

بناام خدا

بررسی آبشستگی در سازه های هیدرولیکی و روشهای کنترل آن

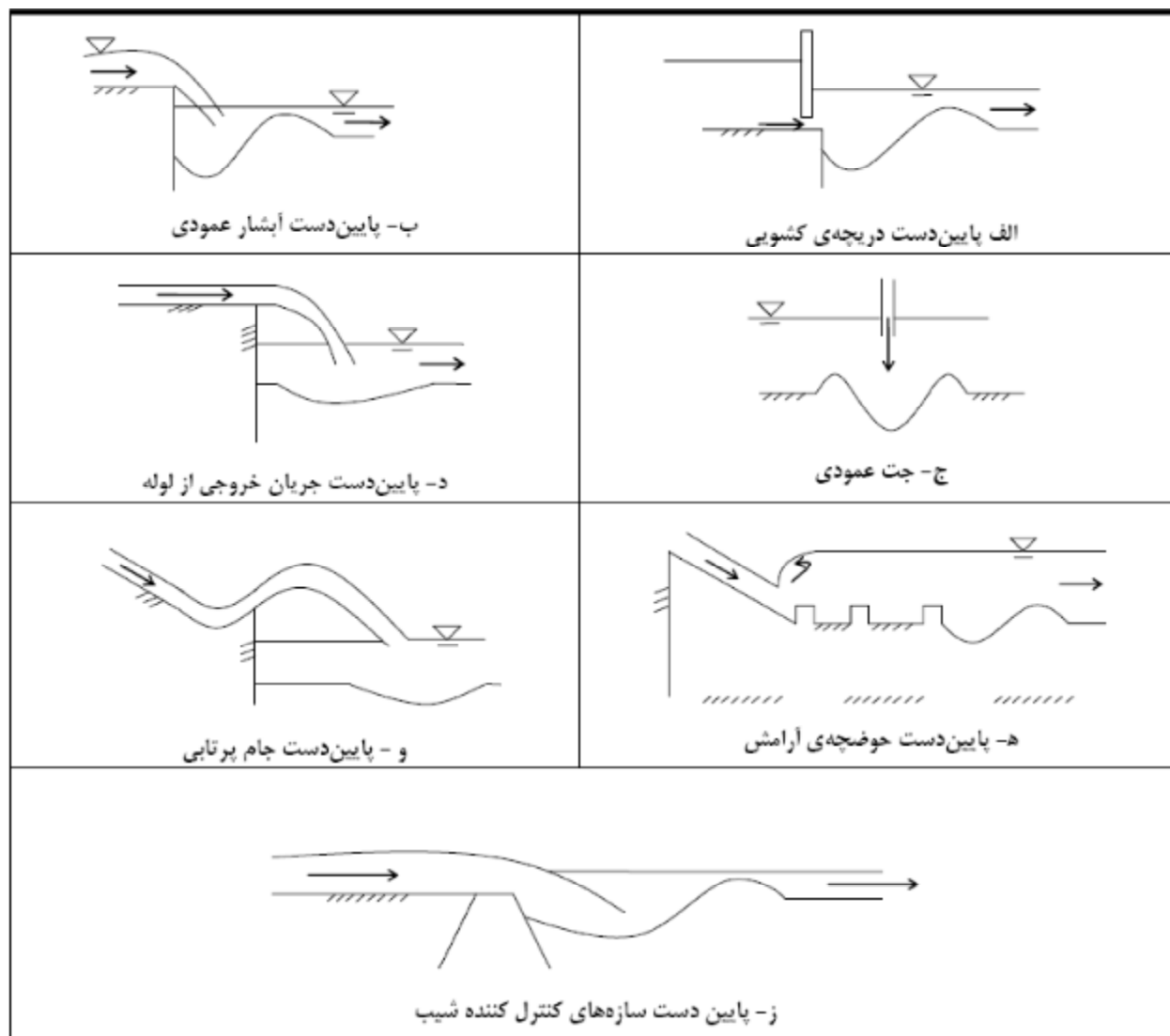
Erosion treatment techniques for hydraulic structures

شرکت مهندسين مشاور طرح افرا
بخش مطالعات آبياري و زهكشي

ترجمه و تأليف: دكتور روح الله فتاحي

مقدمه:

بحث آبستگي هر چند قدمتي طولاني در علم هيدروليک دارد، ليکن به دليل شرايط و پيچيدگي هاي خاص آن و همچنين به دليل نبودن رابطه اي مناسب که بتواند پاسخگوي تمامي شرايط باشد، همچنان مورد توجه خاص محققين علم هيدروليک و مهندسي رودخانه است. سازه هاي هيدروليکي که به صورت مانعي در برابر جريان قرار مي گيرند، الگوي جريان در نزديکي خود را تغيير مي دهند و به صورت موضعي باعث آبستگي در اين محدوده مي شوند شکل 1 تعدادي از سازه هاي هيدروليکي و آبستگي موضعي پايين دست آنها را نشان مي دهد.



شکل 1 (آبستگي موضعي در پايين دست برخي سازه هاي هيدروليکي)

اهميت بررسي پديده آبستگي زماني آشکار مي گردد که عمق آبستگي قابل ملاحظه باشد به گونه اي که اين عمق به پي سازه هاي رودخانه اي برسد و پايداري اين سازه ها را در معرض خطر قرار دهد يا موجب تخريب آنها گردد. روشي که معمولا براي

تعیین میزان عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می گیرد، به کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل های فیزیکی می باشد. لازم به ذکر است علی رغم این که تاکنون مطالعات وسیعی جهت برآورد آبشستگی موضعی اطراف سازه های هیدرولیکی مختلف انجام شده است، اما هنوز رابطه ای عمومی و جامع برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی اطراف هیچ کدام از سازه های رودخانه ای-ارائه نشده است.

آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری است . آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت های انسان مانند ساخت سازه ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد . به طور کلی آبشستگی در اثر اندرکنش نیروهای زیر حاصل می شود:

- 1- نیروی محرک ناشی از جریان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می کند.
 - 2- نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن ذره که در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می شود.
- حرکت یک ذره هنگامی آغاز می شود که نیروهای اعمال شده توسط جریان یعنی نیروی کشسان (Drag force) و نیروی بالابرنده (Lift force) که باعث جدا شدن ذره از بستر می شوند، بر نیروی مقاوم ذره غالب آید.

مراحل توسعه آبشستگی

براساس مطالعاتی که توسط محققینی نظیر بروسرز (1966) ، دیتز (1969) و زنک (1978) انجام گرفته است، پدیده آبشستگی به طور کلی دارای چهار مرحله زیر است:

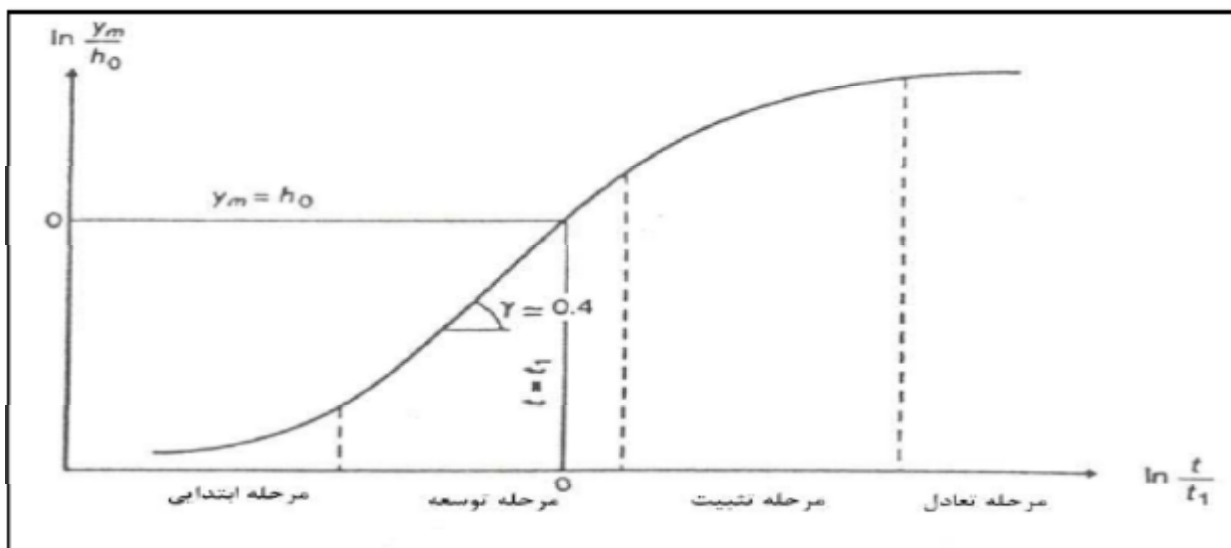
مرحله ابتدایی (Initial phase)

مرحله توسعه (Development phase)

مرحله تثبیت (stabilization phase)

مرحله تعادل (Equilibrium phase)

مرحله اول ظرفیت آبشستگی بالایی دارد و حفره آبشستگی در این مرحله آغاز می شود . در مرحله دوم عمق و ابعاد حفره آبشستگی گسترش می یابد . در مرحله سوم روند تغییرات نیمرخ بستر کاهش می یابد . در این مرحله، دیواره پایی ندست حفره آبشستگی دستخوش تغییرات محسوس ی می شود . 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 نمی شوند . در این مرحله، با توجه به شرایط نشان داده شده است جریان، ممکن است حتی جابجایی ذرات نیز متوقف شود هر کدام از مراحل آبشستگی در شکل 2 نشان داده شده اند.



شکل 2 (مراحل توسعه حفره آبشستگی)

انواع آبشستگی

آبشستگی از جنبه های مختلف به صورت زیر تقسیم بندی می شود:

آبشستگی از نظر علت به وجود آمدن آن، که شامل آبشستگی عمومی، آبشستگی ناشی از تنگ شدگی مقطع و آبشستگی موضعی است، از مجموع این سه آبشستگی، عمق آبشستگی کل به دست می آید.

آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب، که شامل آبشستگی در حالت آب زلال و آبشستگی در حالت آب حاوی رسوب است.

آبشستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره آبشستگی شامل آبشستگی استاتیکی و دینامیکی می شود.

آبشستگی عمومی (General scour)

این نوع آبشستگی زمانی رخ می دهد که جریان در بازه ای از رودخانه قادر باشد ذرات بستر را در طول مسیر جابجا و با خود حمل کند که باعث کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه می شود.

آبشستگی عمومی شامل موارد زیر می شود:

- 1- پایین افتادگی تراز رودخانه
 - 2- مهاجرت جانبی رودخانه یا جابجایی رودخانه در پلان
 - 3- آبشستگی در قوس رودخانه ها و ماندها
 - 4- آبشستگی در محل اتصال رودخانه ها و انشعابات
- پدیده های فوق به طور مستقیم به مشخصات حوضه آبریز و شکل رودخانه وابسته اند.

پایین افتادگی تراز رودخانه (Degredation)

پایین افتادگی بستر رودخانه ها، ناشی از فرسایش طولانی مدت در بستر رودخانه ها می باشد. پایین افتادگی تراز بستر به صورت یک پایین افتادگی کلی در بازه ای از رودخانه ظاهر می شود. این پایین افتادگی سبب می شود بازه، شیب طولی خود را به منظور تطبیق با نیازهای جریان و بار رسوبی حمل شده توسط جریان، تنظیم نماید. اگر بار رسوبی ورودی به بازه مورد نظر کم تر از ظرفیت حمل واقعی در آن بازه باشد، پایین افتادگی بستر از بالادست بازه آغاز می شود و به طرف پایین دست توسعه می یابد، به گونه ای که شیب طولی کلی بازه را کاهش می دهد، اما اگر آبراهه در پایین دست بازه مورد بحث، دارای ظرفیت حمل رسوب

بیشتری باشد، پایین افتادگی از قسمت پایین دست بازه مورد نظر شروع می شود و به بالادست پیشروی می نماید و موجب افزایش شیب بازه مورد نظر می گردد.

جابجایی آبراهه

جابجایی آبراهه ممکن است به طور طبیعی، یا در نتیجه فعالیت های بشری اتفاق بیفتد. جابجایی بخشی از آبراهه به عنوان قسمتی از فرآیند پیشروی پیچانرود یا جابجایی بخش عمیق آبراهه به سمت جداره های آبراهه، می تواند مشکلاتی را برای رودخانه وسازه های هیدرولیکی مربوط به همراه داشته باشد.

در بعضی موارد مانند وقوع سیلاب، جابجایی آبراهه ممکن است به سرعت اتفاق افتد. ولی در موارد دیگر ممکن است این امر به صورت تدریجی حادث شود. در نظر گرفتن پتانسیل جابجایی آبراهه، بخش مهمی از طراحی سازه های مرتبط با رودخانه است. به طور کلی اگر پتانسیل جابجایی رودخانه وجود داشته باشد، پی ها باید براساس جابجایی آبی بستر رودخانه طراحی شوند. همچنین با بررسی احتمال جابجایی بستر رودخانه در آینده، روش های حفاظتی و ساماندهی رودخانه می تواند جهت جلوگیری یا محدود کردن جابجایی های بستر رودخانه انجام گیرد.

آبشستگی در خم رودخانهها (Bend scour)

یکی از مشخصه های جریان در قوس رودخانه ها، وجود جریان های حلزونی است که موجب افزایش آبشستگی در ساحل خارجی خم می گردد. آبشستگی در خم ها ممکن است مربوط به پیش روی ماندر نیز باشد. آبشستگی خم که در شکل 3 نشان داده شده است یک فرآیند پیچیده است و به پارامترهای زیر بستگی دارد:

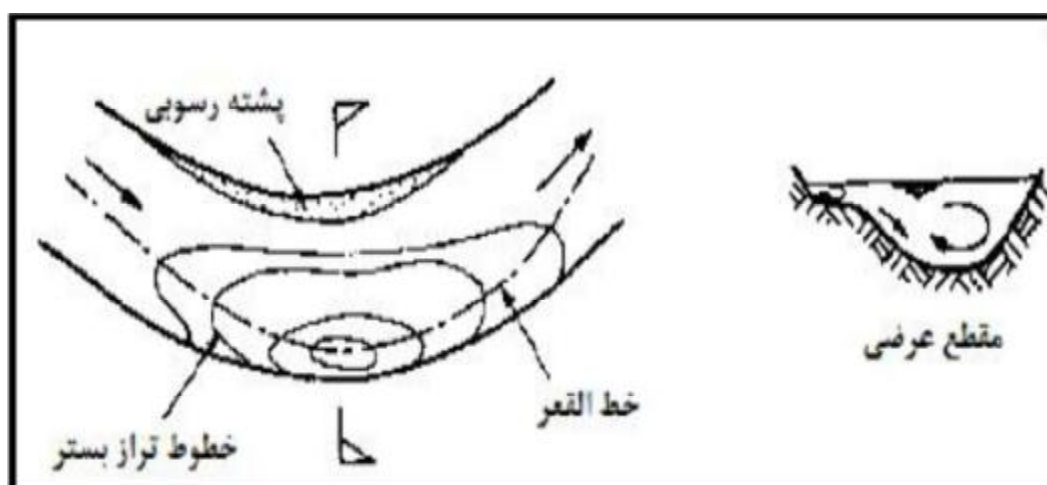
انحنای خم

1- نسبت عرض به عمق جریان

2- خصوصیات جریان

3- فرسایش پذیری جداره

4- دانه بندی مصالح بستر



شکل 3 (نمایی از آبشستگی جداره خارجی خم رودخانه و جریان ثانویه)

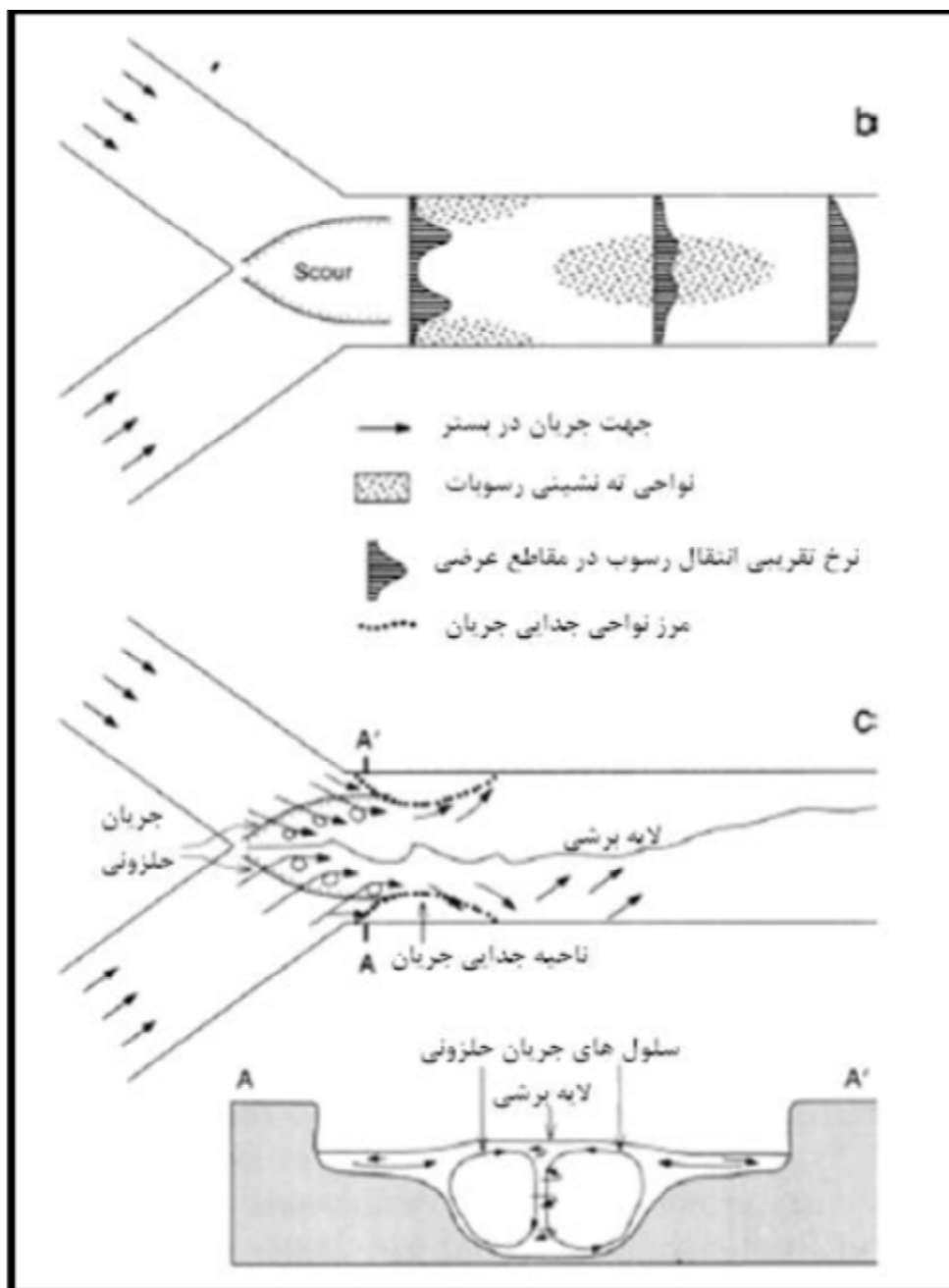
آبشستگی در محل اتصال آبراههها (Confluence scour)

نوعی آبشستگی است که در محل تقاطع دو رودخانه یا تقاطع آبراهه ها در یک رودخانه شریانی ایجاد می شود. ملویل و کلمن (2000) فرآیند آبشستگی در تقاطع آبراهه ها را چنین عنوان نمودند: جریان های عبوری از دو رودخانه همگرا در محور مرکزی تقاطع با یکدیگر برخورد کرده و به سمت بستر منحرف می شوند. این جریان پس از برخورد با بستر با حرکت در جهت پایین دست به سمت سطح آب بر می گردند.

در شکل 4 چگونگی فرآیند برخورد دو جریان و آبشستگی حاصل از آن نشان داده شده است.

آبشستگی ناشی از تنگ شدگی (Contraction scour)

وجود تنگ شدگی مقطع در مسیر جریان باعث افزایش سرعت جریان و بالا رفتن قدرت فرسایشی جریان در این محل می شود آبشستگی ایجاد شده در این حالت را آبشستگی ناشی از تنگ شدگی می گویند. آبشستگی ناشی از تنگ شدگی به طور معمول نتیجه محدود کردن عرض رودخانه می باشد. به عنوان مثال تکیه گاه های کناری پل ها و پایه های پل که در وسط آبراهه احداث می گردند، باعث کاهش عرض مجرا و در نتیجه آبشستگی می شوند.



شکل 4 (الگوی جریان، رسوبگذاری و فرسایش در تقاطع دو رودخانه)

آبشستگی موضعی (Local scour)

این نوع آبشستگی ناشی از اثر موضعی سازه بر روی الگوی جریان می باشد که به صورت موضعی در پایین دست و یا اطراف سازه مورد نظر رخ می دهد. این نوع آبشستگی ممکن است به تنهایی و یا به همراه آبشستگی های دیگر باشد. آبشستگی موضعی بر اثر ایجاد موانعی مانند پایه های پل ها، تکیه گاه های کناری و آبشکن ها در مسیر جریان و در اطراف این موانع رخ می دهد. این موانع می توانند سرعت موضعی جریان و آشفستگی آن را افزایش دهند و بسته به شکل سازه می توانند گردابه هایی ایجاد نمایند که

نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در حوالی این سازه ها افزایش میابد و منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می گردد.

آبشستگی کل (Total scour)

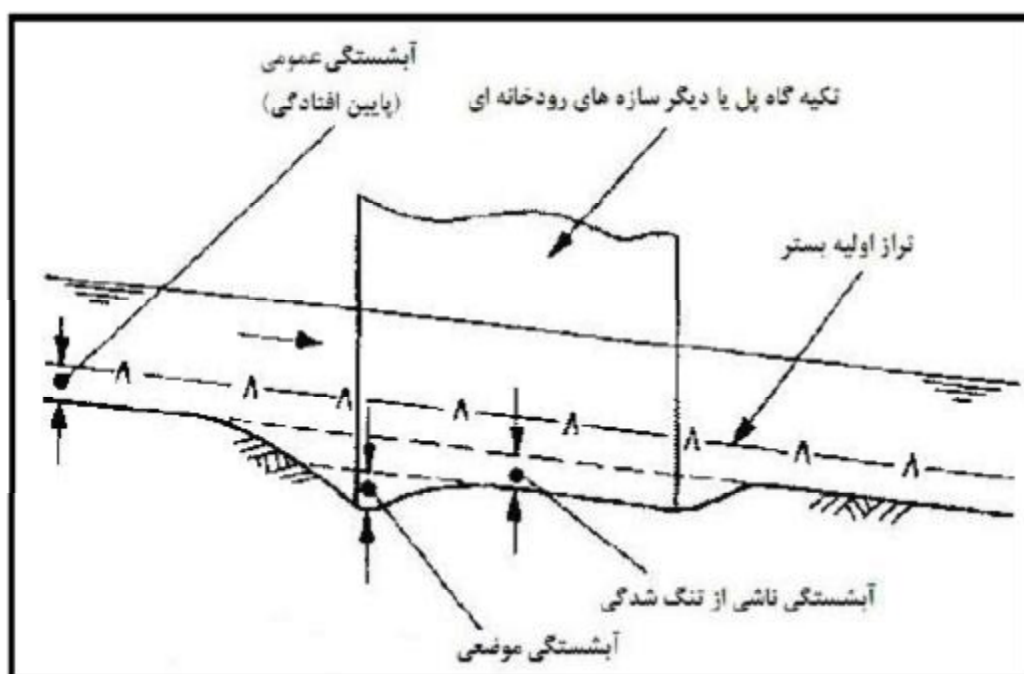
عمق آبشستگی کل مرتبط با یک سازه مشخص، از مجموع سه آبشستگی زیر به دست می آید:

آبشستگی عمومی

آبشستگی ناشی از تنگ شدگی

آبشستگی موضعی

تراز موضعی بستر حاصل از هر کدام از آبشستگی های فوق، به عنوان شرایط اولیه برای تخمین قسمت دیگر به کار می رود. شکل 5 نمونه ای از سه قسمت آبشستگی کل را نشان می دهد.



شکل 5 (اجزای آبشستگی)

آبشستگی در آب زلال و آب حاوی رسوب (Clear water and Live bed scour)

آبشستگی در آب زلال در شرایطی اتفاق می افتد که مواد بستر در بالادست محدوده آبشستگی در جای خود ثابت باشند و به آستانه حرکت نرسیده باشند. به عبارت دیگر جریان ورودی از بالادست حاوی رسوب نباشد. هنگامی که سرعت جریان افزایش می یابد، میزان آبشستگی آب زلال تا زمان آغاز حرکت کلی مصالح بستر افزایش می یابد. از این زمان به بعد، تغذیه رسوبات از بالادست آغاز می شود. در این حالت جریان از بالادست حاوی رسوب است. آبشستگی در آب حاوی رسوب سریع تر به مقدار حداکثر می رسد. در جریان های حاوی رسوب عمق آبشستگی حول یک مقدار میانگین نوسان می نماید. آبشستگی موضعی برای

رسوبات یکنواخت در شرایط آب زلال در حالت $1 < \frac{u}{u_c}$ و در شرایط حمل رسوب در $1 > \frac{u}{u_c}$ و مقدار حداکثر عمق آبخستگی در $\frac{u}{u_c} = 1$ رخ می دهد. در این جا u سرعت متوسط جریان و u_c سرعت بحرانی در آستانه حرکت است.

آبخستگی استاتیکی و دینامیکی

اندازه گیری عمق حفره آبخستگی بعد از وقوع سیلاب می تواند همراه کننده باشد. زیرا حداکثر عمق آبخستگی معمولاً در زمان حداکثر سیلاب اتفاق می افتد و در خلال فروکش نمودن سیلاب قسمتی از حفره آبخستگی ممکن است پر شود. کاهش عمق آبخستگی ممکن است در اثر ته نشینی مصالح معلق شده در حفره آبخستگی یا ریزش شیب های دیواره حفره آبخستگی اتفاق افتد. در تحقیقات آزمایشگاهی معمولاً دو نوع آبخستگی در نظر گرفته می شود که با عناوین آبخستگی استاتیکی و آبخستگی دینامیکی نامیده می شوند. معمولاً عمق آبخستگی استاتیکی را عمق حفره در پایان آزمایش در نظر می گیرند که پس از ته نشینی احتمالی ذرات در حفره آبخستگی به جای می ماند و عمق آبخستگی دینامیکی، عمقی است که در هنگام انجام آزمایش و قبل از ته نشینی رسوبات در حفره آبخستگی وجود دارد.

داده های لازم جهت تخمین عمق آبخستگی

داده های مورد نیاز عبارتند از بده جریان، هندسه مقطع آبراهه، عمق جریان، مشخصات مصالح بستر و خصوصیات سازه های هیدرولیکی که تعیین عمق آبخستگی در اطراف آنها مورد نظر است.

بده جریان

در رودخانه ها لازم است تا ابتدا بده جریان برای سیلاب هایی با دوره بازگشت های مختلف محاسبه گردد. دوره بازگشت سیلاب، یک بازه متوسط زمانی بین سال هایی 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 می باشد. روش محاسبه بده سیلاب به طور کلی عبارتند از:

اندازه گیری مستقیم بده براساس اندازه گیری سرعت جریان یکی از روش های تعیین بده جریان است. با توجه به این که این اندازه گیری ها اغلب در مواقع سیلابی صورت نمی گیرد، بنابراین بده محتمل سیلاب باید با استفاده از برون یابی تعیین شود که موجب خطا در محاسبه سیلاب خواهد شد.

برای تعیین سیلاب محتمل، می توان از داده های قبلی موجود در ایستگاه های اندازه گیری در منطقه مورد نظر، استفاده نمود. در این حالت نیز با توجه به این که معمولاً مدت ثبت داده ها از دوره بازگشت سیلاب کمتر است باید از روش های آماری و احتمالاتی برای تعیین بده های نادر استفاده کرد.

روش های سیلاب منطقه ای نیز می تواند برای محاسبه بده جریان به کار گرفته شود. با استفاده از این روش ها یک ارتباط آماری بین بده و مشخصات حوضه آبریز، شیب رودخانه و متغیرهای دیگر برقرار می گردد. این روش ها مقدار بده اوج سیلاب را ارائه می دهند.

روش های محاسبه رواناب با استفاده از داده های آماری بارندگی و اطلاعات حوضه آبریز را نیز می توان برای محاسبه بده استفاده کرد. در این روش ها ابتدا با استفاده از داده های بارندگی، هیدروگراف واحد تعیین شده و سپس شکل هیدروگراف اصلی و مقدار بده اوج سیلاب محاسبه می گردد.

روش دیگر محاسبه بده، استفاده از بده های سیلابی در حوضه های مشابه با حوضه مورد نظر است. در این روش بده سیلاب براساس اطلاعات مربوط به حوضه یا حوضه های مشابه با حوضه مورد نظر به دست می آید.

در حالتی که داده های ایستگاه های اندازه گیری 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 عمق آبشستگی استفاده می شود. برای پروژه‌های مهم، اغلب دوره بازگشت سیلاب 100-200 سال انتخاب می شود. 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:

$$P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N$$

N: عمر مفید سازه

P: ضریب احتمال

T: دوره بازگشت سیلاب

ارتباط بین دوره بازگشت سیلاب و عمر مفید سازه با تغییرات ضریب احتمال به صورت جدول 1 است:

جدول 1 (ارتباط بین دوره بازگشت سیلاب و عمر مفید سازه با تغییرات ضریب احتمال)

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

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.

هندسه مقطع

برای ارزیابی آبشستگی محتمل اطراف سازه های هیدرولیکی، اطلاعات شکل سطح مقطع، هندسه پلان رودخانه و سیلاب دشت‌ها لازم است. این اطلاعات می تواند از منابع زیر حاصل گردد:

نقشه برداری جدید

اطلاعات مربوط به نقشه برداری های قبلی

نقشه های بزرگ مقیاس

عکس های هوایی

عکس های ماهواره ای

برای پروژه‌های بزرگ و مهم معمولاً جهت به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز از وضعیت آبراهه لازم است عملیات نقشه برداری انجام پذیرد. البته مقایسه این اطلاعات با داده‌های قبلی به منظور تشخیص تغییرات دراز مدت شکل و موقعیت آبراهه اصلی، به خصوص برای رودخانه‌های ماندری و شریانی می تواند مهم باشد. میزان اطلاعات و نقشه برداری مورد نیاز برای طراحی به وسعت و

طبیعت پروژه بستگی دارد، به عنوان یک تقریب اولیه فواصل مقاطع عرضی در بالادست و پایین دست پروژه برابر 50 متر توصیه می‌شود. برای سیلاب‌دشت‌ها اگر شکل مقطع آنها منظم باشد، فواصل مقاطع عرضی 100-150 متر مناسب است. اگر طراحی روش‌های حفاظتی مد نظر باشد، تهیه منحنی‌های هم تراز 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 گیرد. فاصله مورد نیاز بین مقاطع عرضی در فواصل دورتر از محل پروژه براساس شیب رودخانه انتخاب می‌گردد، برخی از توصیه‌های مناسب در جدول 2 آورده شده است. این مقادیر برای حالتی است که سطح مقطع مجرا نسبتاً در مورد این فواصل منظم باشد، ولی چنانچه تغییرات ناگهانی یا مشخصه‌های ویژه ای مشاهده شود، باید مقاطع بیشتری بین بازه‌ها در نظر گرفت.

جدول 2 (فواصل توصیه شده بین مقاطع عرضی برای نقشه برداری)

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

تراز سطح آب و عمق جریان

روش های به دست آوردن تراز سطح آب عبارتند از:

تحلیل آماری داده های تراز سطح آب مربوط به سال های قبل اندازه گیری شده در ایستگاههای نزدیک براساس محاسبات هیدرولیکی، با استفاده از بده سیلاب محاسبه شده و داده های مربوط به هندسه مقاطع و شیب طولی رودخانه اطلاعات محلی گزارش شده توسط افراد محلی در مورد تراز سطح آب در سیلاب های 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 متوسط گیری 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. به طور کلی اهمیت پروژه و هزینه و پیچیدگی تحقیق می‌تواند در انتخاب مدل‌های مزبور برای انجام محاسبات موثر باشد. روش های مختلفی برای تعیین عمق آب وجود دارد، در ادامه یکی از این روشها آورده شده است: نمونه ای از مقاطع عرضی در رودخانه در شکل 6 نشان داده شده است. چنانچه تغییرات زیادی در مقاطع عرضی وجود نداشته باشد، مراحل تعیین عمق آب در حالت مقطع پر به صورت زیر است:

تعیین تراز ی که آب وارد محدوده سیلاب‌دشت ها می شود در هر مقطع عرضی (تراز متوسط در حالت مقطع پر) Z_{bf}

محاسبه عرض سطح جریان در حالت پر B_{bf}

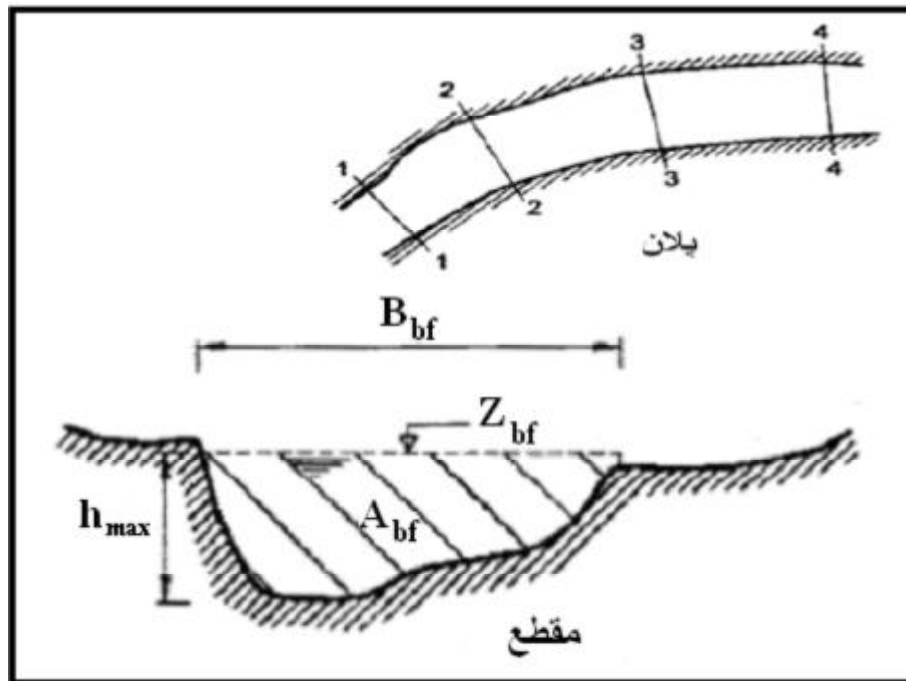
محاسبه سطح مقطع جریان A_{bf} برای عرض B_{bf} و تراز Z_{bf}

تعیین حداکثر عمق آب h_{max} بین Z_{bf} و پایین ترین نقطه سطح مقطع

متوسط گیری از مقادیر محاسبه شده برای B_{bf} و A_{bf} ($\bar{B}_{bf}$ و $\bar{A}_{bf}$)

عمق متوسط آبراهه اصلی h_{bf} از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$h_{bf} = \frac{\bar{A}_{bf}}{\bar{B}_{bf}}$$



شکل 6 (شکل و هندسه مقطع رودخانه)

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 غیر یکنواختی 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 مقاطعی 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 کم تر از 5 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.

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 چسبیده وجود ندارد، مشخصات دانه رسوب با نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های دانه بندی به دست می‌آید. دانه بندی 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 و 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 دانه بندی مشخص می‌شود، ولی برای رسوبات ریزدانه معمولاً این دسته بندی با آزمایش‌های خاص هیدرومتری تعیین می‌گردد.

خصوصیات سازه های مورد نظر

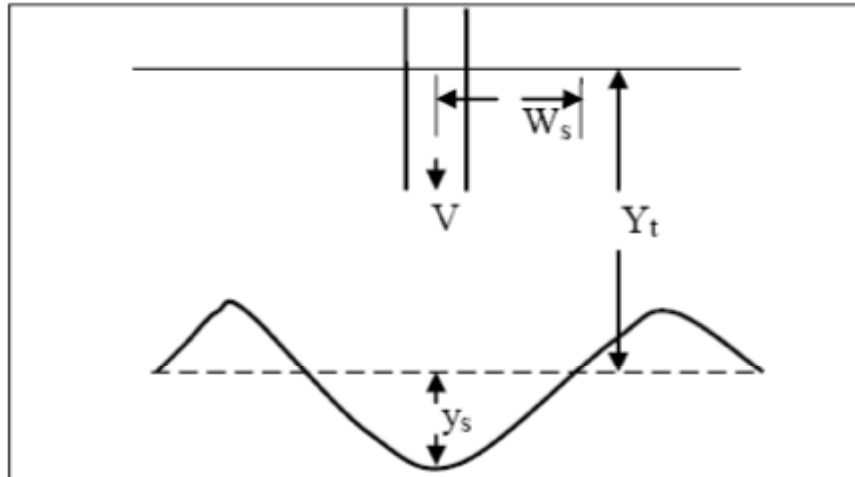
برای محاسبه عمق آبشستگی نیاز به خصوصیات سازه مورد نظر است. این خصوصیات شامل نوع سازه، هندسه سازه عرض یا ضخامت و ارتفاع، شکل، جانمایی و موقعیت سازه می‌باشد.

مکانیزم آبشستگی و معادلات ارائه شده آن جهت محاسبه در پایین دست سازه‌ها

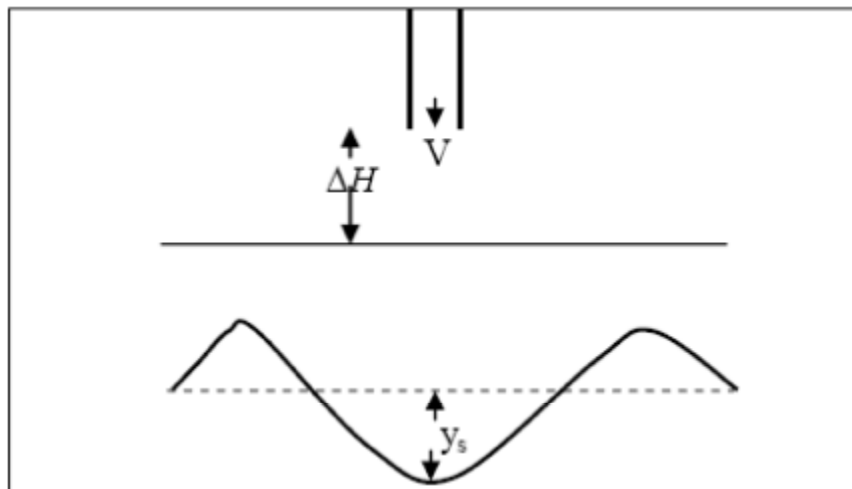
آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی

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 7 جت عمودی مستغرق و آزاد را نشان می‌دهد. جت‌های ریزشی را می‌توان به دو دسته جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل تقسیم بندی نمود. جریان در جت‌های عمودی، به طور عمودی با بستر برخورد می‌کند و حفره آبشستگی در جهت طولی و عرضی متقارن است، درحالی که 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.

الگوی جریان



شکل 7 الف (جت ریزشی مستغرق)



شکل 7 ب (جت ریزشی آزاد)

الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی

پس از برخورد جت عمودی به بستر، آبشستگی آغاز شده و ابتدا جت با زاویه حدود 180 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 ته نشین می‌شود.

ادبرینگ و راجاراتنام (1996) براساس مقادیر پارامتر فرسایش E_c و پارامتر فشار k جت مستغرق عمودی را به دو دسته جت با انحراف زیاد (Strongly Deflected Jet Regime) و جت با انحراف کم (Weakly Deflected Jet Regime) تقسیم بندی کردند شکل 8 الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از این دو نوع جت را نشان می‌دهد.

$$E_c = \frac{V \left[\frac{D}{H} \right]}{\sqrt{g d_{50} (s-1)}}$$

$$K = \left[\frac{V_b}{W} \right]$$

V_b : سرعت جت در برخورد با سطح مصالح بستر

W : سرعت سقوط ذرات بستر

D : قطر جت

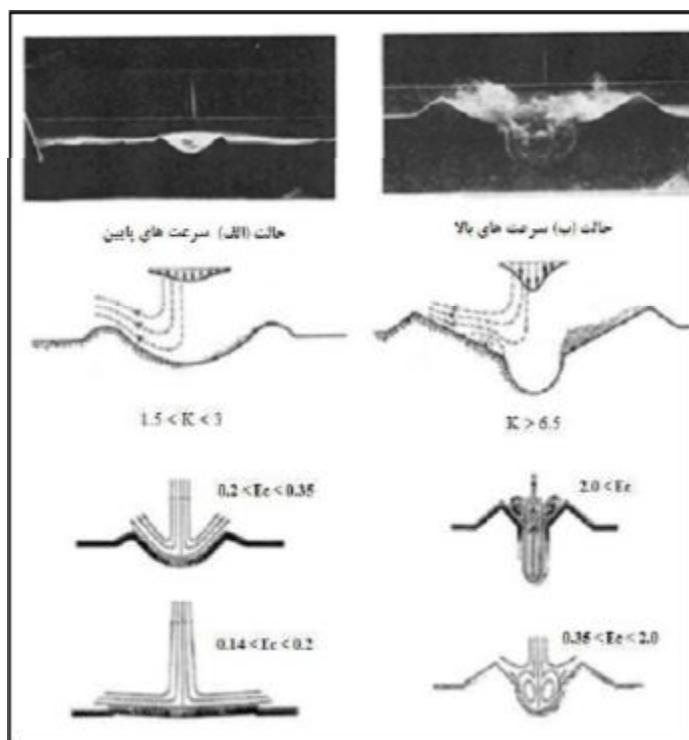
V : سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه)

g : شتاب جاذبه زمین (متر بر مجذور ثانیه)

d_{50} : قطر متوسط ذرات بستر (متر)

H : ارتفاع ریزش جت (متر)

S : چگالی نسبی



شکل 8) الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از آن برای جت‌های عمودی

جت با انحراف کم

این نوع جت در شرایط $0.35 < K < 1.5$ ایجاد می شود. در این حالت حفره آبشستگی کم عمقی ایجاد می شود و جت پس از برخورد به بستر، انحراف کمتری بین $(90 + f, 90)$ خواهد داشت. f در این جا زاویه استقرار ذرات بستر می باشد. جت دیواره ای حاصل از انحراف جریان، مسیر حفره را تا تاج برآمدگی اطراف حفره طی می کند. جدایی جریان در لبه حفره بر اثر تغییر شکل بستر حاصل می شود که البته تأثیری بر آبشستگی داخل حفره ندارد. مواد فرسایش یافته، پس از انحراف جت ته نشین شده و به صورت بار بستر در جهت شعاعی به سمت بیرون حمل می شوند. شعاع فرسایش r_0 که حداکثر فاصله حمل رسوبات می باشد، با گذشت زمان تغییر زیادی نمی کند، ولی حداکثر عمق فرسایش با افزایش هر دو پارامتر فشار و زمان فرسایش افزایش می یابد تا در نهایت به مقدار تعادل برسد. در این نوع جت، شیب کناره های حفره آبشستگی نسبت به E_C یا K بسیار حساس بوده و با افزایش این پارامترها مقدار آن افزایش می یابد.

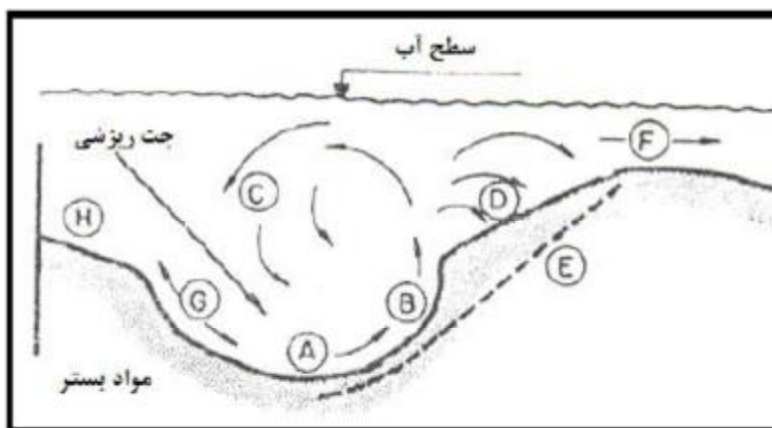
جت با انحراف زیاد

حفره آبشستگی ناشی از این نوع جت که دارای یک فرورفتگی عمیق در مرکز است و با یک سطح شیبدار به برآمدگی اطراف حفره وصل می شود، در شرایط $0.35 < K < 6.5$ تشکیل می شود. در این حالت، جت با زاویه ای بین $(180, 90 + f)$ درجه وابسته به E_C یا K تغییر جهت می دهد. این انحراف جت، مواد فرسایش یافته درون حفره را به صورت معلق به خارج حفره انتقال می دهد و در نتیجه ظرفیت انتقال جت در فواصل شعاعی بزرگتر، کاهش یافته و ذرات بر روی کناره های داخلی حفره آبشستگی ته نشین شده و به تدریج به سمت مرکز حفره سر می خورند و دوباره توسط جریان برداشته می شوند. در این نوع جت، جریان داخل حفره آبشستگی به صورت دورانی است و ذرات را به صورت معلق در حفره آبشستگی می چرخاند و پس از توقف جت، ذرات معلق در حفره ته نشین می شوند. بنابراین عمق آبشستگی استاتیکی (عمق آبشستگی پس از قطع جریان) کمتر از عمق آبشستگی دینامیکی (عمق آبشستگی در هنگام انجام آزمایش) است. در این حالت شیب اطراف حفره آبشستگی تقریباً برابر با زاویه استقرار ذرات در حالت مستغرق است. در این نوع جت، جدایی جریان در لبه داخلی حفره آبشستگی اتفاق می افتد. مواد فرسایش یافته از حفره آبشستگی توسط جت دیواره ای به صورت معلق به سمت بیرون حمل شده و در نهایت ته نشین می شوند. با افزایش E_C یا K زاویه انحراف جت افزایش می یابد و ممکن است به مقدار 180 درجه نیز برسد. هر چه زاویه جت منحرف شده بیشتر شود، قسمت بیشتری از مواد فرسایش یافته دوباره به داخل حفره آبشستگی باز می گردند و نمی توانند خود را از جریانات 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 ته نشین می شوند. این روند تا زمانی که تعادل دینامیکی بین جریان و شکل بستر به وجود آید ادامه می یابد.

الگوی جریان در جت های ریزشی مایل

در جت ریزشی مایل نیز فرآیند آب شستگی اولیه خیلی سریع است. شکل 9 الگوی جریان داخل حفره آبشستگی برای یک جت ریزشی مایل را نشان می دهد. در این حالت جت پس از برخورد با بستر، مواد فرسایش یافته را از ته حفره آبشستگی (محدوده A) شسته و همراه خود به سمت پایین دست (محدوده B) انتقال می دهد. در این محدوده بخشی از جت به همراه مصالح منحرف شده و تقریباً رو به بالا بلند می شود و قسمتی از جریان به سمت بالادست (محدوده C) بر می گردد و وارد جریان بالادست می شود. رسوبات همراه این جریان به صورت معلق داخل حفره باقی می ماندند. بقیه جریان به سمت پایین دست منتقل شده و بخشی از مواد فرسایش یافته همراه خود را روی سطح شیبدار در محدوده D ته نشین می کند و همراه بقیه ذرات به سمت پایین دست (محدوده F) حرکت می کند. تراز بستر در محدوده D به طور متناوب افزایش می یابد و مواد ته نشین شده در این سطح به تدریج سر خورده به داخل حفره اصلی باز می گردد. در نتیجه با گذشت زمان، سطح D تغییر یافته و سطح E پدیدار می شود. 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 به داخل حفره ریزش خواهند کرد.



شکل 9 (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 قطره‌های گوناگون درآید. زاویه برخورد جت با سطح آب q در فرآیند آبشستگی به خصوص شکل حفره تاثیر می‌گذارد. مطابق شکل 10 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 می‌ماند و مقدار آن برابر با سرعت اولیه جت خروجی یعنی V گرفته می‌شود. در خارج از این ناحیه، سرعت جت به دلیل پخشیدگی کم می‌شود و انرژی آن در جهت جت کاهش چشمگیری دارد.

تغییرات زمانی عمق آبشستگی

کلارک (1962) مطالعاتی روی جت‌های مستغرق عمودی دایره ای انجام داد و بیان نمود که عمق آبشستگی دینامیکی $y_{s,t}$ از عمق آبشستگی استاتیکی y_{ss} بزرگتر است. همچنین حدود 70 درصد عمق نهایی حفره آبشستگی در زمان‌های اولیه تشکیل می‌شود. کلارک برای تغییرات زمانی آبشستگی ناشی از جت عمودی دایره ای شکل و مستغرق روابط زیر را ارائه داد:

$$y_{s,t} = (0.21 \pm 0.003) D_C$$

$$\frac{D_C}{D} = 5.5 \left[\frac{V}{\sqrt{gD}} \right]^{0.43} \left[\frac{V}{w_s} \right]^{0.05} \left[\frac{gt}{w_s} \right]^{0.05}$$

D : قطر جت استوانه ای (متر)

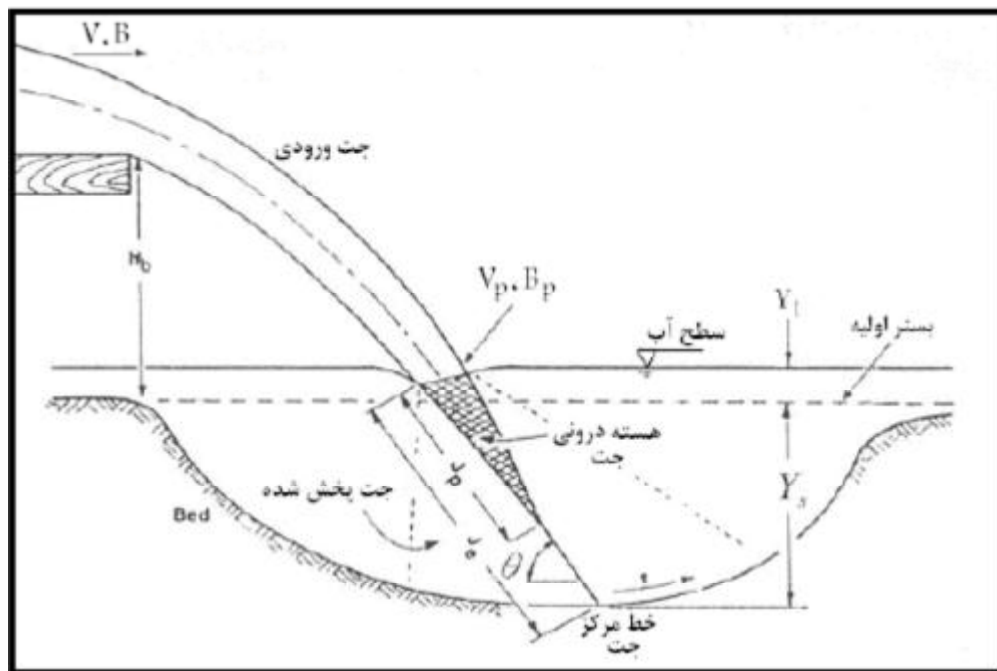
D_C : فاصله ی بین قله های ایجاد شده در دو طرف حفره ی آبشستگی (متر)

$y_{s,t}$: عمق حفره ی آبشستگی اندازه گیری شده از سطح اولیه بستر در زمان t (متر)

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

w_s : سرعت سقوط ذرات بستر (متر بر ثانیه)

t : زمان (ثانیه)



شکل 10 (شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل)

روابط تخمین ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی

آبشستگی 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 آبشستگی پایین‌دست جت‌های مستغرق نسبت به جت‌های آزاد متفاوت باشد. از جمله این پارامترها عمق پایاب می‌باشد که در آبشستگی پایین‌دست جت‌های مستغرق اثر کمتر ولی در جت‌های آزاد اثر بیشتری دارد.

روابط آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی عمودی

مطالعات راجارانتام (1981) روی جت‌های عمودی مستغرق با بستر ماسه‌ای به قطر متوسط $1/2$ و $2/83$ میلی متر منجر به رابطه زیر برای حداکثر عمق آبشستگی گردید:

$$\frac{y_s}{B} = 0.23 \left[\frac{V}{\sqrt{(S-1)gd_{50}}} \right] \left[\frac{H}{B} \right]^{0.5}$$

که در این رابطه :

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

راجاراتنام (1981) مطالعات دیگری با پایاب کم عمق روی جت‌های عمودی آزاد دایره‌ای انجام داد و رابطه‌ی زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ارائه کرد:

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

$$V' = (V^2 + 2gH)^{0.5}$$

که در این رابطه :

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 (1982) همچنین آزمایشاتی بر روی جت‌های صفحه‌ای عمودی آزاد با پایاب کم عمق انجام داد. حاصل نتایج این آزمایش‌ها رابطه زیر برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی است:

$$\frac{y_s}{B} = 0.182 \frac{V}{\sqrt{(S-1)gd_{50}}} \quad \text{FOR:} \quad 17 < \frac{V}{\sqrt{(S-1)gd_{50}}} < 26$$

B : ضخامت جت (متر)

ادریگ و راجاراتنام (1996) با جمع آوری داده‌های مربوط به جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق روابط زیر را به دست آوردند:

$$\frac{y_s}{B} = 0.05(E_c - 0.14)^{0.6} \frac{S^{3.1}}{(S-1)^{2.8}}$$

$$E_c = \frac{V \left(\frac{D}{H} \right)}{\sqrt{(S-1)gd_{50}}}$$

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:

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

مطالعات رادکیوی (1999) بر روی جت های دایره ای عمودی مستغرق منجر به روابط زیر شد:

$$\frac{y_s}{D} = 0.075 \left[\frac{V}{U_{*c}} \right] \quad \text{FOR: } \frac{V}{U_{*c}} < 100$$

$$\frac{y_s}{D} = 0.035 \left[\frac{V}{U_{*c}} \right]^{2/3} \quad \text{FOR: } \frac{V}{U_{*c}} > 100$$

در روابط فوق V سرعت جت در خروجی و U_{*c} سرعت برشی بحرانی ذرات بستر می باشد.

تخمین آبشستگی ناشی از جت های ریزشی مایل

با توجه به تقسیم بندی میسن (1989) روابط محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت های ریزشی مایل در پنج گروه عمده ارائه می گردد:

گروه اول:

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

$$y_s = \frac{K q^x H^y}{d^z}$$

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 : اندازه ی قطر مشخصه مصالح بستر (متر)

x, y, z, K : ضرایب و توان های ثابتی هستند که مقادیر آنها در روابط مختلف این گروه متفاوت می باشند. مقادیر مختلف این ضرایب و توان ها را در جدول 3 مشاهده می کنیم.

گروه دوم

در این گروه از روابط، علاوه بر پارامترهای بده بر واحد عرض ارتفاع ریزش و قطر مصالح بستراز عمق پایاب نیز استفاده شده است. اولین رابطه این گروه مربوط به جایگر (1939) می باشد که براساس مطالعات ورنزه، رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت های ریزشی ارائه کرد:

$$y_s = 0.6 q^{0.5} H^{0.25} \left[\frac{y_t}{d_{50}} \right]^{0.333}$$

Y_t : عمق پایاب بر حسب متر

d_{50} : قطر میانگین ذرات بر حسب متر

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

جدول 3 (مقادیر مختلف ضرایب ثابت روابط موجود در گروه اول)

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

دومین رابطه از این گروه توسط مارتینز (1973) به صورت زیر ارائه شده است:

$$y_s = 0.14N - 0.73 \frac{Y_t^2}{N} + 1.7Y_t \quad \text{که در این رابطه:}$$

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

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های موجود برای نمونه‌ی اصلی و مدل آزمایشگاهی روابط زیر برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی توسط میسن و آروموگان (1985) ارائه شده است:

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

$$Y_s = (4.42 - 3.1H^{0.1}) \times q^{(0.6-0.0033H)} \times H^{(15-0.005H)Y_t^{0.15}} \times g^{-0.2} \times d_{50}^{-0.1} - Y_t$$

قدسیان (2002) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی دوهرینگ و ابت (1994) رابطه زیر را برای پارامترهای بی‌بعد حفره آبشستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی دایره‌ای ارائه داد:

$$\frac{f}{H} = a \left[\frac{H}{D} \right]^b \left[\frac{Q}{A\sqrt{gR}} \right]^c \left[\frac{H}{D} \right]^d$$

که در این رابطه:

f نشانگر پارامتر مربوط به حفره آبشستگی و H ارتفاع ریزش تا بستر اولیه است. مقادیر a, b, c, d ، برای هر یک از پارامترهای حفره آبشستگی در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4 (مقادیر a, b, c, d)

پارامترهای حفره آبشستگی	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 (1381) براساس تحقیق آزمایشگاهی روی جت ریزشی دایره ای رابطه زیر را برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی ارائه داد:

$$\frac{f}{H_c} = a \left[\frac{Y_t}{D} \right]^b \left[\frac{F_0 D}{\sqrt{(S-1)H_c}} \right]^c \left[\frac{Y_t}{D} \right]^d$$

که در این رابطه:

f : پارامترهای حفره آبشستگی

H_c : ارتفاع ریزش از مرکز جت تا کف بستر اولیه

Y_t : عمق پایاب

F_0 : عدد فرود ذرات $F_0 = \frac{V}{\sqrt{gd_{50}}}$

V : سرعت جریان خروجی

S : چگالی نسبی

مقادیر a, b, c, d در جدول 5 نشان داده شده‌اند.

جدول 5 (مقادیر a, b, c, d)

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 (2006) با بررسی داده‌های آزمایشگاهی متعدد، روابط زیر را برای ابعاد حفره آبشستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی ارائه دادند:

$$\frac{y_s}{Y_t} = 1.925 \left[\frac{Y_t}{H_c} \right]^{-0.66} \left[FR_d \frac{R}{H_c} \right]^{0.3}$$

$$\frac{L_s}{Y_t} = 8.432 \left[\frac{Y_t}{H_c} \right]^{-0.9} \left[FR_d \frac{R}{H_c} \right]$$

$$\frac{W_s}{Y_t} = 10.126 \left[\frac{Y_t}{H_c} \right]^{-0.02} \left[FR_d \frac{R}{H_c} \right]^{0.2}$$

$$\frac{h_m}{Y_t} = 0.549 \left[\frac{Y_t}{H_c} \right]^{-0.3} \left[FR_d \frac{R}{H_c} \right]^{0.03}$$

H_c : ارتفاع ریزش جت از مرکز آن تا بستر اولیه

h_m : حداکثر ارتفاع برآمدگی در انتهای حفره

R : شعاع هیدرولیکی جت

$$FR_d = \frac{V}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}}$$

گروه سوم:

در این گروه رابطه خاصی وجود ندارد بلکه محققین با پدیده ی آبشستگی به صورت کیفی برخورد و توصیه‌هایی در مورد آبشستگی ارائه کرده اند. به عنوان مثال کولا (1965) بیان می دارد که حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت های ریزشی تقریباً 40 برابر ضخامت جت در محل برخورد با بستر فرسایش پذیر است. همچنین دیویس و سورنسون (1969) بر این عقیده بودند که مقدار حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت های ریزشی برابر 0/66 ارتفاع ریزش جت است . در این گروه همچنین هارتانگ و هاستلر (1973) با توجه به مطالعات انجام شده توسط کولا، عقیده داشتند که حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت های ریزشی استوانه ای تقریباً حدود 20 برابر قطر جت است.

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 (1960) رابینستین (1865) و معادله‌ی میرتسخالف (1967) را با اطمینان بیشتر می‌توان به کاربرد. این روابط به ترتیب به شرح زیر ارائه گردیده‌اند:

رابطه میخالف:

$$y_s = \left[\frac{1.804q \sin a}{1 - 0.21 \cot a} \right] \left[\frac{1}{d_{90}^{0.33} Y_t^{0.5}} - \frac{1.126}{H} \right]$$

رابطه رابینستین:

$$y_s = Y_t + 0.19 \left[\frac{H + Y_t}{d_{90}} \right]^{0.75} \left[\frac{q^{1.2}}{H^{0.37} Y_t^{0.33}} \right]$$

رابطه میرتسخالف:

$$y_s = \left[\frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right] \frac{q \sin a}{1 - 0.17 \cot a} + 0.25 Y_t$$

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

گروه پنجم:

در گروه پنجم، پارامتر زمان نیز به عنوان یکی از عوامل موثر در نظر گرفته شده است. از روابط این گروه می‌توان به رابطه هانتر و رویز (1950) اشاره نمود که در بخش تغییرات زمانی آبشستگی به آن اشاره شد.

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. او بدین منظور 47 سری داده‌ای آزمایشگاهی و 26 سری داده‌ای صحرایی را انتخاب کرد. وی همچنین اظهار می‌دارد که بهترین جواب‌ها برای داده‌های استفاده شده مربوط به مدل، روابط مارتینز (B) چی وکانگ و سولفریک (1980) می‌باشد. برای داده‌های مربوط به نمونه اصلی روابط دامل (1966) 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 (1984) در مقایسه‌ای تطبیقی در مورد حداکثر عمق آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که رابطه‌ای ارائه شده توسط مارتینز (A) حداکثر عمق آبشستگی در سد کابور باسا در کشور مکزیک را با اطمینان خوبی برآورد می‌کند. 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 هیچ گونه مطابقی نشان نداد. در گروه پنجم، رابطه‌ای که توسط توماس (1953) ارائه شده است نیز نتایج نسبتاً ضعیفی ارائه کرده است.

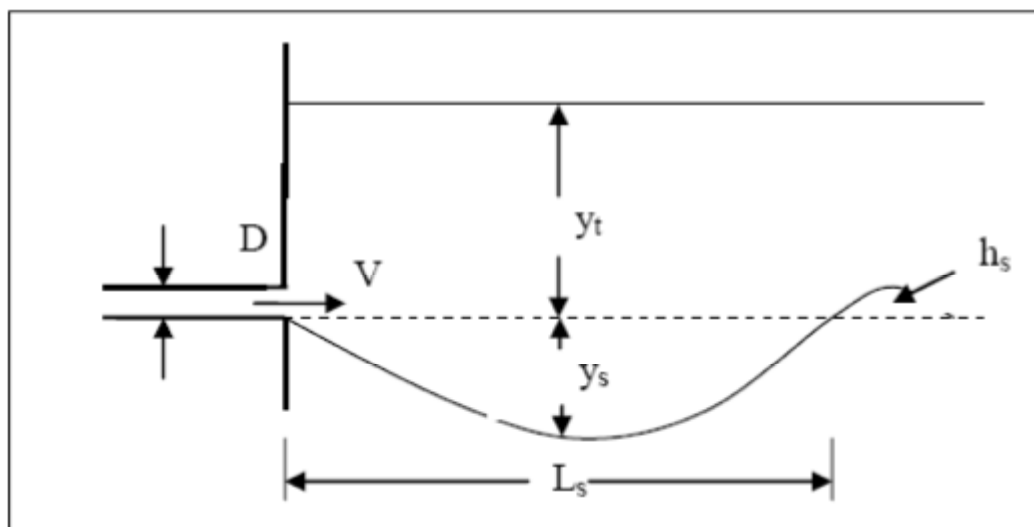
در نهایت توصیه می‌شود عمق آبشستگی از روابط مختلف محاسبه شود و سپس مقدار مناسب با توجه به قضاوت مهندسی و اهمیت پروژه انتخاب گردد.

آبشستگی ناشی از جت‌های افقی

جت‌های افقی معمولاً در پایین‌دست دریچه‌ها یا پایین‌دست 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 تقسیم بندی نمود. در جت‌های دو بعدی، جت توسعه عرضی ندارد یا عرض جت خروجی برابر عرض جریان در پایین‌دست سازه است. در جت‌های سه بعدی عرض جت خروجی کمتر از عرض جریان در پایین‌دست است، لذا گسترش عرضی جت امکان‌پذیر می‌باشد.

الگوی جریان در جت‌های افقی

در جت های افقی، جریان موازی بستر اولیه بوده و معمولاً حفره آبشستگی در جهت عرضی متقارن است. در شکل 11 نمای کلی از یک جت مستغرق خروجی از یک کالورت افقی نشان داده شده است. در جت های افقی، سرعت زیاد جریان در برخورد با بستر فرسایش پذیر، باعث جدا شدن ذرات بستر شده و به خاطر گرداب های ایجاد شده، بخشی از ذرات به صورت معلق در آمده و به سمت پایین دست حمل می شود. در ابتدا و برای مدت کوتاهی، مصالح بیشتر به صورت بار بستر حرکت می کند. رسوبات حمل شده در پایین دست حفره آبشستگی ته نشین شده و تشکیل یک برآمدگی می دهند. روند جدا شدن ذرات، حمل آنها و رسوب گذاری در پایین دست حفره آبشستگی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان و خصوصیات رسوب است. براساس عمق پایاب، جت های افقی به دو حالت جت مستغرق عمیق و جت مستغرق کم عمق تقسیم می شوند.



شکل 11 (نمای کلی از یک جت مستغرق افقی)

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 می یابد، بنابراین سرعت موضعی در نزدیکی کف حفره با افزایش عمق، کاهش می یابد. در نتیجه نرخ فرسایش با گذشت زمان کاهش می یابد. در پایین دست محل حداکثر عمق آبشستگی، سرعت جریان با افزایش فاصله افزایش می یابد. با گذشت زمان زیادی از شروع آبشستگی، سرعت جریان در نزدیکی بستر به مقداری که قادر به جابجایی مصالح نیست کاهش می یابد. در این حالت هندسه حفره آبشستگی به حالت تعادل رسیده است. زمان رسیدن به حالت تعادل و ابعاد حفره آبشستگی تابعی از خصوصیات رسوب، سرعت جریان، ضخامت جت و عمق پایاب است.

ادریگ و راجاراتنام (1998) برای زمانی که $12 < \frac{Y_t}{b_u} < 60$ باشد، مشاهده کردند که جت افقی خروجی از دریچه یا کالورت در

امتداد بستر حرکت می کند و آبشستگی زیادی ایجاد می کند. در این جا b_u ضخامت جت خروجی و Y_t عمق پایاب است.

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 آبشستگی به صورت متوالی می باشد. برای حالتی که $\frac{Y_t}{b_u} < 4.03$ باشد، جت افقی در تماس با بستر بوده و رشد

سریع حفره آبشستگی را به همراه خواهد داشت. به این حالت جت بستری (جت نزدیک بستر) گفته می‌شود. بالاچندرا و کلز (1997) با بررسی آبشستگی 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 آبشستگی است.

تغییرات زمانی ابعاد حفره آبشستگی

اداره عمران ارتش آمریکا (1991) معادلاتی برای حداکثر عمق، عرض، طول و حجم حفره آبشستگی پایین‌دست کالورت لوله‌ای برای دو حالت پایاب کم عمق و پایاب عمیق به صورت زیر ارائه داد:

پایاب کم عمق $y_t < 0.5D$:

$$\frac{y_s}{D} = 0.8 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^{0.375} t^{0.1}$$

$$\frac{W_s}{D} = \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^{0.915} t^{0.15}$$

$$\frac{L_s}{D} = 2.4 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^{0.71} t^{0.125}$$

$$\frac{V_s}{D} = 0.73 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^2 t^{0.375}$$

پایاب عمیق $y_t \geq 0.5D$:

$$\frac{y_s}{D} = 0.74 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^{0.375} t^{0.1}$$

$$\frac{W_s}{D} = 0.72 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^{0.915} t^{0.15}$$

$$\frac{L_s}{D} = 4.1 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^{0.71} t^{0.125}$$

$$\frac{V_s}{D} = 0.62 \left[\frac{Q}{D^{2.5}} \right]^2 t^{0.375}$$

y_t : عمق جریان در پایین‌دست 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 آبشستگی

W_s : حداکثر عرض حفره آبشستگی

L_s : حداکثر طول حفره آبشستگی

V_s : حداکثر حجم حفره آبشستگی

تخمین ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت های افقی

روابط مربوط به جت های دو بعدی

قیوم (1960) رابطه تجربی زیر را جهت تخمین حداکثر عمق آبشستگی در نتیجه عبور جریان از زیر دریچه ارائه داد:

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

که در این رابطه:

y_s : حداکثر عمق آبشستگی (متر)

y_t : عمق پایاب (متر)

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

ΔH : اختلاف ارتفاع بین تراز آب بالادست و پایین دست دریچه (متر)

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

آلتینبیلک و بسماسی (1973) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت های افقی مستغرق عبوری از زیریک دریچه پیشنهاد دادند:

$$y_s = b_u \sqrt{\frac{b_u}{d_{50}} \tan j} \left[\frac{Fr}{\sqrt{S-1}} \right]^{1.5}$$

که در این رابطه:

j : زاویه استقرار ذرات

y_s : حداکثر عمق آبشستگی از سطح بستر

b_u : ضخامت جت (متر)

d_{50} : قطر متوسط ذرات

Fr : عدد فرود $Fr = \frac{U}{\sqrt{gb_u}}$

U : سرعت جت در خروجی جت

g : شتاب جاذبه

S : چگالی نسبی رسوبات

رادکیوی و بروسرز (1991) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های افقی مستغرق عبوری از زیر دریچه ارائه کردند:

$$y_s = 0.008 b_u \left[\frac{u}{u_{*c}} \right]^2$$

$$u_{*c} = \sqrt{q_c g d_{50} (s-1)}$$

که در این رابطه:

u_{*c} : سرعت برشی بحرانی بستر

q_c : پارامتر شیلدز بحرانی

s : چگالی نسبی رسوب

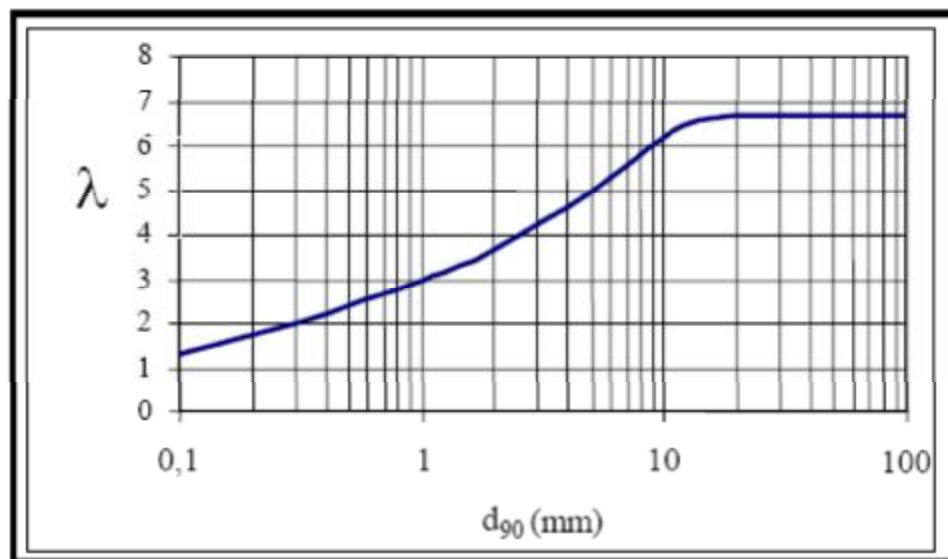
هافمن (1997) رابطه زیر را برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جریان زیر دریچه ارائه داد:

$$y_s = \frac{50}{l} b_u \left[1 - \frac{U_2}{U_1} \right]$$

U_1 : سرعت جت در خروجی

U_2 : سرعت جریان در پایین‌دست حفره آبشستگی

l : ضریب مربوط به اندازه ذرات بستر است که از شکل 12 بدست می‌آید.



شکل 12 (مقادیر l بر حسب d_{90})

سرکار و دی (2005) رابطه زیر را برای ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جریان عبوری از زیر دریچه که در پایین‌دست آن کفبندی به طول L قرار دارد، ارائه دادند:

$$\frac{j}{b_u} = a \frac{F_0^b}{\sqrt{S-1}} \left[\frac{L}{b_u} \right]^9 \left[\frac{Y_t}{b_u} \right]^q$$

که در این رابطه:

b_u : بازشدگی دریچه

$$F_0 = \frac{U}{\sqrt{gd_{50}}}$$

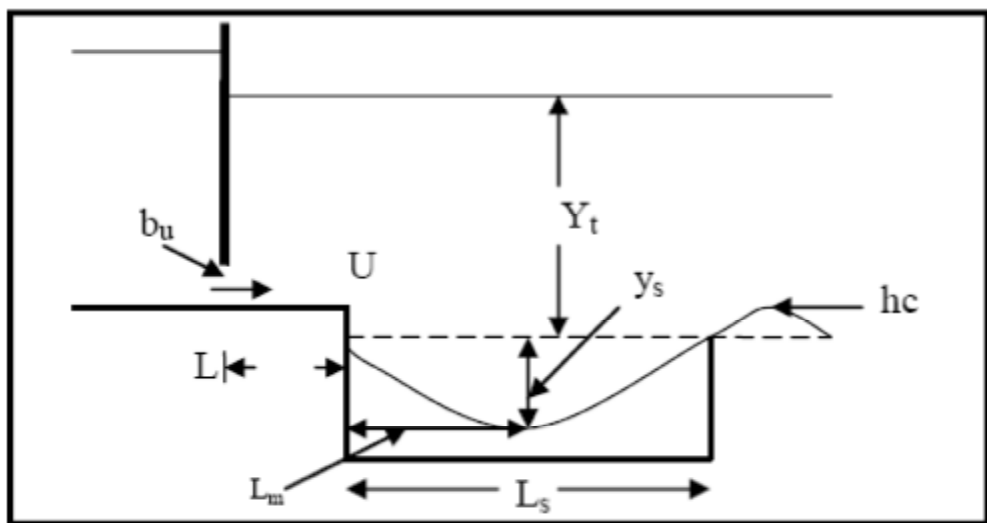
F_0 : عدد فرود رسوبات

U : سرعت جت در خروجی

Y_t : عمق پایاب

L : طول کف بند

مقادیر ضریب و توان های رابطه فوق برای پارامترهای مختلف حفره آبشستگی در جدول 6 آورده شده است.



شکل 13 (نمای کلی یک دریچه همراه با کفبند به طول L)

جدول 6 (مقادیر ضریب و توان های معادله سرکار و دی)

ϕ	α	β	γ	θ
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

روابط مربوط به جت های سه بعدی

چن (1970) برای بده یکسان بر روی کالورت های مربعی و دایره ای شکل زمانی که ارتفاع کالورت مربعی برابر قطر کالورت دایره ای شکل باشد نشان داد که مقدار آبشستگی در کالورت مربعی کمتر از کالورت دایره ای است.

بوهن (1970) آزمایشاتی روی ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست کالورت دایره‌ای انجام داد و روابط زیر را برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی ارائه کرد:

$$\frac{y_s}{D} = 0.65 \left[\frac{U}{U_{*c}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\frac{W_s}{D} = 7.5 (Fr)^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{L_s}{D} = 15 (Fr)^{\frac{2}{3}}$$

که در این رابطه:

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

U : سرعت متوسط جریان خروجی از کالورت و برابر با $\frac{4Q}{p d^2}$ است

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}} \text{ عدد فرود}$$

راجاراتنام و بری (1977) مطالعاتی روی کالورت‌های دایره‌ای سه بعدی انجام دادند و رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمودند:

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

که در این رابطه:

قطر لوله (متر)

شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)

سرعت جت (متر بر ثانیه)

چگالی نسبی رسوب

حداکثر عمق آبشستگی (متر)

راف و همکاران (1982) مطالعاتی روی آبشستگی پایین‌دست کالورت‌های سه بعدی انجام دادند و رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ارائه دادند:

$$y_s = 2.07D \left[\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} \right]^{0.45}$$

ابت و همکاران (1984) برای کالورت دایره‌ای روابط زیر را برای عمق، عرض و طول حفره آبشستگی به دست آوردند:

$$\frac{y_s}{D} = 1.52 Fr^{0.63}$$

$$\frac{W_s}{D} = 7.44 Fr^{0.66}$$

$$\frac{L_s}{D} = 15.6 Fr^{0.58}$$

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

$$\frac{y_s}{D} = 3.18 Fr^{0.57} \left[\frac{d_{50}}{D} \right]^{0.114} s_g^{-0.4}$$

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

راف و همکاران (1982) آزمایشاتی بر روی شکل‌های مختلف کالورت (دایره ای، نیم دایره ای، مربعی، مستطیلی) انجام دادند نتایج آزمایشات ایشان منجر به ارائه روابطی به شکل زیر برای ابعاد حفره آبشستگی گردید:

$$\frac{Y_s}{R}, \frac{W_s}{R}, \frac{L_s}{R}, \frac{\nabla_s}{R^3} = a \left[\frac{Q}{A\sqrt{gR}} \right]^b$$

که در این رابطه:

∇_s : حجم حفره آبشستگی

A : سطح مقطع کالورت

R : شعاع هیدرولیکی مقطع کالورت

مقادیر a و b در جدول 7 برای شکل‌های مختلف کالورت ارائه شده است.

جدول 7 (مقادیر a و b در معادله راف)

پارامترهای حفره آبشستگی	a	b
y_s	۷/۸۴	۰/۲۸
W_s	۲۶/۵۸	۰/۶۳
L_s	۶۹/۲۵	۰/۵۳
∇_s	۳۴۷۹	۱/۴۳

بروسرز و رادکیوی (1991) طی مطالعاتی بر روی کالورت‌های سه بعدی دایره‌ای، رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمودند:

$$y_s = 0.08 D \frac{U_1}{U_{*c}}$$

$$U_{*c} = \sqrt{q_c (S-1) g d_{50}}$$

که در این رابطه:

U_{*c} : سرعت برشی بحرانی ذرات بستر (متر بر ثانیه)

q_c : پارامتر شیلدز بحرانی می‌باشد.

هافمن (1997) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست کالورت‌های سه بعدی دایره‌ای ارائه نمود:

$$y_s = \frac{7}{l} \left[\frac{Q(U_1 - U_2)}{g} \right]^{\frac{1}{3}}$$

که در این رابطه:

U_1 : سرعت جت در خروجی

U_2 : سرعت جریان پایین دست حفره آبشستگی

l : ضریب مربوط به اندازه ذرات بستر است که از شکل 12 به دست می‌آید.

مقایسه روابط ارائه شده

به منظور مقایسه روابط ارائه شده، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده توسط تعدادی از محققین بر روی جت‌های افقی، به ارزیابی و تحلیل برخی از روابط موجود پرداخته شده است. جدول 8 درصد سازگاری روابط ارائه شده با داده‌های فوق را نشان می‌دهد.

جدول 8 (مقایسه روابط)

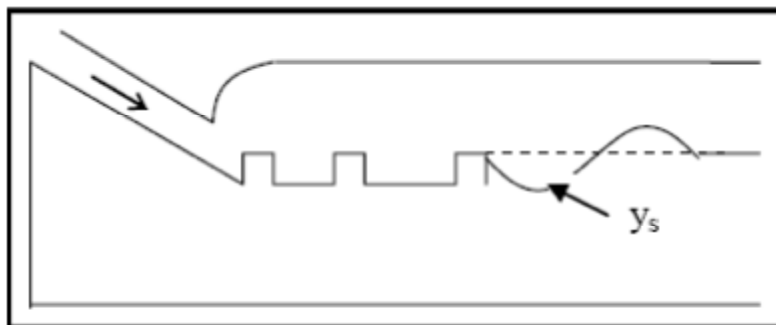
درصد سازگاری روابط تخمین عمق آبشستگی با داده‌ها (%)				تعداد داده‌ها	داده‌های آزمایشگاهی مربوط به جت‌های سه بعدی
هافمن (۱۹۹۷)	بروسرز و رادکپوی (۱۹۹۱)	راف و همکاران (۱۹۸۲)	راجاراتنام و بری (۱۹۷۷)		
۹۶	۹۳	۱۹	۹۶	۲۷	کلارک (۱۹۶۲)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴	راجاراتنام و بری (۱۹۷۷)
۹۶	۳۷	۹۶	۴۵	۷۱	راف و همکاران (۱۹۸۲)
۱۰۰	۸۱	۱۰۰	۵۶	۱۶	بلیسدل و اندرسون (۱۹۸۹)
۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۵	دوهرینگ و ایت (۱۹۹۳)

به طور کلی روابط آبشستگی ارائه شده تنها می‌توانند برای به دست آوردن یک تقریب اولیه از بزرگی عمق آبشستگی 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 آبشستگی ناشی از جت‌ها، یک پدیده دینامیک است و عمق آبشستگی نهایی بستگی به اندرکنش شرایط هیدرولیکی، ریخت شناسی و هیدرولوژیکی دارد. در پروژه‌های اجرایی می‌توان مقدار عمق آبشستگی را با استفاده از روابط مختلف محاسبه و با توجه به اهمیت پروژه و قضاوت مهندسی رابطه مناسب را انتخاب نمود.

آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش

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 ناحیه‌هایی 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 14) 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، زمین شناسی و هندسه حوضه دارد. آنچه مهم است آبشستگی ایجاد شده نباید خسارتی به حوضچه آرامش وارد کند.



شکل 14 (آبشستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش)

الگوی جریان

الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش معمولی

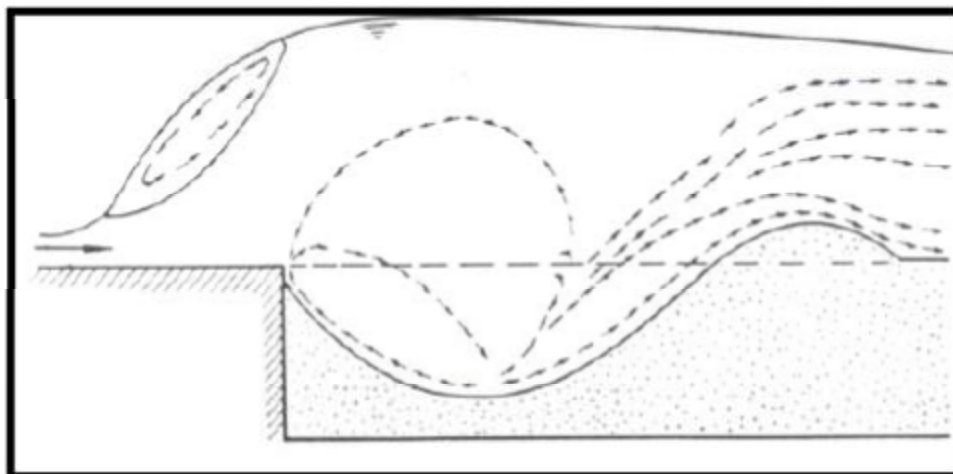
هنگامی که جریان از روی یک سرریز به پایین می‌ریزد، انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. بخشی از این انرژی ممکن است روی یک کف بند بتنی با ایجاد یک پرش هیدرولیکی مستهلک گردد. جریان خروجی از حوضچه آرامش دارای سرعت بالایی است که ممکن است باعث فرسایش بستر پایین دست شود.

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 بارمعلق 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 آبشستگی 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 آبشستگی 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 15). رسوبات خارج شده از حفره آبشستگی 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.

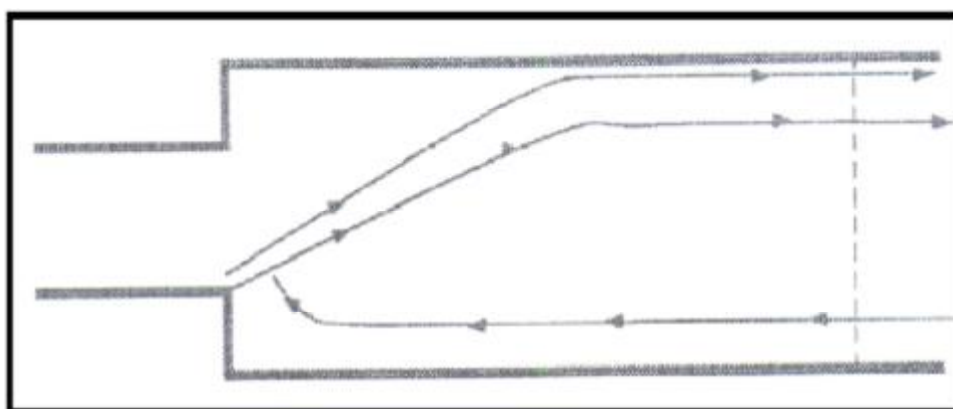
الگوی جریان پایین دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی

مشاهدات نجم (2004) نشان می‌دهد که الگوی جریان و به دنبال آن الگوی آبشستگی پایین‌دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی در حالت بدون آستانه غیرمتقارن خواهند بود در این حالت جت اصلی جریان به صورت فوق بحرانی وارد حوضچه می‌گردد و به سمت یکی از دیواره‌های جانبی منحرف می‌شود (شکل 16) در این حالت حداکثر آبشستگی در همان مسیر جت اصلی اتفاق می‌افتد و یک حفره آبشستگی کوچک‌تر در سمت دیگر شکل می‌گیرد.

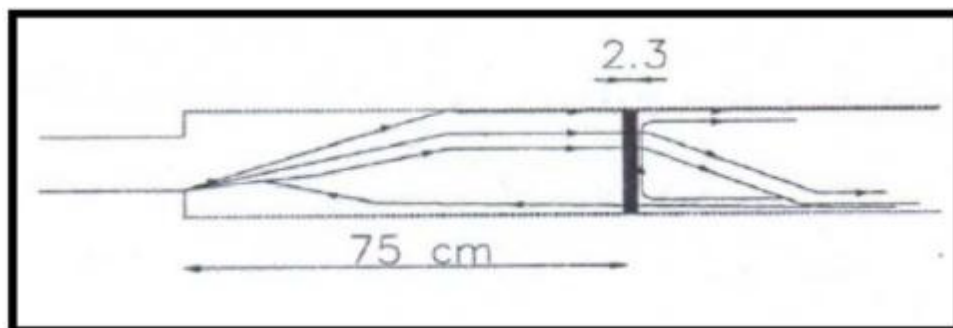
در حالت استفاده از آستانه انتهایی، الگوی جریان و آبشستگی همچنان نامتقارن است. حفره آبشستگی در جهت جت اصلی جریان شکل می‌گیرد. با افزایش عدد فرود جت اصلی، جریان در پایین‌دست بازشدگی منحرف می‌گردد و به یکی از طرفین حوضچه آرامش برخورد می‌کند و سپس موازی خط مرکزی حوضچه به سمت پایین‌دست پیش می‌رود تا به آستانه انتهایی برسد (شکل 17).



شکل 15 (الگوی جریان در فرایند آبشستگی پایین‌دست یک پرش هیدرولیکی)

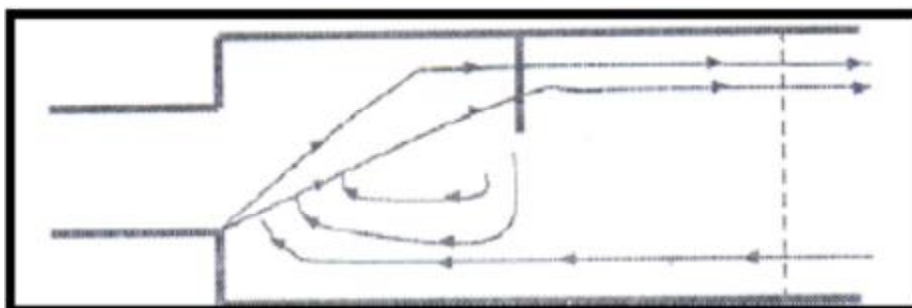


شکل 16 (الگوی جریان در حالت بدون آستانه)

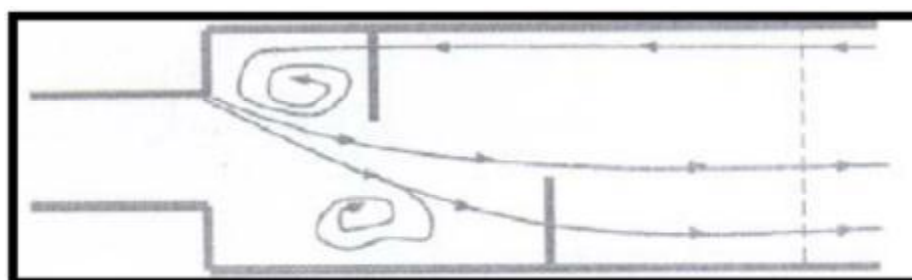


شکل 17 (الگوی جریان در حالت وجود آستانه انتهایی)

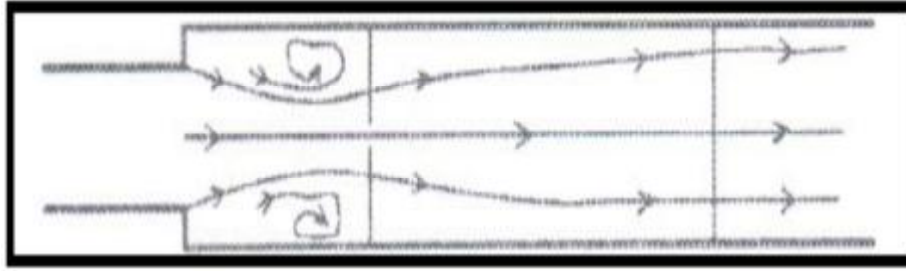
وجود آستانه انتهایی باعث تغییر جهت جریان به سمت دیگر کانال خواهد شد و باعث ایجاد یک حفره آبشستگی فرعی در نزدیک کف بند می‌گردد. در صورت وجود آستانه انتهایی، حفره آبشستگی نزدیک کناره کانال، در جهت جت اصلی جریان روی بستر متحرک شکل می‌گیرد. در این حالت حفره اصلی آبشستگی غیریکنواخت است و طول و عرض غیر یکسان دارد. الگوی جریان پایین‌دست حوضچه‌های آرامش با بازشدگی ناگهانی در سایر حالات قرارگیری آستانه در شکل 18 نشان داده شده است.



شکل 18 الف (وجود یک آستانه جانبی نامتقارن)



شکل 18 ب (وجود دو آستانه جانبی نامتقارن)



شکل 18 ج (وجود دو آستانه جانبی متقارن)
شکل 18 (الگوی جریان در سایر حالات قرارگیری آستانه)

تغییرات زمانی آبشستگی

فروهودی و اسمیت (1985 و 1982) مطالعاتی روی آبشستگی ناشی از جریان خروجی از یک حوضچه آرامش پایین دست یک سرریز انجام دادند (شکل 19). 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 که در آن $y_t > d_1$ می باشد. پرش هیدرولیکی متعادل و پرش هیدرولیکی پیشرونده به سمت پایین دست $y_t < d_1$. براساس نتایج این آزمایشات، توسعه زمانی عمق آبشستگی به صورت زیر بیان گردید (y_t عمق آب پایین دست و d_1 عمق مزدوج پرش):

$$\frac{y_s}{d_0} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^g$$

که در این رابطه:

d_0 : طول مشخصه $d_0 = 0.5h_d$ و h_d ارتفاع تاج سرریز از کف بند می باشد (متر)
 t : زمان (ثانیه)

t_1 : زمان مشخصه که در آن حداکثر عمق آبشستگی برابر d_0 شود (ثانیه)

y_s : عمق آبشستگی در زمان t (متر)

g : ضریبی که در محدوده 0.22 و 0.23 قرار دارد.

زمان مشخصه از رابطه زیر به دست می آید:

$$t_1 = \frac{ky_t^2(s-1)^{1.4}}{(au - u_c)^3}$$

k $\frac{m^{2.3}}{s^{4.3}}$ و t_1 زمان مشخصه بر حسب ساعت

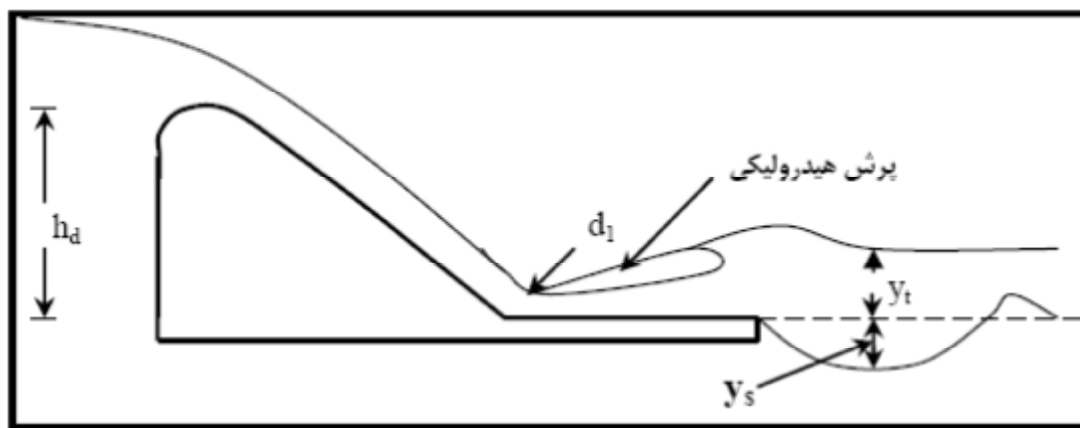
y_t : عمق پایاب متر

u_c : سرعت بحرانی $\frac{m}{s}$

u : سرعت متوسط جریان m/s

a : ضریب آشفته‌گی $a = (1+3r_0)c_v$ و $c_v \approx 1$ ، r_0 شدت نسبی آشفته‌گی

S : چگالی نسبی مصالح



شکل 19 (نمای آزمایشات فرهودی و اسمیت)

درگاهی (2003) مطالعاتی مشابه آزمایشات فرهودی و اسمیت (1982) انجام داد. یک کف بند افقی که سطح آن صاف بود در پایین‌دست پاشنه سرریز قرار داشت. ایشان تغییرات زمانی حفره آبستگی را به صورت زیر ارائه نمود:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = A \left(\frac{t}{t_s} \right)^n$$

t : زمان (ثانیه)

$y_{s,t}$: عمق آبستگی در زمان t (متر)

y_s : حداکثر عمق آبستگی (متر)

t_s : زمان مربوط به حداکثر عمق آبستگی (ثانیه)

تحلیل آزمایشات ایشان نشان داد که $A \approx 1$ و n یک تابعی لگاریتمی بر حسب $\frac{h_0}{h_d}$ به صورت زیر می باشد

$$n = 0.17 \ln \left[\frac{h_0}{h_d} \right] - 0.04$$

h_0 عمق آب روی سرریز و h_d ارتفاع سرریز می باشد.

تخمین حداکثر عمق آبستگی

روابط حداکثر عمق آبستگی پایین‌دست حوضچه‌های آرامش معمولی

نواک (1955 و 1961) بیان نمود که با استفاده از یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی را در برگرد، عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون استفاده از حوضچه آرامش حدود 45 تا 65 درصد کاهش می‌یابد. نواک با استفاده از معادله جایگز رابطه زیر را برای عمق آبشستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش ارائه نمود که کم‌ترین مقدار آبشستگی در حالت $\frac{y_t}{y_{t_{\min}}} = 1.6$ و بیش‌ترین مقدار آبشستگی در حالت $\frac{y_t}{y_{t_{\min}}} = 1$ رخ می‌دهد. در این جا $y_{t_{\min}}$ حداقل عمق پایاب می‌باشد که برای شکل‌گیری پرش هیدرولیکی لازم است.

$$y_s = 0.55 \left[6H^{0.25} q^{0.5} \left[\frac{y_t}{d_{90}} \right]^{0.33} - y_t \right]$$

که در این رابطه:

y_s : حداکثر عمق حفره فرسایشی از بستر اولیه رودخانه (متر)

H : اختلاف تراز آب در بالادست و پایین‌دست (متر)

y_t : عمق پایاب (متر)

q : بده واحد عرض (متر مربع بر ثانیه)

d_{90} : اندازه ذرات رسوب (میلی متر)

کاتاکلی و همکاران (1973) براساس مطالعات آزمایشگاهی روی یک سرریز با حوضچه آرامش با طول $5y_t$ رابطه زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش ارائه نمودند:

$$y_s = 1.6H_1^{0.2} q^{0.6} d_{90}^{-0.1} - y_t$$

که در این رابطه:

H_1 : اختلاف تراز آب بالادست از بستر اولیه (متر)

d_{90} : اندازه ذرات (میلی متر)

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

درگاهی (2003) با مطالعه روی آبشستگی پایین‌دست سرریز اوجی همراه با کف بند افقی، روابط زیر را برای حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمود:

$$\frac{y_s}{h_0} = 1.7 \left[\frac{h_0}{d_{50}} \right]^{1/4.5}$$

$$\frac{x_s}{h_0} = 5 \left[\frac{h_0}{d_{50}} \right]^{1/3}$$

که در این روابط:

y_s : حداکثر عمق آبشستگی (متر)

X_s : موقعیت محل حداکثر عمق آبشستگی از لبه انتهایی کف بند (متر)

h_0 : عمق آب روی سرریز (متر)

d_{50} : قطر متوسط مصالح بستر (میلی متر)

روابط حداکثر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه های آرامش با بازشدگی ناگهانی با آرایش های

مختلف آستانه

یکی از انواع حوضچه های آرامش، حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی در پایین دست می باشد. الگوی جریان و به تبع آن الگوی آبشستگی در پایین دست چنین سازه هایی متقارن نخواهد بود. تحقیقات زیادی در زمینه آبشستگی این نوع حوضچه های آرامش انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

در حالتی که آستانه وجود ندارد:

فولادی و همکارانش (1987) مشاهده کردند که در این نوع حوضچه ها 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:

$$\frac{y_s}{y_1} = 0.039 Fr_0 \left[\frac{B-b}{b} \right]^{0.44}$$

که در این رابطه:

y_s : حداکثر عمق آبشستگی در امتداد خط مرکزی جریان (متر)

y_1 : عمق جریان ورودی (متر)

Fr_0 : عدد فرود ذرات که از رابطه زیر به دست می آید:

$$Fr_0 = \frac{V_1}{[gd_{50}(s-1)]^{0.5}}$$

V_1 : سرعت جریان در کانال ورودی به حوضچه (متر بر ثانیه)

S : چگالی نسبی

d_{50} : میانگین قطر ذرات بستر (میلی متر)

B : عرض جریان پایین دست (متر)

b : عرض جریان ورودی به حوضچه (متر)

نجم (2002) مطالعاتی روی آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با باز شدگی ناگهانی شکل 20 در حالت جریان فوق بحرانی انجام داد و برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی رابطه زیر را ارائه نمود:

$$\frac{y_s}{y_G} = 1.13(F_G) - 28.9\left(\frac{d_{50}}{y_G}\right) + 0.26\left[F_G\left(\frac{B-b}{b}\right) + 2.1\right] - 3.59\left(\frac{y_G}{H_u}\right)$$

که در این رابطه:

y_s : حداکثر عمق آبشستگی

y_G : ارتفاع باز شدگی دریچه

F_G : عدد فرود به صورت $F_G = \frac{V_G}{\sqrt{gy_G}}$

V_G : سرعت میانگین زیر دریچه

H_u : عمق آب در بالادست دریچه

L : طول کف بند حوضچه آرامش

در حالتی که آستانه میانی وجود دارد

نجم (2002) مطالعاتی روی آبشستگی پایین دست حوضچه های آرامش با باز شدگی ناگهانی انجام داد. در این مطالعات از یک آستانه میانی در حوضچه آرامش استفاده گردید (شکل 21). حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش در این حالت با رابطه زیر ارائه گردید:

$$\frac{y_s}{y_G} = 1.27(F_G) - 17.3\left(\frac{d_{50}}{y_G}\right) + 0.25\left[F_G\left(\frac{B-b}{b}\right)\right] - 0.042\left(\frac{y_G}{H_u}\right) - 1.47\left(\frac{h_s}{y_G}\right) + 0.3\left(\frac{X_s}{L}\right) + 0.687$$

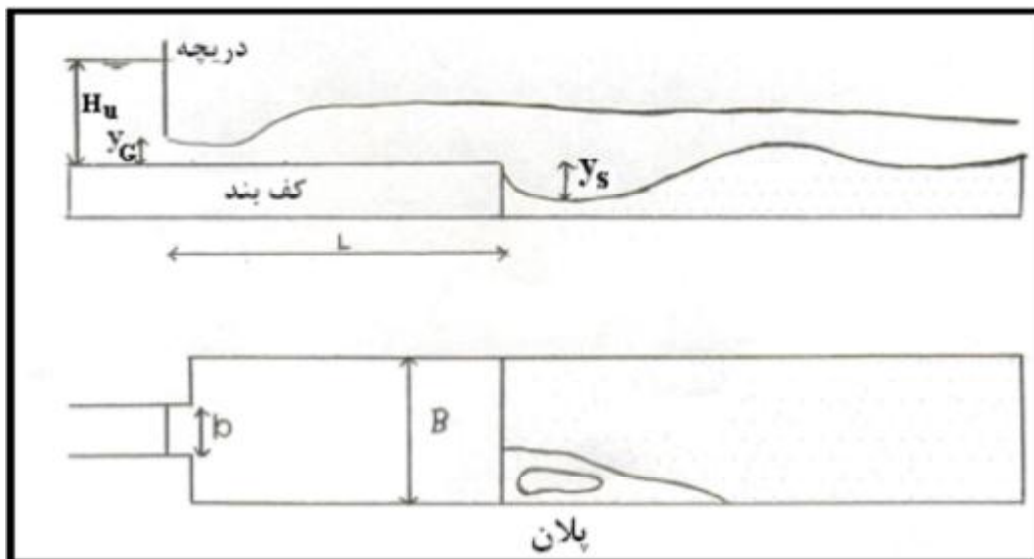
که در این رابطه:

y_s : حداکثر عمق آبشستگی

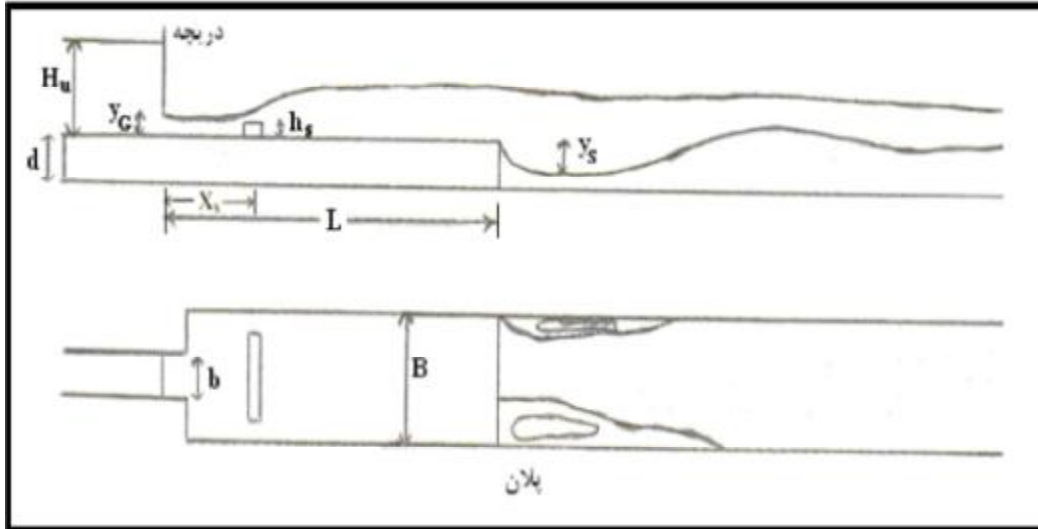
X_s : فاصله محل آستانه از دریچه

h_s : ارتفاع آستانه

در حالتی که آستانه جانبی وجود دارد



شکل 20) آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با باز شدگی ناگهانی



شکل 21 (آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با باز شدگی ناگهانی و وجود آستانه میانی)

نجم (2004) همچنین مطالعاتی روی آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با بازشدگی ناگهانی و وجود آستانه جانبی انجام داد (شکل 22) نجم برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش در حالت کلی رابطه زیر را ارائه کرد:

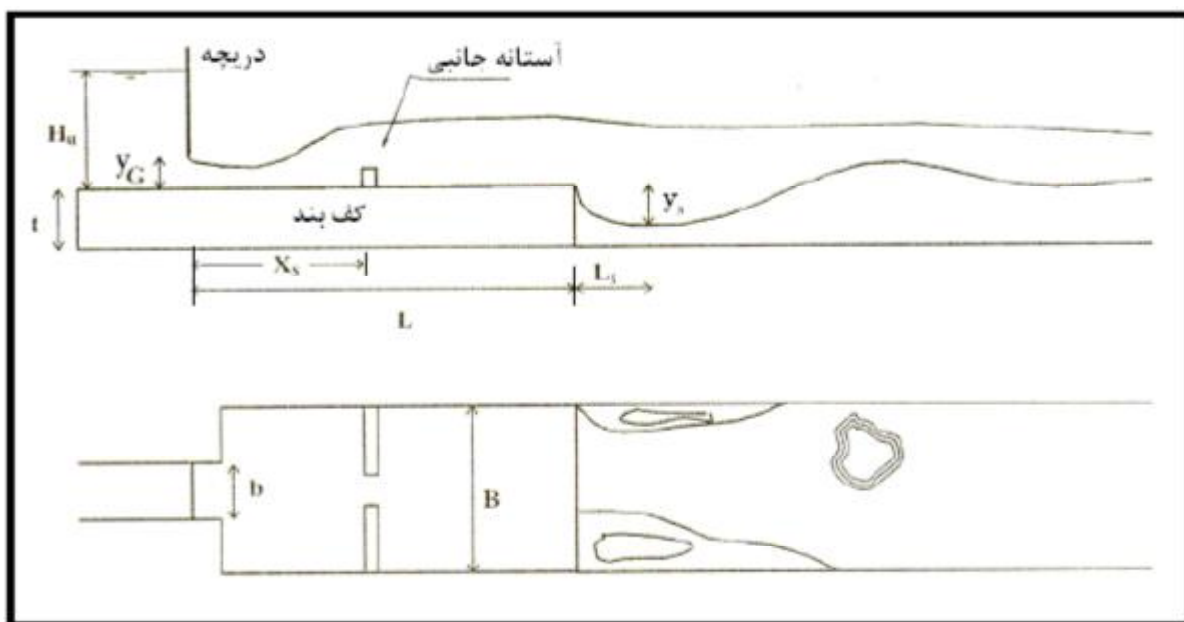
$$\frac{y_s}{y_G} = a + bF_G$$

a و b ضرایبی که تابع $\frac{X_s}{L}$ و $\frac{W}{B}$ می باشند و در جدول 9 نشان داده شده اند.

X_s : فاصله محل آستانه از دریچه

L : طول حوضچه آرامش

W : طول کلی آستانه های جانبی متقارن در جهت عمود بر جریان



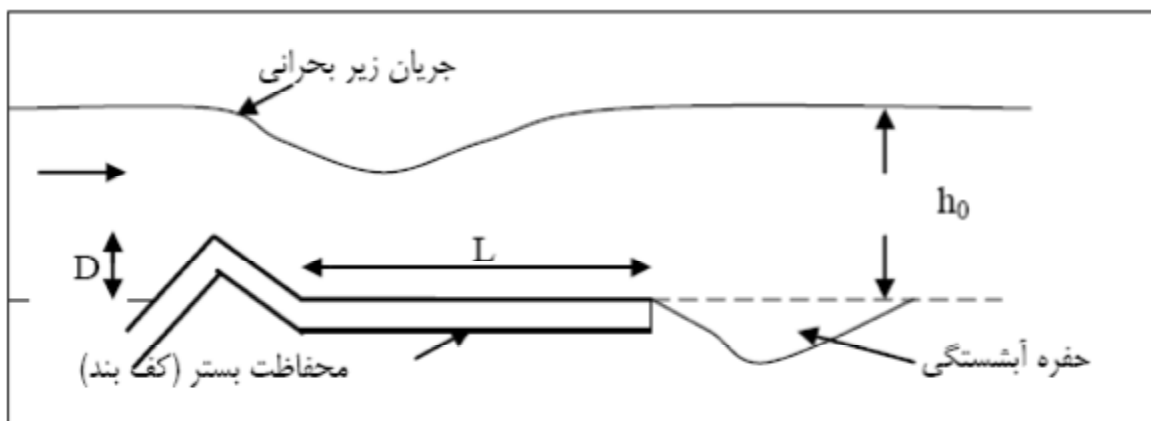
شکل 22) آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با باز شدگی ناگهانی و وجود آستانه جانبی)

جدول 9) ضرایب a و b بر حسب $\frac{X_s}{L}$ و $\frac{W}{B}$

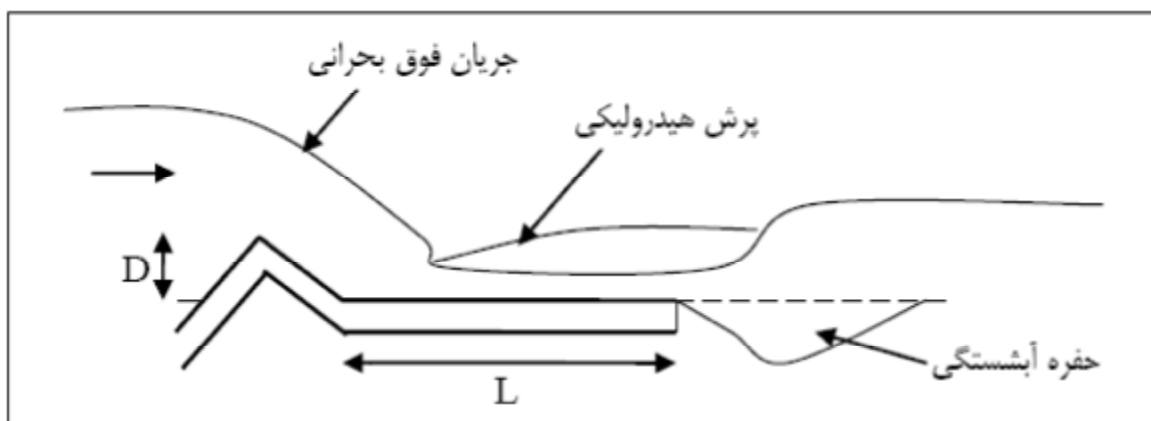
آستانه انتهایی	W/B	X_s/L	a	b
بدون آستانه	1	۱	-۱/۸۷۱	۱/۶۵۵
آستانه نامتقارن	-	-	-۱/۳۸۹	۱/۳۹۵
آستانه متقارن	۰/۳۷	۰/۵	-۱/۲۸	۱/۱۱۷
آستانه متقارن	۰/۷۴	۰/۱۵	-۱/۷۵۱	۱/۱۲
آستانه های نامتقارن	۰/۷۴	۰/۳۵	-۱/۲۳۸	۰/۹۶۴
آستانه متقارن	۰/۷۴	۰/۵ ، ۰/۲۵	-۱/۶۰۱	۱/۰۸۷
آستانه مرکزی	۰/۹	۰/۳۵	-۰/۹۵۵	۰/۶۵۸
آستانه پیوسته	۰/۷۴	۰/۳۵	-۰/۳۹۳	۰/۳۴۹
آستانه انتهایی	۱	۰/۳۵	-۰/۰۹۹	۰/۱۰۲

آبشستگی پایین دست تثبیت کننده های بستر (آستانه)

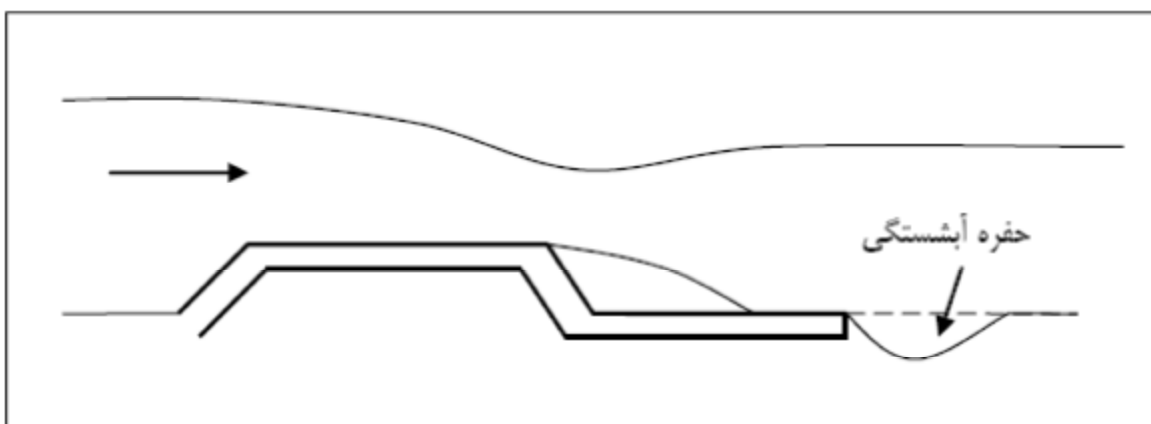
آستانه ممکن است به عنوان بخشی از یک طرح نگهداری تراز آب یا کنترل تراز بستر در رودخانه ها مورد استفاده قرار گیرد. آستانه در عرض رودخانه معمولاً به گونه ای ساخته می شود که تراز تاج آن با تراز بستر تقریباً یکسان یا بالاتر و کف بستر در بالادست و پایین دست سازه تقریباً برابر باشد. این سازه ممکن است از مصالح سنگی، شمع کوبی یا سپری، بتنی، گابیون یا توری سنگی و یا به صورت ترکیبی از آنها ساخته شود شکل های 23 و 24 نمونه ای از دو نوع آستانه با پوشش افقی بستر و آبشستگی پایین دست آنها را نشان می دهد.



شکل 23 الف (جریان روی آستانه و آبستگی پایین دست آستانه با تاج کوتاه، جریان زیر بحرانی)



شکل 23 ب (جریان روی آستانه و آبستگی پایین دست آستانه با تاج کوتاه، جریان فوق بحرانی)

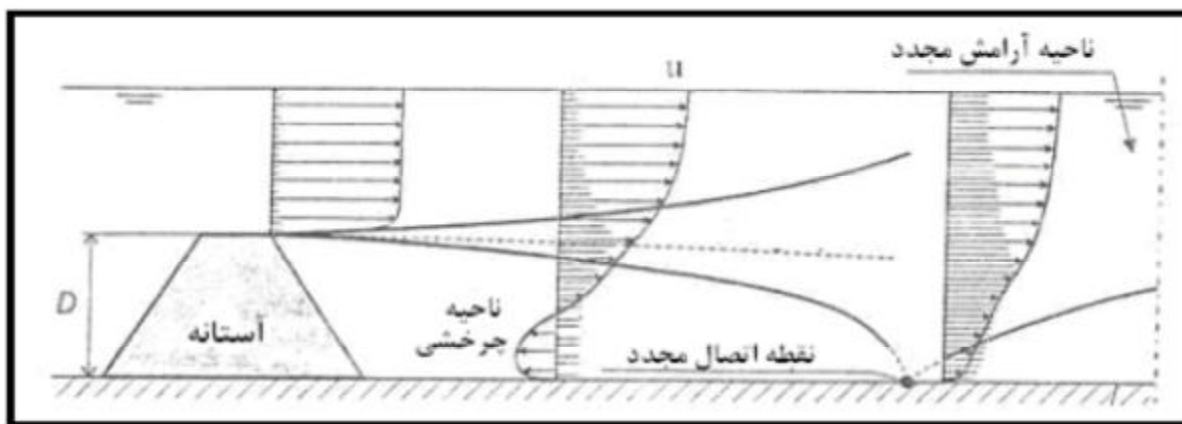


شکل 24 (جریان روی آستانه و آبستگی پایین دست آستانه با تاج پهن)

الگوی جریان:

نمونه ای از الگوی دو بعدی جریان در پایین دست یک آستانه هنگامی که جریان روی آستانه زیر بحرانی باشد، در شکل 25 نشان داده شده است. پایین دست آستانه و در حفره آبستگی، جدایی جریان یا لایه برشی جدا شده (Separated shear layer) و

یک لایه اختلاطی صفحه ای (Simple plane mixing layer) پدید می‌آید. در ابتدا محور لایه اختلاطی به خاطر تاثیر بستر، اندکی خمیده است. انحنای در جهت پایین دست به خصوص در نزدیکی نقطه اتصال مجدد (Reattachment point) که طول نقطه اتصال مجدد، تقریباً 6 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، گرادین‌های سرعت در جهت جانبی به طور نسبی کوچک و در نتیجه جریان درون حفره آبشستگی تقریباً دو بعدی است. اما هنگامی که عرض جریان پایین دست آستانه دارای بازشدگی باشد، جریان درون حفره آبشستگی سه بعدی است.



شکل 25 (الگوی جریان پایین دست آستانه)

تغییرات زمانی عمق آبشستگی

آزمایشات متعددی در شرایط آب زلال توسط موسسه هیدرولیک دلفت هلند (موسسه دلفت 1972 و 1979، باچکو و همکاران 1987) انجام شده است. براساس نتایج این آزمایشات عمق آبشستگی پایین دست آستانه به صورت تابعی از زمان به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = 1 - e^{\ln \left[1 - \frac{y_1}{y_s} \right] \left[\frac{t}{t_1} \right]^g}$$

که در این رابطه:

t : زمان (ثانیه)

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

$y_{s,t}$: عمق آبشستگی در زمان (متر)

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

y_1 : عمق اولیه جریان (متر)

g : مقدار ثابتی که تابع شرایط جریان است

در مرحله توسعه آبشستگی، هنگامی که t کوچکتر از t_1 است، معادله به شکل زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = \left(\frac{t}{t_1}\right)^g$$

محدوده مقادیر g در جدول 10 بر اساس آزمایشات محققین مختلف گزارش شده است.

جدول 10 (مقادیر مختلف پارامتر g)

شرایط جریان	γ	محقق
دو بعدی	۰/۳۸	Breusers (1966)
دو بعدی	۰/۳۵-۰/۲۷	Mosonyi & Schoppmann (1968)
دو بعدی	۰/۴-۰/۳۴	Dietz (1969)
سه بعدی	۰/۸-۰/۴	Vander Meulen & Vinje (1975)

نتایج حدود 110 آزمایش از تحقیقات وندرمولن و وینج (1975) روی حداکثر عمق آبشستگی و مقادیر مختلف ارتفاع نسبی آستانه $\frac{D}{h_0} = 0, 0.3, 0.6$ که D ارتفاع آستانه می باشد) نشان داد که برای عمق‌های آبشستگی کوچک، اگر ضریب g بزرگ تر از 0/8 استفاده شود، تابع نمایی معادله قبل نتایج خوبی را نشان می‌دهد. در مرحله ابتدایی و توسعه آبشستگی، اگر مقدار g برابر 0/4 در نظر گرفته شود، مقدار حداکثر عمق آبشستگی به صورت محافظه کارانه به دست می‌آید. براساس آزمایشات متعدد، زمان مشخصه t_1 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$t_1 = \frac{ky_1^2(s-1)^{1.7}}{(au_0 - u_c)^{4.3}}$$

که در این رابطه:

t_1 : زمان مشخصه بر حسب ساعت

a : ضریبی وابسته به سرعت جریان و شدت آشفته‌گی

S : چگالی نسبی

$$k: \frac{m^{2.3}}{s^{4.3}} \quad 330$$

روابط تجربی متعددی برای ضریب a براساس آزمایشات انجام شده روی آبشستگی دو بعدی و سه بعدی ارائه شده است. طبق مطالعات بروسرز (1966) ضریب a به سرعت جریان و شدت آشفته‌گی بستگی دارد. بروسرز ضریب a را به صورت زیر تعریف نمود

$$a = (1 + 3r_0)c_v$$

که r_0 شدت آشفته‌گی نسبی و c_v ضریب تصحیح نیمرخ سرعت می‌باشد ($c_v \approx 1$).

جورینسن و ویلینگ (1989) برای شرایط جریان هیدرولیکی زبر، ضریب a را به صورت زیر بیان نمودند:

$$a = 1.5 + 5r_0$$

یک رابطه کلی تر برای ضریب a توسط هافمن و بوجی (1993) به صورت زیر ارائه شده است

$$a = 1.5 + 4.4 r_0 f_c$$

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

C : ضریب شزی مربوط به پوشش بستر بالادست حفره آبشستگی،

C_0 : ضریب شزی پایه برابر با $c_0 = 40 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ اگر $C < C_0$ آنگاه $f_c = 1$ در نظر گرفته می شود.

هافمن و بوجی (1993) با آزمایش روی بستر افقی و برای جریان زیر بحرانی روی آستانه، رابطه زیر را برای شدت آشفتگی نسبی ارائه کردند:

$$r_0 = \sqrt{0.0225 \left[1 - \frac{D}{y_1} \right]^{-2} \left[\frac{L - 6D}{6.67 y_1} + 1 \right]^{-1.08} + 1.45 \frac{g}{c^2}} \quad L > 6D$$

که در این رابطه:

$$C \text{ : ضریب شزی پوشش بستر } \left(\frac{\text{m}^{1/2}}{\text{s}} \right)$$

D : ارتفاع آستانه (متر)

g : شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)

L : طول حفاظت بستر (متر)

با ترکیب دو معادله قبل ضریب a به صورت تابعی از شرایط بالادست حفره آبشستگی بیان می شود. گراو و پیلارزیک (1981)

ضریب a را برای جریان دو بعدی پایین دست آستانه به عنوان تابعی از $\frac{L}{y_1}$ بیان کردند. همان گونه که در شکل 26 مشخص

است با افزایش ارتفاع آستانه a افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش آبشستگی است مقدار a ممکن است با طولانی کردن حفاظت بستر یا با زبرتر کردن بستر کاهش یابد، برای یک بستر صاف از نظر هیدرولیکی a 0/3 تا 0/5 به میزان افزایش می یابد.

یعنی به طور متوسط داریم: $a_{smooth} = a_{rough} + 0.4$

روابط تخمین حداکثر عمق آبشستگی

دیتز (1960) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی پایین دست آستانه ارائه داد:

$$\frac{y_s}{y_1} = \frac{w u_0 - u_c}{u_c}$$

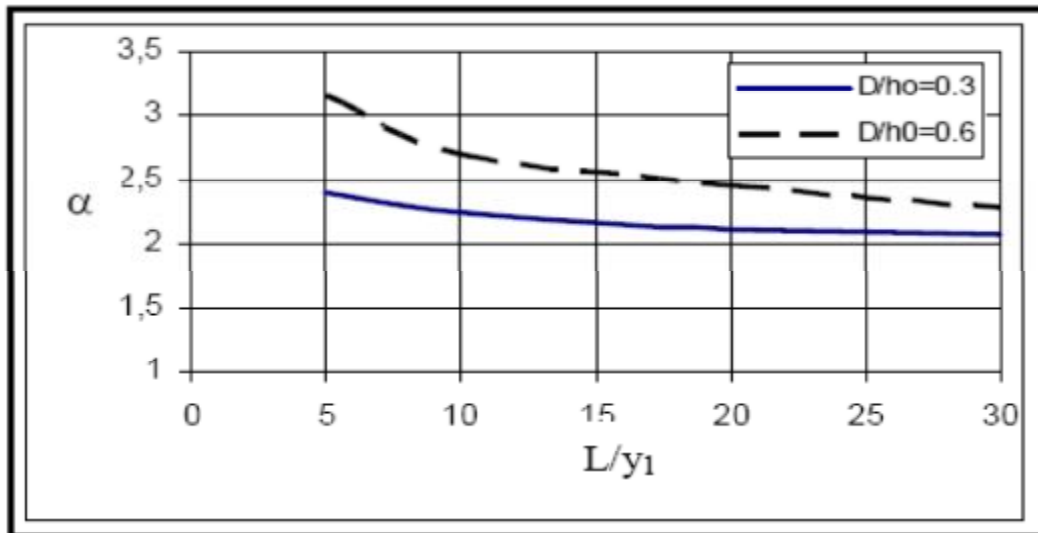
که در این رابطه

y_s : حداکثر عمق آبشستگی

u_c : سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات

u_0 : سرعت متوسط جریان

w : ضریب آشفتگی



شکل 26 (تغییرات α بر حسب $\frac{D}{y_1}$ و $\frac{L}{y_1}$)

مطالعات دیتز (1969) نشان داد که مقدار متوسط ضریب آشفتگی به صورت $w = \frac{2}{3} + 2r_0$ و حداکثر مقدار آن $w = 1 + 3r_0$

می باشد که r_0 شدت نسبی آشفتگی می باشد.

ضریب آشفتگی w توسط پوپوا (1981) به صورت رابطه زیر بیان شد:

$$w = 0.87 + 3.25Fr_1 + 0.3r_0$$

در این رابطه Fr_1 عدد فرود قبل از حفره آبستگی می باشد. مقدار w در محدوده 1/7-1/05 قرار دارد.

لارسن و همکاران (1983، 1966، 1984) مطالعاتی نیز روی آستانه های شیبدار سنگ فرشی انجام دادند (شکل 27) و رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبستگی ناشی از این نوع آستانه ارائه نمودند:

$$\frac{y_s}{y_c} = 4 \left[\frac{y_c}{d_m} \right]^{0.2} - 3 \left[\frac{D_{65}}{y_c} \right]^{0.1}$$

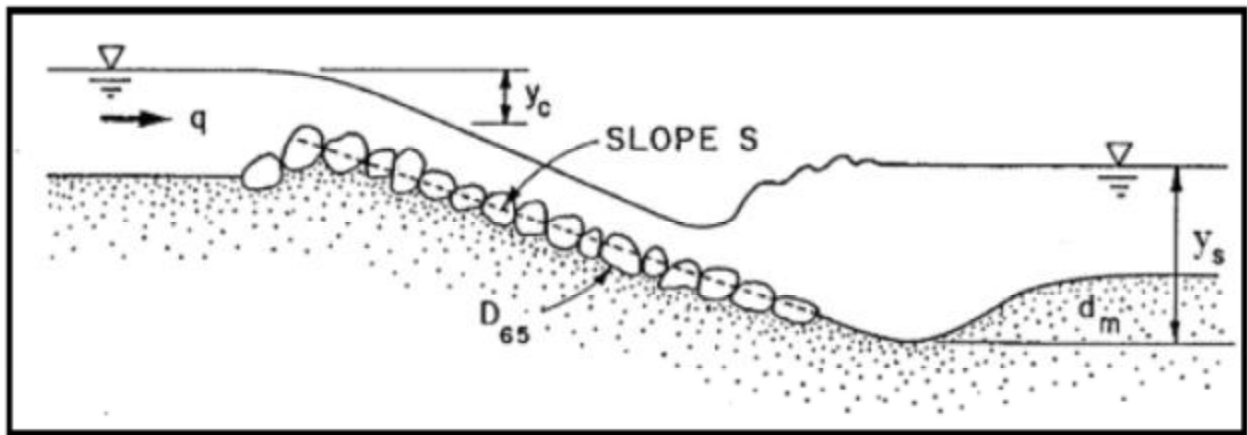
y_s : عمق آبستگی نسبت به سطح جریان در پایین دست بر حسب متر

y_c : عمق بحرانی جریان بر حسب متر

D_{65} : اندازه سنگ آستانه شیبدار بر حسب متر که 65 درصد قطر دانه ها از آن ریزتر می باشد

d_m : اندازه متوسط ذرات بستر بر حسب متر d_{50}

لارسن و همکاران دریافتند که D_{65} می‌تواند با $2.8y_c$ تخمین زده شود. هنگامی که شیب آستانه برابر 25 درصد و y_c در محدوده 0/12 تا 0/18 باشد، آستانه‌های سنگ فرشی شیبدار پایدار خواهند بود. ویتاکر و جگی (1986) رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبشستگی پایین دست آستانه‌های شیبدار سنگ فرشی ارائه کردند:



شکل 27 (معرفی پارامترهای آبشستگی پایین دست آستانه سنگ فرشی شیبدار)

$$\frac{y_s}{y_c} = 1.05S^{-0.83} \left[\frac{D_{65}}{y_c} \right] - 7.13 \left[\frac{d_m}{y_c} \right]$$

که در این رابطه:

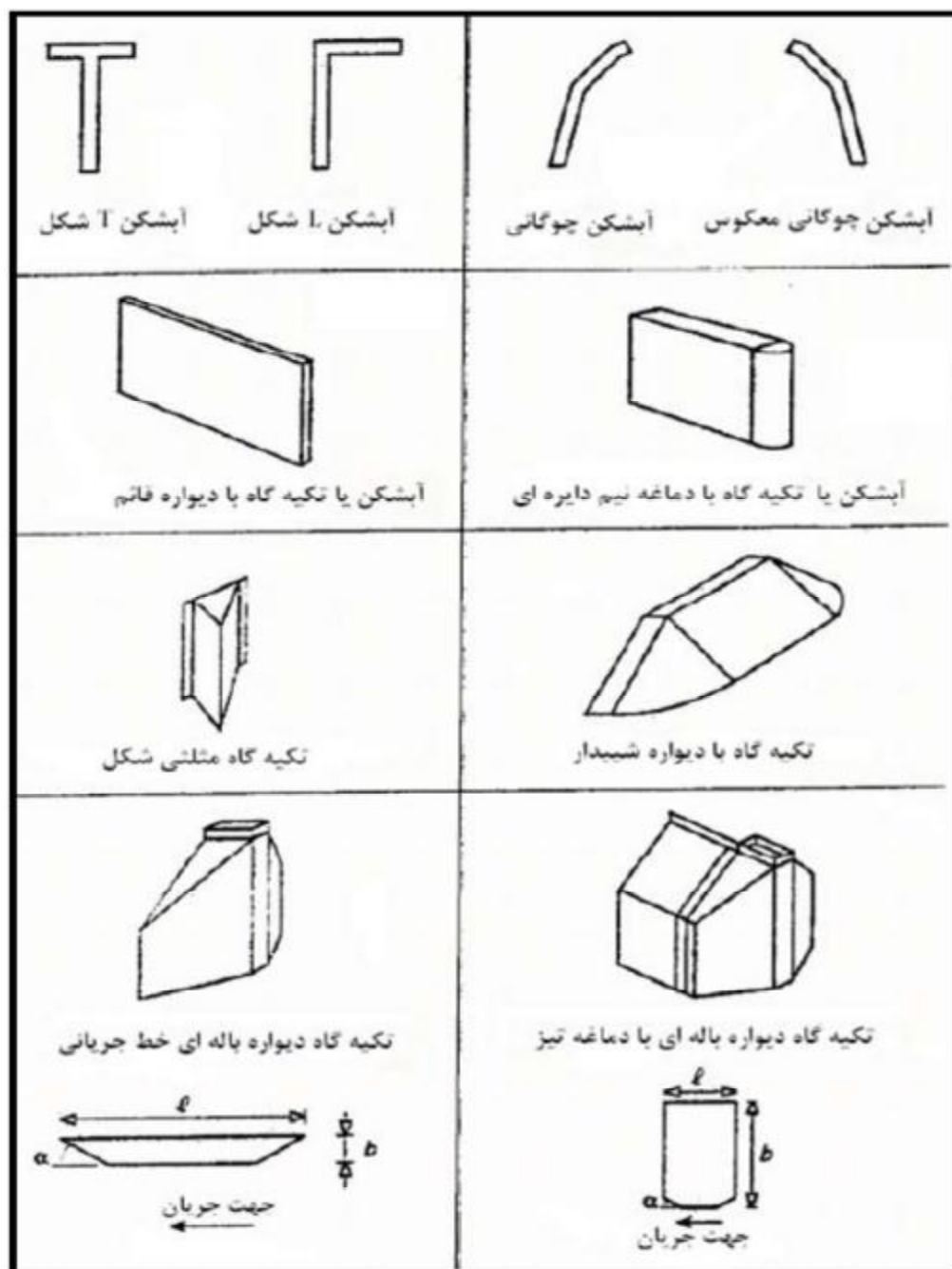
S : شیب آستانه سنگ فرشی شیبدار

D_{65} : اندازه سنگ های آستانه سنگ فرشی شیبدار

آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها

ساخت تکیه‌گاه‌های پل و آبشکن‌ها اهداف متفاوتی دارد، اما به علت مشابه بودن شکل ظاهری و نیز تشابه مکانیسم آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌های بسته، آبشستگی 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 یا کوله‌های پل، پایه‌های پل چسبیده به ساحل رودخانه می‌باشند. درحالی که آبشکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای ساماندهی و تثبیت کناره‌های رودخانه احداث می‌شوند. تکیه‌گاه‌ها معمولاً بتنی هستند، در صورتی که 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 آبشستگی نهایت دقت را مبذول داشت. در حالت کلی، تکیه‌گاه‌ها به تکیه‌گاه‌های خط جریانی و تکیه‌گاه‌های با دماغه تیز 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 آن-

ها شبیه به تکیه‌گاه‌های با دیواره شیب‌دار خواهد بود. آبشکن‌های باز نیز به گونه ای است که قسمتی از جریان از درون این سازه‌ها عبور می‌کند. 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. در شکل انواع تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده اند. در حالت کلی، تکیه‌گاه‌ها به تکیه‌گاه‌های خط جریانی و تکیه‌گاه‌های با دماغه تیز 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 گونه ای است که قسمتی از جریان از درون این سازه‌ها عبور می‌کند. 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. در شکل 28 انواع تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده اند.



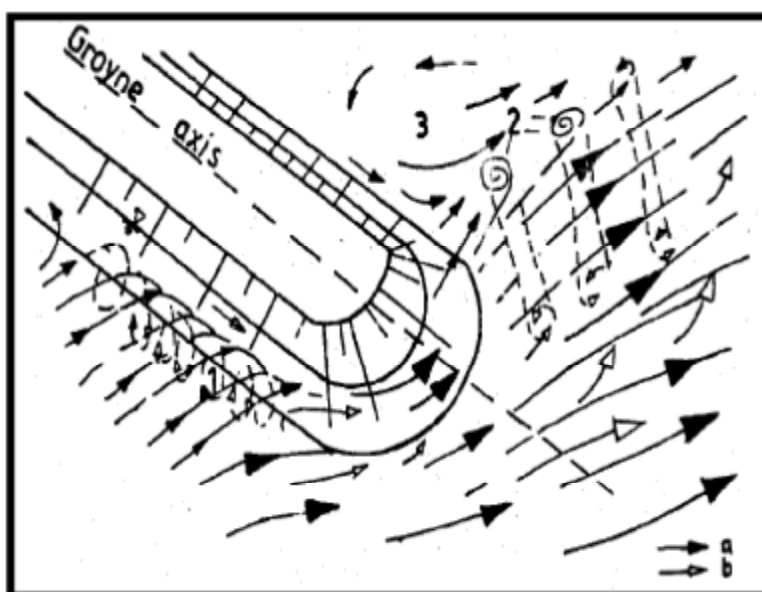
شکل 28 (انواع تکیه‌گاه‌ها و آبشکن‌ها)

الگوی جریان

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 آشفته‌گی بیشتر جریان در اطراف سازه می‌شود. الگوی جریان در اطراف سازه و شکل‌گیری گردابه‌ها بر روی مصالح بستر دلایل اصلی آشفته‌گی موضعی اطراف آبشکن می‌باشند.

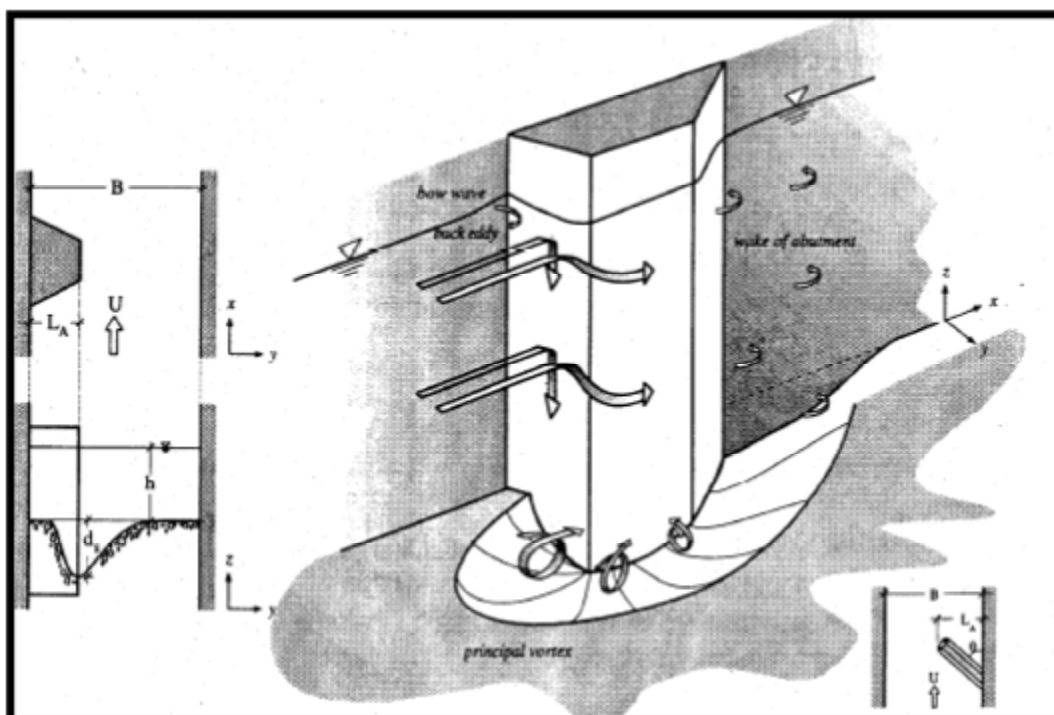
یک جریان چرخشی نیمه نعل اسبی نسبتاً بزرگ با محور افقی در اطراف آبشکن (شماره 1 در شکل 29) در نتیجه برگشت آب ایجاد می‌شود. فوران‌های انتهایی گردابه از دماغه آبشکن با چرخش آب به طرف جریان اصلی حرکت می‌کند. تغییر جهت جریان و ایجاد نیروهای مرکزی ممکن است چرخش به سمت راست را ایجاد کند. به عبارت دیگر فوران‌های 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 پایین‌دست آبشکن، جریان‌های چرخشی با محور قائم (شماره 2 در شکل 29) که بنام گرداب‌های فون کارمن معروف هستند ایجاد می‌شوند. این سامانه چرخشی به وسیله چرخش لایه‌های برشی بین جریان اصلی و یک گرداب بامحور قائم (شماره 3 در شکل 29) 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 شکل 29 و 30 الگوی جریان ایجاد شده اطراف یک آبشکن و تکیه‌گاه را نشان می‌دهد



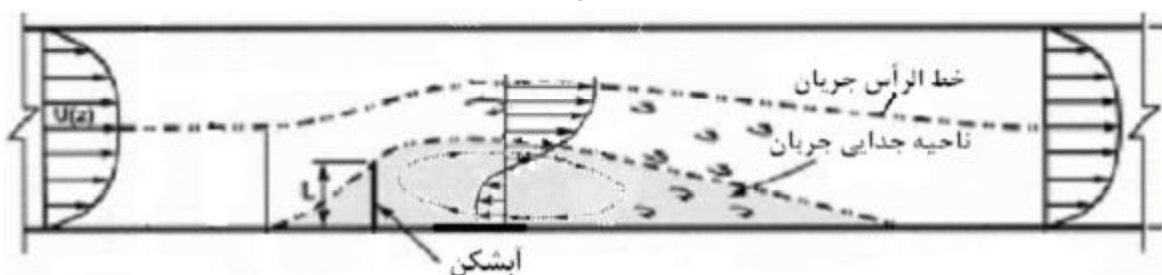
شکل 29 (الگوی جریان اطراف یک آبشکن)

در آبشکن‌های نفوذپذیر، بخشی از جریان از منافذ بین آبشکن‌ها عبور می‌کند که منطقه چرخشی در پایین‌دست 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 تندشونده می‌باشد و در ناحیه دوم از مقطعی که بیشترین تنگ‌شدگی را دارد تا پایین‌دست، جریان با یک شتاب کند شونده دنبال می‌شود و یک نقطه‌ی جدایی جریان در راس آبشکن قرار دارد. در پایین‌دست آبشکن نیز جریان اصلی از یک گردابه‌ی بزرگ جدا و در پایین‌دست نقطه‌ی اتصال مجدد، جریان نرمال مجدداً برقرار می‌شود. البته در بالادست آبشکن نیز یک نقطه‌ی جدایی و گرداب‌های کوچک می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین در وجه بالادست آبشکن نیز یک نقطه‌ی اتصال مجدد وجود دارد. همچنین در نزدیکی دیواره‌های ناحیه جدایی قائم آبشکن یک حرکت مارپیچی شدید ناشی از جریان‌های

برگشتی در نزدیکی بستر تولید می‌گردد. شکل 31 جریان و موقعیت خط جریان در بالادست و پایین‌دست آبشکن منفرد در یک کانال ارائه شده توسط اتما و مستو را نشان می‌دهد.



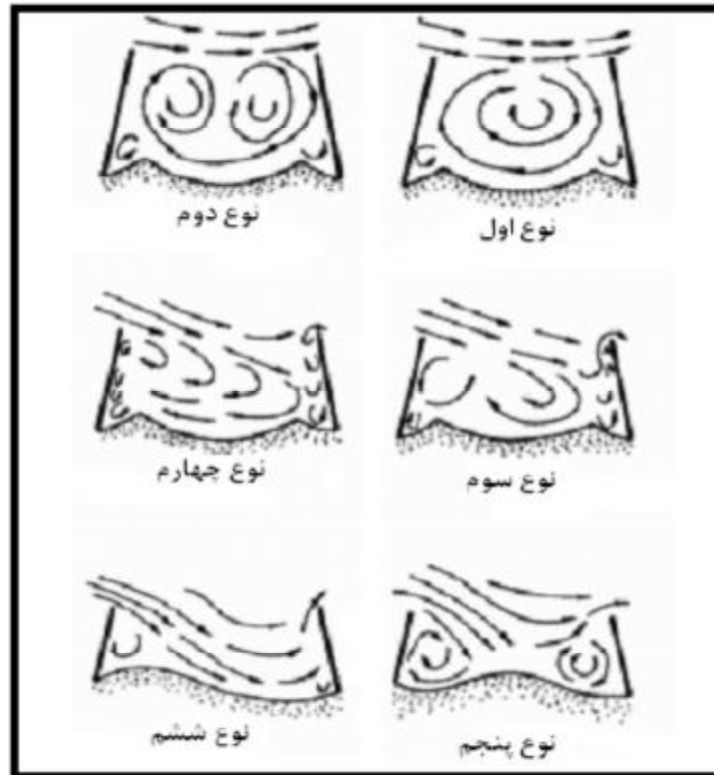
شکل 30 (الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه)



شکل 31 (خط‌الرأس و جدایی جریان در اطراف یک آبشکن منفرد در مسیر مستقیم، پلان)

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 32 ارائه می‌شود.



شکل 32) انواع الگوی جریان چرخشی بین آبشکن‌ها

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 پایین‌دست 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 پایین‌دست متوقف شده و جریان مستقیماً به دیواره برخورد می‌کند.

تغییرات زمانی آبشستگی

فرآیند آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌ها نیز به چهار مرحله ابتدایی، توسعه، تثبیت و تعادل تقسیم می‌شود. برای به‌دست آوردن تغییرات زمانی عمق آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها $\frac{b}{y_1} > 1$ ، عرض تکیه‌گاه و y_1 عمق جریان بالادست تکیه‌گاه می‌باشد می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود که برای تمامی مراحل فرآیند آبشستگی معتبر است.

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = 1 - e^{\ln \left[1 - \frac{y}{y_s} \right] \left[\frac{t}{t_1} \right]^g}$$

که در این رابطه:

y_1 : عمق جریان در بالادست

t : زمان بر حسب ثانیه

t_1 : زمان مشخصه هنگامی که بر حسب ثانیه است

$y_{s,t}$: عمق آبشستگی در زمان

y_s : حداکثر عمق آبشستگی

g : ضریب ثابت برابر 0/4 می‌باشد.

تغییرات عمق آبشستگی در مرحله توسعه آبشستگی زمانی که $t < t_1$ توسط بروسرز (1966) به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{y_{s,t}}{y_s} = \left[\frac{t}{t_1} \right]^g$$

براساس آزمایش‌های متعدد، رابطه زیر برای زمان t_1 مشخصه به دست آمده است:

$$t_1 = \frac{ky_1(S-1)^{1.7}}{(au - u_c)^{4.3}}$$

که در این رابطه

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

u_c : سرعت بحرانی آستانه حرکت m/s

u : سرعت متوسط m/s

a : ضریب وابسته به سرعت جریان و شدت آشفستگی

S : چگالی نسبی مصالح

برای تکیه‌گاه‌ها، پارامتر بستگی به نسبت تنگ شدگی مقطع دارد. مقادیر توسط وان دروال (1991) برای تکیه‌گاه‌های با دیوار قائم و تکیه‌گاه‌های باله‌ای در جدول 11 ارائه شده است:

جدول 11 (پارامتر a برای تکیه‌گاه‌ها با دیوار قائم و باله‌ای)

نوع تکیه‌گاه	b/y_1	α
تکیه‌گاه‌های با دیوار قائم	$1 - 7/5$	$4 - 9$
تکیه‌گاه‌های باله‌ای	$1 - 3$	$2 - 7$

تخمین حداکثر عمق آبشستگی

روابط نیمه تجربی متعددی برای تخمین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌ها توسط محققین مختلف ارائه شده است. انگلیس (1929) رابطه زیر را برای محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه پل ارائه نمود:

$$y_s + y_1 = 2.32 \left[\frac{q^{\frac{2}{3}}}{b} \right]^{0.78}$$

که در این رابطه:

b : عرض تکیه‌گاه (متر)

y_1 : عمق جریان بالادست تکیه‌گاه (متر)

q : بده واحد عرض در بالادست تکیه‌گاه (متر مربع بر ثانیه)

y_s : حداکثر عمق آبشستگی (متر)

احمد (1953) براساس تجزیه آزمایشات متعدد، رابطه زیر را برای تخمین عمق آبشستگی به دست آورد:

$$y_s + y = k_A k'_A \left[\frac{q}{(1-m)} \right]^{\frac{2}{3}}$$

که در این رابطه:

q : بده بالادست در واحد عرض (متر مربع بر ثانیه)

$m = \frac{b}{B}$ ، b : عرض تکیه‌گاه و B : عرض رودخانه

$$k'_A: 2.14g^{\frac{1}{3}}$$

K_A : ضریب تصحیح که به صورت زیر تعریف می گردد (جدول 12):

$$K_A = 2K_P K_S K_q K_h$$

K_P : ضریب تصحیح اثر قوس آبراهه

K_S : ضریب تصحیح اثر شکل سازه

K_q : ضریب تصحیح اثر زاویه برخورد جریان با تکیه‌گاه (زاویه تکیه‌گاه با ساحل پایین‌دست)

K_h : ضریب تصحیح اثر تخلخل سازه

براساس مطالعات لیو و همکاران (1961) روی تکیه‌گاه‌های با دیواره قائم و دیواره شیبدار (سازه‌های خط جریانی) حداکثر عمق آبشستگی به صورت زیر ارائه گردید:

$$y_s = k_L y_1 \left(\frac{b}{y_1} \right)^{0.4} Fr^{1/3}$$

جدول 12

K_6	زاویه برخورد جریان (درجه)	K_7	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	پایین دست قوس خارجی قوس تند
۱/۰۵	۱۲۰	۱/۱۰	قوس ملایم
۱/۱۰	۱۵۰		
K_9	تخلخل سازه	K_8	شکل سازه
۱/۰	۲۰ %	۱/۰۰	تکیه گاه دیواره قائم
۰/۹	۵۰ % (با شیب 1V:2H)	۰/۸۵	تکیه گاه با دیواره شیبدار با شیب های ۴۵ درجه
۰/۶	۵۰ % (با شیب 1V:3.5H)		

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gy_1}} \quad Fr_1: \text{عدد فرود بالادست}$$

$$u: \text{سرعت متوسط جریان در بالادست} \quad \frac{m}{s}$$

k_L : ضریبی ثابت است که برای تکیه گاه های خط جریانی 1/1 و برای تکیه گاه های دماغه تیز 1/5 ملویل و کولمن (2000) رابطه زیر را برای محاسبه عمق آبشستگی اطراف تکیه گاه های پل ارائه نمود:

$$y_s = K_{yL} K_I K_d K_S^* K_q^*$$

ضرایب رابطه فوق در جدول 13 معرفی شده اند.

L : طول تکیه گاه عمود بر جهت جریان

y_1 : عمق جریان بالادست تکیه گاه

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

q : زاویه برخورد جریان با تکیه گاه (زاویه تکیه گاه با ساحل پایین دست) می باشد.

برخی از روابط ارائه شده جهت محاسبه حداکثر عمق آبشستگی در جداول 14 و 15 ارائه شده است.

جدول 13 (معرفی ضرایب رابطه ملویل)

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

جدول 14 (برخی از روابط ارائه شده برای حداکثر عمق آبشستگی تکیه گاه ها و آبشکن های بسته)

مشخصات	معادله	محقق
d_{50} بر حسب میلی متر 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 می کند.	$\frac{y_s}{y_1} = 7.70 \left[\frac{Fr_1}{MFr_c} - 0.35 \right]$ Fr_c : عدد فروود بحرانی در آستانه حرکت Fr_1 : عدد فروود در سیلابدشت، $M = Q_0 / Q$	Sturm et al. (1994)
$m = b/B$ عرض b تکیه گاه و B عرض رودخانه، ضریب K_B در جدول (۵-۶) 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 15 (برخی از روابط ارائه شده برای حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن های باز)

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)
$k_2 = 1.75/d_{50}$ $k_1 = 12.4$ بستر صلب $k_1 = 5$ بستر متحرک	$y_s = k_2 \Delta h$ $\Delta h = k_1 \frac{L}{B} R_b^{1/2} \frac{u^2}{2g}$	Altunin et al (1962)
D و S_d : به ترتیب قطر شمع ها و فاصله بین شمع ها است 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 16) ضریب k_B در رابطه هافمن

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

q : زاویه برخورد جریان

L : طول تکیه گاه عمود بر جهت جریان

b : عرض تکیه گاه

$$k_B = \frac{S_d + D}{S_d}$$

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 به دست آمده در آزمایشگاه استفاده شده است. مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده توسط محققین مختلف، شامل 17 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 (1992) نیل (1973 و 1980) احمد (1953)، لیو (1961) و هافمن و بروسرز (1995) نتایج بهتری از بقیه روابط داشتند. در نهایت لازم به ذکر است که اکثر روابط ارائه شده بر مبنای اندازه گیری‌های آزمایشگاهی بوده و تعداد بسیار کمی از آنها با استفاده از داده‌های میدانی صحت سنجی شده اند. بدیهی است که با مقایسه نتایج به دست آمده از روابط فوق و قضاوت مهندسی می‌توان مقدار حداکثر عمق آبشستگی را تخمین زد.

لایه‌های محافظ

ریپرپ لایه سنگی است که به صورت دستی یا با ماشین آلات برای جلوگیری از فرسایش، آبشستگی، لغزش یک سازه یا خاکریز به کار گرفته می‌شود. از مواد دیگری بجز سنگ و قطعات سنگی نیز به عنوان ریپرپ استفاده می‌شود که می‌توان از قطعات بتنی، خرده سنگ‌ها نام برد که در شکل‌های مختلفی نظیر اسلب‌ها، بلوک‌ها، منشورهای مستطیلی که بر روی محل مورد نظر قرار داده شده و پوشش انعطاف‌پذیر مناسبی را به وجود می‌آورند. انعطاف‌پذیری توده‌ی ریپرپ ناشی از قطعات منفردی است که به طور مستقل همراه با توده عمل می‌کنند. ریپرپ‌ها کاربردهای وسیعی در فعالیت‌های مختلف دارند که می‌توان از پایدار نمودن جداره-های کانال و تثبیت خروجی‌ها نام برد. استفاده از ریپرپ‌ها در کانال و مکان‌های تمرکز جریان از فرسایش بیش از حد ناشی از سرعت آب جلوگیری کرده و میزان تولید رسوب را کاهش می‌دهد. مواد و مصالحی که برای پوشش استفاده می‌شوند باید توانایی تحمل دماهای متفاوت و جریان آب و باد را داشته باشد. برای جلوگیری از شسته شدن لایه زیرین ریپرپ که همان لایه محافظت

شده است و همچنین تخلیه مناسب آب نشت یافته می‌توان از فیلتر استفاده نمود. بافت و خصوصیات خاک، شرایط جریان و میزان نشت در تعیین ضخامت فیلتر مورد نیاز خواهد بود. نوع قطعات سنگی که برای این لایه استفاده می‌شود باید مقاوم و گوشه‌دار بوده و توسط نیروهای خارجی خرد و تجزیه نگردد. قطعات ریپرپ در اندازه‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود که اندازه‌ی مناسب آن بستگی به هدف و کاربرد آن خواهد داشت. به طور مثال اندازه مورد استفاده برای پایداری کناره آبراهه بستگی به سرعت جریان دارد. طراحی این لایه معمولاً بر اساس قطری از قطعات در مخلوط برای درصدی از وزن که از آن کوچکتر باشد خواهد بود. به عبارت دیگر طراحی براساس قطر متوسط سنگ در مخلوط می‌باشد. جدول 17 انواع ریپرپ را بر اساس وزن، قطر کروی و بعد مستطیلی متناظر با آن را نشان می‌دهد. اندازه این قطعات بر اساس فرض وزن ویژه‌ای معادل 165 lb/ft^3 می‌باشد.

جدول 17

<u>Weight</u> (lbs)	<u>Mean Spherical</u> <u>Diameter</u> (in)	<u>Typical Rectangular Shape</u> <u>Length</u> (in)	<u>Width, Height</u> (in)
50	10	18	6
100	13	21	7
150	14	24	8
300	18	30	10
500	22	36	12
1000	27	45	15
1500	31	52	17
2000	34	57	19
4000	43	72	24
6000	49	83	28
8000	54	90	30

ریپرپ باید از مخلوط خوب دانه‌بندی شده با ذراتی به اندازه کمتر از 1 اینچ باشد. بنابراین 50 درصد از وزن مخلوط باید بزرگتر از قطر متوسط ذرات یا d_{50} باشد. یک مخلوط با دانه‌بندی مناسب به مخلوطی که عمدتاً از قطعات سنگی با ابعاد بزرگ تشکیل شده باشد گویند اما این مخلوط باید اندازه‌های دیگری را برای پر کردن خلل و فرج شامل شود. قطر بزرگ‌ترین قطعه نباید از $1.5d_{50}$ بزرگ‌تر باشد. در انتخاب نوع مواد برای استفاده به عنوان ریپرپ منابع موجود در منابع قرضه تاثیرگذار می‌باشد. حداقل ضخامت برای پوشش جداره و همچنین خروجی مجرا باید $1.5d_{50}$ یا 6 اینچ باشد. یک لایه فیلتر باید در زیر ریپرپ برای جلوگیری از شسته شدن ذرات در نظر گرفته شود زیرا شسته شدن مواد باعث به وجود آمدن حفرات، نشت و در نهایت شکست سازه خواهد شد. روابط زیر فیلتر مناسب را برای لایه محافظ نشان می‌دهد:

$$\frac{d_{15(\text{filter})}}{d_{85(\text{soil})}} < (4-5)$$

$$5 < \frac{d_{15(\text{filter})}}{d_{85(\text{soil})}} < 40$$

$$\frac{d_{50(\text{filter})}}{d_{50(\text{soil})}} < 40$$

در برخی از موارد یک لایه فیلتر پاسخگوی نیاز نمی‌باشد و باید از بیش از یک لایه استفاده نماییم. که به عملکرد لایه فیلتری کمک خواهد کرد و اهداف را بهتر برآورده خواهد نمود. منحنی دانه‌بندی فیلتر تقریباً به صورت موازی با دانه‌بندی لایه محافظ و لایه محافظت شده می‌باشد. همچنین مواد فیلتری نباید بیش از 5 درصد ذرات کوچکتر از الک 200 داشته باشند.

محافظت از مجراهای خروجی

استفاده از ریپرپ در خروجی‌ها بسته به شرایط پایداری متفاوت می‌باشد. شروع ریپرپ باید قبل از سیستم خروجی و محل ریزش جریان باشد و تا پایین‌دست سازه برای جلوگیری از آبستنگی در کناره‌ها و کف ادامه پیدا کند. همچنین نباید از انتهای کفبند به کانال پایین‌دست جریان ریزشی داشته باشیم. قطر متوسط قطعات بر اساس فوت از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$d_{50} = \frac{0.02 Q^{\frac{4}{3}}}{TW D_0}$$

که در این رابطه:

$$Q: \text{دبی مجرا} \left(\frac{ft^3}{s} \right)$$

$$D_0: \text{قطر مجرا} (ft)$$

$$TW: \text{عمق آب در پایین‌دست} (ft)$$

طول مورد نیاز برای محافظت نیز از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$L_a = \frac{1.7Q}{D_0^{\frac{3}{2}}} + 8D_0$$

برای مجراهای فعال با نصف یا کمتر از نصف ظرفیت

$$L_a = \frac{3Q_0}{D_0^{\frac{3}{2}}}$$

برای مجراهای فعال با بیشتر از نصف ظرفیت

عرض لایه محافظ معادل عرض کف آبراهه می‌باشد. اجرای لایه محافظ باید تا 1 فوت بالاتر از شکل‌گیری عمق نرمال در پایین‌دست ادامه یابد. اگر کانال یا آبراهه مناسبی در پایین‌دست خروجی وجود نداشته باشد عرض لایه محافظ در پایان کفبند از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$W = 3D_0 + 0.4L_a$$

برای ارتفاع بزرگتر یا برابر با نصف قطر لوله

$$W = 3D_0 + L_a$$

برای ارتفاع کمتر از ارتفاع نصف قطر لوله

در کالورت‌ها عرض کفبند در خروجی می‌بایست سه برابر عرض کالورت باشد. شیب کناره‌ها حداکثر به مقدار 1:2 محدود شود. برای کف آبراهه شیب صفر اختیار شود. باید توجه داشت که هیچ جریان ریزشی در انتهای کفبند منتهی به کانال به‌وجود نیاید و هیچ خم یا انحنایی در تقاطع مجرا و کفبند رخ ندهد.

اگر اندازه‌ی متوسط ذرات کمتر یا معادل ضخامت گابیون یا پوشش بتنی باشد می‌توانیم از گابیون‌ها و بلوک‌های پیش‌ساخته بجای ریپرپ استفاده کنیم. پس از وقوع سیلاب یا ریزش باران بازدید از ریپرپ باید فوراً انجام گیرد. نگهداری بعد از وقوع سیلاب-

هایی معادل سیل طراحی بررسی ریپرر اجتناب ناپذیر است. در مناطقی که ریپرر دچار آسیب شده سریعاً باید عملیات تعمیر و تعویض انجام گیرد چون اثرات منفی روی سازه بالادست خواهد گذاشت.

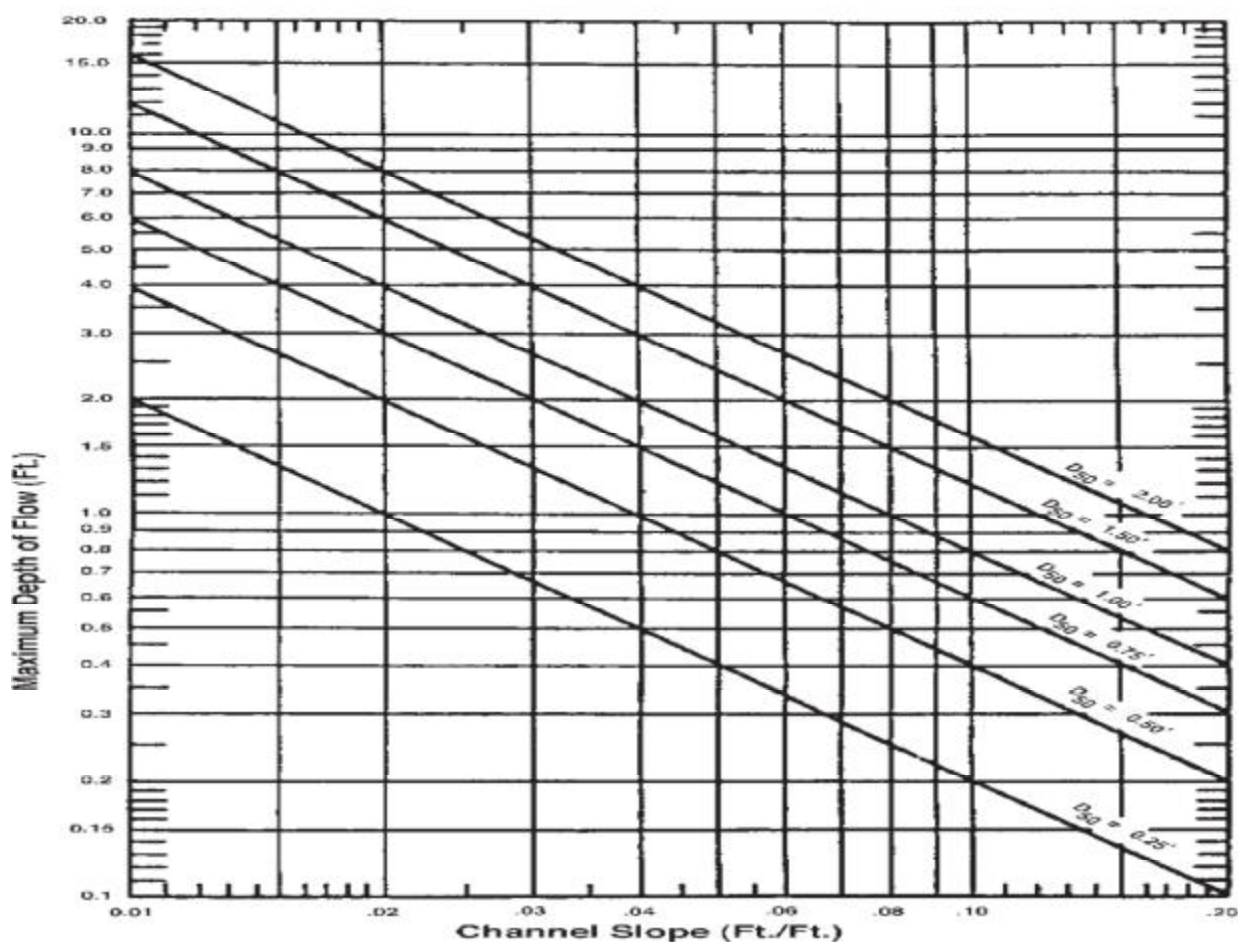
محافظت از شیب جداره کانال

شیب لایه محافظت شده توسط ریپرر نباید تندتر از 1:1.5 باشد. قسمت‌هایی از شیب که در بالای لایه محافظ قرار دارد می‌تواند توسط پوشش گیاهی پایدار شود. زمانی که ریپرر برای محافظت از خاکریز استفاده می‌شود پوشش باید تا 3 فوت بالای حداکثر تراز آب ادامه پیدا کند. در برخی از مواقع نصب ریپرر بر روی شیب طبیعی زمین امکان‌پذیر نیست که باید شیب جدیدی برای آن طراحی شود و سپس از فیلتر بر روی آن استفاده شود.

طراحی لایه محافظ برای قسمت افقی کانال

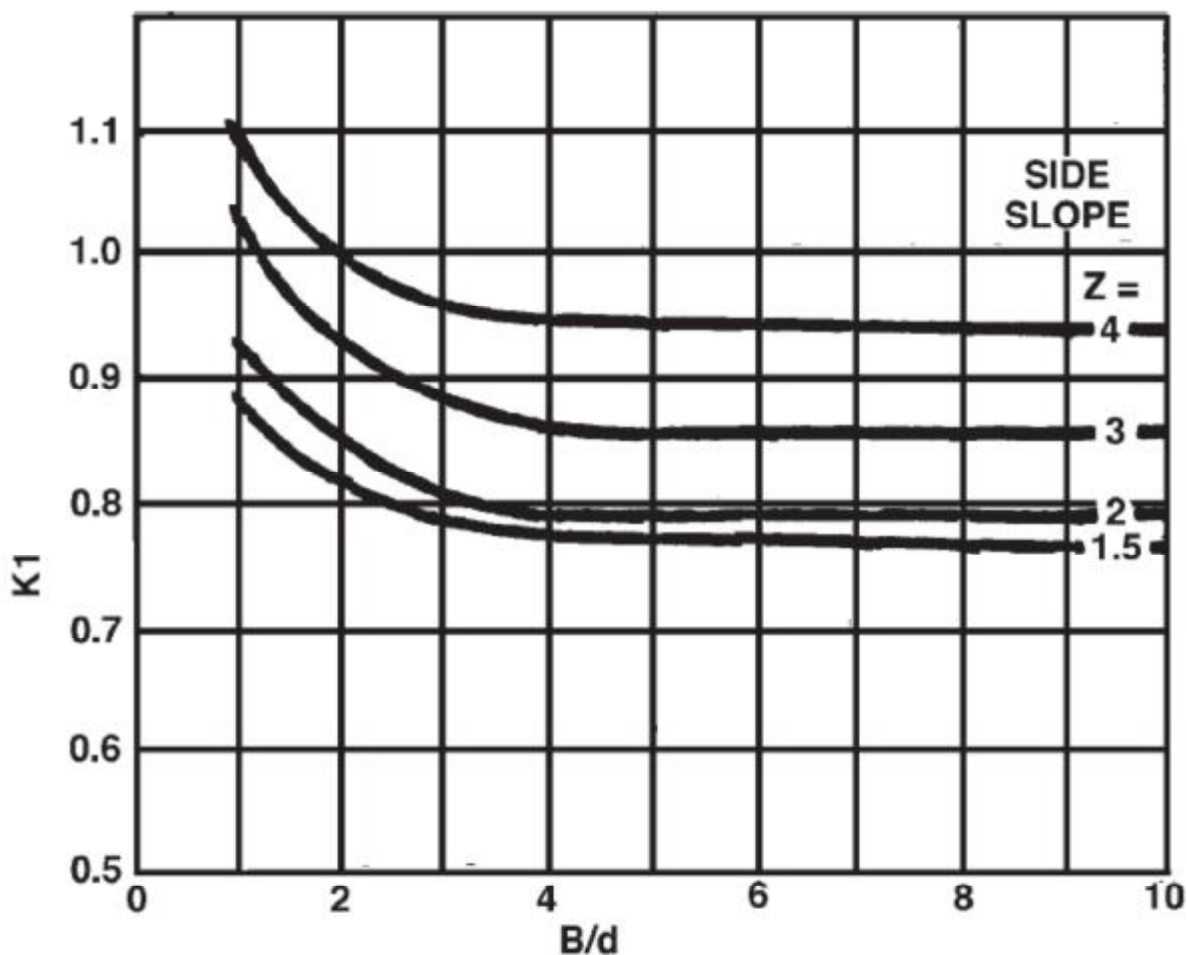
در این روش طراحی و اندازه قطعات بر اساس حداکثر عمق جریان انتخاب می‌شود و اگر شیب کانال تندتر از 1:3 بود اندازه قطعات سنگی افزایش می‌یابد. مقدار متوسط محاسبه شده در بخش قبلی کلی می‌باشد و باید در شرایط مختلف محاسبه شود. مراحل طراحی:

1- با استفاده از شکل 33 با داشتن حداکثر عمق و شیب کانال d_{50} را از محل تقاطع دو منحنی به دست می‌آوریم.



(شکل 33)

- 2- اگر شیب جدار کانال 1:3 تندتر شود به مرحله‌ی سوم می‌رویم و اگر کمتر بود مراحل طراحی کامل است.
- 3- با استفاده از شکل 34 با شیب جداره و نسبت عرض کف به حداکثر عمق $(\frac{b}{d})$ ، اگر محلی که دو خط یکدیگر قطع می‌کنند به صورت افقی ادامه دهیم به مقدار K_1 خواهیم رسید.



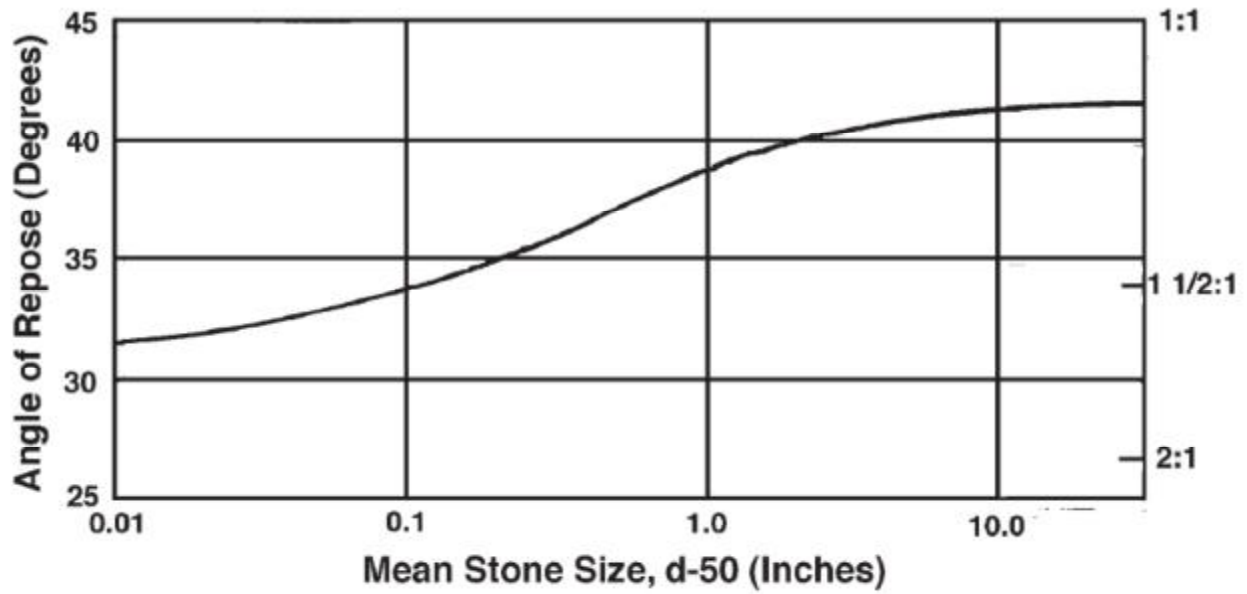
(شکل 34)

- 4- با استفاده از شکل 35 زاویه استراحت خاک (Ar) را برای d_{50} قطعات به دست می‌آوریم. لایه محافظ برای خاکریز بر اساس بیشتر بودن زاویه طبیعی استراحت قطعات سنگی از شیب پایدار خاکریزها طراحی می‌شوند. برای $d_{50} > 1' \rightarrow Ar = 42^\circ$.
- 5- در شکل 36 با شیب کناره کانال و زاویه استراحت قطعات را برای قطعات به دست می‌آوریم. اگر محل تقاطع دو خط را ادامه دهیم ضریب K_2 را به دست می‌آوریم.
- 6- در نهایت قطر مناسب برای مصالح ریپ‌رپ را از رابطه زیر به دست می‌آوریم.

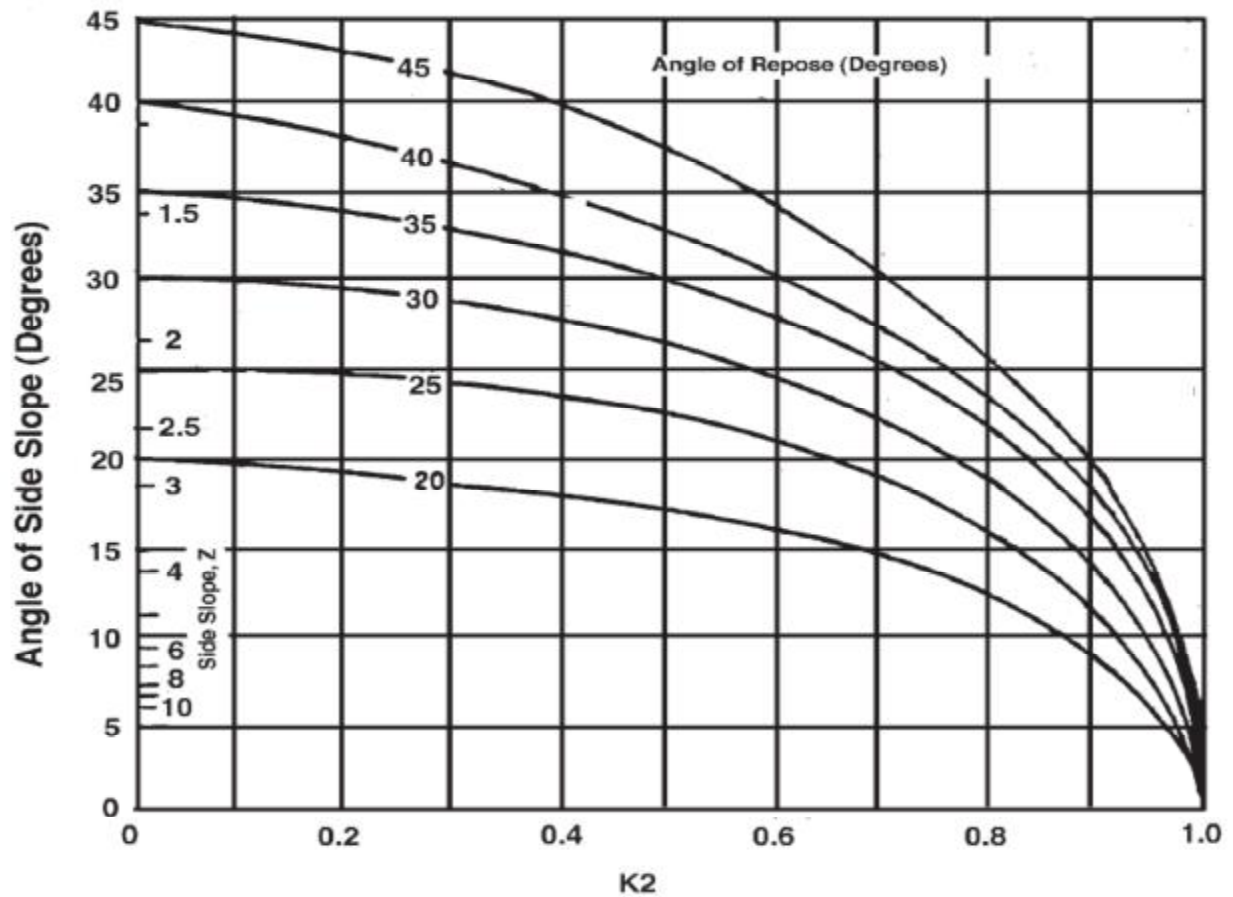
$$d_{50}' = d_{50} \times \frac{k_1}{k_2}$$

طراحی لایه محافظ برای انحنا

شعاع انحنا را برای کانال محاسبه می‌نماییم و نسبت عرض سطح آب به شعاع انحنا $\frac{B_s}{R_0}$ را به دست می‌آوریم.



(شکل 35)



(شکل 36)

با استفاده از شکل 7 با نسبت $\frac{B_s}{R_0}$ ضریب K_3 را به دست می آوریم و در نهایت قطر متوسط ذرات در این ناحیه را با رابطه زیر محاسبه می کنیم.

$$d_{50c} = d'_{50} \times K_3$$

References :

1. Argue, J.R. (1960) New Structure for Roadway Pipe Culverts. The Journal, Institution of Engineers, Australia, June 1960, Sydney.
2. ASCE, (1992) Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems. Water Environment Federation, American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77, New York.
3. AWACS (1990) Smeaton Grange Industrial Development - Hydraulic Model Testing of Drop Structure. Report 90/15 Australian Water and Coastal Studies, Sydney.
4. Bohan, J.P. (1970) Erosion and Riprap Requirements at Culvert and Storm-Drain Outlets. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Research Report H-70-2, Vicksburg, Mississippi.
5. Carr, S.R. (1960) Extension Walls for Limiting Erosion at Water Control Structures. Civil Engineering Transactions, Vol CE 2, No. 2, September 1960, The Institution of Engineers, Australia, Sydney.
6. Concrete Pipe Association of Australia (1986) Hydraulics of Precast Concrete Conduits. Hydraulic design manual. Concrete Pipe Assoc. of Aust. Elsternwick, Victoria.
7. Keim, S.R. (1962) The Contra Costa Energy Dissipator. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.88, No.HY2, March, 1962, ASCE, New York.
8. Korom, S.F., Sarikelle, S. and Simon, A.L. (1990) Design of Hydraulic Jump Chamber. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.116, No.HY2, March/April, 1990, ASCE, New York.
9. MacDonald, T.C. (1969) Energy Dissipators for Large Culverts. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.95, No.HY6, November, ASCE.
10. McInnes, D.B. and Argue, J.R.K. (1987) Gabion Handbook. Smorgon ARC Engineering Services, B.J. Ferguson (ed.). Smorgon ARC.
11. Meredith, D.D. (1975) Model Study of Culvert Energy Dissipator. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101, No.HY3, March, ASCE, New York.
12. O'Loughlin, E.M. (1960) Culvert Investigations by Hydraulic Models. Harbours and Rivers Branch Hydraulic Laboratory.
13. Peterka, A.J. (1984) Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. USBR Eng. Monograph 25, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
14. Queensland Transport (1975) Urban Road Design Manual - Volume 2. Transport Technology Division, Queensland Transport, Brisbane.
15. Rice, C.E. and Kadavy, K.C. (1991) HGL Elevation at Pipe Exit of USBR Type VI Impact Basin. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.117, No. HY7, July, 1991, ASCE, New York.
16. Seetharamaiah and Shashidhara (1965) Energy Dissipation Studies on Submerged-Axially Symmetric-Twin Jets. Journal of "Irrigation and Power" Vol.22 No.2 April 1965 pp.181-191. India.
17. Standing Committee on Rivers and Catchments, Victoria (1991) Guidelines for Stabilising Waterways. prepared by The Working Group on Waterway Management, Armadale, Victoria.
18. U.S. Army Corps of Engineers (1990) Water Surface Profiles - User's Manual.
19. U.S. Department of Transport (1983) Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culvert and Channels. Hydraulic Engineering Circular No. 14
20. U.S. Soil Conservation Service (-) Criteria for the Hydraulic Design of Impact Basins Associated with Full Flow in Pipe Conduits. Water Resources Publication, Technical Release No. 49, National Engineering Publications, Colorado.
21. Vallentine, H.R., Hattersley, R.T. and Cornish, B.A. (1961) Low Cost Scour Control at Culvert Outlets. Reports 48 and 62, October, 1961, Uni of NSW, Water Research Laboratory, Sydney.
22. Witheridge, G.M. (1994) Drop Structure Design Problems. Engineering Update, Vol.2, No.1, March 1994, pp.17-27. Queensland Division, Institution of Engineers, Australia, Brisbane.