



Experimental investigation of the effect of implementing steps over chute on local scour variations downstream of a flip bucket

Amir Rajaei^{✉1}, Mohammad Hosein Omid², Mahdi Esmaili Varaki³

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. amir.rajaei@ut.ac.ir
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. momid@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran. esmaeili@guilan.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 12, 2022

Received: May. 2, 2022

Accepted: May. 8, 2022

Published online: June. 22, 2022

Keywords:

Bucket exit angle,
Energy dissipator,
Flip buckets,
Scour reduction,
Stepped spillway

ABSTRACT

One of the issues that researchers have always considered in the design of storage dams is reducing the kinetic energy of flow passing through the spillways to control the velocity, reduce the destructive energy, and scour depth downstream of spillways. Stepped chutes and flip buckets are the most common energy dissipator structures in emergency spillways at dams. Regarding the effect of scour depth at downstream of these structures on their stability and safety, in the present study, the effect of hydraulic and geometric parameters on variations of scour characteristics downstream of smooth and stepped chutes was investigated experimentally. Experiments were conducted at a hydraulic lab at the University of Guilan in 2020-2021 with a ratio of critical flow depth and step height (y_c/h) of 0.53-0.97, bucket exit angles of 15° and 30°, the ratio of tailwater and critical flow depth (h_t/y_c) ranging from 1.5-2, the ratio of height falling and step height (H_f/h) varied in the range of 2-4, and a spillway slope of 1:2 (V: H). The comparison of results demonstrated that implementing steps over a smooth chute profile reduced maximum downstream scour depth of the flip bucket by 15° and 30° exit angles in comparison with a smooth chute for the minimum relative critical flow depth by 22 and 41 percent, respectively, and for the maximum relative critical flow depth, by 14 and 20 percent, respectively. Also, with an increase in the exit angle from 15° to 30°, the maximum scour depth decreases for the minimum and maximum tailwater depths by an average of 18 and 11 percent, respectively, for a smooth chute and by an average of 19 and 17 percent, respectively, for a stepped chute. Furthermore, a regression relationship was derived for predicting the scour depth at downstream of stepped chutes with the flip bucket.

Cite this article: Rajaei, A., Omid, M. H., & Esmaili Varaki, M. (2022). Experimental investigation of the effect of implementing steps over chute on local scour variations downstream of a flip bucket. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (4), 677-699.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ایجاد پلکان بر روی تندآب بر تغییرات آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل

امیر رجائی^۱، محمدحسین امید^۲، مهدی اسمعیلی ورکی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، amir.rajaei@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، momid@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، esmaeili@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۴/۱

واژه‌های کلیدی:

پرتاب‌کننده جامی شکل،

تندآب پلکانی،

زاویه جت خروجی،

کاهش آب‌شستگی،

مستهلك کننده انرژی

یکی از موضوعاتی که در طراحی سدهای مخزنی اهمیت زیادی داشته و همواره مورد توجه محققین است، کاهش انرژی جنبشی جریان عبوری از سرریز آن‌ها به منظور کنترل سرعت، کاهش انرژی مخرب ناشی از آن و نیز کاستن از عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزها می‌باشد. تندآب‌های پلکانی و پرتاب‌کننده‌های جامی شکل متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در سرریزهای اضطراری در سدها هستند. با توجه به تأثیری که عمق آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه‌ها بر ایمنی و پایداری آن‌ها دارد، در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر تغییرات مشخصات آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه گیلان در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ برای نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله (y_c/h) در دامنه ۰/۵۳ تا ۰/۹۷، زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه پرتاب‌کننده جامی شکل، نسبت عمق پایاب به عمق بحرانی (h_f/y_c) در دامنه ۱/۵ تا ۲، نسبت ارتفاع ریزش به ارتفاع پله (H_f/h) در دامنه ۲ تا ۴ و شیب تندآب ۱:۲ انجام گردید. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با ایجاد پلکان بر روی نیمرخ تندآب، حداکثر عمق آب‌شستگی در پرتاب‌کننده جامی شکل با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به تندآب ساده برای عمق بحرانی نسبی حداقل به ترتیب به میزان ۲۲ و ۳۵ درصد و در عمق بحرانی نسبی حداکثر به ترتیب به میزان ۱۳ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه جت خروجی پرتاب‌کننده جامی شکل از ۱۵ به ۳۰ درجه، حداکثر عمق آب‌شستگی به طور متوسط برای دو عمق پایاب حداقل و حداکثر در تندآب ساده به ترتیب ۱۸ و ۱۱ درصد و برای تندآب پلکانی به ترتیب ۱۹ و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این رابطه رگرسیونی برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی برای تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل ارائه شد.

استناد: رجائی، امیر؛ امید، محمدحسین؛ و اسمعیلی ورکی، مهدی (۱۴۰۱). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ایجاد پلکان بر روی تندآب بر تغییرات آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست

پرتاب‌کننده جامی شکل. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۴)، ۶۹۹-۶۷۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

یکی از مهم ترین سازه‌های هیدرولیکی در سدها، سرریزهای آن‌ها است که وظیفه عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از بالادست به پایین دست سد را به عهده دارند (Chanson, 1994b). نوع سرریز بستگی به شرایط هیدرولیکی جریان و ویژگی‌های ژئوتکنیکی محل ساخت سد دارد که می‌تواند در شکل‌های مختلف ساخته شود (Pereira, 2020).

به دلیل اختلاف زیاد خط تراز انرژی بالادست و پایین دست تندآب سرریزها، جریان به فوق بحرانی و مقدار زیادی از انرژی پتانسیل جریان عبوری به انرژی جنبشی تبدیل و باعث آب‌شستگی در پایین دست سرریز شده و می‌تواند ایمنی سازه را به خطر بیندازد. برای کاهش انرژی جنبشی و توان فرسایش جریان و به حداقل رساندن فرسایش ناشی از انرژی بسیار زیاد آن، در پایین دست سرریزها از سازه‌های مستهلک کننده انرژی استفاده می‌شود (El-Mahdy, 2021)، (Heller et al., 2005; Shivashankara Rao, 1982; Vischer and Hager, 1995). مکانیزم استهلاك انرژی در این سازه‌ها را می‌توان در سه دسته کلی استهلاك به کمک هوا، استهلاك با پرش هیدرولیکی و استهلاك اصطکاکی، طبقه‌بندی کرد (Garg, 2006). تندآب‌های پلکانی، پرتاب کننده‌های جامی شکل و حوضچه‌های آرامش متداول ترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی در سرریزهای اضطراری هستند (Hager, 2018).

پرتاب کننده‌های جامی شکل در پایین دست تندآب و در مجرای خروجی تحتانی سد برای کاهش سرعت بالای جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند (Novák et al., 2017; Vischer and Hager, 1995; Vischer and Hager, 1998). در صورت فراهم بودن شرایط هیدرولیکی و توپوگرافی، پرتاب کننده جامی شکل گزینه مناسب تر و اقتصادی تر برای استهلاك انرژی در سدهای بلند می‌باشد (Khatsuria, 2004; Yamini et al., 2015). در مستهلک کننده‌های جامی شکل بخش زیادی از انرژی جریان به وسیله پراکنده شدن جت در هوا صورت می‌گیرد. با ورود جت جریان به حوضچه استغراق در پایاب و ایجاد آشفتنگی، فرآیند استهلاك انرژی تکمیل می‌شود (Azmathullah et al., 2006; Azmathullah et al., 2005; Heller et al., 2005). پرتاب کننده جامی شکل را نمی‌توان به تنهایی به عنوان سازه مستهلک کننده انرژی در نظر گرفت بلکه قسمتی از یک سیستم کل برای استهلاك انرژی می‌باشد (Alireza et al., 2008; Fraser, 2016; Omidvarinia and Jahromi, 2013). مهمترین پارامترهای مؤثر در طراحی پرتاب کننده جامی شکل، شعاع، ارتفاع لبه انتهایی و زاویه جت خروجی از آن می‌باشند (Khatsuria, 2004). Rajan and Rao (1980) و Mason (1993) برای طراحی پرتاب کننده جامی شکل توصیه کردند که حداقل شعاع پرتاب کننده جامی شکل بین ۳ تا ۵ برابر عمق جریان ورودی به آن، زاویه جت خروجی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه، زاویه گسترش جت در هوا در محدوده ۵-۱۰ درجه و رقوم آب در پایاب باید در زیر رقوم لبه انتهایی باکت قرار گیرد.

عوامل مختلفی بر ابعاد حفرة آب‌شستگی ایجاد شده در اثر جت‌های ریزشی در پایین دست پرتاب کننده جامی شکل وجود دارند که می‌توان به عمق پایاب، سرعت جریان، ارتفاع ریزش، سطح مقطع و زاویه برخورد جت به سطح بستر رسوبی، شعاع و زاویه جت خروجی پرتاب کننده جامی شکل و قطر ذرات رسوبی بستر اشاره کرد. Strelchuk (1969)، Amanian (1993)، Juon and Hager (2000) و Alias et al. (2008) با مطالعه آزمایشگاهی در زمینه آب‌شستگی پایین دست پرتاب کننده جامی شکل به این نتیجه رسیدند که دبی و زاویه جت خروجی تأثیر زیادی بر حداکثر عمق آب‌شستگی دارد و رابطه‌های بی‌بعدی را برای تخمین عمق آب‌شستگی برای زاویه‌های جت خروجی ۳۰ و ۴۵ درجه ارائه کردند. Eder et al. (2019) با مطالعه آزمایشگاهی آب‌شستگی در پایین دست پرتاب کننده‌های جامی شکل بیان داشتند که آب‌شستگی به ارتفاع تلماسه و اندازه قطر ذره بستگی دارد. آن‌ها با تحلیل داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای بی بعد برای محاسبه حداکثر عمق آب‌شستگی ارائه کردند. Khalifehei et al. (2021) با مطالعه آزمایشگاهی آب‌شستگی در پایین دست پرتاب کننده جامی شکل بیان داشتند که با دو برابر شدن دبی، حداکثر عمق آب‌شستگی به میزان ۷۰ درصد و فاصله محل وقوع آن از محل پرتابه به میزان ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با ۱/۵ برابر شدن عدد فرود ذره، حداکثر عمق آب‌شستگی ۲۶ درصد افزایش می‌یابد.

یکی از روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌ی مستهلک کننده‌ی انرژی پایین دست، بکار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تندآب می‌باشد. از جمله‌ی این روش‌ها که تاکنون استفاده شده است پلکانی کردن سرریز است (Chanson, 2001). در دو دهه اخیر، به دلیل پیشرفت‌های فنی در زمینه‌ی ساخت سدهای بتن غلطکی (RCC) و استهلاك انرژی قابل توجه در طول تندآب، سرریزهای پلکانی مورد توجه خاص قرار گرفته‌اند (Boes and Hager, 2003b; Khatsuria, 2004). سرریزهای پلکانی به دلیل کاهش سرعت جریان و قدرت فرسایشی آن باعث کاهش ابعاد و هزینه ساخت سازه‌های مستهلک کننده انرژی پایین دست می‌شوند (Boes and Hager, 2003a). استفاده از این سرریزها بیشتر در سدهای خاکی معمول می‌باشد و بزرگترین سیلاب محتمل را معمولاً بطور ایمن از تاج خود عبور می‌دهد. از مزایای این سرریزها می‌توان به هزینه نسبتاً کم، آسان بودن در اجراء، کاهش احتمال خوردگی، کاهش ابعاد حوضچه آرامش پایین دست و استهلاك چشمگیر انرژی در طول سرریز اشاره کرد (Peyras et al., 1992). Rajaratnam (1990) و Chanson (1994c) با بررسی هیدرولیک جریان در تندآب پلکانی، رژیم جریان عبوری از

تندآب پلکانی را به صورت ریزشی^۱، انتقالی^۲ و سطحی^۳ طبقه‌بندی کردند. در دبی‌های پایین جریان به صورت ریزشی می‌باشد، با افزایش دبی در دامنه دبی متوسط، جریان انتقالی شده و در دبی‌های بالا جریان سطحی مشاهده می‌شود.

Boes and Hager (2003a) رژیم جریان سطحی عبوری در تندآب پلکانی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان داد که رژیم جریان تابعی از عمق بحرانی، زاویه تندآب و ارتفاع پلکان می‌باشد. این موضوع توسط Ghaderi *et al.* (2020) و El-Mahdy (2021) در مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر روی تغییرات آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی نیز گزارش شده است. Kote and Nangare (2019) استهلاک انرژی در پایین‌دست سرریز پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استهلاک انرژی در سرریز پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به سرریز اوجی شکل حدود ۸۴ درصد می‌باشد. همچنین سرریز پلکانی نیاز کمتری به طول سازه مستهلک‌کننده انرژی در مقایسه با سرریز اوجی شکل دارد.

پارامترهای مختلفی بر آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی تأثیر گذارند که مهمترین آن‌ها هندسه پلکان، زاویه تندآب، شیب پلکان، عمق پایاب و سرعت جریان می‌باشند. بررسی آزمایشگاهی (Emiroglu and Tuna (2011)، Tuna (2012) و Tuna and Emiroglu (2013) در مورد تأثیر عمق پایاب، زاویه تندآب و هندسه پلکان بر روی آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست تندآب پلکانی نشان داد که عمق پایاب تأثیر زیادی بر روی عمق حداکثر و مساحت آب‌شستگی دارد. همچنین، حداکثر عمق آب‌شستگی به هندسه پلکان، اندازه ذرات رسوبی، زاویه تندآب و دبی جریان بستگی داشته و با افزایش دبی، ارتفاع پله و زاویه تندآب، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش زاویه تندآب از ۳۰ به ۵۰ درجه، حداکثر عمق آب‌شستگی به طور متوسط ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. Habib *et al.* (2016) و Aminpour and Farhoudi (2017) به بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی همراه با حوضچه آرامش پرداختند. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی به میزان ۳۳ درصد کاهش می‌یابد.

Sá Machado *et al.* (2020) آب‌شستگی پایین‌دست سرریز پلکانی همراه با مستهلک‌کننده جامی شکل را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی برای زوایای جت خروجی ۲۰ و ۲۵ درجه، دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۱/۷ نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی در هر دو زاویه یکسان است ولی در دبی ۰/۹ لیتر بر ثانیه، حداکثر عمق آب‌شستگی در زاویه ۲۰ درجه بیشتر از ۲۵ درجه می‌باشد. مقایسه نتایج نشان داد که در دبی پایین‌تر پخش هیدرولیکی در داخل باکت اتفاق افتاده و جریان مستغرق حاصل می‌شود اما در دبی بالاتر (۰/۹ لیتر بر ثانیه) با افزایش زاویه جت خروجی، پراکندگی توده جریان در هوا بیشتر شده و استهلاک بیشتری از انرژی صورت می‌گیرد.

یکی از پارامترهای تأثیر گذار بر ابعاد چاله آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل، سرعت جت ریزشی آن می‌باشد. در صورتی که بتوان با تغییر هندسه تندآب در این نوع از سازه‌ها، انرژی مخرب جریان ورودی به آن را کاهش داد، می‌توان انتظار داشت که مقدار عمق آب‌شستگی کاهش یابد. یکی از راهکارهای اجرایی در این خصوص، پلکانی نمودن نیمرخ تندآب است. از آنجایی که تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل صورت گرفته است، در تحقیق حاضر ابعاد چاله آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب ساده و پلکانی همراه با سازه مستهلک‌کننده جامی شکل با زاویه‌های مختلف جت خروجی در شرایط مختلف ارتفاع ریزش و عمق پایاب مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب با و بدون پلکان همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل متأثر از عوامل متعددی است که هر کدام تأثیری خاص و متفاوت بر روند آب‌شستگی داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار آن می‌گردد. شکل (۱) نمایی از آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی در ترکیب با مستهلک‌کننده جامی شکل و مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر حداکثر عمق آب‌شستگی در جت ریزشی پایین‌دست تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل را نشان می‌دهد که می‌توان در قالب رابطه (۱) بیان کرد:

$$f_1(U_0, d_s, d_{st}, U_c, \gamma_0, \gamma_e, N, h, l, h_0, h_t, H, \rho, \rho_s, g, u, \sigma, d, H_F, \alpha, R, \theta, l_s, t, t_e) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

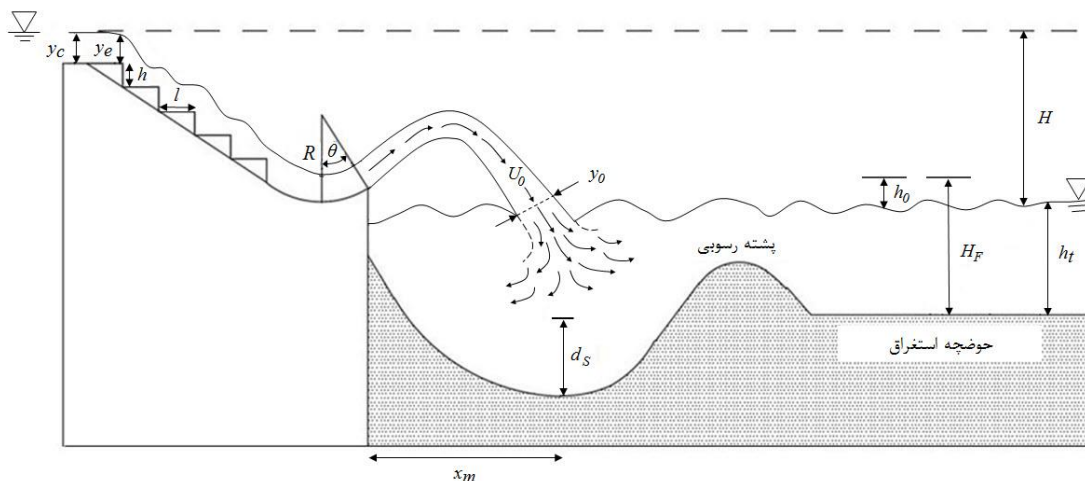
در این رابطه، U_0 : سرعت جت ورودی، d_s : حداکثر عمق آب‌شستگی، d_{st} : عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی، U_c : سرعت بحرانی، γ_0 : ضخامت

۱. Nappe flow

۲. Transition flow

۳. Skimming flow

جت ورودی، y_e : عمق آب در بالای لبه سرریز، N : تعداد پلکان، h : ارتفاع پلکان، l : طول پلکان، h_0 : اختلاف ارتفاع لبه پرتاب کننده جامی شکل و سطح تراز جریان در پایاب، h_t : عمق پایاب، H : اختلاف ارتفاع سطح آب بالادست و پایین دست، ρ : جرم مخصوص آب، ρ_s : جرم مخصوص ذرات، g : شتاب ثقل، v : لزجت سینماتیکی آب، σ : کشش سطحی آب، d : قطر ذرات، H_F : ارتفاع ریزش، α : زاویه تندآب، R : شعاع پرتاب کننده جامی شکل، θ : زاویه جت خروجی از پرتاب کننده جامی شکل، x_m : فاصله حداکثر عمق آب شستگی از انتهای لبه پرتاب کننده جامی شکل، t : زمان از شروع آب شستگی، t_e : زمان تعادل آب شستگی می باشد.



شکل ۱. نمایی از آب شستگی در پایین دست تندآب پلکانی در ترکیب با مستهلک کننده جامی شکل

با بکارگیری روش باکینگهام (π) در تحلیل ابعادی، از رابطه (۱) رابطه بی بعد (۲) حاصل می گردد:

$$f_2(F_0, F', \frac{d_s}{H_F}, \frac{d_{st}}{H_F}, \frac{l_s}{H_F}, \frac{U_c}{U_0}, \frac{y_e}{H_F}, \frac{y_0}{H_F}, \frac{h}{H_F}, \frac{l}{H_F}, \frac{h_0}{H_F}, \frac{h_t}{H_F}, \frac{H}{H_F}, \frac{d}{H_F}, \frac{t}{t_e}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{R}{H_F}, N, \theta, \alpha, Re, We) = 0 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در آب شستگی پارامترهای ρ و ρ_s به صورت ترکیبی به شکل $\Delta = G_s - I$ بکار برده می شود که در آن $G_s = \rho_s / \rho$ می باشد (Dey and Raikar, 2007). F_0 و F' عدد فرود ذره بوده و به ترتیب به صورت $F_0 = \frac{U_0}{(\Delta g d)^{0.5}}$ و $F' = \frac{U_c}{(\Delta g d)^{0.5}}$ تعریف می گردد. در تحقیق حاضر به دلیل در نظر گرفتن همزمان اثر ارتفاع ریزش و جریان نزدیک شونده، از پارامتر η به صورت $\eta = F_0 \times F'$ استفاده شد.

از آنجا که در تمام آزمایش ها جریان طبق معیار (Chanson et al. (2002) و Frizell (2006) ($Re > 10^5$) در محدوده آشفته قرار داشت، از تأثیر عدد رینولدز در آزمایش ها صرف نظر گردید. در تندآب پلکانی به دلیل آشفتگی زیاد جریان و تشکیل جریان دو فازی آب- هوا باید اثر کشش سطحی آب را مورد توجه قرار داد. در تحقیق حاضر عدد وبر طبق معیار (Boes and Hager (2003b) ($We > 100$) در تمام آزمایش ها از مقدار ۱۰۰ بیشتر بود از این رو از تأثیر این پارامتر نیز صرف نظر شد. با توجه به اینکه شیب تندآب، شعاع پرتاب کننده جامی شکل که طبق معیار (Rao (1978 طراحی شد و تعداد پلکان در کلیه آزمایش ها ثابت و به ترتیب ۲۶/۵ (۱:۲) درجه، ۳۶/۵ سانتی متر و ۱۸ بود، لذا این سه پارامتر نیز ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) خلاصه می شود:

$$\frac{d_s}{H_F}, \frac{d_{st}}{H_F} = f_3(\eta, \frac{U_c}{U_0}, \frac{y_0}{H_F}, \frac{y_e}{H_F}, \frac{h}{H_F}, \frac{l}{H_F}, \frac{h_0}{H_F}, \frac{h_t}{H_F}, \frac{H}{H_F}, \frac{d}{H_F}, \frac{t}{t_e}, \frac{l_s}{H_F}, \theta) \quad \text{(رابطه ۳)}$$

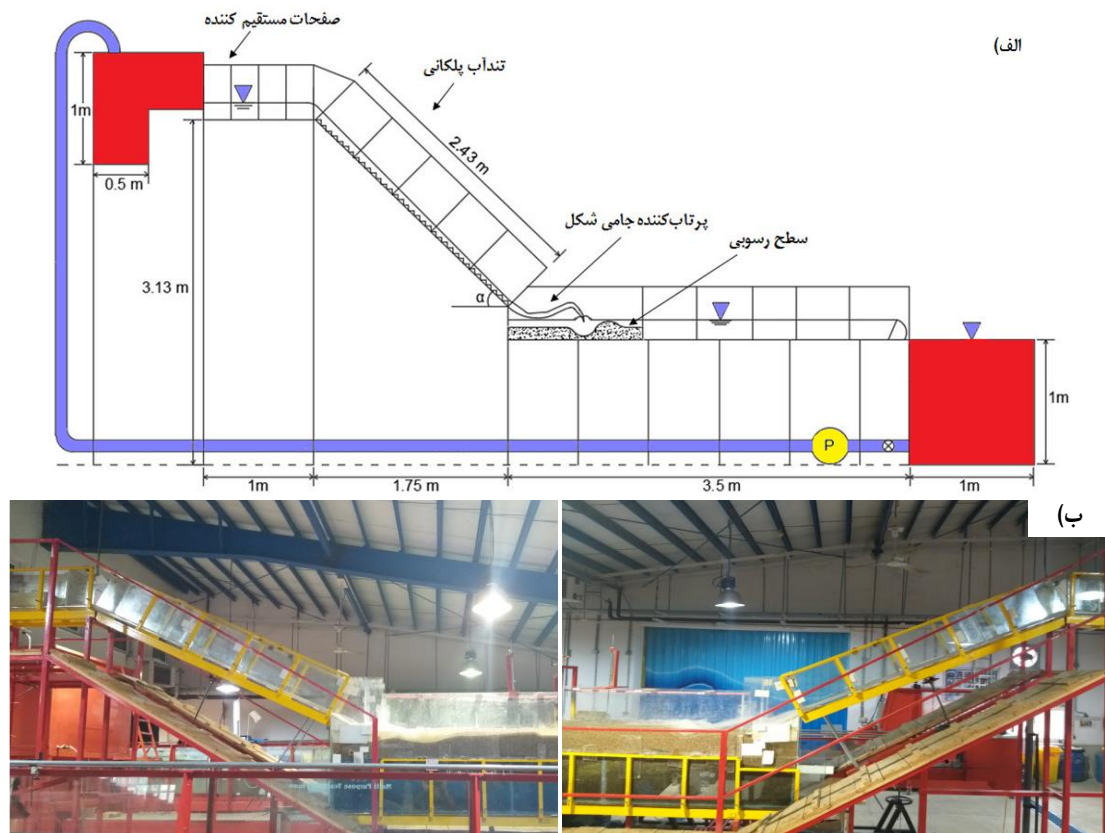
در این تحقیق پارامترهای بدون بعد رابطه (۳)، به عنوان یک رابطه پایه ای برای انجام آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفته است.

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش ها

آزمایش های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل های فیزیکی هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و در فلومی با سیستم بازچرخانی شامل دو بخش تندآب به طول ۲/۴ متر، عرض ۰/۳ متر و عمق ۰/۵ متر که دارای دیواره ها و کف از جنس شیشه و بخش حوضچه استغراق به طول ۳/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و عمق ۱/۵ متر که دارای دیواره ها و کف از جنس پلکسی گلاس بود، انجام شد. در شکل (۲) طرح کلی و تصاویری از فلوم آزمایشگاهی نشان داده شده است.

جریان آب در سیستم بازچرخانی از مخزن پایین دست به مخزن بالادست فلوم پمپاژ شده و پس از عبور از یک حوضچه آرام کننده جریان وارد فلوم می گردد. به منظور کاهش تلاطم جریان ورودی به فلوم و جلوگیری از تشکیل جریان های عرضی در ورودی آن، از صفحات مستقیم کننده جریان در ابتدای فلوم استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در حوضچه آرامش پایین دست تندآب، از دریچه ای که در انتهای آن نصب شده بود، استفاده شد. در انتها با ریزش جریان به مخزن جمع آوری پایین دست، آب مجدداً توسط لوله های برگشتی، به مخزن ورودی منتقل می گردید. برای تأمین جریان،

از پمپ گریز از مرکز که قادر بود دبی تا ۲۰ لیتر بر ثانیه را تأمین کند، استفاده شد. برای تنظیم دقیق دبی از یک دستگاه کنترل کننده دور موتور برای تنظیم دور الکتروموتور پمپ استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی، از دبی‌سنج التراسونیک با دقت ± 0.01 لیتر بر ثانیه استفاده شد. با توجه به تحقیقات (Rajaratnam (1990), Chatila and Jurdi (2004), Patil and Hailkar (2019), Sá Machado *et al.* (2020) و (Krisnayanti *et al.* (2019)، برای بررسی اثر پلکان بر روی تندآب بر تغییرات عمق آب‌شستگی، در تحقیق حاضر ۱۸ پله به عرض 0.3 متر، شیب $1:2$ با ارتفاع 0.05 متر و طول پلکان 0.1 متر از جنس چوب-پلاستیک ساخته و نصب گردید. تحقیقات مختلف نشان داده که مناسب‌ترین زاویه جت خروجی پرتاب‌کننده جامی شکل در دامنه ۱۰ تا ۴۵ درجه است. به عنوان نمونه، (Strelchuk (1969) با مطالعه آزمایشگاهی آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل، زاویه جت خروجی را بین ۲۰ تا ۴۵ درجه پیشنهاد نمود. در مطالعه آزمایشگاهی (Lenau and Cassidy (1969) این زاویه بین ۲۰ تا ۳۰ درجه پیشنهاد شد. در پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر پارامتر مذکور بر تغییرات عمق آب‌شستگی، زاویه‌های ۱۵ و ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲. الف) طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی، ب) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی

طراحی شعاع پرتاب‌کننده جامی شکل از اهمیت خاصی برخوردار است چراکه انتخاب شعاع انحنای کمتر از یک حد مشخص، باعث لرزش سازه و تلاطم سطح آب شده و چنانچه بزرگتر از حد مشخصی باشد، باعث طولانی شدن سازه و افزایش ارتفاع لبه انتهایی و در نتیجه پرتاب نامناسب جریان در دبی‌های کم می‌شود (Hager, 1992). بررسی محققان مختلف نشان داده است که شعاع جام بر اساس عمق جریان فوق بحرانی ورودی در پرتاب‌کننده جامی شکل محاسبه می‌شود. مقادیر پیشنهادی توسط محققان از $3y_1$ تا $7y_1$ می‌باشد، که در آن y_1 عمق ورودی به پرتاب‌کننده جامی شکل است. در این تحقیق، معادلات (Varshney and Bajaj (1970) و Rao (1978) مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس شعاع انحنای $36/5$ سانتی‌متر برای پرتاب‌کننده جامی شکل بر اساس رابطه Rao (1978) انتخاب شد. معادلات تعیین شعاع پرتاب‌کننده جامی شکل (Rao (1978) به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) می‌باشد که در آن: F_r عدد فرود و y_1 عمق جریان ورودی به جام می‌باشد.

$$\frac{R}{y_1} = 11.534F_r^{0.5} - 9.113F_r^{0.25} \quad 3 < F_r < 5.5 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\frac{R}{y_1} = 4.037(F_r - 3.7627) \quad 5.5 < F_r < 10 \quad \text{رابطه (۵)}$$

قطر ذرات رسوبی بستر رودخانه یکی از پارامترهای اثرگذار بر مقدار آب‌شستگی است به طوری که در یک زمان مشخص با کاهش اندازه ذرات، مقدار عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد (Ali *et al.*, 1991). تحقیقات (Raudkivi and Ettema (1983) نشان داد که برای جلوگیری از تشکیل

شکنج در سرعت‌های نزدیک به آستانه حرکت، قطر ذرات رسوبی باید از 0.7 میلی‌متر بیشتر باشد. به عبارت دیگر اگر قطر ذرات از 0.7 میلی‌متر کمتر باشد، به دلیل آشفته‌گی جریان در نزدیک بستر، هنگامی که سرعت برشی در بستر به حدود 0.6 سرعت برشی بحرانی دانه‌ها برسد، ذرات بستر در بالادست شروع به حرکت کرده و پشته‌های کوچکی تشکیل می‌دهند. این پشته‌ها تنش برشی موضعی را افزایش داده و جریان آب از حالت زلال خارج می‌شود. در مطالعه آزمایشگاهی آب‌شستگی موضعی پایین‌دست جت‌های ریزشی برای بستر فرسایشی، (Dey and Raikar (2007) از قطر یکنواخت به اندازه $2/6$ میلی‌متر، (Scurlock et al. (2012) از سه قطر ذره 5 ، $9/8$ و 15 میلی‌متر و (Pagliara et al. (2014) در پایین‌دست سرریزهای w شکل از قطر یکنواخت به اندازه $1/60$ میلی‌متر استفاده کرده‌اند. در این تحقیق به منظور تأمین ذرات رسوبی بستر فرسایشی، ماسه معدنی در دامنه قطرهای $4-0.5$ میلی‌متر تهیه و بعد از الک کردن، قطر یکنواخت به اندازه $2/36$ میلی‌متر بدست آمد و در بستر رسوبی به طول 2 متر، عرض 0.3 متر و به ارتفاع 0.8 متر در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل قرار داده شد.

پدیده آب‌شستگی یک فرآیند زمان بر است و گرچه بدلیل تداوم فرسایش در حفره، هر چند اندک و نامحسوس، نمی‌توان به‌صورت مطلق انتهایی برای رسیدن به زمان تعادل بدست آورد، لیکن تعیین زمانی برای تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. Rajaratnam and Macdougall (1983) با بررسی آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست جت‌های ریزشی اعلام کردند که بعد از گذشت 30 دقیقه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در فرسایش بستر رخ نمی‌دهد. زمان تعادل آب‌شستگی توسط (Pagliara and Palermo (2013) 40 دقیقه، در تحقیقات (Jüstrich et al. (2016) 90 دقیقه، در مطالعه (Scurlock et al. (2012) 12 ساعت و در مطالعه (Bhuiyan et al. (2007) 2 تا 4 روز در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر به منظور تعیین زمان تعادل، در زمان‌های مختلف از چاله آب‌شستگی عکس‌برداری بعمل آمد. مقایسه نتایج نشان داد که بعد از گذشت 6 ساعت از شروع آزمایش، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ابعاد چاله آب‌شستگی رخ نمی‌دهد. لذا در کلیه آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها برای مدت یاد شده صورت گرفت.

برای انجام هر آزمایش ابتدا سطح رسوبی حوضچه استخرق در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل با استفاده از تراز و متر لیزری مسطح می‌گردید. سپس با توجه به دبی جریان، تنظیمات لازم برای دور موتور و فرکانس مربوطه به عمل می‌آمد. در ادامه جریان به تدریج وارد فلوم آزمایشگاهی شده و عمق پایاب موردنظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار و سپس دبی موردنظر تنظیم می‌گردید. در کلیه آزمایش‌ها توسعه زمانی نیمرخ آب‌شستگی به مدت 6 ساعت در گام‌های زمانی مختلف به وسیله یک دستگاه دوربین دیجیتال، عکس‌برداری گردید و سپس با استفاده از نرم افزار Grapher9، نیمرخ زمانی آب‌شستگی استخراج و در انتهای هر آزمایش نیز نیمرخ نهایی آب‌شستگی با استفاده از عمق‌سنج لیزری با دقت ± 1 میلی‌متر اندازه‌گیری شد (Shan and Toth, 2018). در این تحقیق به منظور بررسی اثر حضور پلکان بر روی تندآب و زاویه جت خروجی بر تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل، 64 آزمایش انجام شد که دامنه متغیرهای مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

متغیرها	واحد	حداقل	حداکثر
دبی واحد عرض (q)	لیتر بر ثانیه بر متر	۱۳/۳	۳۳/۴
نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله (y_0/h)	بی بعد	۰/۵۳	۰/۹۷
عمق پایاب (h_1)	متر	۰/۰۵	۰/۱۵
ارتفاع ریزش (H_f)	متر	۰/۱	۰/۲
زاویه جت خروجی (θ)	درجه	۱۵	۳۰
η	بی بعد	۱۲/۲	۱۶/۹

نتایج و بحث

الف) تأثیر رژیم جریان عبوری از تندآب بر ویژگی‌های جت خروجی

در تحقیق حاضر برای تفکیک انواع رژیم‌های جریان عبوری از تندآب پلکانی از معیارهای (Chanson (2002) و (Ohtsu et al. (2001) استفاده شد. روابط مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول (۲) نشان داده شده است. در جدول (۳) و شکل (۳) نوع رژیم‌های جریان عبوری بر روی تندآب پلکانی با شیب $1:2$ برای محدوده داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، رژیم جریان عبوری در برگیرنده طیف کامل رژیم‌های امکان وقوع در سرریزهای پلکانی می‌باشد. بر اساس معیارهای ارائه شده برای طبقه‌بندی نوع رژیم جریان عبوری از تندآب پلکانی با شیب $1:2$ ، رژیم جریان ریزشی در محدوده $y_0/h < 0.69$ ، رژیم جریان انتقالی در محدوده $0.69 < y_0/h < 0.96$ و رژیم جریان سطحی در $y_0/h > 0.96$ رخ می‌دهد. در شکل (۴) تصاویری از رژیم‌های جریان عبوری از

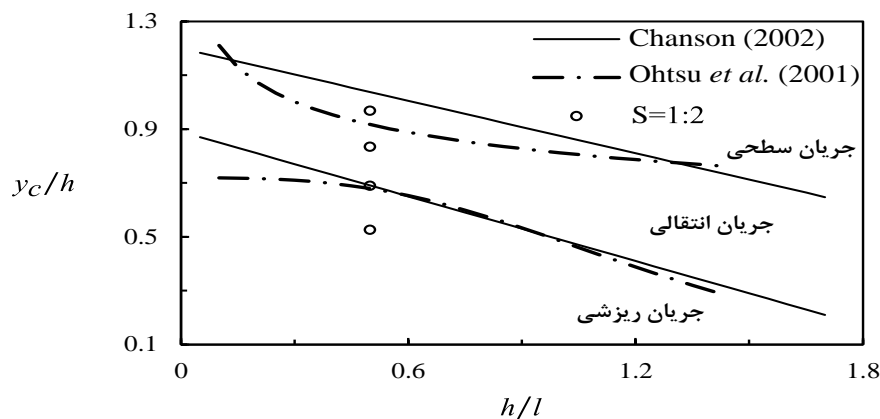
تندآب پلکانی در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

جدول ۲. معادلات تفکیک رژیم‌های جریان عبوری از تندآب پلکانی مورد استفاده در تحقیق حاضر

نام محقق	معادله	محدوده تغییرات (h/l)	تفکیک رژیم جریان
Ohtsu et al. (2001)	$\frac{h}{y_c} = 0.57 \left(\frac{h}{l}\right)^3 + 1.3$	$0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43$	مرز بین جریان ریزشی و انتقالی
	$\frac{h}{y_c} = 1.16 \left(\frac{h}{l}\right)^{0.165}$	$0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43$	مرز بین جریان انتقالی و سطحی
Chanson (2002)	$\frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \frac{h}{l}$	$0.05 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7$	مرز بین جریان ریزشی و انتقالی
	$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \frac{h}{l}$	$0.05 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7$	مرز بین جریان انتقالی و سطحی

جدول ۳. طبقه بندی رژیم‌های جریان عبوری از تندآب پلکانی در تحقیق حاضر

نوع رژیم جریان	$\frac{y_c}{h}$	شیب پلکان ($S=h/l$)	طول پله (متر)	ارتفاع پله (متر)	عمق بحرانی (متر) $y_c = (q^2/g)^{1/3}$
ریزشی	۰/۵۳	۰/۵	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۲۶
انتقالی	۰/۶۹	۰/۵	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۳۴
انتقالی	۰/۸۳	۰/۵	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۴۲
سطحی	۰/۹۷	۰/۵	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۴۸



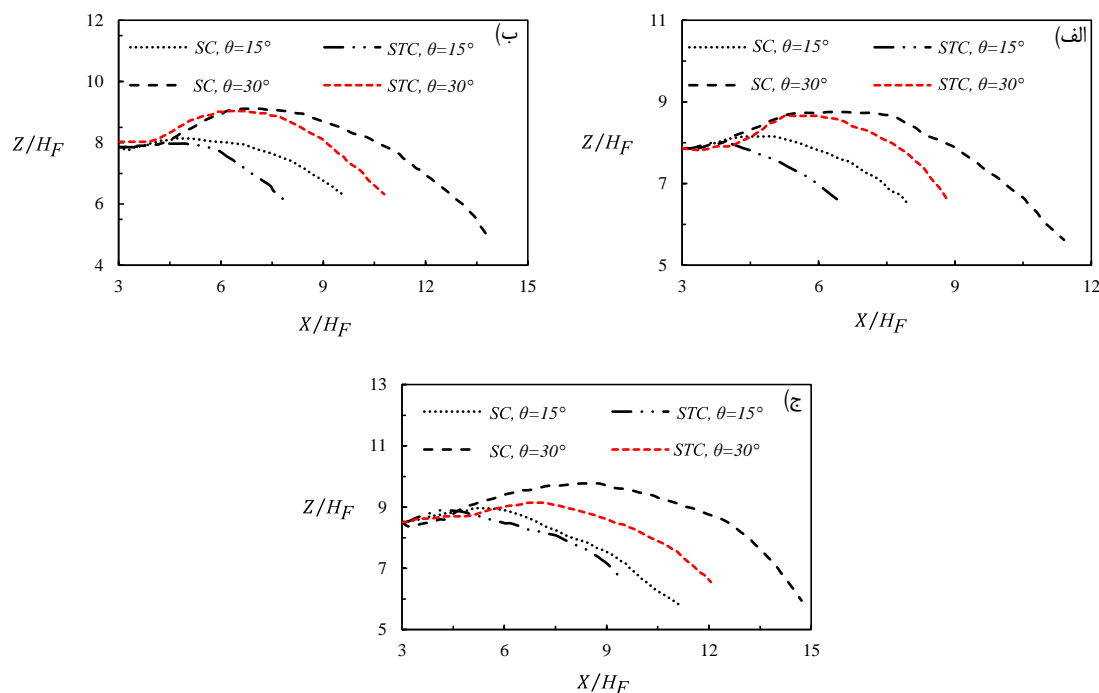
شکل ۳. رژیم‌های جریان عبوری بر روی تندآب پلکانی

مشاهدات و بررسی نتایج حاصله از نیمرخ جت‌های خروجی نشان می‌دهد که پلکان، رژیم جریان و زاویه جت خروجی پرتاب‌کننده جامی شکل از مهمترین پارامترهای اثرگذار بر طول ناحیه جت پرتابی می‌باشند. در نمودارهای شکل (۵) تأثیر پارامترهای مذکور بر نیمرخ جت‌های خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل نشان داده شده است. در این نمودارها X فاصله از انتهای لبه پرتاب‌کننده جامی شکل می‌باشد. مقایسه مقادیر طول جت پرتابی برای تندآب‌های ساده و پلکانی نشان می‌دهد که با ایجاد پلکان با شیب ۱:۲ بر روی نیمرخ تندآب، طول نسبی جت پرتابی (X/H_F) برای $y_c/h=0.53$ و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه از پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به تندآب ساده، به ترتیب ۲۴ و ۱۹ درصد، برای $y_c/h=0.83$ به ترتیب ۲۱ و ۱۸ درصد و برای $y_c/h=0.97$ به ترتیب ۱۷ و ۱۵ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۴. رژیم‌های جریان عبوری بر روی تندآب پلکانی: الف) جریان ریزشی ($y_c/h=0.53$)، ب) جریان انتقالی ($y_c/h=0.69$) و ج) جریان سطحی ($y_c/h=0.97$)

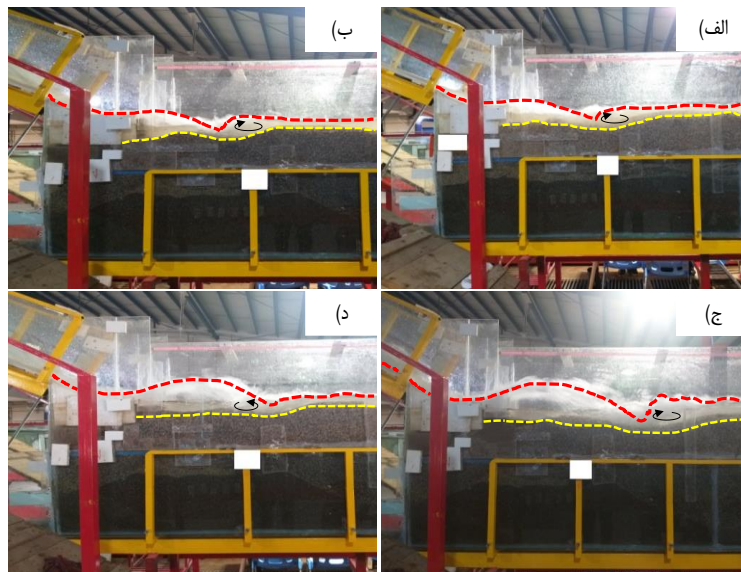
مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که جریان عبوری از روی پلکان به دلیل افت و خیزهای متعدد و متوالی و همچنین تشکیل جریان‌های گردابه‌ای متعدد باعث تداخل بیشتر تیغه‌های ریزشی در طول تندآب شده و مقدار زیادی از انرژی جریان را مستهلک می‌کند. از همین رو ایجاد پلکان بر روی نیمرخ تندآب منجر به کاهش طول جت پرتابی از پرتاب‌کننده جامی شکل در کلیه شرایط هیدرولیکی می‌شود. در شکل (۶) تصاویری از نیمرخ جت‌های خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل در پایین‌دست تندآب ساده (SC) و پلکانی (STC) نشان داده شده است.



شکل ۵. مقایسه نیمرخ جت‌های خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل در تندآب‌های ساده و پلکانی: الف) $y_c/h=0.53$ ، ب) $y_c/h=0.83$ و ج) $y_c/h=0.97$

همان‌طور که اشاره شد، الگوی ریزش جریان از روی پلکان‌ها از نظر یکنواختی در عرض و نوع ریزش بر طول جت پرتابی اثرگذار می‌باشد. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی طول جت پرتابی نشان می‌دهد که با تغییر رژیم جریان از ریزشی به انتقالی در محدوده $0.69 < y_c/h < 0.96$ ، مقدار پارامتر طول نسبی جت پرتابی (X/H_F) در تندآب پلکانی برای زاویه جت خروجی 15° درجه از $6/5$ به 8 و برای 30° درجه از $8/6$ به 11 تغییر می‌یابد. همچنین تغییر پارامتر مذکور در رژیم جریان سطحی ($y_c/h > 0.96$) برای زاویه‌های جت خروجی 15° و 30° درجه به ترتیب $9/5$ و 12 حاصل شد. به عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که تغییر رژیم جریان از ریزشی به سطحی برای عمق‌های بحرانی نسبی $0/53$ تا $0/97$ و شیب تندآب پلکانی $1:2$ ، مقدار طول جت پرتابی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل با زاویه‌های جت خروجی 15° و 30° درجه را به طور متوسط به ترتیب 21 و 19 درصد افزایش می‌دهد. بنابراین، با کاهش استهلاک انرژی جریان در رژیم جریان سطحی در طول تندآب پلکانی، طول جت پرتابی نسبت به رژیم‌های ریزشی و انتقالی به دلیل افزایش مقدار انرژی جنبشی باقیمانده در پای تندآب، افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.

مقایسه نتایج به دست آمده برای مقادیر طول جت پرتابی نشان می‌دهد که با تغییر زاویه جت خروجی از 15° به 30° درجه، مقدار طول جت پرتابی در پایین‌دست تندآب ساده و پلکانی برای $y_c/h=0.53$ به ترتیب 50 و 38 درصد، برای $y_c/h=0.83$ به ترتیب 43 و 37 درصد و برای $y_c/h=0.97$ به ترتیب 31 و 26 درصد افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که با افزایش زاویه جت خروجی از 15° به 30° درجه برای عمق بحرانی نسبی در دامنه $0/53$ تا $0/97$ ، مقدار طول جت پرتابی در تندآب‌های ساده و پلکانی به طور متوسط به ترتیب به میزان 41 و 34 درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۶. تصاویر نیمرخ جت‌های خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی:
 (الف) SC ، $y_c/h=0.53$ و $\theta=15^\circ$ (ب) STC ، $y_c/h=0.53$ و $\theta=15^\circ$ (ج) SC ، $y_c/h=0.97$ و $\theta=30^\circ$ (د) STC ، $y_c/h=0.97$ و $\theta=30^\circ$

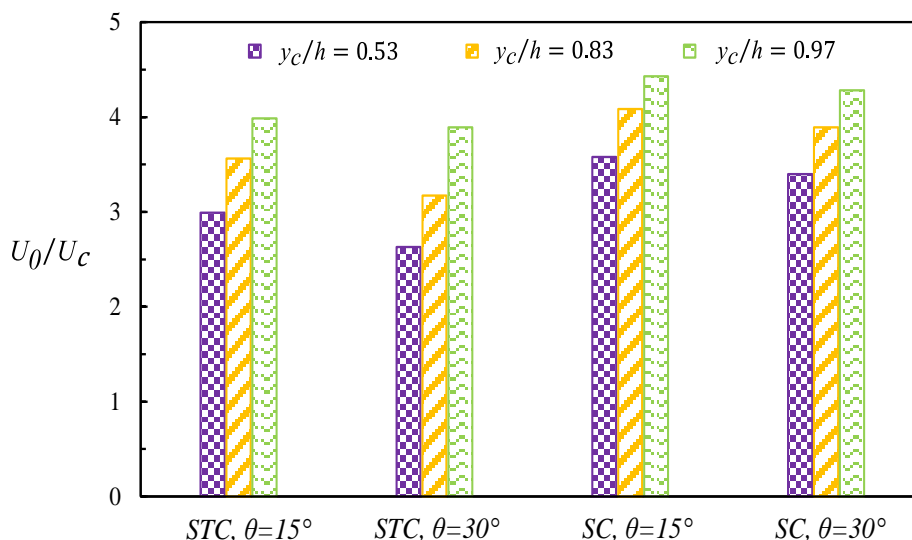
ارتفاع اوج و طول جت پرتابی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل تابعی از سرعت جت در لبه آن است. در تحقیق حاضر به منظور محاسبه مقادیر سرعت جت در لبه پرتاب‌کننده جامی شکل، از رابطه (۶) که بر اساس تئوری حرکت پرتابی^۱ توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا برای برآورد طول جت پرتابی ارائه شده است (Khatsuria, 2004)، استفاده شد.

$$X = \frac{v_j \cos \theta}{g} \left(v_j \sin \theta + \sqrt{(v_j \sin \theta)^2 + 2gy} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه، X : طول جت پرتابی، v_j : سرعت جت در لبه پرتاب‌کننده جامی شکل، θ : زاویه لبه پرتاب‌کننده جامی شکل، g : شتاب ثقل و y : اختلاف ارتفاع لبه پرتاب‌کننده جامی شکل و سطح تراز جریان در پایاب می‌باشد.

تجزیه و تحلیل نتایج برای سرعت جت در لبه پرتاب‌کننده جامی شکل و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه نشان می‌دهد که با ایجاد پلکان با شیب ۱:۲ بر روی نیمرخ تندآب، سرعت جت در لبه پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به تندآب ساده برای $y_c/h=0.53$ و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه به ترتیب ۲۳ و ۱۶ درصد، برای $y_c/h=0.83$ به ترتیب ۲۵ و ۱۳ درصد و برای $y_c/h=0.97$ به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، با ایجاد پلکان و افزایش استهلاک انرژی در طول سازه که در نتیجه آن سرعت جریان ورودی به پرتاب‌کننده جامی شکل کاهش می‌یابد، طول جت پرتابی نیز کاهش محسوس پیدا می‌کند.

نتایج حاصل از مقایسه سرعت جریان در پایین‌دست تندآب با و بدون پلکان برای عمق‌های بحرانی نسبی 0.53 تا 0.97 و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه پرتاب‌کننده جامی شکل در نمودارهای شکل (۷) نشان داده شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده برای مقادیر سرعت جریان در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی نشان می‌دهد که با ایجاد پلکان با شیب ۱:۲ بر روی نیمرخ تندآب، مقدار سرعت نسبی جریان (U_0/U_c) برای $y_c/h=0.53$ و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه از پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به تندآب ساده، به ترتیب ۱۷ و ۲۳ درصد، برای $y_c/h=0.83$ به ترتیب ۱۳ و ۱۹ درصد و برای $y_c/h=0.97$ به ترتیب ۱۰ و ۹ درصد کاهش می‌یابد. به عنوان جمع‌بندی می‌توان بیان داشت که مقدار سرعت جریان در پایین‌دست تندآب پلکانی برای زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه از پرتاب‌کننده جامی شکل و عمق‌های بحرانی نسبی 0.53 تا 0.97 نسبت به تندآب ساده به طور متوسط به ترتیب به میزان ۱۴ و ۱۷ درصد کم می‌شود. بنابراین، تندآب پلکانی با شیب ۱:۲ باعث شده تا مومنتم جریان ورودی به سازه مستهلک‌کننده جامی شکل کاهش یابد و جریان با حداقل انرژی جنبشی به هوا پرتاب شود. به همین رو سرعت جریان در کلیه شرایط هیدرولیکی و هندسه پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به تندآب ساده کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.



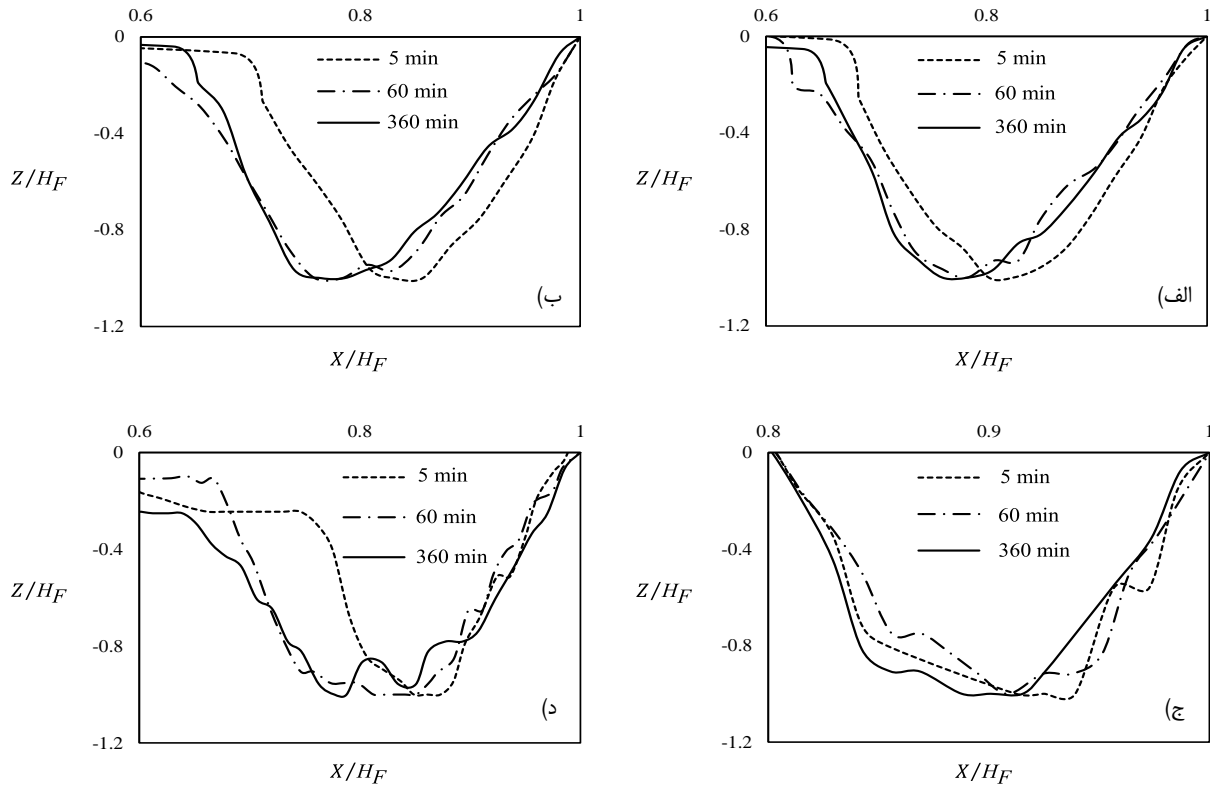
شکل ۷. مقایسه سرعت جریان در پایین دست تندآب با و بدون پلکان همراه با پرتاب کننده جامی شکل

ب) بررسی تغییرات زمانی نیمرخ چاله و عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست تندآب ساده و پلکانی همراه با پرتاب کننده جامی شکل

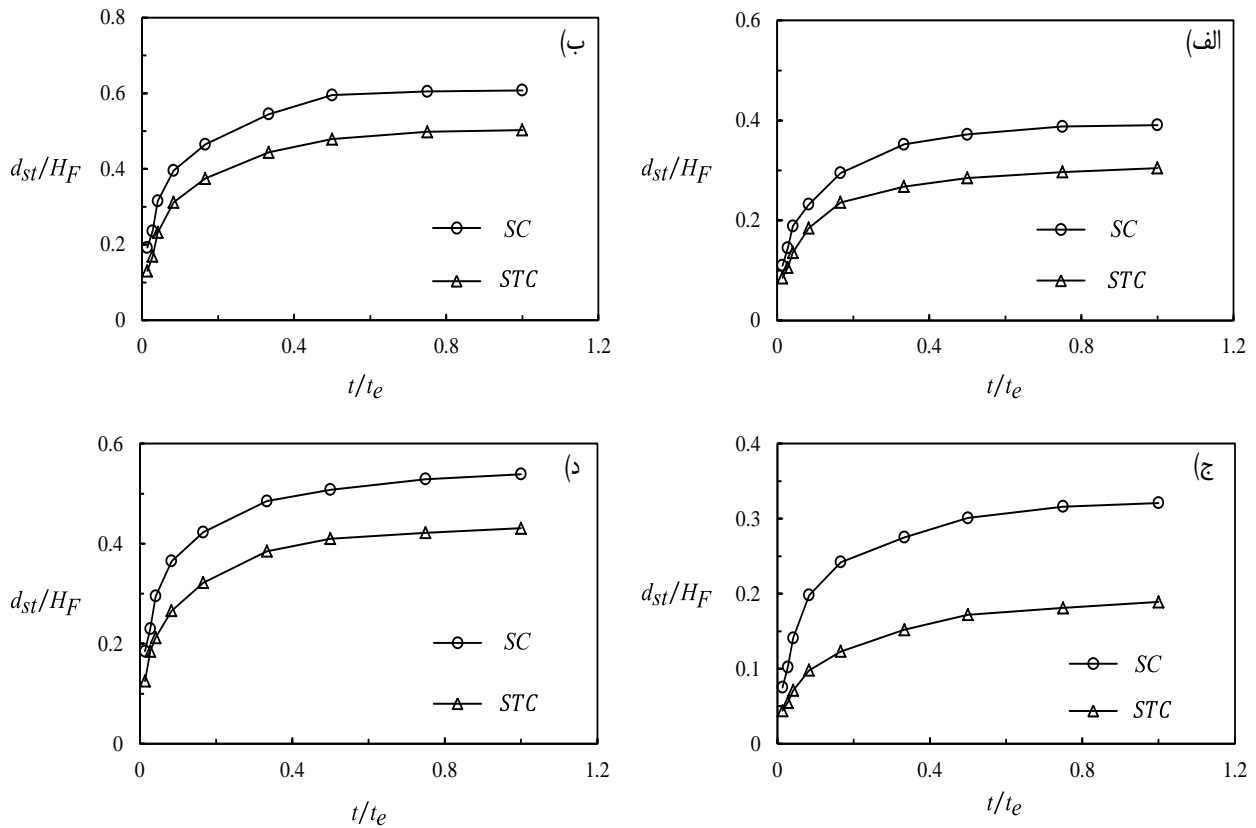
در شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات زمانی بی‌بعد نیمرخ چاله و عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی برای تندآب‌های ساده و پلکانی در پایین دست پرتاب کننده جامی شکل نشان داده شده است. مقایسه نیمرخ‌های بی‌بعد گودال آب‌شستگی در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که موقعیت طولی محل وقوع عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست تندآب ساده و پلکانی با گذشت زمان به سمت بالادست توسعه می‌یابد و شکل چاله نیز به تدریج متقارن تر می‌شود. این موضوع در بررسی آزمایشگاهی توسط *Esmaeili Varaki et al. (2021)* نیز گزارش شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در دقایق اولیه ($t/t_e < 0.1$)، آب‌شستگی با شدت بیشتری رخ داده و عمق آب‌شستگی به جای توسعه طولی در عمق افزایش می‌یابد ولی با گذشت زمان از شدت آن کاسته می‌شود (مرحله ۱). برخورد جت با بستر رسوبی گردابه‌هایی را تشکیل می‌دهد که باعث آشفتگی شدید و حرکات ذرات می‌شود (شکل ۱۰-الف). در مرحله ۲ فرآیند آب‌شستگی ($0.1 < t/t_e < 0.4$)، نرخ توسعه طولی گودال آب‌شستگی افزایش یافته و ارتفاع پشته کاسته شده و به تدریج در جهت طولی به سمت پایین دست حرکت می‌کند (شکل ۱۰-ب).

در مرحله ۳ ($0.4 < t/t_e < 0.6$)، ارتفاع پشته رسوبی به تدریج کاهش یافته و گودال آب‌شستگی در جهت طولی و عمودی توسعه می‌یابد (شکل ۱۰-ج). در مرحله تعادل ($0.6 < t/t_e < 1$)، گودال آب‌شستگی به حالت پایدار می‌رسد (مرحله چهارم). در این حالت، ذرات رسوبی در درون گودال حالت غلطشی و جهشی دارند و به ندرت از درون گودال به سمت پایین دست منتقل می‌شوند (شکل ۱۰-د). این موضوع توسط *Termini و Termini (2011)* and *Sammartano (2012)* در مورد توسعه گودال آب‌شستگی در پایین دست جت ریزشی نیز گزارش شده است. پس از تشکیل چاله آب‌شستگی، نیمرخ پشته رسوبی در پایین دست آن شکل می‌گیرد (شکل ۱۰). مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که سرعت جت خروجی از پرتاب کننده جامی شکل تأثیر زیادی بر شکل پشته رسوبی دارد. در دبی‌های کم به دلیل سرعت کم جریان روی پشته رسوبی (کمتر از سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی)، جریان توانایی جابه‌جایی پشته رسوبی را نداشته و حرکت آن به طرف پایین دست به کندی صورت می‌گیرد. با افزایش سرعت جریان بیشتر از سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، جریان توانایی جابه‌جایی پشته رسوبی را داشته و پشته رسوبی به طرف پایین دست حرکت می‌کند. در این حالت شکل پشته رسوبی به صورت صاف تشکیل می‌شود.

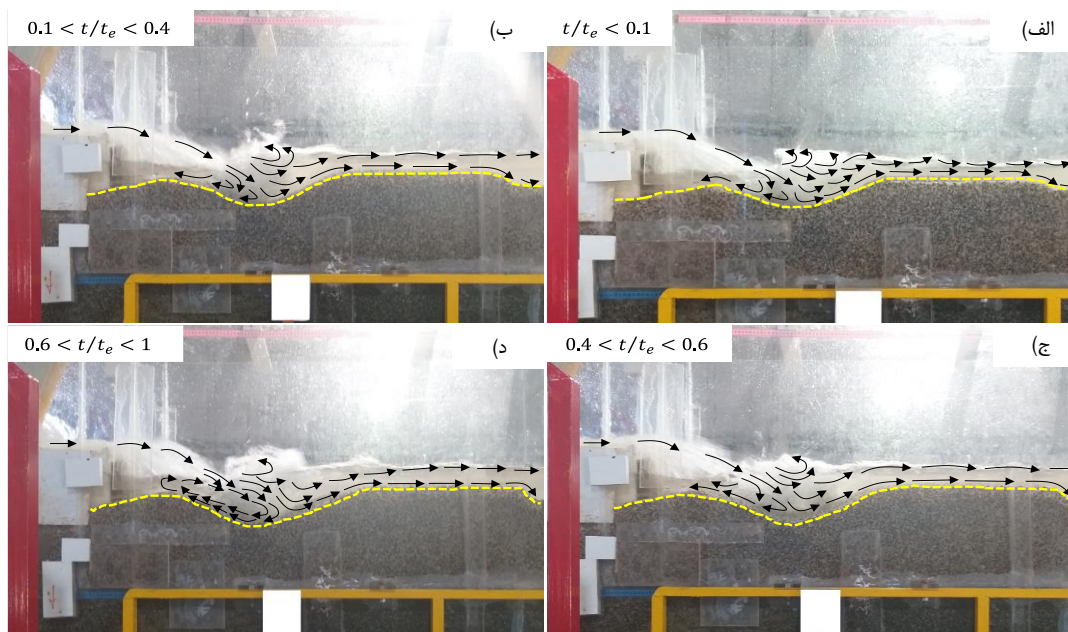
همان‌طور که در نمودارهای شکل (۹) ملاحظه می‌شود، عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی به صورت تابع لگاریتمی از زمان افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج برای زمان‌های نسبی مختلف، نشان داد که برای تندآب پلکانی با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه از پرتاب کننده جامی شکل مذکور، به ترتیب ۲۳ و ۴۱ درصد در زمان ۵ دقیقه ($t/t_e = 0.013$)، ۲۰ و ۵۰ درصد در زمان ۳۰ دقیقه ($t/t_e = 0.083$)، ۲۴ و ۴۳ درصد در زمان ۲۷۰ دقیقه ($t/t_e = 0.75$) کاهش می‌یابد. همچنین عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی نسبت به تندآب ساده برای $y_c/h = 0.97$ و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه از پرتاب کننده جامی شکل، به ترتیب ۲۹ و ۳۲ درصد در زمان ۵ دقیقه ($t/t_e = 0.013$)، ۲۱ و ۲۷ درصد در زمان ۳۰ دقیقه ($t/t_e = 0.083$)، ۱۷ و ۲۱ درصد در زمان ۲۷۰ دقیقه ($t/t_e = 0.75$) کاهش می‌یابد.



شکل ۸. نمودار تغییرات زمانی بی‌بعد نیم‌رخ چاله آب‌شستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل: الف) $\theta=15^\circ$ و $SC, y_c/h=0.53$ و ب) $\theta=15^\circ$ و $STC, y_c/h=0.53$ ج) $\theta=30^\circ$ و $SC, y_c/h=0.97$ و د) $\theta=30^\circ$ و $STC, y_c/h=0.97$



شکل ۹. نمودار تغییرات زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی برای دبی و زاویه‌های مختلف جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل: الف) $\theta=15^\circ$ و $y_c/h=0.53$ ب) $\theta=15^\circ$ و $y_c/h=0.97$ ج) $\theta=30^\circ$ و $y_c/h=0.53$ د) $\theta=30^\circ$ و $y_c/h=0.97$



شکل ۱۰. تصاویر تغییرات زمانی نیمرخ آب‌شستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل برای STC ، $y_c/h=0.53$ و $\theta=15^\circ$

ج) بررسی اثر نصب پلکان بر تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل

مقایسه نتایج تأثیر ایجاد پلکان با شیب ۱:۲ بر حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصله نشان داد که با پلکانی نمودن نیمرخ تندآب، عملکرد آن در کاهش عمق آب‌شستگی بیشتر می‌شود به گونه‌ای که حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه در تندآب پلکانی به طور متوسط نسبت به تندآب ساده برای ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) برابر ۲، عمق پایاب نسبی (h/y_c) برابر ۱/۵ و عمق‌های بحرانی نسبی حداقل $(y_c/h=0.53, \eta=12.2)$ تا حداکثر $(y_c/h=0.97, \eta=23.9)$ به ترتیب ۱۸ و ۲۹ درصد کم می‌شود. همچنین با تغییر عمق پایاب نسبی از ۱/۵ به ۲ در شرایط ارتفاع ریزش یاد شده، مقدار کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی در تندآب پلکانی با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه به طور متوسط به ترتیب ۱۴ و ۳۵ درصد نسبت به تندآب ساده می‌باشد.

مقایسه نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع ریزش نسبی به ۴ در عمق پایاب نسبی برابر ۱/۵، عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه با افزایش عمق بحرانی نسبی در دامنه ۰/۵۳ تا ۰/۹۷ و η در دامنه ۱۲/۲ تا ۲۳/۹، نسبت به تندآب ساده به طور متوسط به ترتیب ۱۶ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر عمق پایاب نسبی از ۱/۵ به ۲ در شرایط ارتفاع ریزش یاد شده، مقدار کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی در تندآب پلکانی با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه از پرتاب‌کننده جامی شکل به طور متوسط به ترتیب ۱۳ و ۲۰ درصد نسبت به تندآب ساده حاصل شد.

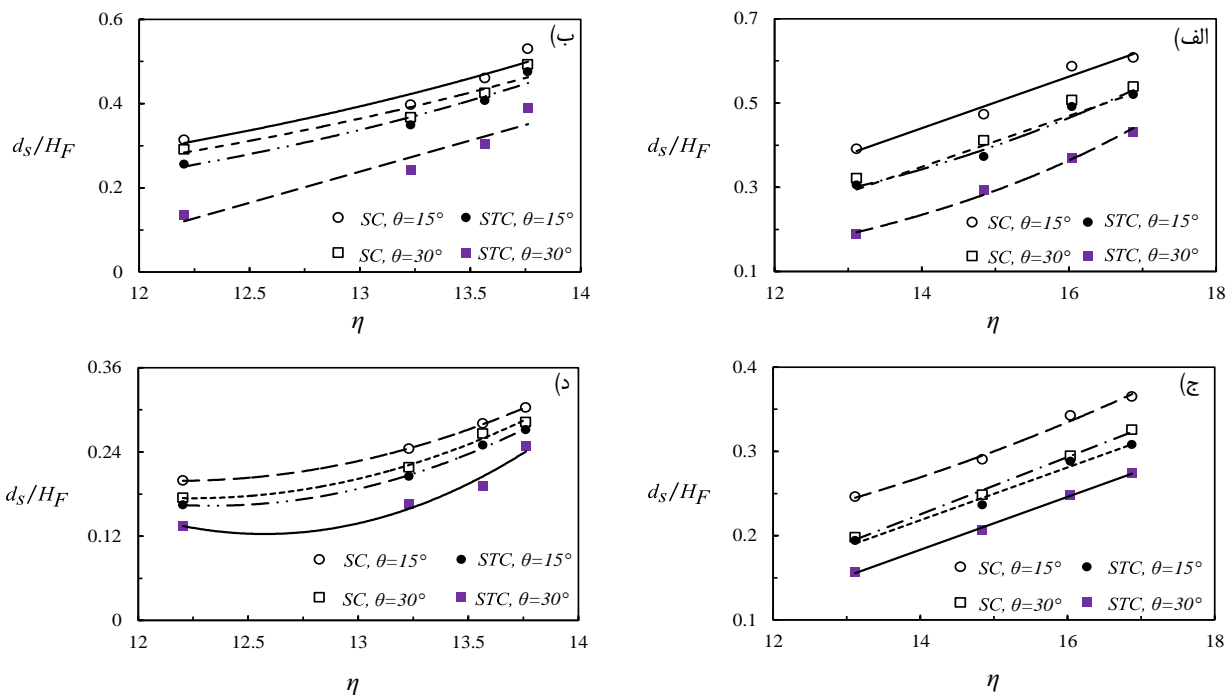
بررسی‌های صورت گرفته پیرامون تأثیر رژیم جریان بر حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی با شیب ۱:۲ برای نسبت ارتفاع ریزش به ارتفاع پله (H_F/h) در دامنه ۲ تا ۴ و نسبت عمق پایاب به عمق بحرانی (h/y_c) در دامنه ۱/۵ تا ۲ نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی (y_c/h) به ۰/۸۳ رژیم جریان از حالت ریزشی به انتقالی تغییر پیدا کرده و روند تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی به صورت افزایشی حاصل می‌گردد. در نتیجه، حداکثر عمق آب‌شستگی در مقایسه با عمق بحرانی نسبی حداقل $(y_c/h=0.53)$ برای زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه پرتاب‌کننده جامی شکل به طور متوسط به ترتیب ۵۵ و ۸۰ درصد افزایش پیدا نمود. مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی نتایج نشان می‌دهد که با تغییر رژیم جریان از ریزشی به انتقالی برای عمق بحرانی نسبی در دامنه ۰/۵۳ تا ۰/۸۳، سرعت و مقدار پارامتر η افزایش یافته و در نتیجه ضخامت تیغه جریان روی پلکان افزایش می‌یابد. برآیند این موضوع منجر به کاهش تأثیر زبری پله‌ها بر روی جریان شده و در نتیجه میزان استهلاک انرژی در طول تندآب کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی به ۰/۹۷ برای شیب تندآب پلکانی ۱:۲، رژیم جریان عبوری از آن، از حالت انتقالی به سطحی تغییر می‌یابد. میزان کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی متأثر از طیف کامل رژیم‌های امکان وقوع برای شیب تندآب پلکانی ۱:۲، عمق پایاب نسبی (h/y_c) برابر ۱/۵، ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) برابر ۴ و زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به تندآب ساده در جدول (۴) نشان داده شده است. در این جدول Δd_s اختلاف حداکثر عمق آب‌شستگی در تندآب‌های ساده و پلکانی $(\Delta d_s = d_{s(sc)} - d_{s(stc)})$ می‌باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش عمق بحرانی نسبی (y_c/h) از ۰/۵۳ به ۰/۹۷، میزان کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی برای زاویه جت خروجی ۱۵ درجه پرتاب‌کننده جامی شکل از ۲۱ به ۱۵ درصد و برای زاویه جت خروجی ۳۰ درجه نیز از ۲۰ به ۱۳/۷ درصد کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با تغییر رژیم جریان از ریزشی به انتقالی و سطحی، عملکرد پلکان‌ها در کاهش عمق آب‌شستگی کمتر می‌شود زیرا در رژیم جریان سطحی به دلیل کاهش آشفستگی جریان و تشکیل گردابه‌های منظم‌تر، کمترین استهلاک انرژی صورت می‌گیرد. در این رژیم، جریان آب بر روی پله‌ها با تشکیل کف کاذب به صورت یک لایه جاری شده و تندآب پلکانی همانند تندآب ساده عمل می‌کند. از همین رو، بیشترین مقدار آب‌شستگی نسبت به رژیم جریان ریزشی و انتقالی، در رژیم جریان سطحی اتفاق می‌افتد. این موضوع توسط Chanson (1994a) در مورد ویژگی‌های جریان و اتلاف انرژی در سرریز پلکانی، در تحقیق آزمایشگاهی (Tuna and Emiroglu (2013) در مورد آب‌شستگی موضعی پایین‌دست تندآب ساده و پلکانی و در مطالعه آزمایشگاهی (Chatila and Jurdi (2004) در زمینه استهلاک انرژی در تندآب‌های ساده و پلکانی نیز گزارش شده است.

د) بررسی تأثیر زاویه‌های مختلف جت خروجی بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل

در شکل (۱۳) تأثیر زاویه‌های مختلف جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل بر حداکثر عمق آب‌شستگی نشان داده شده است. مقایسه مقادیر حداکثر عمق آب‌شستگی برای عمق‌های بحرانی نسبی (y_c/h) در دامنه ۰/۵۳ تا ۰/۹۷، عمق پایاب نسبی (h/y_c) برابر ۱/۵ و ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) برابر ۲ نشان داد که با تغییر زاویه جت خروجی از ۱۵ به ۳۰ درجه، مقدار پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/H_F) در تندآب ساده از ۰/۶ به ۰/۵ و در تندآب پلکانی نیز از ۰/۵ به ۰/۴ کاهش یافت. همچنین مقدار کاهش پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی برای عمق پایاب نسبی یاد شده و ارتفاع ریزش نسبی برابر ۴، در تندآب ساده از ۰/۳ به ۰/۲۴ و در تندآب پلکانی نیز از ۰/۲۷ به ۰/۲ حاصل شد. در جدول (۵) تأثیر افزایش زاویه جت خروجی از ۱۵ به ۳۰ درجه پرتاب‌کننده جامی شکل بر حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی نشان داده شده است.



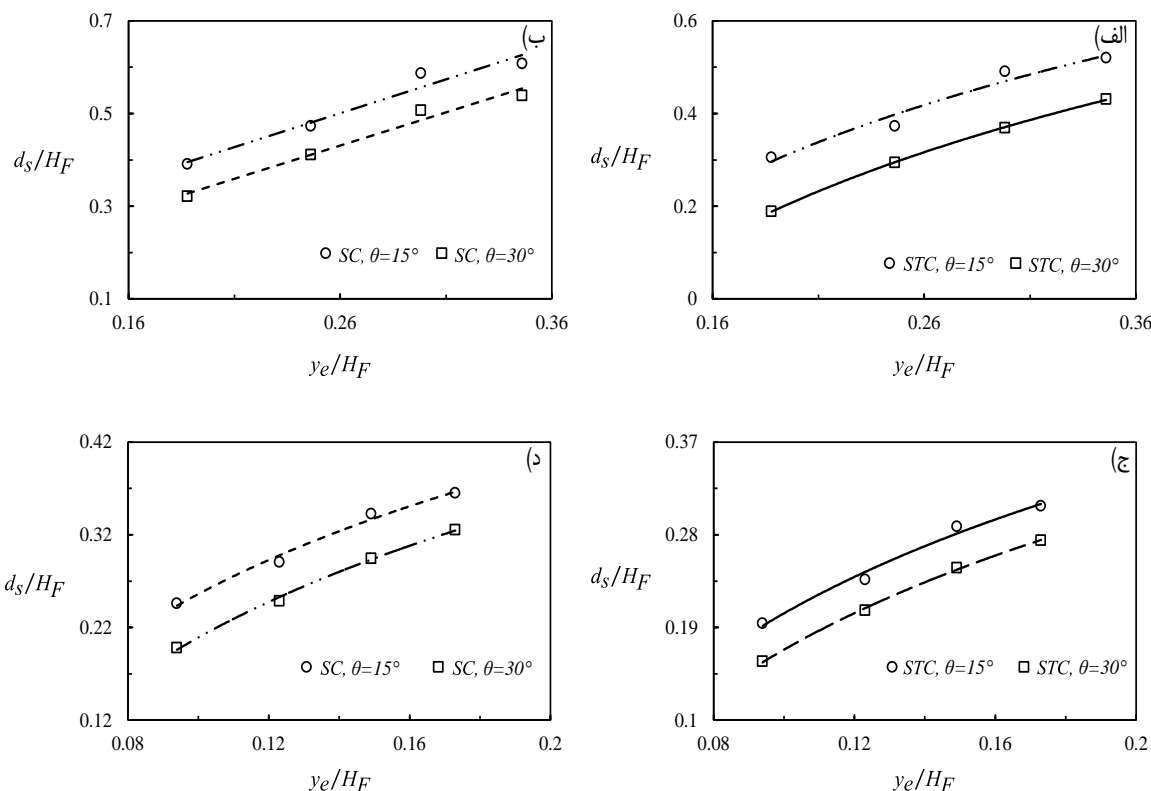
شکل ۱۱. مقایسه تأثیر پلکان بر حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل برای شرایط ارتفاع ریزش و عمق پایاب $H_F/h=4$ و $h/y_c=2$ (د) و $H_F/h=4$ و $h/y_c=1.5$ (ج) و $H_F/h=2$ و $h/y_c=2$ (ب) و $H_F/h=2$ و $h/y_c=1.5$ مختلف: الف)

جدول ۴. درصد کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب پلکانی نسبت به تندآب ساده ($\Delta d_s/d_{s(sc)}$)

STC, $\theta=30^\circ$	STC, $\theta=15^\circ$	نوع رژیم جریان	y_c/h
۲۰	۲۱	ریزشی	۰/۵۳
۱۷/۳	۱۸/۵	انتقالی	۰/۶۹
۱۵/۳	۱۶	انتقالی	۰/۸۳
۱۳/۷	۱۵	سطحی	۰/۹۷

مشاهدات نشان داد که سرعت جریان و زاویه برخورد جت ریزشی به حوضچه استغراق متأثر از زاویه جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل

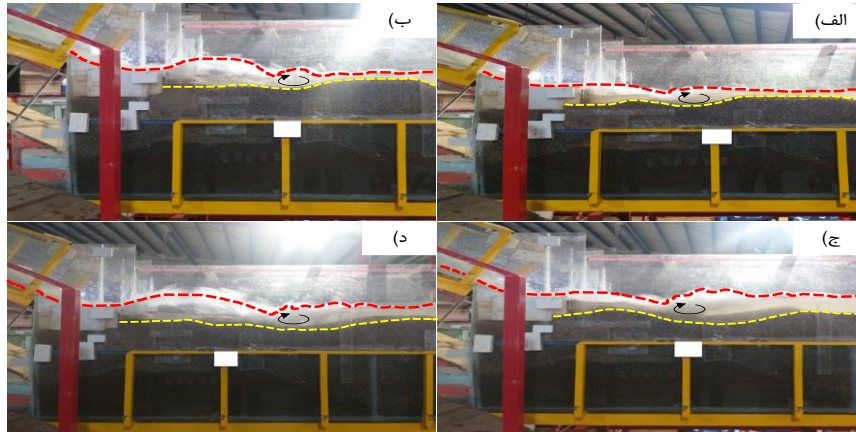
است. جریان بعد از ورود به پرتاب‌کننده جامی شکل، تغییر جهت داده و به سمت بالا پرتاب و رفته رفته از سرعت آن کاسته می‌شود. با کاهش سرعت جریان و پراکنده شدن بیشتر آب در هوا، استهلاک انرژی بیشتری صورت می‌گیرد. در نتیجه برخورد جت پراکنده شده با سطح آب در حوضچه استغراق باعث آشفتنگی و تلاطم بیشتر جت ریزشی شده و کاهش قدرت فرساینده‌گی جریان را به همراه دارد. در مقابل، با کاهش زاویه جت خروجی، شتاب جریان کاهش یافته و استهلاک انرژی کمتری صورت می‌گیرد. در نتیجه جت ریزشی در برخورد با حوضچه استغراق و به تبع آن بستر رسوبی، از مومنتوم بیشتری برخوردار بوده و توانایی نفوذ بیشتری در حوضچه استغراق دارد. به همین دلیل کاهش زاویه جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل منجر به افزایش عمق آب‌شستگی در کلیه شرایط هیدرولیکی شده است. این موضوع توسط Alias et al. (2008) نیز گزارش شده است. شکل (۱۴) تصاویر زاویه‌های مختلف جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. تأثیر زاویه‌های مختلف جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل بر حداکثر عمق آب‌شستگی برای $h/y_c=1.5$ ، $H_F/h=4$ (الف و ب) و $H_F/h=2$ (ج و د)

جدول ۵. تأثیر افزایش زاویه جت خروجی از ۱۵ به ۳۰ درجه بر کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست تنداب

H_F/h	y_e/h	مقدار کاهش برای تنداب ساده (درصد)	مقدار کاهش برای تنداب پلکانی (درصد)
۲	۰/۵۳	۱۸	۳۸
۲	۰/۶۹	۱۳	۲۱
۲	۰/۸۳	۱۴	۲۵
۲	۰/۹۷	۱۱	۱۷
۴	۰/۵۳	۲۰	۱۹
۴	۰/۶۹	۱۵	۱۳
۴	۰/۸۳	۱۴	۱۴
۴	۰/۹۷	۱۱	۱۰



شکل ۱۴. تصاویر زاویه‌های مختلف جت خروجی از پرتاب‌کننده جامی شکل برای $H_F/h=4$ (الف) STC ، $y_c/h=0.53$ و $\theta=15^\circ$ ، $\theta=30^\circ$ (ب) STC ، $y_c/h=0.53$ و $\theta=30^\circ$ (ج) STC ، $y_c/h=0.97$ و $\theta=15^\circ$ (د) STC ، $y_c/h=0.97$ و $\theta=30^\circ$

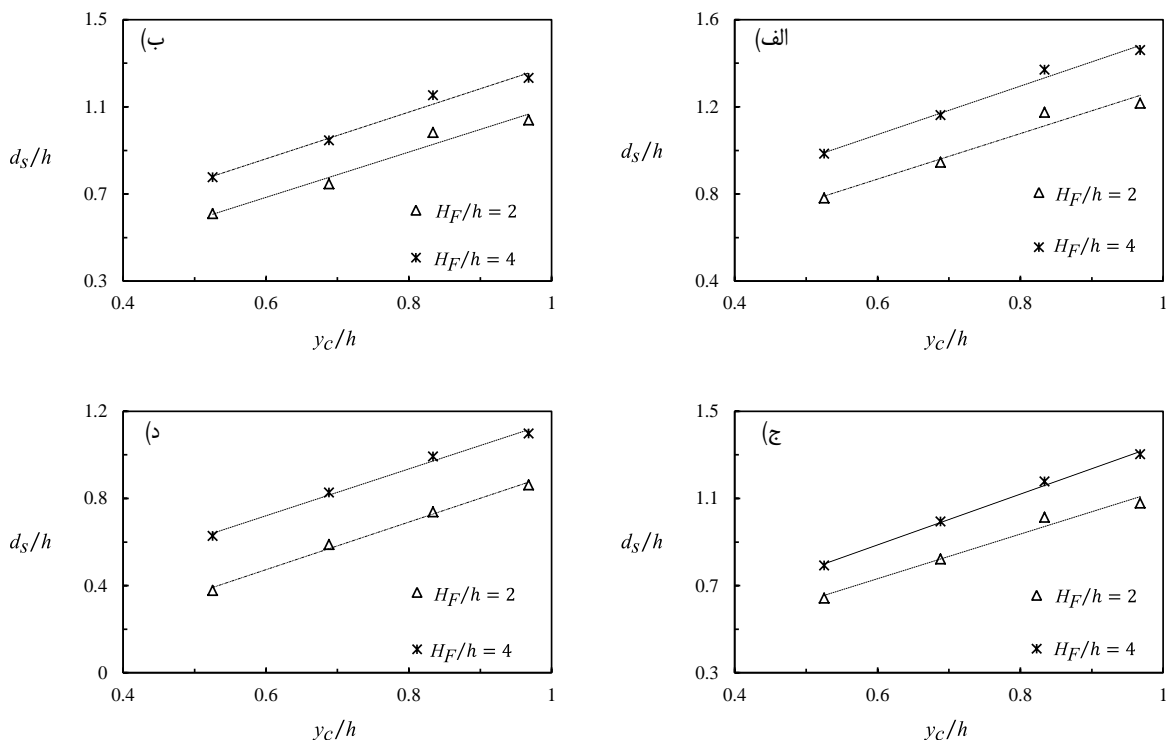
و) بررسی تأثیر ارتفاع ریزش و عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل

در شکل (۱۵) تأثیر ارتفاع ریزش بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست پرتاب‌کننده جامی شکل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای عمق پایاب نسبی (h/y_c) برابر $1/5$ و زاویه جت خروجی 15° درجه با افزایش ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) از 2 به 4 ، مقدار پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/H_F) در تندآب ساده از $1/2$ به $1/4$ و در تندآب پلکانی نیز از $1/1$ به $1/3$ افزایش می‌یابد. همچنین مقدار افزایش پارامتر عمق نسبی آب‌شستگی برای زاویه جت خروجی 30° درجه نیز در تندآب ساده از $1/1$ به $1/3$ و در تندآب پلکانی از $0/6$ به $0/8$ حاصل شد. مقایسه نتایج حاکی از آن است در شرایط ارتفاع ریزش یاد شده، مقدار کاهش عمق آب‌شستگی در تندآب پلکانی برای زاویه‌های جت خروجی 15° و 30° درجه به طور متوسط به ترتیب 18% و 16% درصد نسبت به تندآب ساده حاصل گردید. در جدول (۶) تأثیر افزایش ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) از 2 به 4 بر حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل نشان داده شده است.

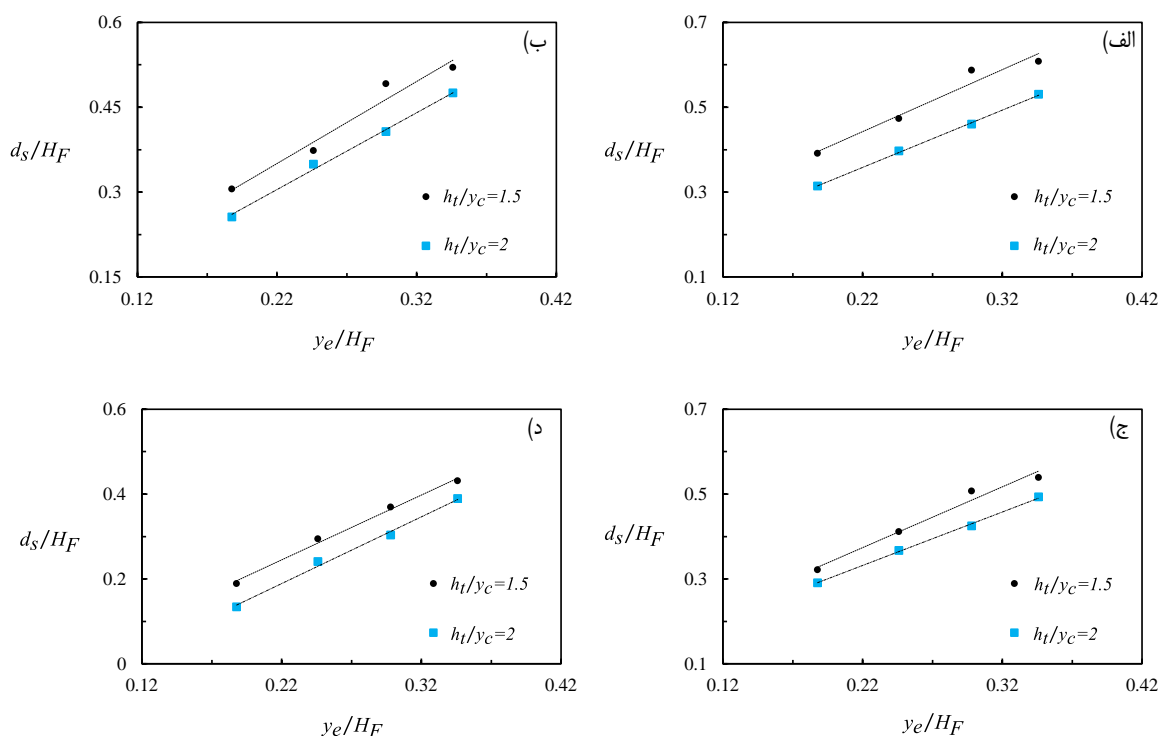
جدول ۶. تأثیر افزایش ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) از 2 به 4 بر حداکثر عمق آب‌شستگی در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل (درصد)

SC		STC		h/y_c	y_c/h
$\theta=30^\circ$	$\theta=15^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=15^\circ$		
۲۳	۲۶	۶۶	۲۷	$1/5$	$0/53$
۲۱	۲۳	۴۰	۲۶	$1/5$	$0/69$
۱۶	۱۷	۳۴	۱۸	$1/5$	$0/83$
۲۱	۲۰	۲۷	۱۹	$1/5$	$0/97$

مشاهدات نشان داد که هر چه ارتفاع ریزش بیشتر شود، عمق آب‌شستگی افزایش بیشتری خواهد یافت. از طرف دیگر با افزایش ارتفاع ریزش، مقدار ضخامت جت ریزشی کاهش و سرعت آن افزایش می‌یابد. در نتیجه عمق آب‌شستگی در کلیه شرایط هیدرولیکی در پایین‌دست تندآب‌های ساده و پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل افزایش می‌یابد. این موضوع توسط Ojha (1999) و Doehring and Abt (1994) در مورد اثر ارتفاع ریزش بر ابعاد چاله آب‌شستگی در پایین‌دست جت ریزشی نیز گزارش شده است. در شکل (۱۶) تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی برای زاویه‌های جت خروجی 15° و 30° درجه نشان داده شده است. نتایج حداکثر عمق آب‌شستگی برای زاویه جت خروجی 15° درجه حاکی از آن است که با تغییر عمق پایاب نسبی (h/y_c) از $1/5$ به 2 ، حداکثر عمق آب‌شستگی در تندآب‌های ساده و پلکانی به طور متوسط به ترتیب 18% و 12% درصد کاهش می‌یابد. همچنین برای زاویه جت خروجی 30° درجه، کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی به طور متوسط به ترتیب 11% و 19% درصد حاصل شد.



شکل ۱۵. تأثیر ارتفاع ریزش بر حداکثر عمق آب‌شستگی برای $h_t/y_c=1.5$ (الف، $SC=15^\circ$) (ب، $STC=15^\circ$) (ج، $SC=30^\circ$) (د، $STC=30^\circ$)



شکل ۱۶. تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین دست پرتاب‌کننده جامی شکل برای $H_F/h=2$ (الف، $SC=15^\circ$) (ب، $STC=15^\circ$) (ج، $SC=30^\circ$) (د، $STC=30^\circ$)

ه) معادله رگرسیونی برآورد عمق حداکثر آب‌شستگی پایین دست تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل

مقدار آب‌شستگی در پایین دست تندآب با و بدون پلکان همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل تحت تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی می‌باشد. بنابراین ارائه روابطی جهت برآورد آن در پایین دست تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل تحت شرایط هیدرولیکی مختلف می‌تواند در

مراحل اولیه طراحی این نوع سازه‌ها مفید باشد. برای این منظور شکل ریاضی رابطه بی بعد (۳) را می‌توان با استفاده از تئوری خود-تشابهی ناقص^۱ (Barenblatt, 1979; Barenblatt, 1987; Ferro, 1997) به صورت رابطه‌ی توانی زیر خلاصه کرد.

$$\frac{d_s}{H_F} = a \left(\frac{h_t}{H_F}\right)^b \left(\frac{h}{l}\right)^c \left(\frac{d}{H_F}\right)^d (\eta)^e \left(\frac{H}{H_F}\right)^f \left(\frac{y_g}{H_F}\right)^g (\theta)^h \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن a, b, c, d, e, f, g, h ضرایب ثابت هستند.

برای تعیین ضرایب رابطه (۷)، تجزیه و تحلیل آماری در نرم‌افزار SPSS 26 صورت گرفت. برای این منظور ۷۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی برای استخراج مدل رگرسیونی و ۳۰ درصد داده‌ها جهت صحت سنجی آن مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت رابطه (۸) برای برآورد عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل در شرایط هیدرولیکی مختلف حاصل شد.

$$\frac{d_s}{H_F} = 0.142 \left(\frac{h_t}{H_F}\right)^{-0.298} \left(\frac{h}{l}\right)^{1.524} \left(\frac{d}{H_F}\right)^{-2.571} (\eta)^{-0.340} \left(\frac{H}{H_F}\right)^{2.319} \left(\frac{y_g}{H_F}\right)^{1.451} (\theta)^{-0.055} \quad \text{رابطه (۸)}$$

به منظور ارزیابی معادله رگرسیونی، از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، ضریب کارایی مدل ناش سانتکیف (NSE)، میانگین مجذور مربعات

خطا^۲ ($RMSE$) و درصد میانگین خطای مطلق^۴ ($MAPE$) استفاده شد که به صورت روابط (۹) تا (۱۱) معرفی می‌شوند (Krause *et al.*, 2005; Nash and Sutcliffe, 1970).

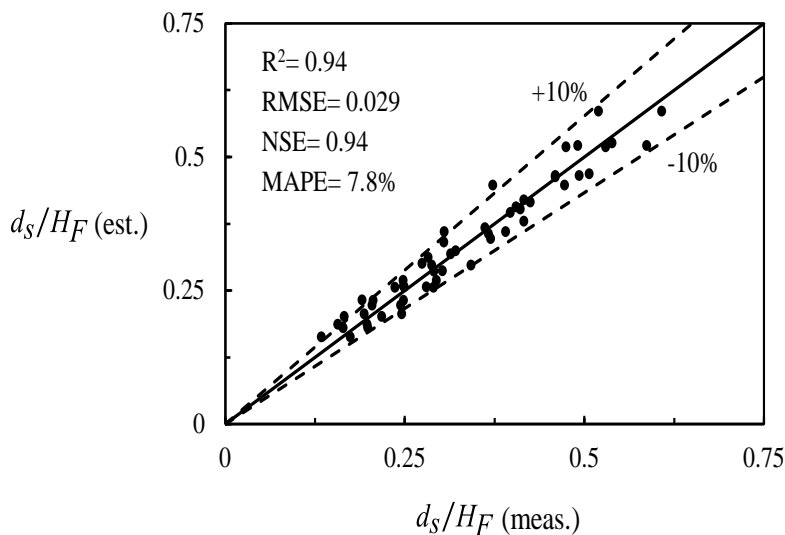
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(d_s/H_F)_{meas} - (d_s/H_F)_{est}]^2}{\sum_{i=1}^n [(d_s/H_F)_{meas} - \overline{(d_s/H_F)_{meas}}]^2} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(d_s/H_F)_{meas} - (d_s/H_F)_{est}]^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(d_s/H_F)_{meas} - (d_s/H_F)_{est}}{(d_s/H_F)_{meas}} \right| \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که در آن $(d_s/H_F)_{est}$ حداکثر عمق آب‌شستگی برآورد شده از معادله پیشنهادی، $(d_s/H_F)_{meas}$ حداکثر عمق آب‌شستگی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی، $(d_s/H_F)_{meas}$ میانگین حداکثر عمق آب‌شستگی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

در شکل (۱۷) مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و برآورد شده عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی پایین دست پرتاب‌کننده جامی شکل نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان داشت که معادله استخراج شده در برآورد عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سازه مورد مطالعه در دامنه شرایط هیدرولیکی مختلف این تحقیق دارای دقت قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی

معادلات (Damle *et al.* (1966), Rubinstein (1963), Sreeja (2012), Naini (2011), Heng *et al.* (2013) و Azmathullah *et al.*

۱. Incomplete self-similarity
۲. Nash-Sutcliffe Efficiency
۳. Root Mean Square Error
۴. Mean Absolute Percentage Error

(2005). *al.* در برآورد مقدار عمق آبشستگی در پایین دست پرتاب کننده جامی شکل نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. روابط مورد استفاده در این تحقیق و مقایسه عملکرد این معادلات بر اساس شاخص های آماری به ترتیب در جداول (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۷. روابط تجربی برآورد عمق آبشستگی استفاده شده در تحقیق حاضر

معادله	نام محقق
$d_s + h_t = 0.652q^{0.5}H^{0.5}$	<i>Damle et al. (1966)</i>
$d_s + h_t = h_t + 0.19 \left(\frac{H + h_t}{d} \right)^{0.75} \left(\frac{q^{1.20}}{H^{0.47} h_t^{0.33}} \right)$	<i>Rubinstein (1963)</i>
$d_s = \frac{0.17q^{0.57}H^{0.35}}{d^{0.25}}$	<i>Sreeja (2012)</i>
$d_s + h_t = 3.278 \left(q / \sqrt{gh_t^3} \right)^{0.702} \left(\frac{d}{h_t} \right)^{0.011} \left(\frac{H}{h_t} \right)^{0.135} \left(\frac{R}{h_t} \right)^{0.02} \theta$	<i>Naini (2011)</i>
$d_s + h_t = 7.4834 \frac{q^{1.4652}}{g^{0.7326} h_t^{0.33}}$	<i>Heng et al. (2013)</i>
$\frac{d_s}{h_t} = 6.914 \left(q / \sqrt{gh_t^3} \right)^{0.694} \left(\frac{H}{h_t} \right)^{0.0815} \left(\frac{R}{h_t} \right)^{-0.233} \left(\frac{d}{h_t} \right)^{0.196} (\theta)^{0.196}$	<i>Azmathullah et al. (2005)</i>

جدول ۸. مقایسه عملکرد معادلات برآورد عمق آبشستگی استفاده شده در تحقیق حاضر بر اساس شاخص های آماری

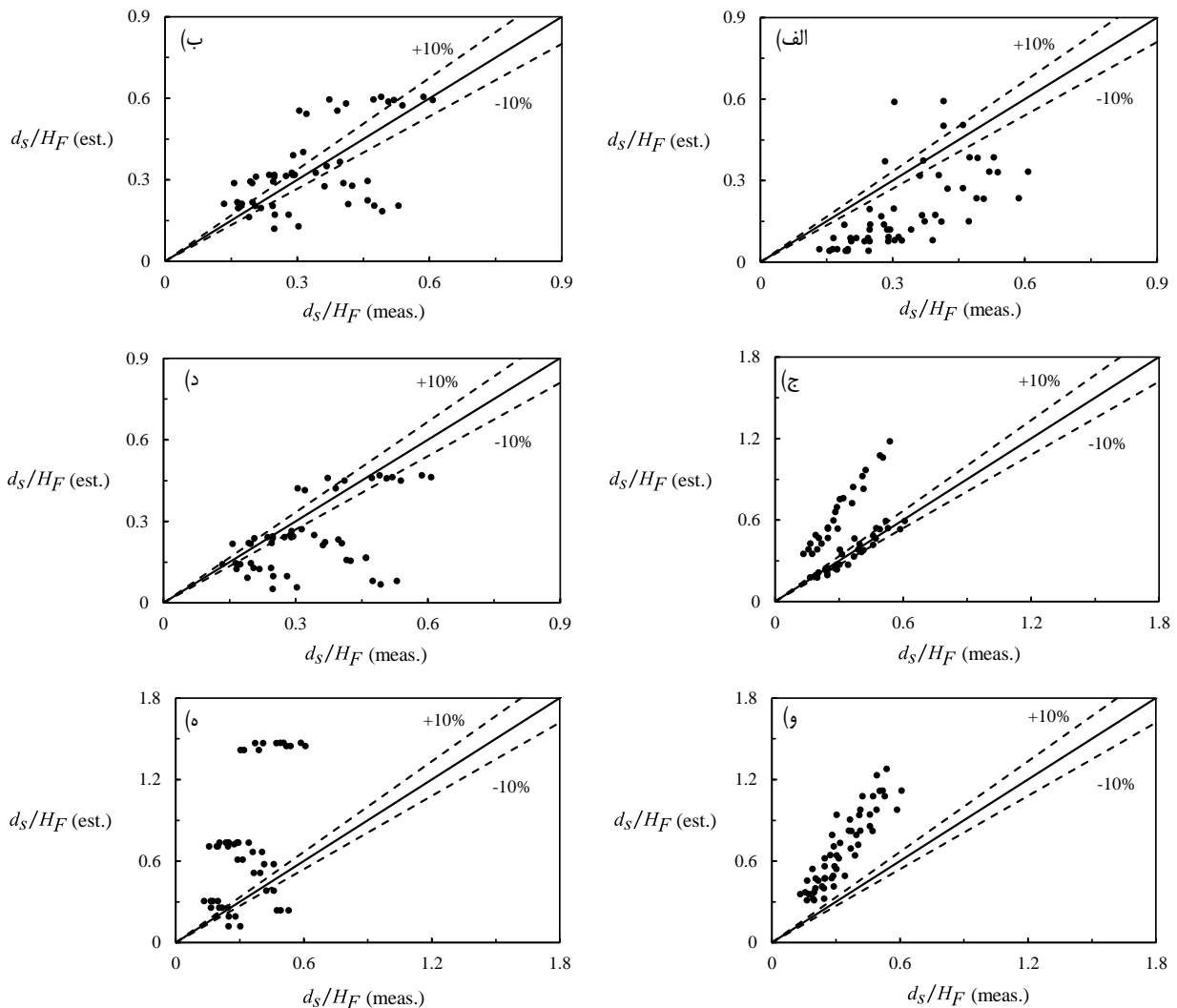
معادله	RMSE	NSE	MAPE (%)
<i>Damle et al. (1966)</i>	۰/۱۷	-۱/۱	۳۸/۵
<i>Rubinstein (1963)</i>	۰/۱۸	-۱/۲	۵۲/۶
<i>Sreeja (2012)</i>	۰/۲	-۱/۸	۴۰/۱
<i>Naini (2011)</i>	۰/۳	-۳/۶	۶۰/۵
<i>Heng et al. (2013)</i>	۰/۵	-۱۹/۹	۱۳۲/۷
<i>Azmathullah et al. (2005)</i>	۰/۴	-۹/۶	۱۰۷/۳

نتایج نشان می دهند که معادله *Damle et al. (1966)* به ازای میانگین مقادیر *RMSE*، *NSE* و *MAPE* به ترتیب برابر ۰/۱۷، ۱/۱- و ۳۸/۵ بهترین و معادله *Heng et al. (2013)* به ترتیب برابر ۰/۵، ۱۹/۹- و ۱۳۲/۷ نامناسب ترین عملکرد را در برآورد مقدار عمق آبشستگی پایین دست پرتاب کننده جامی شکل را دارند. این موضوع توسط *Sá Machado et al. (2020)* در مورد مقایسه معادلات محققین مختلف نیز گزارش شده است. همانطوری که از رابطه ی *Heng et al. (2013)* ملاحظه می گردد، تأثیر اختلاف ارتفاع تراز سطح آب بالادست و پایین دست سازه (*H*) در معادله برآورد عمق آبشستگی در نظر گرفته نشده و در نتیجه با تغییرات دبی، افزایش قابل توجهی در خطای این معادله حاصل می گردد. در شکل (۱۸) مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و برآورد شده حداکثر عمق آبشستگی حاصل از روابط تجربی جدول (۷) نشان داده شده است. همان طوری که ملاحظه می گردد، روابط ارائه شده در جدول (۷) به جز معادله *Damle et al. (1966)*، حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده را کمتر یا بیشتر از مقدار اندازه گیری شده نشان می دهند. برای ارزیابی عملکرد معادلات جدول (۷) در برآورد مقدار عمق آبشستگی در پایین دست پرتاب کننده جامی شکل، می توان رابطه خطی بین مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده عمق حداکثر نهایی آبشستگی را به صورت رابطه (۱۲) نشان داد.

$$(d_s/H_F)_{est} = \lambda (d_s/H_F)_{meas} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در جدول (۹) مقادیر λ برای عمق حداکثر نهایی آبشستگی برآورد شده بر اساس داده های آزمایشگاهی نشان داده شده است. نتایج نشان

می‌دهند که مقادیر برآورد شده حداکثر عمق آب‌شستگی از روابط (Rubinstein (1963) و Sreeja (2012) کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. دلیل این موضوع آن است که پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر مانند عمق پایاب، شعاع و زاویه جت خروجی پرتاب‌کننده جامی شکل که تأثیر زیادی بر عمق آب‌شستگی دارند، در معادلات برآورد مذکور در نظر گرفته نشده است. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر برآورد شده حداکثر عمق آب‌شستگی حاصل از روابط (Naini (2011) و Azmathullah *et al.* (2005) بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. زیرا روابط تجربی مذکور در شرایط تندآب ساده و بدون پلکان همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل حاصل شده است. همان طور که پیش از این نیز بیان گردید، ایجاد پلکان بر روی تندآب باعث استهلاک بیشتر انرژی می‌شود. به همین دلیل مقادیر برآورد شده عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی از روابط تجربی مذکور در کلیه شرایط هیدرولیکی و هندسی، بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل شده است.



شکل ۱۸. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی: الف) (Rubinstein (1963)، ب) (Damle *et al.* (1966)، ج) (Naini (2011)، د) (Sreeja (2012)، و) (Azmathullah *et al.* (2005) و ه) (Heng *et al.* (2013)

جدول ۹. مقادیر λ برای حداکثر عمق آب‌شستگی برآورد شده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی

ملاحظه	λ	معادله
برآورد مناسب	۱/۱	Damle <i>et al.</i> (1966)
کم برآورد	۰/۵	Rubinstein (1963)
کم برآورد	۰/۷	Sreeja (2012)
بیش برآورد	۱/۵	Naini (2011)
بیش برآورد	۲/۲	Heng <i>et al.</i> (2013)
بیش برآورد	۲/۱	Azmathullah <i>et al.</i> (2005)

نتیجه گیری

یکی از موضوعات مهم در طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، کاهش انرژی در جریان‌هایی با سرعت بالا می‌باشد که بی‌توجهی به آن تخریب سازه هیدرولیکی را به همراه داشته و منجر به تحمیل هزینه‌های سنگین می‌گردد. پرتاب‌کننده جامی شکل و تندآب پلکانی دو سازه‌ی متداول برای استهلاک انرژی و نیز کاهش ابعاد حوضچه آرامش در سدها هستند. در پژوهش حاضر استفاده توأم این دو سازه با ایجاد پلکان بر روی تندآب با شیب ۱:۲ و پرتاب‌کننده جامی شکل با دو زاویه جت خروجی مختلف و ارتفاع ریزش، عمق پایاب و اعداد فرود ذره متفاوت بر آب‌شستگی موضعی در پایین دست تندآب به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج حداکثر عمق آب‌شستگی برای عمق بحرانی نسبی (y/h) در دامنه ۰/۵۳ تا ۰/۹۷ و η در دامنه ۱۲/۲ تا ۲۳/۹، حاکی از آن است که:

استفاده از پلکان در نیمرخ تندآب با شیب ۱:۲، حداکثر عمق آب‌شستگی در پرتاب‌کننده جامی شکل با زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه را نسبت به تندآب ساده به طور متوسط به ترتیب ۱۵ و ۲۶ درصد کاهش می‌دهد،

مقایسه مقادیر حداکثر عمق آب‌شستگی برای عمق‌های بحرانی نسبی (y/h) مورد مطالعه، عمق پایاب نسبی (h/y_c) برابر ۱/۵ و ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) در دامنه ۲ تا ۴، نشان می‌دهند که با افزایش زاویه جت خروجی از ۱۵ به ۳۰ درجه، حداکثر عمق آب‌شستگی در تندآب‌های ساده و پلکانی به طور متوسط به ترتیب به میزان ۱۶ و ۲۱ درصد کم می‌شود،

مقایسه مقادیر سرعت جت در لبه پرتاب‌کننده جامی شکل برای عمق‌های بحرانی نسبی ۰/۵۳ تا ۰/۹۷ نشان می‌دهد که با ایجاد پلکان با شیب ۱:۲ بر روی نیمرخ تندآب، مقدار سرعت جت در لبه پرتاب‌کننده جامی شکل نسبت به تندآب ساده برای زاویه‌های جت خروجی ۱۵ و ۳۰ درجه به طور متوسط به ترتیب ۱۹ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابد،

مقایسه نتایج اثر ارتفاع ریزش بر حداکثر عمق آب‌شستگی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ریزش نسبی (H_F/h) از ۲ به ۴، حداکثر عمق آب‌شستگی در تندآب‌های ساده و پلکانی برای زاویه جت خروجی ۱۵ درجه از پرتاب‌کننده جامی شکل به طور متوسط به ترتیب ۲۰ و ۲۲ درصد و برای زاویه جت خروجی ۳۰ درجه نیز به ترتیب ۲۱ و ۴۰ درصد افزایش می‌یابد،

با افزایش عمق پایاب نسبی (h/y_c) از ۱/۵ به ۲، مقدار عمق نسبی آب‌شستگی (d_s/H_F) در تندآب ساده از ۰/۴۷ به ۰/۴۰ و در تندآب پلکانی نیز از ۰/۳۷ به ۰/۳۱ کاهش می‌یابد،

با نصب پلکان روی شیب ۱:۲، فاصله نسبی جت ورودی به بستر رسوبی حوضچه پایین دست انتهای لبه پرتاب‌کننده جامی شکل (X/H_F) نسبت به تندآب ساده به طور متوسط به ترتیب ۲۰ و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد.

همچنین در تحقیق حاضر با استفاده از تحلیل رگرسیون رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست تندآب پلکانی همراه با پرتاب‌کننده جامی شکل ارائه شد که قادر است با دقت مطلوبی مقدار عمق آب‌شستگی را در دامنه داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، برآورد نماید.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ali, K., Neyshaboury, S. & Neyshaboury, A. (1991). Localized Scour Downstream Of a Deeply Submerged Horizontal Jet. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 91(1), 1-18.
- Alias, N. A., Mohamed, T. A., Ghazali, A. H. & Mohd, M. (2008). Impact of takeoff angle of bucket type energy dissipater on scour hole. *American Journal of Applied Sciences*, 5(2), 117-121.
- Alireza, P., Mahmood, S. & Habib, M. (2008). Impact of lip angle of flip bucket energy dissipater on scour hole. 3rd IASME/WSEAS international conference on water resources, hydraulics & hydrology,
- Amanian, N. (1993). *Scour below a flip bucket spillway* Utah State University.
- Aminpour, Y. & Farhoudi, J. (2017). Similarity of local scour profiles downstream of stepped spillways. *International Journal of Civil Engineering*, 15(5), 763-774.
- Azmathullah, H., Deo, M. & Deolalikar, P. (2006). Estimation of scour below spillways using neural networks. *Journal of hydraulic research*, 44(1), 61-69.
- Azmathullah, H. M., Deo, M. & Deolalikar, P. (2005). Neural networks for estimation of scour downstream of a ski-jump bucket. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(10), 898-908.
- Barenblatt, G. I. (1979). Similarity, self-similarity, & intermediate asymptotics. Consultants Bureau.
- Barenblatt, G. I. (1987). *Dimensional analysis*. Taylor & Francis, Inc.
- Bhuiyan, F., Hey, R. D. & Wormleaton, P. R. (2007). Hydraulic evaluation of W-weir for river restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 596-609.
- Boes, R. M. & Hager, W. H. (2003a). Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 671-679.
- Boes, R. M. & Hager, W. H. (2003b). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670.
- Chanson, H. (1994a). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes.



- Journal of hydraulic research*, 32(2), 213-218.
- Chanson, H. (1994b). Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs, and spillways. Pergamon.
- Chanson, H. (1994c). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of hydraulic research*, 32(3), 445-460.
- Chanson, H. (2001). Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*, 11(4), 205-242.
- Chanson, H. (2002). Hydraulics of stepped chutes and spillways. CRC Press.
- Chanson, H., Yasuda, Y. & Ohtsu, I. (2002). Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(6), 809-819.
- Chatila, J. G. & Jurdi, B. R. (2004). Stepped spillway as an energy dissipater. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 29(3), 147-158.
- Damle, P., Venkatraman, C. & Desai, S. (1966). Evaluation of scour below ski-jump buckets of spillways. CWPRS golden jubilee symposia.
- Dey, S. & Raikar, R. V. (2007). Scour below a high vertical drop. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), 564-568.
- Doehring, F. K. & Abt, S. R. (1994). Drop height influence on outlet scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(12), 1470-1476.
- Eder, M., Hillman, G., Tarrab, L., Pagot, M. & Rodríguez, A. (2019). Physical modeling of erosion in low height structures with ski jumps. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 70-95.
- El-Mahdy, M. E.-S. (2021). Experimental method to predict scour characteristics downstream of stepped spillway equipped with V-Notch end sill. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4337-4346.
- Emiroglu, M. E. & Tuna, M. C. (2011). The effect of tailwater depth on the local scour downstream of stepped-chutes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(5), 907-915.
- Esmaili Varaki, M., Mahmoudi Kurdistani, S. & Noormohammadi, G. (2021). Scour morphology downstream of submerged block ramps. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(3), 241-250.
- Ferro, V. (1997). Applying hypothesis of self-similarity for flow-resistance law of small-diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), 175-179.
- Fraser, C. N. (2016). *SKI-JUMP ENERGY DISSIPATION* University of Stellenbosch. Private Bag X1, 7602 Matieland, South Africa.
- Frizell, K. (2006). Research state-of-the-art and needs for hydraulic design of stepped spillways (Hydraulic Laboratory Report HL-2005-06). *Denver, CO: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation*.
- Garg, S. K. (2006). *Irrigation Engineering and Hydraulic Structures* Khanna Publishers.
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Torabi, M., Abraham, J. & Azamathulla, H. M. (2020). Experimental investigation on effective scouring parameters downstream from stepped spillways. *Water Supply*, 20(5), 1988-1998.
- Habib, A., Fahmy, M. & Taha, N. (2016). Scour characteristics downstream converging spillways. *Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology*, 19, 258-266.
- Hager, W. H. (1992). *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Springer Netherlands.
- Hager, W. H. (2018). *Energy Dissipators: IAHR Hydraulic Structures Design Manuals 9*. Routledge.
- Heller, V., Hager, W. H. & Minor, H.-E. (2005). Ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(5), 347-355.
- Heng, S., Tingsanchali, T. & Suetsugi, T. (2013). Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 172, 251-262.
- Juon, R. & Hager, W. H. (2000). Flip bucket without and with deflectors. *J Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 837-845.
- Jüstrich, S., Pfister, M. & Schleiss, A. J. (2016). Mobile riverbed scour downstream of a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), 04016043.
- Khalifehei, K., Azizyan, G., Shafai-Bajestan, M. & Chau, K. (2021). Experimental modeling and evaluation sediment scouring in riverbeds around downstream in flip buckets. *International Journal of Engineering*, 33(10), 1904-1916.
- Khaturia, R. M. (2004). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. CRC Press.
- Kote, A. S. & Nangare, P. B. (2019). Hydraulic Model Investigation on Stepped Spillway's Plain and Slotted Roller Bucket. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(4), 4419-4422.
- Krause, P., Boyle, D. & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.
- Krisnayanti, D. S., Dermawan, V. & Legono, D. (2019). The Effect of Inception Point on Dissipation Energy in Stepped Spillways Modeling. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(3).
- Lenau, C. W. & Cassidy, J. J. (1969). Flow through spillway flip bucket. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(2), 633-648.
- Mason, P. (1993). Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. *International water power & dam construction*, 45(9-10), 40-45.
- Naini, S. (2011). Evaluation of RBF, GR and FFBP neural networks for prediction of geometrical dimensions of scour hole below ski-jump spillway. *International Conference on Environmental and Computer Science*.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles.

- Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Novák, P., Moffat, A., Nalluri, C. & Narayanan, R. (2017). *Hydraulic structures*. CRC Press.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. & Takahashi, M. (2001). Discussion of "Onset of Skimming Flow on Stepped Spillway" by Iwao Ohtsu, Youichi Yasuda, and Masayuki Takahashi. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(6), 522-524.
- Ojha, C. S. P. (1999). Outlet scour modeling for drop height influence. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1), 83-85.
- Omidvarinia, M. & Jahromi, S. M. (2013). Effect of wedge shape deflector on dissipating energy in triangular flip buckets. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3(2), 56-61.
- Pagliara, S., Kurdistanani, S. M. & Cammarata, L. (2014). Scour of clear water rock W-weirs in straight rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(4), 06014002.
- Pagliara, S. & Palermo, M. (2013). Rock grade control structures and stepped gabion weirs: Scour analysis and flow features. *Acta Geophysica*, 61(1), 126-150.
- Patil, C. & Hailkar, S. (2019). *Study of stepped spillways for enhancement of energy dissipation* Journal of Analysis and Computation.
- Pereira, G. M. (2020). *Spillway Design-Step by Step*. CRC Press.
- Peyras, L. a., Royet, P. & Degoutte, G. (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), 707-717.
- Rajan, B. & Rao, K. (1980). Design of trajectory buckets. *Water and Energy International*, 37(1), 63-76.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 587-591.
- Rajaratnam, N. & Macdougall, R. K. (1983). Erosion by plane wall jets with minimum tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(7), 1061-1064.
- Rao, K. (1978). *WRD Thesis* University of Roorkee.
- Raudkivi, A. J. & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350.
- Rubinstein, G. (1963). Laboratory investigation of local erosion on channel beds below high overflow dams. Transactions of Coordination Conferences on Hydraulic Engineering. Iss. VII, Conference on Hydraulics of High Head Water Discharge Structures,
- Sá Machado, L., Lima, M., Aleixo, R. & Carvalho, E. (2020). Effect of the ski jump bucket angle on the scour hole downstream of a converging stepped spillway. *International Journal of River Basin Management*, 18(3), 383-394.
- Scurlock, S. M., Thornton, C. I. & Abt, S. R. (2012). Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 167-176.
- Shan, J. & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
- Shivashankara Rao, K. (1982). Design of energy dissipators for large capacity spillways. *Proc., Brazilian Committee on Large Dams, Rio de Janeiro, Brazil*, 1, 311-328.
- Sreeja, C. (2012). Evaluation of selected equations for predicting scour at downstream of ski-jump spillway using laboratory and field data. *Engineering Geology*, 129, 98-103.
- Strelchuk, D. (1969). *Scour at the base of spillway buckets* Master Thesis, University of Windsor.
- Termini, D. (2011). Bed scouring downstream of hydraulic structures under steady flow conditions: Experimental analysis of space and time scales and implications for mathematical modeling. *Catena*, 84(3), 125-135.
- Termini, D. & Sammartano, V. (2012). Morphodynamic processes downstream of man-made structural interventions: Experimental investigation of the role of turbulent flow structures in the prediction of scour downstream of a rigid bed. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 49, 18-31.
- Tuna, M. (2012). Effect of offtake channel base angle of stepped spillway on scour hole. *IJST, Trans. Civ. Eng.*, 36(C2), 239-251.
- Tuna, M. C. & Emiroglu, M. E. (2013). Effect of step geometry on local scour downstream of stepped chutes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3), 579-588.
- Varshney, R. & Bajaj, M. (1970). Ski-jump buckets on Indian dams. *Water and Energy International*, 27(4), 383-393.
- Vischer, D. & Hager, W. (1995). *Energy dissipators, hydraulic structures design manual*. IAHR, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Vischer, D. & Hager, W. H. (1998). *Dam hydraulics* (Vol. 2). Wiley Chichester, UK.
- Yamini, O. A., Kavianpour, M. & Movahedi, A. (2015). Pressure distribution on the bed of the compound flip buckets. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 7(3), 181-194.