

## جریان غیرماندگار در سرریز لبه تیز مثلثی واقع در انتهای یک مخزن

فیروز قاسم زاده<sup>۱\*</sup>، صلاح کوچک زاده<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
  ۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۹/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۹/۱۶)

### چکیده

سرریزهای لبه تیز از سازه‌های متداول در اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های آبیاری و دیگر سامانه‌های آبی هستند. نصب و بهره‌برداری این سازه‌ها نسبت به سایر انواع سازه‌ها و تجهیزات، ساده‌تر و هزینه‌های نگهداری آن‌ها هم کمتر است. اما وضعیت عملکرد سرریزهای لبه تیز و روابط دبی-اشل یا منحنی‌های سنجه آن‌ها در شرایط غیرماندگار به ندرت مورد بررسی قرار گرفته‌است. در تحقیق حاضر، جریان غیرماندگار عبوری از سرریز مثلثی ۹۰ درجه که در انتهای یک مخزن قرار گرفته‌است در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر آن بر روی مقادیر دبی عبوری از سرریز سنجیده شد. در این تحقیق نشان داده شد که روش روندیابی پالس اصلاح شده در مقایسه با حل معادله مخزن دارای نتایج بهتری است و بر اساس نتایج حاصل از روش پالس اصلاح شده، اختلاف قابل توجهی بین مقادیر دبی محاسبه شده از روابط جریان ماندگار و غیرماندگار وجود دارد بطوریکه در برخی شرایط این اختلاف به حدود ۴۰ درصد نیز می‌رسد. لذا استفاده از روابط دبی-اشل و منحنی‌های سنجه متداول ماندگار در شرایط غیرماندگار نیازمند بازنگری و توجه بیشتر است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان غیرماندگار، دبی-اشل، سرریز لبه تیز مثلثی، معادله دبی-اشل غیرماندگار، روندیابی مخزن

### مقدمه

تجهیزات، خطای اندازه‌گیری این تجهیزات در اغلب مواقع بسیار بالاست و خارج از حد قابل قبول است. در مورد روش سرعت‌سنجی تصویری در کانال‌ها و آبراهه‌ها نیز، از آنجا که سرعت در سطح جریان اندازه‌گیری می‌شود، تعیین سرعت در لایه‌های پایینی نیازمند تجزیه و تحلیل‌هایی است که معمولاً با فرض‌های ساده کننده همراه است و منجر به کاهش درستی اندازه‌گیری می‌شود. از این رو با توجه به مشکلات موجود در اندازه‌گیری مستقیم دبی باید شیوه‌های بهتری برای اندازه‌گیری دبی به کار برده شوند.

استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر روابط و منحنی‌های سنجه (دبی-اشل) در آبراهه‌ها مزایای قابل توجهی دارد. در این روش کافی است آبراهه‌ها به حسگرهای تعیین رقوم سطح آب تجهیز شوند تا ضمن اندازه‌گیری ساده‌تر عمق، با استفاده از معادلات دبی-اشل که بر پایه ایجاد رابطه‌ای بین رقوم جریان و دبی ایجاد می‌شود، به تعیین دبی جریان پرداخت (Aricò et al, 2009; Henderson, 1966) بنابراین علیرغم پیدایش و توسعه انواع مختلف تجهیزات اندازه‌گیری سرعت، سازه‌های متداول اندازه‌گیری جریان همچنان جایگاه خود را حفظ کرده‌اند. سرریزهای لبه تیز، لبه پهن و انواع فلوم‌ها از جمله

امروزه اندازه‌گیری جریان و تحویل حجمی آب از مهم‌ترین مولفه‌های مدیریت مطلوب منابع آب است. پس سازه‌های اندازه‌گیری جریان از اجزای اصلی سامانه‌های انتقال و توزیع آب و آبراهه‌ها به حساب می‌آیند و تاکنون روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری جریان توسط محققین مختلف توسعه داده شده‌است (Bos, 1989). به‌طور معمول اندازه‌گیری دبی در رودخانه‌ها با انتگرال‌گیری مکانی سرعت‌های اندازه‌گیری شده حاصل می‌شود. سرعت می‌تواند توسط تجهیزات مختلفی نظیر مولینه، پروب‌های الکترومغناطیس، داپلرهای سرعت‌سنج صوتی و یا سرعت‌سنج‌های تصویری (LSPIV) اندازه‌گیری شود. در سه روش اول، به دلیل قرارگیری تجهیزات در داخل جریان، احتمال آسیب دیدگی آن‌ها زیاد است. از این رو هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری تجهیزات معمولاً قابل توجه است. همچنین تحقیقات (USB 2012) در خصوص خطای اندازه‌گیری دبی‌سنج‌های داپلر صوتی و الکترومغناطیس نشان می‌دهد که علیرغم رعایت تمام اصول نصب ارائه شده توسط تولیدکنندگان

جریان در مخازن قرار می‌گیرد لذا در ادامه به شرح بیشتر مطالعات در این زمینه پرداخته می‌شود.

بررسی مطالعات پیشین بیانگر این است که جریان غیرماندگار در مخازن و پشت سرریزها با دو رویکرد مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است: (الف) روندیابی مخزن که در آن تغییرات شکل هیدروگراف ورودی به یک مخزن و شکل هیدروگراف خروجی از آن مورد بررسی قرار گرفته است، (ب) استفاده از روش "فروکش مخزن"<sup>۲</sup> که هدف اصلی در آن، کاربرد تغییرات حجم مخزن در واسنجی سرریز انتهایی مخزن بوده است. در هر دو دسته تحقیقات بالا، معادله مخزن<sup>۳</sup> (رابطه ۲) اساس تعیین دبی غیرماندگار عبوری از سازه انتهایی مخزن بوده است (Carter and Godfrey, 1960; De Laine, 1964; Johnson and Green, 1977; Fread, 1985).

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $I$  و  $O$  و  $S$  به ترتیب عبارت‌اند از دبی ورودی به مخزن، دبی خروجی از آن و حجم ذخیره در مخزن.  $dS/dt$  نیز عبارت است از نرخ تغییرات زمانی حجم آب در مخزن پشت سرریز.

در خصوص رویکرد اول، روش‌های مختلف روندیابی به دنبال تعیین هیدروگراف دبی خروجی از مخزن هستند. از میان روش‌های روندیابی موجود، روش پالس اصلاح شده<sup>۴</sup> یکی از روش‌های بکار برده شده توسط محققین مختلف است. شکل اولیه این روش که به روش پالس<sup>۵</sup> معروف است برای اولین بار توسط پالس در سال ۱۹۲۸ ارائه گردید (Fread, 1985; USBR, 1989; Raghunath, 2006; Fiorentini and Orlandini, 2013).

با تغییر اندک در ترکیب پارامترهای موجود در روش پالس، روش پالس اصلاح شده حاصل می‌شود که فرض اصلی آن این است که اساسی‌ترین پارامتر مؤثر در ذخیره مخزن، دبی خروجی است لذا این روش در شرایطی قابل استفاده خواهد بود که یک رابطه بین ذخیره در مخزن و دبی خروجی وجود داشته باشد. برای تولید رابطه مذکور، یک منحنی با محورهای  $O$  و

$$O + \frac{2S}{t} \text{ ایجاد می‌شود (USBR, 1989; Raghunath, 2006)}$$

در گام نهایی فرآیند حل، مقدار دبی خروجی از مخزن با استفاده از این منحنی استخراج می‌گردد. تعیین میزان شاخص

سازه‌های با مقطع کنترل هستند (Clemmens *et al*, 2001) که در شبکه‌های انتقال و توزیع و آبراهه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما اندازه‌گیری جریان در یک مقطع آبراهه و یا بهره‌برداری از سازه‌های مقطع کنترل یاد شده با فرض ماندگار بودن جریان عبوری و با استفاده از رابطه دبی-اشل یک به یک صورت می‌گیرد. در حالی که بجز در شرایط جریان یکنواخت، ممکن است برقراری منحنی دبی-اشل یک به یک میسر نباشد. به‌طور مثال در شرایط سیلابی، به ازای رقوم معین سطح آب در ایستگاه اندازه‌گیری، دبی در شاخه صعودی هیدروگراف می‌تواند از دبی شاخه نزولی متفاوت باشد، که در این صورت منحنی دبی-اشل به صورت یک حلقه بسته ظاهر خواهد شد که به منحنی حلقوی دبی-اشل<sup>۱</sup> مشهور است (Henderson, 1966). اهمیت جریان غیرماندگار در شبکه‌های آبیاری نیز، به‌ویژه در زمان عملیات بهره‌برداری و تنظیم سازه‌ها، حائز اهمیت است و طولانی بودن مدت زمان تداوم جریان غیرماندگار بر میزان اهمیت آن می‌افزاید.

در آبراهه‌ها می‌توان از رابطه (۱) (Henderson, 1966) برای تعیین میزان انحراف دبی غیرماندگار نسبت به دبی ماندگار استفاده کرد اما برای جریان داخل مخازن بالادست سرریزها، که موضوع تحقیق حاضر است، نمی‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. لذا بررسی جریان عبوری از سرریزها در شرایط جریان غیرماندگار دارای گوشه‌های پنهانی است که این مطالعه به دنبال بررسی آن‌ها در آزمایشگاه است.

$$Q = CA \sqrt{R \left( S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \right)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در اینجا بهتر است وجه تمایز جریان در آبراهه‌ها و مخازن نیز مورد اشاره قرار بگیرد. انواع سازه‌های موجود در کانال‌ها به دلیل افتی که ایجاد می‌کنند، باعث پس‌زدگی جریان در بالادست خود می‌شوند و از این طریق تراز سطح جریان در بازه‌ای از بالادست آن‌ها به صورت افقی قرار می‌گیرد. در این شرایط، بازه‌ای که جریان در آن دارای سطح آزاد افقی است به‌عنوان مخزن شناخته می‌شود. بر اساس (Chaudhry, 2008)، دریاچه‌ها، مخازن، حوض‌ها و حوضچه‌های تأخیری به‌عنوان مخزن (Reservoir) شناخته می‌شوند و تراز سطح آب افقی، وجه مشترک آن‌هاست. بررسی وضعیت جریان در مخازن، به‌ویژه در جریان غیرماندگار، متفاوت از کانال‌ها است و اغلب از اصل پیوستگی برای روندیابی مخزن استفاده می‌شود (USDA-SCS, 1989). جریان مورد بررسی در تحقیق حاضر نیز در زمره

2. Pondage drawdown

3. Storage equation

4. Modified Puls method

5. Puls method or Inflow-Storage-Discharge method (ISD method) (USBR, 1989; Raghunath, 2006)

1. Looped rating curve

ورودی و حداکثر ۱/۵ درصد در صورت عدم وجود دبی ورودی بود. خطاهای بالای موجود در تحقیقات پیشین توسط Johnson and Green (1977) and به حدود ۱/۵٪ کاهش یافت.

تحلیل وضعیت تخلیه از مخزن در روش فروکش مخزن با استفاده از رابطه (۴) صورت می‌گیرد (Johnson and Green, 1977):

$$(Q_i - Q_o)_h = (A)_h \left( \frac{dh}{dt} \right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

به طوری که اندیس  $h$  در این رابطه بیانگر مقدار پارامتر مربوطه در همان رقوم  $h$  است. به طور مثال  $(A)_h$  مساحت مخزن در رقوم  $h$  است و از منحنی رقوم- مساحت مخزن مورد نظر قابل تعیین است.  $Q_o$  و  $Q_i$  به ترتیب عبارت‌اند از دبی ورودی به مخزن و خروجی از آن.  $dh/dt$  نیز عبارت است از نرخ تغییرات زمانی تراز سطح آب پشت سرریز.

به طور عمومی نتایج حل معادله مخزن و فرآیند روندیابی نشانگر وقوع دبی بیشتر از دبی ماندگار در شاخه صعودی و کمتر از دبی ماندگار در شاخه نزولی است. دلیل این امر به شتاب‌های مثبت در شاخه صعودی و شتاب‌های منفی در شاخه نزولی بر می‌گردد. اما مطابق شکل (۱)، نتیجه تحقیق Kuhnle and Bowie (1992) نشانگر وقوع دو نوع مختلف حلقه پسماند در رودخانه Goodwin Creek است بطوریکه در شکل (۱-الف) مقدار دبی در شاخه صعودی بیشتر از شاخه نزولی است و این روند با تئوری جریان غیرماندگار هم‌خوانی دارد اما شکل (۱-ب) عکس تئوری بوده و با هیدرودینامیک جریان قابل توصیف نیست. بر اساس استنباط Kuhnle and Bowie (1992)، تغییرات زبری بستر آبراهه و تولید و زوال شکنج‌ها در طول عبور هیدروگراف سیل باعث وقوع رفتار مشابه شکل (۱-ب)) شده‌است.

Bazaz (2008) نیز تحقیقی را در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه تهران به منظور تعیین ضرایب تخلیه سرریزهای لبه‌تیز در جریان غیرماندگار انجام داد. در تحقیق وی، مقایسه حجم زیر هیدروگراف دبی خروجی و تغییرات حجم مخزن برای تعیین تأثیر غیرماندگاری جریان بر دبی عبوری از سرریزها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشانگر وجود اختلاف بین دبی ماندگار و غیرماندگار بود و بنابراین استفاده از روابط ماندگار باعث وقوع خطا در برآورد بده در شرایط غیرماندگار می‌شد. بر اساس نتایج تحقیق، کمترین اختلاف مربوط به سرریز مثلثی بود و میزان خطا در سرریزهای مثلثی نسبت به سایر شکل‌های سرریز نسبتاً کمتر بود. Bazaz (2008) ضرایب اصلاحی برای معادلات دبی-اشل سرریزها ارائه نمود تا برآورد درستی در جریان غیرماندگار ارائه نمایند.

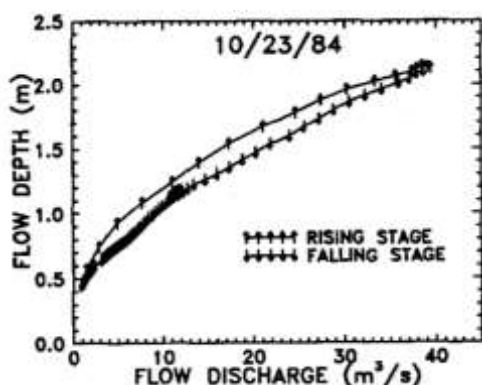
$(\frac{2S}{t} + O)$  با استفاده از رابطه (۳) که فرم بازنویسی شده "معادله مخزن" است، صورت می‌گیرد (Fread, 1985; Raghunath, 2006):

$$(I_1 + I_2) + \left( \frac{2S_1}{t} - O_1 \right) = \frac{2S_2}{t} + O_2 \quad (\text{رابطه ۳})$$

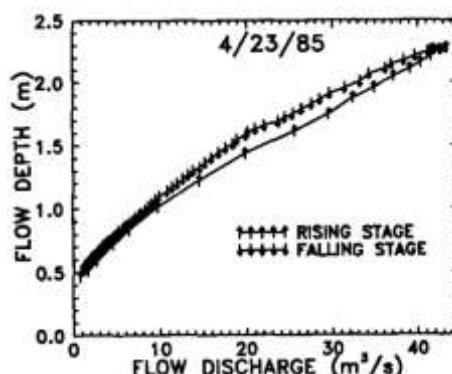
در این رابطه،  $t$  عبارت است از اندازه گام زمانی،  $I_1$  و  $I_2$  دبی ورودی در ابتدا و انتهای گام زمانی،  $O_1$  و  $O_2$  دبی خروجی از مخزن در ابتدا و انتهای گام زمانی و  $S_1$  و  $S_2$  عبارت‌اند از مقدار ذخیره در مخزن در ابتدا و انتهای گام زمانی.

در خصوص استفاده از روش "فروکش مخزن" در واسنجی سرریزها، این روش برای اولین بار توسط De Laine (1964) پیشنهاد شد. به طور کلی در این روش، بار آبی در مخزن پشت سازه با انسداد مقطع سازه به یک حد بالایی می‌رسد و سپس با رفع انسداد به صورت آبی، جریان شروع به فروکش می‌کند و در زمان فروکش مخزن، واسنجی سازه انجام می‌شود. صحت نتایج حاصل از این روش به اندازه روش حجمی نیست (De Laine, 1964) اما از دو جنبه (الف) دامنه وسیع دبی‌های قابل واسنجی و (ب) واسنجی برای مقادیر دبی خیلی بالا، دارای اهمیت است. De Laine (1964) با استفاده از روش فروکش مخزن، سرریزها را با  $\pm 4\%$  اختلاف در مقادیر دبی نسبت به دبی حاصل از روابط تئوریک در دبی‌های پایین و  $\pm 11\%$  در دبی‌های بالاتر واسنجی نمود.

Rowe (1969) از روش فروکش مخزن برای واسنجی فلوام نوع H استفاده نمود (به نقل از Johnson and Green, 1977). برای کاهش اثر امواج ناشی از برداشت مانع، رفع انسداد در آزمایش‌های تحقیق Rowe (1969) به صورت تدریجی انجام شد. Johnson and Green (1977) سعی در شناسایی و معرفی فاکتورهای مؤثر در صحت نتایج حاصل از روش فروکش مخزن و دخالت دادن آن‌ها در محاسبات قبلی نمودند. فاکتورهای مؤثر معرفی شده توسط Johnson and Green (1977) عبارت‌اند از: (۱) تحلیل منحنی فروکش؛ (۲) اندازه مخزن؛ (۳) زمان برداشت مانع از روی تاج سرریز؛ (۴) حرکت موج تولید شده در اثر برداشت مانع و (۵) برقرار بودن دبی ورودی در طول فروکش. Johnson and Green (1977) برای بررسی اثر این فاکتورها، آزمایش‌هایی بر روی سرریز مثلثی ۹۰ درجه انجام داد و با استفاده از تئوری جریان غیرماندگار متغیر سریع، اثر موج را نیز در محاسبات وارد نمود. Johnson and Green (1977) در برخی از سناریوهای تحقیق خود، دبی ورودی به سامانه را نیز برقرار نمود. نتایج نشانگر خطای حداکثر ۳٪ در صورت وجود دبی



(ب) وقوع دبی‌های بالاتر در شاخه نزولی



(الف) وقوع دبی‌های بالاتر در شاخه صعودی

شکل ۱. مثال‌هایی از دو نوع مختلف حلقه پسماند (Kuhnle and Bowie, 1992)

که شرایط جریان در مخزن بالادست سرریز متفاوت از آبراهه است و به دلیل وجود تغییر ناگهانی تراز بستر در محل سازه (به دلیل وجود خود سازه) و تغییر الگوی جریان و فشار غیرهیدرواستاتیک در بالادست سازه و همچنین مقادیر ناچیز سرعت، فرم کلی معادلات سنت‌ونان برای تحلیل جریان قابل استفاده نیست و برای این نوع تحلیل به معادله مخزن (رابطه ۲) تقلیل می‌یابد (Chow, 1959) که در اصل فرم سادس معادله بقای جرم است و تنها انتقال جرم را مدل می‌کند و از اثرات دینامیکی چشم‌پوشی می‌کند (Hager and Sinniger, 1985). به نظر می‌رسد به‌کارگیری معادله مخزن در تعیین مقادیر دبی غیرماندگار عبوری از مخازن می‌تواند تا حدودی خطای برآورد بروش ماندگار را جبران نماید.

برآورد نادرست دبی‌های عبوری از سرریز سدها در شرایط سیلابی می‌تواند آثار بسیار مخربی داشته و ساکنین پایین‌دست را دچار خسارت نماید و همچنین تعیین نادرست دبی عبوری از سازه‌های موجود در کانال‌ها در طول بهره‌برداری می‌تواند علاوه بر تحویل حجمی نادرست آب، در بهره‌برداری نیز اختلالاتی به وجود آورد لذا تعیین مقادیر دبی جریان غیرماندگار برای شرایط حاکم بر این دو ضرورت دارد. پژوهش حاضر با درک این ضرورت، تأثیر غیرماندگاری جریان را بر میزان دبی عبوری از سرریزها مورد بررسی قرار داد. فرض اولیه تحقیق این بود که دبی عبوری از تاج سرریزها در حالت عبور جریان غیرماندگار از دبی-اشل ماندگار پیروی نمی‌کند. بعد از اثبات صحت فرض اتخاذ شده، میزان و روند تغییرات دبی مورد بحث قرار گرفت.

به منظور تعیین مقادیر دبی غیرماندگار و روند تغییرات آن در وهله اول از دو روش "حل معادله مخزن" و "روندیابی پالس اصلاح شده" بهره گرفته شد. سپس نتایج دو روش از نظر صحت مورد بررسی قرار گرفت و بهترین روش برای انجام محاسبات و تحلیل‌های تحقیق انتخاب شد.

(Chanson and Wang (2013) مطالعه‌ای برای تعیین ضریب دبی در جریان غیرماندگار عبوری از سرریز لبه‌تیز مثلثی انجام دادند. روش آزمایش‌های تحقیق آن‌ها نیز مشابه روش فروکش مخزن بود. رابطه (۵) با استفاده از برازش نمودار به داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین مقدار عمق بالادست سرریز در طول آزمایش استخراج گردید:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{12.72}{\left(t \times \sqrt{\frac{g}{h_0}} + 37.62\right)^{0.696}} \quad 2.23 < t \times \sqrt{\frac{g}{h_0}} < 2400$$

در این رابطه،  $h$  عبارت است از عمق آب در بالادست سرریز،  $h_0$  عمق اولیه در بالادست سرریز و  $t$  زمان است.

نتایج تحقیق (Chanson and Wang (2013) بیانگر این بود که رابطه متداول دبی-اشل سرریز مثلثی با ضریب دبی  $C_d$  برابر  $0.58$  (رابطه ۶) در شرایط مورد بررسی تحقیق، نتایج درستی را ارائه می‌کند:

$$Q = C_d \times \frac{8}{15} \times \tan \frac{\alpha}{2} \times \sqrt{2gh^5} \quad (\text{رابطه ۶})$$

مروری بر تحقیقات پیشین که در بالا ارائه شد، حاکی از این است که در خصوص اختلاف بین دبی عبوری از سرریزها در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار اتفاق نظر وجود ندارد و به‌ویژه برای شرایط برقراری دبی ورودی به مخزن، تحقیقات چندانی صورت نگرفته‌است لذا وضعیت عبور جریان از سرریزها در شرایط جریان غیرماندگار دارای ابعاد پنهانی است که نیاز به بررسی بیشتر دارد. همچنین تحقیقات قبلی بیشتر جنبه واسنجی سرریزها را در نظر گرفته‌اند و هدف آن‌ها بررسی مستقیم اثر ترم‌های غیرماندگار بر روی دبی عبوری از سرریزها نبوده‌است. لذا پژوهش حاضر به‌منظور یافتن پاسخ ابهامات بالا، تعریف گردید.

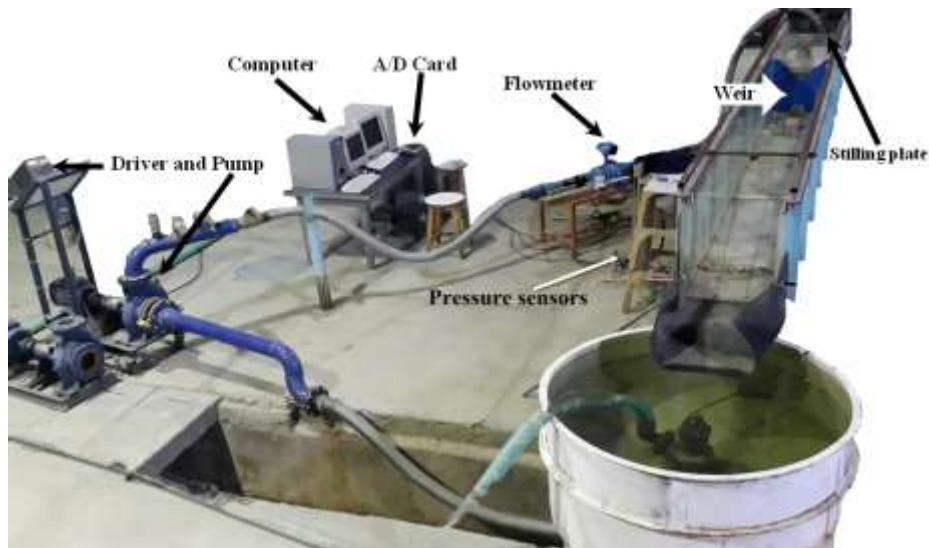
اساس تحلیل‌های پژوهش حاضر، معادله مخزن است چرا

### مواد و روش‌ها

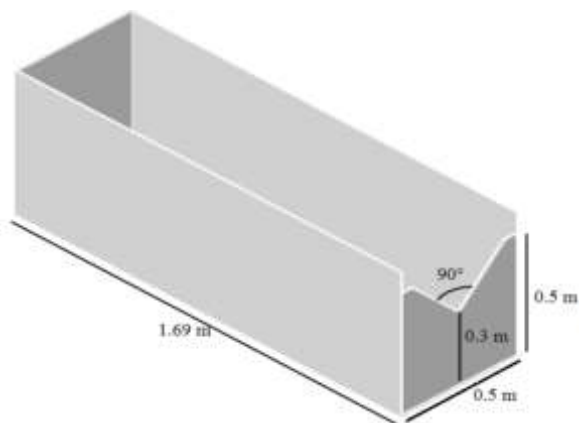
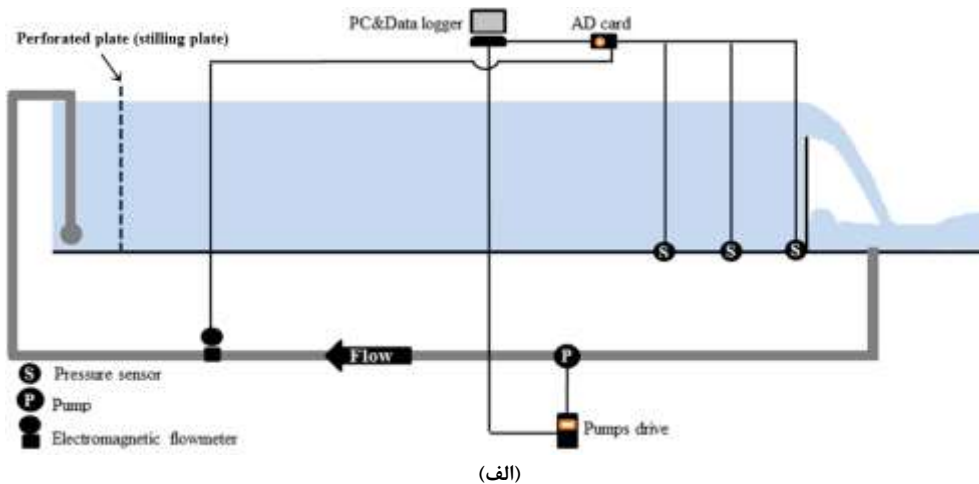
تحقیق حاضر در اصل یک تحقیق آزمایشگاهی برای بررسی اختلاف بین مقادیر دبی‌های ماندگار و غیرماندگار عبوری از سرریز مثلثی ۹۰ درجه بوده و به بررسی جریان در طول یک هیدروگراف عبوری از سرریز می‌پردازد.

### تجهیزات آزمایشگاهی ثبت داده

آزمایش‌های تحقیق حاضر در یک سامانه آزمایشگاهی مستقر در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه تهران صورت گرفت. شکل (۲) و شکل (۳) نشانگر سامانه مورد استفاده در آزمایشگاه می‌باشد.



شکل ۲. نمایی از سامانه آزمایشگاهی ثبت اطلاعات



شکل ۳. طرح شماتیک (الف) سامانه آزمایشگاهی، (ب) مخزن بالادست سازه

فلومتر مغناطیسی بهره گرفته شد که مشخصات آن و مشخصات دیگر تجهیزات اندازه‌گیری در جدول (۲) ارائه شده است. تمام اطلاعات عمق و دبی جریان توسط حسگرها و فلومتر برای ثبت و ذخیره به رایانه‌های مرکزی ارسال می‌شد.

سرریز مثلثی مورد آزمایش در مقطعی از فلوم موجود در سامانه نصب شد و از این طریق مخزن بالادست سرریز (شکل ۳-ب) با مشخصات (جدول ۱) تشکیل شد. در این سامانه برای اندازه‌گیری دبی ورودی به سامانه از

جدول ۱. مشخصات مخازن و سرریز مورد استفاده

نام مخزن	عرض (cm)	طول (cm)	ارتفاع (cm)	ارتفاع تاج (cm)	زاویه رأس سرریز	محل استقرار فلوم
UT	۵۰	۱۶۹	۶۰	۳۰	۹۰	آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه تهران

جدول ۲. مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات

تجهیزات اندازه‌گیری دبی	تجهیزات اندازه‌گیری عمق	محل نصب فلومتر	محل نصب سنسور فشار	تجهیزات تولید هیدروگراف ورودی	کارت آنالوگ به دیجیتال*
فلومتر الکترومغناطیس شرکت ایران‌مدار با درستی تمام مقیاس $\pm 0.5\%$	سنسور فشار ساخت شرکت Endress+HauserTM با صحت $\pm 0.5\%$ و دامنه فشار صفر تا ۰/۴ بار	بر روی لوله ورودی مخزن	کف مخزن	درایور تنظیم دور موتور پمپ ساخت شرکت Siemens	ساخت شرکت Advantech

\* استفاده از کارت آنالوگ به دیجیتال در سامانه‌های آزمایشگاهی، به منظور تبدیل اطلاعات و سیگنال‌های تولید شده توسط حسگرهای فشار و فلومترهای الکترومغناطیس به اطلاعات دیجیتال قابل فهم و ذخیره با رایانه بود.

که همین پارامترها نیز در آزمایشگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و در تحلیل‌های تحقیق استفاده شد. در تحلیل به روش حل معادله مخزن به‌عنوان اولین روش تحلیل هیدروگراف‌ها و استخراج مقادیر دبی غیرماندگار، از فرم انتگرالی معادله پیوستگی جرم که به معادله مخزن (رابطه ۷) مشهور است، استفاده شد. حل معادله مخزن با گسسته‌سازی آن در بازه‌های زمانی  $\Delta t$  (رابطه ۸) صورت گرفت:

$$I - O = A \frac{dH}{dt} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$O^{t-\Delta t/2} = \frac{(I^t + I^{t-\Delta t})}{2} - \left( A \left( \frac{H^t - H^{t-\Delta t}}{\Delta t} \right) \right) \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه،  $O^{t-\Delta t/2}$  عبارت است از دبی عبوری از سازه در زمان  $(t-\Delta t/2)$ ،  $I^t$  دبی ورودی به فلوم در زمان  $t$ ،  $I^{t-\Delta t}$  دبی ورودی به فلوم در زمان  $t-\Delta t$ ،  $H^t$  تراز آب در زمان  $t$ ،  $H^{t-\Delta t}$  سطح آب در زمان  $t-\Delta t$  و  $A$  عبارت است از مساحت مخزن. استفاده از داده‌های تراز سطح آب در تحلیل‌های تحقیق نیازمند اخذ دو فرض (الف) افقی بودن سطح آب مخزن در هر دو شاخه صعودی و نزولی (این شرایط به‌طور عملی نیز در آزمایشگاه و با استفاده از آرام کننده ابتدایی محقق شد)، (ب) چشم‌پوشی از انحنا سطح آب در محل سرریز به دلیل ناچیز بودن حجم آن در مقابل کل حجم مخزن، بود.

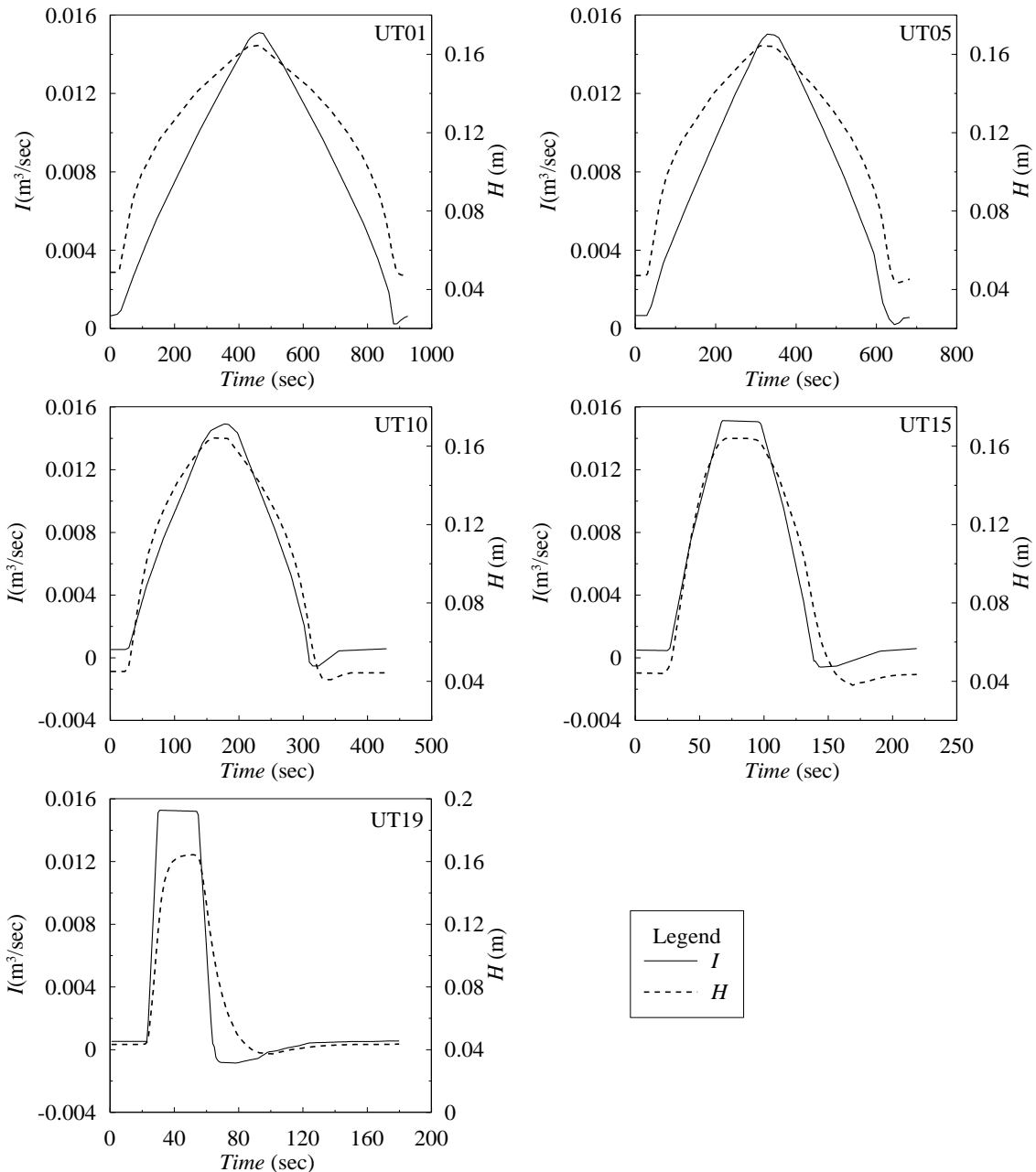
در حل بروش روندیابی پالس اصلاح شده، از برقراری

سناریوهای پژوهش و روش تحلیل اطلاعات ثبت شده آزمون فرضیه تحقیق نیازمند تولید هیدروگراف‌های مختلف بود تا از این طریق، جریان غیرماندگار در داخل مخزن اتفاق بیفتد و سپس مقادیر دبی غیرماندگار تحت چنین شرایطی مورد تحلیل و بررسی قرار بگیرد لذا با تنظیماتی که روی دبی ورودی ( $I$ ) به مخزن اتفاق افتاد، تعداد ۱۹ هیدروگراف با نرخ‌های مختلف تغییرات در شاخه‌های صعودی و نزولی ایجاد شد. در طول عبور این هیدروگراف‌ها، دبی ورودی به مخزن و تراز آب مخزن ثبت گردید. از مجموع ۱۹ سناریو با هیدروگراف‌های ورودی مختلف ایجاد شده در آزمایشگاه، ۵ نمونه در شکل (۴) ارائه شده است. هیدروگراف‌های ایجاد شده که با UT01 تا UT19 نام‌گذاری شده‌اند در جهت افزایش شدت تغییرات بوده‌اند بطوریکه UT01 دارای تغییرات زمانی آرام در خصوصیات جریان و UT19 دارای شدیدترین تغییرات بود. هیدروگراف‌های عمق ( $H$ ) ارائه شده در شکل (۴) نیز نشانگر بار آبی روی تاج سرریز در طول سناریوهای تحقیق است.

داده‌های برداشت شده در آزمایشگاه که در شکل (۴) ارائه شده است، پارامترهای مورد نیاز برای حل معادله مخزن است. برقراری توازن جرم به‌روش معادله مخزن نیازمند چهار عامل (۱) دبی جریان ورودی به مخزن، (۲) دبی جریان خروجی از مخزن، (۳) مساحت مخزن و (۴) تراز سطح آب در مخزن است

دبی خروجی محاسبه شده در برابر زمان به‌عنوان هیدروگراف عبوری از سرریز و مقادیر دبی خروجی در برابر بار آبی روی تاج سرریز به‌عنوان دبی-اشل جریان غیرماندگار ترسیم گردید.

توازن جرم در هر گام زمانی حل استفاده شد و ابتدا با استفاده از رابطه (۳)، مقدار شاخص  $\frac{2S}{t} + O$  برای انتهای هر گام زمانی تعیین گردید و سپس از روی منحنی  $O$  در برابر  $\frac{2S}{t} + O$ ، مقادیر دبی خروجی استخراج شد. بعد از استخراج نتایج، مقادیر



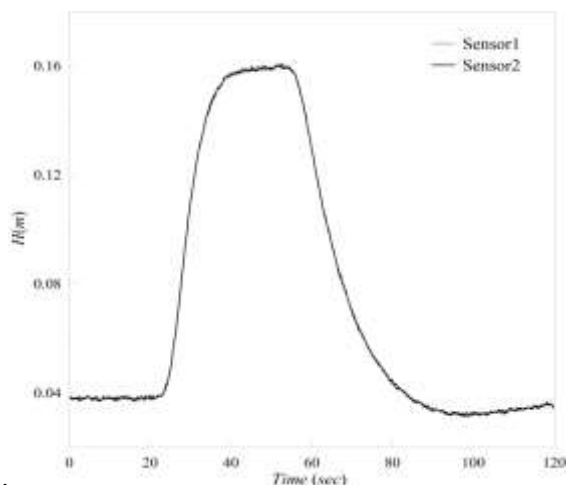
شکل ۴. نمونه‌هایی از سناریوهای مورد بررسی در تحقیق

شدیدترین هیدروگراف بررسی شده (UT19)، می‌باشد بر اساس شکل ۵)، جریان در دو سنسور متوالی در بالادست سرریز دارای تراز یکسان بوده‌است فلذا جریان متأثر از پس‌زدگی بوده و سطح آب افقی است و به‌عنوان جریان در داخل مخزن تلقی می‌گردد.

## نتایج و بحث

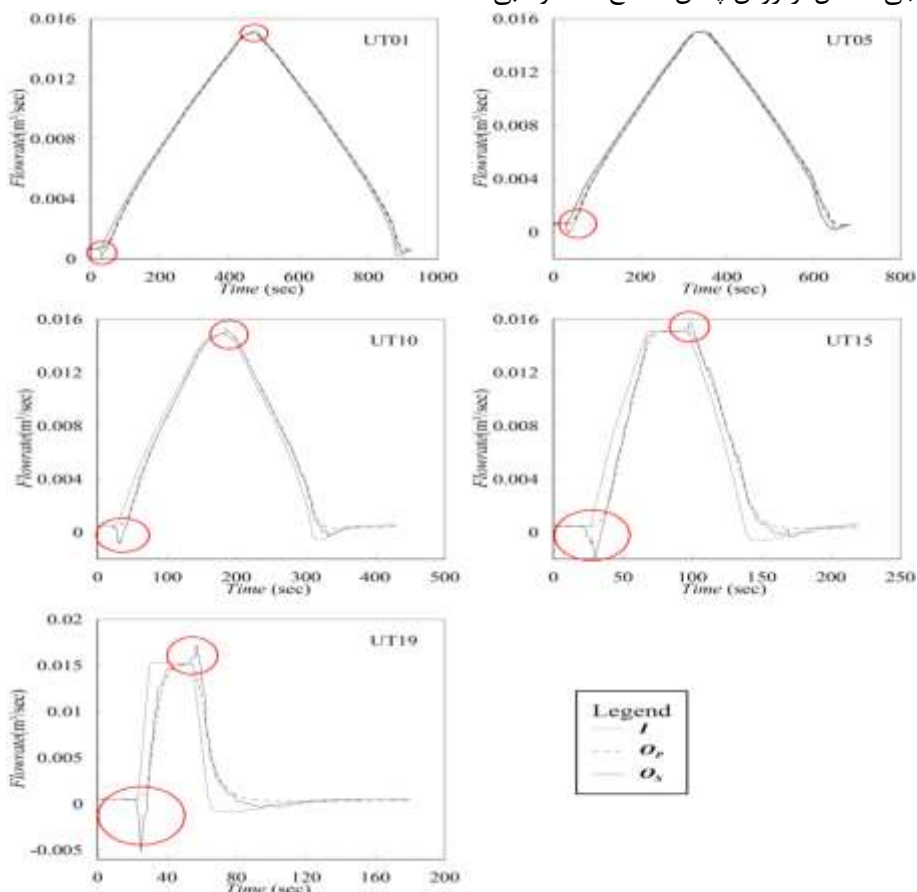
قبل از شروع به تحلیل نتایج تحقیق، به منظور اطمینان از وقوع جریان با سطح افقی در بالادست سرریز و وقوع جریان از نوع مخزن، تراز سطح آب در دو سنسور متوالی در داخل مخزن (مطابق جانمایی ارائه شده در شکل ۳-الف) ترسیم گردید. شکل ۵) در بردارنده اطلاعات عمق دریافتی از دو سنسور یاد شده در

خروجی حاصل از معادله مخزن. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶)، در محل تغییر ناگهانی دبی ورودی و بار آبی در محل شروع شاخه‌های صعودی و نزولی (نواحی مشخص شده با دایره)، دبی خروجی محاسبه شده بروش معادله مخزن ( $O_s$ ) دارای تغییرات شدید است و حتی در برخی موارد، مقادیر دبی منفی شده‌است که این نتایج با شرایط فیزیکی پدیده و مشاهدات عینی آزمایشگاهی مغایرت دارد. دلیل وقوع چنین اتفاقی در نتایج می‌تواند به مقادیر بزرگ  $dH/dt$  (رابطه ۹) نسبت داده شود که در محل تغییرات شدید هیدروگراف اتفاق می‌افتد. اما از آنجا که در روش پالس اصلاح شده، مقادیر  $dH/dt$  دخالت ندارد لذا نوسانات مذکور در روش پالس اصلاح شده وجود ندارد. در سایر نواحی هیدروگراف‌ها، نتایج دو روش تقریباً به هم نزدیک بوده و تقریباً نتایج مشابه ارائه کرده‌اند. بنابراین روش پالس اصلاح شده در برآورد دبی غیرماندگار عبوری از سرریز عملکرد نسبتاً بهتری داشته‌است و روش معادله مخزن که توسط پژوهشگرانی چون Johnson and De Laine (1964)، Green (1977)، Chanson and Wang (2013) مورد استفاده قرار گرفته است، در شرایط مورد بررسی در پژوهش حاضر خطای زیادی را در برخی مقاطع از هیدروگراف ایجاد می‌نماید.



شکل ۵. تراز سطح آب در دو سنسور متوالی در بالادست سرریز

بعد از اطمینان از وقوع جریان در داخل مخزن، انجام تحلیل‌ها مطابق روش‌شناسی تحقیق برای ۱۹ هیدروگراف تولید شده صورت گرفت ولی برای نمایش نتایج فقط چند نمونه از هیدروگراف‌ها به‌عنوان نماینده کل تحلیل‌ها انتخاب شد. شکل ۶ در بردارنده مقادیر دبی لحظه‌ای عبوری از سرریز در سناریوهای انتخابی (سناریوهای UT01، UT05، UT10، UT15 و UT19) است که از دو روش یاد شده استخراج شده‌اند.  $O_p$  و  $O_s$  در شکل ۶) به ترتیب عبارت‌اند از هیدروگراف دبی ورودی به مخزن، دبی خروجی حاصل از روش پالس اصلاح شده و دبی

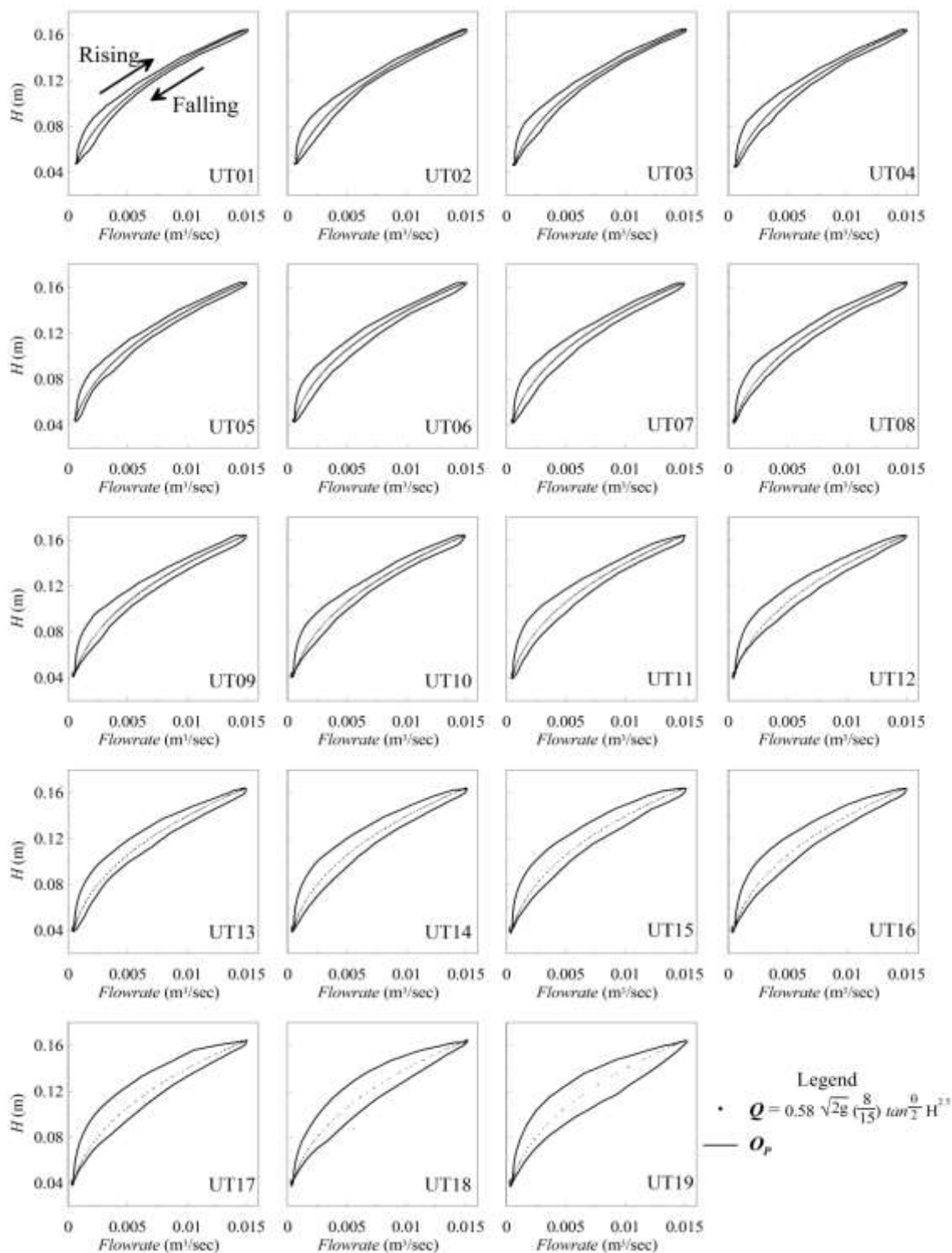


شکل ۶. نمونه‌هایی از نتایج محاسبه دبی غیرماندگار عبوری از سرریز مثلثی در سناریوهای مختلف تحقیق



سناریوی تحقیق می‌باشد، نشانگر تأثیر قابل توجه جریان غیرماندگار بر روی دبی عبوری از سرریز است و این تأثیر در شاخه‌های صعودی و نزولی متفاوت بوده، بطوریکه تشکیل منحنی سنجح حلقوی داده‌است.

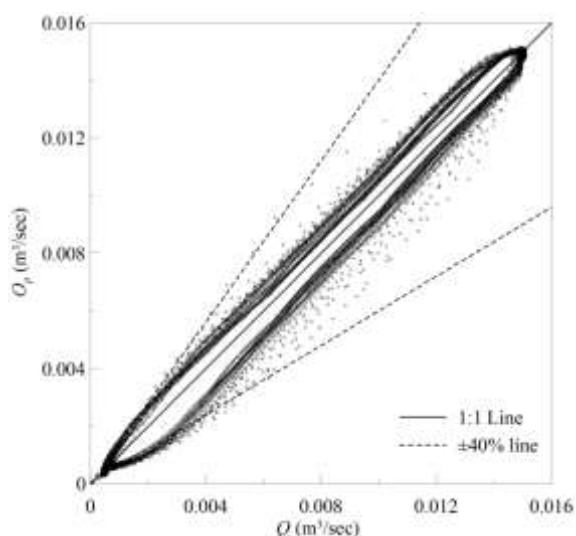
با تشخیص بهتر بودن نتایج حاصل از روش پالس اصلاح شده، مقادیر دبی غیرماندگار برای تمام سناریوهای تحقیق با استفاده از این روش محاسبه گردید. نتایج حاصل برای دبی‌های غیرماندگار عبوری از سازه در شکل) در کنار دبی-اشل ماندگار (Q ارائه شده‌است. شکل) که در بردارنده نتایج تمام ۱۹



شکل ۷. منحنی دبی-اشل حلقوی برای سناریوهای مورد بررسی در تحقیق

ماندگار بیشتر خواهد بود (شکل).

برای نمایش میزان انحراف دبی غیرماندگار حاصل از روش پالس اصلاح شده نسبت به دبی ماندگار، از شکل ۷ استفاده شد. در این شکل، خط یک به یک و خطوط اختلاف  $\pm 40\%$  نیز ترسیم شده است. بر اساس شکل ۷، غیرماندگاری جریان باعث انحراف مقادیر دبی نسبت به دبی ماندگار شده است و میزان این انحراف، به ویژه در دبی‌های پایین، به بیش از ۴۰ درصد نیز رسیده است. در شکل ۷، داده‌های موجود در زیر خط یک به یک مربوط به شاخه صعودی و بالای آن مربوط به شاخه نزولی هیدروگراف می‌باشد.



شکل ۷. مقادیر دبی غیرماندگار محاسبه شده بر روش پالس اصلاح شده در مقابل دبی ماندگار

برای تعیین میزان انحراف دبی‌های غیرماندگار نسبت به دبی ماندگار در سناریوهای تحقیق نیز از رابطه (۹) استفاده شد:

$$\%Diff = \frac{O_p - Q}{Q} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

بطوریکه در این رابطه عبارت  $\%Diff$  در این رابطه عبارت است از درصد اختلاف بین دبی‌های ماندگار و غیرماندگار. از طرفی برای تعیین قابلیت روش‌های "دبی-اشل ماندگار" و "روندیابی پالس اصلاح شده" در تعیین حجم جریان عبوری در طول هیدروگراف از روابط (۱۰) و (۱۱) استفاده شد. معیار  $NRMSE^2$  در این روابط، خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده است که در تعیین آن در هر لحظه از هیدروگراف، از مقادیر تجمعی حجم جریان عبوری تا آن لحظه استفاده گردید:

$$NRMSE_{steady} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - S_{steady})^2 \right)^{0.5} \left( \frac{100}{S} \right) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

همان‌طور که در شکل) مشاهده می‌شود مقدار دبی عبوری از سرریز مثلثی به ازای یک عمق مشخص بالادست، بسته به شدت تغییرات خصوصیات جریان نظیر دبی ورودی و تراز بالادست، مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرد. بر اساس همین شکل، مقدار دبی غیرماندگار در شاخه صعودی هیدروگراف کمتر از شاخه نزولی است و این بدان معناست که در شاخه صعودی علیرغم تغییرات مثبت تراز سطح آب نسبت به زمان، دبی عبوری از سازه مقدار کمتری نسبت به دبی ماندگار و دبی شاخه نزولی دارد.

روند تغییرات دبی بر روی شاخه‌های صعودی و نزولی در شکل) عکس روند تغییرات دبی در آبراهه‌ها است و به همین دلیل، در مقایسه با جریان در آبراهه‌ها، موقعیت شاخه‌های صعودی و نزولی در طرفین دبی-اشل ماندگار جابجا شده است. شکل) روند تغییرات دبی را که در تمام سناریوهای UT01 تا UT19 اتفاق افتاده است، نشان می‌دهد. البته مطابق آنچه در بخش مقدمه بیان شد، مشابه این روند در تحقیق Kuhnle and Bowie (1992) نیز برای آبراهه‌های طبیعی اتفاق افتاده بود (شکل ۱-ب) و دلیل آن، تغییرات زبری بستر آبراهه در طول عبور هیدروگراف بود در حالی که در آزمایش‌های تحقیق حاضر، زبری بستر ثابت بوده و نمی‌تواند عامل تأثیرگذار باشد. بنابراین در جایی دیگر باید به دنبال دلیل وقوع چنین اتفاقی بود.

دلیل کمتر بودن مقادیر دبی معادل یک تراز سطح آب معین در شاخه صعودی نسبت به شاخه نزولی می‌تواند با الگوی جریان داخل مخزن در ارتباط باشد. بدیهی است که در یک تراز مشخص سطح آب مخزن، بهم‌خوردگی<sup>۱</sup> و آشفتنگی ناشی از ورود یک دبی بالاتر (بر روی شاخه صعودی) در سیال داخل مخزن در مقایسه با دبی ورودی پایین‌تر (بر روی شاخه نزولی)، بیشتر است. این بهم‌خوردگی‌ها و آشفتنگی‌ها خود عامل مقاومت در مقابل جریان هستند و بنابراین منجر به وقوع ترازهای بالاتر مخزن در روی شاخه صعودی به ازای یک دبی مشخص خواهند شد و نهایتاً رفتار مشابه **Error! Reference source not found.** به وقوع خواهد پیوست. همچنین در خصوص شاخه نزولی هیدروگراف، علاوه بر استنباط بالا، از طرف دیگر سرریز در هر لحظه در حال تخلیه ذخیره مربوط به تراز لحظه قبلی نیز است و به همین دلیل به میزان دبی عبوری اضافه می‌گردد. با توجه به دلایل بالا، بدیهی است که هر چه میزان تغییرات دبی ورودی یا تراز آب مخزن شدیدتر باشد، میزان انحراف دبی در شاخه‌های صعودی و نزولی نسبت به هم و نسبت به دبی

متوسط مقادیر اختلاف بسته به شدت تغییرات در سناریوهای مختلف از حدود ۱۰ درصد تا ۲۵ متغیر بوده است لذا نتیجه گرفته می‌شود که تأثیر جریان غیرماندگار بر دبی‌های عبوری از سرریزهای لبه تیز بسیار حائز اهمیت است و باید به شکل دقیقی فرموله گردد. از طرفی دیگر در تمام سناریوها، با توجه به مقادیر حاصل برای NRMSE، قابلیت تعیین درست حجم جریان عبوری در طول هیدروگراف توسط روش پالس اصلاح شده بهتر از روش دبی-اشل ماندگار بوده است لذا استفاده از روابط دبی-اشل ماندگار سرریزها در شرایط جریان غیرماندگار همراه با خطا است و باید این روابط مورد اصلاح قرار بگیرد تا برای جریان غیرماندگار قابل کاربرد باشد.

### نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر غیرماندگاری جریان بر مقادیر دبی عبوری از سرریزهای لبه تیز مثلثی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های تحقیق، روش "روندیابی پالس اصلاح شده" در مقایسه با "روش معادله مخزن"، روش بهتری برای محاسبه دبی غیرماندگار لحظه‌ای بوده و بنابراین این روش برای تحلیل پدیده‌های مشابه پیشنهاد می‌گردد. روش معادله مخزن که در تحقیقات پیشین برای تعیین دبی جریان در روش فروکش مخزن بکار رفته است، در شرایط تحقیق حاضر دارای نتایج مناسبی نبود.

نتایج نشانگر این است که تأثیر جریان غیرماندگار بر دبی عبوری از سرریز بسیار حائز اهمیت است بطوریکه در برخی از سناریوهای مورد بررسی باعث بروز اختلاف بیش از ۴۰ درصد، به ویژه در دبی‌های پایین، شده است و مقادیر متوسط اختلاف در سناریوهای مورد بررسی از حدود ۱۰ درصد در هیدروگراف‌های با نرخ تغییرات پایین تا ۲۵ درصد در تغییرات شدید، متغیر بوده است. همچنین محاسبه معیار NRMSE به عنوان شاخصی برای بررسی وضعیت محاسبه حجم جریان به دو روش دبی-اشل ماندگار و روندیابی پالس اصلاح شده نسبت به حجم جریان ورودی، نشانگر این است که استفاده از دبی-اشل ماندگار در تخمین حجم کلی جریان نیز دارای خطای بیشتری است.

بررسی رفتار جریان نیز نشانگر این است که مقدار دبی غیرماندگار عبوری از سرریز در شاخه صعودی، به ازای یک تراز مشخص آب بالادست، کمتر از شاخه نزولی است. این پدیده در مغایرت کامل با تئوری جریان غیرماندگار (معادلات سنت-نونان) است. دلیل این امر به شرایط و الگوی جریان در مخزن بر می‌گردد و چنین استنباط می‌شود که بهم خوردگی‌ها و گردابه‌های موجود در داخل مخزن در شاخه صعودی در مقایسه

$$NRMSE_p = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - S_p)^2 \right)^{0.5} \left( \frac{100}{\bar{S}} \right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

بطوریکه  $S_{steady}$ ،  $S_p$  و  $S_i$  به ترتیب عبارت‌اند از حجم تجمعی جریان در هر لحظه از هیدروگراف حاصل از دبی اشل ماندگار ( $Q$ )، روندیابی پالس اصلاح شده ( $Op$ ) و هیدروگراف دبی ورودی ( $I$ ) که در محاسبه  $S_{steady}$  و  $S_p$  مقادیر تغییرات حجم مخزن نیز به میزان حجم کل افزوده شده است. پارامتر  $\bar{S}$  عبارت است از میانگین حجم ذخیره در طول هیدروگراف ورودی که برای نرمال‌سازی مقادیر  $RMSE^1$  از آن استفاده شد.  $n$  نیز عبارت است از تعداد بازه‌های زمانی از هیدروگراف که محاسبات در آن‌ها صورت گرفت. فاصله زمانی بین محاسبات در روی هیدروگراف برابر یک ثانیه بود.

جدول ۳ در بردارنده مقادیر متوسط پارامتر  $Diff\%$  و همچنین مقادیر پارامترهای  $NRMSE_{steady}$  و  $NRMSE_p$  برای سناریوهای مختلف است.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای محاسبه شده به منظور نمایش اثر جریان غیرماندگار در برآورد دبی و حجم در سناریوهای تحقیق

سناریو	مقدار متوسط %Diff	$NRMSE_{steady}$	$NRMSE_p$
UT01	۹/۳۸	۳/۳۴	۰/۱۰
UT02	۱۰/۷۶	۳/۹۷	۰/۱۲
UT03	۱۰/۱۹	۴/۸۴	۰/۱۳
UT04	۱۰/۵۱	۳/۵۹	۰/۱۱
UT05	۱۱/۵۰	۴/۵۴	۰/۱۶
UT06	۱۲/۴۲	۳/۸۹	۰/۱۵
UT07	۱۵/۳۹	۴/۷۶	۰/۲۴
UT08	۱۴/۳۱	۵/۱۶	۰/۲۷
UT09	۱۵/۲۷	۵/۴۴	۰/۳۸
UT10	۱۸/۵۷	۴/۹۷	۰/۳۴
UT11	۱۶/۵۲	۴/۵۶	۰/۴۹
UT12	۱۳/۹۱	۵/۱۵	۱/۰۵
UT13	۱۹/۷۹	۴/۱۰	۰/۶۵
UT14	۱۸/۸	۴/۴۰	۰/۹۸
UT15	۲۰/۹۱	۵/۱۴	۰/۹۳
UT16	۱۹/۶۰	۴/۶۵	۱/۲۴
UT17	۲۰/۰۱	۶/۵۵	۲/۱۴
UT18	۲۳/۸۴	۴/۶۳	۲/۳۹
UT19	۲۵/۹۴	۴/۹۹	۱/۵۸

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر اختلاف بین دبی‌های ماندگار و غیرماندگار، به ویژه در دبی‌های پایین به بیش از ۴۰ درصد نیز رسیده است و مطابق جدول (۳)،

این خواهد بود که با به‌کارگیری حداقل تعداد از پارامترهای بالا، نتیجه درستی در محاسبه دبی غیرماندگار حاصل گردد.

توسعه معادله حاکم مناسب برای محاسبه دبی غیرماندگار در سرریزها که با استفاده از پارامترهای قابل‌سنجش، میزان دبی غیرماندگار را تعیین نمایند، می‌تواند منجر به تولید مدل‌های برخط شود بطوریکه با ارسال اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط سنسورها<sup>۱</sup>، مقدار دبی توسط مدل تعیین گردد. نتایج این مدل‌های بر خط در شبکه‌های آبیاری پیچیده که سازه‌های تنظیم‌زیادی در شبکه وجود دارد و عملیات بهره‌برداری هر کدام بر دیگر سازه‌ها اثر می‌گذارد، باعث بهبود وضعیت تحویل حجمی آب خواهد شد. همچنین در رودخانه‌ها در زمان وقوع سیل، علاوه بر امکان استخراج و ثبت هیدروگراف سیل با استفاده از مدل‌های برخط مذکور، می‌توان از نتایج این مدل‌ها برای صدور هشدار سیل در دبی‌های پیک بیشتر از دبی پیک مجاز استفاده نمود.

۱. سنسورهای اندازه‌گیری فشار هم‌اکنون در شبکه‌ها به وفور مورد استفاده قرار گرفته‌است و کافی‌ست اطلاعات آنها به منظور پردازش بطور برخط به مدل‌ها مخابره گردد.

## REFERENCES

- Aricò, C., Nasello, C. and Tucciarelli, T. (2009). Using unsteady-state water level data to estimate channel roughness and discharge hydrograph, *Advances in Water Resources*, 32, 8, 1223.
- Bazaz, A. (2008). Discharge coefficient of weirs in unsteady flow, MSc thesis, Tehran University. (In Persian)
- Bos MG. (1989). Discharge measurement structures. Publication no. 161. Delft Hydraulic Laboratory, Delft: The Netherlands. (Also Publication no. 20, ILRI, Wageningen, The Netherlands).
- Carter, R. W., Godfrey, R. G. (1960). Storage and flood routing, USGS report, iv, p. 81-104 :ill. ;23 cm.
- Chanson H. and Wang H. (2013). Unsteady discharge calibration of a large V-notch weir. *Flow Measurement and Instrumentation* 29 (2013) 19–24.
- Chaudhry. M. H. (2008). Open-Channel Flow. Second Edition. *Springer Science+Business Media*, LLC. New York.
- Chow, V. T. (1959). "Open Channel Hydraulics," McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, Japan.
- Clemmens, A. J., Wahl, T. L., Bos, M. G., and Replogle, J. A. (2001). Water Measurement with Flumes and Weir. Publication no. 58, ILRI, Wageningen, The Netherlands.
- De Laine, R. J. (1964). Calibration of weirs using the rate of pondage drawdown, *Journal of Hydrology*, 2 (1964) 130-140.
- Fiorentini, M. and Orlandini, S. (2013). Robust numerical solution of the reservoir routing equation, *Advances in Water Resources*, 59(2013), p.123–132
- Fread, D. L. (1985). Channel routing, *Hydrological Forecasting*, John Wiley and sons Ltd. New York: John Wiley and Sons; 1985. p.437–503.
- Hager, W. and Sinniger, R. (1985). "Flood Storage in Reservoirs." *J. Irrig. Drain Eng.*, 111(1), 76–85
- Henderson, F.M. (1966). Open channel flow: New York, MacMillan, 522 p.
- Johnson, F. A. and Green C.S. (1977). The calibration of sharp crested weirs by the pondage drawdown method, *Journal of Hydrology*, 33 (1977) 363-373.
- Kuhnle, R. A. and Bowie, A. J. (1992). "Loop Rating Curves from Goodwin Creek". Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum '92. Baltimore, Maryland, August 2–6, 1992. (Published by American Society of Civil Engineers).
- Raghunath, H. M. (2006). Hydrology: Principles, Analysis, Design, New Age International (P) Ltd., Publishers
- USBR. (1989). Flood hydrology manual, A water resources technical publication, First Edition 1989.
- USBR. (2012). Laboratory Evaluation of Open Channel Area-Velocity Flow Meters, Hydraulic Laboratory Report HL-2012-03.
- USDA-Soil Conservation Service. (1989). Hydrology Training Series. Module 111-Reservoir Flood Routing.

با شاخه نزولی، از شدت نسبتاً بیشتری برخوردارند و این گردابه‌ها به عنوان عاملی برای مقاومت در مقابل جریان عمل می‌کنند و بنابراین دبی عبوری در شاخه صعودی کمتر از شاخه نزولی است. در خصوص شاخه نزولی هیدروگراف، علاوه بر استنباط بالا، از طرف دیگر سرریز در هر لحظه در حال تخلیه ذخیره مخزن مربوط به تراز بالاتر لحظه قبلی نیز است و به همین دلیل به میزان دبی عبوری اضافه می‌گردد. با توجه به دلایل بالا، بدیهی است که هر چه میزان تغییرات دبی ورودی یا تراز آب مخزن شدیدتر باشد، میزان انحراف دبی در شاخه‌های صعودی و نزولی نسبت به هم و نسبت به دبی ماندگار بیشتر خواهد بود.

در نهایت با توجه به اینکه تغییرات دبی جریان غیرماندگار عبوری از سرریز از پارامترهای زیادی با درجه اهمیت مختلف (به‌طور مثال بار آبی، تغییرات زمانی بار آبی، سطح مخزن، شکل مخزن، نوع سرریز، دبی ورودی، تغییرات زمانی دبی ورودی و تأخیر زمانی) متأثر است لذا شناسایی وضعیت رفتار جریان و توسعه روابط کلی برای محاسبه دبی غیرماندگار، نیاز به تست‌های آزمایشگاهی و صحرایی زیادی دارد و بهترین حالت

**Unsteady Flow in V-Notch Weir Located at the End of a Storage**  
**Firouz Ghasemzadeh<sup>1\*</sup>, Salah Kouchakzadeh<sup>2</sup>**

1. PhD Candidate, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran

2. Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran

**(Received: Aug.7.2016 – Accepted: Dec.6,2016)**

**ABSTRACT**

Sharp-crested weirs are common measuring devices in rivers and irrigation networks. Their installation and operation are simple yet very practical. The hydraulic performance of sharp-crested weirs and their head-discharge equations in unsteady flow condition are of great interest, however, very limited studies are available in the literature. In the present study, the hydraulic performance of 90° V-notch weir, located at the end of a storage, was investigated in unsteady flow condition and the differences between steady and unsteady overflow were observed and evaluated. The results indicate that the difference between steady and unsteady discharges are significant whereas the difference value of investigated scenarios arise up to 40 percent, sometimes. Therefore, the previous head-discharge equations are no longer valid.

Keywords : Unsteady flow, Stage-discharge, V-Notch weir, Unsteady head-discharge equation, Storage routing

