



Performance analysis of combined trapezoidal control notch in the sub-critical flow

Amirhossein Mahmoudi Rahmani¹ | Roohollah Zanganeh^{2✉} | Amir Ghaderi³

1. Department of Water and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: amirh.mahmoudi.r@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: r_zanganeh@iust.ac.ir

3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: a.ghaderi@urmia.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	At the connection point of water conveyance canals carrying sub-critical flow with hydraulic structures such as inverted siphons and chutes, control notches can be used to create critical flow conditions and prevent water level drop in the downstream section or backwater flow in the upstream channel. In the present study, the performance of a combined trapezoidal control notch is investigated for the first time, and a method to determine its optimal dimensions for various discharges within the channel's design discharge range is presented. For this purpose, the required equations are derived using specific energy equations and considering critical flow conditions over the notch and the non-linear equations are simultaneously solved using GRG method for discharges of 10, 25 and 50% of the design discharge. The obtained results are also validated through modeling in Flow3D software. Using this software, the flow characteristics including flow depth, specific energy, velocity profiles and stream lines over the proposed notch are evaluated. The results showed that the proposed structure is able to keep the flow in critical condition over different design discharges. The comparison between analytical results and the numerical method resulted in the proper compliance of these two methods with errors of less than 5%. Errors in flow depth ranged between 2.9% to 4.5%, and in specific energy 3.2% to 4.8%. The findings show that the use of a combined trapezoidal control notch creates critical flow conditions and prevents water level drop or backwater flow in the upstream channel under various hydraulic conditions.
Article history:	
Received: June. 7, 2025	
Revised: Aug. 16, 2025	
Accepted: Aug. 25, 2025	
Published online: Oct. 2025	
Keywords: <i>Combined Trapezoidal Control Notch, Critical Depth, Specific Energy, Specific Force, Sub-critical Flow</i>	

Cite this article: Mahmoudi Rahmani, A., Zanganeh, R., & Ghaderi, K. (2025). Performance analysis of combined trapezoidal control notch in the sub-critical flow, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (8), 2119-2136. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394504.669957>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394504.669957>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The existence of hydraulic structures such as chutes and spillways in water conveyance canals carrying sub-critical flow, sometimes leads to occurrence of high energy flow and excessive shear stress in the downstream section or backwater flow in the upstream section. Therefore, the presence of a water level regulator seems crucial. Typically, a trapezoidal weir with a crest level aligned with channel bed, which is called a trapezoidal control notch, is used to prevent water level drop or any erosion in canal. In some areas with variable hydraulic and hydrologic conditions, it is recommended to use combined sections to be able to handle very low flows to very high flows within the design discharge range. In this study, the specific energy method for designing control notches is used to design a combined trapezoidal control notch under various hydraulic conditions and its performance is investigated using Flow3D modeling software.

Method

In this study, a combined trapezoidal control notch is designed using the specific energy balance method under three different hydraulic conditions to regulate sub-critical flow in open channels. The structure consists of lower and upper sections with dimensions derived from critical flow equations. Numerical modeling was performed using Flow3D to investigate the performance of the structure. In other words, simulations validated water depth and specific energy against theoretical calculations. Design equations were solved using generalized reduced gradient method and the corresponding geometry was created in AutoCAD. This approach ensured critical flow maintenance without any backwater flow in the upstream section of the channel.

Results

The combined trapezoidal control notch effectively maintained critical flow conditions across the tested discharge range (20–100% of design flow) for every hydraulic condition. Also, Flow3D simulations confirmed stable water depths upstream and specific energy, with less than 5% deviation from calculations. The structure prevented backflow and minimized water level fluctuations. The design demonstrated robustness in maintaining hydraulic efficiency under variable flow conditions.

Conclusions

This study indicated that the combined trapezoidal control notch effectively regulates subcritical flow while maintaining critical conditions across varying discharges. Numerical simulations validated the theoretical approach, showing desirable agreement with predicted hydraulic performance. These findings support the notch's practical application in water management systems requiring flow control.

Author Contributions

Conceptualization, R.Z. and A.M.; methodology, R.Z. and A.M.; software, A.M. and A.GH.; validation, A.M., R.Z. and A.GH.; formal analysis, A.M., R.Z. and A.GH.; investigation, A.M., R.Z. and A.GH.; writing—original draft preparation, A.M.; writing—review and editing, R.Z. and A.GH.; visualization, A.M.; supervision, R.Z.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تحلیل عملکرد شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای تحت جریان هیدرولیکی زیربحرانی

امیرحسین محمودی رحمانی^۱ | روح‌اله زنگانه^۲ | امیر قادری^۳^۱. گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: amirh.mahmoudi.r@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه:r_zanganeh@iust.ac.ir^۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: a.ghaderi@urmia.ac.ir

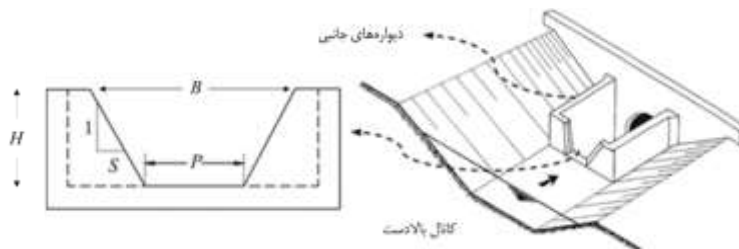
اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۱۷	در محل اتصال کانال‌های انتقال آب حامل جریان زیربحرانی با سازه‌های هیدرولیکی نظیر سیفون‌های معکوس و تندآب‌ها، می‌توان از شکاف‌های کنترل برای ایجاد جریان با شرایط بحرانی و جلوگیری از افت سطح آب یا پس زدن آن در کانال بالادست بهره گرفت. در تحقیق حاضر، عملکرد شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته و نحوه تعیین بهینه ابعاد آن به‌ازاء وقوع دبی‌های مختلف در بازه دبی طراحی کانال ارائه می‌شود. به‌این‌منظور، با استفاده از معادلات انرژی مخصوص و در نظر گرفتن شرایط بحرانی جریان بر روی این سازه، روابط موردنیاز استخراج شده و با حل هم‌زمان معادلات غیرخطی با استفاده از روش گرادیان کاهش‌یافته، ابعاد بهینه سازه برای سه حالت هیدرولیکی مختلف (دبی‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد دبی طراحی) محاسبه می‌گردد. سپس، نتایج حاصل با استفاده از مدلسازی در نرم‌افزار Flow3D نیز صحت‌سنجی می‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار، مشخصات جریان از جمله عمق، انرژی مخصوص، توزیع سرعت و مسیر خطوط جریان بر روی شکاف کنترل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج بررسی‌ها نشان داد سازه یادشده قادر است شرایط بحرانی را در بازه‌ی گسترده‌ای از دبی‌ها با دقت مناسبی حفظ نماید. مقایسه داده‌های نظری و نتایج عددی حاکی از تطابق قابل‌توجه با میانگین خطای کمتر از ۵ درصد بود. به‌طور خاص، در حالت‌های مختلف هیدرولیکی، خطای محاسبه عمق جریان بین ۲/۹ تا ۴/۵ درصد و خطای محاسبه انرژی مخصوص بین ۳/۲ تا ۴/۸ درصد مشاهده شد. از پژوهش حاضر می‌توان دریافت که استفاده از شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای موجب ایجاد شرایط بحرانی در جریان شده و از پایین افتادن سطح آب و یا پس زدن جریان در کانال بالادست به‌ازاء وقوع حالات هیدرولیکی گوناگون جلوگیری می‌نماید.
واژه‌های کلیدی: انرژی مخصوص، جریان زیربحرانی، شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای، عمق بحرانی، نیروی مخصوص.	
استناد: محمودی رحمانی، امیرحسین؛ زنگانه، روح‌اله؛ و قادری، امیر (۱۴۰۴). تحلیل عملکرد شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای تحت جریان هیدرولیکی زیربحرانی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۸)، ۲۱۱۹-۲۱۳۶. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394504.669957	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.394504.669957	



مقدمه

سازه‌های تنظیم و استهلاک انرژی جریان در آبراهه‌ها از اجزای کلیدی مجراهای آبرسانی به حساب آمده و نقشی اساسی در کنترل سطح آب، کاهش سرعت و آشفته‌گی جریان، افزایش راندمان بهره‌برداری و کاهش خطرات فرسایش ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، استفاده از دریچه‌های سالونی^۱ در شرایط جریان مستغرق موجب کاهش سرعت، میزان آبگذری و تلاطم جریان شده و از تشکیل گردابه‌ها جلوگیری می‌نماید (Taheri Talavari et al., 2024). بهره‌گیری از سازه‌هایی مانند دایک‌های انحرافی در محل آبگیرهای جانبی، افزایش چشمگیر بازده آبگیری و کاهش رسوب‌گذاری در دهانه آبگیر را به همراه خواهد داشت (Ahadiyan et al. 2024). در کانال‌هایی با انبساط ناگهانی، استفاده از سازه‌هایی نظیر تیرک‌های عرضی موجب استهلاک انرژی و در نتیجه، کاهش سرعت و شدت آشفته‌گی می‌گردد (Hajialigol et al., 2024). نهایتاً، سازه‌هایی همچون سرریزهای وی‌شکل با طراحی مناسب، باعث کنترل سرعت، عمق و آشفته‌گی جریان شده و همچنین، شرایط مناسبی برای مهاجرت گونه‌های مختلف آبی فراهم می‌آورند (Shahabi et al., 2022). بنابراین، شناخت نحوه تعامل جریان با سازه‌هایی از این دست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و به افزایش راندمان و بهبود کارایی سامانه‌های انتقال و توزیع آب می‌انجامد.

در صورت اتصال دو مجرای انتقال آب به یکدیگر توسط یک شیب‌شکن و یا اتصال یک کانال به سازه‌های هیدرولیکی از جمله سیفون‌های معکوس و تندآب‌ها، پایین‌افتادگی سطح آب در مجرای بالادست حامل جریان زیربحرانی، می‌تواند به فرسایش بستر آن و یا اختلالاتی در سامانه‌های کنترل سطح آب بیانجامد. در چنین مواقعی استفاده از سامانه‌ای جهت جلوگیری از پایین‌افتادگی سطح آب و پس زدن جریان در کانال بالادست توصیه می‌گردد که به آن مقطع کنترل^۲ گویند (Vatankhah, 2013a; Waterbeheer, 2002). به عبارت دیگر، سامانه مذکور در نزدیکی محل اتصال، شرایط وقوع جریان بحرانی را پدید آورده و موجب عبور آن با حداقل انرژی می‌شود. یکی از راه‌های ایجاد شرایط یادشده، استفاده از یک سرریز دوزنقه‌ای با تاج هم‌تراز با بستر مجرا است که با نام شکاف کنترل دوزنقه‌ای^۳ شناخته شده و به دلیل هزینه ساخت کم و طراحی ساده، به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ نمونه‌ای از کاربرد این سازه را در محل اتصال کانال به مجرای دیگر نمایش می‌دهد. مشخصات هندسی و ابعاد سازه مذکور، وابسته به شرایط بحرانی جریان و انرژی یا نیروی مخصوص در محل سازه است (Das, 2011; Vatankhah, 2013a).



شکل ۱. شکاف کنترل دوزنقه‌ای (Vatankhah, 2013a)

شکاف کنترل دوزنقه‌ای معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شود که به‌ازاء دبی‌های بین ۲۰٪ و ۱۰۰٪ دبی طراحی، عمق و سرعت آب در کانال بالادست را به‌خوبی کنترل نماید (Waterbeheer, 2002).

از گذشته تاکنون مطالعات نظری و آزمایشگاهی مختلفی در زمینه طراحی سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان در کانال‌های روباز انجام گرفته است. دَس (Das, 2011) با استفاده از معادلات انرژی و نیروی مخصوص و استخراج ریشه‌های برابر توانست روابطی جهت محاسبه عمق بحرانی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای، مستطیلی، مثلثی و سهمی‌گون و در نتیجه تعیین ابعاد بحرانی در کانال‌های یادشده برای طراحی مناسب تبدیل‌ها ارائه کند. قاسم‌زاده و کوچک‌زاده (۱۳۹۳) فلوم گلوبلند دوزنقه‌ای با تاج هم‌تراز با بستر کانال را معرفی و روشی برای طراحی آن ارائه نمودند. سازه یادشده با ایجاد تنگ‌شدگی عرضی و بدون نیاز به افزایش ارتفاع کف مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل ایجاد دخالت کمتر در مسیر جریان، افت و پس‌زدگی حاصل از آن کم خواهد بود. وطن‌خواه (Vatankhah, 2013a) روش‌های مستقیم و ترسیمی را بر پایه معادلات انرژی مخصوص برای تعیین ابعاد محدودشده کانال‌های دوزنقه‌ای جهت طراحی مناسب تبدیل‌ها و

همچنین طراحی شکاف‌های کنترل دوزنقه‌ای برای هر مقدار از دبی ارائه نمود. محمدی و وطن‌خواه (۱۳۹۹) شکل جدیدی از فلوهای اندازه‌گیری جریان دارای دیواره‌های استوانه‌ای و مخروطی با تاج منطبق با کف کانال را ارائه کرده و معادلاتی را برای تخمین بده جریان در یک کانال مستطیلی با مطالعه نظری و آزمایشگاهی خصوصیات جریان عبوری از سازه‌های یادشده توسعه دادند.

در مواقعی که دبی، تغییرات و نوسانات بسیاری داشته و بازه‌ای از جریان‌های کم در فصول خشک تا جریان‌های زیاد در مواقع بارندگی‌های شدید را شامل می‌شود، دقت سازه‌های کنترلی مذکور کاهش می‌یابد. در این راستا، تاکنون راهکارهای متعددی جهت مدیریت بهینه جریان در این شرایط و کنترل سطح آب در حد دلخواه ارائه گردیده است که از میان آن‌ها می‌توان به انواع دریچه‌های خودکار از نوع هیدرومکانیکی نظیر دریچه‌های سالونی اشاره نمود. خیبر و همکاران (Kheybar et al., 2024) به بررسی عملکرد دریچه‌های سالونی بیضوی در حالت مستغرق با وجود تنگ‌شدگی عرضی در کانال پرداخته و دریافتند سازه یادشده قادر به کاهش نرخ اتلاف انرژی و برآورد دبی جریان با خطای نسبی به میزان ۱۱ درصد است. از دیگر تحقیقات صورت‌پذیرفته در این خصوص می‌توان به مطالعات بهبهانی و همکاران (Behbahani et al., 2024) و مبارک و همکاران (Mobarak et al., 2022) اشاره نمود.

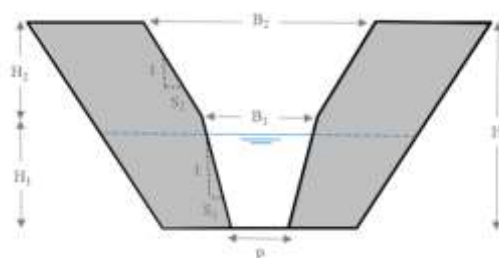
یکی از راه‌حل‌های رایج دیگر در تنظیم و مدیریت نوسان‌های سطح آب، استفاده از سرریزها با مقاطع مرکب است (Grant & Dawson, 1995). لی و همکاران (Lee et al., 2012) کاربرد سرریزهای مرکب متشکل از دو بخش دوزنقه‌ای و یک بخش فوقانی به شکل مستطیل را جهت اندازه‌گیری جریان با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بررسی نمودند. در نهایت، مشخص شد سرریز یادشده می‌تواند برای بازه وسیعی از دبی‌های مختلف با حفظ شرایط پیوستگی جریان مورد استفاده قرار گیرد.

در زمینه مدل‌سازی عددی، مطالعات متعددی در مورد مشخصات جریان بر روی انواع سرریزها انجام گرفته است. کیم و همکاران (Kim et al., 2022) به تحلیل عددی جریان در پایین‌دست یک سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D پرداختند و نتایج خود را با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی مقایسه نمودند. مطالعات آن‌ها نشان داد مدل سه‌بعدی یادشده به دلیل عملکرد قابل قبول، می‌تواند جهت طراحی و بهره‌برداری از سازه‌های هیدرولیکی، مورد استفاده قرار گیرد. تقوی و قدوسی (Taghavi & Ghodousi, 2015) با استفاده از نرم‌افزار Flow3D، ضریب گزردهی سرریزهای مستطیلی لبه‌تیز و سرریزهای جانبی را در جریان دارای بار معلق رسوبی و فاقد آن بررسی و مقایسه نمودند. ایوب و حاماد (Ayoob & Hamad, 2022) به مدل‌سازی عددی جریان بر روی یک سرریز لبه‌پهن با چهار وضعیت قرارگیری و شیب نسبت به بالادست و پایین‌دست توسط نرم‌افزار Flow3D پرداخته‌اند. عسکری و همکاران (Askari et al., 2019) مشخصات جریان از جمله توزیع سرعت و تنش برشی را در کانال‌های مرکب با نرم‌افزار Flow3D و روش حجم سیال^۱ بررسی نموده و دقت بالای این نرم‌افزار را در مدل‌سازی جریان در کانال یادشده با مقایسه با داده‌های تجربی نمایش دادند. از دیگر پژوهش‌های صورت‌گرفته در خصوص کاربرد مدل‌های عددی در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی می‌توان به مطالعه اثر تیغه‌های گردآب‌شکن بر کارایی سرریزهای نیلوفری با استفاده از نرم‌افزار Flow3D (Noruzi & Ahadiyan, 2015) و بررسی میزان استهلاک انرژی سرریز پلکانی با مدل عددی ANSYS - CFX (Sarkamariyan & Ahadiyan, 2017) اشاره نمود.

با بررسی مطالعات انجام شده مشخص شد کاربرد سرریزهای مرکب با تاج هم‌تراز با بستر کانال به عنوان شکاف کنترل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از سویی، روش پیشنهادشده توسط انجمن USBR برای محاسبه ابعاد شکاف‌های کنترل دوزنقه‌ای که به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند، تنها برای دبی‌های کمتر از $2/83$ مترمکعب بر ثانیه کاربرد داشته و روش حلی زمان‌بر محسوب می‌شود (Vatankhah, 2013a). از این رو، در مطالعه حاضر، جهت بررسی عملکرد هیدرولیکی سازه سرریز مرکب دوزنقه‌ای با تاج منطبق با کف کانال به عنوان شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای، از روشی متفاوت بر پایه انرژی مخصوص جریان که پیش‌تر توسط وطن‌خواه (Vatankhah, 2013a) جهت محاسبه ابعاد شکاف‌های کنترل ارائه شده است استفاده شد و ابعاد آن (شامل عرض کف، عرض‌های فوقانی، شیب‌های جانبی و ارتفاع) محاسبه گردید. همچنین نظر به نتایج و کاربرد گسترده روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی^۱ برای پدیده‌های هیدرولیکی گوناگون، به منظور شبیه‌سازی سه‌بعدی عملکرد هیدرولیکی و هیدرودینامیکی سازه پیشنهادی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش‌های کلاسیک برای طراحی شکاف‌های کنترل، از نرم‌افزار Flow3D بهره گرفته شد. مطالعه حاضر می‌تواند به عنوان یک راهنما جهت طراحی شکاف‌های کنترل مرکب دوزنقه‌ای در بازه وسیعی از دبی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۲ نمایی از مقطع عرضی شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای پیشنهادی را نشان می‌دهد.

1. Volume of Fluid (VOF)

1. Computational Fluid Dynamics (CFD)



شکل ۲. شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

همانطور که پیش‌تر بیان شد وجود مقطع کنترل در محل اتصال دو سازه هیدرولیکی مانند کانال انتقال آب حامل جریان زیربحرانی و سیفون معکوس موجب عبور جریان با حداقل انرژی و عمق بحرانی از آن محل می‌گردد. در همین راستا، ابعاد و شکل مقطع کنترل و میزان مجاز کاهش عرض کانال در آن مقطع در صورتی قابل محاسبه است که انرژی مخصوص جریان زیربحرانی با عمق نرمال در کانال بالادست با انرژی مخصوص جریان با عمق بحرانی در شکاف کنترل برابر شود (Das, 2011). با استفاده از روابط ۱ و ۲ می‌توان شرایط مذکور را توصیف نمود:

$$E_{Notch} = E_{canal} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\frac{dE}{dy} = \cos^2 \theta - \alpha \frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 0 \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط بالا E_{notch} انرژی مخصوص جریان در مقطع کنترل برحسب متر، E_{canal} انرژی مخصوص جریان در کانال بالادست برحسب متر، Q دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه، B_c عرض سطح آزاد آب در مقطع کنترل برحسب متر، A_c سطح مقطع جریان در مقطع کنترل برحسب متر مربع و g شتاب گرانش برحسب متر بر مجذور ثانیه است. در رابطه ۲-۲ مقدار α برابر با ۱ و θ کمتر از ۶ درجه فرض شده است.

براساس شکل ۲، می‌توان دریافت که شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای به‌ازاء اعماق مختلف، سطح مقطع یکسانی نداشته و امکان بازنویسی روابط پیش‌گفته بر پایه آن به‌صورت یکپارچه وجود ندارد؛ لذا بایستی سازه یادشده را به دو بخش زیرین و روین تقسیم و ابعاد هر یک را جداگانه و با استفاده از حل هم‌زمان روابط ۱ و ۲ محاسبه نمود. به‌عبارت دیگر، تعیین این ابعاد در صورتی امکان‌پذیر است که فرض شود هر بخش در یک بازه دبی مشخص استفاده خواهد شد؛ یعنی بخش زیرین، کنترل سطح آب را در دوره‌های خشکسالی^۱ و دبی‌های کم بر عهده داشته و بخش روین نیز در صورت وقوع دوره‌های ترسالی^۲ و دبی‌های نزدیک به دبی طراحی، عمل می‌نماید. از آنجاکه دوره‌های خشکسالی و ترسالی در مناطق مختلف دارای تعاریف متفاوت هستند، در مطالعه حاضر، سه حالت هیدرولیکی فرضی که محدوده‌ی قابل‌قبولی از شرایط هیدرولیکی را شامل می‌شود، به شرح جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که پیش‌تر بیان شد، مقاطع کنترل دوزنقه‌ای ساده، به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که در بازه دبی‌های ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ دبی طراحی عمل نمایند. از آنجاکه یکی از اهداف تحقیق حاضر، تحلیل عملکرد مناسب سازه شکاف کنترل در دبی‌های کمتر از حد معمول است، در حالات هیدرولیکی مورد بررسی، حد پایین دبی به ۱۰٪ کاهش یافت.

جدول ۱. حالات مورد بررسی جهت طراحی شکاف کنترل

مقدار دبی		حالت هیدرولیکی
در دوره ترسالی (W)	در دوره خشکسالی (D)	
دبی طراحی	۱۰ درصد دبی طراحی	۱
دبی طراحی	۲۵ درصد دبی طراحی	۲
دبی طراحی	۵۰ درصد دبی طراحی	۳

2. Dry Weather Conditions (D)

3. Wet Weather Conditions (W)

وطن خواه (Vatankhah, 2013b) در تحقیقات خود نشان داد، در کانال‌های با مقطع مرکب امکان وقوع چندین عمق بحرانی وجود دارد. او در این پژوهش بیان نمود که پدیده پیش‌گفته در صورتی رخ می‌دهد که شیب جانبی بخش رویین مقطع مرکب از مقدار معینی کمتر گردد. همچنین روشی تحلیلی برای محاسبه این مقدار ارائه شده است.

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، ابعاد شکاف کنترل دوزنقه‌ای به گونه‌ای تعیین می‌شود که دبی‌های ۲۰٪ دبی طراحی تا ۱۰۰٪ دبی طراحی بدون پایین افتادگی سطح آب و یا پس زدن آن از روی مقطع با کمترین انرژی عبور نماید. مطالعات نشان داده‌اند که اگر شکاف کنترل به‌ازاء حد پایین و حد بالای دبی‌های یادشده به‌درستی عمل کند، هر دبی در این بازه را پاسخگو خواهد بود (Waterbeher, 2002).

بخش زیرین شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای

براساس آنچه پیش‌تر بیان گردید، ابعاد بخش زیرین که وظیفه کنترل سطح آب در دوره خشکسالی را داراست، به‌ازاء دبی‌های ۲۰٪ دبی طراحی و دبی طراحی در دوره یادشده تعیین می‌شود. از این‌رو، در صورت بازنویسی روابط ۱ و ۲ برای این بخش و با فرض کانال دوزنقه‌ای در بالادست خواهیم داشت:

به‌ازاء ۲۰٪ دبی طراحی:

$$y_{c1} + \frac{Q_{0.2D}^2}{2g(Py_{c1} + S_1 y_{c1}^2)^2} = y_{n0.2D} + \frac{Q_{0.2D}^2}{2g(by_{n0.2D} + my_{n0.2D}^2)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\frac{Q_{0.2D}^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} = \frac{(Py_{c1} + S_1 y_{c1}^2)^3}{P + 2S_1 y_{c1}} \quad \text{رابطه ۴}$$

به‌ازاء دبی طراحی:

$$H_1 + \frac{Q_D^2}{2g(PH_1 + S_1 H_1^2)^2} = y_{nD} + \frac{Q_D^2}{2g(by_{nD} + my_{nD}^2)^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\frac{Q_D^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} = \frac{(PH_1 + S_1 H_1^2)^3}{P + 2S_1 H_1} \quad \text{رابطه ۶}$$

در روابط بالا y_{c1} و H_1 به‌ترتیب اعماق بحرانی جریان در شکاف کنترل به‌ازاء دبی‌های ۲۰٪ و ۱۰۰٪ دبی طراحی بر حسب متر، y_n عمق نرمال در کانال بالادست به‌ازاء دبی‌های ۲۰٪ و ۱۰۰٪ دبی طراحی بر حسب متر، P عرض کف شکاف کنترل بر حسب متر، S_1 شیب جانبی بخش زیرین، b و m به‌ترتیب عرض کف بر حسب متر و شیب جانبی کانال بالادست هستند (شکل ۲ ملاحظه شود). با حل هم‌زمان روابط ۳ تا ۶ به‌صورت دستگاه معادلات، ابعاد بخش یادشده محاسبه خواهد شد.

بخش رویین شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای

حال با بازنویسی روابط ۱ و ۲ بر پایه دبی طراحی برای بخش رویین شکاف کنترل خواهیم داشت:

$$H_1 + H_2 + \frac{Q_W^2}{2g(PH_1 + S_1 H_1^2 + B_1 H_2 + S_2 H_2^2)^2} = y_{nW} + \frac{Q_W^2}{2g(by_{nW} + my_{nW}^2)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\frac{Q_W^2}{g} = \frac{A_c^3}{B_c} = \frac{(PH_1 + S_1 H_1^2 + B_1 H_2 + S_2 H_2^2)^3}{B_1 + 2S_2 H_2} \quad \text{رابطه ۸}$$

مجهولات روابط ۷ و ۸، پارامترهای S_2 و H_2 است که به‌ترتیب، شیب جانبی و ارتفاع بخش رویین شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای می‌باشند و با حل دستگاه معادلات قابل محاسبه هستند.

روش حل

با توجه به غیرخطی بودن دستگاه معادلات حاصل از روابط ۳ تا ۶ و روابط ۷ و ۸، در مطالعه حاضر از روش گرادیان کاهش‌یافته عمومی^۱ جهت حل دستگاه معادلات غیرخطی به دلایلی از جمله پایداری عددی، هزینه محاسباتی کم و همگرایی مؤثر در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر توابع جریمه بهره گرفته شد. این روش یکی از کارآمدترین و پرکاربردترین رویکردهای موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی با قیود تساوی محسوب می‌شود و در بسیاری از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی نیز پیاده‌سازی شده است. در این روش، متغیرهای تصمیم به دو دسته مستقل و وابسته تقسیم شده و قیود مسئله برای محاسبه مقادیر متغیرهای وابسته به کار می‌روند. به‌این ترتیب، تابع هدف

به صورت تابعی از متغیرهای مستقل بازنویسی شده و مشتق آن موسوم به گرادیان کاهش یافته، جهت بهینه سازی را در فضای مجاز تعیین می نماید. این ویژگی منجر به کاهش ابعاد فضای جست و جو و همگرایی سریع الگوریتم می گردد (Arora, 2012).

این روش به صورت تکراری عمل می نماید به این معنا که در هر مرحله، یک مسیر حرکت (جهت کاهش تابع هدف) انتخاب شده و متغیرهای مستقل تغییر داده می شوند. سپس متغیرهای اساسی باز محاسبه شده و این فرآیند تا رسیدن به همگرایی ادامه می یابد (Arora, 2012). گفتنی است که نتایج روش یادشده تا حد زیادی متأثر از مقادیر اولیه مجهولات است.

مدل سازی سه بعدی

جهت انجام مدل سازی از نرم افزار Flow3D بهره گرفته شد. Flow3D یک بسته نرم افزاری تجاری بر اساس روش حجم محدود^۱ بوده که توسط شرکت FlowScience تهیه و توسعه یافته است (Bayon, 2016). در این نرم افزار، رابطه پیوستگی (رابطه ۹) در کنار دیگر روابط از جمله معادلات ناویر-استوکس (روابط ۱۰ تا ۱۲) به عنوان معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال برای کل فضای محاسباتی به صورت عددی محاسبه می شوند (قاسم زاده و کوچک زاده، ۱۴۰۲).

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(p u A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(p u A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad \text{رابطه ۹}$$

در رابطه ۹، V_f کسری از حجم مرتبط با جریان، ρ دانسیته سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی، R_{SOR} منبع جرم، عبارات u و v و w مؤلفه های سرعت در جهات x ، y و z ، عبارات A_x ، A_y و A_z کسرهایی از سطح مرتبط با جریان در جهات نام برده بوده و ضریب R نیز بستگی به نوع سیستم مختصات دارد. گفتنی است ضریب ξ برای تعیین مختصات کارتزین و یا استوانه ای مورد استفاده قرار می گیرد. یعنی در صورتی که مقدار آن صفر باشد، مختصات کارتزین و در صورت برابری با عدد یک مختصات استوانه ای حاصل می شود (قاسم زاده و کوچک زاده، ۱۴۰۲).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v^2}{x V_f} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_f} = -\frac{1}{\rho} R \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در این معادلات G_x ، G_y و G_z شتاب های جرمی، f_x ، f_y و f_z شتاب های ناشی از لزجت و b_x ، b_y و b_z افت جریان در محیط های دارای خلل و فرج است.

علاوه بر این موارد، پنج مدل آشفتگی شامل طول اختلاط پرنتل^۲، مدل یک معادله ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دوم معادله ای $k-\epsilon$ ، مدل گروه های نرمال شده رینولدز^۳ و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ^۴ برای شبیه سازی جریان های آشفتگی در این نرم افزار موجود می باشند (Askari, 2019). نتایج بررسی های انجام گرفته بر روی هیدرولیک جریان های عبوری از روی سرریزها توسط دیگر محققان نشان می دهد مدل آشفتگی گروه های نرمال شده رینولدز به نتایج دقیق تری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی منجر می گردد (Majedi Asl, 2023). بنابراین در پژوهش حاضر نیز جهت شبیه سازی آشفتگی جریان از مدل یادشده بهره گرفته شد.

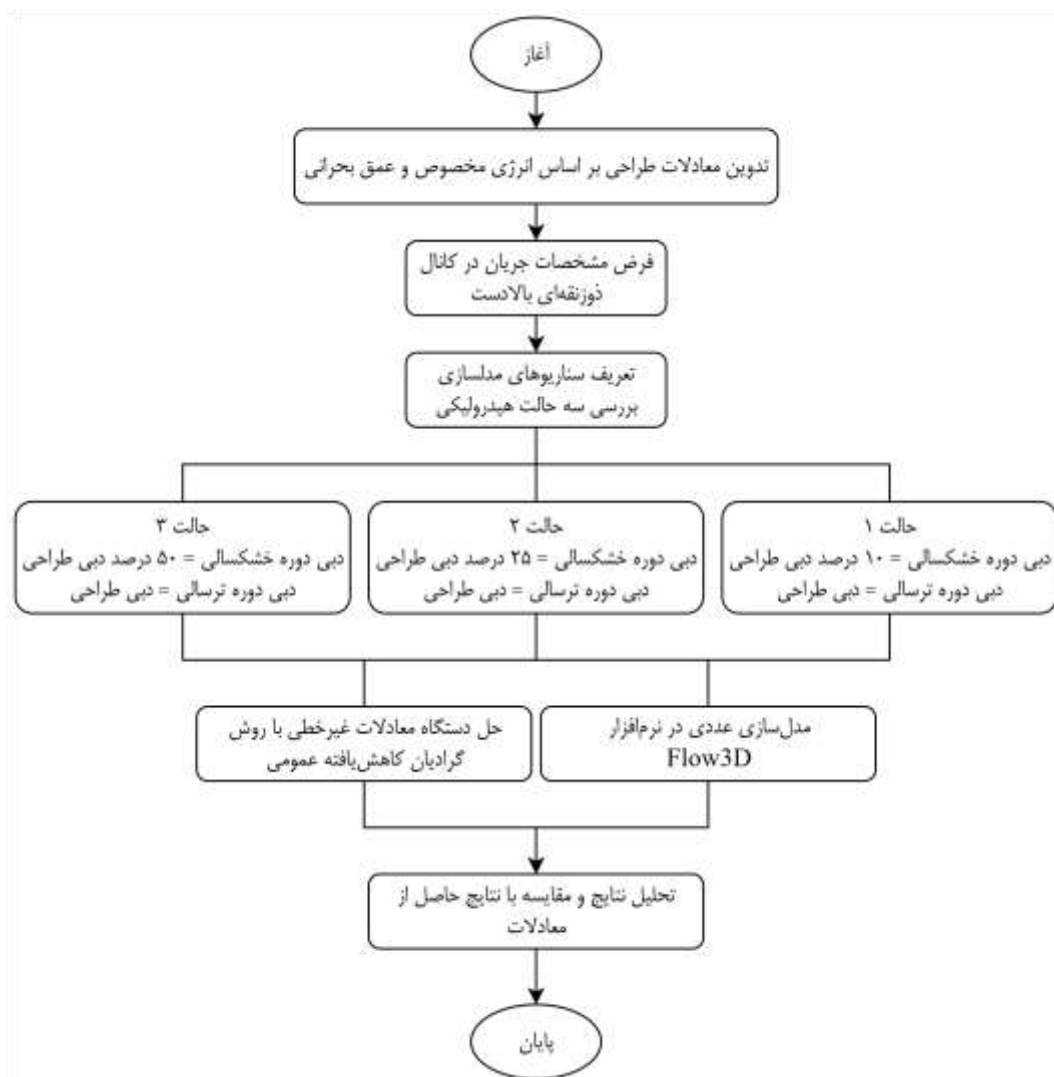
در مطالعه حاضر، به منظور بررسی صحت عملکرد هیدرولیکی سازه پیشنهادی، شبیه سازی سه بعدی جریان در نرم افزار Flow3D انجام گرفته است. در این راستا، عملکرد سازه در سه سناریوی مختلف شامل دی های مرتبط با دوره های خشکسالی ارزیابی گردیده و نتایج حاصل با رویکرد مبتنی بر انرژی مخصوص مقایسه شده است. هدف از مدل سازی عددی، بررسی توانایی سازه در حفظ عمق نرمال جریان در کانال بالادست و ایجاد شرایط بحرانی در محل شکاف، مطابق با تحلیل های نظری می باشد. جزئیات دقیق مقادیر عددی در بخش نتایج و بحث ارائه گردیده است. در ادامه، در شکل ۳ روندنمای تحقیق حاضر به نمایش درآمده است.

2. Finite Volume Method (FVM)

1. Prandtl Mixing Length

2. Renormalized Group (RNG)

3. Large Eddy Simulation (LES)



شکل ۳. روندنمای طراحی بررسی عملکرد شکاف کنترل مرکب دوونقه‌ای در شرایط مختلف هیدرولیکی

نتایج و بحث

ابعاد شکاف کنترل مرکب دوونقه‌ای

در پژوهش حاضر، برای بررسی روابط توسعه‌یافته و استخراج نتایج، کانال دوونقه‌ای دارای جریان زیربحرانی با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۲ بر اساس پارامترها و ابعاد متعارف در کانال‌های آبرسانی در نظر گرفته شده است. ابعاد سازه به‌نحوی تعیین گردید که بخش زیرین، تمامی مقادیر جریان در بازه دبی طراحی در دوره خشکسالی و بخش رویین، مقادیر جریان در بازه دبی طراحی در دوره ترسالی را پاسخگو باشد. در همین راستا، مقادیر عمق نرمال و انرژی مخصوص در کانال دوونقه‌ای بالادست برای حالات هیدرولیکی ۱، ۲ و ۳ مطابق با جدول ۱ محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۲. مشخصات کانال دوونقه‌ای بالادست

۱۰	دبی (مترمکعب بر ثانیه)
۲	عرض کف کانال (متر)
۰/۰۰۰۵	شیب طولی کانال
۰/۰۲	ضریب زبری مانینگ
۱:۱/۵	شیب جانبی



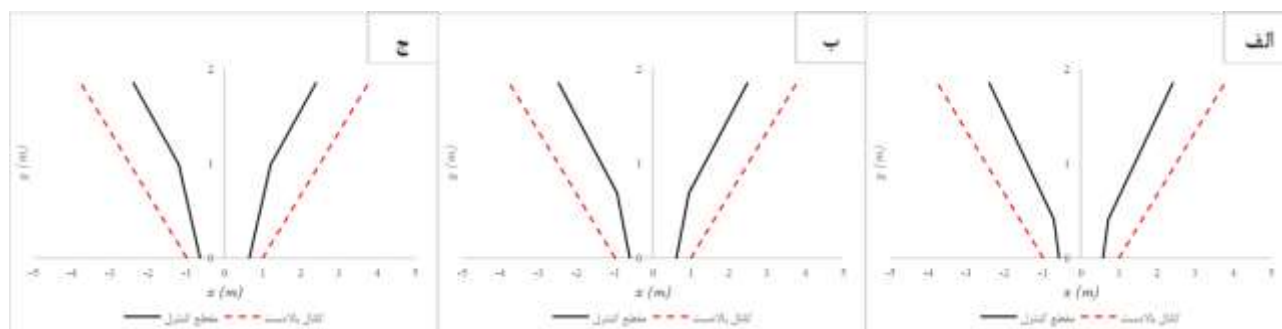
جدول ۳. مشخصات جریان در کانال دوزنقه‌ای بالادست در حالات هیدرولیکی گوناگون

حالت هیدرولیکی	دوره	سهم جریان (درصد از دبی دوره)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	عمق نرمال (متر)	انرژی مخصوص (متر)	سطح مقطع جریان (متر مربع)
۱	خشکسالی	۲۰	۰/۲	۰/۲۳۰	۰/۲۶۵	۰/۵۳۸
	ترسالی	۱۰۰	۱	۰/۵۷۴	۰/۵۹۲	۱/۶۳۹
۲	خشکسالی	۲۰	۰/۵	۰/۳۹۰	۰/۴۵۳	۱/۰۰۷
	ترسالی	۱۰۰	۲/۵	۰/۹۳۳	۰/۹۶۵	۳/۱۷۳
۳	خشکسالی	۲۰	۱	۰/۵۷۴	۰/۵۹۲	۱/۶۳۹
	ترسالی	۱۰۰	۵	۱/۳۲۴	۱/۳۷۰	۵/۲۸۰
	ترسالی	۱۰۰	۱۰	۱/۸۵۰	۱/۹۱۵	۸/۸۳۳

با جاگذاری مقادیر موجود در جدول فوق در روابط ۳ تا ۸ و حل هم‌زمان دستگاه معادلات حاصل، ابعاد بخش‌های زیرین و روین شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای حاصل گردید که نتایج آن به شرح جدول ۴ است. همچنین، شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج به‌ترتیب نمایی از مقطع عرضی شکاف کنترل یادشده را به‌ازاء حالات هیدرولیکی ۱، ۲ و ۳ نمایش می‌دهند. از مشاهده موارد پیش‌گفته می‌توان دریافت که با افزایش دبی، عرض کف شکاف کنترل، میزان بازشدگی دهانه و ارتفاع بخش زیرین افزایش اما ارتفاع و میزان بازشدگی دهانه شکاف در بخش روین کاهش یافته است. در خصوص ضریب گذردهی سازه مورد بررسی و به‌طور کلی، سرریزهای مرکب، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که در این سرریزها، ضریب گذردهی تابعی از پارامترهایی نظیر شیب جانبی، ارتفاع تاج، عرض کف و شرایط جریان است و مقدار ثابتی ندارد (Lee et al., 2012 و Shivapur et al., 2009).

جدول ۴. ابعاد شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای در حالات هیدرولیکی گوناگون

حالت هیدرولیکی	P	S_1	y_{c1}	H_1	B_1	S_2	H_2	B_2
۱	۱/۱۵	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۴۱	۱/۴۳	۱/۲۰	۱/۰۷	۴/۹۰
۲	۱/۲۲	۰/۵۰	۰/۴۲	۰/۶۸	۱/۹۰	۱/۳۱	۰/۸۱	۴/۹۵
۳	۱/۲۸	۰/۵۷	۰/۶۲	۰/۹۹	۲/۴۱	۱/۳۹	۰/۵۰	۴/۸۰



شکل ۴. مقطع عرضی شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای برای حالت‌های هیدرولیکی الف) ۱، ب) ۲ و ج) ۳

شبیه‌سازی عددی

هدف از انجام شبیه‌سازی با نرم‌افزار Flow3D، بررسی عملکرد هیدرولیکی شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای در حضور جریان زیربحرانی بوده که ابعاد آن در بخش پیشین به‌ازاء سه حالت هیدرولیکی گوناگون با استفاده از حل معادلات انرژی مخصوص بدست آمد. جهت انجام مدل‌سازی، دبی و عمق جریان مطابق با دوره خشکسالی حالت‌های پیش‌گفته (به‌ترتیب ۱، ۲/۵ و ۵ مترمکعب بر ثانیه و ۰/۵۷۴، ۰/۹۳۳ و ۱/۳۲۴ متر) لحاظ گردید و فرضیات لحاظ‌شده در مرحله طراحی با نتایج حاصل از مدل‌سازی مقایسه شد.

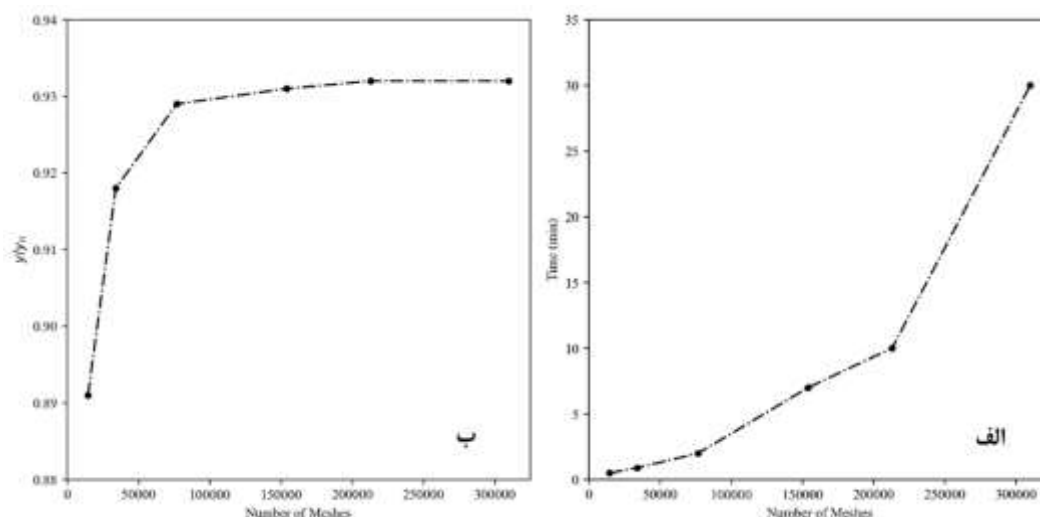
شبکه‌بندی و هندسه مسئله

هندسه کانال دوزنقه‌ای و شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای در فضای سه‌بعدی نرم‌افزار AutoCAD ایجاد شد و پس از ذخیره به صورت فایل Stl، به محیط نرم‌افزار Flow3D منتقل گردید. در این فرآیند، مشخصات کانال مطابق با مشخصات مندرج در جدول ۲ در نظر گرفته شد و شکاف کنترل نیز براساس ابعاد بدست آمده از مرحله پیشین برای حالت‌های هیدرولیکی ۱، ۲ و ۳ ترسیم گردید.

در مدلسازی حاضر، از دو مش بلاک برای افزایش دقت نتایج و کاهش زمان محاسبات استفاده گردید. بنا به توصیه دستور کار نرم‌افزار، در محل شکاف کنترل از مش ریزتر با نسبت اندازه ۱ به ۲ در مقایسه با مش کانال بهره گرفته شد. جهت بررسی استقلال نتایج مدل‌سازی از اندازه مش و دستیابی به مش مناسب، اندازه سلول‌های هر دو بخش به صورت پلکانی کاهش داده شد. متغیر مورد ارزیابی، نسبت عمق جریان در مقطع کنترل به عمق نرمال در کانال بالادست لحاظ گردید. نتایج این ارزیابی در جدول ۵ آورده شده است. با افزایش تعداد مش‌ها میزان تغییرات عمق در مقطع کنترل نسبت به عمق نرمال کم شده و در مقابل موجب افزایش زمان محاسباتی گردید که نتایج آن در این جدول و شکل ۵ آورده شده است.

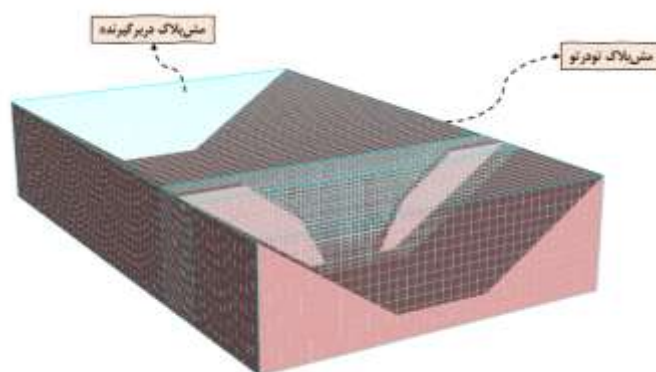
جدول ۶. تحلیل حل شبیه‌سازی مستقل از ابعاد مش

زمان اجرای شبیه‌سازی (دقیقه)	نسبت عمق به عمق نرمال بالادست	تعداد کل سلول‌ها	اندازه سلول مش در مقطع کنترل (متر)	اندازه سلول مش در کانال اصلی (متر)
۰/۵	۰/۸۹۱	۱۴۵۰۰	۰/۴	۰/۸
۰/۹	۰/۹۱۸	۳۴۰۰۰	۰/۳	۰/۶
۲/۰	۰/۹۲۹	۷۶۸۰۰	۰/۲	۰/۴
۷/۰	۰/۹۳۱	۱۵۴۰۰۰	۰/۱	۰/۲
۱۰/۰	۰/۹۳۲	۲۱۳۰۰۰	۰/۰۵	۰/۱
۳۰/۰	۰/۹۳۲	۳۱۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵



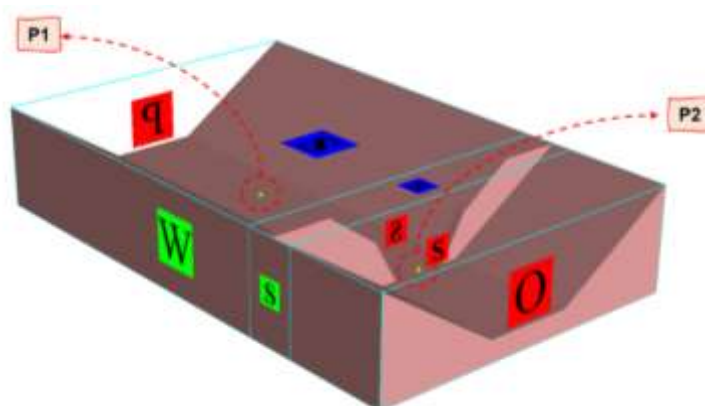
شکل ۵. نمودار الف) تغییرات زمان اجرای شبیه‌سازی و ب) تغییرات عمق در مقطع کنترل به عمق نرمال بالادست، در برابر تعداد سلول‌های شبکه

نهایتاً، برای دامنه محاسباتی، با توجه به تغییرات کم متغیر مورد ارزیابی در برابر کاهش اندازه سلول‌های شبکه، از یک مش بلاک با ابعاد مش ۰/۱ متر در هر سه جهت برای کانال اصلی و یک مش بلاک در نزدیکی شکاف کنترل دوزنقه‌ای با ابعاد ۰/۰۵ متر در نظر گرفته شد. این نوع مش بلاک را اصطلاحاً تودرتو^۱ نامیده و شبکه با اندازه سلول‌های بزرگتر را مش بلاک دربرگیرنده^۲ گویند. شکل ۶ نمایی از شبکه‌بندی انجام شده و هندسه نهایی مدل به‌ازاء حالت ۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۶. شبکه‌بندی و هندسه مسئله

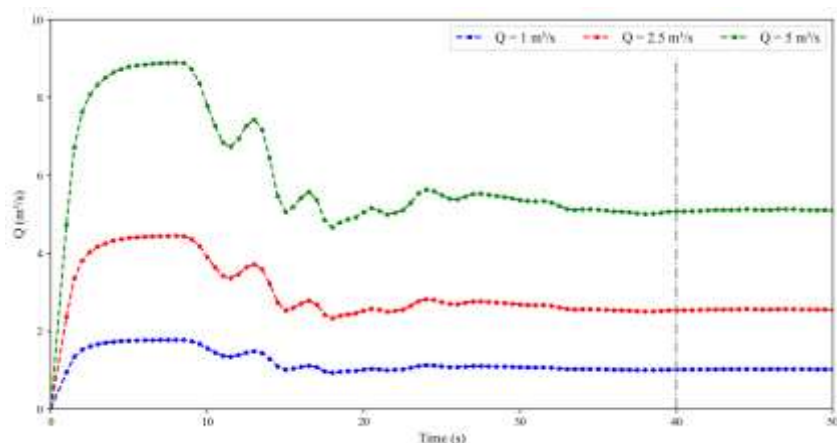
برای قسمت ورودی جریان از شرط Specified Pressure (P) و لحاظ نمودن Stagnation Pressure استفاده شد. برای شروط مرزی دیواره‌ها و کف کانال از شروط Wall (W) و Symmetry (S) بهره گرفته شد. مرز خروجی جریان نیز Outflow (O) لحاظ شد. همچنین برای تمامی مرزهای مش بلاک تودرتو از شرط Symmetry استفاده گردید. جهت پایش مشخصات جریان در محل شکاف کنترل و کانال بالادست و همچنین امکان مقایسه آن با روابط پیش گفته، از History Probe بهره گرفته شد. دو Probe با نام‌های P1 و P2 به ترتیب در کانال بالادست و در محل شکاف کنترل تعریف گردید. شکل ۷ نمایی از محل قرارگیری آن‌ها و شرایط مرزی اعمال شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۷. شرایط مرزی و محل قرارگیری Probe‌ها در دامنه محاسباتی

زمان اتمام شبیه‌سازی و ماندگاری جریان

به مدت زمانی که لازم است تا یک بسته سیال از دامنه محاسباتی عبور نماید، زمان مشخصه^۱ گویند. زمان مناسب برای ماندگاری سیستم دینامیک سیال، ۱۰ تا ۲۰ برابر زمان مشخصه است (ماروسی و همکاران، ۱۳۹۳). از تقسیم طول دامنه محاسباتی به سرعت مشخصه که همان سرعت جریان در کانال بالادست است، می‌توان زمان مشخصه را محاسبه نمود. با استفاده از روش زمان مشخصه، زمان اتمام شبیه‌سازی برابر با ۳۰۸ ثانیه بدست آمد که با توجه به ابعاد مش و طول دامنه محاسباتی استفاده از این زمان تا حدودی غیرمنطقی به نظر می‌رسد. از این‌رو، جهت برآورد تقریبی زمان ماندگاری جریان از نمودار تاریخچه زمان بدست آمده از Flux Surface مربوط به دبی جریان در بالادست شکاف کنترل بهره گرفته شد. شکل ۸ به نمایش این نمودار می‌پردازد. نظر به اینکه تغییرات دبی جریان نسبت به زمان در بالادست شکاف کنترل، از زمان مشخص شده به بعد تقریباً ناچیز است، می‌توان مدت زمان شبیه‌سازی را ۴۰ ثانیه در نظر گرفت.

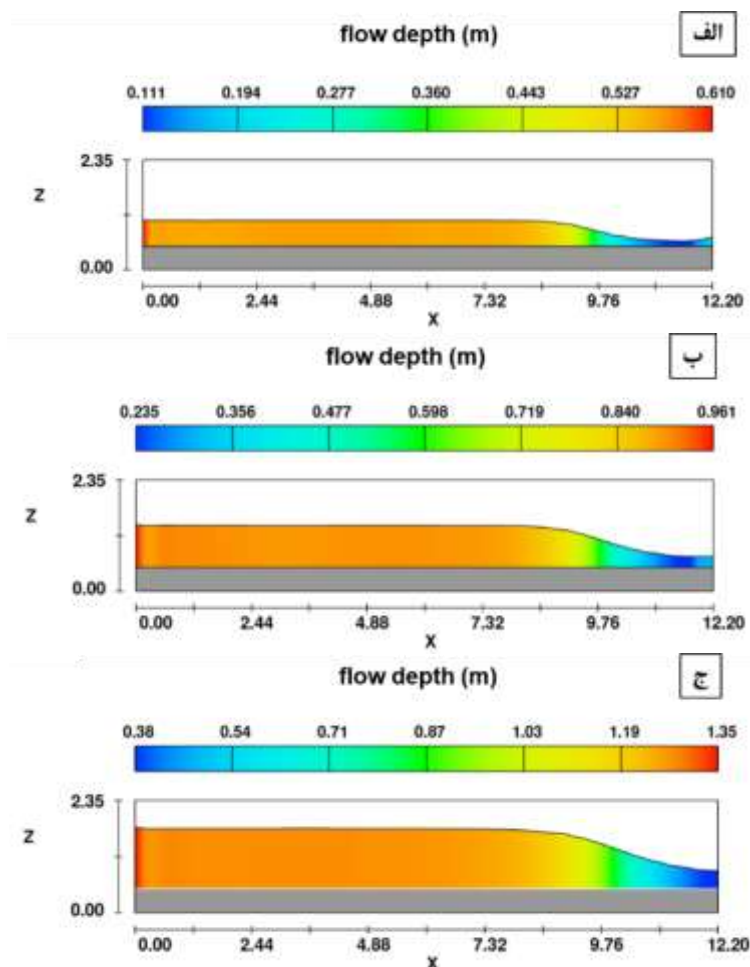


شکل ۸. تاریخچه زمانی دبی در بالادست شکاف کنترل

صحت‌سنجی روابط توسعه‌یافته

بررسی عمق جریان در بالادست شکاف کنترل

همانطور که پیش‌تر بیان شد، محاسبه ابعاد شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای به‌نحوی انجام گرفت که تنگ‌شدگی مقطع عرضی کانال در آن محل موجب افزایش سطح آب بالادست یا به اصطلاح پس زدن جریان نگردد. از این‌رو انتظار می‌رود که سازه یادشده عمق جریان در کانال بالادست را در حدود عمق نرمال حفظ نماید. شکل ۹ نیمرخ سطح آب را در دامنه محاسباتی به‌ازاء حالت‌های ۱، ۲ و ۳ نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل می‌توان دریافت که شکاف کنترل، عمق جریان در کانال دوزنقه‌ای بالادست را برای دوره خشکسالی در هر سه حالت در حدود عمق نرمال مورد انتظار حفظ نموده و با نتایج رویکرد مبتنی بر انرژی مخصوص منطبق است.



شکل ۹. نیمرخ سطح آب در حضور شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای برای حالت‌های الف (۱، ۲ و ج) ۳



جدول ۷. مقایسه عمق جریان در کانال بالادست حاصل از مدل سازی عددی با مقادیر حاصل از رابطه مانینگ

حالت هیدرولیکی	نحوه محاسبه	عمق جریان (متر)	خطای نسبی (درصد)
۱	رابطه مانینگ	۰/۵۷۴	۲/۹۶
	مدل سازی عددی	۰/۵۵۷	
۲	رابطه مانینگ	۰/۹۳۳	۴/۵۰
	مدل سازی عددی	۰/۸۹۱	
۳	رابطه مانینگ	۱/۳۲۴	۴/۳۸
	مدل سازی عددی	۱/۲۶۶	

بر اساس جدول ۷ می توان دریافت که شکاف کنترل دوزنقه ای با مشخصات هندسی حاصل از حل روابط انرژی مخصوص که با استفاده از مدل سازی عددی در نرم افزار Flow3d تحلیل شد، توانایی حفظ عمق جریان در کانال بالادست را برابر با جریان نرمال مورد انتظار دارد. مقادیر خطای نسبی حاصل از مقایسه عمق جریان در کانال بالادست حاصل از مدل سازی عددی با مقادیر حاصل از رابطه مانینگ، نشان می دهد میزان خطای نسبی کمتر از ۵ درصد بوده و با افزایش دبی، خطای موردنظر افزایش می یابد؛ به گونه ای که برای دبی ۱ مترمکعب بر ثانیه میزان خطا برابر با ۲/۹۶ بوده و با افزایش آن به ۲/۵ و ۵ مترمکعب بر ثانیه این خطا به ترتیب به ۴/۵۰ و ۴/۳۸ می رسد. بیشترین خطا در خصوص حفظ عمق جریان بالادست در حد نرمال، مربوط به دبی ۲/۵ مترمکعب بر ثانیه است.

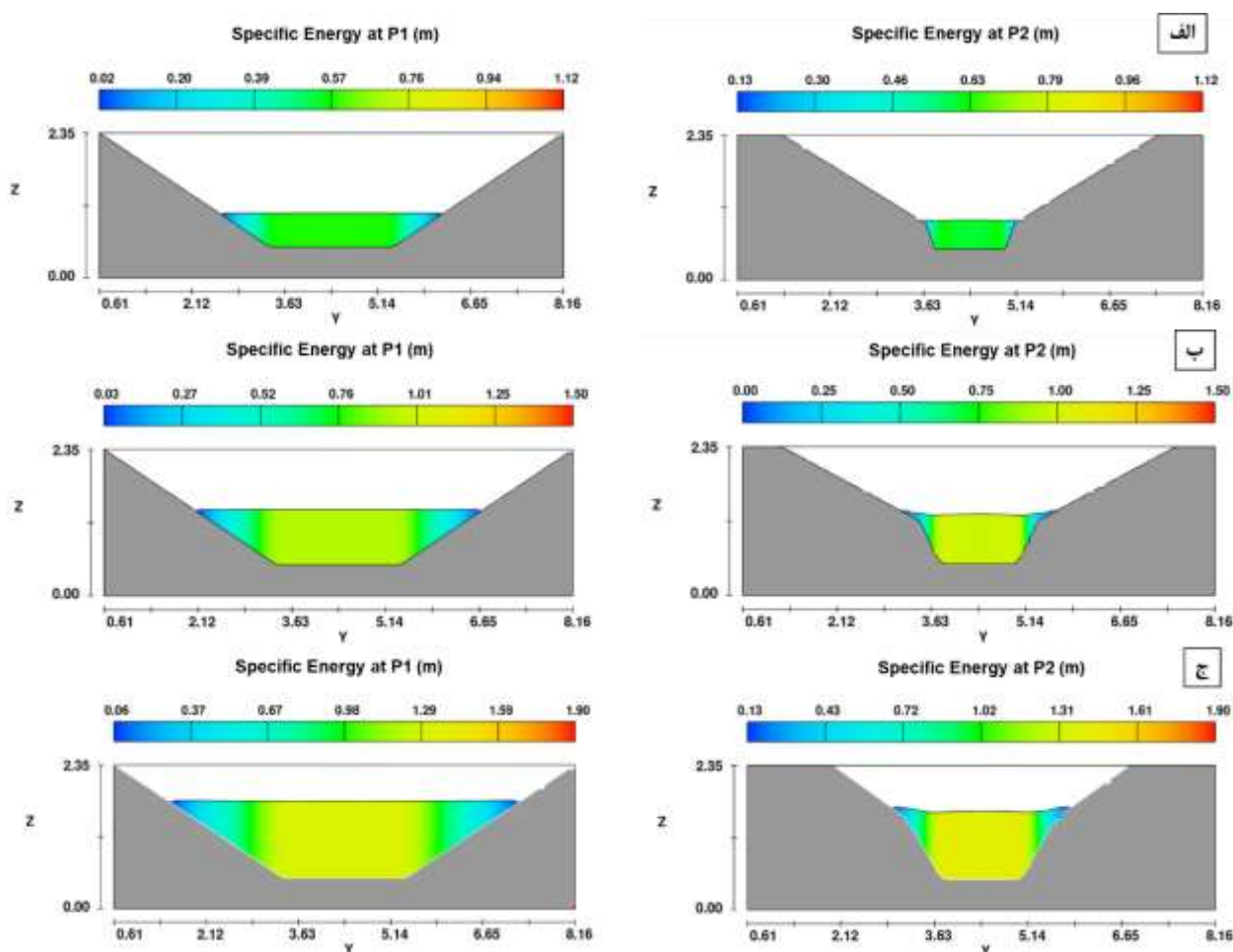
بررسی انرژی مخصوص جریان

از آنجا که در بخش های پیشین، ابعاد شکاف کنترل به نحوی تعیین گردید که انرژی مخصوص جریان در محل سازه با انرژی مخصوص جریان در کانال بالادست یکسان و برابر با مقدار بحرانی باشد، در این بخش به بررسی این موضوع پرداخته شد. در این راستا از نقاط کنترل P1 و P2 بهره گرفته شد. جدول ۸ مقادیر انرژی مخصوص در نقاط یادشده را به ازاء هر سه حالت مورد بررسی گزارش می نماید. همچنین نمایش گرافیکی مقادیر انرژی مخصوص در نقاط پیش گفته در شکل ۱۰ انجام گرفته است.

مطابق جدول ۸ و شکل ۱۰، انرژی مخصوص جریان در شکاف کنترل علاوه بر اینکه با انرژی مخصوص جریان در کانال بالادست اختلاف چندانی ندارد، با مقدار مورد انتظار بر اساس رابطه ۲ نیز انطباق داشته و نشان از عملکرد مناسب روابط توسعه یافته برای محاسبه ابعاد سازه یادشده می دهد. با مشاهده داده های جدول ۸ می توان دریافت که اختلاف مقادیر انرژی مخصوص در محل شکاف کنترل و کانال بالادست، کمتر از ۵ درصد بوده و با افزایش دبی افزایش می یابد؛ به طوری که در دبی ۱ مترمکعب بر ثانیه این مقدار برابر با ۳/۲۰ درصد و در دبی های ۲/۵ و ۵ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب به ۴/۱۲ و ۳/۸۵ می رسد. بیشترین میزان خطا مربوط به دبی ۲/۵ متر مکعب بر ثانیه است.

جدول ۸. مقایسه انرژی مخصوص در نقاط کنترل جریان

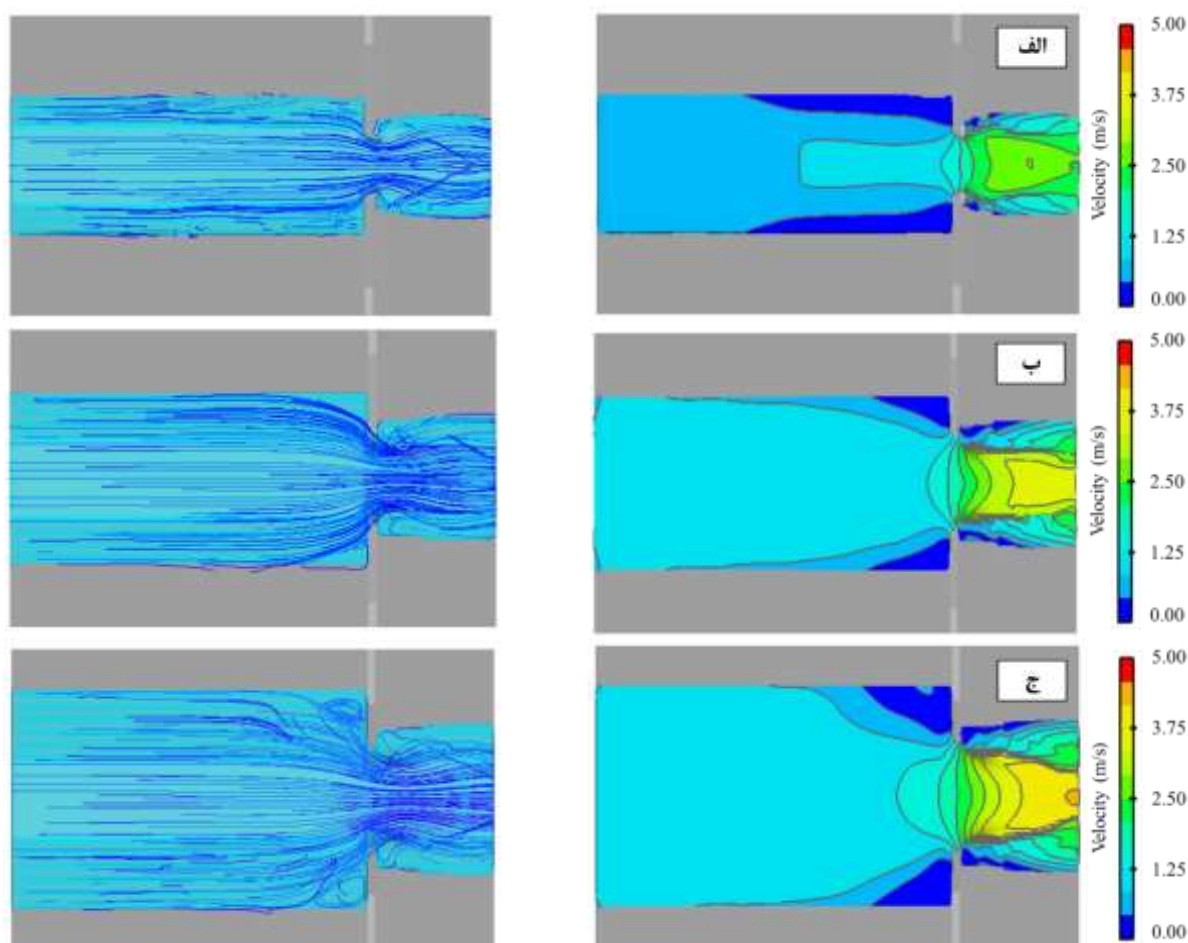
حالت هیدرولیکی	محل اندازه گیری در مدل عددی	انرژی مخصوص (متر)	خطای نسبی (درصد)
۱	P1	۰/۵۷۷	۳/۲۰
	P2	۰/۵۹۶	
۲	P1	۰/۹۳۰	۴/۱۲
	P2	۰/۹۷۰	
۳	P1	۱/۳۲۴	۳/۸۵
	P2	۱/۳۷۷	



شکل ۱۰. مقایسه گرافیکی انرژی مخصوص جریان در نقاط P1 و P2 برای حالت‌های هیدرولیکی الف (۱، ب) ۲ و ج) ۳

بررسی میدان سرعت و خطوط جریان

شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-ج میدان‌های توزیع سرعت و خطوط جریان را در محدوده حل نمایش می‌دهند. در ستون سمت چپ، خطوط جریان و در ستون سمت راست، کانتورهای سرعت در هر یک از سناریوها نشان داده شده‌اند. مطابق راهنمای رنگ‌بندی، تغییر رنگ از آبی به قرمز نشان‌دهنده افزایش سرعت جریان می‌باشد. در هر یک از حالات، الگوی جریان از نسبتاً منظم به آشفته تغییر می‌یابد. همچنین، به دلیل تشکیل گردابه‌های ناشی از وجود سازه و در نزدیکی دیواره‌ها، سرعت جریان در این نواحی نزدیک به صفر خواهد بود. از سویی، با دقت در شکل‌های یادشده می‌توان دریافت با افزایش دبی جریان، سرعت در پایین‌دست سازه شکاف کنترل نیز افزایش یافته است. علاوه بر بالادست سازه پیش‌گفته، گردابه‌های جریان در پایین‌دست سازه به‌ازاء وقوع هر یک از دبی‌ها بوجود آمده که در شکل‌ها قابل مشاهده می‌باشد. وجود گردابه‌ها در محل سازه‌های هیدرولیکی می‌تواند به مشکلاتی از قبیل رسوبگذاری در محل گردابه، ایجاد اختلال در عملکرد و کاهش عمر سازه و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری منجر گردد. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان، ابعاد گردابه ایجادشده افزایش یافته و تا حدودی بر روی خطوط جریان عبوری از روی شکاف کنترل تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۱. میدان توزیع سرعت و خطوط جریان در دامنه محاسباتی شبیه‌سازی به‌ازاء دبی‌های الف) ۱، ب) ۲/۵ و ج) ۵ متر مکعب بر ثانیه

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، طراحی و تحلیل هیدرولیکی شکاف کنترل مرکب دوزنقه‌ای در جریان زیربحرانی انجام گرفت. به عبارت دیگر، در این مطالعه، بر اساس معادلات انرژی مخصوص، روابط مورد نیاز برای طراحی شکاف کنترل پیشنهادی توسعه داده شد. همچنین عملکرد آن با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی در نرم‌افزار Flow3D مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، به مقایسه عمق جریان در بالادست شکاف کنترل حاصل از مدل‌سازی عددی و رابطه مانینگ پرداخته شد. همچنین، انرژی مخصوص جریان در محل سازه با انرژی مخصوص در کانال بالادست مقایسه گردید. نهایتاً، توزیع سرعت و مسیر خطوط جریان متأثر از وجود سازه در کانال دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. روابط به‌گونه‌ای ارائه شد که در شرایط مختلف هیدرولیکی، جریان در کانال بالادست دچار پس‌زدگی نشود و عمق آب در حدود عمق نرمال حفظ گردد. بدین منظور سه حالت هیدرولیکی در شرایط جریان زیربحرانی در نظر گرفته شد به نحوی که بخش زیرین سازه به‌ازاء دبی‌های در بازه ۱۰ تا ۵۰ درصد دبی طراحی و بخش رویین برای دبی‌های بیش از ۵۰ درصد دبی طراحی وارد عمل گردد. بررسی عمق جریان در بالادست شکاف کنترل حاصل از مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با مقدار مورد انتظار حاصل از رابطه مانینگ، نشان داد خطای محاسبه عمق به‌ازای تمامی دبی‌های مورد بررسی کمتر از ۵ درصد بوده و با افزایش دبی مقدار خطا نیز افزایش می‌یابد. همچنین، بیشترین میزان خطا مربوط به دبی ۲/۵ متر مکعب بر ثانیه بود.

بررسی انرژی مخصوص جریان نیز در محل شکاف کنترل و مقایسه آن با انرژی مخصوص در کانال بالادست نشان داد، جریان عبوری از روی شکاف کنترل میزان انرژی مخصوص یکسانی با جریان موجود در کانال بالادست داشته که با فرضیات مسئله نیز همخوانی دارد. همانند عمق جریان، خطای حاصل از مقایسه انرژی مخصوص در دو مقطع یادشده در بازه‌ی ۳ تا ۵ درصد است و افزایش دبی موجب افزایش این خطا می‌گردد. همچنین، بیشترین میزان خطا مربوط به دبی ۲/۵ متر مکعب بر ثانیه است.

در انتها، مقادیر سرعت در محل‌های مختلف کانال دوزنقه‌ای متأثر از وجود شکاف کنترل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد

که در پایین دست سازه مورد نظر، سرعت جریان افزایش یافته که ناشی از تنگ شدگی عرضی مقطع است. گفتنی است از آنجاکه طراحی ابعاد شکاف کنترل با فرض عبور جریان از روی سازه با حداقل انرژی صورت می گیرد، انتظار می رود شکاف کنترل، سرعت را به گونه ای تعدیل نماید که در صورت اتصال کانال به سازه ای همچون شیب شکن، جریان از اغتشاش کمی برخوردار باشد. بررسی الگوی جریان در میدان حل نیز نشان می دهد، خطوط جریان در هنگام عبور از شکاف کنترل همگرا شده و پس از آن به صورت واگرا به مسیر خود ادامه می دهند. وجود تنگ شدگی عرضی ناگهانی در محل سازه موجب ایجاد گردابه هایی در بالادست و پایین دست شکاف کنترل می گردد که می تواند موجب ته نشینی آوردهای رسوبی از بالادست در محل دیواره های سازه گردد.

به طور کلی، نتایج نشان داد که شکاف کنترل پیشنهادی توانایی حفظ عمق نرمال و تنظیم سطح آب در کانال بالادست را به ازای دبی های مختلف در شرایط زیر بحرانی دارد. صحت نتایج و همچنین عملکرد سرریز پیشنهاد شده توسط مدل سازی سه بعدی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که با خطایی کمتر از ۵ درصد، تطابق خوبی را با نتایج معادلات یک بعدی حاصل از انرژی مخصوص نشان می دهد.

"هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد."

منابع

- طاهری طلاوری، طوبی؛ سجادی، سیدمحسن؛ احدیان، جواد و عزیزی نادیان، حسین (۱۴۰۳). بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۴(۳)، ۴۰-۶۰.
- سرکمریان، سعید و احدیان، جواد (۱۳۹۶). مدل سازی ریاضی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل عددی ANSYS-CFX. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۳(۱)، ۴۳-۵۶.
- قاسم زاده، فیروز و کوچک زاده، صلاح (۱۳۹۳). طراحی فلو دوزنقه ای اندازه گیری جریان با تاج هم تراز بستر کانال. *مجله پژوهش آب/ایران*، ۸(۱۵)، ۱-۱۰.
- قاسم زاده، فیروز و کوچک زاده، صلاح (۱۴۰۲). شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در Flow3D. چاپ سوم. تهران: انتشارات نوآور.
- کرم دخت بهبهانی، محمد؛ سجادی، سیدمحسن و احدیان، جواد (۱۴۰۳). بررسی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه در حالت جریان آزاد و مستغرق توسط نرم افزار Flow3D. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب/ایران*، ۱۴(۵۶)، ۳۲-۱۹.
- ماجدی اصل، مهدی؛ جهان پیمان، محمدحسین؛ خداپناه راد، پیمان؛ کوهدرق، مهدی و باقرزاده، محمد (۱۴۰۲). بررسی عددی جریان عبوری از سرریزهای مستطیلی مرکب لبه تیز دارای زاویه در پلان. *پژوهش های زیرساخت های عمرانی*، ۹(۲)، ۶۵-۵۱.
- ماروسی، مرتضی؛ روشن، رضا و سرکرده، حامد (۱۳۹۳). *تحلیل و طراحی با نرم افزار Flow3D*. چاپ اول. تهران: انتشارات فدک ایستاتیس.
- مبارک، فرانک؛ سجادی، سیدمحسن؛ احدیان، جواد و زینی وند، مهدی (۱۴۰۱). مدل سازی عددی اثر کشیدگی بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه سالونی بیضوی. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۲(۲)، ۲۷۵-۲۶۴.
- محمودی، میلاد و وطن خواه، علیرضا (۱۳۹۹). فلو دوزنقه ای اندازه گیری جریان با دیواره های مخروطی و استوانه ای شکل. *تحقیقات آب و خاک/ایران*، ۵۱(۷)، ۱۶۵۱-۱۶۳۷.
- نوروزی، سحر و احدیان، جواد (۱۳۹۶). بررسی تأثیر تیغه های گرداب شکن ۴۵ درجه بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری با استفاده از مدل Flow3D. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۰(۱)، ۱۹۱-۲۰۰.

REFERENCES

- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (2024). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642.
- Arora, J. S. (2012). *Introduction to optimum design*. Iowa: Elsevier.
- Askari, Z., Khodashenas, S. Z., Esmaili, K., Golian, M., Ostad-Ali-Askari, K., Singh, V. P. and Dalezios, N. R. (2019). Numerical analysis of hydraulic flow characteristics in prismatic compound channels using Flow3D software. *American Research Journal of Civil and Structural Engineering*, 3(1), 1-10.
- Ayoob, N. S., Hamaad, A. M. (2022). Numerical simulation for flow over a broad-crested weir using Flow-3D program. *Civil Engineering and Architecture*, 10(5), 2157-2171.
- Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Valles-Moran, F. J., Lopez-Jimenez P. A. (2016). Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322-335.



- Das, A. (2011). Critical channel dimensions for open-channel transition design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 137(11), 735-743.
- Ghasemzadeh, F., & Kouchakzadeh, S. (2014). Design of trapezoidal flow measurement flume with crest level aligned with channel bed. *Iranian Water Research Journal*, 8(15), 1-10, (In Persian).
- Ghasemzadeh, F., & Kouchakzadeh, S. (2023). *Simulation of hydraulic problems in Flow3D*. Third edition, Tehran: Noavar publishing company, (In Persian).
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Hazi, M. A., Chadee, A. A., Nadian, H. A., & Kirby, J. T. (2024). Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structural (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, 21, 101829.
- Karamdokht Behbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J. (2024). Hydraulic investigation of the flow through multiple rectangular Lopac gate in free flow and submerged mode by Flow3D software, *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 14(4), 19-32, (In Persian).
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2021). Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate*. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1145-1154.
- Kim, B. J., Hwang, J. H., Kim, B. (2022). Flow-3D model development for the analysis of the flow characteristics of downstream hydraulic structures. *Sustainability*, 14, 1-17.
- Lee, J., Chan, H., Huang, C and Leu, J. (2012). Experiments on hydraulic relations for flow over a compound sharp-crested weir. *International Journal of Physical Sciences*, 7(14), 2229-2237.
- Majedi-Asl, M., Jahanpeima, M., Khodapanah-Rad, P., Kouhdaragh, M., Bagherzadeh, M. (2023). Numerical investigation of flow over the rectangular compound sharp-crested weir at different angles in plan. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 51-65, (In Persian).
- Marosi, M., Roshan, R. & Sarkardeh, H. (2014). *Analysis and design by Flow3D*. First edition, Tehran: Fadakbook publishing company, (In Persian).
- Mobarak, F., sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Zeynivand, M. (2022). Numerical modeling of the effect of elliptical elongation on the hydraulic performance of an elliptical Lopac gate, *Water and Irrigation Management*, 12(2), 263-275, (In Persian).
- Mohammadi, M. & Vatankhah, A. (2020). Flow measurement flume with cylindrical and conical walls. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7), 1637-1651, (In Persian).
- Nouroozi, S., Ahadiyan, J. (2017). Effect of Vortex Breaker Blades 45 Degree on Discharge Coefficient of Morning Glory Spillway Using Flow-3D, *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), 191-200, (In Persian).
- Sarkamaryan, S. & Ahadiyan, J. (2020). Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model, *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(1), 43-56, (In Persian).
- Shahabi, M., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., Narimousa, M., Katopodis, C., & Nadian, H. A. (2022). Numerical study of the effect of a V-shaped weir on turbulence characteristics and velocity in V-weir fishways. *River Research and Applications*, 39(1), 21-34.
- Shivapur, A., Mulangi, R., & Govardhan Swamy H. (2009). Use of inclined compound triangular notch-weir to improve discharge range, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 15(3), 87-96.
- Taghavi, M., Ghodousi, H. (2015). Simulation of flow suspended load in weirs by using Flow3D model. *Civil Engineering Journal*, 1(1), 37-49.
- Taheri Talavari, T., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, J. and Azizi Nadian, H., (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic lopac gates with Flow3D software. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 40-60, (In Persian).
- Vatankhah, A.R. (2013a). Limiting dimensions for trapezoidal channels and control notches (design aid). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(4), 850-857.
- Vatankhah, A.R. (2013b). Multiple critical depth occurrence in two-stage cross sections: effect of side slope change. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*, 17(4), 850-857.
- Waterbeheer, S. L. E. (2002). *Design of open channels and hydraulic structures*. Netherlands: TU Delft University.