارد، ارائه دادند (شکل ۸-۳) [۷۵]:

شکل ۸-۳- نمای کلی یک دريچه همراه با کف بند به طول  $L$ 

$$\frac{\phi}{b_u} = \alpha \frac{F_0^B}{\sqrt{s-1}} \left( \frac{L}{b_u} \right)^\gamma \left( \frac{Y_t}{b_u} \right)^\theta \quad (۱۴-۸)$$

که در این رابطه:

$\phi$ : معرف پارامترهای حفره آبستگي شامل طول حفره آبستگي  $L_s$ ، ارتفاع برآمدگی در پایین دست حفره  $h_c$ ، فاصله موقعیت حداکثر عمق آبستگي از کف بند  $L_m$  و حداکثر عمق آبستگي  $y_s$  است.

$b_u$ : بازشدگی دريچه

$F_0$ : عدد فرود رسوبات ( $F_0 = U / \sqrt{gd_{50}}$ )

$U$ : سرعت جت در خروجی

$Y_t$ : عمق پایاب

$L$ : طول کف بند

مقادیر ضریب و توان‌های رابطه فوق برای پارامترهای مختلف حفره آبشستگی در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۸-۱- ضریب و توان‌های معادله (۸-۱۴) [۷۵]

$\phi$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\theta$
$L_s$	۸/۳۱	۰/۸۷	-۰/۳۲	۰/۵۳
$h_c$	۱/۶۹	-۰/۱۸	-۰/۵۲	۱/۲۸
$L_m$	۳/۴۸	۰/۹۱	-۰/۵۴	۰/۶۸
$y_s$	۰/۴۲	۰/۴۹	-۰/۳۶	۱/۰۸

#### ۸-۴-۲- روابط مربوط به جت‌های سه بعدی

چن (۱۹۷۰) برای بده یکسان بر روی کالورت‌های مربعی و دایره‌ای شکل زمانی که ارتفاع کالورت مربعی برابر قطر کالورت دایره‌ای شکل باشد نشان داد که مقدار آبشستگی در کالورت مربعی کمتر از کالورت دایره‌ای است [۱۶]. بوهن (۱۹۷۰) آزمایشاتی روی ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست کالورت دایره‌ای انجام داد و روابط زیر را برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی ارائه کرد [۱۵]:

$$\frac{y_s}{D} = 0.65 \left( \frac{U}{u_{*c}} \right)^{1/3} \quad (۸-۱۵)$$

$$\frac{W_s}{D} = 7.5(Fr)^{2/3} \quad (۸-۱۶)$$

$$\frac{L_s}{D} = 15(Fr)^{2/3} \quad (۸-۱۷)$$

$u_{*c}$ : سرعت برشی بحرانی می‌باشد که از منحنی شیلدز به دست می‌آید.

$U$ : سرعت متوسط جریان خروجی از کالورت و برابر با  $Q/(\pi D^2/4)$  است.

$Fr$ : عدد فرود ( $Fr = U/\sqrt{gD}$ )

راجاراتنام و بری (۱۹۷۷) مطالعاتی روی کالورت‌های دایره‌ای سه بعدی انجام دادند و رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق

آبشستگی ارائه نمودند [۶۶]:

$$y_s = 0.4D \left( \frac{U_1}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} - 2 \right) \quad \text{اگر} \quad 2 < \left( \frac{U_1}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \right) < 14 \quad (۸-۱۸)$$

که در این رابطه:

$D$ : قطر لوله (m)

$g$ : شتاب ثقل ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$U_1$ : سرعت جت (m/s)

$s$ : چگالی نسبی رسوب

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی (m)

راف و همکاران (۱۹۸۲) مطالعاتی روی آبستنگی پایین‌دست کالورت‌های سه بعدی دایره‌ای انجام دادند و رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبستنگی ارائه دادند [۷۴]:

$$y_s = 2.07D \left( \frac{Q}{\sqrt{gD^5}} \right)^{0.45} \quad (۱۹-۸)$$

که در این رابطه Q بده جریان می‌باشد.

ابت و همکاران (۱۹۸۴) برای کالورت دایره‌ای روابط زیر را برای عمق، عرض و طول حفره آبستنگی به دست آوردند [۹]:

$$\frac{y_s}{D} = 1.52Fr^{0.63} \quad (۲۰-۸)$$

$$\frac{W_s}{D} = 7.44Fr^{0.66} \quad (۲۱-۸)$$

$$\frac{L_s}{D} = 15.6Fr^{0.58} \quad (۲۲-۸)$$

ایشان همچنین برای عمق آبستنگی با توجه به خصوصیات رسوب، رابطه زیر را پیشنهاد دادند:

$$\frac{y_s}{D} = 3.18Fr^{0.57} \left( \frac{d_{50}}{D} \right)^{0.114} \sigma_g^{-0.4} \quad (۲۳-۸)$$

که در این رابطه  $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$  انحراف معیار ذرات بستر می‌باشد.

راف و همکاران (۱۹۸۲) آزمایشاتی بر روی شکل‌های مختلف کالورت (دایره‌ای، نیم دایره‌ای، مربعی، مستطیلی) انجام دادند [۷۴]. نتایج آزمایشات ایشان منجر به ارائه روابطی به شکل زیر برای ابعاد حفره آبستنگی گردید:

$$\frac{Y_s}{R}, \frac{W_s}{R}, \frac{L_s}{R}, \frac{V_s}{R^3} = a \left( \frac{Q}{A\sqrt{gR}} \right)^b \quad (۲۴-۸)$$

که در این رابطه:

$V_s$ : حجم حفره آبستنگی

A: سطح مقطع کالورت

R: شعاع هیدرولیکی مقطع کالورت

مقادیر a، b در جدول زیر برای شکل‌های مختلف کالورت ارائه شده است.

جدول ۸-۲- ضرایب a، b در معادله (۲۴-۸) [۷۴]

پارامترهای حفره آبستنگی	a	b
$y_s$	۷/۸۴	-۰/۲۸
$W_s$	۲۶/۵۸	-۰/۶۳
$L_s$	۶۹/۲۵	-۰/۵۳
$V_s$	۳۴۷۹	۱/۴۳

بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱) طی مطالعاتی بر روی کالورت‌های سه بعدی دایره‌ای، رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبخستگی ارائه نمودند [۱۶]:

$$y_s = 0.08DU_1 / u_{*,c} \quad u_{*,c} = \sqrt{\theta_c (s-1)gd_{50}} \quad (۲۵-۸)$$

که در این رابطه:

$u_{*,c}$ : سرعت برشی بحرانی ذرات بستر (m/s)

$\theta_c$ : پارامتر شیلدز بحرانی می‌باشد.

هافمن (۱۹۹۷) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبخستگی پایین دست کالورت‌های سه بعدی دایره‌ای ارائه نمود [۳۸]:

$$y_s = \frac{7}{\lambda} \left( \frac{Q(U_1 - U_2)}{g} \right)^{1/3} \quad (۲۶-۸)$$

که در این رابطه:

$U_1$ : سرعت جت در خروجی

$U_2$ : سرعت جریان پایین دست حفره آبخستگی

$\lambda$ : ضریب مربوط به اندازه ذرات بستر است که از شکل (۲-۸) به دست می‌آید.

ابیدا و تاونسند (۱۹۹۱) برای پیش‌بینی عمق آبخستگی ناشی از جت دیواره‌ای خروجی از یک کالورت جعبه‌ای رابطه زیر را به دست آوردند [۸]:

$$\frac{Y_s}{H} = \left( \exp\left(\frac{Fr-2}{2.03}\right) - 0.373 \right) \left( \frac{d_{50}}{H} \right)^{-0.275} \quad (۲۷-۸)$$

که در این رابطه:

$Fr$ : عدد فرود جریان جت و  $H$  ارتفاع کالورت می‌باشد.

## ۸-۵- مقایسه روابط ارائه شده

به منظور مقایسه روابط ارائه شده، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده توسط تعدادی از محققین بر روی جت‌های افقی، به ارزیابی و تحلیل برخی از روابط موجود پرداخته شده است. جدول (۳-۸) درصد سازگاری روابط ارائه شده با داده‌های فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۸- مقایسه برخی از روابط ارائه شده

درصد سازگاری روابط تخمین عمق آبخستگی با داده‌ها (%)				تعداد داده‌ها	داده‌های آزمایشگاهی مربوط به جت‌های سه بعدی
هافمن (۱۹۹۷)	بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱)	راف و همکاران (۱۹۸۲)	راجاراتنام و بری (۱۹۷۷)		
۹۶	۹۳	۱۹	۹۶	۲۷	کلارک (۱۹۶۲)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴	راجاراتنام و بری (۱۹۷۷)
۹۶	۳۷	۹۶	۴۵	۷۱	راف و همکاران (۱۹۸۲)
۱۰۰	۸۱	۱۰۰	۵۶	۱۶	بلیسدل و اندرسون (۱۹۸۹)
۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۵	دوهرینگ و ایت (۱۹۹۴)



همان گونه که در جدول (۸-۳) ملاحظه می‌گردد برای داده‌های استفاده شده، روابط تجربی هافمن (۱۹۷۷) و راف و همکاران (۱۹۸۲) نتایج بهتری ارائه می‌دهد. یادآوری می‌گردد که روابط راجاراتنام و بری (۱۹۷۷) و بروسرز و رادکیوی (۱۹۹۱) مبتنی بر آزمایشاتی است که در آن عمق پایاب به‌طور نسبی زیاد است.

به‌طور کلی روابط آبستنگی ارائه شده تنها می‌توانند برای به‌دست آوردن یک تقریب اولیه از بزرگی عمق آبستنگی در مرحله تعادل مورد استفاده قرار گیرند و در پروژه‌های خاص و مهم باید از مدل‌های فیزیکی نیز سود جست. در هر حال باید توجه داشت که آبستنگی ناشی از جت‌ها، یک پدیده دینامیک است و عمق آبستنگی نهایی بستگی به اندرکنش شرایط هیدرولیکی، ریخت شناسی و هیدرولوژیکی دارد. در پروژه‌های اجرایی می‌توان مقدار عمق آبستنگی را با استفاده از روابط مختلف محاسبه و با توجه به اهمیت پروژه و قضاوت مهندسی رابطه مناسب را انتخاب نمود.

### ۸-۵-۱- مثال

با توجه به داده‌های زیر مقدار حداکثر عمق آبستنگی ناشی از جت دویعدی عبوری از زیر یک دریچه را تعیین کنید.

$$Y_t = 5\text{m}, \Delta H = 5\text{m}, q = 2 \text{ m}^2/\text{s}, d_{90} = 7\text{mm}, d_{50} = 5\text{mm}, \rho_s = 2650\text{kg/m}^3, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3,$$

$$b_u = 0.34\text{m}$$

حل:

- با استفاده از رابطه (۸-۹):

$$y_s + y_t = 2.78 \frac{q^{0.4} \Delta H^{0.22} y_t^{0.4}}{g^{0.2} d_{90}^{0.22}}$$

$$y_s = 2.78 \frac{2^{0.4} 5^{0.22} 5^{0.4}}{9.81^{0.2} 0.007^{0.22}} - 5 = 14\text{m}$$

- با استفاده از رابطه (۸-۱۰):

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g b_u}} = \frac{2}{\sqrt{9.81 \times 0.34}} = 3.23$$

$$y_s = b_u \left( \frac{F_r}{\sqrt{(s-1)}} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{b_u}{d_{50}} \text{tg} \phi}$$

$$y_s = 0.34 \left( \frac{3.23}{\sqrt{1.65}} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{0.34}{0.005} \text{tg} 40^\circ} = 10\text{m}$$

- با استفاده از رابطه (۸-۱۳):

$$y_s = \frac{50}{\lambda} b_u \left( 1 - \frac{U_2}{U_1} \right) \quad \text{و} \quad U_2 = \frac{q}{Y_t} = \frac{2}{5} \quad \text{و} \quad U_1 = \frac{2}{0.34} = 5.9$$

با استفاده از شکل (۸-۲) داریم:  $\lambda = 5.69$  بنابراین:

$$y_s = \frac{50}{5.69} \times 0.34 \times \left(1 - \frac{0.4}{5.9}\right) = 3\text{m}$$

روشن است که روابط مختلف، جواب‌های متفاوتی دارند و نظر به این که نمی‌توان رابطه خاصی برای شرایط مختلف توصیه کرد، انتخاب رابطه مناسب با توجه به اهمیت پروژه و قضاوت مهندسی صورت می‌گیرد.

# فصل ۹

---

---

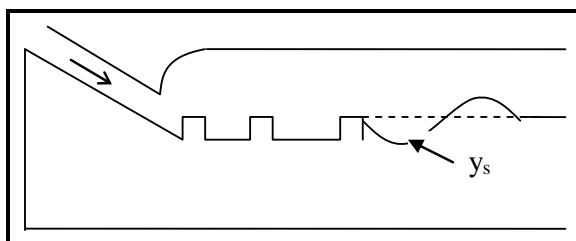
آبشستگی پایین دست حوضچه‌های

آرامش



## ۹-۱- کلیات

حوضچه‌های آرامش متداول‌ترین شکل مستهلک کننده‌های انرژی هستند که جریان فوق بحرانی سرریز را از طریق ایجاد یک پرش هیدرولیکی به جریان زیربحرانی تبدیل می‌کنند و جهت حفاظت ناحیه‌ای که تحت اثر آبشستگی شدید قرار دارد استفاده می‌شوند. در حقیقت هدف اصلی از ایجاد حوضچه‌های آرامش، استهلاک انرژی و کاهش فرسایش ناشی از جریان است. با این وجود در جریان خروجی از حوضچه‌های آرامش بخش قابل توجهی از انرژی باقی می‌ماند که باید مستهلک شود و لذا در پایین دست حوضچه‌های آرامش معمولاً آبشستگی موضعی رخ می‌دهد (شکل ۹-۱). نوع خاصی از حوضچه‌های آرامش، حوضچه آرامش با انبساط ناگهانی است. انبساط ناگهانی این نوع حوضچه‌ها یک راه مناسب برای استهلاک انرژی در پایین دست سرریز می‌باشد. ایراد اساسی این نوع حوضچه‌ها الگوی نامتقارن جریان به ویژه در اعداد فرود بالا می‌باشد. وجود جریان نامتقارن باعث ایجاد آبشستگی نامتقارن در پایین دست بستر فرسایش پذیر می‌شود. گسترش و عمق فرسایش محلی بستگی به عوامل هیدرولیکی، زمین‌شناسی و هندسه حوضه دارد. آنچه مهم است آبشستگی ایجاد شده نباید خسارتی به حوضچه آرامش وارد کند. در ادامه ابتدا شرح مختصری از الگوی جریان ارائه و سپس به روش‌های محاسبه عمق آبشستگی ناشی از جریان در پایین دست حوضچه‌های آرامش پرداخته شده است.



شکل ۹-۱- آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش

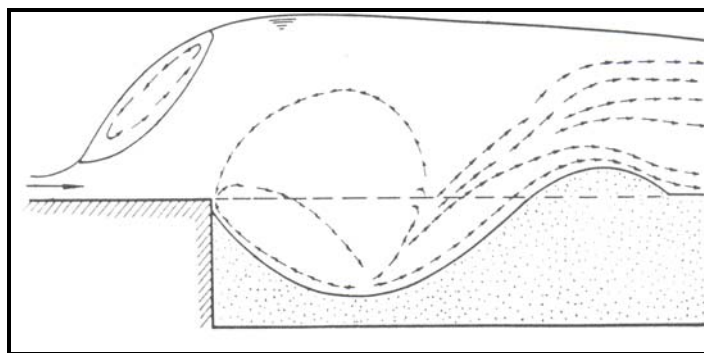
## ۹-۲- الگوی جریان

### ۹-۲-۱- الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش معمولی

هنگامی که جریان از روی یک سرریز به پایین می‌ریزد، انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. بخشی از این انرژی ممکن است روی یک کف بند بتنی با ایجاد یک پرش هیدرولیکی مستهلک گردد. جریان خروجی از حوضچه آرامش دارای سرعت بالایی است که ممکن است باعث فرسایش بستر پایین دست شود.

حرکت ذرات رسوب موجب تغییر در هندسه و توپوگرافی بستر می‌شود. انتقال رسوب در ابتدا به صورت بار معلق صورت می‌گیرد و تغییر بعد عمودی حفره سریع‌تر از بعد افقی آن خواهد بود. با عمیق شدن حفره، انتقال رسوب به صورت ترکیبی از بار بستر و بار معلق خواهد بود. شدت تعلیق تابعی از بده، عمق پایاب و خصوصیات مصالح می‌باشد و با عمیق شدن حفره کاهش می‌یابد. رسوبات معلق در حفره آبشستگی به دو بخش مجزا تقسیم می‌شوند؛ بخشی در امتداد خطوط جریان از حفره به پایین دست حرکت می‌کنند و بخشی در امتداد خطوط جریان برگشتی به سمت بالادست حرکت کرده و قسمتی از آن ته‌نشین می‌شود.

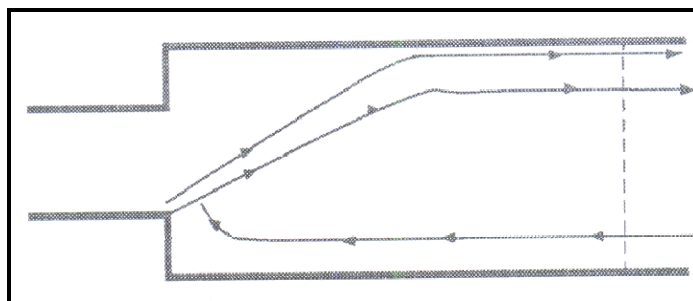
رسوباتی که به صورت بار بستر حرکت می‌نمایند نیز در عمیق‌ترین نقطه حفره آبستنگی به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخشی از آن به سمت پایین دست حرکت کرده و به بیرون حفره می‌رود؛ بخش دیگر توسط گردابه‌های برگشتی به سمت بالادست حفره آبستنگی حرکت کرده و برخی از ذرات رسوب روی شیب بالادست حفره ته‌نشین می‌شود. بخشی از رسوبات ته‌نشین شده دوباره توسط جریان به حرکت در آمده و روند گفته شده تکرار می‌شود. این پدیده در حالتی که عمق پایاب کم است اتفاق می‌افتد و معمولاً همراه با نوسان در موقعیت پرش هیدرولیکی خواهد بود (شکل ۹-۲). رسوبات خارج شده از حفره آبستنگی در پایین دست حفره ته‌نشین می‌شوند و یک برآمدگی را تشکیل می‌دهند. در شرایط پایاب عمیق، ارتفاع برآمدگی رشد بیش‌تری خواهد کرد. اما با سپری شدن زمان که طول حفره افزایش می‌یابد، روند افزایش ارتفاع برآمدگی به تدریج تقلیل می‌یابد.



شکل ۹-۲- الگوی جریان در فرآیند آبستنگی پایین دست یک پرش هیدرولیکی

### ۹-۲-۲- الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی

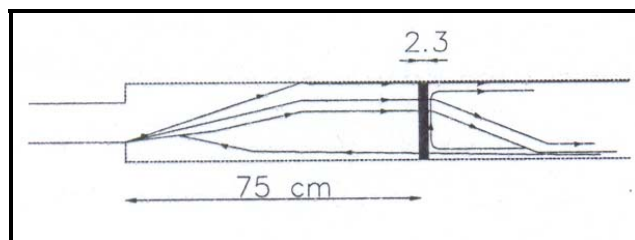
مشاهدات نجم (۲۰۰۴) نشان می‌دهد که الگوی جریان و به دنبال آن الگوی آبستنگی پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی در حالت بدون آستانه غیرمتقارن خواهند بود [۵۴-۵۶]. در این حالت جت اصلی جریان به صورت فوق بحرانی وارد حوضچه می‌گردد و به سمت یکی از دیواره‌های جانبی منحرف می‌شود (شکل ۹-۳). در این حالت حداکثر آبستنگی در همان مسیر جت اصلی اتفاق می‌افتد و یک حفره آبستنگی کوچک‌تر در سمت دیگر شکل می‌گیرد.



شکل ۹-۳- الگوی جریان در حالت بدون آستانه [۵۵]

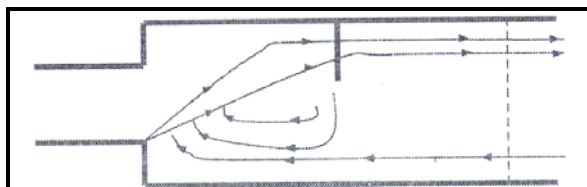
در حالت استفاده از آستانه انتهایی، الگوی جریان و آبستنگی همچنان نامتقارن است. حفره آبستنگی در جهت جت اصلی جریان شکل می‌گیرد. با افزایش عدد فرود جت اصلی، جریان در پایین دست بازشدگی منحرف می‌گردد و به یکی از طرفین حوضچه آرامش برخورد می‌کند و سپس موازی خط مرکزی حوضچه به سمت پایین دست پیش می‌رود تا به آستانه انتهایی برسد (شکل ۹-۴). وجود

آستانه انتهایی باعث تغییر جهت جریان به سمت دیگر کانال خواهد شد و باعث ایجاد یک حفره آبشستگی فرعی در نزدیک کف بند می‌گردد. در صورت وجود آستانه انتهایی، حفره آبشستگی نزدیک کناره کانال، در جهت جت اصلی جریان روی بستر متحرک شکل می‌گیرد. در این حالت حفره اصلی آبشستگی غیریکنواخت است و طول و عرض غیر یکسان دارد.

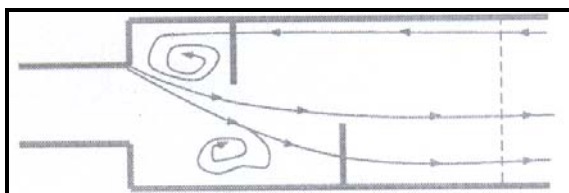


شکل ۹-۴- الگوی جریان در صورت وجود آستانه انتهایی [۵۴]

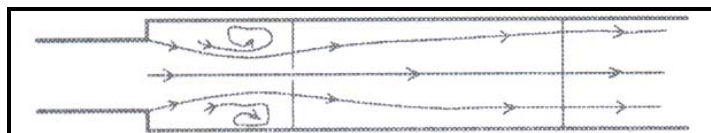
الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی در سایر حالات قرارگیری آستانه در شکل (۹-۵) نشان داده شده است.



الف- وجود یک آستانه جانبی نامتقارن



ب- وجود دو آستانه جانبی نامتقارن



ج- وجود دو آستانه جانبی متقارن

شکل ۹-۵- الگوی جریان در سایر حالات قرارگیری آستانه [۵۴]

## ۹-۳- تغییرات زمانی آبستنگی

فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵ و ۱۹۸۲) مطالعاتی روی آبستنگی ناشی از جریان خروجی از یک حوضچه آرامش پایین دست یک سرریز انجام دادند (شکل ۹-۶). در این آزمایشات یک کف بند مسطح که طول آن تقریباً برابر طول پرش هیدرولیکی بود، استفاده شد. سه نوع پرش مورد آزمایش قرار گرفت: پرش هیدرولیکی مستغرق ( $y_t > d_1$ ، عمق مزدوج پرش هیدرولیکی است)، پرش هیدرولیکی متعادل و پرش هیدرولیکی پیشرونده به سمت پایین دست ( $y_t < d_1$ ). براساس نتایج این آزمایشات، توسعه زمانی عمق آبستنگی به صورت زیر بیان گردید [۳۰ و ۳۱]:

$$\frac{y_s}{d_0} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^\gamma \quad (۹-۱)$$

که در این رابطه:

$d_0$ : طول مشخصه ( $d_0 = 0.5h_d$ ) و  $h_d$  ارتفاع تاج سرریز از کف بند می‌باشد (متر)

$t$ : زمان (ثانیه)

$t_1$ : زمان مشخصه که در آن حداکثر عمق آبستنگی برابر  $d_0$  شود (ثانیه)

$y_s$ : عمق آبستنگی در زمان  $t$  (متر)

$\gamma$ : ضریبی که در محدوده ۰/۲۳ الی ۰/۲۲ قرار دارد.

زمان مشخصه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_1 = \frac{Ky_t^2 (s-1)^{1.4}}{(\alpha u - u_c)^3} \quad (۹-۲)$$

که در این رابطه:

$K=330 \text{ hours m}^{2.3}/\text{s}^{4.3}$  و  $t_1$  زمان مشخصه بر حسب ساعت (یا  $K=1.19 \times 10^6 \text{ m}^{2.3}/\text{s}^{3.3}$  بر حسب ثانیه)

$y_t$ : عمق پایاب (متر)

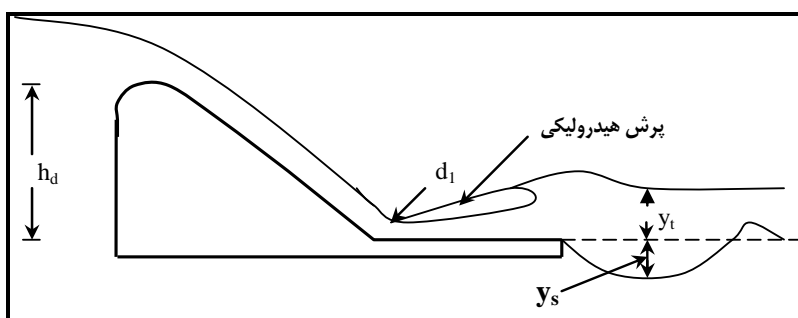
$u_c$ : سرعت بحرانی (m/s)

$u$ : سرعت متوسط جریان (m/s)،  $u = Q/A$  و  $Q$  بده ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) و  $A$  سطح مقطع جریان ( $\text{m}^2$ )

$\alpha$ : ضریب آشفتگی،  $\alpha = (1 + 3r_0)c_v$ ،  $c_v$  ضریب توزیع سرعت،  $c_v \approx 1.0$ ،  $r_0$  شدت نسبی آشفتگی (به فصل ششم مراجعه

شود)

$s$ : چگالی نسبی مصالح



شکل ۹-۶- نمای آزمایشات فرهودی و اسمیت (۱۹۸۵-۱۹۸۲)



درگاهی (۲۰۰۳) مطالعاتی مشابه آزمایشات فرهودی و اسمیت (۱۹۸۲) انجام داد [۲۲]. یک کف بند افقی که سطح آن صاف بود در پایین دست پاشنه سرریز قرار داشت. ایشان تغییرات زمانی حفره آبشستگی را به صورت زیر ارائه نمود:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = A \left( \frac{t}{t_s} \right)^n \quad (۳-۹)$$

که در این رابطه:

$t$ : زمان (ثانیه)

$y_{s,t}$ : عمق آبشستگی در زمان  $t$  (متر)

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی (متر)

$t_s$ : زمان مربوط به حداکثر عمق آبشستگی (ثانیه)

تحلیل آزمایشات ایشان نشان داد که  $A \approx 1$  است و  $n$  یک تابعی لگاریتمی بر حسب  $h_o/h_D$  به صورت زیر می‌باشد:

$$n = 0.17 \ln \left( \frac{h_o}{h_d} \right) - 0.04 \quad (۴-۹)$$

که  $h_o$  عمق آب روی سرریز و  $h_d$  ارتفاع سرریز می‌باشد.

#### ۹-۴- تخمین حداکثر عمق آبشستگی

##### ۹-۴-۱- روابط حداکثر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش معمولی

نواک (۱۹۵۵ و ۱۹۶۱) بیان نمود که با استفاده از یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی را در برگیرد، عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون استفاده از حوضچه آرامش حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. نواک با استفاده از معادله جایگزین رابطه زیر را برای عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش ارائه نمود که کمترین مقدار آبشستگی در حالت  $y_t/y_{tmin} = 1.6$  و بیشترین مقدار آبشستگی در حالت  $y_t/y_{tmin} = 1$  رخ می‌دهد. در این جا  $y_{tmin}$  حداقل عمق پایاب می‌باشد که برای شکل‌گیری پرش هیدرولیکی لازم است [۵۹ و ۶۰].

$$y_s = 0.55 [6H^{0.25} q^{0.5} \left( \frac{y_t}{d_{90}} \right)^{0.33} - y_t] \quad (۵-۹)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق حفره فرسایشی از بستر اولیه رودخانه (m)

$H$ : اختلاف تراز آب در بالادست و پایین دست (m)

$y_t$ : عمق پایاب (m)

$q$ : بده واحد عرض ( $m^2/s$ )

$d_{90}$ : اندازه ذرات رسوب (mm)

کاتاکلی و همکاران (۱۹۷۳) براساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک سرریز با حوضچه آرامش با طول  $5y_t$  رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش ارائه نمودند [۱۹]:

$$y_s = 1.6H_1^{0.2} q^{0.6} d_{90}^{-0.1} - y_t \quad (۶-۹)$$

که در این رابطه:

$H_1$ : اختلاف تراز آب بالادست از بستر اولیه (متر)

$d_{90}$ : اندازه ذرات (mm)

$q$ : بده در واحد عرض ( $m^2/s$ )

درگاهی (۲۰۰۳) با مطالعه روی آبشستگی پایین دست سرریز اوجی همراه با کف بند افقی، روابط زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمود [۲۲]:

$$\frac{y_s}{h_0} = 1.7 \left( \frac{h_0}{d_{50}} \right)^{1/4.5} \quad (7-9)$$

$$\frac{x_s}{h_0} = 5 \left( \frac{h_0}{d_{50}} \right)^{1/3} \quad (8-9)$$

که در این روابط:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی (m)

$x_s$ : موقعیت محل حداکثر عمق آبشستگی از لبه انتهایی کف بند (m)

$h_0$ : عمق آب روی سرریز (m)

$d_{50}$ : قطر متوسط مصالح بستر (mm)

#### ۹-۴-۲- روابط حداکثر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی با آرایش‌های مختلف آستانه

یکی از انواع حوضچه‌های آرامش، حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی در پایین دست می‌باشد. الگوی جریان و به تبع آن الگوی آبشستگی در پایین دست چنین سازه‌هایی متقارن نخواهد بود. تحقیقات زیادی در زمینه آبشستگی این نوع حوضچه‌های آرامش انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

#### ۹-۴-۱- در حالتی که آستانه وجود ندارد

فولادی و همکارانش (۱۹۸۷) مشاهده کردند که در این نوع حوضچه‌ها زمانی که جریان زیر بحرانی است، الگوی جریان متقارن خواهد بود. ایشان حداکثر عمق آبشستگی را با رابطه زیر به صورت تابعی از عدد فرود و نسبت انبساط بیان کردند [۳۲]:

$$\frac{y_s}{y_1} = 0.039 F_{r0} \left[ \frac{B-b}{b} \right]^{0.44} \quad (10-9)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی در امتداد خط مرکزی جریان

$y_1$ : عمق جریان ورودی

$F_{r0}$ : عدد ذرات که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{r0} = \frac{V_1}{[gd_{50}(s-1)]^{0.5}} \quad (11-9)$$

$V_1$ : سرعت جریان در کانال ورودی به حوضچه

$\rho_s$ : چگالی رسوب

$\rho$ : چگالی آب

$d_{50}$ : میانگین قطر ذرات بستر

$B$ : عرض جریان پایین دست

$b$ : عرض جریان ورودی به حوضچه

نجم (۲۰۰۲) مطالعاتی روی آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با باز شدگی ناگهانی (شکل ۷-۹) در حالت جریان فوق بحرانی انجام داد و برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی رابطه زیر را ارائه نمود [۵۵]:

$$\frac{y_s}{y_G} = 1.13(F_G) - 28.9\left(\frac{d_{50}}{y_G}\right) + 0.26\left[F_G\left(\frac{B-b}{b}\right) + 2.1\right] - 3.59\left(\frac{y_G}{H_u}\right) \quad (۱۲-۹)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی

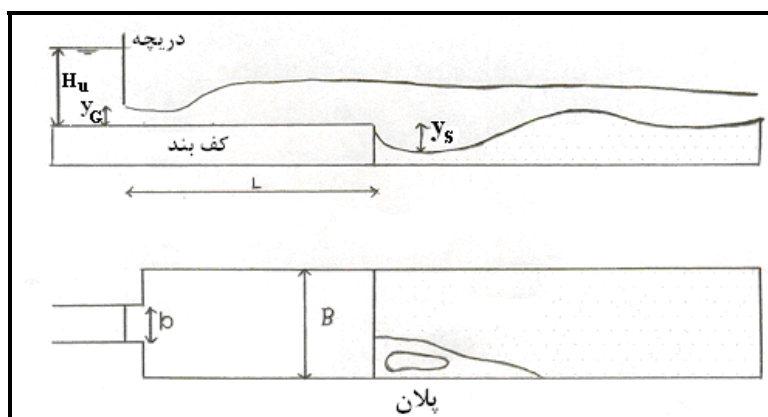
$y_G$ : ارتفاع باز شدگی دریچه

$$F_G = \frac{V_G}{\sqrt{gy_G}} \text{ : عدد فرود به صورت}$$

$V_G$ : سرعت میانگین زیر دریچه

$H_u$ : عمق آب در بالادست دریچه

$L$ : طول کف بند حوضچه آرامش



شکل ۷-۹- آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با باز شدگی ناگهانی [۵۵]

#### ۹-۴-۲-۲- در حالی که آستانه میانی وجود دارد

نجم (۲۰۰۲) مطالعاتی روی آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش با باز شدگی ناگهانی انجام داد. در این مطالعات از یک آستانه میانی در حوضچه آرامش استفاده گردید. (شکل ۸-۹). حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش در این حالت با رابطه زیر ارائه گردید [۵۵].

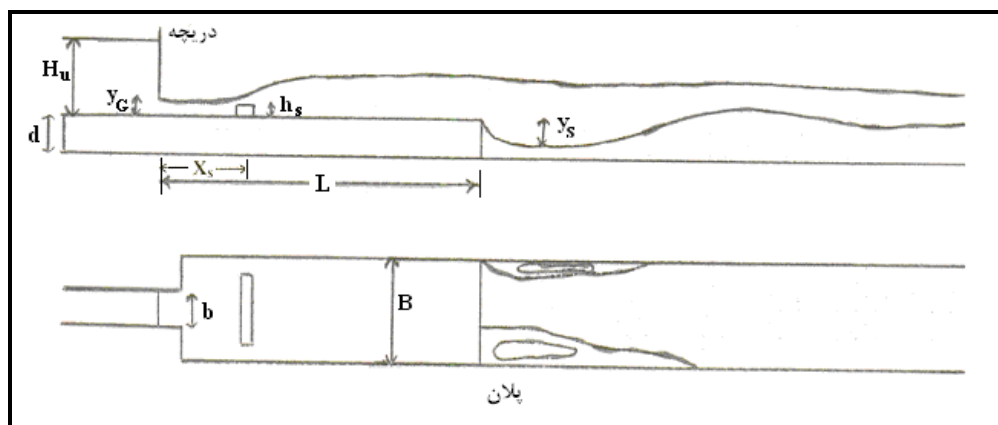
$$\frac{y_s}{y_G} = 1.27(F_G) - 17.3\left(\frac{d_{50}}{y_G}\right) + 0.25\left[F_G\left(\frac{B-b}{b}\right)\right] - 0.042\left(\frac{H_u}{y_G}\right) - 1.47\left(\frac{h_s}{y_G}\right) + 0.3\left(\frac{X_s}{L}\right) + 0.687 \quad (۱۳-۹)$$

که در این رابطه:

$y_s$ : حداکثر عمق آبشستگی

$X_s$ : فاصله محل آستانه از دریچه

$h_s$ : ارتفاع آستانه



شکل ۹-۸- آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی و وجود آستانه میانی [۵۵]

### ۹-۴-۲-۳- در حالتی که آستانه جانبی وجود دارد

نجم (۲۰۰۴) همچنین مطالعاتی روی آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی و وجود آستانه جانبی انجام داد (شکل ۹-۹). نجم برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش در حالت کلی رابطه زیر را ارائه کرد [۵۴].

$$\frac{y_s}{y_G} = a + bF_G \quad (۹-۱۴)$$

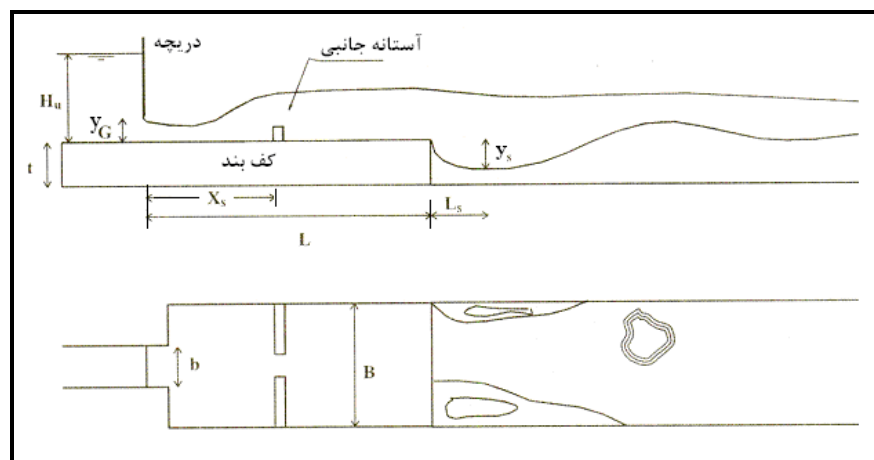
a و b ضرایبی که تابع  $\frac{X_s}{L}$  و  $\frac{W}{B}$  می‌باشند و در جدول (۹-۱) نشان داده شده‌اند.

$X_s$ : فاصله محل آستانه از دریچه

L: طول حوضچه آرامش

W: طول کلی آستانه‌های جانبی متقارن در جهت عمود بر جریان (زمانی که دو آستانه وجود دارد W دو برابر طول یکی از

آستانه‌های جانبی است)



شکل ۹-۹- آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی و وجود آستانه جانبی [۵۴]

جدول ۹-۱- ضرایب a و b در رابطه ۱۰-۱۴ بر حسب  $X_s/L$  و W/B

ب	a	$X_s/L$	W/B	آستانه انتهایی
۱/۶۵۵	-۱/۸۷۱	۱	1	بدون آستانه
۱/۳۹۵	-۱/۳۸۹	-	-	آستانه نامتقارن
۱/۱۱۷	-۱/۲۸	۰/۵	۰/۳۷	آستانه متقارن
۱/۱۲	-۱/۷۵۱	۰/۱۵	۰/۷۴	آستانه متقارن
۰/۹۶۴	-۱/۲۳۸	۰/۳۵	۰/۷۴	آستانه‌های نامتقارن
۱/۰۸۷	-۱/۶۰۱	۰/۵ ، ۰/۲۵	۰/۷۴	آستانه متقارن
۰/۶۵۸	-۰/۹۵۵	۰/۳۵	۰/۹	آستانه مرکزی
۰/۳۴۹	-۰/۳۹۳	۰/۳۵	۰/۷۴	آستانه پیوسته
۰/۱۰۲	-۰/۰۹۹	۰/۳۵	۱	آستانه انتهایی

## ۹-۴-۳- مثال

حداکثر عمق آبخستگی پایین دست حوضچه آرامش با مشخصات زیر بعد از ۳۶ ساعت چقدر است؟ (ضریب آشفستگی  $r_0 = 0.3$  می‌باشد)

جدول ۹-۲- مشخصات مربوط به مثال

مقادیر	مشخصات
2.29m	ارتفاع سرریز ( $h_d$ )
$0.37 \text{ m}^2/\text{s}$	بده ( $q$ )
ماسه	مصالح بستر
0.12mm	اندازه متوسط ذرات ( $d_{50}$ )
2.68	چگالی نسبی مصالح ( $s$ )
0.31m	عمق پایاب ( $h_t$ )

حل:

- سرعت متوسط:

$$u_o = q/h_t = 0.37/0.31 = 1.2 \text{ m/s}$$

- سرعت بحرانی را با روش شیلدز می‌توان به دست آورد:

$$D_* = d_{50}((s-1) \times g/v^2)^{1/3} = 120 \times 10^{-6} \times [1.68 \times 9.81 / (0.86 \times 10^{-6})^2]^{1/3} = 3.38$$

$$\theta_c = 0.24 \times D_*^{-1} = 0.0711 \quad (D_* < 4)$$

$$u_c = 2.5 \sqrt{\theta_c (s-1) g d} \ln(12h_t/k_s), \quad k_s = 3d_{50}$$

$$= 2.5 \sqrt{0.0711 \times 1.68 \times 9.81 \times 120 \times 10^{-6}} \times \ln\left(\frac{12 \times 0.31}{3 \times 120 \times 10^{-6}}\right) = 0.29 \text{ m/s}$$

- زمان مشخصه

$$\alpha = (1 + 3r_0)c_v = (1 + 3 \times 0.3) \times 1 = 1.9$$

$$t_1 = \frac{330y_t^2(s-1)^{1.4}}{(\alpha u_0 - u_c)^3} = \frac{330 \times 0.61^2 \times 1.68^{1.4}}{(1.9 \times 1.2 - 0.29)^3} = 3 \text{ hours}$$

$$d_0 = \frac{1}{2} \times h_d = \frac{1}{2} \times 2.29 = 1.145 \text{ m}$$

- برای حداکثر عمق آبستنگی بعد از ۳۶ ساعت با استفاده از معادله (۹-۱) داریم:

$$y_s = d_0 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{0.2} = 1.145 \times (36/31)^{0.2} = 1.2 \text{ m}$$

بنابراین بعد از ۳۶ ساعت حداکثر عمق آبستنگی برابر ۱.۲ m می‌باشد.

## منابع و مراجع

- ۱- آذر فرادنبه، اردشیر، «اثر دانه‌بندی مصالح بر میزان آبستتگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، (۱۳۷۷).
- ۲- معدلی، ناصر؛ فرهودی، جواد، (۱۳۷۵)، «تاثیر فاصله‌ی پایه‌های پل بر عمق آبستتگی پایه‌ی پل»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، گروه مهندسی آبیاری، دانشگاه ارومیه.
- ۳- بیات، حبیب‌اله، «اندرکنش سازه‌های آبی و فرسایش»، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۹).
- ۴- نجفی، جواد، «آبستتگی پایین‌دست کالورت لوله‌ای»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، (۱۳۸۱).
- ۵- «راهنمای آزمایش‌های دانه‌بندی رسوب»، نشریه شماره ۲۶۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور.
- ۶- «راهنمای تعیین دوره بازگشت سیلاب طراحی برای کارهای مهندسی رودخانه»، نشریه شماره ۳۱۶ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور.
- ۷- نصرالهی، علی، «بررسی تاثیر درصد بازشدگی بر روی آبستتگی اطراف آبشکن‌های باز»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۰).
- 8- Abida. H., Townsend. R. D., "Local scour downstream of box-culvert outlets", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.117, No.3, PP. 425-440, 1991.
- 9- Abt S. R., Kloberdanz R. L. and Mendoza C., "Unified culvert scour determination", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 10, PP. 1363-1367, 1984.
- 10- Aderibigbe O. O. and Rajaratnam N., "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets", Journal of Hydraulic Research, Vol. 34, No. 1, PP. 19-33, 1996.
- 11- Aderibigbe O. O. and Rajaratnam N., "Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets.", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 24, No. 10, PP. 1034-1042, 1998.
- 12- Atinbilek and Basmaci, "Localized scour at the downstream of outlet structures", 11th congress on large dam, Madrid, pp.105-121, 1973.
- 13- Balachandar. R., and Kells. J. A. "Instantaneous water surface and bed scour profiles using video image analysis" Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 25: 662-667, 1998.
- 14- Barkdoll. B. B. "Time scale for local scour at bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.126, No.10, pp.793-794, 2000.
- 15- Bohan. J. P., "Erosion and riprap requirements at culvert and storm drain outlets", Hydr. Lab. Investigation, Rep. H-70-2, U.S. Army Waterway. Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1970.
- 16- Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. "Scouring", Hydraulic structures design manual, volume 2, Balkema, Rotterdam, 1991.

- 17- Breusers.H. N. C “Time scale of two dimesional local scour” . Proc of symposium on model and prototype conformity: Hydraulic research Laboratory, Poona. 1966.
- 18- Buchko, M. F., Kolman.P. A and Pilarczy.K.W “Investigation of local scour in cohissionless sediments using a tunnel model”, IAHR- Congress Laussan: Topics in hydraulic modeling:23-239.1987.
- 19- Catakli.O. et al. “A study of scour at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipators”. Proc. 11<sup>th</sup> Int. Congress on large dams, Madrid.Q41 R2; 23-37. 1973
- 20- Clarke, F. R.W. The action of submerged jets on movable materials. PhD Thesis Imperial college, London. 1962.
- 21- Cola. R. "Energy dissipation of high velocity vertical jet entering a basin" International association for hydraulic research conference. No.X1. Leningrad. U.S.S.R.. Paper 1.52. Vol.1. 1965.
- 22- Dargahi, B. “Scour development downstream of a spillway”. Journal of Hydraulic Research, vol. 41, No. 4, 2003.
- 23- Davis, C. V., and Sorenson, E. K., Handbook of applied hydraulic, 3<sup>rd</sup> ed., Chapt.20. McGraw Hill Book Co., New York, N.Y., 1969.
- 24- Delft Hydraulic systematic investigation of two and three dimensional local scour. Investigation M648/M863/M847, 1972
- 25- Delft Hydraulics prototype scour hole. Investigation M1533. Parts I.II.III and IV. 1979.
- 26- Dietz, J. W. Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei stromendem Abflub. Mitteilungen , Heft 155. Universutat fridericiana Karlsruhe. 1969.
- 27- Doehring, F. and Abt. S. R., "Drop height influence on outlet scour". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No 12, PP.1470-1476. 1994.
- 28- Doddiah, D., Albertson, M. L. and Thomas, R. “Scour from jets. ” *Proc. IAHR Congress*, International Association for Hydraulic Research, pp 161–169, 1953.
- 29- Ettema R., and Muste M., “Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol 130, No 7, pp 635-646 .2004.
- 30- Farhoudi, J. and Smith, V. H. “Local scour profiles downstream of hydraulic jump”. Journal of Hydraulic Research, vol. 23, 1985.
- 31- Farhoudi,J and Smith.K.V.H Time scale for scour downstream of hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering.108.HY10;1147-1161. 1982.
- 32- Fouladi Nashta, C., Garde, J. and Swamee P. K. "Subcritical flow in open channel expansions with movable bed". Journal of Hydraulic Research, 1987, vol. 25, n.1, pp. 89-102.1987.
- 33- Ghodsian, M., "Scour hole geometry downstream of a culvert", 13th APD-IAHR Conference, Singapore, August, 2002.



- 34- Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D., "Local scour due to free overfall jets". Journal of Water Management, Vol. 159, Isu WM4, pp.253-260, 2006.
- 35- Hannah, C. R. "Scour at pile groups". University of Canterbury, NEW ZEALAND, Civil Engineering Research, Rep. No. 78-3, 92, 1978.
- 36- Hartung F, Hausler E "Scours, stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams." In: ICOLD (ed) Proceedings of the 11th congress on large dams, Madrid, Q41, vol R3, pp 39-56, 1973.
- 37- Hoffman, G. J. C. M and Booji, R "Two dimensional mathematical modeling of local scour holes". Journal of hydraulic research, IAHR, Vol:31, No:5, 615-634, 1993.
- 38- Hoffmans, G. J. C. M. and Verhij, H. J., Scour Manual, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1997.
- 39- IIHR, Technical Report No. 398, "A Review of international literature of design practice and experience with low-head alluvial-channel grade-control structures", Tatsuaki Nakato, U. S. Army Engineer, Iowa Institute of Hydraulic Research, June 1998.
- 40- Jaeger, C h. "Uber die ahnlichkeit bei flussbaulichen modellversuchen." Wasserwirtschaft und wassertechnik 34, No 23/27, 1939.
- 41- Jorissen, R. E and Vrijling, "Local scour down strem of hydraulic constructions" , Proceedings 23<sup>rd</sup> IAHR congress, Ottawa: B433-B440, 1989.
- 42- Kells, J. A., Balachandar, R., and Hagel, K. P. "Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 28: 440 – 451, 2001.
- 43- Kothiyari, U. C. & R. J. Garde, & K. G. Ranga raju "Temporal variation of scour around circular bridge piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 8, pp. 1091-1106, 1992.
- 44- Leo C. Van Rijn, "Principles of Sediment Transport", 1990.
- 45- Martins, R "Contribution to the knowledge on scour action of free jets on rocky river beds, 11<sup>th</sup> Inter. Comm. on large dams, Trans., Vol IIQ41, Paper R44, pp.799-814
- 46- Mashahir, M. B., & Zarrati, A. R., and Mokallaf, E. "Depth of scour at groups of two bridge piers", Proceedings of the 3rd Conference on Scour and Erosion, 2006.
- 47- Mason, P. and Arumugam, K., "Free jet scour below dams and flip buckets", Journal of Hydraulic Engineering , Vol:111, No:2, 220-223, 1985.
- 48- Mason, P. J., "Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. Water Power & Dam Construction, September/October, 1993.
- 49- May, J. C. Ackers, A. M. Kirby, Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, London, 2002.
- 50- Melville, B. W. and Coleman, S., "Bridge Scour", water resources research, 2000.

- 51- Melville, B. W. & Chiew, Y. M. "Time Scale for local scour at bridge piers". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65, 1999.
- 52- Melville, B. W. "Local scour at bridge sities". University of Auckland, New Zealand, PhD. Thesis, Dept. of Civil eng. Rep. No. 117, 1975.
- 53- Mosonyi, E. and Schoppmann, Ein beitragszurforschung von ortrichen auskolkungen hinter geneigten befestigungsstrecken in in abhangigkeit der zeit, Miteilungen des theodor rehbok Flubbaulaboratoriums, universitat Karlsruhe, 1968.
- 54- Nazariha, M. "Design relationships for maximum local scour depth for bridge pier groups." Thesis presented to the University of Ottawa, Canada, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD), 1996.
- 55- Negm, A. M. "Effect of sill arrangement on maximum scour depth downstream of abruptly enlarged stilling basins". Hydraulics of dams and river structures, 2004.
- 56- Negm, A. M., "Investigating scour characteristics downstream of sudden expanding stilling basin". conferences ICHE, Warsaw/ARTICLES, 2002.
- 57- Negm, A., M., "Investigating scour characteristics downstream of abruptly enlarged stilling basin", River flow, 2002.
- 58- Neil, C. R., Guide to Bridge Hydraulic, Road and transportation ASSOC of Canada (RTAC), 1987.
- 59- Nouh, M. "Local scour at pile groups in meandering channels". Proc. of IAHR, Symp. on Scale Effects In Modeling Sediment Transport Phenomenon, Toronto, Canada, 25-28 Aug., pp 164-179, 1986.
- 60- Novak, P. Study of stilling basins with special regard to their end sill. Proc. 6<sup>th</sup> IAHR Conference, The Hague, Paper C15, 1955.
- 61- Novak, P. "Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of stilling basin". Proc. 19th IAHR Conference., Dubrovink; 66-75, 1961.
- 62- Pemberton, E. L. and Lara, J. M., "Computing degradation and local scour", Technical Guidelines for Bureau of Reclamation, Engineering Research Center, January, 1984.
- 63- Peterson, M. S. River engineering, Prentice Hall, 1986.
- 64- PIANC "Guidelines for the Design and Construction of Flexible Revetments Incorporating Geotextile for Inland Waterway, Report of Working roup 4 of the Permanent Technical Commite I Supplement to Bulletin No 57, Brussels, 1987.
- 65- Przedwajski, B., Blazejewski, P. & Pilarzyk, K.W. River Training Techniques: Fundamentals, Design and Application " ,Balkema, Rotterdam, 1995.
- 66- Qadar, A., and Ansari, S. A. "Ultimate Depth of Scour around Bridge Piers ", Proc. of National Hydraulics Conference, Buffalo, New York, USA, p. 51-55, 1994.

- 
- 67- Rajaratnam, N., Berry, B. "Erosion by circular turbulent wall jets." *Journal of Hydraulic Research*, Vol.15, No.3, pp.277-289,1977.
- 68- Rajaratnam, N. and Beltaos, S., "Impinging circular turbulent jets", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 100, No.10, PP.1313-1328, 1974.
- 69- Rajaratnam, N., "Erosion by plane turbulent jets", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.19, No.4, PP. 339-358, 1981.
- 70- Rajaratnam, N., "Erosion by submerged circular jets", *proc. ASCE*, Vol. 108, No. 2, pp. 262-267, 1982.
- 71- Rajaratnam, N., "Erosion by unsubmerged plane water jets", In *Applying research to hydraulic practice*, Jakson, ASCE New York, 280-288, 1982.
- 72- Raudkivi, A. J. & Sutherland, A. J. "Scour at bridge crossings", *National Roads Board Research Unit, Bulletin No. 54*, Wellington, N. Z., p. 100, 1981.
- 73- Raudkivi, A. J. *Loose Boundary Hydraulics*, A. A. Balkema/ Rotterdam – Netherlands, 1998.
- 74- Richardson, E. V. & Davis, S. R. "Evaluating scour at bridges", *Hydr. Eng. Circular No. 18*, FHWA-IP-90-017, Fairbank Turner Hwy. Res. Ctr., McLean, Va. 1995.
- 75- Ruff, J. R., Abt, S. R., Mendoza, C., Shaikh, A. and Kloberdanz, R., "Scour at culvert outlets in mixed bed materials", *Colorado State University Engineering Research Center Report no. FHWA/RD-82/011*, Fort Collins Colorado, Sept 1982.
- 76- Sarkar, A. Me and Dey, S. "Scour downstream of aprons caused by sluices", *Water Management* 158, pp 55-64, 2005.
- 77- Shen, H. W. & Schneider, V. R. & Karaki, S. S. "Mechanics of local scour", U. S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standard, Inst. For Applied Tech., Washington, D. C. 1966.
- 78- Van der Meullen, T and Vinje, J. J. "Three dimensional local scour in noncohesive sediments", *Proc.16<sup>th</sup> IAHR- Congress*, Sao Paulo, Brasil,1975.
- 79- Vittal, N. & V. C. Kothyari & M. Haghightat. "Clear-water scour around bridge pier group", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 11, pp. 1309-1318, 1994.
- 80- White House, R. "Scour at marine structures" Thomas Terfold, London, 1998.
- 81- Whittaker, J. and M. Jäggi. 1986. *Blockschwelen*. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Nr. 91, Zurich.
- 82- Whittaker, J. G. and Schleiss, A. "Scour related to energy dissipation for high head structures, *Mitteilungen der versuchsanstalt für wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Zurich, 1984.

## خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر چهارصد عنوان نشریه تخصصی-فنی، در قالب آیین نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تألیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه پیوست در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال های اخیر در سایت اینترنتی <http://tec.mporg.ir> قابل دستیابی می باشد.

دفتر نظام فنی اجرایی

**Islamic Republic of Iran**  
**Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision**

# **Guideline for Estimation of Local Scour**

**No. 549**

Office of Deputy for Strategic Supervision

Bureau of Technical Execution System

<http://tec.mporg.ir>

Ministry of Energy

Bureau of Engineering and Technical  
Criteria for Water and Wastewater

<http://seso.moe.org.ir>

**2011**

## این نشریه

با عنوان «راهنمای روش‌های محاسبه آبخستگی موضعی» به منظور معرفی و آشنایی با روش‌های محاسبه آبخستگی موضعی تهیه شده است. در فصول مختلف این راهنما به موضوعاتی از قبیل انواع آبخستگی، مبانی فرسایش و رسوب در رودخانه‌ها، داده‌های لازم جهت تخمین عمق آبخستگی، آبخستگی موضعی اطراف پایه‌های پل، تکیه‌گاه‌ها و آبسکن‌ها، تثبیت‌کننده‌های بستر و همچنین آبخستگی ناشی از جت‌های ریزشی و حوضچه‌های آرامش اشاره شده است.