

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد سرریز پلکانی - هرمی بر مقدار اکسیژن محلول در آب

علی رنجبین^۱، مهدی اسمعیلی ورکی^{۲*}، مریم نوابیان^۳، شهرام نیازی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

^{۲*} دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

^۳ دانشیار آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت.

^۴ استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

چکیده

از پارامترهای مهمی که نقش حیاتی در پایداری زیست بوم های آبی و نیز فرایندهای بهبود کیفی آب مانند اکسیداسیون آهن و منگنز دارد، غلظت اکسیژن محلول (DO) است. یکی از روش های کارآمد برای افزایش میزان اکسیژن محلول در آب، استفاده از سازه های هوا ده است که با ایجاد اختلاط و آشفستگی در جریان آب، حباب های کوچک هوا را به داخل آب وارد کنند و مقدار اکسیژن محلول را افزایش دهند. در این پژوهش، تأثیر سرریز پلکانی به شکل هرمی دارای پلکان های بدون آستانه، آستانه های پیوسته و کنگره ای با هندسه های مختلف بر افزایش مقدار اکسیژن محلول در دامنه دبی های مختلف به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که در سرریز پلکانی - هرمی ساده، با افزایش دبی از حداقل تا حداکثر، مدت زمان رسیدن DO به سطح اولیه تا حدود ۲ برابر کم می شود ولی این تغییر متناسب با افزایش میزان دبی، افزایش نمی یابد. نصب آستانه های پیوسته و کنگره ای باعث کاهش عملکرد در دبی حداقل می شود ولی با افزایش دبی و به تبع آن ضخامت تیغه های ریزشی جریان از سطوح پلکان ها، مدت زمان افزایش اکسیژن محلول (DO) تا حدود ۳ برابر کاهش می یابد. بررسی نتایج نشان داد به طور کلی سرریزهای پلکانی - هرمی با پلکان ساده می توانند تا ۲/۵ میلی گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن اکسیژن محلول (DO) تزریق کنند که این مقدار برای سرریزهای پلکانی - هرمی با آستانه ساده و کنگره ای بین ۲/۳ تا ۲/۷ میلی گرم بر ثانیه در هر لیتر است.

واژه های کلیدی: اکسیژن محلول، سرریز پلکانی - هرمی، آستانه کنگره ای، هوادهی، تصفیه

مقدمه

(حداکثر ۰/۳ میلی گرم در لیتر برای آهن و ۰/۱ میلی گرم در لیتر برای منگنز) به طور مستقیم خطر جدی برای سلامت انسان ایجاد نمی کنند، اما این غلظت های بالا می تواند باعث رشد باکتری های آهن و منگنز، افزایش میکروارگانیسم های بیماری زا، ایجاد طعم تلخ و بوی نامطبوع در آب، ایجاد لکه های قرمز و قهوه ای روی لوازم بهداشتی و مسدود شدن سیستم های آب رسانی شوند. به همین دلیل، یکی از مراحل اصلی در فرآیند تصفیه آب، حذف یون های آهن و منگنز است. روش های رایج برای حذف آهن و منگنز از آب شامل

بانفوذ آب از سطح زمین به لایه های زیرسطحی که همراه است با عبور از تشکیلات سنگی با ویژگی های شیمیایی مختلف، کیفیت آب دچار تغییر می شود. مهم ترین و فراوان ترین این تغییرات افزایش غلظت آهن و منگنز است؛ بنابراین، بسیاری از منابع آب زیرزمینی مقادیر قابل توجهی آهن و منگنز دارند. به طور معمول، غلظت یون های آهن تقریباً ۱۰ برابر غلظت یون های منگنز است. مقادیر بیشتر از استانداردهای توصیه شده توسط سازمان بهداشت جهانی

(۱) نصب فیلترهای تبادل یونی (سختی‌گیرهای زئولیتی)، همکاران (Chao et al., 1987)، با اندازه‌گیری ضریب‌های (۲) سختی‌گیری با استفاده از آهک‌زنی و (۳) اکسیداسیون به همراه رسوب‌گذاری و فیلتراسیون است. هر یک از روش‌های مذکور مزایا و معایب خاص خود را دارد. در این

میان، استفاده از اکسیداسیون به دلیل پایین بودن هزینه‌های اجرایی، کاربری گسترده‌تری دارد. یکی از ارکان اصلی این روش، استفاده از هواده‌ها است (HDR Engineering, 2001).

هواده‌ی معمولاً به دو روش صورت می‌گیرد، یکی به حرکت در آوردن آب و دیگری تزریق هوا به داخل توده‌ی آب. در هواده‌ی با به حرکت در آوردن آب توسط جابه‌جایی جریان امکان تداخل و آشفتنگی بیشتر فراهم می‌گردد. این روش شامل هواده‌ی ثقلی-ریزشی، هواده‌ی پاششی، هواده‌ی بشقابی، هواده‌ی سطحی است. در هواده‌ی به روش دوم، حباب هوا با استفاده از تجهیزات مکانیکی به درون جریان تزریق می‌شود. هواده‌ی با تزریق هوا و هواده‌ی دیفیوژی یا عمقی دو نمونه از این روش هستند. هواده‌ی ثقلی-ریزشی مانند سرریزها کاربرد زیادی در بهبود شرایط محیط زیستی برای محیط‌های آبی نظیر رودخانه‌ها و برکه‌ها دارند. فرآیند ریزش جریان از روی سرریز منجر به ورود حباب هوا به آب می‌شود و در نتیجه مقدار اکسیژن محلول افزایش می‌یابد. حباب‌ها بعد از ورود یا خیلی سریع بدنه‌ی آبی را ترک می‌کنند یا تا محدوده‌ای از عمق آب پایین می‌روند و سپس به سطح آب باز می‌گردند (Nakason, 1987).

تاکنون جنبه‌های مختلفی از اثر پارامترهای سیال، هیدرولیکی و هندسی سرریزها بر هواده‌ی و افزایش اکسیژن محلول در آب بررسی شده است. از جمله تحقیق‌های انجام شده در رابطه با اثر پارامترهای سیال بر مقدار اکسیژن محلول آب، می‌توان به جامسون (Gameson, 1958) اشاره کرد که ضریبی را برای انتشار اکسیژن محلول در آب در نظر گرفت و رابطه‌ای متناسب با دمای آب برای هواده‌ی بین آن و غلظت اکسیژن اشباع در آب ارائه داد. همچنین چاو و

هواده‌ی و افزایش اکسیژن محلول در آب را می‌توان در

دو قالب کلی سرریزهای لبه تیز و سرریزهای پلکانی بررسی نمود. آلبرچت (Albrecht, 1971) و پوپل (Popel, 1972) با

بررسی هواده‌ی در سرریزهای لبه تیز خطی اظهار داشتند

که عمق پایین‌دست سرریز می‌تواند پارامتری مهم برای راندمان هواده‌ی باشد. این محققان دریافتند که راندمان

هواده‌ی برای عمق‌های پایین‌دست که از ارتفاع ریزش بزرگ‌تر باشند ثابت می‌ماند. از این رو توصیه می‌شود مقدار عمق پایین‌دست دو سوم ارتفاع ریزش در نظر گرفته شود.

ناکاسون (Nakason, 1987) با اجرای آزمایش‌هایی روی

سرریزهای خطی، روابطی بین راندمان هواده‌ی با دبی و هندسه سرریز به دست آورد. وی می‌گوید عمق پایین‌دست

سرریز عامل مهمی در افزایش اکسیژن محلول در آب است

و راندمان هواده‌ی با افزایش آن افزایش می‌یابد. این عمق محدوده‌ای دارد زیرا نفوذ حباب هوا در حوضچه‌های

پایین‌دست تا بی‌نهایت ادامه نمی‌یابد. ورملیتون و سوفانی

(Wormleaton & Soufiani, 1998) با بررسی عملکرد

هواده‌ی سرریزهای کنگره‌ای- مثلثی با تعداد یک سیکل، با

زاویه‌های مختلف داخلی دیواره‌های سرریز و نیز شیب‌دار

بودن دیواره‌ها بیان داشتند که با کوچک‌تر شدن زاویه داخلی

دیواره‌های سرریز، راندمان هواده‌ی افزایش می‌یابد. آنها

اضافه می‌کنند با افزایش ارتفاع ریزش، عمق نفوذ و زمان

تماس حباب هوا در داخل حوضچه پایین‌دست سرریز

افزایش می‌یابد و در نتیجه راندمان هواده‌ی بیشتر می‌شود.

بایلر و باگاتر (Baylor & Bagatur, 2000) نیز عملکرد

هواده‌ی را در انواع سرریزهای خطی لبه تیز مورد بررسی

قرار دادند و دریافتند که بالاترین راندمان انتقال اکسیژن در

سرریز لبه تیز مثلثی و کم‌ترین راندمان مربوط به سرریز لبه

هستند. چانسون و تامبز (Chanson & Toombs, 2002) با بررسی جریان هوا-آب در پایین دست سرریزهای پلکانی، هوادهی بسیار شدیدی را در جریان مشاهده کردند. گانزالس و چانسون (Gonzalez & Chanson, 2008) نیز جریان هوا-آب تشکیل شده در حفره‌های تیغه ریزشی در پای پله‌ها در رژیم جریان سطحی را بررسی کردند و نشان دادند جریان چرخشی درون این حفره‌ها بر هوادهی تأثیر می‌گذارد. بانگ و شلنکف (Bung & Schlenkoff, 2010) در یک مدل فیزیکی سرریز پلکانی، میکروزبری‌هایی را به دو صورت منظم و نامنظم روی پله‌ها قرار دادند و به این نتیجه رسیدند توزیع غلظت هوا تحت تأثیر میکروزبری‌ها قرار نمی‌گیرد، شیب تندتر سرریز منجر به کاهش راندمان هوادهی در سرریز پلکانی می‌شود درحالی‌که تغییر ارتفاع پله و دبی تأثیر چندانی بر راندمان هوادهی ندارد. داتراک و تاتوار (Dhatrak & Tatewar, 2014) با مدل‌سازی سازه سرریز پلکانی عملکرد هوادهی و توزیع فشار را در رژیم جریان سطحی بررسی کردند و نشان دادند با افزایش میزان دبی و تعداد پلکان‌ها، غلظت هوا افزایش می‌یابد. وستریچ و چانسون (Wuthrich & Chanson, 2015) تأثیر عملکرد سرریز پلکانی گابیونی با پوشش روی سطح پلکان و بدون آن را برای طیف وسیعی از دبی‌ها در آزمایشگاهی بررسی کردند. مقایسه اندازه‌گیری جریان هوا-آب برای همه سرریزهای پلکانی نشان داد که برای کمترین دبی، عملکرد هوادهی پیکربندی پلکانی-گابیون افزایش یافته است. برای دبی‌های بالاتر، راندمان هوادهی سرریز پلکانی غیرقابل نفوذ بیشتر از راندمان هوادهی سرریز پلکانی-گابیونی است. فلدر و چانسون (Felder & Chanson, 2017) وضعیت هوادهی و اتلاف انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی با شرایط پلکان مسطح، پلکان دارای آب پایه و پلکان دارای آب پایه متخلخل را بررسی کردند و نشان دادند توزیع سهم هوا، تعداد حباب‌ها، سطح تلاطم و سرعت سطحی تطابق خوبی با یکدیگر دارند و نوع پله تأثیر چندانی بر غلظت هوا ندارد. اسمعیلی ورکی و تیز مستطیلی می‌باشد. همچنین عمق پایاب، ارتفاع ریزش و دبی سرریز پارامتر مهمی برای هوادهی می‌باشند. ورملیتون و تیسنگ (Wormleaton & Tsang, 2000) با آزمایش‌هایی روی عملکرد هوادهی در سرریز کنگره‌ای-مستطیلی و مقایسه آن با سرریز خطی و کنگره‌ای-مثلی، به این نتیجه رسیدند که سرریز کنگره‌ای-مستطیلی عملکرد بهتری نسبت به دیگر گزینه‌های مورد بررسی دارد. در هدهای نسبی کم، تداخل سفره‌های ریزشی سرریز کنگره‌ای، در مقایسه با سرریز خطی، کاهش می‌یابد اما در هدهای نسبی بالا استغراق در سرریزهای کنگره‌ای باعث کاهش راندمان هوادهی، نسبت به سرریز خطی، می‌شود. علاوه بر این موارد، منصوری و همکاران (Mansouri et al., 2018) عملکرد سرریزهای کنگره‌ای-دو زنگه‌ای در مقایسه با سرریز خطی را بر افزایش اکسیژن محلول در آب تحت شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که طول سیکل در جهت جریان سرریزها، ضخامت تیغه ریزشی و الگوی جریان ریزشی از تاج سرریز سه پارامتر مؤثر بر مقدار اکسیژن محلول در آب در سرریزهای پلان کنگره‌ای هستند. به‌طور کلی سرریزهای کنگره‌ای با هندسه سه سیکل، در مقایسه با هندسه دو سیکل، عملکرد بهتری دارند. علاوه بر سرریزهای لبه تیز با پلان خطی یا کنگره‌ای، سرریزهای پلکانی نیز عملکرد مناسبی از نظر هوادهی به جریان و استهلاك انرژی دارند. چمنی و راجاراتنام (Chamani & Rajaratnam, 1999) عملکرد جذب هوا و اتلاف انرژی را در سرریزهای پلکانی، در مقایسه با سرریزهای صاف (تندآب)، بررسی کردند و نشان دادند که میانگین غلظت هوا در سرریز پلکانی بیشتر است. بایلر و همکاران (Bayler et al., 2006) با اجرای آزمایش‌هایی برای بررسی هوادهی در سرریزهای پلکانی نشان دادند جریان آب هنگام عبور از پله‌ها حباب‌های زیادی را به دام می‌اندازد و این مزیت بیشتر در رژیم جریان ریزشی مشاهده می‌شود و نیز اینکه ارتفاع ریزش و زاویه سرریز از پارامترهای مهم هوادهی

شیب‌دار) و برای دامنه‌ای وسیع از دبی جریان اجرا شد. مشاهده‌های آزمایشگاهی و مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که اثر زبری‌ها در شیب ۱:۳ نسبت به دیگر هندسه‌ها بارزتر است. بررسی نتایج حاکی از آن است که نصب زبری‌های بزرگ مقیاس با چیدمان یک‌درمیان در سازه کنترل تراز بستر با شیب ۱:۳ بهترین عملکرد را نسبت به وضعیت بدون زبری در این شیب دارد و می‌تواند مقدار اکسیژن محلول در آب را ۴۷ درصد افزایش دهد. با تغییر شیب سازه به ۱:۵، اعمال زبری بزرگ مقیاس با چیدمان متراکم، مقدار اکسیژن محلول در آب ۳۸ درصد نسبت به شرایط بدون زبری افزایش می‌یابد. با کاهش شیب سازه به ۱:۷، به دلیل طول زیاد سازه و گردش بیشتر جریان در میان المان‌های زبری، زبری بزرگ مقیاس با چیدمان یک‌درمیان عملکرد مناسب‌تری در این شیب دارد و مقدار اکسیژن محلول در آب را ۳۳ درصد افزایش می‌دهد.

پیش‌تر اشاره شد که سازه‌های سرریز پلکانی علاوه بر نقشی که در استهلاک انرژی جریان دارند، به دلیل اثری که پلکان‌های سرریز بر رژیم جریان عبوری و نیز قابلیت نصب آستانه و کنگره‌ها با هندسه‌های مختلف روی آن دارند، عملکرد مطلوبی در هوادهی به جریان عبوری از آن و افزایش اکسیژن محلول در آب از خود نشان می‌دهند. تاکنون بیشتر بررسی‌های روی عملکرد سرریزهای پلکانی، برای نیمرخ جانبی دوبعدی آن بوده است. در کاربردهای عملی، به‌ویژه در پروژه‌های هوادهی در تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و نیز در استخرهای آبی‌پروری، می‌توان از شکل‌های دیگری از سرریزهای پلکانی استفاده کرد. هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی با نصب و بدون نصب آستانه و کنگره‌ها با هندسه‌های مختلف بر تغییرات مقدار غلظت اکسیژن محلول در آب است.

همکاران (Esmaeili Varaki *et al.*, 2021) با ایجاد کنگره به ارتفاع‌های ۰/۵ و ۰/۷۵ ارتفاع پلکان (h)، فاصله کارگذاری برابر و دوبرابر ارتفاع پلکان برای دامنه‌ای وسیع از دبی جریان، تأثیر عملکرد سرریز پلکانی-کنگره‌ای را بر افزایش مقدار اکسیژن محلول در آب به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آزمایش‌ها برای سرریز با شیب‌های ۱:۱ تا ۱:۳ و عمق‌های پایاب برابر و دوبرابر ارتفاع پلکان اجرا شد. آن‌ها بیان داشتند که ایجاد کنگره روی پلکان‌ها، به دلیل اختلاط بیشتر جریان عبوری از روی پلکان‌های سرریز و نیز افزایش مدت زمان جریان عبوری از آن، راندمان اکسیژن محلول در آب را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. مقایسه نتایج نشان داده است که از میان هندسه‌های مختلف مورد بررسی، ارتفاع کنگره ۰/۷۵ h به دلیل افزایش شدت ریزش جت‌ها در طول سرریز و نیز در حوضچه پایین دست آن و در نتیجه ورود بیشتر حباب‌های هوا به توده جریان، عملکرد بهتری در افزایش مقدار اکسیژن محلول در آب دارد. نینا و همکاران (Nina *et al.*, 2022) تأثیر سه هندسه پله‌های افقی و شیب‌دار را بر عملکرد هوادهی و انتقال توده جریان هوا-آب برای دامنه‌ای وسیع از دبی‌ها در سرریز پلکانی با ۱۲ پلکان بررسی کردند و نشان دادند بیشترین هوادهی مربوط به سازه سرریز پلکانی با پلکان‌های افقی و کمترین مقدار هوادهی مربوط به سرریز پلکانی با پلکان‌های شیب‌دار روبه‌پایین است.

در کنار انواع سرریزهای یاد شده، سازه‌های کنترل تراز بستر که ریزش جریان یا پرش هیدرولیکی را در پایین دست خود ایجاد نمایند نیز قادر به هوادهی و افزایش اکسیژن محلول آب هستند. اسمعیلی ورکی و همکاران (Esmaeili Varaki *et al.*, 2022) تأثیر چیدمان زبری‌های بزرگ مقیاس با آرایش‌های متفاوت روی سازه کنترل تراز بستر با سطح شیب‌دار را بر مقدار اکسیژن محلول در آب بررسی کردند. آزمایش‌ها در سه شیب سازه ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷ با شرایط پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق (پرش هیدرولیکی روی سطح

مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

$$f_1(N, h, l, x, d_p, y_c, q, \sigma, g, \rho, \mu, C_u, C_d, C_s, T) = 0 \quad (1)$$

با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، راندمان افزایش اکسیژن محلول در سازه‌های سرریز پلکانی-هرمی را می‌توان به صورت (رابطه ۲) نوشت:

$$\frac{C_d}{C_s} = f_2\left(N, \frac{h}{l}, \frac{h}{y_c}, \frac{x}{y_c}, \frac{d_p}{y_c}, \frac{C_u}{C_s}, Fr, Re, We, T\right) \quad (2)$$

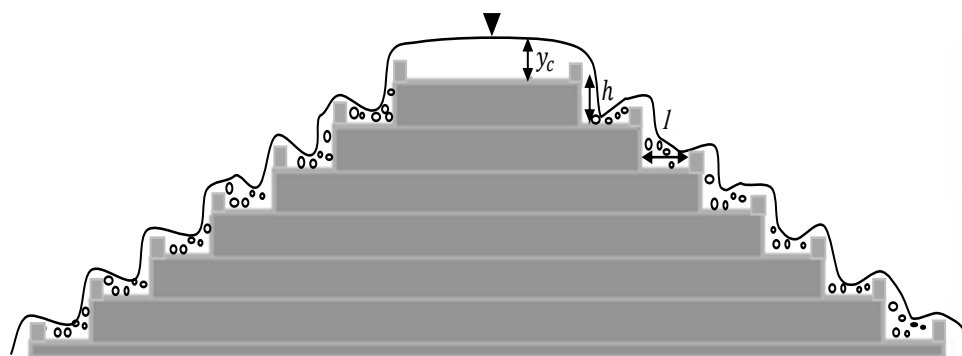
با توجه به اینکه عمق جریان در لبه پلکان ورودی همواره بیش‌تر از ۲ سانتی‌متر و جریان عبوری از سازه سرریز پلکانی-هرمی همواره آشفته است، می‌توان از نیروهای کششی و لزوجت چشم‌پوشی کرد (Subramanya, 1986). در نتیجه، در رابطه (۲) می‌توان از اعداد رینولدز (Re) و وبر (We) صرف‌نظر کرد. علاوه بر این، به جهت ثابت بودن تعداد و شیب (h/l) پلکان‌ها و عمق پایاب در همه آزمایش‌ها و به دلیل تغییر محدود دما در طول آزمایش‌ها، اثر پارامترهای مذکور ثابت یا قابل صرف‌نظر کردن است. در نتیجه رابطه (۲) پس از ساده‌سازی به صورت رابطه ۳ خلاصه می‌شود:

$$\frac{C_d}{C_s} = f_3\left(\frac{h}{y_c}, \frac{x}{y_c}, \frac{C_u}{C_s}, Fr\right) \quad (3)$$

در این تحقیق، رابطه (۳) به عنوان رابطه پایه‌ای برای اجرای آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج به کار گرفته شد.

تحلیل ابعادی به کمک نوعی فشرده کردن، به رفع پیچیدگی و کاستن از تعداد متغیرهای تجربی مؤثر روی پدیده‌ای معین فیزیکی می‌انجامد. اگر پدیده‌ای به n متغیر با بعد بستگی داشته باشد، تحلیل ابعادی تعداد متغیرها را به k متغیر بی‌بعد کاهش می‌دهد و این کاهش به پیچیدگی مسئله بستگی دارد. پس از آن، براساس این متغیرها و با مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به رابطه‌های تجربی مناسبی دست یافت.

پارامترهای تأثیرگذار بر مقدار اکسیژن محلول در آب در پایین‌دست سرریزهای پلکانی-هرمی (C_d)، شامل تعداد پلکان (N)، ارتفاع پلکان (h)، طول پلکان (l)، هندسه آستانه (x)، عمق پایاب (d_p)، عمق بحرانی (y_c) دبی واحد عرض (q)، کشش سطحی سیال (δ)، شتاب ثقل (g)، جرم مخصوص سیال (ρ) و لزوجت دینامیکی سیال (μ)، غلظت اکسیژن محلول جریان ورودی (C_u)، غلظت اکسیژن محلول اشباع آب (C_s) و دما (T) است که آن‌ها را می‌توان به صورت (رابطه ۱) بیان کرد. در شکل (۱) برخی از پارامترها مذکور نشان داده شده است.

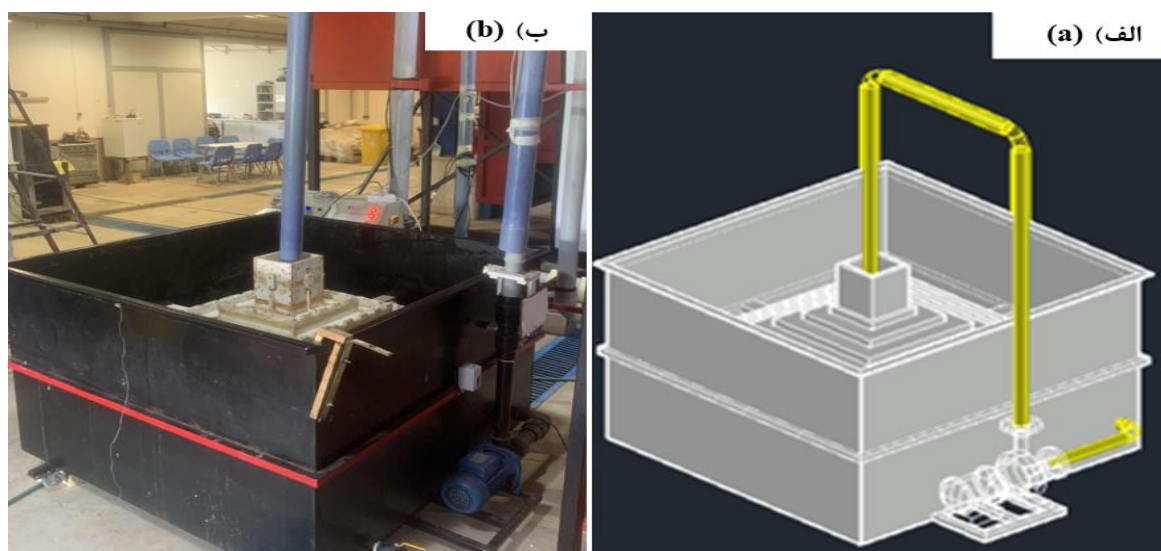


شکل ۱- نیمرخ طولی سرریز پلکانی-هرمی و معرفی پارامترهای مؤثر

Fig. 1. Longitudinal profile of stepped-pyramidal weir and related effective parameter

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش
 آزمایش‌ها روی یک مدل سرریز پلکانی-هرمی در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان اجرا شده است. مدل فیزیکی سرریز پلکانی-هرمی از صفحات PVC با شیب ثابت ۱:۲ و شش پلکان به ابعاد ۴ سانتی‌متر ارتفاع، ۸ سانتی‌متر طول ساخته شد و روی مخزنی به ابعاد ۱/۵ در ۱/۵ متر طول و عرض و یک متر ارتفاع نصب گردید (شکل ۲). برای تأمین دبی جریان، از یک دستگاه پمپ سانتریفیوژ با دبی ۸ لیتر بر ثانیه و برای اندازه‌گیری دبی جریان از دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک بادقت $\pm 0.1\%$ لیتر بر ثانیه استفاده شد.

برای بررسی تأثیر نصب آستانه و کنگره‌هایی با ارتفاع نصف ارتفاع پلکان و فاصله‌های کارگذاری مختلف بر عملکرد اکسیژن محلول در آب، پنج هندسه مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) مشخصات هندسی و در شکل (۳) تصویرهایی از نمای سه بعدی از سرریزهای پلکانی-هرمی مورد آزمایش آورده شده است. لازم است یادآوری شود، ارتفاع آستانه بر اساس نتایج آزمایشگاهی عملکرد آستانه بر افزایش اکسیژن محلول در آب در سرریزهای پلکانی انتخاب شد که اسمعیلی ورکی و همکاران (Esmaeili Varaki et al., 2021) به‌دست آورده بودند.

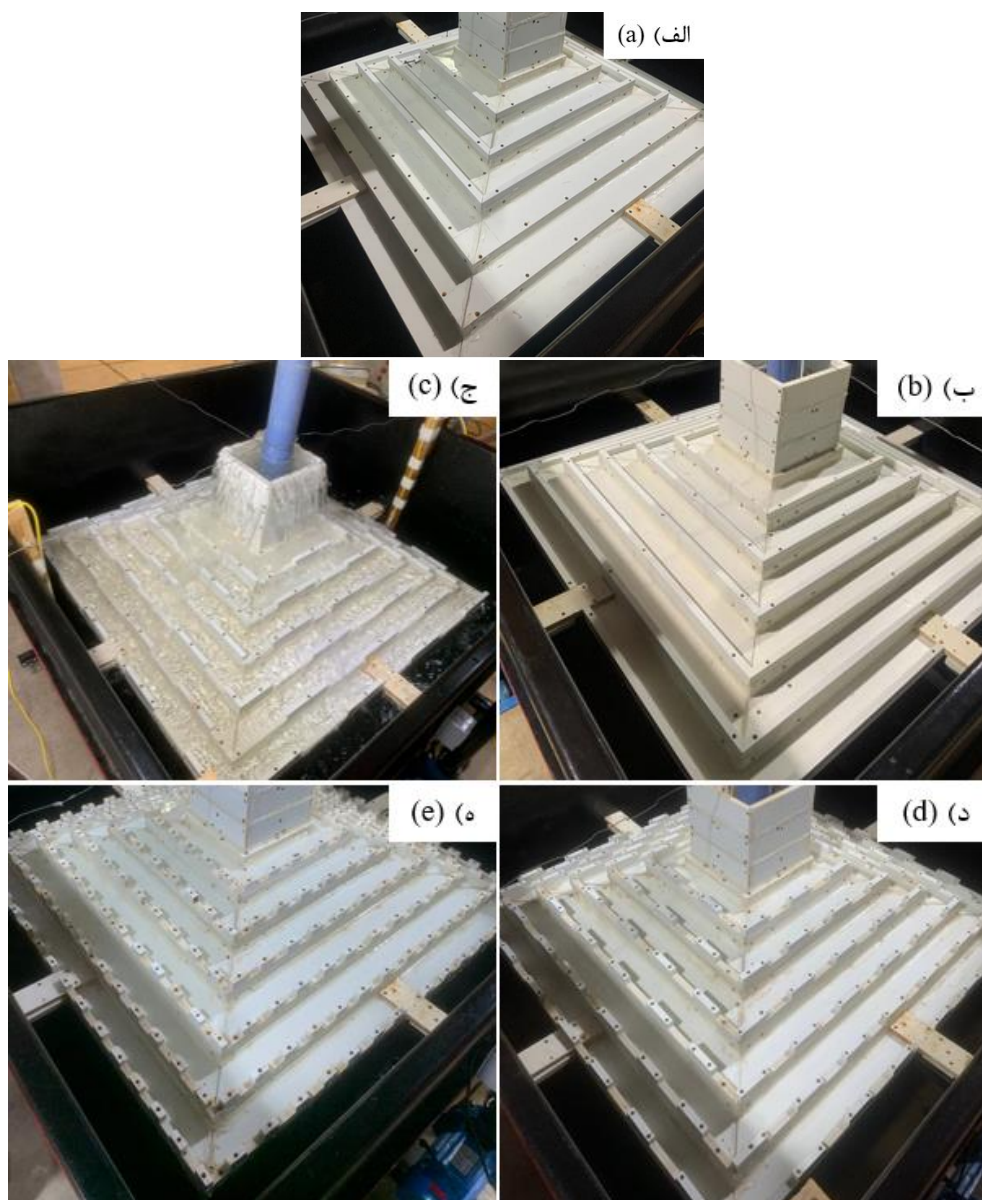


شکل ۲- الف) طرح کلی از سرریز آزمایشگاهی و ب) نمایی از سرریز آزمایشگاهی
 Fig. 2. a) Sketch of experimental weir and b) view of experimental weir

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-هرمی

Table 1. Geometric characteristic of stepped-pyramidal weirs

دامنه دبی Range of discharge (l/s ، لیتر بر ثانیه)	ارتفاع کنگره Height of labyrinth (H ، متر)	فاصله کنگره Space between labyrinth (L ، متر)	ارتفاع آستانه Height of sill (h ، متر)	هندسه Geometry
۲-۷	.	.	.	SG ₁
۲-۷	.	.	۰/۰۲	SG ₂
۲-۷	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۰۲	SG ₃
۲-۷	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۲	SG ₄
۲-۷	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	SG ₅



شکل ۳- تصویرهایی از سرریزهای پلکانی-هرمی آزمایشگاهی مورد مطالعه: الف) بدون آستانه (SG₁), ب) با آستانه (SG₂), ج) با آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 4h (SG₃), د) با آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 2h (SG₄), ه) با آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG₅)

Fig. 3. Photos of laboratory stepped-pyramidal weirs: a) without sill (SG₁), b) with sill (SG₂), c) with sill and labyrinth with space of 4h (SG₃), d) with sill and labyrinth with space of 2h (SG₄), e) with sill and labyrinth with space of h (SG₅)

شرکت Aqualytic که در دو وجه مخزن نصب شده بود، به طور پیوسته تا رسیدن غلظت اکسیژن محلول در آب به سطح اولیه اندازه‌گیری و مقادیر نمایش داده شده توسط مانیتور دستگاه فیلم‌برداری شد. عملکرد سرریزها برای دامنه تغییرات غلظت اکسیژن محلول در آب ۲ تا ۷ میلی‌گرم بر

در هر هندسه از سرریز و هر دبی جریان، ابتدا غلظت اکسیژن محلول در آب در مخزن تأمین آب با استفاده از محلول سولفید سدیم تا دو میلی‌گرم بر لیتر کاهش داده شد و بعد از آن با برقراری جریان، مقدار اکسیژن محلول توسط دو عدد اکسیژن‌سنج (DO meter) مدل AL200xi ساخت

پلکان در مسیر ریزش به تدریج دچار کاهش ضخامت می‌شوند و در پلکان‌های ۵ و ۶ به صورت غیرپیوسته ریزش می‌کنند. با نصب آستانه در پای هر یک از پلکان‌ها در هندسه SG_2 ، امکان تشکیل پرش هیدرولیکی و شرایط بهتر اختلاط آب و هوا فراهم می‌شود. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داد پرش هیدرولیکی در سطح پلکان‌ها فرصت بهتری برای اختلاط است ولی در دبی یادشده (h/y_c بیشتر از ۷/۴) به دلیل کاهش ضخامت تیغه ریزشی از پلکان‌های سوم به بعد و نیز کاهش سرعت برخورد تیغه‌های ریزشی به پلکان‌های بعدی به دلیل اتلاف انرژی در هر یک از پلکان‌ها، شدت آشفستگی کاهش می‌یابد و در نتیجه عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی با اعمال آستانه‌های مختلف ساده و پلکانی کنگره‌ای کاهش پیدا می‌کند.

همان‌طور که در شکل (۴-الف) دیده می‌شود، برای دبی مذکور، مدت زمان رسیدن DO از ۲ به ۷ میلی‌گرم بر لیتر برای هندسه‌های مختلف سرریز پلکانی-هرمی بین ۷۱۴ تا ۹۹۰ ثانیه و به‌طور متوسط ۸۵۷ ثانیه است. کمترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_1 (سرریز پلکانی-هرمی بدون آستانه) و بیشترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_5 (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری برابر با ارتفاع پلکان) است. به‌عنوان جمع‌بندی در شرایط هیدرولیکی مذکور، سرریز پلکانی-هرمی در هندسه‌های مختلف توانسته است به‌طور متوسط ۳/۲ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول در آب را تزریق کند. در شکل (۵)، عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی بدون آستانه و با آستانه‌های مختلف در h/y_c برابر با ۵/۶ (دبی ورودی ۳ لیتر بر ثانیه) برای پلکان اول نشان داده شده است. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که با افزایش دبی جریان ضخامت تیغه‌های ریزشی از روی پلکان‌های ابتدایی افزایش می‌یابد ولی کاهش ضخامت تیغه‌های ریزشی در پلکان‌های انتهایی همچنان مشاهده می‌شود.

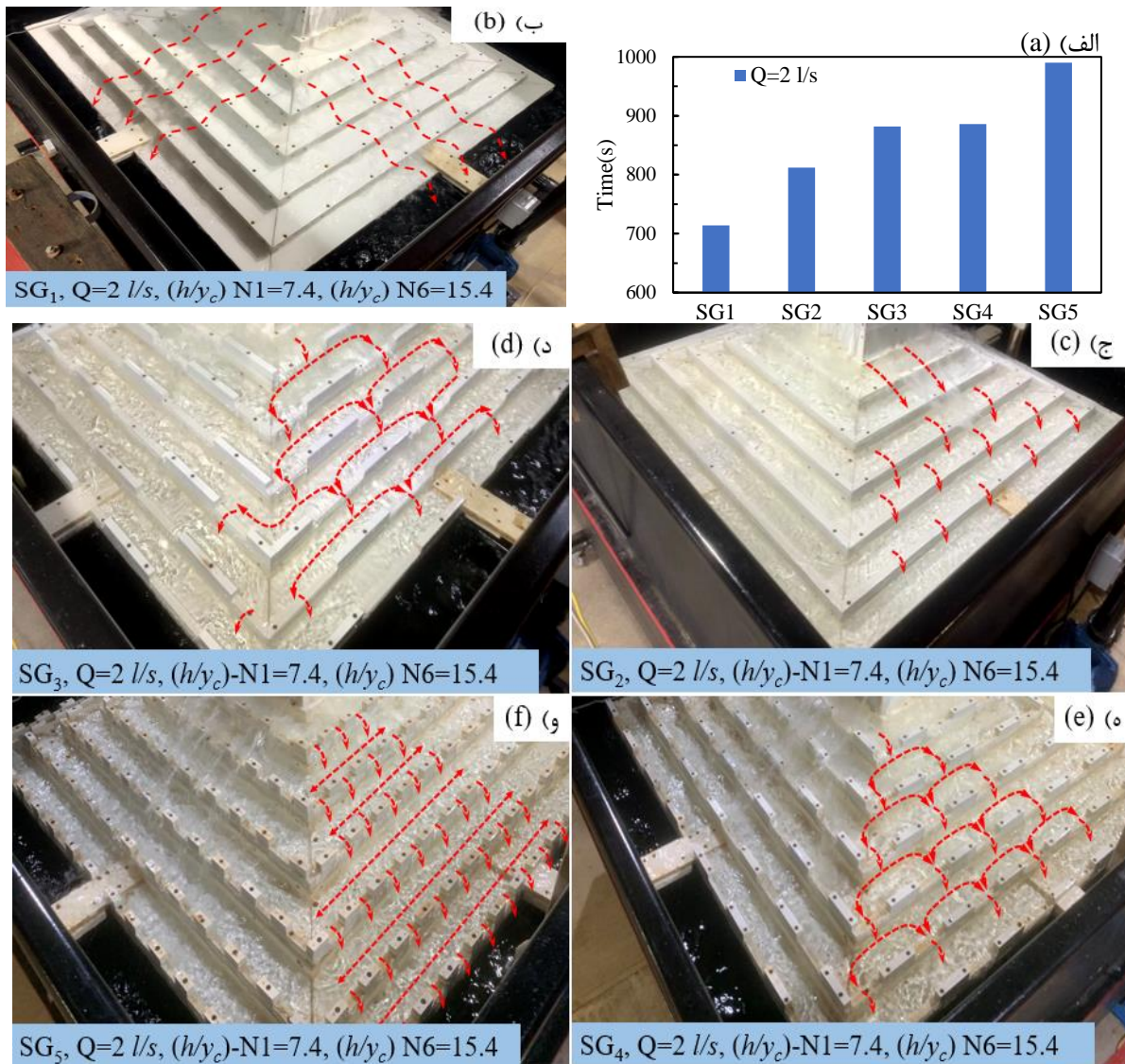
لیتر بررسی گردید. در این تحقیق برای بررسی عملکرد سرریز پلکانی-هرمی و نیز تأثیر نصب آستانه پیوسته و کنگره‌ای بر افزایش اکسیژن محلول در آب، در مجموع ۳۰ آزمایش برای هندسه‌ها و دبی‌های مختلف صورت گرفت.

نتایج و بحث

به‌طور کلی مکانیزم ورود هوا به آب در سرریزهای پلکانی-هرمی شامل ورود هوا به تیغه‌های ریزشی از روی پلکان و ریزش توده دو فازی آب و هوا به مخزن سرریز است. لازم است گفته شود ارتفاع ریزش جت جریان به مخزن جمع‌کننده نیز معادل ارتفاع پلکان در نظر گرفته شد.

با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان در سرریزها پلکانی با شیب ۱:۲، در $h/y_c < ۱/۰۵$ جریان سطحی، در $۱/۴۳ < h/y_c < ۱/۰۵$ جریان انتقالی و در $h/y_c > ۱/۴۳$ رژیم جریان ریزشی شکل می‌گیرد (Khatouria, 2005). در سرریز پلکانی-هرمی، طول کلی سرریز در هر یک از پلکان‌های ۱ تا ۶ از رأس هرم تا خروجی از آن در حال افزایش است. به منظور بررسی رژیم جریان عبوری از پلکان‌ها، در جدول (۲) مقدار h/y_c در هر یک از پلکان‌ها برای دبی‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در دبی‌های کم در همه پلکان‌های رژیم جریان ریزشی است و با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر نیز رژیم جریان همچنان ریزشی باقی می‌ماند. لازم است گفته شود بر اساس نتایج تحقیقات حبیب پناه و همکاران (Habibpanah et al., 2020)، بیشترین راندمان افزایش اکسیژن محلول در آب در سرریزهای پلکانی، در رژیم جریان ریزشی رخ می‌دهد.

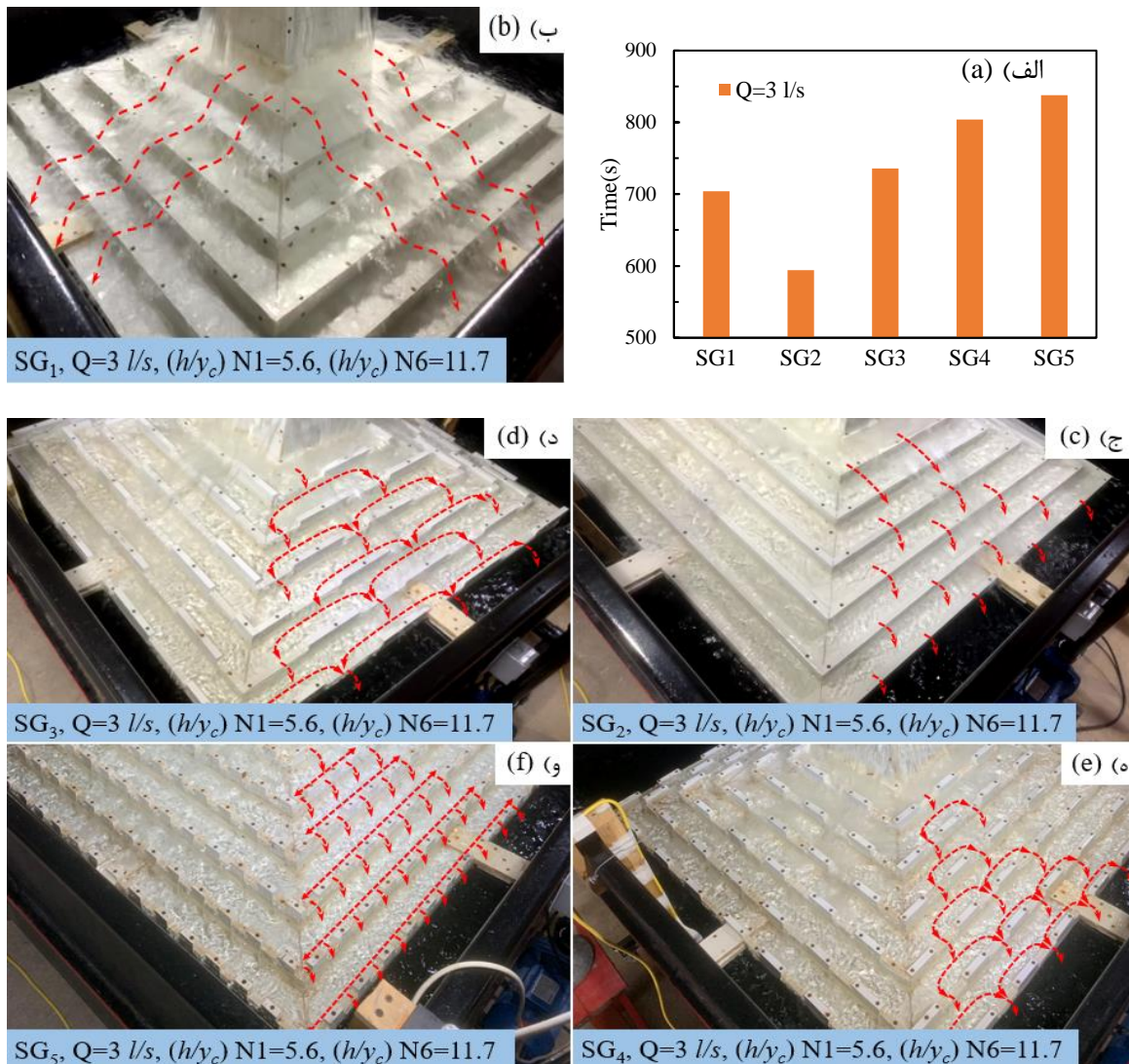
عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی بدون آستانه و با آستانه‌های مختلف در h/y_c برابر با ۷/۴ (دبی ورودی ۲ لیتر بر ثانیه) برای پلکان اول به همراه تصاویری از الگوی جریان ریزشی از آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در شرایط بدون نصب آستانه، تیغه‌های ریزشی به دلیل افزایش طول



شکل ۴- الف) مقایسه عملکرد زمانی افزایش DO در هندسه‌های مختلف سرریز پلکانی-هرمی برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه و تصاویر سرریزهای پلکانی-هرمی با هندسه‌های مختلف: ب) بدون آستانه (SG1)، ج) با آستانه (SG2)، د) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری $4h$ (SG3)، ه) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری $2h$ (SG4)، و) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG5)

Fig. 4. a) Temporal performance of DO variation for different geometries of stepped-pyramidal weirs at flow discharge of 2 l/s and Photos of stepped-pyramidal weirs with different geometries: b) without sill (SG1), c) with sill (SG2), d) sill and labyrinth with space of $4h$ (SG3), e) sill and labyrinth with space of $2h$ (SG4), f) sill and labyrinth with space of h (SG5)

مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که در دبی و عمق نسبی بحرانی یادشده، به دلیل افزایش سرعت تیغه‌های ریزشی و نیز اختلاط آب و هوای ناشی از ریزش جریان در سطوح پلکان‌ها، عملکرد کلی سازه در افزایش اکسیژن محلول در آب بهبود می‌یابد. بررسی نتایج افزایش محلول در آب نشان داد که از میان هندسه‌های مختلف، گزینه سرریز پلکانی-هرمی با نصب آستانه در پای هر یک از پلکان‌ها (هندسه SG_2) عملکرد بهتری نسبت به دیگر هندسه‌ها دارد. در هندسه‌های با آستانه کنگره‌ای، به دلیل تمرکز بیشتر جریان از میان کنگره‌ها، تلاطم بیشتری در اثر برخورد تیغه‌های ریزشی به حوضچه پای هر پله به وجود می‌آید ولی به نظر می‌رسد که سطح تماس یکنواخت‌تر تیغه ریزشی از سطوح پلکان‌ها در هندسه با آستانه پیوسته عملکرد بهتری دارد.



شکل ۵- الف) مقایسه عملکرد زمانی افزایش اکسیژن محلول در آب در هندسه های مختلف سرریز پلکانی-هرمی برای دبی ۳ لیتر بر ثانیه و تصاویر سرریزهای پلکانی-هرمی با هندسه های مختلف: ب) بدون آستانه (SG₁)، ج) با آستانه (SG₂)، د) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 4h (SG₃)، ه) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 2h (SG₄)، و) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG₅)

Fig. 5. a) Temporal performance of DO variation for different geometries of stepped-pyramidal weirs at flow discharge of 3 l/s and Photos of stepped-pyramidal weirs with different geometries: b) without sill (SG₁), c) with sill (SG₂), d) sill and labyrinth with space of 4h (SG₃), e) sill and labyrinth with space of 2h (SG₄), f) sill and labyrinth with space of h (SG₅)

مقایسه نتایج در شکل (۵-الف) نشان می دهد در دبی گفته شده، مدت زمان رسیدن اکسیژن محلول در آب از ۲ به ۷ میلی گرم بر لیتر، بین ۵۹۴ تا ۸۳۸ ثانیه و به طور متوسط ۷۳۵ ثانیه است. کمترین مقدار آن مربوط به هندسه SG₂ (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه پیوسته) و بیشترین مقدار آن مربوط به هندسه SG₅ (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره ای و فاصله کارگذاری برابر با ارتفاع پلکان) است. به طور خلاصه می توان گفت در شرایط هیدرولیکی مذکور، سرریز پلکانی-هرمی در هندسه های مختلف توانسته است به طور میانگین ۲/۵ میلی گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول در آب را وارد جریان کند. در شکل (۶)، اثر سرریزهای پلکانی-هرمی، بدون آستانه و با آستانه های متفاوت، در شرایط h/y_c برابر با ۴/۷ (با دبی ورودی ۴ لیتر بر ثانیه) برای پلکان اول بر افزایش اکسیژن

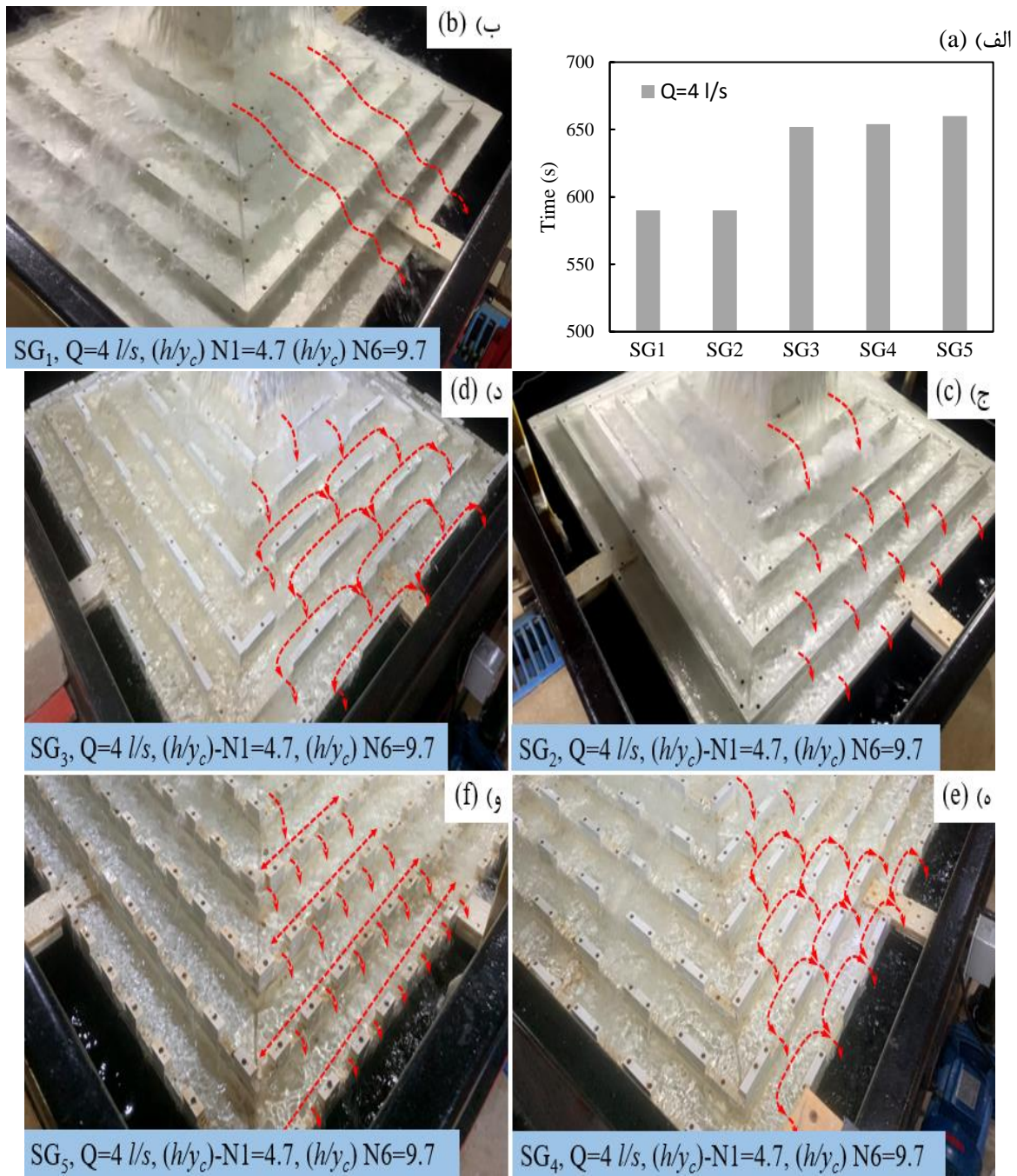
مذکور، سرریز پلکانی-هرمی در هندسه‌های مختلف توانسته است به‌طور متوسط $2/2$ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول در آب را وارد کند. در شکل (۷)، عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی بدون آستانه و با آستانه‌های متفاوت در شرایط h/y_c برابر با ۴ (دبی ورودی ۵ لیتر بر ثانیه) برای پلکان اول، به همراه تصویرهای الگوی جریان ریزشی نشان داده شده است. با افزایش دبی جریان، ضخامت تیغه ریزشی عبوری از پلکان‌ها، سرعت حرکت آن‌ها و نیز مقدار تلاطم حاصل از اختلاط در پرش هیدرولیکی پای هر یک از پلکان‌های دارای آستانه یا آستانه کنگره‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود که اثر نصب آستانه‌ها نسبت به پلکان ساده تدریجاً محسوس‌تر شود. همان‌طور که در شکل (۷-الف) دیده می‌شود، در شرایط هیدرولیکی مذکور (دامنه h/y_c بین ۴ تا $8/3$)، اثر نصب آستانه پیوسته و کنگره‌ای بهتر است تا در پلکان ساده. بنابراین می‌توان گفت دبی و عمق بحرانی نسبی مذکور، مقدار حدی است که بعد از آن، گزینه سرریزهای پلکانی آستانه‌دار، که منجر به تشکیل پرش هیدرولیکی در هر یک از پلکان‌ها می‌شوند، تفاوت قابل توجهی در عملکرد افزایش اکسیژن محلول در آب ایجاد می‌کنند.

مقایسه نتایج نشان داد که در دبی مذکور مدت زمان رسیدن اکسیژن محلول در آب از ۲ به ۷ میلی‌گرم بر لیتر، بین ۴۱۰ تا ۵۸۲ ثانیه و به‌طور متوسط ۴۹۴ ثانیه است که کمترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_4 (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری دوبرابر ارتفاع پلکان) و بیشترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_1 (سرریز پلکانی-هرمی ساده) است؛ بنابراین برای شرایط هیدرولیکی مذکور، سرریز پلکانی-هرمی در هندسه‌های مختلف توانسته است به‌طور متوسط $2/2$ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول در آب را وارد کند.

محلول در آب به همراه تصویرهای الگوی جریان ریزشی نمایش داده شده است. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که با افزایش دبی، ضخامت تیغه‌های ریزشی نه تنها در پلکان‌های ابتدایی بلکه در پلکان‌های بعدی نیز افزایش می‌یابد، هرچند کاهش ضخامت این تیغه‌ها در پلکان‌های انتهایی هم‌چنان دیده می‌شود. بررسی رفتار هیدرولیکی جریان نشان می‌دهد در دبی و عمق نسبی بحرانی مذکور، به دلیل افزایش تشدید برخورد تیغه‌های ریزشی و تقویت اختلاط آب و هوا ناشی از ریزش جریان روی پلکان‌ها، عملکرد کلی سازه در افزایش میزان اکسیژن محلول نسبت به دبی‌های کمتر هم‌چنان صعودی است.

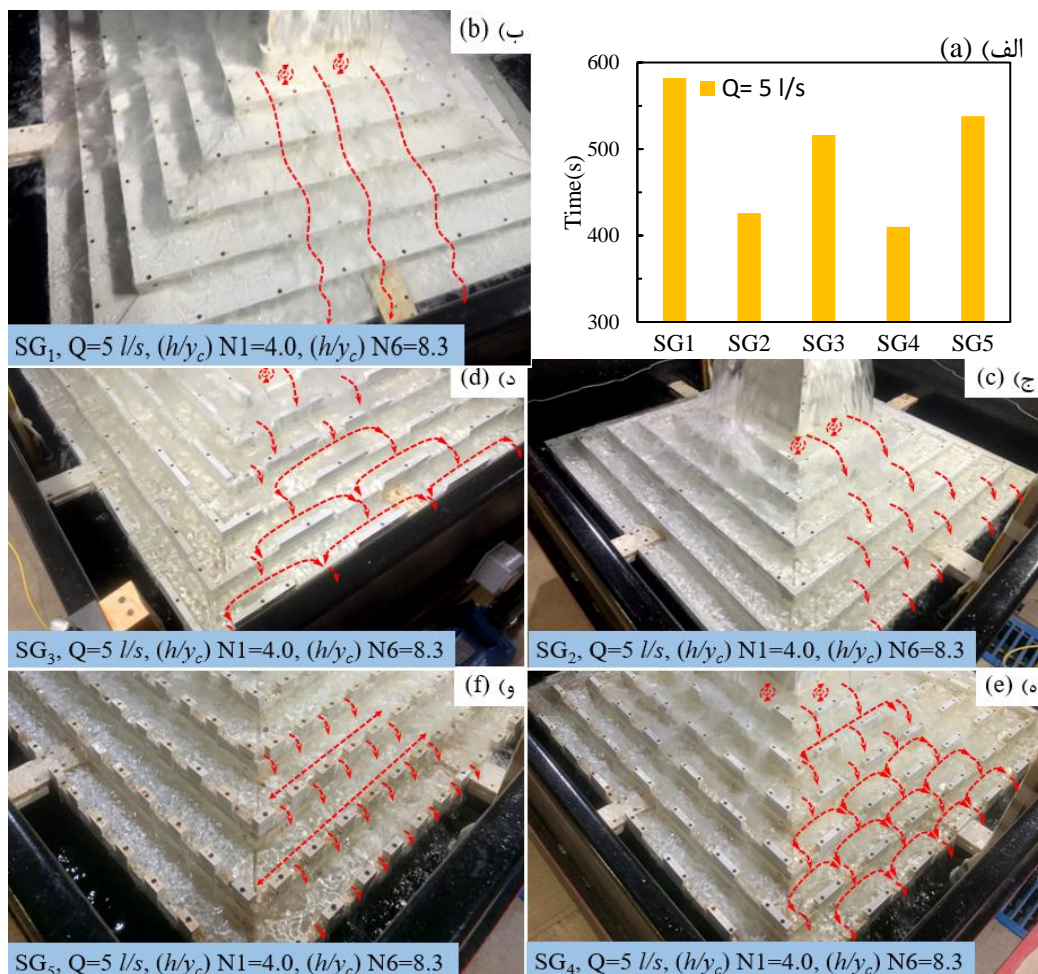
بررسی نتایج افزایش میزان اکسیژن محلول در آب نشان می‌دهد در میان هندسه‌های مختلف مورد آزمایش، سرریز پلکانی-هرمی بدون آستانه (SG_1) و با آستانه پیوسته (SG_2)، عملکردی مشابه و بهتری نسبت به دیگر هندسه‌ها ارائه داده‌اند، با این تفاوت که هندسه SG_2 اندکی بهتر از هندسه SG_1 عمل کرده است. در هندسه‌های دارای آستانه کنگره‌ای، با اینکه تمرکز جریان از میان کنگره‌هاست و به دلیل محدود شدن عرض ریزش از لبه پلکان‌ها منجر به تشدید تلاطم و افزایش شدت برخورد تیغه‌های ریزشی به حوضچه‌های پله می‌شود، اما در شرایط هیدرولیکی مربوط به دبی مذکور، سطح تماس پیوسته‌تر تیغه‌های ریزشی با پلکان‌ها در هندسه دارای آستانه‌های پیوسته، عملکرد بهتری را از نظر افزایش اکسیژن محلول در آب ارائه می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، در دبی و عمق بحرانی نسبی یاد شده، مدت زمان رسیدن اکسیژن محلول در آب از ۲ به ۷ میلی‌گرم بر لیتر، بین ۵۹۰ تا ۶۶۰ ثانیه و به‌طور متوسط ۶۲۹ ثانیه است که کمترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_2 (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه پیوسته) و بیشترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_5 (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری برابر با ارتفاع پلکان) است. به این ترتیب در شرایط هیدرولیکی



شکل ۶- الف) مقایسه عملکرد زمانی افزایش اکسیژن محلول در آب در هندسه های مختلف سرریز پلکانی-هرمی برای دبی ۴ لیتر بر ثانیه و تصویر سرریزهای پلکانی-هرمی با هندسه های مختلف: ب) بدون آستانه (SG₁)، ج) با آستانه (SG₂)، د) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری ۴h (SG₃)، ه) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری ۲h (SG₄)، و) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG₅)

Fig. 6. a) Temporal performance of DO variation for different geometries of stepped-pyramidal weirs at flow discharge of 4 l/s and Photos of stepped-pyramidal weirs with different geometries: b) without sill (SG₁), c) with sill (SG₂), d) sill and labyrinth with space of 4h (SG₃), e) sill and labyrinth with space of 2h (SG₄), f) sill and labyrinth with space of h (SG₅)

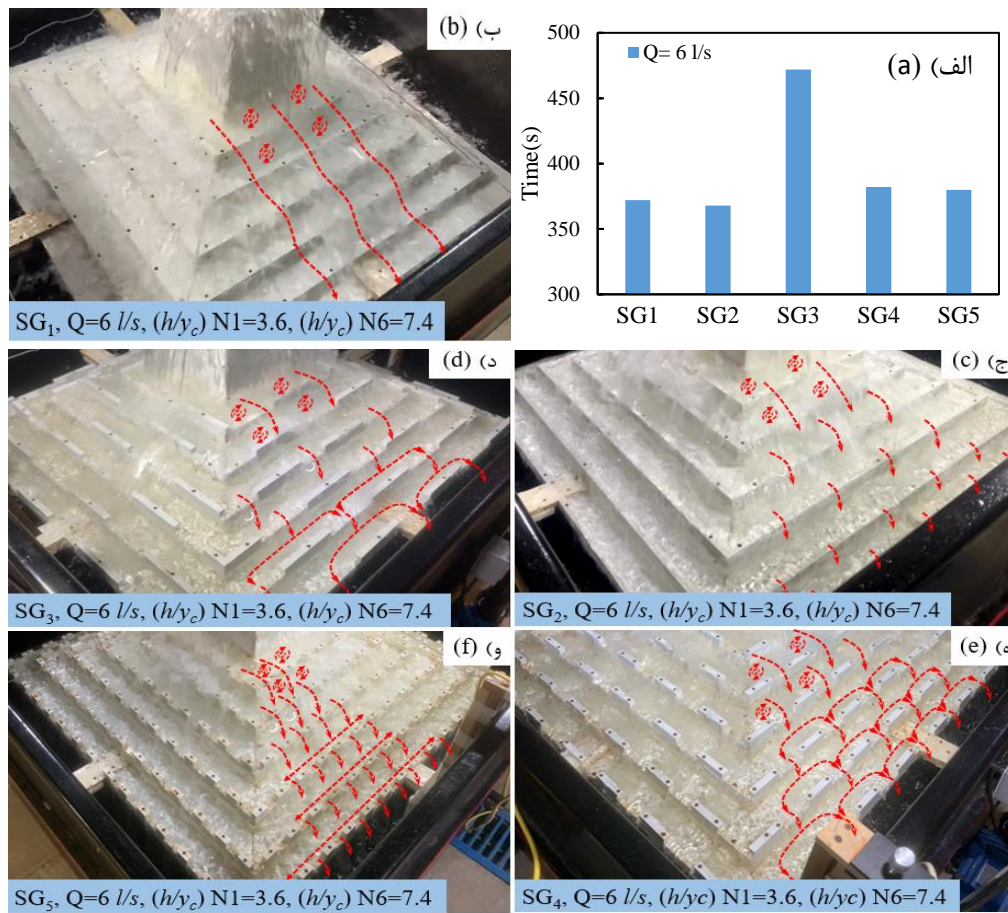


شکل ۷- الف) مقایسه عملکرد زمانی افزایش اکسیژن محلول در آب در هندسه‌های مختلف سرریز پلکانی-هرمی برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تصویرهای سرریزهای پلکانی-هرمی با هندسه‌های مختلف: ب) بدون آستانه (SG₁)، ج) با آستانه (SG₂)، د) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 4h (SG₃)، ه) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 2h (SG₄)، و) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG₅)

Fig. 7. a) Temporal performance of DO variation for different geometries of stepped-pyramidal weirs at flow discharge of 5 l/s and Photos of stepped-pyramidal weirs with different geometries: b) without sill (SG₁), c) with sill (SG₂), d) sill and labyrinth with space of 4h (SG₃), e) sill and labyrinth with space of 2h (SG₄), f) sill and labyrinth with space of h (SG₅)

عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی بدون آستانه و با آستانه‌های مختلف بر افزایش اکسیژن محلول در آب در h/y_c برابر با $3/6$ (دبی ورودی ۶ لیتر بر ثانیه) برای پلکان اول به همراه تصویرهایی از الگوی جریان ریزشی از آن در شکل (۸) نشان داده شده است. رفتار کلی جریان در این دبی مشابه رفتار کلی جریان در دبی قبلی است ولی به دلیل سرعت بیشتر تیغه‌های ریزشی از روی سطوح پلکان‌ها، میزان اختلاط آب و هوا بیشتر می‌شود. در دبی و عمق بحرانی نسبی مذکور، تلاطم بیشتری در پای هر یک از پلکان‌های همراه با آستانه یا آستانه کنگره‌ای مشاهده شده است. همان‌طور که

در شکل (۸-الف) دیده می‌شود، به‌استثنای هندسه SG₃ (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری چهار برابر ارتفاع پلکان)، سایر سازه‌ها عملکرد مشابهی دارند. به‌عبارت‌دیگر، کاهش بیشتر فاصله بین کنگره‌ها از $4h$ به $2h$ و h ، توانسته است عملکرد را بهبود بخشد. به‌طور کلی، آستانه کنگره‌ای منجر به ایجاد تیغه‌های ریزشی جریان با دو ضخامت کمتر (گذر از روی کنگره) و بیشتر (گذر از روی آستانه) می‌شود. از این‌رو تلاطم و آشفتگی در حوضچه پای هر پلکان بسته به تعداد کنگره‌ها بسیار متغیر است.



شکل ۸- الف) مقایسه عملکرد زمانی افزایش اکسیژن محلول در آب در هندسه های مختلف سرریز پلکانی-هرمی برای ۶ لیتر بر ثانیه و تصویر سرریزهای پلکانی-هرمی با هندسه های مختلف: ب) بدون آستانه (SG1)، ج) با آستانه (SG2)، د) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری $4h$ (SG3)، ه) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری $2h$ (SG4)، و) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG5)

Fig. 8. a) Temporal performance of DO variation for different geometries of stepped-pyramidal weirs at flow discharge of 6 l/s and Photos of stepped-pyramidal weirs with different geometries: b) without sill (SG1), c) with sill (SG2), d) sill and labyrinth with space of $4h$ (SG3), e) sill and labyrinth with space of $2h$ (SG4), f) sill and labyrinth with space of h (SG5)

با توجه به عملکرد افزایش اکسیژن محلول در آب سرریزهای مورد آزمایش در دبی مذکور که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، مدت زمان رسیدن اکسیژن محلول در آب از ۲ به ۷ میلی گرم بر لیتر، بین ۳۶۸ تا ۴۷۲ ثانیه و به طور متوسط ۳۹۵ ثانیه است که کمترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_2 (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه پیوسته) و بیشترین مقدار آن مربوط به هندسه SG_3 (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره ای و فاصله کارگذاری چهار برابر ارتفاع پلکان) است. به عنوان جمع بندی در شرایط هیدرولیکی مذکور، سرریز پلکانی-هرمی در هندسه های مختلف توانسته است به طور متوسط $2/3$ میلی گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول در آب را وارد کند.

در شکل (۹)، عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی بدون آستانه و با آستانه های مختلف در h/y_c برابر با $3/2$ (دبی ورودی ۷ لیتر بر ثانیه) برای پلکان اول به همراه تصویرهایی از الگوی جریان عبوری از آن نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رود، با افزایش دبی جریان، سرعت جریان تیغه های ریزشی جریان عبوری از پلکان ها افزایش می یابد و به تبع آن اختلاط، آشفستگی و ورود هوا به جریان بیشتر

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد سرریز پلکانی-هرمی بر مقدار اکسیژن محلول در آب

تزیق بر واحد دبی ابتدا روند کاهش دارد ولی در دامنه دبی میانی، یعنی ۴ تا ۶ لیتر ثانیه، تقریباً ثابت می ماند. البته روند کاهش سرریز پلکانی-هرمی ساده (هندسه SG₁) همچنان ادامه دارد. به عبارت دیگر، با نصب آستانه و امکان تشکیل پرش هیدرولیکی عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی با آستانه‌های مختلف به تدریج با افزایش دبی در محدوده $3 < h/y_c < 4$ برای پلکان ورودی و $6 < h/y_c < 9$ برای پلکان خروجی، همگام با روند افزایشی دبی جریان، افزایش می یابد. همان طور که در نمودارهای شکل (۱۰)، دیده می شود، از میان هندسه‌های مختلف هندسه‌های سرریز پلکانی-هرمی با آستانه پیوسته (SG₂) و سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری دوبرابر ارتفاع پلکان (SG₄)، گزینه‌های مطلوب تر هستند. به عبارت دیگر، تقویت پرش هیدرولیکی با نصب آستانه توانسته است عملکرد سرریز پلکانی را در افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب بهبود بخشد و در کنار آن نصب آستانه کنگره‌ای باعث می شود تا جریان عبوری از فضای بین کنگره‌ها سرعت بیشتری بیابد و اختلاط و آشفته‌گی بالاتری در پرش هیدرولیکی در پلکان پایین دستی خود ایجاد کند، ولی رفتار ترکیبی مذکور تنها در هندسه SG₄ مطلوب تر خواهد بود.

می شود. مشاهده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که در دبی مذکور هرچه ابعاد کنگره‌ها کوچک تر باشد نقش هوادهی آن‌ها بیشتر می شود. به عبارت دیگر، کنگره‌های کوچک تر می توانند برش‌های بیشتری بر تیغه‌های ریزشی ایجاد و هوای بیشتری بر آن وارد کنند.

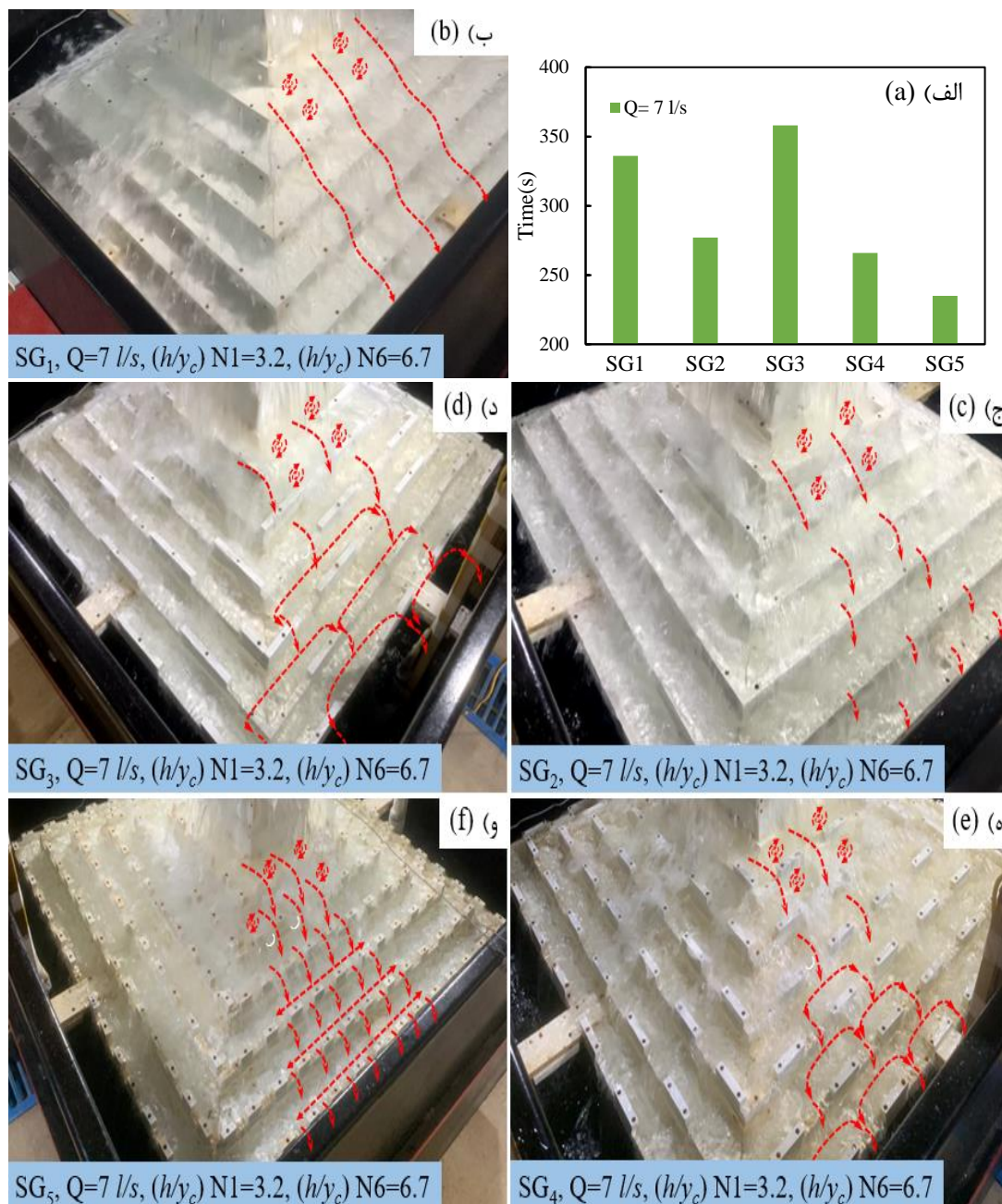
با توجه به شکل (۹-الف)، برای دبی مذکور مدت زمان رسیدن اکسیژن محلول در آب از ۲ به ۷ میلی گرم بر لیتر بین ۲۳۵ تا ۳۵۸ ثانیه و به طور متوسط ۲۹۴ ثانیه است که کمترین مقدار آن مربوط به هندسه SG₅ (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری برابر با ارتفاع پلکان) و بیشترین مقدار آن مربوط به هندسه SG₃ (سرریز پلکانی-هرمی با آستانه کنگره‌ای و فاصله کارگذاری چهار برابر ارتفاع پلکان) است. به این ترتیب، در شرایط هیدرولیکی مذکور، سرریز پلکانی-هرمی در هندسه‌های مختلف توانسته است به طور متوسط ۲/۷ میلی گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن، اکسیژن محلول در آب را تزیق نماید.

در جدول (۲)، عمق بحرانی نسبی در هر یک از پلکان‌های سرریز و در شکل (۱۰)، منحنی‌های اثر تغییر هندسه و دبی بر میزان تزیق اکسیژن محلول در آب بر واحد دبی ورودی به مخزن (C_{inj}/Q) بر حسب ($mg.l/s$) آورده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش دبی جریان، میزان

جدول ۲- تغییرات عمق بحرانی نسبی در پلکان‌های سرریز در دبی‌های ۲ تا ۷ لیتر بر ثانیه

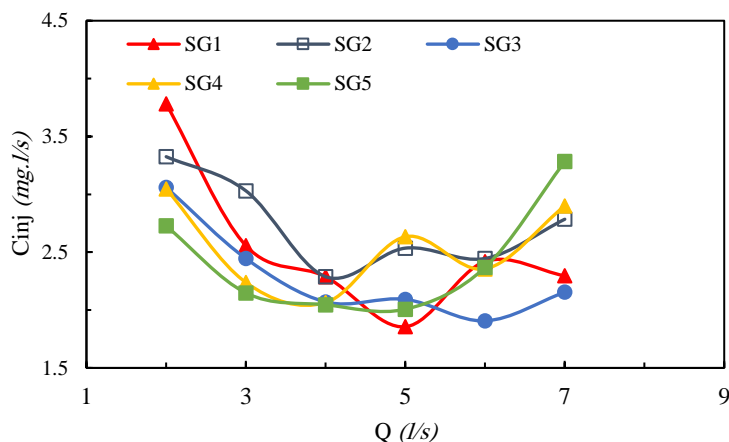
Table. 2. Variation of relative critical depth on steps of weirs for flow discharges of 2 to 7 l/s

h/y_c						دبی Q (l/s)
شماره پلکان‌ها						
N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	
۱۵/۴	۱۴/۰	۱۲/۵	۱۰/۹	۹/۲	۷/۴	۲
۱۱/۷	۱۰/۷	۹/۵	۸/۳	۷/۰	۵/۶	۳
۹/۷	۸/۸	۷/۹	۶/۹	۵/۸	۴/۷	۴
۸/۳	۷/۶	۶/۸	۵/۹	۵/۰	۴/۰	۵
۷/۴	۶/۷	۶/۰	۵/۳	۴/۴	۳/۶	۶
۶/۷	۶/۰	۵/۴	۴/۷	۴/۰	۳/۲	۷



شکل ۹- الف) مقایسه عملکرد زمانی افزایش اکسیژن محلول در آب در هندسه های مختلف سرریز پلکانی-هرمی برای دبی ۷ لیتر بر ثانیه و تصویر سرریزهای پلکانی-هرمی با هندسه های مختلف: ب) بدون آستانه (SG₁)، ج) با آستانه (SG₂)، د) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 4h (SG₃)، ه) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری 2h (SG₄)، و) آستانه و کنگره با فاصله کارگذاری h (SG₅)

Fig. 9. a) Temporal performance of DO variation for different geometries of stepped-pyramidal weirs at flow discharge of 7 l/s and Photos of stepped-pyramidal weirs with different geometries: b) without sill (SG₁), c) with sill (SG₂), d) sill and labyrinth with space of 4h (SG₃), e) sill and labyrinth with space of 2h (SG₄), f) sill and labyrinth with space of h (SG₅)



شکل ۱۰- اثر هندسه‌های مختلف بر مقدار واحد دبی تزریق اکسیژن محلول در آب در سرریزهای پلکانی-هرمی
 Fig. 10. Effect of different geometries on the unit discharge injection rate of water dissolved oxygen in stepped-pyramidal

نتیجه‌گیری

گردد، عملکرد پلکان‌های دارای آستانه ساده و کنگره‌ای بهتر می‌شود و دلیل آن افزایش آشفتگی و اختلاط در پرش‌های هیدرولیکی در پای هر یک از پلکان‌هاست به طوری که عملکرد آن‌ها از حداقل ۲ به حداکثر ۳/۳ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن تغییر می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که از میان هندسه‌های مختلف از سرریز پلکانی-هرمی، سرریز با هندسه SG2 با متوسط تزریق اکسیژن محلول در آب ۲/۷ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن دارای بهترین عملکرد است. از آنجاکه این سازه‌ها، در مقایسه با دیگر گزینه‌های هوادهی، در بسیاری از پروژه‌های هوادهی مانند تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و نیز استخرهای آبی‌پروری، فضای کمتری اشغال می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان سازه‌ای جایگزین استفاده شوند.

در این تحقیق، عملکرد سرریزهای پلکانی-هرمی بر افزایش اکسیژن محلول در آب بررسی شد. مکانیزم ورود هوا به آب در این سرریزها شامل ورود جریان به تیغه‌های ریزشی در هر پلکان، اختلاط آب و هوا در پرش هیدرولیکی پای هر پلکان و در نهایت ورود توده دو فاز آب و هوا به مخزن سرریز است. بررسی نتایج به دست آمده نشان داد در ضخامت‌های کم تیغه ریزشی $h/y_c > 10$ ، سرریزهای پلکانی ساده عملکرد بهتری نسبت به دیگر هندسه‌ها از نظر نصب آستانه ساده یا کنگره‌ای دارند و توانسته‌اند به طور متوسط ۲/۹ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر اکسیژن به جریان تزریق کنند در حالی که در دیگر گزینه‌ها، متوسط تزریق اکسیژن محلول در آب ۲/۵ میلی‌گرم بر ثانیه در هر لیتر جریان ورودی به مخزن است. مقایسه نتایج به دست آمده حاکی از آن است که هرچه دبی جریان و به تبع آن سرعت ریزش تیغه‌های ریزشی بیشتر

مراجع

- Albrecht, D. (1971). Belüftungsversuche mit Frei Absturzendem Wasser. GWF Wasser/Abwasser, 112.
- Baylar, A. & Bagatur, T. (2000). Aeration performance of weirs. Water Sa, 26(4), 521-526.
- Baylar, A., Emiroglu, M. E., & Bagatur, T. (2006). An experimental investigation of aeration performance in stepped spillways. Water and Environment Journal, 20(1), 35-42.
- Bung, D. B., & Schlenkhoff, A. (2010). Self-aerated skimming flow on embankment stepped spillways: the effect of additional micro-roughness on energy dissipation and oxygen transfer. First IAHR European Congress. May 3. Heriot-Watt University, School of the Built Environment, Edinburgh.
- Chamani, M. R., & Rajaratnam, N. (1999). Characteristics of skimming flow over stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 125(4), 361-368.
- Chanson, H., & Toombes, L. (2002). Air–water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. International Journal of Multiphase Flow, 28(11), 1737-1761.
- Chao, A. C., Chang, D. S., Smallwood Jr, C., & Galler, W. S. (1987). Effect of Temperature on Oxygen Transfer Laboratory Studies. Journal of Environmental Engineering, 113(5), 1089-1101.
- Dhatrak, A. I., & Tatewar, S. P. (2014). Air entrainment and pressure fields over stepped spillway in skimming flow regime. Journal of Power and Energy Engineering, 2(4), 53-57.
- Esmaeili Varaki, M., Habibpanah, M., Biabani, R., & Navabian, M. (2021). Experimental investigation of dissolved oxygen efficiency in stepped-labyrinth weirs. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (pp. 1-14). Thomas Telford Ltd.
- Esmaeili Varaki, M., Kamakoli, M., Biabani, R., & Navabian, M. (2022). Effect of large scale roughness of block ramps on dissolved oxygen efficiency in water. Water Practice & Technology, 17(7), 1490-1504.
- Felder, S., & Chanson, H. (2017). Closure to " Simple design criterion for residual energy on embankment dam stepped spillways' by Stefan Felder and Hubert Chanson. Journal of Hydraulic Engineering, 143(5), 07017002.
- Gameson, A. L. H. & et al., (1958). The effect of temperature on aeration at weirs. Water and Water Engineering, 753(62), 489.
- Gonzalez, C. A., & Chanson, H. (2008). Turbulence and cavity recirculation in air–water skimming flows. Journal of Hydraulic Research, 46(1), 65-72.
- Habibpanah, M., Esmaeili Varaki, M., Navabian, M., Behbodi, R., Farzin, M., & Saffari, M. (2020). Experimental Investigation of Efficiency of Increasing Dissolved Oxygen of Flow in Stepped-Labyrinth Weirs. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 21(78), 1-22.
- HDR Engineering. (2001). Handbook of public water systems. John Wiley and Sons.
- Khatsuria, R. M. (2004). Hydraulics of spillways and energy dissipators. CRC press.
- Mansouri, R., Esmaeili Varaki, M., & Navabian, M. (2018). Experimental study of the geometric effect of trapezoidal labyrinth weirs on increase of the dissolved oxygen. Iranian Journal of Soil and Water Research, 49(5), 977-990.
- Nakasone, H. (1987). Study of aeration at weirs and cascades. Journal of environmental engineering, 113(1), 64-81.
- Nina, Y. A., Shi, R., Wüthrich, D., & Chanson, H. (2022). Aeration performances and air-Water mass transfer on steep stepped weirs with horizontal and inclined steps. Journal of Hydrodynamics, 34(5), 904-916.
- Pöpel, H. J. (1972). Aeration and gas transfer. Division of Sanitary Engineering, Delft University of Technology, pp 61-64.
- Subramanya, K. (1986). Flow in Open Channel. Second Edition, Tata McGraw-Hill New Delhi.
- Wormleaton, P. R., & Soufiani, E. (1998). Aeration performance of triangular planform labyrinth weirs. Journal of environmental engineering, 124(8), 709-719.
- Wormleaton, P. R., & Tsang, C. C. (2000). Aeration performance of triangular planform labyrinth weirs. Journal of environmental engineering, 124(8), 709-719.
- Wuthrich, D., & Chanson, H. (2015). Aeration performances of a gabion stepped weir with and without capping. Environmental Fluid Mechanics, 15, 711-730.

Original Research

Experimental investigation of performance of stepped-pyramidal weir on the content of dissolved oxygen in water

A. Ranjbin, M. Esmaeili varaki*, M. Navabian, SH. Niazi

***Corresponding Author:** Associate Professor, Dept. of Water Engineering, University of Gilan, Rasht, Iran.

Received: 17 August 2024, **Accepted:** 29 September 2024

Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2024.366766.1587

Extended Abstract

Introduction

Water quality changes with the penetration of water from the surface of the earth to the subsurface layers, which are accompanied by the passage of subsurface of earth crust with different chemical composition. The most important issues is the increase in the concentration of iron and manganese. Therefore, almost underground water sources have significant amounts of iron and manganese. At high concentrations, those may cause the growth of iron and manganese bacteria, increase pathogenic microorganisms, create bitter taste and unpleasant smell in water, create red and brown spots on appliances and blockage water distribution systems. One of the main steps in the water purification process is the removal of iron and manganese ions. Among these methods, the use of oxidation is more widely used due to less operational costs. Use of an aerator is the main part of this method. Stepped weirs are one of the economical devices for the aeration of water that has acceptable performance. In this research, application of a pyramid-shaped stepped weir with and without sill on increase the dissolved oxygen concentration under various flow discharge was investigated experimentally.

Experimental Setup and procedure

Experiments have been carried out on a stepped-pyramidal weir model in the Hydraulic Modeling Laboratory at of University of Guilan. The physical model of the stepped-pyramid weir is made of PVC panels with a constant slope of 1:2 and the number of steps is 6, with dimensions of 4 cm high and 8 cm long. The weir was installed on Iron's tank with dimensions of 1.5 m length and 1.5 m in width and 1 m height. A centrifugal pump device with maximum flow rate of 8 l/s was used to provide desired flow discharge. In order to measure the flow rate, an ultrasonic flow meter was used with an accuracy of ± 0.01 l/s.

In each geometry of the weir and desired flow rate, first the concentration of dissolved oxygen in the water supply tank was reduced to 2 mg/l using Na_2SO_3 solution, then variation of dissolved oxygen concentration was measured by 2 oxygen meters (DO meter) model AL200xi manufactured by Aqualytic company, which was installed on both sides of the tank, until the dissolved oxygen concentration reached on its initial level.

In this research, totally 30 tests were carried out to consider effect of the stepped-pyramidal weir on increasing the dissolved oxygen concentration.

Results and discussion

The performance of stepped-pyramidal weirs with different geometries at h/y_c equal to 7.4 (flow discharge of 2 l/s) for the first step indicates that for stepped-pyramidal weir without sill, the falling jet from the steps have gradually decreased in thickness and it falls discontinuously in steps 5 and 6. By installing the sill at the end of each step, although turbulence and mixing of air and water occurred by formation of hydraulic jump but due to the reduction in the thickness of the falling jet, the intensity of mixing is low and, the performance of stepped-pyramidal weirs with end sill reduced. For the mentioned flow rate, the time to reach DO to from 2 to 7 mg/l for

Experimental investigation of performance of stepped-pyramidal weir on the content of ...

different stepped-pyramidal weir geometries is 857 seconds on average which injected 2.3 *mg.l/s* dissolved oxygen into the water content of recipient tank.

By increasing the flow rate to h/y_c equal to 5.6 (flow discharge of 3 *l/s*) for the first step, the thickness of the falling jet and corresponding flow velocity increases and the overall performance of the stepped-pyramidal weir to increasing dissolved oxygen improved. For mentioned flow discharge, the time of increase of DO to reach its initial level is 735 seconds on average, which dissolved oxygen injected by rate of 2.5 *mg.l/s* into the water content of the recipient tank.

by further increase of flow discharge to 6 *l/s* (h/y_c equal to 6) turbulence and mixing of air and water intensified by formation of hydraulic jump. Also, in the mentioned flow and relative critical depth, more turbulence was observed at the end of each steps along with the sill or labyrinth sill. The results show that, with the exception of the SG₃ geometry (stepped-pyramidal weir with sill and labyrinth with the space of 4*h*), the other structures had similar performance. The results showed that the time duration of DO concentration from 2 to 7 *mg/l* is 395 seconds on average, the lowest value of which was related to SG₂ geometry (stepped-pyramidal weir with sill) which could inject dissolved oxygen on an average of 2.3 *mg.l/s* into water content of the recipient tank.

At the maximum h/y_c equal to 3.2 (flow rate of 7 *l/s*) for the first step, the mixing of air bubbles and turbulence of flow on each step causes the labyrinth sill with small length could better performance due to more separation of falling jet of over passing. The time duration to reach the DO concentration from 2 to 7 *mg/l* is 294 seconds on average. The SG₅ geometry (stepped-pyramidal weir with labyrinth having internal space of *h*) had the best performance. In general, dissolved oxygen is injected into water content of the recipient tank at an average of 2.7 *mg.l/s*.

Conclusion

The results showed that at the low thickness of overpassing flow with $h/y_c > 10$, simple stepped-pyramidal weir had better performance than other geometries and could inject 2.9 *mg.l/s* of dissolved oxygen into the water. The comparison of the results indicates that as the flow rate increases, due to the increase of turbulence and mixing of air bubbles into overpassing flow at each step, the performance of the steps with a simple and labyrinth sill improves, so that their performance to inject dissolved oxygen is from 2 to 3.3 *mg.l/s*. In general, among the different geometries of the stepped-pyramidal weir, the SG₂ geometry had the best performance.

Keywords: Aeration, Dissolved oxygen, Labyrinth sill, Purification, Stepped-pyramidal weir.