مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و یکم، شماره ۳ سال ۱۴۰۰

یادداشت تحقیقاتی

بررسی آزمایشگاهی تغییرات زمانی عمق آبشستگی و محل وقوع آن در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی بدون کف‌بند

مجتبی مرسلی[۱]، علی باباخانی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشگاه زنجان

***۲- استادیار و عضو هیئت علمی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه زنجان**

Babakhani@Znu.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۸/۱٤ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۳

چکیده

یکی از مهمترین چالش‌های پیشروی طراحی سرریزها، تامین پایداری آنهاست که بیشتر در طراحی فونداسیون این سازه‌ها از میزان عمق آبشستگی تعادلی تحت جریان دائمی استفاده می‌شود در حالیکه سرریزهای کنگره‌ای در معرض جریان‌های سیلابی قرار می‌گیرند و با توجه به محدود بودن زمان استمرار دبی پیک سیلاب آبشستگی پائین‌دست آنها به تعادل نمی‌رسد، پس استفاده از عمق آبشستگی‌تعادلی می‌تواند عمق فونداسیون مورد نیاز را دست بالا تخمین بزند. بر همین اساس مقادیر عمق آبشستگی لحظه‌ای می‌تواند اطلاعات مفیدی برای تخمین دقیق آبشستگی در اختیار طراحان قرار دهد. در این پژوهش به بررسی تغییرات عمق آبشستگی لحظه‌ای و محل وقوع آن پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی پرداخته شده است. آزمایش‌ها برای سرریزهای کنگره‌ای با زوایای مختلف کنگره ۱۵ تا ۹۰ درجه (خطی) و به ازای H/P=0.1-0.7 انجام گرفته‌است که در تمامی حالات اقدام به برداشت داده‌های بیشینه عمق تعادلی آبشستگی و به ازای H/P=0.1-0.5 اقدام به برداشت تغییرات زمانی عمق آبشستگی لحظه‌ای و محل وقوع آن شده است. نتایج نشان می‌دهد به ازای مقادیر مختلف هد آب روی سرریز و زوایای کنگره سازوکار و میزان آبشستگی متفاوت است در حالی‌که تغییرات زمانی عمق آبشستگی لحظه‌ای دارای روندی تقریباً مشابه است. به گونه‌ای که در کلیه آزمایش‌ها نرخ آبشستگی در لحظات ابتدایی شدیدتر بوده و حدود ۸۰ درصد توسعه عمق آبشستگی در ۱۰ درصد ابتدایی آزمایش اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش۵ برابری پارامتر H/P و ٦ برابری زاویه کنگره سرریز، زمان تعادل بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب حدود ٦برابر افزایش و ٤٥ درصد کاهش یافته است. نتایج بررسی محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی تعادلی نیز حاکی از آن است که در تمامی سرریزها با افزایش هد آب روی سرریز، محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی، در راستای طولی کانال از مرکز سیکل‌ها فاصله بیشتری می‌گیرد و با افزایش۵ برابری هد آب روی سرریز فاصله محل وقوع تا ۸ برابر افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: آبشستگی، تغییرات زمانی، محل وقوع، سرریز کنگره‌ای مثلثی، بدون کف بند

۱- مقدمه

سرریزهای رودخانه‌ای سازه‌هایی هستند که برای کنترل سیلاب، ذخیره آب، بالا آوردن تراز آب رودخانه استفاده می‌شوند. در صورتی که ساختن این سرریزها در بازه‌ای از رودخانه که دارای محدودیت عرض و تنگنا الزامی باشد برای افزایش ظرفیت دبی سرریزهای کنگره‌ای استفاده می‌شود. با توجه به اینکه این سرریزها در معرض سیلاب‌های متعددی در طبیعت قرار می‌گیرند، پس یکی از مهمترین چالش‌های پیشروی این سرریزها، تامین پایداری این سازه‌ها در برابر فرسایش و آبشستگی پائین‌دست این سازه‌ها است و برای پیش‌بینی تمهیدات لازم، باید میزان آبشستگی صورت گرفته تخمین زده شود.

جنتلینی (۱۹٤۱) نخستین پژوهشگری بود که به طور مستقیم روی سرریزهای کنگره‌ای کار کرد[۱]. در ادامه پژوهشگرانی مانند کوزاک و سواب(۱۹٦۱)، هی و تیلور (۱۹۷۰)، پیتر و همکاران (۱۹۹۸)، بویان و همکاران (۲۰۰۷)، قدسیان و همکاران (۲۰۰۹)، پژوهش‌های گسترده‌ای برای بررسی تاثیر پارامترهای از قبیل شکل هندسی سرریز از پلان، ارتفاع سرریز، ضخامت دیوار، شکل تاج، نوع و شکل رأس تاج و روی الگوی جریان و رفتار هیدرولیکی حول این سازه‌ها و نهایتا ضریب آبگذری و راندمان این سرریزها انجام دادند [۲،۳،٤،۵] . کورکستون و تولیس (۲۰۱۰،۲۰۱۱،۲۰۱۲) با انجام یکسری آزمایش‌ها به بررسی حالت مختلف قرارگیری سرریز داخل مخزن و کانال پرداختند [٦،۷،۸،۹]. با وجود مطالعات متعدد و گسترده‌ای که در زمینه عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای صورت-گرفته‌است مطالعات معدودی نیز در زمینه آبشستگی پائین‌دست این سرریز انجام‌شده که در ادامه به اهم آنها اشاره می‌شود.

اسکورلوک و همکاران (۲۰۱۲) آبشستگی پائین‌دست سازه-های کنترل تراز بستر را بررسی نمودند و معادلاتی را برای تخمین عمق آبشستگی ارائه کردند [۱۰]. ملویل و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه الگوی‌جریان در گودال آبشستگی پائین‌دست یک سرریز مستغرق پرداختند و نمودارهای بی‌بعد ساختار جریان در گودال را ارائه کردند [۱۱]. ایلنیخیلی (۲۰۱٦) بیشترین عمق آبشستگی ایجاد شده در پائین‌دست سرریز دارای مانع منحنی شکل را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج وی نشان داد که استفاده از مانع دارای منحنی باعث کاهش عمق و طول آبشستگی پائین دست می‌شود [۱۲]. یوستریخ و همکاران (۲۰۱۷) هنگام یک مطالعه آزمایشگاهی روی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی، تاثیر پارامترهایی همچون عدد فرود جریان، اندازه مصالح، عمق پایاب را بر ابعاد حفره و پشته رسوبی بررسی کردند. ایشان دریافتند که با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب ابعاد حفره افزایش چشمگیری دارد و یکسری روابطی برای تخمین ابعاد حفره ارایه نمودند [۱۳]. یزدی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی (در دو مدل شکل تاج مستطیلی و ذوزنقه‌ای از پلان) پرداختند و دریافتند که بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی مدل مستطیلی بیشتر از مدل ذوزنقه‌ای هست [۱٤]. کومار و احمد (۲۰۲۰) به مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی سرریز کلیدپیانویی پرداختند و با بررسی اثر عمق‌پایاب به ازای دبی‌های مختلف دریافتند که جت‌های ریزشی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز عامل اصلی ایجاد حفره و پشته است [۱۵]. باباخانی و مرسلی (۱۳۹۹) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهایی مانند زاویه کنگره سرریز و هد آب روی سرریز بر ابعاد حفره آبشستگی و نیز پشته رسوبی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش۷ برابری هد آب روی سرریز بطور متوسط عمق آبشستگی ۱۲ برابر و طول حفره ۱۰ برابر افزایش داشته و افزایش ٦ برابری زاویه کنگره نیز منجر به کاهش ۷۰ درصدی عمق آبشستگی می‌شود[۱٦].

مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات در زمینه سرریزهای کنگره‌ای به بررسی تاثیر شرایط جریان و شکل هندسی سرریز بر رفتار هیدرولیکی جریان عبوری از روی سرریز و ضریب آبگذری پرداخته‌اند و مطالعات انگشت‌شماری در زمینه آبشستگی پایین‌دست این سازه‌ها صورت گرفته است که البته این مطالعات نیز به بررسی ابعاد نهایی و تعادلی آبشستگی متمرکز بوده است. این در حالی است که سرریزهای کنگره‌ای بیشتردر معرض جریان‌های سیلابی قرار می‌گیرند و با توجه به محدود بودن زمان استمرار دبی پیک سیلاب، آبشستگی پائین‌دست آنها به تعادل نمی رسد پس استفاده از عمق آبشستگی‌تعادلی می‌تواند عمق فونداسیون مورد

نیاز را دست بالا تخمین زند. بر همین اساس مقادیر عمق آبشستگی لحظه‌ای می‌تواند اطلاعات مفیدی برای افزایش دقت تخمین آبشستگی در اختیار طراحان قرار دهد پس در این پژوهش سعی- شده تغییرات زمانی عمق آبشستگی و محل وقوع آن در پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی بدون کف‌بند بررسی شده است.

۲- امکانات آزمایشگاهی

مطالعات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه زنجان در یک کانال مستطیلی به طول ٦ متر، عرض و ارتفاع ۰/۳ متر و شیب کف ۰/۰۱ انجام شد که جزییات امکانات آزمایشگاهی، شکل شماتیکی از سرریز و محدوده پارامترهای مورد نظر در آزمایش‌ها در مقاله باباخانی و مرسلی (۱۳۹۹) آورده شده است [١٦].

در مجموع ۳۰ آزمایش آبشستگی برای برداشت تغییرات زمانی عمق‌آبشستگی با سرریزهای کنگره‌ای با ٦ زوایه مختلف کنگره ۱۵، ۲۲.۵، ۳۰، ٤٥، ٦٧.٥ درجه و خطی (مدل شاهد) در ۵ حالت نسبت هدآب به ارتفاع سرریز ۰.۱ تا ۰.۵ انجام گرفته است. برای ثبت نتایج عمق آبشستگی لحظه‌ای و نهایی عمق سنجی با دقت یک میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت که این عمق‌سنج روی یک صفحه مدرج با قابلیت حرکت طولی و عرضی مستقر شده و بدین‌وسیله امکان برداشت مختصات محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی فراهم شد. برداشت تغییرات زمانی مقادیر مذکور در بازه‌های زمانی غیریکنواخت انجام می‌شد به شکلی که در ابتدای آزمایش‌ها به دلیل نرخ شدید آبشستگی، بازه‌های زمانی برداشت کوتاهتر و در ادامه طولانی‌تر در نظر گرفته شد و تا زمان تعادل فرآیند آبشستگی ادامه داشت.

۳- آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر

پدیده آبشستگی پایین‌دست سرریزها تابع چهار عامل اصلی، پارامترهای وضعیت هندسی رودخانه (W عرض مجرا، S_0شیب طولی مجرا)، پارامترهای مشخصه ذرات بستر و سیال (شاملd_{50} قطر متوسط ذرات، ρ , ρ_s جرم مخصوص آب و رسوب، σ_g انحراف استاندارد توزیع اندازه ذره، ν لزجت سینماتیک‌آب)، پارامترهای سرریز کنگره‌ای (L طول تاج سرریز، P ارتفاع سرریز، αزاویه کنگره سرریز، T ضخامت سرریز)، پارامترهای‌مشخصه- جریان(Vسرعت‌جریان، D عمق هیدرولیکی جریان، H هد آب روی سرریز، t زمان از ابتدا تا لحظه دلخواه از آزمایش، t_eزمان انتهایی آزمایش) هستند. بنابراین رابطه (۱) بیانگر پارامترهای موثر بر ابعاد حفره آبشستگی لحظه‌ای است.

$$\phi = f(V,D,t,t_e,H,L,P,\alpha,T,d_{50},\rho_s,\rho,\sigma_g,\nu,W,S_0) \quad (۱)$$

در این رابطه ϕمی‌تواند هریک از ابعاد حفره آبشستگی از قبیل بیشینه عمق لحظه‌ای، طول و حجم‌حفره آبشستگی لحظه‌ای باشد. با توجه به ثابت بودن شیب کانال متغیر S_0 حذف می‌شوند. ثابت- بودن سیال و مصالح بستر (غیرچسبنده، یکنواخت، کروی) نیز منجر به حذف متغیرهای $\sigma_g, \nu, \rho_s, \rho, d_{50}$ می‌شود پس متغیرهای باقیمانده به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$\phi = f\ (V\ , D\ , g\ , H\ , P\ , T\ , \alpha , t\ , t_e\ , L\ , W\ ) \quad (۲)$$

برای آنالیز ابعادی روش‌های مختلفی وجود دارد. در بین این روش‌ها، روش πباکینگهام به‌طور گسترده در تعیین پارامترهای بدون بعد مؤثر در پدیده‌های فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل کلی رابطه (۳) را با استفاده از تئوری π باکینگهام می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\phi}{T} = f\ (\frac{H}{P}, \alpha, \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{t}{t_e}, \frac{L}{W}) \quad (۳)$$

با اندکی تامل در پارامترها می‌توان دریافت (با توجه به ثابت بودن W در این پژوهش) هر دو پارامتر $\alpha, \frac{L}{W}$ دارای مفهوم یکسانی از ویژگی‌های کنگره سرریز است و با توجه به اینکه به ازای هر زاویه کنگره یک طول تاج مختص (L) به آن را خواهیم داشت پس برای اجتناب از تکرار یکی از این دو پارامتر در رابطه مذکور حذف می‌شود. همچنین برای $\frac{t}{t_e}$=1 نتایج محاسباتی ابعاد نهایی حفره آبشستگی بدست می‌آید.

٤- بحث و نتایج

در این بخش سعی در تجزیه و تحلیل روند تغییرات عمق آبشستگی لحظه‌ای و محل وقوع آن پایین‌دست سرریز به ازای مقادیر مختلف هد آب روی سرریز، زاویه کنگره و عدد فرود جریان خواهدشد.

٤-۱ بررسی تغییرات‌زمانی عمق‌آبشستگی

یکی از عوامل موثر بر روند و میزان آبشستگی حفره پارامتر $\frac{H}{P}$ است که در شکل (۱) تاثیر این پارامتر (برای نمونه به‌ازای H/P=0.1

0.3 ,) بر میزان آبشستگی و گردابه ناشی از برخورد جریان ریزشی نشان داده شده است.

شکل ۱. تاثیر پارامتر $\frac{H}{P}$ بر شکل‌گیری گردابه و انتقال ذرات

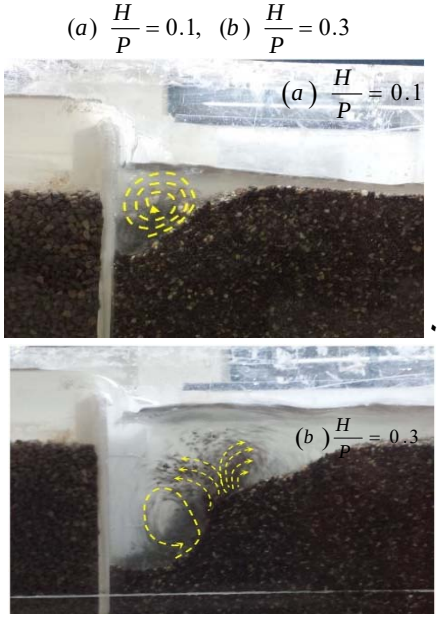


Fig. 1. The effect of parameter H/P on vortex formation and particle transport $(a)\ \frac{H}{P}=0.1,\ (b)\ \frac{H}{P}=0.3$

همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش $\frac{H}{P}$ سازوکار تشکیل گردابه‌ها متفاوت است و طبق شکل (۱-a) به ازای H/P=0.1 یکسری گردابه با جهت چرخش یکسان موجب آبشستگی می‌شود ولی با افزایش H/P مطابق شکل (۱-b) دو سری گردابه با جهت چرخش معکوس شکل می‌گیرد به گونه‌ای که گردابه‌های اصلی موجب کنده‌شدن ذرات بستر در محل بیشینه عمق آبشستگی شده و سپس به گردابه‌های فرعی ملحق می‌شود و انتقال ذرات برخاسته به بیرون از حفره توسط گردابه-های فرعی انجام می‌شود. پژوهشگرانی مانند بورمن و همکاران (۱۹۹۱) و گوان و همکاران (۲۰۱٤) با بررسی الگوی جریان و آبشستگی پایین‌دست سرریزها به این سازوکار اشاره کرده‌اند [۱۷، ۱۸].

در شکل (۲) تغییرات زمانی عمق‌آبشستگی سرریزهای 15^0 ، 22.5^0و 30^0 به‌ازای H/Pهای مختلف ارائه شده است.

شکل ۲ . تاثیر H/P بر روند تغییرات زمانی عمق آبشستگی در سرریزهای

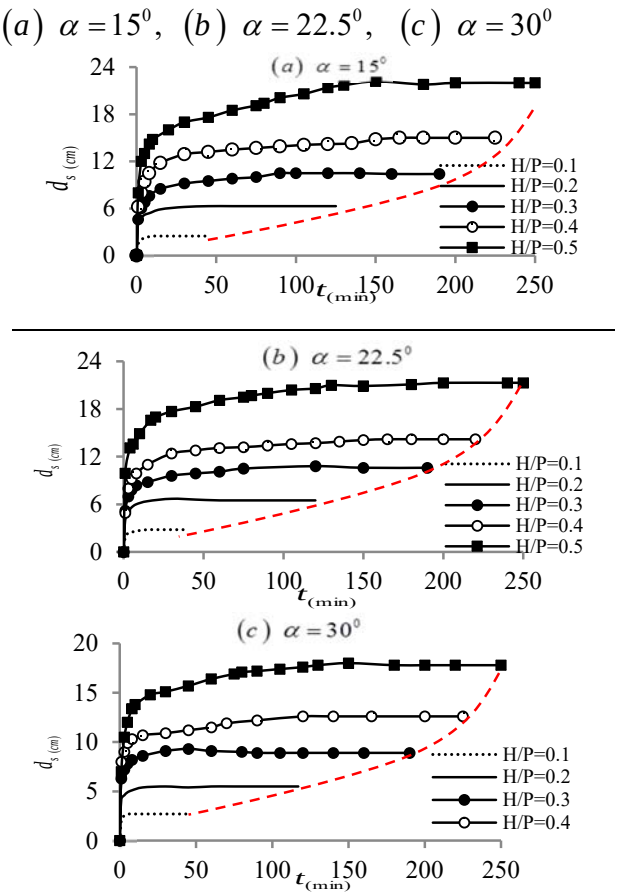


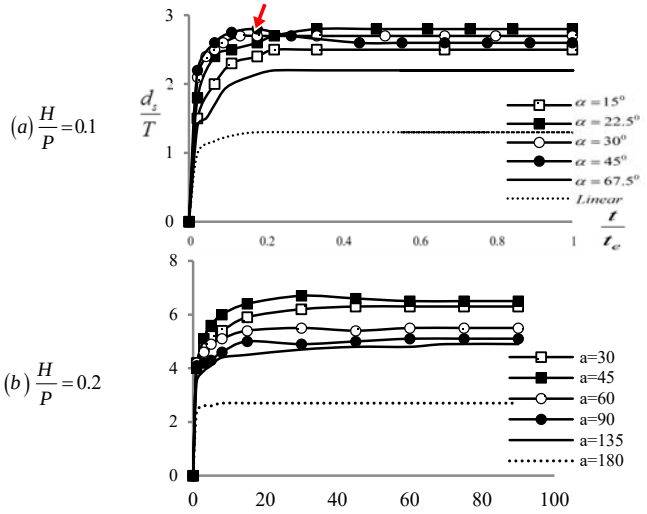
Fig. 2. The effect of $\frac{H}{P}$ on temporal variation of scour depth in Weir $(a)\ \alpha=15^0, (b)\alpha=22.5^0, (c)\ \alpha=30^0$

همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در کلیه آزمایش‌ها با گذشت زمان و توسعه بیشتر ابعاد حفره فرآیند انتقال ذرات به پائین‌دست بشدت کند می‌شوند و تنها تفاوت آنها در زمان به تعادل رسیدن حفره است. به شکلی که با وجود افزایش۵ برابری H/P عمق آبشستگی نهایی حدود ۱۲ برابر و افزایش ٦ برابری زاویه کنگره نیز منجر به کاهش ۷۰ درصدی عمق آبشستگی می‌شود منتهی تغییرات زمانی عمق آبشستگی لحظه‌ای دارای روندی تقریباً مشابه است. به گونه‌ای که در کلیه آزمایش‌ها نرخ آبشستگی در لحظات ابتدایی شدیدتر بوده و حدود ۸۰ درصد توسعه عمق آبشستگی در ۱۰ درصد ابتدایی آزمایش اتفاق می‌افتد.

زوایه کنگره سرریز از پارامترهای موثر بر آبشستگی است که در شکل (۳) روند تغییرات‌زمانی عمق آبشستگی

پایین‌دست سرریز با زاویه کنگره مختلف به ازای H/Pهای یکسان ارائه شده است.

شکل ۳. تغییرات زمانی عمق آبشستگی به ازای زوایای مختلف در $(a)\frac{H}{P}=0.1,\ (b)\frac{H}{P}=0.2,(c)\frac{H}{P}=0.3,(d)\frac{H}{P}=0.4,(e)\frac{H}{P}=0.5$



$(c)\frac{H}{P}=0.3$

$(d)\frac{H}{P}=0.4$

$(e)\frac{H}{P}=0.5$

Fig. 3. Temporal variation of scour depth under different α at $(a)\frac{H}{P}=0.1,\ (b)\frac{H}{P}=0.2,(c)\frac{H}{P}=0.3,(d)\frac{H}{P}=0.4,(e)\frac{H}{P}=0.5$

نتایج نشان می‌دهد که به ازایH/P یکسان مقادیر عمق آبشستگی لحظه‌ای سرریزهای با زوایای مختلف نزدیک به هم هست و همواره بیش از آبشستگی پایین‌دست سرریز خطی مستقیم است. همچنین با دقت در روند برخی از نمودارها (به ویژه ۳-e) نوساناتی در روند تغییرات عمق آبشستگی لحظه‌ای مشاهده می‌شود که این نوسانات نشانگر کاهش عمق آبشستگی لحظه‌ای در بعضی از بازه‌های زمانی آزمایش است و در برخی از آزمایش‌ها عمق آبشستگی نهایی اندکی کمتر از بی عمق آبشستگی لحظه‌ای است که دلیل آن می‌تواند وجود ذرات رسوب معلقی باشد که گردابه‌ها قادر به انتقال آنها به پائین‌دست نشده‌اند و با اتمام آزمایش این ذرات معلق دوباره نشست کرده و باعث کاهش حدود ۵ درصدی عمق تعادلی آبشستگی نسبت به حداکثر لحظه‌ای می‌شوند. همچنین با دقت در نتایج شکل (۳-a-e) می‌توان دریافت که زمان تعادل عمق آبشستگی برای سرریزها با زوایای کنگره مختلف تقریباً برابر است. با توجه به اینکه نمودارها در هر شکل به ازای H/P یکسان و زاویه کنگره مختلف است بیانگر این است که زاویه کنگره در مقایسه با H/P اثر کمتری بر زمان تعادل حفره دارد.

۴-۲ ارائه رابطه تجربی برای تخمین عمق آبشستگی لحظه‌ای و زمان تعادل

با توجه به زمان‌بر بودن فرآیند آبشستگی، انتخاب معیاری مناسب برای تعیین زمان تعادل حفره و عمق آبشستگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بهترین روش برای تعیین زمان تعادل حفره استفاده از توصیه‌های سایر پژوهشگران فعال در این حوزه و بر اساس مشاهده و تجربه‌های آزمایشگاهی است. در این پژوهش برای تعیین زمان تعادل عمق آبشستگی سعی شده از معیار ملویل استفاده شود. طبق این معیار، زمان تعادل مدت زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در ۲۴ ساعت به کمتر از ۵ درصد ارتفاع سرریز برسد پس با توجه به شرایط آزمایشگاهی و مدل سرریز در این پژوهش، زمان تعادل مدت زمانی که تغییرات عمق آبشستگی در ۶ ساعت متوالی بیش از یک میلی‌متر نباشد در نظر گرفته شد [۱۹].

در شکل (۴) روند زمان‌تعادل عمق آبشستگی به‌ازای $\frac{H}{P}$ های مختلف ارائه شده‌است.