




## **Experimental study of flood detention basins capacity in unsteady flow conditions**

**Abdolreza Zahiri<sup>1✉</sup>, Marjan Parsmehr<sup>2</sup>, Mohammad Bijankhan<sup>3</sup>, Amir Ahmad Dehghan<sup>4</sup>**

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: [zahiri.areza@gmail.com](mailto:zahiri.areza@gmail.com)
2. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Email: [marjan.parsmehr@yahoo.com](mailto:marjan.parsmehr@yahoo.com)
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Email: [bijankhan@eng.ikiu.ac.ir](mailto:bijankhan@eng.ikiu.ac.ir)
4. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Email: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)

<b>Article Info</b>	<b>ABSTRACT</b>
<p><b>Article type:</b> Research Article</p> <p><b>Article history:</b></p> <p><b>Received:</b> July. 7, 2022</p> <p><b>Revised:</b> Oct. 5, 2022</p> <p><b>Accepted:</b> Nov. 8, 2022</p> <p><b>Published online:</b> Dec. 22, 2022</p> <p><b>Keywords:</b> Average inflowing discharge, Roughness height of bed, Length of side weir, Steady flow.</p>	<p>Due to increasing negative environmental impacts of storage dams, detention basins have been considered as an alternative solution instead of construction of concrete dams for reduction of flood damage in recent decades. Literature reviews on detention basins show that there are limited numerical and experimental studies in this regard. In this research the effect of bed roughness height of main channel on the inflow discharge has been investigated by considering the effective factors on the efficiency of basins in laboratory of Gorgan University in 2018. Also, the general ability of using steady flow equations for unsteady flow was investigated by calibrating some of the discharge coefficient equations. For simulation, a metal tank was connected to a channel through a broad side weir. Three bed roughness heights of the flume in the range of 0.06 to 15 mm as well as three lengths of side weirs in the range of 30 to 90 cm were utilized. The experiments were carried out under unsteady flow condition by three inflow hydrographs with peak discharges of 17, 25 and 33 l/s and a base time of 504s. The flow depth was measured instantaneously by transmitter and the average inflowing discharge into the detention pond was calculated. According to the results, use of lateral flow discharge coefficient relationships of the steady flow cannot be generalized for unsteady flow. So, based on dimensional analysis of the <math>\Pi</math>-Buckingham theory, some relationships have been proposed for calculation of the average inflow rate into the detention pond and also for filling time of the pond. The maximum errors for calculation of the average inflow rate as well as the filling time of the basin were less than 15 percent. Also, increasing the streambed roughness can increase the average inflow rate to the detention basin by 25 percent .</p>
<p>Cite this article: Zahiri, A., Parsmehr, M., Bijankhan, M., &amp; Ahmad Dehghani, A. (2022) Experimental study of flood detention basins capacity in unsteady flow conditions. <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 53 (10), 2311-2331. <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345528.669314">https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345528.669314</a></p> <p>© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.</p> <p>DOI: <a href="https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345528.669314">https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345528.669314</a></p>	

## مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت آبیگری مخازن نگهداشت سیل در جریان غیرماندگار

عبدالرضا ظهیری<sup>۱</sup>، مرجان پارس مهر<sup>۲</sup>، محمد بی جن خان<sup>۳</sup>، امیر احمد دهقانی<sup>۴</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: [zahiri.areza@gmail.com](mailto:zahiri.areza@gmail.com)۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم و کشاورزی منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: [marjan.parsmehr@yahoo.com](mailto:marjan.parsmehr@yahoo.com)۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، ایمیل: [bijankhan@eng.ikiu.ac.ir](mailto:bijankhan@eng.ikiu.ac.ir)۴. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، ایمیل: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

به دلیل اثرات منفی محیط زیستی سدهای مخزنی، مخازن نگهداشت سیل یا مخازن تأخیری سیلاب به عنوان یک راهکار جایگزین برای مدیریت و کاهش خسارات سیل در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات عددی و آزمایشگاهی محدودی در این زمینه انجام شده است، لذا در این تحقیق با بررسی آزمایشگاهی عوامل موثر بر نحوه عملکرد مخازن نگهداشت در آزمایشگاه هیدرولیک آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۲۰۱۸، اثر میزان زبری بستر آبراهه اصلی بر میزان دبی ورودی به مخزن نگهداشت در کنترل دبی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با واسنجی برخی معادلات ضریب دبی سرریز جانبی، قابل تعمیم بودن استفاده از روابط جریان ماندگار برای جریان غیرماندگار بررسی شد. برای مدل سازی، یک مخزن فلزی از طریق سرریز جانبی لبه پهن به بدنه کانال متصل شد. سه ارتفاع زبری بستر فوم در محدوده ۰/۰۶ تا ۱۵ میلی‌متر و همچنین سه طول سرریز جانبی در محدوده ۳۰ تا ۹۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها تحت شرایط جریان غیرماندگار و با سه هیدروگراف ورودی با دبی‌های اوج ۱۷، ۲۵ و ۳۳ لیتر بر ثانیه و زمان پایه ۵۰۴ ثانیه انجام شد. با استفاده از حسگرهای دیجیتال، عمق جریان در هر لحظه در کانال و مخزن ثبت و دبی متوسط جریان ورودی به مخزن محاسبه گردید. بر اساس نتایج، استفاده از روابط ضریب دبی سرریز جانبی جریان ماندگار برای جریان غیرماندگار قابل تعمیم نیست لذا بر مبنای تئوری بدون بعدسازی پی باکینگهام، روابطی برای محاسبه دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت و مدت زمان پرشدن آن ارائه گردید که پیشینه خطای محاسباتی برای دبی متوسط جریان ورودی به مخزن و زمان پر شدن مخزن کمتر از ۱۵ درصد بوده است. همچنین تغییرات زبری بستر آبراهه می‌تواند تا ۲۵ درصد باعث افزایش دبی متوسط ورودی به مخزن جانبی شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱

## واژه‌های کلیدی:

دبی متوسط جریان ورودی به سرریز، ارتفاع زبری بستر، طول سرریز جانبی، جریان ماندگار.

استناد: ظهیری؛ عبدالرضا، پارس مهر؛ مرجان، بی جن خان؛ محمد، دهقانی؛ امیراحمد، (۱۴۰۱) مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت آبیگری مخازن نگهداشت سیل در جریان

غیرماندگار. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۰)، ۲۳۳۱-۲۳۴۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345528.669314>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345528.669314>

## مقدمه

کشور ایران به واسطه شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ژئومورفولوژی در بسیاری از مناطق، همه ساله در معرض خطر سیل می‌باشد، به طوری که بیش از ۸۰ درصد وسعت شهرهای ایران در معرض خطر وقوع سیل قرار دارند (Moayeri & Entezar, 2008). اواخر سال ۱۳۹۷ و اوایل سال ۱۳۹۸ در کشور ایران بارندگی‌های بهاری ممتدی در چندین استان کشور رخ داد که سیل‌های شدید و خسارت‌های زیان‌باری به همراه داشت (Rajabzadeh *et al.*, 2019). لذا پرداختن به اقداماتی جهت کنترل و کاهش خسارات ناشی از سیل‌های به وجود آمده تا حد امکان ضروری است. از جمله اقدامات معمول برای کنترل و کاهش خسارات ناشی از سیل و همچنین کاهش حجم و پیک جریان، ساخت سدهای مخزنی و تأخیری می‌باشد. سدها فواید بسیاری دارند ولی تداوم این عمل انسانی در تغییر شرایط طبیعی، نهایتاً می‌تواند توازن محیط را برهم زده و زنجیره‌ای از پیامدهای ناخواسته یا پیش‌بینی نشده را در پی داشته باشد چنانچه هم اینک جوامع انسانی با این معضل روبرو هستند (Pirestani & shafaghatti, 2010).

با توجه به اینکه اثرات تخریبی سدها در محیط زیست افزایش یافته است، لذا استفاده مخازن نگهداشت سیل یا مخازن تأخیری سیلاب به عنوان راهکار جایگزین در دهه‌های اخیر مطرح و مورد توجه قرار گرفته است (Ji *et al.*, 2013; Siviglia *et al.*, 2009). شکل (۱) نمونه‌ای از مخزن نگهداشت را نشان می‌دهد (Boosik & Byeongman, 2012).



شکل ۱- مخزن نگهداشت وایت اوک<sup>۱</sup> در کنار آبراهه اصلی الف) قبل از سیلاب. ب) بعد از سیلاب

مخازن نگهداشت، مخازنی هستند که به دیواره‌ها و یا خاکریزهایی محدود می‌شوند تا فضایی را برای نگهداشت آب فراهم آورند و می‌توانند شامل یک سرریز یا روزنه برای خروج جریان‌های بیشتر از ظرفیت مخزن باشند (GDSDS, 2005). این مخازن عمدتاً به منظور انحراف و نگهداشت بخشی از رواناب سطحی ناشی از سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند تا نرخ دبی پیک سیلاب و همچنین اثرات منفی ناشی از سیلاب را کاهش دهند (Ji *et al.*, 2013).

اولین بار عملکرد مخازن نگهداشت برای مدیریت دبی سیلاب در سال ۱۹۱۷ مطرح شد. در طی صد سال گذشته کاربرد این مخازن بسیار زیاد شده است و از دهه ۷۰ میلادی نیز به صورت تخصصی و فنی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. (Gierk *et al.*, 2008) از جمله مزایای مخازن نگهداشت می‌توان به تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، بهبود کیفیت آب از طریق فرآیندهای طبیعی مثل ته‌نشینی رسوبات و نفوذ آب در خاک اشاره کرد. از دیگر مزایای آن‌ها این است که می‌توان از این مخازن به عنوان مکانی برای تفریح و همچنین زیستگاهی برای زندگی موجودات منطقه بهره برد و به نوعی پارامترهای اکولوژی و زیست‌محیطی رودخانه را ارتقاء داد (GDSDS, 2005).

اکثر تحقیقات انجام شده در دهه‌های اخیر بر پایه مدل‌سازی عددی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعه Fukuoka *et al.* (2007) اشاره کرد آن‌ها با انجام پایش داده‌های موجود از یک مخزن نگهداشت در رودخانه ترامیگاوا<sup>۲</sup> یک مدل عددی دو بعدی



ارائه دادند که با توجه به پروفیل سطح آب در رودخانه می‌توان میزان حجم آب قابل ذخیره در مخزن و همچنین میزان کاهش تراز سطح آب پایین دست را تخمین زد. (Gierk *et al.* (2008). کاهش دبی پیک سیلاب را در طول رودخانه البه<sup>۱</sup> با استفاده از مدل موج دیفیوژن مورد ارزیابی قرار دادند، مدل مذکور میزان کاهش دبی پیک در ایستگاه‌های متفاوت در طول رودخانه را بین ۳/۹ تا ۱۰/۸ درصد تخمین زد. با استفاده از مدل شبیه‌سازی EPA-SWMM، عملکرد مخازن نگهداشت موجود در منطقه شهری تهران به منظور مدیریت بهینه عملکرد آن‌ها در قبل و بعد از سیلاب مورد بررسی قرار گرفت (Yazdi, 2019). کاربرد مخازن ذخیره برای کنترل سیل و تولید انرژی برق آبی توسط Dadfar *et al.* (2019) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها پارامترهای مختلف مخازن مانند اندازه، شکل و تراز سطح آب در مخزن را به منظور تعیین حجم بهینه مخزن برای تولید بهترین میزان انرژی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که شکل استوانه‌ای مخزن نسبت به شکل مکعبی بهترین نتیجه را در موارد بررسی شده دارد.

عملکرد مخازن نگهداشت به طور مستقیم به حجم جریان ورودی به آن نیز بستگی دارد. سازه‌های مختلفی برای انحراف سیل از مسیر اصلی خود به مخازن نگهداشت استفاده می‌شوند که سرریزهای جانبی از جمله سازه‌های رایج هستند لذا عواملی که بر میزان دبی عبوری از روی سرریز تأثیر گذار است حائز اهمیت خواهند بود.

مطالعات گسترده‌ای در زمینه سرریزهای جانبی و عوامل مؤثر بر میزان ضریب دبی سرریز صورت گرفته است که مطالعات De Marchi (1934) پایه و اساس مطالعات سایر محققین است. او رابطه (۱) را برای تخمین دبی عبوری از سرریز جانبی مستطیلی ارائه نمود:

$$Q_w = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2gL}(H - P)^{1.5} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه  $Q_w$  دبی عبوری از سرریز جانبی،  $C_d$  ضریب دبی سرریز جانبی،  $g$  شتاب ثقل،  $L$  طول سرریز جانبی،  $H$  بار آبی روی سرریز و  $P$  ارتفاع سرریز می‌باشند.

بسیاری از محققین با انجام آزمایش‌هایی روابطی را برای محاسبه ضریب دبی انواع سرریزهای جانبی از جمله مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای ارائه کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات (Borghai & Salehi, 2003; Bagheri, 2010; Riahi & Vatankhah, 2015; Parandin *et al.*, 2016; Velayati & Vatankhah, 2019; Borghai *et al.*, 1999; Jalili & Borghai, 1996; Bairami, & Vatankhah, 1987; Huger, 1987; Swamee *et al.*, 1994; Izadjoo and Shafai, 1994; Subramaya *et al.*, 1972; 2021) اشاره کرد. در جدول شماره (۱) برخی روابط پیشنهادی برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی در مقاطع مستطیلی لبه تیز آورده شده است.

عواملی که در تئوری فرمول‌های سرریز جانبی ارائه شده نظیر عمق جریان و طول سرریز به صورت مستقیم بر روی دبی عبوری تأثیرگذار هستند اما عواملی از کانال اصلی نیز به صورت غیر مستقیم بر روی این پارامترها تأثیرگذار هستند مانند زبری و دبی جریان. لذا زبری بستر اصلی سیلاب به عنوان یک عامل غیرمستقیم بر روی دبی عبوری از روی سرریز و به تبع آن عملکرد مخزن نگهداشت مؤثر است.

از محدود تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی تأثیر ضریب زبری آبراهه اصلی بر میزان آبگذری از سرریز جانبی می‌توان به تحقیق (Ayyoubzadeh *et al.* (2019) اشاره کرد آن‌ها به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل فرم بستر کانال بر تغییرات پروفیل سطح آب در سرریزهای جانبی پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی تحت تأثیر شکل بستر تشکیل شده در مجاور سرریز بوده و در نتیجه در شرایط جریان بر روی سرریز جانبی مؤثر است. (Sayed (2021) با مطالعه آزمایشگاهی بررسی تأثیر زبری بستر اصلی جریان بر میزان جریان انحرافی به این نتیجه رسید که با افزایش زبری بستر اصلی حجم جریان انحرافی افزایشی است. Jun *et al.*, (2010) یک مدل دو بعدی جریان شبه غیرماندگار برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه ایمجین<sup>۲</sup> شامل مخزن و سرریز جانبی به کار گرفتند آن‌ها با تغییر هیدروگراف ورودی و ضریب زبری بستر آبراهه به این نتیجه رسیدند که کاهش دبی پیک سیلاب به وسیله مخزن نگهداشت به تغییر ضریب زبری بستر آبراهه اصلی بسیار حساس می‌باشد

سئوجون و همکارانش با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS و با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی یک روش طراحی گرافیکی برای تعیین طول بهینه سرریز جانبی در مخازن نگهداشت ارائه کردند و همچنین با تغییر ضریب زبری بستر آبراهه در مدل مذکور به این نتیجه رسیدند که کاهش دبی پیک سیلاب از طریق مخزن نگهداشت به ضریب زبری بستر بسیار حساس می‌باشد (Seojun *et al.*, 2016).

1 - Elbe river

2 - Imjin

جدول ۱- روابط پیشنهادی برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی در مقاطع مستطیلی لبه تیز

روابط پیشنهادی	نام محقق
$C_d = 0.78 - 0.34 Fr_1 - 0.19 \frac{p}{y_1} + 0.06 \frac{L}{B}$	Borghei and Salehi (2003)
$C_d = 0.402 Fr^{-0.227}$	Bagheri (2010)
$C_d = 0.677 Fr^{0.259} + 0.5 \left(\frac{p}{y_1}\right)^{2.304}$	Parandin et al. (2016)
$C_d = \frac{-0.094 Fr^{0.35} - 0.076 \left(\frac{p}{y_1}\right)^{0.35}}{0.71 - 0.41 Fr_1 - 0.32 \frac{p}{y_1}} + 0.68$	Riah and Vatankhah (2015) Jalili and Borghei (1996)
$C_d = 0.55 - 0.47 Fr_1$	Borghei et al. (1999)
$C_d = Fr^{-0.071} \left(\frac{y_1}{W}\right)^{0.1052} (0.544 - 0.372Z + 0.25Z^2)$	Velayati and Vatankhah (2019)
$C_d = 0.611 \sqrt{1 - \frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2}}$	Subramaya et al. (1972)
$C_d = -0.076 Fr_1^2 - 0.736 \frac{p}{y_1} - 0.019 \frac{l}{y_1} + -0.2$	Izadjoo and Shafai (1994)
$C_d = 1.06 \left[ \left(\frac{14.14p}{8.15p + y_1}\right)^{10} + \left(\frac{y_1}{y_1 + p}\right)^{15} \right]^{0.1}$	Swamee et al. (1994)
$C_d = 0.485 \sqrt{\frac{2 + Fr_1^2}{2 + 3Fr_1^2}}$	Huger (1987)

در این جدول،  $B$  عرض کانال اصلی،  $C_d$  ضریب دبی دیمارچی،  $Fr_1$  عدد فرود جریان در بالادست،  $L$  طول سرریز جانبی،  $p$  ارتفاع سرریز و  $y_1$  عمق جریان در بالادست سرریز است.

با بررسی پیشینه تحقیق کاربرد مخازن نگهداشت می‌توان دریافت که تاکنون مطالعات عددی و آزمایشگاهی محدودی در این زمینه انجام شده است و اغلب این مطالعات بر پایه عملکرد مخازن نگهداشت موجود در منطقه در کنترل سیلاب بوده و کمتر به بررسی عوامل تأثیرگذار بر آن پرداخته شده است. همچنین طی بررسی‌های صورت گرفته، در هیچ یک از این پژوهش‌ها، بررسی تأثیر ارتفاع زبری آبراهه اصلی بر میزان آبیگری از سرریز جانبی به صورت آزمایشگاهی انجام نشده است. لذا هدف از این تحقیق آن است که به صورت آزمایشگاهی، عوامل تأثیرگذار بر میزان کارایی و عملکرد مخازن نگهداشت مثل طول سرریز و ارتفاع زبری آبراهه اصلی در کنترل دبی سیلاب بررسی شود. همچنین با واسنجی برخی معادلات ضریب دبی سرریز جانبی در جریان ماندگار و استفاده از بهترین رابطه ضریب دبی سرریز جانبی متناسب با آزمایش‌های انجام شده، قابل تعمیم بودن استفاده از این روابط در جریان ماندگار برای جریان غیرماندگار بررسی شده است.

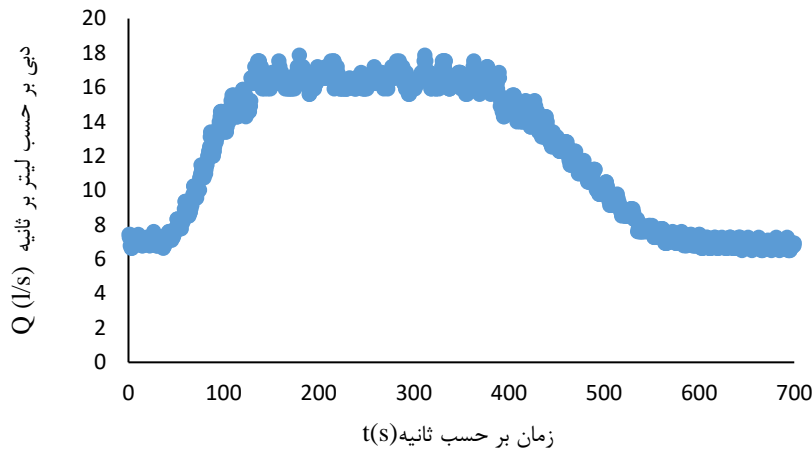
## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی و مشخصات آزمایش‌ها

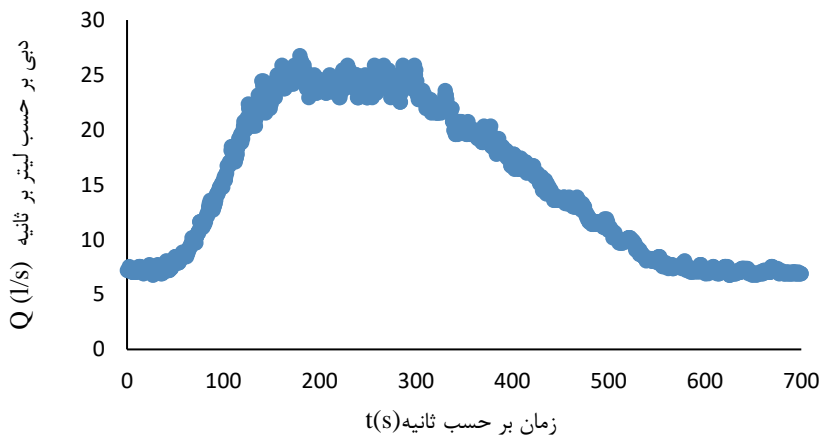
مطالعات آزمایشگاهی پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۲۰۱۸ انجام شد. آزمایش‌ها در کانالی از جنس آهن گالوانیزه با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۱۲ متر و عرض و ارتفاع ۰/۶۱ متر انجام گرفت. سه سرریز جانبی مستطیلی لبه پهن با طول‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر که به صورت بی بعد معادل با  $\frac{L_1}{b} = 0.49$ ،  $\frac{L_2}{b} = 0.98$ ،  $\frac{L_3}{b} = 1.48$  و عرض ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع سرریز ۱۲ سانتی‌متر از جنس پلکسی‌گلس مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق ارتفاع سرریز در تمامی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. در قسمت ورودی کانال، مخزن آرام کننده جریان به طول یک متر وجود دارد که آشفتگی‌های جریان ورودی به کمک این مخزن را به حداقل رسانده و جریان به آرامی وارد کانال می‌گردد.

به منظور ذخیره‌سازی و کاهش دبی پیک سیلاب، یک مخزن فلزی تحت عنوان مخزن نگهداشت به طول سه متر، عرض ۱/۹ متر و عمق یک متر ساخته و در فاصله چهار متری از ورودی، به بدنه کانال مورد نظر از طریق سرریز لبه‌پهن متصل شد. در این تحقیق سه هیدروگراف با دبی اوج ۱۷، ۲۵ و ۳۳ لیتر بر ثانیه به ترتیب مطابق شکل‌های (۳، ۴ و ۵) که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) ذکر شده است مورد بررسی قرار گرفتند. در کلیه آزمایش‌ها جریان ثابت پایه با دبی هفت لیتر بر ثانیه در کانال برقرار و سپس هیدروگراف‌های مورد نظر

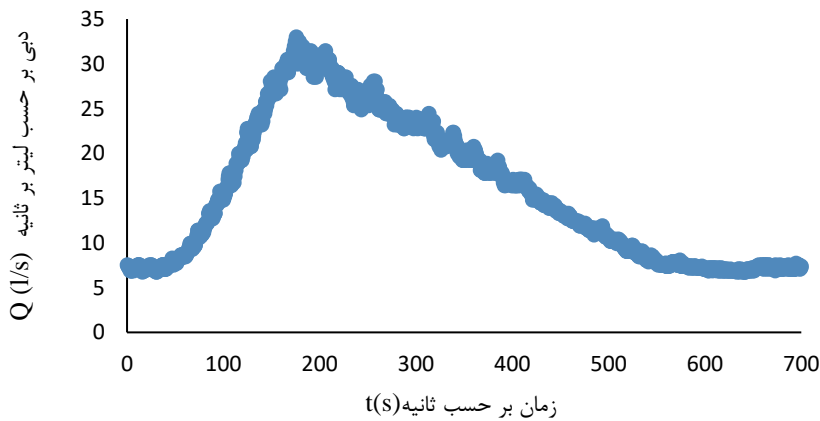
در کانال جریان یافته و مازاد جریان تحت عنوان دبی پیک وارد مخزن نگهداشت می‌شود. به منظور ایجاد جریان غیرماندگار در آزمایشگاه از یک درایو تنظیم دور موتور پمپ استفاده شد که دستگاه مذکور قابلیت برنامه نویسی برای ایجاد الگوهای متفاوت هیدروگراف ورودی با شیب‌های صعودی و نزولی غیر یکسان براساس دور موتور داشت. شیب صعودی هیدروگراف‌ها سه برابر شیب نزولی در نظر گرفته شد که در هر سه نوع هیدروگراف یکسان می‌باشد.



شکل ۳- هیدروگراف جریان ورودی با دبی اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه



شکل ۴- هیدروگراف ورودی با دبی اوج ۲۵ لیتر بر ثانیه

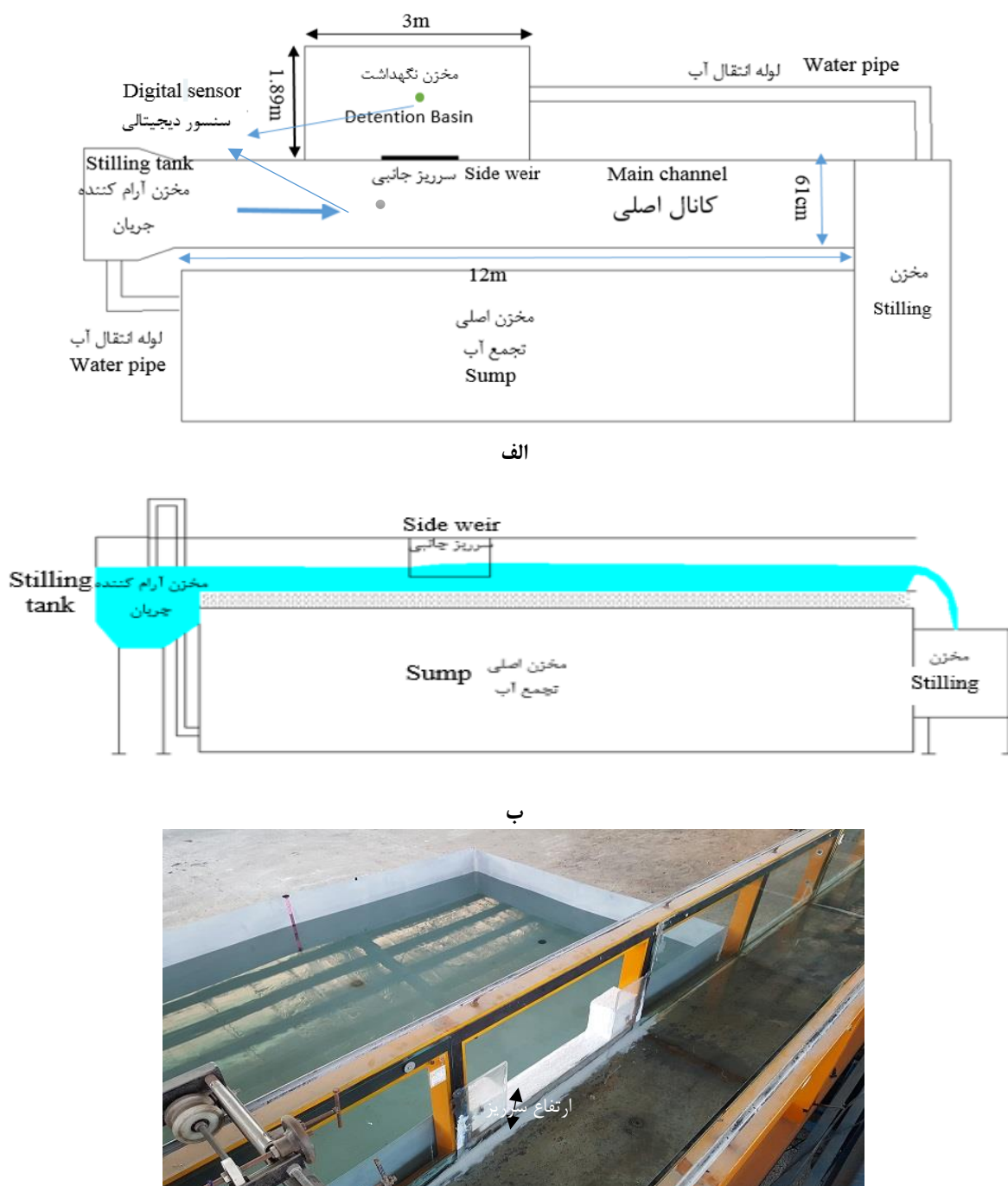


شکل ۵- هیدروگراف ورودی با دبی اوج ۳۳ لیتر بر ثانیه

جدول ۲- مشخصات هیدروگراف ورودی

پارامتر بی بعد زمان T	زمان دبی اوج (s)	زمان کل هیدروگراف (s)	دبی اوج (l/s)	هیدروگراف
۱/۵	۲۸۰	۵۶۰	۱۷	۱
۱/۲۵	۱۴۰	۵۶۰	۲۵	۲
۱	۰	۵۶۰	۳۳	۳

از آنجا که جریان غیرماندگار می باشد با استفاده از حسگرهای دیجیتالی که قابلیت برداشت عمق در لحظه را داشتند و در کف مخزن و کف کانال اصلی نصب شده بودند تراز سطح آب در هر لحظه در مخزن و کانال ثبت شد. شمای کلی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- فلوم آزمایشگاهی: الف- پلان ب- نمای جانبی ج- فلوم آزمایشگاهی و مخزن

در این پژوهش، سه ارتفاع زبری متفاوت در بستر کانال اصلی بررسی شد. ارتفاع زبری ۰/۰۶ میلی متر برای بستر صلب فلوم از جنس آهن گالوانیز (White, 1987). ارتفاع زبری چهار و ۱۵ میلی متر به ترتیب برای زبری از جنس توری پلاستیکی و سنگ با  $d_{50} = 15\text{mm}$  می باشد که با استفاده از یک ترازسنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه گیری و در کف کانال اصلی مطابق شکل های (۷ و ۸) چسبانده شدند. در مجموع ۲۷ آزمایش انجام گرفت که محدوده پارامترهای هیدرولیکی این آزمایش ها در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- محدوده پارامترهای هیدرولیکی

پارامترهای هیدرولیکی	طول سرریز L (cm)	ارتفاع سرریز P (cm)	عرض فلوم b (cm)	ارتفاع زبری $K_s$ (mm)	دبی اوج جریان $Q_p$ (l/s)
محدوده	۳۰-۹۰	۱۲	۶۱	۰/۰۶-۱۵	۱۷-۳۳



شکل ۷- زبری ایجاد شده با ذرات شن  $K_s = 15\text{mm}$       شکل ۸- زبری ایجاد شده با توری پلاستیکی  $K_s = 4\text{mm}$

### آنالیز ابعادی

تحلیل ابعادی پدیده های فیزیکی درک ما را در مورد پدیده ها عمیق تر و این امکان را فراهم می سازد تا با گروه بندی متغیرهای مهم به صورت پارامترهای بی بعد، تعداد متغیرهای موجود را کاهش داده و نتایج را برای تمام حالت های مشابه اعتبار بخشید. از طرفی منظور کردن تأثیر کلیه پارامترها کار مشکل و پیچیده ای می باشد از این رو در این تحقیق پارامترهایی که تأثیر بیشتری دارند در نظر گرفته می شود. این پارامترها شامل متغیرهای جریان، خواص سیال و هندسه مسئله می باشند که می توان به صورت رابطه (۲) نشان داد:

$$f(Q_p, Q_w, y_0, y_{max}, g, \mu, S_u, S_d, t_p, t_t, K_s, P, \rho, L, b, c, \lambda) = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن  $Q_p$  دبی اوج سیلاب،  $Q_w$  دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت در طول بازه غیرماندگاری،  $y_0$  عمق اولیه جریان،  $y_{max}$  حداکثر عمق جریان،  $t_p$  مدت زمانی که دبی برابر با دبی اوج جریان است،  $t_t$  کل زمان هیدروگراف ورودی،  $S_u$  شیب بالارونده هیدروگراف ورودی،  $S_d$  شیب پایین رونده هیدروگراف ورودی مطابق شکل (۹)،  $g$  شتاب ثقل،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال،  $K_s$  ارتفاع زبری بستر کانال اصلی،  $\rho$  چگالی سیال،  $P$  ارتفاع سرریز،  $L$  طول سرریز،  $b$  عرض کانال اصلی،  $c$  تراکم زبری بر حسب درصد (نسبت سطحی از پلان که توسط عنصر زبری اشغال شده بر واحد سطح کف کانال)،  $\lambda$  فاصله مخزن تا خروجی پایین دست می باشد. با بکارگیری آنالیز ابعادی به روش پی باکینگهام و انتخاب  $b, g$  و  $\rho$  به عنوان پارامترهای تکراری و همچنین ثابت بودن پارامترهای  $S_u, S_d, P, \lambda$  در کلیه آزمایش ها خواهیم داشت:

$$f\left(\frac{Q_w}{Q_p}, \frac{\rho Q_p}{\mu L}, \frac{L}{b}, \frac{K_s}{b}, \frac{y_0}{b}, \frac{y_{max}}{b}, \frac{t_p}{t_t}, c\right) = 0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

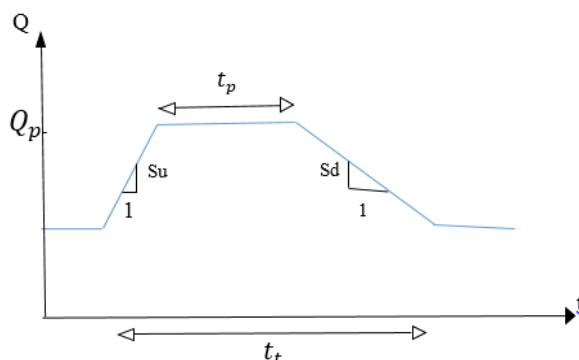
در این رابطه عبارت  $\frac{t_p}{t_t}$  معرف تأثیر زمان در قالب جریان غیرماندگار می باشد که با توجه به اینکه در برخی آزمایش ها این نسبت برابر صفر می باشد این پارامتر به صورت  $1 + \frac{t_p}{t_t}$  تغییر یافت و در روابط با حرف  $T$  نشان داده شد (Barenblatt, 1987). همچنین پارامتر  $C$  نیز در برخی آزمایش ها برابر صفر می باشد و به صورت  $C=1+C$  تعریف گردید. عدد رینولدز در محدوده ۳۵۷۵۰ تا ۶۷۴۵۰ می باشد که بزرگتر از ۵۰۰ بوده و جریان آشسته است لذا پارامترهای بی بعد مؤثر و مورد استفاده به صورت زیر می باشند:



$$f\left(\frac{Q_w}{Q_p}, \frac{L}{b}, \frac{K_s}{y_0}, \frac{y_{max}}{b}, \left(1 + \frac{t_p}{t_t}\right), (1 + c)\right) = 0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

در نهایت می‌توان رابطه بی‌بعد مورد نظر را به صورت رابطه (۵) ارائه داد:

$$\frac{Q_w}{Q_p} = \alpha \times \left(\frac{L}{b}\right)^\beta \times \left(\frac{K_s}{y_0}\right)^\gamma \times \left(\frac{y_{max}}{b}\right)^\eta \times (T)^\epsilon \times (C)^\theta \quad \text{رابطه (۵)}$$



شکل ۹- مشخصات هیدروگراف ورودی

به منظور بررسی تأثیر جداگانه پارامترهای آزمایش شده بر میزان جریان ورودی به مخزن نگهداشت، در رابطه (۵) فرضیاتی در نظر گرفته شد و روابط (۶) الی (۸) به صورت ذیل ارائه شدند.

با فرض بر اینکه بتوان از تأثیر پارامتر  $y_{max}$  حداکثر عمق جریان صرف نظر کرد آنگاه رابطه (۶) قابل بررسی است.

$$\frac{Q_w}{Q_p} = \alpha \times \left(\frac{L}{b}\right)^\beta \times \left(\frac{K_s}{y_0}\right)^\gamma \times (T)^\epsilon \times (C)^\theta \quad \text{رابطه (۶)}$$

در صورتی که بتوان از تأثیر پارامتر  $K_s$  ارتفاع زبری بستر کانال اصلی صرف نظر کرد معادله (۷) قابل بررسی است.

$$\frac{Q_w}{Q_p} = \alpha \times \left(\frac{L}{b}\right)^\beta \times \left(\frac{y_{max}}{b}\right)^\eta \times (T)^\epsilon \quad \text{رابطه (۷)}$$

و در نهایت با فرض بر اینکه بتوان از هر دو پارامتر  $y_{max}$ ، حداکثر عمق جریان و همچنین  $K_s$ ، ارتفاع زبری بستر کانال اصلی صرف نظر کرد معادله (۸) بدست خواهد آمد.

$$\frac{Q_w}{Q_p} = \alpha \times \left(\frac{L}{b}\right)^\beta \times (T)^\epsilon \quad \text{رابطه (۸)}$$

## نتایج و بحث

### بررسی روابط محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی در جریان ماندگار

برای بررسی قابلیت کاربرد روابط مربوط به جریان ماندگار برای حالت غیرماندگار، ابتدا لازم است از بین روابط پیشنهاد شده در جدول (۱) رابطه‌ای برای برآورد منحنی دبی-اشل جریان ماندگار متناسب با داده‌های تحقیق حاضر انتخاب گردد. سپس بر اساس این رابطه انتخابی، مقادیر ضریب دبی سرریز برای داده‌های غیرماندگار محاسبه شود و با نتایج داده‌های مشاهداتی در جریان غیرماندگار مقایسه گردند. با توجه به ساختار روابط پیشنهاد شده محققان برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی مطابق جدول (۱) می‌توان دریافت که اکثر معادلات پرتکرار دارای فرم رگرسیونی به صورت معادله (۹) می‌باشند لذا معادلات بر اساس این فرم تنظیم گردید:

$$C_d = a_1(Fr_1)^{a_2} + a_3\left(\frac{p}{y_1}\right)^{a_4} + a_5\left(\frac{L}{b}\right)^{a_6} + a_7 \quad \text{رابطه (۹)}$$

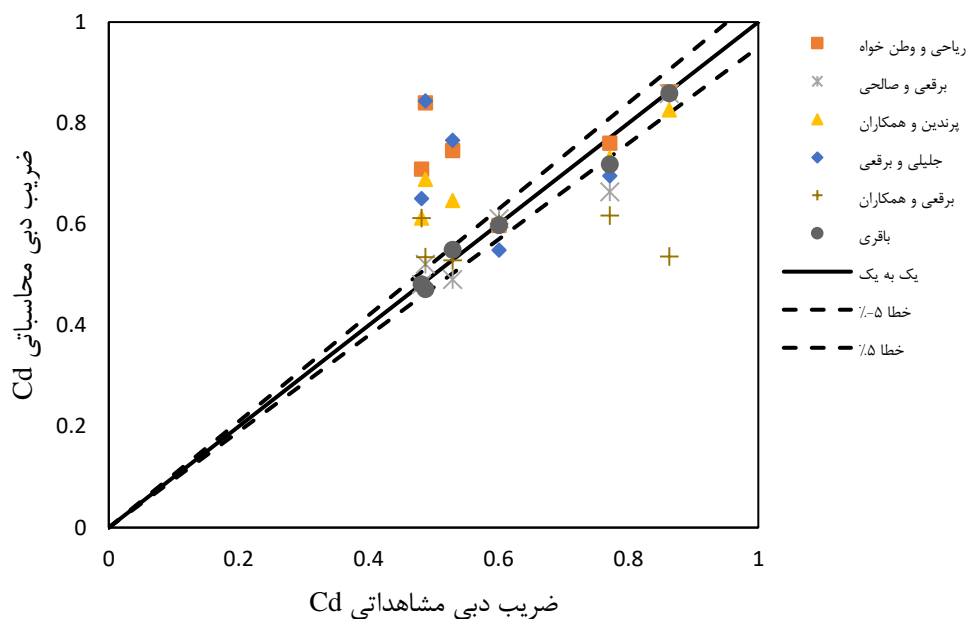
در این رابطه ضرایب  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  ضرایب ثابتی هستند که با واسنجی داده‌های ماندگار از آزمایش‌ها قابل محاسبه می‌باشند به این صورت که در بازه‌ای از هیدروگراف‌های ورودی که جریان ماندگار برقرار و زبری بستر کانال اصلی صلب است با معلوم بودن تغییرات عمق جریان در مخزن در بازه زمانی مشخص، حجم آب ورودی به مخزن اندازه‌گیری و دبی عبوری از سرریز تخمین زده شد و با استفاده از رابطه De Marchi (1934) (معادله ۱) ضریب دبی سرریز برای داده‌های مشاهداتی محاسبه شد. سپس ضریب دبی

سرریز جانبی از روابط پیشنهاد شده سایر محققین موجود در جدول (۴) بر اساس داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شد و با استفاده از گزینه حلگر اکسل با شرط حداقل کردن شاخص متوسط قدرمطلق درصد خطا (MRPE) بین ضریب دبی محاسبه شده از روابط پیشنهادی و ضریب دبی مشاهداتی، ضرایب ثابت در معادله (۶) در هر یک از روابط پیشنهادی مطابق جدول (۴) بدست آمد.

جدول ۴- مقادیر ضرایب ثابت بدست آمده از رابطه ۶ بعد از واسنجی برای روابط پیشنهادی

نام محققین	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
Borghei and Salehi (2003)	-۵۰/۵۷	۱	-۱۴/۵۲	۱	۰/۸۸	۱	۱۳/۸۹
Bagheri (2010)	۰/۳۷۷	-۰/۱۴۲	.	.	.	.	.
Parandin et al. (2016)	۱/۹۹	۰/۶۵	۲/۵۵	۵/۴۹	.	.	.
Riahi and Vatankhah (2015)	۱/۹۵	۰/۳۶	۱/۷۳	۲/۵۴	-۱/۰۵۲	.	.
Jalili and Borghei (1996)	-۰/۰۸۴	۱	۳/۱۶	۱	-۱/۹۳	.	-۱/۹۳
Borghei et al. (1999)	۴/۵۶	۱	.	.	.	.	-۰/۳۲۴

با معلوم شدن ضرایب ثابت و واسنجی معادلات پیشنهاد شده برای داده‌های آزمایشگاهی، ضریب دبی سرریز از روابط محاسبه شدند. مقادیر بدست آمده از ضریب دبی مشاهداتی از آزمایش‌ها و روابط پیشنهادی با محدوده خطای پنج درصد در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- مقایسه ضریب دبی مشاهداتی از آزمایش‌ها و ضریب دبی بدست آمده از روابط پیشنهادی

برای انتخاب بهترین رابطه از بین روابط پیشنهادی واسنجی شده، مشخصه‌های آماری نظیر شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص متوسط قدرمطلق خطا (MAPE) و حداکثر خطای نسبی (MRE) مطابق روابط (۱۱ الی ۱۳) مورد استفاده قرار گرفتند و بر اساس نتایج بدست آمده رابطه Bagheri (2010) (معادله ۱۰) با کمترین درصد خطا یعنی ۳/۶۴ درصد مطابق جدول (۵) به عنوان بهترین رابطه برای محاسبه ضریب دبی سرریز در جریان ماندگار برای بستر با زبری صلب انتخاب شد.

$$C_d = 0.377 * Fr_1^{-0.14} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در این رابطه با اینکه تأثیر پارامتر طول سرریز دیده نشده است اما باز هم دقت نتایج بدست آمده از سایر روابط بهتر بوده است که نشان دهنده این است که عدد فرود بالادست بیشترین تأثیر را در ضریب دبی سرریز نسبت به پارامتر بی بعد  $\frac{L}{b}$  (تغییر طول سرریز) برای

آزمایش‌های ماندگار دارد. قابل ذکر است که رابطه بدست آمده فقط برای آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق مطابق با مشخصات قید شده در جدول (۳) اعتبار دارد.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_{(\text{calculated})} - R_{(\text{measured})}|^2} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(\text{calculated})} - R_{(\text{measured})}}{R_{(\text{measured})}} \right| \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\text{MRE} = \max\left(\frac{R_{(\text{calculated})} - R_{(\text{measured})}}{R_{(\text{calculated})}}\right) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

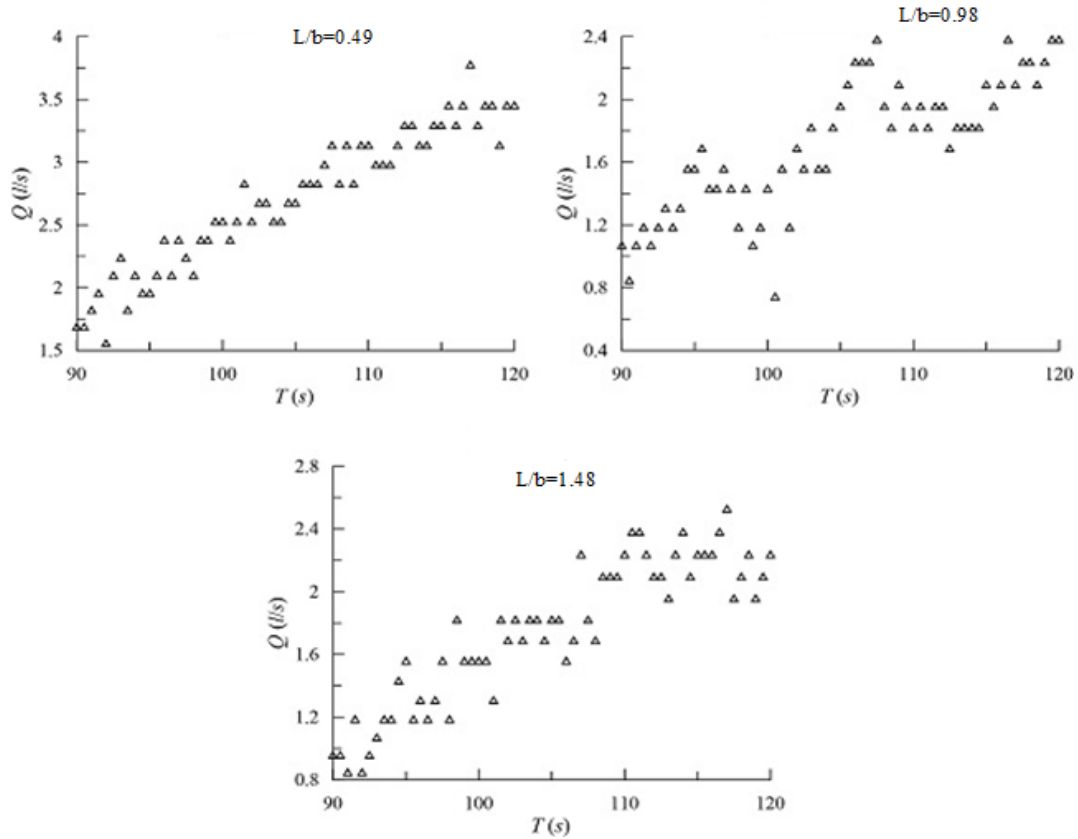
در این روابط  $i$  معرف شماره آزمایش،  $N$  تعداد داده‌های آزمایشگاهی،  $R$  معرف ضریب دبی سرریز،  $R_{(\text{calculated})}$  ضریب دبی سرریز که از رابطه پیشنهادی محاسبه شده است و  $R_{(\text{measured})}$  ضریب دبی سرریز که از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده است.

جدول ۵- مقادیر انواع شاخص‌های خطا برای مقایسه ضرایب دبی محاسبه شده از روابط پیشنهادی و مشاهداتی

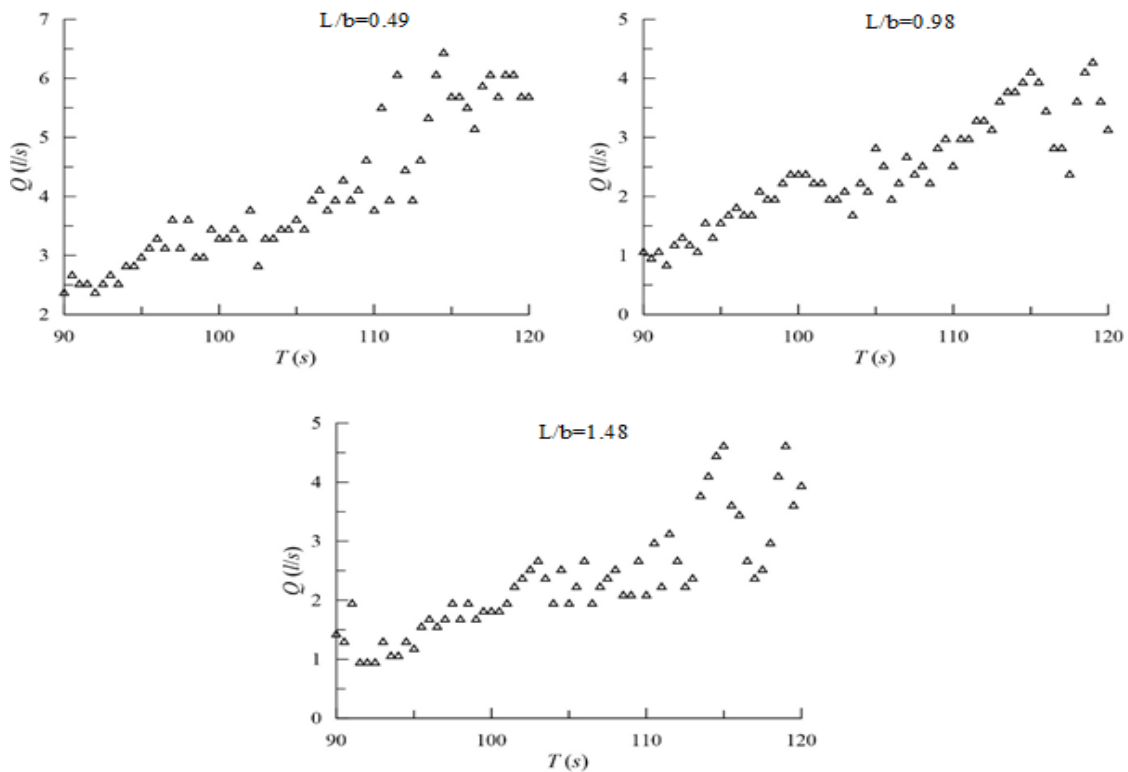
نام محققین	%MAPE	RMSE	%MRE
Borghei and Salehi (2003)	۵/۴۵	۰/۰۴۸	۷/۲
Bagheri (2010)	۳/۶۴	۰/۰۲۶	۷
Parandin <i>et al.</i> (2016)	۱۳/۱۵	۰/۱۱	۲۹
Riahi and Vatankhah (2015)	۱۷/۵۲	۰/۱۹۳	۴۲
Jalili and Borghei (1996)	۱۹/۹۱	۰/۱۹	۴۲
Borghei <i>et al.</i> (1999)	۱۹/۳۷	۰/۱۶	۲۱

اینک برای بررسی تأثیر غیرماندگاری جریان بر میزان آبیگری سرریز، تغییرات حجم در مخزن نگهداشت بر اساس داده‌های مشاهداتی با حجم محاسبه شده از دبی عبوری سرریز در بازه زمانی مشخص غیرماندگار مقایسه شدند. به این صورت که با داشتن تغییرات عمق جریان در بازه غیرماندگاری در کانال اصلی و معادله دبی-اشل استخراج شده فلووم براساس جریان ماندگار، دبی و سپس سرعت متوسط جریان محاسبه و با استفاده از رابطه (2010) Bagheri، ضریب دبی سرریز محاسبه و هیدروگراف‌های دبی عبوری از سرریز در بازه زمانی مشخص غیرماندگار مطابق شکل‌های (۱۱ و ۱۲) و تغییرات زمانی عدد فرود در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ رسم شدند.

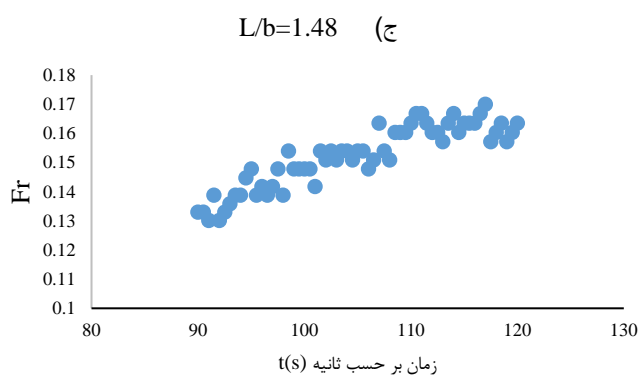
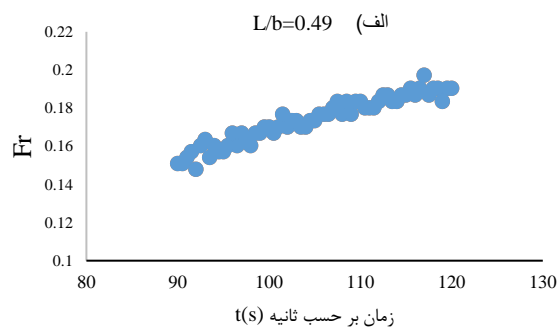
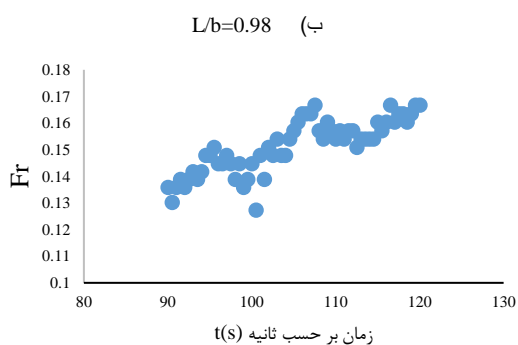
با محاسبه مساحت زیر هیدروگراف‌های دبی عبوری از سرریز، حجم آب وارد شده به مخزن در بازه غیرماندگاری بدست آمد. همچنین حجم آب مشاهداتی وارد شده به مخزن با توجه به تغییرات عمق-زمان در مخزن (شکل ۱۵ تغییرات زمانی حجم مخزن در دبی اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه) و مشخص بودن مساحت مخزن نگهداشت محاسبه گردید. میزان خطاهای محاسبه شده با توجه به شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص متوسط قدرمطلق خطا (MAPE) و حداکثر خطای نسبی (MRE) به ترتیب ۸۶/۴ درصد، ۰/۰۱۴ و ۷۰ درصد برآورده شده است که نشان دهنده این است که روابط پیشنهادی برای محاسبه ضریب دبی سرریز در جریان ماندگار قابل استفاده برای جریان غیرماندگار نمی‌باشند. همان طور که (2018) Ghasemzadeh & Koochakzadeh در تحقیقات خود بیان کردند که روابط جریان ماندگار قابل تعمیم برای جریان غیرماندگار نمی‌باشند، آن‌ها با بررسی تأثیر جریان غیرماندگار بر مقادیر دبی عبوری از سرریز مثلی ۹۰ درجه در انتهای یک مخزن بر اساس نتایج پالس اصلاح شده به این نتیجه رسیدند که اختلاف قابل توجهی بین مقادیر دبی محاسبه شده از روابط جریان ماندگار و غیرماندگار وجود دارد به طوری که در برخی شرایط این اختلاف به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. قابل ذکر است که کار مشابه برای سرریز جانبی در جریان غیرماندگار صورت نگرفته است که بتوان با آن قیاس کرد.



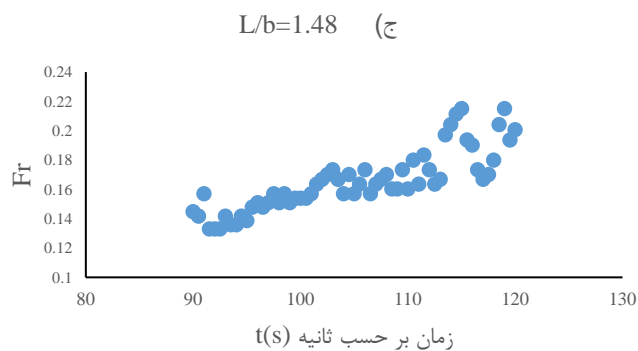
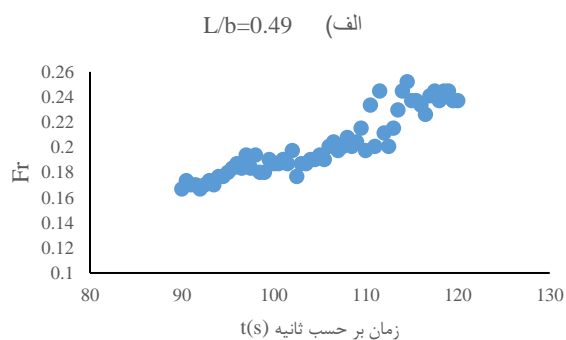
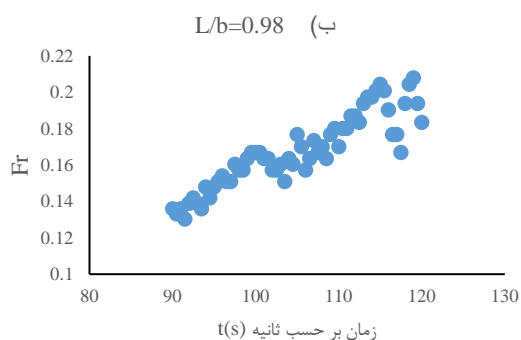
شکل ۱۱- هیدروگراف عبوری از سرریز با دبی اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه الف)  $L/b = 0.49$  ب)  $L/b = 0.98$  ج)  $L/b = 1.48$



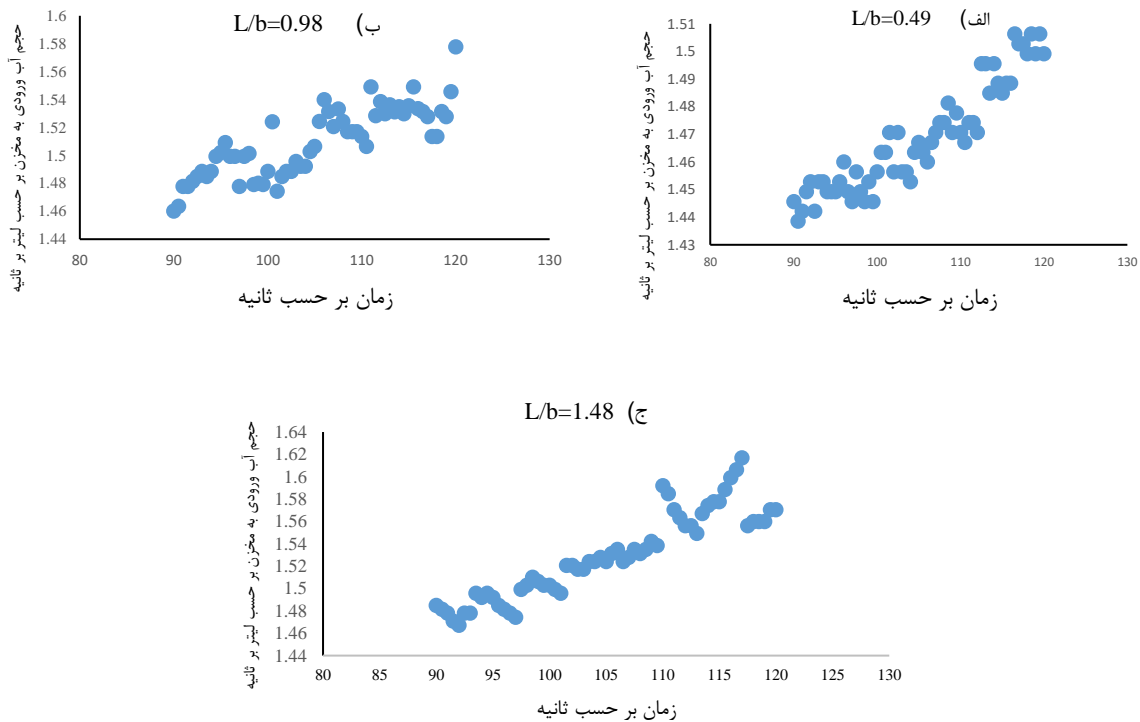
شکل ۱۲- هیدروگراف عبوری از سرریز با دبی اوج ۲۵ لیتر بر ثانیه الف)  $L/b = 0.49$  ب)  $L/b = 0.98$  ج)  $L/b = 1.48$



شکل ۱۳- تغییرات زمانی عدد فرود در دبی اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه الف)  $L/b = 0.49$  ب)  $L/b = 0.98$  ج)  $L/b = 1.48$

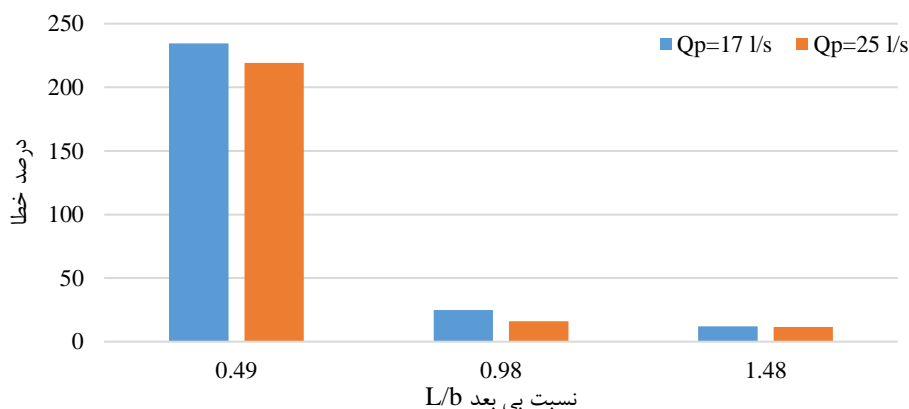


شکل ۱۴- تغییرات زمانی عدد فرود در دبی اوج ۲۵ لیتر بر ثانیه الف)  $L/b = 0.49$  ب)  $L/b = 0.98$  ج)  $L/b = 1.48$



شکل ۱۵- تغییرات زمانی حجم آب مشاهده‌ای وارد شده به مخزن با دبی اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه (الف)  $L/b = 0.49$  (ب)  $L/b = 0.98$  (ج)  $L/b = 1.48$

با رسم نمودار درصد خطاهای بدست آمده نسبت به پارامتر بدون بعد  $L/b$  مطابق شکل (۱۳) می‌توان دریافت که هرچه نسبت بی بعد  $L/b$  کوچکتر شود دقت تخمین حجم عبوری سرریز با استفاده از روابط جریان ماندگار برای حالت غیرماندگار کمتر می‌شود. زیرا هنگامی که طول سرریز جانبی افزایش می‌یابد کاسته شدن تدریجی جریان سبب می‌شود که تغییرات قابل ملاحظه و آبی در جریان رخ ندهد در نتیجه حجم بدست آمده از روابط ماندگار برای حالت غیرماندگار با دقت بیشتری تخمین زده می‌شوند.

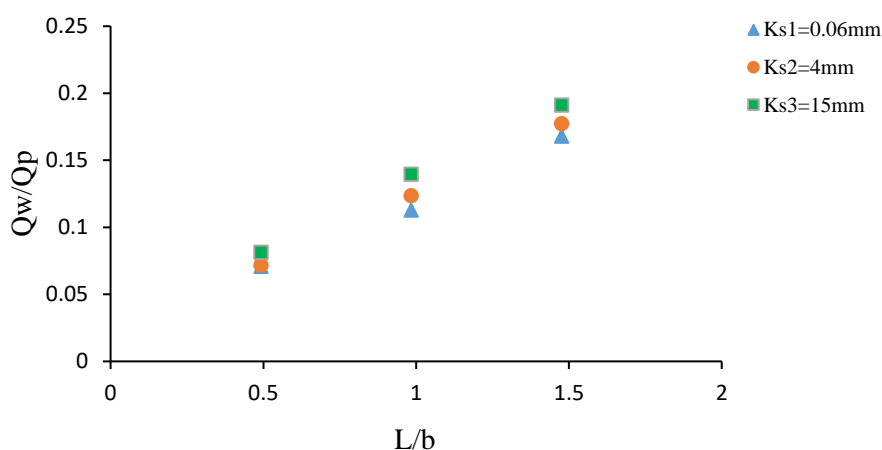


شکل ۱۳- درصد خطای حجم بدست آمده از رابطه ماندگار نسبت به پارامتر بدون بعد  $L/b$

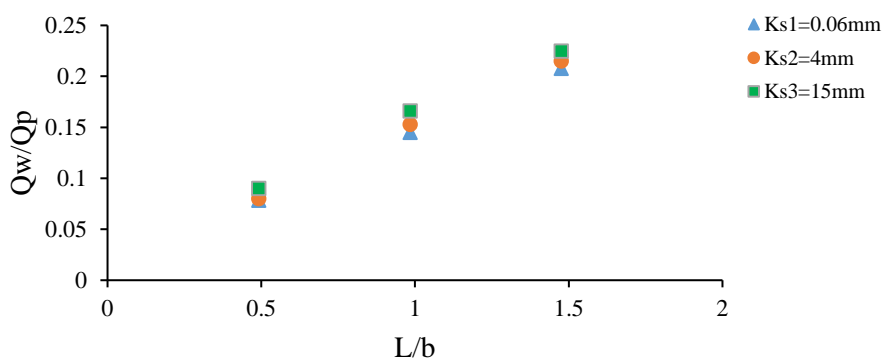
#### بررسی ظرفیت و تعیین دبی جریان ورودی به مخزن نگهداشت در جریان غیرماندگار

با استناد به نتایج بدست آمده و عدم استفاده از روابط ضریب دبی از جریان ماندگار برای حالت غیرماندگار، به منظور بررسی ظرفیت و تعیین دبی جریان ورودی به مخزن نگهداشت، دبی به صورت متوسط در طول زمان محاسبه شد. به این صورت که با قرائت تراز سطح آب مخزن در ابتدا و انتهای عبور هیدروگراف از سرریز و همچنین معلوم بودن ابعاد مخزن و زمان عبور آب، دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت محاسبه گردید.

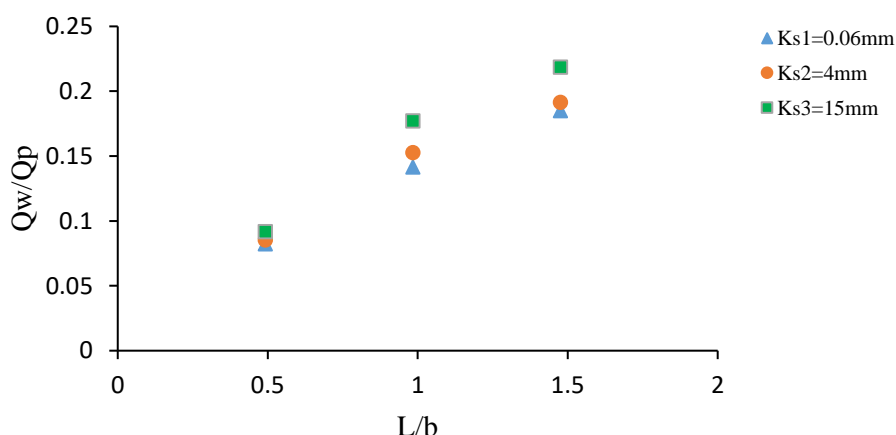
بر اساس نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی، میزان دبی جریان ورودی به مخزن نگهداشت تابعی از پارامترهای بدون بعد ذکر شده می‌باشد. در شکل‌های (۱۴، ۱۵ و ۱۶) می‌توان تأثیر پارامترهای بی‌بعد بر میزان دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت را ملاحظه نمود. شکل (۱۴) تغییرات دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت در برابر تغییرات طول سرریز به صورت بی‌بعد به ازاء ارتفاع زبری‌های متفاوت در شرایطی که حداکثر دبی هیدروگراف برابر با ۱۷ لیتر بر ثانیه در  $T=1/5$  باشد را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۱۵ و ۱۶) هم به ترتیب دبی‌های ۲۵ لیتر بر ثانیه در  $T=1/25$  و ۳۳ لیتر بر ثانیه در  $T=1$  را نشان می‌دهند.



شکل ۱۴- تغییرات دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت با تغییر طول سرریز جانبی و ارتفاع زبری به صورت بی‌بعد در  $T=1/5$  و دبی اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۵- تغییرات دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت با تغییر طول سرریز و ارتفاع زبری به صورت بی‌بعد برای  $T=1/25$  و دبی اوج ۲۵ لیتر بر ثانیه



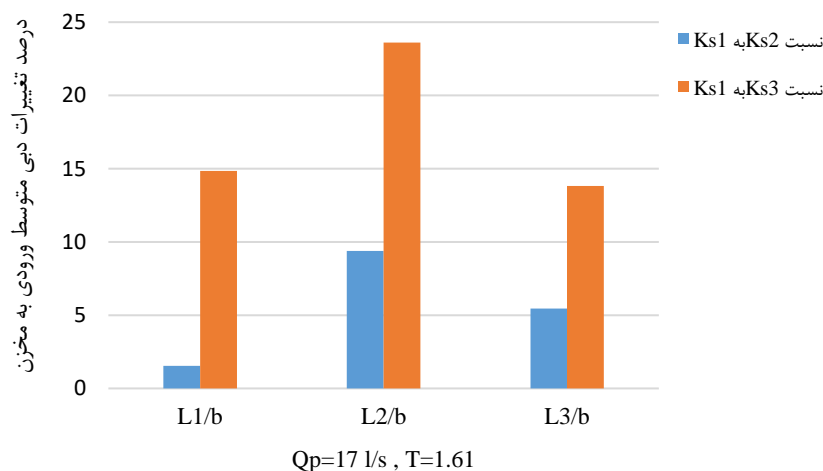
شکل ۱۶- تغییرات دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت با تغییر طول سرریز و ارتفاع زبری به صورت بی‌بعد برای  $T=1$  و دبی اوج ۳۳ لیتر بر ثانیه

### نتایج تأثیر طول سرریز و زبری کانال اصلی بر جریان ورودی به مخزن نگهداشت

همان‌طور که در شکل‌های (۱۴ تا ۱۶) ملاحظه می‌شود با افزایش طول سرریز و دبی اوج جریان، میزان دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت افزایش می‌یابد زیرا با افزایش طول سرریز، طول ناحیه جدایی جریان کاهش می‌یابد که سبب افزایش طول مؤثر سرریز یعنی طولی از سرریز که در انتقال جریان از روی سرریز نقش مؤثرتری دارد می‌شود و در نتیجه دبی عبوری سرریز به مخزن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع زبری بستر کانال اصلی، میزان دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت افزایش می‌یابد. نکته‌ای که قابل توجه می‌باشد این است که در آزمایش‌هایی که نسبت بی‌بعد طول سرریز به عرض سرریز حداقل مقدار است یعنی معادل با  $0/48$  می‌باشد، میزان تأثیر زبری کانال اصلی بر دبی متوسط ورودی به مخزن کاهش می‌یابد.

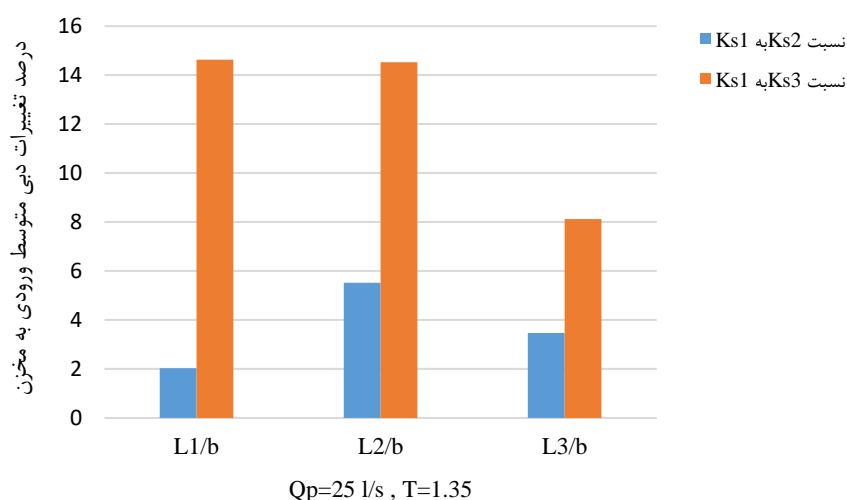
برای بررسی میزان تأثیر زبری بر میزان آبگذری از سرریز برای کاهش دبی پیک سیلاب، بستر صلب با ارتفاع زبری  $0/06$  میلی‌متر به عنوان معیار مقایسه انتخاب گردید و میزان درصد تغییرات دبی ورودی به مخزن برای سایر زبری‌ها نسبت به آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های (۱۷، ۱۸ و ۱۹) درصد تغییرات میزان ریزش به مخزن نگهداشت دو زبری دیگر نسبت به زبری با بستر صلب به ترتیب برای جریان با دبی‌های ۱۷، ۲۵ و ۳۳ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهند. درصد تغییر دبی ورودی به مخزن نگهداشت با افزایش ارتفاع زبری افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش ارتفاع زبری تا ۱۵ میلی‌متر، دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت تا ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. علت این تغییر این است که با افزایش زبری بستر و کاهش سرعت جریان، از قدرت جریان‌های چرخشی در ورودی سرریز کاسته می‌شود و با کم شدن وسعت ناحیه جدایی جریان، طول مؤثر سرریز افزایش یافته و این امکان فراهم می‌شود تا جریان بیشتری از طریق سرریز جانبی به مخزن نگهداشت وارد شود. قابل ذکر است که Jun et al., (2010) هم در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده‌اند که ضریب زبری در کاهش دبی پیک سیلاب تأثیرگذار است، آن‌ها یک مدل شبه دو بعدی جریان غیرماندگار برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه بر اساس معادلات یک بعدی سن و نانت<sup>۱</sup> به کار گرفتند و از این مدل برای رودخانه ایمجین<sup>۲</sup> شامل شش مخزن مصنوعی همراه با سرریز جانبی استفاده کردند و با تغییر هیدروگراف ورودی و ضریب زبری بستر آبراهه به این نتیجه رسیدند که کاهش دبی پیک سیلاب به وسیله مخزن نگهداشت به تغییر ضریب زبری بستر آبراهه اصلی بسیار حساس می‌باشد و باعث افزایش تراز سطح آب در سرریز می‌شود لذا تخمین مناسب ضریب زبری برای طراحی سرریزهای جانبی امری ضروری می‌باشد. نکته‌ای که باید در نظر داشت این است که علی‌رغم تأثیر مثبت افزایش زبری در کاهش دبی پیک سیلاب، با افزایش زبری ارتفاع تراز سیلاب نیز افزایش یافته و می‌تواند موجب گسترش بیشتر سیل به اطراف شود که به عنوان یک نکته مهم باید در نظر گرفته شود.

ارتفاع زبری‌ها در طول رودخانه یکسان نیست و به دلیل تغییر شرایط محیطی و هیدرولیکی ممکن است افزایش یا کاهش داشته باشند (Azizipour, et al., 2018; Mousavi, et al., 2012) هر چه بستر آبراهه زبری بیشتر داشته باشد طبیعتاً عمق بیشتری برای عبور یک مقدار مشخص از جریان اتفاق خواهد افتاد. در هنگام سیلاب، این مناطق حادثه خیزی بیشتری خواهند داشت لذا برای اینکه بتوان از این نکته منفی به نحوه مطلوب بهره جست بهتر است مخزن نگهداشت در محلی از آبراهه واقع گردد که بیشترین زبری را داشته باشد

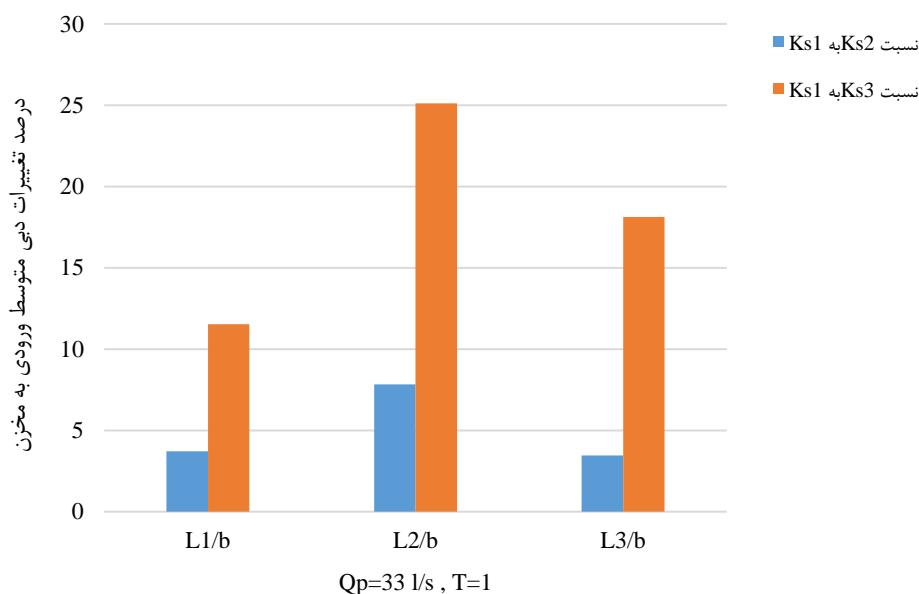


شکل ۱۷- درصد تغییرات دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت با تغییر طول سرریز و ارتفاع زبری در دبی جریان اوج ۱۷ لیتر بر ثانیه و  $T=1/5$





شکل ۱۸- درصد تغییرات دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت با تغییر طول سرریز و ارتفاع زبری در دبی اوج ۲۵ لیتر بر ثانیه و T=۱/۲۵



شکل ۱۹- درصد تغییرات دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت با تغییر طول سرریز و ارتفاع زبری در دبی اوج ۳۳ لیتر بر ثانیه و T=۱

با یافتن پارامترهای مؤثر بر میزان دبی ورودی به مخزن نگهداشت به کمک آنالیز ابعادی که در رابطه (۵) نشان داده شده است ضرایب مجهول روابط (۵ الی ۸) به کمک بهینه‌سازی و تحلیل رگرسیونی داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب مطابق با روابط (۱۴ الی ۱۷) بدست آمد.

$$\frac{Q_w}{Q_p} = 15.99 \times \left(\frac{L}{b}\right)^{0.972} \times \left(\frac{K_s}{y_0}\right)^{-0.038} \times \left(\frac{y_{max}}{b}\right)^{3.641} \times (T)^{0.72} \times (C)^{0.428} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\frac{Q_w}{Q_p} = 0.113 \times \left(\frac{L}{b}\right)^{0.81} \times \left(\frac{K_s}{y_0}\right)^{-0.035} \times (T)^{-0.377} \times (C)^{0.49} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\frac{Q_w}{Q_p} = 138.4 \times \left(\frac{L}{b}\right)^{1.032} \times \left(\frac{y_{max}}{b}\right)^{4.5} \times (T)^{1.129} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\frac{Q_w}{Q_p} = 0.157 \times \left(\frac{L}{b}\right)^{0.081} \times (T)^{-0.377} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

به منظور بررسی و مقایسه تأثیر جداگانه هر یک از پارامترهای مورد آزمایش در محاسبه دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت و ارزیابی بهتر روابط پیشنهادی (۱۴ الی ۱۷)، از روابط و مشخصه‌های آماری نظیر شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص

متوسط قدرمطلق خطا (MAPE) و حداکثر خطای نسبی (MRE) مطابق روابط (۱۱ الی ۱۳) استفاده شد (Siviglia et al., 2009). در این روابط متغیر R معرف دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت،  $R_{(calculated)}$  دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت که از رابطه پیشنهادی محاسبه شده است و  $R_{(measured)}$  دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت که از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده است. مقادیر انواع خطاها محاسبه و در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- مقادیر انواع شاخص‌های خطا برای دبی متوسط ورودی به مخزن و زمان پر شدن مخزن

شاخص خطا	RMSE	R <sup>2</sup>	MAPE%	MRE%
رابطه ۱۴	۰/۰۰۶	۰/۹۸۴	۳/۶	۸/۵
رابطه ۱۵	۰/۰۱۱	۰/۹۵۹	۴/۷	۱۲/۳
رابطه ۱۶	۰/۱۵	۰/۹۴۷	۱۰۲/۵	۵۶/۸
رابطه ۱۷	۰/۰۱۴	۰/۹۲۶	۷/۲	۱۷/۲

با مقایسه‌ای که بین معادلات پیشنهادی (۱۴ الی ۱۷) با توجه به درصد خطاهای بدست آمده در جدول (۶) صورت گرفته است می‌توان دریافت که پارامترهای مورد آزمایش تأثیر مهمی در تخمین میزان دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت خواهند داشت و نمی‌توان تأثیر این پارامترها را نادید گرفت و اگر از آن‌ها صرف نظر شود رابطه‌ای که برآورد می‌شود از دقت کمتری برخوردار است لذا رابطه (۱۴) با کمترین درصد خطا معادل با ۳/۶ درصد به عنوان بهترین رابطه در تخمین دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت انتخاب شد. همچنین با توجه به این رابطه می‌توان مدت زمان پر شدن مخزن نگهداشت را با معلوم بودن حجم مخزن نگهداشت (V) مطابق رابطه (۱۸) محاسبه نمود.

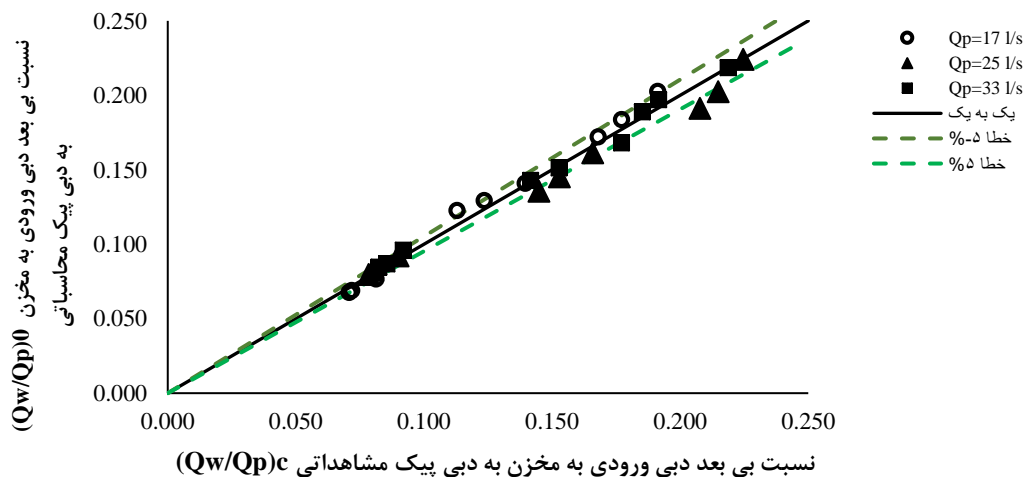
$$t_f = \frac{V}{0.113Q_p} \left(\frac{L}{b}\right)^{-0.81} \left(\frac{K_s}{\gamma_0}\right)^{0.035} (T)^{0.377} (C)^{-0.49} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در این رابطه V معرف حجم آب ورودی به مخزن و  $t_f$  مدت زمان پر شدن مخزن نگهداشت می‌باشد.

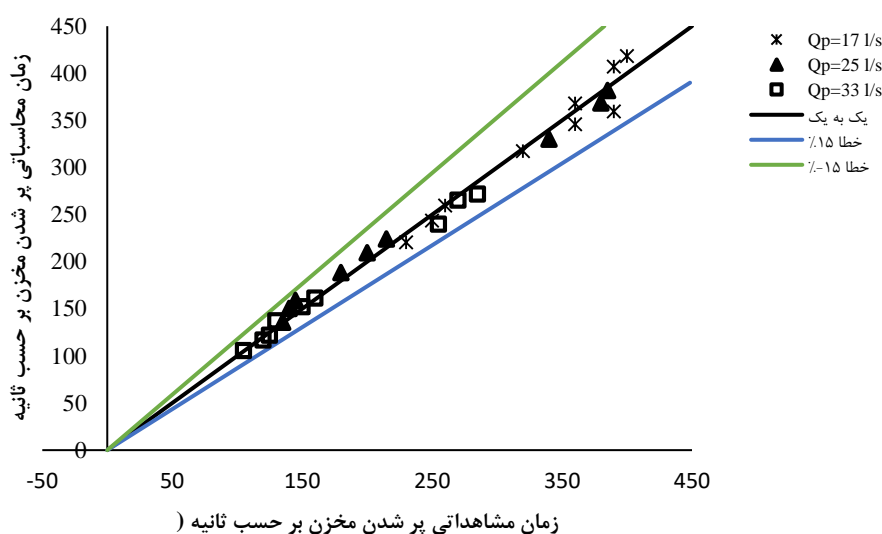
نمودار شکل (۲۰) مقایسه مقادیر دبی متوسط عبوری از سرریز بدست آمده از رابطه (۱۴) با نتایج آزمایشگاهی و نمودار شکل (۲۱)

مقایسه مقادیر زمان محاسباتی پر شدن مخزن با زمان مشاهداتی را نشان می‌دهد.

قابل ذکر است که معادلات بدست آمده در محدوده اعداد بدون بعدی که در مقاله ذکر شده است صادق است و برای تمام هیدروگراف‌هایی که از نظر ابعادی مشابه هستند، نتایج قابل تعمیم خواهند بود. همچنین از آنجایی که در سیلاب‌های سریع اندازه‌گیری دبی متوسط ممکن است با خطای قابل توجه همراه باشد لذا لازم است در بکارگیری روابط ارائه شده شیب هیدروگراف در مقاطع صعودی و نزولی منطبق با مقادیر آزمون شده در این تحقیق باشد.



شکل ۲۰- مقایسه دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت بدست آمده از رابطه (۱۴) با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۲۱- مقایسه زمان پر شدن مخزن بدست آمده از رابطه (۱۸) با زمان پر شدن مخزن از نتایج آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی بهتر روابط پیشنهادی برای محاسبه زمان پر شدن مخزن نگهداشت (رابطه ۱۸)، مقادیر انواع خطاها محاسبه شده است که شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص متوسط قدرمطلق خطا (MAPE) و حداکثر خطای نسبی (MRE) به ترتیب برابر با ۱۱، ۳/۵ و ۹/۶ درصد می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای هیدرولیکی شامل ارتفاع زبری بستر آبراهه اصلی و طول سرریز جانبی بر میزان کارایی و عملکرد مخزن نگهداشت در کاهش دبی پیک سیلاب مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین قابل‌تعمیم بودن استفاده از روابط تخمین میزان آبگذری سرریز جانبی تحت شرایط جریان ماندگار برای جریان غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفتند که بر اساس نتایج، استفاده از روابط ماندگار دقت بسیار پایینی برای برآورد تخمین میزان آبگذری سرریز جانبی در جریان غیرماندگار دارند لذا نمی‌توان از روابط پیشنهادی سایر محققین تحت شرایط ماندگار برای حالت غیرماندگار استفاده کرد. قابل ذکر است که هرچه نسبت بی بعد  $\frac{L}{b}$  کوچکتر شود دقت تخمین حجم عبوری سرریز با استفاده از روابط جریان ماندگار برای حالت غیرماندگار کمتر می‌شود. براساس آزمایش‌ها میزان دبی جریان ورودی به مخزن نگهداشت، تابعی از پارامترهای هیدرولیکی از جمله زبری بستر آبراهه می‌باشد و از آنجا که این پارامتر در میزان آبگذری از سرریز جانبی بسیار تأثیرگذار می‌باشد و باعث کاهش دبی پیک سیلاب می‌شود، لذا تخمین درست این پارامتر در روابط می‌تواند حائز اهمیت زیادی باشد. بیشترین تأثیر زبری بستر آبراهه بر میزان دبی متوسط ورودی به مخزن نگهداشت برابر با ۲۵ درصد می‌باشد که در بستری با ارتفاع زبری حداکثر ۱۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است. همچنین با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته و نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی، روابطی برای محاسبه میزان دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت و زمان پر شدن مخزن نگهداشت ارائه شد و با محاسبه شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص متوسط قدرمطلق خطا (MAPE) و حداکثر خطای نسبی (MRE) روابط پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفتند. این ارزیابی نشان داد که روابط پیشنهادی همپوشانی تقریباً مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند به طوری که بیشینه خطای محاسباتی برای محاسبه میزان دبی متوسط جریان ورودی به مخزن نگهداشت و نیز زمان پر شدن مخزن کمتر از ۱۵ درصد بوده است. برای استفاده عملی از نتایج این پژوهش در طرح‌های مهندسی رودخانه و سیلاب باید به چند نکته توجه داشت. نکته اول اینکه اگرچه با افزایش زبری بستر، دبی جریان بیشتری وارد مخزن نگهداشت خواهد شد و مدیریت سیلاب ورودی به شهر مطمئن‌تر خواهد بود، اما این اقدام باعث افزایش تراز سطح آب می‌شود لذا خاکریزهای کنترل سیلاب موجود در رودخانه باید جوابگوی این افزایش تراز باشند. نکته دوم این است که از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر میزان حجم آب ورودی به مخزن نگهداشت، موقعیت قرارگیری مخزن در طول آبراهه می‌باشد که در این پژوهش ثابت در نظر گرفته شد. لذا با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بستر زبرتر را به عنوان یک معیار جهت انتخاب موقعیت قرارگیری مخزن نگهداشت در نظر گرفت بدین صورت که بهتر است موقعیت مخزن نگهداشت در جایی واقع شود که آن قسمت از آبراهه



زبری بیشتری داشته باشد و همچنین در مناطقی که زبری رودخانه کم است طول سرریز افزایش یابد و یا ارتفاع سرریز کاهش یابد که به عنوان پارامتر مورد بررسی پیشنهاد می‌گردد.

### "هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

#### REFERENCES

- Ayyoubzadeh, A., Habibi, M., Rostami, M., Saneie, M. and Faramarz, M. (2016). Laboratory studies on bed form effects on water surface profiles in side weirs. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 7(4), 352-362. (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/1478095>
- Azizpour, A., Kashefipour, M. and Haghghi, A. (2018). Investigating the changes in the roughness coefficient of the river due to the passage of time using the FASTER numerical model (Case study: Karun River). In: Proceedings of 17th Iranian hydraulic conference, 4-6 Sep, University of Shahre kord, Shahre kord, Chaharmahal and Bakhtiar, Iran, pp.120-128. (In Persian) <https://civilica.com/doc/811345>
- Bayrami, M. and Vatankhah, A. R. (2021). Laboratory study of overflow on rounded edge rectangular side weir in subcritical flow. In: Proceedings of 20th Iranian hydraulic conference, 27-28 Oct, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Golestan, Iran, pp.235-241. (In Persian) <https://civilica.com/doc/1322714>
- Barenblatt, G. I. (1987). *Dimensional analysis (1th ed.)*. Gordon and Breach Science Publishers, Netherlands: Amsterdam
- Bagheri, S. (2010). *Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side and normal weirs*. Master's thesis, Isfahan University of Technology.
- Boosik, K. and Byeongman, Y. (2011 March). *Evaluation of effects of flood control for side-weir detention basin using equivalent peak hydrograph*. Retrieved September 25, 2020, Research Center of Flood Defense Technology for Next Generation, from <https://slideplayer.com/slide/7053646/>
- Borghei, S. M., Jalili, M. R. and Ghodsian, M. (1999). Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 1051-1056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:10\(1051\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:10(1051))
- Borghei, S. M. and Salehi, H. (2003). Investigation of discharge coefficient in side weirs using physical model. In: Proceedings of 6th International conference of Civil Engineering, 5 May, Isfahan University of Technology, Esfahan, Iran, pp. 2150-2156. (In Persian). <https://civilica.com/doc/853/>
- Dadfar, A., Besharat, M. and Ramos, H. (2019). Storage ponds application for flood control, hydropower generation and water supply. *Journal of International Review of Civil Engineering*, 10(4), 219-226. <https://doi.org/10.15866/irece.v10i4.17133>
- De-Marchi, G. (1934). Essay on the performance of lateral weirs. *Journal of L' Energia Elettrica*, 11(11), 849-860. (In Italy)
- Fukuoka, S., Kon, T. and Okamura, S. (2007). Assesment of flood control effects of the Tsurumigawa river multi-purpose retarding basin. *Journal of Doboku Gakkai Ronbunshuu*, 63(3), 238-248. (In Japanese). <https://doi.org/10.2208/jscejb.63.238>
- Ghasemzadeh, F. and Kouchakzadeh, S. (2016). Unsteady flow in V-Notch weir located at the end of a storage. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48(3). 503-514. (In Persian). DOI: [10.22059/ijswr.2017.213394.667519](https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.213394.667519).
- Gierk, M., Bodis, K., Younis, J., Szabo, J. and De Roo, A. (2008). The impact of retention polders, dyke shifts and reservoirs on discharge in the Elbe River. *Joint Research Centre of Scientific and Technical Report*, JRC 49172, Retrieved May 10, 2021, from <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC49172>
- Greater Dublin Strategic Drainage Study. (2005). *Retention Pond Site Control*. Retrieved May 20, 2021, from <https://sswm.info/node/4748>.
- Hager, WH. (1987). Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4), 491-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:4\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:4(491))
- Izadjoo, F. and Shafai Bajestan, M. (1996). Experimental investigation of discharge coefficient in side weirs. In: *4th River Engineering Conference*, 21-22 Oct, University of Ahwaz. pp.29-44. (In Persian).
- Jalili, M. R. and Borghei, S.M. (1996). Discussion of "Discharge coefficient of rectangular side weir", by Singh R., Manivannan, D. and Satyanarayana, T. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2). 132.
- Ji, U., Kim, S., Yoon, B. and Kim, S. (2013). Analytical and experimental investigation of a side-weir detention basin in flood-level reduction in the main channel. *Journal of Irrigation and Drain Engineering*, 139, 663-671. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000610)

- Jun, K. S., Kim, W. and Yoon, B. M. (2010). Computational model for flow in river systems including storage pockets with side weirs. *Journal of Korea Water Resource*, 43(2), 139-151. (In Korea). <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2010.43.2.139>
- Moayeri, M. and Entezari, M. (2008). Floods and review floods in province of Esfahan. *Journal of Geographic perspective*, 3(6), 110-124. (In Persian). [https://jshsp.rasht.iau.ir/article\\_522468.html](https://jshsp.rasht.iau.ir/article_522468.html)
- Mousavi Baygi, S.M., Faridhoseini, A., Alizadeh, A. and – Inanlou, M. (2012). The Assessment of Fluctuations on Roughness Manning Coefficient for Prediction of Flood Flow Hydraulics. *Journal of Water and Soil*, 26(1), 183-192 (In Persian). <https://www.sid.ir/paper/141792/fa#downloadbottom>.
- Parandin, M. H., Heidarpour, M. and Parandin, M.A. (2015). Investigation of flow characteristics in rectangular side weir. *Journal of Applied Research Water Science*, 1(1), 13-22. (In Persian)
- Pirestani, M. and shafaghatti, M. (2010). Survey of environmental impacts of dam construction. *Journal of Research Quarterly of Human Geography*, 1(3), 39-50. (In Persian). <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=118363>
- Rajabizadeh, Y., Ayyoubzadeh, A. and Zahiri, A. (2019). Survey of flood in Golestan Province in year 1397-1398 and offer control and management strategies in the future. *Journal of Echo Hydrology*, 6(4), 921-942. (In Persian). <https://www.sid.ir/fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=493317>
- Riahi, S. and Vatankhah, A. R. (2015). Discharge computation of trapezoidal side weir in subcritical flow regime using conventional weir theory. *Journal of Water and Soil*, 29(1), 23-24. (In Persian). <https://www.sid.ir/fA/Journal/ViewPaper.aspx?ID=293600>
- Sayed, T. (2021). Effect of main channel bed roughness on the branch channel discharge. *Mansoura Engineering Journal*, 46(1), 47-52. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2021.153347>
- Swamee, PK., Santosh, KP. and Masoud, SA. (1994). Side weir analysis using elementary discharge coefficient. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(4), 742–55. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\)120:4\(742\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:4(742))
- Seojun, K., Byungman, Y., Sanghuk, K. and Dongsu, K. (2016). Flood control detention basin considering bed roughness coefficient. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 7(33), 06016011-10. DOI: [10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001008)
- Siviglia, A., Stocchino, A. and Colombini, M. (2009). Design of flood control systems on the Vara River by numerical and physical modelling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1063–1072. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000135)
- Subramanya, K. and Awasthy, S. C. (1972). Spatially varied flow over side weirs. *Journal of Hydraulic division*, 98(1), 1-10. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003188>
- Velayati, F. and Vatankhah, A. R. (2019). Discharge computation of trapezoidal broad-crested side weir in subcritical flow regime using spatially varied flow theory. *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20(24), 1-12. (In Persian). <http://doi:10.22092/idser.2018.109440.1188>.
- White, F. M. (1987). *Fluid Mechanics (7th ed.)*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, Rhode Island.
- Yazdi, J. (2019). Optimal operation of urban storm detention ponds for flood management. *Journal of Water Resources Management*, 33, 2109–2121. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-019-02228-5#author-information>
- Yu-Tech, L. (1972). Discussion of spatially varied flow over side weir. *Journal of the Hydraulics Division*, 98(11), 2046–8. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003490>