

A Review of Hydraulic Performance and Energy Dissipation Mechanisms in Inclined and Vertical Drop Structures

Farhoud Kalateh^{1*}, Ehsan Aminvash², Rasoul Daneshfaraz³

1- Associated professor, Faculty of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Ph.D. candidate in water and hydraulic engineering, Faculty of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Professor, Faculty of engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

* f.kalateh@gmail.com

Received: 28 April 2025

Accepted: 4 July 2024

Discussion: 21 March 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Drop structures are widely used hydraulic constructions in water supply networks, irrigation and drainage channels, sewage treatment systems, and erosion control infrastructures. These structures dissipate the flow energy primarily via a hydraulic jump occurring downstream, with substantial energy dissipation also occurring when the flow plunges from the structure's edge before reaching the hydraulic jump. Inclined drops, specifically, are implemented in drainage and irrigation canals, as well as mountainous areas where the constructed channel slope is milder than the natural terrain slope. They are effectively employed to transfer flow from higher elevations to lower levels, simultaneously dissipating excess kinetic energy. Considering the engineering importance of energy dissipation in hydraulic infrastructures, this study aims to provide researchers with a comprehensive overview of inclined and vertical drop structures, highlighting their effectiveness in dissipating kinetic energy through supplementary structural arrangements. Pagliara and Chiavaccini (2006a, b) examined the effects of base materials and reinforced block ramps on flow energy dissipation, while Pagliara et al. (2008) explored submerged flow conditions over reinforced slopes constructed with rigid blocks. This review systematically followed these stages:

1. Identification and review of literature on inclined drop structures.
2. Identification and review of literature on vertical drop structures.
3. Investigation of previous studies focused on energy dissipation mechanisms.
4. Analysis and synthesis of findings from steps (1), (2), and (3).
5. Examination of various stilling basin designs associated with drop structures.
6. Evaluation of auxiliary structures and their role in energy dissipation within drop structures.

Despite the limited number of studies explicitly targeting drop structures, substantial research exists on spillways. Although spillways and drops share similar functional objectives, their hydraulic and geometric characteristics are notably different. Generally, drop structures are restricted to heights that do not exceed roughly 4 meters, while spillways can greatly exceed this height limitation. Literature review revealed that comprehensive research on drop structures mainly emerged after 2012, with a notable concentration of studies conducted between 2018 and 2023. The literature reviewed in this research was sourced from recognized academic databases, including Google Scholar, Science Direct, CAS, and various esteemed publishers such as Elsevier, Springer, Taylor & Francis, and MDPI. In total, 49 articles spanning the years 1932 to 2023 were critically assessed, with the majority reflecting recent research advances. Results and Discussion Analysis of inclined, vertical, and stepped drops revealed critical insights into their hydraulic performance and energy dissipation capabilities. Results indicated that relative energy dissipation generally decreases with increasing relative critical depth and decreasing channel slope angles for flow rates ranging between 3.31 and 3.5 liters per second. Comparative analysis demonstrated that under identical geometric and hydraulic conditions, vertical

drops exhibited the highest relative energy dissipation, followed by stepped and inclined drops. The relatively lower energy dissipation observed in inclined drops is primarily attributed to the absence of a substantial plunge pool and jet formation, resulting in diminished structural energy dissipation. An essential factor influencing energy dissipation efficiency is the relative height of drop structures. Lower heights in stepped drops inhibit the formation of fully developed two-phase (air-water) flows, reducing their energy dissipation capacity compared to vertical drops. In vertical drops, substantial energy dissipation occurs due to significant drop heights, the formation of plunge pools, and pronounced two-phase flows. The inclined drop configurations examined typically involved slopes of 26.56° and 33.7° , highlighting their sensitivity to structural angle variations in terms of energy dissipation.

Drop structures are vital components in systems designed to transfer water flow from higher to lower elevations, serving key roles in flood control and water supply management. Among the various drop configurations, vertical drops with adequately designed stilling basins demonstrate superior energy dissipation capabilities. As such, vertical drops remain highly desirable within hydraulic engineering practice. Conversely, inclined drops transfer flows downstream more rapidly due to their structural geometry, relying heavily on hydraulic jumps to dissipate energy. However, critical areas such as cavitation risks, pressure, and velocity distribution remain largely understudied for both inclined and vertical drop structures. Future research is required to address these knowledge gaps comprehensively, ultimately contributing to safer, more efficient hydraulic structure designs.

Results and Discussion: By examining different types of drops with common geometries, including inclined, vertical and stepped drops have been conducted. The results obtained show a decrease in relative energy dissipation with an increase in relative critical depth and a decrease in the channel angle in the flow rate range of 3.5-3.31 liters per second. A comparison of the anodic dissipation in the range of variables of the present study shows that under equal geometric and hydraulic conditions, the maximum amount of relative energy dissipation is allocated to the vertical drop, with stepped and inclined drops in the second and third place, respectively. The reason for this is that in inclined drops, due to the lack of formation of a pool and a falling jet, the energy dissipation caused by the structure itself is much lower than that of other drops. One of the most important parameters that increases energy dissipation is the relative height of the structure. The low height of stepped drops prevents two-phase flow of water and air from occurring on the steps, which is a factor in the low depreciation compared to vertical drops. While in vertical drop, due to the flow falling from a high height and the formation of pools and two-phase flows, more energy will be taken from the flow. For the inclined drop used in the research, they are from two angles with values of 26.56 and 33.7 degrees.

Conclusion: Transferring water flow from high to low levels in flood control and water supply systems requires the use of drop structures. These structures come in various types in terms of geometric construction. One of the most important parameters for increasing energy dissipation in vertical weirs is the formation of a stilling basin. For this reason, hydraulic engineers are very keen on building these drops. Due to their geometry, inclined drop transfers the flow downstream at a faster rate, and the only reason for the excess energy dissipation is hydraulic jump. Other important topics, such as cavitation, pressure distribution, velocity distribution, etc., in these structures are among the topics that are clearly missing from studies. No studies have been conducted on these topics in drops, and more studies are needed in this field.

Keywords: Inclined drop, vertical drop, energy dissipation, applications, energy dissipaters.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution:

First Author: Conceptualization, Methodology, Project administration, Writing – review & editing.

Second Author: Formal analysis, Investigation, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft.

Third Author: Conceptualization, Methodology, Project administration, Writing – review & editing.

References:

- 1- Pagliara, S. & Chiavaccini, P. (2006a). Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 41-48.
- 2- Pagliara, S. & Chiavaccini, P. (2006b). Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 545-552.
- 3- Pagliara, S., Das, R. & Palermo, M. (2008). Energy dissipation on submerged block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(4), 527-532.

مروری بر عملکرد شیب‌شکن‌های مایل و قائم بر پارامترهای هیدرولیکی موثر و مکانیزم استهلاک انرژی

فرهود کلاته^{۱*}، احسان امین‌وش^۲، رسول دانشفراز^۳

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

* f.kalateh@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱ و وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در کانال‌های آبیاری و زهکشی عموماً برای انتقال آب از تراز ارتفاعی بالاتر به تراز پایین‌تر از شیب‌شکن‌ها استفاده می‌گردد. شیب‌شکن‌های قائم و مایل به‌عنوان سازه‌های هیدرولیکی مؤثر در مهار انرژی جنبشی جریان، نقشی کلیدی در کنترل فرسایش بستر و کاهش خسارات پایین‌دست دارند. این مقاله مروری به بررسی مقایسه‌ای عملکرد این دو نوع شیب‌شکن در استهلاک انرژی جریان پرداخته و مکانیزم اصلی اتلاف انرژی یعنی برخورد جت ریزشی جریان با بستر پایین‌دست و تشکیل پرش هیدرولیکی را تبیین می‌نماید. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که شیب‌شکن‌های قائم در شرایط مشابه نسبت به شیب‌شکن‌های مایل، به‌طور متوسط ۲۰ تا ۳۵ درصد استهلاک انرژی بیشتری ایجاد می‌کنند. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی با ایجاد اغتشاشات مؤثر در بستر جریان، موجب افزایش میانگین استهلاک انرژی به میزان ۷۴/۳٪ در شیب‌شکن قائم و ۴۹/۶٪ در شیب‌شکن مایل در مقایسه با مدل پایه شد. همچنین، استفاده از المان‌هایی مانند زبری و صفحات مشبک به ترتیب باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۲۲٪ و ۳۱٪ گردید. در تحلیل نهایی، علاوه بر کاویتاسیون، به‌خلافی چون عدم پایداری جریان، کمبود داده‌های میدانی و فرسایش موضعی در شیب‌شکن‌ها نیز اشاره شده است. اگرچه تمرکز اصلی این مطالعه بر مرور مطالعات شیب‌شکن‌های مایل و قائم است، اما در جریان تحلیل‌ها، برخی زمینه‌های مغفول‌مانده نظیر پدیده‌ی کاویتاسیون، کمبود داده‌های میدانی در خصوص رفتار جریان در دبی‌های بالا، تاثیر بلند مدت پارامترهای هندسی بر پدیده‌های هیدرولیکی نیز به‌عنوان خلأهای تحقیقاتی قابل‌توجه نمایان شدند که می‌توانند در مطالعات آینده مورد توجه بیشتری قرار گیرند.

کلیدواژگان: شیب‌شکن مایل، شیب‌شکن قائم، استهلاک انرژی، سازه‌های الحاقی، مستهلک‌کننده‌های انرژی.

۱- مقدمه

است. در مقابل، شیب‌شکن‌های قائم به‌طور معمول منجر به ایجاد جریان سقوطی با انرژی متمرکز می‌شوند که نیاز به طراحی دقیق برای مهار پدیده‌هایی مانند فشار منفی و حفره‌زایی دارد. از منظر سازه‌ای نیز، تفاوت در هزینه ساخت، نوع مصالح، و پیچیدگی اجرایی میان این دو نوع قابل ملاحظه است. پرداختن به این تفاوت‌ها، به‌ویژه در بررسی‌های مروری، اهمیت دارد چرا که می‌تواند در جهت‌دهی تحقیقات آینده نقش مؤثری ایفا کند (Balkis, 2004).

شیب‌شکن‌ها به‌عنوان سازه‌هایی کلیدی در مدیریت انرژی جریان در سازه‌های آبی، در شکل‌های مختلفی طراحی و اجرا می‌شوند که دو نوع رایج آن شامل شیب‌شکن‌های قائم و مایل هستند. این دو نوع، از نظر رفتار هیدرولیکی و الزام‌های سازه‌ای تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند. در شیب‌شکن‌های مایل، جریان به‌صورت تدریجی تسریع می‌شود و شرایط به‌وجودآمدن جریان فرابحرانی و حفره‌زایی (کاویتاسیون) در مقایسه با نوع قائم متفاوت

شیب‌شکن‌ها از جمله سازه‌های هیدرولیکی پرکاربرد در مهندسی منابع آب و طراحی سامانه‌های مهار جریان باز هستند که با هدف کاهش انرژی جریان، جلوگیری از فرسایش بستر، و مهار پدیده‌هایی مانند حفره‌زایی به کار می‌روند. این سازه‌ها نقش حیاتی در حفظ پایداری سازه‌های آبی و افزایش ایمنی عملکرد سامانه‌های تخلیه دارند، به‌ویژه در محل‌هایی با تغییر ناگهانی تراز سطح زمین یا افت شدید ارتفاع. شناخت عملکرد هیدرولیکی انواع شیب‌شکن‌ها اعم از مایل و قائم در شرایط مختلف جریان، از جمله محورهای کلیدی در طراحی و بهره‌برداری مؤثر از این سازه‌ها به‌شمار می‌رود. از این‌رو، بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی این سازه‌ها و مرور نتایج بررسی‌های پیشین در این زمینه می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و ارتقاء عملکرد آنان در پروژه‌های عمرانی آینده کمک کند. درصد بیشینه‌ای از انرژی جریان در اثر پرش هیدرولیکی ایجاد شده در پایین‌دست سازه شیب‌شکن مستهلک می‌شود و مقدار قابل توجهی از انرژی نیز هنگام سقوط جریان از روی لبه شیب‌شکن و پیش از پرش هیدرولیکی مستهلک می‌شود. این سازه‌ها از نظر ساختمان هندسی انواع متفاوتی دارند. شیب‌شکن‌های مایل در آبراهه‌های آبیاری و زهکشی و منطقه‌های کوهستانی که شیب مسیر آبراهه کمتر از شیب طبیعی زمین باشد ساخته شده و همچنین برای انتقال جریان از تراز ارتفاعی بالا به تراز ارتفاعی پایین و مستهلک کردن انرژی مازاد جریان استفاده می‌شود. شیب‌شکن‌های قائم نیز در آبراهه‌های آبیاری، زهکشی و همچنین گردآوری آب‌های سطحی با اهداف مهار نشست بستر، کنترل تراز سراب، تشکیل سرعت بهینه برای کاهش آبشستگی و مستهلک نمودن انرژی مازاد جریان به کار گرفته می‌شوند (Moore, 1943; Peterka, 1958; Bos et al., 1984; Chamani et al., 2008). یکی از مهم‌ترین فراسنجه‌های طراحی در شیب‌شکن‌های مایل و قائم، جریان ورودی در بالادست می‌باشد که این جریان در مقطع بالادست این سازه‌ها به‌طور معمول دارای رژیم فروبحرانی هستند. با وجود آن، برخی مواقع به دلیل شرایط ناهمواری، وجود دریچه پیش از شیب‌شکن‌ها و یا فاصله‌های طول کم، جریان آب با رژیم

فرابحرانی نیز از بالادست این سازه‌ها عبور می‌کنند (Chamani and Beirami, 2002; Tokyay and Yildiz, 2007; Liu et al., 2014). طراحی شیب‌شکن‌ها تحت تأثیر عامل‌های چندی از جمله شرایط هیدرولیکی، هندسی، سازه‌ای و محیطی قرار دارد. در این میان، شرایط پستی و بلندی و اقلیمی منطقه، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب نوع شیب‌شکن، ابعاد آن، و ملاحظه‌های اجرایی ایفا می‌کنند. برای نمونه، در منطقه‌های با شیب طبیعی زیاد یا زمین‌های محدود از نظر فضای اجرایی، استفاده از شیب‌شکن‌های قائم می‌تواند مؤثرتر باشد، در حالی که در منطقه‌هایی با ناهمواری باز و شیب ملایم، شیب‌شکن‌های مایل عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. از سوی دیگر، اقلیم منطقه از جمله شدت و الگوی بارش، تغییرهای دمایی، و پدیده‌هایی مانند یخبندان یا طوفان‌های ناگهانی بر فراسنجه‌هایی مانند دبی طراحی، مقاومت فرسایشی مصالح و ضرورت پیش‌بینی تمهیدهای خاص در طراحی اثرگذار است (Esen, 2004; Daneshfaraz et al., 2019). در نتیجه، در تحلیل و مقایسه عملکرد انواع شیب‌شکن‌ها، در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و ناهمواری منطقه دارای اهمیت بالایی است و می‌تواند جهت‌دهنده‌ی تحقیقات آینده باشد. بیشتر تحقیقات انجام گرفته در شیب‌شکن‌های مایل و قائم در ارتباط با جریان زیر بحرانی می‌باشد که به بررسی فراسنجه‌های مختلف هیدرولیکی آن پرداخته شده است. در تحقیق مروری حاضر در آغاز به نتایج بررسی‌های انجام گرفته در زمینه شیب‌شکن‌های مایل و پس از آن به نتایج تحقیقات صورت پذیرفته در مورد شیب‌شکن‌های قائم پرداخته شده است. شکل ۱، شمایی کلی از سازه‌های شیب‌شکن مایل و قائم را نشان می‌دهد.

پیشینه پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که به علت استهلاک کم شیب‌شکن مایل نسبت به شیب‌شکن‌های قائم و پلکانی، بررسی‌های بسیار محدود و اندکی در این زمینه صورت گرفته است که در زیر به برخی آنان اشاره شده است.

شیب‌شکن‌ها از جمله سازه‌های هیدرولیکی پرکاربرد در مهندسی منابع آب و طراحی سامانه‌های مهار جریان باز هستند که با هدف کاهش انرژی جریان، جلوگیری از فرسایش بستر، و مهار پدیده‌هایی مانند حفره‌زایی به کار می‌روند. این سازه‌ها نقش حیاتی در حفظ پایداری سازه‌های آبی و افزایش ایمنی عملکرد سامانه‌های تخلیه دارند، به‌ویژه در محل‌هایی با تغییر ناگهانی تراز سطح زمین یا افت شدید ارتفاع. شناخت عملکرد هیدرولیکی انواع شیب‌شکن‌ها اعم از مایل و قائم در شرایط مختلف جریان، از جمله محورهای کلیدی در طراحی و بهره‌برداری مؤثر از این سازه‌ها به‌شمار می‌رود. از این‌رو، بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی این سازه‌ها و مرور نتایج بررسی‌های پیشین در این زمینه می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و ارتقاء عملکرد آنان در پروژه‌های عمرانی آینده کمک کند. درصد بیشینه‌ای از انرژی جریان در اثر پرش هیدرولیکی ایجاد شده در پایین‌دست سازه شیب‌شکن مستهلک می‌شود و مقدار قابل توجهی از انرژی نیز هنگام سقوط جریان از روی لبه شیب‌شکن و پیش از پرش هیدرولیکی مستهلک می‌شود. این سازه‌ها از نظر ساختمان هندسی انواع متفاوتی دارند. شیب‌شکن‌های مایل در آبراهه‌های آبیاری و زهکشی و منطقه‌های کوهستانی که شیب مسیر آبراهه کمتر از شیب طبیعی زمین باشد ساخته شده و همچنین برای انتقال جریان از تراز ارتفاعی بالا به تراز ارتفاعی پایین و مستهلک کردن انرژی مازاد جریان استفاده می‌شود. شیب‌شکن‌های قائم نیز در آبراهه‌های آبیاری، زهکشی و همچنین گردآوری آب‌های سطحی با اهداف مهار نشست بستر، کنترل تراز سراب، تشکیل سرعت بهینه برای کاهش آبشستگی و مستهلک نمودن انرژی مازاد جریان به کار گرفته می‌شوند (Moore, 1943; Peterka, 1958; Bos et al., 1984; Chamani et al., 2008). یکی از مهم‌ترین فراسنجه‌های طراحی در شیب‌شکن‌های مایل و قائم، جریان ورودی در بالادست می‌باشد که این جریان در مقطع بالادست این سازه‌ها به‌طور معمول دارای رژیم فروبحرانی هستند. با وجود آن، برخی مواقع به دلیل شرایط ناهمواری، وجود دریچه پیش از شیب‌شکن‌ها و یا فاصله‌های طول کم، جریان آب با رژیم

و مقدار آن از ۰/۱۵ تا ۰/۰۳ متر متغیر بوده و بستگی به ابعاد، اندازه و سرعت جریان بحرانی دارد.

برای برخی از فراسنجه‌های شیب‌شکن مایل Bos et al., (1984)، معیارهایی را تعیین نمودند. آنان در محاسبه‌های خود میزان استهلاک انرژی سازه شیب‌شکن مایل را صفر در نظر گرفتند و نشان دادند که رقوم انرژی در حوضچه آرامش پایین‌دست برای شیب‌شکن مایل در مقایسه با به‌کارگیری شیب‌شکن قائم در شرایط یکسان آزمایشگاهی خیلی بیشتر است. دلیل این امر آن بوده است که در شیب‌شکن قائم به علت برخورد جریان در حوضچه پایاب لبه شیب‌شکن و ایجاد آشفتگی در استخر، انرژی مستهلک می‌شود. اثر شیب‌راهه (Ramp) بلوک‌گذاری شده با مصالح پایه و بلوک‌های تقویت‌شده بر استهلاک انرژی جریان توسط Pagliara and Chiavaccini (2006a, b) بررسی شد. پاگلپارا و همکاران (2008) Pagliara et al. جریان را بر روی سطح‌های شیب‌دار مسلح‌شده با بلوک‌های سخت و سفت را تحت شرایط جریان مستغرق بررسی کردند.

Ahmad et al. (2009) به بررسی استهلاک انرژی بر روی شیب‌راهه‌های زبرشده با تخته‌سنگ‌های ثابت و محکم با سه قطر متوسط متفاوت بر روی آن پرداختند. نتایج نشان داد که در هر سه اندازه زبری، با افزایش عمق بحرانی نسبی، افت انرژی کاهش می‌یابد. با طراحی یک شیب‌راهه زبرشده با چهار شیب مختلف به و بررسی تاثیر آن بر استهلاک انرژی نتایج نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی در هر چهار شیب روند نزولی دارد (Ghare et al., 2010).

در پژوهشی آزمایشگاهی در دانشگاه براویجایا اندونزی به برآورد طول پرش هیدرولیکی با استفاده از عدد شیب‌شکن $(D=q^2/gZ^3)$ در پایین‌دست شیب‌شکن‌های مایل و قائم پرداخته شده است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی کارایی و کاربرد عدد شیب‌شکن در سازه‌های شیب‌شکن مایل و قائم و همچنین توسعه معادله مدل برای سازه‌های شیب‌شکن مایل بود. نتایج پژوهش آنان نشان داد که می‌توان برای شیب‌شکن قائم، طول شیب‌شکن و طول پرش هیدرولیکی را بر مبنای عدد شیب‌شکن پیش‌بینی نمود. این در حالی است که برای سازه شیب‌شکن مایل

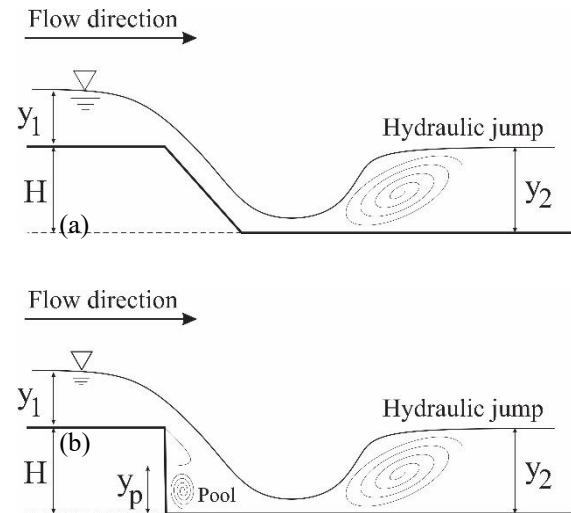


Fig. 1 Schematic diagram of inclined and vertical drop: a) inclined drop b) vertical drop

شکل ۱ شکل شمای کلی شیب‌شکن‌های مایل و قائم: (a) شیب‌شکن مایل، (b) شیب‌شکن قائم

۱-۱- پیشینه بررسی‌های شیب‌شکن‌های مایل

نخستین بررسی‌های انجام شده در ارتباط با سازه‌های شیب‌شکن مایل مربوط به تحقیق Wagner (1956) می‌باشد که بر روی شیب‌شکن‌های مایل رودخانه کلمبیا با هدف بررسی استهلاک انرژی پایین‌دست این سازه‌ها انجام گرفته است. Peterka (1958) در پژوهشی به صورت آزمایشگاهی با ایجاد تغییرپذیری‌ها بر روی فراسنجه‌های دبی، اندازه، ارتفاع و فاصله‌های بازدارنده‌ها (موانع) بر روی یک مدل از شیب‌شکن مایل مانع‌دار، در هر آزمایش استهلاک انرژی را محاسبه کرد. وی همچنین سرعت جریان را در هر حالت توسط ابزارهای آزمایشگاهی اندازه‌گیری محاسبه کرده و پیشنهادهایی نیز برای ضوابط طراحی ارائه داد.

موسسه استانداردهای هند (BIS) در سال ۱۹۷۵ برای طراحی شیب‌شکن‌های مایل، استاندارد IS 6062-1971 را پیشنهاد داده است. استاندارد بالا و روش طراحی آن در نشریه شماره ۲۶/۲ سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) گزارش شده است. شیب‌شکن مایل در این استاندارد یک فلوم جهش آبی با سطح شیب‌دار و یک بلوک کف (Baffle block) در انتهای آن می‌باشد. شیب سطح شیب‌دار ۱:۲ پیشنهاد شده است. استهلاک انرژی سازه در این استاندارد به اصطکاک جریان با سطح شیب‌دار مرتبط شده

مایل صاف می‌باشد. همچنین (Daneshfaraz et al. (2021a) به بررسی سه‌بعدی تاثیر شکل عنصرهای زبری بر ویژگی‌های هیدرولیکی شیب‌شکن مایل با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداختند. شیب‌شکن مورد استفاده در تحقیق آنان با ارتفاع و زاویه ثابت بوده و از سه نوع زبری با هندسه‌های مختلف استفاده شده است. نتایج تحقیق آنان نشان داد که استفاده از المان‌های زبری در شیب‌شکن مایل باعث افزایش استهلاک انرژی، افزایش عمق نسبی پایین‌دست و همچنین کاهش عدد فرود شده است. شیب‌شکن‌های مایل تورسنگی (گابیونی) نیز از جمله انواع شیب‌شکن‌های مایل هستند که در قسمت سطح شیب‌دار آن، به جای استفاده از سطح صاف از تورسنگی به صورت مایل استفاده می‌کنند که تاثیر بسیار زیادی در فراسنجه‌هایی مانند کاهش عدد فرود پایین‌دست و افزایش افت انرژی می‌شوند (Daneshfaraz et al., 2021b). شکل ۲ نگاره‌ای از شیب‌شکن مایل به همراه مستهلک‌کننده‌های نصب‌شده بر روی آن را با همه فراسنجه‌های موثر نشان می‌دهد (Daneshfaraz et al., 2021a).

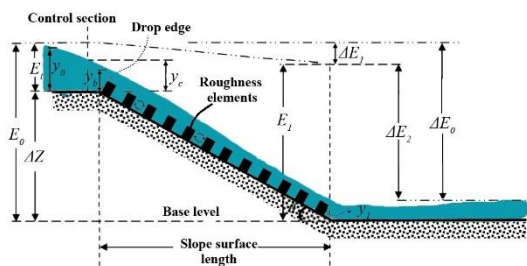


Fig. 2 An image of an inclined drop model with dissipators installed on it

شکل ۲ نگاره‌ای از مدل شیب شکن مایل به همراه مستهلک کننده‌های نصب شده بر روی آن

۱-۲- پیشینه بررسی‌های شیب‌شکن‌های قائم

دسته دیگر تحقیقات مربوط به بررسی‌های انجام گرفته در زمینه شیب‌شکن‌های قائم می‌باشد.

(Moore (1943) با بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم با جریان فرابحرانی نشان داد که استهلاک انرژی جریان از ارتفاع نسبی شیب‌شکن پیروی می‌کند و به بیان دیگر ارتفاع شیب‌شکن فراسنجه‌ای

براساس عدد شیب‌شکن، نمی‌توان طول پرش هیدرولیکی را تخمین زد (Mohammad and Shatirah, 2010).

بررسی استهلاک انرژی بر روی شیب‌راه‌های زبرشده به‌وسیله (Paglira and Palermo (2012) بررسی قرار گرفته شده است. نتایج آزمایشات آنان نشان‌دهنده کاهش استهلاک انرژی نسبی با افزایش عمق بحرانی نسبی می‌باشد.

(Pagliara and Palermo (2012) به بررسی تاثیر هندسه حوضچه آرامش بر استهلاک انرژی در حضور شیب‌راهه زبرشده پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، افت انرژی جریان کاهش می‌یابد.

فرآیند هدرووی انرژی زین‌بار جریان در شیب‌راهه‌های بلوک‌دار که در آن سنگ‌های بزرگ بر روی یک شیب چیده شده‌اند توسط (Ortel and Schlenkhoff (2012) بررسی پژوهشی شد. مطالعه‌ای آزمایشگاهی توسط (Ahmad and Srivastava (2014) با هدف بررسی ویژگی‌های سطح آب و میزان اتلاف انرژی در جریانانی توسعه‌یافته انجام شده است. در این تحقیق، از رویکردهای نوین مرتبط با ضریب اصطکاک و سازوکارهای هدرفت انرژی برای ارزیابی عمق جریان در رژیم‌های مختلف استفاده شده است.

(Daneshfaraz et al. (2020) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی شیب‌شکن مایل مجهز به صفحه‌های مشبک پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از صفحه مشبک قائم در برابر شیب‌شکن مایل باعث افزایش ۱۰۵ الی ۱۳۰ درصدی عمق نسبی پایین‌دست شده است. همچنین استفاده از صفحه‌های مشبک در مقایسه با شیب‌شکن مایل ساده میزان استهلاک انرژی نسبی کل را ۴۰۷ الی ۹۰۳ درصد افزایش داده است. (Norouzi et al. (2021) به بررسی استهلاک انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن مایل و قائم به همراه اسکرین قائم پرداختند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، استهلاک نسبی انرژی روندی کاهشی داشت. (Abbaspour et al. (2021) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی بر روی شیب‌شکن مایل زبرشده با مصالح طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که استهلاک انرژی در شیب‌شکن زبرشده ۱۰ الی ۳۲ درصد بیشتر از شیب‌شکن

شیب‌شکن‌های قائم با جریان فرابحرانی، افزایش شیب بالادست و عدد فرود موجب کاهش عمق در لبه شیب‌شکن، کاهش عمق استخر پایین‌دست و همچنین کاهش زاویه برخورد فوران ریزشی می‌شود.

(Kabiri-Samani et al. (2017) فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان در مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای و شیاری را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، استهلاک نسبی انرژی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت تخلخل شبکه، استهلاک انرژی در آغاز افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین Kabiri-Samani et al. (2017) در پژوهشی آزمایشگاهی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌های افقی و شیاری پرداختند. نتایج این آزمایش نشان داد که تخلخل ۴۴ درصدی شبکه‌های شیاری عملکرد بهتری داشته و با تغییر مسیر جت ریزشی، استهلاک انرژی را به میزان ۳۳ درصد افزایش می‌دهد.

اثرگذاری عمق پایین‌دست در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به استهلاک‌گرهای شبکه‌ای و شیاری با رژیم فروبحرانی نشان داد که با افزایش عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن قائم، اختلاط آب و هوا و طول نسبی اختلاط جریان کاهش و عمق نسبی استخر افزایش می‌یابد (Sharif and Kabiri-Samani, 2018). Chamani and Beirami (2002) به بررسی و ارزیابی فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان با رژیم فرابحرانی در بالادست شیب‌شکن پرداختند. نتایج نشان داد که در رژیم فرابحرانی، جریان از دو فراسنجه بدون بعد عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست پیروی و اثر می‌پذیرد. بدین ترتیب که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، با افزایش عدد فرود بالادست فراسنجه‌های استهلاک انرژی، عمق نسبی پایین‌دست و عمق استخر کاهش می‌یابد. (Daneshfaraz et al. (2019) به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی با رژیم فرابحرانی در مقطع بالادست پرداختند. نتایج نشان داد که فراسنجه استهلاک انرژی جریان هنگام استفاده از این صفحه‌ها در لبه شیب‌شکن قائم به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. فراسنجه‌های طول نسبی خیس‌شده و عمق استخر با

موثر در افزایش یا کاهش استهلاک انرژی می‌باشد. White (1943) با ارائه روش تحلیلی، رابطه‌ای برای انرژی مخصوص در شیب‌شکن‌ها ارائه داد. وی علت اصلی استهلاک انرژی جریان را آشفته‌گی و اختلاط جریان در پایین‌دست شیب‌شکن معرفی نمود. نتایج تحقیقات وی نشان داد که فراسنجه بدون بعد عدد شیب‌شکن، به عنوان اثرگذارترین فراسنجه هیدرولیکی شیب‌شکن می‌باشد. در ادامه تحقیق White (1943)، با استفاده از داده‌های Moore (1943) و مقایسه آن‌ها با داده‌های خودش، رابطه‌هایی را برای بررسی فراسنجه هیدرولیکی شیب‌شکن قائم ارائه داد. (Rajaratnam and Chamani (1995) با بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی، معادله‌هایی را برای برآورد و محاسبه استهلاک انرژی ارائه دادند. استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم تحت تاثیر پله نصب شده در پایین‌دست توسط Esen et al. (2004) در پژوهشی آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شد. آنان روابطی برای عمق‌های نسبی پایین‌دست و استخر در دو حالت با پله و بدون پله ارائه دادند. تحقیقاتی بر روی شیب‌شکن قائم با رژیم فرابحرانی در بالادست آن توسط Tokyay and Yildiz (2007) انجام گرفته و برای نخستین بار پاشیدگی جریان در اثر فوران جت (Jet) ریزشی به کف آبراهه را معرفی نمودند. افزون بر آن رابطه‌هایی بر مبنای عدد فرود و ارتفاع نسبی شیب‌شکن برای فراسنجه‌های طول نسبی شیب‌شکن، طول نسبی پاشیدگی و عمق نسبی پاشیدگی ارائه دادند. آنان برخلاف دستاوردهای Chamani and Beirami (2002) دریافتند که عمق نسبی استخر به میزان عدد فرود بستگی نداشته و تنها تابعی از ارتفاع نسبی شیب‌شکن می‌باشد.

(Chamani et al. (2008) از نظریه لایه‌های برشی و فوران سطحی توسعه یافته استفاده کرده و معادله استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم با رژیم فروبحرانی را بازنویسی و اصلاح کردند. (Hong et al. (2010) تحقیقاتی در ارتباط با تاثیر شیب‌شکن قائم انجام دادند. نتایج تحقیقات نشان داد که با افزایش میزان شیب پایین‌دست شیب‌شکن قائم، فراسنجه‌های طول شیب‌شکن و نیروی برخورد افزایش می‌یابند. نتایج بررسی Liu et al. (2014) نشان داد که در

صفحه‌های مشبک و پله در پایین دست آن به عنوان مستهلک کننده ترکیبی انرژی نشان می‌دهد.

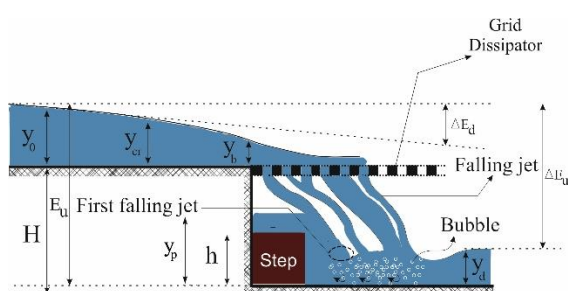


Fig. 3 An image of an vertical drop model with step and vertical screen installed on it

شکل ۳ نگاره‌ای از مدل شیب‌شکن قائم به همراه پله و اسکرین نصب شده بر روی آن

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده و کاوش در نتایج بررسی‌های پیشین، متاسفانه تحقیقات اندکی در زمینه انواع شیب‌شکن‌ها با وجود استفاده در طبیعت و با توجه به هزینه پایین احداث این سازه‌ها انجام شده است. از سوی دیگر شیب‌شکن‌ها به دلیل ماهیتی که دارند باعث تبدیل رژیم فروبحرانی به رژیم فرابحرانی می‌شوند که این عامل باعث افزایش سرعت و انرژی جریان در پایین دست این سازه‌ها شده و باعث آسیب رسیدن به سازه‌های پایین دست و یا خطرهای احتمالی دیگر مانند افزایش آبشستگی و ... می‌شود. به همین دلیل بایستی با استفاده از چند سازه‌ی مستهلک کننده، نیروی زیان بار جریان در پایین دست گرفته شود تا از خطرات احتمالی جلوگیری شود. با توجه به اهمیت موضوع، هدف در این پژوهش آشنایی محققان با این سازه‌ها و چگونگی استفاده از سازه‌های الحاقی برای مستهلک کردن انرژی جنبشی زیان بار جریان در شیب‌شکن‌های مایل و ارائه یک دیدگاه کلی و جامع در مورد تحقیقات صورت گرفته در شیب‌شکن‌ها و آشنایی با روش‌های جلوگیری از افزایش انرژی جریان است.

۲- مواد و روش‌ها

مرحله‌های بررسی‌ها بدین صورت انجام گرفته است:

۱. شناسایی تحقیقات در ارتباط با سازه‌های شیب‌شکن مایل
۲. شناسایی تحقیقات انجام گرفته در زمینه

افزایش درصد تخلخل صفحه‌های مشبک افقی کاهش یافته و همچنین دریافتند که درصد تخلخل صفحه مشبک افقی تاثیری بر میزان استهلاک انرژی جریان ندارد.

(Daneshfaraz et al. (2021c) با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی و روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)، به بررسی عملکرد این مدل‌ها در پیش‌بینی تأثیر قطر صفحه‌های مشبک افقی بر فراسنجه‌های هیدرولیکی شیب‌شکن قائم پرداختند. آنان در این بررسی دو پیش‌فرض شامل میزان استهلاک انرژی و عمق نسبی استخر را ارزیابی کردند. نتایج ناشی از کاربرد مدل SVM نشان داد که این روش در هر دو پیش‌فرض سازگاری و همخوانی بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی فراسنجه‌های هیدرولیکی استفاده شود. (Daneshfaraz et al. (2021d) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به بررسی عددی تأثیر پله و پایین دست شیب‌شکن قائم به همراه صفحه‌های مستهلک کننده شبکه‌ای افقی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از صفحات شبکه‌ای و پله در پایین دست، باعث افزایش استهلاک انرژی و کاهش عدد فرود شده است. Pasbani Khiavi and Hasanniya (2022) با بررسی عددی تأثیر ارتفاع صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم نشان دادند که با کاهش نسبی ارتفاع صفحه‌های مشبک، عدد فرود پائین دست به میزان $66/3$ و $10/3$ درصدی و همچنین افزایش 187 و $2/8$ درصدی استهلاک انرژی نسبی همراه بوده است.

از جمله مسئله‌های جدید و نوینی که مورد توجه محققان در زمینه مهندسی هیدرولیک قرار گرفته است استفاده از جریان‌های دوفازی است. جریان‌های دوفازی باعث ایجاد آشفتگی و افزایش استهلاک انرژی زیان بار جریان می‌شود. در طی سال‌های اخیر استفاده از صفحه‌های مشبک به عنوان یکی از روش‌هایی که باعث ایجاد جریان‌های دوفازی می‌شود، شناخته شده است. همچنین این سازه‌های الحاقی جایگزین بسیار مناسبی برای حوضچه‌های آرامش و دیگر مستهلک کننده‌های انرژی هستند. در این زمینه نیز تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است که به شرح زیر می‌باشد. شکل ۳ نیز نگاره‌ای از شیب‌شکن قائم را به همراه

تکراری، غیرمرتبط یا از نظر کیفیت علمی قابل قبول نبودند حذف شدند. این فرآیند باعث کاهش شمار مقاله‌ها به حدود ۱۰۰ مقاله شد.

در مرحله سوم، ارزیابی دقیق‌تری بر مبنای معیارهای کیفی و کمی انجام گرفت. این معیارها شامل مرتبط بودن دقیق موضوع مقاله با محورهای اصلی پژوهش، کیفیت و اعتبار مجله منتشرکننده (با اولویت مجله‌های دارای ضریب تأثیر بالا و داوری دقیق)، سال انتشار (ترجیح به مقاله‌های جدیدتر برای پوشش آخرین دستاوردها) و شمار ارجاع‌های علمی به هر مقاله بود. این ارزیابی منجر به انتخاب ۴۹ مقاله شد که به‌عنوان منبع‌های اصلی در تحلیل و بررسی‌های عمیق‌تر استفاده شدند.

در گام نهایی، داده‌های کلیدی و اطلاعات مهم از مقاله‌های منتخب استخراج شدند. این اطلاعات شامل اهداف تحقیق، روش‌های به‌کاررفته (آزمایشگاهی، عددی، نظری)، نتایج اصلی، فراسنجه‌های هیدرولیکی مورد بررسی، و یافته‌های مرتبط با استهلاک انرژی، توزیع فشار و کواپتاسیون بودند. داده‌های استخراج شده به صورت جدول‌بندی شده و در قالب تحلیل‌های کیفی و کمی مورد بحث قرار گرفتند تا روندها، نقطه‌های قوت و محدودیت‌های پژوهش‌های موجود به خوبی تبیین شود.

کل مقاله‌های استفاده‌شده در پژوهش از منبع یا رفرنس‌های آنلاین که شامل Google Scholar، Google، CAS، Science Direct و ... از ناشران Elsevier، Springer، Taylor & Francis، MDPI، Civilica و ... تهیه شده است. در این پژوهش بیش از ۳۰ ژورنال JCR، اسکوپوس و نشریه‌های علمی و پژوهشی بررسی شده است که مقاله‌های حاضر در منبع‌ها، از سال ۱۹۳۲ تا ۲۰۲۳ میلادی بوده که از این میان شمار عمده مقاله‌ها در چند سال اخیر یعنی از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ بررسی شده‌اند که نشان از به‌روز و جدید بودن مطالب ارائه شده دارد. از این رو شمار ۴۸ مقاله در این تحقیق مورد بررسی و مرور قرار گرفته است. البته شمار به نسبت کم مقاله‌های بررسی‌شده برای این پژوهش مروری به این علت است که در زمینه شیب‌شکن‌ها تحقیقات بسیار اندکی انجام گرفته است و این مقاله مروری جهت شناخت هرچه بیشتر این سازه‌ها و

شیب‌شکن‌های قائم

۳. بررسی و شناسایی ارزیابی‌های صورت‌پذیرفته در زمینه استهلاک انرژی

۴. تجزیه و تحلیل مقاله‌های بررسی شده در موارد (۱)، (۲) و (۳)

۵. تجزیه و تحلیل انواع حوضچه‌های آرامش به‌کاررفته در سازه‌های شیب‌شکن

۶. تحلیل سازه‌های الحاقی در انواع شیب‌شکن‌ها

گرچه تاکنون تحقیقات کمی در ارتباط با شیب‌شکن‌ها انجام گرفته است و بیشتر تحقیقات در ارتباط با سرریزها بوده‌اند، اما از نظر مفهومی بین سرریزها و شیب‌شکن‌ها تفاوتی قائل نشده و عملکرد آن را شبیه به هم عنوان کرده‌اند. این در صورتی است که با توجه به شرایط هندسی و هیدرولیکی عملکرد این دو سازه به‌کلی متفاوت بوده است، به‌طوری‌که از شیب‌شکن‌ها نمی‌توان با ارتفاع بیش از ۴ متر استفاده کرد اما سرریزها از این قاعده مستثنی هستند. با توجه به اینکه بررسی‌ها و مقاله‌های کمی در این زمینه انجام گرفته است اما عمده بررسی‌های صورت‌پذیرفته در این زمینه از سال ۲۰۱۲ به بعد بوده که در این بازه نیز شمار بیشتر مقاله‌ها در بازه سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ بوده است. این پژوهش مروری با هدف ارائه تصویری جامع و دقیق از پژوهش‌های مرتبط با هیدرولیک شیب‌شکن‌های مایل و قائم، استهلاک انرژی و حفره‌زایی، مرحله‌های انتخاب و بررسی مقاله‌ها را به‌صورت ساختارمند و چندمرحله‌ای انجام داده است.

در نخستین مرحله، جستجوی گسترده‌ای در پایگاه‌های داده معتبر علمی شامل Scopus، Web of Science و Google Scholar انجام شد. کلیدواژه‌های اصلی به‌صورت ترکیبی شامل عبارت‌هایی مانند «شیب‌شکن مایل»، «شیب‌شکن قائم»، «هیدرولیک جریان»، «استهلاک انرژی»، «کواپتاسیون»، «توزیع فشار» و دیگر اصطلاح‌های مرتبط به کار گرفته شدند تا دامنه گسترده‌ای از مقاله‌های مرتبط شناسایی شود. این جستجو منجر به گردآوری بیش از ۴۰۰ مقاله مرتبط شد.

مرحله دوم شامل غربالگری اولیه مقاله‌ها بود که بر اساس مطالعه عنوان و زمینه‌ها و چکیده‌ها انجام شد. مقاله‌های

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_d}{\Delta z}, \frac{y_b}{y_c} = f\left(\frac{y_c}{\Delta z}\right) \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}}, \frac{F_D}{F_{D,C}}, E = f\left(\frac{h}{h_B}, \frac{h_c}{h_B}, \frac{h_c}{H}\right) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_d}{h}, \frac{y_p}{h} = f\left(\frac{y_c}{h}, \varepsilon\right) \quad (6)$$

$$\frac{E_d}{E_0}, \frac{L_{mix}}{h}, \frac{y_p}{h}, \frac{y_d}{h} = f\left(\frac{y_c}{h}, p, \theta\right) \quad (7)$$

که در رابطه‌های بالا، E_0 انرژی مخصوص مقطع بالادست شیب‌شکن‌ها، y_b عمق جریان آب در لبه شیب‌شکن، y_c عمق بحرانی، y_d عمق جریان آب در پایین دست شیب‌شکن‌ها، Δz ارتفاع شیب‌شکن، θ زاویه قرارگیری شیب‌شکن، p درصد تخلخل صفحه‌های مشبک، Fr_d عدد فرود جریان در پایین دست شیب‌شکن‌ها، L_{air} طول هوادهی جریان، L_j طول پرش هیدرولیکی، H ارتفاع سازه شیب‌شکن، a, b به ترتیب طول و عرض مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای مربعی، Ed انرژی مخصوص در مقطع پایین دست شیب‌شکن، L_{mix} طول اختلاط و آشفتگی آب و هوا و yp عمق استخر در شیب‌شکن قائم می‌باشد.

۳- یافته‌ها

۳-۱- عملکرد سازه شیب‌شکن‌های مایل

انرژی جریان به خصوص با رژیم فرابحرانی که دارای سرعت و همچنین انرژی بسیار زیادی است، آسیب‌ها و هزینه‌های بسیار زیادی را می‌تواند در پایین دست سازه‌های اصلی ایجاد کند که این آسیب‌ها می‌تواند به صورت سریع یا با گذشت زمان و به صورت تدریجی رخ بدهد. از سازه‌های الحاقی که برای کاستن انرژی جریان استفاده می‌شود می‌توان به صفحه‌های مشبک یا اشاره کرد (Daneshfaraz et al., 2020). از سازه‌های مولد جریان فرابحرانی در آبراهه‌های آبیاری و... می‌توان به شیب‌شکن‌ها اشاره کرد. از آنجائیکه در پایین دست شیب‌شکن‌ها انرژی جنبشی افزایش می‌یابد، برای کاهش آن بایستی از عناصر و سازه‌های الحاقی

بررسی جنبه‌های شناسایی نشده آن در تحقیقات بعدی می‌باشد. کلید واژه‌های استفاده شده در این مقاله نیز عبارت‌اند از: "Inclined drop"، "Vertical drop"، "Energy dissipation"، "Application's structures"، "Hydraulic structures"، "Froude number"، "Downstream depth" و "Rough bed". شکل ۴ دسته‌بندی موضوع‌های بررسی شده را نشان می‌دهد. برابر دسته‌بندی انجام گرفته، ۵۰٪ مقله‌ها در ارتباط با انواع حوضچه‌های آرامش و ۵۰٪ باقی‌مانده به موضوع‌های استهلاک انرژی، شیب‌شکن‌های قائم و شیب‌شکن‌های مایل پرداخته است. مجموع مقاله‌های پذیرفته شده در این دسته‌بندی چیزی در حدود ۴۰۰ مقاله می‌باشد که در بازه سال‌های ۱۹۳۲ تا ۲۰۲۳ در نشریه‌های مختلف و معتبر بین‌المللی و داخلی به چاپ رسیده‌اند.

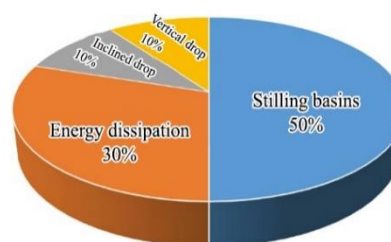


Fig. 4 Pie chart of percentage of topics completed
شکل ۴ نمودار دایره‌ای درصد موضوع‌های انجام شده

از مطلب بسیار مهمی که در بررسی فراسنجه‌های هیدرولیکی بایستی انجام پذیرد، شناسایی فراسنجه‌های وابسته و مستقل می‌باشد که این امر با انجام تحلیل ابعادی قبلی شناسایی است. در رابطه‌های زیر شماری از تحلیل‌های ابعادی انجام گرفته توسط محققانی که در زمینه شیب‌شکن‌های مایل و قائم فعالیت کرده‌اند، اشاره شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_b}{y_c}, \frac{y_d}{\Delta z} = f\left(\theta, p, \frac{y_c}{\Delta z}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_d}{\Delta z}, Fr_d = f\left(\theta, p, \frac{y_c}{\Delta z}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{y_d}{H}, Fr_d, \frac{L_{air}}{H}, \frac{L_j}{H} = f\left(\varphi, \frac{a}{b}, \frac{y_c}{H}\right) \quad (3)$$

شیب‌شکن‌ها به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در مهار انرژی جریان در آبراهه‌های آبیاری شناخته می‌شوند که با افزایش ارتفاع شیب، سرعت جریان را مهار می‌کنند (Hashemi et al., 2019; Norouzi et al., 2021). به دلیل افزایش انرژی جنبشی در پایین‌دست شیب‌شکن‌ها، استفاده از عنصرهای الحاقی برای کاهش انرژی ضروری است.

در مقایسه این دو نوع سازه، شیب‌شکن‌ها به دلیل ساختار ساده‌تر، کاربرد گسترده‌تری در کنترل انرژی دارند، ولی شیب‌راهه‌ها با افزایش اصطکاک و تغییر عمق جریان، کنترل موثرتری روی جریان ایجاد می‌کنند.

به طور کلی، نتایج بررسی‌های مختلف نشان می‌دهند که انتخاب و به‌کارگیری سازه‌های الحاقی باید بر مبنای نوع رژیم جریان، ویژگی‌های هندسی سازه و شرایط محیطی صورت گیرد تا بیشترین کارایی در کاهش انرژی جریان حاصل شود.

رابطه استخراج شده توسط این محققان مطابق رابطه ۸ می‌باشد:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \log_{10} \left(S_0^{-2.5} \frac{h}{D_{84}} \right) + 2.8 \quad (8)$$

که در رابطه بالا، f ضریب دارسی-ویسباخ، S_0 شیب کف آبراهه و D_{84} بیانگر ۸۴٪ ذرات عبوری می‌باشد. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که وجود تخته‌سنگ بر روی یک شیب‌راهه با بلوک‌های تقویت شده، مقاومت جریان را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت جریان بستگی به شیب سطح شیب‌دار شیب‌راهه، درصد تراکم تخته‌سنگ‌ها، آرایش و چینش آن‌ها و به اندازه تخت‌سنگ‌ها دارد. افزایش مقاومت جریان ناشی از وجود تخته‌سنگ‌ها را می‌توان با استفاده از رابطه‌های زیر بیان کرد. افزایش مقاومت جریان به طور مستقیم با تراکم تخته‌سنگ‌ها در ارتباط می‌باشد. که در رابطه‌های زیر فراسنجه Γ بیانگر درصد تراکم تخته‌سنگ‌ها، Δf ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ، Δn ضریب مانینگ و دیگر فراسنجه‌ها مقادیر ثابتی هستند.

$$\Delta f = a\Gamma^b \quad (9a)$$

استفاده کرد (Norouzi et al., 2021). صفحه‌های مشبک دارای روزنه‌هایی با تخلخل‌های متفاوت بوده که به صورت افقی یا عمودی در برابر جریان واقع می‌شوند و باعث مستهلک کردن انرژی جریان می‌شوند.

۳-۱-۱- عملکرد شیب‌شکن‌های مایل در استهلاک انرژی

انرژی جریان، به‌ویژه در رژیم‌های فرابحرانی که دارای سرعت و انرژی بسیار بالایی هستند، می‌تواند موجب آسیب‌ها و هزینه‌های قابل توجهی در پایین‌دست سازه‌های اصلی شود. این آسیب‌ها ممکن است به صورت فوری یا تدریجی رخ دهند. برای کاهش انرژی جریان، تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از سازه‌های الحاقی انجام شده است که می‌توان آنها را به دو دسته کلی تقسیم کرد: سازه‌های مقاوم در برابر انرژی جریان و سازه‌های مولد جریان فرابحرانی.

بررسی‌های (Pagliara and Chiavaccini, 2006, 2008) بر روی شیب‌راهه‌های زبرشده با تخته‌سنگ نشان داده‌اند که قرار دادن تخته‌سنگ‌های با قطر متوسط بین ۰/۲ تا ۱۹/۷ میلی‌متر، افزون بر افزایش عمق جریان، باعث افزایش تنش برشی و اصطکاک شده و به طور مؤثری مقاومت جریان را افزایش می‌دهد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که مقاومت جریان روی شیب‌راهه نه تنها به غوطه‌وری نسبی جریان بلکه به شیب شیب‌راهه وابسته است. افزون بر این، رابطه ارائه شده بین ضریب دارسی-ویسباخ و فراسنجه D_{84} در این بررسی‌ها با نتایج دیگر تحقیقات (همچون رابطه دارسی-ویسباخ استاندارد) همپوشانی خوبی دارد، که اعتبار مدل‌های موجود را تقویت می‌کند.

در دسته اول، صفحه‌های مشبک با روزنه‌هایی دارای تخلخل‌های متفاوت، به صورت افقی یا عمودی در برابر جریان قرار گرفته و با مستهلک کردن انرژی، کاهش قابل توجهی در شدت جریان ایجاد می‌کنند (Daneshfaraz et al., 2020; Mohammadi et al., 2018). این صفحه‌ها به عنوان سدهای جزئی، با ایجاد مقاومت در برابر جریان، انرژی جنبشی را کاهش می‌دهند.

در دسته دوم، سازه‌های مولد جریان فرابحرانی مانند

مشهود است. برای شیب‌شکن مایل مورد استفاده در تحقیق آنان دو زاویه با درجه‌های ۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ می‌باشد. Mohammad and Shatirah (2010) با معرفی فراسنجه‌ای با عنوان «عدد شیب‌شکن»، روشی برای پیش‌بینی شرایط پرش هیدرولیکی در سازه‌های شیب‌دار قائم و ملیل ارائه دادند. این عدد به صورت تابعی از ویژگی‌های جریان، هندسه شیب‌راهه و شرایط پایاب تعریف شده و قابلیت استفاده در طراحی و ارزیابی عملکرد شیب‌شکن‌ها را دارد. نتایج تحقیق آنان نشان می‌دهد که عدد شیب‌شکن می‌تواند با دقت مناسبی موقعیت و شدت پرش را پیش‌بینی کند و در تحلیل رفتار جریان نقش کلیدی ایفا کند. در این پژوهش فراسنجه‌های مهمی مانند عمق نسبی پایین‌دست، طول نسبی پرش هیدرولیکی، طول نسبی سازه و عدد فرود پایین دست بر مبنای عدد شیب‌شکن (شکل ۶) بررسی شده است. عدد شیب‌شکن فراسنجه مستقلی است که بنابر دستاوردهای محققان از رابطه $D=q^2/gZ^3$ به دست می‌آید که این رابطه تابعی q دبی جریان، z ارتفاع سازه، g شتاب گرانش و D عدد شیب‌شکن می‌باشند. نتایج نشان داده است که استفاده از عدد شیب‌شکن برای سازه‌های قائم برای شرایط پرش هیدرولیکی ضعیف و نوسانی (انتقالی) در محدوده عدد فرود $1/7 < Fr < 4/5$ و محدوده عمق بحرانی نسبی $0/16 < y/z < 0/1$ مناسب باشد. بر مبنای نتایج ۳۰ الی ۱۲۰ $(cm^3/sec/cm)$ مناسب باشد. بر مبنای نتایج بدست آمده از بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی شیب‌شکن ملیل، خطای زیادی به مقدار ۱۵٪ بین نتایج آزمایشگاهی و استخراج شده از رابطه عدد شیب‌شکن وجود دارد و این نشان‌دهنده آن است که عدد شیب‌شکن در برآورد پرش هیدرولیکی در شیب‌شکن‌های مایل، به دلیل عدم قطعیت و خطای زیاد نمی‌تواند مورد استفاده شود.

مقاله‌هایی که در زمینه شیب‌شکن‌های مایل و استهلاك انرژی آن‌ها انجام گرفته است با استفاده از صفحه‌های مشبک بررسی شده‌اند اما (Daneshfaraz et al. (2021a استفاده از عنصرهای زبری بر روی سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل، اثر این زبری‌ها را بر روی فراسنجه‌های هیدرولیکی این سازه مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از یک ارتفاع و یک زاویه برای شیب‌شکن مایل و

$$\Delta n = aT^{b'} \quad (9b)$$

پژوهش (Koochi et al. (2011) به بررسی انواع مختلف شیب‌شکن‌ها با هندسه‌های رایج، از جمله شیب‌شکن‌های مایل، قائم و پلکانی پرداخته است. نتیجه به دست آمده نشان از کاهش استهلاك انرژی نسبی با افزایش عمق بحرانی نسبی و کاهش زاویه مجرا در محدوده دبی ۳۱/۴-۳/۵ لیتر در ثانیه دارد. مقایسه استهلاك انرژی در دامنه متغیرهای این تحقیق نشان از این دارد که در شرایط هندسی و هیدرولیکی برابر، مقدار بیشینه استهلاك انرژی نسبی به شیب‌شکن قائم اختصاص داشته است که شیب‌شکن‌های پلکانی و مایل به ترتیب در رده دوم و سوم قرار دارند. علت این امر نیز به این دلیل است که در شیب‌شکن‌های مایل به دلیل تشکیل نشدن استخر و جت ریزشی، استهلاك انرژی ناشی از خود سازه بسیار کمتر از شیب‌شکن‌های دیگر می‌باشد. یکی از فراسنجه‌های بسیار مهمی که باعث افزایش استهلاك انرژی می‌شود، ارتفاع نسبی سازه می‌باشد. ارتفاع کم شیب‌شکن‌های پلکانی باعث می‌شود که جریان دوفازی آب و هوا بر روی پلکان‌ها رخ ندهد و این عاملی برای کم بودن استهلاك نسبت به شیب‌شکن قائم است. در شیب‌شکن‌های قائم، به دلیل سقوط جریان از ارتفاع قابل توجه و تشکیل استخر به همراه جریان‌های دوفازی، میزان بیشتری از انرژی جریان مستهلك می‌شود. این موضوع در نتایج پژوهش Koochi et al. (2011) که در شکل ۵ نمایش داده شده است، به خوبی

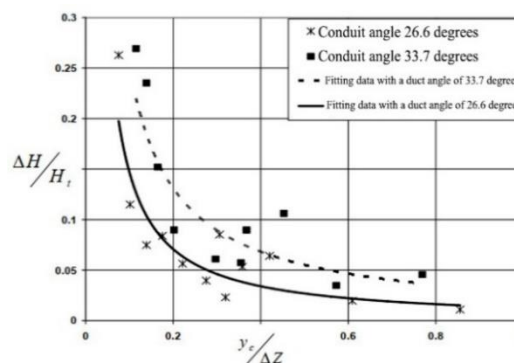


Fig. 5 Changes in energy dissipation versus relative critical depth of inclined drop in the study of Koochi et al. (2011)

شکل ۵ تغییرپذیری‌های استهلاك انرژی در برابر عمق بحرانی نسبی شیب‌شکن مایل در تحقیق (Koochi et al. (2011)

المان خفاشی و شیب‌شکن مایل صاف بترتیب بیشترین و کمترین عمق نسبی پائین‌دست را دارد. استهلاک نسبی انرژی با افزایش عمق بحرانی نسبی به دلیل افزایش عمق پایین‌دست جریان روند کاهش می‌دهد. در این میان به طوری که بیشترین استهلاک انرژی مربوط به شیب‌شکن مجهز به المان خفاشی شکل و کمترین میزان استهلاک انرژی مربوط به شیب‌شکن صاف می‌باشد. به طوری که شیب‌شکن مجهز به المان‌های زبری مثلی، استوانه‌ای و خفاشی شکل بترتیب ۶۵، ۷۶ و ۸۵ درصد انرژی جریان را بیشتر از شیب‌شکن مایل صاف مستهلک می‌کند. به کارگیری المان‌های زبری بر روی سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل، عدد فرود پایین‌دست را به طرز چشمگیری کاهش می‌دهد بطوریکه عدد فرود پایین‌دست در همه مدل‌ها از بازه ۴/۷ الی ۷/۵ به ۱/۴۵ الی ۳/۳۶ نسبت به شیب‌شکن مایل صاف کاهش یافته است. همچنین باتوجه به حجم زبری‌های خفاشی شکل که حجم کمتری نسبت به دیگر المان‌ها دارد، از لحاظ اقتصادی نیز استفاده از این نوع زبری مقرون به صرفه می‌باشد.

استفاده از این نوع زبری مقرون به صرفه می‌باشد. (Abbaspour et al. (2021) به بررسی تجربی استهلاک انرژی جریان بر روی شیب‌راهه‌های مسلح شده با سنگدانه‌های طبیعی پرداختند. آنان در این تحقیق از سنگ‌های درشت و ریزدانه با ارتفاع زبری‌های ۴/۳، ۲۲ و ۳۲ میلی‌متر با آرایش‌های گوناگون و با زاویه‌های ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه پرداختند. استهلاک انرژی نسبی تابعی از ارتفاع نسبی سازه، ارتفاع نسبی زبری‌ها و زاویه قرارگیری شیب‌راهه می‌باشد. استهلاک انرژی تحت اثر زبری‌ها بر روی شیب‌راهه با افزایش ارتفاع زبری‌ها، افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش دبی جریان، این فراسنجه روند کاهش می‌گیرد. به عبارت دیگر خود زبری‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی شده اما افزایش دبی و سرعت جریان باعث کاهش این فراسنجه نسبت به دیگر زبری‌ها و حالت شاهد آن شود. همچنین افت نسبی انرژی تابعی از زاویه قرارگیری شیب‌راهه‌ها نیز می‌باشد. هنگامی که زاویه و شیب شیب‌راهه‌ها از ۱۵ به ۳۰ افزایش می‌یابد، استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد اما در دبی‌های بزرگ‌تر افت نسبی انرژی در طول یکسان شیب‌راهه در

المان زبری با هندسه‌های خفاشی شکل، استوانه‌ای و مثلی استفاده شده (شکل ۷) و با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به صورت عددی بررسی شده است (جدول ۱).

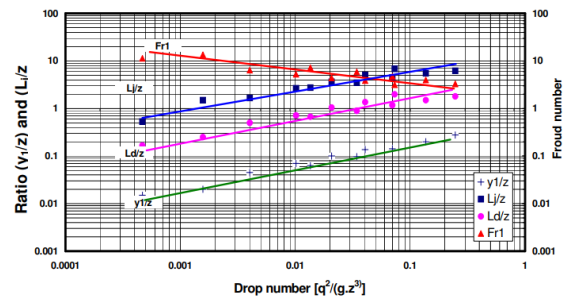


Fig. 6 Relationship diagram between hydraulic parameters based on the drop number in the study of Mohammad and Shatirah (2011)

شکل ۶ نمودار ارتباط بین فراسنجه‌های هیدرولیکی بر مبنای عدد شیب‌شکن در تحقیق Mohammad and Shatirah (2010)

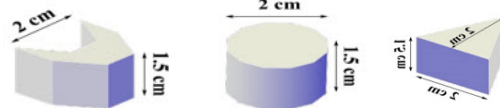


Fig. 7 Geometry of roughness elements used in the study by Daneshfaraz et al. (2021a)

شکل ۷ هندسه عنصرهای زبری مورد استفاده در تحقیق Daneshfaraz et al. (2021a)

جدول ۱ فراسنجه‌های متغیر اندازه‌گیری شده در تحقیق Daneshfaraz et al. (2021a)

Table 1 Mesured variable parameters in the research of Daneshfaraz et al. (2021a)

Model	Discharge (Lit/sec)	Downstream Flow depth (mm)	Downstream Froude number	Reynolds number ($\times 10^3$)
Smooth surface		5-19	4.69-7.5	32-138
Model 1	2.5-11.7	11-29.5	1.45-3.36	16-178
Model 2		17-27.5	1.56-3.0	39-145
Model 3		8.9-25.5	2.9-6.0	49-153

آرایش قرارگیری المان‌ها بر روی سطح شیب‌دار به صورت زیگزآگی و با تراکم ۱۵ درصد می‌باشد. برای شبیه‌سازی جریان از روش VOF و از مدل آشفتگی RNG (k-ε) استفاده شده است. عمق نسبی لبه در شیب‌شکن مایل مجهز به المان استوانه‌ای بشتترین مقدار را دارد. همچنین عمق نسبی پائین‌دست با افزایش عمق بحرانی نسبی روند صعودی داشت به طوری که شیب‌شکن مایل زبر شده بوسیله

طرفی استفاده از صفحه مشبک با تخلخل ۴۰ درصد باعث افزایش ۹/۸۹، ۷/۱۹ و ۵/۰۷ درصدی به ترتیب در زوایای یاد شده و اسکرین با تخلخل ۵۰ درصد نیز باعث افزایش ۱۰، ۷/۳۶ و ۵/۲۳ درصدی استهلاك انرژی نسبت به حالت شاهد آن شده است (شکل ۹). به عبارت دیگر صفحه‌های مشبک قائم، تاثیر زیادی بر استهلاك انرژی در هر دو تخلخل را ندارد و بیشترین عامل استهلاك انرژی، پرش هیدرولیکی تشکیل شده به واسطه استقرار صفحه‌های مشبک در برابر جریان می‌باشد.

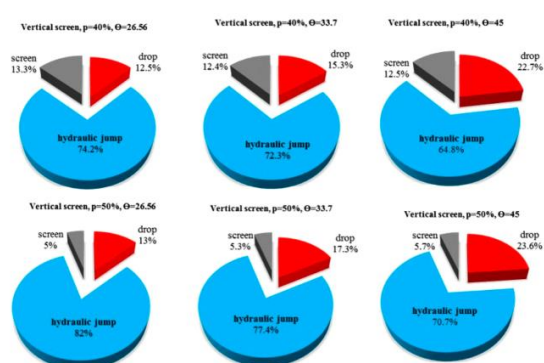


Fig. 9 Changes in energy dissipation percentage in the study by Daneshfaraz et al. (2020)

شکل ۹ تغییرپذیری‌های درصد استهلاك انرژی در تحقیق Daneshfaraz et al. (2020)

Daneshfaraz et al. (2020) به بررسی آزمایشگاهی استهلاك انرژی جریان بر روی شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک پرداختند. شیب‌شکن‌های مورد استفاده در تحقیق آن‌ها دارای سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه با اسکرین‌های قائم با تخلخل‌های ۴۰٪ و ۵۰٪ بوده است. برای شیب‌شکن مایل مجهز به صفحات مشبک و برای زوایای ذکر شده با اسکرین ۴۰٪ تخلخل، میانگین کل استهلاك انرژی به ترتیب ۷۰/۵٪، ۷۰/۹٪ و ۷۱/۲٪ بوده است. هم‌چنین برای صفحه مشبک با تخلخل ۵۰٪ در هر سه زاویه، میانگین استهلاك انرژی کل حدود ۷۲٪ می‌باشد (شکل ۹). این امر بیانگر این است که افزایش زاویه قرارگیری سطح شیب‌دار شیب‌شکن مایل باعث افزایش استهلاك انرژی می‌گردد. زیرا با سقوط جریان از روی سازه، با افزایش سرعت برخورد جریان به کف آبراهه افزایش یافته و پرش هیدرولیکی تشکیل شده باعث

زاویه ۲۲/۵ درجه روند کاهش‌ی به خود گرفته است. از سوی دیگر برای آرایش‌های مختلف قرارگیری زبری‌ها، بیشترین استهلاك انرژی متعلق به آرایش زیگزاگی است که شکل آرایش قرارگیری دانه‌ها را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد.



Fig. 8 Geometry of roughness elements used in the study by Abbaspour et al. (2021)

شکل ۸ هندسه المان‌های زبری مورد استفاده در تحقیق Abbaspour et al. (2021)

۳-۱-۲- شیب‌شکن‌های مایل

Daneshfaraz et al. (2020) برای نخستین بار عملکرد صفحه‌های مشبک در شیب‌شکن‌های مایل را به صورت آزمایشگاهی بررسی قرار کردند. در این تحقیق آنان نقش صفحه‌های مشبک قائم را در شیب‌شکن‌های مایل با تخلخل‌های ۴۰ و ۵۰ درصد در فاصله‌های مختلف از شیب‌شکن را بر فراسنجه‌های عمق پایین‌دست و استهلاك انرژی ارزیابی و در نهایت سهم هر کدام از سازه‌ها در استهلاك انرژی نسبی را معرفی کردند. با افزایش عمق بحرانی نسبی و دبی جریان، فراسنجه‌های استهلاك انرژی و عمق نسبی پایین‌دست در هر دو شیب‌شکن مایل ساده و شیب‌شکن مجهز به صفحه‌های مشبک قائم با هر دو تخلخل به ترتیب کاهش و افزایش یافته است. شیب‌شکن مورد استفاده در تحقیق با سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه در آبراهه مورد نظر نصب شده است. صفحه مشبک مستقر شده در پایین‌دست شیب‌شکن مایل با تخلخل ۴۰ درصد، باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست به میزان ۱۲۱/۸۷، ۱۱۴/۷۸ و ۱۰۵/۲۷ درصد به ترتیب در زاویه‌های یاد شده نسبت به شیب‌شکن مایل ساده شده است. هم‌چنین صفحه مشبک با تخلخل ۵۰ درصد نیز باعث افزایش ۱۳۰، ۱۲۳ و ۱۱۷ درصدی نسبت به حالت ساده شیب‌شکن شده است. همان‌طور که مشخص است، تغییر تخلخل صفحه مشبک تاثیر چندانی را نشان نمی‌دهد. از

سازه‌های الحاقی مؤثر معرفی کرده‌اند که با ایجاد مقاومت در برابر جریان، به کاهش انرژی کمک می‌کنند. در مقایسه، Esen et al., (2004) با تمرکز ویژه بر نقش پله‌ها در شیب‌شکن‌ها در بررسی‌های خود نشان دادند که افزون بر افزایش عمق استخر، ارتفاع پله‌ها تأثیر قابل توجهی بر استهلاك انرژی دارد.

این مقایسه نشان می‌دهد که هر سازه بسته به کاربرد و شرایط جریان برتری‌ها و محدودیت‌های خود را دارد؛ به طور مثال شیب‌راهه‌های زبرشده به افزایش اصطکاک و مهار انرژی می‌پردازند، صفحه‌های مشبک به عنوان مقاومت فیزیکی عمل می‌کنند و پله‌های نصب‌شده در پایین‌دست شیب‌شکن، افزون بر تأثیر مکانیکی، با ایجاد پرش هیدرولیکی موجب افت انرژی می‌شوند. بنابراین، انتخاب سازه مناسب باید با توجه به شرایط هیدرولیکی و هدف کاهش انرژی جریان انجام شود.

که در رابطه‌های زیر y_l عمق بالادست جریان، y_c عمق بحرانی، h ارتفاع شیب‌شکن، h_s ارتفاع پله و y_p عمق استخر می‌باشد.

$$\frac{y_l}{h} = 0.482 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{1.1854} \times \left[1 + 0.5243 \left(\frac{h_s}{h} \right)^{1.4877} \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.07571} \right] \quad (10a)$$

$$\frac{y_p}{h} = 1.215 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{0.8124} \quad (10b)$$

فرضیه لایه‌های برشی و جت سطحی توسعه یافته، تئوری‌هایی بودند که توسط Chamani et al. (2008) برای بیان استهلاك انرژی نسبی جریان در شیب‌شکن‌های قائم ارائه داده شد. در این آزمایش از دبی ۲۱ تا ۴۷ لیتر در ثانیه و محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۳۲ تا ۰/۷۵ برای بررسی این موضوع استفاده گردید. بر مبنای شباهت بین جت سطحی آشفته و جریان بر روی شیب‌شکن قائم، روشی برای برآورد افت انرژی نسبی ارائه شده است. این مدل براساس فرضیه لایه‌های برشی و تئوری جت سطحی، توسعه یافته است. براساس نتایج به دست آمده، برای عمق بحرانی نسبی بیش از ۰/۳ می‌توان از مدل تئوری لایه‌های برشی برای تخمین و پیش‌بینی افت انرژی نسبی استفاده کرد.

افزایش استهلاك انرژی نسبی می‌گردد. استهلاك انرژی جریان ناشی از چند عامل می‌باشد که این عوامل شامل خود سازه (شیب‌شکن)، پرش هیدرولیکی و اسکرین می‌باشد که هر کدام سهم ویژه‌ای در استهلاك دارند.

۳-۲- عملکرد سازه شیب‌شکن‌های قائم

استفاده از پله‌های نصب‌شده در پایین‌دست شیب‌شکن قائم به منظور استهلاك انرژی جریان برای نخستین بار توسط Esen et al., (2004) به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. در این تحقیق که شامل ۱۲۳ آزمایش با ابعاد پله‌های مربعی شکل به ارتفاع‌های ۵، ۷/۵، ۱۰، ۲۲/۵ و ۲۷ سانتی‌متر بود، نشان داده شد که وجود پله‌ها باعث افزایش عمق استخر ناشی از جت ریزشی می‌شود. این افزایش عمق استخر به نوبه خود منجر به افزایش افت انرژی جریان می‌گردد و رابطه‌ای تجربی برای محاسبه عمق نسبی پایین‌دست بر مبنای عمق بحرانی نسبی و ارتفاع نسبی پله‌ها ارائه شده است (رابطه ۱۰-الف). همچنین عمق استخر ناشی از جت ریزشی به دبی جریان و ارتفاع نسبی شیب‌شکن بستگی داشته و از رابطه ۱۰-ب قابل محاسبه است.

از منظر روند تغییرپذیری‌ها، با افزایش عمق بحرانی جریان، استهلاك انرژی جریان کاهش می‌یابد، اما افزایش ارتفاع پله موجب افزایش افت انرژی نسبت به دیگر پله‌ها می‌شود. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش سرعت برخورد جریان به کف آبراهه باعث تشکیل پرش هیدرولیکی و در نتیجه افزایش استهلاك انرژی نسبی می‌گردد. همچنین این استهلاك انرژی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله سازه شیب‌شکن، پرش هیدرولیکی و صفحه‌های مشبک می‌باشد که هر یک سهمی ویژه در کاهش انرژی جریان دارند.

پژوهش‌های پیشین مانند Pagliara and Hiavaccini (2006, 2008) بر روی شیب‌راهه‌های زبرشده با تخته‌سنگ نشان داده‌اند که افزایش اصطکاک سطحی و عمق جریان می‌تواند مقاومت جریان را بالا ببرد و در مهار انرژی مؤثر باشد. همچنین Daneshfaraz et al., (2020) و Mohammadi et al., (2018) صفحات مشبک را به عنوان

افزایش عمق استخر شده و افزایش عمق استخر نیز باعث افزایش افت انرژی جریان می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت که طول نسبی سازه تابعی از شیب کف آبراهه (S_0)، دبی جریان و زاویه جت ریزشی جریان می‌باشد.

۳-۲-۱- شیب‌شکن‌های قائم و تاثیر عنصرهای الحاقی بر استهلاک انرژی

با ریزش جریان از روی شیب‌شکن قائم، رژیم جریان در پایین دست تبدیل به رژیم فرابحرانی می‌شود. با فرابحرانی شدن رژیم جریان، سرعت و انرژی جریان افزایش یافته و باعث تخریب سازه‌های موجود در پایین دست و فرسایش کف آبراهه می‌شود. یکی از راهکارهایی که برای جلوگیری از این امر انجام گرفته است، استفاده از مستهلک کننده‌های شبکه‌ای و شیاری است که توسط Kabiri-Samani et al. (2017) و Sharif and Kabiri-Samani (2018) بررسی شده است. این مستهلک کننده‌های شبکه‌ای و شیاری به صورت افقی از لبه شیب‌شکن نصب شده و جریان از میان شبکه‌ها و شیارهای آن عبور کرده و در نهایت به پایین دست هدایت می‌شود. استفاده از مستهلک کننده‌های شبکه‌ای باعث پراکنده شدن جریان در حین سقوط از روی آن می‌شود که یک جریان فرابحرانی را در استخر ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه در پایین دست آبراهه هیچ گونه سازه کنترلی مانند حوضچه آرامش وجود ندارد اما این شبکه‌ها در پایین دست باعث تشکیل پرش هیدرولیکی و ایجاد جریان دوفازی (اختلاط آب و هوا) شده است. پس از برخورد نخستین جت ریزشی با کف آبراهه، یک پرش هیدرولیکی ایجاد می‌شود. از آنجایی که جت‌های در حال سقوط پی‌درپی به پرش هیدرولیکی افزوده می‌شوند، لذا یک جریان مستغرق در پایین دست تشکیل می‌شود. نتیجه استفاده از این شبکه‌ها نشان می‌دهد که تخلخل شبکه‌ها، عمق بحرانی نسبی و ابعاد منفذها از فراسنجه‌هایی هستند که بر رفتار جریان اثرگذار می‌باشند. پراکنده شدن جریان عبوری از منفذها شبکه‌ها باعث افزایش هدرروی انرژی جریان و افزایش عمق نسبی استخر می‌شود. این در حالی است که مستهلک‌گرهای شبکه‌ای در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، انرژی جریان

همچنین برای عمق بحرانی نسبی کمتر از 0.3 می‌توان از مدل تئوری جت سطحی برای بیان افت انرژی نسبی استفاده کرد.

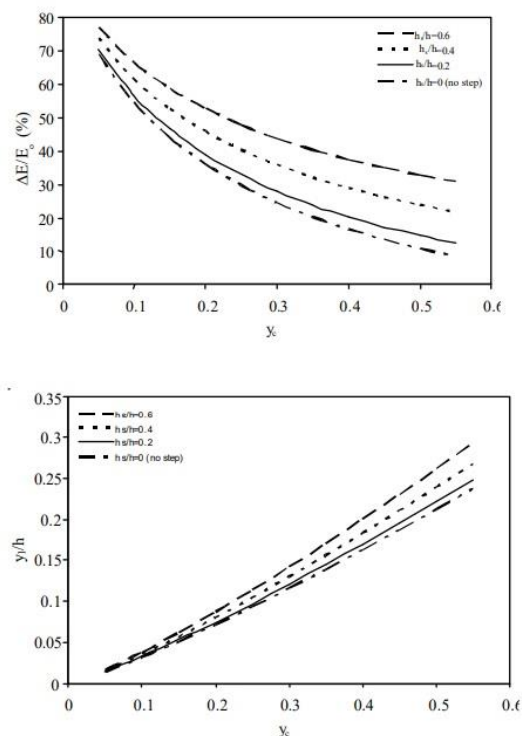


Fig. 10 Changes in downstream relative depth and energy dissipation in the study of Esen et al. (2004)

شکل ۱۰ تغییرپذیری‌های عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی در تحقیق Esen et al. (2004)

اثر شیب کف آبراهه در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم از جمله مهم‌ترین تحقیقاتی است که در چند سال اخیر بررسی شده است که می‌توان نخستین تحقیق انجام گرفته در این زمینه را به پژوهش Hong et al. (2008) نسبت داد. یکی از مهم‌ترین فراسنجه‌ها و به عبارت دیگر موثرترین فراسنجه‌ها، طول نسبی سازه شیب‌شکن و عمق بحرانی نسبی جریان می‌باشد. برای شیب کف آبراهه میزان‌های صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد و چهار ارتفاع برای سازه اصلی در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش زاویه شیب کف آبراهه باعث افزایش طول نسبی سازه شیب‌شکن می‌شود. علت این امر افزایش ارتفاع و زاویه جت ریزشی و برخورد جریان با کف آبراهه می‌باشد. این امر دلیل بر افزایش استهلاک انرژی جریان نیز می‌شود. زیرا زاویه برخورد و ارتفاع جت ریزشی باعث

که در رابطه‌های فوق L_{max} بیشینه طول حوضچه، Z ارتفاع سازه و S ارتفاع نسبی سازه می‌باشد.

اثرگذاری شیب بالادست بر روی فراسنجه‌های هیدرولیکی شیب‌شکن قائم به صورت آزمایشگاهی در تحقیقی توسط Liu et al. (2014) بررسی شد. در این پژوهش در آغاز رابطه‌هایی فرضیه‌ای جهت محاسبه فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان با در نظر داشتن شیب مثبت بالادست شیب‌شکن قائم ارائه شده و سپس به صورت آزمایشگاهی، آزمایش‌هایی برای رسیدن به هدف‌های تحقیق انجام گرفته است. چهار ارتفاع برای سازه شیب‌شکن و شیب‌های صفر، ۲، ۴ و ۶ درصد به عنوان شیب بالادست در نظر گرفته شده است. رژیم جریان بالادست فرابحرانی بوده که این نوع رژیم جریان ناشی از شیب بالادست سازه می‌باشد. با افزایش عدد فرود بالادست و همچنین افزایش شیب بالادست سازه، مقدار عمق نسبی لبه کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش فراسنجه عدد شیب‌شکن، مقادیر فراسنجه‌های بدون بعد عمق نسبی پایین دست و عمق نسبی استخر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب بالادست شیب‌شکن زاویه سقوط جت ریزشی، فراسنجه‌های بدون بعد عمق نسبی پایین دست و عمق نسبی استخر کاهش می‌یابد. این در حالی است که محل سقوط جت ریزشی افزایش می‌یابد استفاده از دریچه در بالادست شیب‌شکن قائم به منظور ایجاد جریان فرابحرانی در بالادست و تاثیر عدد فرود بر فراسنجه‌های هیدرولیکی شیب‌شکن قائم از جمله پژوهش‌هایی است که (Daneshfaraz et al. 2019) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق که به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته است از یک ارتفاع به اندازه ۱۵ سانتی‌متر برای سازه شیب‌شکن و از یک دریچه با مقدارهای بازشدگی $1/3$ ، $1/7$ و $2/1$ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد طول نسبی شیب‌شکن، طول نسبی پاشیدگی و طول کلی شیب‌شکن با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود افزایش می‌یابند. از سوی دیگر با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود، عمق استخر در آغاز افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. این نتیجه در حالی است که افت انرژی نسبی با افزایش عمق بحرانی و عدد فرود در ابتدا کاهش و سپس روند افزایشی به خود

را ۳۳٪ بیشتر مستهلک می‌کند و طول حوضچه را نیز در حدود ۷۰٪ کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، افزایش تخلخل روزنه‌های شبکه مستهلک کننده باعث کاهش میزان استهلاک انرژی نسبی جریان می‌شود. دلیل آن این است که با افزایش تخلخل، فضای زیادی برای سقوط جریان وجود دارد و این امر باعث افزایش سرعت سقوط جریان و افزایش سرعت جت ریزشی می‌شود.

رژیم جریان فرابحرانی در بالادست شیب‌شکن‌های قائم یکی از مهم‌ترین موضوع‌هایی است که می‌توان گفت برای نخستین بار توسط Tokyay and Yildiz (2007) بحث و بررسی شده است. آنان برای نخستین بار پاشیدگی جریان در اثر برخورد جت ریزشی به کف آبراهه را منحصر با عنوان رژیم فوق‌بحرانی در بالادست مورد بررسی و واکاوی قرار دادند. بازه عدد فرود بالادست جریان در محدوده $1/3$ تا ۴ بوده و از دو ارتفاع ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری برای سازه شیب‌شکن بهره جسته‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمق نسبی لبه شیب‌شکن برای جریانی با رژیم فرابحرانی تابع عدد فرود بالادست جریان می‌باشد. البته این امر برای همه شیب‌شکن‌ها از جمله شیب‌شکن‌های مایل و پلکانی نیز صادق بوده و ارتباطی با نوع رژیم جریان ندارد. عمق نسبی استخر یا به عبارت دیگر عمق آب پشت جت ریزشی تابعی از عمق نسبی لبه شیب‌شکن می‌باشد. این در حالی است که با افزایش عمق نسبی لبه، میزان عمق نسبی استخر افزایش به صورت خطی افزایش می‌یابد تا جایی که میزان عمق نسبی لبه به مقدار $0/3$ برسد. بیشینه طول نسبی جریان از ابتدای استخر تا انتهای پرش هیدرولیکی، تابعی از عدد فرود بالادست جریان و ارتفاع نسبی سازه شیب‌شکن می‌باشد که می‌توان مقدارهای این فراسنجه را از رابطه تجربی (a-11) حساب کرد. عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی نیز تابعی از عدد فرود بالادست جریان و ارتفاع نسبی سازه می‌باشد که می‌توان مقدار این فراسنجه را نیز از رابطه (b-11) محاسبه کرد.

$$\frac{L_{max}}{Z} = 1.29Fr / \sqrt{S} + 0.2 \quad (11a)$$

$$\frac{y_{sp}}{Z} = 0.4532Fr / \sqrt{S} \quad (11b)$$

• فقدان مقایسه‌ی ساختارمند بین کارایی روش‌های مختلف طراحی و عملکرد هیدرولیکی شیب‌شکن‌ها تحت رژیم‌های جریان مختلف فروبحرانی، بحرانی و فرابحرانی.

بر این مینا، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی در این زمینه با تمرکز بر موارد زیر گسترش یابند:

• توسعه مدل‌های CFD پیشرفته همراه با شبیه‌سازی دقیق حفره‌زایی و تحلیل تنش‌های موضعی در سازه‌های مختلف.

• اجرای آزمایش‌های فیزیکی در مقیاس‌های متنوع همراه با حسگرهای دقیق اندازه‌گیری فشار و سرعت برای تحلیل میدانی جریان.

• ارائه چارچوب‌های طبقه‌بندی‌شده برای انتخاب نوع شیب‌شکن بر مبنای شرایط ناهمواری، اقلیمی و هیدرولیکی پروژه.

در نهایت، این پژوهش ضمن ارائه تصویری جامع از وضعیت موجود، می‌کوشد با تحلیل تطبیقی و دسته‌بندی ساختارمند بررسی‌های پیشین، بستری برای شکل‌گیری مسیرهای جدید تحقیقاتی فراهم آورد و به عنوان مرجعی قابل اتکا در طراحی پژوهش‌های آتی و اجرای آن‌ها فراهم سازد.

۴- نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی عملکرد شیب‌شکن‌های مایل و قائم در استهلاک انرژی جریان و نقش سازه‌های الحاقی، به تحلیل کمی و کیفی پژوهش‌های انجام‌شده در بازه سال‌های ۱۹۳۲ تا ۲۰۲۳ پرداخت. هدف اصلی این پژوهش بررسی و تحلیل رفتار جریان آب در شیب‌شکن‌های قائم با تمرکز ویژه بر فرآیند استهلاک انرژی ناشی از تشکیل استخر پایین‌دست جت ریزشی است. این پژوهش با هدف بهبود عملکرد سازه‌های مهار جریان در سامانه‌های سیلاب و آبرسانی انجام می‌شود؛ چرا که انتقال مؤثر جریان از تراز بالاتر به پایین‌تر مستلزم کاهش انرژی جریان و کنترل رژیم‌های هیدرولیکی است. با توجه به تفاوت‌های هندسی و عملکردی شیب‌شکن‌های مایل و قائم، تمرکز این تحقیق بر روی شیب‌شکن‌های قائم است که در آنها تشکیل استخر

گرفته است. این در حالی است که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود فراسنجه‌های طول نسبی پاشیدگی، طول کلی شیب‌شکن و افت انرژی نسبی روند افزایشی و عمق نسبی استخر روند کاهشی داشته است. با توجه به شباهت این تحقیق با Tokyay and Yildiz (2007) نتایج این تحقیق با بررسی‌های آنان در اختصاص تاثیر عدد فرود بالادست بر روی رفتار فراسنجه‌های طول نسبی شیب‌شکن و طول نسبی پاشیدگی جریان موازی با نتایج Tokyay and Yildiz (2007) می‌باشد. اما این در حالی است که رفتار عمق نسبی استخر با نتایج آنان مغایرت دارد. پیش از نتیجه‌گیری کلی می‌توان در حالت کلی به موارد زیر اشاره کرد:

بررسی‌های انجام‌شده در زمینه عملکرد هیدرولیکی شیب‌شکن‌های مایل و قائم طی سال‌های اخیر گسترش یافته‌اند، با این حال بررسی مقاله‌های نشان می‌دهد که پژوهش‌ها به‌طور عمده متمرکز بر ارزیابی‌های آزمایشگاهی محدود یا تحلیل‌های عددی کلاسیک با شرایط ساده‌شده بوده و کمتر به بررسی‌های جامع چندمتغیره یا مدل‌سازی پدیده‌هایی مانند حفره‌زایی پرداخته شده است.

مرور نظام‌مند منابع نشان داد که به‌رغم تفاوت در هندسه، شرایط جریان و هدف‌های تحقیقات، نتایج ارائه‌شده از منظر سازوکار استهلاک انرژی، رفتار جریان فرابحرانی و توزیع فشار در سازه‌ها به‌طور عمده همگرا هستند، ولی برخی مغایرت‌ها نیز وجود دارد که می‌تواند ناشی از تفاوت در مقیاس آزمایشگاهی، مدل‌های عددی مورد استفاده یا روش‌های اندازه‌گیری باشد.

از جمله مهم‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی که در این پژوهش شناسایی شد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

• نبود تحلیل‌های جامع عددی در مورد تأثیر توزیع فشار و بروز پدیده حفره‌زایی در شیب‌شکن‌های مایل و قائم. در حالی که این موضوع نقش مهمی در پایداری سازه دارد، تنها به‌طور محدود و نامستقیم به آن پرداخته شده است.

• نبود مدل‌های ترکیبی (آزمایشگاهی-عددی) که بتوانند همزمان به بررسی اثر شیب، دبی، ارتفاع سقوط، شکل هندسی و موقعیت نصب سازه بپردازند.

Esen et al., (2004) بیان می‌کند که با افزایش ارتفاع پله‌ها، عمق استخر پایین‌دست افزایش یافته و افت انرژی تا حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد ارتقا می‌یابد. این افزایش افت انرژی همزمان با کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد همراه است که شرایط پایدارتر و کنترل‌شده‌تری برای جریان فراهم می‌کند.

- سازوکار اصلی استهلاک انرژی در هر دو نوع شیب‌شکن، برخورد جت جریان به کف پایین‌دست و تشکیل آشفتگی و جریان‌های دوفازی (آب-هوا) است. استفاده از سازه‌های الحاقی با تغییر در الگوی جریان، نقش مهمی در توزیع دوباره انرژی جنبشی و افزایش عمق جریان پایین‌دست دارد.
- تحلیل نتایج نشان می‌دهد که زاویه شیب، تخلخل سازه‌های الحاقی، نوع زبری و الگوی چیدمان از عامل‌های تعیین‌کننده در عملکرد نهایی سامانه هستند.
- در نهایت، اگرچه پیشرفت‌های خوبی در طراحی شیب‌شکن‌ها حاصل شده است، اما برخی زمینه‌ها همچنان نیازمند مطالعه بیشترند؛ از جمله:
- بررسی دقیق حفره‌زایی در شیب‌شکن‌های قائم و مایل،
- تحلیل توزیع فشار و تنش بر روی عنصرهای الحاقی،
- مدلسازی عددی پرش هیدرولیکی در شرایط ناپایدار،
- و استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی بهینه‌سازی عملکرد این سازه‌ها.
- با توجه به خلأهای موجود در زمینه بررسی و ارزیابی‌های حفره‌زایی در شیب‌شکن‌های مایل و قائم، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی به صورت ساختارمند بر استفاده از روش‌های عددی پیشرفته مانند شبیه‌سازی‌های CFD با مدل‌های دقیق حفره‌زایی و همچنین آزمایش‌های نظارت‌شده آزمایشگاهی متمرکز شوند. این رویکردها می‌توانند به درک بهتر سازوکارهای ایجاد حفره‌زایی، تأثیر آن بر استهلاک انرژی و پایداری سازه‌ها کمک کرده و راهکارهای بهینه طراحی را فراهم آورند. بررسی‌های

پایین‌دست نقش مهمی در استهلاک انرژی دارد. از این رو، این پژوهش به دنبال شناسایی فراسنجه‌های مؤثر بر عمق استخر و میزان افت انرژی، و همچنین ارائه رابطه‌های تجربی دقیق برای بهبود طراحی و بهره‌برداری از شیب‌شکن‌های قائم است.

نتایج مرور منابع و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و عددی گویای آن است که:

- شیب‌شکن‌های قائم نسبت به شیب‌شکن‌های مایل، عملکرد مؤثرتری در کاهش انرژی جریان دارند. این امر به‌طور عمده به دلیل تشکیل پرش هیدرولیکی کامل و استخر در پایین‌دست و برخورد عمودی جت ریزشی با کف آبراهه است.
- میزان استهلاک انرژی در شیب‌شکن قائم در شرایط آزمایشگاهی تا حدود ۷۵٪ و در حضور سازه‌های الحاقی تا بیش از ۹۰٪ نیز افزایش یافته است.
- در شیب‌شکن‌های مایل، به دلیل نبود زمینه تشکیل کامل پرش و ماهیت سقوط مایل جریان، میزان استهلاک انرژی به‌طور طبیعی کمتر است. با این حال، افزودن عنصرهای زبری، صفحه‌های مشبک می‌تواند عملکرد آنان را به‌طور معناداری بهبود دهد، به‌گونه‌ای که در برخی مدل‌ها افزایش تا ۸۸٪ در استهلاک انرژی مشاهده شده است.
- از سوی دیگر، زبری‌های سطحی مانند تخته‌سنگ‌های قرارگرفته بر روی شیب‌راه‌های زبرشده نیز نقش مهمی در افزایش مقاومت جریان ایفا می‌کنند. به‌طوری‌که قرار دادن این زبری‌ها موجب افزایش تنش برشی و اصطکاک سطحی می‌شود که به‌طور میانگین تا ۲۰ تا ۳۰ درصد به استهلاک انرژی جریان می‌افزاید. این افزایش مقاومت سطحی سبب کاهش طول پرش هیدرولیکی نیز شود که به اندازه حدود ۱۵ درصد گزارش شده است؛ این امر باعث بهبود شرایط پایدار جریان و کاهش آسیب‌های احتمالی به سازه‌های پایین‌دست می‌شود.
- افزون‌بر این، پله‌های نصب‌شده در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم نیز تأثیر بسزایی در استهلاک انرژی و مهار پرش هیدرولیکی دارند. نتایج بررسی‌های

نویسنده سوم: مواد و روش تحقیق، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی و ویرایش نهایی مقاله.

۶- منابعها

Abbaspour, A., Shiravani, P. & Hosseinzadeh Dalir, A. (2021). Experimental study of the energy dissipation on rough ramps. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(1), 334-342.

Ahmad, Z. & Srisvastava, D. (2014). Energy dissipation on block ramps with large scale roughness. In ISHS 2014-Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 1-8. The University of Queensland.

Ahmad, Z., Petappa, N.M. & Westrich, B. (2009). Energy dissipation on block ramps with staggered boulders. *Journal of Hydraulic Eng.*, 133(6), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000039).

Bos, M.G., Replogle, J.A. & Clemmens, A.J. (1984). Flow measuring flumes for open channel systems, John Wiley & Sons, 321p.

Chamani, M.R., Rajaratnam, N. & Beirami, M.K. (2008). Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(10), 1532-1535.

Chamani, M. & Beirami, M.K. (2002). Flow characteristics at drops. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(8), 788-791.

Daneshfaraz, R., Aminvash, E. & Abraham, J. (2022). Hydraulic Characteristics of Fish-passes on Inclined Drops with Multifarious Configurations: An Experimental Study, *Research Developments in Science and Technology*, 4, 108-123.

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A. & Abraham, J. (2021a). Three-dimensional study of the effect of block roughness geometry on inclined drop. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(1), 1-9.

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Abraham, J. & Bagherzadeh, M. (2021b). SVM performance for predicting the effect of horizontal screen diameters on the hydraulic parameters of a vertical drop. *Applied sciences*, 11(9), 4238.

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Kuriqi, A. & Abraham, J. (2021). Three-dimensional investigation of hydraulic properties of vertical drop in the presence of step and grid dissipators. *Symmetry*, 13(5), 895, <https://doi.org/10.3390/sym13050895>.

Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Ghaderi, A., Di

میدانی و تجربی در مقیاس‌های مختلف و توسعه مدل‌های نیمه‌تجربی نیز از اولویت‌های پژوهشی آینده در این زمینه خواهد بود.

این تحقیق مروری، بستری برای درک بهتر رفتار هیدرولیکی این سازه‌ها فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی و اجرای سازه‌های مدیریت و مهار انرژی در پروژه‌های آبیاری و زهکشی استفاده شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

y_l	عمق جریان بالادست، m
y_c	عمق بحرانی جریان، m
y_2	عمق جریان پایین‌دست، m
$H, \Delta z$	ارتفاع شیب‌شکن، m
p	تخلخل صفحه مشبک، -
L_j	طول پرش هیدرولیکی، m
Fr_d	عدد فرود پایین‌دست، -
$Fr_{u,0}$	عدد فرود بالادست، -
y_p	عمق استخر، m
θ	زاویه صفحه مشبک، -

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مواد و روش تحقیق، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی و ویرایش نهایی مقاله

نویسنده دوم: جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله، نگارش مقاله.

- by adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *AUT Journal of civil engineering*, 53(3), 1-17.
- Norouzi, R., Sihag, P., Daneshfaraz, R., Abraham, J. & Hasannia, V. (2021). Predicting relative energy dissipation for vertical drops equipped with a horizontal screen using soft computing techniques. *Water Supply*, 21(8), 4493-4513.
- Oertel, M. & Schlenkhoff, A. (2012). Crossbar block ramps: Flow regimes, energy dissipation, friction factors, and drag forces. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(5), 440-448.
- Pagliara, S. & Chiavaccini, P. (2006a). Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 41-48.
- Pagliara, S. & Chiavaccini, P. (2006b). Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 545-552.
- Pagliara, S. & Palermo, M. (2012). Effect of stilling basin geometry on the dissipative process in the presence of block ramps. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 138(11), 1027-1031.
- Pagliara, S., Das, R. & Palermo, M. (2008). Energy dissipation on submerged block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(4), 527-532.
- Pasbani Khiavi, M. & Hasanniya Giglou, V. (2022). Numerical Study of the Effect of Height of Vertical Screens on Vertical Drop Energy Dissipation. *Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 65-84.
- Peterka, A.J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters engineering monograph No. 25. US Bureau of Reclamation, Denver Colorado.
- Rajaratnam, N. & Chamani, M.R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.
- Sharif, M. & Kabiri-Samani, A. (2018). Flow regimes at grid drop-type dissipators caused by changes in tail-water depth. *Journal of Hydraulic Research*, 56(4), 505-516.
- Sholichin, M. & Akib, S. (2011). Development of drop number performance for estimate hydraulic jump on vertical and sloped drop structure. *Int J Eng Sci*, 5(11), 1678-1687.
- Singh, U.K. & Roy, P. (2023). Energy dissipation in hydraulic jumps using triple screen layers. *Applied Water Science*, 13, 17, <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01824-y>.
- Tokyay, N.D. & Yildiz, D. (2007). Characteristics of free overfall for supercritical flows. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(2), 162-169.
- Wagner, W.E. (1956). Hydraulic model studies of the check intake structure-potholes East canal. Francesco, S. & Asl, M.M. (2021c). Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3451-3459.
- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R. & Bazayar, A. (2020). Experimental investigation of the effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2499-2509. (In Persian)
- Daneshfaraz, R., Majedi, A. M. & Bazayar, A. (2019). Experimental investigation of the performance of horizontal screen on energy dissipation in inclined drop. *Iran J Sci Technol*, 51(2), 441-453.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. & Hasannia, V. (2020). Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(7), 1765-1782.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. & Hasanniya, V. (2019). Experimental investigation of energy dissipation in vertical drops equipped with a horizontal screen under supercritical flow. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(6), 1421-1436. (In Persian)
- Esen, I.I., Alhumoud, J.M. & Hannan, K.A. (2004). Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water international*, 29(4), 523-529.
- Ghare, A.D., Ingle, R.N., Porey, P.D. & Gokhale, S. S. (2010). Block ramp design for efficient energy dissipation. *Journal of Energy Engineering*, 136(1), 1-5.
- Hong, Y.M., Huang, H.S. & Wan, S. (2010). Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 125-129.
- Kabiri-Samani, A.R., Bakhshian, E. & Chamani, M.R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- Koohi, A.M.S., Kashefipour, S. & Bina, M. (2011). Experimental comparison of energy dissipation on drop structures, *JWSS*, 15(56), 209-223. (In Persian)
- Liu, S.I., Chen, J.Y., Hong, Y.M., Huang, H.S. & Raikar, R.V. (2014). Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 476-486.
- Moore, W.L. (1943). Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 108(1), 1343-1360.
- Norouzi, R., Daneshfaraz, R. & Bazayar, A. (2019). The study of energy dissipation due to the use of vertical screen in the downstream of inclined drops

White, M. (1943). Discussion of "Moore (1943)".
Tran. ASCE, 108, 1361-1364.

Bureau of reclamation hydraulic laboratory report
hyd, Vol. 411.



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons
Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits
unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original
work is properly cited.