



## تحلیل و بررسی استفاده از بلوک بر عملکرد حوضچه‌های آرامش

محمد مردانی<sup>۱</sup>، حسن رحیم زاده<sup>۲\*</sup>، حامد سرکرده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- محقق پسا دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-4413 rahimzad@aut.ac.ir

### چکیده

مطالعه حاضر به بررسی میزان استهلاک انرژی و آشستگی پایین دست حوضچه در حضور بلوک و عدم حضور آن و معنی حوضچه بهینه در شرایط مختلف برداخته است. در این تحقیق تلاش شده است نگاهی جامع به موضوع بلوک در حوضچه‌های آرامش شود و زوایای مختلف تأثیر آن در استهلاک انرژی و همچنین آشستگی 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 موافع استفاده نشده و تأثیر تغییر شرایط هندسی حوضچه بر استهلاک انرژی و آشستگی پایین دست معیار ارزیابی قرار گرفته است. در گروه دوم، با استفاده از بلوک‌های مختلف در طول حوضچه، میزان استهلاک انرژی و آشستگی پایین دست مشخص گردیده است. بررسی داده‌های موجود نشان می‌دهد با توجه به هندسه حوضچه آرامش و نحوه چینش بلوک و عدد فروع استفاده از بلوک می‌تواند به طور میانگین ۱۵٪ موجب افزایش استهلاک انرژی گردد. با افزایش عدد فروع عمق ثانویه نیز افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از سطح زیر موجب کاهش عمق ثانویه بین ۱۸٪ تا ۳۷٪ نسبت به سطح صاف می‌گردد. استفاده از سطح زیر می‌تواند ۲۷٪ تا ۶۷٪ موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی گردد. همچنین استفاده از بلوک در حوضچه موجب کاهش پارامتر آشستگی نسبت به حالت استاندارد USBR می‌گردد. همچنین استفاده از بلوک در حوضچه آرامش موجب افزایش عدد عملکرد در مقایسه حالت بدون بلوک می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۷ بهمن ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۷ اسفند ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۲۹ فروردین ۱۳۹۴

کلید واژگان:

حوضچه آرامش

استهلاک انرژی

پرش هیدرولیکی

بلوک

آشستگی

## 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.

فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین دست می‌باشد. یکی از رایج‌ترین سازه‌های مستهلك کننده انرژی، حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی می‌باشند که در آن‌ها با شکل‌گیری پرش هیدرولیکی و عبور جریان از رژیم فوق بحرانی به زیربحارانی، انرژی جریان مستهلك می‌شود [۱]. پرش هیدرولیکی با توجه به مشخصات سطح بستر به دو نوع کلی تقسیم می‌شود.

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

Please cite this article using:

M. Mardani, H. Rahimzadeh, H. Sarkardeh, Analysis and Assessment of Installing Blocks on Performance of Stilling Basins, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 31-41, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mardani, H. Rahimzadeh, H. Sarkardeh, Analysis and Assessment of Installing Blocks on Performance of Stilling Basins, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 31-41, 2015 (In Persian)

نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱ برای نقطه ۱ می‌توان رابطه (۲) 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 (۲)،  $H$  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 کanal در نقطه ۱ می‌نامند و آن را با  $E_1$  نمایش می‌دهند. برای بدست آوردن دیگر حساب انرژی مخصوص  $V_1$ ، در هر نقطه دیگری از کanal از رابطه (۳) استفاده می‌کنیم. که  $q$  در رابطه (۳) 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 (۴) نشان داده شده است را بدست آورد. همین طور رابطه (۵) و (۶) که به ترتیب

نشان دهنده انرژی مخصوص اولیه و میزان استهلاک انرژی می‌باشد.

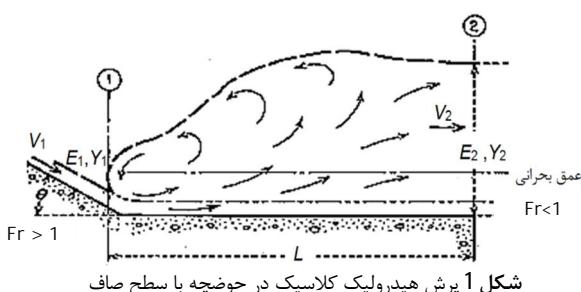
$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (4)$$

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

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

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 صیر می‌کنند (۶) تا ۲۴ ساعت، بستگی به شرایط آزمایش دارد [۱۱]. بعد از گذشت این زمان دو پارامتر مهم را اندازه‌گیری می‌کنند، عمق آبستنگی  $d_m$  و فاصله آن از انتهای حوضچه  $d$ . در شکل ۲ پارامترهای عملکرد شده نشان داده شده است.

پارامتری که در رابطه (۷) نشان داده شده است به عنوان پارامتر آبستنگی شناخته می‌شود. هر چقدر این عدد کوچکتر باشد نشان دهنده عملکرد بهتر حوضچه می‌باشد.



نوع اول آن که ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی که در کanal‌های با مقطع مستطیلی و کف افقی صاف تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A می‌نامند که به طور وسیع توسط پترکا [۲]، راجارانتام [۳]، لئوتزر [۴]، هاگر و برمون [۵] و چانسون [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. توسط رابطه ارائه شده توسط بلانگر [۷] عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک  $y_2^*$  بازای عمق اولیه یا همان عمق فوق بحرانی در پنجه پرش  $y_1$  و سرعت متوسط  $V_1$  در این مقطع به صورت رابطه (۱) بدست می‌آید [۸]:

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

که در رابطه (۱)  $Fr_1 = V_1 / \sqrt{gy_1}$  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 مستهلاک کننده انرژی آب یا همان حوضچه آرامش، عمولاً 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، بدليل وقوع آبستنگی زیاد، نباید روی دهد. در تمام حوضچه‌هایی که در آن عمق پایاب کمتر از ۹۰ درصد عمق ثانویه پرش کلاسیک است، طراحی حوضچه را با ساختار فیزیکی آن باید به گونه‌ای تصحیح کرد تا عمق پایاب، بیشتر از ۹۰ 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 [۹]. 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 ۴۰٪ تا ۵۵٪ عرض حوضچه را اشغال کنند تا در این حالت عملکرد بهینه داشته باشند [۱۰].

حوضچه‌های آرامش بنا به کارایی مورد نظرشان از ورودی‌های متفاوتی بهره می‌برند. این ورودی‌ها بعضاً به صورت کanal 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 یک سطح آزاد آب وارد حوضچه می‌گردد.

با توجه با این که 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 قبیل و بعد از پرش می‌باشد. جنبه‌های کلی پرش هیدرولیکی در شکل ۱

کرده و رابطه‌ای را که خود او ۴ سال قبل در مقاله‌اش آورده بود را اصلاح کرد [21]. یکی از موضوعات مهم در آبشنستگی پیش‌بینی پروفیل و هندسه آبشنستگی می‌باشد. بیشتر در گهی بر روی هندسه آبشنستگی آزمایشاتی را انجام داده و رابطه‌ای منطقی جهت پیش‌بینی این هندسه ارائه کرده است. او نتیجه گرفت که آبشنستگی پایین دست توسط جریان‌های ثانویه و گردابه‌های حاصله از پرش هیدرولیکی ایجاد می‌گردد.

اصلی‌ترین پارامتر بی بعد در کنترل این پدیده را هدنسی بالا دست، اندازه نسی ماده قابل شستشو رودخانه و زبری نسی کف سر ریز معرفی کرده است [22]. آیتک و گونال نیز جهت تخمین پروفیل آبشنستگی از روش رگرسیون خطی استفاده کرده‌اند و نشان دادند از روابط دیگر محققین پروفیل دقیق‌تری را تخمین می‌زنند [23].

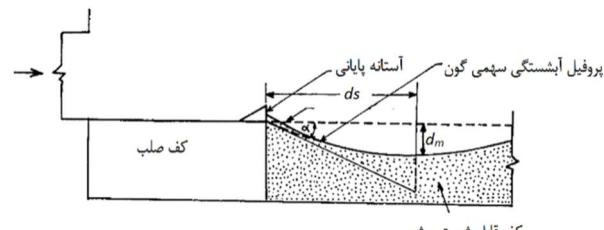
بیوت و ویکتور نیز آزمایشات متعددی برای بدست آوردن پروفیل آبشنستگی انجام دادند و نتیجه گرفتند حد اکثر عمق آبشنستگی با ( $Fr_{dm}$ ) متناسب است و مکان این حد اکثر عمق از انتهای آبشنستگی نیز با  $(Fr_{dm})^{4/3}$  متناسب است [24]. همان‌طور که اشاره شد انرژی آب به طور کامل توسط حوضچه از بین نمی‌رود بنابراین این انرژی اضافی موجود آبشنستگی پایین دست می‌گردد. ریس و کدوی در تحقیقات خود نشان دادند با قرار دادن سنج ریزه در پایین دست حوضچه آرامش می‌توانند از آبشنستگی 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 آنکه دیگر روابطی حاصل شده است [25]. محققینی مانند بردلی و پترکا [2]، راجاتنان [3]، لوتزر 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]، ویسچر و هگر [15]، بر روی شکلهای مختلف بلوک‌ها آزمایشاتی را انجام داده‌اند، که نتایج آنها در ۳ مورد زیر خلاصه گردیده است [11]:

۱. حالت استوانه‌ای برای وجه رو به جریان حالت بهینه است.

۲. از یک ردیف بلوک استفاده می‌شود، بدليل این‌که ردیف دوم کارایی کمتری داشته و عملکرد آن متأثر از ردیف اول است.

۳. از بلوک برای اعداد فرود بالای حدود ۴ استفاده نمی‌شود و از مستهلک کنده‌های پرتتابه‌ای 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 ۴۵ درجه کارایی بهتری دارد [31-30]. تیواری در مقاله بعدی خود با کار کردن بر ورودی مستطیلی توانست ۲۹٪ عملکرد حوضچه را نسبت به مدل USB بهبود بخشید، این کار را توسط تغییر محل دادن دیبور برخور迪 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 ۱/۷ تا ۵/۵ با استفاده از بلوک با زاویه حمله ۱۵۰ درجه حوضچه را نسبت به مدل



شکل ۲ پارامترهای مهم در ارزیابی حوضچه توسط معیار آبشنستگی

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

که در رابطه (7)  $d_m$  و  $ds$  به ترتیب حد اکثر عمق آبشنستگی و فاصله آن از انتهای حوضچه می‌باشد. همچنین  $\tan\alpha$  به عنوان اندیس آبشنستگی نیز شناخته می‌شود. عملکرد حوضچه آرامش تابعی از عدد فرود اولیه ( $Fr_1$ ، قطر لوله و رودی  $(d)$ ، عمق پایاب پایین دست حوضچه ( $h$ )، ماکزیمم عمق آبشنستگی ( $d_m$ ، و مکان این آبشنستگی می‌باشد ( $s$ )). حوضچه‌ای که عمق آبشنستگی آن کم و فاصله آن از انتهای حوضچه زیادتر باشد عملکرد بهتری دارد. عدد فرود آبشنستگی  $Fr_{dm}$  بر مبنای سرعت متوسط کanal  $V_c$  و ماکزیمم عمق آبشنستگی  $d_m$  می‌تواند به صورت رابطه (8) معرفی گردد.

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

اگر پروفیل آبشنستگی بصورت سه‌می باشد، مقدار  $\tan\alpha$  نشان دهنده شبی در محل ماکزیمم آبشنستگی می‌باشد. بعضی از محققین برای دخیل کردن عدد فرود پایین دست در معیار آبشنستگی و بدست آوردن معیاری مناسب برای مقایسه حوضچه‌ها از عدد عملکرد که بصورت رابطه (9) تعريف 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:

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

## ۲- پیشینه تحقیق

برای اولین بار در سال ۱۹۴۷ در مرکز تحقیقات آیدaho آمریکا مطالعاتی بر روی عملکرد حوضچه آرامش برروی 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 ضمامت آن ارائه کرده‌اند. مروری فشرده بر مطالعات پرش هیدرولیکی و مستهلک کننده‌های انرژی در منابعی چون هاگر [14] یافت می‌شود.

در استفاده از معیار آبشنستگی پایین دست حوضچه‌ها، فرمول‌هایی جهت تخمین پروفیل آبشنستگی توسط محققینی مانند، نوارک [15]، کتلکی [16]، یویمار [17]، پیلایی [18]، بغدادی [19]، ال عبد [20]، ارائه شده است. پیلایی که بر موضع پرش هیدرولیکی با اعداد فرود کم کار می‌کرد نشان داد استفاده از بلوک با زاویه حمله ۱۵۰ درجه و زاویه انتهایی ۹۰ درجه موجب افزایش کارایی حوضچه گردیده و آبشنستگی پایین دست را کاهش می‌دهد [18]. هافمنس بر روی آبشنستگی جت افقی مطالعاتی را انجام داده و با استفاده از قانون دوم نیوتون برای عمق ماکزیمم آبشنستگی رابطه‌ای را ارائه

حوضچه‌ها بود [43].

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

ابراهیمی و همکاران به منظور بدست آوردن نحوه تغییرات استهلاک انرژی حوضچه‌های آرامشی که سطح آن‌ها زیر می‌باشد از روش CFD جهت مدل عددی بهره برده‌اند. آن‌ها پرش هیدرولیکی دو بعدی را توسط روش استاندارد توربولانس  $K-e$  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 زیر 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 تأثیرات مختلف وجود و عدم وجود بلوک و تأثیر زیری 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 تأثیر آن در استهلاک انرژی و همچنین آبشنستگی پایین دست حوضچه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

در این مطالعه به بررسی دو نوع عمدۀ حوضچه آرامش پرداخته شده است. در نوع اول از هیچ گونه بلوک و مواعنی 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 برخوردار، سطح زیر 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 [33-31] بر این موضوع تمرکز کرده‌اند و با استفاده از انواع مختلف مواد، عملکرد حوضچه آرامش را بهبود پخشیده‌اند. 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 داده‌های 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،  $\rho$  چگالی سیال،

USBR بهبود بخشیدند [34]. یک سال بعد تواستند 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 زیری سطح حوضچه، موجب کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی می‌گردد. این زیری 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 زیری بهینه حوضچه و معادلات کلی جهت بی‌بردن به عمق ثانویه بعد از پرش ارائه کرده است [37]. اید و راجارانتام بر روی پرش هیدرولیکی بر بستر موج دار در محدوده اعداد فرود  $4$  تا  $10$  مطالعه کرده‌اند، نتیجه گرفته‌ند که ثابت تنش برشی سطح ( $\beta$ ) به ارتفاع نسبی زیری بستر وابسته است  $H_b = H_b/y_1 = K_R$  که در آن  $H_b$  ارتفاع زیری است. همچنین او نتیجه گرفت که طول پرش هیدرولیکی در بستر موج دار 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 موج دار بدست آورده‌اند و نشان دادند این عبارت به طور قابل قبولی بر نتایج راجارانتام صدق می‌کند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که تنش برشی سطح موج دار با جریان مومنتوム متناسب است و برای عمق ثانویه پرش هیدرولیکی رابطه (11) را ارائه کرده‌اند:

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

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

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

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

بدیع‌زادگان و همکاران بر روی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار 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  $0/75$  تا  $0/167$  و تغییرات عدد فرود بین  $4/6$  تا  $12/26$  می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با بکارگیری بستر موج دار سینوسی در حوضچه‌های آرامش می‌توان شاهد کاهش نسبت اعمق 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 حوضچه	معادلات بدست آمده	ضریب 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

همان طور 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 مستهلاک کرد. با توجه به هندسه حوضچه آرامش و نحوه چینش بلوک و عدد فرود، استفاده از بلوک می‌تواند ۱۹٪ 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 مذکور 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 ۱۹٪ و فرود 5 تا 7 حدود ۱۶٪ و فرود 7 تا 9 حدود ۱۳٪ 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 افتی 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 پرتات 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 توanstه‌اند طول حوضچه را به ۴/۵ 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 می‌تواند انرژی آب را مستهلاک کنند. یکی از مهمترین مشخصات این بلوک‌ها، هندسه آن‌ها می‌باشد. با توجه با 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 پیلایی 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 یکسری مطالعات تجربی، پیلایی (1964) نشان داد استفاده از بلوک با زاویه حمله ۱۲۰ درجه و زاویه انتها ۹۰ درجه موجب

ه کشش سطحی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی می‌باشد. در هیدرولیک کاتال‌های 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 بی باکینگهام برای دستیابی به پارامترهای بی بعد موثر بر جریان به صورت رابطه (15) خواهد بود [49]:

$$\frac{E}{y_1} = f(\text{Fr}_1) = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (15)$$

درتابع فوق  $\text{Fr}_1$  عدد فرود بالا دست جریان می‌باشد.

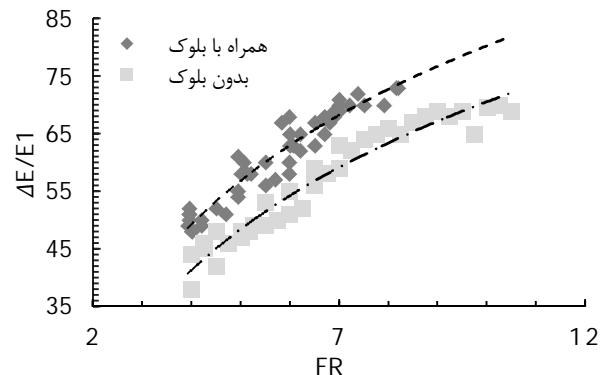
#### 4- داده‌ها و مشخصات حوضچه آرامش

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.

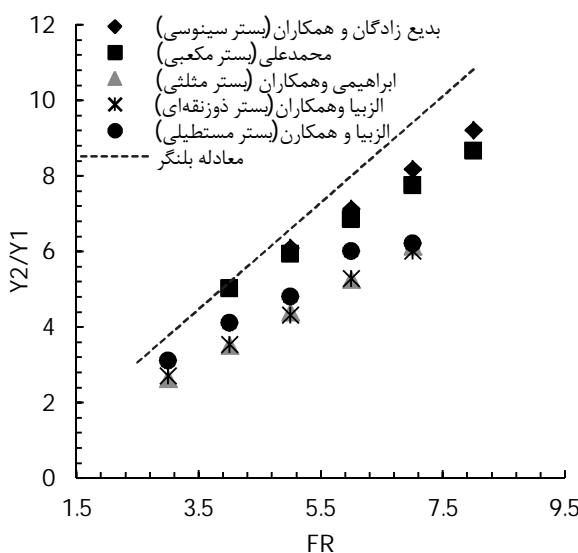
در شکل 3 داده‌های محققینی که در تحقیقات خود از بلوک استفاده کرده‌اند رسم شده است. در این میان فهمی عبدالحالم [11] که بر روی تاثیر بلوک‌های نیمه دایروی بر استهلاک انرژی در حوضچه آرامش کار کرده است، گردآوری شده است. او جهت نشان دادن تاثیر بلوک چندین آزمایش را در سطح صاف بدون بلوک انجام داده است. داده‌های این محقق برای اعداد فرود ۲/۵۸ تا ۲/۰۷ در شکل 3 رسم گردیده است.

مجموعه دیگری از داده‌ها مربوط به فتحی مقدم و پارسی می‌باشد که بر روی تاثیر موقعيت پرش بر تغییرات سرعت در حوضچه آرامش انجام داده‌اند (اعداد فرود بین ۱ تا ۵) [9].

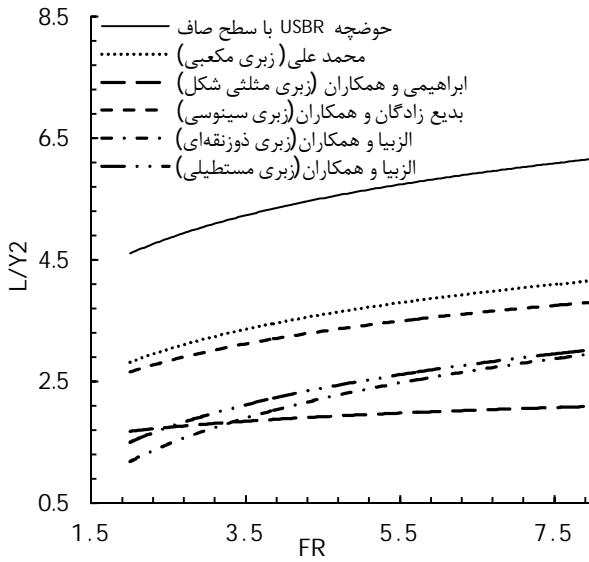
مجموعه داده دیگری که به بررسی استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش بدون بلوک گردآوری شده مربوط به عبدالعظیم می‌باشد [44]. در شکل شماره ۳ همچنین داده‌های مربوط به محققینی که در حوضچه‌های آرامش همراه با بلوک کار کرده‌اند گردآوری شده تا مقایسه بهتری صورت گیرد. حبیبزاده و همکاران بر موضوع پرش هیدرولیکی بر بلوک مستغرق مطالعه کرده‌اند و داده‌های آن‌ها برای اعداد فرود از ۳/۹۲ تا ۸/۱۹ در شکل شماره ۳ رسم گردیده است [51.50]. بدیعزادگان و همکاران نیز بر موضوع استهلاک انرژی در بسترها موجدار تحقیقاتی انجام داده‌اند که داده‌های آن‌ها بین اعداد فرود ۴ تا ۱۰ در شکل شماره ۳ 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 اعدا فرود حدود 4/5 تا 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.

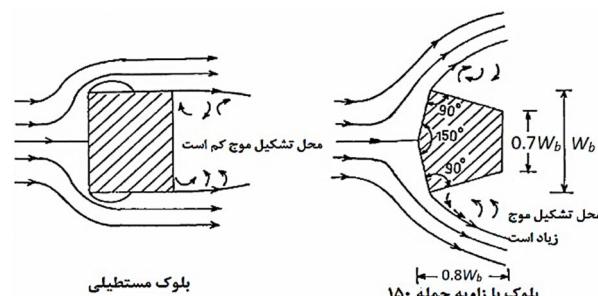
همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌کنید تغییرات طول پرش تقریباً مستقل از عدد فرود می‌باشد. با توجه به شکل 7 حوضچه ابراهیمی با سطح زبر بهترین عملکرد را داشته و موجب کاهش طول پرش تا 67% نسبت به

افزایش درگ و در نتیجه افزایش توربولنس 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 کاویتاسیون در چنین حالتی نیز کاهش می‌یابد، بدليل اینکه پایین دست بلوک شکل دار شده است و مرکز تشکیل کاویتاسیون از مرز بلوک‌ها دور می‌باشد [52]. در ابتدا محققین زاویه حمله این بلوک را 120 درجه انتخاب کردند اما با انجام آزمایشات دیگر پی بردن که زاویه مناسب این بلوک‌ها برای سریزها 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.

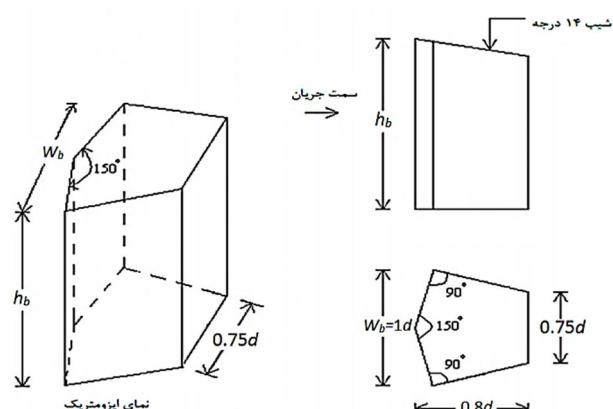
اخیراً آقای گوئل و ورما در آزمایشات خود نشان داده‌اند که استفاده از بلوکی که سطح آن شیبدار است جهت استهلاک انرژی موثرتر می‌باشد. هندسه این بلوک‌ها در شکل 5 نشان داده است [54].

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 صاف 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 بدليل 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، الزیبا با بستر ذوزنقه‌ای 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 ضعیف‌ترین 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 بردن که حوضچه در شکل 9 برای ورودی‌های با مقطع گرد، بهترین عملکرد را دارا است [35].

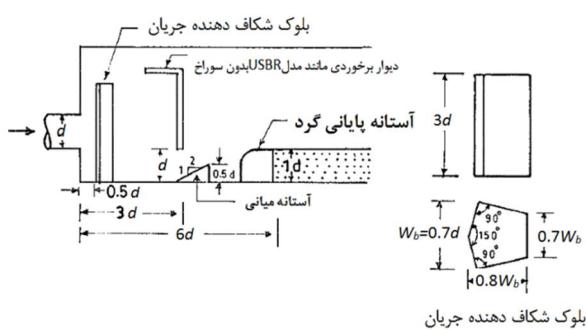
همچنین این دو محقق تحقیقاتی در راستای بهینه کردن عرض بلوک شکاف دهنده جریان انجام داده‌اند و نتیجه گرفتند که  $\frac{W_b}{d} = 0/75$  برای اکثربیت حالت‌ها در بازه اعداد فرود 1/7 تا 5/5 بهترین بازدهی را دارا است. گوئل و ورما در حوضچه آرامشی که ورودی به آن تحت فشار است و لوله به کف زمین چسبیده 133 آزمایش 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) هرچقدر 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 بسته است.)

با توجه به شکل 10 برای اینکه بدانیم فاصله دیوار برخوردار تا کف حوضچه چقدر باشد نیز آزمایشاتی انجام شده است و اگر فاصله دیوار برخوردار تا کف حوضچه 0/75D باشد بهترین عملکرد را دارد. (برای تمامی آزمایش شده در شکل 6 و 7 آمده است.)

جدول 3 معادلات و ضرایب رگرسیون خطوط شکل 7

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



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

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].

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

با توجه به شکل 6، علاوه بر پارامتر زبری  $K_R$  هندسه زبری نیز تأثیر 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 مکعب های 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 ذوزنقه‌ای (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 ذوزنقه‌ای (الزیبا) عملکرد ضعیفتری را نسبت به بستر ذوزنقه‌ای (الزیبا) 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.

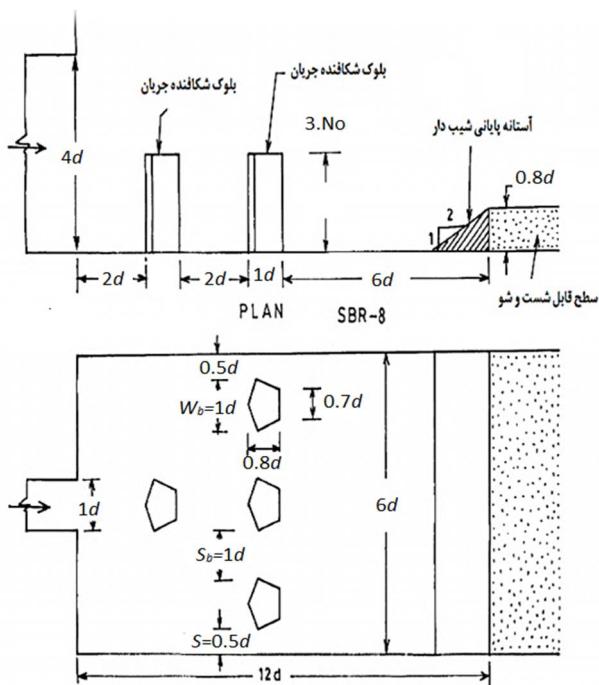
با توجه به شکل 7 ترتیب گفته شده برای عمق ثانویه، در مورد طول پرش صدق نمی‌کند. حوضچه آرامشی که ابراهیمی با بستر مثلثی ساخته



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	جهت زبری سطح حوضچه	ضریب زبری سطح	هندسه به کار بده شده
-	سطح صاف	بلنگر	
0/45	بلوک مکعبی شکل	محمد علی	
0/72	سطح زبر مثلثی	ابراهیمی و همکاران	
2/3	سطح زبر سینوسی	بدیع‌زادگان و همکاران	
0/72	سطح زبر ذوزنقه‌ای	الزیبا و همکاران	
0/72	سطح زبر مستطیلی	الزیبا و همکاران	

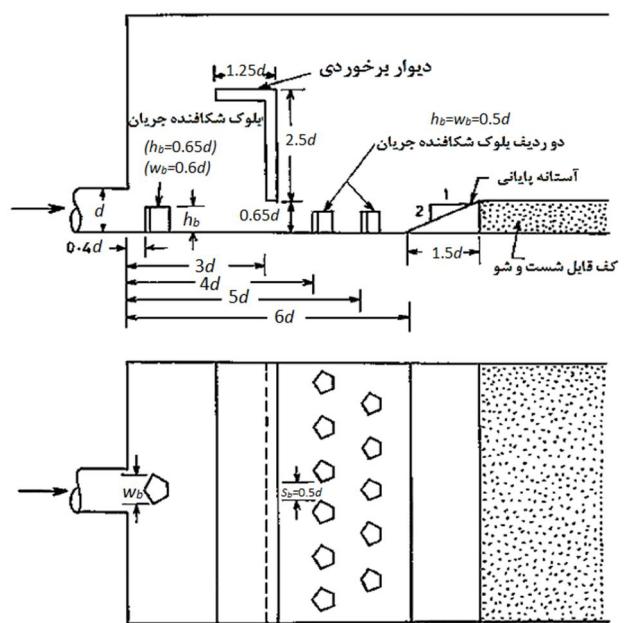


شکل 12 حوضچه آرامش بهینه برای ورودی مستطیلی [46]

عدد فرود و نحوه آبستنستیگی پایین دست نشان داده شده است. در شکل 13 جهت مشخص کردن نحوه تاثیرگذاری بلوک بر کاهش پارامتر آبستنستیگی نتایج محققینی 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 این اثرباره بر حوضچه‌ها، آبستنستیگی 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 حدوداً 5) کارایی بهتری از خود نشان می‌دهند اما بعد از آن، با افزایش عدد فرود تغییر محضوسی در پارامتر آبستنستیگی مشاهده نمی‌شود. در این شکل عبارت  $\tan\alpha$  بیان‌گر آبستنستیگی پایین دست می‌باشد. را نیز به عنوان اندیس آبستنستیگی نیز می‌شناسند، هر چقدر مقدار این عبارت بیشتر گردد نشان دهنده این است که حوضچه عملکرد ضعیفی را دارد. با توجه به این شکل می‌توان گفت استفاده از بلوک در حوضچه موجب کاهش پارامتر آبستنستیگی 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 آبستنستیگی 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.

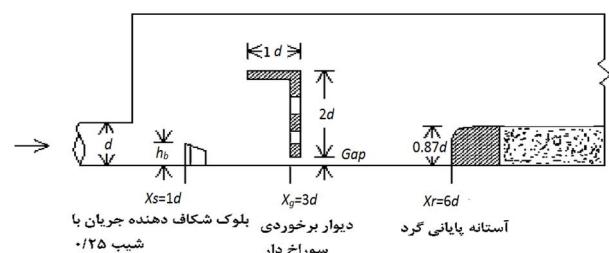


شکل 10 حوضچه آرامش بهینه برای ورودی لوله در کف [51]

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  $5D$  و  $1/5D$ ). اما در عملکرد حوضچه تاثیرگذار 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 قطر لوله  $D$  ورودی است. در مطالعات بعدی گول، برای بهبود وضعیت حوضچه آرامش، بلوک اول را شبیه‌دار کرده و همچنین به جای دیوار برخوردی [47] از دیوار شبکه‌ای استفاده کرده است [54]. با این تفاسیر پارامتر آبستنستیگی از مقدار قابلی (که پارامتر آن 0/98 بود) کاهش پیدا کرده و به 0/56 رسیده است. آزمایشات فقط برای  $Fr=5/5$  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 آبستنستیگی و فاصله آن از انتهای حوضچه به معیاری به نام شاخص آبستنستیگی می‌رسند. در شکل 13، شکلی جهت تبیین روند افزایش

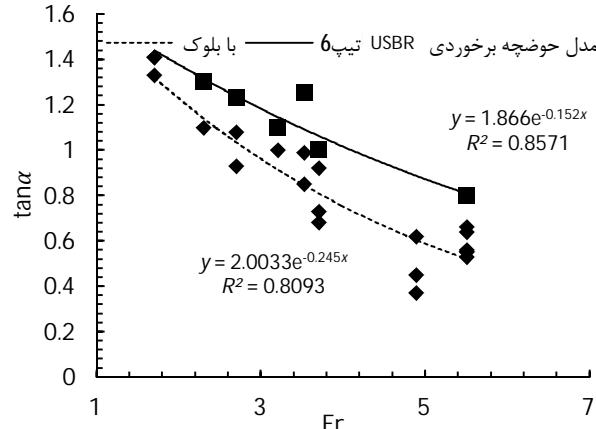


شکل 11 حوضچه بهینه برای ورودی لوله در کف حوضچه [56]

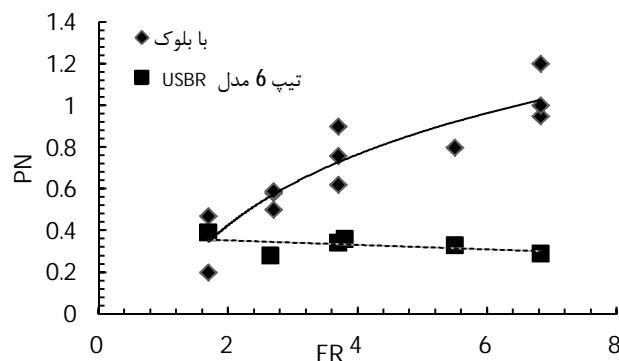
- نسبت به سطح صاف می‌گردد. (18) مربوط به ضعیفترین عملکرد که برای بدیع زادگان با بستر سینوسی و عدد زبری 2/3 بود. و 37% مربوط به داده‌های ابراهیمی با بستر مثلثی وزبری 0/72 می‌باشد).
- حوضچه زبر در اعدا فرود حدود 4/5 تا 5/5 موجب کاهش عمق مزدوج می‌شود، این عدد برای اعداد فرود 7/5 تا 7/5 به 38% می‌رسد. بنابراین حوضچه‌های آرامش در اعدا فرود بالاتر (تا حدود عدد فرود 7/5) کارایی بهتری نسبت به حوضچه سطح صاف دارد.
- 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).
- اگر زبری به کار رفته در حوضچه به صورت ناهمواری‌های 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، ذوزنقه‌ای و مستطیلی هر دو با زبری 0/72 کاهش می‌یابند.
- استفاده از بلوک به کار رفته در کار حاضر (شکل 13) موجب کاهش پارامتر آبستنگی بین 15 تا 40 درصد نسبت به حالت استاندارد USBR می‌گردد. این تفاوت درصد کاهش پارامتر آبستنگی بدلیل متفاوت بودن هندسه‌های بلوک و مواعن بکار رفته در حوضچه می‌باشد.
- استفاده از بلوک در حوضچه آرامش موجب افزایش عدد عملکرد تا 70% در مقایسه حالت بدون بلوک می‌گردد.
- حوضچه آرامش با زبری مثلثی ( $k_R=0/72$ )، ذوزنقه‌ای ( $k_R=0/72$ )، 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.
- حوضچه آرامش با زبری مثلثی ( $k_R=0/72$ )، ذوزنقه‌ای ( $k_R=0/72$ )، 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 علامت

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



شکل 13 تغییرات آبستنگی 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 استهلاک 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 استهلاک انرژی و همچنین آبستنگی پایین دست حوضچه مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. و نتایج زیر حاصل گردید:

- با افزایش عدد فرود تا حدود 8 استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش افزایش می‌یابد. اما بعد از عدد 8 نمودار افقی گشته و استهلاک 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 حدوداً بالاتر از 8 حوضچه آرامش توانایی استهلاک انرژی را نداشته و باید از ملزمات دیگری مانند پرتاب کننده‌های جامی باید استفاده گردد.
- با توجه به هندسه حوضچه آرامش و نحوه چینش بلوک و عدد فرود، استفاده از بلوک می‌تواند 13 درصد موجب افزایش استهلاک انرژی گردد.
- تاثیر گذاری حوضچه با بلوک جهت استهلاک انرژی در اعداد فرود بین 3 تا 5 حدود 19% و فرود 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.
- با افزایش عدد فرود عمق ثانویه نیز افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از سطح زبر موجب کاهش عمق ثانویه بین 37% تا 18% می‌باشد.

- [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] SM.EIAbd, 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] AJ.Peterka, Hydraulic design of stilling basin and energy dissipators. *U.S. Dept. of the Interior. Denever, Colorado:Bureau of Reclamation*, 1978.
- [28] AA.El-Masry, TE. 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] AA .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 TiwariSeema, Reduction of Scour Depth Downstream of Stilling Basin, *International Research Journal of Engineering Sciences*, Vol. 2, No7, pp.20- 25, 2013
- [31] H.L.Tiwari, TiwariSeema ,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, No3. 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.GoelArun 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. ASCE2002
- [40] F.G.Carollo, V.Ferro, V.Pampalone, Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No.9,pp. 989-999, ASCE2007
- [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 GuptaMehta, 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 3rdNirma University International Conference on Engineering (NUiCONE 2012)*.J of ELSEVIE
- [46] D. V. S. Verma1 and Arun Goel2, Development of Efficient Stilling Basins for Pipe Outlets, *L OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING* ,ASCE, Vol. 129, pp. 194-200, MAY 2003

(Pa)	فشار تمودینامیکی در مقطع 1	P <sub>1</sub>
عدد عملکرد	PN	
دی در واحد عرض (m <sup>3</sup> /s)	q	
ضریب رگرسیون	R <sup>2</sup>	
طول موج (m)	S	
عمق موج (m)	T	
پارامتر آشستگی	tan $\alpha$	
سرعت میانگین (m/s)	V	
سرعت متوسط در مقطع 1 (m/s)	V <sub>1</sub>	
سرعت متوسط کاتال (m/s)	V <sub>c</sub>	
عرض بلوک (m)	W <sub>b</sub>	
عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (m)	y <sub>2</sub>	
عمق فوق بحرانی در پنجه پرش (m)	y <sub>1</sub>	
ارتفاع سیال در مقطع 1 (m)	Z <sub>1</sub>	
علائم یونانی		
ثابت تنش برشی سطح	β	
اختلاف انرژی مخصوص (m)	ΔE	
ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)	μ	
چگالی سیال (m/kg)	ρ	
کشش سطحی (N/m)	σ	

## 7 - منابع

- M.Bakhtiari, S.M. Kashefipor, 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)
- AJ.Peterka, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, *United States Department of interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 25*, Denver Co 4<sup>th</sup> revised Printing.
- S.A.Ead, N.Rajarantam, Hydraulic jump on corrugated bed, *journal of hydraulic engineering*, ASCE, 2002a, Vol. 128, No. 7, pp. 656-663
- F.J.Resch, H.J. Leutheusser, Reynolds stress measurements in Hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Res*, No 10, pp. 409-430, 1972
- W. Hager, R. Bremen, Classical hydraulic jump sequent depths, *Journal of Hydraulic Research*, 1989
- 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
- M. A. ABDELAZIM, A Hybrid Approach to improve design of stilling basin, *Nile Basin Capacity Building network*, pp.16, 2010
- V.T.Chow, Open Channel Hydraulics ,McGraw-Hill. New York. pp. 561959
- M. A. FathiMoghadam, 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)
- F.W. Blaisdell, Development and hydraulic design of St. Anthony Fall Stilling Basin. *Proc Journal of Hydraulic Eng. ASCE*, 1947
- Fahmy Salah, FahmyAbdelhaleem, Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear over fall weirs , *Ain Shams Engineering Journal*,Vol. 4, pp. 675-684, 2013
- 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
- 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
- W.H. Hager. Energy dissipators and hydraulic jump. *Water science and technology library*,Vol. 8, pp. 106-110, 1992
- P. Novak, Influence of bed load passage on scour and turbulence Downstream of stilling basin, *9<sup>th</sup> Congress, IAHR, Dubrovnik, Croatia*, 1961.
- O.Cataklı et al. A study of scour at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipaters. *11<sup>th</sup> 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 VipunRai, 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. Elsebail 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