

## آبشناسی موضعی در پایاب سرریزهای زیگزاگی

مهدی یاسی<sup>1</sup>، بهاره عزیزپور<sup>2</sup>

1- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

2- دانشجوی پیشین کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

رایانامه نویسنده مسئول (m.yasi@ut.ac.ir)

### خلاصه

فرضیه اصلی در توسعه طرح سرریزهای زیگزاگی، افزایش ظرفیت انتقال جریان بر روی سرریز از طریق افزایش طول تاج سرریز در یک محدوده معین عرضی است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی پدیده آبشناسی موضعی در پایین دست سرریزهای زیگزاگی، با سه پلان متفاوت (مثلثی، دوزنقه‌ای، قوسی) بوده است. تعداد 33 آزمون تجربی برای بررسی اثرات شکل پلان سرریز در شرایط مختلف جریان انجام گردید. الگوی آبشناسی بستر پایاب برای هر یک از سه پلان سرریز زیگزاگی با سرریز نظیر نرمال مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که آبشناسی در پایاب سرریز با پلان دوزنقه‌ای بیشتر از دو پلان مثلثی و قوسی است. تأثیر پارامترهای مختلف (عدد فرود جریان، بار آبی روی سرریز) بر هندسه حفره آبشناسی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، روابط نیمه تجربی برای تخمین بیشینه عمق آبشناسی، موقعیت طولی آن، و توسعه زمانی عمق آبشناسی برای هر یک از سه نوع سرریز زیگزاگی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: سرریز، سرریز زیگزاگی، آبشناسی موضعی، بیشینه عمق آبشناسی.

### 1. مقدمه

آبشناسی در اطراف سازه‌های آبی احداث شده روی بسترهای نفوذپذیر، از جمله مهم‌ترین مسائلی است که عملکرد اولیه مورد انتظار از این سازه و پایداری آن را در طول زمان بهره‌برداری تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده در پایاب سازه‌ها هنگامی رخ می‌دهد که تنش برشی تلاطمی جریان در مجاورت سازه از تنش برشی آستانه حرکت ذرات بیشتر باشد. در چنین شرایطی، مواد بستر توسط جریان آب کنده شده و سپس حمل می‌گردد؛ که سبب تغییر فرم بستر و ایجاد حفره‌ی آبشناسی در اطراف سازه خواهد بود [1]. یکی از انواع سرریزهای با محور تاج غیرخطی در سطح افق (پلان)، سرریزهای نوع زیگزاگی (Labyrinth Weirs) است. سرریزهای زیگزاگی ترکیبی از دیواره‌هایی است که در سطح افق عموماً با هندسه مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی، قوسی، یا U شکل احداث می‌شوند [2]. این شکل هندسی ممکن است متناوباً در عرض جریان با سیکل زیگزاگی تکرار گردد [3 و 4].

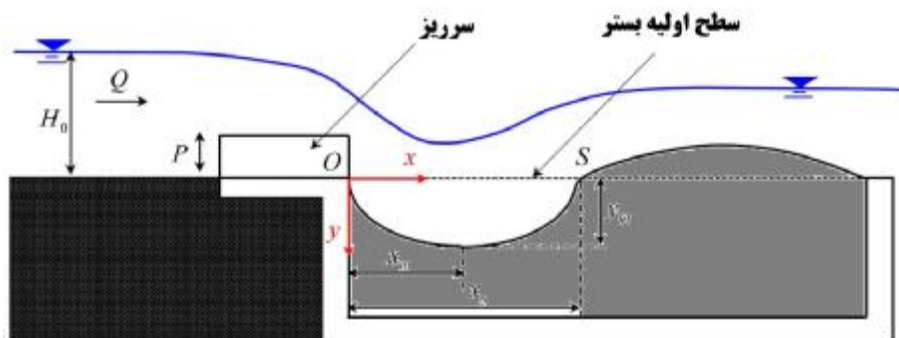
فرآیند آبشناسی موضعی در پایاب سازه‌های هیدرولیکی نسبت به نوع آبشناسی عمومی در مدت زمان بسیار کوتاه (مانند دوره سیلاب یک رودخانه) رخ می‌دهد، اما اثرات آن نسبت به آبشناسی عمومی ممکن است قابل توجه باشد. پدیده آبشناسی در پایین دست انواع سرریزهای خطی و نرمال انجام شده است [5]. بررسی این پدیده در پایین دست سرریزهای زیگزاگی بسیار محدود گزارش شده است. رومرو و برنز (2009) پدیده آبشناسی موضعی را در پایین دست سرریز زیگزاگی با پلان مثلثی مورد آزمایش قرار دادند [6]. در این بررسی، چهار سرریز زیگزاگی مثلثی با دو سیکل، با زوایای بازشدگی متفاوت تحت سه بده جریان، بر روی یک نوع مواد بستری، مورد آزمایش قرار دادند. براساس این نتایج، سرریز زیگزاگی مثلثی با زاویه‌ی بازشدگی 35 درجه، کمترین میزان آبشناسی را ایجاد می‌کند. بیشینه اندک مطالعات نشان می‌دهد که بررسی تحلیلی و تجربی آبشناسی در پایاب انواع سرریزهای زیگزاگی، در شرایط مختلف جریان، و بر روی مواد بستری متفاوت ضروری است. اهداف اصلی این تحقیق، بررسی پدیده آبشناسی موضعی (پارامترهای موثر، توسعه زمانی حفره آبشناسی، عمق بیشینه آبشناسی) در پایاب سه پلان سرریزهای زیگزاگی (پلان مثلثی، دوزنقه‌ای، قوسی) و مقایسه آن با سرریز نرمال بوده است.

## 2. مواد و روش‌ها

**فلوم و مدل سرریزها:** مطالعه آبستستگی موضعی در پایین‌دست سرریزهای زیگزاگی در آزمایشگاه هیدرولیک کاربرد دکترا جواد فرهودی، گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، انجام یافت. مدل موردنظر، در یک فلوم مستقیم به طول 8 متر، با مقطع مستطیلی به عرض 0/6 متر و عمق 0/42 متر، با شیب طولی تقریبی 0/0001 قرار گرفت. در این تحقیق از سه سرریز زیگزاگی با سه پلان مختلف (مثلثی، قوسی و دوزنقه‌ای)، هر کدام با دو سیکل و یک سرریز نرمال استفاده شد. هر چهار سرریز از جنس پلکسی گلاس شفاف ساخته شدند. مدل سرریزهای زیگزاگی مطابق با هندسه برتر هر یک از سه پلان زیگزاگی در تحقیقات پیشین طراحی و ساخته شد [7 و 9]. ارتفاع هر چهار سرریز 15 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سرریزها در بالادست بستر رسوبی قرار گرفتند. نمای کلی فلوم و مدل سرریزهای مورد استفاده در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است.



شکل 1- نمایی از سرریزهای زیگزاگی با پلان مثلثی، دوزنقه‌ای و قوسی مورد استفاده در این تحقیق



شکل 2- نمای جانبی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق

در این تحقیق، در مجموع 33 آزمون اجرا شده است که از این تعداد، 12 آزمون به‌عنوان آزمون اصلی؛ و 21 آزمون برای ایجاد جریان یکنواخت در کانال پایین‌دست و آزمون شاهد برای تعیین بار آبی مناسب روی سرریز و تعیین دانه‌بندی مناسب انجام گرفته است. جهت انجام آزمایش‌های موردنظر، ابتدا به ازای حداقل بار آبی جریان روی سرریز برای جلوگیری از اثر کشش سطحی آزمایش انجام گرفت. در نهایت بار آبی 5، 4 و 3 سانتی‌متر برای شروع آزمایش‌ها انتخاب شدند. به ازای این بارهای آبی، دبی نیز از روی دستگاه دبی‌سنج ثبت گردید. نوع مواد بستری، ماسه

درشت طبیعی با دانسیته ویژه 2/6، دانه بندی یکنواخت، و با اندازه میانه 1/9 میلیمتر بود. زمان تعادل دینامیکی بستر آبخستگی در محدوده 4 تا 10 ساعت بوده است. در جدول (1) دامنه تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق ذکر شده است.

جدول 1- دامنه تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

پارامتر	محدوده تغییرات
تعداد انواع سرریز	4
دبی جریان (lit/s)	5/3-39/5
بار آبی روی سرریز (cm)	3-5
ارتفاع سرریز (cm)	15
دانه بندی ذره رسوبی (mm)	1/9

پارامترهای مؤثر و معادله ابعادی بررسی ابعاد حفره آبخستگی: تابع و پارامترهای مؤثر بدون بعد بر توسعه ابعاد حفره آبخستگی در پایین دست سرریزهای زیگزاگی، بر اساس تئوری باکینگهام، به صورت زیر استخراج می شود:

$$f\left(\frac{H_0}{P}, \frac{y_m}{P}, \frac{x_m}{P}, \frac{x_s}{P}, S_g, \frac{r_s}{r}, We = \frac{r V^2 H_0}{d}, Fr = \frac{V}{\sqrt{g H_0}}, Re = \frac{r V H_0}{m}, \frac{t}{\frac{H_0}{V}}\right) = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه،  $x_m$ ،  $y_m$  و  $x_s$ ، به ترتیب، فاصله بیشینه عمق آبخستگی از ابتدای حفره، بیشینه عمق آبخستگی و طول حفره آبخستگی است.  $H_0$ ، عمق آب بالادست سرریز،  $g$ ، شتاب ثقل،  $d$ ، کشش سطحی،  $P$ ، ارتفاع سرریز،  $r_s$ ، جرم حجمی ذرات رسوبی و  $t$ ، زمان،  $We$ ، عدد وبر،  $Fr$ ، عدد فرود جریان و  $Re$ ، عدد رینولدز می باشد. در این تحقیق، شرایط جریان متلاطم زبر بود. ( $Re^3 > 4000$ ) به همین عدد رینولدز بی تأثیر بوده است. با رعایت حداقل بار آبی بر روی سرریز، از تأثیر عدد وبر صرف نظر شده است. با توجه به استفاده از یک نوع مواد رسوبی با دانه بندی معین ( $D_{50}$ )، پارامتر جرم مخصوص نسبی  $\frac{r_s}{r}$  نیز ثابت بوده، و از تحلیل ابعادی فوق کنار گذاشته شد. از اینرو، رابطه ابعادی فوق به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$f\left(\frac{y_m}{P}, \frac{x_m}{P}, \frac{x_s}{P}, Fr, \frac{H_0}{P}, \frac{t}{\frac{H_0}{V}}\right) = 0 \quad (2)$$

بر اساس تحلیل ابعادی فوق، می توان گفت که زمان مشخصه به صورت  $t_0 = \frac{H_0}{V}$  در نظر گرفته شده؛ با رابطه زیر ارزیابی شده است [10].

$$t_0 = \frac{H_0}{\sqrt{g(S_g - 1)D_{50}}} \quad (3)$$

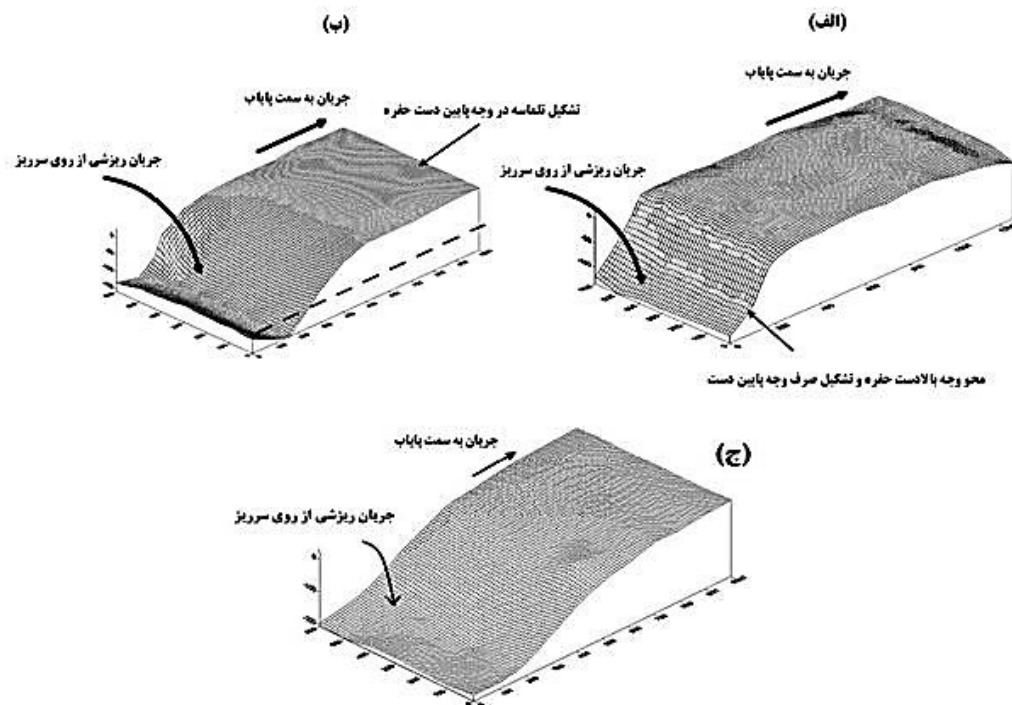
### 3. نتایج و بحث

**هندسه حفره آبخستگی:** تفاوت تأثیر نوع پلان سرریز (دو زنگه ای، قوسی، مثلثی و نرمال) بر الگوی توسعه حفره آبخستگی، در شرایط مختلف جریان، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه این تفاوت برای جریان بر روی سرریز نرمال و سرریز زیگزاگی (با پلان قوسی) در شکل (3)؛ و برای هندسه فرم بستر آبخستگی در شکل های (4) و (5) نمایش داده شده است. تغییرات عرضی نیمرخ آبخستگی نشان دهنده توسعه عرضی حفره علاوه بر توسعه طولی است. بر اساس این شکل ها، مقدار عمق حفره در مجاورت جداره ها نزدیک به یکدیگر است؛ لکن میزان عمق آبخستگی از دوجداره به سمت میانه عرضی کاهش می یابد، به طوری که میزان عمق حفره آبخستگی در میانه عرضی بستر کمتر از جداره ها می شود. در توجیه این پدیده می توان گفت سرعت های

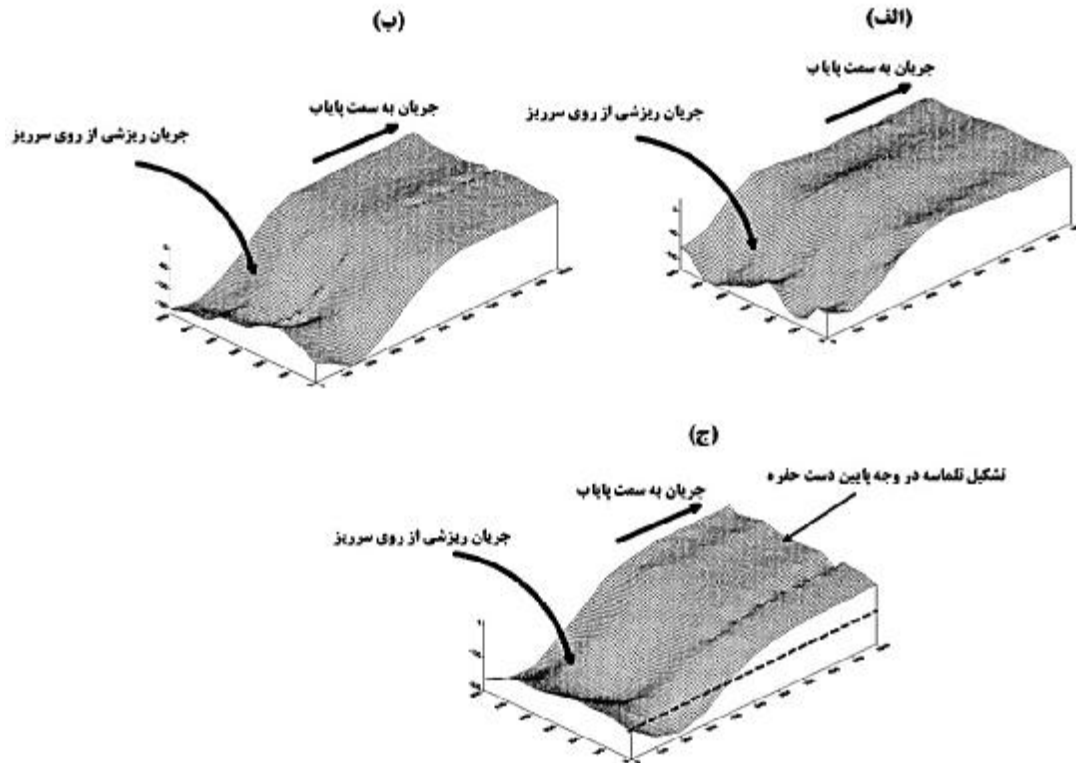
ناشی از جریان‌های عرضی پس از برخورد با جداره و در بازگشت به میانه عرضی بستر، بخشی از رسوبات موجود در مجاورت آن جداره را به صورت بار بستر در عرض منتقل می‌کنند. این پدیده در سمت دیگر جداره نیز مشاهده می‌شود. در نتیجه جریانات عرضی از دو طرف جداره در میانه عرضی تلاقی کرده و بار بستری در این ناحیه نهشته می‌گردد. در حقیقت شکل حفره و تعداد حفره‌های آبستنگی در بستر سرریزهای زیگزاگی متأثر از فرم پلان و تعداد سیکل‌های آن است.



شکل 3- مقایسه جریان بر روی سرریزهای خطی و زیگزاگی (با پلان قوسی)



شکل 4- حفره آبستنگی در پایاب سرریز نورمال (خطی)، برای بار آبی: الف) 3 سانتی‌متر، ب) 4 سانتی‌متر و ج) 5 سانتی‌متر



شکل 5- حفره آبستگي در پایاب سرریز با پلان قوسی، برای بار آبی: (الف) 3 سانتی متر، (ب) 4 سانتی متر و (ج) 5 سانتی متر

**بررسی روابط توسعه زمانی حفره آبستگي:** در مطالعات آبستگي موضعی در پایاب انواع سازه‌های هیدرولیکی، تعیین عمق آبستگي در هر زمان از شروع فرایند و هم چنین تعیین بیشینه عمق آبستگي در شرایط تعادلی از مسائل بسیار مهم به شمار می آید. در بخش تحلیل ابعادی حاکم بر این تحقیق، پارامترهای بی بعد مؤثر بر تغییرات ابعاد حفره آبستگي (بیشینه عمق آبستگي  $(y_m)$ ، فاصله بیشینه عمق آبستگي از ابتدای حفره  $(x_m)$  و طول حفره آبستگي  $(x_s)$ ) مورد بررسی قرار گرفت و به صورت رابطه (2)، **Error! Reference source not found.** ارائه گردید. به منظور تعیین ضرایب و توان‌های این معادله رگرسیونی چندمتغیره، داده‌های آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و توابع زیر جهت برآورد بیشینه عمق آبستگي  $(y_m)$  و فاصله بیشینه عمق آبستگي از ابتدای حفره  $(x_m)$  به تفکیک نوع پلان سرریز زیگزاگی به صورت زیر ارائه گردید:

$$\frac{y_m}{P} = 2.195 \frac{\frac{\partial H_o}{\partial P}}{\frac{\partial}{\partial}}^{-2.207} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial t_o}}{\frac{\partial}{\partial}}^{0.081} (Fr)^{3.3} \quad \text{پلان دوزنقه‌ای و پلان قوسی} \quad (4)$$

$$\frac{x_m}{P} = 1.981 \frac{\frac{\partial H_o}{\partial P}}{\frac{\partial}{\partial}}^{0.368} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial t_o}}{\frac{\partial}{\partial}}^{0.06} (Fr)^{0.448}$$

$$\frac{y_m}{P} = 3.537 \frac{\frac{\partial H_o}{\partial P}}{\frac{\partial}{\partial}}^{0.714} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial t_o}}{\frac{\partial}{\partial}}^{0.094} (Fr)^{0.681} \quad \text{پلان مثلثی} \quad (5)$$

$$\frac{x_m}{P} = 0.799 \frac{\frac{\partial H_o}{\partial P}}{\frac{\partial}{\partial}}^{3.697} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial t_o}}{\frac{\partial}{\partial}}^{0.062} (Fr)^{-2.327}$$

که در این روابط،  $y_m$ ، بیشینه عمق آبشستگی،  $P$ ، ارتفاع سرریز،  $H_o$ ، بار آبی روی سرریز،  $t$ ، زمان،  $t_o$ ، زمان مشخصه،  $Fr$ ، عدد فرود جریان و  $x_m$ ، فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره می‌باشد. درصد قدر مطلق خطای نسبی در تخمین هندسه حفره آبشستگی برای پلان‌های مختلف سرریز زیگزاگی در جدول (2) ارائه شده است.

جدول 2- درصد خطای نسبی (RE%) معادلات برآورده ابعاد حفره آبشستگی برای پلان‌های مختلف سرریز زیگزاگی

RE%		نوع پلان
فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره ( $x_m$ )	بیشینه عمق آبشستگی ( $y_m$ )	
8/3	5/5	ذوزنقه‌ای
7/0	5/2	قوسی
11/7	4/8	مثلی

#### 4. نتیجه‌گیری

در این تحقیق پدیده آبشستگی موضعی در پایین‌دست سرریزهای زیگزاگی برای سه پلان مختلف (ذوزنقه‌ای، قوسی و مثلی) و سرریز نرمال با یک ارتفاع یکسان و برای یک دانه‌بندی مشخص مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع سرریزها، نوع و اندازه مواد بستری ثابت در نظر گرفته شده است. زمان تعادل دینامیکی بستر آبشستگی در محدوده 4 تا 10 ساعت بوده است. نتایج حاصل از این بررسی را می‌توان در قالب موارد زیر بیان نمود:

- 1) پارامترهای مؤثر بر هندسه حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای زیگزاگی با روش تحلیل باکینگهام تعیین گردید (معادله 2).
- 2) روابط همبستگی غیرخطی جهت تخمین بیشینه عمق آبشستگی ( $Y_m$ )، و فاصله بیشینه عمق آبشستگی از ابتدای حفره ( $X_m$ )، به تفکیک نوع پلان سرریز استخراج و ارائه شده (معادلات 4 و 5)؛ و میزان خطای نسبی هر یک محاسبه گردید (جدول 2).
- 3) هندسه آبشستگی در پایاب سرریز، نشان‌دهنده توسعه عرضی حفره علاوه بر توسعه طولی است. هم‌چنین، میزان آبشستگی در جداره‌ها نسبت به محور مرکزی بیشتر است. دلیل این امر، وجود جریان‌های عرضی است که باعث انتقال مواد رسوبی از جداره‌ها به بخش مرکزی بستر می‌شود.
- 4) تأثیر پارامترهای مختلف بر هندسه حفره آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش عدد فرود جریان، به علت وابسته بودن کامل عدد فرود به دبی جریان، انرژی لازم برای کندن مواد رسوبی بیشتر شده، بنابراین حفره با ابعاد بزرگ‌تری در پایاب سرریزهای زیگزاگی ایجاد می‌شود. هم‌چنین افزایش بار آبی روی سرریز هم باعث افزایش ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست می‌شود. با وجود کم بودن دبی جریان عبوری از روی سرریز نرمال نسبت به پلان‌های مختلف سرریز زیگزاگی، آبشستگی بیشتری در پایین‌دست این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای زیگزاگی رخ می‌دهد.

#### 5. قدردانی

این مقاله از پژوهش پایان‌نامه کارشناسی ارشد مولف دوم (1392)، و همچنین از پایان‌نامه‌های پیشینه این تحقیق توسط محمدی (1381) و فرهنگی (1383)، تحت راهنمایی مولف اول (مهدی یاسی)، در گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه استفاده نموده است.

#### 6. مراجع

1. Dargahi B. (2003). Scour development downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 417-426.
2. Falvey H. (2003). *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. American Society of Civil Engineers.

3. Hay N. and Taylor G. (1970). Performance and Design of Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 96(2).
4. Tullis B.P.; Young J.C. and Chandler M.A. (2007) Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(3), 248–254.
5. Farhoudi, J. and Smith, K.V. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump, *Journal of hydraulic research*, 23(4), 343-358.
6. Romero M. and Brañez, H. (2009). Experimental Study on Scour Processes Downstream Labyrinth Weirs. *33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*.
7. محمدی، م. (1381). جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.
8. فرهنگي، ا.س. (1383). جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.
9. یاسی، م.، و محمدی، م. (1386). بررسی سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی. مجله پژوهشی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، جلد 11، شماره 41، صفحه 14-1.
10. Farhoudi, J., and Shayan, H. K., (2014). Investigation on local scour downstream of adverse stilling basins, *Ain Shams Engineering Journal*, 5, 361-375.