

راهنمای تعیین عمق فرسایش و روشهای مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل

نشریه شماره ۲۶۰

وزارت نیرو
سازمان مدیریت منابع آب
دفتر استاندارد مهندسی آب

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
معاونت امور فنی
دفتر امور فنی و تدوین معیارها
<http://www.omran.net/tsb.mpo>

جمهوری اسلامی ایران

راهنمای تعیین عمق فرسایش و روشهای مقابله با آن در محدوده پایه های پل

نشریه شماره ۲۶۰

وزارت نیرو
شرکت مدیریت منابع آب ایران
دفتر استاندارد مهندسی آب

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
معاونت امور فنی
دفتر امور فنی و تدوین معیارها

فهرستبرگه

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها
راهنمای تعیین عمق فرسایش و روشهای مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل /
معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها؛ وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع آب
ایران، دفتر استاندارد مهندسی آب - تهران: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور
پشتیبانی، مرکز مدارک علمی و انتشارات، ۱۳۸۱.

۴۱ص. - مصور. - (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها؛
نشریه شماره ۲۶۰) (انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور؛ ۸۵/۰۰/۸۱)
ISBN 964-425-397-3

مربوط به بخشنامه شماره ۱۶۷۴۴۱/۱۰۱ مورخ ۱۳۸۱/۹/۱۳
کتابنامه: ص. ۴۱

۱. پلها - پی و پایه. ۲. فرسایش پلها. الف. سازمان مدیریت منابع آب ایران. دفتر استاندارد
مهندسی آب. ب. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. مرکز مدارک علمی و انتشارات. ج.
عنوان. د. فروست.

۱۳۸۱ ش. ۲۶۰ س/۳۶۸ TA

ISBN 964-425-397-3

شابک ۹۶۴-۴۲۵-۳۹۷-۳

راهنمای تعیین عمق فرسایش و روشهای مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل

تهیه کننده: معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها

ناشر: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور پشتیبانی، مرکز مدارک علمی و انتشارات

چاپ اول: ۱۰۰۰ نسخه، ۱۳۸۱

قیمت: ۵۰۰۰ ریال

لیتوگرافی: قاسملو

چاپ و صحافی: چاپ زحل

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.



بسمه تعالی

ریاست جمهوری
سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
دفتر رئیس سازمان

شماره:	۱۰۱/۱۶۷۴۴۱
تاریخ:	۱۳۸۱/۹/۱۳

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران

موضوع: راهنمای تعیین عمق فرسایش و روشهای مقابله با آن در محدوده پایه های پل

به استناد آیین نامه استانداردهای اجرایی طرح های عمرانی موضوع ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و در چهارچوب نظام فنی و اجرایی طرح های عمرانی کشور (مصوبه شماره ۲۴۵۲۵ / ت ۱۴۸۹۸ هـ ، مورخ ۱۳۷۵/۴/۴ هیات وزیران) به پیوست نشریه شماره ۲۶۰ دفتر امور فنی و تدوین معیارهای این سازمان ، با عنوان " راهنمای تعیین عمق فرسایش و روشهای مقابله با آن در محدوده پایه های پل " از نوع گروه سوم ، ابلاغ می گردد.

دستگاه های اجرایی ، مهندسان مشاور ، پیمانکاران و عوامل دیگر می توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده نمایند و در صورتی که روش ها، دستورالعمل ها و راهنماهای بهتر در اختیار داشته باشند، رعایت مفاد این نشریه الزامی نیست .

عوامل یادشده باید نسخه ای از دستورالعمل ها ، روش ها یا راهنماهای جایگزین را برای دفتر امور فنی و تدوین معیارهای این سازمان ، ارسال دارند.

محمد ستاری فر
معاون رئیس جمهور و رئیس سازمان

بسمه تعالی

پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان سنجی)، مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرحهای عمرانی بلحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرحها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیتی ویژه برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرح های عمرانی کشور (مصوبه مورخ ۱۳۷۵/۴/۴ هیات محترم وزیران) بکارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرحها را مورد تاکید جدی قرار داده است.

باتوجه به مراتب یادشده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب و وزارت نیرو (طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (دفتر امور فنی و تدوین معیارها) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است:

- استفاده از تخصصها و تجربه‌های کارشناسان و صاحبانظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- پرهیز از دوباره‌کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات تهیه کننده استاندارد

ضمن تشکر از کارشناسان محترم برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیتهای کشور تلاش نموده و صاحبانظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

معاون امور فنی

پاییز ۱۳۸۱

ترکیب اعضای کمیته

اسامی اعضای کمیته فنی شماره ۱۴-۱ (رسوب) که در تهیه استاندارد حاضر مشارکت داشته اند به ترتیب حروف الفباء به شرح زیر می باشد :

خانم زهرا ایزدپناه	دانشگاه شهید چمران	فوق لیسانس آبیاری و آبادانی
آقای فیروزبهادری خسروشاهی	دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی	فوق لیسانس منابع آب
آقای سید جمال الدین پرورده	سازمان آب تهران	فوق لیسانس هیدرولوژی
خانم کیاندرخت کباری	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	لیسانس راه و ساختمان
آقای جمال محمدولی سامانی	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای هیدرولیک
آقای ابوالفضل سپهری منش	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	فوق لیسانس مهندسی منابع آب

استاندارد حاضر در کمیته تخصصی مهندسی رودخانه و سواحل مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است.

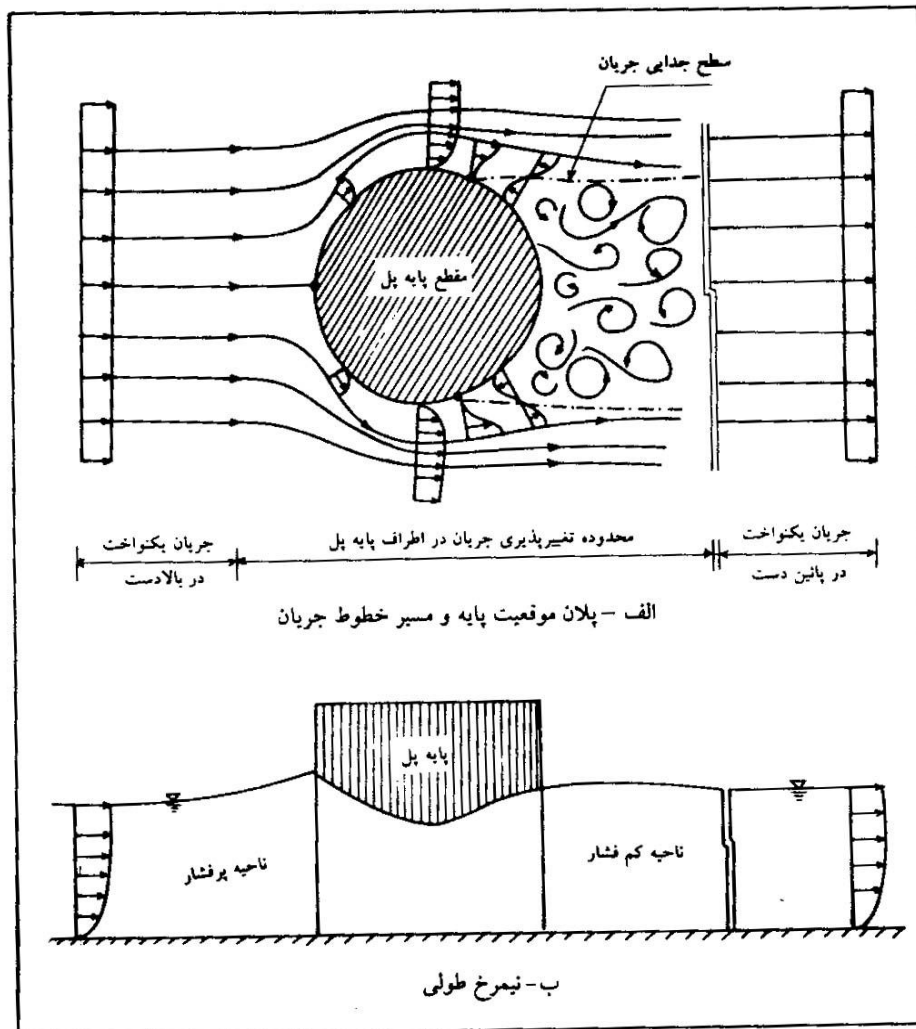
فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	۱- مقدمه
۲	۲- بررسی وضعیت جریان در محدوده پایه‌های پل‌ها
۸	۳- بررسی مبانی و مکانیسم فرسایش در محدوده پایه‌های پل
۱۱	۴- شکل‌های مختلف فرسایش در محدوده پایه‌های پل
۱۴	۵- ارزیابی آثار فرسایش بازه‌ای در محدوده پایه‌های پل
۱۷	۶- تأثیرپذیری پل‌ها از الگوهای مختلف فرسایش
۲۰	۷- روش‌های مختلف تعیین عمق چاله فرسایشی در محدوده پایه‌های پل
۳۶	۸- روش‌های مهار فرسایش پایه پل‌ها و توصیه‌ها
۴۱	منابع و مآخذ

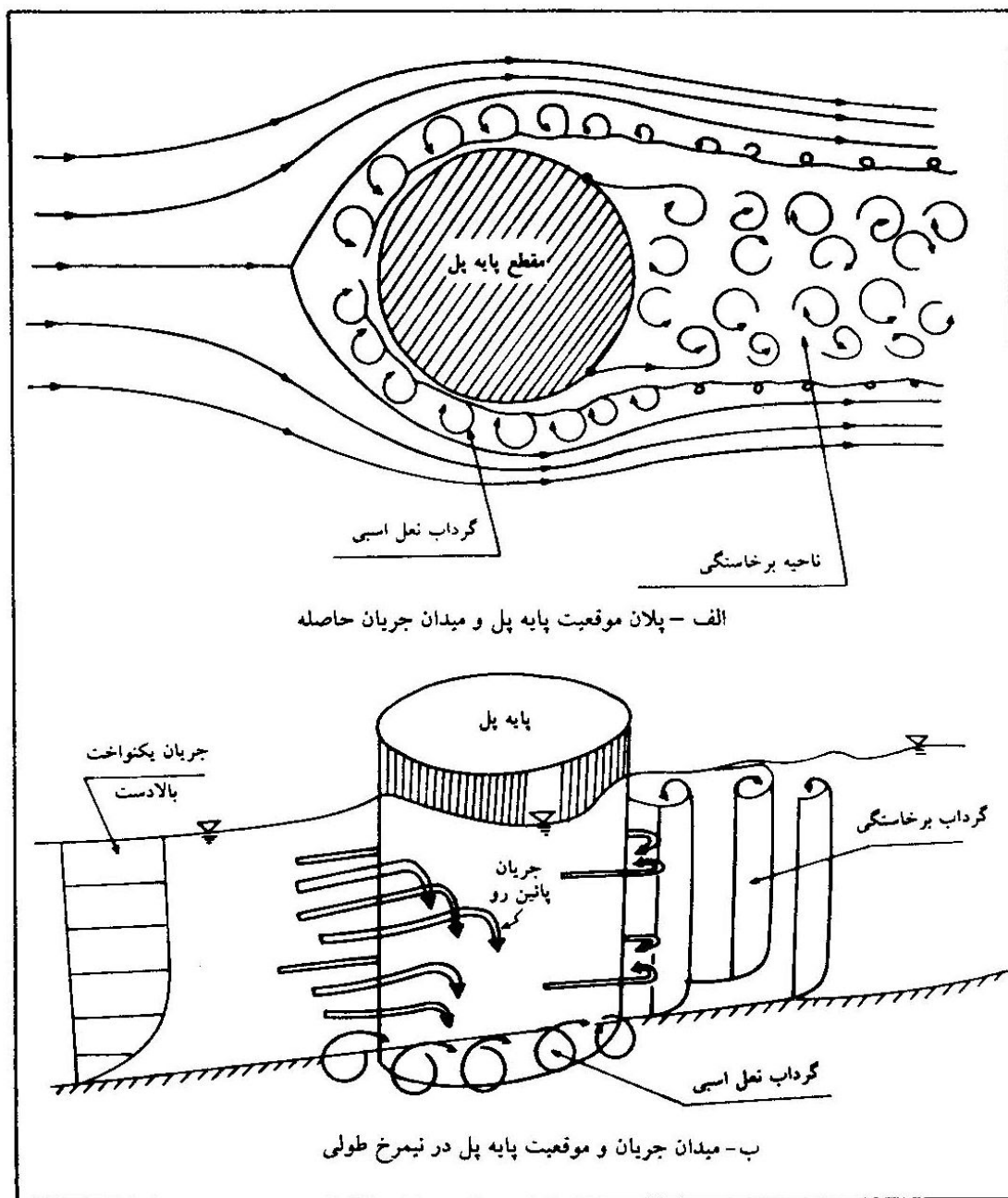
تعیین عمق فرسایش در محدوده پایه پل‌ها مستلزم آگاهی از نحوه جابه‌جایی مواد رسوبی بستر رودخانه‌ها است. پایه پل‌ها جریان عادی رودخانه را مختل می‌کند و تلاطم و اغتشاش حاصل از آن موجب فرسایش مواد رسوبی موجود در اطراف پایه می‌شود. چاله فرسایشی ایجاد شده در اطراف پایه به شکل و مشخصات هندسی آن بستگی دارد. به علاوه نوع مواد تشکیل دهنده بستر رودخانه و همچنین شرایط هیدرولیکی جریان نظیر وقوع حالت سیلابی و عبور تلماسه‌ها در میزان عمق چاله فرسایشی مؤثر است. از آنجایی که گسترش چاله فرسایشی پایداری سازه پل را به مخاطره می‌اندازد پیش بینی میزان گودافتادگی و اتخاذ تدابیر لازم برای مهار آن از جمله اقدامات مهندسی متداول در عرصه مهندسی رودخانه تلقی می‌شود. در این راهنما، مبانی و انواع مختلف فرسایش در محدوده پایه‌های پل در چند بخش مورد بررسی قرار گرفته و عوامل مؤثر در وقوع فرسایش‌های بازه‌ای و موضعی و نقش الگوهای مختلف فرسایشی در گودافتادگی اطراف پایه پل‌ها معرفی گردیده است. متعاقب آن روش‌های مختلف تعیین عمق چاله فرسایشی بنا بر توصیه و تجربه محققین و متخصصین امر به تفصیل بیان گردیده و برای سهولت استفاده از روش‌های مختلف چند مثال کاربردی نیز ارائه شده است. بخش پایانی نشریه به معرفی روش‌های مهار فرسایش در اطراف پایه‌های پل و توصیه‌های فنی و نمودارهای کاربردی متداول اختصاص داده شده است.

۲- بررسی وضعیت جریان در محدوده پایه‌های پل‌ها

پایه پل به صورت مانعی در مقابل جریان رودخانه عمل می‌کند و خصوصیات هیدرولیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل هندسی و موقعیت پایه نسبت به امتداد جریان و همچنین تعداد و فواصل پایه‌ها و میزان تنگ شدگی در تغییر وضعیت جریان رودخانه و تبعات ناشی از آن مؤثر است. در شکل ۱-۲ وضعیت جریان در محدوده یک پایه استوانه‌ای نشان داده شده است [۱]. مطابق شکل ۱-۲ جریان منظم و یکنواخت رودخانه پس از برخورد با پایه پل دچار دگرگونی می‌شود و در اثر انحراف خطوط جریان و تشکیل لایه مرزی ناحیه پرفشار در بالادست پایه و ناحیه کم فشار در پایین دست آن به وجود می‌آید. این امر سبب تشدید گردابان فشار و به وجود آمدن نوعی جریان ثانویه در اطراف پایه پل می‌شود که اصطلاحاً به گرداب نعل اسبی^۱ معروف است [۲ و ۳]. شکل ۲-۲ موقعیت گرداب نعل اسبی ایجاد شده در اطراف پایه پل را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- وضعیت جریان در اطراف پایه پل (از نوع استوانه‌ای)



الف - پلان موقعیت پایه پل و میدان جریان حاصله

ب- میدان جریان و موقعیت پایه پل در نیمرخ طولی

شکل ۲-۲- نمایش چگونگی تشکیل گرداب نعل اسبی و گرداب برخاستگی در اطراف پایه پل استوانه‌ای


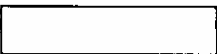
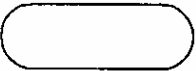
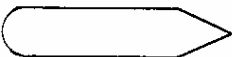
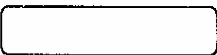
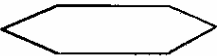

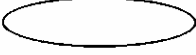
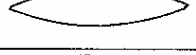
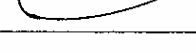
بررسی شکل ۲-۲ نشان می‌دهد که میدان جریان ایجاد شده در اطراف پایه پل از سه ناحیه مشخص تشکیل شده است. در رویه بالایی بخشی از جریان پس از برخورد با پیشانی پل به سمت پایین منحرف می‌شود و ناحیه جریان پایین رو را تشکیل می‌دهد. وقوع چنین پدیده‌ای همانگونه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است ناشی از ویژگی توزیع سرعت و کاهش مقدار آن در مجاورت بستر در جریان یکنواخت بالادست است که به نوبه خود عدم توازن در فشارهای دینامیک را به همراه دارد. گرداب نعل اسبی بخش مهم دیگری از میدان جریان ایجاد

شده در اطراف پایه پل است. این جریان پیچشی قوی از نوع سه بعدی بوده و در تشکیل آن جریان پایین رو و همچنین تمرکز رشته های گردابی^۱ موجود در جریان اصلی (جریان یکنواخت بالادست) [۳ و ۴]. ناحیه پایین دست پایه، موسوم به ناحیه برخاستگی، سومین بخش از میدان جریان و کانون تشکیل گرداب های متعدد و فعال است و ناحیه ای کم فشار و مجزا از جریان فعال رودخانه تلقی می شود. جریان های چرخشی ایجاد شده در این بخش موسوم به گرداب برخاستگی برخلاف گرداب نعل اسبی که دارای محوری افقی است عموماً حول محور قائم تشکیل می شود. منشاء تشکیل این گرداب ها پدیده جدایی جریان^۲ و تشکیل لایه های برشی^۳ ناشی از این فرایند در جناحین پایین دست پایه است. از ویژگی های بارز این گرداب ها وجود یک مغزه کم فشار در ناحیه مرکزی است که به صورت مکشی عمل می کند و قادر است مواد و مصالح را از بستر جدا کرده و با خود حمل کند. الگوهای سه گانه فوق الذکر هریک نقش مؤثری را در انتقال مواد رسوبی و ایجاد چاله فرسایشی در اطراف پایه پل به خود اختصاص می دهند. از این رو شناخت الگوهای مختلف جریان و آگاهی از مکانیسم های آنها برای شناخت پدیده فرسایش دارای اهمیت زیادی است. در این خصوص، تأثیر شکل پایه ها در وضعیت جریان حائز اهمیت است.

طبق بررسی های انجام شده، گرداب نعل اسبی که نقش مؤثری در بسترکنی اطراف پایه به عهده دارد در پایه های دماغه پهن^۴ نظیر پایه های استوانه ای و یا پایه های چهارگوش با دماغه نیمدایره تشکیل می شود [۲]. در پایه های با دماغه تیز^۵ نظیر دماغه سه گوش و یا بیضی کشیده که حالت آئرو دینامیک دارند میدان فشار ایجاد می شود به گونه ای است که امکان تشکیل گرداب نعل اسبی را منتفی می کند. در عین حال تشکیل ناحیه برخاستگی در پایین دست و همچنین فشردگی خطوط جریان در امتداد بدنه پایه پل از عوامل بالقوه در وقوع فرسایش تلقی می شوند. در جدول ۱-۲ شکل های مختلف پایه های پل [۴ و ۵] و در شکل ۲-۳ وضعیت جریان در اطراف یک پایه نوک تیز نشان داده شده است [۶].

-
- 1 - Vortex Filaments
 - 2 - Flow Separation
 - 3 - Shear Layers
 - 4 - Blunt Nosed
 - 5 - Sharp Nosed

جدول ۱-۲- اشکال مختلف دماغه و پایه در پلها

شکل پایه	نوع پایه	ردیف
	استوانه‌ای ^۱	۱
	چهارگوش ^۲ (مستطیلی)	۲
	چهارگوش با دماغه نیمدایره ^۳	۳
	چهارگوش با دماغه نیمدایره در بالادست و دنباله گوه‌ای (مثلثی) در پایین دست ^۴	۴
	چهارگوش با گوشه های گرد ^۵	۵
	چهارگوش با دماغه و دنباله - گوه‌ای (مثلثی) ^۶	۶
	چهارگوش با دماغه مثلثی ^۷ (گوه ای)	۷
	بیضوی ^۸	۸
	عدسی ^۹	۹
	بال هواپیما ^{۱۰}	۱۰

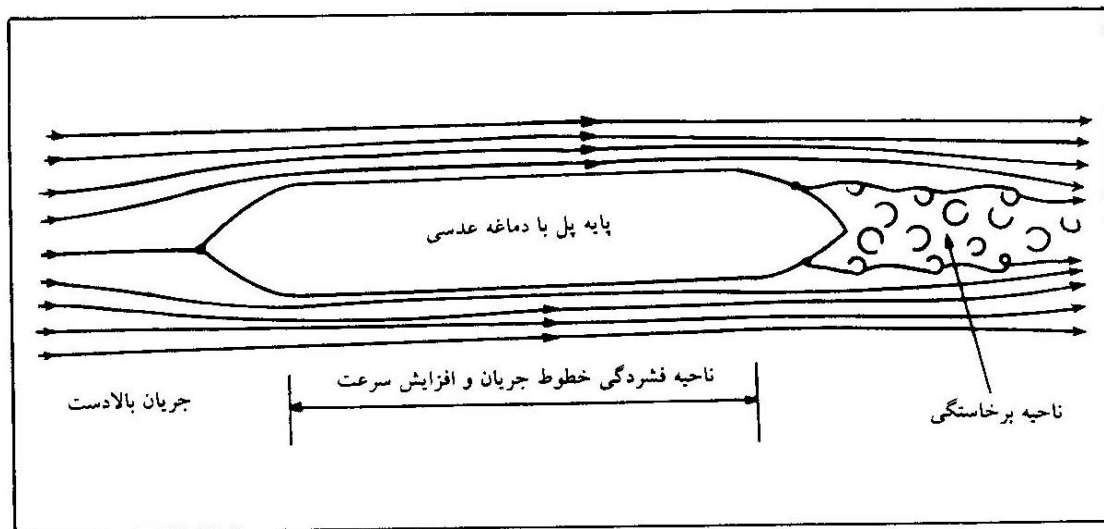
مطابق شکل ۲-۳ اغتشاش در آرایش خطوط جریان در پایه‌های با دماغه تیز و آئرو دینامیک کمتر از حالت دماغه پهن بوده و عموماً جریان‌های پیچشی و تشکیل گرداب به ناحیه برخاستگی در پایین دست پایه محدود می‌شود.

تنگ شدگی مقطع و بروز جریان‌های جانبی و گردابی وضعیت هیدرولیکی پیچیده تری را در اطراف پایه‌های پل به وجود آورده و تشدید فرسایش را به همراه دارد. در شکل ۲-۴ تأثیر کاهش مقطع در آرایش خطوط جریان

-
- 1 - Cylindrical
 - 2 - Rectangular
 - 3 - Rectangular with semi - circular nose
 - 4 - Semicircular nose with wedge shaped tail
 - 5 - Rectangular with chamfered corners
 - 6 - Rectangular with wedge shaped nose and tail
 - 7 - Rectangular with wedge shaped nose
 - 8 - Elliptic
 - 9 - Lenticular
 - 10 - Aerofoil

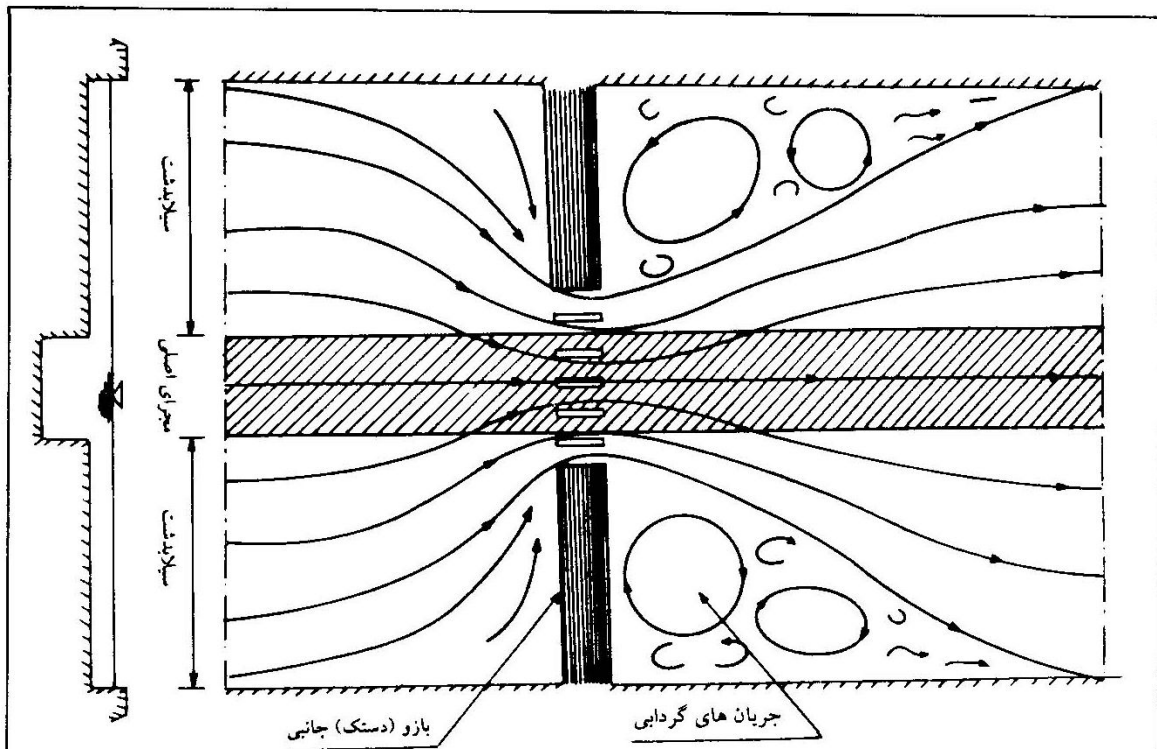
نشان داده شده است [۷ و ۸]. چنین حالتی در مواردی اتفاق می‌افتد که رودخانه از دو بخش، مجرای اصلی^۱ و سیلابدشت^۲ تشکیل شده باشد. معمولاً پل در محل مجرای اصلی احداث شده و آب سیلابدشت به دهانه تنگ شده هدایت می‌شود. همان‌طوری‌که در شکل مشخص است در شرایط انقباض، خطوط جریان با امتداد پایه‌های پل هم راستا نبوده^۳ و این امر وقوع جریان‌های ثانویه قوی تری را نسبت به شرایط هم راستا^۴ در پی دارد. تنگ شدگی مقطع بعضاً به پس زدگی جریان و ایجاد فراآب^۵ نیز منجر می‌شود. در چنین حالتی شرایط هیدرولیکی جریان از اثرات برگشت آب متأثر می‌شود و به نوبه خود بر پیچیدگی میدان جریان ایجاد شده در مجاورت پایه‌ها می‌افزاید.

شکل ۲-۵ نحوه تأثیرپذیری جریان از پدیده تنگ شدگی مقطع را به نمایش می‌گذارد [۹]. همان‌گونه که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود، وقوع جریان‌های فوق بحرانی و تشدید تنش‌های هیدرولیکی در مقطع تنگ شده در اثر پدیده فراآب امکان‌پذیر است.

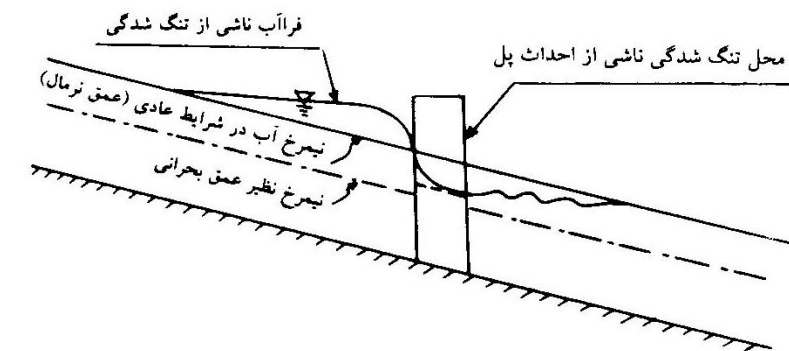


شکل ۲-۳- وضعیت جریان در اطراف پایه پل با دماغه تیز از نوع عدسی

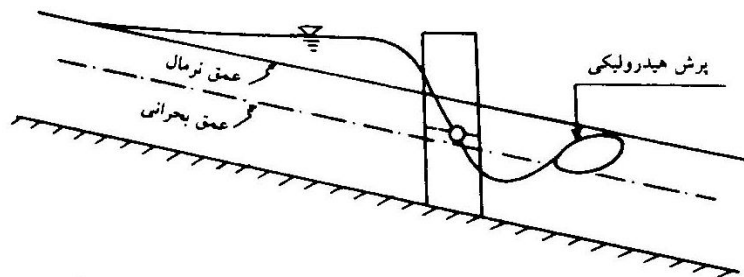
- 1 - Main Channel
- 2 - Flood plain
- 3 - Nonaligned Flow
- 4 - Aligned Flow
- 5 - Backwater



شکل ۲-۴- نمایش چگونگی تغییر وضعیت خطوط جریان ناشی از تنگ شدگی مقطع در محل احداث پل (رودخانه با مسیر سیلابدشت)



الف - وقوع حالت زیر بحرانی در محدوده تنگ شدگی و نحوه تغییرات نیمرخ طولی آب

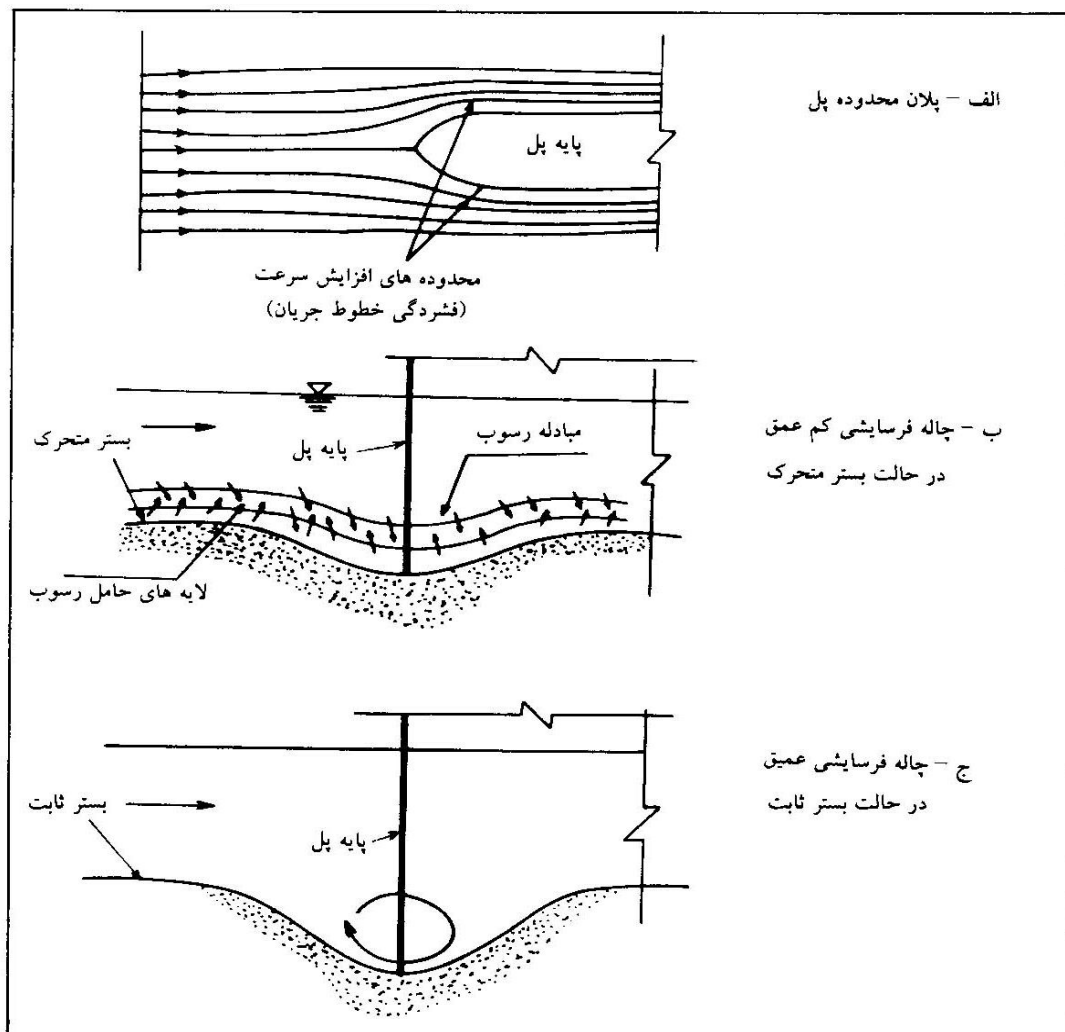


ب - وقوع حالت فوق بحرانی در محدوده تنگ شدگی و نحوه تغییرات نیمرخ طولی آب

شکل ۲-۵- تأثیر تنگ شدگی در تغییرات پروفیل سطح آب و شرایط هیدرولیکی جریان

۳- بررسی مبانی و مکانیسم فرسایش در محدوده پایه‌های پل

عامل اصلی وقوع فرسایش در محدوده پایه‌های پل انحراف خطوط جریان و افزایش تنش‌های هیدرولیکی ناشی از آن است. انتقال مواد رسوبی موجود در بستر رودخانه در اثر تنش برشی^۱ حاصل از جریان آب منجر به وقوع فرسایش‌های عمومی^۲ و موضعی^۳ می‌شود. در محدوده پایه‌های پل مطابق شکل ۱-۳، در پی انحراف و تمرکز خطوط جریان مناطق سرعت بالا ایجاد می‌شود و وقوع فرسایش موضعی و سبب تشکیل چاله فرسایشی^۴ می‌شود [۶].



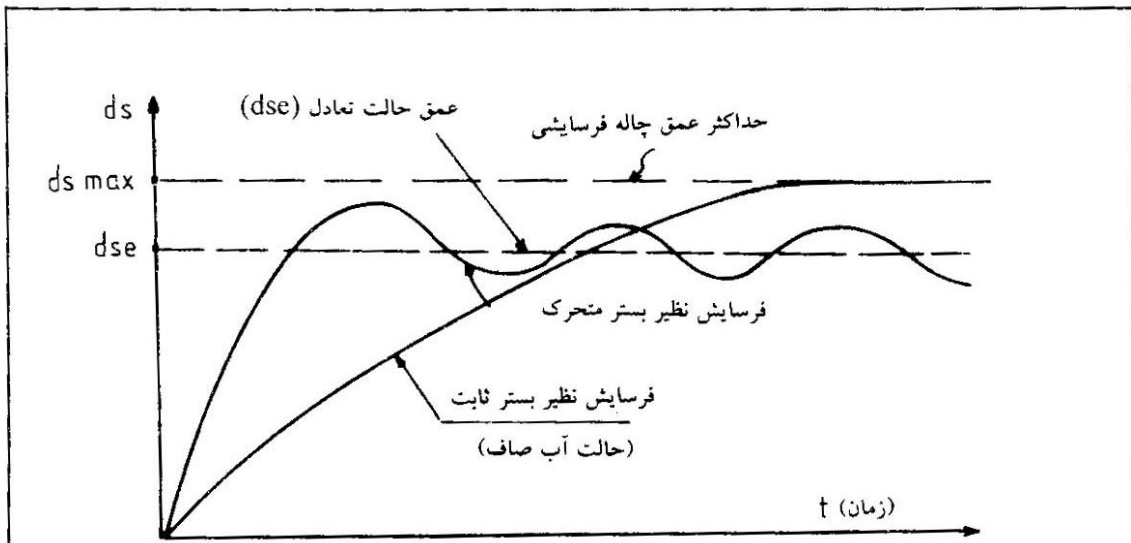
شکل ۱-۳- وقوع فرسایش موضعی در محدوده پایه پل ناشی از انحراف خطوط جریان و افزایش سرعت در حالت بستر متحرک و بستر ثابت

- 1 - Shear Stress
- 2 - General Scour
- 3 - Local Scour
- 4 - Scour Hole

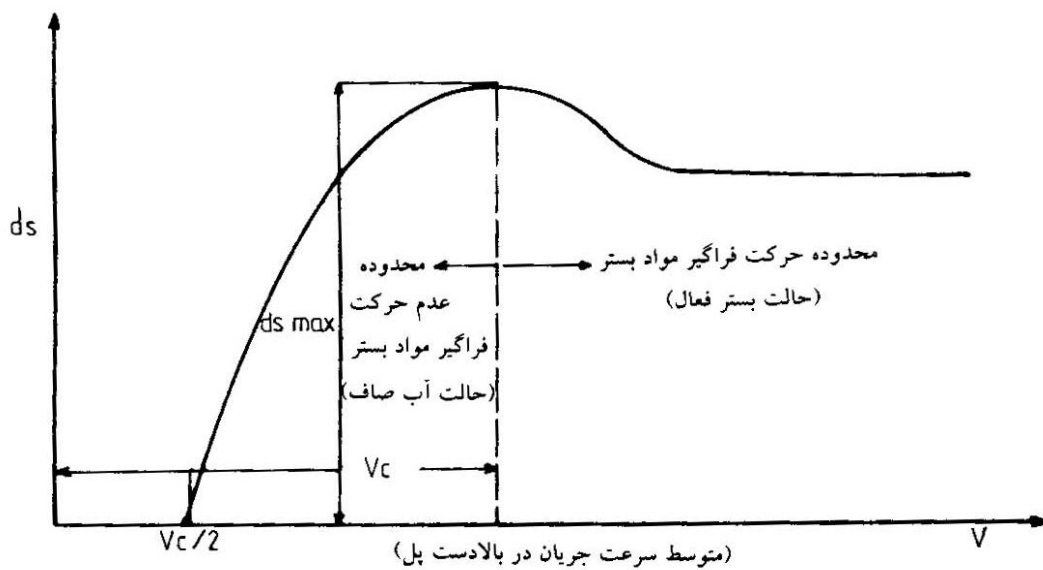
مطابق شکل ۳-۱ فرسایش در محدوده پایه‌ها در دو حالت بستر متحرک^۱ و بستر ثابت^۲ (در این حالت جریان آب قادر به حمل مواد رسوبی بستر نیست) حادث می‌شود. از بستر ثابت اغلب با اصطلاح "حالت آب صاف"^۳ نیز نام برده می‌شود.

در حالت بستر متحرک، افزایش عمق چاله فرسایشی تا مرحله‌ای پیش می‌رود که مقدار رسوب برخاسته از بستر با مقدار رسوب در حال ته نشینی موجود در آب حامل رسوب برابر می‌شود. در بسترهای متحرک، مواد رسوبی کنده شده از بستر رودخانه (بار مواد بستری^۴) از بالادست وارد چاله فرسایشی شده و عیناً به پایین دست منتقل می‌شود. در حالت بستر ثابت که جریان آب فاقد مواد رسوبی است، برخلاف بستر متحرک عمق چاله فرسایشی تا تحقق شرایط پایداری دانه های رسوب و کاهش تنش برشی تا حد آستانه حرکت^۵ توسعه می‌یابد. از این رو چاله فرسایشی ایجاد شده در بسترهای ثابت عمیق تر از بسترهای متحرک است. در بسترهای متحرک حرکت تلماسه ها^۶ و پشته های رسوبی^۷ موجب نوسان عمق چاله فرسایشی می‌شود و حالت تعادل موجود در چاله را برهم می‌زند. نکته مهم در بررسی مکانیسم فرسایش در محدوده پل‌ها توجه به عامل زمان است. به بیانی، برای گسترش چاله فرسایشی تا رسیدن به حد نهایی و تحقق مرحله تعادل^۸ استمرار جریان رودخانه تا مدت زمان کافی ضروری است. بر این اساس سیلاب‌های ممتد و متوالی ولی با شدت کم اغلب چاله فرسایشی عمیق تری را نسبت به سیلاب‌های شدید ولی با مدت دوام کوتاه تر^۹ ایجاد می‌کنند. در شکل ۳-۲ تغییرات عمق چاله فرسایشی نسبت به زمان در دو حالت بستر ثابت و متحرک نشان داده شده است [۳]. مطابق شکل ۳-۲ عمق چاله فرسایشی در بسترهای متحرک زودتر از حالت بستر ثابت به میزان حداکثر خود^{۱۰} (ds_{max}) می‌رسد. در بسترهای متحرک عمق چاله فرسایشی به علت عبور تلماسه ها (امواج رسوبی) حول یک مقدار متوسط (dse) در نوسان است. مقدار dse به عنوان عمق نظیر حالت تعادل^{۱۱} در نظر گرفته می‌شود. اغلب، تغییرات عمق چاله فرسایشی به صورت تابعی از متوسط سرعت جریان آب^{۱۲} نشان داده می‌شود. شکل ۳-۳ نتایج تحقیقات انجام شده توسط چاپرت و همکاران را در خصوص رابطه ds (عمق چاله فرسایشی) و V (سرعت جریان آب) نشان می‌دهد [۱۰].

-
- 1 - Live bed
 - 2 - Fixed bed
 - 3 - Clear water bed
 - 4 - Bed material load
 - 5 - Threshold of sediment motion
 - 6 - Dunes and antidunes
 - 7 - Sediment bars
 - 8 - Equilibrium condition
 - 9 - Flash floods
 - 10 - Maximum scour depth
 - 11 - Equilibrium scour depth
 - 12 - Approaching average flow velocity



شکل ۲-۳- نمودار تغییرات عمق چاله فرسایشی برحسب زمان در اطراف پایه پل



شکل ۳-۳- نمودار تغییرات ds برحسب V در اطراف پایه پل

بررسی شکل ۳-۳ نشان می‌دهد که در سرعت‌های کم که متناظر با محدوده عدم حرکت فراگیر مواد بستر^۱ و مشابه حالت آب صاف است حداکثر عمق چاله فرسایشی (ds_{max}) حادث می‌شود. سرعت نظیر ds_{max} با علامت V_c

نشان داده شده است که به عنوان سرعت بحرانی (آستانه) حرکت فراگیر مواد بستر^۱ تلقی می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده حرکت مواد بستر عملاً از سرعت‌های $V_c/2$ (نصف سرعت نظیر آستانه حرکت) به صورت تدریجی و انفرادی آغاز می‌شود و در سرعت V_c مجموعه مواد تشکیل دهنده بستر رودخانه به صورت فراگیر و یکپارچه حرکت خود را آغاز می‌کند. این فرایند کاهش عمق چاله فرسایشی را در پی دارد. مطابق شکل ۳-۳ حداکثر عمق چاله فرسایشی در سرعت معادل V_c اتفاق می‌افتد که متناظر با شرایط بستر ثابت است.

علاوه بر فرسایش‌های موضعی فوق‌الذکر، اشاره شد محدوده پایه‌های پل، از فرسایش‌های بازه‌ای یا عمومی نیز متأثر می‌شود.

علت وقوع فرسایش‌های عمومی را می‌توان ناشی از عوامل زیر قلمداد کرد :

- فرسایش عمومی حاصل از کاهش مقطع جریان
- فرسایش عمومی حاصل از فرایندهای مورفولوژیک

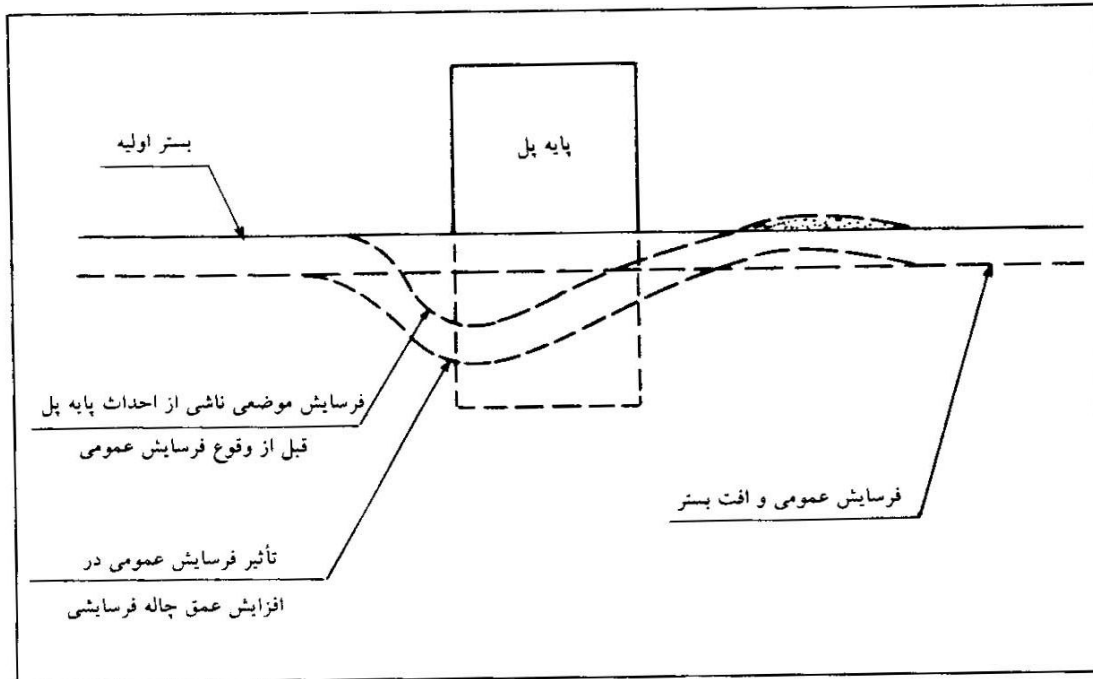
در حالت اول مقطع جریان رودخانه در اثر احداث پل و سازه‌های مرتبط با آن کاهش می‌یابد و این امر موجب افزایش سرعت جریان و به تبع آن افزایش قدرت انتقال رسوب رودخانه در مقطع تنگ شده می‌شود. در حالت دوم پدیده‌های مورفولوژیک (ریخت شناسی) که تابعی از عوامل مختلف طبیعی و انسانی است منجر به کف‌کنی و گودافتادگی سرتاسری بستر رودخانه می‌شود. به عنوان مثال تغییر پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز، تغییر در کاربری اراضی، احداث سدهای ذخیره‌ای و برداشت مصالح از بستر رودخانه‌ها از جمله عواملی هستند که رفتار مورفولوژیک رودخانه را متأثر می‌کند و وقوع فرسایش‌های ممتد و گودافتادگی تدریجی و مستمر بستر رودخانه را در پی دارد. در تعیین حداکثر عمق فرسایش در محدوده پایه‌های پل لازم است مجموع فرسایش موضعی و عمومی مدنظر قرار گیرد. در شکل ۳-۴ نحوه تأثیرپذیری پایه پل از فرسایش موضعی و عمومی نشان داده شده است.

۴- شکل‌های مختلف فرسایش در محدوده پایه‌های پل

عوامل مختلفی در وقوع فرسایش و افت تراز بستر در محدوده پایه‌های پل تأثیرگذارند. در مباحث قبلی به بعضی از این عوامل از جمله تغییر ساختار جریان در محدوده پایه‌ها که منجر به ایجاد چاله فرسایشی می‌شود و همچنین اثرات فرسایش عمومی در تشدید گودافتادگی بستر اشاره شد. در یک جمع بندی کلی صور مختلف فرسایش در محدوده پایه‌های پل را می‌توان به صورت زیر طبقه بندی کرد [۲ و ۳] :

۴-۱ فرسایش موضعی که نمود عینی آن تشکیل چاله فرسایشی در مجاورت پایه پل است. این نوع فرسایش حاصل تغییر ساختار جریان است و از نظر کمی تابعی از شدت جریان، نوع مواد تشکیل دهنده بستر، وضعیت انتقال رسوب و شکل هندسی پایه پل است.

1 - Critical (Threshold) velocity



شکل ۳-۴- نمایش چگونگی تأثیرپذیری چاله فرسایشی از افت عمومی بستر

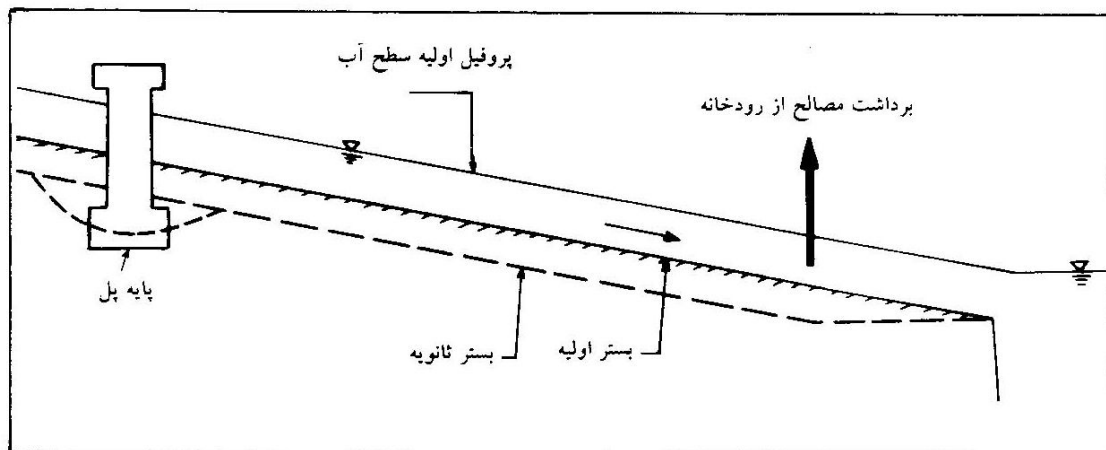
۲-۴ فرسایش ناشی از کاهش مقطع جریان: در نتیجه احداث پایه‌های پل، احداث دستک‌های جانبی^۱، تجمع رسوبات در دهانه پل، انجام اقدامات ساماندهی و موارد دیگر مقطع رودخانه کاهش یافته و این امر موجب افزایش سرعت جریان و به تبع آن تشدید حمل رسوب در محدوده پایه‌ها و افت بیشتر تراز بستر می‌شود.

۳-۴ فرسایش ناشی از فرایندهای ریخت‌شناسی^۲: رودخانه‌ها به تبعیت از فرایندهای ریخت‌شناسی همواره در تغییر و تحول می‌باشند و در نتیجه آن مشخصات هندسی و پلان مسیر رودخانه نسبت به زمان تغییر می‌کند. جابه‌جایی‌های عرضی و طولی حاصل از این فرایند و تغییر هندسی مقطع جریان به نوبه خود موجب تشدید فرسایش در محدوده پل‌ها می‌شود.

۴-۴ فرسایش عمومی: این نوع فرسایش در پایین دست سدها و یا پایین دست و بالادست کانون‌های برداشت مصالح رودخانه‌ای اتفاق می‌افتد و منجر به افت عمومی بستر رودخانه می‌شود. گاهی نیز فرسایش‌های عمومی ممکن است دارای منشاء طبیعی باشد از جمله افت سطح اساس^۳ (نظیر سطح دریا، دریاچه و ...). و سایر پدیده‌های زمین‌شناسی فرسایش عمومی را در پی دارد.

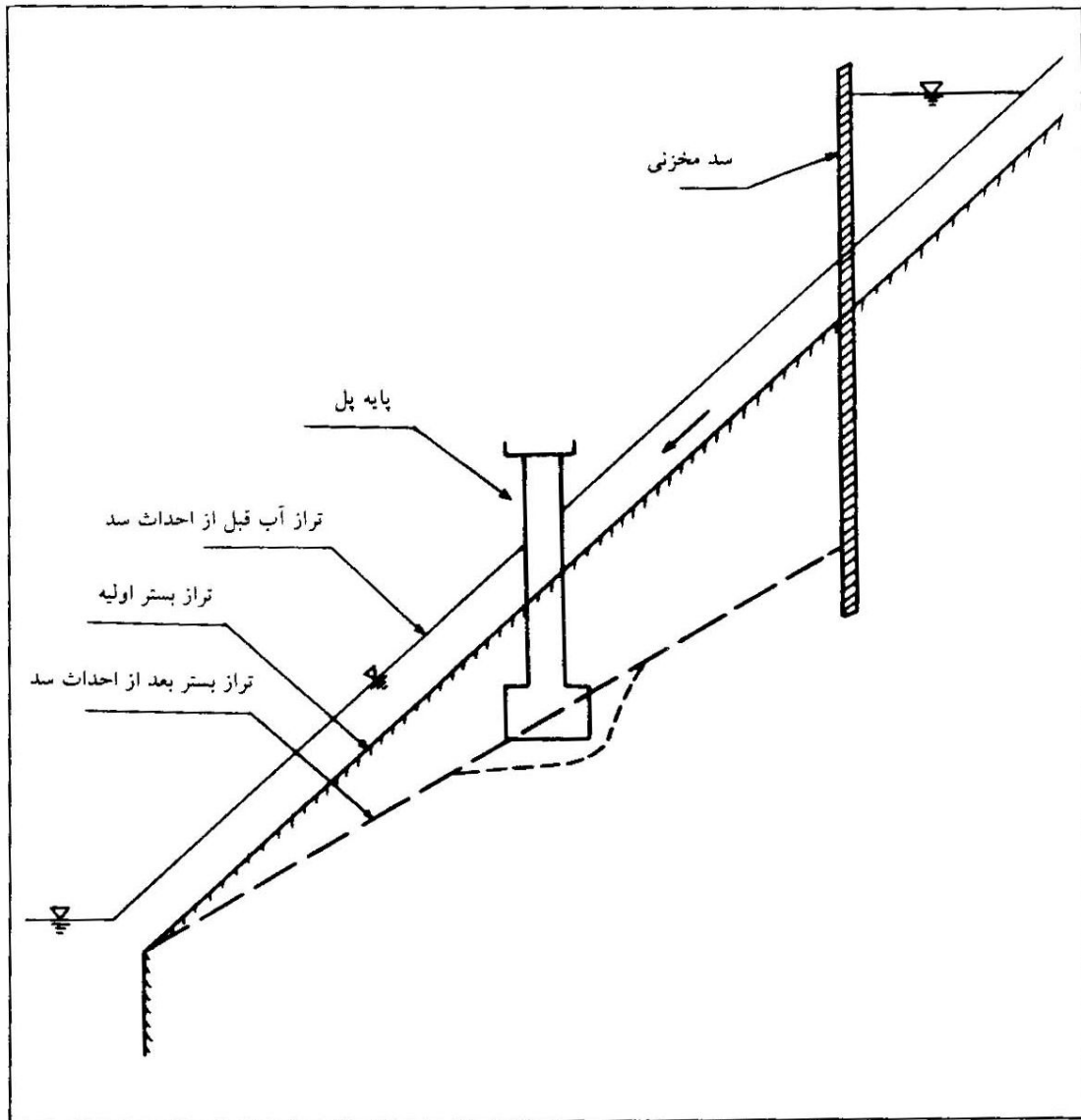
1 - Bridge Approaches
2 - Morphology
3 - Base Level

ارزیابی کمی هریک از موارد چهارگانه فوق الذکر امکان پیش بینی حداکثر فرسایش ممکن در محدوده پایه‌های پل را فراهم می‌آورد. در عمل تعیین فرسایش موضعی (۴-۱) و فرسایش ناشی از کاهش مقطع (۴-۲) به دلیل وجود روابط و معادلات گوناگون ارائه شده توسط متخصصین در مقایسه با موارد ۴-۳ و ۴-۴ آسان تر است. پیش بینی فرسایش ناشی از فرایندهای مورفولوژیک (۴-۳) به دلیل تعدد عوامل تأثیرگذار و پیچیدگی‌های حاکم بر رفتار ریخت شناسی رودخانه‌ها از جمله معضلات موجود در طراحی هیدرولیکی پایه‌های پل است. از طرفی فرسایش‌های عمومی (۴-۴) را می‌توان در مواردی نظیر اثرات احداث سد و یا برداشت مصالح رودخانه‌ای و موارد مشابه دیگر با مدل‌های کامپیوتری پیش بینی کرد. در شکل ۴-۱ اثرات برداشت مصالح رودخانه‌ای در افت عمومی تراز بستر رودخانه و عوارض ناشی از آن در محدوده پل نشان داده شده است [۱۱]. در شکل ۴-۲ همچنین چگونگی تأثیر احداث سد مخزنی در افت تراز بستر رودخانه و تأثیر پیامدهای آن بر محدوده سازه پل نشان داده شده است [۸].



شکل ۴-۱- فرسایش عمومی و گودافتادگی بستر و آثار نامطلوب آن در محدوده پل
ناشی از برداشت مصالح رودخانه‌ای

علاوه بر موارد فوق در شکل‌های (۲-۴) و (۲-۵) اثرات هیدرولیکی ناشی از کاهش عرض رودخانه به ویژه مسدود کردن مسیر سیلابدشت با استفاده از دستک‌های جانبی که خود منجر به تشدید فرسایش در محدوده پایه‌ها می‌شود نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- فرسایش عمومی ناشی از احداث سد مخزنی و آثار آن در محدوده پایه پل

۵- ارزیابی آثار فرسایش بازه‌ای در محدوده پایه‌های پل

بستر رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف دچار فرسایش بازه‌ای یا گودافتادگی عمومی^۱ می‌شود. تأسیسات آبی سازه‌های موجود در مسیر رودخانه از جمله پایه‌های پل از این‌گونه فرسایش فراگیر تأثیرپذیری مستقیم دارند. عوامل مختلف فرسایش بازه‌ای را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۳]:

۱-۵ کاهش طبیعی مقطع رودخانه

۲-۵ احداث بازوهای جانبی پل‌ها بر روی سیلابدشت

۳-۵ عبور موج سیل

1 - General scour

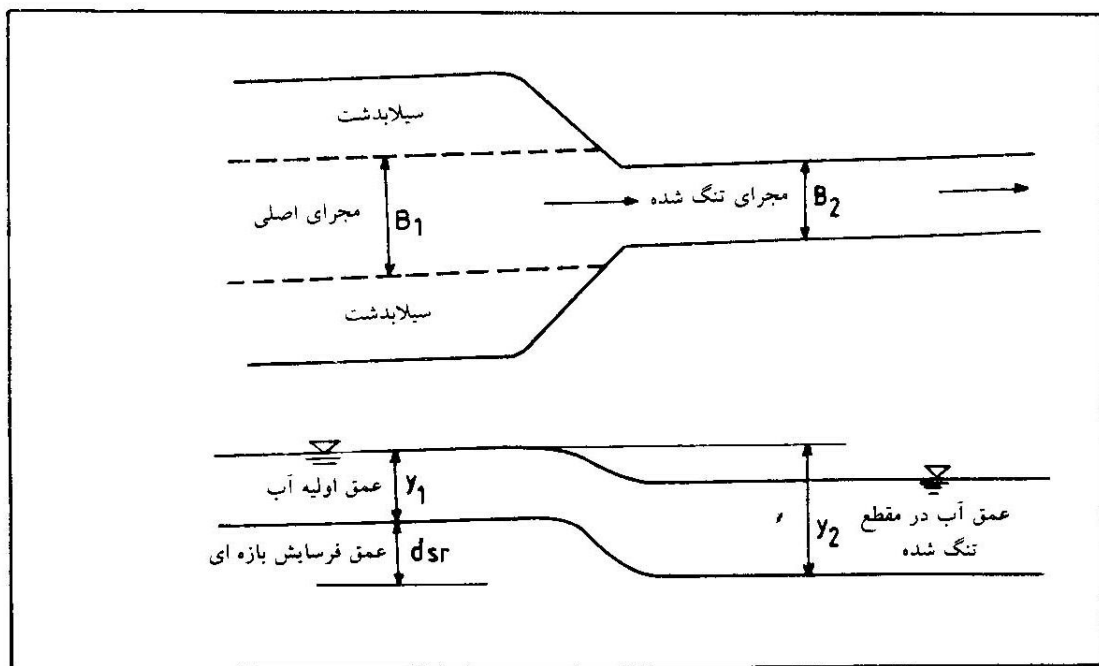
۴-۵ احداث سدهای مخزنی و تله اندازی رسوب

۵-۵ برداشت مصالح از بستر رودخانه ها

۶-۵ کاهش مقطع ناشی از احداث پل و سایر اقدامات سازه‌ای

۷-۵ تشکیل انباشته ها و جزایر رسوبی در محدوده دهنه پل‌ها

ارزیابی کمی فرسایش عمومی ناشی از عوامل فوق به دلیل تعدد عناصر تأثیرگذار به آسانی امکان‌پذیر نیست. در خصوص فرسایش حاصل از احداث پل و بازوهای جانبی بررسی‌های زیادی توسط محققین از جمله لارسن^۱، نوردین^۲، استراب^۳ و دیگران انجام گرفته و فرمول‌های تجربی برای تعیین عمق فرسایش حاصل از کاهش مقطع^۴ معرفی شده است. در شکل ۱-۵ نمونه‌ای از فرسایش بازه‌ای ناشی از کاهش مقطع نشان داده شده است [۴]. مطابق شکل ۱-۵ کاهش عمومی مقطع جریان موجب می‌شود تا کف رودخانه به اندازه ds نسبت به بستر اولیه دچار گودافتادگی شود. علت این گودافتادگی افزایش توان حمل رسوب در مقطع تنگ شده است.



شکل ۱-۵- اثرات کاهش مقطع در وقوع فرسایش بازه‌ای

- 1 - Laursen
- 2 - Nordin
- 3 - Straub
- 4 - Contraction scour

از جمله روابط تجربی که برای تعیین d_{sr} متداول است معادله لارسن است که به صورت زیر نوشته می‌شود [۳]:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \left(\frac{Q_t}{Q_c}\right)^{6/7} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^A \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^B \quad (1-5)$$

$$d_{sr} = Y_2 - Y_1$$

در رابطه فوق (شکل ۱-۵):

d_{sr} - عمق فرسایش بازه ای

Y_1 - عمق آب در مجرای اصلی

Y_2 - عمق آب در مقطع تنگ شده

B_1 - عرض مجرای اصلی (بدون در نظر گرفتن سیلابدشت)

B_2 - عرض مقطع تنگ شده (عرض مقطع در محل پل)

Q_t - دبی در مقطع تنگ شده

Q_c - دبی در مقطع اصلی (بدون در نظر گرفتن دبی مربوط به سیلابدشت)

n_2 - ضریب مانینگ در مقطع تنگ شده

n_1 - ضریب مانینگ در مقطع اصلی

A و B - ضرایب انتقال که از روابط زیر و همچنین جدول ۱-۵ به دست می‌آید:

$$A = 6(2 + e) / 7(3 + e)$$

$$B = 6e / 7(3 + e)$$

جدول ۱-۵ - ضرایب A و B برحسب شرایط انتقال مواد رسوبی

U^*c/w	e	A	B	نحوه انتقال مواد بستر
< 0.5	0.25	0.59	0.66	عمدتاً به صورت بار بستر
1.0	1.0	0.64	0.21	بخشی از رسوب به صورت بار معلق است.
> 2.0	2.25	0.69	0.37	عمدتاً به صورت بار معلق

در جدول فوق:

U^*c - سرعت برشی که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U^*c = (gY_1S_1)^{0.5}$$

S_1 - شیب رودخانه یا شیب خط انرژی در مجرای اصلی

g - شتاب ثقل

w - سرعت سقوط دانه های با قطر D_{50} (۵۰ درصد ریزتر وزنی) مواد بستر

e - فاکتور انتقال رسوب

برای حالتی که مسیر رودخانه فاقد سیلابدشت باشد معادله لارسن به صورت زیر در می آید :

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^A \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^B \quad (2-5)$$

$$d_{sr} = Y_2 - Y_1$$

استراب برای تعیین عمق فرسایش بازه‌ای رابطه زیر را ارائه کرده است :

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{6/7} \left(\frac{\tau_1}{\tau_c}\right)^{3/7} \quad (3-5)$$

$$\tau_1 = \gamma Y_1 S_1$$

$$\tau_c = \gamma Y_2 S_2$$

در رابطه فوق τ_1 تنش برشی در مجرای اصلی و τ_c تنش برشی، در مقطع تنگ شده است.

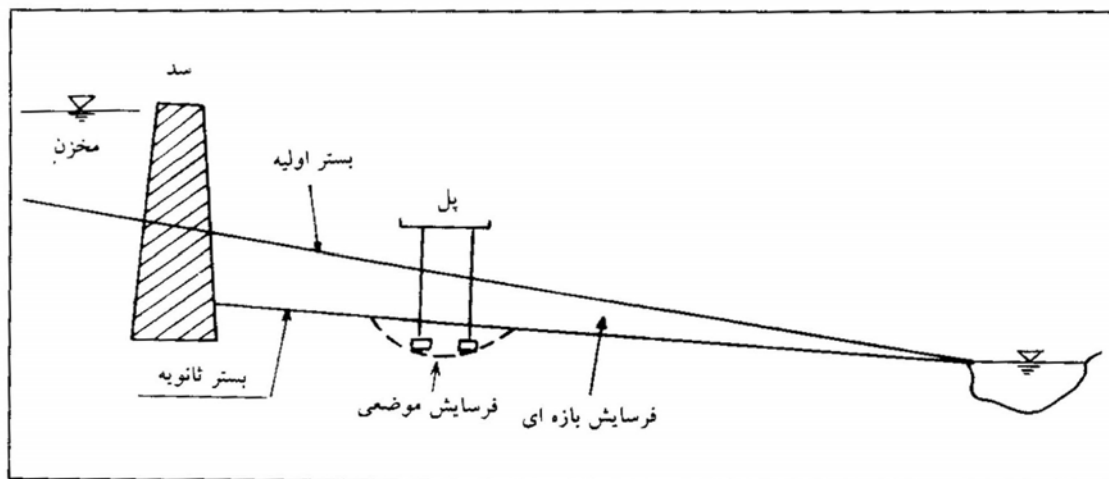
S_1 و S_2 به ترتیب شیب رودخانه و یا شیب خط انرژی در مجرای اصلی و مقطع کاهش یافته و γ وزن مخصوص آب است.

برای تعیین عمق فرسایش در محدوده پایه‌های پل لازم است مقدار فرسایش پیش بینی شده از روابط فوق با فرسایش موضعی ارزیابی شده تلفیق شود.

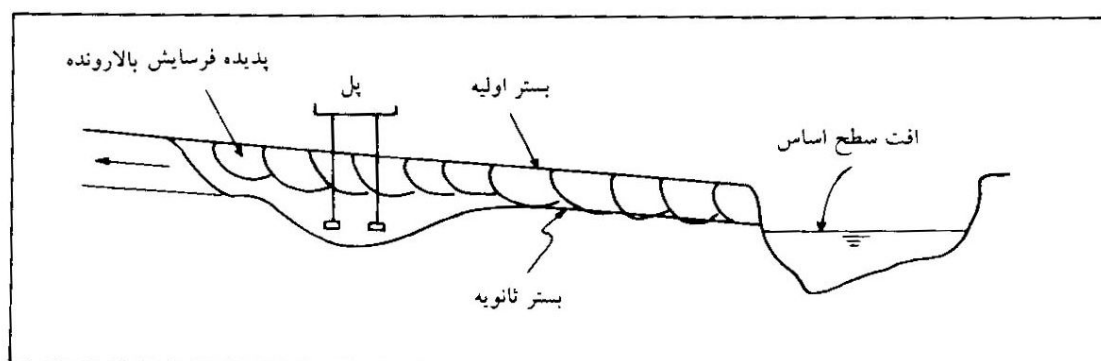
۶- تأثیرپذیری پل‌ها از الگوهای مختلف فرسایش

فرسایش در محدوده پایه‌های پل حاصل عوامل مختلفی است و کم و کیف فرسایش حاصل از نحوه تأثیرگذاری چنین عواملی تبعیت می‌کند. به‌عنوان نمونه احداث سد و تله اندازی رسوب در مخزن موجب می‌شود تا در بازه‌های پایین دست بستر رودخانه به تدریج حالت کف کنی به خود گرفته و یک الگوی فرسایش فراگیر و مستمر بر رودخانه و از جمله پل‌های موجود در مسیر آن حاکم می‌شود. در چنین شرایطی مطابق شکل ۶-۱ پایه‌های پل دچار فرسایش بازه‌ای شده و به همراه فرسایش موضعی خطر تخریب و اضمحلال سازه تشدید می‌شود [۸]. پایین افتادن سطح اساس^۱ از جمله عواملی است که الگوی فرسایشی خاصی را در مسیر رودخانه‌ها ایجاد می‌کند. این نوع فرسایش مطابق شکل ۶-۲ از نوع بالا رونده^۲ بوده و برای پایه‌های پل عامل ناپایداری جدی تلقی می‌شود.

1 - Base-level
2 - Headcutting



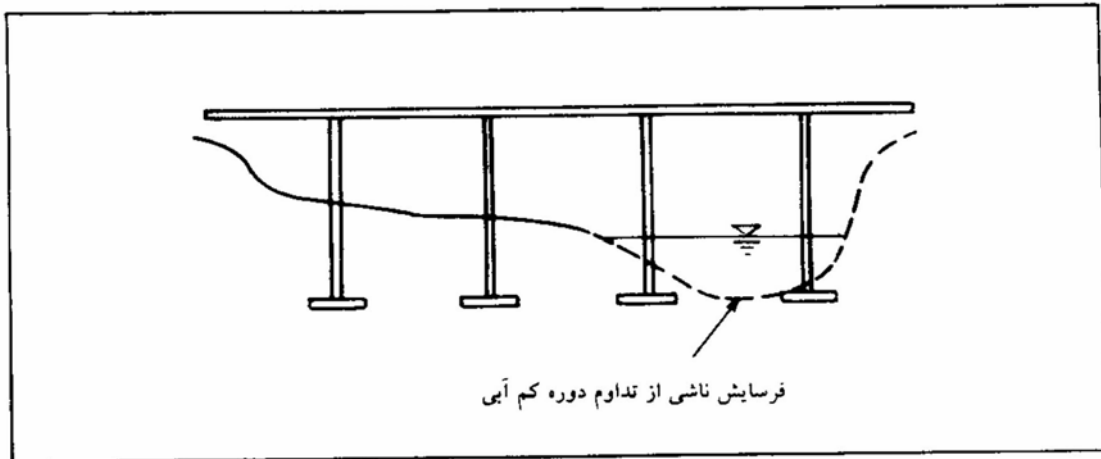
شکل ۶-۱- الگوی فرسایش ایجاد شده در محدوده پل ناشی از احداث سد مخزنی در بالادست



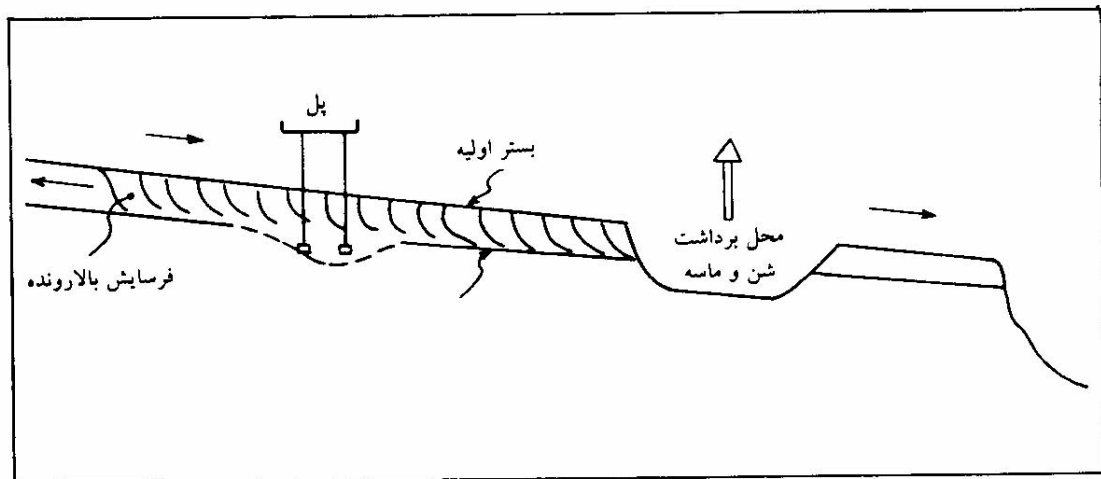
شکل ۶-۲- افت سطح اساس و تأثیر آن در الگوی فرسایش ایجاد شده در محدوده پایه‌های پل

رژیم جریان رودخانه از دیگر عوامل طبیعی مهم در وقوع فرسایش‌های بازه‌ای تلقی می‌شود. تداوم دوره کم آبی، که در آن فقط در بخش محدودی از مسیر رودخانه جریان آب برقرار است، موجب می‌شود تا مطابق شکل ۶-۳ فرسایش غیر یکنواخت در دهانه پل حادث می‌شود و بخشی از سازه را دچار ناپایداری کند.

برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه‌ها به نوبه خود الگوی فرسایشی خاصی را در بازه‌های بالادست و پایین دست و به تبع آن سازه‌ها و تأسیسات آبی موجود ایجاد می‌کند. برداشت شن و ماسه نظیر حالت افت سطح اساس فرسایش بالارونده را در بالادست ناحیه برداشت به همراه دارد. این امر موجبات جریان شدن تدریجی پایه‌های پل و مآلاً تخریب پی و شکست سازه پل را به دنبال دارد. در شکل ۶-۴ آثار برداشت شن و ماسه در ایجاد فرسایش عمومی و تبعات حاصل از آن نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۳-۶- تأثیر تداوم دوره کم آبی (جریان‌های کم) در الگوی فرسایشی ایجاد شده در محدوده پایه‌های پل



شکل ۴-۶- فرسایش بازه‌ای حاصل از برداشت شن و ماسه و آثار آن در محدوده پل

در جدول ۱-۶ الگوهای مختلف فرسایش حاصل از عوامل مختلف درج شده است. بدیهی است تعیین میزان کف کنی حاصل از الگوهای مذکور در بسیاری از موارد به لحاظ پیچیدگی‌های حاکم بر مکانیسم فرسایش چندان آسان نیست. برای ارزیابی کمی فرسایش حاصل اغلب توسط به مدل‌های کامپیوتری نظیر HEC-۶ و بعضاً انجام آزمایش‌های فیزیکی ضروری است.

جدول ۶-۱- الگوهای مختلف فرسایش حاصل از عوامل مختلف در محدوده پایه‌های پل

ردیف	نوع عامل فرسایش	الگوی فرسایش ایجاد شده
۱	افت سطح اساس	فرسایش بازه‌ای بالارونده (در خلاف جهت جریان)
۲	تداوم جریان‌های کم آبی	فرسایش بازه‌ای
۳	انباشته‌های رسوبی و جریان گل و لای	فرسایش موضعی
۴	سد مخزنی	فرسایش بازه‌ای (در بازه‌های پایین دست سد)
۵	جابه‌جایی طبیعی بستر رودخانه	فرسایش موضعی
۶	ایجاد میان‌بر و کاهش طول رودخانه	فرسایش بازه‌ای
۷	امواج جزر و مدی	فرسایش بازه‌ای
۸	عبور موج سیل	فرسایش بازه‌ای و موضعی
۹	کاهش مقطع جریان	فرسایش بازه‌ای
۱۰	برداشت شن و ماسه	فرسایش بازه‌ای

۷- روش‌های مختلف تعیین عمق چاله فرسایشی در محدوده پایه‌های پل

فرسایش در محدوده پایه‌های پل حاصل فرسایش بازه‌ای و موضعی است که در خصوص مکانیسم هریک در فصول قبل بحث شد. تعیین اندازه فرسایش بازه‌ای با استفاده از معادلات مندرج در فصل پنجم (۵-۱) تا (۵-۳) امکان‌پذیر است. در این فصل روش‌های مختلف تعیین میزان فرسایش موضعی و یا عمق چاله فرسایشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. منشاء اصلی وقوع فرسایش موضعی در اطراف پایه‌های پل تشکیل گرداب نعل اسبی است (فصل دوم)، به علاوه شکل پایه‌ها، نوع مواد تشکیل دهنده بستر و تعداد پایه‌ها از جمله عوامل مؤثر در تشدید فرسایش موضعی می‌باشند. سیمونز و شتورک [۳] عوامل مؤثر در ایجاد چاله فرسایشی را در اطراف پایه‌های پل به صورت زیر ارائه کرده است:

- عرض پایه پل
- طول پایه پل
- عمق جریان در بالادست
- سرعت جریان در پائین دست
- اندازه مواد تشکیل دهنده بستر
- زاویه برخورد جریان با پایه
- شکل پایه
- پستی یا بلندی‌های موجود در بستر رودخانه ناشی از انباشت رسوبات
- تجمع قطعات یخ در دهانه پل
- جریان گل و لای

با عنایت به موارد فوق مجموعه‌ای از معادلات تجربی توسط متخصصین برای تعیین عمق چاله فرسایشی ارائه گردیده است که در زیر به معرفی آنها پرداخته شده است.

۱-۷ معادله دانشگاه ایالتی کلرادو^۱

این معادله توسط ریچاردسون و همکاران ارائه شده است :

$$\frac{d_s}{Y_1} = 2K_1 K_2 \left(\frac{a}{Y_1}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (1-7)$$

که در آن :

d_s - عمق چاله فرسایشی

Y_1 - عمق جریان در بالادست پل

a - عرض پایه

K_1 - فاکتور تصحیح مربوط به شکل پایه که از جدول ۱-۷ به دست می‌آید.

K_2 - فاکتور تصحیح زاویه برخورد جریان با پایه که از جدول (۱-۷) به دست می‌آید.

$Fr_1 = V_1 / (gy_1)^{0.5}$ - عدد فرود

V_1 - سرعت جریان در بالادست پل

جدول ۱-۷ - ضریب تصحیح K_1 و K_2 در تعیین عمق فرسایش موضعی در محدوده پایه‌های پل

ضریب تصحیح، K_2				ضریب تصحیح، K_1		ردیف
$L/a = 12$	$L/a = 8$	$L/a = 4$	زاویه برخورد θ	مقدار K_1	شکل پایه	
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰	۱/۱	دماغه مربع	A
۲/۵	۲/۰	۱/۵	۱۵	۱/۰	دماغه گرد	B
۳/۵	۲/۵	۲/۰	۳۰	۱/۰	استوانه‌ای	C
۳/۴	۳/۳	۲/۳	۴۵	۰/۹	دماغه مثلثی	D
۵/۰	۳/۹	۲/۵	۹۰	۱/۰	استوانه های متوالی	E

در جدول فوق L طول پایه پل و θ زاویه برخورد جریان با پایه است.

۲-۷ معادله جین و فیشر^۱

جین و فیشر برای اعداد فرود بالاتر از ۱ ($Fr > 1$) و پایه‌های استوانه‌ای معادلانی را به صورت زیر ارائه کردند (در این معادلات a معرف قطر پایه می‌باشد):

الف - حالت بستر متحرک (انتقال بار بستر) برای محدوده $Fr_1 - Fr_c > 0.2$

$$\frac{d_s}{a} = 2(Fr_1 - Fr_c)^{0.25} (Y_1 / a)^{0.5} \quad (2-7)$$

ب - حالت بستر ثابت (بدون انتقال بار بستر)

$$\frac{d_s}{a} = 1/85(Fr_c)^{0.25} (Y_1 / a)^{0.3} \quad (3-7)$$

این معادلات تابع عدد فرود بحرانی (Fr_c) بوده و برای تعیین d_s لازم است نخست با انجام گامهای محاسباتی زیر مقدار Fr_c برحسب شرایط انتقال مواد بستر تعیین شود:

- تعیین مقدار D_{50} (قطر نظیر ۵۰ درصد ریزتر وزنی) مواد بستر

- تعیین مقدار τ_c از نمودار شکل (۱-۷). در این نمودار τ_c برحسب پوند بر فوت مربع (lb/ft^2) بوده و برای تبدیل τ_c به نیوتن بر متر مربع (N/m^2) به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\tau_c \text{ پوند بر فوت مربع} = 47/8 \tau_c \text{ نیوتن بر مترمربع}$$

- تعیین سرعت برشی بحرانی (U^*c)

$$U^*c = (\tau_c / \rho)^{1/5} \text{ متر بر ثانیه}$$

ρ - جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)

- تعیین ضخامت قشر حد ورقه‌ای δ

$$\delta = 11/6 v / U^*c \text{ متر}$$

در این رابطه متر مربع بر ثانیه $v = 10^{-6}$ (لزوجت سینماتیکی) فرض می‌شود.

- تعیین نسبت D_{50}/δ

- مقدار X از شکل ۲-۷ مشخص شود.

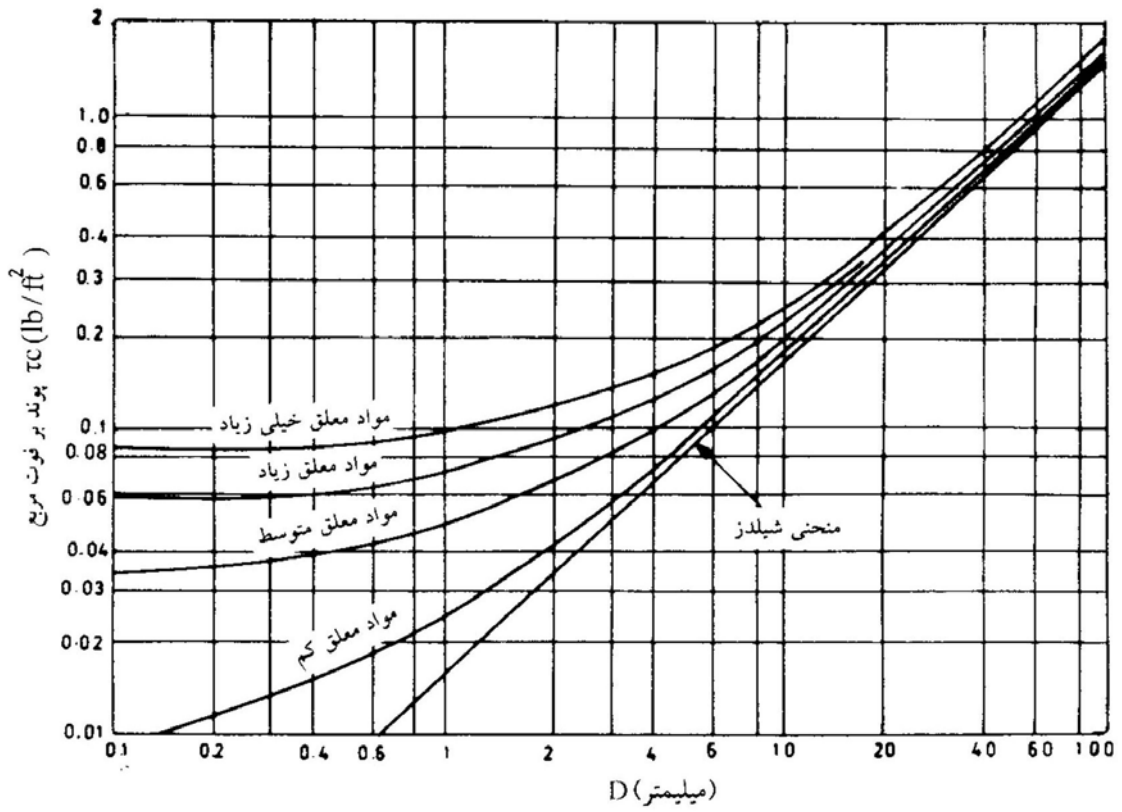
- تعیین سرعت بحرانی (Uc):

$$Uc = U^*c [2/5 \ln 11 Y_1 X / D_{50}] \text{ متر بر ثانیه}$$

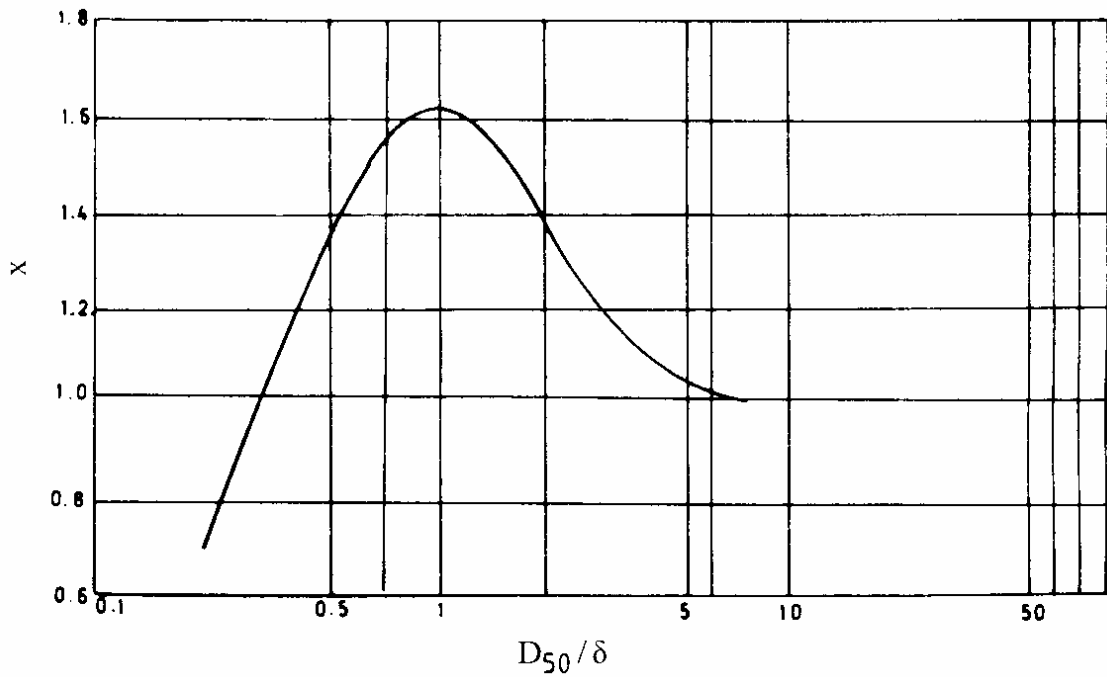
- تعیین مقدار Fr_c از رابطه

$$Fr_c = Uc / (g Y_1)^{1/5}$$

1 - Jain and Fisher (1999)



شکل ۷-۱- نمودار تغییرات تنش برشی بحرانی (τ_c) بر حسب قطر مواد بستر D_{50}



شکل ۷-۲- نمودار تغییرات پارامتر X بر حسب پارامتر $\frac{D_{50}}{\delta}$

عمق چاله فرسایشی حاصل از روابط فوق برای محدوده $0 < (Fr - Fr_c) < 0.2$ برابر با مقدار ماکزیمم به دست آمده از دو معادله فوق انتخاب می‌شود. برای پایه‌های غیر استوانه‌ای لازم است ضرایب اصلاحی مرتبط با شکل پایه و همچنین زاویه برخورد جریان از جدول ۷-۱ به کار گرفته شود.

۳-۷ معادله دانشگاه اوکلند^۱

برای بسترهای با دانه بندی متنوع رادکیوی^۲ و سایر محققین معادله‌ای را به صورت زیر ارائه داده اند:

برای $(a / D_{50} > 18)$

$$\frac{d_s}{a} = 2 / 1 K_1 K_2 K_3 \quad (4-7)$$

برای $(a / D_{50} < 18)$

$$\frac{d_s}{a} = 0.45 K_1 K_2 K_3 (a / D_{50})^{0.53} \quad (5-7)$$

در روابط فوق :

d_s - عمق چاله فرسایشی

a - عرض پایه

K_1 - ضریب تصحیح مربوط به شکل پایه (جدول ۷-۱)

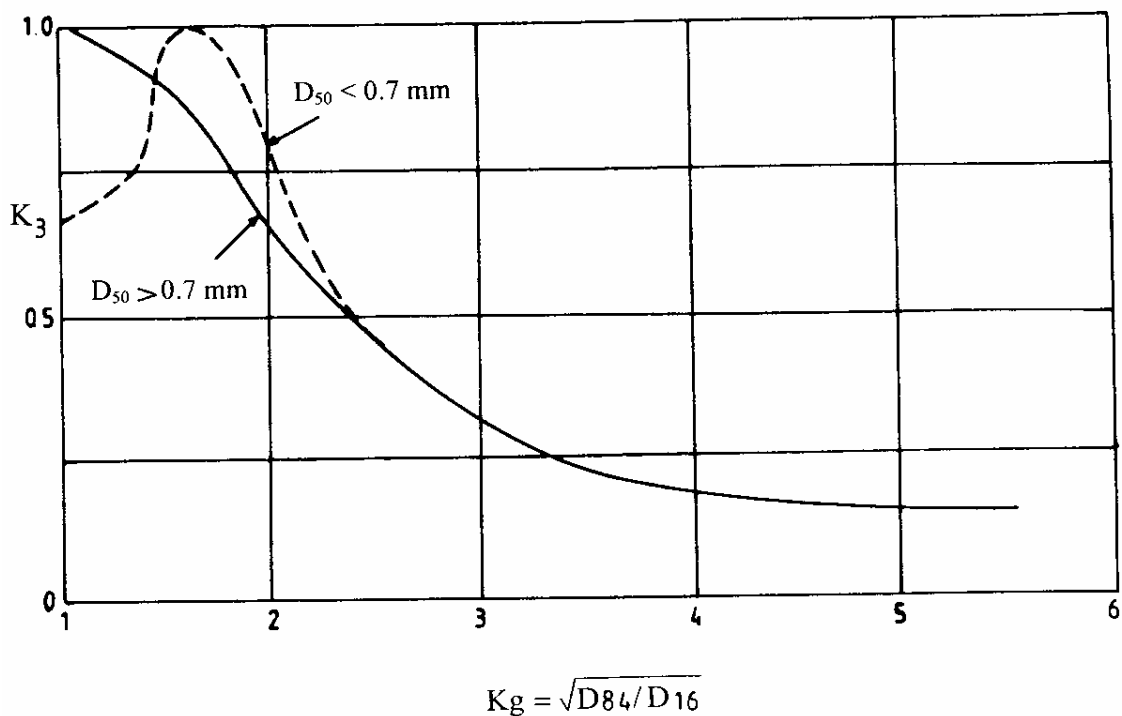
K_2 - ضریب تصحیح مربوط به زاویه برخورد جریان با پایه (جدول ۷-۱)

K_3 - ضریب تصحیح مربوط به منحنی دانه بندی که از شکل ۷-۳ به دست می‌آید.

بر روی شکل مزبور K_g ضریب دانه بندی بوده و از رابطه $K_g = (D_{84} / D_{16})^{1/5}$ به دست می‌آید که در آن D_{16} و D_{84} به ترتیب قطر نظیر ۱۶ و ۸۴ درصد ریزتر وزنی مواد بستر است.

کاپ و جانسون^۳ (۱۹۸۷) توصیه کردند که در استفاده از معادلات ۷-۴ و ۷-۵ از یک ضریب اصلاحی K_{fs} نیز استفاده شود. چنانچه $K_3 < 2$ باشد $K_{fs} = \frac{1}{K_3}$ و برای $K_3 > 2$ مقدار $K_{fs} = 1/5$ است.

1 - University of Aukland
2 - Raudkivi
3 - Cope & Janson



شکل ۷-۳- نمودار ضریب K_3 بر حسب K_g در بسترهای با دانه بندی مختلف

۴-۷ معادله فرولیش^۱

فرولیش براساس ۸۳ نمونه از مشاهدات تجربی معادله زیر را در سال ۱۹۸۸ برای ارزیابی عمق فرسایش موضعی در محدوده پایه‌های پل ارائه کرد:

$$d_s = 0.32 K_1 \left(\frac{a'}{a}\right)^{0.62} \left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.46} Fr_1^{0.2} (a/D_{50})^{0.08} + 1 \quad (۶-۷)$$

که در آن:

K_1 - ضریب شکل پایه (دماغه مربعی $K_1 = ۱/۳$ ، دماغه دایره‌ای و پایه‌های استوانه‌ای $K_1 = ۱/۰$ و دماغه های مثلثی $K_1 = ۰/۷$ است)

1 - Froehlich

a' - تصویر عرضی پایه پل در راستای عمود بر جریان آب و مقدار آن در رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$a' = a \cos \theta + L \sin \theta$$

که در آن θ زاویه برخورد جریان و L طول پایه است.

بقیه پارامترها قبلاً^۱ تعریف شده اند. در صورتی که در بستر امواج ماسه ای^۱ وجود داشته باشد لازم است رقم حاصل از رابطه (۶-۷) به اندازه $(Y_1/6)$ افزایش داده شود.

۵-۷ معادله بروزرس^۲

بروزرس با انجام بررسی‌های تجربی معادله ساده زیر را برای پیش بینی عمق چاله فرسایشی پیشنهاد کرد:

$$d_s = 1/4a \tag{۷-۷}$$

در معادله فوق a عرض پایه است.

۶-۷ معادله آلوارز و سانچه^۳

این معادله به صورت زیر ارائه شده است:

$$\frac{d_s}{a} = K_1 K_2 \frac{V_1^2}{ga} - \frac{30D_{50}}{a} \tag{۸-۷}$$

مقادیر K_1 و K_2 به ترتیب از جدول (۲-۷) و (۳-۷) به دست می‌آید؛ D_{50} قطر نظیر ۵۰ درصد ریزتر وزنی مواد بستر است.

جدول ۲-۷ - مقادیر ضریب K_1 در تعیین عمق چاله فرسایشی

شکل پایه پل	مقدار K_1					
	$\theta =$	0°	10°	20°	30°	40°
دایره ای		۱۰/۰				
گوشه دار		۸/۵	۸/۷	۹/۰	۱۰/۳	۱۱/۳

θ - زاویه برخورد جریان با پایه پل (به شکل ۴-۷ مراجعه شود)

1 - Dunes
2 - Breusers (1965)
3 - Maza Alvarez & Sanchez (1960)

جدول ۷-۳- مقادیر ضریب K_2 در تعیین عمق چاله فرسایشی

Y/a	$V_1^{1/2}g=$	K_2			
		۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۴
۱/۸		۰/۷۵	۰/۹۵	۱/۱۵	۱/۴
۲/۲		۰/۷۵	۰/۹۵	۱/۱۰	۱/۳۵
۲/۶		۰/۷۵	۰/۹۰	۱/۱۰	۱/۳۰
۳/۰		۰/۷۵	۰/۹۰	۱/۱۰	۱/۳۰

۷-۷ معادله پیشنهادی توسط لاراس^۱

معادله لاراس برای تعیین عمق نهایی چاله فرسایشی ایجاد شده در اطراف پایه پل به صورت زیر است:

$$d_s = 1/42K_1a^{0/75} \quad (9-7)$$

در این معادله K_1 برای مقاطع دایره‌ای برابر با ۱ و برای مقاطع مستطیلی $K_1 = 1/4$ است، به علاوه زاویه برخورد برابر با $\theta = 0^\circ$ فرض شده است.

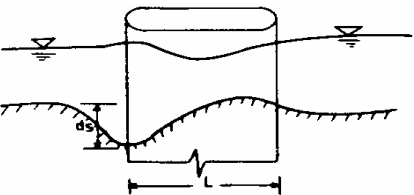
۷-۸ معادله نیل^۲

نیل پس از بررسی‌های تحقیقاتی پیشنهاد کرد که مقدار d_s به صورت رابطه کلی زیر بیان شود:

$$d_s = Ka \quad (10-7)$$

مقدار K مطابق جدول ۷-۴ داده شده است. همان‌طوری‌که از جدول ۷-۴ برمی‌آید معادله نیل برای پایه‌های متوالی نیز کاربرد دارد و بسته به موقعیت پایه مقادیر K (پایه اول) از ۲/۰ به ۱/۲ (پایه چهارم) تقلیل می‌یابد.

جدول ۷-۴ مقادیر K مورد استفاده در معادله نیل

شکل پایه	K
	<p>پایه اول = ۲/۰</p> <p>پایه دوم = ۱/۵</p> <p>پایه سوم = ۱/۳</p> <p>پایه چهارم = ۱/۲</p>

1 - Larras (1963)

2 - Neill (1973)

۹-۷ معادله کالمان^۱

کالمان از تلفیق دو مفهوم عدد اولر فرسایش^۲ و عدد رینولدز پایه^۳ معادله‌ای را به صورت زیر برای تعیین d_s ارائه کرده است:

$$d_s = 1/49a^{0/9}(V_1^2/2g)^{0/1} \quad (۱۱-۷)$$

۱۰-۷ رابطه شن^۴

شن براساس مفهوم عدد رینولدز پایه حداکثر عمق آبخستگی در پای پل استوانه‌ای را به صورت تابعی از عدد رینولدز ارائه کرد [۲] و [۱۲]:

$$d_s = 0/00022R_e^{0/619} \quad (۱۲-۷)$$

$$R_e = aV_1 / v$$

که در آن R_e عدد رینولدز پایه و v ویسکوزیته سینماتیک آب است. بقیه پارامترها قبلاً^۵ تعریف شده اند.

۱۱-۷ اطلاعات تکمیلی در محاسبه عمق فرسایش در محدوده پایه‌های پل

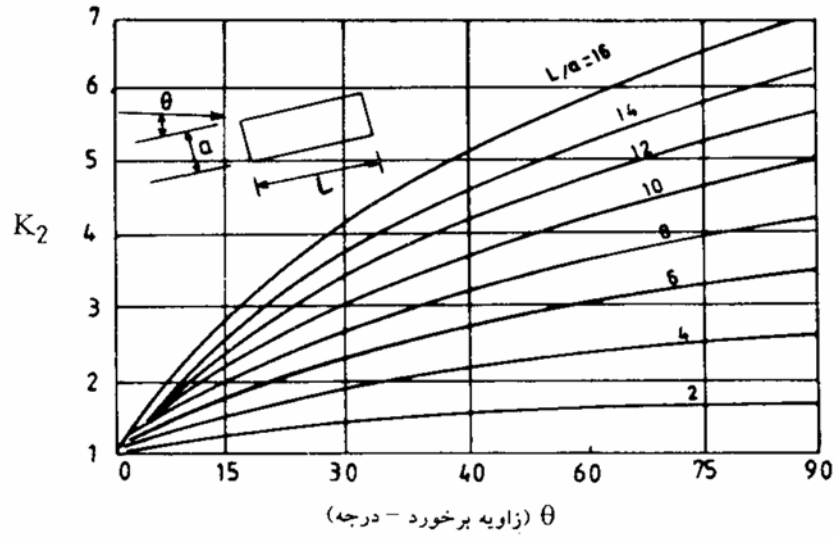
در تعیین عمق آبخستگی یکی از پارامترهای مهم ضریب تصحیح K_1 مربوط به شکل پایه است در جدول ۵-۷ مقادیر K_1 برای اشکال مختلف پایه‌ها درج شده است. همچنین پارامتر K_2 که معرف ضریب تصحیح مربوط به زاویه برخورد جریان با امتداد پایه است از نمودارهای شکل ۴-۷ برای پایه‌های مستطیلی شکل به دست می آید.

1 - Coleman (1971)
2 - The Scour Euler No
3 - Pier Reynolds No.
4 - Shen

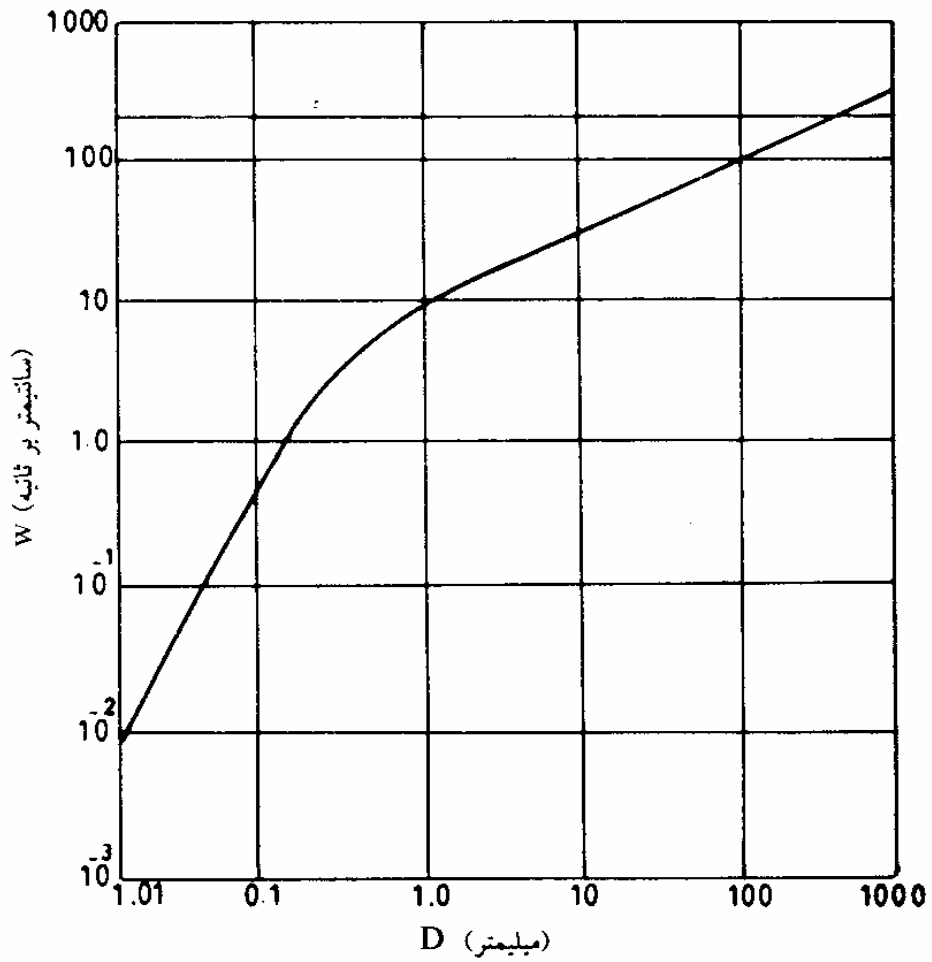
جدول ۷-۵- مقادیر K_1 به ازای شکل‌های مختلف در پایه‌های پل [۱۳]

K_1	a/L	شکل پایه
۱/۰	۱ : ۱	استوانه‌ای
۱/۲۲	۱ : ۳	چهارگوش
۱/۰۸	۱ : ۵	چهارگوش
۰/۹	۱ : ۳	چهارگوش با دماغه نیمدایره
۰/۸۶	۱ : ۵	چهارگوش با دماغه نیمدایره و دنباله گوه‌ای شکل (مثلثی)
۱/۰۱	۱ : ۴	چهارگوش با گوشه‌های گرد شده
۰/۷۶	۱ : ۳	چهارگوش با دماغه گوه‌ای شکل (مثلثی)
۰/۸۳	۱ : ۲	بیضی
۰/۸۰	۱ : ۳	بیضی
۰/۶۱	۱ : ۵	بیضی
۰/۸۰	۱ : ۲	بیضی کشیده با نوک عدسی
۰/۷۰	۱ : ۳	بیضی کشیده با نوک عدسی
۰/۸۰	۱ : ۳/۵	مقطع بال هواپیما (آئرو دینامیک)

سرعت سقوط دانه‌ها از دیگر اطلاعات موردنیاز در برآورد مقدار فرسایش در محدوده پایه‌هاست که به ویژه برای تعیین فرسایش بازه‌ای (فرسایش ناشی از کاهش مقطع جریان) کاربرد دارد معادلات (۵-۱) و (۵-۲) در شکل ۷-۵ نمودار تغییرات w (سرعت سقوط) برحسب D (قطر دانه) داده شده است [۱۴].



شکل ۷-۴- ضریب تصحیح K_2 بر حسب θ برای پل‌های مستطیلی



شکل ۷-۵- نمودار تغییرات سرعت سقوط دانه‌ها (w) بر حسب قطر دانه (D)

مثال عددی ۷-۱-

عمق فرسایش در اطراف پایه پل استوانه‌ای به قطر $a = 1/2m$ براساس داده های زیر چقدر است ؟ (زاویه برخورد برابر با صفر $(\theta = 0/0)$ و غلظت مواد معلق ریزدانه در حد متوسط است).

$$D_{50} = 1 \text{ میلیمتر} \quad D_{16} = 0/66 \text{ و } D_{84} = 1/5$$

$$V_1 = 2/44 \text{ متر بر ثانیه}$$

$$Y_1 = 4/6 \text{ متر}$$

$$v = 10^{-6} \text{ مترمربع بر ثانیه}$$

حل :

الف - معادله دانشگاه ایالتی کلرادو

$$\frac{d_s}{Y_1} = 2K_1K_2\left(\frac{a}{Y_1}\right)^{0/65} Fr_1^{0/43}$$

با مراجعه به جدول ۷-۱ مقادیر K_1 و K_2 برابر با ۱ است و لذا $K_1K_2 = 1$ در نظر گرفته می‌شود.

$$Fr_1 = V_1 / (gY_1)^{0/5} = 2/44 / (9/81 \times 4/6)^{0/5} = 0/363$$

$$\frac{d_s}{Y_1} = 2 \times 1 \times \left(\frac{1/2}{4/6}\right)^{0/65} (0/363)^{0/43} = 0/54$$

$$d_s = 4/6 \times 0/54 = 2/43 \text{ عمق چاله فرسایشی، متر}$$

ب - معادله جین و فیشر

$$\frac{d_s}{a} = 2(Fr - Fr_c)^{0/25} (Y_1/a)^{0/5}$$

- حالت بستر فعال

$$\frac{d_s}{a} = 1/85(Fr_c)^{0/25} (Y_1/a)^{0/3}$$

- حالت بستر ثابت

- با در دست داشتن D_{50} مقدار τ_c از گراف شکل ۷-۱ تعیین می‌شود.

$$\tau_c = 0/043 \text{ نیوتن بر متر مربع} = 0/043 \times 47/8 = 2/05 \text{ پوند بر فوت مربع}$$

$$U * c = (\tau_c / \rho)^{0/5} = (2/05 / 1000)^{0/5} = 0/0453 \text{ متر بر ثانیه}$$

$$\delta = 11/6v / U * c = 11/6 \times 10^{-6} / 0/0453 = 2/56 \times 10^{-4} \text{ متر}$$

$$D_{50} / \delta = 1 \times 10^{-3} / 2/56 \times 10^{-4} = 3/9$$

- با مراجعه به شکل ۷-۲ مقدار پارامتر X بدست می آید :

$$D_{50}/\delta = 3/9 \quad \text{و} \quad X = 1/15$$

- تعیین سرعت بحرانی

$$U_c = U * c [2/5 \ln 11 Y_1 X / D_{50}] = 0/0453 [2/5 \ln 11 * 4/6 * 1/15 / 1 * 10^{-3}] = 1/24 \quad \text{متر بر ثانیه}$$

- تعیین عدد فرود بحرانی Fr_c :

$$Fr_c = U_c / (g Y_1)^{0/5} = 1/24 / (9/81 * 4/6)^{0/5} = 0/18$$

- تعیین عدد فرود (Fr_1) :

$$Fr_1 = V_1 / (g Y_1)^{0/5} = 2/44 / (9/81 * 4/6)^{0/5} = 0/36$$

- حالت بستر متحرک

$$\frac{d_s}{a} = 2(0/36 - 0/18)^{0/25} (4/6 \div 1/2)^{0/5} = 2/55$$

$$d_s = 1/2 * 2/55 = 3/06 \quad \text{عمق چاله فرسایشی متر}$$

- حالت بستر ثابت

$$\frac{d_s}{a} = 1/85 (Fr_c)^{0/25} (Y_1 / a)^{0/3} = 1/85 (0/18)^{0/25} (4/6 \div 1/2)^{0/3} = 1/8$$

$$d_s = 1/2 * 1/8 = 2/16 \quad \text{متر}$$

ج - معادله دانشگاه اوکلند :

$$a / D_{50} = 1/2 \div 1 * 10^{-3} = 12000 > 18$$

$$\frac{d_s}{a} = 2/1 K_1 K_2 K_3$$

- تعیین K_g

$$K_g = \sqrt{D_{84} / D_{16}} = \sqrt{1/5 \div 0/66} = 1/5$$

- تعیین K_3 از گراف شکل ۷-۳

$$K_3 = 0/88$$

- برای مقطع دایره‌ای و جریان با زاویه برخورد صفر $K_1 K_2 = 1$ است.

$$\frac{d_s}{a} = 2/1 * 1 * 0/88 = 1/848$$

- اعمال ضریب کاپ و جانسون

$$K_3 = 0/88 < 2 \quad \text{و} \quad K_{fs} = \frac{1}{K_3} = \frac{1}{0/88} = 1/136$$

$$\frac{d_s}{a} = 1/848 * K_{fs} = 1/848 * 1/136 = 2/1$$

$$d_s = 2/1 * 1/2 = 2/52 \quad \text{عمق چاله فرسایشی متر}$$

د - معادله فرولیش

$$d_s = 0.32 K_1 \left(\frac{a'}{a}\right)^{0.62} \left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.46} Fr_1^{0.2} (a/D_{50})^{0.08} + 1$$

$K_1 = 1$, $a' = a$ (زاویه برخورد برابر با صفر است)

$$Y_s = 0.32 \times 1 \left(\frac{1/2}{1/2}\right)^{0.62} \left(\frac{4/6}{1/2}\right)^{0.46} (0.363)^{0.2} \left(\frac{1/2}{0.001}\right)^{0.08} + 1$$

$d_s = 1/85$ عمق چاله فرسایشی متر

ه - معادله بروزرس

$$d_s = 1/4a$$

$d_s = 1/4 \times 1/2 = 1/68$ عمق چاله فرسایشی متر

و - معادله لاراس

$$d_s = 1/42 K_1 a^{0.75}$$

$d_s = 1/42 (1/0)(1/2)^{0.75} = 1/63$ عمق چاله فرسایشی متر

ز - معادله کلمان

$$d_s = 1/49a \frac{9}{10} \left(\frac{V_1^2}{2g}\right)^{1/10} = 1/49(1/2)^{9/10} \left(\frac{2/44^2}{2 \times 9/81}\right)^{1/10}$$

$d_s = 1/58$ عمق چاله فرسایشی متر

ح - معادله مزالوارز و سانچه

$$\frac{d_s}{a} = K_1 K_2 \frac{V_1^2}{ga} - \frac{30D_{50}}{a}$$

- از جدول ۷-۲ مقدار ضریب K_1 برای پایه با مقطع دایره‌ای شکل و $\theta = 0$ برابر با ۱۰ است.

- از جدول ۷-۳ مقدار K_2 با توجه به کمیت $\frac{V_1^2}{2g} = \frac{2/44^2}{2 \times 9/81} = 0.3$ که نزدیکترین عدد به ضریب (۰/۲۵)

نزدیکترین عدد به رقم ۰/۳ در جدول است برابر با $K_2 = ۰/۷۵$ است. $\frac{Y_1}{a} = \frac{4/6}{1/2} = 3/8$

$$\frac{d_s}{a} = 10 \times 0.75 \times \frac{(2/44)^2}{9/81 \times 1/2} - \frac{30 \times 0.001}{1/2} = 3/77$$

عمق فرسایش متر $d_s = 1/2 \times 3/77 = 4/52$

ت - رابطه شن

$$d_s = 0.00022 Re^{0.619}$$

$$Re = aV_1 / \nu = 1/2 \times 2/44 \div 10^{-6} = 2/928 \times 10^6$$

$$d_s = 0.00022 (2/928 \times 10^6)^{0.619}$$

عمق چاله فرسایشی متر $d_s = 2/214$

ی - جدول نتایج محاسبات از روش‌های مختلف

در جدول ۶-۷ مقادیر d_s حاصل از روش‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۶-۷ - مقادیر d_s حاصل از روش‌های مختلف

مقدار d_s (متر)	نام روش	ردیف
۲/۴۸	معادله دانشگاه ایالتی کلرادو	۱
۳/۰۶	معادله جین و فیشر	۲
۲/۵۲	معادله دانشگاه اوکلند	۳
۱/۸۵	معادله فرولیش	۴
۱/۶۸	معادله بروزرس	۵
۱/۶۳	معادله لاراس	۶
۱/۵۸	معادله کالمان	۷
۴/۵۲	معادله مزالوارزو سانچه	۸
۲/۲۱۴	رابطه شن	۹

مطابق جدول فوق کمترین مقدار d_s مربوط به رابطه کالمان و برابر با $d_s = 1/58$ و بیشترین آن از رابطه مزالوارزو سانچه $d_s = 4/52$ حاصل شده است.

معمولاً در عمل مقدار متوسط حاصل از چند روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس جدول ۶-۷ رقم متوسط حاصل برابر با متر $d_s = 2/39$ است.

مثال ۷-۲

در مثال ۷-۱ چنانچه مقطع مجرای اصلی برابر با متر ۱۰۰ = B_1 و مقطع تنگ شده در محل احداث پل (با در نظر گرفتن قطر پایه‌های موجود) برابر با متر ۷۵ = B_2 باشد مقدار عمق فرسایش بازه‌ای ایجاد شده در محل پل و مقدار فرسایش کل (شامل فرسایش موضعی و فرسایش بازه‌ای) در محدوده پایه‌ها چقدر خواهد بود ؟

حل :

برای تعیین فرسایش بازه‌ای حاصل از کاهش مقطع جریان با مراجعه به فصل پنجم از رابطه (۵-۱) داریم :

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \left(\frac{Q_t}{Q_c}\right)^{\frac{6}{7}} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^A \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^B$$

$$dsr = Y_2 - Y_1$$

- تعیین نسبت $\frac{Q_t}{Q_c}$ ، نظر به اینکه رودخانه موردنظر فاقد سیلابدشت فرض می‌شود لذا $Q_t = Q_c$ بوده و نسبت مزبور برابر با ۱ می‌شود.

- تعیین نسبت $\frac{n_2}{n_1}$ ، در این مثال فرض می‌شود $n_2 = n_1$ است و لذا $\frac{n_2}{n_1} = 1$ است.

- با توجه به مفروضات فوق معادله به صورت زیر ساده می‌شود :

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^A$$

- تعیین نمای A براساس رابطه مندرج در فصل پنجم :

$$A = 6(2 + e) \div 7(3 + e)$$

- پارامتر e از جدول ۵-۱ به دست می‌آید و بدین منظور لازم است نسبت U^*c/w معلوم شود :

$$U^*c = 0/0453 \quad \text{متر بر ثانیه}$$

از مثال عددی ۷-۱ :

(روش جین و فیشر) :

- مقدار w (سرعت سقوط) از گراف شکل (۷-۵) حاصل می‌شود،

$$D_{50} = 1 \quad \text{متر بر ثانیه} = 0/1 = \text{سانتیمتر بر ثانیه} \quad w = 10 \quad \text{و میلیمتر} \quad D_{50} = 1$$

$$U^*c/w = 0/0453 \div 0/1 = 0/453 < 0/5$$

$$e = 0/25$$

$$A = 6(2 + 0/25) \div 7(3 + 0/25) = 0/593$$

$$\frac{Y_2}{Y_1} = (100 \div 75)^{0/593} = 1/186$$

$$Y_2 = 4/6 \times 1/186 = 5/456 \quad \text{متر}$$

$$dsr = Y_2 - Y_1 = 5/456 - 4/6 = 0/86 \quad \text{مقدار فرسایش بازه‌ای ناشی از کاهش مقطع متر}$$

- حال با معلوم شدن مقدار فرسایش بازه‌ای فرسایش کل از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$d_{st} = d_{sr} + d_s$$

فرسایش کل پیش بینی شده در محدوده پایه پل متر $d_{st} = 0/86 + 2/39 = 3/25$

۸- روش‌های مهار فرسایش پایه پل‌ها و توصیه‌ها

برای مقابله با پدیده فرسایش در اطراف پایه‌های پل سه راه کار عمده زیر متداول است.

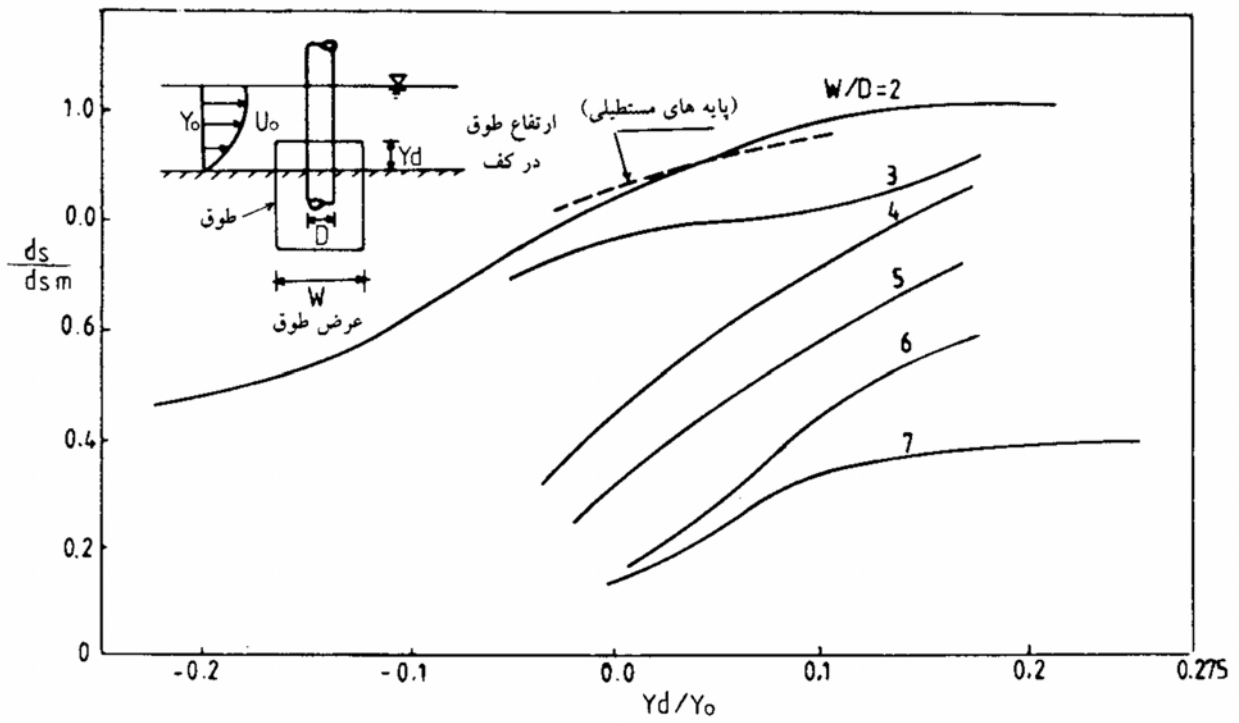
۱-۸ قرارداد پی (فونداسیون) در تراز پایین تر از عمق گودال فرسایشی

۲-۸ کاهش قدرت گرداب ایجاد شده در اطراف پایه

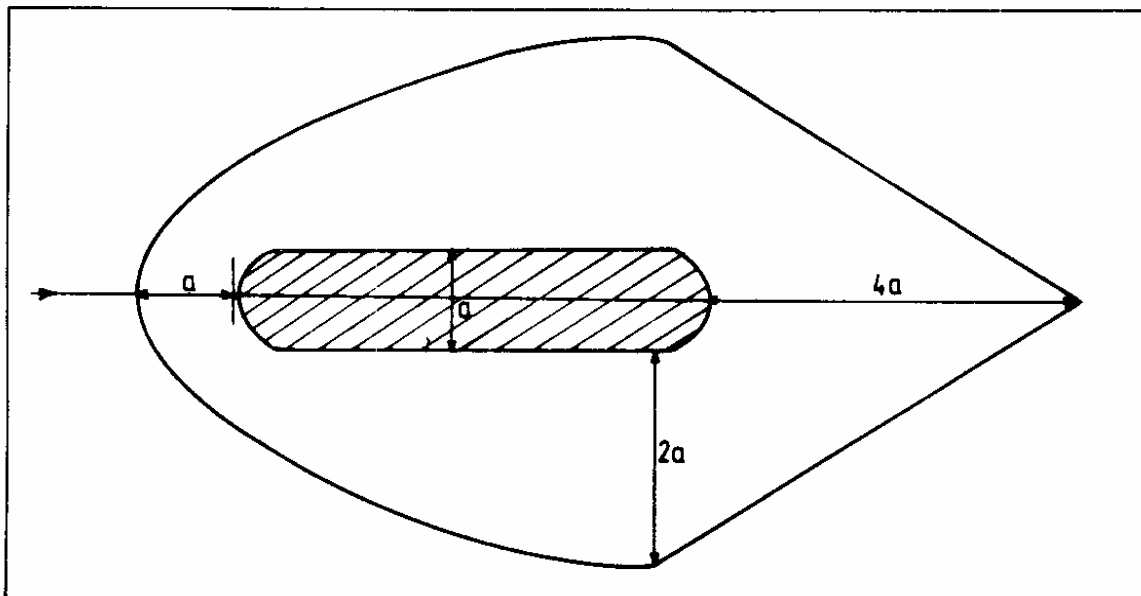
۳-۸ ایجاد پوشش حفاظتی سنگچین در اطراف پایه

در بسیاری از موارد به لحاظ اجتناب از تبعات حاصل از تخریب پل روش ۱-۸ ترجیح داده می‌شود. به خصوص در مواردی که عمق فرسایش پیش بینی شده از ۶ متر تجاوز کند قراردادن فونداسیون در عمق بیشتر از عمق چاله فرسایشی الزام آور خواهد بود [۳]. برای فرسایش‌های کمتر از ۶ متر روش کاهش قدرت گرداب (روش ۲-۸) و یا ایجاد پوشش سنگچین توصیه شده است. در مواردی برای کاهش مؤثر عمق گودال فرسایشی استفاده تلفیقی از روش (۲-۸) و (۳-۸) متداول است. برای کاهش قدرت گرداب ایجاد شده در جلو و عقب پایه (دماغه و دنباله) متداولترین راه ایجاد شکل آنرودینامیکی در پایه‌هاست. بدین منظور معمولاً از پایه‌های بیضی شکل یا پایه‌های با دماغه نیم‌دایره، عدسی و گوه‌ای استفاده می‌شود که در مباحث پیشین انواع مختلف آن معرفی گردیده اند. استفاده از طوق برای دور ساختن گرداب فعال از اطراف پایه از دیگر روش‌های مرسوم در حفاظت پایه‌های پل در مقابل فرسایش‌های موضعی است. در شکل ۱-۸ تأثیر استفاده از طوق در کاهش عمق چاله فرسایشی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای نشان داده شده است [۳] و [۱۵]. مطابق شکل مزبور با افزایش عرض طوق (w) فرسایش نسبی (ds/dsm) که معرف عمق فرسایش در شرایط ایجاد طوق (ds) به حالت بدون حفاظ طوق (dsm) است به‌طور محسوسی رو به کاهش می‌گذارد. بر روی نمودار مزبور نتایج حاصل از بررسی‌های زراتی [۱۳] بر روی پایه‌های مستطیلی آورده شده و معرف آن است که نمودار مزبور می‌تواند برای پایه‌های غیراستوانه‌ای نیز به عنوان یک راهنمای اولیه در طراحی مورد استفاده قرار گیرد (بدیهی است اظهار نظر جامع در این خصوص مستلزم انجام بررسی‌های تحقیقاتی بیشتری است).

ایجاد پوشش حفاظتی سنگچین در اطراف پایه‌ها به عنوان روش متداول و آسان توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته و الگوهای پوششی مختلفی ارائه شده است. از جمله گارده و راجو [۱۶] الگویی را مطابق شکل ۲-۸ برای ایجاد پوشش سنگفرش در اطراف پایه‌های مستطیلی با دماغه گرد معرفی کرده اند. در این الگو سطح پوشش سنگچین قریب به شش برابر سطح مقطع پایه پل مستطیلی است.



شکل ۸-۱- نمودار تغییرات فرسایش نسبی برحسب ارتفاع طوق از کف (Y_d) به عمق جریان بالادست (Y_o)
به ازاء نسبت‌های مختلف W/D



شکل ۸-۲- محدوده پوشش سنگچین پیشنهادی توسط گارده و راجو در اطراف پایه‌های پل

برای تعیین اندازه سنگ‌های مورد استفاده در لایه پوشش حفاظتی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. از جمله اینها روش U.S.B.P.R.¹ (اداره راه آمریکا) است که با استفاده از سرعت در مجاورت بستر (U_b) اندازه سنگ‌های مورد نیاز برای پوشش حفاظتی (D_{50}) تعیین می‌شود [۸]. مقدار U_b (سرعت در مجاورت بستر) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{U_b}{U_1} = \frac{1}{0.958 \log\left(\frac{Y_1}{D_{50}}\right) + 1} \quad (1-8)$$

که در آن:

U_b - سرعت در مجاورت بستر (متر بر ثانیه)

U_1 - سرعت متوسط جریان در بالادست پل (متر بر ثانیه)

Y_1 - عمق جریان در بالادست پل (متر)

D_{50} - قطر نظیر ۵۰ درصد لایه سنگفرشی (متر)

برای تعیین اندازه D_{50} از نمودار شکل ۳-۸ استفاده می‌شود. بدین منظور نخست از معادله (۱-۸) برای یک مقدار فرضی D_{50} ، مقدار U_b تعیین و سپس با مراجعه به شکل ۳-۸ قطر نظیر D_{50} از آن قرائت می‌شود چنانچه دو کمیت فرضی و حاصل از نمودار متفاوت باشند لازم است قطر جدیدی را فرض کرده و تا رسیدن به جواب مناسب تکرار محاسبات را انجام داد. استفاده از نمودار U.S.B.R.² (اداره عمران آمریکا) از دیگر روش‌های تعیین اندازه سنگ‌های مورد استفاده در لایه حفاظتی است. در شکل ۴-۸ نمودار تغییرات D_{max} به صورت تابعی از سرعت جریان در بستر (U_b) نشان داده شده است. این نمودار اندازه حداکثر قطر مورد استفاده در لایه سنگچین را مشخص می‌کند. ضخامت لایه سنگچین معمولاً دو برابر قطر نظیر D_{50} انتخاب می‌شود. به علاوه لازم است در لایه سنگچینی درجه بندی دانه‌های مورد استفاده مطابق شکل ۵-۸ رعایت شود. رعایت منحنی دانه بندی مذکور پایداری لایه را در مقابل جریان آب افزایش می‌دهد. رابطه دیگری توسط یون برای تعیین قطر نظیر D_{50} در لایه سنگچین معرفی شده است. در این معادله پارامتر جریان (V_1)، عرض پایه (a)، چگالی دانه‌ها و همچنین عمق جریان در بالادست (Y_1) به همراه شتاب ثقل منظور شده است [۱۷]:

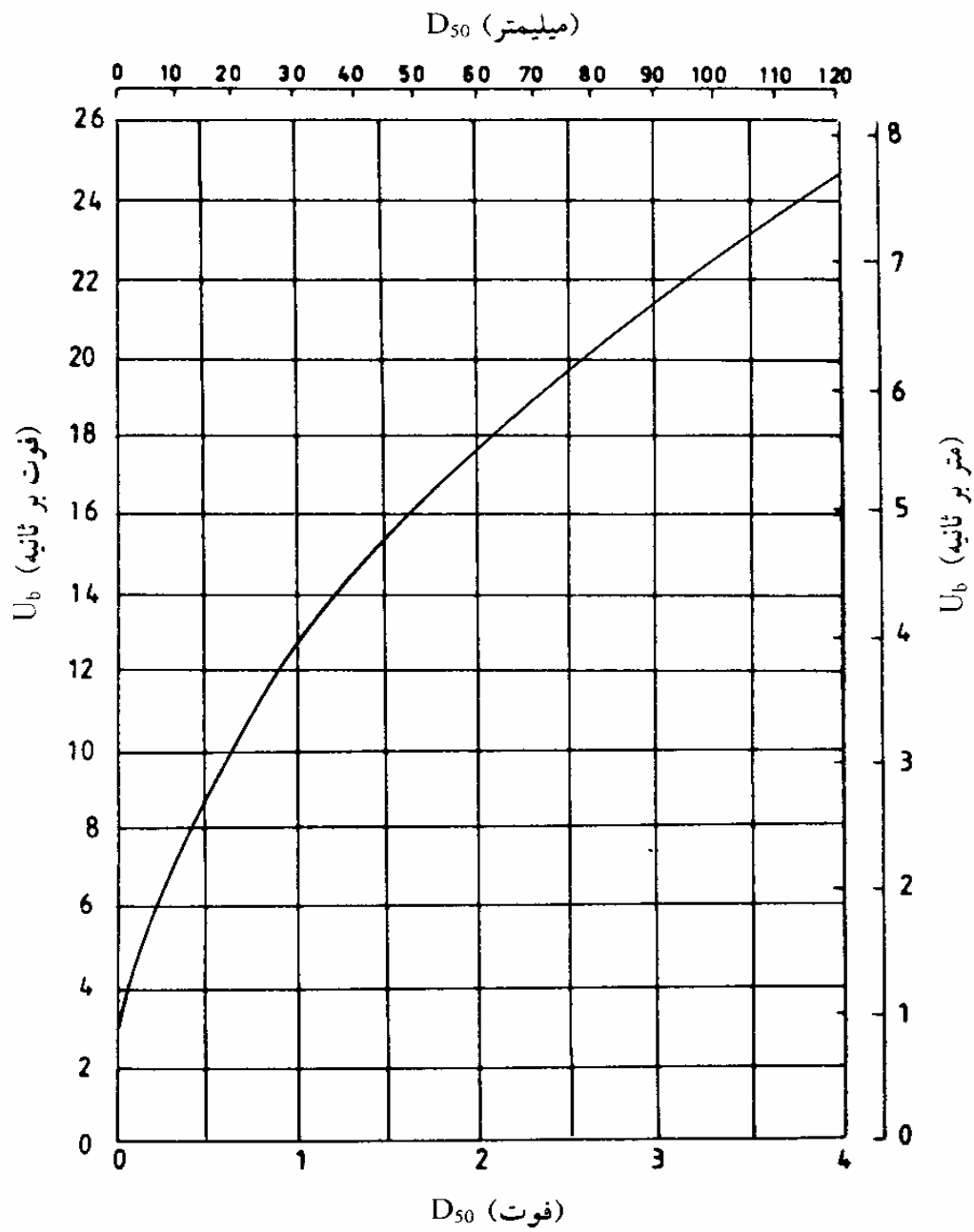
$$D_{50} = 1/003 \frac{V_1^{2/198} a^{0/143} Y_1^{-0/242}}{\Delta^{1/099} g^{1/099}} \quad \text{متر} \quad (2-8)$$

$$\Delta = (G_s - 1)$$

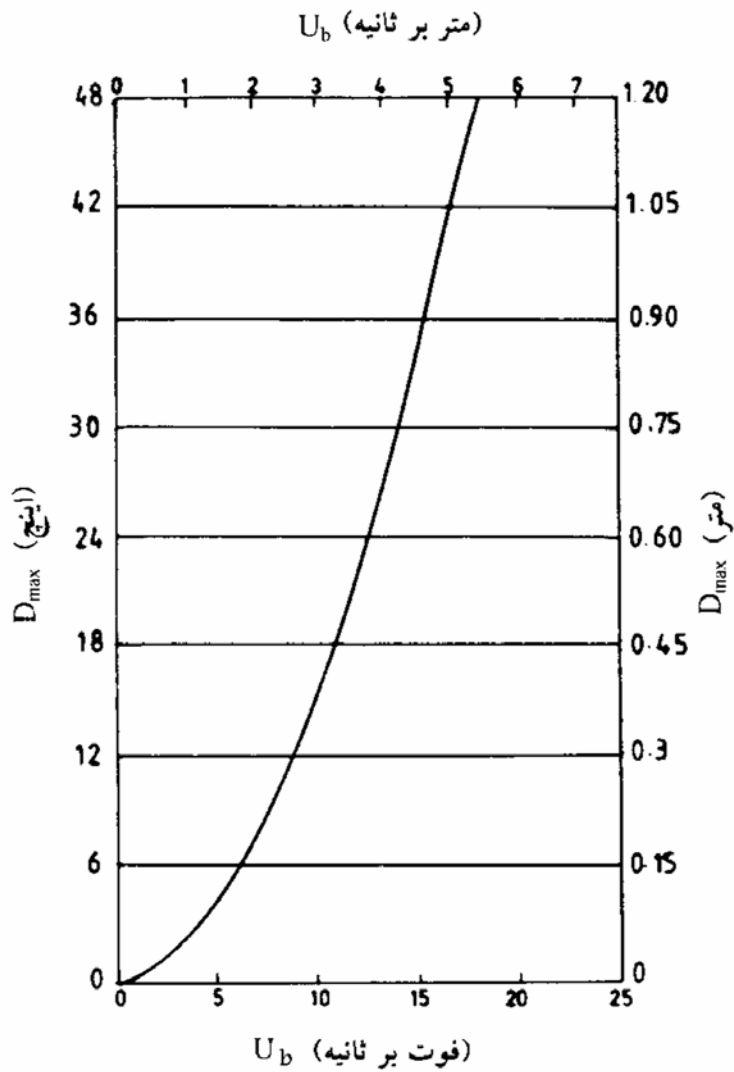
در رابطه فوق Δ اختلاف چگالی سنگ (G_s) با آب است و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده اند.

1 - U.S.B.P.R (U.S. Bureau of Public Roads)

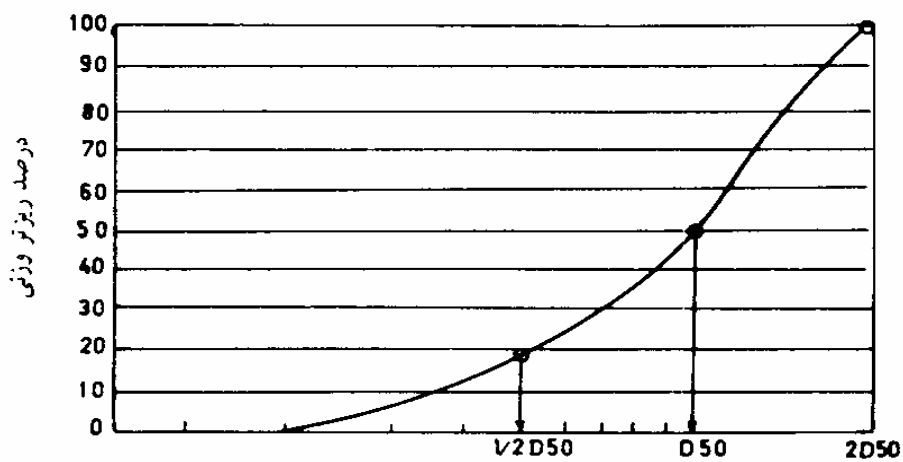
2 - U.S.B.R. (U.S. Bureau of Reclamation)



شکل ۸-۳- نمودار تغییرات D_{50} بر حسب U_b در تعیین مشخصات لایه سنگچین اطراف پایه‌های پل



شکل ۸-۴- نمودار تغییرات حداکثر اندازه سنگ بر حسب سرعت جریان در مجاورت بستر



شکل ۸-۵- نمودار تغییرات دانه بندی پیشنهادی برای لایه سنگچین

منابع و مأخذ

- 1- Chabert, J. & Engeldinger, P., (1956), "Study of scour around bridge piers", In French.
- 2- Chadwick A., & Morfet.J., (1993) ,"Hydraulics in Civil and Environmental Engineering" , Clapman & Hall Inc, London.
- 3- Chow, V.T., (1967), "Handbook of Applied Hydrology", Mc Graw Hill Book Co., New York.
- 4- Chow V.T., (1988), "Open Channel Hydraulics", Mc Graw – Hill Book Co., New York.
- 5- Garde, R.J., & K.G.Ranga Raju, (1977),"Mechanics of Sediment Transportation" Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- 6- Henderson F.M., (1966), "Open Channel Flow", Mac Millan Pub. Co., U.S.A.
- 7- Jansen P.P. et al., (1983), "Principles of River Engineering", Pitman Pub. Co., England.
- 8- Lagasse . et al., (1977) "Bridge Scour & Stream Instability Counter Measures", FHWA – HI – 97030.
- 9- Przedwojski, B. et al., (1995),"River Training Techniques",A.A. Balkema, The Netherlands.
- 10- Shen, W.H., (1971), "River Mechanics" , Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- 11- Simons D.B. & Senturk, F., (1992), "Sediment Transport Technology" Book Crafters, Inc., U.S.A.
- 12- Raudkivi, A.J., "1976" , "Loose Boundary au Hydraulics" , Pergamon Press, UK.
- 13- Raynov.s, et al., (1986), "River Response to Hydraulic Structurs", UNESCO, Paris.
- 14- Richardson E.V., et al., (1983) "Highways in the River Environment", U.S. Department of Transportation.
- 15- Richardson, S.R. Davis (2001) "Evaluating Scour at Bridges" 4 th – ed FHWA.
- 16- Vittal, N., V.C.Kothyori & M.Haghighat, (1994), "Clean – Water scour around bridge pier group", J. Hyd. Eng. 120(11) : 130, - 1318.
- 17- Yoon T.H. et al., (1995), "Design of riprap for scour propetion around bridge piers", Hydro 2000, IAHR, 1:105-110.

۱۸- تأثیر فاصله پایه‌های پل بر عمق آبشستگی پایه پل، دکتر جواد فرهودی، مهندس محمدحسین ناصری
معدلی، وزارت نیرو – معاونت امور آب، دی ماه ۱۳۷۵.

۱۹- بررسی مسئله آبشستگی و نحوه جلوگیری از آن در اطراف پایه‌های مستطیل شکل پل‌ها، دکتر امیررضا
زراتی، وزارت نیرو، معاونت امور آب، دی ماه ۱۳۷۵.

In the Name of God
Islamic Republic of Iran
Ministry of Energy
Iran Water Resources Management CO.
Deputy of Research
Office of Standard and Technical Criteria

Guideline for Scour Determination and Protection Schemes at Bridge Piles

این نشریه

اصول و مبانی حاکم بر پدیده فرسایش و عوامل مختلف هیدرولیکی تأثیرگذار بر ایجاد چاله فرسایشی در محدوده پایه پلها را مورد بررسی قرار می‌دهد. به منظور تعیین کمی عمق چاله فرسایش و استفاده از آن در عرصه‌های کاربردی معادلات و الگوهای ارائه شده توسط متخصصین با درج مثالهای تجربی ارائه شده است. بخش پایانی نشریه به راهکارهای مهار فرسایش و توصیه‌های لازم برای حفاظت پایه‌های پل اختصاص دارد.

معاونت امور پشتیبانی
مرکز مدارک علمی و انتشارات

964 - 425 - 397 - 3



9 789644 253973