



تشریح پرش هیدرولیکی به عنوان مستهلک کننده انرژی

محمد رضا رئیسی دهکردی^{*}، رضا فغانی^۲، شهرزاد مدیری^۳

^{۱*} دانشجوی دکتری، مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده عمران واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(mohamadreza.raeisi.d@gmail.com)

^۲ دانشجوی دکتری، مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده عمران واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده عمران واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱)

چکیده

برای جلوگیری از خسارات ناشی از انرژی فوق العاده آب در سرعت های فوق بحرانی و نیز به منظور از بین بردن انرژی اضافی سینتیک موجود در چنین آبی، عموماً لازم است از سازه های خاصی به نام انرژی گیرنده (Energy Dissipators) که در پایین دست جریان ساخته میشود استفاده نمود. این گونه سازه ها علاوه بر از بین بردن انرژی آب، وسیله ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی (Control of Hydraulic Jump) و بوجود آوردن شرایط جهت وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص نیز به شمار میرود. در این پژوهش که به روش تحقیقی توصیفی گردآوری شده است، پس از معرفی و شناخت پرش هیدرولیکی و حوضچه آرایش به تحقیقات در رابطه با نحوه آرایش هندسی حوضچه های آرامش پرداخته است و در نهایت سه نسبت متفاوت گسترش و پنج ارتفاع متفاوت لبه های سرریز مورد بررسی قرار گرفتند.

کلمات کلیدی

پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، جریان رودخانه ای، آرایش هندسی، عدد فرود.



Description of Hydraulic Jump as a Waste of Energy

Mohammadreza Raeisi Dehkordi ^{1*}, Reza Faghani ², Shahrazad Moderi ³

^{*1} Ph.D. Candidate, Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (mohammadreza.raeisi.d@gmail.com)

² Ph.D. Candidate, Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Rodhan Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Ph.D. Candidate, Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Shahr-Quds Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Date of received: 13/11/2022, Date of accepted: 11/05/2023)

ABSTRACT

In order to prevent damages caused by the extraordinary energy of water at supercritical speeds and to eliminate the additional kinetic energy in such water, it is generally necessary to use special structures called (Energy dissipators) that are made downstream. In addition to removing water energy, these structures are also a mean of controlling and restraining hydraulic jump and creating conditions for its occurrence in a specific location. In this research, which has been compiled by descriptive research method, after introducing and recognizing hydraulic jump and resting basin, researches on the geometric arrangement of resting ponds were investigated and finally three different expansion ratios and five different heights of overflow edges were investigated.

Keywords:

Hydraulic jump, Stilling basin, River flow, Geometric arrangement, Froude number.



۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبه‌رو هستیم و عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی. چنانچه آب در قسمتی دارای حالت فوق بحرانی بوده و بنا به مشخصات و موقعیت کانال بخواهد تغییر حالت دهد، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل توجهی افزایش یافته و ضمن افت انرژی محسوس از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می‌گردد. این پدیده یکی از پدیده‌های مهم در کانال‌های باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد. پرش هیدرولیکی در کانال‌های باز دارای کاربردهای فراوانی است از جمله:

۱. کاهش انرژی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و سایر سازه‌های هیدرولیکی و نهایتاً محافظت پایین‌دست.
۲. ترمیم و افزایش سطح آب در کانالها به منظور پخش آب.
۳. افزایش دبی خروجی از زیر دریچه‌ها با افزایش ارتفاع مؤثر دریچه.
۴. کاهش فشار بالابرنده در زیر سازه‌ها با افزایش عمق آب در دامنه سازه.
۵. مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب.
۶. هوادهی جریانها و کلرزدایی فاضلاب.
۷. جدا نمودن هوای محبوس از جریان‌های کانال‌های باز دایروی.

۲- انواع پرش هیدرولیکی

از آنجایی که عدد فرود در مقاطع اولیه پرش هیدرولیکی بیانگر وضعیت کلی پرش تشخیص داده شده است، انواع پرش هیدرولیکی نیز بر مبنای عدد فرود طبقه‌بندی می‌شود.

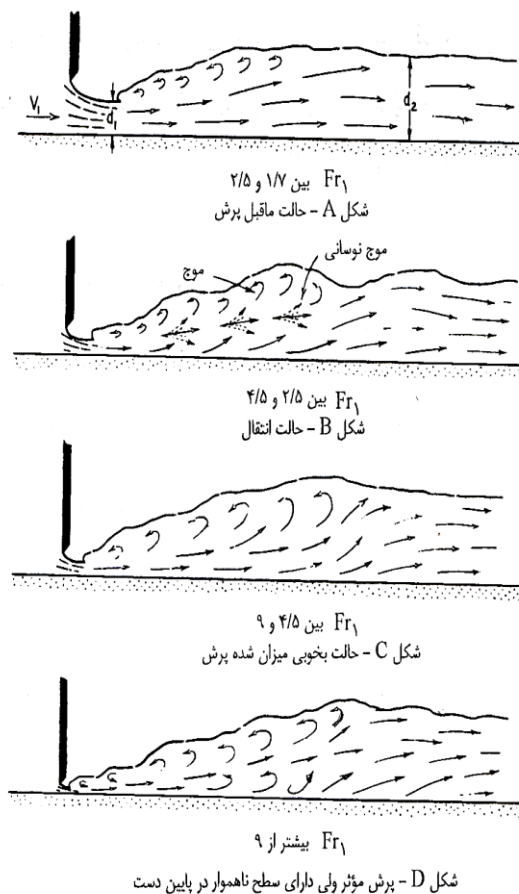
۱- به‌ازای $Fr1 < 1$ پرش موجی شکل است. در این پرش اختلاف کمی بین $y1$ و $y2$ وجود داشته و افت انرژی نیز بسیار محدود می‌باشد. باتوجه به این امر موج به وجود آمده دارای پیشانی مشخص نخواهد بود و تنها تلاطم مختصر حاصله در سطح آب میتواند این نوع جریان را از جریان بحرانی متمایز سازد.

۲- به‌ازای $Fr1 < 7/1 > 2/5$ پرش ناقص تشکیل شده و پرش ضعیف است. اگرچه پیشانی موج شکسته است اما نسبتاً آرام بوده و تنها به وسیله ی آشفتگی‌های سطحی مشخص می‌گردد. در این حالت سرعت در تمامی مقطع تقریباً یکنواخت و مقدار افت انرژی کمتر از ۲۰٪ است.

۳- به‌ازای $Fr1 < 5/2 > 4/5$ نوسانات شدیدی در سطح آب ایجاد می‌شود و تا فاصله‌ی دور ادامه مییابد. مهارکردن این نوع پرش بسیار مشکل است و پرش به پرش نوسانی یا ضربهای معروف می‌باشد. عمدتاً در سازه‌های کوتاه اتفاق می‌افتد و موج‌های نوسانی به وجود آمده ممکن است تا مسافت‌های طولانی (کیلومترها) در پایین‌دست ادامه یابند و باعث خرابی سازه‌های پایین‌دست شوند.

۴- به‌ازای $Fr1 < 5/4 > 9$ پرش به‌صورت کامل و بدون نوسانات شدید در سطح آب تشکیل می‌گردد. کنترل این نوع پرش نسبتاً آسان است و به نام پرش دائمی معروف است. این نوع پرش که به پرش ساکن نیز معروف است، پرش حاصله شدید اما پایدار و در یک منطقه محصور می‌باشد.

۵- به‌ازای $Fr1 < 9$ پرش از نوع قوی بوده و موانع قوی برای مهارکردن آن لازم است. در این پرش مقدار $y1$ نسبتاً کم و ارتفاع موج قابل‌ملاحظه بوده و طول پرش نیز تقریباً نامشخص است.



شکل ۱: انواع پرش هیدرولیکی در کانال‌های افقی.

در حوضچه آرامش با مقاطع مستطیلی نسبت به مقاطع دیگر برخورد خطوط جریان کمتر، پرش هیدرولیکی آرام‌تر و محاسبات ساده‌تر است؛ لذا حوضچه‌های آرامش با مقاطع مستطیلی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. چنانچه مقطع حوضچه آرامش مستطیلی و شیب کف حوضچه در حد صفر باشد، افت انرژی در پرش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 y_1 y_2} \quad (1)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (2)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} \quad (3)$$



افت نسبی انرژی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (4)$$

در این روابط E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص در مقاطع اولیه و ثانویه و Y_1 و Y_2 به ترتیب عمق‌های اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی می‌باشد.

۲-۱- طول پرش هیدرولیکی

طول پرش هیدرولیکی برابر است با فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان. اگرچه طول پرش هیدرولیکی یکی از پارامترهای مهم در طراحی به شمار می‌رود، اما در حالت کلی قابل محاسبه از طریق تحلیل‌های ریاضی نبوده و لازم است تا در هر مورد از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده گردد. بسیاری از محققین معتقدند که در حوضچه‌های آرامش افقی که در آن‌ها هیچ‌گونه موانع پیش‌بینی نشده باشد، طول پرش به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$L_j = 6/9 \times (y_p - y_1) \quad (5)$$

چنانچه در انتهای حوضچه آرامش فقط یک دیوار سرتاسری قرار دهند، طول حوضچه کوتاه‌تر شده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_j = 5/9 \times (y_p - y_1) \quad (6)$$

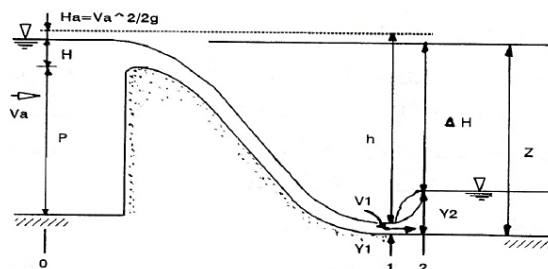
مؤسسه USBR باتوجه به انواع پرش یاد شده طول پرش هیدرولیکی را در حوضچه‌های افقی به صورت شکل زیر ارائه داده است.

۲-۲- محاسبه انرژی مخروب در پایانه سرریز

جریان آب در انتهای سرریز یا به عبارت دیگر در پنجه سرریز دارای سرعت زیاد می‌باشد که می‌توان آن را به صورت زیر نشان داد:

$$V_1 = C_v \sqrt{2gh} \quad (7)$$

در این رابطه V_1 : سرعت متوسط جریان در پنجه سرریز، C_v : ضریب سرعت که حدود ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ است و h : بار آبی مؤثر بر روی سرریز است. رابطه با نوشتن معادله برنولی بین مقاطع ۰ و به دست می‌آید.



شکل ۲: جریان در پایانه سرریز از نوع اوجی.



مؤسسه USBR رابطه زیر را بر اساس معادله سقوط آزاد و تجربه ارائه داده است:

$$V_1 = \sqrt{2g[Z - \frac{H}{\gamma}]}$$
 (۸)

برای ارزیابی قدرت تخریبی جریان در پنجه سرریز، رابطه زیر که انرژی جنبشی را در واحد زمان بیان می‌دارد، ارائه می‌شود:

$$P_1 = \frac{MV_1^2}{\gamma} = \rho Q \frac{V_1^2}{\gamma} = \gamma Q \frac{V_1^2}{2g}$$
 (۹)

که P_1 قدرت تخریبی جریان در پنجه سرریز بر حسب وات، γ وزن مخصوص آب بر حسب N/m^3 ، Q دبی جریان بر حسب m^3/s است. چنانچه سرعت جریان بعد از پرش هیدرولیکی و در مقطع ۲ با V_2 نشان داده شود، مقدار انرژی مخرب بین مقاطع ۲ و ۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$P = P_1 - P_2 = \gamma Q \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g}$$
 (۱۰)

از آنجایی که در فاصله بین مقاطع ۱ و ۲ پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد، حداکثر ۵۰ درصد انرژی مخرب پرش هیدرولیکی مستهلک شده و بقیه می‌بایست با استفاده از ایجاد موانع از آب گرفته شود.

۳- حوضچه آرامش

طبق تعریف، حوضچه آرامش یا حوضچه جهش آبی عبارت است از قسمت کوتاهی از یک کانال کف سازی شده که به صورت سازه‌های خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته می‌شود و هدف از ساختن آن استهلاک انرژی مخرب آب که با تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه انجام می‌شود، می‌باشد.

۳-۱-۱- اجزاء حوضچه آرامش

هر حوضچه آرامش، بر حسب شدت پرش، احتیاج به اجزایی دارد تا ضمن شکل دادن پرش در یک موقعیت و محل خاص، تاحدامکان از طول آن بکاهد. از جمله این اجزا عبارت‌اند از:

۳-۱-۱-۱- بلوک های پای تند آب

این بلوک ها در محل تغییر شیب و در ابتدای کف افقی حوضچه آرامش ساخته شده و هدف از ساخت آن کوتاه کردن طول و پایدار نمودن پرش می باشد.

۳-۱-۲- آب پایه

آب پایه به صورت دنداندار یا منفرد در انتهای حوضچه آرامش ساخته می‌شود. آب پایه باعث کاهش بیشتر طول پرش و کنترل موقعیت آن گردیده که در حوضچه‌های بزرگ و به جهت پخش جت دارای سرعت زیاد که به انتهای حوضچه رسیده است، به صورت دنداندار ساخته می‌شود.

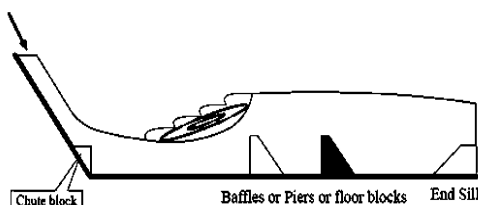


۳-۱-۳- بلوک های آرام کننده

بلوک های آرام کننده که با نام های بلوک های کف و همچنین بلوک های میانی نیز نامیده می شوند، در قسمت میانی حوضچه کار گذاشته شده و هدف مقدماتی از ساخت آن عبارت است از اتلاف انرژی به صورت متمرکز و یک جا. در سرعت های کم دیوارهای آرام کننده بسیار مؤثر هستند؛ اما آن گاه که سرعت آب رسیده به محل زیاد باشد، ممکن است این زائده مناسب نباشد و احتمالاً باعث ایجاد پدیده کایتاسیون می گردد. شکل های مختلف و چیدمان های مختلفی برای این بلوک های میانی وجود دارد که با توجه به سرعت آب از آن ها استفاده می شود.

۳-۲- اجزاء اصلی حوضچه آرامش

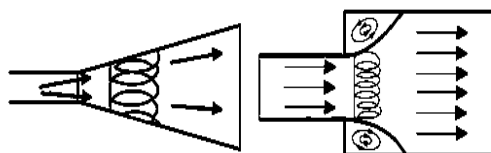
در تحقیقات انجام شده توسط پروفیسور B. S. Thandaveswara چنین آمده است که موج گیرها عمدتاً برای کوتاه کردن پرش هیدرولیکی بدون دست یافتن به سطح بیشتر آب پایاب ارائه می شوند. مقایسه با حوضچه ساده که در آن جریان ورودی آبی از طریق سطح آب پایاب به توازن کافی می رسد سایر حوضچه های آرامش دارای اجزای شوت و موج گیر هستند. آن اجزا در ته حوضچه قرار گرفته و شامل پله ها، لبه های سرریز و بلوک ها هستند. تأثیر اتلاف را می توان با یک حوضچه واگرا افزایش داد.



شکل ۳: ملحقات (موج گیرها یا موج شکن ها یا بلوک های کف) در حوضچه آرام.

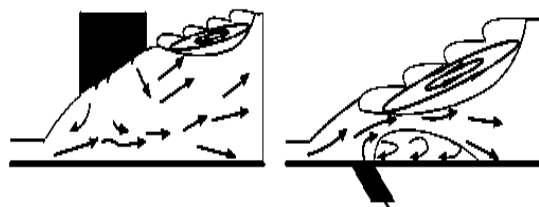


فرو رفتگی موج شکن یا پله انتهای حوضچه



گسترش تدریجی

گسترش یکباره



شکل ۴: اجزای معمول حوضچه های آرامش.



در بین طیف وسیعی از شکل‌هایی که پیشنهاد شده‌اند حوضچه با موج‌گیر لبه سرریز و حوضچه با بلوک موج‌گیر رایج‌ترین آنها هستند. این اجزا مستعد خرابی ناشی از کاویتاسیون هستند. حتی اگر سایش برای جریان رو به پایین حوضچه‌های سازه‌های جریان بیش از حد نباشد. درمورد حوضچه‌های آرامش با سرعت زیاد با احتمال سایش موج‌گیرها بایستی با فلز پوششی فولادی تعبیه شود یا یک حوضچه ساده باید عرضه گردد.

۳-۳- بررسی تأثیر بلوک‌های میانی حوضچه آرامش بر الگوی جریان در حالت پرش هیدرولیکی

پرش هیدرولیکی در شبکه‌های آبیاری و توزیع آب، در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریزها و دریچه‌ها اتفاق می‌افتد. اگر دبی، از دبی طراحی بیشتر شود، عمق پایاب بزرگ‌تر از عمق پایاب موردنیاز پرش آزاد می‌شود و پرش به شکل مستغرق شکل می‌گیرد. این شرایط برای سازه‌های هیدرولیکی با هد پایین مانند دریچه و سرریز سدهای انحرافی کوتاه به وجود می‌آید. بلوک‌های میانی از جمله سازه‌های عرضی در حوضچه آرامش هستند که برای پایدار ساختن پرش، کوتاه کردن طول آن و استهلاک بیشتر انرژی، به کار گرفته می‌شوند. عملکرد این بلوک‌ها در پرش مستغرق متفاوت از پرش آزاد است.

۳-۴- تأثیر شکل بلوک‌های میانی حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی

طی هفتاد سال گذشته پدیده پرش هیدرولیکی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و اطلاعات جامعی نیز منتشر شده است. هدف عمده این مطالعات شناخت بهتر مکانیزم پرش و ایجاد روابطی برای پیش‌بینی خصوصیات پرش نظیر طول پرش، عمق پایاب موردنیاز، میزان استهلاک انرژی، در طول پرش بوده است. برآورد دقیق این خصوصیات کمک کرده است تا سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی از نوع پرش هیدرولیکی اقتصادی‌تر و ایمن‌تر طراحی شوند. حوضچه‌های آرامش بستر مناسبی برای کنترل و مهار پرش - آبی و وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص می‌باشند. ممکن است دارای شکل هندسی متفاوت و یا حاوی ضامم اضافی نظیر بلوک‌های کف و آستانه‌ها باشند که به عملکرد مؤثرشان کمک می‌کند. همچنین تاکنون تحقیقات متفاوتی به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی صورت گرفته است و روش‌های گوناگونی برای بهبود و افزایش کارایی پرش از سوی محققین مختلف پیشنهاد شده است که می‌توان به استفاده از بلوک‌های کف، آستانه انتهایی، پله‌های مثبت یا منفی، شیب‌دار کردن کف و افزایش عرض مقطع اشاره کرد. در حوضچه‌های آرامش به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی از بلوک‌ها و ایجاد موانع در برابر جریان استفاده می‌کنند که وجود مانع در مقابل جریان باعث جدایش خطوط جریان و استهلاک بیشتر انرژی و افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی درگ می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند باعث کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی گردد بدون آنکه کاویتاسیونی رخ دهد زبری‌های کف می‌باشد [۴ و ۵]. در ادامه برخی از تحقیقاتی که توسط محققین مختلف در این زمینه صورت گرفته است، بیان می‌شود. بلانگر (۱۸۲۸) برای عمق ثانویه جهش هیدرولیکی کلاسیک در ناحیه زیربحرانی فرمول نسبت عمق‌های جهش را ارائه کرد [۵]. پوزی و هسینگ (۱۹۳۸) تأثیر شیب جانبی را بر طول جهش در حوضچه دوزنقه‌ای بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که کاهش شیب جانبی باعث کاهش طول جهش نسبت به جهش کلاسیک می‌شود [۱۲]. دیسکن (۱۹۶۱) رابطه‌های تئوری برای نسبت عمق ثانویه در مقطع دوزنقه‌ای ارائه کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش شیب جانبی، نسبت عمق ثانویه در مقطع دوزنقه‌ای در مقایسه با مقطع مستطیلی کاهش می‌یابد [۶]. تحقیقات اولیه توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) نشان داد که اگر بستر کانالی که پرش بر روی آن شکل می‌گیرد زبر باشد، عمق پایاب موردنیاز برای تشکیل پرش می‌تواند به طور مشخصی کوچک‌تر از عمق مزدوج مشابه خود در بستر صاف باشد. وی پارامتری به نام زبری نسبی $(k_e = y_1)$ تعریف کرد که در آن k_e ارتفاع معادل زبری و y_1 عمق جریان ورودی فوق بحرانی بر روی زبری‌ها است. وی نشان داد که طول غلتاب و طول پرش روی بستر زبر در مقایسه با همان پارامترها بر روی بستر صاف کاهش قابل توجهی دارند [۱۳ و ۱۴]. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی پرش آبی روی بستر موج‌دار در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که عمق مشابه آن در پرش بر روی بستر صاف



$$(D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*})$$

است. اگر D را به صورت پارامتر بی بعد عمق y_2^* تعریف کنیم، در بازه مورد بررسی، D تقریباً برابر با ۰/۲۵ به دست آمده است [۸]. همچنین آن‌ها در سال (۲۰۰۷) نتیجه گرفتند که طول پرش در بستر زبر تقریباً نصف طول متناظر آن در بستر صاف است. آن‌ها دلیل کاهش طول جهش را افزایش تنش برشی بستر بر اثر برهم کنش جریان فوق بحرانی با زبری‌های بستر توضیح دادند [۷]. ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) مطالعات خود را بر روی بسترهای دوزنقه‌ای نواری شکل انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که عمق مورد نیاز پایاب برای تشکیل جهش بر روی بسترهای زبر کمتر از y_2^* می‌باشد و مقدار را ۰/۲ برای پارامتر D به دست آوردند. همچنین نتیجه گرفتند که طول جهش کلاسیک بیش از دو برابر طول جهش در بستر زبر می‌باشد، و این طول بیشتر به فاصله تاج زبری‌ها بستگی دارد تا ارتفاع زبری‌ها [۱۰]. امید و همکاران (۲۰۰۷)، خصوصیات جهش هیدرولیکی واگرا در حوضچه آرامش دوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نیز با به کارگیری اصول پیوستگی، انرژی و مومنتم و استفاده از فرضیات ساده شونده، روابطی برای نسبت عمق ثانویه به اولیه، طول نسبی جهش ارائه گردید [۱۱]. اید (۲۰۰۷) آزمایش‌های خود را بر روی سه بستر موج‌دار سینوسی، دوزنقه‌ای و منشوری انجام داد. او نتیجه گرفت زبری نسبی و شکل موج‌ها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی عمق مزدوج نسبی ندارند. باتوجه به اینکه تراز تاج موج‌ها هم سطح کف کانال در بالادست می‌باشد، فواصل زبری‌ها به صورت گودافتادگی عمل می‌نمایند و تغییر ارتفاع آن‌ها اثر چندانی بر مشخصات جهش ندارد. وی میزان پارامتر D را برابر با ۰/۴ به دست آورد. او همچنین نتایج گزارشات قبلی مبنی بر کاهش عمق ثانویه در جهش آبی بر روی بستر زبر نسبت به عمق متناظر آن در بستر صاف را تأیید و علت آن را افزایش تنش برشی کف بر روی بستر زبر بیان کرد [۷]. ایلخانی‌پور (۱۳۸۷) با معرفی مدلی با نام مدل ایلخانی‌پور اعلام کرد مدل ایلخانی‌پور یک سد انحرافی جدید است که با تعبیه یک روزنه در بدنه سد و ترکیب جریان ورودی از روی سرریز اوجی با استاندارد USBR و جریان خروجی از روزنه، بدون استفاده از بلوک‌های حوضچه آرامش انرژی آب را تلف کرده و هم‌زمان عمل تخلیه رسوب و کاهش بار آبی روی تاج سرریز را موجب می‌شود. در این مطالعه تأثیر برخورد جریان خروجی از روزنه با جت آب ریزشی از روی دیواره سرریز و تغییر محل برخورد آن‌ها در فاصله جهش از دیواره سرریز، در دبی‌ها و عمق پایاب‌های مختلف تعیین گردید [۱۱]. گوهری و فرهودی (۲۰۰۹) آزمایش‌های خود را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند عمق ثانویه جهش بر روی سطوح زبر نسبت به سطح صاف کاهش دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها، افزایش می‌یابد. همچنین پی بردند که تغییر ارتفاع زبری‌ها و عمق اولیه پرش اثر ناچیزی بر مشخصات هیدرولیکی دارد و مقادیر تنش برشی کف در بستر زبر تقریباً ۹ برابر بستر صاف به دست آمد [۹]. شفافی بجستان و نیسی (۲۰۰۹) به بررسی مشخصات جهش آبی در حضور بلوک‌های لوزی شکل در حوضچه آرامش پرداختند و به این نتیجه رسیدند که طول جهش در مقایسه با حوضچه‌های USBR و SAF کمتر است. در این بررسی کاهش عمق ثانویه و طول جهش آبی در محدوده اعداد فرود ۴/۵ تا ۱۲ به ترتیب در حدود ۲۶٪ و ۴۰٪ گزارش شد [۱۵]. مطالعات انجام شده بر روی بستر حوضچه آرامش نشان می‌دهد که برای تعیین مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین شکل مانع‌های کف حوضچه و ابعاد و فاصله آن‌ها تحقیقاتی انجام نشده است. نتایج آزمایشگاهی حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) معیار سنجش نتایج عددی قرار گرفت و هندسه میدان جریان به صورتی ترسیم شد که بیشترین تطابق را با این مدل آزمایشگاهی داشته باشد. آزمایش‌های حبیب‌زاده و راجاراتنام (۲۰۱۲)، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آلبرتا انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها در یک فلوم به عرض ۰/۴۶۷ متر، ارتفاع ۰/۶۰ متر، و طول ۷/۵ متر و با بستر آلومینیومی و دیواره شیشه‌ای انجام شده است. در انتهای پایین دست مخزن هادی یک دریچه با بازشدگی $y_1/9$ سانتی‌متر قرار داده شده است. لبه‌های دریچه منطبق بر خطوط جریان به شکل ربع استوانه با قطر ۲۰ سانتی‌متر است تا انقباض جریان را کاهش دهد و یک جریان فوق بحرانی یکنواخت فراهم شود. یک دریچه در انتهای پایین دست قرار داده شده است تا عمق پایاب قابل کنترل باشد. بلوک‌ها در فاصله ۱۹/۱ سانتی‌متری از دریچه قرار گرفته‌اند [۹]. در مطالعه حاضر برای صرفه‌جویی در وقت تنها سه متر ابتدای کانال شبیه‌سازی شده است. همچنین برای تسریع در حل عددی، میدان حل باتوجه به تقارن موجود، کوچک‌تر در



نظر گرفته شده و حل برای ۳ بلوک انجام شد. سه نوع مدل‌سازی به ترتیب در شرایط پرش هیدرولیکی بدون بلوک به شکل جت دیواره‌ای، پرش هیدرولیکی همراه با بلوک در شرایط رژیم DSJ و پرش هیدرولیکی همراه با بلوک در شرایط رژیم RWJ انجام گرفته است. شکل شماتیک از هندسه کانال و بلوک‌ها و مشخصات مدل‌های عددی به ترتیب در شکل (۳)، شکل (۴) و جدول (۱) ارائه شده است.

۴- تحقیقات گروه مهندسی هیدرولیک ارتش آمریکا (Updated-2011)-حوضچه آرامش

در کتاب مهندسی هیدرولیک ارتش آمریکا حوضچه‌های آرامش به‌عنوان اتلاف‌کنندگان خارجی انرژی که در خروجی آبرو سرپوشیده سرریز شوت قرار دارند معرفی شده‌اند. این حوضچه‌های آرامش از طریق برخی اجزاء مانند: بلوک‌های سرریز، بلوک‌های موج‌گیر، و لبه سرریز طراحی شده که برای به‌وجودآوردن شرایط مطلوب پایاب در زمان پرش هیدرولیکی تعیین می‌شوند. بسته به طراحی خاص، حوضچه‌های آرامش در سطح دامنه‌ای از اعداد فرود از ۱/۷ تا ۱۷ عمل می‌کنند همان‌طور که در جدول (۱) خلاصه شده‌اند:

جدول ۱. دامنه کاربردی عدد فرود برای حوضچه‌های آرامش

حوضچه آرامش	کمترین عدد فرود اولیه	بیشترین عدد فرود اولیه
USBR III	۵/۴	۱۷
USBR IV	۵/۲	۵/۴
SAF	۷/۱	۱۷

انتخاب حوضچه آرامش به چندین عامل شامل: محدودیت‌های هیدرولیکی، ساخت‌پذیری، اندازه حوضچه، و هزینه‌ها بستگی دارد. در این متن تلاش شده است که مقایسه‌ای بین اندازه حوضچه‌ها و نوع پرش هیدرولیکی ارائه گردد. جدول (۲) نتایج بررسی‌ها را با عدد فرود، ارتفاع آب در پایاب در انتهای طول حوضچه همراه با طول حوضچه و عمق حوضچه بیان می‌نماید. در این بررسی، حوضچه آرامش SAF منجر به کوتاه‌ترین و سطحی‌ترین حوضچه می‌گردد.

جدول ۲. بررسی مقایسه ای ابعاد حوضچه‌های آرامش (سیستم متریک).

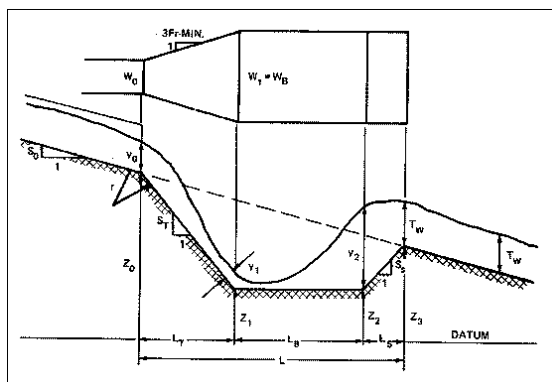
نوع حوضچه	عدد فرود	عمق پایاب	طول حوضچه	عمق حوضچه
Free jump	۶/۷	۱/۳	۷/۳۳	۸/۴
USBR III	۹/۶	۳	۶/۲۰	۸/۳
USBR IV	۸	۵/۳	۱/۳۸	۵/۵
SAF	۱/۶	۴/۲	۴/۱۲	۷/۲

جزئیات و مراحل آزمایش طراحی به شرح ذیل می‌باشد:

آزمایش بر روی یک جعبه به ابعاد ۸*۳ (متر) به‌عنوان آبرو با دبی طراحی ۰.۱۱ مترمکعب بر ثانیه که در آن حوضچه دارای پهنای ثابت و معادل پهنای آبرو می‌باشد انجام پذیرفته است. عدد فرود خارج از دامنه توصیف است، اما برای مقایسه متناسب با USBR IV در نظر گرفته شده است. ارتفاع آب پایاب بر عمق حوضچه تأثیر می‌گذارد. سرعت ترک هر یک از این حوضچه‌ها به ارتفاع آب در پایاب بستگی دارد. همچنین در این کتاب آمده است که: بر اساس تحقیقات انجام شده بالا بودن عدد فرود در ورودی حوضچه، باعث پرش هیدرولیکی مؤثرتر و حوضچه به‌دست‌آمده کوتاه‌تر می‌شود؛ بنابراین برای افزایش دادن عدد فرود، هنگامی که آب از آبروی سرپوشیده به حوضچه جریان پیدا می‌کند، می‌توان در حوضچه آرامش یک فرورفتگی ایجاد نمود، همان‌طور که در



شکل (۱) نشان داده شده است. فرورفتگی عمق، یا افزایش انرژی پتانسیل، با وجود جریان به انرژی جنبشی تبدیل می‌شوند. نتیجه این است که عمق کاهش پیدا کرده و سرعت و عدد فرود افزایش پیدا می‌کنند.



شکل ۵: تعریف طرح برای حوضچه آرامش.

عدد فرود برای تعیین کردن کارآمدی و ارزیابی متناسب بودن حوضچه‌های آرامش جایگزین به کار برده می‌شوند، همان‌طور که در جدول ۱ توصیف شده و در معادله (۱۱) تعریف شده است.

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (11)$$

در رابطه فوق، عدد فرود، V_1 سرعت ورودی به حوضچه، y_1 عمق اولیه و یا ورودی به حوضچه و g شتاب جاذبه می‌باشد. برای سرعت و عمق ورودی حوضچه، معادله موازنه انرژی از خروجی آبروی سرپوشیده به حوضچه نوشته شده است با جایگزین کردن $Q(Y_1WB)$ برای V_1 . معادله ۱۲ دارای سه مجهول Y_1, WB, Z_1 می‌باشد. عمق y_1 را می‌توان از طریق آزمون و خطا تعیین کرد اگر WB, Z_1 فرض شده باشند WB بایستی به پهنایی محدود شود که یک فواره می‌تواند به طور طبیعی در فاصله شیب L داشته باشد.

$$W_B \leq W_0 + \frac{2L_T \sqrt{S_T^2 + 1}}{3Fr_0} \quad (12)$$

در رابطه فوق، L_T طول انتقال از خروجی آبرو به حوضچه، S_T شیب انتقال، Fr_0 عدد فرود خروجی. از آنجایی که جریان فوق بحرانی است، آزمایش مقدار y_1 بایستی از نزدیک صفر شروع شده و تا زمانی ادامه پیدا کند که دبی طراحی (Q) به دست بیاید. از عمق y_1 یافتن عمق ثانویه، y_2 ، با استفاده از معادله پرش هیدرولیکی نتیجه می‌شود:

$$y_2 = \frac{cy_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (13)$$

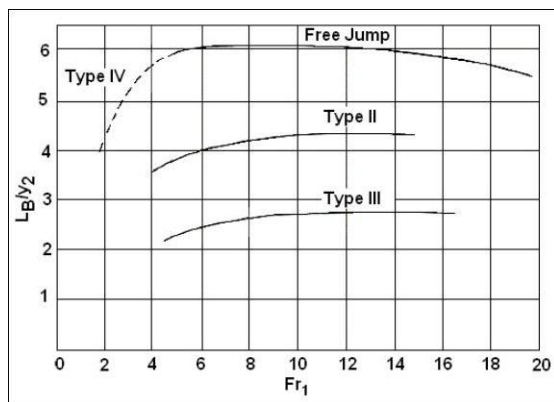
Fr_1 عدد فرود اولیه، C نسبت آب پایاب به عمق ثانویه، y_1 عمق اولیه‌ی پرش، y_2 عمق ثانویه و برای یک پرش آزاد هیدرولیکی $c=1$ می‌باشد. برای اینکه پرش اتفاق بیفتد، مقدار $Y_2 + Z_2$ بایستی معادل یا کمتر از $TW + Z_3$ باشد همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است.



اگر Z_2+Y_2 بزرگتر از Z_3+TW باشد عمق حوضچه باید کاهش پیدا کرده و فرآیند آزمون و خطا تا زمانی تکرار شود که آب پایاب کافی برای ایجاد پرش وجود داشته باشد. برای انجام دادن این کنترل، Z_3 و طولهای حوضچه بایستی تعیین گردند. طول انتقال از طریق معادله ۱۴ محاسبه می‌گردد.

$$L_T = \frac{Z_0 - Z_1}{S_T} \quad (14)$$

در رابطه فوق، S_T شیب انتقال ورودی حوضچه، L_T طول انتقال از خروجی آبرو تا انتهای حوضچه و طول حوضچه (L_B)، به نوع حوضچه، عمق جریان ورودی Y_1 ، عدد فرود ورودی FR_1 ، بستگی دارد. شکل ۶ این روابط را برای پرش آزاد هیدرولیکی همانند چندین حوضچه آرامش USBR توصیف می‌کند.



شکل ۶: طول پرش هیدرولیکی در کف افقی.

طول حوضچه از کف تا لبه سرریز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_S = \frac{L_T(S_T - S_0) - L_B S_0}{S_S + S_0} \quad (15)$$

در رابطه فوق، L_S طول حوضچه از ته حوضچه تا لبه سرریز خروجی حوضچه، S_S شیب خروجی حوضچه، پس بلندی ورودی تا پایاب کانال از طریق زیر محاسبه می‌گردد:

$$Z_3 = L_S S_S + Z_1 \quad (16)$$

در رابطه فوق، Z_3 بلندی حوضچه در لبه خروجی حوضچه،

۴-۱- تحقیقات پروفیسور تانداوسوارا (۲۰۱۰) - رابطه عمق پایاب و عمق ثانویه

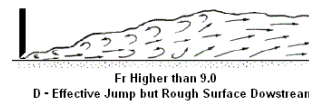
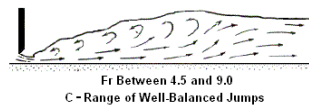
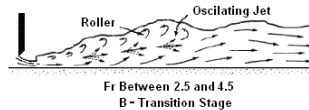
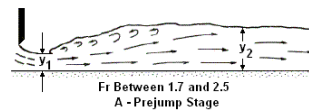
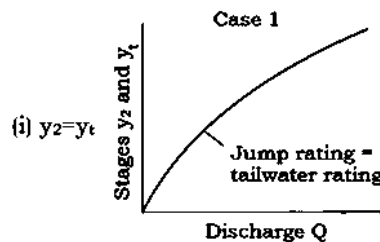
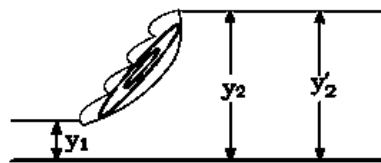
پروفیسور B. S. Thandaveswara عضو انجمن تکنولوژی هندوستان در ارتباط با رابطه عمق پایاب و عمق ثانویه در حوضچه آرامش چنین بیان می‌کند که: در یک حوضچه آرامش انرژی زیاد مکانیکی هیدرو اساساً به گرما، قطره و صدا تبدیل می‌شود. حوضچه آرامش یک سازه هیدرولیکی است که بین جریان خروجی یک سد و آب پایاب قرار گرفته است. برای جایی که باید جریان‌های اضافی را به طور ایمنی بازگرداند. حوضچه آرامش سازه‌ای است که در آن پرش هیدرولیکی گسترش پیدا کرده و به طور کلی طراحی

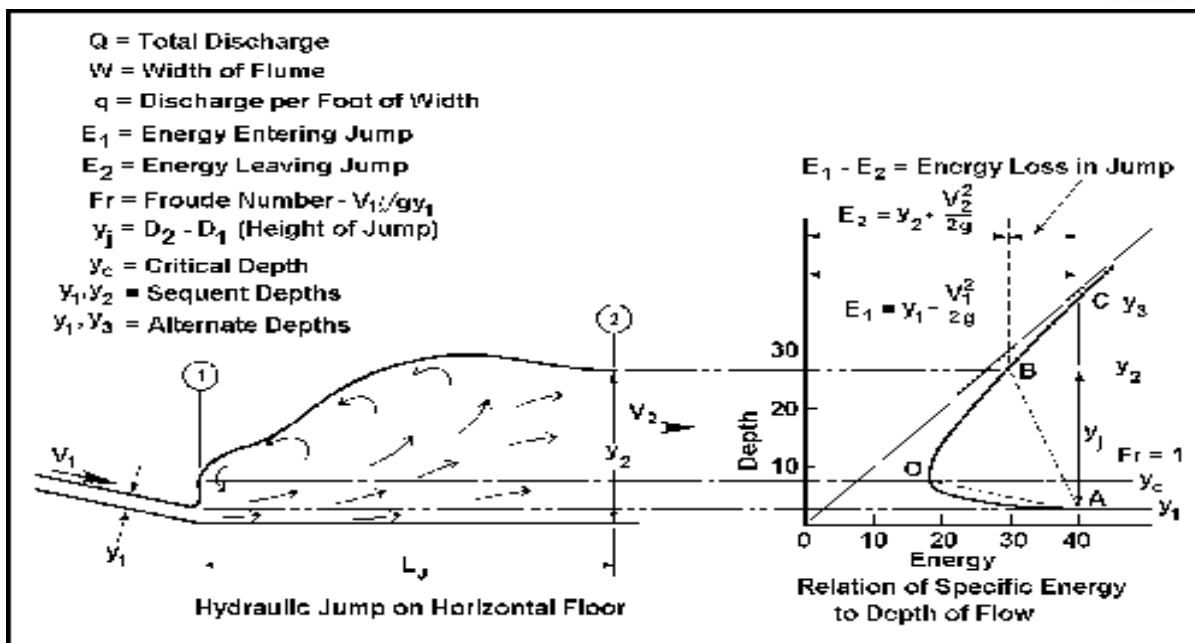


آن می‌بایست از نظر اقتصادی، طولی، سطح آب پایاب و آبشستگی بررسی شود. همچنین پروفیسور B. S. Thandaveswara انتخاب حوضچه آرامش را به عوامل ذیل وابسته می‌داند:

- شرایط جریان ورودی
- ویژگی‌های آب پایاب
- پتانسیل آب شکستگی
- تجربیات شخصی

همچنین بیان می‌کند که ارتفاع انرژی ورودی بایستی بین ۱۰ تا ۳۰ متر باشد، تا عملکرد حوضچه موفقیت‌آمیز باشد و مشکلات درمورد حوضچه‌های آرامش می‌توانند برای سرعت ورودی زیاد به وقوع بپیوندند. عدد فرود کمتر از (۲/۵) همراه است با شرایط نامتقارن ورودی، جریان ورودی یا جریان خروجی غیرخطی یا سطح اندک آب پایاب، به‌طور کلی حداقل سطح آب پایاب بایستی برابر با عمق ثانویه باشد. تعدادی از حوضچه‌های استاندارد موجودند که به‌طور گسترده‌ای توسط پیترکا (۱۹۵۸) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، رابطه بین آب پایاب و عمق ثانویه در شکل ۷ نشان داده شده است. بررسی دامنه دبی زمانی که $y_2 > y_t$ برای دامنه کلی دبی‌ها، آستانه حفاظت شده، لبه‌های سرریز برای ایجاد پرش درون حوضچه به کار برده می‌شوند.





شکل ۷: رابطه بین عمق پایاب y_2 و عمق ثانویه y_1 .

۵- تحقیقات گروه مهندسی هیدرولیک ارتش آمریکا (Updated-2011) - پرش هیدرولیکی

هنگامیکه عدد فرود بین ۱ و ۷/۱ باشد تنها تلاطم جزئی در سطح آب بوجود خواهد آمد و عمق پائین دست حدود دو برابر عمق ورودی و سرعت خروجی حدود نیمی از سرعت بالادست خواهد بود. در جریان با عدد فرود از ۷/۱ تا ۵/۲، پیش از پرش اتلاف انرژی بسیار اندک می‌باشد و سطح آب کاملاً بی‌تکان بوده و سرعت در سرتاسر سطح یکپارچه می‌باشد و اتلاف انرژی در حدود ۲۰ درصد است. برای اعداد فرود بین ۵/۲ تا ۵/۴ پرش نوسانی رخ داده و این امر موجب خوردگی و فرسایش پایین دست می‌شود. در اعداد فرود ۵/۴ تا ۹ یک پرش خوب و پایدار بوجود می‌آید و اتلاف انرژی ۴۵ تا ۷۰ درصد می‌باشد. در اعداد فرود بزرگ‌تر از ۹ پرش قوی همراه با مشکلات فرسایش پایین دست اتفاق می‌افتد.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

یک بررسی تجربی انجام شد تا تأثیر لبه سرریز نهایی در حوضچه آرامش ناگهان گسترش یافته بر روی پایین دست آبستگي حوضچه را مورد ارزیابی قرار دهد. سه نسبت متفاوت گسترش و پنج ارتفاع متفاوت لبه‌های سرریز مورد بررسی قرار گرفتند. الگوی جریان و آبستگي هر دو مورد بحث قرار گرفتند. درحالی‌که توسط پارامترهای جریان و حوضچه تحت تأثیر قرار گرفتند. چنین درک شد که وجود لبه سرریز نهایی الگوی جریان بالادست لبه سرریز اندکی تغییر و فقط الگوی پایین دست لبه سرریز نهایی را به شدت تغییر می‌دهد. آبستگي پایین دست حوضچه‌های آرامشی که به طور ناگهانی گسترش پیدا کرده‌اند با لبه سرریز نهایی نامتقارن می‌باشد. جنبه آبستگي و فرایند رسوب سازی به عدد فرود، ارتفاع لبه سرریز نهایی و ضریب گسترش بستگی دارد. هنگامی که لبه سرریز نهایی یک الزام است ارتفاع آن بایستی به دقت طراحی شود تا الگوی آبستگي را ارتقا داده و حداقل عمق آبستگي پایین دست حوضچه را به وجود بیاورد. این ارتفاع نبایستی بیشتر از ارتفاع غالب دریچه باشد تا از انحراف نواره اصلی جریان درست در پایین دست لبه سرریز ممانعت به عمل آورد و در نتیجه از یک حفره آبستگي کاملاً نامتقارن و ناقص ممکن است جلوگیری به عمل آید. از



لحاظ عملی استفاده از لبه سرریز نهایی در حوضچه‌های آرامشی که یکباره گسترش یافته‌اند برای کاهش دادن عمق آبشستگی توصیه نمی‌گردد. اما دور کردن حفره آبشستگی از حوضچه که باعث افزایش ایمنی سازه می‌شود ممکن است سودمند باشد. معادله ۱۰-۱ برای ارزیابی حداکثر ضریب عمق آبشستگی شرح و بسط یافته است. برخی از نمودارهای حاصله در ذیل آمده است. رودخانه‌ها به طور معمول با استفاده از سرریزها و سدها کنترل می‌شوند. جریان در سطح این سازه‌ها دارای پتانسیل قابل توجهی برای آبشستگی حتی برای ارتفاعات نسبتاً پایین می‌باشد. بنابراین حوضچه‌های آرامش به طور رایجی برای حفظ انرژی جریان‌ها از آبشستگی بستر رودخانه ساخته می‌شوند. اما سطح متلاطم جریان درون آنها به‌طور کلی زیاد بوده و می‌تواند آبشستگی بستر محلی را گسترش دهد. این مقاله با سیر تکاملی موقتی آبشستگی محلی پایین دست حوضچه‌های آرامش کم ارتفاع سروکار دارد به همین منظور آزمایش‌هایی در یک کانال مستطیلی با عرض ۱ متر انجام شدند. فواره‌های آزاد سرریز از طریق سرریزهای اوجی (پیوند) به وجود آمده و در یک حوضچه آرامش غوطه‌ور شدند. آزمایش‌ها (run) اضافی نیز با یک آستانه افقی بدون لبه سرریز نهایی انجام شدند همان طوری که به طور معمول در تاریخچه انجام شده است چهار رسوب متفاوت نسبتاً یکپارچه برای بستر روان در میان گوی‌های سربی که به طور عمیقی وابستگی آبشستگی محلی به عدد فرود را نشان می‌دهند و شن برای آزمایش بهتر تأثیر اندازه دانه رسوب مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها با مدت زمان طولانی عمدتاً برای به دست آوردن مقدار دقیق حفره آبشستگی و همچنین شرایط شبه تعادلی انجام شدند بر اساس داده‌های تجربی ویژگی‌های برجسته تکامل شکل پذیری بستر عرضه شدند تأثیرات اصلی لبه سرریز نهایی بر فرایند آبشستگی نیز مشخص شدند.

۷- مراجع

- ۱- حسینی، س. م.، ابریشمی، ج.، ۱۳۹۳. **هیدرولیک کانال‌های باز**، انتشارات دانشگاه امام رضا. ویرایش دوم. چاپ سی و سوم، ۶۱۵ص.
- ۲- اشتیاق حسن نژاد، ف.، فرسادی زاده، د.، حسین زاده دلیر، ع. و عباسپور، ا.، ۱۳۸۴، **بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در پایین دست سازه آرام کننده جامی مستغرق دندانه دار**.
- ۳- بیرامی، م. ک.، ۱۳۷۶، **سازه‌های انتقال آب**، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۶۲
- ۴- پارسا مهر، پ.، حسین زاده دلیر، ع.، فرسادی زاده، د.، عباسپور، ا.، ۱۳۸۴، **تأثیر آب پایه بر طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب معکوس**.
- ۵- پایگاه اطلاع رسانی شبکه آبیاری فرضی (پاشاد). معرفی شبکه‌های آبیاری تحت پوشش
- ۶- پارس مهر، م. ۱۳۹۰، **بررسی تأثیر سری صفحات مستغرق در جلوگیری و کنترل آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی آبراهه**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.
- ۷- تائبی، ح.، بهروزی راد، ر.، فتحی مقدم، م.، ۱۳۸۸، **کنترل آبشستگی در پایاب فرسایش یافته حوضچه آرامش بوسیله سنگچین (مطالعه موردی سد نمرود)**، هشتمین کنگره بین المللی عمران. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۸- سایت روابط عمومی سازمان آب و برق خوزستان، ۱۳۸۴، **بزرگترین سد تنظیمی کشور**
- ۹- سازمان مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۵، **راهنمای روش‌های آبشستگی موضعی**.
- ۱۰- شفاعی بجستان، م.، مرادلو، ج.، تفرج نورو، ع.، و اتحاد، ع.، ۱۳۸۴، **کنترل و ترمیم آبشستگی پایین دست سدهای انحرافی در شرایط جریان**، کارگاه آموزشی- تخصصی کنترل فرسایش در رودخانه‌ها، انجمن هیدرولیک ایران.
- ۱۱- شفاعی بجستان، م.، ۱۳۷۴، **مروری بر مبانی و مکانیزم فرسایش و نظریه‌های مختلف فرسایش سطحی**، کارگاه آموزشی- تخصصی کنترل فرسایش در رودخانه‌ها، انجمن هیدرولیک ایران.



- ۱۲- شفاعی بجستان، م، ۱۳۸۴، هیدرولیک انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ویرایش دوم. چاپ سوم، ۴۷۰ ص.
۱۳- رستمی، ف، ۱۳۸۶، مطالعه عددی جریان زیر و فوق بحرانی از دریاچه سد به سرریز تنداب منتهی به حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده عمران.
۱۴- ریاحی مدوار، ح، سامانی، م، حقیقی پور، ج، ۱۳۸۵، تخمین ابعاد حفره آبستگي پایین دست سرریزهای تنظیم و کنترل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین المللی ملی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز : اهواز. ۲۴ تا ۲۶ بهمن.

- 15-Thandaveswara, B. S., 2010, **Sequent Depth Tail Water Relationship**, Stilling Basin.
16-Oliveto, G., and Comuniello, V., 2009, **Local Scour Progress Downstream of Low-Head Stilling Basins**, Department of Environmental Engineering and Physics, University of Basilicata, Potenza, Italy .
17-Saleh, O. K, and Negm, A. M., 2003, **Effect of end sill on scour characteristics downstream of sudden expanding stilling basins**, Proc. of 6th. Int. River Engineering Conf., 28-30 Jan 2003, Shahid-Chamran University, Ahvaz, Iran.
18-U.S. Department of transportation Federal Highway Administration, 2011, (**Chapter 6: Hydraulic Jump, Chapter 8: Stilling Basins**), Updated 2011. Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. Hydraulic Engineering Circular Number 14, Third Edition.
19-Azamathulla, H. M., Ghani, A. A., and Azazi Zakaria, N., 2007, **ANFIS-based approach to predicting scour location of spillway**, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 162, 399–407.
20-Edward, J. Hickin, 2022, **The momentum equation and the hydraulic jump**, River Hydraulics Channel Form.
21-Graf W. H., and Istiarto, I., 2001, **Flow pattern in the scour hold around a Cylinder**, Journal of hydraulic Reaserch, 40, 1, 13-20.