

Laboratory investigation of the effect of obstruction caused by a central baffle structure on the flow pattern in a rectangular compound channel under various flow regimes

Mohammad Khosravi-Hamole¹, Elham Ghanbari-Adivi^{2*}, Ali Raeisi³, GholamReza Shams Ghahfarokhi⁴, Nariman Mehranfar⁵

Extended Abstract

Introduction:

Through laboratory experiments, this study investigated the effects of a central baffle structure on the hydraulic characteristics of flow within a rectangular compound channel under two distinct hydraulic regimes: subcritical and supercritical. The primary objective was to analyze and evaluate the influence of flow obstruction caused by the central baffle on the flow pattern and its key parameters. Unlike previous research which predominantly focused on channels with simple cross-sections, this study employed a rectangular compound channel equipped with a central baffle. Thereby the current research simulated more realistic conditions typically encountered in hydraulic engineering systems such as water conveyance channels, rivers, and water resources management structures. A deeper understanding of flow behavior in these more complex environments provided the scientific basis necessary for the optimal design of baffled structures, leading to improved hydraulic performance, reduced erosion, and enhanced efficiency of water systems. Focusing on both subcritical and supercritical regimes enabled a comprehensive investigation of flow pattern variations and hydraulic parameters under different discharge and energy conditions.

Materials and Methods:

Experiments were conducted in the hydraulic laboratory of Shahrood University using a rectangular compound channel equipped with a central baffle at a 1:50 scale. The flume measured 20 meters in length, 60 centimeters in width, and 60 centimeters in height, featuring transparent fiberglass walls and a metal bed. The experimental channel and central baffle were constructed with precise dimensions and carefully installed in the flume. The total length of the channel and the characteristics of its compound cross-section complied with the experimental design. The central baffle, with specified geometric dimensions, glass material, and accurately defined installation location along the channel, was fixed using clamps and connectors to ensure stability without vibration or displacement. The water supply system and return pathway to the reservoir were configured to maintain steady selected discharges. The experimental program included five subcritical and five supercritical discharges. Three water-depth measurement points were designated for each test: the beginning of the baffle, the center, and the end. For each discharge, water depths at these three points were recorded to examine depth distribution along the channel and the effect of the baffle on the water surface profile. In this research, parameters such as discharge, flow depth, average velocity, Froude number, and energy loss were accurately measured and recorded in the presence of the central baffle across different discharge ranges for both subcritical and supercritical regimes. The experiments were organized into two distinct categories based on flow regime: the subcritical regime (Froude number $Fr < 1$) with discharges ranging from 0.01057 to 0.025496 m³/s, and the supercritical regime ($Fr > 1$) with higher discharges ranging from 0.04896 to 0.108 m³/s. The central baffle, designed with standard geometric dimensions, was installed at a designated location within the channel. Measurements were performed using precise hydrometric instruments, including an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for velocity measurements and water surface level sensors.

1- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.

2- Associated Professor, Department of Water Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

4- Associated Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

5- Ph.D. student of hydraulic structures, Department of Civil, Mining and Geology, Faculty of Polytechnique, Montreal University, Quebec, Canada

* Corresponding Author: ghanbariadi@sku.ac.ir

Received: 2026/04/14

Accepted: 2026/06/16

Results and Discussions:

The results of this study revealed the significant impact of the central baffle structure on the flow pattern within the rectangular compound channel across both hydraulic regimes. In the subcritical regime, as the discharge increased from 0.01057 to 0.025496 m³/s, the flow depth increased proportionally, indicating an increase in the total flow energy with higher discharge. The most significant depth increase occurred in the upstream regions due to backwater effects, while this trend was attenuated in shallower or lateral regions (at the outlet and the throat). In this regime, the baffle induced a backwater effect ($h_1 > h_3$) and substantial hydraulic resistance, resulting in significant energy losses ranging from 74.2% to 77.9%. This energy dissipation was primarily attributed to form drag, intense turbulence, and local friction around the baffle, demonstrating its effectiveness in dissipating energy in low-velocity flows. The Froude number in this regime ranged from 0.140014 to 0.255311 ($Fr < 1$), and its mild increase with discharge indicated flow stability in the presence of the baffle. In contrast, in the supercritical regime, as the discharge increased from 0.04896 to 0.108 m³/s, despite the increase in depth and velocity, energy dissipation by the baffle decreased significantly (25.73% to 35.08%), and the flow tended toward more stable conditions. Phenomena such as standing waves and flow separation were observed in this regime. The Froude number ranged from 1.098702 to 1.25347 ($Fr > 1$) and decreased with increasing discharge. Velocity profile analysis indicated an intensification of the three-dimensional nature of the flow, increased velocity around the baffle, vortex formation downstream, and, ultimately, increased energy dissipation. In the supercritical regime, the channel was capable of passing much higher discharges, and the accelerating effect of the throat was less pronounced than in the subcritical regime. Downstream of the baffle, flow separation induced recirculation regions or “dead zones”, characterized by low velocities or reverse flow (vortices). These were evidenced by velocity profiles as significant velocity reductions or vector reversals at the structure’s exit. These zones play a crucial role in energy dissipation and increased turbulence. Overall, changes in the velocity gradient and increased turbulence led to the transformation of velocity profiles and an increase in the system’s total energy loss.

Conclusion:

This research clearly demonstrated that the central baffle structure exerts significant hydraulic effects on flow in rectangular compound channels. In the subcritical regime, the structure induces increased flow depth and high energy dissipation, whereas in the supercritical regime, it acts as a moderator and stabilizer, resulting in lower energy losses. Collectively, these effects contribute to increased depth, reduced average velocity, and a lower Froude number, proving effective in controlling high velocities and mitigating downstream erosion. The findings of this study provide a deeper understanding of energy dissipation mechanisms and flow behavior in the presence of hydraulic obstructions, offering a scientific basis for the optimal design of structures aimed at flow control and erosion reduction.

Keywords: Central Baffle, Energy Dissipation, Flow Hydraulics, Rectangular Compound Channel, Subcritical, Supercritical

Citation:

Khosravi-Hamole.M., Ghanbari-Adivi.E., Raeisi.A., Shams Ghahfarokhi.Gh., Mehranfar.N.,2026. Laboratory investigation of the effect of obstruction caused by a central baffle structure on the flow pattern in a rectangular compound channel under various flow regimes. Iranian Water Research Journal, 20(62), pp. 91-90. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14976.2640>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



بررسی آزمایشگاهی اثر انسداد ناشی از سازه بافل مرکزی بر الگوی جریان در یک کانال مرکب مستطیلی تحت رژیم‌های مختلف جریان

محمد خسروی حموله^۱، الهام قنبری عدیوی^{۲*}، علی رئیسی^۳، غلامرضا شمس قهفرخی^۴، نریمان مهرانفر^۵

چکیده:

این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی اثر بافل مرکزی با درصد انسداد ۳۳/۳ درصد بر رفتار هیدرولیکی جریان در یک کانال مرکب مستطیلی تحت دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی می‌پردازد. هدف اصلی، تبیین تأثیر این سازه بر مشخصات جریان با تمرکز بر پارامترهای بی‌بعد شامل عدد فرود، تغییرات پروفیل سطح آب، توزیع سرعت و نرخ استهلاک انرژی است. نتایج نشان داد که در رژیم زیربحرانی، با افزایش دبی، عمق جریان افزایش می‌یابد، اما ورود جریان به ناحیه تنگ‌شدگی بافل موجب کاهش نسبت h/b ، شتاب‌گیری محسوس جریان، افت موضعی سطح آب و افزایش عدد فرود تا نزدیکی شرایط بحرانی در مقطع میانی می‌شود. در این رژیم، بافل مرکزی از طریق فرم‌درگ، تلاطم شدید، تشکیل گردابه‌ها و افت موضعی، استهلاک انرژی بالایی در محدوده ۷۴/۷۲ تا ۷۸ درصد ایجاد می‌کند و به‌عنوان یک مستهلک‌کننده قوی انرژی عمل می‌نماید. در مقابل، در رژیم فوق‌بحرانی، با وجود افزایش عمق و سرعت جریان با افزایش دبی، اثر بافل بر پارامترهای هیدرولیکی محدودتر و پایدارتر است. در این حالت، عدد فرود در تمام مقاطع بزرگ‌تر از یک باقی می‌ماند، اما با افزایش دبی به عدد یک نزدیک‌تر می‌شود. همچنین، با وجود کاهش موضعی نسبت h/b در ناحیه میانی، ماهیت پرنرژی جریان مانع از افت شدید سطح آب و شتاب‌گیری قابل‌توجه می‌شود. درصد استهلاک انرژی در این رژیم در محدوده ۲۵/۷۳ تا ۳۵ درصد قرار دارد که به‌مراتب کمتر از رژیم زیربحرانی است. این اختلاف عمدتاً ناشی از حفظ انرژی جنبشی جریان، غوطه‌وری نسبی سازه در دبی‌های بالاتر، جدایش جریان، تلاطم موضعی، امواج ایستایی و احتمال تشکیل پرش هیدرولیکی موضعی است. مقایسه عدد فرود نشان داد که این پارامتر در رژیم زیربحرانی در بازه ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ قرار داشته و با افزایش دبی، روندی افزایشی اما همچنان کمتر از یک دارد؛ در حالی که در رژیم فوق‌بحرانی در بازه ۱/۰۹ تا ۱/۲۵ بوده و با افزایش دبی کاهش یافته و به شرایط بحرانی نزدیک می‌شود. در مجموع، هیدرولیک جریان در حضور بافل مرکزی به‌شدت تابع رژیم جریان حاکم است؛ به‌طوری‌که در جریان زیربحرانی، نقش غالب آن استهلاک مؤثر انرژی و در جریان فوق‌بحرانی، نقش اصلی آن تعدیل سرعت و کاهش شدت انرژی جنبشی در پایین‌دست است. این یافته‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های کنترل انرژی در کانال‌های مرکب مشابه فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، بافل مرکزی، زیربحرانی، فوق‌بحرانی، کانال مرکب مستطیلی، هیدرولیک جریان

ارجاع: خسروی حموله، م، قنبری عدیوی، ا، رئیسی، ع، شمس قهفرخی، غ، نریمان مهرانفر، ن. ۱۴۰۵. بررسی آزمایشگاهی اثر انسداد ناشی از سازه بافل مرکزی بر الگوی جریان در یک کانال مرکب مستطیلی تحت رژیم‌های مختلف جریان. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۲)، صص. ۹۱-۱۱۲.

<https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14976.2640>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شهرکرد

۵- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، معدن و زمین‌شناسی، دانشکده پلی‌تکنیک، دانشگاه مونترال، کانادا

* نویسنده مسئول: ghanbariadi@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵

مقدمه

مدیریت جریان در مجاری روباز، به‌ویژه در راستای مقابله با چالش‌هایی نظیر سیلاب و فرسایش، از ارکان اصلی مهندسی رودخانه و حفظ پایداری سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود. در این میان، استفاده از سازه‌های بافل (Baffle structures) به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کنترل و بهینه‌سازی الگوهای جریانی، مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این سازه‌ها که معمولاً شامل اشکال هندسی یا ردیفی از ستون‌ها در مسیر جریان می‌باشند، با ایجاد انقباض و انسداد، نقش کلیدی در کاهش سرعت، استهلاک انرژی و افزایش عمق آب در بالادست ایفا می‌کنند (Alwan and Azzubaidi, 2022; Ubing et al., 2017; Ubing, 2015). سازه‌های بافل فراتر از صرفاً استهلاک انرژی بوده و شامل اهدافی نظیر اندازه‌گیری دبی (از طریق رابطه دبی-اشل) و مدیریت پرش هیدرولیکی نیز می‌شود. حضور بافل‌ها با تغییر در توزیع سرعت، فشار و الگوی جریان در مجاورت سازه، به‌طور مستقیم بر فرآیندهای رسوب‌گذاری و فرسایش بستر و جداره‌ها اثرگذار است؛ به‌گونه‌ای که بافل مرکزی می‌تواند موجب تمرکز یا پخش جریان در کانال شود. لذا شناخت دقیق تغییرات هیدرولیکی ناشی از این سازه‌ها، برای بهبود عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی، کاهش مخاطرات سازه‌ای و ارتقای مدیریت منابع آب، اهمیت پژوهشی و کاربردی فراوانی دارد (Khosravi-Hamouleh and Ghanbari Adivi, 2026; Ghasemzadeh and Kouchakzadeh, 2014). تحقیقات در این زمینه را می‌توان به دو دسته کاربرد بافل‌ها در اندازه‌گیری جریان و بررسی مکانیسم‌های هیدرولیکی و رفتار سیال در مواجهه با سازه‌های کنترلی، طبقه‌بندی کرد. مطالعات متعددی به بررسی و تحلیل کاربردهای مختلف سازه بافل در مجاری روباز پرداخته‌اند:

Carollo et al. (2016) فلوم‌های SMBF را به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری غیرمستقیم دبی بررسی کردند. این فلوم‌ها با انقباض کانال از طریق نصب دو نیم‌استوانه روی دیواره‌های مقطع مستطیلی ساخته می‌شوند. آن‌ها یک معادله جدید برای تخلیه فلوم SMBF به‌صورت نظری استنتاج و سپس با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره کردند. اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از یک فلوم SMBF با نسبت انقباض ۰/۵ نیز انجام شد و برای بررسی رابطه جدید مرحله-تخلیه به کار رفت. (Samani 2017) با استفاده از

مفاهیم جریان بحرانی، یک معادله کلی برای کانال‌های روباز پیشنهاد کرد که با قرار دادن ستون‌های عمودی در مسیر جریان و ایجاد انقباض، قابلیت کاربرد برای مجراهای مستطیلی، دوزنقه‌ای و دایره‌ای را دارد. این معادله بدون نیاز به ضرایب کالیبراسیون متعدد و بدون توجه به نسبت انقباض و شیب جانبی قابل استفاده است. در پژوهش Bijankhan and Ferro (2019)، یک فلوم با بافل مرکزی مثلثی با زاویه راس ۷۵ درجه مورد مطالعه قرار گرفت. فرمول نظری دبی با بهره‌گیری از قضیه باکینگهام و فرضیه خود شباهت استنتاج و با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره شد، که نسبت انسداد را به‌عنوان عامل تمایز بین رژیم‌های جریان آزاد و غوطه‌ور معرفی کرد. (Bijankhan et al. 2022) ویژگی‌های هیدرولیکی فلوم بافل مرکزی مثلثی (TCB) را با آزمایش‌های متعدد بررسی کردند. نسبت انقباض ۰/۳۹، نسبت ارتفاع کف فلوم به عرض گلو و همچنین شیب ورودی برای نسبت انقباض کمتر از ۰/۳۹ تأثیری بر دبی و ظرفیت جریان نداشت. برای نسبت‌های بالاتر، ظرفیت تخلیه افزایش یافت و نتایج آزمایشگاهی با داده‌های میدانی تأیید و توصیه‌های کاربردی ارائه گردید. (Ghasemi and Vatankhah 2024) بر اهمیت اندازه‌گیری دقیق دبی در کانال‌های آبیاری تأکید کردند. آن‌ها فلوم ساده‌ای با دیواره‌های مثلثی همگرا برای شرایط جریان آزاد معرفی کردند که هزینه کم و نصب و نگهداری ساده‌ای دارد. رابطه دبی با تحلیل ابعادی استنتاج و با داده‌های تجربی کالیبره شد. معادله پیشنهادی خطای نسبی ۱/۶۶ درصد و برای شرایط جریان آزاد و غوطه‌ور خطای مطلق کمتر از ۳/۴۴ درصد دارد. این فلوم به‌دلیل سادگی و دقت بالا، برای کاربردهای عملی مناسب است.

Irzooki et al. (2005) پژوهشی با هدف ارزیابی عملکرد هیدرولیکی بلوک‌های مانع با هندسه‌های اصلاح‌شده در حوضچه آرامش انجام دادند. در این مطالعه، هفت پیکربندی مختلف برای بلوک‌ها (شامل برش‌های افقی و عمودی با زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه و همچنین مقطع نیمه‌استوانه‌ای) مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های آن‌ها نشان داد که بلوک‌های مانع اصلاح‌شده، در مقایسه با بلوک‌های استاندارد، کارایی به‌مراتب بالاتری در استهلاک انرژی (۸۰/۶۲ درصد بهبود عملکرد) و کاهش طول پرش هیدرولیکی (۳۷/۵ درصد بهبود) دارند؛ هرچند این تغییرات هندسی به افزایش نیروی پسای وارد بر بلوک‌ها منجر می‌شود. در شرایط هیدرولیکی یکسان، بلوک‌های

زبری بررسی شد. از بلوک بافل استاندارد با ارتفاع‌های برابر با ۳، ۴/۵ و ۶ سانتی‌متر استفاده شد که در سه پیکربندی مختلف، دو خطی، چهار خطی و کاملاً زیر قرار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر سرعت تحت تأثیر افزایش ارتفاع بلوک‌های بافل و افزایش تعداد خطوط المان‌های زبری قرار می‌گیرند. پیکربندی چهار خطی با کاهش سرعت در نزدیکی کف در مقایسه با پیکربندی‌های دو خطی و کاملاً زیر به ترتیب حدود ۵۰ و ۱۰ درصد مؤثرتر بود. مقادیر سرعت در نزدیکی سطح آزاد در مواردی با بلوک‌های مانع با ارتفاع ۶ سانتی‌متر یا پیکربندی کاملاً زیر، بسیار بیشتر از سایر موارد و حدود ۱۰ تا ۵۰ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، در همه موارد، ارتفاع زبری ۶ سانتی‌متر در کاهش سرعت در نزدیکی بستر، نسبت به سایر ارتفاع‌های زبری، حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد مؤثرتر است. Ghaderi et al. (2022) به منظور تعیین پیکربندی بهینه بافل‌های (موانع) شکل بر ویژگی‌های هیدرولیکی که در یک راه ماهی استفاده شدند، سه نوع آرایش با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در میان این سه پیکربندی، با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف، چیدمان معکوس بافل‌های شکل با ۶۸/۳ درصد پس‌زدگی آب و همچنین ۶۱ درصد نرخ اتلاف انرژی، بهترین عملکرد را داشت.

Khosravi et al., (2026) در پژوهشی به بررسی اثر انسداد ناشی از بافل مرکزی در مجاری روباز با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب هندسه مرکب و حضور بافل، از طریق تولید گردابه‌های بزرگ و تغییرات ناگهانی در پروفیل‌های سرعت و فشار، منجر به بازتوزیع تنش برشی و ایجاد نواحی جریان کم‌سرعت در پایین‌دست می‌شود که در نهایت کارایی کنترل انرژی را بهبود می‌بخشد.

Qasim et al. (2023) تأثیر حضور بافل‌ها (مثلی و زاویه‌دار) را در سیستم پایین‌دست سرریز بررسی کردند. آن‌ها فاصله‌ها و جهت‌های مختلف نصب بافل‌ها را مطالعه کرده و بر تغییرات عدد فرود، عدد رینولدز، دبی، ضریب دبی، عمق آب پایین‌دست و راندمان سیستم تمرکز کردند. نتایج نشان داد که تعداد بافل‌ها تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان دارد و مقاومت جریان را افزایش می‌دهد.

Djunur et al., (2024) تأثیر زاویه بلوک بافل مستطیلی متخلخل بر اتلاف انرژی و پرفش‌های هیدرولیکی را مطالعه کردند. افزایش سطح آب در بالادست سرریز، منجر به جریان

دارای برش عمودی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به برش‌های افقی نشان دادند؛ به گونه‌ای که عملکرد هیدرولیکی بلوک‌های برش‌خورده با زاویه ۴۵ درجه عمودی، مشابهت قابل توجهی با بلوک‌های نیمه‌استوانه‌ای داشته است. Azimi and Shabanlou (2017) الگوی جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی را برای کانال‌های مثلی دارای سرریز جانبی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در شرایط جریان زیربحرانی، عمق جریان از ابتدای سرریز به سمت انتهای آن با افزایش و در شرایط جریان فوق‌بحرانی با کاهش همراه است. همچنین برای هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی، یک افت سطح آزاد در یک سوم ابتدایی دهانه سرریز و یک پرش سطحی در یک سوم انتهایی طول دهانه به وقوع پیوسته است. در پژوهشی توسط Bong and Liow (2020) اثر صفحات بافل زاویه‌دار بر جریان آب در کانال‌های باز با سه زاویه (۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) و سه حالت جریان (بالا، متوسط و کم) بررسی شد. نتایج نشان داد که تمام زوایای بافل باعث کاهش دبی می‌شوند؛ زاویه ۹۰ درجه بیشترین کاهش (۵/۳۲ تا ۱۱/۶۷ درصد) و زاویه ۳۰ درجه کمترین کاهش (۳/۵۷ تا ۷/۷ درصد) را داشت. همچنین، معادله‌ای برای پیش‌بینی افزایش عمق نسبی آب با خطای میانگین مربعات ۰/۴۵۴۸ ارائه شد که به انتخاب زاویه مناسب بافل کمک می‌کند.

Niyazi et al. (2022) به مطالعه ساختار و دینامیک جریان آشفته از طریق یک بافل مرکزی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد یک سیستم گردابه نعل اسبی که در جلوی بافل شناسایی شده است، یک برآمدگی قابل توجه روی سطح آزاد ایجاد می‌کند و گردابه‌های دنده‌ای ایجاد شده از بافل تا دیواره‌های جانبی کانال امتداد می‌یابند. لایه جدایش عمودی مشاهده شده در پایین‌دست بافل منجر به جریان معکوس می‌شود و با برخورد جریان معکوس حاصل به پشت بافل، یک جفت گردابه تشکیل می‌شود. جریان معکوس، ساختار جریان غوطه‌وری، پاشش و موج برگشتی مشاهده شده در پایین‌دست، اثرات هیدرودینامیکی قابل توجهی بر بافل ایجاد می‌کنند. آن‌ها همچنین هندسه بافل مرکزی را برای جلوگیری از اثرات چرخش مجدد بر اساس بینش‌های مربوط به ساختار کامل جریان در اطراف بافل اصلاح کردند. در نهایت، ساختارهای گردابه حذف شدند و طول ناحیه چرخش مجدد ۷۶ درصد کاهش یافت. Alwan and Azzubaidi (2022) توزیع سرعت در طول فلوم با انجام یک سری آزمایش برای یافتن بهترین ارتفاع و پیکربندی المان‌های

بین آن‌ها با داشتن نتایج آزمایشگاهی می‌توان به یک رابطه مشخص برای تعیین پارامتر مورد نظر که در اینجا انرژی جریان و میزان دبی می‌باشد، دست یافت.

$$f(h, Q, B_c, B, L, L_e, g, \mu, \rho) = 0 \quad (۱)$$

که در اینجا g : شتاب گرانش زمین، μ ویسکوزیته آب، h عمق آب بالادست، Q ظرفیت جریان، B عرض کانال، B_c عرض مفید عبور جریان ($B_c = B - b$)، L طول بافل، b عرض بافل، L_e فاصله طولی دیواره راهنمای بافل و ρ چگالی آب است. شایان ذکر است که در اینجا زاویه بافل (α) ثابت و معادل ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است؛ بنابراین جزو متغیرهای مسئله نیست. بعد از انتخاب B_c ، μ ، g به‌عنوان متغیرهای تکراری و با کمک قضیه باکینگهام رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$Q^* = f\left(\frac{h}{B_c}, r, \frac{L}{B}, \frac{L_e}{b}, R\right) \quad (۲)$$

که در اینجا $Q^* = \frac{Q}{B_c^{2.5} g^{0.5}}$ و $r = \frac{B_c}{B}$ و $R = \frac{\rho Q}{\mu B}$ می‌باشد. از طرفی با فرض رخداد جریان بحرانی در محل سازه بافل در بخش منقبض شده جریان، میزان حداقل انرژی مخصوص را می‌توان براساس رابطه (۳) نوشت:

$$E_c = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{1}{C_c^2 B_c^2 g}} \quad (۳)$$

که در اینجا C_c ضریب انقباض جانبی به‌دلیل انحنای خط جریان است.

در این پژوهش، طراحی مدل آزمایشگاهی بر مبنای تشابه فرودی (Froude Similarity) صورت گرفته است. از آنجایی که جریان در کانال‌های باز عمدتاً تحت تأثیر نیروی گرانش و اینرسی قرار دارد و دارای سطح آزاد است، حفظ عدد فرود به‌عنوان پارامتر اصلی تشابه دینامیکی در نظر گرفته شد. با توجه به انتخاب ابعاد مدل و مقادیر دبی آزمایشگاهی، عدد رینولدز در تمامی آزمایش‌ها در بازه جریان آشفته قرار داشت. این محدوده عدد رینولدز، که به‌طور قابل توجهی بزرگتر از حدود است، تضمین‌کننده قرارگیری جریان در رژیم کاملاً آشفته می‌باشد. در این شرایط، اثرات نیروهای لزجت نسبت به نیروهای اینرسی و گرانشی ناچیز شده و بنابراین، اثرات مقیاس ناشی از تفاوت در عدد رینولدز بین مدل و مقیاس واقعی (پروتوتایپ) به حداقل می‌رسد. علاوه بر این، تدابیر لازم برای کاهش سایر اثرات مقیاس احتمالی نیز اتخاذ گردید. برای

فوق‌بحرانی و پرش‌های هیدرولیکی در پایین‌دست می‌شود. نتایج نشان داد که سطح آب بالا افزایش و اتلاف انرژی کاهش می‌یابد؛ بلوک با زاویه ۶۰ درجه مؤثرترین گزینه برای اتلاف انرژی و کاهش طول پرش هیدرولیکی بود. این بلوک از برگشت جریان جلوگیری می‌کند.

Ibrahim et al. (2026) به مطالعه یک حوضچه آرامش اصلاح‌شده با پایه‌های مانع مستغرق در پایین‌دست پرداختند. این مطالعه ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، راندمان اتلاف انرژی، الگوهای توزیع سرعت، نوسانات سطح آب و پیکربندی بستر ناشی از جریان در پایین‌دست دریاچه سد را تجزیه و تحلیل کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که پایه‌های مانع با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان، با بهینه ساختن عملکرد حوضچه آرامش، ویژگی‌های جریان را بهبود بخشیده و پیکربندی بستر را به حداقل می‌رسانند. این طراحی بهینه، راندمان اتلاف انرژی را ۴۶ تا ۶۰ درصد افزایش داد و حداکثر سرعت را ۳۳ درصد در مقایسه با کفپوش صاف در محدوده عدد فرود آزمایش شده کاهش داد.

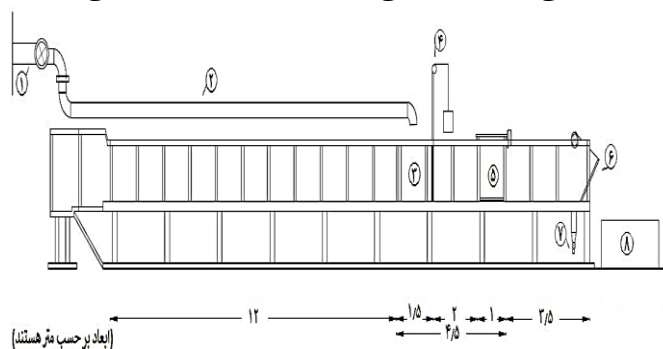
هدف از پژوهش حاضر، بررسی و تحلیل اثرات انسداد ناشی از سازه بافل مرکزی بر الگو و پارامترهای اثرگذار جریان در یک کانال مرکب مستطیلی از طریق مطالعات آزمایشگاهی است. در این راستا، تغییرات پارامترهای کلیدی جریان در دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی ارزیابی شده است. در این مطالعه، برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر کانال‌های با مقطع ساده تمرکز داشته‌اند، از یک کانال مرکب مستطیلی همراه با سازه بافل مرکزی استفاده شده است. این پیچیدگی هندسی، نشان‌دهنده شرایط واقعی‌تری در بسیاری از سیستم‌های مهندسی هیدرولیک از جمله کانال‌های انتقال آب، رودخانه‌ها و سازه‌های مرتبط با مدیریت منابع آب است. بدین ترتیب، یافته‌های این تحقیق با تبیین مکانیسم‌های استهلاك انرژی و تغییرات الگوی جریان، می‌تواند به درک عمیق‌تری از رفتار جریان در مجاری پیچیده منجر شده و مبنایی علمی برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های کنترل‌کننده جریان به منظور بهبود پایداری هیدرولیکی و مدیریت انرژی در سیستم‌های آبی فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

برای بررسی رفتار جریان دو رویکرد مختلف، یعنی استفاده از تحلیل ابعادی و معادله انرژی وجود دارد. برای تحلیل ابعادی با استخراج پارامترهای بدون بعد مهم و یافتن رابطه مناسب

با درصد انسداد $33/3$ درصد است که به عنوان مانع هیدرولیکی برای تحلیل رفتارهای جریان طراحی و نصب گردید. به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی مشابه شکست سد، در ابتدای فلوم سامانه‌ای متشکل از سیستم دریچه و وزنه تعبیه شد که مجهز به مکانیزم بازشدگی ناگهانی برای آزادسازی دبی فوق بحرانی است. ترازهای متغیر آب در مخزن ورودی، امکان کنترل دبی فوق بحرانی را فراهم می‌سازد. در انتهای مسیر (پایین دست) برای تنظیم سطح آب و کنترل رژیم جریان، دریچه‌ای تعبیه شده است. این پیکربندی آزمایشگاهی، محیطی کنترل شده برای بررسی برهم کنش میان سازه بافل و میدان جریان (شامل جدایش جریان، تشکیل گردابه‌ها و استهلاك انرژی) تحت رژیم‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی فراهم آورده است. تجهیزات اندازه‌گیری و پایش، در فواصل مشخص به منظور ثبت داده‌های دقیق استهلاك انرژی و ویژگی‌های هیدرولیکی در حضور سازه بافل، جانمایی شده‌اند.



شکل ۱-نمایی از فلوم به همراه تجهیزات ورودی و خروجی جریان:

- ۱- لوله آب ورودی؛ ۲- لوله آب انشعاب به مخزن تخلیه موج؛ ۳- مخزن تخلیه موج؛ ۴- سیستم نخ لوله و دریچه کشویی؛ ۵- فلوم لبه چاقویی و نیروسنج؛ ۶- دریچه آب بند و میکروفون؛ ۷- دریچه تخلیه رسوب؛ و ۸- چاهک تخلیه جریان

مثال، به منظور ناچیز ماندن اثر کشش سطحی در مقایسه با نیروهای گرانشی، عمق جریان در تمامی شرایط آزمایش حداقل در نظر گرفته شد. همچنین، استفاده از دیواره‌های جانبی پلکسی گلس با سطح بسیار صاف، به منظور مدل‌سازی شرایط مرزی نزدیک به ایده‌آل و کاهش اثرات زبری نسبی انجام شد. خطای احتمالی در اندازه‌گیری پارامترهای جریان، با استفاده از تجهیزات دقیق (مانند فلومتر اولتراسونیک و دستگاه ADV با دقت $0/5$ درصد) و تکرار آزمایش‌ها، به حداقل رسانده شد.

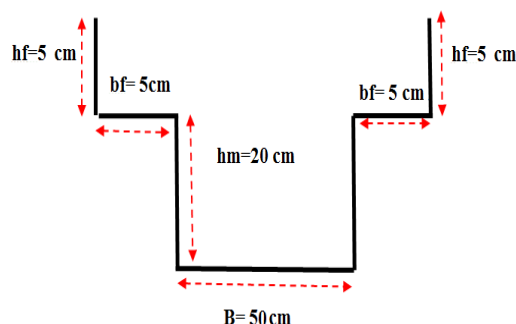
تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد و در یک فلوم مستطیلی به طول ۲۰ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر با دیواره‌های شفاف شیشه‌ای برای رصد دقیق الگوهای جریان انجام شد (شکل ۱). سازه اصلی این پژوهش، یک بافل مرکزی



مشخصات مدل آزمایشگاهی

مطالعه آزمایشگاهی این پژوهش شامل بررسی رفتار جریان اطراف سازه بافل با خصوصیات هندسی مشخص در یک کانال با مقطع مرکب مستطیلی است که شکل شماتیک آن در شکل ۲ و ابعاد آن در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- مشخصات و نمای شماتیک از کانال مرکب استفاده شده در پژوهش

جدول ۱- مشخصات کانال مرکب بررسی شده در پژوهش

مقدار	توضیحات	مشخصات کانال مرکب
۵۰	عرض کانال اصلی (cm)	B
۲۰	ارتفاع کانال اصلی (cm)	h_m
۵	عرض سیلاب دشت (cm)	h_f
۵	ارتفاع سیلاب دشت (cm)	b_f

انتخاب ابعاد هندسی بافل مرکزی (مطابق جدول ۲) با هدف ایجاد یک مانع هیدرولیکی با نفوذپذیری کنترل شده و بر اساس محدودیت ابعاد هندسی فلوم آزمایشگاهی انجام شده است. درصد انسداد $33/3$ درصد، به عنوان آستانه‌ای انتخاب شد که ضمن اعمال اثر موضعی بر میدان جریان،

آزمایشگاهی نصب شد. سازه بافل مرکزی با ابعاد هندسی مشخص (جدول ۲) ساخته شد و در طول کانال در محل تعیین شده نصب گردید. برای اطمینان از پایداری آزمایشگاهی، بافل به گونه‌ای تثبیت شد که در طول اندازه‌گیری‌ها هیچ گونه لرزش یا جابجایی نداشته باشد. سیستم تغذیه آب و مسیر برگشت به مخزن به نحوی طراحی و پیکربندی شد که امکان تثبیت دقیق دبی و حفظ پایداری جریان در طول بازه اندازه‌گیری فراهم گردد. در مجموع، آزمایش‌ها برای پنج دبی زیر بحرانی و پنج دبی فوق بحرانی اجرا شد. برای اندازه‌گیری دبی، از دبی‌سنج آلتراسونیک فلومتر استفاده و برای هر دبی، با تنظیم دریچه و پمپ، جریان ابتدا به حالت پایدار رسانده شد. سپس، وضعیت هیدرولیکی جریان با محاسبه عدد فرود در ورودی کانال تعیین گردید تا اطمینان حاصل شود که شرایط زیر بحرانی یا فوق بحرانی به درستی برقرار است. اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت عمق آب و مولفه سرعت در راستای محور کانال در سه موقعیت مکانی در امتداد کانال بود: ابتدای بافل، مرکز بافل و انتهای بافل. عمق جریان با استفاده از اشل‌های نصب شده روی بدنه فلوم و سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج ایدیوی (ADV) با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درصد در نقاط مشخص ثبت گردید. برای هر دبی، سه اندازه‌گیری مستقل عمق و سرعت در هر نقطه انجام شد تا از دقت و تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود. شکل ۴ مدل آزمایشگاهی کانال و بافل و شکل ۵، نمونه‌ای از الگوی جریان و نحوه توزیع سرعت در اطراف سازه بافل در کانال مرکب را نشان می‌دهد.

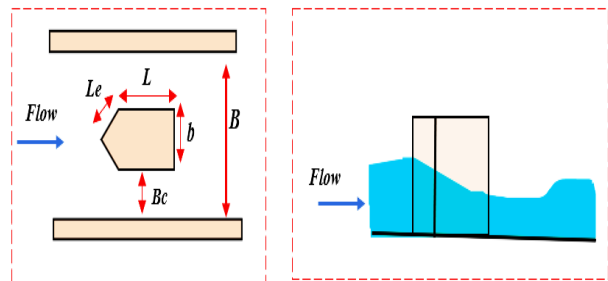
انرژی ویژه جریان (E) در هر مقطع کانال، با استفاده از رابطه (۴) محاسبه گردید:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

که در آن E انرژی ویژه جریان (متر)، y عمق جریان (متر)، V سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) و g شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه) در آن مقطع است. همچنین، اختلاف انرژی ویژه بین دو نقطه مورد بررسی به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right)}{h_1 + \frac{V_1^2}{2g}} \quad (5)$$

منجر به ایجاد ناپایداری‌های شدید که مانع از تحلیل الگوهای جریان می‌شود، نگردد. زاویه ۴۵ درجه در رأس سازه، با هدف به حداقل رساندن ناحیه مرده در پشت سازه و تسهیل در جدایش جریان مدیریت شده طراحی شده است. این هندسه خاص، امکان تشکیل گردابه‌های پایدار را که در استهلاك انرژی جریان نقش اصلی را ایفا می‌کنند، فراهم می‌کند. بدین ترتیب، ابعاد مذکور نه تنها بر اساس محدودیت‌های فیزیکی فلوم، بلکه با رویکرد بهینه‌سازی الگوی جدایش جریان و مطالعه دقیق مکانیسم‌های استهلاك انرژی انتخاب شده‌اند. نمای شماتیک و مشخصات هندسی سازه بافل مرکزی برای مدل‌سازی فیزیکی در شکل ۳ و جدول ۲ به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۳- مشخصات و نمای شماتیک از سازه بافل

جدول ۲- مشخصات سازه بافل مرکزی

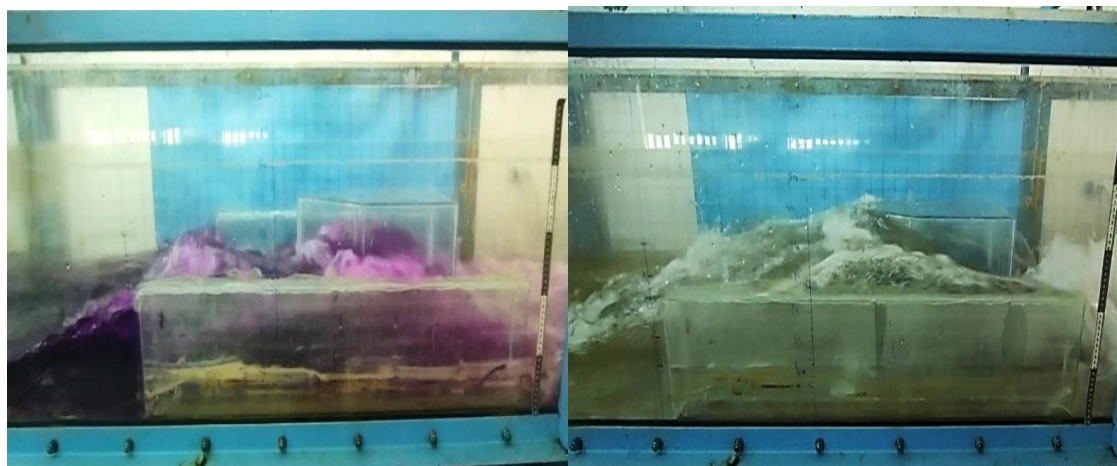
مشخصات سازه بافل	توضیحات	مقدار
L	طول بافل (cm)	۳۰
b	عرض بافل (cm)	۲۰
h	ارتفاع بافل (cm)	۳۰
α	زاویه راس بافل (درجه)	۴۵

شرح آزمایش

در این مطالعه، آزمایش‌های هیدرولیکی روی کانال مرکب با سازه بافل مرکزی انجام شد تا اثر هم‌زمان هندسه کانال مرکب و وجود بافل بر الگوی جریان در دبی‌های مختلف ارزیابی شود. آزمایش‌ها در شرایط پایدار و در رژیم‌های مختلف جریان انجام شد و هدف، تحلیل تغییرات عمق و سرعت جریان در امتداد کانال در سه ناحیه کلیدی شامل قبل از بافل، ناحیه میانی بافل و بعد از بافل بود. کانال آزمایشگاهی مطابق طرح هندسی پژوهش تهیه و در فلوم



شکل ۴- مدل آزمایشگاهی ساخته شده شامل کانال مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی



شکل ۵- نمایی از الگوی جریان در کانال مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی با تست ماده رنگی

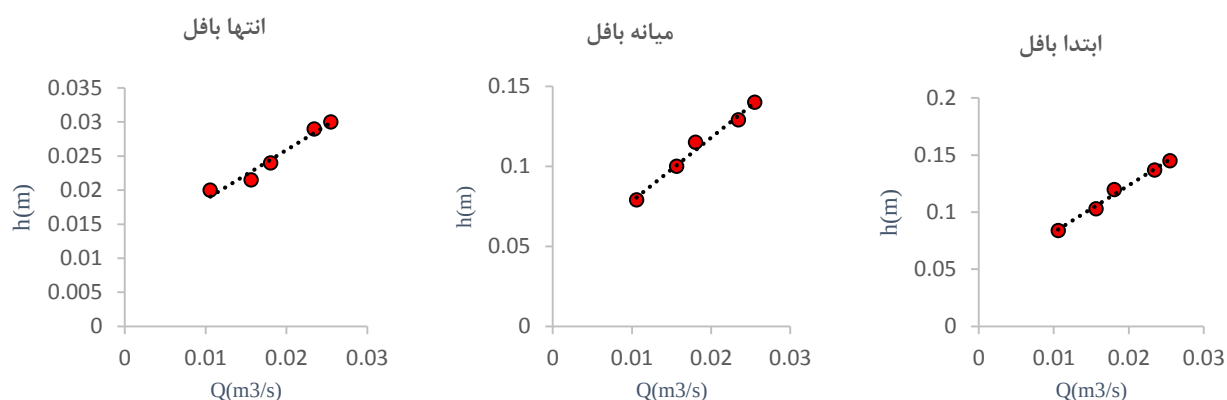
نتایج و بحث

مقایسه نمودارهای دبی-اشل

الف) جریان زیربحرانی

طبق شکل ۶، در رژیم جریان زیربحرانی، افزایش دبی از ۰/۰۱ به ۰/۰۲۵ متر مکعب بر ثانیه، باعث افزایش متناسب عمق جریان (h_1, h_2, h_3) در هر سه مقطع می شود که مشخصه جریان کانال های باز است. سازه بافل در این شرایط به عنوان انقباضی جزئی عمل کرده و اثر پس زدگی را در بالادست (h_1)

ایجاد می کند؛ به طوری که عمق در مقطع ابتدایی بالاتر از مقاطع انتهایی (h_3) است. این پدیده نشان دهنده مقاومت هیدرولیکی بافل و تجمع آب در بالادست آن است. افت تراز سطح آب در طول سازه، که نشان دهنده تلفات انرژی ناشی از جدایش جریان، گردابه ها و اصطکاک در مجاورت بافل است، بیانگر این موضوع می باشد. در مجموع، افزایش دبی در این رژیم منجر به افزایش عمق کلی و ایجاد تراز بالاتری در بالادست سازه می شود.

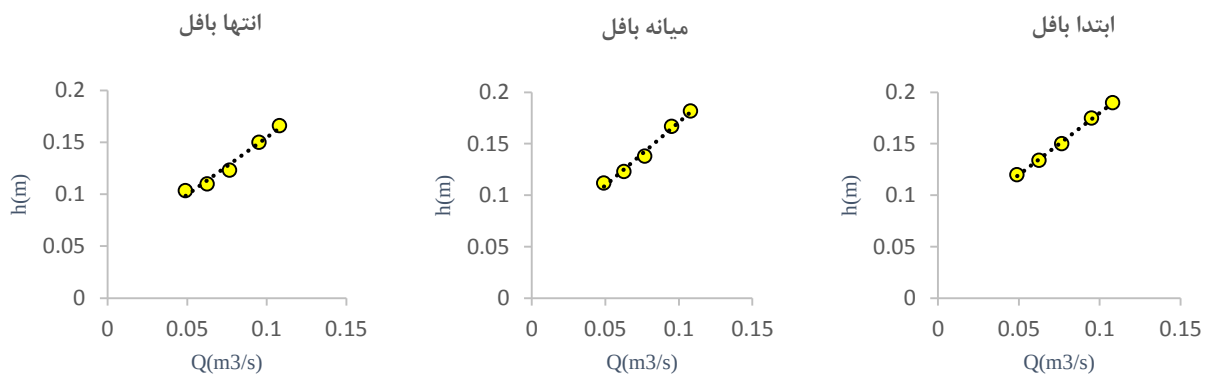


شکل ۶- نمودار دبی-اشل در ابتدا، میانه و انتهای سازه بافل در دبی های مختلف در جریان زیربحرانی

ب) جریان فوق بحرانی

در رژیم فوق بحرانی، با افزایش دبی از ۰/۰۴۸ به ۰/۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه، عمق جریان در مقاطع مختلف h_1 , h_2 , h_3 افزایش می یابد، که با اصول جریان فوق بحرانی در کانال های باز سازگار است. در این رژیم، سرعت جریان نیز به مقادیر بالایی می رسد، اما سازه بافل با استهلاك بخشی از انرژی جنبشی بالا از طریق انقباض و اختلاط شدید، سرعت را تعدیل می کند. این تعدیل سرعت می تواند منجر به کاهش

گرادین خط انرژی و در نتیجه کاهش عدد فرود شود؛ بدین معنا که بافل در دبی های بالاتر فوق بحرانی، جریان را به سمت شرایط پایدارتر (نزدیک به بحرانی) سوق می دهد. نمودارهای دبی-اشل در سه مقطع سازه (شکل ۷) نشان دهنده تلفات انرژی و تغییر شکل پروفیل سطح آزاد به دلیل تعامل با بافل، شامل امواج ایستایی یا پرش های هیدرولیکی جزئی است. این پدیده ها در مجموع به تعدیل و پایداری جریان فوق بحرانی کمک می کنند.



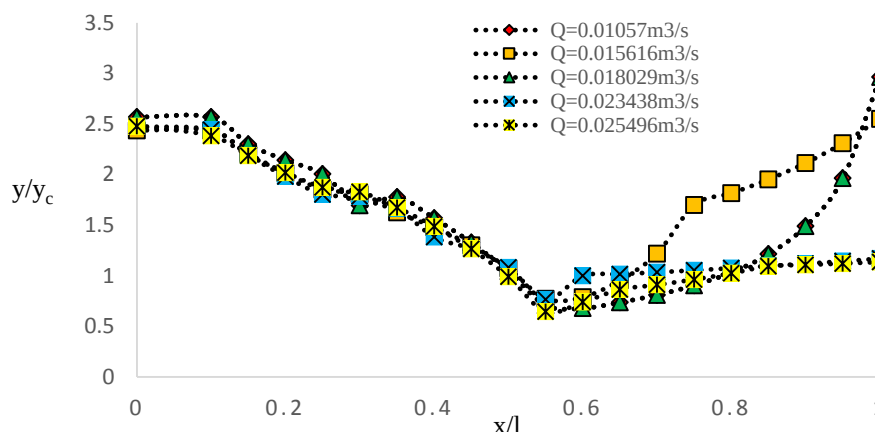
شکل ۷- نمودار دبی-اشل در ابتدا، میانه و انتهای سازه بافل در دبی های مختلف در جریان فوق بحرانی

تحلیل هیدرولیکی رخداد جریان بحرانی در گلوگاه

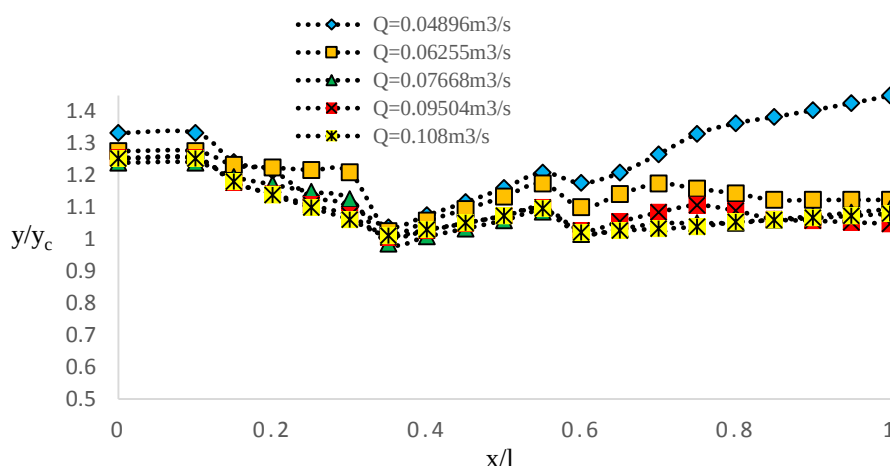
یافته های حاصل از تحلیل بی بعد y/y_c نشان می دهد که گلوگاه کانال در تمامی دبی های مورد آزمایش، نقش مقطع کنترل را ایفا کرده و باعث همگرایی رفتار جریان به سمت وضعیت بحرانی می شود. در جریان های زیر بحرانی (شکل ۸) جریان با نسبت $y/y_c > 1$ وارد کانال شده و با نزدیک شدن به مقطع گلوگاه، کاهش تدریجی انرژی پتانسیل و میل کردن نسبت y/y_c به مقدار بحرانی (بازه ۱/۰۴ تا ۱/۱۵) مشاهده می شود. این نوسان در مقادیر، حوالی عدد ۱ در گلوگاه، تأیید کننده وقوع جریان بحرانی در این مقطع است و نیاز به فرض های کیفی را برطرف می سازد. نمودار نسبت عمق جریان به عمق بحرانی (y/y_c) به عنوان شاخصی بی بعد، نشان دهنده رژیم جریان در طول کانال است. داده های آزمایشگاهی به وضوح نشان می دهند که در تمامی دبی های بررسی شده، جریان از حالت زیر بحرانی وارد ناحیه گلوگاه شده، در مقطع گلوگاه به نزدیکی نقطه بحرانی رسیده و یا از آن عبور کرده است. این رفتار، تطابق کامل با تئوری جریان در کانال های دارای گلوگاه را تأیید می کند.

در جریان های فوق بحرانی (شکل ۹) جریان با نسبت $y/y_c < 1$ (در مقادیر بالادست) آغاز شده و با عبور از هندسه گلوگاه، داده ها نشان دهنده یک تغییر رفتار مشهود می باشند؛ به طوری که در مقطع گلوگاه مقدار y/y_c به طور ملموسی کاهش یافته و حتی در برخی دبی ها به زیر ۰/۹۸ رسیده است. این همگرایی در حوالی خط بحرانی، نشان دهنده رسیدن جریان به حداقل انرژی ویژه (E_{min}) در گلوگاه است.

مقایسه داده ها برای هر دو رژیم جریان نشان می دهد که علی رغم تفاوت در شرایط اولیه ورود (بالادست)، هر دو جریان در مقطع گلوگاه به سمت یک «نقطه تعادل» حرکت می کنند. نزدیکی مقادیر y/y_c به عدد ۱ در مقطع گلوگاه برای تمامی دبی ها، شاهی بر این مدعاست که گلوگاه کانال به طور مؤثری باعث ایجاد شرایط بحرانی شده است. در واقع، این همگرایی متمرکز در یک مقطع خاص، انطباق کامل رفتار آزمایشگاهی با منحنی انرژی ویژه را اثبات می کند؛ چرا که جریان در مقطع گلوگاه موظف است برای عبور از تغییرات هندسی، انرژی خود را به حداقل مقدار ممکن در عمق بحرانی برساند.



شکل ۸- نمودار تغییرات نسبت عمق جریان به عمق بحرانی در طول کانال در جریان زیر بحرانی



شکل ۹- نمودار تغییرات نسبت عمق جریان به عمق بحرانی در طول کانال در جریان فوق بحرانی

مقایسه تغییرات عدد فرود در دبی‌های مختلف در

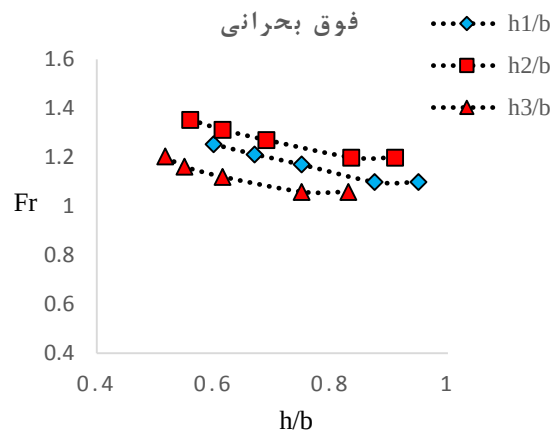
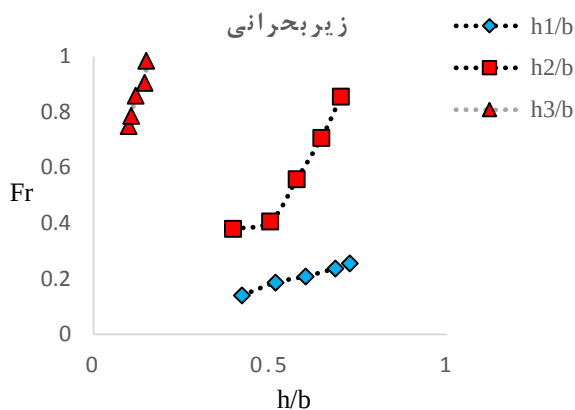
شرایط زیر بحرانی و فوق بحرانی

مطابق با شکل ۱۰، در رژیم جریان زیر بحرانی در ابتدا بافل مقادیر عدد فرود در محدوده ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ قرار دارند. با افزایش دبی، نسبت h/b از ۰/۴۲ به ۰/۷۲ افزایش یافته و هم‌زمان عدد فرود از ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ می‌رسد. این افزایش ملایم عدد فرود ناشی از افزایش دبی در مقطع اولیه است. مقطع میانی بافل شاهد بیشترین دگرگونی در پارامترها است. با کاهش شدید نسبت h/b (از ۰/۷۲ به ۰/۳۹ در بالاترین دبی)، عدد فرود به‌طور چشمگیری افزایش یافته و در محدوده ۰/۳۸ تا ۰/۹۸ قرار می‌گیرد که بیانگر نزدیک شدن جریان به آستانه بحرانی در اثر تنگ‌شدگی مقطع است. این پدیده، ناشی از شتاب‌گیری جریان و کاهش عمق در پشت بافل است. در

مقطع انتهایی بافل پس از عبور از بافل، هرچند نسبت h/b مجدداً افزایش می‌یابد اما عدد فرود همچنان با نوسان کمتری در محدوده قبل باقی می‌ماند.

در رژیم فوق بحرانی، جریان تمایل به حفظ انرژی جنبشی خود دارد و اثر بافل متفاوت ظاهر می‌شود. در مقطع ابتدایی بافل اعداد فرود همواره بالاتر از یک می‌باشند. با افزایش دبی نسبت h/b از ۰/۶ به ۰/۹۵ افزایش یافته و عدد فرود از ۱/۲۵ تا ۱/۱۷ کاهش می‌یابد. این کاهش فرود با افزایش دبی، نشان‌دهنده‌ی این است که عمق جریان با نرخی بیشتر از سرعت آن افزایش می‌یابد. در مقطع میانی بافل نسبت h/b کاهش یافته اما عدد فرود همچنان بالا و در محدوده ۱/۱۹ تا ۱/۳۵ باقی می‌ماند. در مقطع انتهایی بافل، نسبت h/b مجدداً افزایش یافته (۰/۹۱ به ۰/۸۳ در بالاترین دبی)، اما عدد فرود نیز همچنان در محدوده ۱/۰۵ تا ۱/۲

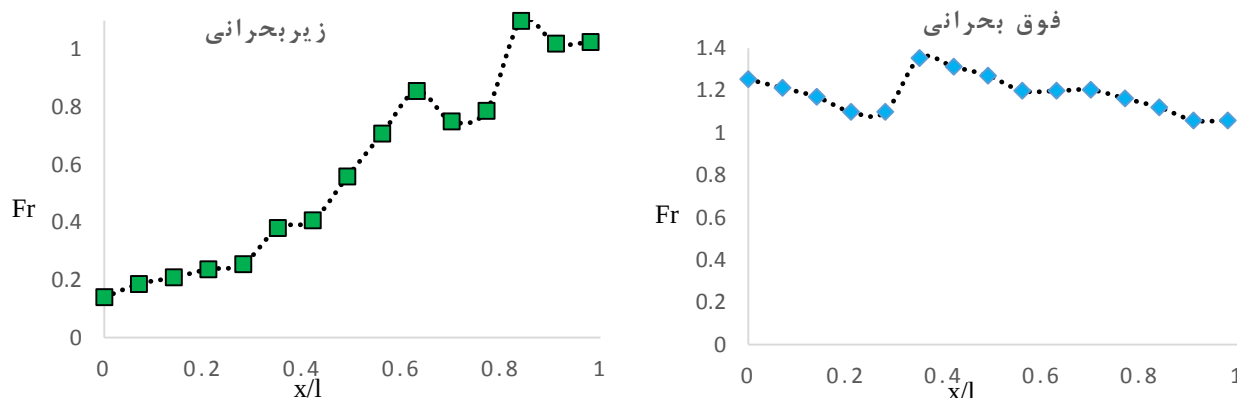
فرود در هر سه مقطع به طور مداوم بالاتر از یک باقی مانده و نوسانات کمتری را تجربه می کنند. این مساله بیانگر آن است که بافل در رژیم زیربحرانی نقش کنترل کننده ی قوی تری بر عدد فرود ایفا می کند؛ در حالی که در رژیم فوق بحرانی، بیشتر بر دینامیک موضعی و توزیع سرعت- عمق تأثیر می گذارد و از تغییرات بنیادی ماهیت جریان جلوگیری می کند.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات عدد فرود در مقابل نسبت عمق جریان به عرض بافل در جریان زیربحرانی و فوق بحرانی

در رژیم جریان فوق بحرانی (شکل ۱۱) در ناحیه ابتدای بافل مقادیر عدد فرود همگی بالاتر از ۱ (محدوده ۱/۱۷ تا ۱/۲۵) قرار دارند که مشخصه رژیم فوق بحرانی است. با افزایش دبی، عدد فرود به طور کلی کاهش می یابد، که این معمولاً به دلیل نسبت افزایش عمق جریان نسبت به افزایش سرعت است. در میانه بافل، اعداد فرود همچنان بالا باقی مانده و در محدوده ۱/۱۹ تا ۱/۳۵ قرار دارند اما در کل، عدد فرود در این ناحیه نسبتاً پایدار مانده و نشان می دهد که جریان توانایی حفظ انرژی جنبشی بالای خود را دارد. در انتهای کانال، اعداد فرود از ۱/۰۵ تا ۱/۲ متغیر هستند. این مقادیر همچنان بیشتر از عدد یک بوده و نشان دهنده حفظ ماهیت فوق بحرانی جریان در طول کانال است، حتی پس از عبور از بافل. روند کلی نشان می دهد که با افزایش دبی، عدد فرود در این مقطع تمایل به کاهش دارد.

در رژیم جریان زیربحرانی (شکل ۱۱) در ابتدای بافل مقدار عدد فرود در محدوده ۰/۱۴ تا ۰/۲۵ قرار دارد که به وضوح بیانگر رژیم زیربحرانی است. با افزایش دبی، عدد فرود نیز به طور پیوسته افزایش می یابد. این افزایش نشان دهنده بالا رفتن سرعت جریان و کاهش عمق نسبت به عمق مرجع در مقطع ابتدایی کانال است. در میانه بافل، اعداد فرود به طور قابل توجهی افزایش یافته و از ۰/۳۸ به ۰/۹۸ می رسند. این افزایش چشمگیر، ناشی از کاهش عمق جریان و افزایش سرعت به دلیل تنگ شدگی مقطع جریان توسط بافل است. بالاترین مقدار (نزدیک به ۱) نشان دهنده نزدیک شدن جریان به مرز رژیم بحرانی در این نقطه است، که این پدیده در گلوگاه ها امری رایج است. در انتهای بافل، اعداد فرود دوباره کاهش یافته است. این کاهش نسبت به میانه بافل، نشان دهنده بازبایی نسبی عمق جریان و کاهش سرعت پس از عبور از ناحیه تنگ شده یا پرفشار در میانه بافل است. با این حال، مقادیر عدد فرود همچنان بالا بوده و با ایجاد پرش هیدرولیکی دوباره جریان به حالت زیر بحرانی باز می گردد.



شکل ۱۱- پروفیل تغییرات عدد فرود در راستای طول کانال در جریان زیربحرانی و فوق بحرانی

افزایش دبی و با نزدیک شدن به بافل، تا حدی افزایش می‌یابد (به‌طور مثال تا ۱/۱۱۷ برای بالاترین دبی). این نشان می‌دهد که در جریان فوق بحرانی، حضور بافل حتی در بالادست، باعث بالا آمدن موضعی سطح آب می‌شود. این پدیده می‌تواند ناشی از تشکیل امواج شوک یا مورب و تغییر در توزیع فشار باشد که منجر به انحراف جریان به سمت بالا و افزایش تراز آب در نزدیکی مانع می‌شود. کاهش نسبتاً سریع سطح آب پس از $(x/L=0/1)$ تا حدود $(0/35)$ ، نشان‌دهنده ورود جریان به ناحیه تأثیر مستقیم بافل است. در ناحیه نزدیکی و پشت بافل $(x/L > 0/4)$ برخلاف رژیم زیربحرانی، سطح آب به میزان قابل توجهی کمتر از ۱ باقی می‌ماند (به‌طور مثال در حدود $0/8$ تا $0/9$). این نشان می‌دهد که بافل در این رژیم، باعث کاهش دائمی عمق جریان در پشت خود می‌شود. این پدیده با تشکیل امواج شوک و پدیده‌های مرتبط با آن در جریان فوق بحرانی، که باعث اتلاف انرژی و تغییر در پروفیل جریان می‌شوند، سازگار است. در مقایسه با رژیم زیربحرانی، افت سطح آب در پشت بافل در رژیم فوق بحرانی متفاوت است؛ در حالی که در رژیم زیربحرانی افت شدید و سپس بازیابی نسبی دیده می‌شود، در جریان فوق بحرانی سطح آب در پشت بافل پایین‌تر از حالت اولیه باقی می‌ماند. با افزایش دبی در رژیم فوق بحرانی، مقدار y/y_0 در پشت بافل تمایل به افزایش دارد، اما همچنان پایین‌تر از ۱ باقی می‌ماند.

بافل مرکزی اثرات متفاوتی بر تراز سطح آب در دو رژیم جریان دارد. در رژیم زیربحرانی، کاهش شدید عمق آب در ناحیه پشت بافل مشاهده می‌شود. در رژیم فوق بحرانی،

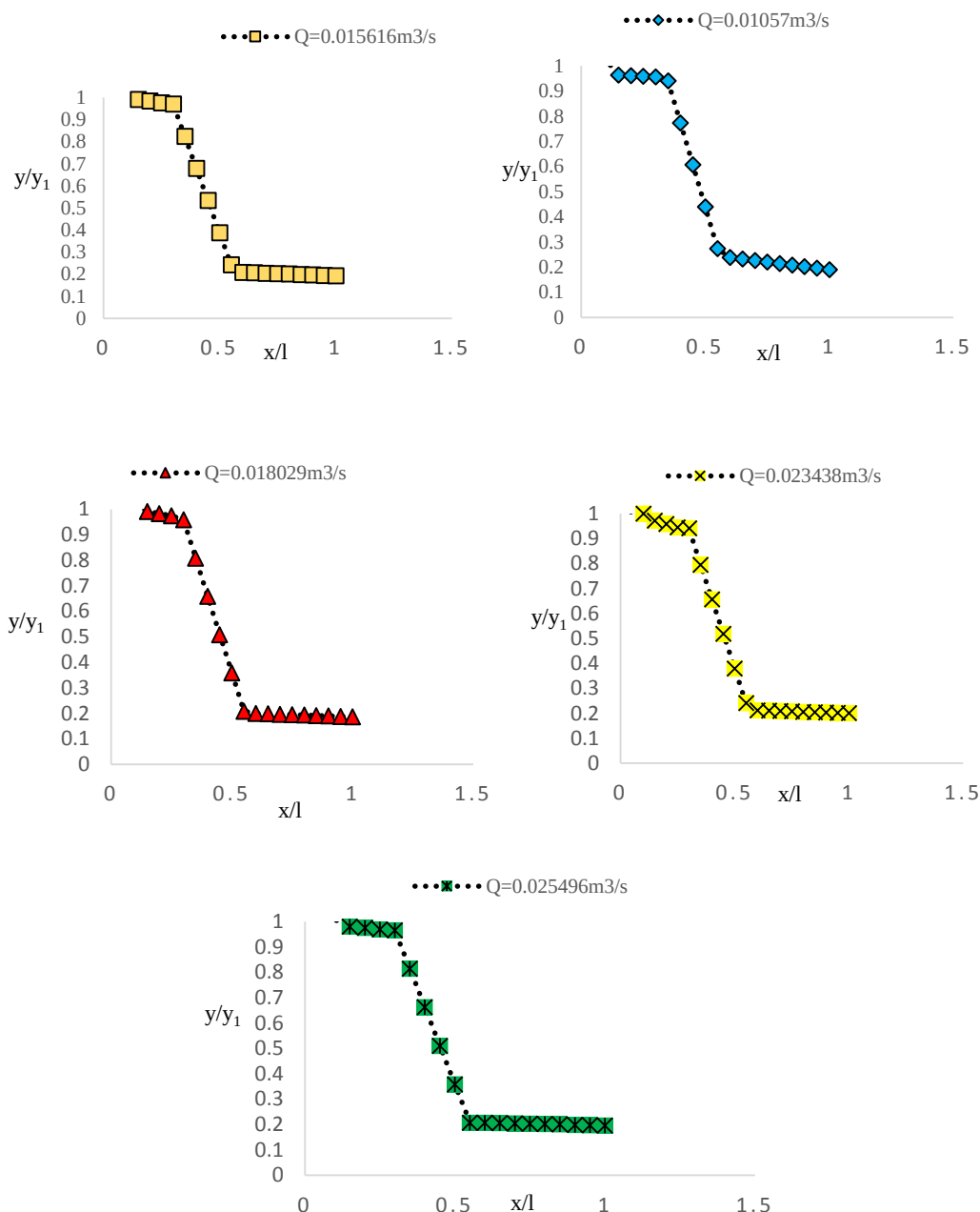
بررسی پروفیل سطح آب

پروفیل‌های سطح آزاد جریان در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند که در رژیم زیربحرانی، مقطع بالادست بافل در ابتدای کانال $(x/L=0)$ ، سطح آب کمی بالاتر از عمق مرجع قرار دارد که به دلیل اثرات موضعی ورودی یا تنظیم اولیه جریان است. با نزدیک شدن به بافل سطح آب در این ناحیه تا حدودی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که بافل، علی‌رغم اینکه جریان هنوز در بالادست آن قرار دارد، با ایجاد مقاومت و تغییر جزئی در سرعت شروع به تأثیرگذاری بر توزیع عمق می‌کند. در نزدیکی و پشت بافل در حدود $x/L=0/35$ ، افت قابل توجهی در سطح آب رخ می‌دهد و مقدار آن به شدت کاهش می‌یابد (به‌طور مثال از حدود $0/95$ به $0/81$). این افت نشان‌دهنده کاهش شدید عمق جریان در پشت بافل است. در این ناحیه، سرعت متوسط جریان کاهش یافته و گردابه‌هایی ایجاد می‌شود که منجر به کاهش تراز سطح آب می‌شود. برای دبی‌های مختلف در این رژیم، الگوی کلی افت سطح آب پشت بافل مشابه است، اما شدت افت و عمق نهایی آب متأثر از دبی است. دبی‌های بالاتر منجر به افت کمتر در نسبت y/y_0 می‌شوند، که این با اصل بقای انرژی و مومنوم سازگار است (در دبی بالاتر، انرژی بیشتری برای غلبه بر مقاومت بافل وجود دارد). در انتهای کانال $(x/L=1)$ ، سطح آب نسبت به حالت بالادست کمتر است، که نشان‌دهنده اتلاف انرژی کلی در اثر وجود بافل در کانال است.

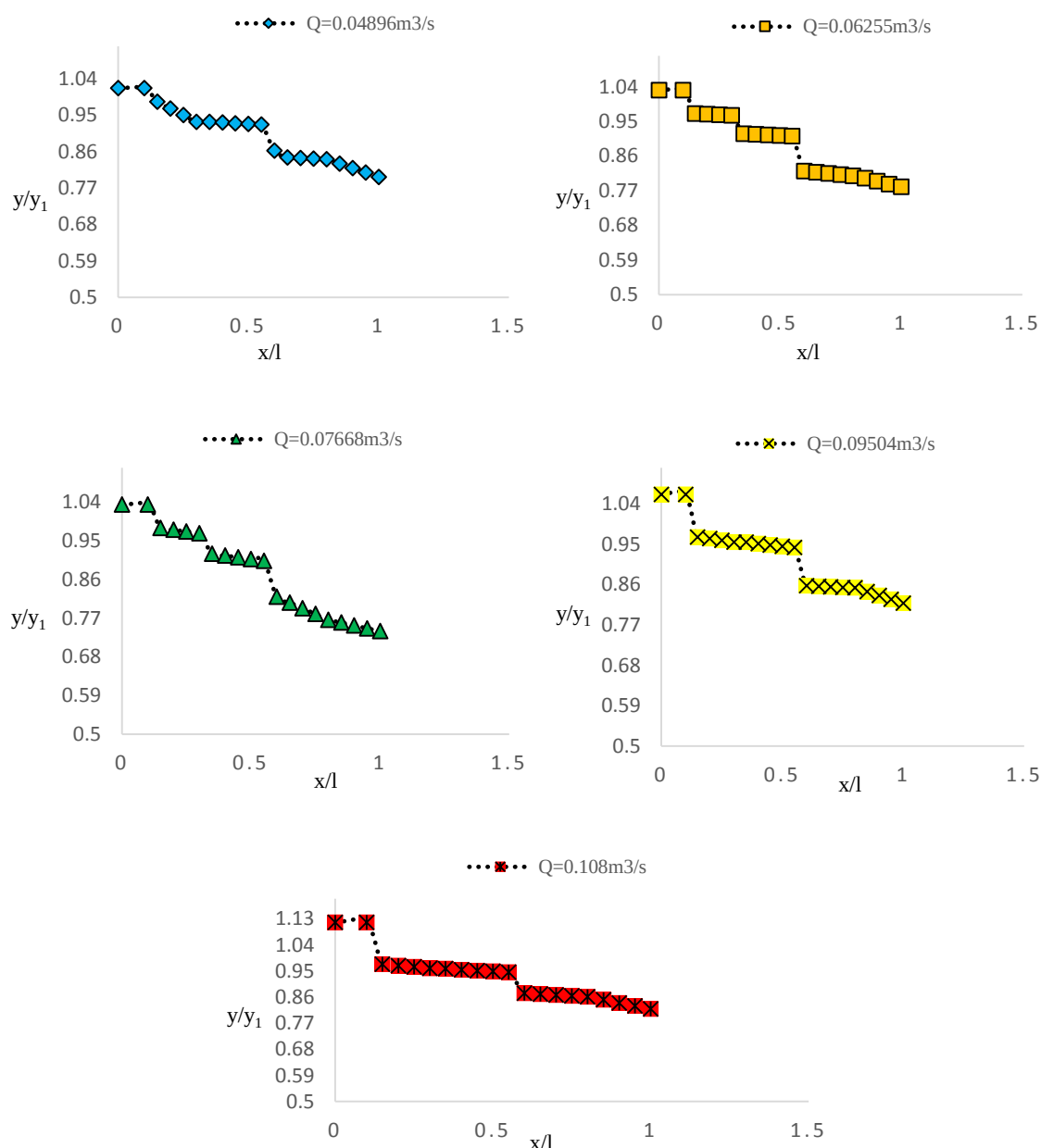
در رژیم فوق بحرانی، مقطع بالادست بافل $(x/L=0)$ ، سطح آب بی‌بعد شده (y/y_0) از ۱ بالاتر است و این مقدار با

پیچیده‌تر دینامیکی دخیل می‌باشند. در هر دو رژیم، تغییرات دبی بر شدت این پدیده‌ها تأثیر می‌گذارد. دبی‌های بالاتر معمولاً منجر به تغییرات کمتر در نسبت y/y_0 یا بازیابی سریع‌تر می‌شوند، اما ماهیت کلی رفتار جریان (کاهش عمق در انتهای بافل یا افزایش در بالادست شوک) حفظ می‌شود.

سطح آب در بالادست بافل (نزدیک به مانع) افزایش یافته و در پشت آن، عمق جریان کاهش می‌یابد. کاهش سطح آب در انتهای کانال در هر دو رژیم، نشان‌دهنده اتلاف انرژی است. اما شدت و الگوی این اتلاف متفاوت است. در رژیم زیربحرانی، اتلاف انرژی بیشتر به صورت آشفتگی و اتلاف در ناحیه انتهای بافل خود را نشان می‌دهد؛ در حالی که در رژیم فوق‌بحرانی، امواج شوک و فرآیندهای



شکل ۱۲- نمودار تغییرات پروفیل سطح در دبی‌های مختلف در جریان زیربحرانی



شکل ۱۳- نمودار تغییرات پروفیل سطح آب در دبی‌های مختلف در جریان فوق‌بحرانی

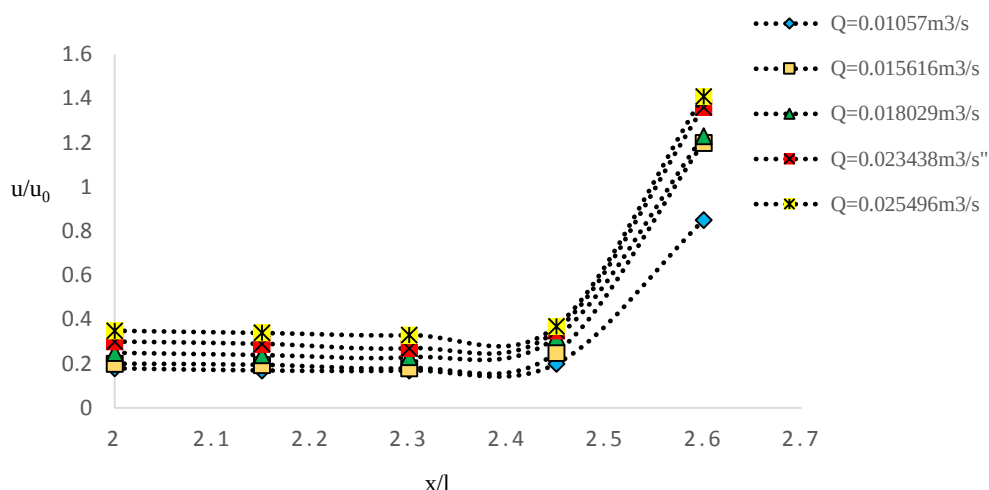
بررسی پروفیل سرعت جریان تحت تاثیر سازه بافل

تحلیل پروفیل‌های سرعت طولی (شکل‌های ۱۴ و ۱۵) و عمودی (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) نشان می‌دهد که حضور بافل، ماهیت سه‌بعدی و غیر یکنواخت جریان در کانال مرکب را تشدید می‌کند. در جریان‌های زیربحرانی الگوی سرعت نشان‌دهنده یک تغییر تدریجی در ابتدا و سپس شتاب‌گیری شدید در مقاطع پس از بافل است. در ابتدا ($x=2$ متر)، سرعت به دلیل ورود به مقطع مرکب و شروع انقباض، افزایش جزئی را تجربه می‌کند (از حدود 0.18 به 0.35 متر بر ثانیه). با نزدیک شدن به بافل ($x=2/15$ تا $x=3$ متر)، سرعت به دلیل اثر بازدارندگی و هدایت جریان به کناره‌ها،

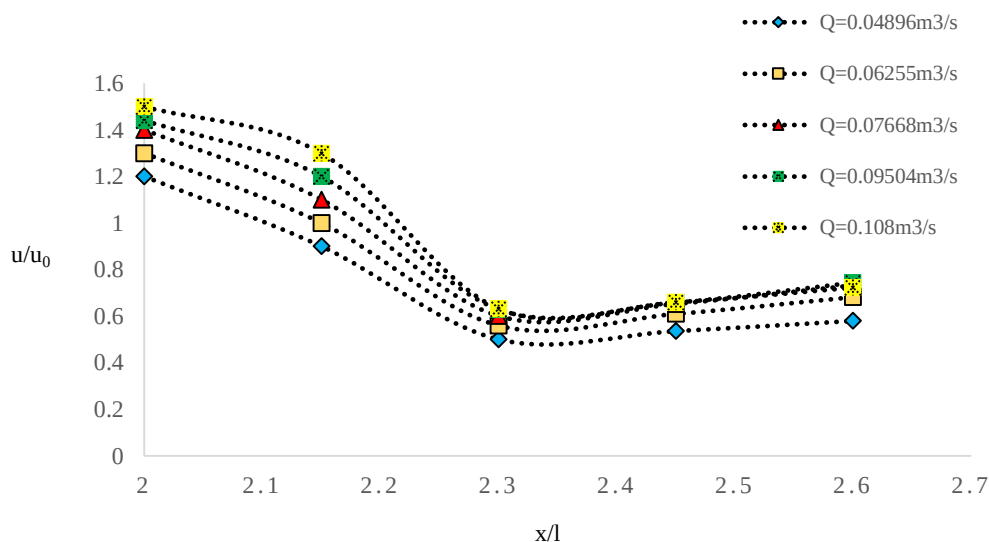
کاهش جزئی یافته و سپس با عبور از تنگ‌ترین مقطع ($x=2/45$ متر)، به دلیل شتاب‌گیری ناشی از انقباض و گلوگاه، افزایش چشمگیری می‌یابد. نکته برجسته در این رژیم، افزایش ناگهانی و قابل توجه سرعت در ناحیه بلافاصله پس از بافل است. سرعت در نقطه انتهایی بافل با افزایش شدیدتری همراه است، که بیانگر تشکیل یک ناحیه پرسرعت در این ناحیه و اتلاف انرژی قابل توجه است. در جریان‌های فوق‌بحرانی روند تغییرات سرعت به‌طور کلی متفاوت است. در مقطع ورودی ($x=2$ متر)، سرعت حداکثر است (از $1/2$ تا $1/5$ متر بر ثانیه) و با نزدیک شدن به بدنه بافل ($x=2/15$ تا $x=3$ متر)، سرعت به دلیل پدیده جدایش

است که افزایش سرعت در ناحیه پشت بافل در این رژیم به مراتب کمتر از رژیم زیربحرانی است. این موضوع نشان‌دهنده اتلاف انرژی کمتر در رژیم فوق‌بحرانی در مقایسه با رژیم زیربحرانی است، که می‌تواند ناشی از ماهیت دینامیک جریان و نحوه انتشار اختلالات باشد.

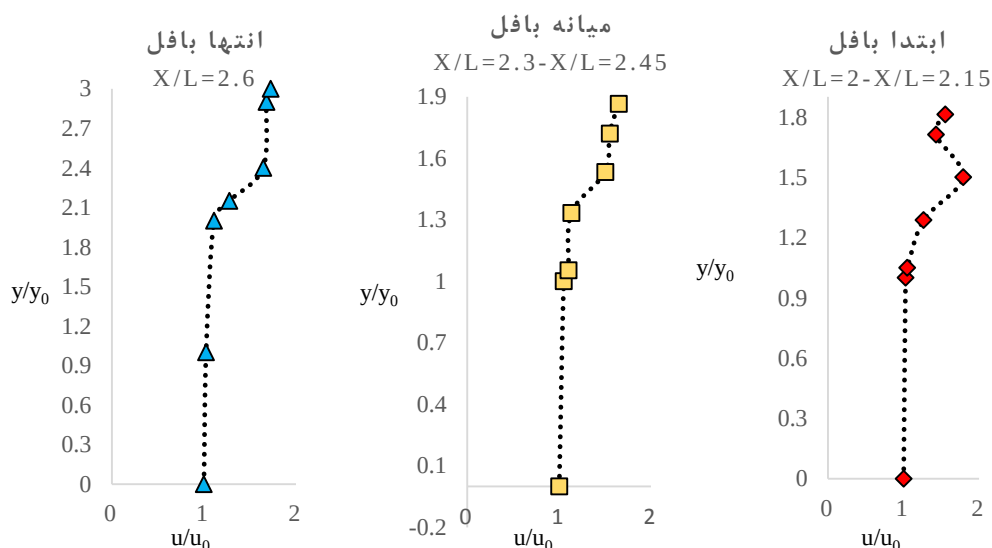
جریان، افت انرژی و تأثیر امواج مورب که در جریان‌های فوق‌بحرانی رخ می‌دهد، به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. در ادامه، در مقاطع $x=2/45$ متر، سرعت به‌دلیل عبور از ناحیه تنگ‌شدگی و خروج از منطقه تأثیر مستقیم بافل، روند افزایشی ملایمی پیدا می‌کند. اما نکته کلیدی این



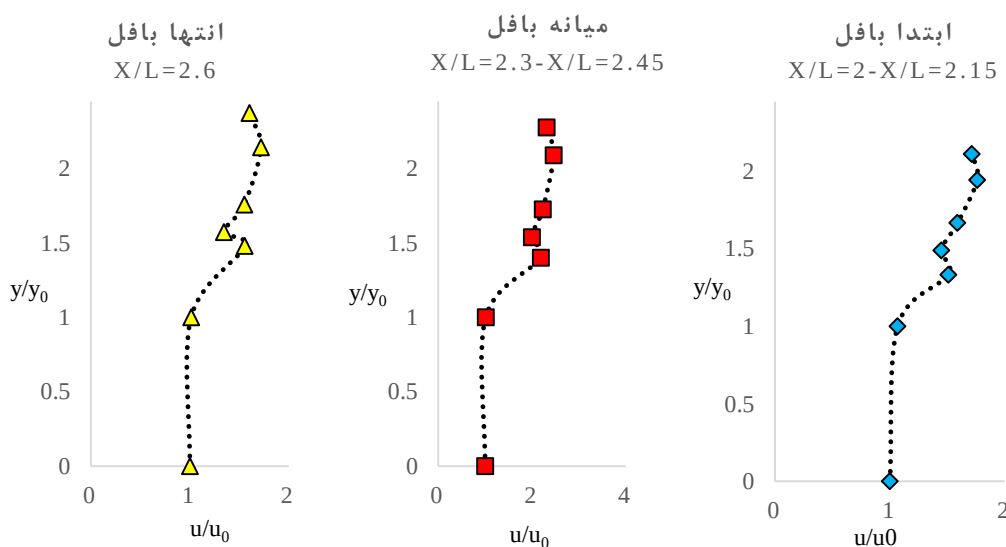
شکل ۱۴- پروفیل طولی سرعت جریان در دبی‌های مختلف در جریان زیربحرانی



شکل ۱۵- پروفیل طولی سرعت جریان در دبی‌های مختلف در جریان فوق‌بحرانی



شکل ۱۶- پروفیل عمودی (عمقی) سرعت جریان در سه نقطه ابتدا، میانه و انتهای سازه بافل در دبی‌های مختلف در جریان زیر بحرانی



شکل ۱۷- پروفیل عمودی (عمقی) سرعت جریان در سه نقطه ابتدا، میانه و انتهای سازه بافل در دبی‌های مختلف در جریان فوق بحرانی

بررسی تغییرات انرژی جریان و استهلاک انرژی

الف) جریان زیر بحرانی

نتایج جدول ۳ به وضوح نشان می‌دهد که سازه بافل در رژیم جریان زیر بحرانی، کارایی بالا در استهلاک انرژی دارد. درصد استهلاک انرژی $(\Delta E/E_1\%)$ در این رژیم، در محدوده ۷۴/۲ درصد تا ۷۷/۹ درصد متغیر است. این سطح بالای استهلاک انرژی حاکی از آن است که سازه بافل با ابعاد و هندسه مشخص خود (به‌ویژه زاویه راس ۴۵ درجه)، در شرایط جریان زیر بحرانی، به نحو مؤثری باعث ایجاد تلفات انرژی می‌شود. در جریان زیر بحرانی طبق روند تغییرات استهلاک انرژی در دبی‌های مختلف در گروه

دبی‌های پایین‌تر روند استهلاک انرژی افزایشی است اما با افزایش مقادیر دبی این استهلاک انرژی با تغییرات تدریجی کاهش می‌یابد. مکانیسم‌های اصلی استهلاک انرژی در این رژیم شامل:

۱. فرم‌درگ: مقاومت ناشی از شکل سازه در برابر جریان که منجر به جدایش جریان و تشکیل گردابه‌های بزرگ در بالادست و پایین‌دست می‌شود.
۲. تلاطم شدید: اختلاط و آشفتگی جریان در مجاورت بافل، که انرژی جنبشی را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند.
۳. اصطکاک موضعی: افزایش اصطکاک سیال با سطوح بافل و دیواره‌های کانال در ناحیه انقباض

ب) جریان فوق بحرانی

در رژیم جریان فوق بحرانی، مطابق با جدول ۴، درصد استهلاك انرژی نسبت به جریان زیر بحرانی کمتر است، و در محدوده ۲۵/۷ تا ۳۵/۱ درصد نوسان دارد. این اختلاف در کارایی استهلاك انرژی بین دو رژیم، ناشی از تفاوت اساسی در دینامیک سیالات مربوط به هر رژیم است. روند تغییرات در این رژیم نشان می‌دهد که با افزایش دبی درصد استهلاك انرژی کاهش می‌یابد (از ۳۵/۰۸ درصد در دبی ۰/۰۴۸ به ۲۵/۷۳ درصد در دبی ۰/۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه).

این پدیده می‌تواند به این دلایل باشد:

۱. غوطه‌وری نسبی سازه: در دبی‌های بالاتر، عمق جریان افزایش یافته و سازه بافل ممکن است تا حدی غوطه‌ور شود؛ در نتیجه، جریان فوق بحرانی پراثرتری تمایل دارد به جای برخورد کامل و ایجاد تلاطم شدید، از روی سازه عبور کند که این امر می‌تواند کارایی استهلاك انرژی را کاهش دهد.

۲. ماهیت پراثری جریان: انرژی جنبشی اولیه در جریان‌های فوق بحرانی بسیار بالاست. با وجودی که بافل بخشی از این انرژی را مستهلک می‌کند، اما نسبت آن به کل انرژی ورودی ممکن است کمتر باشد.

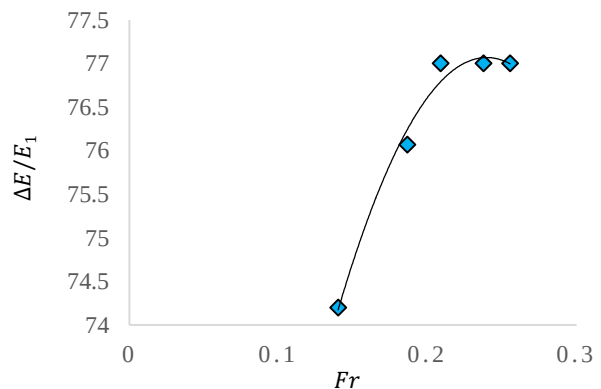
۳. مکانیسم‌های متفاوت استهلاك: در جریان فوق بحرانی، استهلاك انرژی ممکن است بیشتر از طریق تشکیل پرش هیدرولیکی (در صورتی که عدد فرود به قدر کافی بزرگ باشد و شرایط برای آن فراهم شود) و تلاطم‌های شدید در نواحی جدایش جریان اتفاق افتد.

با این حال، استهلاك ۲۵ تا ۳۵ درصدی انرژی در جریان فوق بحرانی نیز اهمیت دارد و نشان‌دهنده نقش مؤثر سازه در کاهش انرژی کلی جریان‌های پرسرعت است، که می‌تواند در کاهش خطرات فرسایش و بهبود پایداری سازه‌های هیدرولیکی پایین دست مفید باشد. در شکل ۲۰، نمودار تغییرات استهلاك انرژی در مقابل عدد فرود و در شکل ۲۱، نمودار درصد استهلاك انرژی در دبی‌های مختلف در جریان زیر بحرانی آورده شده است.

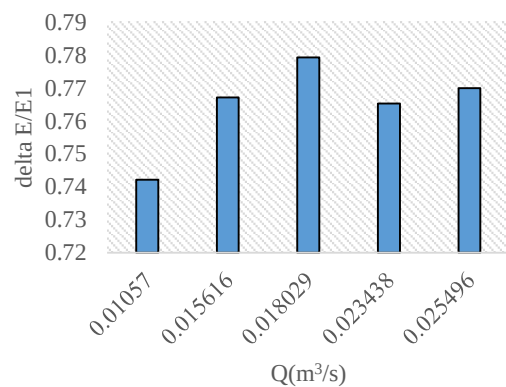
ثبات نسبی درصد استهلاك انرژی در دبی‌های مختلف بیانگر عملکرد پایدار و بهینه این هندسه بافل در شرایط زیر بحرانی است. این یافته از اهمیت زیادی در طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین دست سرریزها یا در مناطقی که نیاز به کاهش سرعت جریان برای جلوگیری از فرسایش بستر و دیواره‌ها وجود دارد، برخوردار است. در شکل ۱۸ نمودار تغییرات استهلاك انرژی در مقابل عدد فرود در جریان زیر بحرانی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۹ نمودار درصد استهلاك انرژی در دبی‌های مختلف در جریان زیر بحرانی آمده است.

جدول ۳- محاسبه تغییرات انرژی جریان در کانال مرکب مستطیلی با سازه بافل مرکزی در جریان زیر بحرانی

$Q(m^3/s)$	$E_1(m)$	$E_2(m)$	$E_3(m)$	$\Delta E/E_1\%$
۰/۰۱	۰/۰۸۶	۰/۰۸۱	۰/۰۲۲	۷۴/۲
۰/۰۱۵	۰/۱۰۶	۰/۱۰۳	۰/۰۲۴۷	۷۶/۷
۰/۰۱۸	۰/۱۲۳	۰/۱۱۸	۰/۰۲۷	۷۷/۹
۰/۰۲۳۴	۰/۱۴۱	۰/۱۳۳	۰/۰۳۳	۷۶/۵
۰/۰۲۵۴	۰/۱۴۹	۰/۱۴۴	۰/۰۳۴	۷۶/۹



شکل ۱۸- نمودار تغییرات استهلاك انرژی در مقابل عدد فرود در جریان زیر بحرانی



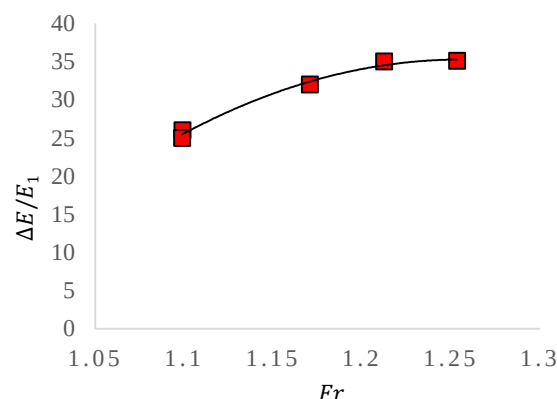
شکل ۱۹- نمودار درصد استهلاك انرژی در دبی‌های مختلف در جریان زیر بحرانی

یافته و در نتیجه، دبی عبوری نیز با وجود کاهش جزئی عمق جریان در برخی نقاط، افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. این افزایش دبی در گلوگاه نشان‌دهنده اثر شتاب‌دهندگی کانال در این ناحیه است.

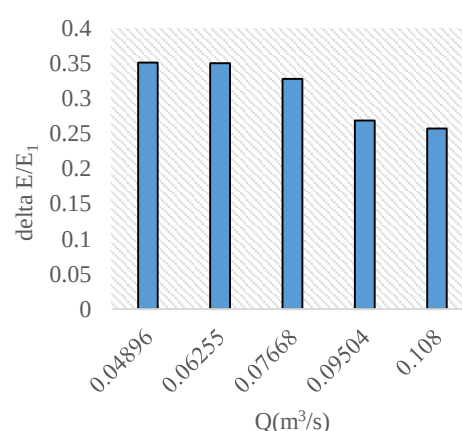
ب) جریان فوق بحرانی

در مقطع بالادست، عمق جریان افزایش می‌یابد و در مقطع گلوگاه، عمق جریان نیز افزایش می‌یابد، اما همچنان نسبت به مقاطع بالادست، عمق در گلوگاه کمتر است. در هر دو مقطع بالادست و گلوگاه، با افزایش عمق جریان، پارامتر $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ نیز افزایش می‌یابد. اما در جریان فوق بحرانی، مقادیر $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ در هر دو مقطع به‌طور کلی بسیار بالاتر از جریان زیر بحرانی است. همچنین، تفاوت بین مقادیر $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ در مقاطع بالادست و گلوگاه در جریان فوق بحرانی نسبت به جریان زیر بحرانی کمتر است، به این معنی که اثر شتاب‌دهندگی گلوگاه در این حالت کمتر محسوس است. در جریان فوق بحرانی، سرعت جریان بسیار بالا است. افزایش عمق جریان در این حالت نیز منجر به افزایش دبی می‌شود. اثر گلوگاه در این شرایط اثر کمتری روی افزایش دبی دارد زیرا جریان از قبل در سرعت بالا قرار دارد.

مهم‌ترین تفاوت در مقادیر $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ است. در جریان فوق بحرانی، این پارامتر به‌طور قابل توجهی بالاتر از جریان زیر بحرانی است. این نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود (که در جریان فوق بحرانی بزرگتر از ۱ است)، توانایی کانال برای عبور دبی افزایش می‌یابد. تفاوت اصلی بین دو نوع جریان در عدد فرود است. عدد فرود نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانش است و در جریان زیر بحرانی، کمتر از ۱ و در جریان فوق بحرانی، بزرگتر از ۱ است. در جریان فوق بحرانی، نیروی اینرسی غالب است که منجر به سرعت‌های بالا و تغییرات دینامیکی بیشتر می‌شود. در جریان زیر بحرانی، انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و گلوگاه این تبدیل را تشدید می‌کند. در جریان فوق بحرانی، انرژی جنبشی از قبل بسیار بالاست و تغییرات کمتر تاثیرگذار هستند. به‌طور خلاصه، نمودار نشان می‌دهد که در جریان فوق بحرانی، کانال توانایی عبور دبی بسیار بیشتری را دارد و اثر شتاب‌دهندگی گلوگاه نیز نسبت به جریان زیر بحرانی کمتر است. این تحلیل بر اساس روند تغییرات پارامترهای ارائه شده و اصول مکانیک سیالات صورت گرفته است. در شکل ۲۲ نمودار تغییرات نسبت h/B_c در مقابل نسبت $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ در بالادست بافل و گلوگاه در جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی آمده است.



شکل ۲۰- نمودار تغییرات انرژی در مقابل عدد فرود در جریان فوق بحرانی



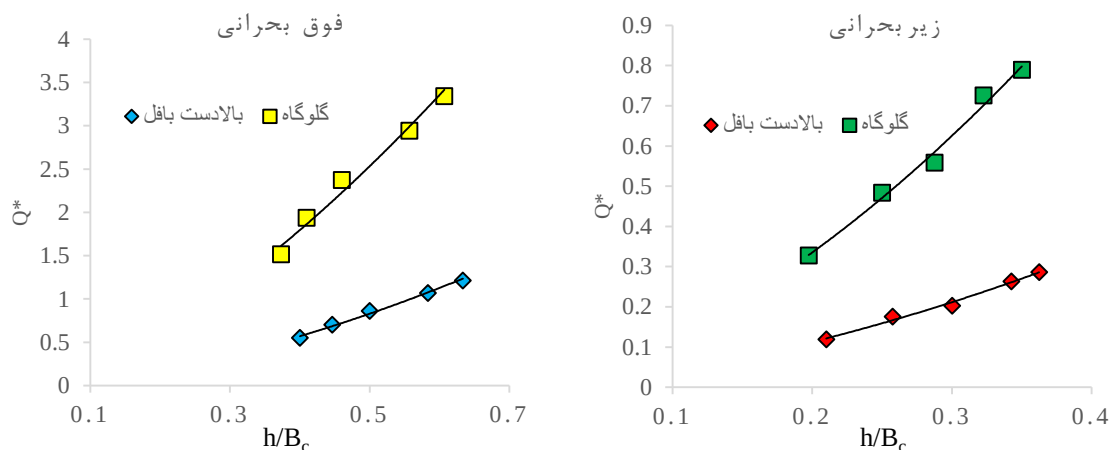
شکل ۲۱- نمودار درصد استهلاک انرژی در دبی‌های مختلف در جریان فوق بحرانی

اثر انسداد سازه بافل بر توزیع دبی عبوری در دو رژیم

زیر بحرانی و فوق بحرانی

الف) جریان زیر بحرانی

در مقطع بالادست (h_1/B_c)، عمق جریان به تدریج افزایش می‌یابد. در مقابل، در مقطع گلوگاه h_2/B_c نیز عمق جریان افزایش می‌یابد، اما همچنان نسبت به مقاطع بالادست، عمق در گلوگاه کمتر است. در مقطع بالادست، با افزایش h_1/B_c ، پارامتر $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ نیز افزایش می‌یابد، اما این افزایش نسبتاً خطی است. در مقطع گلوگاه، با افزایش h_2/B_c ، پارامتر $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ با شدت بیشتری افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که به ازای مقادیر مشابه h_1/B_c و h_2/B_c ، مقدار $Q/(B_c^{2.5} g^{0.5})$ در گلوگاه به مراتب بیشتر است. در جریان زیر بحرانی، افزایش دبی منجر به افزایش عمق جریان می‌شود. در گلوگاه، به دلیل کاهش عرض موثر (B_c) و تغییر هندسه، سرعت جریان افزایش



شکل ۲۲-مقایسه تغییرات نسبت h/B_c در مقابل نسبت Q^* در بالادست بافل و گلگاه در جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی

نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار هیدرولیکی جریان در کانال مرکب مستطیلی با حضور بافل مرکزی و نسبت انسداد $33/3$ درصد تحت دو رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی، بررسی و تحلیل شد. بررسی‌ها با تمرکز بر پارامترهای هیدرولیکی مهم شامل عدد فرود، پروفیل‌های سرعت جریان و پروفیل سطح آب در سه مقطع طولی (ابتدا، میانه و انتهای بافل) و اثرات آن‌ها بر نرخ استهلاک انرژی انجام شد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد در رژیم زیر بحرانی، بافل مرکزی به‌عنوان یک مانع موثر عمل کرده و منجر به تغییرات چشمگیر در مشخصات جریان می‌شود. ورود جریان به ناحیه بافل با کاهش نسبت h/b (از $0/725$ به $0/395$ در بالاترین دبی) همراه است که این خود موجب شتاب‌گیری قابل توجه جریان و افزایش عدد فرود به مقادیر نزدیک به مرز بحرانی در میانه بافل می‌شود. این پدیده با افت سطح آب در ناحیه تنگ‌شده و افزایش سرعت همراه است. در انتهای بافل، با وجود بازگشت نسبی عمق، عدد فرود همچنان بالا باقی مانده که نشان‌دهنده اتلاف انرژی و باقی‌ماندن اثرات آشفتگی است. نرخ استهلاک انرژی در رژیم زیر بحرانی در محدوده $74/72$ تا 78 درصد قرار دارد. این استهلاک بالا ناشی از مکانیسم‌های متعددی چون فرم‌درگ، تلاطم شدید، تشکیل گردابه‌ها و اصطکاک موضعی است. روند افزایشی استهلاک در دبی‌های پایین‌تر و سپس کاهش تدریجی آن با افزایش دبی، نشان‌دهنده دینامیک پیچیده جریان در مجاورت بافل است.

در رژیم فوق بحرانی، جریان توانایی بالاتری در حفظ انرژی جنبشی خود دارد. حضور بافل منجر به تغییرات محدودتر و پایدارتر در پارامترهای جریان می‌شود. اعداد فرود در هر سه

مقطع ابتدا، میانه و انتهای بافل به‌طور مداوم بالاتر از ۱ باقی مانده و تغییرات عدد فرود نسبت به h/b کمتر محسوس است. بافل باعث کاهش موضعی عمق (h/b) در میانه شده، اما به دلیل ماهیت فوق بحرانی جریان، از افت شدید سطح آب و شتاب‌گیری قابل توجه جلوگیری می‌کند و بیشتر بر توزیع موضعی سرعت و عمق تأثیر می‌گذارد. تحلیل تغییرات در سه مقطع (ابتدا، میانه و انتهای بافل) به وضوح اثرات موضعی بافل بر جریان را نشان می‌دهد. به‌خصوص، مقایسه بافل با مقادیر ابتدایی و انتهایی، نقش کانونی بافل در تعدیل دینامیک جریان و نحوه اتلاف یا تبدیل انرژی را برجسته می‌سازد. یافته‌ها نشان می‌دهند که بافل مرکزی به‌عنوان یک سازه‌ی تنظیم‌کننده دبی و انرژی عمل می‌کند. در مقایسه با رژیم زیر بحرانی، درصد استهلاک انرژی در رژیم فوق بحرانی کمتر و در محدوده $25/73$ تا $35/08$ درصد نوسان دارد. این اختلاف عمده‌تاً به دلیل ماهیت پراثری جریان فوق بحرانی، احتمال غوطه‌وری نسبی سازه در دبی‌های بالاتر و مکانیسم‌های متفاوت استهلاک مانند تشکیل پرش هیدرولیکی یا تلاطم‌های خاص است. با این حال، استهلاک قابل توجه انرژی در این رژیم نیز نشان‌دهنده نقش مؤثر بافل در کاهش انرژی کلی جریان‌های پرسرعت، که می‌تواند به افزایش پایداری سازه‌ها کمک کند، می‌باشد. در مجموع، این پژوهش نشان داد که در کانال‌های مرکب، هندسه‌ی موانع مانند بافل می‌تواند به‌طور قابل توجهی دینامیک جریان را، بسته به رژیم حاکم (زیر بحرانی یا فوق بحرانی)، دگرگون سازد. درک این تفاوت‌ها برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی کارآمدتر، پیش‌بینی دقیق‌تر پروفیل سطح آب و مدیریت انرژی جریان در کانال‌های مشابه، امری ضروری است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه شهرکرد به دلیل در اختیار قرار دادن امکانات لازم برای انجام این پژوهش، تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها، انجام مراحل آزمایشگاهی، تهیه پیش نویس اولیه مقاله
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

نویسنده سوم: نظارت

نویسنده چهارم: نظارت

نویسنده پنجم: تحلیل داده‌ها

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

- Basin Management, 18(3), pp. 377–382.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1653307>
5. Bijankhan, M., Teymourkhani, A. and Ferro, V., 2022. Portable central baffle flume. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(2).
<https://doi.org/10.4081/jae.2022.1339>
6. Carollo, F.G., Di Stefano, C., Ferro, V. and Pampalone, V., 2016. New stage-discharge equation for the SMBF flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5), pp. 04016005.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001005](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001005)
7. Djunur, L.H., Pallu, M.S., Karamma, R. and Bakri, B., 2024. Effect of Porous Rectangular Type Baffle Block Angle on Hydraulic Jump Downstream of Spillway. *Civil Engineering Journal*, 10(10), pp. 3173–3193. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-10-04>
8. Ghasemi, M. and Vatankhah, A.R., 2024. Experimental study of simple flumes with converging triangular walls. *Flow Measurement and Instrumentation*, 97, pp. 102623.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102623>
9. Ghaderi, D., Mollazadeh, M. and Mahdizadeh, H., 2022. Influence of T shape baffles arrangement on flow hydraulic characteristics in fishways. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(1), pp.35-51.[In Persian].
<https://doi.org/10.22055/jhs.2022.40382.1209>
10. Ghasemzadeh, F. and Kouchakzadeh, S., 2014. Design of flat invert trapezoidal flow measurement flume. *Iranian Water Research Journal*, 8(2), pp. 1-10. [In Persian].
https://iwrj.sku.ac.ir/article_11000.html
11. Ibrahim, M.M., Hamdi, B., Ibraheem, A.M. and Samy, A., 2026. Baffle Pier Effects on Hydraulic Performance and Scour Downstream of Sluice Gates. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 30(1), pp.19-31.
<https://doi.org/10.31272/jeasd.3112>
12. Irzooki, R.H., Bakir, A.A.I. and Kadhban, I.I., 2005. Dissipation of hydraulic energy in stilling basin by cutting baffle blocks. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 12(3), pp.1-19.
<https://doi.org/10.25130/tjes.12.3.07>
13. Khosravi-Hamouleh, M. and Ghanbari Adivi, E., 2026. Baffle Structure in Water Engineering: A Review of Applications, Challenges, and Innovative Methods in Flow Control and Flood Management. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), pp. 37-72.[In Persian].
<https://doi.org/10.22034/nawee.2025.553107.1171>
14. Khosravi, M., Ghanbari-Adivi, E., Raeisi, A., Shams, G. and Mehranfar, N., 2026. Numerical and experimental hydraulic modeling of flow under the influence of a central baffle structure in open channels using OpenFOAM software. *Journal of*
1. Alwan, I. and Azzubaidi, R., 2022. Control of Velocity Profiles by using Baffle Blocks in Open Canals. *Journal of Water Resources and Geosciences*, 1(1), pp.86-101.
<https://jwrg.gov.iq/index.php/jwrg/article/view/17>
2. Azimi, H. and Shabanlou, S., 2017. Comparison of Subcritical and Supercritical Flow Patterns at Triangular Channels with Side Weir. *Iranian Water Research Journal*, 11(3), pp.19-26. [In Persian].
https://iwrj.sku.ac.ir/article_10551.html
3. Bijankhan, M. and Ferro, V., 2019. Experimental study on triangular central baffle flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70, pp. 101641.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101641>
4. Bong, C.H.J. and Liow, C.V., 2020. Hydraulic characteristics of flow through angled baffle-plates in an open channel. *International Journal of River*

- Hydraulics*, 21(3), pp. 23-46. [In Persian].
<https://doi.org/10.30482/jhyd.2026.578810.1761>
15. Niyazi, H., Yaban, H. and Demirel, E., 2022. Structure and dynamics of the turbulent flow through a central baffle. *Flow Measurement and Instrumentation*, 88, p.102248.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102248>
16. Qasim, R.M., Abdulhussein, I.A. and Hameed, M.A., 2023. Analysis of the hydraulic interference between the baffles and the composite hydraulic structure. *EUREKA: Physics and Engineering*, (6), pp.104-117.
<https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002894>
17. Samani, Z., 2017. Three simple flumes for flow measurement in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6), pp. 04017010.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001168)
18. Ubing, C., Ettema, R. and Thornton, C.I., 2017. Flume experiments on baffle-posts for retarding open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), pp. 430-437.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1275048>
19. Ubing, C., 2015. Baffle-post structures for flow control in open channels. Colorado State University.
<https://www.proquest.com/openview/a1ce18cbf70a90fe4a7e549e4b99627e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>