



تحلیل و بررسی استفاده از بلوک بر عملکرد حوضچه‌های آرامش

محمد مردانی¹، حسن رحیم زاده^{2*}، حامد سرکرده³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 3- محقق پسا دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
 * تهران، صندوق پستی 4413-15875@aut.ac.ir rahimzad

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 07 بهمن 1393
 پذیرش: 17 اسفند 1393
 ارائه در سایت: 29 فروردین 1394
 کلید واژگان:
 حوضچه آرامش
 استهلاک انرژی
 پرش هیدرولیکی
 بلوک
 آبستگي

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی میزان استهلاک انرژی و آبستگي پایین دست حوضچه در حضور بلوک و عدم حضور آن و معرفی حوضچه بهینه در شرایط مختلف پرداخته است. در این تحقیق تلاش شده است نگاهی جامع به موضوع بلوک در حوضچه‌های آرامش شود و زوایای مختلف تاثیر آن در استهلاک انرژی و همچنین آبستگي پایین دست حوضچه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. نتایج محققینی که در دهه اخیر بر روی استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش کار کرده‌اند گردآوری شده و در دو گروه دسته بندی گردیده است. در گروه اول از بلوک و موانع استفاده نشده و تاثیر تغییر شرایط هندسی حوضچه بر استهلاک انرژی و آبستگي پایین دست معیار ارزیابی قرار گرفته است. در گروه دوم، با استفاده از بلوک‌های مختلف در طول حوضچه، میزان استهلاک انرژی و آبستگي پایین دست مشخص گردیده است. بررسی داده‌های موجود نشان می‌دهد با توجه به هندسه حوضچه آرامش و نحوه چپش بلوک و عدد فرود، استفاده از بلوک می‌تواند به طور میانگین 15% موجب افزایش استهلاک انرژی گردد. با افزایش عدد فرود عمق ثانویه نیز افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از سطح زبر موجب کاهش عمق ثانویه بین 18% تا 37% نسبت به سطح صاف می‌گردد. استفاده از سطح زبر می‌تواند 27% تا 67% موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی گردد. همچنین استفاده از بلوک در حوضچه موجب کاهش پارامتر آبستگي نسبت به حالت استاندارد USBR می‌گردد. همچنین استفاده از بلوک در حوضچه آرامش موجب افزایش عدد عملکرد در مقایسه حالت بدون بلوک می‌گردد.

Analysis and Assessment of Installing Blocks on Performance of Stilling Basins

Mohamad Mardani, Hassan Rahimzadeh*, Hamed Sarkardeh

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
 *P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, rahimzad@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 27 January 2015
 Accepted 08 March 2015
 Available Online 18 April 2015

Keywords:
 Stilling basin
 Energy Dissipation
 Hydraulic jump
 Baffle block
 Scouring

ABSTRACT

One of the most frequently encountered cases of rapid varied flow is the hydraulic jump. Stilling basins are used to dissipate the excess kinetic energy of flow to ensure the safety of overflow spillway, chutes, sluices, pipe outlets, etc. In this study the topic of block in stilling basins is investigated using a general approach and its effect on energy dissipation and downstream scouring are analyzed. In the present research, the energy dissipation and scouring phenomenon were studied in different hydraulic and geometric conditions. Moreover, the present paper was focused on the effect of presence of blocks as an effective parameter on energy dissipation on stilling basin performance. To analyze and assess the formed hydraulic jump in the stilling basins, the experimental data of many recent researches were achieved and compared. It was concluded that presence of blocks has significant effect on energy dissipation from 1% to 34%. It is also shown that with increasing the Fr Number, the secondary depth increases and using a rough bed causes the secondary depth to reduce between 18% and 37% in comparison with smooth one. Moreover, installing a rough bed also reduced the length of hydraulic jump between 27% and 67%. Using block in the stilling basins reduces the scouring depth from the USBR standard recommendation. Finally, it was concluded that using blocks increased the efficiency of the stilling basin performance.

1- مقدمه

فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین دست می‌باشد. یکی از رایج‌ترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی، حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی می‌باشند که در آن‌ها با شکل‌گیری پرش هیدرولیکی و عبور جریان از رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی، انرژی جریان مستهلک می‌شود [1]. پرش هیدرولیکی با توجه به مشخصات سطح بستر به دو نوع کلی تقسیم می‌شود.

پرش هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین روش‌ها جهت استهلاک انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد. معمولاً در انتهای سازه‌هایی مانند سرریز سدها، تندآب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، به دلیل انرژی زیاد جریان، نیاز به سازه‌هایی برای استهلاک انرژی و کاهش سرعت آن به منظور جلوگیری از

نشان داده شده است.

با توجه به شکل 1 برای نقطه 1 می‌توان رابطه (2) را به صورت زیر نوشت:

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2)$$

که در رابطه (2)، H هد کل سیال، Z ارتفاع سیال از نقطه مبدأ، P فشار سیال و V سرعت میانگین سیال می‌باشد. عبارت سمت راست تساوی را انرژی مخصوص کانال در نقطه 1 می‌نامند و آن را با E_1 نمایش می‌دهند. برای بدست آوردن دبی برحسب انرژی مخصوص و y_1 ، در هر نقطه دیگری از کانال از رابطه (3) استفاده می‌کنیم. که q در رابطه (3) برابر با دبی در واحد عرض یا دبی دو بعدی نیز نامیده می‌شود.

$$V = \frac{q}{y} \Rightarrow E = y + \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{y}\right)^2 \Rightarrow q = \sqrt{2g(y^2 E - y^3)} \quad (3)$$

با انجام یکسری روابط ریاضیاتی می‌توان عمق ثانویه که در رابطه (4) نشان داده شده است را بدست آورد. همین‌طور رابطه (5) و (6) که به ترتیب نشان دهنده انرژی مخصوص اولیه و میزان استهلاک انرژی می‌باشد.

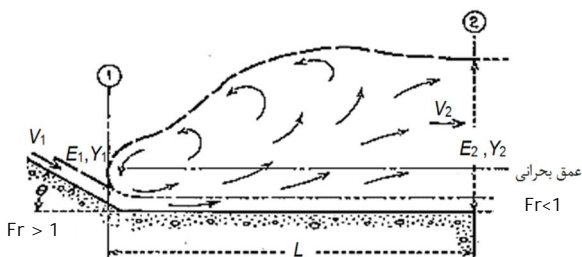
$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (4)$$

$$E_1 = \left(y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \right) \quad (5)$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (6)$$

برای بدست آوردن میزان استهلاک انرژی از اختلاف انرژی مخصوص قبل و بعد پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود. یکی دیگر از معیارهای ارزیابی عملکرد حوضچه، آبستنگی پایین دست است. زمانی که آب از حوضچه آرامش خارج می‌شود تمام انرژی آن از بین نمی‌رود. بنابراین این انرژی باقی مانده در جریان، موجب آبستنگی پایین دست رودخانه می‌گردد. با اندازه‌گیری پارامترهای هندسی آبستنگی به معیار ارزیابی عملکرد حوضچه می‌رسند. در مدل آزمایشی نیز برای رسیدن به این مهم در انتهای حوضچه آرامش مواد قابل حمل (توسط جریان آب) مانند ماسه ریخته می‌شود. در حقیقت این مواد نقش مصالح پایین دست حوضچه را که شبیه‌سازی شده‌اند را ایفا می‌کند. بعد از شروع به کار کردن حوضچه برای رسیدن به حالت تعادل مدت زمانی صبر می‌کنند (6 تا 24 ساعت، بستگی به شرایط آزمایش دارد) [11]. بعد از گذشت این زمان دو پارامتر مهم را اندازه‌گیری می‌کنند، عمق آبستنگی d_m و فاصله آن از انتهای حوضچه d_s . در شکل 2 پارامترهای نامبرده شده نشان داده شده است.

پارامتری که در رابطه (7) نشان داده شده است به عنوان پارامتر آبستنگی شناخته می‌شود. هر چقدر این عدد کوچکتر باشد نشان دهنده عملکرد بهتر حوضچه می‌باشد.



شکل 1 پرش هیدرولیک کلاسیک در حوضچه با سطح صاف

نوع اول آن که ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی که در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی صاف تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A می‌نامند که به طور وسیع توسط پترکا [2]، راجارانتام [3]، لئوتزر [4]، هاگر و برمن [5] و چانسون [6] مورد بررسی قرار گرفته است. توسط رابطه ارائه شده توسط بلانگر [7] عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک y_2 با y_1 عمق اولیه یا همان عمق فوق بحرانی در پنجه پرش y_1 و سرعت متوسط V_1 در این مقطع به صورت رابطه (1) بدست می‌آید [8]:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (1)$$

که در رابطه (1) $Fr_1 = V_1 / \sqrt{gy_1}$ عدد فرود در مقطع بالا دست پرش و g شتاب ثقل می‌باشد. نوع دوم پرش هیدرولیکی که در سطح زبر شکل می‌گیرد توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار داده شده است که در آن با استفاده از موانع مختلف سعی در افزایش ضریب زبری کف حوضچه و در نتیجه افزایش استهلاک انرژی دارند.

در ساختمان‌های مستهلک کننده انرژی آب یا همان حوضچه آرامش، معمولاً از بلوک‌ها و آب‌پایه‌ها به عنوان لوازم جانبی برای کنترل پرش در حوضچه‌ها استفاده می‌شود که می‌توان به کاربرد آن‌ها در تثبیت، کنترل، کاهش عمق ثانویه، و کاهش طول پرش اشاره نمود. از این رو توسعه تحقیقات بعدی محققین در جهت بکارگیری انواع بلوک و تاثیر آن بر استهلاک انرژی آب صورت پذیرفت. از دیگر پارامترهای تاثیر گذار در استهلاک انرژی حوضچه‌های آرامش شکل و هندسه آستانه پایانی حوضچه می‌باشد. مطالعات محققین حاکی از آن است که شکل آستانه پایانی به طور قابل توجهی بر شرایط جریان و آبستنگی پایین دست حوضچه تاثیر گذار می‌باشد.

هر حوضچه آرامش باید در شرایط مختلف پایاب و جریان ورودی، به طور مناسبی عمل کرده و استهلاک انرژی را به خوبی انجام دهد. اگر عمق پایاب بسیار کم باشد، آبستنگی قابل توجهی را در پی خواهد داشت، بنابراین چنین حالتی در شرایط مختلف جریان در پایاب، بدلیل وقوع آبستنگی زیاد، نباید روی دهد. در تمام حوضچه‌هایی که در آن عمق پایاب کمتر از 90 درصد عمق ثانویه پرش کلاسیک است، طراحی حوضچه را با ساختار فیزیکی آن باید به گونه‌ای تصحیح کرد تا عمق پایاب، بیشتر از 90 درصد عمق ثانویه پرش کلاسیک شود تا از وارد شدن خسارت به حوضچه جلوگیری گردد، زیرا پایداری سد، تا حد زیادی به پایداری حوضچه بستگی دارد [9]. این نکته قابل توجه است که استفاده زیاد از بلوک‌ها در عرض حوضچه از عملکرد آن می‌کاهد. بلازل در تحقیقات خود نشان داد که بلوک‌ها باید 40% تا 55% عرض حوضچه را اشغال کنند تا در این حالت عملکرد بهینه داشته باشند [10].

حوضچه‌های آرامش بنا به کارایی مورد نظرشان از ورودی‌های متفاوتی بهره می‌برند. این ورودی‌ها بعضاً به صورت کانال بوده و آب به صورت جت وارد حوضچه می‌گردد که سطح مقطع آن می‌تواند مربعی، مستطیلی و یا دایروی باشد. در اکثر مواقع نیز ورودی خاصی برای آن در نظر نگرفته و با یک سطح آزاد آب وارد حوضچه می‌گردد.

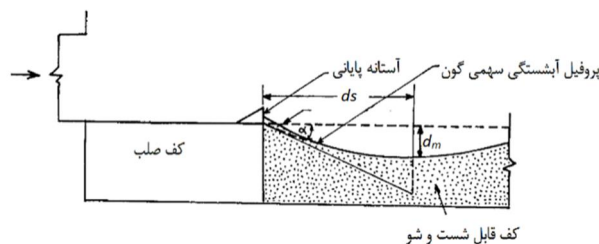
با توجه به این‌که هدف اصلی استفاده از حوضچه آرامش کاهش انرژی آب در کمترین طول حوضچه می‌باشد، بنابراین حوضچه‌ای عملکرد بهتری دارد که استهلاک انرژی بیشتری را در طول کمتری فراهم آورد. یکی از روش‌های مقایسه عملکرد حوضچه‌های آرامش مقایسه انرژی مخصوص آنها در قبل و بعد از پرش می‌باشد. جنبه‌های کلی پرش هیدرولیکی در شکل 1

کرده و رابطه‌ای را که خود او 4 سال قبل در مقاله‌اش آورده بود را اصلاح کرد [21]. یکی از موضوعات مهم در آبستنگی پیش‌بینی پروفیل و هندسه آبستنگی می‌باشد. بیژن درگهی بر روی هندسه آبستنگی آزمایشاتی را انجام داده و رابطه‌ای منطقی جهت پیش‌بینی این هندسه ارائه کرده است. او نتیجه گرفت که آبستنگی پایین دست توسط جریان‌های ثانویه و گردابه‌های حاصله از پرش هیدرولیکی ایجاد می‌گردد.

اصلی‌ترین پارامتر بی بعد در کنترل این پدیده را هد نسبی بالا دست، اندازه نسبی مواد قابل شست‌وشو رودخانه و زبری نسبی کف سر ریز معرفی کرده است [22]. آیتک و گونال نیز جهت تخمین پروفیل آبستنگی از روش رگرسیون خطی استفاده کرده‌اند و نشان دادند از روابط دیگر محققین پروفیل دقیق‌تری را تخمین می‌زند [23].

الیوتو و ویکتور نیز آزمایشات متعددی برای بدست آوردن پروفیل آبستنگی انجام دادند و نتیجه گرفتند حد اکثر عمق آبستنگی با $(Fr-1)$ متناسب است و مکان این حداکثر عمق از انتهای آبستنگی نیز با $(Fr-1)^{4/3}$ متناسب می‌باشد [24]. همان‌طور که اشاره شد انرژی آب به طور کامل توسط حوضچه از بین نمی‌رود بنابراین این انرژی اضافی موجب آبستنگی پایین دست می‌گردد. ریس و کدوی در تحقیقات خود نشان دادند با قرار دادن سنگ‌ریزه در پایین دست حوضچه آرامش می‌تواند از آبستنگی پایین دست جلوگیری کنند. نکته حائز اهمیت اندازه این سنگ ریزه‌ها می‌باشد که با افزایش عدد فرود از بستر خود حرکت نکنند. ریس و کدوی نشان دادند قطر این سنگ‌ریزه‌ها با افزایش عدد فرود به صورت نمایی رشد می‌کند. برای بدست آوردن حداقل اندازه سنگ‌ریزه‌هایی که از شستن پایین دست حوضچه جلوگیری کند روابطی حاصل شده است [25]. محققینی مانند بردلی و پترکا [2]، راجاراتنام [3]، لئوتزر و کارتا [4]، هگر و برمن [5] و چانسون [6] بر روی پرش هیدرولیکی با سطح صاف (بدون حضور بلوک) کار کرده‌اند. لانگ و همکاران [26] ساختار جریان را در تشکیل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که گردابه‌های استوانه‌ای شکل موجود در روی سطح بالای پرش هیدرولیکی از چندین گردابه دیگر تشکیل شده که اندازه آنها از پنجه پرش به انتهای پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد. محققین دیگری مانند پترکا [27]، المرسی و سرهان [28]، المرسی [29]، ویسجر و هگر [15]، بر روی شکل‌های مختلف بلوک‌ها آزمایشاتی را انجام داده‌اند، که نتایج آنها در 3 مورد زیر خلاصه گردیده است [11]:

1. حالت استوانه‌ای برای وجه رو به جریان حالت بهینه است.
 2. از یک ردیف بلوک استفاده می‌شود، بدلیل این‌که ردیف دوم کارایی کمتری داشته و عملکرد آن متاثر از ردیف اول است.
 3. از بلوک برای اعداد فرود بالای حدود 4 استفاده نمی‌شود و از مستهلک کننده‌های پرتابه‌ای برای استهلاک انرژی آنها بهره می‌برند.
- در ادامه کارهای محققین تیواری با استفاده از انواع بلوک‌ها در حوضچه آرامشی که ورودی آن غیر دایروی بود نتیجه گرفت که استفاده از آستانه پایانی با شیب 45 درجه کارایی بهتری دارد [31,30]. تیواری در مقاله بعدی خود با کار کردن بر ورودی مستطیلی توانست 29% عملکرد حوضچه را نسبت به مدل USBR بهبود بخشد، این کار را توسط تغییر محل دادن دیوار برخوردی انجام داد [32]. در نهایت در مقاله اخیر خود عملکرد حوضچه را با تغییر دادن هندسه بلوک‌ها در وسط حوضچه افزایش داد [33]. گوئل و ورما برای حوضچه‌هایی با خروجی مربعی شکل برای اعداد فرود بین 1/7 تا 5/5 با استفاده از بلوک با زاویه حمله 150 درجه عملکرد حوضچه را نسبت به مدل



شکل 2 پارامترهای مهم در ارزیابی حوضچه توسط معیار آبستنگی

$$\tan \alpha = \frac{2d_m}{d_s} \quad (7)$$

که در رابطه (7) d_m و d_s به ترتیب حداکثر عمق آبستنگی و فاصله آن از انتهای حوضچه می‌باشد. همچنین $\tan \alpha$ به عنوان اندیس آبستنگی نیز شناخته می‌شود. عملکرد حوضچه آرامش تابعی از عدد فرود اولیه (Fr) ، قطر لوله ورودی (d) ، عمق پایاب پایین دست حوضچه (h) ، ماکزیم عمق آبستنگی (d_m) ، و مکان این آبستنگی می‌باشد (d_s) . حوضچه‌ای که عمق آبستنگی آن کم و فاصله آن از انتهای حوضچه زیادتر باشد عملکرد بهتری دارد. عدد فرود آبستنگی Fr_{dm} بر مبنای سرعت متوسط کانال V_c و ماکزیم عمق آبستنگی d_m می‌تواند به صورت رابطه (8) معرفی گردد.

$$Fr_{dm} = \frac{V_c}{\sqrt{gd_m}} \quad (8)$$

اگر پروفیل آبستنگی بصورت سهمی باشد، مقدار $\tan \alpha$ نشان دهنده شیب در محل ماکزیم آبستنگی می‌باشد. بعضی از محققین برای دخیل کردن عدد فرود پایین دست در معیار آبستنگی و بدست آوردن معیاری مناسب برای مقایسه حوضچه‌ها از عدد عملکرد که بصورت رابطه (9) تعریف می‌شود استفاده می‌کنند [12]:

$$PN = \frac{Fr_{dm}}{\tan \alpha} = \frac{Fr_{dm} \times d_s}{2d_m} \quad (9)$$

با جای گذاری Fr_{dm} از رابطه (8) در رابطه (9)، رابطه (10) منجر خواهد

شد:

$$PN = 0.025d_s \left(\frac{d}{d_m} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

2- پیشینه تحقیق

برای اولین بار در سال 1947 در مرکز تحقیقات آیداهو آمریکا مطالعاتی بر روی عملکرد حوضچه آرامش بر روی مدل سد کاسکید انجام گرفت. مکانیزم استهلاک انرژی و ارزیابی فشار دینامیکی و نوسانات سرعت جریان در حوضچه‌های آرامش توسط محققین بسیاری در دو دهه اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. تانگ و میز [13] به منظور اطمینان از تاثیر مستهلک کننده‌های انرژی، مدلی برای بدست آوردن ابعاد حوضچه آرامش و ضمامم آن ارائه کرده‌اند. مروری فشرده بر مطالعات پرش هیدرولیکی و مستهلک کننده‌های انرژی در منابعی چون هاگر [14] یافت می‌شود.

در استفاده از معیار آبستنگی پایین دست حوضچه‌ها، فرمول‌هایی جهت تخمین پروفیل آبستنگی توسط محققینی مانند، نوارک [15]، کتکلی [16]، یویماز [17]، پیلابی [18]، بغدادی [19]، ال عبد [20]، ارائه شده است. پیلابی که بر موضوع پرش هیدرولیکی با اعداد فرود کم کار می‌کرد نشان داد استفاده از بلوک با زاویه حمله 150 درجه و زاویه انتهایی 90 درجه موجب افزایش کارایی حوضچه گردیده و آبستنگی پایین دست را کاهش می‌دهد [18]. هافمنس بر روی آبستنگی جت افقی مطالعاتی را انجام داده و با استفاده از قانون دوم نیوتن برای عمق ماکزیم آبستنگی رابطه‌ای را ارائه

حوضچه‌ها بود [43].

الاین و همکاران نیز با استفاده از زبر کردن بستر حوضچه عملکرد حوضچه آرامش را نسبت به سطح صاف افزایش دادند. او با زبر کردن حوضچه توسط بلوک گوه شکل عمق پرش هیدرولیکی را 16/5 تا 30 درصد و طول پرش هیدرولیکی را 30 تا 53 درصد کاهش داد. او در آزمایشات خود از اعداد فرود $3/06 < Fr < 10/95$ استفاده کرده و زبری حوضچه نیز $0/22 < K_R < 1/4$ بوده است [36].

ابراهیمی و همکاران به منظور بدست آوردن نحوه تغییرات استهلاک انرژی حوضچه‌های آرامشی که سطح آن‌ها زبر می‌باشد از روش CFD جهت مدل عددی بهره برده‌اند. آن‌ها پرش هیدرولیکی دو بعدی را توسط روش استاندارد توربولانس $K-\epsilon$ مدل کرده و برای اعداد فرود 3 تا 7 نتایج را استخراج نموده و با نتایج تجربی مقایسه کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از سطح زبر موجب کاهش ارتفاع عمق ثانویه و کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌گردد [38].

اگرچه تحقیقات زیاد و پراکنده‌ای بر روی عملکرد حوضچه‌های آرامش در شرایط مختلف توسط محققین مختلف به انجام رسیده است، ولی به نظر می‌رسد تحقیق جامعی برای تعیین تاثیرات مختلف وجود و عدم وجود بلوک و تاثیر زبری بر روی حوضچه‌ها به انجام نرسیده باشد. در این تحقیق تلاش شده است نگاهی جامع به موضوع بلوک در حوضچه‌های آرامش شود و زوایای مختلف تاثیر آن در استهلاک انرژی و همچنین آبستنگی پایین دست حوضچه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

در این مطالعه به بررسی دو نوع عمده حوضچه آرامش پرداخته شده است. در نوع اول از هیچ‌گونه بلوک و موانعی جهت استهلاک انرژی استفاده نشده و فقط با تغییرات شرایط هندسی حوضچه سعی در پیدا کردن مدلی مناسب جهت افزایش استهلاک انرژی در حوضچه شده است. در این میان محققینی مانند فهمی و همکاران [11]، فتحی مقدم و پارسی [9]، عبدالعظیم [44]، گوپتا و همکاران [45] بر حوضچه‌ی آرامش بدون بلوک مطالعاتی را انجام داده و مدل مناسب خود را معرفی کرده‌اند.

در نوع دوم از حوضچه‌های آرامش با استفاده از بلوک، سطح شیب‌دار، دیوار سوراخ‌دار، دیوار برخوردی، سطح زبر حوضچه و انواع آستانه پایانی سعی در بهبود شرایط عملکرد حوضچه دارند. در این میان محققینی مانند محمد علی [37] ابراهیمی و همکاران [38] بدیع‌زادگان [43] گوئل و ورما [47,46,37] و تیواری و همکاران [31-33] بر این موضوع تمرکز کرده‌اند و با استفاده از انواع مختلف موانع، عملکرد حوضچه آرامش را بهبود بخشیده‌اند. با بررسی این دو نوع حوضچه آرامش داده‌های موجود در شکل‌ها شکل گرفته است.

3- تحلیل ابعادی

در علم مکانیک سیالات اغلب پدیده‌ها با استفاده از قانون تشابه حاصل از آنالیز ابعادی داده‌ها مربوط به یک مدل کوچک را می‌توان به داده‌های طراحی یک نمونه واقعی تبدیل نمود. با توجه به رابطه (1) انرژی اولیه آب در بالادست حوضچه‌ای که از بلوک برای استهلاک انرژی استفاده نشده است به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که در رابطه (13) نشان داده شده است [48]:

$$E = f_1(y_1, V_1, g, \rho, \mu, \sigma) \quad (13)$$

که در آن E انرژی اولیه آب، y_1 ارتفاع اولیه آب قبل از پرش، V_1 سرعت ورودی آب قبل از پرش، g شتاب گرانش در محل آزمایش، ρ چگالی سیال،

USBR بهبود بخشیدند [34]. یک سال بعد توانستند با استفاده از چینش جدید طول حوضچه را کاهش بدهند [35]. در دهه اخیر گوئل و ورما تحقیقات زیادی را در راستای کاهش طول حوضچه و افزایش استهلاک انرژی انجام داده‌اند. گوئل ابتدا توانست طول حوضچه را از $12D$ (قطر لوله ورودی به حوضچه) به $8D$ و سپس در تحقیقات بعدی خود به $6D$ و سرانجام به $4/5D$ برساند. همچنین این دو محقق آزمایشات زیادی برای حوضچه‌های ورودی مستطیلی شکل عمیق انجام داده‌اند [12]. مطالعات محققینی که در حوضچه‌هایی آرامش همراه با بلوک کار کرده‌اند نشان می‌دهد که استفاده از بلوک‌ها جهت افزایش ضریب زبری سطح حوضچه، موجب کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی می‌گردد. این زبری می‌تواند با استفاده از بلوک و یا ناهمواری در سطح حوضچه باشد [36]. محمد علی در تحقیقات خود نشان داد که استفاده از بلوک‌های مکعب شکل در کف حوضچه باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی نسبت به سطح صاف حوضچه از $27/4\%$ تا $67/4\%$ براساس اعداد فرود ورودی از 4 تا 10 می‌گردد. او همچنین معادلات کاربردی جهت بدست آوردن زبری بهینه حوضچه و معادلات کلی جهت پی بردن به عمق ثانویه بعد از پرش ارائه کرده است [37]. اید و راجارانتام بر روی پرش هیدرولیکی بر بستر موج‌دار در محدوده اعداد فرود 4 تا 10 مطالعه کرده‌اند، نتیجه گرفتند که ثابت تنش برشی سطح (β) به ارتفاع نسبی زبری بستر وابسته است $K_R = H_b / y_1$ که در آن H_b ارتفاع زبری است. همچنین او نتیجه گرفت که طول پرش هیدرولیکی در بستر موج‌دار نصف طول پرش هیدرولیکی در بستر صاف می‌باشد و عمق ثانویه بعد از پرش نیز به طور محسوسی کمتر از حالتی است که بستر صاف می‌باشد [38]. کارول و همکاران یک عبارتی را برای محاسبه تنش برشی بستر موج‌دار بدست آوردند و نشان دادند این عبارت به طور قابل قبولی بر نتایج راجارانتام صدق می‌کند. آن‌ها مشاهده کردند که تنش برشی سطح موج‌دار با جریان مومنوم متناسب است و برای عمق ثانویه پرش هیدرولیکی رابطه (11) را ارائه کردند [39]:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8(1 - \beta) Fr_1^2} - 1 \right) \quad (11)$$

که در رابطه (11) y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در بستر موج‌دار می‌باشد. نتایج اید و راجارانتام [38] و هاگس و فلک [40] جهت تخمین زدن مقدار β و رابطه آن K_R استفاده شد تا رابطه (12) حاصل گردد:

$$\beta = 0.42 \frac{H_b}{y_1} \quad (12)$$

پاگلایارا و همکاران بر روی پارامترهای موثر بر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی سطح زبر همگن و ناهمگن مطالعاتی را انجام داده و ضریب تصحیحی برای معادله عمومی پرش هیدرولیکی بر روی سطح زبر همگن و ناهمگن ارائه داده‌اند [41]. برهمند و شمسی بر روی پرش هیدرولیکی در سطح غیر منشوری زبر آزمایشاتی را انجام داده و رابطه‌ای ساده جهت تخمین عمق ثانویه پرش برحسب تابعی از زبری سطح و عدد فرود بالا دست بدست آوردند [42].

بدیع‌زادگان و همکاران بر روی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی آزمایشاتی را انجام داده‌اند، در این پژوهش عمق موج t و طول موج S که با مقدار بدون بعد t/S نشان داده می‌شود در محدوده $0/167$ تا $0/75$ و تغییرات عدد فرود بین $4/6$ تا $12/26$ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با بکارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه‌های آرامش می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه تقریباً به میزان 20 و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان 35 درصد نسبت به پرش کلاسیک در این نوع از

جدول 1 معادلات بدست آمده شکل 3

وضعیت	معادلات بدست آمده	ضریب
حوضچه		رگرسیون R^2
با بلوک	$\frac{\Delta E}{E_1} = 33/765 \ln(Fr) + 2/5598$	0/9121
بی بلوک	$\frac{\Delta E}{E_1} = 31/894 \ln(Fr) - 2/8556$	0/9426

همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌کنید با افزایش عدد فرود استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش (چه بدون بلوک و چه با بلوک) زیاد می‌گردد. زمانی که از حوضچه‌های آرامش همراه با بلوک استفاده می‌شود، استهلاک انرژی زیاد گشته و بنابراین در طول کمتری از حوضچه می‌توان انرژی بیشتری را مستهلک کرد. با توجه به هندسه حوضچه آرامش و نحوه چینش بلوک و عدد فرود، استفاده از بلوک می‌تواند 13% تا 19% درصد موجب افزایش استهلاک انرژی گردد. جهت بدست آوردن درصد کاهش استهلاک انرژی جهت تبیین تاثیرگذاری بلوک در حوضچه، بازای یک عدد فرود مشخص از معادلات بدست آمده در جدول 1 استفاده شده است. بدین صورت که به طور مثال برای عدد فرود 4 برای حوضچه با بلوک $\frac{\Delta E}{E_1} = 49/36\%$ و برای حوضچه بدون بلوک $\frac{\Delta E}{E_1} = 41/35\%$ بدست آمد. حال با تقسیم کردن تفاضل دو عدد بر مقدار اولیه آن (حوضچه بدون بلوک) درصد کاهش استهلاک انرژی ناشی از بکار بردن بلوک در حوضچه بدست آمد. در طول این مقاله هر کجا چنین تاثیرگذاری مد نظر بود بدین صورت اعمال نظر شده است. با توجه به شکل 3 تاثیرگذاری حوضچه با بلوک جهت استهلاک انرژی در اعداد فرود بین 3 تا 5 حدود 19% و فرود 5 تا 7 حدود 16% و فرود 7 تا 9 حدود 13% می‌باشد. بنابراین حوضچه آرامش با بلوک برای اعداد فرود 3 تا 5 کارایی بهتری نسبت به حوضچه آرامش بدون بلوک دارد. از طرف دیگر با توجه به شکل 3 با افزایش عدد فرود استهلاک انرژی افزایش می‌یابد، این روند صعودی تا عدد فرود 8 ادامه پیدا می‌کند اما بعد از عدد فرود 8 نمودار افقی شده و دیگر استهلاک انرژی افزایش پیدا نمی‌کند. به همین دلیل جهت استهلاک انرژی حوضچه‌هایی با عدد فرود بیشتر از 8 نیاز به مکانیزم‌های دیگری از قبیل پرتاب کننده‌های جامی می‌باشد.

استفاده از حوضچه‌های آرامش همراه با بلوک باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی، و در نتیجه کاهش طول حوضچه‌های آرامش می‌گردد. بدلیل بالا بودن هزینه‌های عمرانی ساخت حوضچه‌های آرامش، هر چقدر طول حوضچه را کوتاه‌تر شود، از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود. آقای گوئل و ورما تحقیقات زیادی در کوتاه کردن طول حوضچه‌های آرامش انجام داده‌اند و اخیراً توانسته‌اند طول حوضچه را به $4/5$ برابر قطر ورودی حوضچه برسانند. استفاده مناسب از بلوک‌ها، دیوارهای مشبک، دیوارهای برخوردی و موانع جدا کننده جریان نقش بسزایی در افزایش توربولانس جریان دارند و می‌توانند انرژی آب را مستهلک کنند. یکی از مهمترین مشخصات این بلوک‌ها، هندسه آن‌ها می‌باشد. با توجه به شکل 4 سطح برخورد مستطیلی بلوک‌ها بیشترین نیروی کشش را ایجاد می‌کند، اما مشکلی که این بلوک‌ها دارند این است که هندسه مستطیلی شکل موجب کاهش درگ در جریان‌های برگشتی می‌شود و موجب استهلاک انرژی جریان نمی‌گردد. آزمایشاتی که توسط محققینی مانند پیلابی و اونی صورت گرفته حاکی از آن است که استفاده از بلوک‌هایی با لبه تیز موجب افزایش درگ و در نتیجه کاهش استهلاک انرژی می‌گردد [47]. براساس یک سری مطالعات تجربی، پیلابی (1964) نشان داد استفاده از بلوک با زاویه حمله 120 درجه و زاویه انتهایی 90 درجه موجب

σ کشش سطحی، μ ویسکوزیته دینامیکی می‌باشد. در هیدرولیک کانال‌های باز اثر کشش سطحی، ویسکوزیته دینامیکی و چگالی سیال ناچیز می‌باشد، بنابراین از تاثیر آن چشم‌پوشی کرده و رابطه (13) به رابطه (14) تبدیل خواهد شد:

$$E = f(y_1, V_1, g) \quad (14)$$

به کارگیری روش پی باکینگهام برای دستیابی به پارامترهای بی بعد موثر بر جریان به صورت رابطه (15) خواهد بود [49]:

$$\frac{E}{y_1} = f(Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}) \quad (15)$$

در تابع فوق Fr_1 عدد فرود بالا دست جریان می‌باشد.

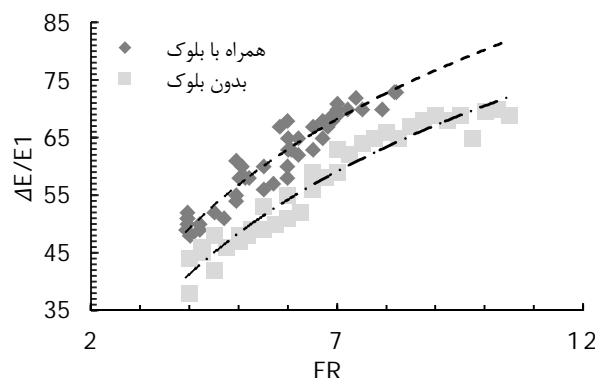
4- داده‌ها و مشخصات حوضچه آرامش

برای مشخص کردن نحوه تغییرات استهلاک انرژی حوضچه‌های آرامشی که از بلوک و موانع استهلاک انرژی استفاده نکرده‌اند داده‌های محققین دردهه اخیر جمع آوری شد.

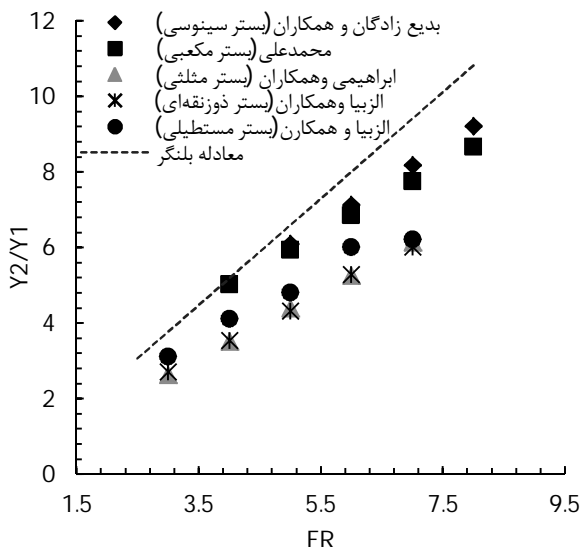
در شکل 3 داده‌های محققینی که در تحقیقات خود از بلوک استفاده کرده‌اند رسم شده است. در این میان فهمی عبدالحملم [11] که بر روی تاثیر بلوک‌های نیمه دایروی بر استهلاک انرژی در حوضچه آرامش کار کرده است، گردآوری شده است. او جهت نشان دادن تاثیر بلوک چندین آزمایش را در سطح صاف بدون بلوک انجام داده است. داده‌های این محقق برای اعداد فرود $2/58$ تا $5/07$ در شکل 3 رسم گردیده است.

مجموعه دیگری از داده‌ها مربوط به فتهی مقدم و پارسی می‌باشد که بر روی تاثیر موقعیت پرش بر تغییرات سرعت در حوضچه آرامش مطالعاتی را انجام داده‌اند (اعداد فرود بین 1 تا 5) [9].

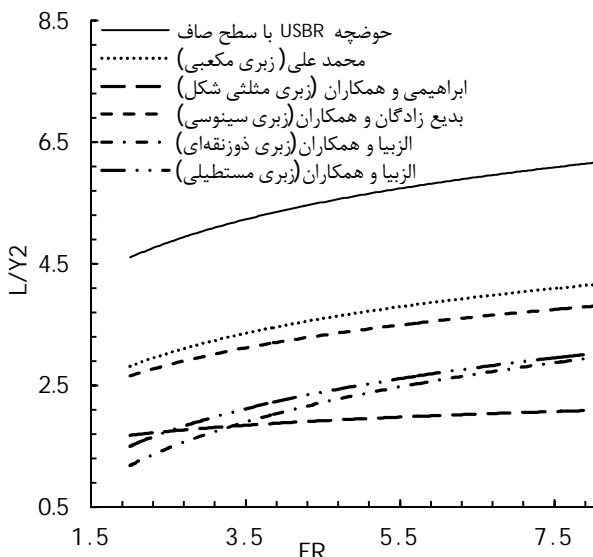
مجموعه داده دیگری که به بررسی استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش بدون بلوک گردآوری شده مربوط به عبدالعظیم می‌باشد [44]. در شکل شماره 3 همچنین داده‌های مربوط به محققینی که در حوضچه‌های آرامش همراه با بلوک کار کرده‌اند گردآوری شده تا مقایسه بهتری صورت گیرد. حبیب‌زاده و همکاران بر موضوع پرش هیدرولیکی بر بلوک مستغرق مطالعه کرده‌اند و داده‌های آن‌ها برای اعداد فرود از $3/92$ تا $8/19$ در شکل شماره 3 رسم گردیده است [51,50]. بدیع‌زادگان و همکاران نیز بر موضوع استهلاک انرژی در بسترهای موج‌دار تحقیقاتی انجام داده‌اند که داده‌های آن‌ها بین اعداد فرود 4 تا 10 در شکل شماره 3 رسم گردیده است. به طور کلی برای اینکه بتوان تاثیر حضور بلوک‌ها را در مقایسه با نبود آن‌ها بررسی کرد، داده‌های موجود در شکل 3 جمع آوری شده است. در جدول 1 معادلات بدست آمده و سایر اطلاعات شکل 3 را مشاهده می‌کنید.



شکل 3 استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش همراه با بلوک و بدون بلوک



شکل 6 بررسی تغییرات طول عمق ثانویه به صورت تابعی از عدد فرود در حوضچه‌های با سطح زبر



شکل 7 تغییرات طول پرش هیدرولیکی به صورت تابعی از عدد فرود در حوضچه‌های آرامش با سطح زبر

داشته و به طور قابل ملاحظه‌ای عمق ثانویه را کاهش داده‌اند. با توجه به شکل 6 حوضچه زبر در اعداد فرود حدود $4/5$ تا $32.5/5$ درصد موجب کاهش عمق مزدوج شده است. این عدد برای اعداد فرود $5/5$ تا $7/5$ به 38 درصد می‌رسد. بنابراین حوضچه‌های آرامش در اعداد فرود بالاتر (تا حدود عدد فرود $7/5$) کارایی بهتری نسبت به حوضچه سطح صاف دارد. همچنین جهت مقایسه تغییرات طول پرش هیدرولیکی به صورت تابعی از عدد فرود شکل 7 فراهم گردیده است. با توجه به شکل 7 استفاده از سطح زبر می‌تواند 27% (در بدترین شرایط زبری با بستر مکعب شکل و زبری $0/45$) تا 67% (در بهترین حالت استفاده از حوضچه زبر با بستر مثلثی و ضریب زبری $0/72$) موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی گردد.

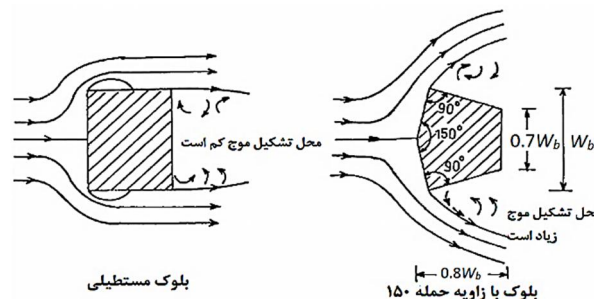
همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌کنید تغییرات طول پرش تقریباً مستقل از عدد فرود می‌باشد. با توجه به شکل 7 حوضچه ابراهیمی با سطح زبر بهترین عملکرد را داشته و موجب کاهش طول پرش تا 67% نسبت به

افزایش درگ و در نتیجه افزایش توربولانس آب و در آخر افزایش استهلاک انرژی آب می‌گردد. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌کنید حرکت چرخشی شدید آب با محور عمودی شکل در سمت دیگر بلوک منجر به افزایش ناحیه موج می‌گردد. احتمال ایجاد کاونتاسیون در چنین حالتی نیز کاهش می‌یابد، بدلیل اینکه پایین دست بلوک شکل‌دار شده است و مرکز تشکیل کاونتاسیون از مرز بلوک‌ها دور می‌باشد [52]. در ابتدا محققین زاویه حمله این بلوک را 120 درجه انتخاب کردند اما با انجام آزمایشات دیگر پی بردند که زاویه مناسب این بلوک‌ها برای سرریزها و موانع با عدد فرود ورودی کم $2/5 < Fr < 4/5$ باید 150 درجه باشد این بلوک زمانی که به عنوان بلوک شکاف در ورودی حوضچه قرار می‌گیرد، بازده حوضچه را افزایش می‌دهد [35,34]. در شکل 4 مختصات هندسی این بلوک‌ها نشان داده شده است.

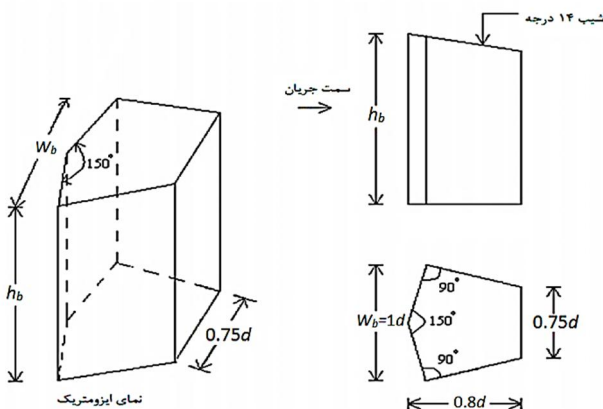
اخیراً آقای گوئل و ورما در آزمایشات خود نشان داده‌اند که استفاده از بلوکی که سطح آن شیب‌دار است جهت استهلاک انرژی موثرتر می‌باشد، هندسه این بلوک‌ها در شکل 5 نشان داده شده است [54].

از دیگر راه‌های افزایش استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش زبر کردن بستر می‌باشد، که نتیجه این کار کاهش طول پرش هیدرولیکی و کاهش عمق ثانویه پرش می‌باشد. جهت مقایسه کار محققینی که بر زبری حوضچه آزمایشاتی را انجام داده‌اند، داده‌های آن‌ها در شکل 6 گردآوری شده است.

با توجه به شکل 6 مشخص است که با افزایش عدد فرود عمق ثانویه نیز افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از سطح زبر موجب کاهش عمق ثانویه بین 18% تا 37% نسبت به سطح صاف می‌گردد. با توجه به شکل 6 مدل زبری که ابراهیمی و همکاران در مدل عددی خود استفاده کرده‌اند کارایی بهتری



شکل 4 افزایش درگ در اثر به کار بردن بلوک با زاویه حمله 150 درجه [53]



شکل 5 هندسه بلوک مورد استفاده در حوضچه‌های آرامش [54]

است بدلیل زیاد بودن ضریب تنش برشی موجب شده تا هم طول پرش هم عمق ثانویه آن در مقایسه با سایر محققین کاهش یابد و حوضچه عملکرد بهتری را از خود نشان دهد. بعد از آن، الزبیا با بستر دوزنقه‌ای با ضریب زبری $0/72$ عملکرد بهتری نسبت به بستر مستطیلی خود داشته است، سپس بدیع‌زادگان با بستر موج دار سینوسی و زبری $2/3$ کوتاه‌ترین طول پرش را داشته و در نهایت محمد علی با بستر مکعبی و زبری $0/45$ کوتاه ضعیف ترین عملکرد را از خود به جای گذاشته است. در جدول 3 معادلات خطوط و ضریب رگرسیون شکل 7 آورده شده است.

گوئل و ورما در مقاله خود که بر هندسه بلوک‌ها مطالعاتی را انجام دادند نتیجه گرفتند که اگر آستانه پایانی گرد ساخته شود، استهلاک انرژی بیشتر می‌گردد. آن‌ها 39 مدل مختلف را آزمایش کردند و پی بردند که حوضچه در شکل 9 برای ورودی‌های با مقطع گرد، بهترین عملکرد را دارا است [35].

همچنین این دو محقق تحقیقاتی در راستای بهینه کردن عرض بلوک شکاف دهنده جریان انجام داده‌اند و نتیجه گرفتند که $w_b/d=0/75$ برای اکثریت حالت‌ها در بازه اعداد فرود $1/7$ تا $5/5$ بهترین بازدهی را دارا است. گوئل و ورما در حوضچه آرامشی که ورودی به آن تحت فشار است و لوله به کف زمین چسبیده 133 آزمایش بر روی 19 مدل انجام دادند و در انتها شکل 10 به عنوان بهینه‌ترین مورد انتخاب شده است [47].

در این آزمایشات او نتیجه گرفت که افزایش پهنا و طول بلوک موجب بهتر شدن عملکرد حوضچه می‌شود. در قطر یکسان ورودی هر چقدر عدد فرود افزایش یابد عملکرد حوضچه بهتر می‌شود. در شرایط یکسان (حوضچه و عدد فرود یکسان) هر چقدر قطر ورودی کاهش یابد، عملکرد حوضچه ضعیف‌تر می‌شود. برای آستانه پایانی حوضچه، به ترتیب آستانه‌ای با شیب $0/5$ ، شیب 1، انتهای گرد، و مستطیلی شکل بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. (برای تمامی اعداد فرود به همین ترتیب بدست آمده است).

با توجه به شکل 10 برای اینکه بدانیم فاصله دیوار برخوردی تا کف حوضچه چقدر باشد نیز آزمایشاتی انجام شده است و اگر فاصله دیوار برخوردی تا کف حوضچه $0/75D$ باشد بهترین عملکرد را دارد. (برای تمامی

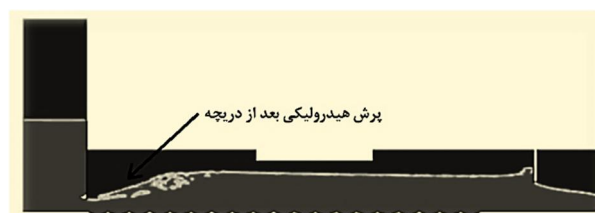
سطح صاف می‌گردد. با توجه به شکل 7 این کاهش به طور کلی برای اعداد فرود 4 تا 6 بین 27% تا 67% می‌باشد. همچنین برای اعداد فرود بین 2 تا 4 این کاهش طول پرش به 50% سطح صاف می‌رسد. در کل استفاده از سطح زبر موجب کاهش 50 درصدی طول پرش نسبت به سطح صاف می‌گردد.

ابراهیمی و همکاران در یک مدل عددی با مدل کردن حوضچه آرامشی که بستر آن زبر می‌باشد نشان دادند که اگر زبری به کار رفته در حوضچه به صورت ناهمواری‌های مثلثی باشد طول پرش هیدرولیکی به صورت قابل توجهی نسبت به دیگر از زبری‌های به کار رفته کاهش می‌یابد. در شکل 8 مدل سطح حوضچه مدل شده را مشاهده می‌کنید [38].

عبدالحمید در مقاله خود بر بلوک‌های نیمه دایروی آزمایشاتی را انجام داده و تاثیرات هندسه بلوک بر محل و میزان آبستگي پایین دست را بررسی کرده است. او نتیجه گرفت که افزایش ارتفاع بلوک موجب کاهش آبستگي پایین دست می‌گردد. همچنین افزایش فاصله بلوک $(\frac{L_p}{L_s})$ از ابتدای حوضچه موجب کاهش عملکرد حوضچه می‌گردد. افزایش ارتفاع بلوک موجب کاهش عمق آبستگي (D_s) و کاهش طول آبستگي (L_s) می‌گردد [11].

با توجه به شکل 6، علاوه بر پارامتر زبری K_R هندسه زبری نیز تاثیر بسزایی در کاهش عمق ثانویه دارد. بدیع‌زادگان با به کار بردن هندسه سینوسی (با زبری $2/3$) در میان محققین از عملکرد ضعیف‌تری برخوردار است. بعد از آن محمد علی با زبر کردن حوضچه توسط مکعب‌های کوچک (با زبری $0/45$) عملکرد بهتری را دارا می‌باشد. سپس داده‌های بعدی مربوط به الیزابیا است، او در چندین بستر، آزمایشاتی را انجام داده است. در شکل 6 و 7 بستر دوزنقه‌ای (با زوایای وجه 60 درجه) و بستر مستطیلی شکل (هر دو بستر با زبری $0/72$) آورده شده است. با توجه به شکل 6 بستر مستطیلی (الزبیا) عملکرد ضعیف‌تری را نسبت به بستر دوزنقه‌ای (الزبیا) دارا می‌باشد [55]. در نهایت بهترین عملکرد برای ابراهیمی و همکاران می‌باشد که از سطحی با زبری مثلثی استفاده کرده‌اند (با زبری $0/72$) همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است. در جدول 2 مشخصات حوضچه‌های آزمایش شده در شکل 6 و 7 آمده است.

با توجه به شکل 7 ترتیب گفته شده برای عمق ثانویه، در مورد طول پرش صدق نمی‌کند. حوضچه آرامشی که ابراهیمی با بستر مثلثی ساخته



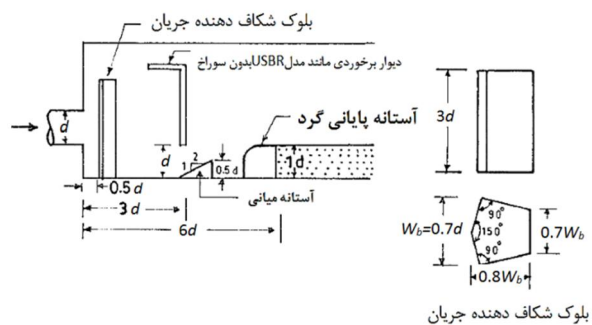
شکل 8 زبری مثلثی به کار رفته شده در کف حوضچه [38]

جدول 2 مشخصات حوضچه‌های آزمایش شده در شکل 6 و 7

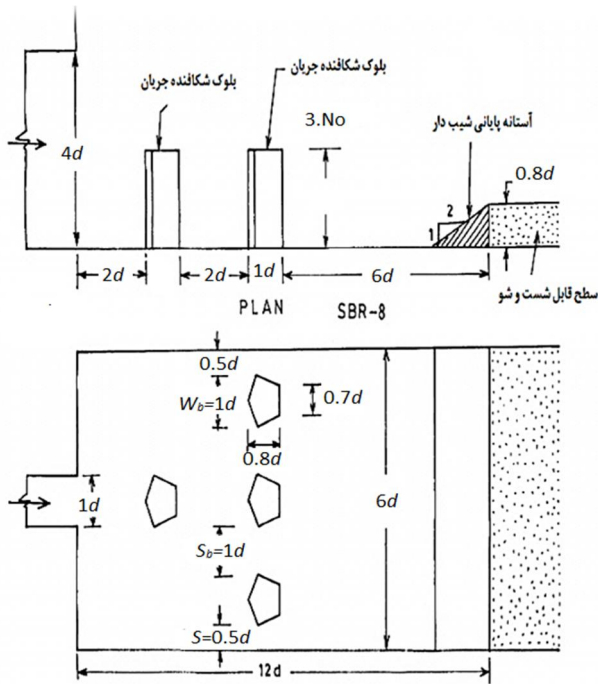
نام محقق	هندسه به کار برده شده	ضریب زبری سطح
بلنگر	سطح صاف	K_R
محمد علی	بلوک مکعبی شکل	0/45
ابراهیمی و همکاران	سطح زبر مثلثی	0/72
بدیع‌زادگان و همکاران	سطح زبر سینوسی	2/3
الزبیا و همکاران	سطح زبر دوزنقه ای	0/72
الزبیا و همکاران	سطح زبر مستطیلی	0/72

جدول 3 معادلات و ضرایب رگرسیون خطوط شکل 7

نام محقق	معادله خط بدست آمده	ضریب رگرسیون R^2
بلنگر	$y = 1/123 \ln(x) + 3/823$	-
محمد علی	$y = 0/967 \ln(x) + 2/143$	0/887
ابراهیمی و همکاران	$y = 0/2956 \ln(x) + 1/473$	0/815
بدیع‌زادگان و همکاران	$y = 0/7535 \ln(x) + 2/2162$	0/7669
الزبیا و همکاران (دوزنقه‌ای)	$y = 1/2799 \ln(x) + 0/2921$	0/6912
الزبیا و همکاران (مستطیلی)	$y = 1/098 \ln(x) + 0/7358$	0/3384



شکل 9 حوضچه بهینه معرفی شده توسط گوئل و ورما [35]

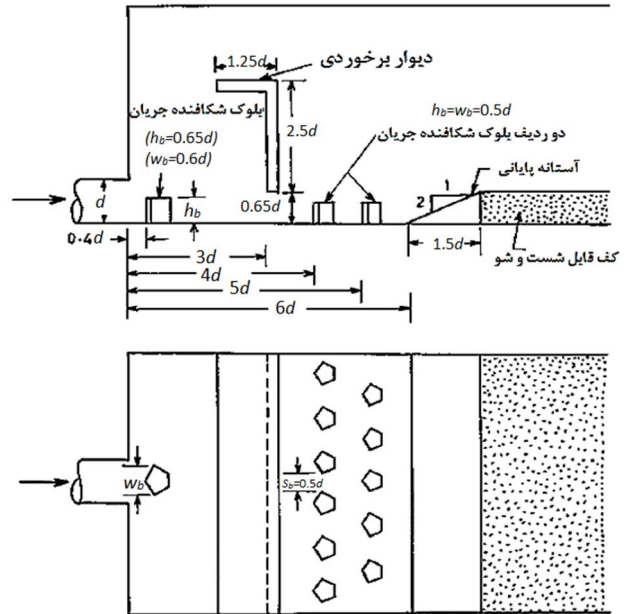


شکل 12 حوضچه آرامش بهینه برای ورودی مستطیلی [46]

عدد فرود و نحوه آبستگي پایین دست نشان داده شده است. در شکل 13 جهت مشخص کردن نحوه تاثیرگذاري بلوک بر کاهش پارامتر آبستگي نتایج محققيني که در حوضچه آرامش خود از انواع بلوک با هندسه‌های گوناگون استفاده کرده‌اند جمع‌آوری شده است.

گوئل در دهه اخیر بر شکل‌های مختلفی از بلوک‌ها کار کرده است. هدف اصلی او در این مقالات افزایش استهلاک انرژی در حوضچه و کاهش طول حوضچه می‌باشد. او همچنین برای ورودی‌های مختلفی اعم از دایروی و مستطیلی تحقیقاتی را انجام داده است. در نهایت جهت مقایسه عملکرد حوضچه‌ها، آبستگي پایین دست را مقایسه کرده است [54, 53, 47].

یکی از مواردی که از شکل 13 نتیجه گرفته می‌شود این است که این قبیل از حوضچه‌ها با افزایش عدد فرود (تا عدد فرود حدودا 5) کارایی بهتری از خود نشان می‌دهند اما بعد از آن، با افزایش عدد فرود تغییر محسوسی در پارامتر آبستگي مشاهده نمی‌شود. در این شکل عبارت $\tan\alpha$ بیانگر آبستگي پایین دست می‌باشد. $\tan\alpha$ را نیز به عنوان اندیس آبستگي نیز می‌شناسند، هر چقدر مقدار این عبارت بیشتر گردد نشان دهنده این است که حوضچه عملکرد ضعیفی را دارا است. با توجه به این شکل می‌توان گفت استفاده از بلوک در حوضچه موجب کاهش پارامتر آبستگي بین 15 تا 40 درصد نسبت به حالت استاندارد USBR می‌گردد. همان‌طور که گفته شد بعضی از محققین برای دخیل کردن عدد فرود پایین دست در معیار آبستگي و بدست آوردن معیاری مناسب برای مقایسه حوضچه‌ها از عدد عملکرد برای مقایسه عملکرد حوضچه‌ها استفاده می‌کنند. برای بررسی نحوه تغییرات کارهای محققین براساس معیار ارزیابی عدد عملکرد، شکل 14 رسم شده است. همان‌طور که در شکل 14 مشخص شده است، استفاده از بلوک در حوضچه آرامش موجب افزایش عدد عملکرد تا 70% حالت بدون بلوک گردد. این افزایش عملکرد در اعداد فرود بالاتر، بیشتر است. و برای اعداد فرود کوچکتر از 2 عملکرد دو نوع حوضچه یکسان می‌باشد.

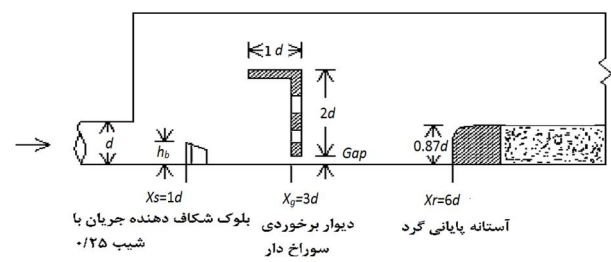


شکل 10 حوضچه آرامش بهینه برای ورودی لوله در کف [51]

اعداد فرود و برای تمامی اندازه‌های دیوار). ابعاد بهینه دیوار برخوردی نیز مستقل از عدد فرود به صورت $2/5D \times 1/25D$ گزارش گردیده است. این دیوار نیز در فاصله‌های متفاوتی قرار داده شده است ($2D$ و $1/5D$ و $2/5D$) اما در عملکرد حوضچه تاثیر گذار نبوده است. مگر در اعداد فرود بالا $5/5$ که فاصله بهینه $2D$ گزارش شده است. برای بلوک شکافنده جریان نیز بهترین اندازه اینگونه ذکر گردید: پهنا $0/85D$ و ارتفاع $0/6D$ که D قطر لوله ورودی است. در مطالعات بعدی گوئل، برای بهبود وضعیت حوضچه آرامش، بلوک اول را شیب‌دار کرده و همچنین به جای دیوار برخوردی [47] از دیوار شبکه‌ای استفاده کرده است [54]. با این تفاسیر پارامتر آبستگي از مقدار قبلی (که پارامتر آن $0/98$ بود) کاهش پیدا کرده و به $0/56$ رسیده است. آزمایشات فقط برای $F_r=5/5$ صورت گرفته، و در 16 طرح مختلف مقایساتی را انجام داده است. در نهایت شکل 11 به عنوان بهترین حوضچه انتخاب گردید.

گوئل و همکاران در مطالعه‌ای که بر روی بهینه‌سازی حوضچه آرامشی که ورودی آن مستطیل شکل است، حالت بهینه‌ای انتخاب کردند که در شکل 12 به نمایش گذاشته‌ایم [46].

همان‌طور که پیشتر ذکر گردید محققینی که در زمینه حوضچه آرامش فعالیت می‌کنند، برای ارزیابی نهایی و مقایسه عملکرد حوضچه خود در انتهای حوضچه مواد قابل شست و شو و قابل حملی می‌ریزند. سپس با اندازه‌گیری عمق آبستگي و فاصله آن از انتهای حوضچه به معیاری به نام شاخص آبستگي می‌رسند. در شکل 13، شکلی جهت تبیین روند افزایش



شکل 11 حوضچه بهینه برای ورودی لوله در کف حوضچه [56]

نسبت به سطح صاف می‌گردد. (18% مربوط به ضعیف‌ترین عملکرد که برای بدیع‌زادگان با بستر سینوسی و عدد زبری 2/3 بود. و 37% مربوط به داده‌های ابراهیمی با بستر مثلثی و زبری 0/72 می‌باشد.)

5. حوضچه زبر در اعداد فرود حدود 4/5 تا 5/5، 32% موجب کاهش عمق مزدوج می‌شود، این عدد برای اعداد فرود 5/5 تا 7/5 به 38% می‌رسد. بنابراین حوضچه‌های آرامش در اعداد فرود بالاتر (تا حدود عدد فرود 7/5) کارایی بهتری نسبت به حوضچه سطح صاف دارد.

6. استفاده از سطح زبر می‌تواند 27% تا 67% موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی گردد. (27% مربوط به ضعیف‌ترین عملکرد که برای محمد علی با زبری مکعبی شکل و ضریب زبری 0/45 بود و 67% مربوط به داده‌های ابراهیمی با بستر زبر و ضریب زبری 0/72 می‌باشد.)

7. اگر زبری به کار رفته در حوضچه به صورت نا همواری‌های مثلثی با زبری 0/72 باشد طول پرش هیدرولیکی به صورت قابل توجهی نسبت به دیگر از زبری‌های به کار رفته از جمله زبری سینوسی 2/3، مکعبی 0/45، دوزنقه‌ای و مستطیلی هر دو با زبری 0/72 کاهش می‌یابد.

8. استفاده از بلوک به کار رفته در کار حاضر (شکل 13) موجب کاهش پارامتر آبستگي بين 15 تا 40 در صد نسبت به حالت استاندارد USBR می‌گردد. این تفاوت درصد کاهش پارامتر آبستگي بدليل متفاوت بودن هندسه‌های بلوک و موانع بکار رفته در حوضچه می‌باشد.

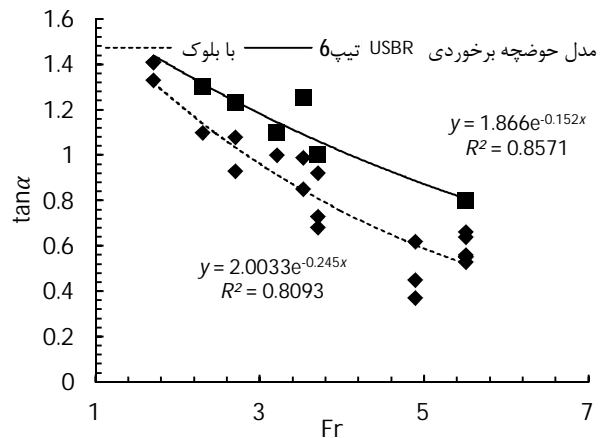
9. استفاده از بلوک در حوضچه آرامش موجب افزایش عدد عملکرد تا 70% در مقایسه حالت بدون بلوک می‌گردد.

10. حوضچه آرامش با زبری مثلثی ($k_R=0/72$)، دوزنقه‌ای ($k_R=0/72$)، مستطیلی ($k_R=0/72$)، سینوسی ($k_R=2/3$) و مکعبی ($k_R=0/45$) به ترتیب کوتاه‌ترین طول پرش هیدرولیکی را ایجاد می‌کنند.

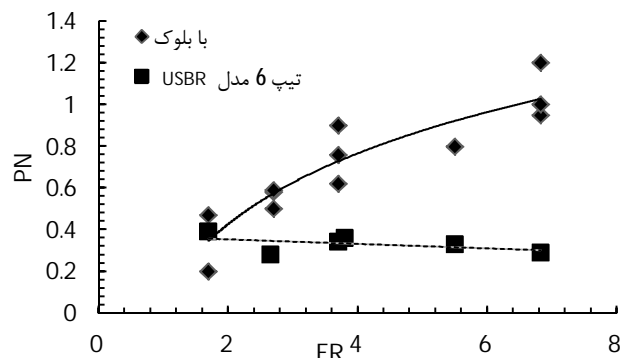
11. حوضچه آرامش با زبری مثلثی ($k_R=0/72$)، دوزنقه‌ای ($k_R=0/72$)، مستطیلی ($k_R=0/72$)، مکعبی ($k_R=0/45$)، سینوسی ($k_R=2/3$) به ترتیب کوتاه‌ترین عمق ثانویه را حاصل می‌کنند.

6- فهرست علائم

B_b	ارتفاع زبری (m)
D	قطر لوله ورودی به حوضچه (m)
d_m	عمق آبستگي (m)
d_s	فاصله عمق آبستگي انتهای حوضچه (m)
E_1	انرژی مخصوص کانال در نقطه 1 (m)
Fr_1	عدد فرود در مقطع بالا دست
Fr_{dm}	عدد فرود آبستگي
G	شتاب ثقل (m/s^2)
H_1	هد کل سیال در مقطع 1 (m)
H_i	ارتفاع آستانه پایانی (m)
K_R	ارتفاع نسبی زبری
L_b	فاصله آستانه پایانی از ابتدای پرش (m)



شکل 13 تغییرات آبستگي پایین دست حوضچه با تغییرات عدد فرود



شکل 14 تغییرات عدد عملکرد حوضچه با تغییرات عدد فرود

5- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی تاثیر بلوک در استهلاك انرژی حوضچه‌های آرامش پرداخته شده است. در این تحقیق تلاش شده است نگاهی جامع به موضوع بلوک در حوضچه‌های آرامش شود و زوایای مختلف تاثیر آن در استهلاك انرژی و همچنین آبستگي پایین دست حوضچه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. و نتایج زیر حاصل گردید:

1. با افزایش عدد فرود تا حدود عدد 8 استهلاك انرژی در حوضچه‌های آرامش افزایش می‌یابد. اما بعد از عدد 8 نمودار افقی گشته و استهلاك انرژی در عدد 72% باقی می‌ماند و تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ به صفر می‌رسد. این نشان دهنده این موضوع است که در اعداد فرود حدودا بالاتر از 8 حوضچه آرامش توانایی استهلاك انرژی را نداشته و باید از ملزومات دیگری مانند پرتاب کننده‌های جامی باید استفاده گردد.
2. با توجه به هندسه حوضچه آرامش و نحوه چینش بلوک و عدد فرود، استفاده از بلوک می‌تواند 13 تا 19 درصد موجب افزایش استهلاك انرژی گردد.
3. تاثیر گذاری حوضچه با بلوک جهت استهلاك انرژی در اعداد فرود بین 3 تا 5 حدود 19% و فرود 5 تا 7 حدود 16% و فرود 7 تا 9 حدود 13% می‌باشد. بنابراین حوضچه آرامش با بلوک برای اعداد فرود 3 تا 5 بهترین کارایی را نسبت به حوضچه آرامش بدون بلوک دارد.
4. با افزایش عدد فرود عمق ثانویه نیز افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از سطح زبر موجب کاهش عمق ثانویه بین 18% تا 37%

[17] J. Uymaz, The Investigation of the scours originating when water passes simultaneously over and under vertical gates. *Journal of Hydraulic Eng. ASCE*, Vol. 114, No. 7, pp. 811–816, 1988

[18] N. Pillai et al. Hydraulic jump type stilling basin for low Froude numbers. *J Hydraulic Eng. ASCE*, Vol. 115, No. 7, pp. 989–994, 1989

[19] K.H. Baghdadi, Local scour downstream drop structure. *Alexandria Eng. Journal*, Vol. 36, No. 2, 1997

[20] S.M. El Abd, Effect of using stilling basins on local scour downstream irrigation structures. *MSc. thesis, Irrigation and Hydraulic Dept. El-Mansoura University, Egypt*, 2002.

[21] G. Hoffmans, Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Eng. ASCE*, Vol. 124, No. 4, pp. 430–437, 1998

[22] B. Dargahi, Scour development downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Res*, Vol. 41, No. 4, pp. 417–426, 2003

[23] S. Aytac, M. Gunal, Prediction of scour downstream of grad-control Structures using neural networks. *J Hydraulic Eng. ASCE* 2008, Vol. 10, pp. 733–942.

[24] C. Victor, Local scour downstream of positive-step stilling basins. *J Hydraulic Eng. ASCE*, Vol. 135, No. 10, pp. 846–851, 2009

[25] C.E. Rice, K.C. Kadavy, Protection against scour at SAF stilling basins. *Hydraulic Eng. ASCE*, Vol. 119, No. 1, pp. 133–139, 1993

[26] D. Long, N. Rajaratnam, M.P. Steffler, and P.R. SMY, Structure of flow in hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 207–218, 1991

[27] A.J. Peterka, Hydraulic design of stilling basin and energy dissipators. *U.S. Dept. of the Interior. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation*, 1978.

[28] A.A. El-Masry, T.E. Sarhan, Minimization of scour downstream heading-up structure using a single line of angle baffles. *Eng. Res Journal of Helwan University*, Vol. 69, 2000

[29] A.A. El-Masry, Minimization of scour downstream heading-up structures using double line of angle baffles. *Proc of sixth international water technology conference (IWTC). Alexandria, Egypt*, 2001.

[30] H.L. Tiwari, V.K. Gahlot, and Tiwari Seema, Reduction of Scour Depth Downstream of Stilling Basin, *International Research Journal of Engineering Sciences*, Vol. 2, No. 7, pp. 20–25, 2013

[31] H.L. Tiwari, Tiwari Seema, Design of Stilling Basin Models with Intermediate sill. *Journal of Science Technology and Management*, Vol. 2, No. 4, pp. 66–71, 2013

[32] H.L. Tiwari, Design of Stilling Basin with Impact Wall and End Sill, *International Research Journal of Resent Sciences*, Vol. 2, No. 3, pp. 56–59, 2013

[33] H.L. Tiwari, A. Pawar, B. K. Gehlot, and J. Singh, Study of Shape of Intermediate Sill on the Design of Stilling Basin Model, *International Journal of Research in Egg and Technology (IJRET)*, Vol. 3, No. 4, pp. 133–138, 2014

[34] A. Goel, Arun and Verma, Improved Design of Energy Dissipators for Pipe Outlets. *J. of Irrigation and Drainage Systems, Kluwer Academic Pub The Netherlands*, Vol. 13, No. 4, pp. 313–320, 1999

[35] A. Goel, Verma, Development of Economical Energy Dissipators for Pipe Outlets with Low Inflow Froude Numbers, *Asian Institute of Technology, Thailand*. D.V.S. (2000)

[36] Ashraf Fathy ELLAYN, Zhi-lin SUN, Hydraulic jump basins with wedge-shaped baffles, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, Vol. 13, No. 7, pp. 513–525, 2012

[37] H.S. Mohamed Ali, Effect of Roughened Bed Stilling Basin on Length of Rectangular Hydraulic Jump, *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 1, pp. 83–93, 1991

[38] S. Ebrahimi, F. Salmasi, A. Abbaspour, Numerical Study of Hydraulic Jump on Rough Beds Stilling Basins, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, Vol. 3, No. 1, pp. 19–24, 2013

[39] S.A. Ead, Rajaratnam, Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 7, pp. 656–663. ASCE 2002

[40] F.G. Carollo, V. Ferro, V. Pampalona, Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 9, pp. 989–999, ASCE 2007

[41] S. Pagliara, I. Lotti, M. Palermo, Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 29–38, 2008

[42] N. Barahmand, A. Shamsai, Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds. *Lakes & Reservoirs Research & Management*, Vol. 15, NO. 4, pp. 285–306, 2010.

[43] R. Badizadegan, K. Esmaili, M.F. Maghrebi M. Saneie, Hydraulic Jump Properties in Irrigation Canals with Corrugated Bed, *Journal of Water and Soil* Vol. 25, No. 3, pp. 676–687, Jul–Aug 2011

[44] M.A. Abdelazim, Yasser, A. Mohamed, Effect of stilling basin shape on the hydraulic characteristics of the flow downstream radial gates, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 49, pp. 393–400, 2010

[45] R. C. Sanjeev Kumar Gupta Mehta, V. K. Dwivedi, Modeling of relative length and relative energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel, *Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of the 3rd Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE 2012)*. J of ELSEVIE

[46] D. V. S. Verma and Arun Goel, Development of Efficient Stilling Basins for Pipe Outlets, *L OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING ASCE*, Vol. 129, pp. 194–200, MAY 2003

P_1	فشار ترمودینامیکی در مقطع 1 (Pa)
PN	عدد عملکرد
q	دبی در واحد عرض (m^3/s)
R^2	ضریب رگرسیون
S	طول موج (m)
T	عمق موج (m)
$\tan \alpha$	پارامتر آبشستگی
V	سرعت میانگین (m/s)
V_1	سرعت متوسط در مقطع 1 (m/s)
V_c	سرعت متوسط کانال (m/s)
w_b	عرض بلوک (m)
γ^*	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (m)
γ_1	عمق فوق بحرانی در پنجه پرش (m)
Z_1	ارتفاع سیال در مقطع 1 (m)

علائم یونانی

β	ثابت تنش برشی سطح
ΔE	اختلاف انرژی مخصوص (m)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)
ρ	چگالی سیال (m/kg)
σ	کشش سطحی (N/m)

7- منابع

[1] M. Bakhtiari, S.M. Kashefpor, M. Shafei Bajestan, Experimental study of characteristics of hydraulic jump in a stilling basins rectangular divergent, *Fourth National Conference on Management of irrigation and drainage networks*, Shahid Chamran University, College of Water Sciences and Engineering, 2013 (In Persian)

[2] A.J. Peterka, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, *United States Department of interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 25*, Denver Co 4th revised Printing.

[3] S.A. Ead, N. Rajaratnam, Hydraulic jump on corrugated bed, *journal of hydraulic engineering*, ASCE, 2002a, Vol. 128, No. 7, pp. 656–663

[4] F.J. Resch, H.J. Leutheusser, Reynolds stress measurements in Hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Res*, No 10, pp. 409–430, 1972

[5] W. Hager, R. Bremen, Classical hydraulic jump sequent depths, *Journal of Hydraulic Research*, 1989

[6] H. Chanson, Air Bubble Entrainment in Hydraulic Jumps Similitude and Scale Effects, *Dept. of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia*, Report No. CH57/05, pp. 119, 2006

[7] M. A. ABDELAZIM, A Hybrid Approach to improve design of stilling basin, *Nile Basin Capacity Building network*, pp.16, 2010

[8] V.T. Chow, *Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill. New York*. pp. 56–1959

[9] M. Fathi Moghadam, E. Parsi, Experimental Investigation of the Effect of Hydraulic Jump Location on Flow Velocity in Type II Stilling Basin, *Irrigation Engineering and Science (Journal of Agriculture)*, Volume 36, Number 2, pp. 5–21, April. 2013 (in Persian)

[10] F.W. Blaisdell, Development and hydraulic design of St. Anthony Fall Stilling Basin. *Proc Journal of Hydraulic Eng. ASCE*, 1947

[11] Fahmy Salah, Fahmy Abdelhaleem, Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear, over fall weirs, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, pp. 675–684, 2013

[12] A. Goel, Experimental Study on Stilling Basins for Square Outlets. *3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain*, December 14–16, 2007, pp. 157–162

[13] Y. K. Tung, L. w. Mays, Optimal designs for overflow spillway, *Proceeding of ASCE journal of Hydraulic division*, Vol. 10, No. 108, pp. 1163–1178, 1982

[14] W.H. Hager, Energy dissipators and hydraulic jump. *Water science and technology library*, Vol. 8, pp. 106–110, 1992

[15] P. Novak, Influence of bed load passage on scour and turbulence Downstream of stilling basin, *9th Congress, IAHR, Dubrovnik, Croatia*, 1961.

[16] O. Catakli et al. A study of scour at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipators. *11th Congress of large dams; Madrid*. 1973.

- [52] N.N.Pillai & V.Jayaraman, Cavitation on baffle piers in stilling basins. Symposium on High Velocity Flow. *Indian Institute of Science. Bangalore.* 1967
- [53] D. V. S. Verma, Arun Goel and Vipun Rai, NEW STILLING BASINS DESIGNS FOR DEEP RECTANGULAR OUTLETS, *International journal of engineering*, Vol. 17, No. 1, pp.1-10, 2004
- [54] UN GOEL & D. V. S. VERMA, Alternate designs of stilling basins for pipe outlets *J of Springer*, Vol. 20, No. 1, pp. 139-150, 2006
- [55] I.H. Elsebaie and S. Shabayek, Formation Of Hydraulic Jumps On Corrugated Beds, *International Journal of Civil & Environment al Engineering IJCEE –IJENS*, Vol:10 No:1 pp. 37-47 ,2010
- [56] S. A. Ead, N. Rajaratnam, Hydraulic jump on corrugated beds, *Journal of Hydraulic Engineering, ACSE* , Vol. 128, No. 7, pp. 656-663, 2002
- [47] ARUN GOEL & D.V.S. VERMA, Model studies on stilling basins for pipe outlets, *Irrigation and Drainage Systems*, 2001 *Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.* Vol. 15, pp. 81-91
- [48] V.T CHOW Open Channel Hydraulics, *COPYRIGHT 1959 the McGraw Hill Book Company*, pp. 41
- [49] M. ALI ABDELAZIM, A Hybrid Approach to improve design of stilling basin, *Nile Basin Capacity Building network*, 2010, pp.16
- [50] A. Habibzadeh, S. Wu, F. Ade, N. Rajaratnam, and M. R. Loewen, Exploratory Study of Submerged Hydraulic Jumps with Blocks, *American Society of Civil Engineers*, Vol 137, No. 6, pp. 706-710, 2011
- [51] A. Habibzadeh, M. R. Loewen and N. Rajaratnam, Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps *Journal of ASCE*, Vol.138, No. 10, pp. 902-908, 2012