

Baffle Structure in Water Engineering: A Review of Applications, Challenges, and Innovative Methods in Flow Control and Flood Management

Mohammad Khosravi-Hamole¹ , Elham Ghanbari-Adivi^{1*} 

¹ Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 12 March 2026

Revised 28 April 2026

Accepted 06 May 2026

Published online 23 September 2026

Keywords:

Energy dissipation

Baffle structure

Flow control

Open channels

Flood management

ABSTRACT

Objective: The main objective of this study is to provide a comprehensive review of baffle structures in water engineering. The specific objectives are as follows: To review and analyze different types of baffles and their applications in water engineering; To examine and analyze the hydraulic aspects of baffle structures based on the governing fluid flow equations; To propose strategies for improving and optimizing baffle performance; To identify challenges, limitations, and issues in the design and implementation of baffles; To introduce emerging trends and future developments in the design and application of baffles; To emphasize the importance of systematic studies and the expansion of baffles in water engineering projects.

Methods: This study conducted a systematic review to identify and comprehensively evaluate the major applications of baffle structures in water engineering. Scientific and technical resources were collected from reputable databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar. The review includes articles published between 1980 and 2025 to cover both the historical development and technological trends in this field. Using keywords such as *baffle structures*, *flow control*, *energy dissipation*, *flood management*, and *flow measurement*, 300 articles were identified, of which 200 were selected for detailed review.

Results: Specifically, CFD simulations enable more accurate flow assessment and modeling, while machine learning models play predictive and optimization roles in determining the optimal size, arrangement, and angle of baffles. This improves the predictability of flood behavior and reduces risks associated with infrastructure damage. Moreover, baffle structures can dissipate an average of 55% of flow energy. Results from studies combining machine learning models with experimental research demonstrate that baffle structures can increase energy dissipation by 18–22%.

Conclusion: The final conclusion of this study shows that baffle structures, beyond being simple flow control tools, have significant potential to evolve into intelligent and dynamic systems for flood control and water resources management. Despite advancements in design and optimization, challenges remain in the comprehensive modeling of baffle interactions with sediments and their environmental impacts. Future developments should focus on adaptive baffles capable of automatically adjusting their geometry and performance in response to changing flow and sediment conditions. Such an approach will not only maximize baffle efficiency in energy dissipation and flood control but also help minimize negative impacts on aquatic ecosystems.

*Corresponding author, Email: GhanbariAdivi@sku.ac.ir

Cite this article: Khosravi-Hamole, M., 1, Ghanbari-Adivi, (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), 37-72. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.553107.1171>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.553107.1171>

Introduction

One of the most important challenges in water engineering is the management and control of free-flowing currents and hydraulic structures to protect natural resources, infrastructure, and surrounding ecosystems. Baffles, as flow control structures in hydraulic engineering, have a long history of application. These structures play a crucial role in optimizing hydraulic processes. By creating physical barriers in the flow path, they help regulate energy, reduce flow velocity, facilitate sedimentation, improve water quality, and enhance system efficiency.

The main objective of this research is to comprehensively investigate baffle structures in water engineering. The specific objectives of this study are as follows:

1. To review and analyze different types of baffles and their applications in water engineering;
2. To examine the hydraulic aspects of baffle structures based on the governing equations of fluid flow;
3. To propose solutions for improving and optimizing baffle performance;
4. To identify challenges, limitations, and issues in the design and implementation of baffles;
5. To introduce emerging trends and future developments in the design and application of baffles; and
6. To emphasize the importance of systematic studies and the expansion of baffle applications in water engineering projects.

Method

In this review study, scientific and technical resources related to baffle structures in water engineering were collected and analyzed. Articles, reports, and standards concerning different types of baffles and their hydraulic performance were reviewed using reputable databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar.

The study focuses on both recent research and the historical development of baffles, highlighting technological advances such as numerical simulations and artificial intelligence applications in this field. Hydraulic equations related to fluid flow and their effects on baffle performance were analyzed. In addition, the structure, applications, and effectiveness of baffle systems, along with challenges and limitations in their design and implementation in practical projects, were evaluated.

A systematic review was conducted to identify and comprehensively assess the major applications of baffle structures in water engineering. This study includes articles published between 1980 and 2025 to cover both the historical development and technological trends in this field. Using keywords such as *baffle structures*, *flow control*, *energy dissipation*, *flood management*, and *flow measurement*, 300 articles were identified, of which 200 were selected for detailed review.

The selection criteria included studies published over the last 40 years to ensure a comprehensive review covering both foundational and major developments in this field. However, comparative analysis mainly emphasized studies from the past six years to better capture recent developments and findings.

Results

The findings show that the application of advanced technologies such as numerical simulations, computational fluid dynamics (CFD), and machine learning models in baffle structure research significantly improves the accuracy of predicting the performance and efficiency of baffle systems.

Specifically, CFD simulations enable more accurate flow assessment and modeling, while machine learning models play predictive and optimization roles in determining the optimal size,

arrangement, and angle of baffles. This improves flood behavior prediction and reduces risks associated with infrastructure damage.

Studies on flood discharge modeling and damage to buildings and infrastructure have shown that proper installation of baffles contributes up to 38% improvement in controlling hydraulic jump length and approximately 9% increase in flow energy dissipation compared with standard blocks. Baffle structures can also dissipate an average of 55% of flow energy. Furthermore, studies combining machine learning models with experimental research indicate that baffle structures can increase energy dissipation by 18–22%.

Conclusions

The synthesis and analysis of the reviewed studies reveal a significant gap in the existing literature regarding integrated modeling of the long-term impacts of baffle structures on aquatic ecosystems. In addition, the need for standardized protocols to evaluate baffle performance under unexpected flood conditions remains significant.

By integrating these findings, this study proposes a framework for major applications of baffle structures based on their specific hydraulic characteristics. It also identifies challenges and limitations that must be addressed to advance research toward intelligent and responsive baffle systems capable of adapting to changing flow conditions.

The final conclusion of this study shows that baffle structures, beyond being simple flow control tools, have considerable potential to evolve into intelligent and dynamic systems for flood control and water resource management. Despite progress in design and optimization, challenges remain in comprehensively modeling baffle interactions with sediments and assessing their environmental impacts.

Future developments should focus on adaptive baffles capable of automatically adjusting their geometry and performance in response to changing flow and sediment conditions. Such an approach will not only maximize baffle efficiency in energy dissipation and flood control but also help minimize negative impacts on aquatic ecosystems.

Author Contributions

Writing-original draft preparation, methodology, formal analysis and investigation; []: Resources, manuscript editing, conceptualization.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to the University of Shahrekord for the financial support. Conflicts of interest

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the authors used the Chat gpt tool to write part of the text. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.



سازه بافل در مهندسی آب: مروری بر کاربردها، چالش‌ها و روش‌های نوین در کنترل جریان و مدیریت سیلاب

محمد خسروی حموله^۱، الهام قنبری عدیوی^{۱*}

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: هدف اصلی این پژوهش، بررسی جامع سازه‌های بافل در مهندسی آب است. اهداف دیگر این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:
مقاله پژوهشی	۱- مرور و تحلیل انواع بافل‌ها و کاربردهای آن‌ها در مهندسی آب ۲- بررسی و تحلیل جنبه‌های هیدرولیکی سازه‌های بافل بر اساس معادلات حاکم بر جریان سیال ۳- ارائه راهکارهای بهبود و بهینه‌سازی عملکرد بافل‌ها ۴- تشخیص چالش‌ها، محدودیت‌ها و مشکلات طراحی و اجرای بافل‌ها ۵- معرفی روندهای نوین و توسعه‌های آینده در طراحی و کاربرد بافل‌ها ۶- تاکید بر اهمیت انجام مطالعات سیستماتیک و گسترش کاربردهای سازه‌های بافل در پروژه‌های مهندسی آب.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱	مواد و روش‌ها: در این پژوهش، منابع علمی و فنی مرتبط با سازه‌های بافل در مهندسی آب از پایگاه‌های داده معتبری همچون Scopus، Web of Science، Google Scholar و غیره جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. این مطالعه، مقالات منتشر شده بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ را شامل می‌شود تا هم تاریخچه پیدایش و هم روندهای توسعه فناوری در این حوزه را پوشش دهد. با استفاده از کلید واژه‌هایی مانند سازه‌های بافل، کنترل جریان، استهلاک انرژی، مدیریت سیلاب، اندازه‌گیری جریان و غیره تعداد ۳۰۰ مقاله شناسایی و از بین آن‌ها تعداد ۲۰۰ مقاله انتخاب شد. معیار انتخاب مقالات بررسی ۴۰ سال اخیر بوده است تا یک مرور جامع با در نظر گرفتن پیشینه این موضوع و مطالعات مهم و پایه این موضوع صورت گیرد. معیار مقایسه و تحلیل نتایج مقالات، اکثراً مقالات ۶ سال اخیر بوده است تا به پیشرفت‌ها و نتایج جدید بیشتر پرداخته شود.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸	نتایج: تحقیقات به‌طور مشخص، شبیه‌سازی‌های CFD امکان ارزیابی و مدل‌سازی جریان را به طور دقیق‌تر فراهم می‌آورند و مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند نقش پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی‌کننده را در تنظیم اندازه، چیدمان، و زاویه بافل ایفا کنند. این امر موجب افزایش قابلیت پیش‌بینی‌پذیری رفتار سیلابی و کاهش خطرات مرتبط با تخریب زیرساخت‌ها می‌شود. در مدل‌سازی دبی سیلاب و آسیب‌های وارده بر بناها و زیرساخت‌ها، ثابت شده که نصب اصولی بافل‌ها تا ۳۸ درصد در کنترل طول پرش هیدرولیکی و حدود ۹ درصد در افزایش اتلاف انرژی جریان نسبت به بلوک‌های استاندارد نقش‌آفرین هستند. همچنین سازه‌های بافل به‌طور میانگین می‌توانند انرژی جریان را به مقدار ۵۵ درصد مستهلک کنند. نتایج مطالعات ترکیبی مدل‌های یادگیری ماشین با تحقیقات تجربی و نقش پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی‌کننده یادگیری ماشین نشان داده است که سازه‌های بافل قادر به افزایش ۲۲-۱۸ درصدی استهلاک انرژی می‌باشند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶	نتیجه‌گیری: نتیجه‌گیری نهایی این پژوهش نشان می‌دهد که سازه‌های بافل فراتر از ابزارهای ساده کنترل جریان، پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به سیستم‌های هوشمند و دینامیک در کنترل سیلاب و مدیریت منابع آبی دارند. علی‌رغم پیشرفت‌ها در طراحی و بهینه‌سازی، هنوز چالش‌هایی در زمینه مدل‌سازی جامع تعامل بافل‌ها با رسوبات و تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها وجود دارد. توسعه آتی باید بر روی بافل‌های سازگار متمرکز شود که قادر به تنظیم خودکار هندسه و عملکردشان در پاسخ به شرایط متغیر جریان و رسوب باشند. این رویکرد نه تنها کارایی بافل‌ها را در استهلاک انرژی و کنترل سیلاب به حداکثر می‌رساند، بلکه به حداقل رساندن اثرات منفی بر اکوسیستم‌های آبی نیز کمک خواهد کرد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	کلیدواژه‌ها:
	استهلاک انرژی
	سازه بافل
	کنترل جریان
	مجاری باز
	مدیریت سیلاب

*نویسنده مسئول Email: GhanbariAdivi@sku.ac.ir

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (۱۴۰۴). عنوان مقاله. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۲۲-۳۷.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.553107.1171>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مهندسی آب، مدیریت و کنترل جریان‌های آزاد و سازه‌های آبی به منظور حفاظت از منابع طبیعی، زیرساخت‌ها و اکوسیستم‌های پیرامون آن‌ها است. در این میان، سازه‌های بافل (Baffle structures) نقش کلیدی و حیاتی در بهینه‌سازی فرآیندهای هیدرولیکی ایفا می‌کنند. این سازه‌ها با ایجاد موانع فیزیکی در مسیر جریان، به کنترل انرژی، کاهش سرعت، تسهیل ته‌نشینی رسوبات، بهبود کیفیت آب و افزایش راندمان سیستم‌ها کمک می‌نمایند (Chanson, 2015). (Singh, 2014; Novak et al, 2017) اهمیت سازه بافل در مهندسی آب به‌ویژه در شرایط خطرناک مرتبط با سیلاب، فرسایش بستر، و فرآیندهای تصفیه آب، به‌گونه‌ای است که نقش مؤثر آن‌ها در افزایش پایداری و عمر مفید سازه‌های هیدرولیکی به‌طور گسترده‌ای شناخته شده است (Zare and Doering, 2012; Aydoğdu, 2024).

توسعه تاریخی فناوری بافل‌ها به بیش از چند دهه پیش بازمی‌گردد که در ابتدا برای کنترل جریان و استهلاک انرژی در سازه‌های آبی پایه‌گذاری شد (Wang et al, 2023; Yang and Yang, 2021). با پیشرفت دانش هیدرولیک و افزایش نیاز به حفاظت محیط زیست، کاربردهای آن گسترده‌تر شده است به‌گونه‌ای که امروزه در تصفیه‌خانه‌ها، کانال‌های کنترل سیلاب، آبروها و حتی سیستم‌های پیچیده‌تر همچون راکتورهای بیولوژیکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (Al-Mansori et al, 2020). (Ghare et al, 2020) این پیشرفت‌ها به‌طور مستقیم با استقبال از فناوری‌های نوین مانند شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی CFD و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ریاضی همراه بوده که دقت و کارایی طراحی سازه‌های بافل را به‌طور چشمگیری افزایش داده‌اند (Abdi Chooiplou et al, 2024; Pujari et al, 2023).

امروزه، مهندسان آب با چالش‌های متعددی مواجه‌اند که از جمله آن می‌توان به افزایش اثرات ترکیبی سیلاب‌های فزاینده، آلودگی منابع آبی، رشد و توسعه جمعیت، نیاز به استفاده کارآمد از انرژی، و حفظ تنوع زیستی اشاره کرد (Yune and Kim, 2021; Nair et al, 2025). سازه‌های بافل با ویژگی‌های متعدد خود قادرند بسیاری از این مشکلات را بهبود دهند؛ از جمله مدیریت بهتر انرژی جریان، کاهش نرخ فرسایش و انباشت رسوب، بهبود فرآیندهای ارائه شده در تصفیه آب و تسهیل مسیرهای عبوری برای آبزیان مهاجر (Daneshfaraz et al, 2025) همچنین با گسترش فناوری‌های نوین، این سازه‌ها به‌طور فزاینده در مهندسی‌های نوظهور مانند مخازن پویای خودروهای برقی و سیستم‌های صنعتی برای کاهش نوسانات سیال نیز کاربرد یافته‌اند که نمایانگر تنوع و گستردگی اهمیت جهانی این سازه مهندسی است (Dong et al, 2024; Wang et al, 2023).

افزایش قابل توجه و فزاینده‌ی سیلاب‌های طبیعی در سطح جهانی، که ناشی از تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت است، نگرانی‌های عمده‌ای را برمی‌انگیزد. سیل‌ها نه تنها خسارت‌های مالی و جانی زیادی به همراه دارند، بلکه زیرساخت‌های حیاتی را تهدید می‌کنند، و در آینده با توجه به پیش‌بینی‌های تغییر وضعیت اقلیم، این خطرات بیشتر خواهند شد (UNDRR, 2019). (Rojas et al, 2003) قرارگیری در معرض رویدادهای بارش شدید و رواناب‌های سطحی، افزایش سطح سیلاب‌های بزرگ و جهش‌های نرخ جریان در سراسر جهان را رقم زده است، که در فهرست رکوردهای جهانی سیلاب‌ها ثبت شده است (IAHS, 1984). بنابراین، مدیریت دقیق این پدیده‌ها و کاهش آسیب‌پذیری با بکارگیری سازه‌های استهلاک انرژی در مقابل آن‌ها ضروری است تا اثرات مخرب اقلیم و جمعیت فزاینده کاهش یابد. گزارش هزینه‌های انسانی بلایا در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۰۰ ادعا می‌کند که خطرات طبیعی جهانی در ۲۰ سال اول قرن بیست و یکم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است و خاطرنشان می‌کند که افزایش بلایای مرتبط با آب و هوا به‌ویژه "تکان دهنده" بوده است (Maziar et al, 2022). گزارش ارزیابی بلایای طبیعی جهانی ۲۰۱۹ نشان داد که میانگین سالانه فراوانی خطرات طبیعی بزرگ جهانی از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ حدود ۳۲۰ مورد بوده است که روند اولیه افزایشی و سپس کاهشی را نشان می‌دهد. بلایای سیل و طوفان بیشترین فراوانی را دارند و بیش از ۶۰ درصد موارد را تشکیل می‌دهند (Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, 2020). گزارش ارزیابی بلایای طبیعی جهانی ۲۰۲۰ اشاره کرد که بلایای سیل، عمده‌ترین خطرات طبیعی تأثیرگذار بر جهان در سال ۲۰۲۰ بودند (Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Emergency, 2021). از منظر اقتصادی، هزینه‌های مالی ناشی از خرابی سازه‌های هیدرولیکی به‌دلیل سیلاب و انرژی جنبشی جریان اغلب به ده‌ها میلیون یورو در حوادث خاص افزایش یافته است (Cupać et al, 2020).

مجموعه مطالعات و آمار ارائه شده در مطالعات جدید آشکار می‌سازد که مدیریت اثرات انرژی جنبشی جریان طی رخدادهای سیلابی با رویکرد بهبود طراحی، نگهداری پیشگیرانه، استفاده از تجهیزات اتلاف انرژی نوین، پایش مستمر و شبیه‌سازی عددی پیشرفته، لازمه اصلی کاهش خسارات ساختاری و مالی گسترده در سازه‌های هیدرولیکی است. این امر نه تنها موجب افزایش طول عمر مفید سازه‌ها بلکه محافظت از سرمایه‌های ملی و زیرساخت‌های مهم کشور خواهد شد (Mohammed et al, 2020). این امر نشان می‌دهد که راهکارهای موجود از جمله سازه‌های بافل به طور جامع و کامل بررسی، ارزیابی و تحلیل نشده‌اند تا بتوانند پاسخگوی شرایط متنوع جریان باشند. به علاوه، پیچیدگی‌های طراحی بهینه بافل‌ها برای شرایط گوناگون جریان همچنان یک چالش مهندسی است که نیازمند یک مطالعه جامع است تا تمامی کاربردهای سازه بافل در مهندسی آب را دربرگیرد و به ارائه ابزارهای تصمیم‌گیری کارآمد منجر شود.

از منظر علمی و مهندسی، همزمان با افزایش نیازهای عملکردی، موضوع طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های بافل از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. بهره‌گیری از روش‌های نوین شبیه‌سازی سیالات محاسباتی (CFD)، مدل‌سازی دینامیک بیانگر و هوش مصنوعی، به مهندسان این امکان را می‌دهد تا بدون نیاز به آزمایش‌های میدانی گسترده، اثرات پارامترهای مختلف مانند شکل، ابعاد، حالت تنظیم و ماده سازنده بافل را بر جریان آب تحلیل و بهینه‌سازی کنند (Aluthwalage, 2023; Abdi, 2023). Chooplou et al, 2024 علاوه بر این، تحقیقات در زمینه استفاده از مواد نوین با ویژگی‌های مکانیکی و زیستی خاص، مانند مواد انعطاف‌پذیر یا کامپوزیت‌های هوشمند، در حال گسترش است که بهره‌وری و دوام این سازه‌ها را بهبود می‌بخشد و امکان عملکرد در شرایط نامساعد محیطی را فراهم می‌کند (Dong et al, 2024; Wei et al, 2024). همچنین با افزایش شدت و فراوانی سیلاب‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، مدیریت پایدار منابع آب، مقابله با آلودگی‌های آب و بهبود عملکرد تصفیه آب سازه‌های بافل به عنوان یکی از فناوری‌های مکمل و کارآمد در کنترل انرژی جنبشی و هدایت جریان، اهمیت مطالعات جامع و به‌روزرسانی یافته‌های موجود بیش از پیش احساس می‌شود. تنوع گسترده کاربردهای سازه‌های بافل در زمینه‌های گوناگون مهندسی آب نیز بر ضرورت یک مطالعه مروری جامع تأکید می‌کند تا تصویر جامعی از کاربردها، مزایا و محدودیت‌ها ارائه شود و کاربردهای عملی و پژوهش‌های تجمعی را در کنار هم مرور کند.

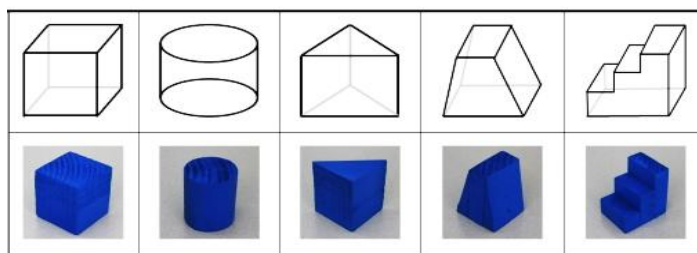
نوآوری اصلی این پژوهش مروری در ارائه یک بررسی و تحلیل جامع و همه‌جانبه از کاربردهای مختلف سازه‌های بافل در مهندسی آب است که در هیچ مطالعه‌ای به این سطح از یکپارچگی و جامعیت بررسی نشده است. این جامعیت شامل کاربردهای عملی، پژوهش‌های تجمعی، نوآوری‌های فنی و طراحی‌های متنوع سازه بافل در مطالعات مختلف می‌شود و به پاسخ به سوالات فنی درباره کارکرد در شرایط مختلف جریان کمک می‌کند. همچنین این رویکرد به چالش‌های جهانی مانند مقابله با آلودگی آب و تأمین پایدار منابع در شرایط تغییرات اقلیمی پاسخ می‌دهد و رویکردی نوآورانه در حل مشکلات زیست‌محیطی و مهندسی آب ارائه می‌دهد.

اگرچه پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه سازه‌های بافل انجام شده است، اما هنوز فقدان یک مرور جامع که همزمان به تمامی جنبه‌های طراحی بهینه مواد، کاربردهای نوین و پژوهش‌های تجمعی در حوزه سازه‌های بافل در مهندسی آب و جریان‌های آزاد بپردازد احساس می‌شود. تحقیقات ارائه شده عمدتاً پراکنده‌اند و هر کدام به یکی از جنبه‌های خاص این موضوع تمرکز دارد، بدون آنکه یک دیدگاه کل‌نگر از سازه‌های بافل ارائه کنند. این پراکندگی دانش، همراه با نیاز به آینده‌نگری، نشان می‌دهد که مرور فعلی باید یکپارچه‌سازی داده‌ها و یافته‌های متنوع را هدف قرار دهد تا روندها، چالش‌ها و فرصت‌های آتی را به صورت سیستماتیک تحلیل کند و به تصمیم‌گیرندگان و پژوهشگران ابزاری برای تحلیل و برنامه‌ریزی ارائه دهد. بنابراین هدف اصلی این پژوهش مروری، ارائه یک نگاه جامع و همه‌جانبه به کاربردهای سازه بافل در مهندسی آب و جریان‌های باز است که با پرداختن به جوانب مختلفی همچون طراحی‌های متنوع، انواع مواد مصرفی، روش‌های بهینه‌سازی، کاربردهای عملی، پژوهش‌های تجمعی و نوآوری‌های فنی، تصویری کامل از موضوع فراهم آورد. این مطالعه همچنین به تحلیل و آینده‌نگری در طراحی سازه‌های هیدرولیکی بافل بر اساس چالش‌ها و فرصت‌های توسعه از طریق فناوری‌های نوین و بررسی اثرات محیط زیستی و اقتصادی

می‌پردازد تا به تصمیم‌گیرندگان، پژوهشگران و مهندسان حوزه آب کمک کند که دید گسترده‌تر و ابزارهای به‌روزتری جهت مدیریت بهینه منابع آب و سازه‌های مرتبط داشته باشند.

تاریخچه و مبانی نظری سازه‌های بافل

بافل به‌عنوان سازه‌ای دیرینه در کنترل جریان، ریشه‌ای در روش‌های ابتدایی تمدن‌های باستان نظیر مصر و بین‌النهرین برای مدیریت آب دارد (Smith, 2020; Johnson and Lee, 2018). در آن دوران، ابداعاتی همچون تغییر شکل مقطع کانال و ایجاد پله‌ها، پیش‌نیازهای اولیه استفاده از بافل‌های امروزی را تشکیل می‌دادند (Ahmed, 2019). با آغاز انقلاب صنعتی و افزایش نیاز به انرژی آبی، ضرورت کنترل دقیق‌تر جریان جهت کاهش فرسایش و افزایش عمر مفید سازه‌ها، تکامل طراحی بافل‌ها را شتاب بخشید (Roberts, 2021; Garcia, 2022) با پیشرفت دانش هیدرولیک، این سازه‌ها به‌طور گسترده در نیروگاه‌ها برای کنترل جریان ورودی به توربین‌ها و بهبود سیستم‌های تخلیه اضطراری به کار گرفته شدند (Bridgewater and Smith, 2023). در قرن بیستم، با ظهور فناوری‌های شبیه‌سازی عددی، نقطه عطفی در دستیابی به طراحی‌های پیشرفته برای بافل‌ها بود (Taylor, 2020). امروزه این سازه‌ها با بهره‌گیری از مواد متنوعی همچون بتن، فولاد و پلیمر، در اشکال و اندازه‌های مهندسی‌شده برای کاربردهای مختلف ساخته می‌شوند (Martinez, 2019). این سیر تکاملی نشان‌دهنده اهمیت روزافزون بافل‌ها در مدیریت بهینه جریان در سازه‌های هیدرولیکی مدرن است. سازه‌های بافل شامل یک تا دو ردیف موازی از ستون‌ها و اشکال مختلف (شکل ۱) هستند که در مسیر جریان قرار می‌گیرند و سازه‌ای مفید برای کند کردن جریان در موقعیت‌های مختلف کانال می‌باشند. سازه بافل نوعی انقباض کننده جریان است که برای خفه کردن و در نتیجه به تأخیر انداختن جریان ورودی، افزایش عمق آن بلافاصله در بالادست سازه و ایجاد پروفیل جریان برگشتی در بالادست عمل می‌کند. عملکرد اساسی یک سازه بافل، به تأخیر انداختن جریان ورودی، کند کردن آن، پخش کردن آن و اتلاف بخشی از انرژی آن است (Ubing et al, 2017; Ubing, 2015).



شکل ۱- انواعی از پیکربندی سازه بافل (Kang, 2017)

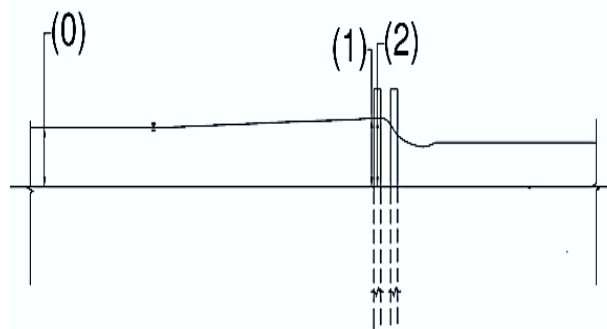
اهمیت سازه بافل در مهندسی آب

سازه‌های بافل با افزایش اتلاف انرژی، کاهش آبستگي و بهبود پایداری سیستم‌های هیدرولیک نقش مهمی در مهندسی آب ایفا می‌کنند. کاربردهای این سازه از جریان‌های آبی گرفته تا سیستم‌های زهکشی متغیر است و تطبیق‌پذیری آن‌ها را در مدیریت جریان آب و کاهش فرسایش نشان می‌دهد. کاربردهای این سازه در بخش‌های گوناگونی از مهندسی آب شامل: سد‌ها و نیروگاه‌های آبی، کانال‌های انتقال آب (مانند کانال‌های آبیاری)، مخازن آب (مخازن ذخیره‌سازی)، تاسیسات تصفیه آب، مناطق ساحلی و مهندسی ساحلی، محل‌های رسوب‌گذاری و سیستم‌های کنترل سیلاب است (Aydın and Ulu, 2018; Shahsavari et al, 2020; Al-Mansori et al, 2020; Rasul et al, 2025; Niyazi et al, 2022; Ahmed et al, 2025; Karimi Chahartaghi et al, 2020; Ahmedi and Thaqi, 2025; Hirom and Devi, 2025; Shahrokhi et al, 2013).

در راستای اهمیت گسترده سازه‌های بافل در حوزه‌های مختلف مهندسی آب، که در بخش قبل بررسی شد، درک عمیق عملکرد هیدرولیکی این سازه‌ها برای طراحی بهینه و کارآمد آن‌ها ضروری است. بررسی عملکرد هیدرولیکی بافل‌ها، به‌ویژه در ارتباط با اصول بقای انرژی و پیوستگی سیال، برای درک نحوه کنترل جریان و اتلاف انرژی توسط این سازه‌ها کمک می‌کند.

عملکرد هیدرولیکی یک سازه بافل بر اساس اصول حاکم بر معادلات انرژی و پیوستگی

عملکرد اساسی یک سازه بافل، کند کردن جریان ورودی، کاهش سرعت آن، پخش کردن آن و اتلاف بخشی از انرژی آن است. با این حال، از آنجا که جریان در یک سازه بافل مبنای غیر یکنواخت است، تجزیه و تحلیل عملکرد هیدرولیکی سازه مستلزم چندین تقریب ساده کننده است که امکان طراحی سازه بافل را برای برآورده کردن الزامات عملکرد در محدوده قابل قبول فراهم می‌کند. نیاز اصلی مورد توجه برای سازه‌های بافل‌دار، در کانال‌های آبرفتی، افزایش عمق آب بلافاصله در بالادست سازه است. عملکرد هیدرولیکی یک سازه بافل‌دار را می‌توان بر اساس اصول بقای انرژی و پیوستگی (جرم) اعمال شده بین سه مقطع عرضی جریان که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است، ارزیابی کرد (Ubing et al, 2015).



شکل ۲- رفتار جریان برای یک ساختار ستون بافل دو ردیفه (Ubing et al., 2015).

۱. بین بخش‌های ۰ و ۱، که در آن ۰ نشان دهنده جریان ورودی یکنواخت در بالادست سازه و ۱ نشان دهنده بخشی بلافاصله در بالادست سازه است.

۲. بین بخش‌های ۱ و ۲، که در آن ۲ نشان دهنده بخش منقبض شده درون سازه است.

نمودار انرژی ویژه، مفهومی مفید برای توضیح عملکرد هیدرولیکی یک سازه با موانع حائل است. هنگامی که کانال منقبض می‌شود و دبی واحد عرض، $q > q_0$ ، افزایش می‌یابد، مجموعه‌ای از منحنی‌ها وجود دارند که هر کدام با افزایش مقدار عمق بحرانی، E_{min} و $\mathcal{V}_c$ ، مشخص می‌شوند. در نهایت، انقباض به پهنای بحرانی می‌رسد که در آن E_{min} با انرژی ویژه اولیه، E_0 ، منطبق می‌شود. همراه با این عمق جریان بحرانی، یک عرض بحرانی، b_c ، وجود دارد که به عنوان حداکثر انقباضی که جریان می‌تواند از آن عبور کند بدون اینکه دچار انسداد و خفگی^۱ شود، تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، هر انقباضی که باریک‌تر از b_c باشد، انقباض "بیش از حد بحرانی" ایجاد می‌کند، به طوری که انرژی کافی برای حفظ نرخ جریان داده شده از طریق انقباض وجود ندارد. عرض بحرانی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$b_c = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{Q}{\sqrt{gE_0^3}} \quad (1)$$

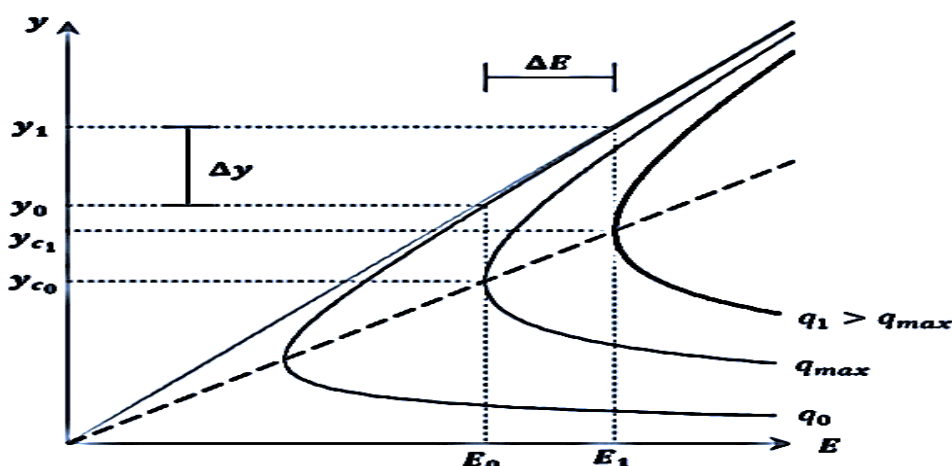
که در آن b_c : عرض بحرانی، Q : دبی جریان، g : شتاب ثقل و E_0 : انرژی اولیه است.

هنگامی که عرض مؤثر تنگ شده جریان کمتر از b_c باشد، تنگ شدن به عنوان یک "خفه کننده" عمل می‌کند، زیرا انرژی ویژه موجود، E_0 ، قادر به عبور دادن جریان از محدوده تنگ شده نیست (به دلیل کم شدن انرژی موجود جریان از حداقل انرژی ممکن جهت عبور جریان). بنابراین جریان به اجبار به عقب برمی‌گردد و یک پروفیل بالازدگی سطح آب^۲ ایجاد می‌کند (M_1) که به تدریج این پروفیل سطح آب جریان را تغییر می‌دهد، به طوری که مقدار انرژی ویژه مورد نیاز برای عبور جریان از تنگ شدن را افزایش داده و به حداقل ممکن (E_{min}) می‌رساند. جریان درون محدوده تنگ شده بحرانی باقی می‌ماند، زیرا جریان

^۱ chocking

^۲ Back water

نزدیک شونده فقط تا حدی به عقب برمی‌گردد که حداقل انرژی مورد نیاز برای عبور نرخ جریان معین از تنگ شدگی را تولید کند. جریان پایین دست بسته به شرایط پایین دست ممکن است فوق بحرانی یا زیر بحرانی باشد. انرژی اضافی در افزایش عمق جریان در تنگ شدگی و در نتیجه آن، افزایش انرژی، ΔE مورد نیاز برای عبور جریان از ناحیه انقباض، اثر خود را آشکار می‌سازد. شکل شماره (۳) افزایش انرژی ویژه و عمق آب مرتبط در بالادست تنگ شدگی را نشان می‌دهد. افزایش انرژی ویژه، هنگام عبور جریان از محل انقباض و در یک پرش هیدرولیکی که بلافاصله در پایین دست محل انقباض تشکیل می‌شود، به صورت آشفستگی جریان مستهلک می‌شود.



شکل ۳- افزایش انرژی ویژه و سطح آب بالادست مورد نیاز برای عبور جریان دچار انسداد شده (Ubing et al., 2015)

انرژی اضافی، ΔE مورد نیاز برای عبور یک دبی ثابت از یک انقباض مسدود شده را می‌توان بر اساس اجزای انرژی ویژه بین بخش‌های ۰ و ۱ ارزیابی کرد:

$$\Delta E = (y_1 - y_0) + \frac{q_0^2}{2gy_1^2} - \frac{q_0^2}{2gy_0^2} \quad (2)$$

که در آن y_1 : عمق جریان در مقطع ۱، y_0 : عمق جریان در مقطع ورودی، g : شتاب ثقل، q_0 : دبی در واحد عرض و ΔE : اختلاف انرژی است. همانطور که در قبل اشاره شد سازه‌های بافل نقش حیاتی در کنترل جریان و اتلاف انرژی در مهندسی آب دارند. این سازه‌ها با بهبود کیفیت آب، کاهش فرسایش و کمک به پایداری سیستم‌های هیدرولیکی، در برابر چالش‌هایی مانند سیلاب، آلودگی و تغییرات اقلیمی بسیار مؤثرند. بنابراین جهت شناخت بهتر این سازه در ادامه به هر یک از کاربردهای آن در مهندسی آب با جزئیات بیشتری پرداخته می‌شود.

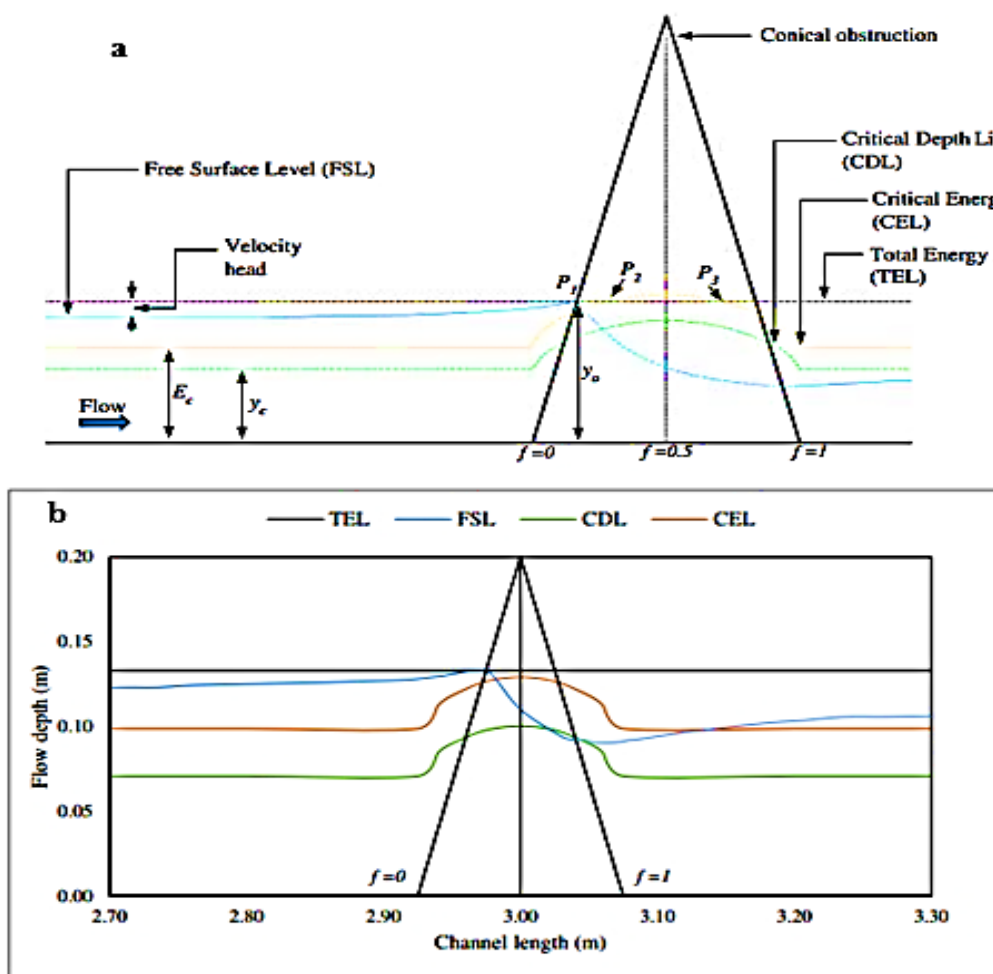
مشخصات و کاربردهای سازه بافل در مهندسی آب

در ادامه مشخصات و کاربردهای سازه‌های بافل در مهندسی آب توضیح داده شده است.

اندازه‌گیری جریان

از رایج‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز، فلوم‌های روباز هستند که با تنگ‌شدگی عرضی (مشابه پارشال فلوم)، برآمدگی کف یا ترکیبی از این دو، سرعت جریان را افزایش می‌دهند. تاکنون نمونه‌های متعددی از فلوم‌ها شامل فلوم‌های با گلوگاه طولانی، کوتاه (فلوم‌های گلو بریده)، فلوم‌های ونتوری و فلوم‌های پارشال، طراحی و مورد بررسی قرار گرفته است (Heyrani et al, 2022; Ghasemi and Vatankhah, 2024). ترکیب سازه بافل با سازه‌های اندازه‌گیری جریان مانند فلوم: یک روش ساده و ارزان برای اندازه‌گیری دبی کانال، ایجاد یک مانع محوری در مقطع جریان است که در نتیجه شرایط بحرانی جریان (شکل شماره ۴) ایجاد می‌شود. چنین دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان، فلوم‌های بافل نامیده می‌شوند (Nair et al, 2024).

(2023) زمانی که آب از طریق یک فلوم بافل عبور می‌کند، بافل ناحیه‌ای باریک‌تر را ایجاد می‌کند و سطح مقطع ناحیه عبور آب را کاهش می‌دهد (با نصب بافل) و سرعت افزایش می‌یابد و طبق رابطه برنولی فشار کاهش می‌یابد. فلوم‌های ترکیبی که فلوم‌های همراه با سازه بافل استفاده می‌شوند می‌توانند به‌عنوان یک دستگاه اندازه‌گیری برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌های باز با رویکردهای مختلف استفاده شوند (Kapoor et al, 2019, 2022; Ghare et al, 2020). همچنین ماژول درپچه بافل انحراف، وظیفه به حداقل رساندن تغییرات در میزان آب تحویلی را در مواجهه با نوسانات نسبتاً بزرگ عمق جریان بالادست بر عهده دارد (Bijankhan and Kouchakzadeh, 2012).



شکل ۴- الف) نمای جانبی فلوم بافل مرکزی مخروطی با پروفیل‌های خطوط انرژی (ب) رسم پروفیل‌های خطوط انرژی در طول کانال Nair et al., (2023)

با استفاده از مقادیر عمق بحرانی نظری محاسبه‌شده و انرژی بحرانی، خط عمق بحرانی (CDL) و خط انرژی بحرانی (CEL) در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. پروفیل‌های (CDL) و (CEL) به‌دلیل انقباض حداکثری به مقادیر پیک مربوطه در گلوگاه فلوم بافل مرکزی مخروطی (CCBF) می‌رسند. خط سطح آزاد (FSL) خط جریان واقعی مشاهده‌شده در طول آزمایش است. جریان در نقطه P_1 ، یعنی در نقطه سکون (شکل ۴)، به مانع مخروطی برخورد می‌کند که به‌عنوان انرژی بالادست (E) در نظر گرفته می‌شود و بر این اساس، خط انرژی کل (TEL) با فرض عدم اتلاف انرژی رسم می‌شود. برای شرایط جریان بحرانی، CEL در نقاط P_2 و P_3 از (TEL) عبور می‌کند. از نظر ریاضی، P_2 و P_3 مکان‌هایی را نشان می‌دهند که در آن‌ها انرژی بحرانی برابر با انرژی کل بالادست است. P_2 و P_3 در فاصله مشابهی از گلوگاه مانع مخروطی قرار دارند. P_2 در بالادست گلوگاه است در حالی که P_3 در پایین‌دست گلوگاه قرار دارد. در محل P_2 ، نسبت انرژی به عمق بحرانی (E/y_c) تعیین می‌شود. این نقطه به مانند

نقطه کنترل عمل نموده و با ایجاد یک رابطه مشخص بین انرژی بحرانی و عمق جریان به اندازه گیری جریان صرفاً با قرائت عمق کمک می‌نماید. در شکل ۵ نیز نمونه‌هایی از فلوم‌های بافل نمایش داده شده است.



شکل ۵- تصاویری از فلوم‌های استوانه‌ای مورد استفاده در کانال‌های دایره‌ای و دوزنقه‌ای در شرایط (a,b,c) میدانی و (d) آزمایشگاهی اصلاح شده از (Samani, 2017).

در ادامه مروری بر مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد سازه‌های فلوم بافل در مجاری روباز پرداخته می‌شود: استفاده از فلوم‌های بافل برای اندازه‌گیری دبی در کانال‌های باز، با کارهای پیشگامانه هاگر آغاز شد. او با استفاده از یک استوانه پیش‌ساخته در مرکز کانال جهت ایجاد شرایط جریان بحرانی و کاهش سطح مقطع، رابطه‌ای میان دبی و اشل با دقت ۹۵ درصد ارائه داد (Hager, 1985, 1988). در ادامه، این رویکرد با ورود محاسبات رایانه‌ای توسط سامانی و همکاران بهبود یافت و مدل‌های متنوعی برای کانال‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی توسعه یافت (Samani et al., 1991; Ghare and Badar, 2014). در جریان مطالعات، چالش‌های هندسی و هیدرولیکی با معرفی اشکال مختلف بافل‌ها مورد توجه قرار گرفت:

- **بهینه‌سازی هندسه و پایداری:** برای بهبود پایداری در برابر جریان، استفاده از مانع مخروطی (به‌جای استوانه) پیشنهاد شد (Hager, 1986). (Kapoor et al., 2019). با معرفی فلوم بافل مرکزی مخروطی (CCBF)، رابطه‌ای برای عمق بحرانی در کانال‌های مستطیلی ارائه کردند که بعدها برای کانال‌های دوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی متغیر نیز توسعه یافت (Kapoor et al., 2019, 2022).
- **محل تشکیل مقطع بحرانی:** برخلاف فرض اولیه بر انطباق مقطع بحرانی با گلوگاه فلوم، مطالعات نشان داده‌اند که این دو لزوماً بر هم منطبق نیستند (Tekade et al., 2016; Jesson et al., 2016). در این راستا، Nair et al., (2024) با پیش‌بینی دقیق محل تشکیل مقطع بحرانی، دقت اندازه‌گیری در طراحی CCBF را ارتقا بخشیدند.
- **فلوم‌های بافل مرکزی (CBF):** (Peruginelli and Bonacci, 1997) با معرفی مانع منشوری شکل در مرکز کانال، مفهوم CBF را توسعه دادند که با بهره‌گیری از تحلیل ابعادی و اصول خود-شباهتی توسط پژوهشگران دیگر (Ferro, 2016; Lotfi Kolavani et al., 2019) اصلاح و گسترش یافت.

در پژوهش‌های اخیر، تمرکز بر بافل‌های مثلی و استفاده از قضیه باکینگهام برای استنباط روابط نظری دبی-اشل معطوف شده است (Bijankhan and Ferro, 2019). یافته‌ها نشان می‌دهند که نسبت انسداد پارامتری حیاتی در تمایز بین رژیم‌های جریان آزاد و غوطه‌ور در فلوم‌های مثلی است. همچنین، رویکردهای نوین از ترکیب متغیرهای بدون بعد و تحلیل‌های نظری برای ارائه مدل‌های جامع‌تر استفاده می‌کنند (Aali and Vatankhah, 2023). جزئیات مشخصات این پژوهش‌ها در جدول ۱ و تصویری از کاربرد فلوم‌های بافل مثلی در شکل‌های ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- نمایی از فلوم بافل مرکزی مثلثی (Bijankhan et al, 2022).

جدول ۱- مشخصات پژوهش‌های انجام شده در خصوص اندازه‌گیری جریان با فلوم‌های بافل

منبع	معادله پیشنهادی	نوع رویکرد	پارامترهای موثر
Samani and Magallanez, (2000)	$Q = C_d B_c \sqrt{g \left(\frac{2H}{3} \right)^3}$ $C_d = 1.33 - 0.44 \frac{d}{B} + \sin \left(0.21 \frac{H}{B_c} \right)$	فرض تشکیل عمق بحرانی در مقطع تنگشدگی و در نظر گرفتن معادله انرژی	Q دبی جریان، C_d ضریب دبی، B_c عرض گلوگاه، g شتاب ثقل، H انرژی بالادست، d قطر لوله، B عرض کانال
Carollo et al, (2016)	$Q = \frac{(B_c + \beta h) \sqrt{g} h^{1.5}}{\left\{ \frac{\alpha}{2} + \alpha \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{(B_c + \beta h)^2}{B^2 \alpha^3} \right) \right] \right\}^{1.5}}$	فرض تشکیل عمق بحرانی در فاصله کمی بعد از گلوگاه با در نظر گرفتن اصل انرژی	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، h عمق بالادست، B عرض کانال، α و β ضرایب ثابت
Ferro, (2016)	$\frac{Q^{\frac{2}{3}}}{B_c^{\frac{5}{3}} g^{\frac{1}{3}}} = a \left(\frac{h}{B_c} \right)^n$	قضیه باکینگهام و نظریه خود شباهتی ناقص	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، h عمق بالادست، a ضریب ثابت، g
Baiamonte and Ferro, (2007)	$\frac{y_c}{B_c} = a \left(\frac{h}{B_c} \right)^n$ $a, n = f \left(i, r = \frac{B}{B_c} \right)$	استفاده از اصل خود تشابهی ناقص	y_c عمق بحرانی، B_c عرض گلوگاه، h عمق بالادست، n و a پارامترهای ثابت، i شیب طولی کانال
Vatankhah, (2017)	$\frac{Q}{B_c \sqrt{g} h^3} = \frac{0.826 \left[1 + 0.214 \left(\frac{h}{B_c} \right)^{0.76} \right]^{1.5}}{\left\{ \frac{1}{2} + \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} (1 - 2r^2) \right] \right\}^{1.5}}$	اعمال اثر پس‌زدگی جریان بر تغییرات عمق بالادست و اصلاح رابطه، Carollo et al, (2016)	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، g شتاب ثقل، h عمق بالادست، r نسبت تنگ‌شدگی
Bijankhan and Ferro, (2019)	$\frac{Q}{B_c^{2.5} g^{0.5}} = 0.6925 \left(\frac{h}{B_c} \right)^{0.5734}$	قضیه باکینگهام و نظریه خود شباهتی ناقص	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، g شتاب ثقل، h عمق بالادست
Lotfi Kolavani et al, (2019)	$\frac{Q}{B_c^{2.5} g^{0.5}} = \left[0.655 - 0.1914 \frac{L}{B} + 0.0861 \left(\frac{L}{B} \right)^2 \right] \left(\frac{h}{B_c} \right)^{1.45}$ $E_c = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{1}{C_c^2 B_c^2 g} Q^2}$	معادله اول با رویکرد قضیه دوم تحلیل ابعادی و نظریه خود شباهتی ناقص- معادله دوم با رویکرد معادله انرژی	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، L طول بافل، g شتاب ثقل، C_c ضریب انقباض جانبی
Ghare et al, (2020)	$Q_p = 0.39 m^{0.58} D^{1.5} B g^{0.5} \left(\frac{y}{D} \right)^{2.4}$	استفاده از قضیه پی باکینگهام و فرضیه خود شباهتی	Q_p دبی پیش‌بینی شده جریان، B عرض کانال، g شتاب ثقل، y عمق جریان بالادست

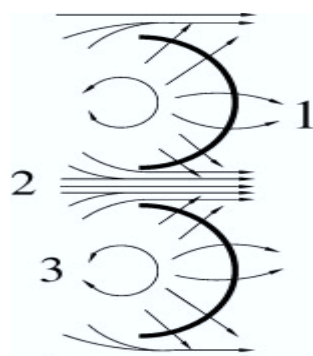
ادامه جدول ۱

منبع	معادله پیشنهادی	نوع رویکرد	پارامترهای موثر
Samani, (2017)	$Q = 0.226 B_c^{2.5} g^{0.5} \left(\frac{H}{B_c} \right)^{1.51}$	بر اساس اصول جریان بحرانی در کانال‌های باز و اصل قضیه بی	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، g شتاب ثقل، H جریانی بحرانی، انرژی بالادست
Kapoor et al, (2019)	$Q = C_d \frac{(B_c y_c + c y_c)^{1.5} g^{0.5}}{(B_c + 2 c y_c)}$ $C_d = 1.1 \left(\frac{E}{B_c} \right)^{0.135}$	استفاده از مفهوم معادله انرژی	Q دبی جریان، B_c عرض گلوگاه، y_c عمق بحرانی، C_d ضریب دبی
Vatankhah and Mohammadi, (2020)	$Q = \left[0.407 \beta^{-0.16} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.263} + 0.407 \beta \right] b \sqrt{g h}^{1.5}$	در نظر گرفتن نسبت‌های انقباض	Q دبی جریان، h عمق بالادست، b عرض، β ضریب ثابت، g شتاب ثقل

کنترل جریان: با استهلاك انرژی و کاهش سرعت جریان

جریان‌های با انرژی هیدرولیکی بالا که از پایین‌دست سازه‌های آبی عبور می‌کنند، با ایجاد سرعت‌های بسیار زیاد، شرایط فشار و اصطکاک شدیدی را ایجاد می‌کنند که می‌تواند منجر به بروز پدیده‌های مخربی نظیر فرسایش، سایش و کاویتاسیون در سازه یا بستر پایین‌دست شود. این وضعیت نه تنها می‌تواند به آسیب‌های جدی به تأسیسات اطراف منجر شود، بلکه در صورت عدم اتخاذ تدابیر لازم، ریسک خرابی کامل سازه را نیز به همراه دارد. از آنجایی که سازه‌های هیدرولیک در مواجهه با جریان‌های پرانرژی، دچار رفتار مخرب تبدیل انرژی پتانسیل بالادست به انرژی جنبشی در پایین‌دست هستند، مدیریت و استهلاك سریع این انرژی تا حد امکان ایمن، یکی از حیاتی‌ترین مباحث در طراحی سازه‌های هیدرولیک محسوب می‌شود (Aydogdu, 2024). (Melan et al., 2019; Khatsuria, 2004) در این راستا، بلوک‌های بافل به‌عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها برای کاهش تکانه و اتلاف انرژی جنبشی در پایین‌دست سرریزها، کانال‌ها و حوضچه‌های آرامش شناخته می‌شوند (Djunur et al., 2024; Kang, 2017; Mohammed and Al-Shukur, 2022). این سازه‌ها با ایجاد آشفتگی و تداخل در مسیر جریان، به‌ویژه در کانال‌های شیب‌دار، انرژی را به‌طور مؤثری مستهلک می‌کنند (Ding et al., 2020). و هدف اصلی آن‌ها یعنی کاهش سرعت‌های فوق‌بحرانی به سطوح زیربحرانی از طریق تحریک پرش هیدرولیکی را محقق می‌سازند (Aydogdu, 2024; Melan et al., 2019; Bong, 2020).

از منظر رفتار فیزیکی، جریان عبوری از ردیف‌های بافل را می‌توان بر اساس تحلیل‌های تجربی به سه الگوی اصلی تقسیم کرد (شکل ۷): (۱) جریان روگذر از روی بافل‌ها. (۲) جریان منحرف‌شده از میان فواصل آن‌ها. (۳) جریان گردابی خمیده که منجر به تشکیل گرداب‌های موضعی در جلوی بافل‌ها می‌شود (Abdelhaleem, 2013; Ubing, 2015). این رفتارها مستقیماً بر طول پرش هیدرولیکی و در نتیجه ابعاد حوضچه آرامش تأثیر می‌گذارند. در حالی که پرش هیدرولیکی کلاسیک در کانال‌های صاف، افقی و منشوری طول بسیار زیادی را اشغال می‌کند، استفاده از مستهلک‌کننده‌های انرژی بر روی بسترهای زبر منجر به وقوع نوع دوم یعنی «پرش هیدرولیکی اجباری» می‌شود که در آن طول پرش و طول مورد نیاز حوضچه آرامش به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از قطعات مکعبی یا نیم‌استوانه‌ای (بافل) با بهبود مشخصات جریان و افزایش درصد استهلاك انرژی، می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر طول پرش و طول حوضچه آرامش گردد (El-Saie et al., 2023; Panwar and Tiwari, 2014).

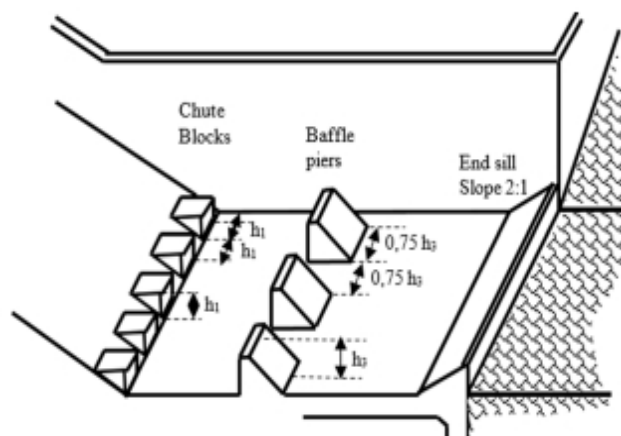


شکل ۷-انواع جریان مشاهده شده در میان بافل‌های نیم‌استوانه‌ای (Abdelhaleem, 2013).

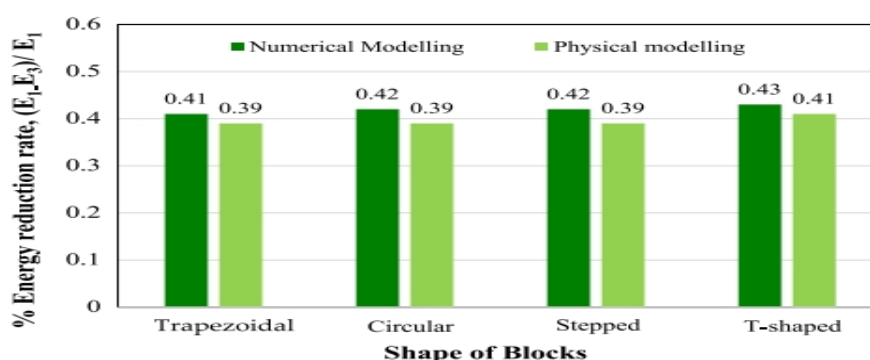
علاوه بر این، بافل‌ها با تغییر در توزیع جانبی جریان و ایجاد تأخیر در حرکت آب، موجب افزایش عمق و کاهش سرعت می‌شوند (Qasim et al., 2023; Jamshidnia and Takeda, 2010). بررسی پروفیل‌های سرعت نشان می‌دهد که اگرچه در ناحیه بالادست بافل یک ساختار اوج (سرعت بیشتر) مشاهده می‌شود، اما حضور بافل در ناحیه پایین‌دست به‌طور مؤثری این ساختار را کاهش داده و با ایجاد آشفتگی، انرژی هیدرولیکی را مستهلک می‌کند (Jamshidnia et al., 2010; Mesbahi et al., 2017; Sadeghfam et al., 2017). از نظر هندسی نیز، عملکرد این سازه‌ها تابع ابعاد، شکل و چیدمان آن‌هاست؛ به‌طوری که برای مثال، بلوک‌های T شکل بالاترین نرخ استهلاک انرژی را در حوضچه‌های آرامش از خود نشان داده‌اند (Kumcu and Ispir, 2022). در نهایت، در شرایط توپوگرافی پیچیده‌ای که طراحی‌های استاندارد (مانند USBR) ممکن است برای مدیریت انرژی‌های بسیار بالا کفایت نکنند، استفاده از آرایه‌های بافل می‌تواند راهکاری کلیدی برای دستیابی به سطوح بالاتر استهلاک انرژی و تضمین پایداری سازه‌های هیدرولیک باشد (Kumcu and Kökpınar, 2019; Eloubaidy et al., 1999).

سازه‌های بافل که معمولاً از یک یا دو ردیف موازی تشکیل شده‌اند، از طریق ایجاد تداخل در جریان، موجب تأخیر در حرکت، کاهش سرعت، افزایش عمق و تغییر در توزیع جانبی جریان می‌شوند (Takeda, 2010 & Jamshidnia). میزان افت انرژی و روند افزایش عمق در این سازه‌ها به‌شدت تابع ابعاد هندسی، شکل بافل‌ها و شرایط جریان ورودی است (Ubing et al., 2017). تعداد و فاصله بافل‌ها تأثیر مستقیمی بر سرعت جریان دارد. همچنین حضور بافل‌ها در ساختارهای سرریز (ایرانپور و همکاران، ۱۴۰۳) تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های هیدرولیکی، مانند اعداد فرود و رینولدز دارد و مقاومت و کارایی جریان را افزایش می‌دهد که به نوبه خود بر سرعت جریان تأثیر می‌گذارد (Qasim et al, 2023; Huang et al, 2021). نتایج مقایسه‌ای نرخ کاهش انرژی، نمودارهای استهلاک انرژی در پژوهش‌های مختلف و مقایسه اثرگذاری سازه‌ها در جدول ۲ و شکل‌های ۸.۹ و ۱۰ ارائه شده است. در بررسی‌های تخصصی بر روی حوضچه‌های آرامش (مانند نوع III)، اثرات چیدمان و هندسه بافل‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است (Kumcu and Ispir, 2022) که نتایج کلیدی آن عبارتند از:

- **تأثیر هندسه و چیدمان:** مطالعات نشان می‌دهند که چیدمان‌های مختلف (تک‌ردیفه، دوردیفه و دوردیفه بدون آستانه) در کنار اشکال هندسی گوناگون، نرخ استهلاک انرژی را به‌طور مستقیم تغییر می‌دهند. در میان اشکال بررسی شده، بلوک‌های T شکل با بالاترین نسبت استهلاک انرژی شناخته شده‌اند.
- **تطابق مدل‌های عددی و تجربی:** استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D نشان داده است که نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با مطالعات آزمایشگاهی در محدوده خطای بسیار پایین (کمتر از ۵ درصد) مطابقت دارد که نشان‌دهنده قابلیت بالای این مدل‌ها در تحلیل رفتار بافل‌هاست.
- **تأثیر بر فشار و هد جریان:** استفاده از بافل‌ها (به‌ویژه نوع تک‌ردیفه T شکل) منجر به کاهش هد فشار در جریان خروجی از حوضچه استهلاک انرژی به سمت پایین‌دست می‌شود که گواهی بر موفقیت در کاهش انرژی جنبشی است.



شکل ۸- مخزن تثبیت کننده نوع III ، (Peterka, 1984)

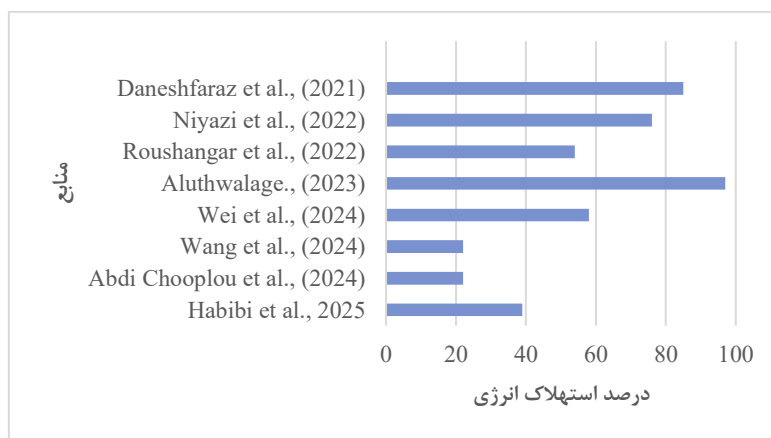

 شکل ۹- مقایسه نرخ کاهش انرژی مدل سازی عددی و فیزیکی برای بلوک های تک ردیفه مستهلک کننده انرژی در حداکثر دبی طراحی $Q=39.6$ لیتر بر ثانیه در پیکربندی های مختلف: دوزنقه ای، دایره ای، پله ای و T شکل (Kumcu and Ispir, 2022).

جدول ۲-مقایسه اثرگذاری سازه های بافل در نرخ استهلاک انرژی

منبع	نوع مطالعه	نتایج
Habibi et al, (2025)	تجربی	در حداکثر دبی، هندسه بهینه مانع قادر به استهلاک ۳۹ درصد انرژی بیشتر نسبت به سرریز بدون مانع بود
Abdi Chooplou et al, (2024)	تجربی- یادگیری ماشین	افزایش ۱۸-۲۲ درصد استهلاک انرژی
دانشفراز و همکاران، (۱۴۰۱)	تجربی	افزایش راندمان استهلاک انرژی با استفاده از آزمایش ها بر روی سه شوت با زوایا، پنج شکل هندسی مختلف بلوک و سه فاصله طولی مختلف انجام شد.
Nguyen et al, (2025)	تجربی	بهبود استهلاک انرژی با استفاده از چیدمان بهینه بافل
Wang et al, (2024)	تجربی	افزایش ۲۲ درصد در راندمان ضدغفونی مرتبط با کاربرد بافل
Aluthwalage, (2023)	تحلیلی	افزایش قابل ملاحظه در استهلاک انرژی راندمان کلی اتلاف انرژی از ۹۲ درصد تا ۹۷ درصد متغیر بود.
Wei et al, (2024)	عددی	بهبود راندمان هیدرولیکی و هیدرودینامیکی در تالاب مصنوعی با افزایش تعداد بافل ها از ۰ به ۵، ۵۸ درصد افزایش در راندمان هیدرولیکی مشاهده می شود. با این حال، هنگامی که تعداد بافل ها ثابت ۱۱ بافل باشد، افزایش طول بافل از ۰/۴ به ۰/۵ متر تنها منجر به بهبود ۵/۵ درصدی در راندمان هیدرولیکی می شود.

ادامه جدول ۲

منبع	نوع مطالعه	نتایج
Zaffar et al, (2023)	عددی	بهینه‌سازی استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی در ساختارهای هیدرولیکی سرریز و حوضچه آرامش با استفاده از بافل
Pujari et al, (2023)	یادگیری ماشین	بهبود پیش‌بینی استهلاک انرژی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین
Dong et al, (2024)	عددی	کاهش نوسان امواج با افزایش عمق و طول بافل
Love & McNamara, (2024)	تجربی	استفاده از بافل افقی جهت افزایش استهلاک در مخازن
Al-Fatlawi & Al-Shuker, (2023)	تجربی	تاثیر بلوک‌های باصفحه شیبدار بر افزایش استهلاک انرژی
Mohammed and Al-Shukur, (2022)	تجربی	بهترین مدل برای استهلاک انرژی و تخمین پرش هیدرولیکی، مدل غیریکنواخت با زاویه شیب (۳۰ درجه) و تعداد پله ۵ است.
Roushangar et al, (2022)	تجربی-عددی	تأثیر منشورهای مثلثی میزان استهلاک انرژی را تا ۵۴ درصد افزایش داد.
Niyazi et al, (2022)	عددی	ساختارهای گردابی توسط بافل‌ها سرکوب شدند و طول منطقه گردش مجدد تا ۷۶٪ کاهش پیدا کرد
Daneshfaraz et al, (2021b)	عددی	تعبیه بلوک‌های مثلثی، استوانه ای و خفاشی شکل بر روی شیب شیب‌شکن به ترتیب ۶۵، ۷۶ و ۸۵ درصد انرژی جریان را مستهلک می‌نمایند.
سرکاماریان و قمیشی، (۱۳۹۸)	تجربی	میزان استهلاک انرژی نسبت به مدل‌های بدون بلوک بافل تا ۴۴ درصد افزایش می‌یابد

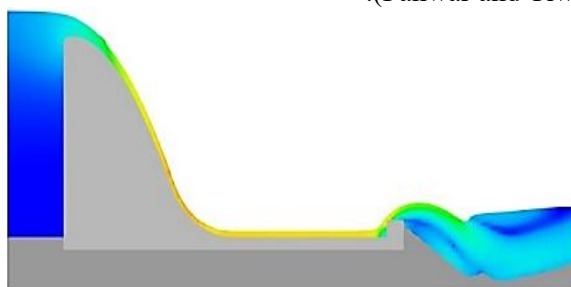


شکل ۱۰- نمودار تغییرات درصد استهلاک انرژی توسط سازه‌های بافل در مطالعات مختلف

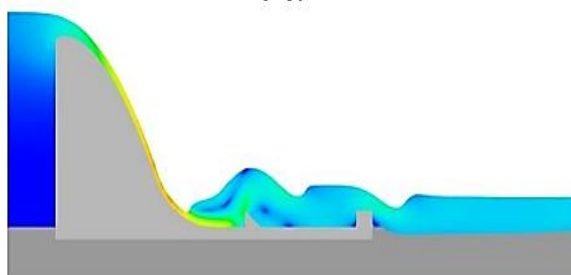
کاهش فرسایش و آبشستگی

طراحی غیراصولی سازه‌های هیدرولیکی و انتقال جریان از تراز انرژی بالا به پایین‌دست، منجر به بروز فرسایش و آبشستگی بستر می‌گردد که تهدیدی جدی برای پایداری سازه‌ها محسوب می‌شود. اگرچه تمهیدات متداول اتلاف انرژی، به‌ویژه در پایین‌دست سرریزها، برای کنترل فرسایش ضروری هستند، اما در بسیاری از موارد ناکافی به نظر می‌رسند (Aydın and Ulu, 2018; Taha et al., 2020a,b). در چنین شرایطی، استفاده از سازه‌های بافل (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) به‌عنوان راهکاری مکمل برای شکستن انرژی جریان و کاهش چشمگیر فرسایش رسوبات در مخازن و پایین‌دست سازه‌ها توصیه شده است (Kumcu and Ispir, 2022; Ahmed et al., 2023; Ahmed, 2024b; Rasul et al., 2025; Khidhir et al., 2025; Sulaiman et al., 2025).

آبشستگی در مجاورت سازه‌های هیدرولیکی، تابعی از رژیم جریان است: در جریان زیربحرانی، آبشستگی موضعی ناشی از تشکیل گرداب‌ها (مانند گرداب نعل اسبی و جریان رو به پایین در پایه‌های پل) در مجاورت سازه‌هایی نظیر پایه‌ها، تکیه‌گاه‌ها و سرریزهای مستغرق رخ می‌دهد (Wang et al., 2016; Mir et al., 2018). در جریان فوق‌بحرانی، آبشستگی موضعی در سازه‌هایی نظیر حوضچه‌های آرامش و صفحات عرضی، ناشی از تغییر رژیم جریان و تشکیل پرش هیدرولیکی است (Mignot et al., 2015; Tiwari, 2013). تبدیل انرژی پتانسیل جریان‌های عبوری از سرریزها و دریچه‌ها به انرژی جنبشی در پایین‌دست، ضرورت استهلاک انرژی را جهت جلوگیری از تخریب بستر و تضمین ایمنی سازه دوچندان می‌کند (نعمادی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ عبدی‌چوپلو، ۱۴۰۱). در این راستا، تحقیقات متعددی بر کاهش آبشستگی موضعی از طریق به‌کارگیری صفحات جداکننده و طوق‌ها تمرکز داشته‌اند (Masjedi et al., 2010; Hamidifar et al., 2018). همچنین، نصب بلوک‌های مانع (Baffle Blocks) در حوضچه‌های آرامش، علاوه بر تثبیت پرش هیدرولیکی و افزایش تلاطم، نقش دوگانه‌ای ایفا می‌کند: این بلوک‌ها در جریان‌های کم، کمبود فشار پایاب را جبران کرده و در جریان‌های زیاد، جریان را از بستر آبراهه منحرف می‌کنند (Abdelhaleem, 2013; Panwar and Tiwari, 2014; Rashed et al., 2022).



شکل ۱۱- فرسایش توسعه یافته در پایین‌دست سرریز در شرایط بدون سازه بافل (Aydin and Ulu, 2018).

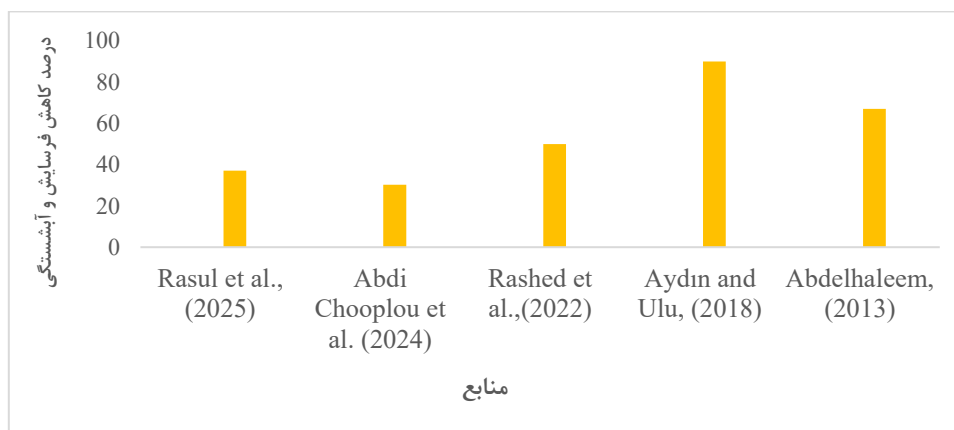


شکل ۱۲- کنترل فرسایش با بکارگیری سازه بافل در پایین‌دست سرریز (Aydin and Ulu, 2018).

با در نظر گرفتن انواع مختلف موانع، چیدمان‌های متعددی برای بلوک‌های کف قابل تصور است. با این حال، اشغال بیش از حد عرض کف توسط بلوک‌ها می‌تواند جریان آب را محدود کند و منجر به عملکردی شبیه به یک آستانه (Sill) شود. بافل‌ها با افزایش اتلاف انرژی و کاهش عمق فرسایش در پایین‌دست سرریزها، به جلوگیری از تخریب بستر کانال کمک می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهند که بافل‌ها می‌توانند منجر به ۱۸ تا ۲۲ درصد افزایش در اتلاف انرژی و ۱۱ تا ۱۴ درصد کاهش در عمق فرسایش شوند (جدول ۳). چیدمان و پیکربندی استراتژیک بافل‌ها نقش مهمی در کاهش قابل توجه مساحت و حجم حفره‌های فرسایش و بهبود پایداری ساختاری سیستم‌های هیدرولیکی ایفا می‌کند (El-Masry, 2001). همچنین، تنظیم بافل‌ها در بالادست و پایین‌دست برای افزایش کارایی اتلاف انرژی و کاهش اثرات منفی بر زیستگاه‌های آبی ضروری است. یافته‌ها نشان می‌دهند که بافل‌ها نه تنها به کنترل فرسایش کمک می‌کنند، بلکه به حفظ ساختار و یکپارچگی کانال نیز یاری می‌رسانند (Abdi, 2024a; Chooplou et al., 2024; Rasul et al., 2025; Ahmed, 2024a). نمودار تغییرات درصد کاهش فرسایش و آبشستگی توسط سازه‌های بافل در مطالعات مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول ۳- اثربخشی سازه بافل در کنترل آبشستگی و فرسایش

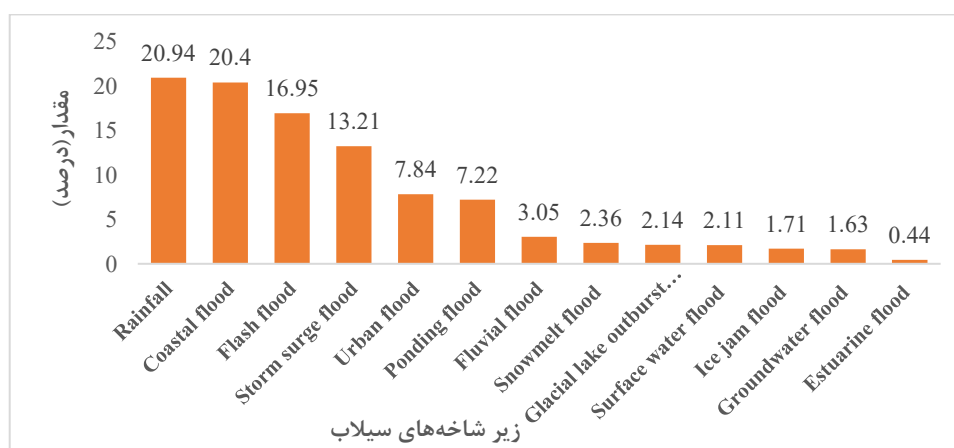
منبع	شاخص تحلیلی	تحلیل و مقایسه نتایج
Rasul et al, (2025)	تاثیر انسداد- شرایط جریان	۱- تحلیل عمیق کاربرد بافل‌ها در مقایسه با سناریوی حالت پایه تحت شرایط انسداد یکسان نشان داد که در سناریوی حالت پایه، عمیق‌ترین عمق آبشستگی معمولاً در فاصله دورتری از خروجی قرار دارد. با این حال، با استفاده از بافل‌ها، بیشترین عمق آبشستگی بسیار نزدیک‌تر به خروجی رخ داد. ۲- در شرایط جریان پایدار، پیکربندی طراحی اول بافل، عمیق‌ترین عمق آبشستگی را با نرخ جریان ۲۰ لیتر بر ثانیه و با ۲۵ درصد انسداد، ۲۹/۸۷ درصد کاهش داد و پیکربندی سه با کاهش ۳۷/۷۰ درصدی برای ۱۳/۸ لیتر بر ثانیه و بدون انسداد ورودی، بیشترین تأثیر را داشت. ۳- در شرایط جریان ناپایدار، پیکربندی طراحی اول، عمیق‌ترین عمق آبشستگی را با ۲۵ درصد انسداد، ۳۷/۳۳ درصد کاهش داد، در حالی که پیکربندی دو با ۲۵ درصد انسداد، ۳۴/۴۸ درصد کاهش را به دست آورد.
Abdi Chooplou et al, (2024)	کمترین عملکرد	کاهش ۱۱ تا ۱۴ درصدی در عمق آبشستگی - کاهش قابل توجه ۲۶/۷ درصدی در مساحت چاله آبشستگی و کاهش ۳۰/۳ درصدی در حجم آبشستگی در مقایسه با استفاده از سرریز بدون بافل
Rashed et al,(2022)	وابستگی به هندسه بافل	۱- بهترین موقعیت بافل در یک سوم اول طول کف با قطر نسبی برابر با ۰/۷۴ نسبت به عمق اولیه آب (بازشدگی دریچه) قرار دارد. این موقعیت باعث کاهشی معادل حدود ۵۰ درصد برای حداکثر عمق آبشستگی، نسبت به حالت کف صاف (بدون بافل) می‌شود. ۲- طول امتداد یافته آبشستگی به حدود ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. ۳- موقعیت تیغه‌های دوم، در دو سوم طول کف، تنها طول نسبی آبشستگی را به حدود ۵۷ درصد کاهش می‌دهد.
Shahsavari et al, (2020)	موقعیت مکانی بافل	۱- میزان عمق آبشستگی به دلیل وجود بلوک‌ها کاهش می‌یابد. ۲- با کاهش فاصله تیغه از پنجه سرریز، طول و عمق آبشستگی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. ۳- افزایش ارتفاع تیغه، عمق آبشستگی را در یک مقطع طولی کاهش می‌دهد. ۴- در موقعیت‌های مختلف بلوک، با افزایش ارتفاع بلوک‌ها، طول آبشستگی کاهش می‌یابد. به طوری که بلوک با ارتفاع $(H_b/D=2)$ در مقایسه با بلوک با ارتفاع $(H_b/D=0/66)$ کاهش قابل توجهی در طول آبشستگی دارد.
Aydin and Ulu, (2018)	بیشترین عملکرد	نصب بافل‌ها، میزان فرسایش را حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد نسبت به حالت بدون بافل کاهش داده است
Emiroğlu et al, (2017)	پیکربندی مختلف بافل	اثر بخشی بافل‌ها در کاهش عمق حداکثر فرسایش به عنوان ساختارهای ضدگردابی با اشکال مختلف
Abdelhaleem, (2013)	وابستگی به شرایط جریان	۱- بلوک‌های مانع برای $F_{rl} < 3/5$ زمانی است که از $H_b/D_o = 1$ و $L_b/L_f = 0/4$ استفاده می‌شود که باعث کاهش عمق آبشستگی از ۸۶/۵۱ تا ۸۱/۶۳ درصد می‌شود. ۲- برای $F_{rl} > 3/5$، استفاده از $H_b/D_o = 1/33$ و $L_b/L_f = 0/4$ باعث کاهش عمق آبشستگی از ۵۰/۵۲ تا ۹۱/۸۷ درصد می‌شود. ۳- برای تمام چیدمان‌های در نظر گرفته شده از بلوک‌های مانع، استفاده از $L_b/L_f = 0/4$ و $H_b/D_o = 1/33$ حداکثر کاهش در طول آبشستگی را نشان می‌دهد که از ۶۰/۷۷ تا ۶۶/۹۳ درصد متغیر است.



شکل ۱۳- نمودار تغییرات درصد کاهش فرسایش و آبرستگی توسط سازه‌های بافل در مطالعات مختلف

کاهش اثرات مخرب ناشی از جریان‌های ناگهانی و سیلاب

سیلاب‌ها و زیرشاخه‌های اصلی آن‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، سالانه خسارات جانی و مالی قابل توجهی در سراسر جهان برجای می‌گذارند و اهمیت طراحی و استقرار راهکارهای مهندسی برای کاهش این خسارات هر روز بیش از پیش احساس می‌شود (شکل ۱۴). بافل‌ها به‌عنوان عناصر هیدرولیکی انرژی‌گیر، نقش کلیدی در کنترل، تعدیل و کاهش آثار مخرب سیلاب‌ها مخصوصاً در جریان‌های ناگهانی دارند. عملکرد اصلی این سازه‌ها در مجاری باز بر پایه ایجاد اختلال و شکست در مسیر جریان است که منجر به کاهش انرژی جنبشی و سرعت جریان می‌گردد و در نتیجه میزان فرسایش بستر و دیواره‌ها و شدت تخریب‌های پایین‌دست به‌طور موثر تقلیل می‌یابد (Law et al, 2016; Habibzadeh and Mehrzadegan, 2014; Habibzadeh et al, 2012; Jamshidnia et al, 2010; Yune & Kim, 2021). که نصب بافل‌ها در نقاط استراتژیک می‌تواند تا چند برابر، میزان اتلاف انرژی جریان را افزایش دهد و سطح آسیب را به میزان چشمگیری کاهش دهد (Zare and Doering, 2012; Arao et al, 2000). همچنین بافل‌ها نه‌تنها باعث کاهش شدت امواج سیلابی می‌شوند، بلکه نقش موثری در توزیع یکنواخت آب در مقطع عرضی کانال و بهبود شرایط ته‌نشینی و عملکرد زیست‌محیطی بازی می‌کنند (Zare and Doering, 2012; Habibzadeh and Mehrzadegan, 2014).



شکل ۱۴- آمار کمی در مورد زیرشاخه‌های سیل اصلاح شده از (Zhang and Wang, 2022a).

سازه‌های بافل با کاهش انرژی جنبشی جریان‌های پرسرعت، نقش مؤثری در حفاظت از زیرساخت‌ها، اکوسیستم‌های آبی و تقلیل خسارات ناشی از سیلاب ایفا می‌کنند (Yoon and Park, 2015; Zhang and Huang, 2022). در تحلیل‌های مهندسی، استفاده از بافل‌های بهینه در مقایسه با بلوک‌های استاندارد، منجر به افزایش ۹ درصدی اتلاف انرژی و کنترل ۳۸ درصدی طول پرش هیدرولیکی شده است (Habibzadeh et al., 2012; Zare and Doering, 2012). در خصوص پارامترهای طراحی، مطالعات نشان می‌دهند که افزایش ارتفاع بافل‌های استوانه‌ای همبستگی مستقیمی با افزایش اتلاف انرژی دارد، در حالی که افزایش تعداد ردیف‌ها لزوماً بازدهی را به همان نسبت ارتقا نمی‌دهد (Yune and Kim, 2021). همچنین، تعیین فواصل بهینه بین ردیف‌ها (نظیر نسبت فاصله به قطر $L/D = 3$) در مدل‌های المان گسسته و آزمایشگاهی، جهت کاهش نیروهای دینامیکی و ضربات سیلاب بر سازه‌های پایین‌دست حائز اهمیت است (Law et al., 2016). تنوع در طراحی بافل‌ها شامل بلوک‌های بتنی، سازه‌های عمودی، استوانه‌ای و ترکیبات کامپوزیتی جهت افزایش مقاومت هیدرولیکی است (Habibzadeh et al., 2012; Habibzadeh and Mehrzadegan, 2014). رویکردهای نوین در این حوزه شامل موارد زیر است:

- **بافل‌های هوشمند و نفوذپذیر:** قابلیت تنظیم ارتفاع/موقعیت و بهبود فرایندهای فیلتراسیون و ته‌نشینی در سیلاب‌های رسوب‌دار (Yune and Kim, 2021; Zare and Doering, 2012; Jamshidnia et al., 2010).
 - **سیستم‌های ترکیبی:** تلفیق بافل‌ها با حوضچه‌های آرامش و سدهای کوچک برای بهینه‌سازی توزیع جریان و اتلاف انرژی (Arao et al., 2000; Zare and Doering, 2012; Law et al., 2016).
 - **کاربردهای شهری:** تعدیل سرعت جریان در کانال‌های باز و شبکه‌های فاضلاب جهت جلوگیری از تجمع آلاینده‌ها و مدیریت ایمن جریان سیلاب (شکل ۱۵) (Stamou, 2018; Loginova and Petropavlovskikh, 2021; Admiraal and Zhang, 2023).
- در مجموع، انتخاب دقیق چیدمان هندسی (ارتفاع، فاصله، زاویه و فرم) بافل‌ها، عاملی کلیدی در کاهش شدت سیلاب و ارتقای تاب‌آوری سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شود. به‌طور مثال، استفاده از بافل‌های عمودی جهت جذب شناورهای سطحی و کاهش انرژی دورانی آب در منهول‌ها و کانال‌ها سبب افزایش طول عمر خطوط لوله و کاهش هزینه‌های نگهداری نگاشته شده است (Campisano and Doria, 2007). این سازه‌ها در عملکرد سیستم‌های مدیریت سیلاب شهری به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که بتوانند حجم بالای جریان ناگهانی را کنترل و بدون آسیب به مناطق پایین‌دست هدایت کنند (Arao et al., 2000; Jamshidnia et al., 2010).



شکل ۱۵- نمونه‌ای از سازه‌های بافل L شکل برای کنترل و استهلاک انرژی جریان و قابل استفاده برای اهداف فرعی مانند: تنظیم ظرفیت جریان، کنترل سیلاب و آبگرفتگی در معابر شهری و نیازهای تعمیراتی و غیره در پایین‌دست می‌توان بهره برد.

بهبود فرآیند کنترل و حذف مواد معلق در حوضچه‌های ته‌نشینی

ته‌نشینی به‌عنوان فرآیند جداسازی جامدات معدنی از آب خام تحت تأثیر نیروی جاذبه، مستلزم مدیریت دقیق میدان جریان در مخازن است (Bouisfi et al., 2019). راندمان این مخازن به‌شدت تابع ویژگی‌های هیدرولیکی، از جمله سطوح آشفتگی،

پدیده چرخش مجدد جریان، تشکیل مناطق مرده و وقوع اتصال کوتاه است (Crittenden et al., 2012). در این میان، تفاوت عملکردی میان مخازن ته‌نشینی اولیه (با غلظت ذرات کم و جریان تحت تأثیر توزیع غلظت محدود) و مخازن نهایی (با غلظت بالای لجن و اثرات چگالی قابل توجه) ضرورت کنترل دقیق جریان را دوجندان می‌کند (Krebs et al., 1995; Tamayol et al., 2008; Shahrokhi et al., 2012).

تعبیه بافل‌ها یا دیواره‌های جامد، به‌عنوان یک اصلاح ساختاری ساده اما کارآمد، به‌منظور بازآرایی میدان جریان شناخته می‌شود (Harvard Brescher et al., 1992; Krebs et al., 1995). از منظر هیدرولیکی، جریان عبوری از یک بافل ایستاده (پله)، ترکیبی از جریان‌های رو به عقب (BFS) و رو به جلو (FFS) است (Jamshidnia and Takeda, 2010). اگرچه هندسه بافل ساده به نظر می‌رسد، اما موقعیت و چیدمان آن پیچیدگی‌های زمانی و مکانی شدیدی ایجاد می‌کند که مستقیماً بر جهت جریان، ابعاد مناطق مرده و توزیع غلظت جامدات معلق اثرگذار است. بافل‌ها با غلبه بر گرادیان سرعت و حذف اتصال کوتاه، عملاً نسبت ابعاد مؤثر مخزن را افزایش می‌دهند (Crittenden et al., 2012; Jamshidnia and Takeda, 2009). تحقیقات بر روی مخازن مستطیلی نشان داده است که اثربخشی بافل‌های میانی (مانند دیوار حائل مرکزی) به‌شدت به الگوی جریان غالب وابسته است (Harvard Brescher et al., 1992; Taebi Harandi and Schroeder, 2000). در رویکردهای نوین، توسعه سیستم‌های بافل بر طراحی هندسه‌های مدولار و ابتکاری متمرکز شده است تا کنترل جریان و اتلاف انرژی با حداکثر کارایی صورت گیرد (Wei et al., 2024). در این راستا، مدل‌سازی‌های عددی در تعیین پارامترهای بهینه نظیر تعداد، طول و آرایش بافل‌ها برای یکنواخت‌سازی توزیع جریان و ارتقای راندمان اتلاف انرژی نقش کلیدی دارند (Wei et al., 2024). همچنین، به‌کارگیری بافل‌های مشبک (سوراخ‌دار) در مخازن تماس، منجر به بهبود ۳۱ درصدی شاخص اختلاط مورریل شده است که برای تصفیه‌خانه‌های شهری و صنعتی بسیار حائز اهمیت است (Nasyrlyayev et al., 2020). نتایج مقایسه‌ای اثرگذاری این سازه‌ها در پژوهش‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است.

استفاده از صفحات آرام‌کننده جریان (بافل) به عنوان یک روش جایگزین و مؤثر، با هدف بهبود عملکرد و افزایش راندمان رسوب‌گذاری در حوضچه‌های ته‌نشینی پیشنهاد می‌شود. با توجه به اینکه افزایش ابعاد فیزیکی حوضچه‌ها منجر به افزایش هزینه‌های ساخت و لایروبی می‌گردد، به‌کارگیری بافل‌ها می‌تواند بدون نیاز به افزایش حجم حوضچه، کارایی آن را بهبود بخشد (حیدری و شفاعی بجستان، ۱۳۹۳). مطالعات نشان می‌دهند که عملکرد بافل‌ها به نوع هندسه، زاویه و موقعیت قرارگیری آن‌ها بستگی دارد (Ahmedi and Thaqi, 2025).

- **بافل‌های عمودی منفرد:** قرارگیری این بافل‌ها در مرکز یا نزدیکی ورودی حوضچه باعث کاهش پروفیل سرعت می‌شود. برای غلظت‌های ورودی بالا، استفاده از بافل‌های کوتاه‌تر (کمتر از عمق آب) توصیه می‌شود، در حالی که در غلظت‌های پایین ($LSS < 200$ میلی‌گرم در لیتر)، بافل‌های بلندتر جهت مهار جت‌های جریان و افزایش کارایی ضروری هستند. همچنین، ترکیب بافل عمودی متصل به سطح با یک صفحه نمایش در زیر آن، بیشترین درصد حذف جامدات را به همراه دارد.
- **بافل‌های زاویه‌دار و دو سوراخه:** بافل‌های با زاویه ۶۰ درجه در موقعیت مرکزی و پایین حوضچه، با افزایش عدد فرود و غلظت ذرات، راندمان حذف رسوب را ارتقا می‌دهند (بهترین عملکرد در این زاویه نسبت به جهت جریان گزارش شده است). از سوی دیگر، بافل‌های دو سوراخه در یک‌سوم ابتدایی طول حوضچه، از افزایش ناگهانی غلظت پساب در هنگام ورود جریان به تصفیه‌خانه جلوگیری می‌کنند.
- **بافل‌های طولی و تعداد بافل‌ها:** بافل‌های طولی تحت نرخ جریان پایدار، حذف کدورت را بهبود می‌بخشند. همچنین، استفاده از تعدادی بافل عمودی در موقعیت‌های بهینه، ضمن مستهلک کردن انرژی جنبشی و ایجاد میدان جریان یکنواخت، حجم ناحیه گردش مجدد را به حداقل رسانده و راندمان هیدرولیکی را افزایش می‌دهد.

منبع	نتایج
Hiron and Devi, (2025)	بهترین عملکرد مخزن رسوب‌گذاری، مخزنی است که مجهز به یک چاه آرامش سوراخ‌دار و یک بافل سوراخ‌دار است.
Hiron and Devi, (2024)	بافل‌های سوراخ‌دار در اتلاف انرژی جنبشی در ناحیه ورودی مؤثر هستند و همچنین به ایجاد جریانی توزیع‌شده‌تر و آرام‌تر در ناحیه ته‌نشینی کمک می‌کنند.
Zhang et al, (2024)	تأثیر مکان بافل بیشتر از طول بافل بر ویژگی‌های هیدرولیکی یک رسوب‌گذاری افقی است.
Al-Mafraji and Al-Mussawy, (2021)	بهترین بافل مرکزی یک اتصال کوتاه ایجاد می‌کند که ذرات رسوب شده را تمیز می‌کند، در حالی که بهترین حذف کدورت با کمترین دبی رخ می‌دهد.
Saeedi et al, (2020)	جریان در حوضچه ته‌نشینی به شدت تحت تأثیر بافل قرار دارد. همچنین، بافل‌های نصب شده با ارتفاع کمتر و نزدیک‌تر به ورودی حوضچه و بافل‌های با ارتفاع زیاد و دور از ورودی حوضچه بیشترین تأثیر را دارند.
Nouri and Heydari, (2017)	استفاده از بافل‌ها موجب افزایش ۵-۶ درصدی راندمان ته‌نشینی، با بیشترین بهره‌وری در زاویه ۶۰ درجه است. بهترین ارتفاع و موقعیت آن‌ها در ۴۰ درصد عمق و ۵۰ درصد طول مخزن قرار دارد. همچنین، افزایش تعداد بافل‌ها باعث کاهش راندمان شد و بیش از ۸۰ درصد رسوبات در مرکز مخزن از ورودی ته‌نشین شدند.
Lee, (2017)	اثر بخشی سازه بافل بر عملکرد پساب.
Liu et al, (2016)	کاهش فاصله افقی بافل از ۰/۵ تا ۲ متر موجب افزایش نرخ حذف از ۸۲/۶ به ۹۲/۶ درصد می‌شود، بنابراین پیشنهاد می‌شود فاصله ۰/۵ تا ۲ متر باشد. همچنین، عمق غوطه‌وری بافل از ۰/۵ متر به ۱ متر باعث افزایش قابل توجه در نرخ حذف است، اما افزایش عمق از ۲ به ۲/۵ متر کمی کاهش در حذف دارد؛ بنابراین، عمق ۲ متر بهتر است.
PARK et al, (2014)	مقایسه عملکرد حوضچه‌های مجهز به بافل و بدون بافل نشان داد که، در شرایط جریان ثابت، میزان حذف کدورت در حوضچه با بافل حدود ۱۸ درصد بیشتر از حوضچه بدون بافل بود.
Razmi et al, (2013)	اثر بخشی زاویه سازه بافل بر بهبود راندمان حذف.
Asgharzadeh et al, (2011)	تعیین بخش وسط مخزن به‌عنوان بهترین مکان برای سازه بافل - بهترین ارتفاع برای بافل در وسط مخزن برای غلظت جامد = ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و غلظت جامد = ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، یک سوم و یک چهارم ارتفاع مخزن است.
Jamshidnia and Firoozabadi, (2010)	اثر بخشی موقعیت‌های مختلف سازه بافل بر الگوی جریان از بالادست به پایین‌دست - تعیین موقعیت ایده‌آل سازه بافل در حوضچه ته‌نشینی با تغییر گرادیان سرعت کانال.
Tamayol et al, (2008)	تعیین موقعیت ایده‌آل سازه بافل در ورودی حوضچه ته‌نشینی.
Huggins et al, (2005)	اثر بخشی سازه بافل بر راندمان حذف مواد جامد و معلق از ۸۱/۸ به ۹۱/۱ درصد.

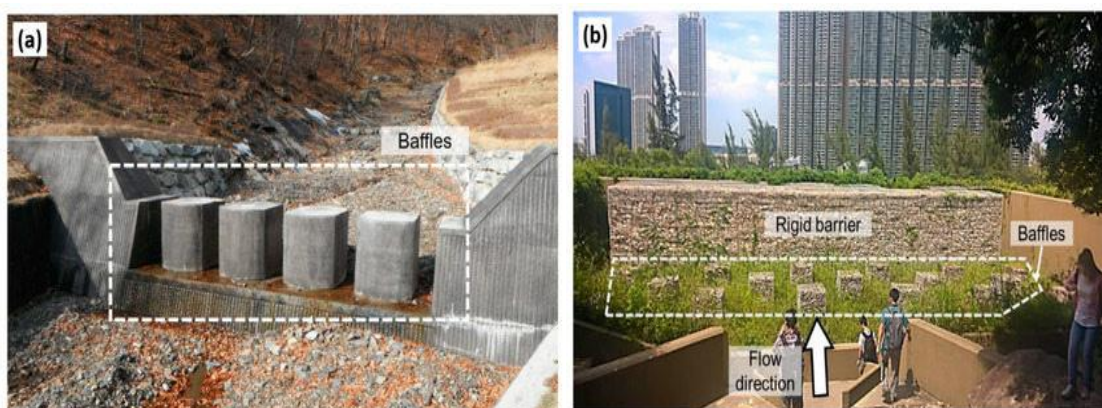
مدیریت و کنترل جریان‌های واریزه‌ای (آواری)^۱

افزایش نرخ بارندگی ناشی از تغییرات اقلیمی، منجر به گسترش پدیده جریان‌های واریزه‌ای به‌عنوان یکی از مخاطرات جدی زمین‌شناسی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی شده است (Wang et al., 2017a, b). این جریان‌ها به‌دلیل سرعت بالا، چگالی زیاد و نیروهای ضربه‌ای مخرب، تهدیدی مستقیم برای جانی و مالی محسوب می‌شوند (Iverson et al., 1997). برای مقابله با این پدیده، طیف وسیعی از اقدامات مهندسی شامل سدهای شکاف‌دار، شبکه‌های انعطاف‌پذیر، کانال‌های زهکشی، حوضچه‌های جریان آوار و موانع کاهش سرعت (بافل‌ها) به‌کار گرفته می‌شوند (Bichler et al., 2012; Gems et al., 2014; Ng et al., 2015a, b; Wang et al., 2017a). که در مسیرهای جریان یا مسیل‌های فصلی مستقر می‌شوند، عملکرد دوگانه‌ای دارند: از یک سو با ایجاد تداخل در الگوی جریان، سرعت و نیروهای ضربه‌ای را کاهش می‌دهند و از سوی دیگر با ایفای نقش فیلتر، از عبور تخته‌سنگ‌ها جلوگیری می‌کنند (Choi et al., 2014; Ng et al., 2015a, b; Wang et al., 2017a). این سازه‌ها می‌توانند به‌صورت مستقل یا به‌عنوان کنترل‌کننده‌های کمکی در کنار سایر سازه‌ها برای کاهش اثرات جریان بر زیرساخت‌های پایین‌دست استفاده شوند. با این حال، طراحی مهندسی بافل‌ها به‌دلیل فقدان دستورالعمل‌های جامع در زمینه پیکربندی بهینه (مانند تعداد ردیف‌ها، ارتفاع، و فواصل

^۱ Debris Flow

عرضی و طولی)، همچنان با چالش‌های فنی روبروست (Good Goodwin et al., 2021). ماهیت پیچیده جریان‌های آواری ناشی از پدیده‌هایی نظیر «جدایش و جذب» همزمان، تحلیل مکانیسم‌های آن‌ها را در مقیاس‌های بزرگ بسیار دشوار می‌سازد (Bowman et al., 2010; Nguyen et al., 2025). مطالعات بر پایه تحلیل المان گسسته نشان داده‌اند که پدیده «جدایش معکوس» به‌طور قابل توجهی بر تحرک و رژیم‌های جریان در مجاورت اجسام دانه‌ای اثرگذار است (Zhou and Ng, 2010a,b) از منظر موقعیت‌دهی، سازه‌های بافل می‌توانند در دامنه‌ها، در بالادست موانع صلب یا در داخل حوضچه‌های رسوب قرار گیرند تا با برهم زدن الگوی جریان و کاهش سرعت در مجاورت هر بلوک، از آسیب‌های ناشی از برخورد جریان به زیرساخت‌ها بکاهند (Cosenza et al., 2006; Choi et al., 2020).

هندسۀ مانع تأثیر آشکاری بر تعامل جریان دارد (Bugnion et al, 2012; Hauksson et al, 2007). تأثیر پیکربندی آرایه بر جریان آوار از نظر تعداد ردیف‌ها، فاصله بین ردیف‌های متوالی، ارتفاع بافل و انسداد عرضی ناشی از بافل‌ها از جمله نکات مهم در به‌کارگیری این سازه می‌باشد. بهینه‌سازی پیکربندی به منظور جلوگیری مؤثرتر از تحرک آوار ضروری است. علاوه بر این، کاهش مساحت آرایه‌ها روی شیب‌ها برای سهولت ساخت و ساز در زمین‌های طبیعی مفید خواهد بود (Ng et al, 2012). در جدول ۵ به اثربخشی سازه بافل در کنترل جریان واریزه‌ای در پژوهش‌های مختلف پرداخته شده است. جریان‌های آوار که با سرعت بالا در امتداد دره‌ها حرکت می‌کنند، می‌توانند عواقب فاجعه‌باری را برای مناطق پایین‌دست به همراه داشته باشند. اقدامات متقابل سازه‌ای معمولاً در امتداد مسیرهای جریان پیش‌بینی‌شده مناطق در معرض خطر جریان آوار نصب می‌شوند تا تحرک جریان آوار را کاهش دهند. نصب سازه بافل، که یک اقدام متقابل از نوع باز هستند، به دلیل هزینه ساخت پایین، توانایی فیلتر کردن سنگ‌ها و افزایش پیوستگی هیدرولیکی افزایش یافته است. همچنین، سازه بافل نسبت به دیواره‌های مستطیلی مزایایی دارند، زیرا نیروی پسی کم و اتلاف انرژی مؤثر ناشی از تداخل بیشتر جریان‌ها بین دیواره‌ها را دارند (Kim and Yune, 2022).



شکل ۱۶- موانع جریان آوار: الف) موانع استوانه‌ای (کوه اومیون در سنول، کره جنوبی) ب) موانع مستطیلی نصب شده در پشت یک مانع صلب (جزیره لانتائو در هنگ کنگ، چین) (Kim et al, 2019).

جدول ۵- مروری بر مطالعات اثربخشی بافل در کنترل جریان واریزه‌ای

منبع	موضوع بررسی شده	نتایج
------	-----------------	-------

Nguyen et al, (2025)	اثرات اتلافی دیواره‌ها بر دینامیک جریان واریزه‌ای و تأثیر آن بر سازه پایین‌دست	بافل‌ها در کاهش سرعت جریان‌ها با اعداد فرود پایین که عموماً در شیب‌های ملایم رخ می‌دهند، مؤثرتر هستند- افزایش تعداد ردیف‌های بافل در یک سیستم بافل می‌تواند جریان‌ها را بیشتر کند کند، و نیروی ضربه دینامیکی روی مانع را کاهش می‌دهد
Kim and Yune, (2025)	بررسی فلوم تخته سنگ‌های درگیر در جریان واریزه با استفاده از دیواره‌های استوانه‌ای و یک مانع صلب	با نصب بافل، نیروی ضربه اوج به‌طور متوسط ۷۰ تا ۹۴ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، افزایش تعداد ردیف‌های بافل از یک به دو منجر به کاهش متوسط ۵۰ درصدی نیروی ضربه برای هر نسبت انسداد عرضی شد.
Luo et al, (2025)	عملکرد موانع جریان واریزه: از دیدگاه انرژی	در شرایط سرریز قابل توجه، ساختار بافل از نظر راندمان انتقال انرژی و اتلاف انرژی از دو نوع مانع دیگر بهتر عمل می‌کند.
Ng et al, (2025)	اثرات جداکننده‌های مانع بر مکانیسم‌های ضربه در برابر جریان آوار	معادله جدید برای پیش‌بینی عمق جریان پس از فرود توسعه یافته که می‌تواند به‌طور محافظه‌کارانه سرعت سرریز، فاصله فرود، سرعت جریان، عمق جریان و نیروی ضربه بر موانع چندگانه را تخمین بزند. نصب چهار مانع با یک منحرف‌کننده می‌تواند نیروی ضربه به مانع انتهایی را تا ۶۰ درصد کاهش دهد.
Sun et al, (2024)	اثرات حفاظتی تیغه‌ها با موقعیت‌ها، فاصله‌های ردیفی و ارتفاع‌های مختلف بر تأثیر جریان واریزه‌ای	وقتی بافل در ناحیه عبور قرار می‌گیرد، نیروی ضربه بر بافل ردیف اول بیشتر از زمانی است که بافل در ناحیه رسوب‌گذاری قرار می‌گیرد. به‌طور مشابه، وقتی بافل در ناحیه عبور قرار می‌گیرد، اثر انسداد بر جرم جریان آوار نیز بیشتر از زمانی است که بافل در ناحیه رسوب‌گذاری قرار می‌گیرد.
Chen et al, (2024)	بررسی رفتار تغییر شکل سازه‌های تیغه‌ای تحت تأثیر جریان واریزه‌ای بر اساس مدل‌سازی فیزیکی	ترکیب اشکال مختلف بافل نه تنها می‌تواند اتلاف انرژی را بهینه کند، بلکه مقاومت در برابر تغییر شکل را نیز افزایش می‌دهد.
Kim et al, (2023)	بررسی فلوم چند مقیاسی تأثیر دیواره‌های استوانه‌ای بر تحرک واریزه‌های زمین لغزش	استفاده از تیغه‌ها اتلاف انرژی جریان‌های واریزه‌ای، و یک ردیف اضافی از موانع، اثرات بیشتری بر اتلاف انرژی در جریان‌های واریزه‌ای ایجاد کرد. بر اساس نتایج آزمایش، میانگین دینامیک ضربه فشار دینامیکی برای تیغه‌های استوانه‌ای ۰/۳۱ بود.
Kim et al, (2022)	مطالعه تجربی دینامیک ضربه بافل‌های استوانه‌ای با مانع صلب در برابر جریان‌های واریزه‌ای	نصب بافل‌ها، ارتفاع بالاروی و نیروی ضربه بر روی مانع انتهایی صلب را کاهش می‌دهد.
Zhang and Huang, (2022)	مدل ضربه برای طراحی بافل مقاوم در برابر بلایای جریان دانه‌ای	حداکثر سرعت جریان کلی و عمق جریان باید در طراحی مهندسی سازه‌های بافل اتخاذ شود

تحلیل و آینده‌نگری در طراحی سازه‌های هیدرولیکی بافل بر اساس چالش‌ها و فرصت‌های توسعه

در این مطالعه، مروری بر برخی از مسائل و کاربردهای کلیدی در زمینه سازه هیدرولیکی بافل در مهندسی آب و به‌خصوص مجاری روباز و عملکرد هیدرولیکی این سازه در مقابل جریان، پرداخته شده است. اهمیت و کاربردهای موجود سازه بافل در شش حوزه مهم اندازه‌گیری جریان، تأثیر بر دینامیک جریان (کنترل جریان: استهلاک انرژی و کاهش سرعت جریان)، کاهش فرسایش و آبشستگی، بهبود فرآیند کنترل و حذف مواد معلق در حوضچه‌های ته‌نشینی، کاهش اثرات ناشی از جریان‌های ناگهانی و سیلاب، مدیریت و کنترل جریان‌های واریزه‌ای (آواری)، مورد بحث قرار گرفت و در نهایت، دیدگاه‌هایی برای تحقیقات آینده با ذکر چالش‌ها و کمبودهای پژوهشی در طراحی و تعامل سازه بافل با جریان ارائه شده است که به شرح زیر می‌باشد: (Huang, 2022; Zhang, 2022; Chen et al, 2024; Hager and Boes, 2014; Bekheet et al, 2025; Amirgaliyev et al, 2025)

۱. در حال حاضر، روش‌های طراحی عمدتاً بر اساس مدل‌های هیدرولیک، هیدرواستاتیک، هیدرودینامیک و مدل‌های هیبریدی، برای برآورد نیروی ضربه بر سازه‌ها استوار هستند. هر چند این مدل‌ها ساده و پارامترهای ورودی آسان قابل دستیابی‌اند، اما نیازمند بهبود در اعتبارسنجی و دقیق‌تر شدن هستند. یکی از چالش‌های عمده، در نظر گرفتن مکانیزم‌های پیچیده تعامل جریان و سازه در این مدل‌ها است. راهکار پیشنهادی برای ارتقاء اعتمادپذیری این مدل‌ها،

- توسعه چارچوبی جهانی است که ضریب فشار را بر اساس فرآیندهای فیزیکی در مدل‌های هیدرولیکی تعریف می‌کند؛ این امر مستلزم در نظر گرفتن حالت‌های غیرایستا، الگوهای ضربه و ویژگی‌های موانع به صورت مصنوعی است.
۲. در مورد مدل‌های پیش‌بینی ارتفاع جریان، بیشتر مدل‌های فعلی مبتنی بر قوانین انرژی و مومنوم هستند. برای ارتقاء دقت این مدل‌ها، باید توجه بیشتری به تأثیر ویژگی‌های جریان و خصوصیات موانع در دینامیک جریان معطوف شود. علاوه بر این، ارزیابی صحت و اعتبار این مدل‌ها با استفاده از مجموعه داده‌های بزرگ و به‌ویژه داده‌های میدانی، امری ضروری است.
۳. تحلیل شکست سازه‌های مهندسی در مقابل جریان، هنوز از ضعف‌های قابل توجهی رنج می‌برد. عدم وجود روش‌های کارآمد و دقیق برای تحلیل دینامیکی جریان، بزرگ‌ترین چالش محسوب می‌شود. در آینده، به‌کارگیری شبیه‌سازی‌های عددی، نقش کلیدی در درک بهتر رفتار سازه‌ها و کاهش هزینه‌های آزمایش‌های عملی ایفا خواهد کرد.
۴. روند بهینه‌سازی جایگاه و طراحی موانع متعدد تاکنون بر پایه تجربیات و روش‌های ساده صورت گرفته است. چالش اصلی، اطمینان از بهره‌برداری کامل و اثربخش از عملکرد هر مانع در سیستم‌های چندمانع‌ای است که نیازمند تحقیقات بیشتر و توسعه مدل‌های جامع‌تر است.
۵. یکی از موانع مهم در توسعه اقدامات مقاومتی، کمبود درک عمیق از مکانیزم تعامل بین جریان و سازه است. بهره‌گیری از تکنیک‌هایی نظیر آزمایش‌های سانتریفیوژ می‌تواند در مدل‌سازی رئولوژیک جریان‌های آوار، رفتار ضربه و شکست سازه‌ها، راه‌گشا باشد. آزمایش‌های سانتریفیوژ می‌توانند برای بررسی واکنش سازه در برابر نیروهای غیرقابل پیش‌بینی و دینامیکی به کار روند. این آزمایش‌ها به مهندسين کمک می‌کنند ویژگی‌های رئولوژیکی و مکانیکی مواد و رفتار جریان‌های پیچیده را به شکل دقیق بدون نیاز به انجام آزمایش‌های کامل در مقیاس بزرگ مدل‌سازی و پیش‌بینی کنند.
۶. هنوز جای کار و توسعه در زمینه کدهای طراحی خاص و استانداردهای مربوط به سازه‌های حفاظتی وجود دارد. توسعه رویکردهای مبتنی بر فیزیک، نظیر تحلیل‌های دینامیکی پاسخ ضربه و روش‌های طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان، می‌تواند منجر به بهبود طراحی و کاهش خطاهای مهندسی شود. در این مسیر، شبیه‌سازی‌های عددی نقش مهمی در تایید استراتژی‌های طراحی ایفا خواهند کرد.
۷. در رویکرد مدرن طراحی پیشگیرانه، باید سازه‌هایی مانند سازه بافل و سایر سازه‌های مستهلک‌کننده جریان، در کنار اقدامات غیرسازه‌ای به‌عنوان مثال پوشش گیاهی و درختی و الهام از روش‌های مبتنی بر طبیعت به‌طور هماهنگ عمل کنند تا در مواجهه با عوامل نامشخص، رفتار سیستم ایمن، موثر و اقتصادی باقی بماند. کاهش خسارات ناشی از جریان، تنها هدف پیشگیری نیست، بلکه باید به سمت توسعه سیستمی پایدار و مقاوم حرکت کرد. در این راستا، مفهوم تاب‌آوری، به‌عنوان رویکردی چندهدفه، پیشنهاد می‌شود که توانایی مقابله با سناریوهای پیچیده‌تر بلایا را دارد و در برنامه‌ریزی‌ها، تدوین سیاست‌ها و دستورالعمل‌ها باید مورد توجه قرار گیرد.
۸. مدل‌سازی مبتنی بر داده: با توجه به موفقیت رویکردهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در مدیریت کارآمد مسائل پیچیده دنیای واقعی، بررسی مسئله انسداد در این زمینه بسیار مورد توجه است. اگرچه مقالات تحقیقاتی کمی در این زمینه گزارش شده است، اما هنوز هم دامنه وسیعی وجود دارد. به عنوان مثال: روش‌های ارزیابی انسداد، فرض اساسی مبنی بر اینکه انسداد یک موجودیت آنی است را در نظر می‌گیرند و انسداد را برای یک نمونه معین بدون در نظر گرفتن اطلاعات زمینه‌ای ارزیابی می‌کنند. همچنین بهینه‌سازی بافل‌ها شامل چیدمان، موقعیت قرارگیری بافل‌ها ساخت و طراحی ابعاد و شکل هندسی بهینه بافل‌ها از موضوعاتی هستند که می‌توان با رویکردهای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به پاسخی درست دست یافت.
۹. دستورالعمل‌های طراحی باید برای پیکربندی مختلف بافل‌ها تدوین شوند. این دستورالعمل‌ها باید ابعاد و موقعیت‌های بهینه‌ای را که باعث افزایش اتلاف انرژی برای ویژگی‌های هر سایت می‌شوند، توصیف کنند. این می‌تواند به مهندسان و تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا بر اساس شرایط خاص سایت خود به طرح‌های اقتصادی کارآمد دست یابند.

۱۰. توصیه می‌شود استفاده از مواد مختلف در ساخت شوت‌های پلکانی آزمایش شود و مقرون به صرفه بودن، تأثیر آن‌ها بر محیط زیست و تأثیر آن‌ها بر اتلاف انرژی و نقطه شروع ارزیابی شود. اخیراً، استفاده از مواد زائد در ساخت و ساز توجه زیادی را به خود جلب کرده و به یک روش پایدار توصیه شده تبدیل شده است. از این رو، توصیه می‌شود استفاده از مواد زائد مختلف مانند لاستیک، نخاله‌های ساختمانی، چوب و غیره به عنوان عناصر اضافی در پله‌ها برای اتلاف انرژی و ارائه یک استراتژی مدیریت زباله سازگار با محیط زیست به طور همزمان مورد مطالعه قرار گیرد.
۱۱. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر توسعه مواد هوشمند جدیدی تمرکز کنند که قادر به پاسخ‌گویی فعال به تغییرات محیطی مانند دما، فشار یا رطوبت در یک بافل باشند. همچنین، چگونگی تولید این بافل‌های هوشمند در مقیاس صنعتی، پایداری طولانی مدت آن‌ها، و بررسی مقرون به صرفه بودن این راه حل‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی، از جمله موضوعاتی است که نیازمند تحقیقات گسترده‌تری هستند. در زمینه عملکرد بافل‌ها، تحقیقات کنونی بیشتر بر روی شرایط عملیاتی ثابت و دبی‌های مشخص متمرکز شده‌اند. تحلیل جامع عملکرد بافل‌ها در دبی‌های متغیر، از جمله تغییرات ناگهانی و نوسانات جریان، که می‌تواند بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر بگذارد، هنوز به صورت عمیق مورد بررسی قرار نگرفته است. این نوع تحلیل نیازمند مدل‌سازی‌های پیچیده‌تر و آزمایش‌های دینامیکی است. با توجه به رویکرد این پژوهش با تمرکز بر کنترل جریان و مدیریت سیلاب پیشنهادات پژوهشی در ادامه آمده است:
 - کنترل موج‌های سطحی و کاهش فروریزش جریان در کانال‌های نگهداری سیلاب.
 - تقسیم‌بندی مناطق خطرناک با استفاده از بافل‌های با ارتفاع‌های مختلف برای جذب انرژی سیلاب و جلوگیری از فراتر رفتن از سد یا مخازن.
 - بهینه‌سازی چرخه ذخیره‌سازی و تخلیه در سدهای کوچک و متوسط برای تطبیق با خروجی شبکه‌های توزیع آب و فاضلاب.
 - استفاده از بافل‌های متحرک یا انعطاف‌پذیر در کانال‌های هدایت سیلاب برای سهولت نگهداری و پاسخ سریع به بارش ناگهانی.
 - تحلیل پاسخ به تغییرات شدت بارش، تغییرات سطح مخزن، و نوسانات ورودی و خروجی بافل‌ها.
 - مطالعه پایداری ساختار بافل در محیط‌های حاوی آب شور یا آلودگی‌های صنعتی؛ بررسی خوردگی و عمر مفید.
 - ادغام بافل‌ها با فناوری‌های غشایی یا بیوفیلم‌های کنترل‌شده برای مدیریت دقیق‌تر آلودگی‌های آبی در کانال‌های سیلابی.
 - بهبود مدل‌های هم‌زمان سه‌بعدی برای پیش‌بینی انتشار آلودگی و توزیع دبی در کانال‌های بافل‌دار در مقیاس حوضه‌ای.
 - مطالعات طولانی مدت میدانی در برابر تغییرات کلان اقلیم و اثر آن بر کارایی بافل‌ها در مدیریت سیلاب.
 - طراحی بافل‌های هوشمند یا خودتنظیم برای پاسخ به بارش‌های غیرمنتظره و تغییرات سطح آب.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مروری، مطالعات متعددی در زمینه انواع بافل‌ها، تحلیل‌های هیدرولیکی بر اساس معادلات حاکم بر جریان سیال، و مکانیزم‌های اثرگذاری این سازه‌ها در مجاری باز بررسی شده است. کاربردهای اصلی بافل‌ها شامل اندازه‌گیری جریان، کنترل انرژی و کاهش سرعت جریان، کاهش فرسایش و آبشستگی، بهبود فرآیند حذف مواد معلق در حوضچه‌های ته‌نشینی، کاهش اثرات ناشی از جریان‌های ناگهانی و سیلاب‌ها و مدیریت جریان‌های واریزه‌ای (آواری) می‌باشد. همچنین در ادامه چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در طراحی بافل‌ها مورد بحث قرار گرفته و روندهای نوین در توسعه این سازه‌ها معرفی شده است. این مرور با تمرکز بر چالش‌ها و محدودیت‌ها، بر ضرورت مطالعات سیستماتیک و استفاده گسترده‌تر از سازه‌های بافل در پروژه‌های مهندسی آب تأکید نموده و مسیرهای تحقیقاتی آینده را پیشنهاد می‌دهد. نتایج کارآمدی سازه‌های بافل در هر کدام از کاربردهای این سازه به شرح زیر است:

۱. اندازه‌گیری جریان: روش‌های مبتنی بر کاربرد معادله انرژی در تعیین آبگذری فلوم در شرایط جریان آزاد عمومیت بیشتری داشته و خطای تعیین دبی جریان از این روش‌ها بر اساس مجموعه داده‌های مختلف آزمایشگاهی نسبتاً ثابت است. با این حال روش پیشنهادی مبتنی بر اصل خود تشابهی ناقص به دلیل شدت وابستگی به داده‌های آزمایشگاهی با افزایش قابل توجه خطای تعیین دبی جریان روبه رو شده است.

۲. کنترل سیلاب و جریان‌های ناگهانی: در مدل‌سازی دبی سیلاب و آسیب‌های وارده بر بناها و زیرساخت‌ها، ثابت شده که نصب اصولی بافل‌ها تا ۳۸ درصد در کنترل طول پرش هیدرولیکی و حدود ۹ درصد در افزایش اتلاف انرژی جریان نسبت به بلوک‌های استاندارد نقش آفرین هستند. انتخاب مناسب چیدمان (ارتفاع، فاصله، زاویه و فرم) بافل منجر به کاهش چشمگیر شدت جریان سیلاب و نهایتاً کاهش خسارات چهارچوب‌های ساختمانی خواهد شد.

۳. استهلاک انرژی جریان: از اثرات و کاربردهای بلوک‌های بافل با شکل‌های مختلف را بر اتلاف انرژی در حوضچه‌های آرامش، سرریزها، جلوگیری از خطرات سیلاب در رودخانه‌ها و جلوگیری اثرات مخرب امواج بر سواحل و غیره می‌توان اشاره کرد. در مرور منابع مختلف در این زمینه افزایش قابل ملاحظه در استهلاک انرژی راندمان کلی اتلاف انرژی از ۹۲ درصد تا ۹۷ درصد متغیر بوده است و به‌طور میانگین در ۹ مطالعه شاخص بافل‌ها می‌توانند انرژی جریان را به مقدار ۵۵ درصد مستهلک کنند.

۴. کنترل فرسایش و آبستگي: بافل‌ها باعث افزایش پخش انرژی و کاهش عمق فرسایش پایین‌دست سرریزها می‌شوند، به‌طوری‌که مطالعات نشان می‌دهند که ۱۸ تا ۲۲ درصد افزایش در پخش انرژی و ۱۱ تا ۱۴ درصد کاهش در عمق فرسایش مشاهده شده است و توانسته‌اند از تخریب بستر کانال جلوگیری کنند. کاهش ۱۱ تا ۱۴ درصدی در عمق آبستگي - کاهش قابل توجه ۲۶/۷ درصدی در مساحت چاله آبستگي و کاهش ۳۰/۳ درصدی در حجم آبستگي در مقایسه با استفاده از سرریز بدون بافل

۵. کنترل جریان واریزه‌ای: با نصب بافل، نیروی ضربه اوج به‌طور متوسط ۷۰ تا ۹۴ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، افزایش تعداد ردیف‌های بافل از یک به دو منجر به کاهش متوسط ۵۰ درصدی نیروی ضربه برای هر نسبت انسداد عرضی شد

۶. کنترل رسوبات در حوضچه‌های ته‌نشینی: جریان در حوضچه ته‌نشینی به شدت تحت تأثیر بافل قرار دارد. همچنین، بافل‌های نصب شده با ارتفاع کمتر و نزدیک تر به ورودی حوضچه و بافل‌های با ارتفاع زیاد و دور از ورودی حوضچه بیشترین تأثیر را دارند. بافل‌های سوراخ‌دار در اتلاف انرژی جنبشی در ناحیه ورودی مؤثر هستند و همچنین به ایجاد جریانی توزیع‌شده‌تر و آرام‌تر در ناحیه ته‌نشینی کمک می‌کنند. مقایسه عملکرد حوضچه‌های مجهز به بافل و بدون بافل نشان داد که، در شرایط جریان ثابت، میزان حذف کدورت در حوضچه با بافل حدود ۱۸ درصد بیشتر از حوضچه بدون بافل بود.

مرور تحقیقات نشان داده است که بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند شبیه‌سازی‌های عددی، مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و هوش مصنوعی در طراحی و بهینه‌سازی بافل‌ها، می‌تواند اثربخشی این سازه‌ها را به شکل قابل توجهی ارتقا دهد. با توجه به چالش‌هایی همچون ضعف در اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولیکی، محدودیت‌های تحلیل دقیق رفتار سازه در برابر جریان‌های پیچیده و نیاز به تدوین کدهای طراحی جامع و به‌روز، پژوهش‌های آتی باید بر توسعه چارچوب‌های فیزیکی دقیق‌تر، آزمایش‌های مقیاسی نوین مانند سانتیفریوژ و به‌کارگیری رویکردهای هوش مصنوعی متمرکز شوند. علاوه بر این، استفاده از مواد نوین و پایدار و توجه به توسعه طرح‌های مبتنی بر تاب‌آوری و ادغام اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای، می‌تواند به افزایش تاب‌آوری سیستم‌های هیدرولیکی در برابر بلایا کمک نماید. در نهایت، گسترش مطالعات سیستماتیک، توسعه دستورالعمل‌های طراحی کارآمد منطبق با شرایط متنوع محیطی و هیدرولیکی، و همکاری میان‌رشته‌ای میان مهندسان، پژوهشگران و مدیران منابع آب، از ضروریات اساسی برای حفظ پایداری و کارایی سازه‌های بافل در آینده است. این اقدامات باعث می‌شود سازه‌های بافل به‌طور مؤثر در کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب‌ها و جریان‌های پرانرژی عمل کرده و به‌عنوان راهکارهای پایداری در مدیریت جریان‌های آزاد به کار گرفته شوند.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه شهرکرد به دلیل حمایت معنوی این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

منابع

- ایرانپور، علی؛ اگدرنژاد، اصلان؛ حیدرنژاد، محمد. (۱۴۰۳). بررسی عددی استهلاک انرژی در سرریزهای کلیدپیانویی بافل دار. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۳(۱)، ۷۰-۵۵.
- حیدری، محمد مهدی؛ شفاعی بجستان، محمود (۱۳۹۳). بررسی تجربی تأثیر تیغه بر بهبود راندمان مخازن رسوب گذاری. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۸(۴)، ۵۶۹-۵۸۰.
- دانشفراز، رسول؛ قادری، امیر؛ باقری، علیرضا (۱۴۰۱). تأثیر زاویه و شکل هندسی بلوک بر استهلاک انرژی جریان در شوت بافل دار. *مهندسی محیط زیست و آب*، ۹(۲)، ۲۴۰-۲۲۵.
- سرکاماریان، سعید؛ قمشی، مهدی (۱۳۹۸). مطالعه اتلاف انرژی در ناودان با مانع مستغرق با استفاده از مدل فیزیکی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۳)، ۶۹۱-۷۰۰.
- عبدی چوپلو، چنور؛ قدسیان، مسعود؛ واقفی، محمد؛ کازرونی، سارا؛ بداغی، الناز (۱۴۰۱). مطالعه آزمایشگاهی اثر ارتفاع ریزش جریان بر توپوگرافی بستر پایین دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه ای شکل نوع A. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۱(۱)، ۱۲۴-۱۱۳.
- نعمای زاده، محمدعلی؛ اگدرنژاد، اصلان؛ مسجدی، علیرضا (۱۴۰۲). بررسی آزمایشگاهی تلفات انرژی در سرریزهای جامی شکل مثلثی ساده و دندانه ای. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۲(۱)، ۹۲-۸۱.
- Aali, F., Vatankehah, A. R., 2023. Experimental study of simple flumes with trapezoidal contraction. *Flow measurement and instrumentation*, 90, pp. 102328.
- Abdelhaleem, F. S. F., 2013. Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), pp. 675-684.
- Abdi Chooplou, C., Kahrizi, E., Fathi, A., Ghodsian, M., 2024. Baffle-enhanced scour mitigation in rectangular and trapezoidal piano key weirs: An experimental and machine learning investigation. *Water*, 16(15), 2133.
- Abdi Choploo, C., Ghodsian, M., Vaghefi, M., Kazeroni, S., and Bodaghi, E., 2022. Experimental Study of the Effect of Nappe Height on the Bed Topography Downstream of a Type-A Trapezoidal Piano Key Weir. *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 1(1), pp.113-124. [In Persian].
- Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Emergency Management & Ministry of Education. Global Disaster Data Platform (Chinese Version) on May 12 Line, the 2020 Global Natural Disaster Assessment Report (Abstract in Chinese) Was Released Simultaneously. 12 May 2021. Available online: <http://adrem.bnu.edu.cn/xwxx/231044.html>
- Admiraal, D. M., Zhang, C., 2023. Energy Dissipation Optimization for Circular Culverts.
- Ahmed, K. O., Kavianpour, M. R., Amini, A., Aminpour, Y., 2025. Numerical assessments of scour depth predictions downstream of box culverts under various flow and blockage conditions. *Discover Applied Sciences*, 7(3), pp. 211.
- Ahmed, K. O., Kavianpour, M. R., Amini, A., Aminpour, Y., 2024a. Numerical modelling of downstream scour in circular culverts: Impact of inlet blockages and variable flow conditions. *PLOS ONE*, 19(10), e0312501.
- Ahmed, K. O., Kavianpour, M. R., Amini, A., Aminpour, Y., 2024b. Physical modeling of the effect of shape, blockage, and flow variability on scour in culvert outlets. *PLOS ONE*, 19(6), e0306252.
- Ahmed, K. O., Nariman, N., Hawez, D. M., Kisi, O., Amini, A., 2023. Predicting and optimizing the influenced parameters for culvert outlet scouring utilizing coupled FLOW 3D-surrogate modeling. *Iranian Journal of Science and Technology, Trans Civil Engineering*, 47(3), pp. 1763-1776.
- Ahmed, S., 2019. Water flow control methods in civil engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(6), pp. 04019011
- Ahmedi, F. Thaqi, P., 2025. Baffle Utilization in Settling Tanks: A Review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(3), pp. 1995-2002.
- Al-Fatlawi, M., Al-Shuker, A., 2023. Experimental investigation of energy dissipation in ogee spillway using new distributions of dissipation blocks. *E3S Web of Conferences*.
- Al-Mafraji, E. A., Al-Mussawy, H. A., 2021. Using lower and upper baffle arrangements to enhance sedimentation tank performance. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067(1), pp. 012009.

- Al-mansori, N., Alfatlawi, T., Hashim, K., Al-Zubaidi, L. S. A., 2020. The Effects of Different Shaped Baffle Blocks on the Energy Dissipation. *Civil Engineering Journal*.
- Aluthwalage, K. P. S., 2023. Energetics and dynamics of flow through baffle drop shafts using physical and computational model studies.
- Amirgaliyev, B., Kozbakova, A., Omarova, P., Merembayev, T., Amirzhan, K., 2025. Development and experimental study of an intelligent water quality monitoring system based on the internet of things. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 14(1), pp. 761–773.
- Arao, S., Takita, Y., Kusuda, T., 2000. Improvement of Two-Way Circular Drop Manholes for Reduction of Flood Damage. *Environmental Engineering Research*.
- Asgharzadeh, H., Firoozabadi, B., Afshin, H., 2011. Experimental investigation of effects of baffle configurations on the performance of a secondary sedimentation tank. *Scientia Iranica*, 18(4), pp. 938.
- Aydoğdu, M. 2024. The Role of CFD Technique in the Effect of Baffle Blocks on Flow Dynamics. *NatureNgs*, 5(2), pp. 70–76.
- Aydin, M. C. Ulu, A. E., 2018. Effects of different shaped baffle blocks on the energy dissipation and the downstream scour of a regulator. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 8(2), pp. 69-74.
- Badar, A. M., Ghare, A. D., 2012. Development of discharge prediction model for trapezoidal canals using simple portable flume. *Int. J. Hydraul. Eng*, 1(5), pp. 37-42.
- Baiamonte, G., Ferro, V., 2007. Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1), pp. 71–78.
- Bekheet, A.A., AboulAtta, N.M., Saad, N.Y., El-Molla, D.A., 2025. Energy dissipation in stepped spillways: a comprehensive review of the recent research. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(6), pp. 1–25.
- Bichler, A., Yonin, D., Stelzer, G., 2012. Flexible debris flow mitigation: introducing the 5.5 mile debris fence. In: Eberhardt, E. et al. (eds) *Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. CRC Press, pp. 1209–1214.
- Bijankhan, M. & Ferro, V., 2019. Experimental study on triangular central baffle flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70, pp. 101641.
- Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S., 2012. Baffle modules: improved design based on the variable hydraulic sensitivity concept. *Irrigation and Drainage*, 61(2), pp. 260-269.
- Bijankhan, M., Teymourkhani, A., Ferro, V., 2022. Portable central baffle flume. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(2).
- Bong, C. H. J., Liow, C. V., 2020. Hydraulic characteristics of flow through angled baffle-plates in an open channel. *International Journal of River Basin Management*, 18(3), pp. 377–382.
- Bouisfi, F., Bouisfi, A., Ouarriche, H., Bouhali, M., Chaoui, M., 2019. Improving removal efficiency of sedimentation tanks using different inlet and outlet position. *FME Transactions*, 47(4), pp. 894.
- Bowman, E. T., Laue, J., Imre, B., Springman, S. M., 2010. Experimental modelling of debris flow behavior using a geotechnical centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(7), pp. 742–762.
- Bridgewater, C., Smith, J. 2023. Applications of baffles in hydropower plants. *Renewable Energy Journal*, 58(2), pp. 243-256
- Bugnion, L., Acardell, B. W., Bartelt, P., Wendeler, C., 2012. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, 9, pp. 179–187.
- Campisano, A., Doria, V. A., 2007. Vertical baffles for the capture of floatables in sewer channels.
- Carollo, F. G., Di Stefano, C., Ferro, V., Pampalone, V., 2016. New stage-discharge equation for the SMBF flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5), pp. 04016005.
- Chanson, H., 2015. *Energy dissipators in hydraulic structures*. CRC Press.
- Chen, W., Zhang, B., Xu, N., Huang, Y., 2024. Investigation of the Deformation Behavior of Baffle Structures Impacted by Debris Flow Based on Physical Modelling. *Water*, 16(14), pp. 2046.
- Chin, D. A., 2023. Discussion of “Calibration of Stage–Discharge Relationship for Rectangular Flume with Central Cylindrical Contraction”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(6), pp. 07023007.
- Choi, C. E., Ng, C. W. W., Liu, H., Wang, Y., 2020. Interaction between dry granular flow and rigid barrier with basal clearance: analytical and physical modelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(2), pp. 236–245.
- Cosenza, E., Cozzolino, L., Pianese, D., Fabbrocino, G., Acanfora, M., 2006. Concrete structures for mitigation of debris-flow hazard in the Montoro Inferiore Area, Southern Italy. *Proceedings of the 2nd International Congress, Naples, Italy*, 12 pages.
- Crittenden, C. J., Trussell, R. R., Hand, W. D., Howe, J. K., Tchobanoglous, G. M., 2012. *MWH’s Water Treatment: Principles and Design*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- Cupać, R., Zahirović, E., Blagojević, V., 2020. Flood damage functions in the Vrbas River Basin. *WIT Transactions on the Built Environment*.

- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A., Abraham, J., 2021. Three-dimensional study of the effect of block roughness geometry on inclined drop. *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(1), pp. 1-9.
- Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Bagheri, A., 2023. Effect of angle and geometric shape of block on flow energy dissipation in baffled chute. *Environment and Water Engineering*. [In Persian].
- Daneshfaraz, R., Ghaderi, A., Bagheri, A., 2025. Design and evaluation of baffled fishways for enhanced migratory fish passage. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Ding, Z., Marensi, E., Willis, A. P., Kerswell, R., 2020. Stabilising pipe flow by a baffle designed using energy stability. *Journal of Fluid Mechanics*, 902.
- Djunur, L. H., Pallu, M. S., Karamma, R., Bakri, B., 2024. Effect of Porous Rectangular Type Baffle Block Angle on Hydraulic Jump Downstream of Spillway. *Civil Engineering Journal*, 10(10), 3173–3193.
- Dong, F., Xu, X., Zhang, W., Hu, W., Cao, X., 2024. Investigation and optimization of wave suppression baffles in automobile integrated water tanks. *Journal of Automotive Fluid Mechanics*.
- El-Masry, A.A., 2001. Minimization of scour downstream heading-up structures using double line of angle baffles. In *Proc of sixth international water technology conference (IWTC). Alexandria, Egypt*.
- El-Saie, Y., Saleh, O., El-Sayed, M., Ali, A., Sadek, E. E. T. Y. M., 2023. Dissipation of Water Energy by Using a Special Stilling Basin Via Three-dimensional Numerical Model. *The Open Civil Engineering Journal*.
- Eloubaidy, A., Al-Baidhani, J., Ghazali, A. H., 1999. Dissipation of hydraulic energy by curved baffle blocks. *Pertanika J. Sci. Technol*, 7(1), pp. 69-77.
- Emiroglu, M. E., Gogus, M., Tunc, M., Islamoglu, K., 2017. Effects of antivortex structures installed on trapezoidal labyrinth side weirs on discharge capacity and scouring. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6), pp. 04017006.
- Ferro, V., 2016. Simple flume with a central baffle. *Flow Meas. Instrum.*, 52, pp. 53–56.
- Garcia, E., Patel, S., 2022. Protection of hydraulic structures using baffles. *Journal of Structural Engineering*, 148(5), pp. 04022034
- Garcia, L., 2022. Advancements in fluid mechanics and their impact on structure design. *International Journal of Hydraulic Research*, 48(3), pp. 325-336
- Gems, B., Wörndl, M., Gabl, R., Weber, C., Aufleger, M., 2014. Experimental and numerical study on the design of a deposition basin outlet structure at a mountain debris cone. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, pp. 175–187.
- Ghare, A. D., Kapoor, A., Badar, A. M., 2020. Cylindrical central baffle flume for flow measurements in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Ghare, A., Badar, A., 2014. Experimental studies on the use of mobile cylinders for measurement of flow through rectangular channels. *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), pp. 504-512.
- Ghasemi, M. & Vatankeh, A. R., 2024. Experimental study of simple flumes with converging triangular walls. *Flow Measurement and Instrumentation*, 97, pp. 102623.
- Golian, S., Moazami, S., Yazdi, J., Sheshangosht, S., 2010. An IFM-based flood damage reduction: A small study area in Iran., 2010 International Conference on Chemistry and Chemical Engineering.
- Goodwin, S. R., Choi, C. E., Yune, C. Y., 2021. Towards rational use of baffle arrays on sloped and horizontal terrain for filtering boulders. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(10), pp. 1571–1589.
- Habibi, K., Erfani Fard, F., Asghari Pari, S. A., Azimi, A. H., 2025. Experimental and numerical studies on the hydraulics of stepped spillways with baffle walls and blocks. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 31(2), pp. 217-238.
- Habibzadeh, A., Loewen, M., Rajaratnam, N., 2012. Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Habibzadeh, A., Mehrzadegan, H. R., 2014. Effect of Baffles on the Flow and Hydrodynamics of Settling Basins: A Review.
- Hager, W. H., 1985. Modified venturi channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(1), pp. 19-35.
- Hager, W. H., 1986. Modified, trapezoidal Venturi channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(3), pp. 225-241.
- Hager, W. H., 1988. Mobile flume for circular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(3), pp. 520-534.
- Hamidifar, H., Nasrabadi, M., Omid, M. H., 2018. Using a bed sill as a scour countermeasure downstream of an apron. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), pp. 1663-1669.
- Harvard Brescher, U., Krebs, P., Hager, W. H., 1992. Improvement of flow in final settling tanks. *Journal of Environmental Engineering*, 118(3), pp. 307-321.

- Hauksson, S., Pagliardi, M., Barbolini, M., Johannesson, T., 2007. Laboratory measurements of impact force of supercritical granular flow against mast-like obstacles. *Cold Regions Science and Technology*, 49, pp. 54–63.
- Heydari, M. M., Shafaei Bajestan, M., 2014. Laboratory investigation of the effect of flow calming plates on improving the sedimentation efficiency of irrigation sedimentation basins. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(3), pp. 569-580. [In Persian].
- Heyrani, M., Mohammadian, A., Nistor, I. & Dursun, O. F., 2022. Application of numerical and experimental modeling to improve the efficiency of Parshall flumes: a review of the state-of-the-art. *Hydrology*, 9(2), pp. 26.
- Hirom, K. Devi, T. T., 2025. Investigating the effects of perforated inlet baffles in a circular sedimentation tank using Computational Fluid Dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, 2025.
- Hirom, K., Devi, T. T., 2024. A computational fluid dynamics study on the optimisation of a circular sedimentation tank using perforated inlet baffles. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, pp. 1-14.
- Huang, Y., Zhang, B., Zhu, C., Zhu, C., 2021. Computational assessment of baffle performance against rapid granular flows. *Landslides*, 18(1), pp. 485–501.
- Huebl, J., Fiebigler, G., 2005. Debris-flow mitigation measures. In: Jakob, M. & Hungr, O. (eds) *Debris-flow hazards and related phenomena*.
- Huggins, D. L., Piedrahita, R. H., Rumsey, T., 2005. Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness. *Aquacultural Engineering*, 33(3), pp. 167.
- IAHS., 1984. World catalogue of maximum observed floods. IAHS-AISH Publication No. 143, Wallingford, UK.
- Iranpour, A., Agdarnazhad, A., and Heydarnazhad, M., 2024. Numerical Investigation of Energy Dissipation in Baffled Piano Key Weirs. *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 3(1), pp.55-70. [In Persian].
- Iverson, R. M., Reid, M. E., LaHusen, R. G., 1997. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, pp. 85–138.
- Jamshidnia, H. R., Takeda, Y., 2009. UVP measurement of flow around a baffle in a rectangular open channel. *Journal of Fluid Science and Technology*, 4(3), pp. 758-774.
- Jamshidnia, H., Firoozabadi, B., 2010. Experimental investigation of baffle effect on the flow in a rectangular primary sedimentation tank. *Scientia Iranica*, 17(4), pp. 241.
- Jamshidnia, H., Takeda, Y., 2010. An experimental study of the effect of a baffle on the flow structure in a rectangular open channel using UVP. *Journal of Fluid Science and Technology*, 5(3), pp. 542-557.
- Jamshidnia, H., Takeda, Y., Firoozabadi, B., 2010. Effect of a standing baffle on the flow structure in a rectangular open channel. *Journal of Hydraulic Research*.
- Jesson, M., Sterling, M., Baker, D., 2016. Application of ISO4359 for discharge calculation in a narrow 404 flume. *Flow Meas. Instrum.*, 54, pp. 283–287.
- Johnson, R., Lee, A., 2018. Historical water structures in ancient civilizations. *Journal of Historical Engineering*, 12(4), pp. 45-57
- Kang, J. G., 2017. An experimental study on the dissipation effect of a Baffle downstream of a Weir. *Engineering*, 9(11), pp. 937-949
- Kapoor, A., Ghare, A. D., Badar, A. M., 2022. CFD Simulations of Conical Central Baffle Flumes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(2), pp. 06021014.
- Kapoor, A., Ghare, A. D., Vasudeo, A. D., Badar, A. M., 2019. Channel flow measurement using portable conical central baffle. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), pp. 06019010.
- Karimi Chahartaghi, M., Nazari, S. Babarsad, M. S., 2020. Investigating the effects of the block geometries and sidewall divergences on the local scour downstream of baffled chute spillways. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), pp. 2978602.
- Khatsuria, R. M. 2004. *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. CRC Press.
- Khidhir, M. R., Ahmed, K. O., Bahrami, J., Isari, M., Karim, M. M., 2025. Influence of turbulence models on simulated flow characteristics over ogee spillways. *Journal of the Studies in Civil Engineering*, 2(1), 1.
- Kim, B. J., Han, K. D., Kim, H. S., Choi, C. E., Yune, C. Y., 2019. An experimental study on cylindrical countermeasures for dissipation of debris flow energy. *Journal of the Korean Geotechnical Environment Society*, 20(1), pp. 57–65.
- Kim, B. J., Yune, C. Y., 2025. Flume investigation of debris flow entrained boulders with cylindrical baffles and a rigid barrier. *Engineering Geology*, 344, pp. 107836.
- Kim, B.J., Choi, C.E., Yune, C.Y., 2023. Multi-scale flume investigation of the influence of cylindrical baffles on the mobility of landslide debris. *Engineering Geology*, 314, pp. 107012.
- Krebs, P., Vischer, D., Gujer, W., 1995. Inlet structure design for final Clarifiers. *Journal of Environmental Engineering*, 121(8), pp. 558-564.
- Kumcu, S. Y., Ispir, K., 2022. Experimental and numerical modeling of various energy dissipater designs in chute channels. *Applied Water Science*, 12(12), pp. 266.

- Kumcu, S. Y., Kökpınar, M. A., 2019. Application of numerical modeling on spillway structures: a case study of kavsak bendi hydroelectric power plant (HEPP). DSI Tech Bull, 132, pp. 12-27.
- Lave, T., Lave, L., 1991. Public perception of the risks of floods: implications for communication. Risk Analysis.
- Law, R. P. H., Choi, C., Ng, C., 2016. Discrete-element investigation of influence of granular debris flow baffles on rigid barrier impact. Canadian Geotechnical Journal.
- Lee, B., 2017. Evaluation of double perforated baffles installed in rectangular secondary clarifiers. Water, 9(6), pp. 407.
- Liu, Y., Zhang, P., Wei, W., 2016. Simulation of the effect of a baffle on the flow patterns and hydraulic efficiency in a sedimentation tank. Desalination and Water Treatment, 57(54), pp. 25950-25959.
- Loginova, O., Petropavlovskikh, O., 2021. Inspection and assessment of concrete pipe culverts under highways in Tatarstan. In: E3S Web of Conferences.
- Lotfi Kolavani, F., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V., Mahdavi Mazdeh, A., 2019. Experimental study of central baffle flume. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 145(3), pp. 04019002.
- Love, J. S., McNamara, K. P., 2024. Horizontal baffles for robust shallow water tuned sloshing dampers. Engineering Structures.
- Luo, H., Zhang, L., He, J., Zhou, J., 2025. Performance of debris flow barriers: an energy perspective. Acta Geotechnica, 20(2), pp. 987-1000.
- Martinez, R., 2019. The role of baffles in modern hydraulic engineering. Water Resources Management, 33(10), pp. 3901-3915
- Masjedi, A., Bejestan, M. S., Esfandi, A., 2010. Experimental study on local scour around single oblong pier fitted with a collar in a 180-degree flume bend. International Journal of Sediment Research, 25(3), pp. 304-312.
- Maziar, Y., Mohammad, M., Martin, L., David, S. A. A modelling framework to design an evacuation support system for healthcare infrastructures in response to major flood events. Prog. Disaster Sci. 2022, 13, pp. 100218.
- Mazon, J., Romero, L., González, D., Solanes, J. C. B., Ruiz Bellet, J. L., Mestre, J., Barriendos Valve, M., 2015. Transdisciplinary and multiscale reconstruction of the major floods.
- Melan, A., Syamsir, A., Zawawi, M. H., 2019. Enhancement of Energy Dissipation by Using Different Shape of Baffle Block - A Review. In: Springer, Singapore, pp. 567-576.
- Mesbahi, M., Talebbeydokhti, N., Hosseini, S. A., Afzali, S. H., 2017. External validation criteria and uncertainty analysis of maximum scour depth at downstream of stilling basins based on EPR and MT approaches. Iran J Sci Techn Trans Civ Eng, 41(1), pp. 87-99.
- Mignot, E., Moyné, T., Doppler, D., Rivière, N., 2015. Clear-water scouring process in a flow in supercritical regime. Journal of Hydraulic Engineering, 142(4), pp. 04015063.
- Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China., 2019 Global Natural Disaster Assessment Report. Released Last Year's Global Natural Disasters Were Generally Lighter, and Chinese Disaster Losses Were among the Highest in the World. 8 May 2020. Available online: https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/202005/t20200508_352281.shtml.
- Mir, B. H., Lone, M. A., Rather, N. A., 2018. Significance of shape factor of obstacle on local scour. Iranian Journal of Science and Technology, Trans Civil Engineering, 43(1), pp. 323-330.
- Mizuyama, T., 2008. Structural countermeasures for debris flow disasters. International Journal of Erosion Control Engineering, 1, pp. 38-43.
- Mohammed, H. J., Al-Shukur, A. H. K., 2022. Investigating Energy Dissipation for Different Inclined Spillways and Baffles Blocks. Journal of University of Babylon for Engineering Sciences, 30(3), pp. 74-95.
- Mohammed, S.R., Nile, B.K. and Hassan, W.H., 2020, January. Modelling stilling basins for sewage networks. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 671, No. 1, p. 012111). IOP Publishing.
- Momeni Heravi, A., Kouchakzadeh, S., Bijankhan, M., 2023. Water delivery performance of Baffle modules using 3D simulation. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 29(2), pp. 154-164.
- Nair, P. S., Ghare, A. D., Kapoor, A., 2023. An Improved Channel Flow Measurement Approach Using Conical Central Baffle Flumes.
- Nair, P. S., Ghare, A. D., Kapoor, A., 2024. An approach to hydraulic design of Conical Central Baffle Flumes. Flow Measurement and Instrumentation, 97, pp. 102573.
- Nair, P. S., Ghare, A. D., Kapoor, A., Badar, A. M., 2025. Improved discharge prediction models for flow measurements using Central Baffle Flumes. Flow Measurement and Instrumentation, 104, 102882.
- Nasyrlyayev, N., Kizilaslan, M. A., Kurumus, A. T., Demirel, E., Aral, M. M., 2020. A perforated baffle design to improve mixing in contact tanks. Water, 12(4), pp. 1022.

- Nemavizadeh, M. A., Agdarnazhad, A., and Masjedi, A., 2023. Experimental Investigation of Energy Loss in Simple and Toothed Triangular Bucket Spillways. *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 2(1), pp.81-92. [In Persian].
- Ng CWW, Choi CE, Song D, Kwan JSH, Koo RCH, Shiu HYK, Ho KKS., 2015a Erratum to: physical modeling of baffles influence on landslide debris mobility. *Landslides* 12, p. 627.
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., Kwan, J. S. H., Shiu, H. Y. K., Ho, K. K. S., Koo, R. C. H., 2012. Flume modelling of debris flow resisting baffles. *Natural Terrain Hazard Mitigation Measures*, pp. 11.
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., Song, D., Kwan, J. S. H., Koo, R. C. H., Shiu, H. Y. K., 2015a. Erratum to: physical modeling of baffles influence on landslide debris mobility. *Landslides*, 12, pp. 627.
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., Song, D., Kwan, J. S. H., Koo, R. C. H., Shiu, H. Y. K., 2015b. Physical modeling of baffles influence on landslide debris mobility. *Landslides*, 12, pp. 1–18.
- Ng, C.W., Li, Z., Liu, H., Poudyal, S., Jia, Z., Zhang, R., 2025. Effects of Barrier Deflectors on Impact Mechanisms against Debris Flow. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 151(8), pp. 04025074.
- Nguyen, T. K., Nguyen, N. H. T., Vo, T. T., Chen, L., 2025. Dissipative effects of baffles on the dynamics of debris flow and its impact on downstream structure. *Computers and Geotechnics*.
- Niyazi, H., Yaban, H., Demirel, E., 2022. Structure and dynamics of the turbulent flow through a central baffle. *Flow Measurement and Instrumentation*, 88, pp. 102248
- Niyazi, H., Yaban, H., Demirel, E., 2022. Structure and dynamics of the turbulent flow through a central baffle. *Flow Measurement and Instrumentation*, 88, pp. 102248.
- Nouri, A. Z., Heydari, M. M., 2017. Experimental investigation of the effect of baffles on the efficiency improvement of irrigation sedimentation tank structures. *Structural Engineering and Mechanics: An International Journal*, 63(4), pp. 567-574.
- Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., Narayanan, R., 2017. *Hydraulic structures*. CRC Press.
- Nugroho, J., Soekarno, I., Soeharno, A. W. H., 2019. Experimental study of energy dissipation at baffled chute spillway. *Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 26(1), pp. 33-37.
- Panwar, A., Tiwari, H. L., 2014. Hydraulic energy dissipators-a review. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 3(4), pp. 400-402.
- Park, N. S., Kim, S. S., Lee, Y. J., Wang, C. K., 2014. Effects of longitudinal baffles on particles settling in a sedimentation basin. *Water Science and Technology*, 69(6), pp. 1212.
- Peruginelli, A., Bonacci, F., 1997. Mobile prisms for flow measurement in rectangular channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), pp. 170-174.
- Peterka, A. J., 1984. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters*. Denver, Colorado: United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Pujari, S., Kaushik, V., Kumar, S. A., 2023. Prediction of energy dissipation over stepped spillway with baffles using machine learning techniques. *Civil Engineering and Architecture*.
- Qasim, R. M., Abdulhussein, I. A., Hameed, M. A., 2023. Analysis of the hydraulic interference between the baffles and the composite hydraulic structure.
- Raker, E. J., 2025. Flooding, Sociospatial Risk, and Population Health. *Demography*, pp. 11792975.
- Rashed, R. E., El-Masry, A. A., AbdelGawad, H. A. A., 2022. Effect of Hollow Semi-Circular Baffles Arrangement on Local Scour Downstream Hydraulic Structures. *MEJ-Mansoura Engineering Journal*, 47(3), pp. 22-31.
- Rasul, A. M., Ahmed, K. O., Bahrami, J., Isari, M., pour, M. R. K., Aminpour, Y. Pande, C. B., 2025. Experimental investigation of baffle configurations, blockage, and flow variability on downstream scour in box culverts. *Applied Water Science*, 15(5), pp. 109.
- Razmi, A. M., Bakhtyār, R., Firoozabadi, B., Barry, D. A., 2013. Experiments and numerical modeling of baffle configuration effects on the performance of sedimentation tanks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(2), pp. 140.
- Roberts, P., 2021. The impact of the industrial revolution on hydraulic engineering. *Engineering History Review*, 25(1), pp. 22-35
- Rojas, R., Feyen, L., Watkiss, P., 2003. Climate change and river floods in the European Union: socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation. *Global Environmental Change*, 23(6), pp. 1737–1751.
- Roushangar, K., Akhgar, S., Shahnazi, S., 2022. The effect of triangular prismatic elements on the hydraulic performance of stepped spillways in the skimming flow regime: an experimental study and numerical modeling. *Journal of Hydroinformatics*, 24(2), pp. 243-258.
- Sadeghfam, S., Khatibi, R., Hassanzadeh, Y., Daneshfaraz, R., Ghorbani, M. A., 2017. Forced hydraulic jumps described by classic hydraulic equations reproducing cusp catastrophe features. *Arab J Sci Eng*, 1–11.
- Saeedi, E., Behnamtalab, E., Salehi Neyshabouri, S. A. A., 2020. Numerical simulation of baffle effect on the performance of sedimentation basin. *Water and Environment Journal*, 34(2), pp. 212-222.

- Samani, Z., 2017. Three simple flumes for flow measurement in open channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6), pp. 04017010.
- Samani, Z., Jorat, S., Yousaf, M., 1991. Hydraulic characteristics of circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), pp. 558-566.
- Samani, Z., Magallanez, H., 2000. Simple flume for flow measurement in open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2), pp. 127-129.
- Sarkamaryan, S., Ghomeshi, M., 2019. Study of energy dissipation in the chute with submerged obstacle using physical model. *Watershed Eng. Manage.*, 11(3), pp. 691-700. [In Persian].
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Md Said, M. A., Sabbagh-Yazdi, S. R., Syafalni, S., Abdullah, R., 2012. The effect of baffle angle on primary sedimentation tank efficiency. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(3), pp. 293.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Md. Said, M. A., Yazdi, S. R. S. & Syafalni., 2013. Experimental investigation of the influence of baffle position on the flow field, sediment concentration, and efficiency of rectangular primary sedimentation tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1), pp. 88-94.
- Shahsavari, H., Moradi, S., Parmodeh, A. Esmaili, K., 2020. Effect of V-shaped Blocks on Local Scour Downstream of Ogee Spillway, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(80), pp. 115-132.
- Singh, V. P., 2014. *Entropy theory in hydraulic engineering: An introduction*. CRC Press.
- Smith, J., 2020. A comprehensive history of hydraulic structures. *Water Science & Technology*, 82(4), pp. 835-846.
- Stamou, A., 2018. The Disastrous Flash Flood of Mandra in Attica-Greece and now What?
- Sulaiman, S. H., Ahmed, K. O., Isari, M., Bahrami, J., 2025. Numerical study on the influence of inlet blockage ratios and flow conditions on scour development in circular culverts. *Journal of Structural Civil Engineering* 2(1):2.
- Sun, X., Chen, M., Bi, Y., Zheng, L., Che, C., Xu, A., et al., 2024. Protective effects of baffles with different positions, row spacings, heights on debris flow impact. *Journal of Mountain Science*, 21(7), pp. 2352-2367.
- Taebe Harandi, A., Schroeder, E. D., 2000. Formation of density currents in secondary clarifiers. *Journal of Water Resources*, 34(4), pp. 1225-1232.
- Taha, N., El-Feky, M. M., El-Saiad, A. A., Fathy, I., 2020a. Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts. *Alex. Eng. J.*, 59(5), pp. 3503-3513.
- Taha, N., El-Feky, M. M., El-Saiad, A. A., Zelenakova, M., Vranay, F., Fathy, I., 2020b. Study of scour characteristics downstream of partially blocked circular culverts. *Water*, 12(10), pp. 2845.
- Tamayol, A., Firoozabadi, B., Ahmadi, G., 2008. Determination of settling tanks performance using an Eulerian-Lagrangian method. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 1(1), pp. 43.
- Taylor, B., 2020. The influence of numerical simulation technologies on water structure design. *Advances in Water Resources*, 144, pp. 103708.
- Tekade, S. A., Vasudeo, A. D., Ghare, A. D., Ingle, R. N., 2016. Dimensionless discharge in supercritical flow regime for different sizes of cutthroat flumes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, pp. 4235-4245.
- Tiwari, H. L., 2013. Analysis of baffle wall gap in the design of stilling basin model. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 4(4), pp. 66-71.
- Ubing, C., 2015. Baffle-post structures for flow control in open channels (Master's thesis, Colorado State University).
- Ubing, C., Ettema, R., Thornton, C. I., 2017. Flume experiments on baffle-posts for retarding open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), pp. 430-437.
- UNDRR., 2019. *Global assessment report on disaster risk reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- Vatankhah, A. R., 2017. Discussion of New Stage Discharge Equation for the SMBF Flume by Francesco Giuseppe Carollo, Costanza Di Stefano, Vito Ferro, and Vincenzo Pampaloni. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(8), pp. 07017011.
- Vatankhah, A. R., Mohammadi, M., 2020. Stage-discharge equation for simple flumes with semi-cylinder contractions. *SN Applied Sciences*, 2, pp. 1-13.
- Volkwein, A., Baumann, R., Rickli, C., Wendeler, C., 2015. Standardization for flexible debris retention barriers. In: Lollino, G. et al. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory*, Volume 2. Springer International Publishing, pp. 193-196.
- Wang, C. P., Li, M. H., Lo, C. L., 2023. Investigation of baffle configurations on the water disinfection efficiency using ultraviolet C light-emitting diodes. *Environmental Technology*.
- Wang, C. P., Li, M. H., Lo, C. L., 2024. Investigation of baffle configurations on the water disinfection efficiency using ultraviolet C light-emitting diodes. *Environmental Technology*, 45(25), pp. 5359-5367.

- Wang, F., Chen, X. Q., Chen, J. G., 2017b. Experimental study on the energy dissipation characteristics of debris flow deceleration baffles. *Journal of Mountain Science*, 14, pp. 1951–1960.
- Wang, F., Chen, X. Q., Chen, J. G., You, Y., 2017a. Experimental study on a debris-flow drainage channel with different types of energy dissipation baffles. *Engineering Geology*, 220, pp. 43–51.
- Wang, H., Tang, H., Liu, Q., Wang, Y., 2016. Local scouring around twin bridge piers in open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 149(9), pp. 6016008.
- Wang, Z. Y., Qi, L. J., Wang, X. Z., 2012a. Debris flow control with energy dissipation structures – experiences from Wenjiagou. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43, pp. 253–263.
- Wang, Z. Y., Qi, L. J., Wang, X. Z., 2012b. A prototype experiment of debris flow control with energy dissipation structures. *Natural Hazards*, 60, pp. 971–989.
- Wei, J., Cotterill, S., & Keenahan, J., 2024. Optimizing the hydraulic performance of a baffled horizontal subsurface flow constructed wetland through computational fluid dynamics modelling. *Journal of Environmental Management*.
- Yang, Q., & Yang, Q., 2021. Numerical investigation of the turbulence characteristics and energy dissipation mechanism of baffle drop shafts. *Water Science and Technology*.
- Yoon, S.-H., Park, K.-J., 2015. Effect of Baffles on Sloshing Mitigation in Liquid Storage Tanks. *Mechanical Engineering*.
- Young, J., 2025. Social Response to Environmental Extremes: A Computational Approach.
- Yune, C., & Kim, B.-J., 2021. Flume investigation of cylindrical baffles for dissipation of debris flow energy. *Water Science and Technology*.
- Zaffar, M. W., Hassan, I., Ali, Z., Sarwar, K., 2023. Numerical investigation of hydraulic jumps with USBR and wedge-shaped baffle block basins for lower tailwater.
- Zare, H. K., Doering, J. C., 2012. Energy dissipation and flow characteristics of baffles and sills on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 50(2), pp. 184–195.
- Zhang, B., Huang, Y., 2022. Impact Model for Baffle Design Resisting Granular-Flow Disasters. *International Journal of Geomechanics*, 22(12).
- Zhang, M., Wang, J., 2022a. Global flood disaster research graph analysis based on literature mining. *Applied Sciences*, 12(6), pp. 3066.
- Zhang, T., Wei, W., Hong, Y., Wang, J., Zhang, J., Pei, Y., Li, Q., 2024. CFD method for the effect of baffle locations and baffle lengths on the hydraulic characteristics of a horizontal sedimentation tank. *Desalination and Water Treatment*, 317, pp. 100187.
- Zhou, G. G. D., Ng, C. W. W., 2010a. Numerical investigation of reverse segregation in debris flows by DEM. *Granular Matter*, 12(5), pp. 507–516.
- Zhou, G. G. D., Ng, C. W. W., 2010b. Dimensional analysis of natural debris flows. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(7), pp. 719–729.