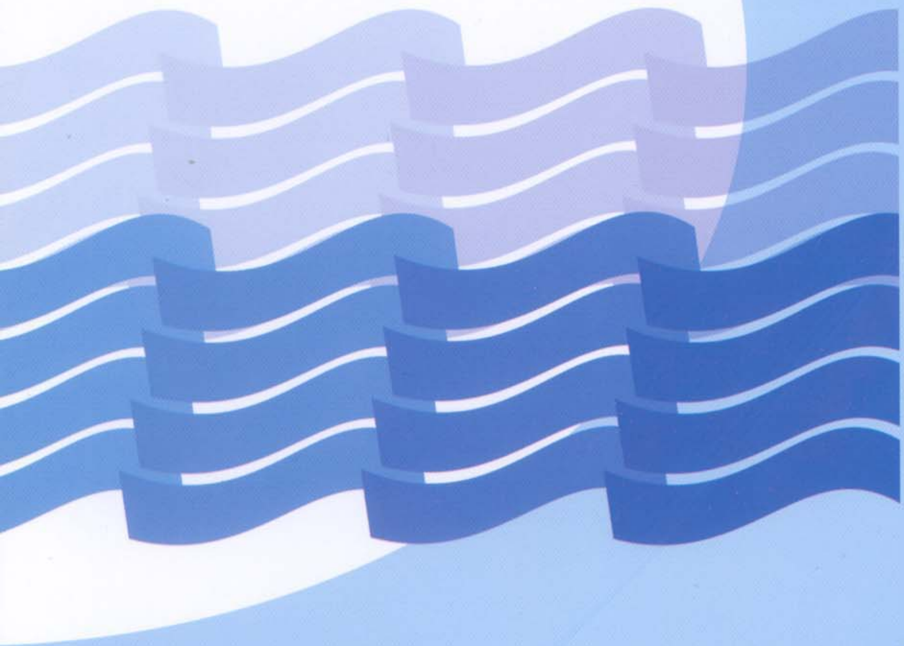
وزارت نیرو
شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران

استاندارد مهندسی آب

راهنمای تعیین آبشستگی در سازه های مهم هیدرولیکی



نشریه شماره ۱۳۶ - ن

مرداد ماه ۱۳۸۰

پيش‌گفتار

امروزه نقش و اهميت ضوابط، معيارها و استانداردها و آثار اقتصادي ناشي از به كارگيري مناسب و مستمر آنها در پيشرفت جوامع، تهيه و كاربرد آنها را ضروري و اجتناب ناپذير ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهيه ضوابط، معيارها و استانداردها در هر زمينه به مجامع فني - تخصصي واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرايط اقليمي و محدوديت منابع آب در ايران، تهيه استاندارد در بخش آب از اهميت ويژه اي برخوردار بوده و از اين رو دفتر استانداردها و معيارهاي فني شركت مديريت منابع آب ايران در جهت نيل به اين هدف، با مشخص نمودن رسته هاي اصلي مهندسي آب اقدام به تشكيل مجامع علمي – تخصصي با عنوان كميته‌هاي تخصصي نموده كه نظارت بر تهيه اين استانداردها را به عهده دارند.

استانداردهاي مهندسي آب با در نظر داشتن موارد زير تهيه و تدوين مي گردد :

- استفاده از تخصص و تجارب كارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومي و خصوصي
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهاي بين المللي
- بهره گيري از تجارب دستگاه‌هاي اجرايي، سازمان‌ها، نهادها، واحدهاي صنعتي، واحدهاي مطالعه، طراحي و ساخت
- ايجاد هماهنگي در مراحل تهيه، اجرا، بهره برداري و ارزشيابي طرح‌ها
- پرهيز از دوباره كاري‌ها و اتلاف منابع مالي و غيرمالي كشور
- توجه به اصول و موازين مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقيقات صنعتي ايران و ساير مؤسسات معتبر تهيه كننده استاندارد

آگاهي از نظرات كارشناسان و صاحب‌نظراني كه فعاليت آنها به نوعي در ارتباط با تهيه استانداردهاي مهندسي آب مي باشد موجب امتنان خواهد بود.

تركيب اعضاي كميته

اسامي اعضاي كميته فني شماره ١٤-١ (رسوب) كه در تهيه نشريه حاضر مشاركت داشته‌اند به ترتيب حروف الفباء به شرح زير مي‌باشد:

خانم زهرا ايزدپناه	دانشگاه شهيد چمران	فوق‌ليسانس آبياري و آباداني
آقاي فيروز بهادري	دانشگاه خواجه نصيرالدين طوسي	فوق‌ليسانس منابع آب
آقاي سيد جمال‌الدين پرورده	سازمان آب تهران	فوق‌ليسانس هيدرولوژي
آقاي جمال محمدولي ساماني	دانشگاه تربيت مدرس	دكتراي هيدروليك
خانم كياندخت كباري	طرح تهيه استانداردهاي مهندسي آب كشور	ليسانس راه و ساختمان

اين نشريه در كميته تخصصي مهندسي رودخانه و سواحل بررسي و براي استفاده در مجموعه وزارت نيرو به تأييد رسيده است. اعضاي كميته تخصصي مهندسي رودخانه و سواحل به شرح زير مي‌باشد:

آقاي محمدابراهيم بني‌حبيب	شركت جهاد تحقيقات آب و آبخيزداري	دكتراي عمران - مهندسي آب
آقاي علي پاك	دانشگاه صنعتي شريف	دكتراي ژئوتكنيك
آقاي ابراهيم جباري	دانشگاه علم و صنعت ايران	دكتراي هيدروليك
آقاي محمدحسن چيتي	شركت آب و نيروي ايران	فوق ليسانس سازه‌هاي آبي
آقاي مهدي شفيعي‌فر	دانشگاه تربيت مدرس	دكتراي سازه‌هاي دريايي
آقاي جبار وطن فدا	دفتر حفاظت و مهندسي رودخانه‌ها و سواحل و كنترل سيلاب	ليسانس عمران

فهرست مطالب

۱- کليات

وقتي که در اثر عبور جريان‌هاي با سطح آزاد ذرات تشکيل دهنده بستر تحت تأثير برآيند نيروهاي مؤثر هيدروليکي از محل خود برداشته شده و در فاصله دورتري رسوب مي‌کند، گفته مي‌شود که فرسايش رخ داده است. آبشستگي يکي از موارد مهمي است که در زمينه علم هيدروليك و هيدروليك رسوب وجود دارد. مکانيسم اين پديده طوري است که قبل از آنکه سازه در اثر نيروهاي مخرب سيل منهدم گردد در معرض خطرات ناشي از فرسايش اطراف پي خود قرار مي‌گيرد.

عمق آبشستگي را عمق ناشي از فرسايش نسبت به تراز اوليه مي‌دانند که البته در بررسي‌هاي آبشستگي و اقدامات حفاظتي حداکثر عمق آبشستگي را مدنظر قرار مي‌دهند. باتوجه به مکانيسم عمل آبشستگي در مکان‌هاي مختلف، آن را به دو بخش تقسيم مي‌کنند :

- آبشستگي موضعي در اثر تنگ شدگي مقطع[1]
- آبشستگي موضعي[2] در اطراف سازه‌ها

آبشستگي نوع اول در مکان‌هايي که سرعت جريان افزايش مي‌يابد رخ مي‌دهد، مانند کاهش مقطع رودخانه در محل پل‌ها. در اين حالت افزايش سرعت سبب افزايش تنش در بستر و کنده شدن ذرات بستر مي‌شود. اين عمل تا زماني ادامه مي‌يابد که سرانجام تنش بحراني حرکت ذره کمتر شده و ظرفيت حمل رسوب در مقطع برابر ظرفيت حمل رسوب در بالادست سازه گردد.

آبشستگي نوع دوم در اثر افزايش شدت تلاطم موضعي ناشي از تغيير شرايط جريان در پايين‌دست سازه‌هاي هيدروليکي مانند حوضچه هاي آرامش، سرريز آزاد، باکت پرتابي و همچنين در محل پايه هاي پل، پيچ رودخانه‌ها و به طور کلي هرجا که شدت تلاطم بطور موضعي افزايش يابد به وجود مي‌آيد.

در اين راهنما، آبشستگي نوع دوم موردتوجه قرار مي‌گيرد.

۲- آبشستگي موضعي

بخشي از انواع مختلف آبشستگي موضعي با ذکر جزئيات مهم در ذيل مورد توجه قرار مي‌گيرد.

۲-۱ آبشستگي در اثر جت آب

ورود جريان آب با سرعت زياد و سطح مقطع معين بداخل سيالي ديگر که مي‌تواند همان سيال مذکور يا سيال ديگري باشد را جت مي‌گويند.

جريان خروجي از بسياري از سازه‌هاي هيدروليکي نظير سرريز سدها به صورت جت است که معمولاً سرعت آنها بقدري زياد است که در صورت عدم مقاومت بستر، حفره بزرگي در پايين‌دست سازه ايجاد خواهد شد، و رفته رفته ممکن است در اثر تخريب‌هاي بعدي و تغيير در برآيند نيروهاي وارده به سازه، موجب سرنگوني آن گردد.

---

[1] - Contraction Scour

[2] - Local Scour

۲-۱-۱ *تقسيم بندي جت ها*

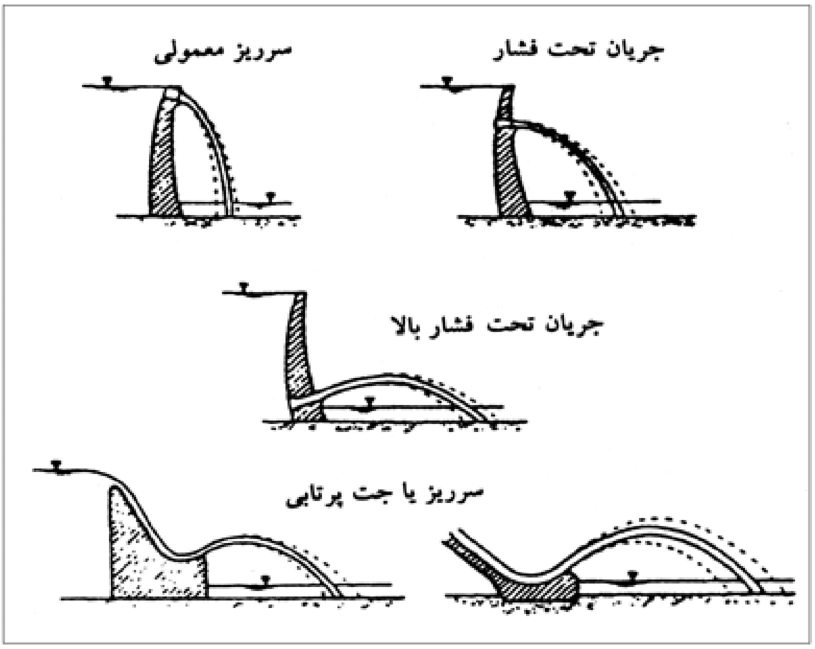
جت‌ها براساس ويژگي‌هايشان به انواع مختلفي تقسيم مي‌شوند:

- جت قائم يا افقي
- جت دو بعدي يا سه بعدي
- جت آزاد يا مستغرق
- انواع جت‌هاي پرتابي

جت قائم جتي است که با بستر زاويه قائمه مي‌سازد. در اين حالت، جت قدرت تخريبي زيادتري دارد و ذرات را سريعاً جابجا نموده و در همان لحظات اول قسمت اعظم حفره آبشستگي نهايي تشکيل مي‌شود. معمولاً در پايين‌دست سازه‌هاي هيدروليکي پاياب وجود دارد. لذا جت آب به صورت مستغرق عمل خواهد نمود. از انواع جت‌هاي پرتابي مي‌توان جت ناشي از سرريز سقوط آزاد از روي تاج سدها، جت پرتابي از وسط ديواره سد و جت پرتابي از سرريزهاي سرسره‌اي را نام برد.

۲-۱-۲ *آبشستگي در محل فرود جت‌هاي پرتابي*

همانطوري که مي‌دانيم جريان خروجي از بعضي سدها به صورت جت پرتابي است و اين نوع جت در محل فرود خود باعث فرسايش مي‌شود (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱- جت‌هاي پرتابي [۱]

۲-۱-۳ *تاريخچه تحقيق و طراحي*

در اين مورد، مطالعات زيادي توسط محققين نظير ايگنبرگر[1](۱۹٤٤)، هوسلر[2](۱۹۸۳)، ويتاكر و شليس[3] (۱۹۸٤) و محققين ديگر انجام گرفته است[۱]. عوامل مؤثردر اين نوع آبشستگي عبارتند از:

- سرعت پرتاب
- دبي جريان
- عمق سقوط
- مصالح بستر

روش توصيه شده براي طراحي براساس روش شوكليچ[4]، رابطه ذيل است:

$$y_s + y_{\circ} = ۲/۶۲\ V^{۰/۴} \frac{q^{۰/۵۷}}{d_{۵۰}^{۰/۳۲}} \tag{۱-۲}$$

كه در آن :

V = مؤلفه عمودي سرعت جت در محل برخورد به سطح آب

q = دبي جريان جت در واحد عرض برحسب مترمربع بر ثانيه

$d_{۵۰}$ = قطر ذرات بستر (۵۰ درصد درشت‌تر) برحسب ميليمتر

y_o = عمق آب در پاياب برحسب متر

y_s = عمق آبشستگي برحسب متر

مؤلفه عمودي سرعت و محل فرود جت آب از روابط زير حساب مي‌شوند (شكل ۲-۲):

$$V = \sqrt{V_{\circ}^{۲} \sin^{۲} \phi + ۲g\Delta H} \tag{۲-۲}$$

$$L = \frac{V_{\circ}}{g} \cos\theta \,(V + V_{\circ} \sin\varphi) \tag{۳-۲}$$

اگر جت آب ناشي از جريان از روي سرريز باشد داريم :

$$V = \sqrt{۲g\Delta H} \tag{٤-۲}$$

$$L = \sqrt{۲h\Delta H} \tag{۵-۲}$$

$$q = ch^{۱/۵} \tag{٦-۲}$$

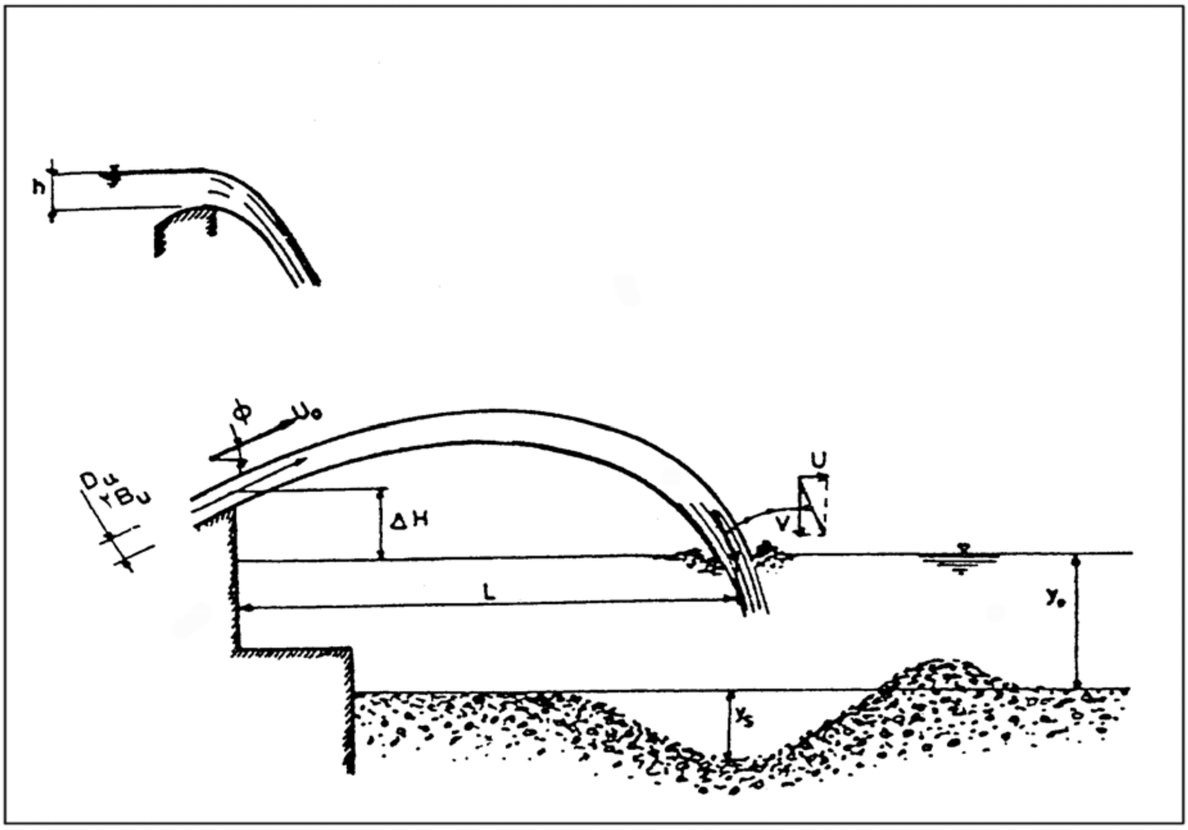
---

[1] - Eggenberger

[2] - Hausler

[3] - Whittaker and Schleiss

[4] - Schoklitch



شکل ۲-۲- آبشستگي در محل جت پرتابي

در اين روابط :

V_o = سرعت اوليه جت برحسب متر بر ثانيه

L = طول نقطه فرود به سطح آب برحسب متر

h = ضخامت تيغه آب روي سرريز برحسب متر

ϕ = زاويه پرتاب برحسب درجه

θ = زاويه سرعت برخورد جت با خط عمود در نقطه سطح آب پايين‌دست

c = ضريب سرريز که از روابط هيدروليکي محاسبه مي‌شود.

در رابطه (۲-۱) مؤلفه افقي سرعت وجود ندارد و تأثيرات آن در دبي q نهفته مي‌باشد. روش محاسبه عمق فرسايش براي جت‌هاي پرتابي همان است که براي جت‌هاي مستغرق افقي و عمودي به کار مي‌رود با اين شرط که سرعت متوسط و ابعاد جت پرتابي در محل برخورد به سطح آب محاسبه شده و به عنوان V_o و D_u و يا ۲Bu، ملاك عمل قرار مي‌گيرند که ۲Bu ارتفاع خروج جت صفحه‌اي برحسب متر است.

جت‌هاي پرتابي مي‌توانند انواع مختلفي داشته باشند که عبارتند از [۱] :

- جت‌هاي ناشي از سرريز سقوط آزاد از روي تاج سد

براي كاهش هزينه‌ها در ساخت سرريز سدهاي قوسي از اين جت‌ها استفاده مي‌شود. در اين نوع سرريزها، آب در فاصله نزديكتري از سد به بستر برخورد مي‌كند.

- جت‌هاي پرتابي از وسط ديواره سد

به لحاظ مسائل امنيتي، نظير تغيير در برآيند نيروهاي وارده بر سد، ترجيح داده مي‌شود كه جت در فاصله دورتري از بدنه سد پرتاب شود. در اين صورت، از دريچه‌هاي تحت فشار در وسط يا تا اندازه مناسبي در زير تاج سد، استفاده مي‌شود.

- جت‌هاي پرتابي از ارتفاع كمي بالاتر از سطح آب پايين‌دست

در اين حالت، جريان سرريز شده از طريق كانال يا سرسره‌اي تا نزديك سطح آب پاياب هدايت شده و در نهايت به وسيله يك جام پرتاب مي‌شود. بنابراين، با هدايت جت تا نزديك پاياب، سرعت در جام (باكت) به حداكثر خود مي‌رسد و جت در فاصله دورتري از سد پرتاب مي‌شود. اين نوع سرريزها، به خاطر استفاده از بتن و پايداري سد، معمولاً در سدهاي وزني به كار مي‌روند ولي هزينه ساخت آنها بالاست.

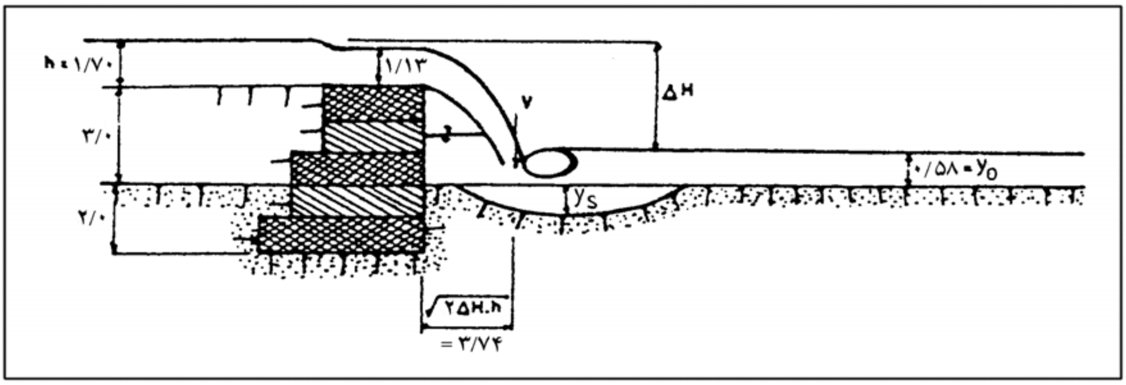
- جت‌هاي پرتابي از سرريزهاي سرسره‌اي

در سدهاي خاكي به لحاظ ضخامت بدنه سد بايد سرريز به گونه‌اي ساخته شود كه آب را در فاصله مناسبي دور از بدنه سد تخليه كند. لذا از ارتفاعات كنار سد براي ساختن سرريز استفاده مي‌شود و آب به وسيله يك سرسره طولاني به پايين‌دست منتقل مي‌گردد.

براي درك فرمول‌هاي ارائه شده، به ذكر مثالي در اين رابطه مي پردازيم.

مثال ۲-۱ :

در عرض رودخانه‌اي با استفاده از گابيون سرريزي ساخته شده است. پشت سرريز در اثر رسوبات به مرور پر مي‌شود. ابعاد هيدروليكي مطابق شكل زير است. در مواد بستر d_{90} = ۱۰۰m است ميزان آبشستگي را محاسبه كنيد.



شكل ۲-۳

$$q = ch^{1/5} = 0/4\sqrt{2g}\ \ (1/7)^{1/5} = 4\,m^2/sec$$
$$\Delta H = 3/0 + 1/7 - 0/58 = 4/12\,m$$
$$V = \sqrt{2g\Delta H}\ =\ \sqrt{2y\,(4/14}\ = 8/99\,m/sec$$
$$y_s + y_\circ = 2/62V^{0/4}\,q^{0/57}\,/\,d_{90}^{0/32} = 3/18\,m$$
$$y_s = 3/18 - 0/58 = 2/6m$$

۲-۲ آبشستگي با جريان افقي پايين‌دست كف بند افقي[1] [۵]

در يك كف بند افقي، جريان آب مي‌تواند توأم با يك پرش هيدروليكي يا بدون آن باشد. لذا آبشستگي موضعي در پايين‌دست اين سازه براي دو حالت مختلف "از طريق آزمايش" تعيين شده است. يعني يك بار با پرش هيدروليكي و بار ديگر بدون پرش. اين آزمايش‌ها با سطوح مختلف اغتشاش (در ادامه سطح اغتشاش معرفي خواهد شد) انجام شده است. هدف از انجام اين آزمايش‌ها ياري جستن از نتايج حاصله در طراحي روش‌هاي حفاظتي در مقابل آبشستگي است.

آبشستگي موضعي هم در پايين‌دست و هم در بالادست سازه‌هاي هيدروليكي نظير سرريزها، پل‌ها، تنظيم‌كننده‌هاي جريان و سازه‌هاي اندازه‌گيري جريان اتفاق مي‌افتد. جريان در بالادست اين سازه‌ها غالباً زير بحراني است و بعد از يك مقطع كنترل به حالت فوق بحراني تبديل مي‌شود. آبشستگي موضعي در سازه‌هاي هيدروليكي ديگر نظير سيفون‌هاي معكوس، مجاري انتقال آب و كالورت‌ها نيز مشاهده مي‌شود و اين در حالتي است كه پرش هيدروليكي نيز وجود ندارد. در اين سازه‌ها، مقطع جريان نرمال به لحاظ مسائل اقتصادي منقبض ساخته مي‌شود. اگرچه سرتاسر جريان در حالت زيربحراني است اما افزايش سرعت جريان در مقطع منقبض شده به نحو زيادي قابل مشاهده است. تحقيق انجام شده در مورد محاسبه آبشستگي موضعي در پايين‌دست يك كف بند افقي جريان مي‌تواند داراي پرش هيدروليكي و يا فاقد آن باشد. آبشستگي تحت تأثير مشخصات كانال، جريان و مشخصات رسوب و هندسه سازه شكل مي‌گيرد. در اينجا اندازه ذرات رسوب و دانه‌بندي آنها ثابت نگهداشته شده است. طول كف‌بندها را مختلف در نظر گرفته و براي هر طول، آبشستگي براي دو حالت مختلف: جريان زير بحراني بعد از كف بند كه در جلوي يك پرش هيدروليكي تشكيل مي‌شود و جريان زيربحراني بدون انجام پرش بررسي مي‌شود. دبي جريان، عمق جريان و عدد فرود جريان در پايين‌دست كف بند ثابت نگهداشته مي‌شوند. جرياني كه با پرش هيدروليكي است اغتشاش زيادي دارد و با جرياني كه فاقد پرش هيدروليكي است و داراي اغتشاش نرمالي در حدود ۳ تا ۵ درصد است مقايسه مي‌شود. نتايج حاصل از اين بررسي براي تخمين حداكثر عمق آبشستگي، موقعيت آن و حجم مواد شسته شده مورد استفاده قرار مي‌گيرد. چنين اطلاعاتي براي طراحي روشهاي حفاظتي براي كف بندهاي انعطاف پذير، آب بندها، اعماق فونداسيون‌ها و غيره به كار مي‌رود [۵].

۲-۲-۱ تاريخچه تحقيق و طراحي

آبشستگي موضعي در اطراف پايه پل‌ها طي مطالعات زيادي بررسي شده و فرمول‌هاي زيادي براي پيش‌بيني آن ارائه شده است. تحقيقات وسيعي نيز در مورد آبشستگي در پايين‌دست كالورت‌ها، دهانه هاي آبگير و خروجي لوله‌ها انجام شده است. اما

---

[1] - Level Apron

مطالعات و تحقيقات كمي در مورد آبشستگي در پايين‌دست كف بندها در دسترس مي‌باشد. فرهودي و اسميت[1] در سال ۱۹۸۲ آبشستگي در پايين‌دست كف بند را همراه با پرش هيدروليكي مورد مطالعه قرار داده اند. هدف از انجام اين تحقيق، معين كردن حداكثر عمق آبشستگي، شبيه سازي حفره‌هاي آبشستگي و زمان لازم براي گسترش و توسعه آبشستگي بوده است. پارامترهاي مورد توجه كه حاكم بر آبشستگي بودند عبارتند از :

- نوع مصالح بستر و توزيع اندازه ذرات
- سرعت جريان
- زاويه و نوع جت جريان
- عمق پاياب
- نوع ضمائم به كار رفته

بيشتر مطالعات، عمق آبشستگي را به صورت تابعي از شدت جريان (q)، اختلاف تراز سطح آب در بالادست و پايين‌دست سازه هيدروليكي (ΔH)، اندازه ذرات رسوب (d_{90}) و عمق پاياب (y_o) بيان مي‌كنند. هيچ يك از مطالعات انجام شده تأثير انرژي جنبشي جريان رسوب و سطح اغتشاش جريان به هنگام ترك كف بند را در نظر نگرفته‌اند. و لذا امكان طراحي يك مستهلك كننده انرژي كه بتوان با آن با اطمينان كامل انرژي را براي تمامي جريان‌ها و اعماق جريان پايين‌دست وجود نخواهد داشت. ميزان انرژي جنبشي در پايين‌دست حوضچه آرامش به شرايط جريان بستگي دارد. چنين انرژي سبب مي‌شود كه جريان غيريكنواخت شود و از حالت طبيعي خود بيرون آيد و توزيع سرعت در پلان‌هاي قائم و افقي غيريكنواخت گردد. لذا، سبب آبشستگي موضعي در پايين‌دست مي‌شود.

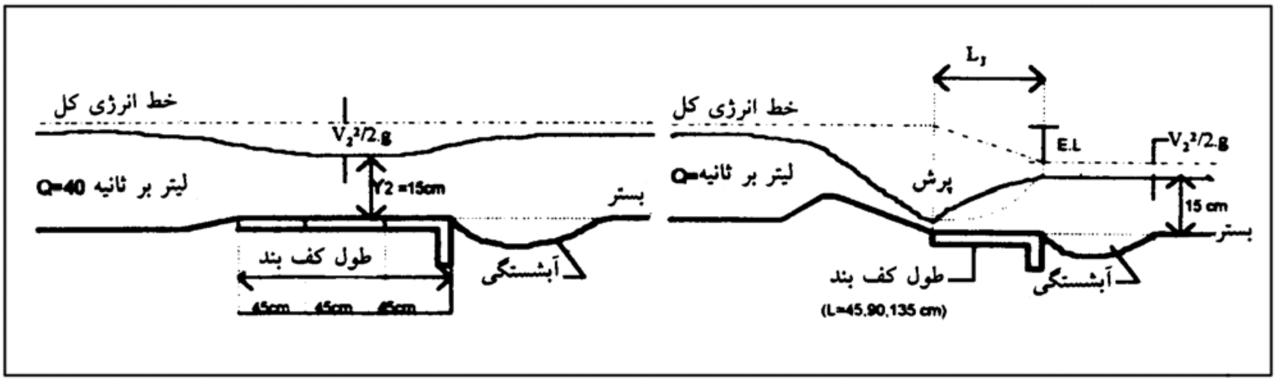
در فرآيند طراحي، طول كف بند در يك حوضچه آرامش بين ۳ تا ٦ برابر y_2 (عمق بعد از پرش) در نظر گرفته مي‌شود، (بستگي به عدد فرود قبل از پرش و نوع حوضچه دارد). اما ثابت شده است كه از بين رفتن كامل اغتشاش در سطح نرمال (۵% -۳) در طول‌هاي بلندتر كف بند ($22y_2$- ۱۵) صورت مي‌گيرد. جريان‌هايي كه داراي اغتشاش زيادي هستند سبب آبشستگي موضعي در زير حوضچه آرامش مي‌شوند. براي مواقعي كه جريان با سرعت زيادي در يك فلوم، سازه‌اي را ترك مي‌كند، مطالعات خيلي كمي در مورد آبشستگي موضعي در پايين‌دست سازه وجود دارد. اين گونه سازه‌ها توسط دو تبديل (بازشدگي) به مقطع جريان نرمال متصل مي‌شوند و معمولاً بستر كانال در محل رسيدن به تبديل به طور كامل يا جزيي سنگ فرش مي‌شود. در اين مطالعه، حداكثر عمق آبشستگي، موقعيت آن و حجم مواد شسته شده در پايين‌دست كف بند افقي تحت تأثير دو جريان مختلف بررسي گرديد.

- جريان زير بحراني با سطح اغتشاش زياد مانند آنچه كه در انتهاي يك حوضچه آرامش با پرش هيدروليكي همراه است.
- جريان زير بحراني با سطح اغتشاش كم همانند آنچه كه در نوعي از مجاري بدون هيچ پرش هيدروليكي صورت مي‌گيرد.

شكل‌هاي (۲-٤) و (۲-۵) به طور شماتيك كف بند با پرش و بدون پرش را نشان مي‌دهند.

---

[1] - Farhoudiق Smith

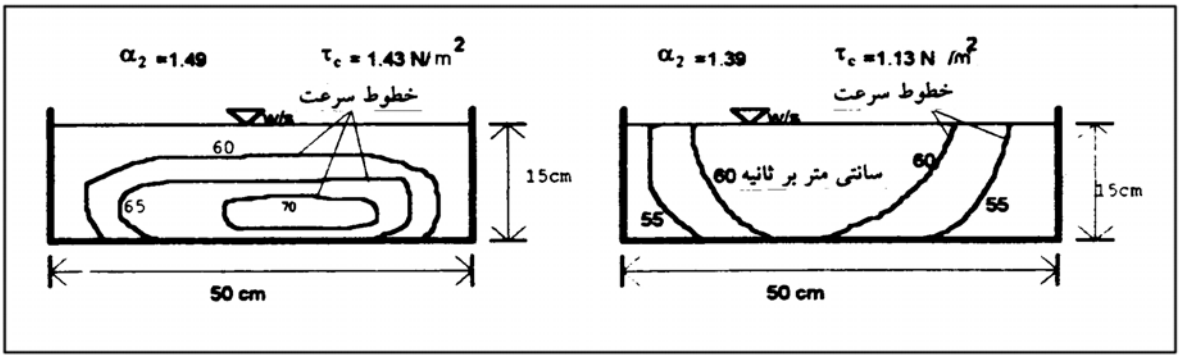


شکل ۲-٤- کف‌بند با پرش هیدرولیکي

شکل ۲-۵- کف‌بند بدون پرش

۲-۲-۲ *نتایج*

خلاصه نتایج حاصله در جدول (۲-۱) آورده شده است. در هریك از آزمایش‌ها اجازه داده شد تا حداکثر عمق آبشستگي تثبیت گردد. پروفیل توزیع سرعت و پروفیل آبشستگي در هر حالت اندازه‌گیري شدند. تیپ پروفیل‌هاي توزیع سرعت براي آزمایش ۱ و ٤ جدول (۲-۱) در شکل‌هاي (۲-٦) و (۲-۷) ارائه داده شده اند.



شکل ۲-٦- توزیع سرعت (بدون پرش)

Y = 15 cm

شکل ۲-۷- توزیع سرعت (با پرش)

Y = 15 c

α_2 ضریب تصحیح انرژي جنبشي و تنش برشي τ_c در انتهاي خروجي کف بند با اندازه‌گیري توزیع سرعت مشخص شدند که به ترتیب در ستون‌هاي ۵ و ٦ جدول (۲-۱) داده شده‌اند. ستون ۷ نسبت تنش برشي متوسط به تنش برشي بحراني را که در آن تنش بحراني از دیاگرام شیلدز حساب شده است و مقدار آن N/m^2 ۰/۲۲۱۵ است ارائه مي‌کند. حداکثر عمق آبشستگي (d_{sm}) ، حجم مواد شسته شده (V_s)، موقعیت حداکثر عمق آبشستگي از انتهاي کف بند (L_{sm}) و کل آبشستگي (L_{st}) به ترتیب در ستون‌هاي ۸ ، ۹ ، ۱۰ و ۱۱ آورده شده اند و در شکل‌هاي (۲-۸) و (۲-۹) نشان داده شده اند. ضریب تصحیح انرژي جنبشي (α_2) جریان رسوبي را به هنگام ترك کف بند به دست مي‌دهد و به وسیله منحني هاي هم سرعت محاسبه مي‌شود.

تنش برشي متوسط با استفاده از معادله کارمن - پراندل[1] محاسبه مي‌شود :

$$\frac{u}{u_*}=5/75\log(\frac{yu_*}{\upsilon})+4/5 \qquad (۷-۲)$$

حجم مواد شسته شده از روي منحني هاي آبشستگي محاسبه مي‌شود.

جدول ۲-۱- خلاصه نتايج آزمايش آبشستگي در کف‌بند افقي

شماره آزمايش (۱)	طول کف بند (cm) (۲)	Q (lps) (۳)	$Y_{۲}$ (cm) (٤)	$\propto_{۲}$ (٥)	τ_o $(N/m^{۲})$ (٦)	τ_o/τ_c (۷)	d_{SM} (cm) (۸)	V_S $(cm^{۳})$ (۹)	L_{SM} (cm) (۱۰)	L_{st} (cm) (۱۱)	توضيحات (۱۲)
۱	٤٥	٤۰	۱٥	۱/۳۸۹۱	۱/۱۳	٥/۱۲	۱۰/٥۷	۳٥۹۰٥	٥٦/۰	۲۲/۳	بدون پرش
۲	۹۰	٤۰	۱٥	۱/۳۳۱۷	۰/۸۷	۳/۹۲	۹/۳۲	۳۰٦۸۸	٤٦/٥	۲٥۲۱	بدون پرش
۳	۱۳٥	٤۰	۱٥	۱/۲٥۹۸	۰/٦۱	۲/۷٤	۸/۱٦	۲۳۷۹٥	۳۷۰	۱۷۸۲	بدون پرش
٤	٤٥	٤۰	۱٥	۱/٤۸۷۹	۱/٤۳	٦/٤٥	۱۳/٥٤	٤۷٥۲۸	٤۷/۰	۲۰۰/۰	بدون پرش
٥	۹۰	٤۰	۱٥	۱/۳۸۹۲	۱/۱٥	٥/۱۰	۱۰/٥٦	۳٦٤۲٥	۳۹/۰	۱۷۳/۱	با پرش
٦	۱۳٥	٤۰	۱٥	۱/۳٤۸۲	۰/۹۳	٤/۲۱	۸/۲٤	۳۲۷٥۰	۳۰/۰	۱۹۷/۸	با پرش
۷	۹۰	٤۰	۲۰	۱/۲۷۷۷	۰/٦۰	۲/۷۰	۹/۷٦	۲٥۷٤۰	۳۸/۰	۱۰۹/۰	با پرش
۸	۹۰	٤۰	۲٥	۱/۱۹۰٥	۰/۲۹	۱/۳۰	٦/۳٤	۱۱۱۸۰	۲٥/۰	۹۲/۰	با پرش

سطح اغتشاش به صورت $\frac{u'^2}{v_2}$ بعد از پرش هيدروليکي تعريف مي‌شود و از معادله کالي[2] محاسبه مي‌شود:

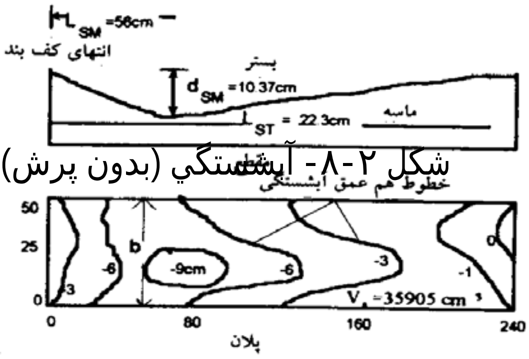
$$Kv=\frac{\sqrt{u'^2}}{v_2}=0/35\frac{x}{y_2}+2/1+7/6\,Fr_1^{-1} \qquad (۸-۲)$$

که $Fr_۱$ عدد فرود جريان قبل از پرش $v_۲$ سرعت متوسط در پايين‌دست و x طول کف‌بند تا ابتداي پرش است.

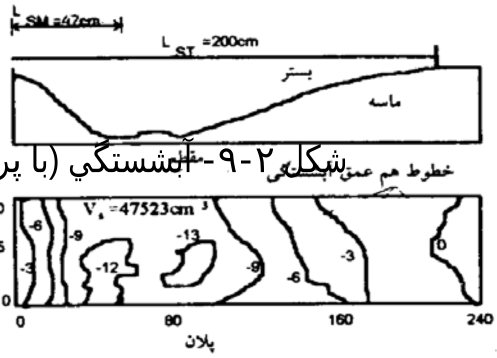
---

1 - Karman - Prandtle

2 - Kali



شکل ۲-۸- آبشستگي (بدون پرش)



شکل ۲-۹- آبشستگي (با پرش)

وقتي که پرش هيدروليکي اتفاق مي‌افتد اعماق آبشستگي و حجم مواد شسته شده افزايش نشان مي‌دهند. بهرحال، اختلاف بين اعماق آبشستگي (با پرش و بدون پرش) با افزايش طول کف بند کاهش مي‌يابد و اين به علت کاهش تدريجي سطح اغتشاش است. موقعيت حداکثر عمق آبشستگي همراه با پرش نسبت به حالت بدون پرش به کف بند نزديکتر است. براي تمام طول‌هاي کف بند، حداکثر عمق و حجم آبشستگي با افزايش α_2 افزايش مي‌يابند. رفتار مشابهي براي عمق و حجم آبشستگي در مقابل $\frac{\tau_o}{\tau_c}$ حکمفرماست، هر دو مقدار با افزايش تنش برشي موضعي افزايش مي‌يابند.

در نهايت، حداکثر عمق آبشستگي در حالت پرش با افزايش سطح اغتشاش (تلاطم) جريان به هنگام ترک حوضچه‌ها نيز افزايش مي‌يابد.

۲-۲-۳ *خلاصه نتايج*

۱- حداکثر عمق آبشستگي $(\frac{d_{SM}}{b})$، حجم مواد شسته شده $(\frac{V_s}{b^2 y_2})$ و موقعيت حداکثر عمق آبشستگي، $(\frac{L_{SM}}{b})$ با افزايش طول کف بند $(\frac{L}{b})$ براي هر دو حالت جريان با و بدون پرش کاهش مي‌يابد.

۲- حجم مواد شسته شده $(\frac{V_s}{b^2 y_2})$ براي حالتي که پرش باشد بيشتر و حداکثر عمق آبشستگي $(\frac{L_{SM}}{b})$ کمتر است.

۳- عمق و حجم آبشستگي با افزايش α_2 افزايش مي‌يابد.

٤- با افزايش تنش برشي، عمق و حجم آبشستگي افزايش مي‌يابد.

٥- حداکثر عمق و حجم آبشستگي با افزايش سطح اغتشاش (تلاطم) جريان به هنگام ترک کف بند در حالت با پرش هيدروليکي افزايش مي‌يابد.

۲-۲-٤ محاسبه آبشستگي در پايين‌دست كف بند افقي

براساس بررسي‌هاي تئوريكي و آزمايشگاهي كه توسط بروزرس[1] (۱۹۶۶ و ۱۹۶۷)، وان درميلن و وينجي[2] انجام گرفته است. رابطه ذيل براي محاسبه حداكثر عمق آبشستگي در زمان t پيشنهاد گرديد.

$$z=\frac{(۳U_m-U_c)^{۱/۶۳۴}h^{۰/۲۴}t^{۰/۳۸}}{۱۰\Delta^{۰/۷}} \tag{۹-۲}$$

كه در آن (شكل ۲-۹) :

$$U+۳\,\delta_{uh}=U_m$$

U = متوسط سرعت قبل از منطقه آبشستگي

h = عمق آب قبل از منطقه آبشستگي

δ_{uh} = انحراف معيار سرعت قبل از منطقه آبشستگي

Uc = سرعت بحراني آستانه حركت

t = زمان به ساعت

$\Delta=(\rho_s-\rho)/\rho$ جرم مخصوص نسبي رسوب

دي گرو و پيلررزيك[3] (۱۹۸۰) رابطه زير را پيشنهاد كردند .

$$Z=\frac{(\alpha U-U_c)^{1/7}\,h^{0/2}\,t^{0/4}}{10\Delta^{0/7}} \tag{۱۰-۲}$$

كه α = ضريب آبشستگي است كه نشان دهنده تأثير شدت تلاطم ناشي از هندسه سازه .

مقدار α معمولاً بين ۵ تا ۱/۵ كه هرچه تلاطم و عدم يكنواختي جريان بيشتر است مقدار α بزرگتر لحاظ مي‌شود.

L_1 از رابطه زير بدست مي‌آيد :

$$L_1=ZCot\,(\frac{0/39\delta_{uh}}{U}+0/13) \tag{۱۱-۲}$$

اما عمق آبشستگي Zo از رابطه ذيل محاسبه مي‌شود.

$$Z_o=\frac{Uh}{Uc}\left[\frac{0/4h_c}{h}\,(1-\frac{U_m}{U})-0/1\right] \tag{۱۲-۲}$$

كه :

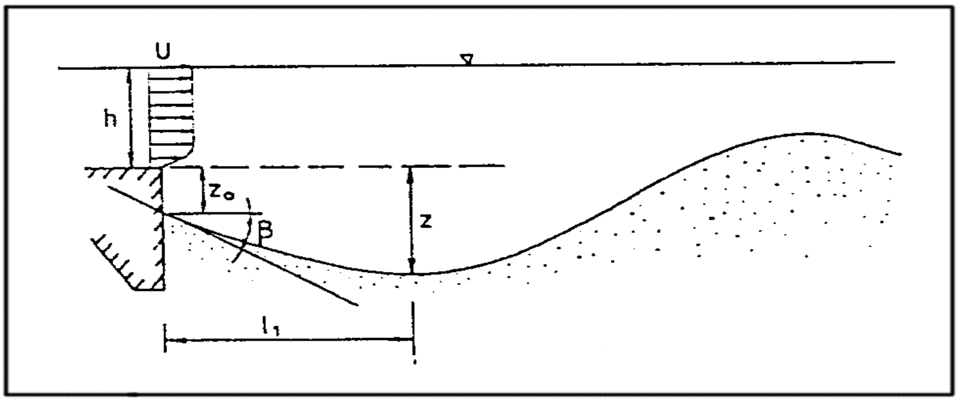
h_c = عمق بحراني

---

[1] - Breusers

[2] - Van der Meulen and vinje

[3] - De Graauw and Pilarczyk



شكل ۲-۱۰- جزئيات آبشستگي در پايين‌دست كف بند

$$\beta = \mathrm{Cot}^{-1}\left[5/5\frac{w}{d50}\left(\frac{\gamma}{\Delta^2 g^2}\right)^{\frac{1}{3}}\left(2/5+\frac{0/75}{\alpha-1/32}\right)\right] \qquad (۱۳\text{-}۲)$$

β = زاويه بين خط مماس شيب بالادست حفر آبشستگي با افق (شكل ۲-۱۰).

ω = سرعت سقوط مواد بستر با قطر d۵۰

γ = لزجت كينماتيك

رابطه ديگري توسط پوپووا[1] (۱۹۸۵) براي ماسه ريز و متوسط ارائه شده و مدلهاي دو بعدي پيچيده‌اي نيز توسط هوفمانز[2] (۱۹۹۲) و هوفمانز و پيلرزيك[3] (۱۹۹۵) پيشنهاد گرديد.[۹]

۲-۳ حفاظت از آبشستگي در پايين‌دست آبشستگي با جريان افقي

سنگ چين به عنوان يك وسيله مؤثر براي حفاظت بستر و سواحل كانال‌ها در برابر فرسايش به كار برده مي‌شود. در بالادست سدهاي انحرافي و در پايين‌دست حوضچه هاي آرامش از سنگ چين استفاده مي‌شود. معمولاً در بالادست به علت پايين بودن سرعت از سنگ چين با اندازه هاي كوچك استفاده مي‌شود ولي به هر حال اندازه سنگ چين بايد طوري باشد كه در زمان‌هاي سيلابي پايدار بماند. در پايين‌دست حوضچه هاي آرامش، سرعت جريان پس از پرش زياد است و ممكن است بستر رودخانه را مورد فرسايش قرار دهد. به علاوه سنگ چين در واقع به عنوان مستهلك كننده انرژي اضافي عمل مي‌كند و سرعت جريان را به سرعت مطمئن كاهش مي‌دهد. در سدهاي مهم جهت بررسي مؤثر بودن حفاظت توسط سنگ چين استفاده از مدل هيدروليكي غيرقابل اجتناب است.

عمق فرسايش يا آبشستگي y_s را مي‌توان با استفاده از رابطه ذيل تخمين زد (روش ليسي[4]) [۸].

---

[1] - Popova

[2] - Hoffmans

[3] - Hoffmans and Pilarczyk

[4] - Lacey

$$y_s = 0/475\left(\frac{Q}{f}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۱۴-۲)$$

چنانچه عرض واقعي جريان مساوي يا بزرگتر از عرض رژيم[1] باشد، در اين صورت مي‌توان از رابطه ذيل استفاده نمود [۸].

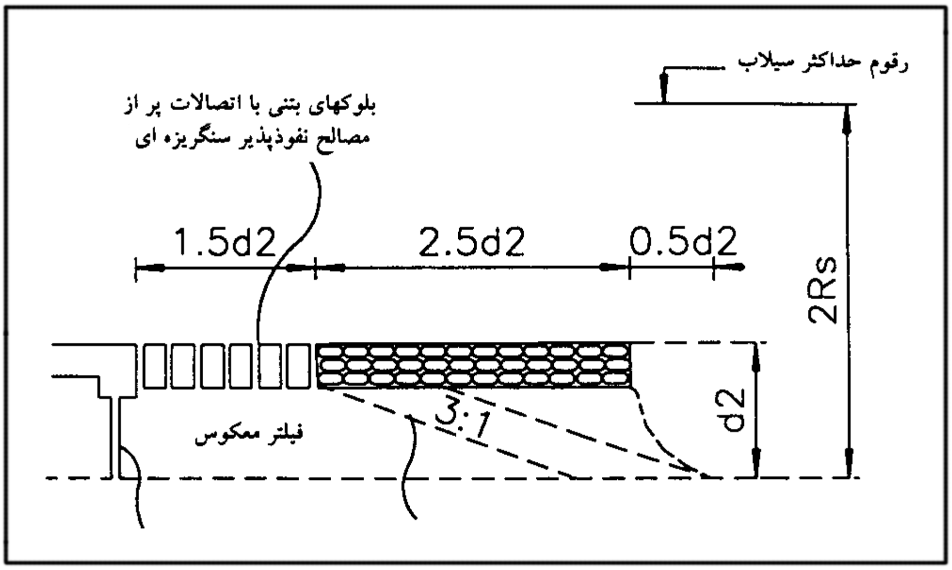
$$y_s = 1/35\left(\frac{q}{f}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۱۵-۲)$$

q، دبي در واحد عرض كانال مي‌باشد. ضريب f ليسي يا ضريب لاي[2] از رابطه ذيل به دست مي‌آيد :

$$f = 1/75\sqrt{d_{50}} \qquad (۱۶-۲)$$

كه d_{50} برحسب ميلي متر است.

براي جلوگيري از خرابي فونداسيون پايين‌دست سد، ديوار آب بند بايد تا عمقي پايين تر از عمق آبشستگي قرار داده شود (به شكل ۲-۱۱ توجه شود).



شكل ۲-۱۱- جزييات پايين‌دست حوضچه آرامش با در نظر گرفتن فرسايش بستر

---

[1] - Regime

[2] - Silt Factor

مثال ۲-۲ :

در محل يك سد انحرافي، دبي طرح برابر با ۱۸۰۰ متر مكعب در ثانيه، عرض رودخانه ۲۰۰ متر، ارتفاع سطح آب و كف رودخانه از سطح مقايسه به ترتيب ۳۰۰ متر و ۲۹۳ متر و ضريب لاي f برابر با واحد است. عمق ديوار آب بند پايين‌دست، اندازه حداقل سنگ‌چين و طول گسترش آن را تعيين كنيد.

حل :

$$y_s = 0/475\left(\frac{1800}{1}\right)^{\frac{1}{3}} = 5/78\,\mathrm{m}$$

۲ R_s = عمق آبشستگي پايين‌دست از سطح جريان آب

= ۲ × ٥/۷۸

= ۱۱/٥٦ m

۳۰۰ − ۱۱/٥٦ = ارتفاع كف نقطه آبشستگي نهايي از سطح مقايسه

= ۲۸۸/٤٤ m

d_2 = ۲۹۳ − ۲۸۸/٤٤   عمق ديوار آب بند از كف رودخانه

= ٤/٥٦ m

d_2 را برابر با ٥ متر در نظر مي‌گيريم.

$$V = \frac{۱۸۰۰}{۲۰۰\times۷}$$ سرعت جريان

= ۱/۲۸٦ m/s

$$d = K\frac{V^۲}{۲g} = ۱/۴\,\frac{(۱/۲۸۶)^۲}{۲\times۹/۸}$$ اندازه حداقل سنگ‌چين [۲]

= ۰/۱۲ m

توضيح اينكه K ضريبي است كه براي جريان معمولي برابر ۱ و براي جريان متلاطم شديد ۱/٤ در نظر گرفته مي‌شود.

طول گسترش سنگچين   = ٤ d_2

= ٤ × ٥

= ۲۰ m

زير سنگ‌چين از صا في (فيلتر) طبق ضوابط طراحي فيلتر استفاده مي‌شود اما بطوركلي سنگ‌چين بايد بر روي يك لايه فيلتر با ضخامت ۲۰۰ – ۱٥۰ ميلي متر قرار گيرد. فيلتر بايد به خوبي دانه بندي شده باشد و حداكثر اندازه آن از ۷٥ ميلي متر تجاوز نكند. ضخامت سنگ‌چين نبايد از ۱/٥ برابر حداكثر اندازه سنگ‌چين كمتر باشد.

۲-٤ آبشستگي در جلوي اپي‌ها

اپي[١] سازه‌اي است که در مجاري روباز نظير کانال‌ها (و در جهت عرضي) براي حفاظت ديواره‌ها در مقابل فرسايش و يا انحراف و هدايت آب در جهت‌هاي موردنظر، يعني دورنمودن جهت اصلي جريان از کناره فرسايش‌پذير رودخانه و هدايت آن به قسمت‌هاي وسط مقطع رودخانه، ساخته مي‌شود. نتيجه احداث اپي، تنگ تر شدن مقطع عبور جريان است و به همين دليل شاهد فرسايش در نزديکي رأس اپي در بستر رودخانه مي‌باشيم.

استفاده از اين سازه به صورت‌هاي مختلفي انجام مي‌گيرد. بسته به موارد استفاده، اين سازه مي‌تواند به صورت منفرد و يا يکسري اپي پشت سرهم با فواصل معين قرار گيرد. اگر اين سازه به صورت منفرد باشد در اين صورت مسئله اساسي و مهم، طول گردابه‌اي است که پس از اپي در قسمت پايين‌دست آن تشکيل مي شود. اما اگر چندين اپي به صورت پياپي مورد استفاده قرار گيرند، در اين حالت مسئله اساسي فاصله بين آنها است. در اينجا به آبشستگي در جلوي اپي هاي منفرد و ذکر مثالي در اين خصوص مي‌پردازيم. اپي معمولاً از مصالح سنگ ريزه‌اي (تورسنگ) مخلوط رودخانه‌اي با روکش تورسنگي ساخته مي‌شود و از طرف ساحل به داخل رودخانه امتداد يافته و موجب انحراف جريان از کناره‌ها مي‌شود. اين سازه در حفاظت ديواره خارجي قوس‌ها و طرح‌هاي اصلاح مسير رودخانه‌ها به طور گسترده‌اي مورد استفاده قرار مي‌گيرد. از جمله مسائل مهم در طراحي اپي پديده آبشستگي موضعي دماغه آن مي‌باشد که به علت تنگ شدگي مقطع جريان و وجود گرداب‌هاي قوي به وجود مي‌آيد. آبشستگي موضعي دماغه اپي مي‌تواند موجبات تخريب آنها را خصوصاً در مواقع سيلابي فراهم آورده و طرح را با شکست مواجه سازد. به علت ماهيت سه بعدي و پيچيده جريان‌هاي گردابي اطراف دماغه اپي هنوز راه حل جامع و کاملي براي عمق‌آبشستگي دماغه آنها ارائه نشده است [۳].

اپي‌ها بر دو نوع‌اند. نفوذپذير و نفوذناپذير (صلب)، که نوع اخير حساسيت بيشتري نسبت به تنگ‌شدگي نشان مي‌دهد.

۲-٤-۱ تاريخچه تحقيق و طراحي

محققين متعددي در مورد محاسبه عمق آبشستگي در جلوي اپي‌ها تحقيق نموده اند، از جمله انگلس[٢] (۱۹٤۹) که معادله پيشنهادي خود را بر پايه معادله ليسي (۱۹۵۳) بنا نهاد، ليو و احمد[٣] (۱۹۶۱)، توچ و لارسن[٤] (۱۹۵۸ ، ۱۹۶۳)، فيلد[٥] (۱۹۷۱)، کنه[٦] (۱۹۷۱)، ويگادا و کارات[٧] (۱۹۷٤)، ريچاردسن[٨] (۱۹۷۵) و راجاراتنام و نوچوکوا[٩] (۱۹۸۰) .

---

[1] - Groyne or Super Dike

[2] - Inglis

[3] - Liu and Ahmad

[4] - Toch and Laursen

[5] - Field

[6] - Cunh

[7] - Veigada and Karat

[8] - Richardson

[9] - Rajaratnam and Nuachukwa

فرمول توصیه شده براي طراحي بر پایه تحقیقات لیو و احمد عبارت است از :

$$y_o + y_s = K\left(\frac{Q}{B-b}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (۱۷-۲)$$

در رابطه فوق :

Q = دبي طراحي جریان رودخانه بر حسب متر بر ثانیه

B = عرض اولیه رودخانه به متر

b = طول تصویر شده اپي در امتداد عمود بر جهت جریان برحسب متر

y_o = عمق اولیه جریان رودخانه با دبي Q ، برحسب متر که با استفاده از گودشدگي کلي مقطع محاسبه ميشود

y_s = حداکثر عمق فرسایش یافته در مجاورت رأس اپي برحسب متر

K = ثابت عددي که داراي بعد $\sec^{\frac{2}{3}} . m^{\frac{-1}{3}}$ است .

در شکل (۲-۱۲) پارامترهاي معادله (۲-۱۷) نشان داده شده‌اند.

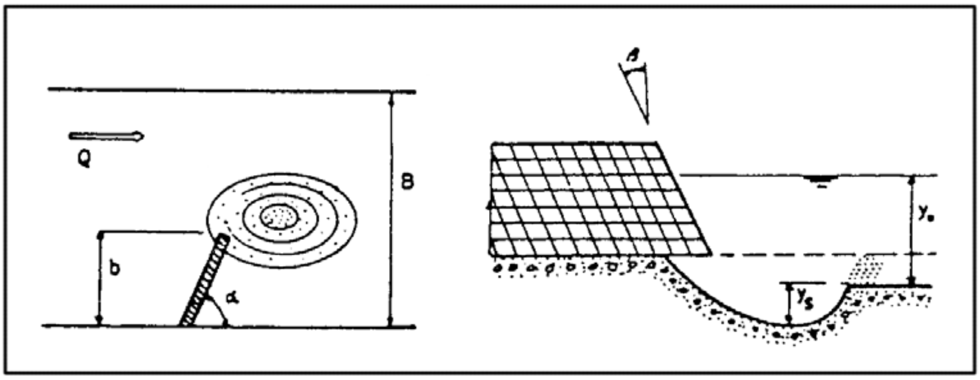
فرمول دیگري توسط نیل[1] (۱۹۸۰ و ۱۹۷۳) ارائه شده است.

$$\frac{Y_s + Y_o}{Y_o} = \frac{2/1 \div 2/75}{h}\left(\frac{2/5q^2}{d^{0/318}}\right)^{0/333} \qquad (۱۸-۲)$$

که در آن :

h= عمق آب در پایین‌دست قبل از آبشستگي به متر و q = دبي به متر مکعب بر ثانیه بر واحد عرضي به متر .

حدود اعتبار این فرمول ۰/۱≤d۵۰≤۲۰۰mm مي‌باشد. [۹]



شکل ۲-۱۲- توضیح پارامترهاي معادله (۲-۱۷)

---

[1] - Neil

اگر ضريب K برابر ۲/۰ انتخاب شود حداكثر خطا حدود ±۱۵% نسبت به نتايج اندازه‌گيري شده خواهد بود. لذا مقدار توصيه شده K ، برابر ۲/۲ است. عدد ۲/۲ در شرايطي است كه اپي عمود بر مسير جريان آب قرار گيرد و رأس اپي به صورت عمودي ساخته شود. جدول‌هاي ۲-۲ و ۲-۳ مقادير ضريب K_1 تا K_3 را براي شكل‌هاي مختلف دماغه اپي نشان مي‌دهند.

جدول ۲-۲

شكل دماغه اپي (β)	K۲
قائمه عريض	۱/۰
قائمه و ديواره باريك	۱/۰
با زاويه ٤٥°	۰/۸۵
با زاويه بسيار خوابيده	۰/۵

K۱	α (درجه)
۰/۸	۳۰
۰/۹	٤٥
۰/۹۵	٦۰
۱/۰	۹۰
۱/۰۵	۱۲۰
۱/۱	۱۵۰

جدول ۲-۳

موقعيت اپي	ضريب K۳
روي بازه مستقيم رودخانه	۱/۰
روي كناره مقعر نسبت به آب	۱/۱۰
روي كناره محدب نسبت به آب	۰/۸
در پايين‌دست خم تند، روي كناره مقعر	۱/٤
در پايين‌دست خم ملايم، روي كناره مقعر	۱/۱۰

ضريب نهايي :

$$K_f = K.K_1.K_2.K_3 \quad (۲-۱۹)$$

– شرايط استفاده از رابطه (۲-۱۷)

وقتي‌که $u_o > 0/5 u_c$

$$u_o = Q/(B-b)\,y_o$$

که

$$u_c = u_{*c}\,(5/75 \log \frac{y_o}{2d50} + 6)$$

و

که u_o سرعت متوسط جريان در مقطع تنگ شده توسط اپي و u_{*c} سرعت برشي بحراني متناظر با قطر d_0. بستر بوده و از دياگرام شيلدز تعيين مي‌شود.

از دياگرام شيلدز داريم :

(۲۰-۲) $$u_{*c} = (\Delta.g.\theta_c.d)^{0/5}$$

Δ = اختلاف چگالي نسبي ذرات بستر و آب (بدون بعد، معمولاً ۱/۶۵)

g = شتاب ثقل، متر بر مجذور ثانيه (۹/۸۱)

d = قطر معين ذرات بستر برحسب متر

u_{*c} = سرعت برشي بحراني متناظر با ذرات به قطر d برحسب متر بر ثانيه

θ_c = پارامتر بدون بعد شيلدز.

در صورتي که سرعت در مقطع تنگ شده يعني $u_o = Q/(B-b)\,y_o$ از نصف سرعت بحراني متناظر با قطر d_0. کمتر باشد ($u_o <$ ۰/۵u_c) عمق گودال فرسايش متناظر از مقدار تعيين شده توسط رابطه (۲-۱۷) کمتر خواهد بود. در اين حالت برخي ذرات کوچکتر از d_* فرسايش مي‌يابند. اندازه d_* قطري است که از دياگرام شيلدز با فرض $u_o =$ ۰/۵ u_c به دست مي‌آيد.

جهت طراحي بايد حداکثر عمق محتمل گودال فرسايش را برابر عمق حاصل از فرمول (۲-۱۷) ضربدر درصد ذرات کوچکتر از d_* فرض نمود. در صورتي که کوچکترين ذرات بستر از قطر d_* بزرگتر باشند اصلا" گودال فرسايش نمي يابد.

اگر فاکتور Z را به صورت $Z = 1 + \frac{y_s}{y_o}$ معرفي کنيم، براي آبشستگي در اپي ها، ۲/۰ $< Z <$ ٤/٥ خواهد بود.

به طور کلي ميزان آبشستگي در اپي‌ها تابع عوامل زير است :

- طول اپي و ساير مشخصات هندسي آن
- عمق جريان
- دبي جريان
- مصالح بستر

براي روشنتر شدن مطالب ذکر شده به ذکر يك مثال مي‌پردازيم.

مثال ۲-۳

عرض اوليه رودخانه‌اي ۲۰۰m، طول اپي ۵۰m، عمق جريان در مقطع تنگ شده با اپي ۳m و دبي جريان ۸۰۰ m^3/sec است. زاويه دماغه اپي با امتداد قائم (β) ۴۵ درجه و اپي عمود بر امتداد جريان و در قسمت مستقيم رودخانه احداث مي‌گردد. قطر d_0. ذرات بستر ۱۰mm و چگالي مصالح بستر ۲/۶۵ ton/m^3 است. عمق آبشستگي را محاسبه كنيد.

حل :

$B=200m$

$b=50m$

$\beta=45^o$

$d_{50}=10mm$

$G_s=2/65$

$\theta_c=0/056$

$y_o=3m$

$$u_{*c}=\sqrt{g\Delta\theta_c d}$$

$$u_{*c}=\sqrt{(9/81\times1/65\times0/056\times10\times10^{-3})}=0/1m/sec$$

$$u_c=u_{*c}(5/75\log\frac{y_o}{2d_{50}}+6)$$

$$u_c=0/1(5/75\log\frac{3}{2\times10\times10^{-3}}+6)=1/85m/sec$$

$$u_o=\frac{Q}{(B-b)y_o}\Rightarrow u_o=\frac{800}{(200-50)\times3}$$

$$u_o=1/8m/sec$$

$$u_o>0/5u_c$$

$K=2/2$ و $K_1=1/0$ و $K_2=0/85$ و $K_3=1/0$

$$y_s=K_f(\frac{Q}{B-b})^{\frac{2}{3}}-y_o \quad ; \quad K_f=K.K_1.K_2.K_3$$

$$y_s=2/7m$$

۵-۲ آبشستگي در جلوي پشتواره‌ها

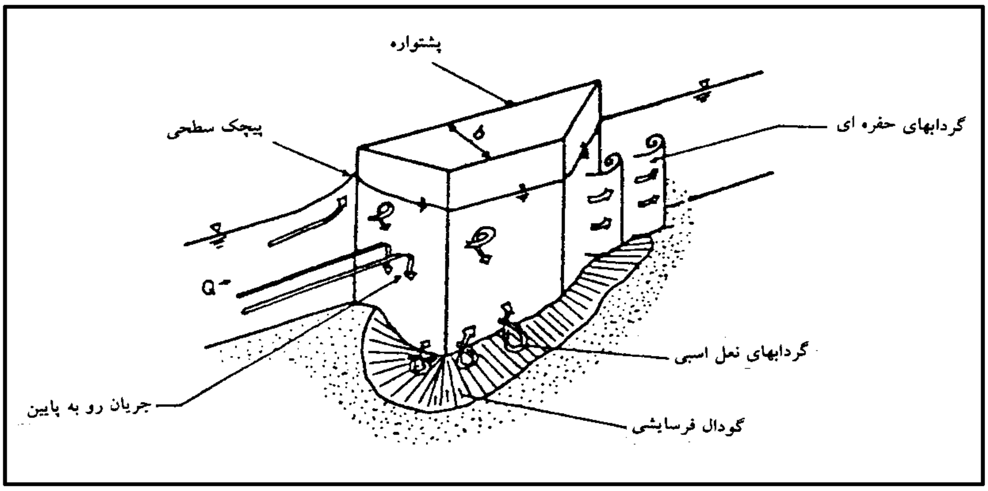
پشتواره‌ها[1] به صورت يك برآمدگي موضعي در كناره مقطع رودخانه مي‌باشند. براي مثال مي‌توان به پشتواره‌هاي پل‌ها و سازه‌هاي ديگر اشاره نمود. آبشستگي در جلو و كنار پشتواره‌ها رخ مي‌دهد.شكل (۲-۱۳) نشان مي‌دهد كه علت آبشستگي در اين سازه به وجود آمدن جريان‌ها رو به پايين در اثر برخورد آب به جلو پشتواره، و نيز گرداب‌هاي حفره‌اي و نعل اسبي است.

عوامل مؤثر در آبشستگي پشتواره عبارتند از :

- برآمدگي پشتواره
- عمق جريان
- مصالح بستر
- شكل هندسي پشتواره

---

[1] - Abutments



شکل ۲-۱۳- برخورد جریان آب با پشتواره

معمولاً عمق آبشستگي موضعي با فاكتور Z تعيين مي‌شود.

(۲-۲۱)
$$Z=1+\frac{y_s}{y_o}$$

كه در آن y_s عمق آبشستگي و y_o عمق اوليه جريان است. لازم به ذكر است كه عمق y_s نسبت به بستر اوليه طبيعي در نظر گرفته مي‌شود.

ميزان Z در آبشستگي پشتواره همانند اپي‌ها بين ۲ تا ٤/۵ است. رابطه طراحي براي پشتواره‌ها به صورت $\frac{y_s}{b}=f\left(\frac{y_o}{b}\right)$ مي‌باشد.

۲-۵-۱ تاریخچه تحقیق و طراحی

مسئله فرسايش در جلوي پشتواره‌ها به طور خيلي محدود مطالعه شده است. به هر حال محققيني چون جوگلكار[1] (۱۹۷۱)، وانگ[2] (۱۹۷۲)، تي[3] (۱۹۸٤) و كوان[4] (۱۹۸٤)، كه سه محقق اخير در دانشگاه اوكلند تحقيق كرده‌اند، و رودكيوي[5] (۱۹۸٤) نيز مطالعاتي در اين زمينه انجام داده‌اند.

---

[1] - Joglekar

[2] - Wong

[3] - Tey

[4] - Kwan

[5] - Raudkiui

روش توصيه شده براي طراحي :

اين روش بر پايه مطالعات انجام شده در دانشگاه اوكلند ارائه شده است. در اين روش، حداكثر عمق فرسايش با استفاده از شكل (۲-۱٤) به دست مي‌آيد. محور قائم اين شكل عمق نسبي فرسايش و محور افقي آن، عمق اوليه جريان آب در مقطعي كه در آن واقع است مي‌باشد. پارامتر b ميزان جلوآمدگي پشتواره را نشان مي‌دهد شكل (۲-۱٤) از دو منحني تشكيل شده است:

منحني شماره (۱) براي پشتواره‌هايي است كه شكل آنها انحناء دار و شبيه خطوط جريان مي‌باشد مانند شكل (۲-۱۳).

منحني شماره (۲) براي پشتواره هايي با شكل تندتر صادق است.

نقاطي كه بر روي منحني داده شده اند مربوط به آزمايش‌هايي است كه در آنها پشتواره به شكل‌هاي مختلف بوده است . ارقام حاصل از منحني‌ها تا حدودي كمتر از فرسايش در كناره پايه هاي پل‌ها مي‌باشند. در بعضي موارد، پشتواره را مانند نيمه پايه پل فرض كرده و فرسايش و آبشستگي آنها را مانند فرسايش در پايه پل حساب مي‌كنند. منحني هاي شكل (۲-۱٤) وقتي مي‌توانند براي محاسبه آبشستگي به كار روند كه $u_o > ۰/5\ u_c$ باشد، كه در آن u_o سرعت در مقطع رودخانه در محل پشتواره بوده و u_c از نرمال زير به دست مي‌آيد.

(۲-۲۲)

$$u_c = u_{*c}\left(5/75 \log \frac{y_o}{2d_{50}} + 6\right)$$

كه در آن :

d_{50} = قطر ذرات برحسب m

U_{*c} = سرعت برشي بحراني متناظر با قطر d_{50} برحسب m/sec

U_c = سرعت بحراني براي فرسايش ذرات با قطر d_{50} برحسب m/sec

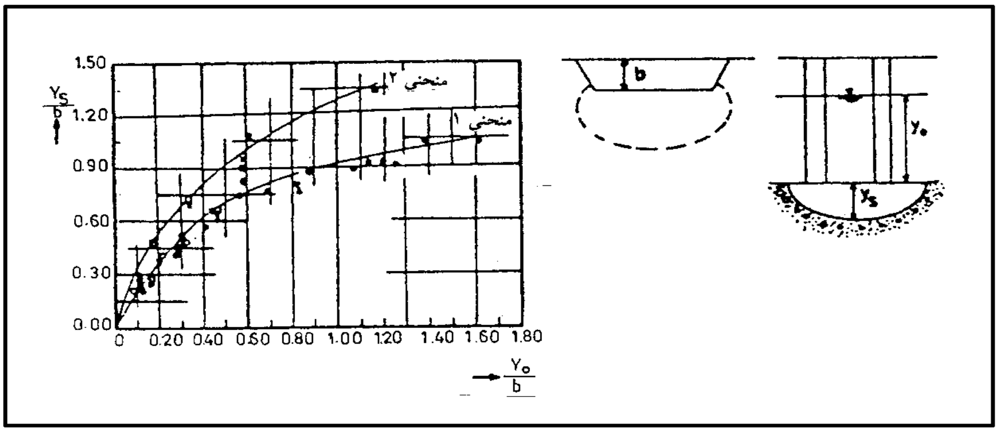
$\frac{\gamma_a}{\gamma} - 1 = \Delta$

(۲-۲۳)

$$u_{*c} = \sqrt{g d_{so} \Delta \theta_c}$$

مي باشد.

اگر $u_o < ۰/5\ u_c$ باشد لازم است كه ابتدا قطر بحراني d_* متناظر با رابطه $u_o = ۰/5\ u_c$ تعيين گردد. اگر درصد ذرات كوچكتر از d_* در مصالح بستر برابر p فرض شود، جواب حاصل از شكل (۲-۱٤) بايد در p ضرب شود.

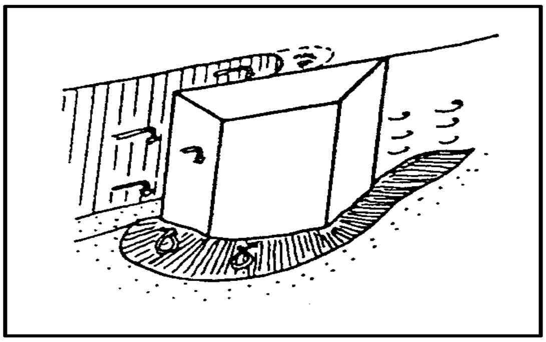


شكل ۲-۱٤-

اين روش بر اساس اين فرضيه استوار است كه ذرات كوچكتر از d_* به صورت آزاد در معرض آبشستگي قرار مي‌گيرند و ذرات بزرگترمانعي براي حركت آنها ايجاد نمي كنند. در عمل چنين پديده‌اي رخ نمي دهد ولي براي مقاصد طراحي بايد بدترين حالت را در نظر گرفت. در صورتي كه كوچكترين ذرات بستر از قطر d_* بزرگتر باشند، اصولاً فرسايش رخ نمي دهد.

منحني هاي شكل (۲-۱٤) نشان مي‌دهد كه عمق فرسايش در جلوي پشتواره نسبتاً زياد و در حدود ۲ تا ۵ برابر عمق اوليه آب مي‌باشد. در مواردي كه مسئله مهمتر بوده و مقطع پشتواره شكل خاصي غير از شكل‌هاي فوق الذكر دارد بايد از مطالعات مدل هيدروليكي و نتايج آن براي محاسبه فرسايش بهره برد.

نوع ديگري از فرسايش در پشتواره‌ها ايجاد مي‌شود كه قابل توجه است. مصالح خاكي كناره رودخانه در پشت پشتواره به تدريج لغزيده و وارد گودال فرسايش مي‌شود. با بازشدن شيار يا حفره قائم در مصالح مذكور، قدرت جريان رو به پايين بيشتر شده و لذا گودال فرسايش عميق تر و عريض‌تر مي‌شود و متناظراً شيار يا حفره قائم، عميق تر و بزرگتر شده و در نهايت به كلي مصالح موجود در پشت پشتواره فرسايش يافته و پشتواره از كناره رودخانه جدا مي‌شود شكل (۲-۱۵). به اين فرآيند (Outflanking) مي‌گويند.



شكل ۲-۱۵- آبشستگي در پشتواره‌ها

حال براي روشن تر شدن مطالب ذكر شده يك مثال در اين زمينه ارائه مي‌شود [۱۰] .

مثال ٢-٤

ميزان برآمدگي يك پشتواره پل از ساحل رودخانه ٣m ، دبي جريان در واحد عرض مقطع رودخانه در محل پشتواره ٣m^3/sec.m و عمق جريان در مقطع پل نيز ٣m است. شكل پشتواره مشابه WW در شكل (٢-١٥) است. براي مصالح بستر d_{50} = ٢mm ، G_s = ٢/٦ است. آبشستگي موضعي را تعيين كنيد.

حل :

$b = 3m$

$y_o = 3m$

$q = 3m^2 / sec$

WW تيپ

$d_{50} = 2mm$

$G_s = 2/6$

$y_s = ?$

y_s

$\theta_c = 0/04$

$$u_o = \frac{q}{y_o} \Rightarrow u_o = 1m/sec$$

$$u_{*c} = \sqrt{\Delta g d_{50} \theta_c}$$

$$= \sqrt{1/6 \times 9/81 \times 2 \times 10^{-3} \times 0/04} = 0/035 \ \ m/sec$$

$$u_c = u_{*c}(5/75 \ \log \frac{y_o}{2d_{50}} + 6)$$

$$u_c = 0/035\,(5/75 \log \frac{3}{2 \times 2 \times 10^{-3}} + 6) = 0/79\,m/sec$$

$$u_o > 0/5\,u_c$$

$(y_o / b) = \frac{3}{3} = 1$ و $y_s / b = 0/92$ (منحني1)

$$y_s = 0/95 \times 3 \Rightarrow y_s = 2/76\,m$$

٢-٦ آبشستگي در خروجي كالورت‌ها

چنانچه در مسير آبرو يا خط القعري براي ايجاد راه يا راه آهن از خاكريز استفاده شود، براي انتقال آب از يك سوي خاكريز به سوي ديگر از سازه‌اي به نام كالورت استفاده مي‌شود. كالورت‌ها در پايين ترين نقطه خط القعر ساخته مي‌شوند. اگرچه اين سازه از نظر اجرايي ساده است اما طرح هيدروليكي آن تا حدودي پيچيده بوده و تابع عوامل مختلفي است [٧] .

شايد بتوان گفت كه كالورت‌ها پرتعدادترين سازه آبي ساخته شده هستند. به دليل سرعت نسبتاً زياد در خروجي كالورت‌ها، در صورت عدم ايجاد پوشش حفاظتي مناسب، فرسايش ايجاد مي‌شود [١٠] شكل (٢-١٦).

٢-٦-١ *تاريخچه تحقيق و طراحي*

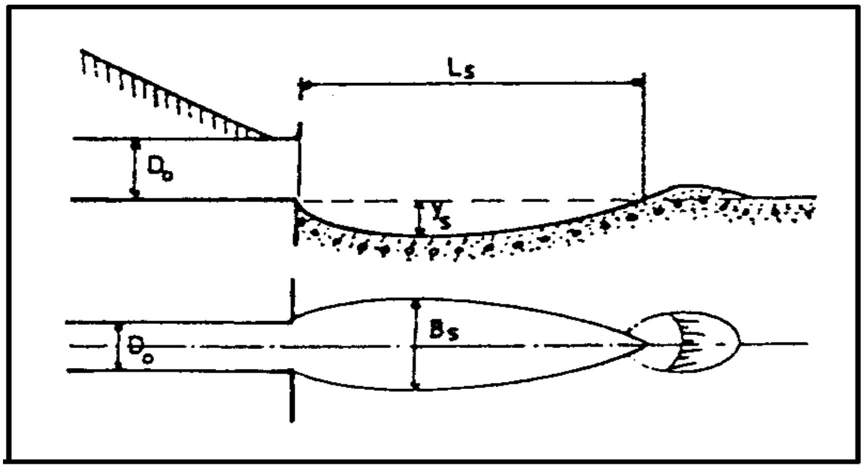
محققيني چون بوهان[1] (١٩٧٠)، روف[2] و همكاران (١٩٧٢)، رودكيوي و بروسوس[3] (١٩٩١) مسئله آبشستگي در كالورت‌ها را بررسي كرده اند.

---

[1] - Bohan

[2] - Ruff

[3] - Raudkiui and Brwssers



شکل ٢-١٦- آبشستگي درخروجي کالورت

فرمول‌هاي توصيه شده براي طراحي براساس بوهان وراف و همکاران [١٠] عبارتند از :

$$\frac{y_s}{D_o} = 0/65\left(\frac{u_o}{u_{*c}}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (٢-٢٤)$$

$$\frac{B_s}{D_o} = 7/5\ Fr^{\frac{2}{3}} \qquad (٢-٢٥)$$

$$\frac{L_s}{D_o} = 15\ Fr^{\frac{2}{3}} \qquad (٢-٢٦)$$

$$Fr = \frac{u_o}{\sqrt{gD_o}} \qquad (٢-٢٧)$$

در اين روابط :

u_o = سرعت خروج از انتهاي کالورت برحسب m/sec

u_{*c} = سرعت برشي بحراني متناظر با قطر d_{50} مصالح بستر برحسب m/sec که از دياگرام شيلدز با فرض $d = d_{50}$ به دست مي‌آيد.

Fr = عدد فرود

D_o = قطر کالورت در گلوگاه خروجي برحسب m .

اگر مقطع کالورت مستطيلي باشد، در روابط (٢-٢٤) و (٢-٢٦) به جاي D_o ارتفاع مستطيل و در رابطه (٢-٢٤) عرض مستطيل لحاظ مي‌شود.

رابطه (٢-٢٤) در شرايطي به کار مي‌رود که (u_{*c} براي قطر d_{50} محاسبه مي‌شود) :

$$u_o > 6/5\sqrt{Fr}\ \ u_{*c}$$

در غیر این صورت ابتدا باید قطر d_* از رابطه $u_o > 6/5\sqrt{Fr}\ \ u_{*c}$ به دست آید. عمق گودال آبشستگي برابر جواب حاصل از رابطه (۲-۲٤) است با این فرض که در p ضرب شود (p نسبت مصالح بستر کوچکتر از اندازه d_* است). جواب روابط (۲-۲٥) و (۲-۲٦) به همان نسبت کاهش مي‌یابد. اگر تمام مصالح بستر از قطر d_* بزرگتر باشند، علي القاعده نباید آبشستگي رخ دهد. جهت روشن تر شدن مطالب به ذکر یك مثال مي‌پردازیم.

مثال ۲-٥

در خروجي کالورتي به قطر ۲m ، سرعت جریان ٤m/sec ، مصالح بستر d_0. = ۱۰۰mm و ۲/٦٥ = G_s است. فرسایش حاصل را حساب کنید.

حل :

$$u_o = 4m/sec$$
$$d_{50} = 100mm \quad ; \quad \theta_c = 0/056$$
$$u_{*c} = \sqrt{gd_{50}\Delta\theta_c} = 0/3m/sec$$
$$F = \frac{u_o}{\sqrt{gD_o}} = \frac{4}{\sqrt{9/81 \times 2}} = 0/903 \quad ; \quad u_o > 6/5Fr^{0/5}\ \ u_{*c}$$
$$y_s = 0/65D_o\,(u_o/u_{*c})^{\frac{1}{3}} = 3/08m$$
$$B_s = 7/5D_o\,Fr^{\frac{2}{3}} = 14m \quad ; \quad L_s = 15D_oFr^{\frac{2}{3}} = 28m$$

۷-۲ حفاظت از آبشستگي در خروجي کالورت‌ها

زماني که مجراي آبي به کانال خاکي وصل مي‌شود، در ناحیه ورودي آب به مجرا و در ناحیه خروجي آب از آن ممکن است فرسایش ایجاد شود. از این رو قسمتي از کانال خاکي را به وسیله سنگ فرش یا قلوه سنگ یا شن درشت مي‌پوشانند تا از فرسایش احتمالي جلوگیري به عمل آید.

مؤسسه U.S.B.R توصیه هاي زیر را براي تعیین نوع و طول حفاظت کانال ارائه داده است :

در صورتي که عمق آب در کانال را با y نمایش دهیم :

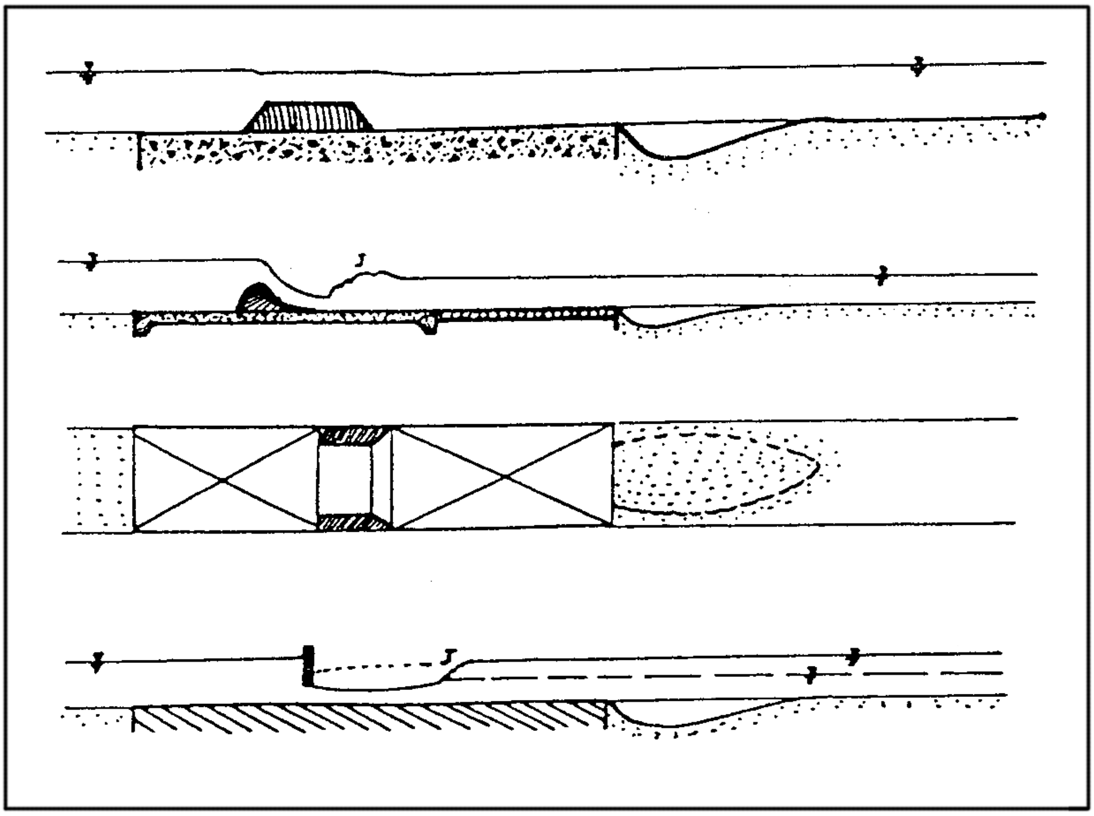
اگر $0 < y \leq 1/05$ در این صورت در پایین‌دست به طول ۲/٥y و حداقل ۱/٥ متر شن درشت با ضخامت ۳۰cm استفاده شود.

براي $1/05 < y \leq 2/1$ ، در پایین‌دست به طول ۲/٥ و حداقل ۱/٥ متر سنگ چین با ضخامت ۳۰cm استفاده شود که در زیر آن شن و ماسه با ضخامت ۱٥cm قرار مي‌گیرد و در بالادست به طول y و حداقل ۰/۹ متر شن درشت با ضخامت ۱٥cm استفاده شود.

۲-۸ آبشستگي در پايين‌دست سازه‌هاي هيدروليكي كوتاه

جريان در ابنيه هيدروليكي واقع بر مسير رودخانه ها، مانند سدهاي انحرافي، سرريزها و غيره به دليل تنگ شدگي مقطع، برآمدگي در كف مقطع به صورت سرريز لبه پهن و يا جريان از دريچه‌ها داراي سرعت بيشتري مي‌باشد. اين سرعت بيشتر، به هر حال مستقيماً با كف رودخانه تماس نمي گيرد، زيرا به علت وجود سازه هيدروليكي، ايجاب مي‌كند كه جريان بعد از عبور از مقطع كنترل، روي دال بتني (يا هر دال محافظ، حفاظت كف بعد از دال بتني) حركت كرده و بعد از آن وارد بستر طبيعي رودخانه مي‌شود شكل (۲-۱۷) .

پس از تمام شدن بستر حفاظتي، پايين‌دست هر سازه آبي، ممكن است فرسايش در بستر طبيعي رودخانه ايجاد شود. عمق گودال آبشستگي با زمان تغيير مي‌كند و در اين مورد روابطي توسط محققين پيشنهاد شده كه هنوز مقبوليت عام پيدا نكرده است. در اين نشريه گودال آبشستگي در حال تعادل (پس از گذشت مدت زمان طولاني) مورد بررسي قرار مي‌گيرد.



شكل ۲-۱۷ آبشستگي در پايين‌دست سازه‌هاي هيدروليكي كوتاه

۲-۸-۱ *تاريخچه تحقيق و طراحي*

محققيني كه در اين زمينه تحقيق نموده اند عبارتند از :

شوكليج[1] (١٩٣٢) (١٩٣٥)، مولر[2] (١٩٩٤)، اسميت[3] (١٩٨٢) (١٩٨٤) و فرهودي[4]. عوامل مؤثر در آبشستگي در پايين‌دست سازه‌هاي هيدروليكي كوتاه عبارتند از :

- ضريب a كه در ادامه همين بحث توضيح داده خواهد شد.
- عمق جريان
- مشخصات مواد بستر

اگر فاكتور Z را به صورت $Z=1+\frac{y_s}{y_o}$ نشان دهيم داريم ۲ < Z < ۵. فرمول ارائه شده جهت طراحي براساس مطالعات انجام شده در پروژه دلتا [١٠] بوده اما لازم به ذكر است كه در مورد سازه‌هاي هيدروليكي مهم بايد از مطالعات مدل هيدروليكي استفاده شود.

به عنوان يك تخمين مقدماتي، عمق گودال فرسايش در حالت تعادل حدي را مي‌توان از رابطه زير به‌دست آورد.

(٢٨-٢)
$$\frac{y_s}{y_o}=\frac{0/5au-u_c}{u_c}$$

(٢٩-٢)
$$\cot\beta=2/3+(a-1/3)^{-1/0}$$

(٣٠-٢)
$$u_c=u_{*c}\,(5/75\log\frac{y_o}{2d_{50}}+6/0)$$

در روابط فوق :

u = سرعت متوسط موضعي در انتهاي دال حفاظتي برحسب متر بر ثانيه

β = زاويه اوليه گودال فرسايش كه براي ريزش كناره گودال و خالي شدن زير انتهاي دال كف مهم است (برحسب درجه).

y_o = عمق آب در پايين‌دست برحسب متر

y_s = حداكثر عمق گودال فرسايش برحسب متر

a = ضريبي كه مقدار آن براي $\frac{L}{H}=10$ از دياگرام شكل (٢-١٨) به دست مي‌آيد.

L = طول دال حفاظتي بعد از سازه برحسب متر

براي ساير مقادير $\frac{L}{H}$ داريم :

---

1 - Schoklitch

2 - Muller

3 - Smith

4 - Farhoodi

(۳۱-۲)

$$a = 1/5 + (1/5a_{10} - 2/35)\exp(-0/045\frac{L}{H})$$

شرط استفاده از روابط فوق آن است که

(۳۲-۲)

$$0/5au > u_c + 0/1$$

در غیر این صورت مي‌توان فرض نمود که گودال آبشستگي تشکیل نخواهد شد.

در روابط فوق U سرعت موضعي در انتهاي دال حفاظتي است که با توجه به مقادیر $\frac{L}{H}$ از روابط زیر بدست مي‌آید.

(۳۳-۲)

$$u = \frac{Q}{by_o} \quad ; \quad \frac{L}{H} < 20$$

(۳٤-۲)

$$u = \frac{Q}{By_o} \quad ; \quad \frac{L}{H} > 20$$

که در آن:

b = عرض مجراي جریان که تحت تأثیر سازه جانبي قرار گرفته است.

B = عرض مجراي جریان در حالت آزاد (مجراي اولیه)،

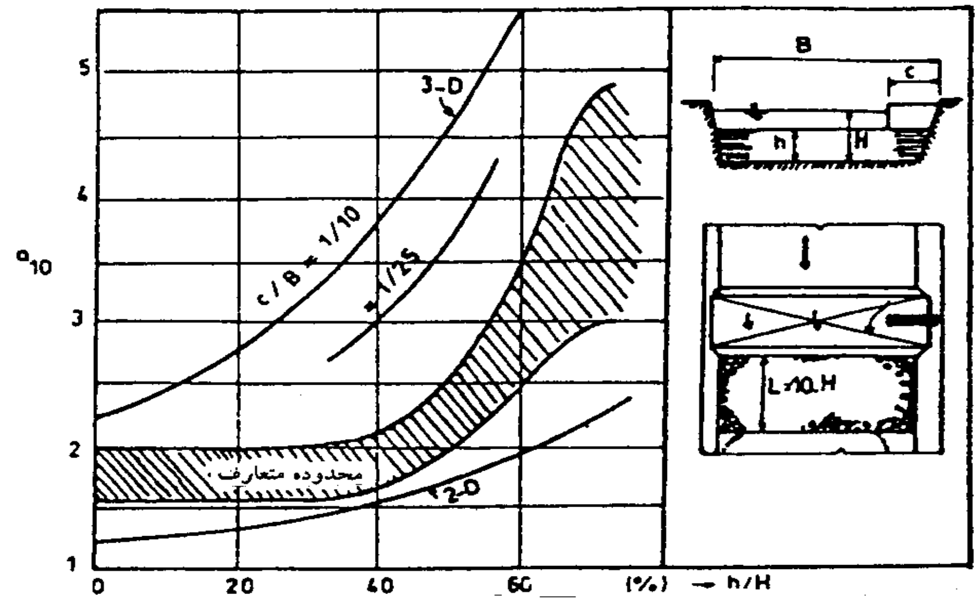
H = فاصله سطح آب تا کف طبیعي مجرا است.

در صورتي که به جاي سرعت موضعي (u) سرعت اولیه به کار رود یعني :

(۳۵-۲)

$$u_o = \frac{Q}{BH}$$

در این صورت ضریب a_{10} باید از دیاگرام شکل‌هاي (۲-۱۸) و (۲-۱۹) تعیین گردد.



شکل ۲-۱۸- تعيين ضريب a_{10}.

در شکل (۲-۱۸) مقادير a_{10} برحسب u_0 تعيين شده اند و بايد طبق رابطه (۲-۳۱) تصحيح شده و آنگاه در رابطه (۲-۲۸) به جاي au کميت au_0 به کار برده شود. در صورتي که يك سازه خروجي حجم زيادي از آب را تخليه کند. آنگاه مقدار a برحسب u_0 بين ۳/۵ – ۵/۰ خواهد بود.

قبل از رسيدن فرسايش به حالت تعادل، عمق گودال آبشستگي را مي‌توان از رابطه زير به دست آورد.

$$y_s(t)=(au-u_c)^{1/7}\, y_o^{0/2}\, t^{0/4}\,/10\Delta^{0/7}$$

بديهي است که حداکثر $y_s(t)$ حالت تعادل خواهد بود. t برحسب ساعت است. براي درك بهتر مطالب، از يك مثال استفاده مي‌شود.

مثال ۲-۶

براي تثبيت بستر رودخانه، کف آن در تمام عرض مقطع با يك لايه سنگ چين پوشانده شده است، عمق جريان ۳m، دبي ۹۰۰m^3/sec و عرض رودخانه ۱۰۰m است. طول حفاظت شده با سنگ چين، ۶۰m است. در پايين‌دست سنگ چين چه اتفاقي مي‌افتد؟ مصالح بستر رودخانه d_{50} = ٤ mm و G_s = ۲/۶۵ .

حل :

در پایین‌دست سنگ چین گودال فرسایش ایجاد مي‌شود.

$$a_{10} = 1/5$$

$$\frac{L}{H} = \frac{60}{3} = 20$$

$$a = 1/5 + (1/57\,a_{10} - 2/32)\exp(-0/045\frac{L}{H}) = 1/5$$

$$u = \frac{Q}{by_o} = \frac{900}{3 \times 100} = 3\,m/sec$$

$d_{50} = 4mm$ و $\theta_c = 0/050$

$$u_{*c} = \sqrt{g\Delta d_{50}\theta_c} = \sqrt{9/81 \times 1/65 \times 0/05 \times 4 \times 10^{-3}} = 0/057\,m/sec$$

$$u_c = u_{*c}\,(5/75\log\frac{y_o}{2d_{50}} + 6) = 1/19\,m/sec$$

$$\frac{y_s}{y_o} = (0/5 \times 1/5 \times 3/0 - 1/19)/1/19 = 0/891$$

$$y_s = 3/0 \times 0/891 \Rightarrow y_s = 2/67$$

$$\cot\beta = 2/3\,(a - 1/3)^{-1} = 4/22 \Rightarrow \widehat{\beta} = 13/32^\circ$$

$$y_s(t) = (au - u_c)^{1/7}\,y_o^{0/2}\,t^{0/4}/10\Delta^{0/7} \Rightarrow y_s(t) = 0/6710t^{0/4}$$

جدول ۲-٤ عمق فرسایش را در زمان‌هاي مختلف و دو مقدار a_{10} نشان مي‌دهد.

جدول ۲-٤

y_s (m)		
t(hr)	$a_{۱۰}$ = ۱/۵	$a_{۱۰}$ = ۲
۱	۰/٦۷	۱/۰۳
۱۰	۱/٦۹	۲/٦۰
۲۰	۲/۲۲	۳/٤۳
۳۰	۲/٦۲	٤/۰۳
۳۱/٦	۲/٦۷	٤/۱۲
۳۳/٦	۲/٦۷	٤/۲۲

منابع و مراجع

[۱] احمدي، حسن، محاسبه فرسايش موضعي در رودخانه‌ها ، انجمن هيدروليك ايران، كارگاه آموزشي كنترل و فرسايش در رودخانه‌ها (۱۳۷۵) .

[۲] اولين كنفرانس هيدروليك ايران – بخش آبشستگي – انتشارات دانشگاه علم و صنعت (۱۳۷٦) .

[۳] فرهودي، جواد "نيمرخ طولي آبشستگي موضعي در پايين‌دست حوضچه هاي آرامش". مجله آب شماره ۲ (۱۳٦٤).

[٤] فرهودي، جواد "سازه‌هاي تنظيم آب در سيستمهاي آبياري"، نشر امور آب وزارت نيرو (۱۳٦٤).

[٥] محمدولي ساماني، حسين، طراحي سازه‌هاي هيدروليكي، انتشارات علوي (۱۳۷٦) .

[٦] مسعوديان، محسن، پيش‌بيني آبشستگي ناشي از جت ديواره اي، پايان نامه كارشناسي ارشد. دانشگاه تربيت مدرس (۱۳۷٤).

[7] Ali, K.H.M. and O.A. Karim (1995). “Scour and Deposition Downstram of Hydraulic Structures”. Sixth Inter. Symposium on River Sedimentation , New Delhi, India.

[8] Bormann, N.E. and P.Y. Julien (1991). “Scour Downstream of Grade – Control Structures”. J. of Hydraulic Engineering , ASCE, Vol, 117, No. 5,PP.576 – 594.

[9] Changxi, M. (1995). “A General Formula for Local Scour Below Hydraulic Structures.” Sixth Inter. Symposium on River Sedimentation, New Delhi, India.

[10] Mazudar, S.K. and P. Kumar (1995). Local Scour Downstream of a Level Apron With and Without Hydraulic Jump. Sixth Inter . Symposium on River Sedimentation , New Delhi , India.

[11] Novak, P., A.I.B. Moffat, and R. Narayanan (1990). “Hydraulic Structures”, Unwin Hyman Ltd.

[12] Przedwojski, B., R. Blazejewski and K.W. Pilarczyk (1995). River Training Techniques. A.A. Balkma Publisher, Old Post Road, Brookfield, USA.

[13] Yec, M.C. and S.Y. Lin (1996). “Local Scour by a Deeply Submerged Horizontal Circular Jet”. J.of Hydraulic Engineering , ASCE, Vol , 2, No.9 , PP.529 – 531.