

## مطالعه آزمایشگاهی راندمان افزایش اکسیژن محلول آب در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای

مینا حبیب پناه<sup>۱</sup>، مهدی اسمعیلی‌ورکی<sup>۲\*</sup>، مریم نواییان<sup>۳</sup>، رامین بهبودی<sup>۴</sup>،  
مژگان فرزین<sup>۵</sup> و مریم صفاری جورشری<sup>۶</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
۴، ۵ و ۶- به ترتیب: مدیر دفتر بهبود بهره‌وری و تحقیقات؛ رئیس گروه تحقیقات؛ و رئیس گروه بهبود بهره‌وری و تحول اداری، شرکت آب و فاضلاب گیلان، رشت، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۵

### چکیده

از پارامترهای مهم کیفی آب، مقدار بالای اکسیژن محلول<sup>۱</sup> است که برای بقای حیات آبزیان و نیز بهبود کیفیت آب حیاتی است. یکی از روش‌های افزایش مقدار اکسیژن محلول (DO)، استفاده از سازه‌هایی است که منجر به ایجاد اغتشاش و آشفته‌گی در جریان و ورود حباب‌های کوچک هوا به آب شود. جت ریزشی از سرریزها نمونه‌ای ویژه از ایجاد آشفته‌گی در آب و افزایش اکسیژن محلول محسوب می‌شود. در این پژوهش، تأثیر ایجاد کنگره‌ها با ارتفاع‌های ۰/۵ و ۰/۷۵ + ارتفاع پلکان ( $h$ )، فاصله‌های کارگذاری برابر و دو برابر ارتفاع پلکان و آستانه با ارتفاع ۰/۳۲ + ارتفاع پلکان بر افزایش مقدار اکسیژن محلول آب در پایین دست سرریز پلکانی با شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ برای دامنه وسیعی از دبی جریان و عمق‌های پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱، در شرایط عمق پایاب برابر با ارتفاع پلکان، ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۷۵  $h$ ، فاصله کارگذاری ۲  $h$  و طولی برابر با طول پلکان با افزایش ۴۸ درصد در مقدار غلظت اکسیژن محلول آب و با افزایش عمق پایاب به دو برابر ارتفاع پلکان، ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۷۵  $h$ ، فاصله کارگذاری  $h$  و طولی برابر با طول پلکان با افزایش ۷۷ درصد در مقدار غلظت اکسیژن محلول در آب، نسبت به سایر هندسه‌ها در این شیب، عملکرد بهتری دارند. مقایسه نتایج به دست آمده در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ نشان می‌دهد که ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۷۵  $h$  و فاصله کارگذاری  $h$  در شرایط عمق پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان با افزایش به ترتیب ۷۱ و ۵۱ درصد در مقدار غلظت اکسیژن محلول در آب، دارای بهترین عملکرد در این شیب است. تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ ایجاد کنگره با ارتفاع ۰/۷۵  $h$ ، فاصله کارگذاری  $h$  و طولی برابر و دو برابر ارتفاع پلکان به صورت هم‌لیه با وجه پایین دست پلکان با افزایش ۱۵ درصد مقدار اکسیژن محلول، نسبت به سایر هندسه‌ها در این شیب، دارای عملکرد مناسب‌تری است.

### واژه‌های کلیدی

اکسیژن محلول، سرریز پلکانی، سرریز کنگره‌ای، کیفیت آب، هوادهی

### مقدمه

همه جریان‌های طبیعی، هم از نظر کیفی و هم از نظر زندگی آبزیان، بسیار مهم است. اهمیت موضوع تا حدی است که میزان پاکی آب را بر مبنای میزان اکسیژن محلول در آن می‌سنجند و در مورد فاضلاب از میزان کمبود آن سنجیده می‌شود (Mansori-

تمام موجودات زنده برای ادامه فعالیت‌های متابولیسمی خود و تهیه انرژی برای رشد و تولیدمثل، نیاز به اکسیژن به شکل‌های متفاوت دارند. غلظت اکسیژن محلول در آب رودخانه‌ها و

حباب‌های هوا، مقدار ضرایب با افزایش دمای آب افزایش می‌یابد.

گالیور و همکاران (Gulliver *et al.*, 1990) به بررسی رابطه آزمایشگاهی مبتنی بر شاخص‌های انتقال گاز در جریان‌های هوادهی شده در سازه‌های هیدرولیکی پرداختند. رابطه ارائه شده بر اساس سرعت یک حباب معلق در جریان آشفته و انتقال گروهی حباب‌ها بررسی شد که با رابطه آزمایشگاهی که جامسون (Gameson, 1957) آن را مطرح کرده نیز با مجموعه‌ای از مفروضات خاص در تناسب است.

بایلار و باختور (Baylar & Bagatur, 2000) عملکرد هوادهی را در انواع سرریزهای خطی لبه‌تیز بررسی کردند و دریافتند که بالاترین راندمان ورود اکسیژن محلول در سرریز لبه‌تیز مثلثی و کمترین آن در سرریز لبه‌تیز مستطیلی است.

امیراوغلو و بایلار (Emiroglo & Baylar, 2005) با بررسی تأثیر زاویه داخلی دیواره‌های سرریز و شیب‌دار بودن دیواره‌ها بر راندمان هوادهی سرریزهای کنگره‌ای با پلان مثلثی دریافتند که این دو عامل تأثیر بسزایی در ورود هوا به داخل جریان دارند و بر شکل سفره ریزشی، که در میزان ورود هوا بسیار موثر است، موثرند. این محققان می‌گویند برای همه زوایای داخلی با افزایش شیب دیواره سرریز، ورود هوا به داخل آب افزایش می‌یابد به گونه‌ای که مقدار ورود هوا برای زاویه داخلی سرریز ۱۳۵ درجه و شیب دیواره ۴۵ درجه بیشترین مقدار می‌شود.

منصوری و همکاران (Mansori-Konsestani *et al.*, 2016) عملکرد سرریزهای کنگره‌ای-ذوزنقه‌ای را در مقایسه با سرریز خطی بر مقدار DO آب تحت شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی بررسی کردند. مشاهدات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نتایج

(Konsestani *et al.*, 2016). بنابراین، تأمین مقدار مناسب اکسیژن محلول در آب تأثیری بسزا در بهبود کیفیت آب از نظر حیات آبیان و نیز افزایش راندمان حذف آهن و منگنز دارد. به همین منظور محققان تلاش‌های زیادی کرده‌اند تا راه‌حلهایی مناسب برای این موضوع درپیش گیرند.

روش‌های مختلفی برای افزایش مقدار اکسیژن محلول آب معرفی شده است که آنها را می‌توان در چهار گروه تقسیم کرده‌اند: هوادهی ثقیلی-ریزشی، هوادهی پاششی (اسپری)، پخش‌گر یا دیفیوزرهای حباب هوا، و هوادهی مکانیکی (Baylar *et al.*, 2007).

یکی از راه‌کارهای اقتصادی و کم‌هزینه برای بهبود مقدار اکسیژن محلول در آب، استفاده از روش هوادهی ثقیلی-ریزشی مانند سرریزهاست که کاربرد زیادی در پروژه‌های تصفیه آب، فاضلاب و احیای رودخانه‌ها دارد. فرآیند ریزش جریان از روی سرریزها، حباب‌های هوا را به آب وارد می‌کند و در نتیجه مقدار اکسیژن محلول افزایش می‌یابد (Nakasone, 1987).

جامسون (Gameson, 1957) اولین پژوهش در زمینه هوادهی در سرریزها را ارائه داد. پس از آن ناکاسون (Nakasone, 1987) هوادهی سرریزهای خطی را بررسی کرد و به روابطی بین راندمان هوادهی با دبی و هندسه سرریز دست یافت.

چاو و همکاران (Chao *et al.*, 1988) اثر دما بر سطح انتقال اکسیژن محلول را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و با اندازه‌گیری ضریب‌های انتقال اکسیژن محلول و هوادهی بر اساس منحنی‌های اکسیژن محلول و پیش‌بینی ضرایب با استفاده از معادلات Oconner و Dabbins به این نتیجه رسیدند که در هنگام تلاطم کم

حدود  $h_s > 0.57h_c$  را پیشنهاد کردند ( $h_s$  ارتفاع پلکان و  $h_c$  عمق بحرانی است).

ماتوس (Matos, 2001) جریان هوا-آب تشکیل شده در حفره‌های زیر تیغه ریزشی در پای پله‌ها را در جریان‌های سطحی بررسی کرد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحقیق نشان داد که جریان چرخشی در درون این حفره‌ها بر هوادهی جریان تأثیر می‌گذارد.

چانسون و تامبز (Chanson & Toombes, 2002) با بررسی جریان هوا-آب در پایین‌دست شوت‌های پلکانی، هوادهی بسیار شدید جریان را مشاهده کردند.

گانزالس و همکاران (Gonzalez *et al.*, 2008) با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سه نوع زبری در رژیم جریان سطحی در شوت پلکانی، دریافتند که زبری پله بر نوع رژیم جریان بی‌تأثیر است و نیز اینکه نسبت موقعیت طولی نقطه آغاز هوادهی برای سرریز پلکانی زیر نسبت به حالت صاف، ۳۵ درصد افزایش می‌یابد.

بانگ و شلنکف (Bung & Schlenkhoff, 2010) وضعیت هوادهی را در مدل فیزیکی یک سرریز پلکانی با مقیاس ۱:۱۰ بررسی کردند و نشان دادند زبری اثر محسوسی بر هوادهی در سرریز پلکانی ندارد.

گونترو و همکاران (Guenther *et al.*, 2013) میزان هوادهی و اتلاف انرژی را روی سرریزهای پلکانی با شیب ۲۲/۶ درجه بررسی کردند. پلکان‌ها در سه نوع مسطح، دارای آب‌پایه، و ترکیبی از دو نوع پله بودند. این محققان گزارش دادند که ترکیب دو پله، نسبت به پله مسطح و پله دارای آب‌پایه، هیچ مزیتی در هوادهی جریان و اتلاف انرژی ایجاد نمی‌کند.

بررسی‌های آنها نشان داد که طول سیکل در جهت جریان سرریزها، ضخامت تیغه‌های ریزشی و الگوی جریان ریزشی از تاج سرریزها سه پارامتر موثر بر مقدار اکسیژن محلول در سرریزهای پلان کنگره‌ای هستند. مقایسه نتایج تحقیق نشان داد که با تغییر هندسه سرریز از خطی به کنگره‌ای، مقدار متوسط عملکرد هیدرولیکی سرریزها در افزایش DO از ۳۵ به ۴۲ درصد افزایش یافته است.

اولین تحقیق در زمینه شناخت هیدرولیک جریان عبوری از سرریزهای پلکانی، از جمله الگوی جریان ریزشی و هوادهی در آن را چانسون (Chanson, 1993) دنبال کرد. محققانی چند به بررسی انواع سرریزهای پلکانی، رژیم جریان و میزان استهلاک انرژی آنها پرداخته‌اند. جریان روی سرریزهای پلکانی در سه دسته جریان ریزشی، جریان سطحی و جریان انتقالی طبقه‌بندی می‌شود. جریان ریزشی با جانشینی ضربه جت ریزشی آزاد روی پله‌ها بیان و با یک پرش هیدرولیکی کاملاً توسعه‌یافته یا جزئی توسعه‌یافته توصیف می‌شود. زمانی که دبی افزایش یابد و حفره زیر ریزش کاملاً محو شود، جریان سطحی اتفاق می‌افتد. عبور جریان از رژیم ریزشی و رسیدن به شرایط سطحی، تدریجی است و در یک رژیم انتقالی صورت می‌گیرد (Khatsuria, 2005).

کریستودولو (Christodouliou, 1993) با بررسی آزمایشگاهی اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی تحت شرایط جریان سطحی، نشان داد که نسبت عمق بحرانی جریان عبوری از سرریز به ارتفاع پله و نیز تعداد پله‌ها از مهم‌ترین پارامترهای حاکم بر اتلاف انرژی هستند. شماری از محققان (Baylar *et al.*, 2007; Ohtsu *et al.*, 2001) برای معیار رژیم جریان ریزشی، که رژیم جریان موثر بر هوادهی است،

طول  $h$  نصب شده به صورت هم‌لبه با وجه ریزش با ایجاد افت نسبی انرژی به میزان  $۴۳/۲$  درصد و افزایش  $۴/۴$  درصد در افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون کنگره مناسب‌ترین عملکرد را دارد.

همان‌طور که اشاره شد، سرریزهای پلکانی یکی از سازه‌های کارآمد برای استهلاک انرژی و هوادهی جریان هستند. با توجه به نقشی که پلکان‌های سرریز بر رژیم جریان عبوری و در نتیجه مقدار ورود هوا به آن دارند، با اصلاح هندسی آنها می‌توان مقدار هوادهی و در نتیجه مقدار اکسیژن محلول آب را افزایش داد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف بر تغییرات مقدار اکسیژن محلول آب در سرریزهای پلکانی با شیب‌های متفاوت است.

### مواد و روش‌ها

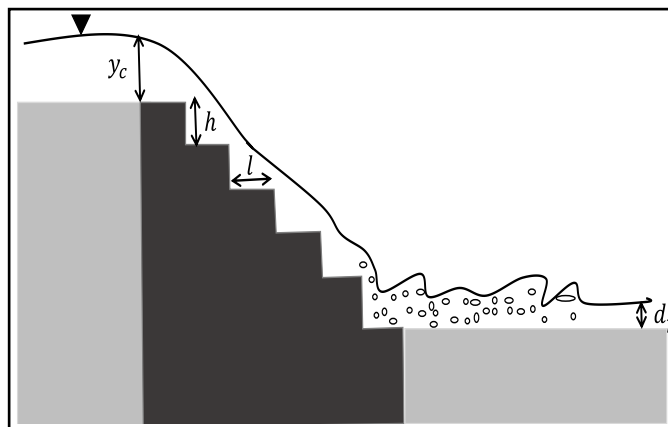
#### الف) تحلیل ابعادی

پارمترهای تأثیرگذار بر مقدار اکسیژن محلول در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای شامل تعداد پلکان ( $N$ )، ارتفاع پلکان ( $h$ )، طول پلکان ( $l$ )، هندسه کنگره ( $x$ )، عمق پایاب ( $d_p$ )، عمق بحرانی ( $y_c$ )، دبی واحد عرض ( $q$ )، کشش سطحی سیال ( $\sigma$ )، شتاب ثقل ( $g$ )، جرم مخصوص سیال ( $\rho$ ) و لزوجت دینامیکی سیال ( $\mu$ )، غلظت اکسیژن محلول اشباع ( $C_s$ )، غلظت اکسیژن محلول بالادست ( $C_u$ )، غلظت اکسیژن محلول پایین‌دست ( $C_d$ )، و دما ( $T$ ) است (شکل ۱) که آنها را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

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

واسریچ و چانسون (Wuthrich & Chanson, 2014) عملکرد هیدرولیکی سرریز پلکانی-گابیونی را با دو نوع پیکربندی به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که برای دبی‌های کم (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله کمتر از  $۰/۳$ ) جریان ریزشی مشاهده نمی‌شود و تنها از طریق فضای بین سنگ‌ها در گابیون‌ها نشت می‌کند. در دبی‌های بالاتر (نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله بیش از  $۰/۹$ ) رژیم‌های جریان ریزشی، انتقالی و سطحی مشاهده می‌گردد.

کشاوری اسکندری و همکاران (Keshavarz- Eskandari et al., 2019) تأثیر ایجاد کنگره با فاصله‌های کارگذاری مختلف و اعمال زبری بر افت نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی با شیب‌های  $۱:۱$ ،  $۱:۲$  و  $۱:۳$  را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که در سرریز پلکانی با شیب  $۱:۱$ ، ایجاد کنگره با ارتفاع  $۰/۵h$  (ارتفاع پلکان)، فاصله کارگذاری  $۲h$  و طولی برابر با طول پلکان با ایجاد افت نسبی انرژی  $۵۱/۹$  درصد، منجر به افزایش  $۱۲/۷$  درصد در افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون کنگره می‌شود. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده در سرریز پلکانی با شیب  $۱:۲$  نشان داد که ایجاد کنگره با ارتفاع  $۰/۷۵h$ ، فاصله کارگذاری  $۲h$  و طول کنگره برابر با ارتفاع پلکان، میزان افت نسبی انرژی را  $۱۰/۵$  درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش می‌دهد و افت نسبی انرژی را به  $۵۹/۹$  درصد می‌رساند. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در سرریز پلکانی با شیب  $۱:۳$  ایجاد کنگره با فاصله کارگذاری  $h$ ، ارتفاع  $۰/۵h$  و



شکل ۱- نیمرخ طولی سرریز پلکانی و معرفی پارامترهای موثر

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

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

### ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی شیب‌پذیر با سیستم بازچرخانی به طول ۱۵، عرض ۱/۵ و عمق ۱ متر با دیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی اجرا شد (شکل ۲). برای تأمین جریان، از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که قادر به تأمین دبی تا ۹۰ لیتر بر ثانیه و مجهز به دستگاه تنظیم دور موتور بود. جریان با پمپ وارد مخزن بالادست و پس از آن به قسمت آرام‌کننده ورودی و سپس به فلوم وارد می‌گردید. به منظور اندازه‌گیری و تنظیم دبی جریان، از دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت  $\pm 0.1\%$  لیتر بر ثانیه استفاده شد.

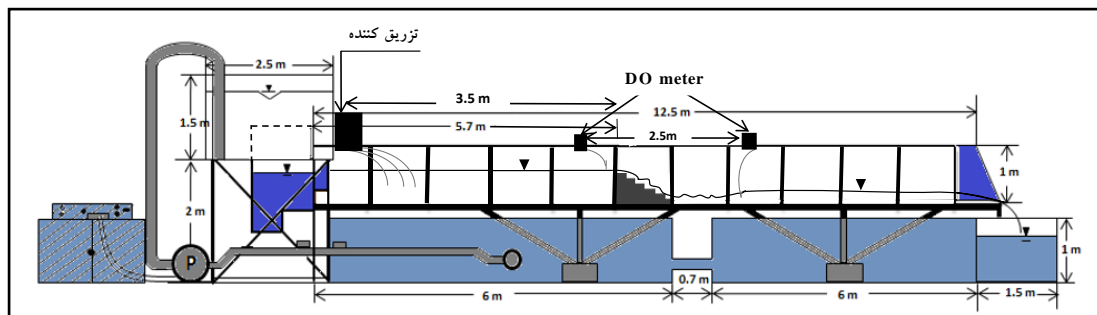
با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه ۱ به صورت زیر تبدیل می‌شود:

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

که در آن،

$Re$  = عدد رینولدز؛  $Fr$  = عدد فرود؛ و  $We$  = عدد وبر. پارامتر  $E$  راندمان افزایش اکسیژن محلول است که به صورت  $E = (C_d - C_u) / (C_s - C_u)$  تعریف می‌شود. با توجه به اینکه عمق جریان در لبه سرریز همواره بیش از ۲ سانتی‌متر و جریان عبوری از سرریز همواره آشفته است، نیروهای کششی و لزوجت قابل چشم‌پوشی هستند (Subramanya, 1986). بنابراین، در رابطه ۲ می‌توان از اعداد رینولدز  $Re$  و وبر  $We$  صرف‌نظر کرد. علاوه بر این، تعداد پلکان‌ها در کلیه آزمایش‌ها ۵ و نیز دمای آب در طول آزمایش‌ها تقریباً ثابت است و از این رو این پارامترها نیز ثابت در نظر گرفته شدند. در نتیجه، رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ ساده می‌شود.

$$E = f_3(\frac{h}{l}, \frac{h}{y_c}, \frac{x}{y_c}, \frac{d_p}{y_c}, \frac{C_u}{C_s}, \frac{C_d}{C_s}, Fr) \quad (3)$$



شکل ۲- طرح کلی از کانال آزمایشگاهی

Fig. 2- Sketch of experimental flume

مشخصات هندسی و در شکل ۴ تصویرهایی از نمای سه‌بعدی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد آزمایش آورده شده‌اند. کنگره‌های استفاده شده در این تحقیق با فاصله‌های کارگذاری ۰/۱ و ۰/۲ متر در طول پلکان (برابر و دو برابر ارتفاع پلکان‌ها) و ارتفاع‌های ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ متر (۰/۵ و ۰/۷۵ ارتفاع پلکان‌ها) هستند که روی سطوح پلکان‌ها در سرریزهای مورد مطالعه نصب شده‌اند.

سرریزهای مورد بررسی در این تحقیق از جنس چوب-پلاستیک و در شیب کارگذاری ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ با ارتفاع و طول پلکان ۰/۱ متر ساخته و در فاصله ۵/۷ متری از ورودی فلوم نصب شدند (شکل ۳).

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر هندسه کنگره‌ها بر عملکرد اکسیژن محلول در سرریزهای مورد مطالعه، کنگره‌هایی با ارتفاع و فاصله‌های کارگذاری مختلف بررسی شدند. در جدول ۱



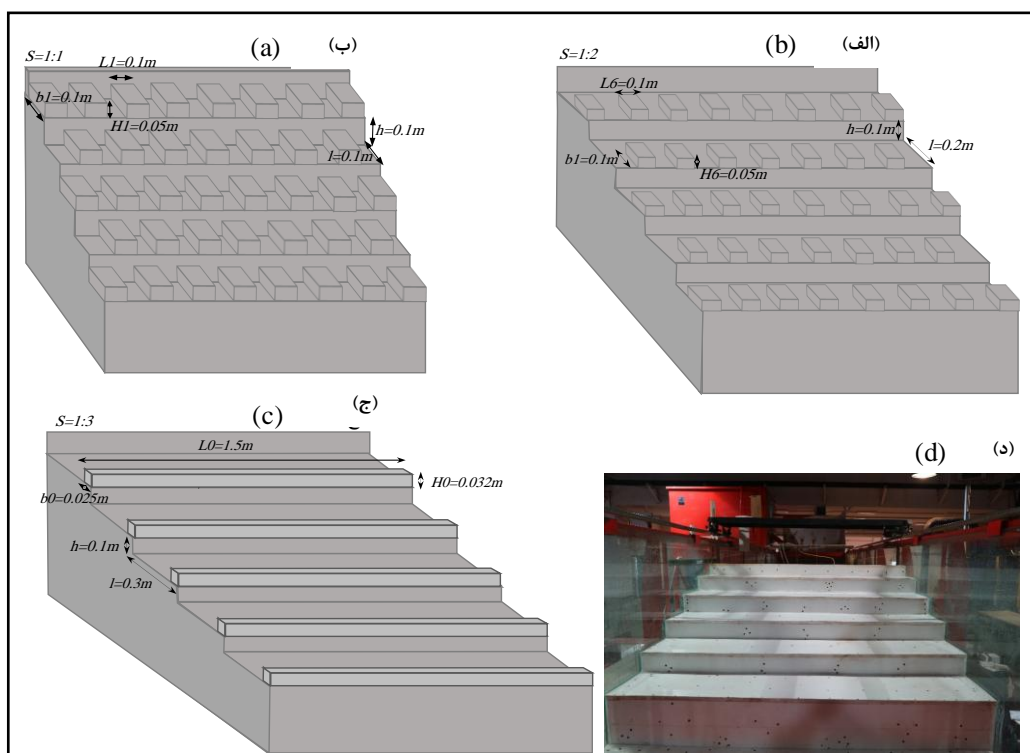
شکل ۳- تصویرهایی از فلوم آزمایشگاهی و سرریزهای پلکانی مورد مطالعه

Fig. 3- Photos of experimental flume and stepped weirs

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد بررسی

Table 1- Geometric characteristic of stepped-labyrinth weirs

دامنه دبی Range of discharge (مترمکعب بر ثانیه)	طول کنگره Length of labyrinth (متر, b)	ارتفاع کنگره height of labyrinth (متر, H)	فاصله کنگره Space between labyrinth (متر, L)	شماره سرریز Weir number
0.018-0.078	0	0	0	S <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.1	0.05	0.1	S <sub>1</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.1	0.05	0.2	S <sub>1</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.1	0.075	0.1	S <sub>1</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.1	0.075	0.2	S <sub>1</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.025	0.032	With sill	S <sub>1</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>
0.018-0.078	0	0	0	S <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.05	0.1	S <sub>2</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.05	0.2	S <sub>2</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.075	0.1	S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.075	0.2	S <sub>2</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.1	0.05	0.1	S <sub>2</sub> H <sub>6</sub> L <sub>6</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.1	0.075	0.1	S <sub>2</sub> H <sub>7</sub> L <sub>7</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.025	0.032	With sill	S <sub>2</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>
0.018-0.078	0	0	0	S <sub>3</sub>
0.018-0.078	0.2	0.05	0.1	S <sub>3</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.05	0.2	S <sub>3</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.075	0.1	S <sub>3</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.2	0.075	0.2	S <sub>3</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>2</sub>
0.018-0.078	0.1	0.05	0.1	S <sub>3</sub> H <sub>6</sub> L <sub>6</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.1	0.075	0.1	S <sub>3</sub> H <sub>7</sub> L <sub>7</sub> b <sub>1</sub>
0.018-0.078	0.025	0.032	With sill	S <sub>3</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>



شکل ۴- تصویرهایی از سرریزهای مورد مطالعه

الف) سرریز S<sub>1</sub>H<sub>1</sub>L<sub>1</sub>b<sub>1</sub>، ب) سرریز S<sub>2</sub>H<sub>6</sub>L<sub>6</sub>b<sub>1</sub>، ج) سرریز S<sub>3</sub>H<sub>5</sub>L<sub>0</sub>b<sub>0</sub> و د) سرریز S<sub>3</sub>  
 Fig. 4- Photos studied weirs: a) S<sub>1</sub>H<sub>1</sub>L<sub>1</sub>b<sub>1</sub>, b) S<sub>2</sub>H<sub>6</sub>L<sub>6</sub>b<sub>1</sub>, c) S<sub>3</sub>H<sub>5</sub>L<sub>0</sub>b<sub>0</sub> and d) S<sub>3</sub>

بالادست ( $C_u$ )  $mg/l$  ۲، ۳، ۴ و ۵ بررسی شد. در این تحقیق، برای محاسبه راندمان افزایش اکسیژن محلول از رابطه‌های ۴ تا ۷ استفاده شد که جامسون (Gameson, 1957) آنها را ارائه داده است.

$$r_T = \frac{C_s - C_u}{C_s - C_d} \quad (4)$$

$$E_T = 1 - \frac{1}{r_T} = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} \quad (5)$$

$$\ln r_T = \ln r_{20} [1 + 0.0168(T - 20)] \quad (6)$$

$$E_f = \frac{C_d - C_u}{C_u} \quad (7)$$

که در آنها،

$r_T$  = نسبت کمبود اکسیژن محلول در دمای مورد نظر،  $E_T$  = راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای مورد نظر،  $r_{20}$  = نسبت کمبود اکسیژن محلول در دمای  $20^\circ$ ،  $E_f$  = نسبت افزایش اکسیژن محلول در بالادست، و  $T$  = دما است.

### نتایج و بحث

براساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان در سرریزهای پلکانی در شیب ۱:۱، رژیم جریان سطحی در  $h/y_c < 1/25$ ، رژیم جریان انتقالی در  $1/25 < h/y_c < 1/82$  و رژیم جریان ریزشی در  $h/y_c > 1/82$  شکل می‌گیرد (Khatsuria, 2005). مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که با ایجاد کنگره روی پلکان‌ها، امکان ریزش تیغه‌های جریان در جهت‌های مختلف در طول پلکان‌های سرریز فراهم خواهد شد. در نتیجه میزان تداخل جریان در

برای اندازه‌گیری مقدار اکسیژن محلول در آب (DO) از دو دستگاه اکسیژن‌سنج (DOmeter) مدل AL200xi ساخت شرکت Aqualytic استفاده شد که به ترتیب در فاصله ۰/۵ متر در بالادست سرریز و ۲/۵ متر در پایین‌دست سرریز و در مکانی نصب شدند که حباب‌های شکل گرفته در پایین‌دست سرریز کاملاً محو شده بودند.

به منظور کاهش میزان اکسیژن محلول جریان قبل از عبور سرریزهای مورد مطالعه و بررسی عملکرد آنها در افزایش مقدار اکسیژن محلول در آب، از ماده شیمیایی اکسیژن‌زدای سدیم سولفیت استفاده شد. در هر آزمایش، بعد از نصب سرریز با برقراری دبی مورد نظر و تنظیم عمق پایاب، محلول سدیم سولفیت با غلظت ۷۰ گرم بر لیتر تزریق گردید تا میزان اکسیژن محلول بالادست سرریز به محدوده یک میلی‌گرم بر لیتر برسد. پس از آن با قطع محلول سدیم سولفیت، قرائت اکسیژن محلول در بالادست و پایین‌دست تا جایی ادامه می‌یافت که مقدار اکسیژن محلول در پایین‌دست به سطح اشباع اولیه خود قبل از تزریق ماده شیمیایی برسد.

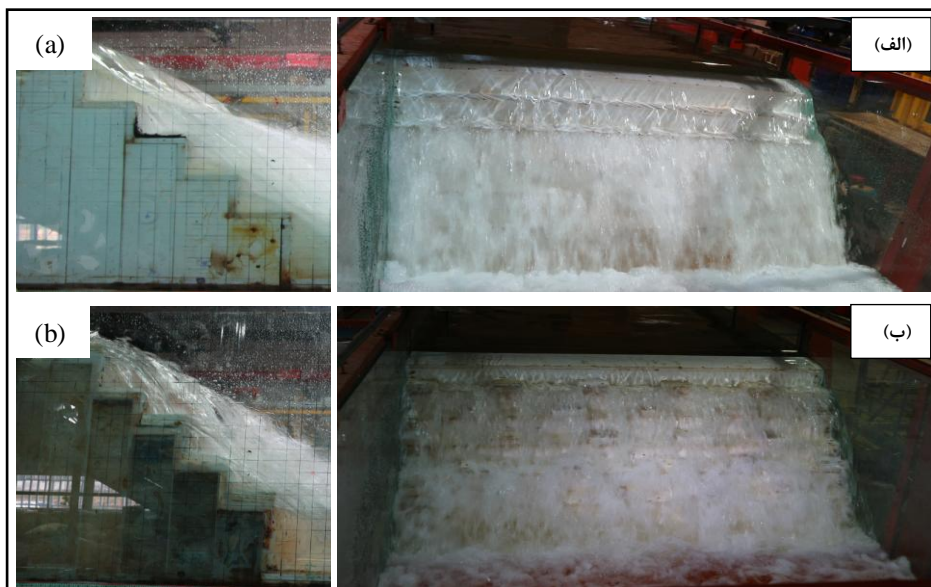
در این تحقیق برای بررسی تاثیر کنگره‌ای کردن سرریز پلکانی بر افزایش اکسیژن محلول آب، در مجموع ۵۷۲ آزمایش برای هندسه‌های مختلف، دبی‌ها، عمق‌های پایاب متفاوت، و غلظت‌های مختلف اکسیژن محلول ورودی صورت گرفت.

مقایسه‌ها نشان می‌دهد که با کاهش غلظت اکسیژن محلول در بالادست سرریز و افزایش اختلاف آن نسبت به غلظت اکسیژن محلول اشباع، عملکرد سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای مورد مطالعه مشهودتر می‌شود. از این‌رو، از میان دامنه غلظت‌های بالادست  $1 mg/l$  تا غلظت اکسیژن اشباع ( $10 mg/l$ )، راندمان سرریزها در غلظت‌های اکسیژن



تشکیل گردابه‌ها و ریزش جریان در هر پلکان رخ می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان ( $h/y_c$  کمتر از  $2/3$ )، جریان عبوری از پله‌های اول و دوم سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای نیز شفاف و بدون هواست و این دو پلکان در مقدار افزایش راندمان هوادهی بی‌تأثیر می‌باشند (شکل ۵).

طول سرریز افزایش می‌یابد و مقدار اکسیژن محلول در آب در طول سرریز بیشتر می‌شود. در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱، بدون حضور کنگره، جریان عبوری از روی سرریز پلکانی در پله‌های اول تا سوم به صورت سطحی و تقریباً شفاف و بدون هوا مشاهده می‌شود در حالی که در شرایط مشابه هیدرولیکی ولی با حضور کنگره، ترکیبی از

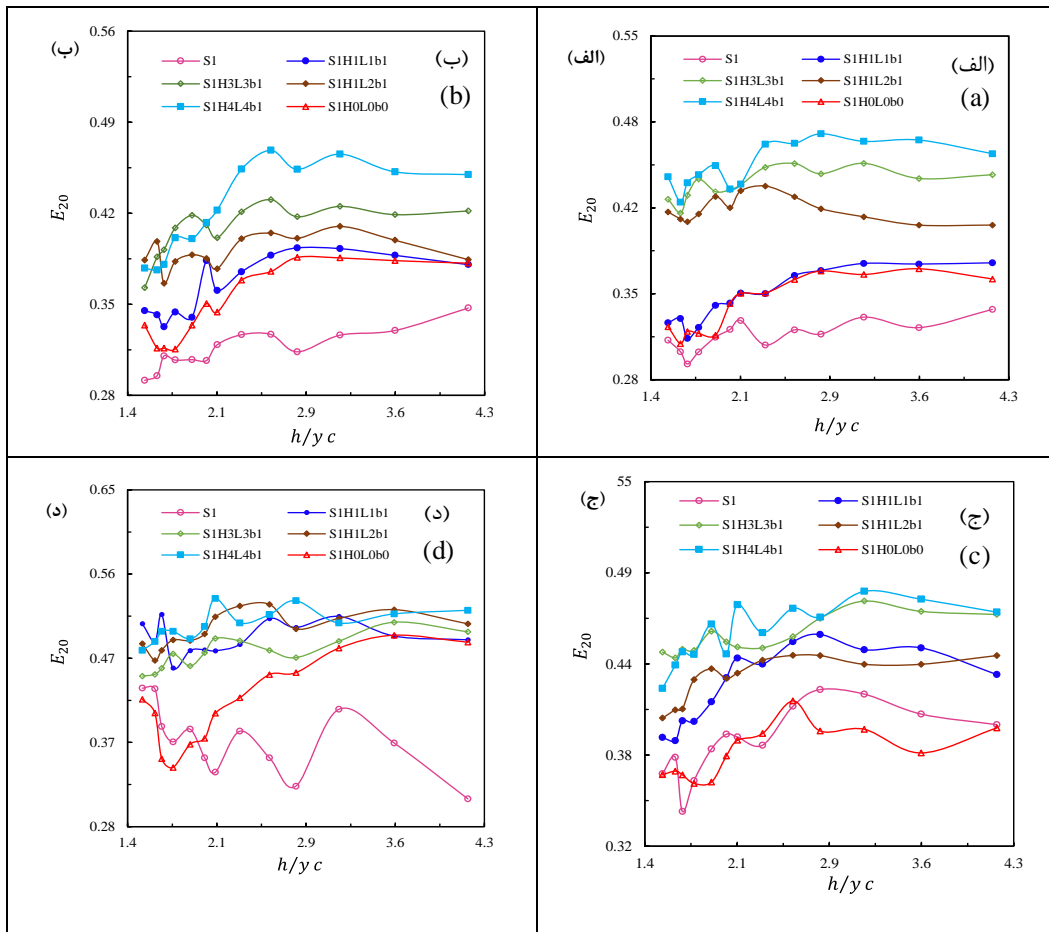


شکل ۵- (الف) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز  $S_1$  در  $h/y_c=4.16$  (ب) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز  $S_1H_2L_2b_1$  در  $h/y_c=4.16$

Fig. 5- a) Front and profile view of Photos  $S_1$  weir at  $h/y_c=4.16$   
b) Front and profile view of Photos  $S_1H_2L_2b_1$  weir at  $h/y_c=4.16$

افزایش اکسیژن محلول در بالادست ( $E_f$ )  $1/28$  منجر به افزایش غلظت اکسیژن محلول به میزان  $48$  درصد نسبت به حالت بدون کنگره شد. با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست، متوسط عملکرد سرریزها کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج تغییرات غلظت اکسیژن محلول بدون حضور کنگره نشان می‌دهد در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست  $3, 4, 5$   $mg/l$  و متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول ( $E_f$ ) به ترتیب  $0/42, 0/56$  و  $0/27$  و با ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف، پارامتر  $E_f$  به طور متوسط برای غلظت‌های مذکور به ترتیب  $0/45, 0/65$  و  $0/33$  حاصل شده است.

در شکل‌های ۶ و ۷ و نیز در جدول ۲، اثر ایجاد کنگره بر مقدار تغییرات اکسیژن محلول آب در دمای  $20$  درجه سلسیوس ( $E_T$ ) برای سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست  $2, 3, 4, 5$   $mg/l$  ( $C_{ii}$ ) برای عمق‌های پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده برای غلظت اکسیژن محلول  $C_{ii}=2mg/l$  نشان می‌دهد که از میان کنگره‌های مختلف مورد بررسی در عمق پایاب برابر با ارتفاع پلکان، هندسه  $S_1H_4L_4b_1$  (فاصله کارگذاری  $2h$ ، ارتفاع  $0/75h$  و طول  $h$ ) دارای بهترین عملکرد در افزایش مقدار اکسیژن محلول است و با نسبت



شکل ۶- تأثیر ایجاد کنگره بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ برای عمق پایاب ( $d_p$ ) برابر با ارتفاع

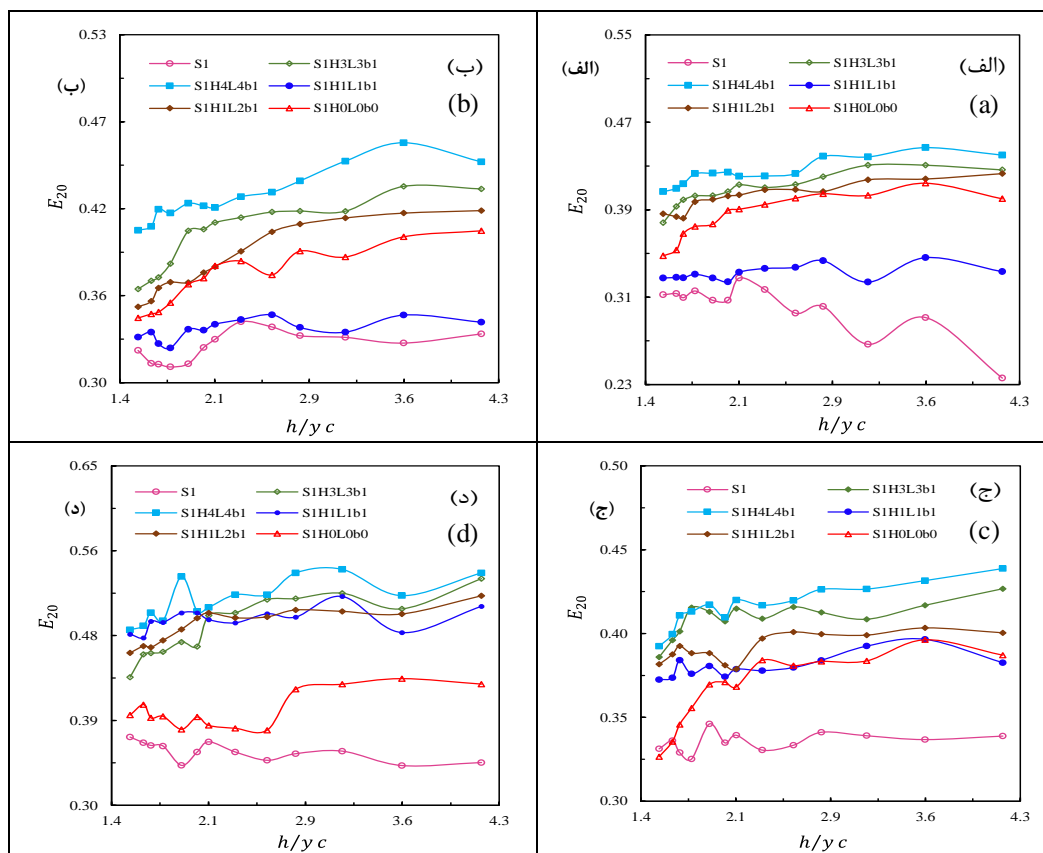
پلکان‌ها و در غلظت‌های اکسیژن بالادست: الف) ( $C_u=2 \text{ mg/l}$ ، ب) ( $C_u=3 \text{ mg/l}$ ، ج) ( $C_u=4 \text{ mg/l}$ ، د) ( $C_u=5 \text{ mg/l}$ )

Fig. 6- Effect of labyrinth on increase of dissolved oxygen performance at stepped weir with slope of 1:1 at  $d_p = h$  and upstream oxygen of a)  $C_u=2 \text{ mg/l}$ , b)  $C_u=3 \text{ mg/l}$ , c)  $C_u=4 \text{ mg/l}$  and d)  $C_u=5 \text{ mg/l}$

آورده شده است. نشان می‌دهد برای غلظت اکسیژن محلول بالادست  $C_u=2 \text{ mg/l}$ ، هندسه  $S_1H_3L_3b_1$  (فاصله کارگذاری  $h$ ، ارتفاع  $0.75h$  و طول  $h$ ) دارای بهترین عملکرد در افزایش مقدار اکسیژن محلول است و با  $E_f$  ۱/۲۸ منجر به افزایش اکسیژن محلول به میزان ۷۷ درصد نسبت به حالت بدون کنگره شد. با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست به مقادارهای ۳، ۴ و ۵، متوسط پارامتر  $E_f$  در سرریز پلکانی به ترتیب ۰/۵۵، ۰/۳۵ و ۰/۲۵ و با ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف، متوسط  $E_f$  برای غلظت‌های ذکر شده به ترتیب ۰/۶۶، ۰/۴۲ و ۰/۳۳ حاصل شده است.

یادآوری می‌شود که با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست، برای افزایش اکسیژن محلول به جریان نیاز به زمان، آشفتگی و تلاطم بیشتری است. در نتیجه، برای شرایط یکسان هیدرولیکی و هندسی سرریزها، با افزایش غلظت محلول در بالادست، عملکرد سرریزها در افزایش اکسیژن محلول جریان کاهش می‌یابد.

با افزایش عمق پایاب به  $2h$ ، تراز سطح آب در پایاب برابر با تراز پلکان آخر شده و ارتفاع ریزش جریان از روی در پله‌ی آخر به حوضچه پایین دست کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج در شکل ۷ و جدول ۲



شکل ۷- تأثیر ایجاد کنگره بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی با شیب ۱:۱ برای عمق پایاب ( $d_p$ ) دو برابر ارتفاع پلکان ها و در غلظت های اکسیژن بالادست ( $C_u$ ): الف)  $C_u=2$  mg/l، ب)  $C_u=3$  mg/l، ج)  $C_u=4$  mg/l و د)  $C_u=5$  mg/l

جدول ۲- متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی-کنگره ای با شیب ۱:۱ و عمق های پایاب مختلف در دامنه  $h/y_c > 2/3$

$E_f$				$E_T$				عمق پایاب (m) ( $d_p$ ) Tail water depth	شماره سرریز Weir number
5	4	3	2	5	4	3	2		
0.27	0.42	0.56	0.86	0.35	0.4	0.32	0.32	$h$	S <sub>1</sub>
0.25	0.35	0.55	0.72	0.34	0.33	0.33	0.28	$2h$	
0.37	0.48	0.56	1.08	0.49	0.44	0.38	0.36	$h$	S <sub>1</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>1</sub>
.34	0.4	0.56	1	0.49	0.38	0.34	0.33	$2h$	
0.32	0.43	0.68	1.25	0.51	0.43	0.39	0.41	$h$	S <sub>1</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>1</sub>
0.35	0.45	0.72	1.09	0.5	0.4	0.4	0.41	$2h$	
0.31	0.44	0.65	1.26	0.48	0.46	0.42	0.44	$h$	S <sub>1</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>1</sub>
0.34	0.4	0.77	1.28	0.51	0.41	0.41	0.4	$2h$	
0.37	0.49	0.74	1.28	0.51	0.46	0.45	0.46	$h$	S <sub>1</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>1</sub>
0.36	0.44	0.69	1.14	0.52	0.42	0.43	0.43	$2h$	
0.3	0.42	0.65	1.07	0.46	0.39	0.38	0.36	$h$	S <sub>1</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>
0.29	0.41	0.57	1.07	0.4	0.38	0.38	0.4	$2h$	

در شکل های ۸ و ۹ و نیز جدول ۳، اثر ایجاد کنگره بر مقدار عملکرد اکسیژن محلول در آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس ( $E_T$ ) برای سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ در غلظت های اکسیژن محلول بالادست

در سرریز پلکانی به‌ترتیب ۰/۵۷، ۰/۳۹ و ۰/۳۱ در همین غلظت‌ها، با ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف، پارامتر  $E_f$  به‌طور متوسط به‌ترتیب ۰/۷۹، ۰/۴۶ و ۰/۳۸ به‌دست آمده است.

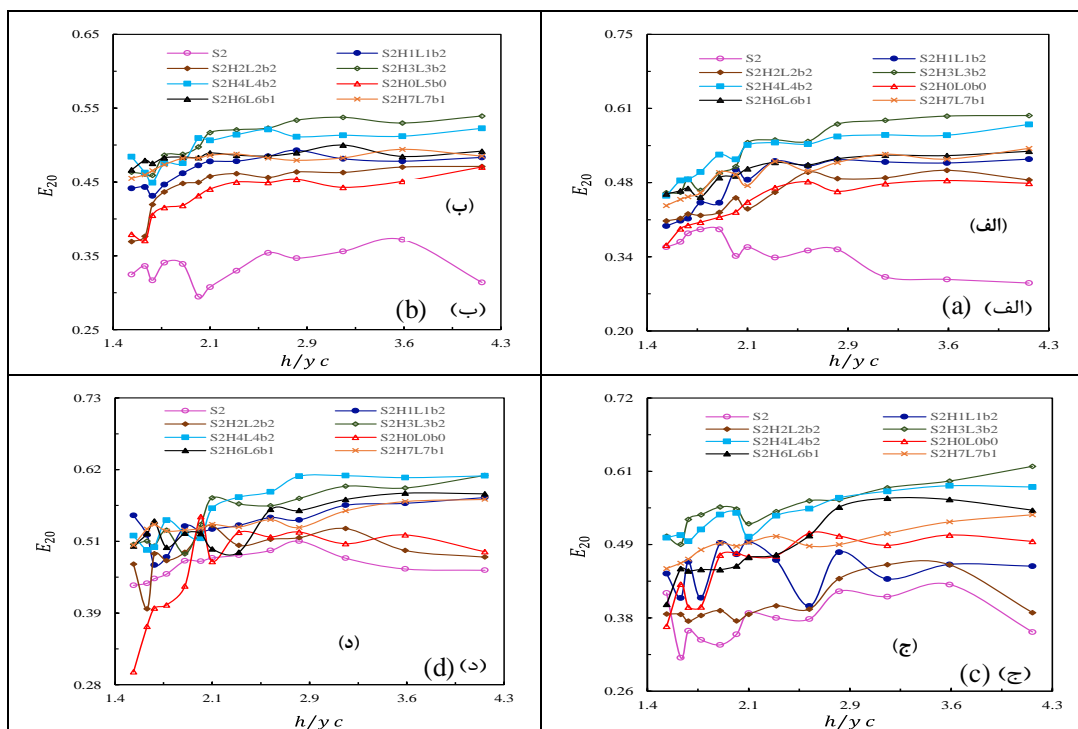
مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب به  $2h$ ، تراز سطح آب در پایاب برابر با تراز پلکان آخر شده و ارتفاع ریزش جریان از روی پله‌ی آخر کاهش می‌یابد، در نتیجه در محل برخورد جت ریزشی با سطح آب حوضچه پایین دست سرریز، آشفتگی کمتری به‌وجود می‌آید و سطح آب کمتر متلاطم می‌شود. مقایسه نتایج که در شکل ۹ و جدول ۳ آورده شده‌اند نشان می‌دهد برای غلظت اکسیژن محلول بالادست  $C_{ii}=2 \text{ mg/l}$ ، از میان کنگره‌های مورد بررسی هندسه  $S_2H_3L_3b_2$  (فاصله کارگذاری  $h$ ، ارتفاع  $0.75h$  و طول  $2h$ ) به‌دلیل ارتفاع ریزش بیشتر توسط کنگره‌ها به‌ویژه در پلکان آخر دارای بهترین عملکرد در افزایش مقدار اکسیژن محلول است و با راندمان  $E_T=0.52$ ، اکسیژن محلول به‌میزان ۶۲ درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش یافته است.

$C_{ii}$  (mg/l) ۲، ۳، ۴ و ۵ در عمق پایاب برابر ارتفاع پلکان نشان داده شده است. بر اساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده رژیم جریان در سرریز با شیب ۱:۲، جریان سطحی در  $h/y_c < 1/0.5$ ، جریان انتقالی در  $1/0.5 < h/y_c < 1/0.43$  و جریان ریزشی در  $h/y_c > 1/0.43$  رخ می‌دهد (Khatsuria, 2005).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی نصب کنگره بر این شیب از سرریز پلکانی به‌طور متوسط ۳۲ درصد به راندمان افزایش اکسیژن محلول ( $E_T$ ) می‌افزاید. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده برای غلظت اکسیژن محلول  $C_{ii}=2 \text{ mg/l}$  نشان می‌دهد که با نصب کنگره با هندسه  $S_2H_3L_3b_2$  (فاصله کارگذاری  $h$ ، ارتفاع  $0.75h$  و طول  $2h$ )، راندمان ( $E_T$ ) به‌طور متوسط ۴۷ درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش می‌یابد و بهترین عملکرد را در افزایش مقدار اکسیژن محلول دارد. هندسه مذکور با  $E_f$  برابر با ۱/۵۳، موجب شده است غلظت اکسیژن محلول به‌میزان ۷۱ درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش یابد. با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست به  $4.3 \text{ mg/l}$  و  $5$ ، متوسط  $E_f$

جدول ۳- متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی-کنگره‌ای با شیب ۱:۲ و عمق‌های پایاب مختلف در دامنه  $h/y_c > 2/3$   
Table. 3- Mean performance of increase of dissolved oxygen at stepped- labyrinth weir with slope of 1:2 at different  $d_p$  for  $h/y_c > 2.3$

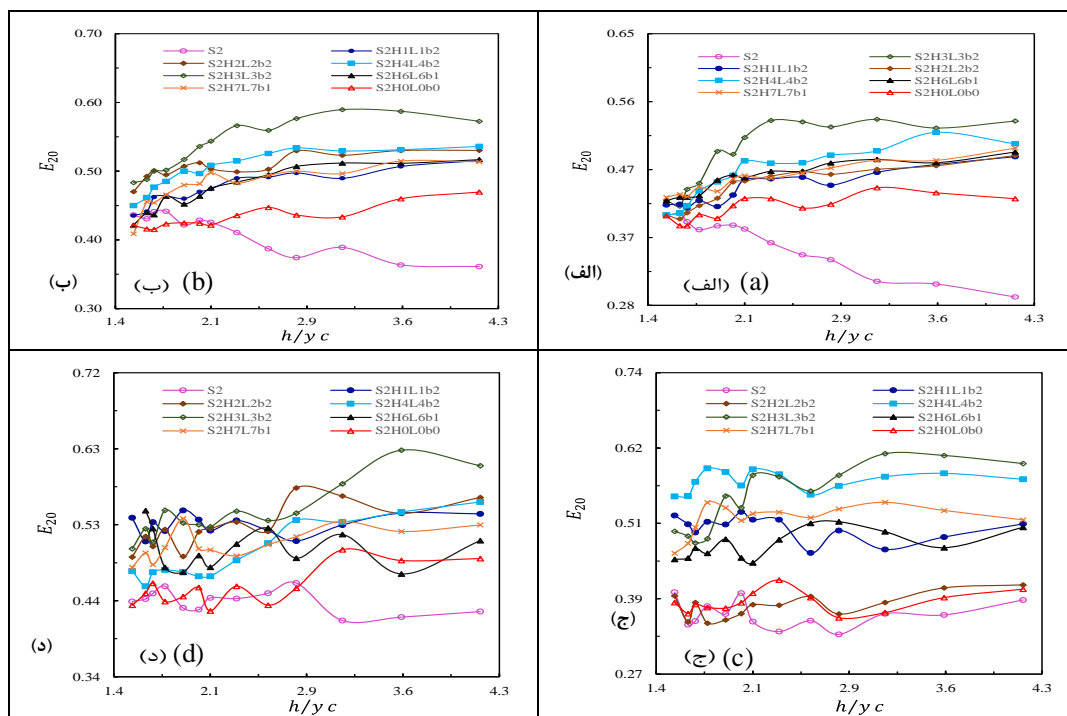
$E_f$				$E_T$				عمق پایاب (متر) (m) Tail water depth	شماره سرریز Weir number
غلظت (mg/l) Concentration									
5	4	3	2	5	4	3	2		
0.31	0.39	0.57	0.89	0.47	0.39	0.34	0.32	$h$	$S_2$
0.3	0.36	0.63	0.91	0.43	0.35	0.38	0.32	$2h$	
0.37	0.48	0.75	1.43	0.55	0.44	0.48	0.52	$h$	$S_2H_1L_1b_2$
0.38	0.52	0.83	1.28	0.53	0.48	0.49	0.46	$2h$	
0.35	0.41	0.71	1.56	0.5	0.41	0.46	0.48	$h$	$S_2H_1L_2b_2$
0.37	0.41	0.79	1.35	0.55	0.38	0.51	0.46	$2h$	
0.39	0.66	0.84	1.53	0.58	0.57	0.53	0.57	$h$	$S_2H_3L_3b_2$
0.42	0.64	0.92	1.38	0.57	0.58	0.57	0.52	$2h$	
0.43	0.64	0.92	1.25	0.59	0.56	0.51	0.56	$h$	$S_2H_4L_4b_2$
0.38	0.59	0.82	1.34	0.52	0.57	0.52	0.48	$2h$	
0.37	0.52	0.82	1.29	0.5	0.49	0.45	0.47	$h$	$S_2H_0L_0b_0$
0.33	0.41	0.72	1.15	0.46	0.38	0.44	0.42	$2h$	
0.38	0.52	0.78	1.45	0.55	0.53	0.48	0.52	$h$	$S_2H_6L_6b_1$
0.33	0.53	0.79	1.28	0.5	0.49	0.5	0.47	$2h$	
0.37	0.57	0.76	1.58	0.54	0.5	0.48	0.51	$h$	$S_2H_7L_7b_1$
0.37	0.53	0.81	1.33	0.51	0.52	0.5	0.47	$2h$	



شکل ۸- تأثیر ایجاد کنگره بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ برای عمق پایاب ( $d_p$ ) برابر ارتفاع پلکانها

و در غلظت‌های اکسیژن بالادست ( $C_u$ ): الف)  $C_u=2$  mg/l، ب)  $C_u=3$  mg/l، ج)  $C_u=4$  mg/l و د)  $C_u=5$  mg/l

Fig. 8. Effect of labyrinth on increase of dissolved oxygen performance at stepped weir with slope of 1:2 at  $d_p = h$  and upstream oxygen of a)  $C_u = 2$  mg/l, b)  $C_u = 3$  mg/l, c)  $C_u = 4$  mg/l and d)  $C_u = 5$  mg/l



شکل ۹- تأثیر ایجاد کنگره بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ برای عمق پایاب ( $d_p$ ) دو برابر ارتفاع پلکانها

و در غلظت‌های اکسیژن بالادست ( $C_u$ ): الف)  $C_u=2$  mg/l، ب)  $C_u=3$  mg/l، ج)  $C_u=4$  mg/l و د)  $C_u=5$  mg/l

Fig. 9. Effect of labyrinth on increase of dissolved oxygen performance at stepped weir with slope of 1:2 at  $d_p = 2h$  and upstream oxygen of a)  $C_u = 2$  mg/l, b)  $C_u = 3$  mg/l, c)  $C_u = 4$  mg/l and d)  $C_u = 5$  mg/l

سطوح پلکان‌ها همراه با تلاطم، پرش‌های هیدرولیکی جزئی و حباب‌های هوای بیش‌تر بوده و علاوه بر این در محل برخورد جت‌های ریزشی با سطح آب حوضچه پایین‌دست سرریز، آشفتگی بالایی ایجاد و سطح آب حاوی حباب‌های زیادی می‌شود. در نتیجه شدت آشفتگی و تراکم حباب‌ها در سطح حوضچه افزایش می‌یابد و مقدار راندمان افزایش اکسیژن محلول به‌طور محسوس تغییر می‌کند (شکل ۱۰).

مقایسه نتایج به‌دست آمده از سرریز کنگره‌ای با شیب ۱:۲ حاکی از آن است که با کاهش فاصله کنگره‌ها از  $2h$  به  $h$  و در ارتفاع کنگره  $0.75h$ ، میزان راندمان افزایش اکسیژن محلول ( $E_T$ ) به‌طور متوسط ۱ درصد افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در فاصله یکسان کنگره‌ها ( $h$ ) و افزایش ارتفاع از  $0.5$  به  $0.75$  ارتفاع پله، میزان راندمان ( $E_T$ ) به‌طور متوسط ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع کنگره‌ها در فاصله یکسان  $h$ ،



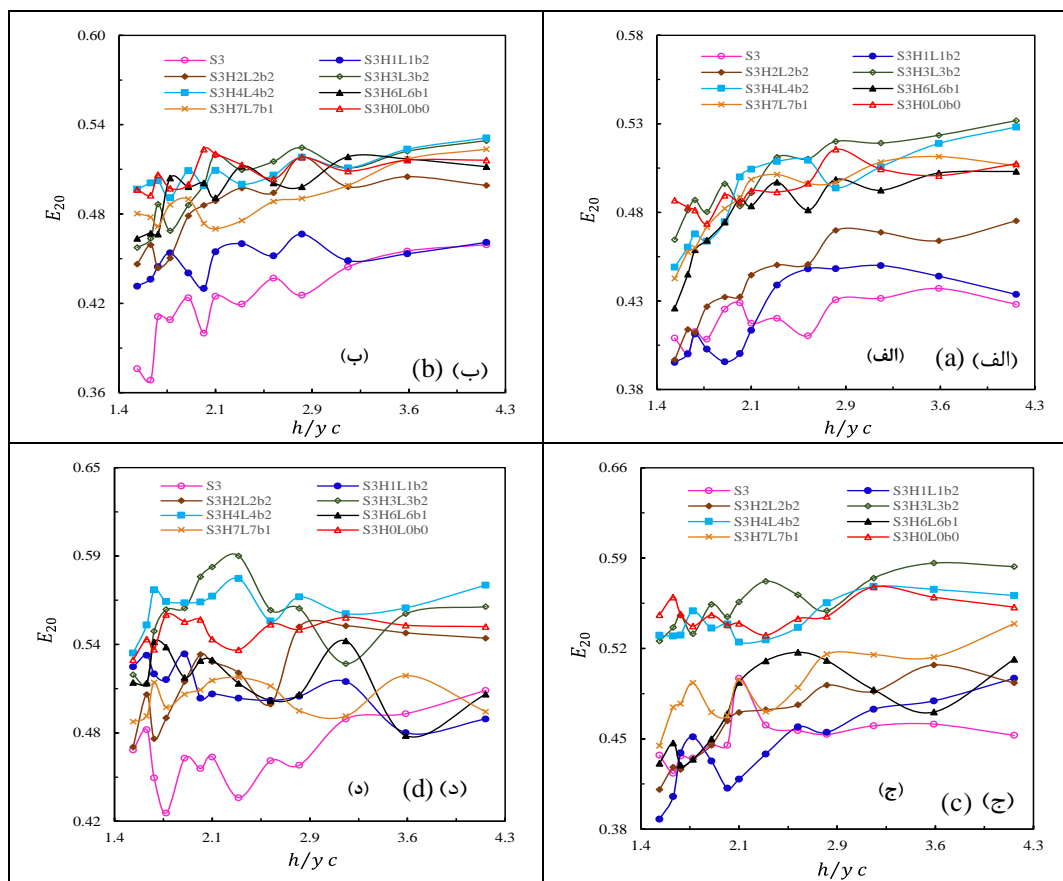
شکل ۱۰- الف) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز  $S_2H_3L_3b_2$  در  $h/y_c=2.5$  و ب) تصویر رو به رو و نیمرخ سرریز  $S_2H_4Lb_2$  در  $h/y_c=2.5$   
 Fig. 10- a) Front and profile view of Photos  $S_2H_3L_3b_2$  weir at  $h/y_c=2.5$  a) Front and profile view of Photos  $S_2H_4Lb_2$  weir at  $h/y_c=2.5$

تجزیه و تحلیل نتایج عملکرد اکسیژن محلول در شیب ۱:۳ حاکی از آن است که در شرایط بدون کنگره (سرریز  $S_3$ ) در غلظت اکسیژن محلول بالادست ( $C_{II}$ )  $2, 3, 4, 5$  mg/l مقدار راندمان اکسیژن محلول ( $E_T$ ) به‌طور متوسط  $0.44$  به‌دست می‌آید و با نصب کنگره بر این سرریز، مقدار این پارامتر به  $0.5$  افزایش می‌یابد. در این هندسه، به‌دلیل ۳ برابر بودن طول پلکان‌ها نسبت به ارتفاع

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و در جدول ۴، نتایج تأثیر ایجاد کنگره بر مقدار عملکرد اکسیژن محلول در غلظت‌های ورودی مشخص برای سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ ارائه شده است. در سرریز با شیب ۱:۳ جریان سطحی در  $h/y_c < 0.97$  و جریان انتقالی در محدوده  $0.97 < h/y_c < 1.25$  و جریمان ریزشی در  $h/y_c > 1.25$  رخ می‌دهد (Khatsuria, 2005).

شرایط، گزینه‌های فرارگیری کنگره‌ها با هندسه  $S_3H_7L_7b_1$  و  $S_3H_6L_6b_1$ ،  $S_3H_4L_4b_2$ ،  $S_3H_3L_3b_2$  به‌طور متوسط با افزایش ۱۵ درصد در  $E_T$  نسبت به حالت بدون کنگره عملکرد مناسب‌تری دارند.

آن‌ها، امکان کارگذاری کنگره‌ها با طول ۰/۱ و ۰/۲ متر (برابر و دو برابر ارتفاع پلکان) به‌صورت هم‌لبه با وجه پایین‌دست پلکان (به‌عنوان نمونه هندسه‌های  $S_3H_7L_7b_1$  و  $S_3H_3L_3b_2$ ) فراهم گردید. در این



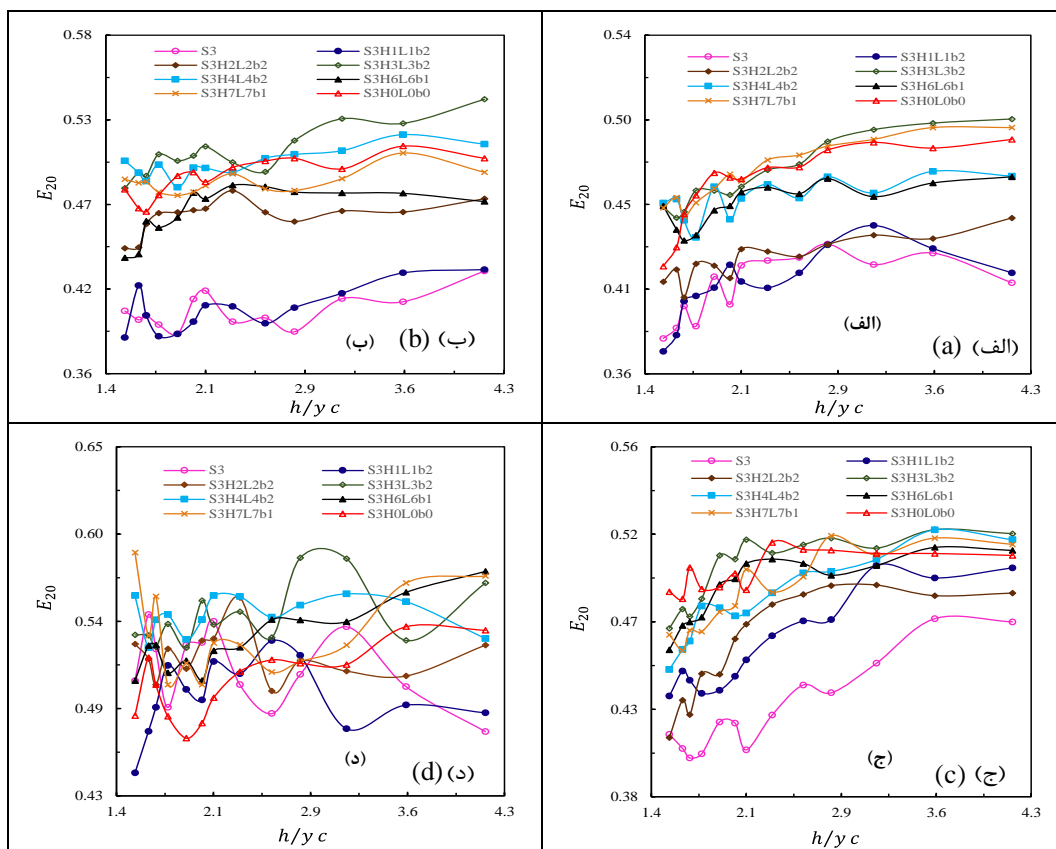
شکل ۱۱- تأثیر ایجاد کنگره بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ برای عمق پایاب ( $d_p$ ) برابر ارتفاع

پلکان‌ها و در غلظت‌های اکسیژن بالادست ( $C_u$ ): الف)  $C_u=2$  mg/l، ب)  $C_u=3$  mg/l، ج)  $C_u=4$  mg/l، د)  $C_u=5$  mg/l

Fig. 11- Effect of labyrinth on increase of dissolved oxygen performance at stepped weir with slope of 1:3 at  $d_p = h$  and upstream oxygen of a)  $C_u = 2$  mg/l, b)  $C_u = 3$  mg/l, c)  $C_u = 4$  mg/l and d)  $C_u = 5$  mg/l

اکسیژن محلول به‌میزان ۱۴ درصد نسبت به حالت بدون کنگره شد. با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست به مقادیرهای ۳، ۴ و ۵ mg/l، متوسط پارامتر  $E_T$  در سرریز پلکانی به‌ترتیب ۰/۴۴، ۰/۴۹ و ۰/۴۹ و با ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف، متوسط پارامتر  $E_T$  برای غلظت‌های ذکر شده به‌ترتیب ۰/۴۷، ۰/۴۹ و ۰/۵۲ حاصل شده است.

با افزایش عمق پایاب به  $2h$  در غلظت اکسیژن محلول بالادست  $C_u=2$  mg/l، از میان کنگره‌های مورد بررسی هندسه  $S_3H_3L_3b_2$  (فاصله کارگذاری  $h$ ، ارتفاع  $0.75h$  و طول  $2h$ ) و  $S_3H_7L_7b_1$  (فاصله کارگذاری  $h$ ، ارتفاع  $0.75h$  و طول  $h$ ) دارای بهترین عملکرد در افزایش مقدار اکسیژن محلول است (شکل ۱۲) و با راندمان  $E_T$  ۰/۴۸ منجر به افزایش



شکل ۱۲- تأثیر ایجاد کنگره بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ برای عمق پایاب ( $d_p$ ) دو برابر ارتفاع پلکان‌ها و در غلظت‌های اکسیژن بالادست ( $C_u$ ): (الف)  $C_u=2$  mg/l، (ب)  $C_u=3$  mg/l، (ج)  $C_u=4$  mg/l، (د)  $C_u=5$  mg/l

Fig. 12. Effect of labyrinth on increase of dissolved oxygen performance at stepped weir with slope of 1:3 at  $d_p=2h$  and upstream oxygen of a)  $C_u=2$  mg/l, b)  $C_u=3$  mg/l, c)  $C_u=4$  mg/l and d)  $C_u=5$  mg/l

در جدول ۵، مقادیر متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول ( $E_T$ ) در  $h/y_c > 2/3$  در عمق پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان برای کلیه سرریزهای پلکانی و پلکانی-کنگره‌ای آورده شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که از میان هندسه‌های مختلف مورد بررسی در شیب‌های متفاوت سرریزهای پلکانی، سرریز  $S_2H_3L_3b_2$  (فاصله کارگذاری  $h$  ارتفاع  $0.75h$  و طول  $2h$ ) با راندمان  $E_T$  ۰/۵۷ مناسب‌ترین عملکرد را دارد. بررسی نتایج همچنین نشان می‌دهد ایجاد کنگره در سرریز با شیب ۱:۲ نسبت به شیب ۱:۱ و ۱:۳ راندمان افزایش اکسیژن محلول ( $E_T$ ) بیشتری ایجاد می‌کند.

در کنار هندسه‌های مختلف کنگره، ایجاد آستانه روی لبه پلکان (شکل ۱۳) با عرض ۰/۰۲۵ متر و ارتفاع ۰/۰۳۲ متر بررسی شد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد نصب آستانه‌ها به تشکیل پرش هیدرولیکی و جریان چرخشی در ناحیه پای هر پلکان می‌انجامد. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده برای غلظت اکسیژن محلول  $C_u=2$  mg/l نشان می‌دهد که با نصب آستانه با هندسه مذکور، پارامتر  $E_T$  به‌طور متوسط ۱۹ درصد و پارامتر  $E_f$  با مقدار ۱/۲۶ به‌طور متوسط ۵ درصد نسبت به حالت بدون کنگره افزایش یافته است.



جدول ۴- متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز پلکانی-کنگره‌ای با شیب ۱:۳ و عمق‌های پایاب مختلف در دامنه برای  $h/y_c > 2/3$

Table 4. Mean performance of increase of dissolved oxygen at stepped- labyrinth weir with slope of 1:3 at different  $d_p$  for  $h/y_c > 2.3$

$E_f$		$E_T$						عمق پایاب Tail water depth ( $d_p$ ) (m)	شماره سرریز Weir number
غلظت Concentration (mg/l)									
5	4	2	5	4	3	2			
0.34	0.49	0.75	1.19	0.47	0.45	0.44	0.42	$h$	$S_3$
0.34	0.47	0.69	1.44	0.49	0.44	0.4	0.42	$2h$	
0.33	0.48	0.75	1.25	0.49	0.46	0.45	0.44	$h$	$S_3H_1L_1b_2$
0.33	0.47	0.64	1.2	0.49	0.48	0.41	0.42	$2h$	
0.37	0.51	0.89	1.28	0.53	0.48	0.5	0.46	$h$	$S_3H_1L_2b_2$
0.34	0.45	0.74	1.19	0.51	0.48	0.46	0.43	$2h$	
0.4	0.62	0.8	1.55	0.55	0.57	0.51	0.51	$h$	$S_3H_3L_3b_2$
0.38	0.53	0.87	1.28	0.55	0.51	0.51	0.48	$2h$	
0.41	0.6	0.85	1.36	0.56	0.55	0.51	0.51	$h$	$S_3H_4L_4b_2$
0.4	0.55	0.87	1.39	0.54	0.5	0.5	0.46	$2h$	
0.4	0.58	0.84	1.26	0.54	0.54	0.51	0.5	$h$	$S_3H_0L_0b_0$
0.36	0.55	0.8	1.23	0.52	0.5	0.49	0.47	$2h$	
0.35	0.51	0.86	1.4	0.5	0.5	0.5	0.49	$h$	$S_3H_6L_6b_1$
0.35	0.52	0.77	1.38	0.54	0.5	0.47	0.45	$2h$	
0.36	0.54	0.84	1.4	0.5	0.5	0.49	0.5	$h$	$S_3H_7L_7b_1$
0.37	0.55	0.84	1.4	0.53	0.5	0.48	0.48	$2h$	



شکل ۱۳- نمای روبه‌رو و نیمرخ سرریز پلکانی-کنگره‌ای  $S_3H_0L_0b_0$  در  $h/y_c = 2.04$

Fig. 13- Front and profile view of  $S_3H_0L_0b_0$  weir at  $h/y_c = 2.04$

جدول ۵- مقادیر حداکثر راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریزهای پلکانی با و بدون کنگره در عمق‌های پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان برای محدوده  $h/y_c > 2/3$

Table 5- Maximum performance of increase of dissolved oxygen at stepped with and without labyrinth for tail water depth of  $h$  and  $2h$  and  $h/y_c > 2.3$

5	4	3	2	غلظت اکسیژن (mg/l)	شماره سرریز Weir number
				Concentration	
0.35	0.4	0.33	0.32		S <sub>1</sub>
0.49	0.44	0.38	0.36		S <sub>1</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>1</sub>
0.51	0.43	0.4	0.41		S <sub>1</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>1</sub>
0.51	0.46	0.42	0.44		S <sub>1</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>1</sub>
0.52	0.46	0.45	0.46		S <sub>1</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>1</sub>
0.46	0.39	0.38	0.4		S <sub>1</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>
0.47	0.39	0.38	0.32		S <sub>2</sub>
0.55	0.48	0.49	0.52		S <sub>2</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>2</sub>
0.55	0.41	0.51	0.48		S <sub>2</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>2</sub>
0.58	0.58	0.57	0.57		S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>2</sub>
0.59	0.57	0.52	0.56		S <sub>2</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>2</sub>
0.5	0.49	0.45	0.47		S <sub>2</sub> H <sub>6</sub> L <sub>6</sub> b <sub>1</sub>
0.55	0.53	0.5	0.52		S <sub>2</sub> H <sub>7</sub> L <sub>7</sub> b <sub>1</sub>
0.54	0.52	0.5	0.51		S <sub>2</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>
0.49	0.45	0.44	0.42		S <sub>3</sub>
0.49	0.48	0.45	0.44		S <sub>3</sub> H <sub>1</sub> L <sub>1</sub> b <sub>2</sub>
0.53	0.48	0.5	0.46		S <sub>3</sub> H <sub>2</sub> L <sub>2</sub> b <sub>2</sub>
0.55	0.57	0.51	0.51		S <sub>3</sub> H <sub>3</sub> L <sub>3</sub> b <sub>2</sub>
0.56	0.55	0.51	0.51		S <sub>3</sub> H <sub>4</sub> L <sub>4</sub> b <sub>2</sub>
0.54	0.54	0.51	0.5		S <sub>3</sub> H <sub>6</sub> L <sub>6</sub> b <sub>1</sub>
0.54	0.5	0.5	0.49		S <sub>3</sub> H <sub>7</sub> L <sub>7</sub> b <sub>1</sub>
0.53	0.5	0.49	0.5		S <sub>3</sub> H <sub>0</sub> L <sub>0</sub> b <sub>0</sub>

### نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده در سرریز پلکانی با شیب ۱:۲ حاکی از آن است که ایجاد کنگره با ارتفاع  $0.75h$  و فاصله کارگذاری  $h$  در شرایط با عمق پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان، به ترتیب ۷۱ و ۵۱ درصد در مقدار غلظت اکسیژن محلول در آب افزایش ایجاد می‌کند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد استفاده از کنگره‌هایی با ارتفاع  $0.75h$  در این شیب با ایجاد راندمان افزایش اکسیژن محلول به‌طور متوسط ۱۴ درصد عملکرد مؤثرتری نسبت به کنگره‌هایی با ارتفاع  $0.5h$  دارند. همچنین، در سرریز پلکانی با شیب ۱:۳ ایجاد کنگره با ارتفاع  $0.75h$ ، با فاصله‌های کارگذاری  $h$  و  $2h$  و طول برابر و دو برابر ارتفاع پلکان به‌صورت هم‌لبه با وجه پایین‌دست پلکان با افزایش ۱۵ درصد مقدار اکسیژن محلول، عملکرد مناسب‌تری نسبت به

در این تحقیق، تأثیر ایجاد کنگره با ارتفاع  $0.5$  و  $0.75$  ارتفاع پلکان ( $h$ ) و فاصله‌های کارگذاری  $h$  و  $2h$  بر افزایش مقدار اکسیژن محلول آب، به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم کیفی آب، به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد ایجاد کنگره روی سرریزها به دلیل اختلاط بیشتر جریان عبوری از روی پلکان‌های سرریز و نیز افزایش مدت‌زمان عبور جریان، راندمان افزایش اکسیژن محلول را به‌طور چشم‌گیر افزایش می‌دهد. مقایسه‌ها همچنین نشان می‌دهد با ایجاد کنگره با هندسه‌های مختلف، راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای با شیب ۱:۱ در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست  $2 \text{ mg/l}$  تا  $5$  به‌طور متوسط ۲۴ تا ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.

سایر هندسه‌ها در این شیب دارد. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی از میان هندسه‌های مختلف مورد بررسی، ارتفاع کنگره  $0.75h$  به‌دلیل افزایش شدت ریزش جت‌ها در طول سرریز دارد.

و نیز حوضچه پایین‌دست آن و در نتیجه ورود بیشتر حباب‌های هوا به توده جریان، عملکرد بهتری در افزایش مقدار اکسیژن محلول دارد.

## مراجع

- Baylar, A., Bagatur, T., & Emiroglu, M. E. (2007). Prediction of oxygen content of nappe, transition and skimming flow regimes in stepped-channel chutes. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(2): pp. 201-208.
- Baylar, A., & Bagatur, T. (2000). Aeration performance of weirs. *Water Engineering and Management*, 26(4): pp. 521-526.
- Bung, D., & Schlenkoff, 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.
- Chanson, H. (1993). Stepped spillway flows and air entrainment. *Can. Journal of Civil Engineering*, 3(6): pp. 422-435.
- 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.
- Christodouliou, G. (1993). Energy dissipation on stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(5): pp. 644-650.
- Chao, A., Chang, S., & Galler, W. (1988). Effect of temperature on oxygen transfer laboratory studies. *Journal of Environmental Engineering*, 113(5): pp. 1089-1101.
- Emiroglu, M. E., & Baylar, A. (2005). Influence of included angle and sill slope on air entrainment of triangular planform labyrinth weirs. *J. Hydraul. Eng.* 131(3): pp. 184-189.
- Gameson, A. L. H. (1957). Weirs and the aeration of rivers. *Journal of The Institution of Engineers*, 2(6): pp. 477-490.
- Gulliver, J. S., Thene, J. R., & Rindels, A. J. (1990). Indexing gas transfer in self-aerated flows. *Journal of Environmental Engineering*, 116(3): pp. 503-523.
- Gonzalez, A., Takahashi, M., & Chanson, H. (2008). An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46(1): pp. 24-35.
- Guenther, P., Felder, S., & Chanson, H. (2013). Flow aeration, cavity processes and energy dissipation on flat and pooled stepped spillways for embankments. *Environmental Fluid Mechanics*, 13(5): pp. 503-525.
- Keshavarz-Eskandari, M., Esmaeili Varaki, M., & Karimi, M. (2019). Experimental investigation of energy dissipation over stepped-labyrinth weirs. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 20(74):59-74.

- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Marcel Dekker, New York.
- Mansori-Konsestani, R., Esmaeili-Varaki, M., & Navabian, M. (2018). Experimental study of the geometric effect of trapezoidal labyrinth weirs on increase of the dissolved oxygen. *Iran Journal of Soil Water Research*, 49(5): pp. 977-990..
- Matos, J. (2001). Onset of skimming flow on stepped spillways. *Discussion. Journal of Hydraulic Engineering*, 127(6): pp. 519-521.
- Nakasone, H. (1987). Study of aeration at weirs and cascades. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(1): pp. 64-81.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Takahashi, M. (2001). Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(6): pp. 519-525.
- Subramanya, K. (1986). *Flow in Open Channel*. Second Edition, Tata McGraw-Hill New Delhi.
- Wuthrich, D., & Chanson, H. (2014). Air entertainment and energy dissipation on gabion stepped weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9): 04014046.

## Experimental Investigation of Efficiency of Increasing Dissolved Oxygen of Flow in Stepped-Labyrinth Weirs

M. Habibpanah, M. Esmaili-Varaki\*, M. Navabian, R. Behbodi, M. Farzin  
and M. Saffari-Jourshari

\* Corresponding Author: Associate Professor, Department of water Engineering, Department of water and environmental engineering, Caspian Sea basin research center, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

Received: 5 October 2018, Accepted: 5 May 2019

### Extended Abstract

#### Introduction

One of the important parameters of water quality is the high level of dissolved oxygen (DO) content that is essential for the survival of all aquatic organisms and water quality improvement. Aeration refers to the physical process of oxygen absorption from the atmosphere and enhancement of the dissolved oxygen of water. Some hydraulic structures enhance the oxygen transfer by creating a great deal of turbulence and entering air bubbles. Stepped spillways are efficient in terms of air bubble entrainment. Advantages of stepped spillways include strong turbulent mixing, a large residence time and a substantial air bubble entrainment. Moreover, based on the laboratory data, some researchers have studied the aeration performance of labyrinth weirs in order to develop regression models for the prediction of aeration efficiency. The experimental results showed that the labyrinth weirs aerated significantly better than the normal weirs, especially at the lower drop heights. One of the methods to increase the content of dissolved oxygen is installation of structures that help increasing turbulence and entering small bubbles of air into water body. A falling jet of weirs is a specific case of creating turbulence in the water and increasing DO.

#### Methodology

Experimental measurements were conducted in the hydraulics modeling laboratory of University of Guilan, Iran in a flume with rectangular cross section having a 1.5 width, 1 m depth and 15 m length the experimental models consisted of five steps made of PVC panels. In this study three different slopes of spillway (1:1, 1:2 and 1:3 V: H) and one step height ( $h=0.10$  m) were examined. In order to clarify the influence of labyrinth geometries on dissolved oxygen efficiency, intermediate blocks with different configurations were set in a zigzag pattern on every two steps. The height of labyrinths ( $H$ ) was chosen 0.05 and 0.075 m, and the installed spacing between the labyrinths ( $L$ ) along the width of channel were 0.1 and 0.2 m. In this study, the flow characteristics over the stepped weirs with intermediate labyrinths were compared with the pooled stepped ones which made by sill with height and thickness of 0.032 and 0.025 m, respectively. In order to investigate the aeration efficiency of stepped-labyrinth weirs, and in particular, to determine the effects of hydraulic and geometrical parameters, 572 tests were Experimental measurements were conducted in the hydraulics modeling laboratory of University of Guilan, Iran, in a flume with rectangular cross section having 1.5m width, 1m depth and 15m length the experimental models consisted of five steps made of PVC panels. In this study, three different slopes of spillway (1:1, 1:2 and 1:3 V:H) and one step height ( $h=0.10$  m) were examined. In order to clarify the influences of labyrinth geometries on dissolved oxygen efficiency, intermediate blocks with different configurations were set in a zigzag pattern

on every two steps. Two heights of labyrinths ( $H$ ) were 0.05 and 0.075 m, and the installed spacing between the labyrinths ( $L$ ) along the width of channel were 0.1 and 0.2 m. In this study, the flow characteristics over the stepped weirs with intermediate labyrinths were compared with that of pooled stepped ones which made by sill with height and thickness of 0.032 and 0.025 m, respectively. In order to investigate the aeration efficiency of stepped-labyrinth weirs, and in particular, to determine the effects of hydraulic and geometrical parameters, 572 tests were carried out. Moreover, the variation of DO concentration in water flowing over the weirs can be affected by a proportion of the upstream DO deficit. Therefore, in order to make the comparison as fair as possible, four different upstream DO concentrations ( $C_u$ ) 2, 3, 4 and 5 ( $mg/l$ ) were chosen to illustrate the effects of  $C_u$  value on the dissolved oxygen efficiency. The upstream DO concentrations were based on a range between minimum DO concentrations (2  $mg/l$ ) and dissolved oxygen saturation concentration (8-10  $mg/l$ ).

### Results and Discussion

Comparison of results of DO concentrations ( $C_u$ ) on aeration efficiency of the flat and stepped-labyrinth weirs with 1:1 slope under two tailwater conditions ( $d_p=h$  and  $d_p=2h$ ) indicated that the  $S_1H_4L_4b_1$  configuration had the highest DO efficiency. Thus, for upstream oxygen transfer efficiency ( $E_u$ ) of 1.28, the concentration of dissolved oxygen associated with the stepped-labyrinth weirs was almost 48% higher than that for flat stepped weirs.

For flat stepped weirs, since the upstream concentration of DO became larger ( $C_u = 2, 3$  and 4  $mg/l$ ), there was a decreasing tendency of  $E_u$  to 0.56, 0.42 and 0.27, respectively. However, corresponding  $E_u$  values for stepped-labyrinth weirs were 0.65, 0.45 and 0.33. As a consequence, for a given geometry and hydraulic condition, decreasing the upstream dissolved oxygen concentration increased the average DO efficiency of stepped weirs. For  $C_u=2$  ( $mg/l$ ), the  $S_1H_3L_3b_1$  was the most efficient configuration due to providing the strong turbulent mixing and substantial air bubble entrainment which the average value of  $E_u$  in flat stepped weirs with  $S_1$  configuration, corresponding to the upstream dissolved oxygen concentration of 3, 4 and 5 ( $mg/l$ ), was 0.55, 0.35 and 0.25, respectively (Fig. 12). However, intermediate labyrinths on the steps led to increase the air entrainment and the average value of  $E_u$  increased to 0.66, 0.42 and 0.33. for slope of 1:2, the  $S_2H_3L_3b_2$  configuration had the best performance in this slope. Hence, for  $C_u=2$  ( $mg/l$ ), this configuration increased the  $E_{20}$  and  $E_u$  up to 47% and 71%, respectively, compared to the flat stepped weirs. By reduction of stepped weir slope to 1:3,  $C_d$  of tested labyrinth weirs with the average  $E_{20}=0.44$  and  $E_u=1.25$  increased by 50%. The DO efficiency in the  $S_3H_3L_3b_2$ ,  $S_3H_4L_4b_2$ ,  $S_3H_6L_6b_1$  and  $S_3H_7L_7b_1$  configurations, which labyrinths were installed at the same edge as the steps, had better performance, compared with that of other tested geometries.

### Conclusion

The air bubbles transfer and dispersion into water are governed by overflowing the jet, hydraulic jump and interaction of flow jet with receiving pool. The stepped-labyrinth weirs were shown to have an overall aeration advantage over the flat stepped weirs, largely because of the high turbulence and the high air bubble entrainment.

The aeration advantages of the labyrinth-stepped weir become greater at smaller weir slopes. Conclusions revealed that for the slopes of 1:1, 1:2, 1:3 and tailwater of  $h$ , a labyrinth stepped weir with labyrinth height of  $0.75h$  and labyrinth interspace of  $h$ , had 48%, 71% and 15% higher aeration efficiency than that of flat stepped weirs. However, with doubling of the tailwater depth, the dissolved oxygen efficiency increased by 77%, 51% and 15%, compared with the similar flat stepped weirs.

**Keywords:** Aeration, Dissolved Oxygen, Labyrinth Weir, Stepped Weir, Water Quality