

نسبت کمبود اکسیژن محلول آب و راندمان هوادهی 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. گلیور و ریندلز (Gulliver & Rindels, 1993) به اندازه‌گیری انتقال اکسیژن هوا-آب در سازه‌های هیدرولیکی پرداختند و معادلاتی را برای ارتباط انتقال اکسیژن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به سایر دماهای بین صفر تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد دادند.

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 (Emiroglu & 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 توده جریان دارند. این محققان همچنین نشان دادند که برای همه زاویای داخلی با افزایش شیب دیواره سرریز، ورود هوا به داخل آب افزایش می‌یابد به گونه‌ای که بیشترین مقدار ورود هوا برای زاویه داخلی سرریز ۱۳۵ درجه و شیب دیواره ۴۵ درجه است.

گانزالس و همکاران (Gonzalez *et al.*, 2008) با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سه نوع زبری در رژیم جریان سطحی عبوری از تندآب‌های پلکانی دریافتند که زبری پله بر نوع رژیم جریان بی‌تأثیر است. این

دریاچه‌ها و دیگر منابع آبی، در آینده این امر به بحرانی فزاینده تبدیل خواهد شد. در حال حاضر کیفیت آب و حفظ پارامترهای کیفی آن در آب‌های شیرین بسیار اهمیت دارد. غلظت اکسیژن محلول یکی از پارامترهای مهم کیفی آب است که تأثیر بسزایی بر بهبود حیات آبزیان و اکوسیستم‌های آبی دارد. بالا بودن غلظت اکسیژن همچنین در فرآیندهای تصفیه آب، مانند حذف آهن و منگنز، نقش اساسی دارد. از این پارامتر به‌طور عمده به عنوان شاخص آلودگی در رودخانه‌ها استفاده می‌شود (Mohan & Komar, 2016). اهمیت وجود اکسیژن محلول تا حدی است که میزان پاک‌ی آب را بر مبنای میزان اکسیژن محلول در آب می‌سنجند. به همین منظور محققان تلاش‌های زیادی کرده‌اند تا راه‌حل‌های مناسب برای این موضوع در پیش گیرند (Esmaeili Varaki *et al.*, 2019).

روش‌های مختلفی برای افزایش اکسیژن محلول آب معرفی شده است که آنها را در چهار گروه تقسیم کرده‌اند: هوادهی ثقلی-ریزشی، هوادهی پاششی (اسپری)، پخش‌گرها یا دیفیوزرهای حباب هوا، و هوادهی مکانیکی (Baylar *et al.*, 2007). یکی از راهکارهای اقتصادی و کم‌هزینه برای بهبود مقدار اکسیژن محلول در آب، به‌کارگیری روش هوادهی ثقلی-ریزشی است که کاربرد زیادی در پروژه‌های تصفیه آب، فاضلاب و احیای رودخانه‌ها دارد (Nakasone, 1987).

در زمینه هوادهی به صورت ثقلی-ریزشی، که عمدتاً مربوط به انواع سرریزهاست، تاکنون تحقیقات زیادی شده است ولی مطالعات در موضوع اثر آنها بر افزایش اکسیژن محلول در آب اندک است. جامسون (Gameson, 1957) از اولین محققانی بود که هوادهی در سرریزها را بررسی کرد و روابطی برای

شیب‌های ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ در دامنه وسیعی از دبی جریان و عمق‌های پایاب برابر و دو برابر ارتفاع پلکان به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که به‌طور کلی از میان هندسه‌های مختلف مورد بررسی، ارتفاع کنگره $0.75h$ به دلیل افزایش مقدار اختلاط و آشفته‌گی تیغه‌های جریان در طول سرریز، حوضچه آرامش پایین‌دست آن و ورود بیشتر حباب‌های هوا به توده جریان، عملکرد بهتری در افزایش مقدار اکسیژن محلول دارد. بررسی نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بیشترین راندمان افزایش اکسیژن محلول در سرریز با شیب ۱:۱ و ۱:۲ با میزان تقریبی ۶۲ درصد نسبت به حالت بدون کنگره است. افزون بر این، در سرریز با شیب ۱:۳ راندمان افزایش اکسیژن محلول به میزان ۱۵ درصد نسبت به حالت بدون کنگره مشاهده شده است.

در کنار انواع سرریزهایی که می‌توان برای افزایش اکسیژن محلول در رودخانه‌ها به کار گرفت، سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، به دلیل نقشی که در طرح‌های مهندسی رودخانه به منظور کنترل تراز بستر رودخانه‌ها دارند، می‌توانند به عنوان سازه افزایش‌دهنده اکسیژن محلول نیز استفاده شوند. مقدار راندمان هوادهی و اکسیژن‌دهی در این سازه‌ها تابعی است از مشخصات هندسی آن از نظر شیب، طول و اندازه زبری سطح آن، مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سازه و شرایط عمق پایاب. هرچه جریان عبوری از روی آن سازه‌ها دارای آشفته‌گی و اختلاط بیشتر باشد، می‌توان انتظار داشت که مقدار اکسیژن بیشتری وارد جریان شود.

پالیارا و کیاوچینی (Pagliara & Chiavaccini, 2006a) وضعیت استهلاک انرژی روی سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را در دامنه شیب‌های ۱:۱۲ تا ۱:۴ و محدوده دبی‌های m^3/s

محققان می‌گویند موقعیت نقطه آغاز هوادهی برای سرریز پلکانی زیر ۳۵ درصد پایین‌دست‌تر از موقعیت نقطه آغاز هوادهی برای سرریز پلکانی صاف است. بانگ و شلنکف (Bung & Schlenkhoff, 2010) وضعیت هوادهی را در مدل فیزیکی یک سرریز پلکانی با مقیاس ۱:۱۰ بررسی کردند و نشان دادند که زبری اثر محسوسی بر هوادهی در سرریز پلکانی ندارد.

منصوری و همکاران (Mansori-Konsestani *et al.*, 2018) به بررسی عملکرد سرریزهای کنگره‌ای-ذوزنقه‌ای، در مقایسه با سرریز خطی، بر افزایش اکسیژن محلول تحت شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی پرداختند. مشاهدات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق نشان داد که با تغییر هندسه سرریز از خطی به کنگره‌ای، مقدار متوسط عملکرد سرریزها در افزایش اکسیژن محلول از ۳۵ به ۴۲ درصد افزایش می‌یابد.

البرزی ورکی و همکاران (Alborzi Varaki *et al.*, 2019) اثر پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین‌دست دریچه بر افزایش اکسیژن محلول را برای اعداد فرود کمتر از $4/5$ بررسی کردند و نشان دادند که هرچه غلظت اکسیژن محلول قبل از پرش هیدرولیکی کمتر باشد، راندمان افزایش اکسیژن محلول بیشتر می‌شود. همچنین با استفاده از تئوری خود متشابهی ناقص، رابطه تجربی برای برآورد مقدار اکسیژن محلول در پایین‌دست پرش هیدرولیکی ارائه گردید.

اسمعیلی ورکی و همکاران (Esmaeili Varaki *et al.*, 2019) راندمان اکسیژن محلول آب را در سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای با ارتفاع‌های 0.5 و 0.75 ارتفاع پلکان (h)، فاصله‌های کارگذاری برابر و دو برابر ارتفاع پلکان در پایین‌دست سرریز پلکانی با

و برای شیب‌های بیشتر، مقاومت جریان افزایش چشمگیری پیدا می‌کند.

پالیارا و همکاران (Pagliara et al., 2008) استهلاک انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را در شرایط پرش هیدرولیکی مستغرق (تشکیل پرش هیدرولیکی روی سازه) بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها در محدوده شیب‌های ۱:۸، ۱:۶ و ۱:۴ با دو حالت بستر صاف و بستر زیر و تنظیم پرش هیدرولیکی در یک سوم و دو سوم طول سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نشان داد که استهلاک انرژی عمدتاً به پارامتر y_c/H عمق بحرانی جریان و H ارتفاع سازه، اندازه زبری نصب شده روی سازه و شرایط پرش هیدرولیکی بستگی دارد. این محققان همچنین به معادله‌ای برای ارزیابی استهلاک انرژی دست یافتند.

احمد و همکاران (Ahmad et al., 2009) وضعیت استهلاک انرژی را روی سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با چیدمان مصالح سنگی یک در میان در شیب کارگذاری ۱:۴ بررسی کردند. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی برای زبری‌های مختلف با میانگین $0.02 m$ نشان داد که در دبی‌های کمتر به دلیل تداخل بیشتر جریان در میان المان‌های زبری، استهلاک انرژی بیشتری رخ می‌دهد. این محققان می‌افزایند برای استهلاک بیشتر انرژی، به تراکم مصالح سنگی بیشتری در قسمت پایینی سازه نیاز خواهد بود تا در قسمت بالایی آن.

قاری و همکاران (Ghare et al., 2010) استهلاک انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با مصالح بستر مختلف را با تندآب‌های پلکانی مقایسه کردند و نشان دادند راندمان استهلاک انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، مانند تندآب‌های پلکانی، تابعی از y_c/H و S

تا 0.01 تا $0.1 m^3/s$ با مصالح مختلف بستر در محدوده‌ای از شن خیلی درشت تا قلوه سنگ‌های کوچک بررسی کردند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد با کاهش اندازه زبری، شیب و y_c/H عمق بحرانی جریان و H ارتفاع سازه، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. این محققان با بررسی شرایط هیدرولیکی جریان، محدوده $2/5 < y_c/k_s < 6/6$ (LR)، $2/5 < y_c/k_s < 6/6$ را زبری بزرگ مقیاس (IR) و $6/6 < y_c/k_s < 42$ را زبری متوسط مقیاس (SR) معرفی کردند پالیارا و کیاوچینی (Pagliara & Chiavaccini, 2006b) استهلاک انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار پوشیده شده با المان‌های زبری بزرگ-مقیاس را بررسی کردند و نشان دادند که مهم‌ترین پارامتر در افزایش استهلاک انرژی، تراکم زبری‌های بزرگ مقیاس است. بررسی نتایج نشان داد که حداکثر میزان افزایش استهلاک انرژی ۱۲-۱۰ درصد و در محدوده تراکم زبری‌های بزرگ مقیاس ۳۰-۳۵ درصد است.

پالیارا و کیاوچینی (Pagliara & Chiavaccini, 2006c) مقاومت جریان در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را با زبری‌های بزرگ مقیاس برجسته بررسی کردند. مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق نشان داد که حضور زبری‌های بزرگ مقیاس روی سازه‌های مذکور باعث افزایش مقاومت جریان می‌شود. زبری‌های بزرگ مقیاس نیز با آرایش ردیفی، استهلاک انرژی و مقاومت جریان بیشتری را نسبت به آرایش تصادفی ایجاد می‌کند. افزون بر این، بررسی نتایج حاکی از آن است که شیب سازه، به ویژه برای مقادیر تا 0.32 ، بر افزایش مقاومت جریان تأثیر چندانی ندارد

هر دو حالت جریان انتقالی و یکنواخت بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها در محدوده قطر مصالح در مقیاس واقعی ۰/۶ تا ۰/۸ متر و محدوده شیب‌های ۰/۱۸ تا ۰/۳۸ نشان داد که استهلاک انرژی عمدتاً به دلیل برخورد جریان با اجزای زبر نصب‌شده روی سازه است و مقدار آن در بخش بالادست سازه نسبت به بخش پایین‌دست آن بیشتر است.

پیشتر گفته شد که سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار علاوه بر نقشی که به عنوان سازه کاهش تراز بستر رودخانه دارند، به علت ویژگی جریان عبوری از روی آن و نیز قابلیت نصب المان‌های زبری با اندازه و آرایش‌های متنوع، می‌توانند به عنوان سازه افزایش‌دهنده اکسیژن محلول در آب نیز استفاده شوند. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر نصب زبری با مقیاس متوسط (IR) با چیدمان‌های مختلف روی سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار بر افزایش مقدار اکسیژن محلول آب در پایین‌دست سازه است.

مواد و روش‌ها

الف) تحلیل ابعادی

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.

میزان اکسیژن محلول آب در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار متأثر از

y_c عمق بحرانی جریان، H ارتفاع سازه و S شیب سازه) است و عملکرد یکسانی دارد. این محققان برای ارتباط نسبت ارتفاع پلکان (نسبت ارتفاع سازه به ارتفاع پله) در تندآب‌های پلکانی با y_c/d_{50} در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای محدوده‌ای از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی، معادله‌ای ارائه دادند.

پالیارا و همکاران (Pagliara et al., 2010) وضعیت خودهوادهی و اصطکاک را در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای شرایط جریان یکنواخت بررسی کردند و نشان دادند شرایط جریان یکنواخت بعد از موقعیت $X/D_{84} > 63$ رخ می‌دهد (در اینجا X فاصله طولی در امتداد سازه و D_{84} قطر مشخصی از مصالح بستر که ۸۴ درصد مصالح از آن ریزتر است). این محققان می‌افزایند به‌طور کلی سه رژیم جریان در شرایط زبری‌های بزرگ مقیاس به‌وجود می‌آید: (۱) رژیم جریان شبه یکنواخت بدون هوادهی، (۲) رژیم جریان شبه یکنواخت با هوادهی و (۳) رژیم جریان سطحی.

احمد و سریسواستاوا (Ahmad & Srisvastava, 2014) استهلاک انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را با زبری‌های بزرگ مقیاس در سه شیب ۱:۳، ۱:۶ و ۱:۹ بررسی کردند. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که استهلاک انرژی برای شیب‌های کم (به دلیل طول زیاد سازه) بیشتر است. این محققان می‌افزایند استهلاک انرژی برای مقادیر کمتر y_c/H (عمق بحرانی جریان و H ارتفاع سازه) به دلیل حضور زبری‌های بزرگ، بیشتر است و با افزایش نسبت y_c/H ، استهلاک انرژی به دلیل استغراق زبری‌ها کاهش می‌یابد.

پالیارا و همکاران (Pagliara et al., 2015) استهلاک انرژی را در زبری‌های بزرگ مقیاس برای

عوامل متعددی است. از این عوامل می‌توان به پارامترهای هندسی سازه، شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات سیال، اندازه زبری‌های سازه و دما اشاره کرد که آنها را می‌توان به صورت رابطه‌ی تابعی زیر بیان کرد:

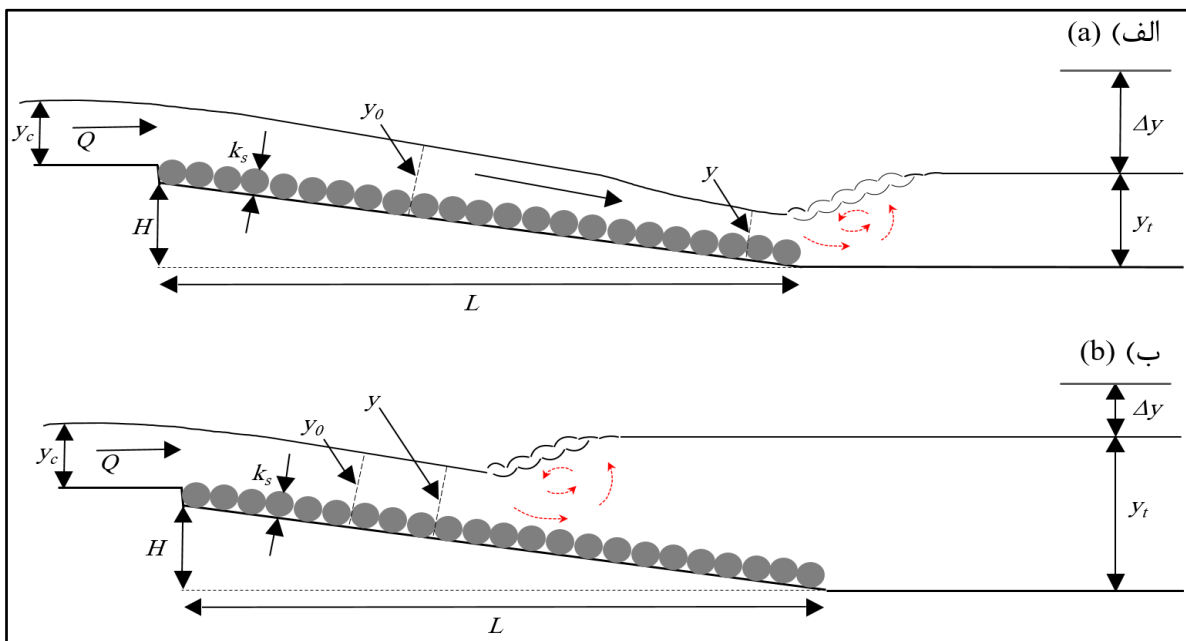
$y_c =$ عمق بحرانی جریان؛ $u_0 =$ سرعت متوسط جریان؛ $y_t =$ عمق پایاب؛ $b =$ عرض فلوم؛ $W =$ عرض سازه؛ $H =$ ارتفاع سازه؛ $L =$ طول سازه؛ $k_s =$ اندازه زبری؛ $X =$ چیدمان زبری‌ها روی سازه؛ $C_u =$ غلظت اکسیژن محلول بالادست؛ $C_d =$ غلظت اکسیژن محلول اشباع؛ $C_s =$ غلظت اکسیژن محلول اشباع؛ $T =$ دما؛ $g =$ شتاب ثقل؛ $\mu =$ لزوجت دینامیکی سیال؛ $\sigma =$ کشش سطحی سیال؛ $\rho =$ جرم مخصوص سیال؛ و $E =$ غلظت اکسیژن محلول آب. در شکل (۱) برخی از پارامترهای ارائه شده در رابطه (۱) نشان داده شده است.

عوامل متعددی است. از این عوامل می‌توان به پارامترهای هندسی سازه، شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات سیال، اندازه زبری‌های سازه و دما اشاره کرد که آنها را می‌توان به صورت رابطه‌ی تابعی زیر بیان کرد:

$$E = f(y, y_0, y_c, u_0, y_t, b, W, H, L, k_s, X, C_u, C_d, C_s, T, g, \mu, \sigma, \rho) \quad (1)$$

که در آن،

$Y =$ عمق جریان یکنواخت در پای سازه‌ی کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار؛ $y_0 =$ عمق جریان روی سازه؛



شکل ۱- نمایی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر اکسیژن محلول در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار:

(الف) پرش هیدرولیکی آزاد (F_j) و (ب) پرش هیدرولیکی مستغرق (R_j)

Fig. 1. A view of effective hydraulic and geometric parameters on dissolved oxygen downstream of block ramp: a) Free hydraulic jump (F_j) and b) Ramp hydraulic jump (R_j)

$$E = f\left(\frac{y}{y_c}, \frac{y_t}{y_c}, \frac{y_0}{y_c}, \frac{H}{y_c}, \frac{L}{y_c}, \frac{b}{y_c}, \frac{W}{y_c}, \frac{k_s}{y_c}, \frac{C_d}{C_s}, \frac{C_u}{C_s}, \frac{C_u}{C_d}, Fr, Re, We, T, X\right) \quad (2)$$

با به‌کارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، راندمان افزایش اکسیژن محلول در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۲ نوشت:

با توجه به اینکه عمق جریان در لبه‌ی سازه همواره

بیشتر از ۲ سانتی‌متر و جریان عبوری از سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار همواره آشفته است، می‌توان از نیروهای کششی و لزوجت چشم‌پوشی کرد (Subramanya, 1986). در نتیجه، رابطه (۲) پس از ساده‌سازی به صورت رابطه ۳ خلاصه می‌شود:

$$E = f\left(\frac{y}{y_0}, \frac{y_t}{y_c}, \frac{H}{L}, \frac{H}{y_c}, \frac{k_s}{y_c}, \frac{C_d}{C_s}, \frac{C_u}{C_s}, \frac{C_u}{C_d}, Fr, X, T\right) \quad (3)$$

رابطه (۳) رابطه‌ای است پایه‌ای که برای اجرای آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج به کار گرفته شد. در این تحقیق، به منظور محاسبه راندمان افزایش اکسیژن محلول آب، از رابطه‌های (۴) تا (۷) استفاده شد که جامسون (Gameson, 1957) و گلیور و ریندلز (Gulliver & Rindels, 1993) ارائه داده‌اند:

$$E_T = 1 - \frac{1}{r_T} = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} \quad (4)$$

$$E_f = \frac{C_d - C_u}{C_u} \quad (5)$$

$$f = 1 + 0.02103(T - 20) + 8.261 \times 10^{-3}(T - 20)^2 \quad (6)$$

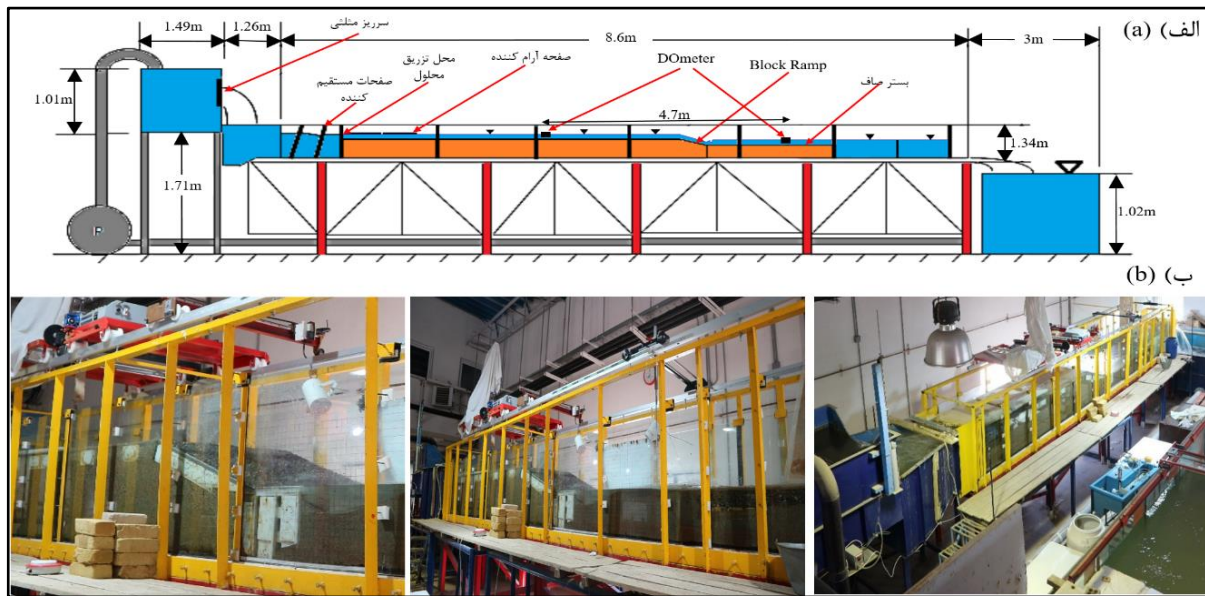
$$1 - E_{20} = (1 - E_T)^{\frac{1}{f}} \quad (7)$$

که در آنها،

r_T = نسبت کمبود اکسیژن محلول در دمای مورد نظر؛ E_T = راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای مورد نظر؛ E_f = نسبت افزایش غلظت اکسیژن محلول؛ و E_{20} = راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است.

ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایش

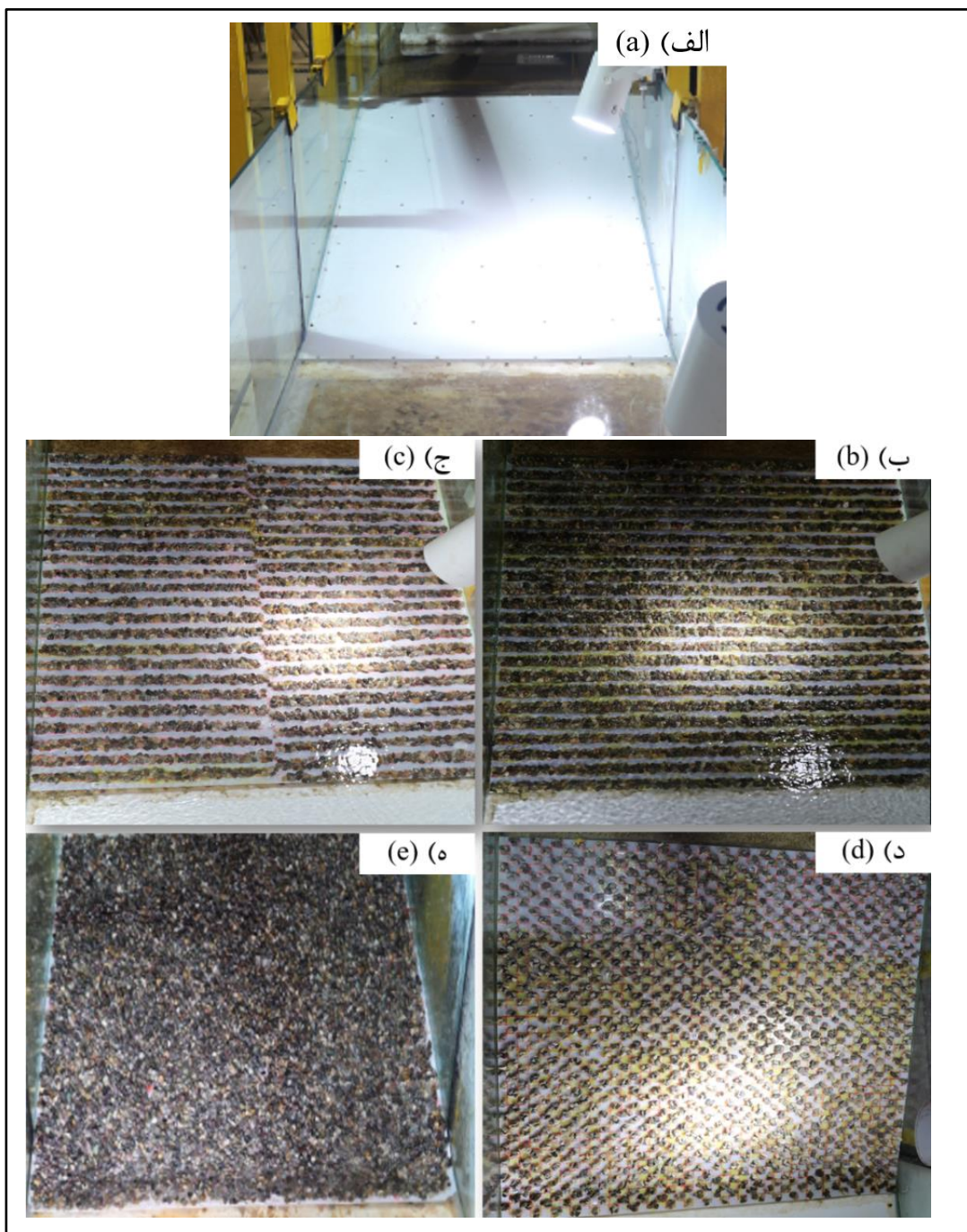
آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی به طول ۸/۶ متر، عرض ۰/۸۸ متر و عمق ۱ متر با دیواره‌های شیشه‌ای و کف فلزی اجرا شد. به منظور تأمین جریان از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که قادر به تأمین دبی تا ۷۰ لیتر بر ثانیه و مجهز به دستگاه تنظیم دور موتور بود. جریان با پمپ وارد مخزن بالادست و سپس وارد قسمت آرام کننده ورودی و در ادامه وارد فلوم می‌گردید. به منظور اندازه‌گیری دبی جریان از دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت ± 0.1 لیتر بر ثانیه استفاده شد. عمق پایین‌دست سازه نیز با استفاده از دریچه پروانه‌ای در انتهای فلوم تنظیم شد که با استفاده از آن امکان برقراری عمق‌های مختلف فراهم می‌شود. شکل (۲) نمایی از فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



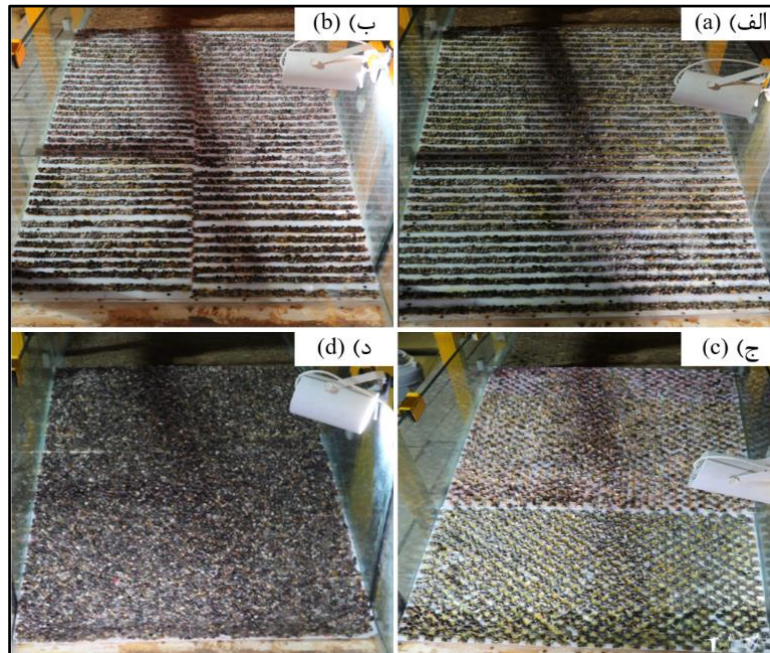
شکل ۲- الف) طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی و ب) نمایی از فلوم آزمایشگاهی
 Fig. 2. a) Sketch of experimental flume and b) view of experimental flume

پالیارا و کیاوچینی (Pagliara & Chiavaccini, 2006a)، این ذرات در طبقه‌بندی زیری متوسط‌مقیاس (IR) و در محدوده $2/5 < y_o/k_s < 6/6$ قرار می‌گیرند. در شکل‌های (۳) تا (۵) چیدمان‌های مختلف زبری متوسط‌مقیاس را روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای شیب‌های ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷ نشان داده شده است.

سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد بررسی در این تحقیق از جنس چوب-پلاستیک و در شیب‌های ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷ با ارتفاع ۰/۳ متر ساخته و در فاصله ۴/۳ متری از ورودی کانال نصب شد. به منظور بررسی تأثیر چیدمان‌های مختلف زبری بر راندمان افزایش اکسیژن محلول در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، از ذرات ماسه با قطر ۱ تا ۱/۳ سانتی‌متر استفاده شد. با توجه به نظر

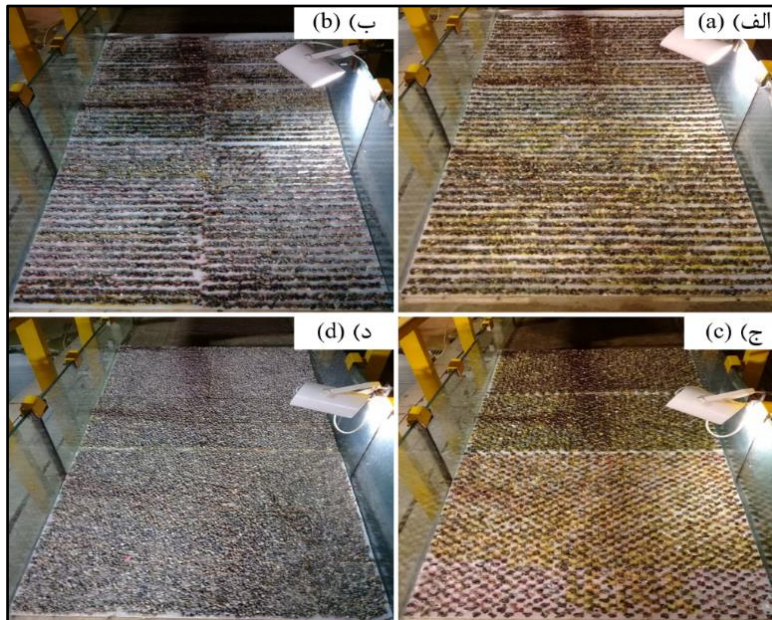


شکل ۳- تصویرهایی از چیدمان‌های مختلف زبری متوسط‌مقیاس در سازه کنترل تراز بستر با شیب ۱:۳: الف) بدون اعمال زبری (S_{1R0})، ب) چیدمان نواری (S_{1R1A1})، ج) چیدمان یک در میان نواری (S_{1R1A2})، د) چیدمان یک در میان (S_{1R1A3}) و ه) چیدمان کامل (S_{1R1A4})
Fig. 3. Photos of different arrangements of intermediate-scale roughness on block ramp with slope of 1:3: a) Smooth (S_{1R0}), b) Stripe arrangement (S_{1R1A1}), c) Stripe staggered arrangement (S_{1R1A2}), d) staggered arrangement (S_{1R1A3}) and e) compact arrangement (S_{1R1A4})



شکل ۴- تصویری از چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس در سازه کنترل تراز بستر با شیب ۵:۱ (الف) S_{2R1A1} ، (ب) S_{2R1A2} ، (ج) S_{2R1A3} و (د) S_{2R1A4}

Fig. 4. Photos of different arrangements of intermediate-scale roughness on block ramp with slope of 1:5: a) S_{2R1A1} , b) S_{2R1A2} , c) S_{2R1A3} and d) S_{2R1A4}



شکل ۵- تصویری از چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس در سازه کنترل تراز بستر با شیب ۷:۱ (الف) S_{3R1A1} ، (ب) S_{3R1A2} ، (ج) S_{3R1A3} و (د) S_{3R1A4}

Fig. 5. Photos of different arrangements of intermediate-scale roughness on block ramp with slope of 1:7: a) S_{3R1A1} , b) S_{3R1A2} , c) S_{3R1A3} and d) S_{3R1A4}

برای اندازه‌گیری مقدار اکسیژن محلول در آب $HQ30D$ در فاصله‌های ۰/۷ متری بالادست سازه (DO) ، دو دستگاه اکسیژن‌سنج ($DOmeter$) مدل کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و ۲/۵ متری

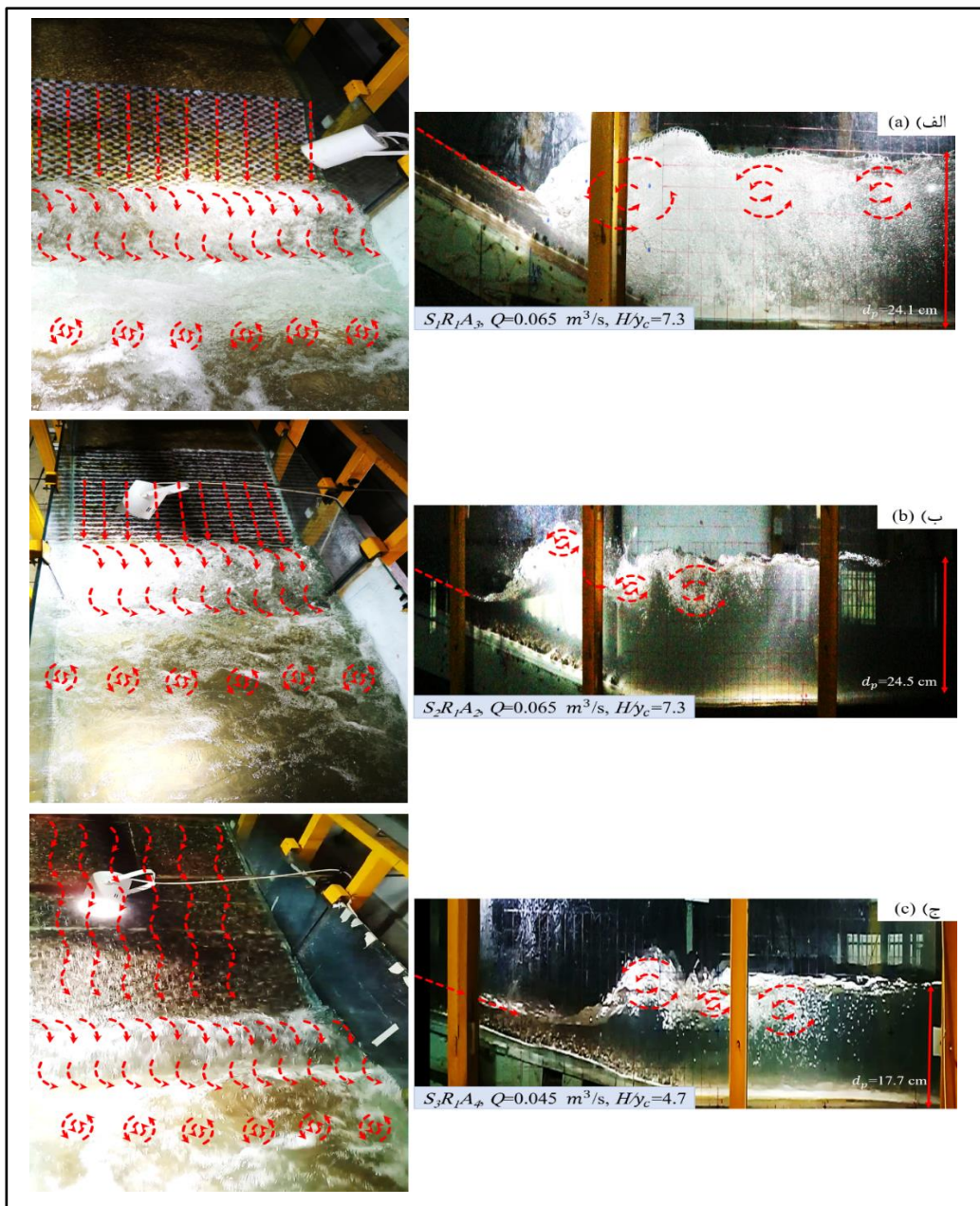
نتایج و بحث

مکانیزم ورود هوا و به تبع آن افزایش اکسیژن محلول در آب در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار از دو طریق پیش می‌رود. اول با عبور جریان از روی زبری‌هاست که این بخش تابعی از اندازه و چیدمان زبری‌ها و الگوی گردابه‌های شکل گرفته اطراف آن است و دوم مربوط به موقعیت پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین دست سازه است.

با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، رژیم جریان ریزشی در $h < h_B$ ، رژیم جریان انتقالی در $h_B < h < 1.5h_B$ و رژیم جریان سطحی در $h > 1.5h_B$ رخ می‌دهد که h عمق متوسط جریان و h_B ارتفاع مصالح سنگی نصب شده روی سازه است (Oertei, 2013). براساس مشاهدات آزمایشگاهی، در حد پایین عمق جریان عبوری از زبری‌های متوسط‌مقیاس روی سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، تیغه‌های جریان در جهت‌های مختلف از روی المان‌های زبری ریزش می‌کنند. در نتیجه، تداخل جریان در طول سازه افزایش می‌یابد و مقدار تولید حباب‌های هوا در جریان عبوری از روی سازه بیشتر می‌شود. درحالی که برای شرایط بدون اعمال زبری و نیز حد بالای عمق جریان عبوری از زبری‌های متوسط‌مقیاس، جریان عبوری از ابتدای سطح شیب‌دار تا پیش از تشکیل پرش هیدرولیکی به صورت سطحی و تقریباً شفاف و بدون هواست. در شکل (۶) تصویرهایی از نمای روبه‌رو و نیم‌رخ جریان برخی از چیدمان‌ها در شیب‌های مختلف نشان داده شده است.

پایین دست آن و در مکانی نصب شدند که حباب‌های شکل گرفته در پایین دست سازه کاملاً محو شده بودند. به منظور کاهش میزان اکسیژن محلول آب عبوری از سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و بررسی عملکرد آن در افزایش اکسیژن محلول آب، از ماده شیمیایی اکسیژن‌زدای سدیم سولفیت کاتالیست محلول در آب استفاده شد. در هر آزمایش بعد از نصب سازه، دبی جریان ورودی به کانال و موقعیت پرش هیدرولیکی تنظیم و پس از آن با استفاده از سیستم تزریق، محلول سدیم سولفیت کاتالیست به جریان بالادست فلوم اضافه شد تا میزان اکسیژن محلول بالادست سازه به محدوده $1/5$ میلی‌گرم بر لیتر برسد. در ادامه، تزریق محلول قطع و روند افزایشی اکسیژن محلول در آب در بالادست و پایین دست سازه تا بازگشت به سطح اشباع اولیه خود قبل از تزریق به صورت پیوسته داده برداری شد.

در این تحقیق برای دستیابی به اثر چیدمان‌های مختلف زبری متوسط‌مقیاس بر سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در تغییرات اکسیژن محلول در آب، در مجموع ۲۴۳ آزمایش برای چیدمان‌های مختلف زبری متوسط‌مقیاس، دامنه دبی‌های m^3/s ۰/۰۲۵ تا $0/065 m^3/s$ و موقعیت‌های پرش هیدرولیکی مستغرق (استقرار پیشانی پرش هیدرولیکی در یک سوم طول سازه) و پرش هیدرولیکی آزاد (استقرار پیشانی پرش هیدرولیکی در پای سازه) برای غلظت‌های مختلف اکسیژن محلول ورودی، اجرا و نتایج آنها به شرح زیر بررسی شد.



شکل ۶- تصویر روبه‌رو و نیم‌رخ جریان در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب‌های مختلف: الف) سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_1R_1A_3$ با شیب ۱:۳ و موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق (R_j)، ب) سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_2R_1A_2$ با شیب ۱:۵ و موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق (R_j) و ج) سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_3R_1A_4$ با شیب ۱:۷ و موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد (F_j)

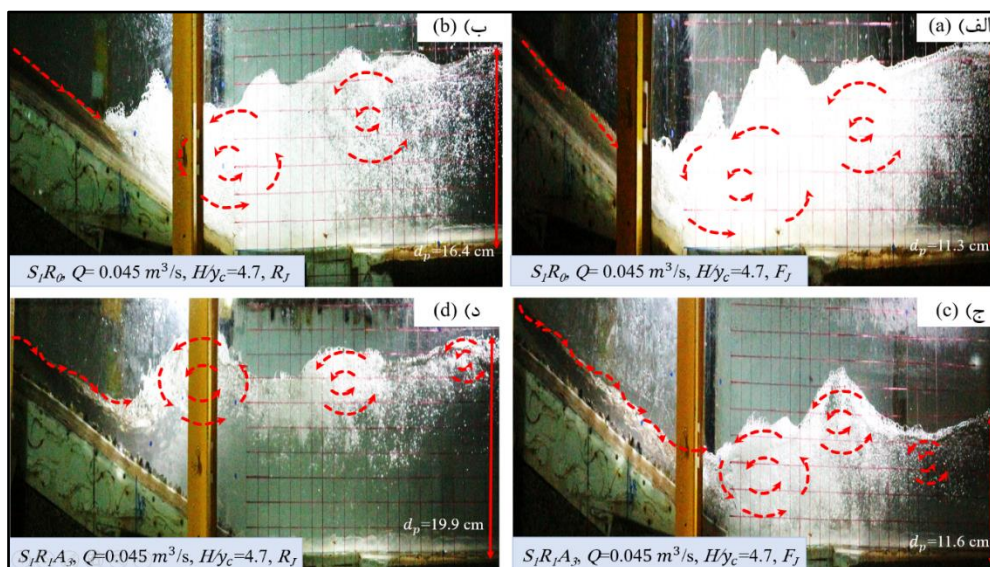
Fig. 6. Front and profile view of flow over block ramps with different slopes: a) $S_1R_1A_3$ structure with slope of 1:3 and free hydraulic jump position (F_j), b) $S_2R_1A_2$ structure with slope of 1:5 and ramp hydraulic jump position (R_j) and c) $S_3R_1A_4$ structure with slope of 1:7 and free hydraulic jump position (F_j)

برخورد جت ریزشی در حوضچه پایین دست افزایش می‌یابد و این آشفتگی منجر به ورود حجم بالایی از حباب‌های هوا به حوضچه آرامش می‌شود و در

مشاهدات آزمایشگاهی از مکانیزم دوم ورود هوا که مربوط است به موقعیت پرش هیدرولیکی شکل گرفته، نشان داد که در پرش هیدرولیکی آزاد شدت

اندازه حباب‌ها بزرگ‌تر و حرکت آنها از حالت گروهی به حالت منفرد تغییر می‌یابد. شکل (۷) تصویرهایی از نمای نیمرخ جریان روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را نشان می‌دهد.

نتیجه هوادهی را افزایش می‌دهد. همچنین، در این حالت اندازه حباب‌ها کوچک است و حباب‌ها به صورت متراکم و گروهی انتقال می‌یابند. درحالی‌که در پرش هیدرولیکی مستغرق، از شدت آشفتگی و تراکم حباب در سطح جریان کاسته می‌شود ولی



شکل ۷- الف) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S1R0$ و موقعیت پرش هیدرولیکی FJ ، ب) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S1R1A3$ و موقعیت پرش هیدرولیکی RJ ، ج) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S1R1A3$ و موقعیت پرش هیدرولیکی FJ و د) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S1R1A3$ و موقعیت پرش هیدرولیکی RJ

Fig. 7. a) Side view of $S1R0$ structure and FJ hydraulic jump position, b) Side view of $S1R0$ structure and RJ hydraulic jump position, c) Side view of $S1R1A3$ structure and FJ hydraulic jump position and d) Side view of $S1R1A3$ structure and RJ hydraulic jump position

افزایش دبی (کاهش H/y_c) به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده $H/y_c=4/7$ (دبی‌های بیشتر از 0.45 متر مکعب بر ثانیه) برای پرش هیدرولیکی آزاد و $H/y_c=4/1$ (دبی‌های بیشتر از 0.55 متر مکعب بر ثانیه) برای پرش هیدرولیکی مستغرق روند افزایشی متوقف می‌شود و افزایش بیشتر دبی (کاهش بیشتر H/y_c) تا حدودی منجر به کاهش عملکرد سازه مذکور در افزایش غلظت اکسیژن محلول در پایین دست می‌گردد که این موضوع در گزارش اسمعیلی ورکی و همکاران (Esmaili Varaki et al., 2019) نیز آمده است. یکی از دلایل این موضوع

در شکل‌های (۸) و (۹) و نیز در جدول (۱) تأثیر چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس بر عملکرد سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب $1:3$ بر تغییرات غلظت اکسیژن محلول در آب برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد (FJ) و مستغرق (RJ) نشان داده شده است. مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی روند تغییرات عملکرد سازه در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست (C_u) $2, 3, 4$ و 5 mg/l نشان می‌دهد که در وضعیت بدون زبری ($S1R0$) و برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد (FJ) و مستغرق (RJ)، راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) با

را می‌توان به کاهش مقدار عدد فرود عمق اولیه پرش هیدرولیکی از $4/1$ به $3/1$ و در نتیجه کاهش مقدار اختلاط غلتابه‌ها در پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین دست سازه نسبت داد.

مقایسه نتایج تغییرات غلظت اکسیژن محلول در سازه $S1R0$ نشان داد که با افزایش غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست از ۲ به ۳، ۴ و 5 mg/l متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برای پرش هیدرولیکی آزاد به ترتیب $1/35$ ، $1/88$ ، $1/54$ و $1/32$ و برای پرش هیدرولیکی مستغرق به ترتیب $1/99$ ، $1/59$ ، $1/36$ و $1/21$ به دست می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پرش هیدرولیکی آزاد نسبت به پرش هیدرولیکی مستغرق در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست است. لازم است گفته شود با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست برای افزایش اکسیژن محلول به جریان نیاز به زمان، آشفتگی و تلاطم بیشتری است و در نتیجه برای شرایط یکسان هیدرولیکی و هندسی، با افزایش غلظت اکسیژن محلول در بالادست، عملکرد سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در افزایش اکسیژن محلول جریان کاهش می‌یابد.

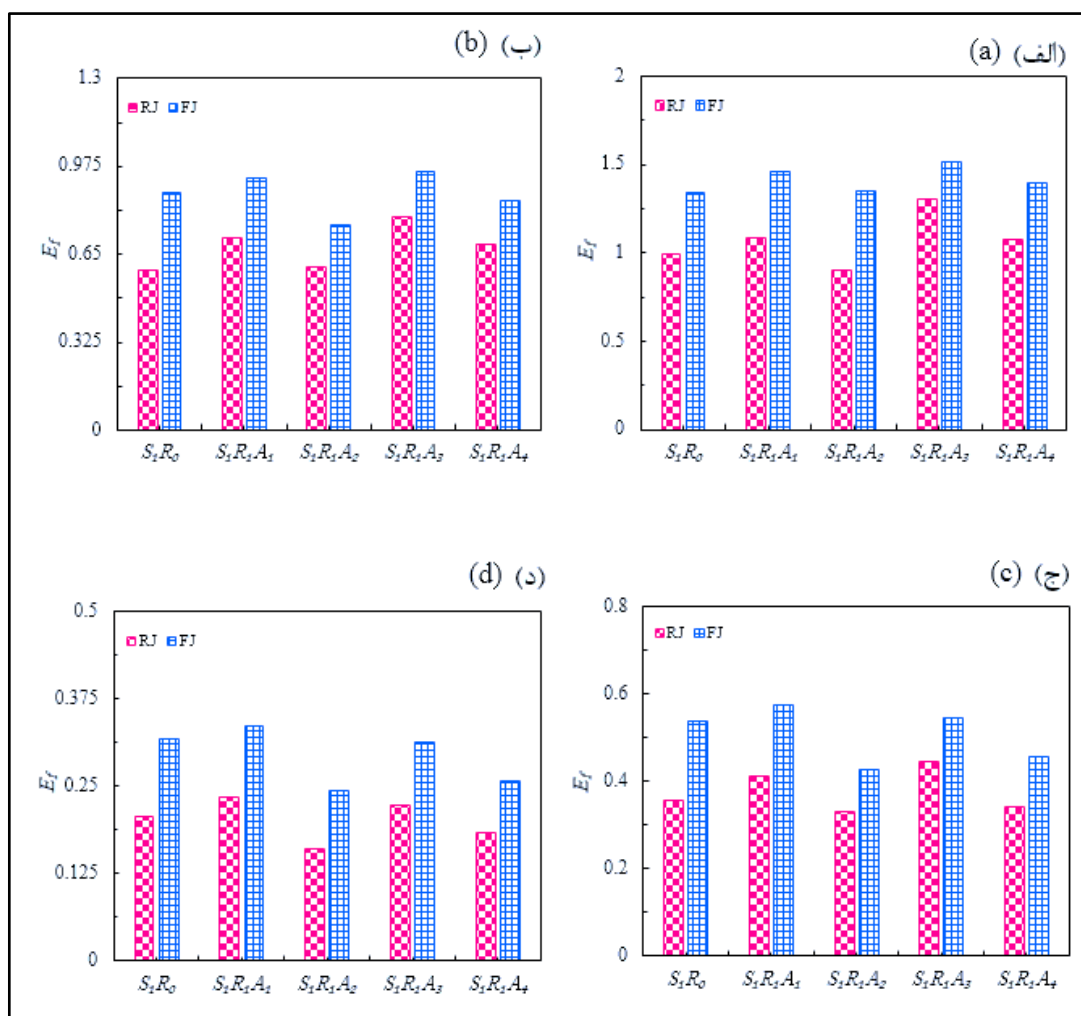
بررسی نتایج عملکرد سازه‌های $S1R1A1$ ، $S1R1A2$ ، $S1R1A3$ و $S1R1A4$ در افزایش اکسیژن محلول حاکی از آن است که با افزایش غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست از ۲ به ۳، ۴ و 5 mg/l متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برای پرش هیدرولیکی آزاد به ترتیب $1/43$ ، $1/88$ ، $1/54$ و $1/29$ و برای پرش هیدرولیکی مستغرق به ترتیب $1/1$ ، $1/7$ ، $1/38$ و $1/2$ به دست می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پرش هیدرولیکی آزاد نسبت به پرش هیدرولیکی مستغرق در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست است. افزون بر این، در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست، به‌طور متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به وضعیت بدون زبری ($S1R0$) برای موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق ۸ درصد افزایش می‌یابد ولی با تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی به آزاد، برخی از چیدمان‌ها مانند $S1R1A2$ و $S1R1A4$ به میزان ۱۴ و ۹ درصد کاهش عملکرد نشان می‌دهد و سایر گزینه‌ها به‌طور متوسط ۶ درصد افزایش عملکرد دارند. با اعمال زبری روی سطح سازه کنترل تراز بستر، به دلیل افزایش مقاومت جریان و استهلاک انرژی جریان عبوری از آن، عدد فرود جریان خروجی از سازه به محدوده $2/2$ کاهش می‌یابد و پرش هیدرولیکی شکل گرفته از تلاطم و آشفتگی برای تشکیل حباب‌های هوا کافی نیست. از این‌رو، عملکرد

مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی روند تغییرات عملکرد سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S1R1A1$ ، $S1R1A2$ ، $S1R1A3$ و $S1R1A4$ ————— دارای چیدمان‌های مختلف زبری بودند در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست (C_u) ۲، ۳، ۴ و 5 mg/l موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق نشان داد که راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) با افزایش دبی (کاهش H/y_c) به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده $H/y_c=4/4$ (دبی‌های بیشتر از $1/5$ متر مکعب بر ثانیه) برای پرش هیدرولیکی آزاد و

به وضعیت بدون زبری (S_1R_0) از میان چیدمان‌های مختلف برای شیب ۱:۳، در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_1R_1A_3$ (چیدمان یک در میان) و شرایط پرش هیدرولیکی مستغرق است که با E_f برابر با ۱/۳، مقدار اکسیژن محلول را به میزان ۳۱ درصد افزایش می‌دهد.

سازه‌ها با اعمال زبری‌های متوسط مقیاس در موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد نسبت به وضعیت بدون زبری کاهش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در غلظت اکسیژن محلول $C_{ii}=2\text{mg/l}$ ، بهترین عملکرد در افزایش راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت

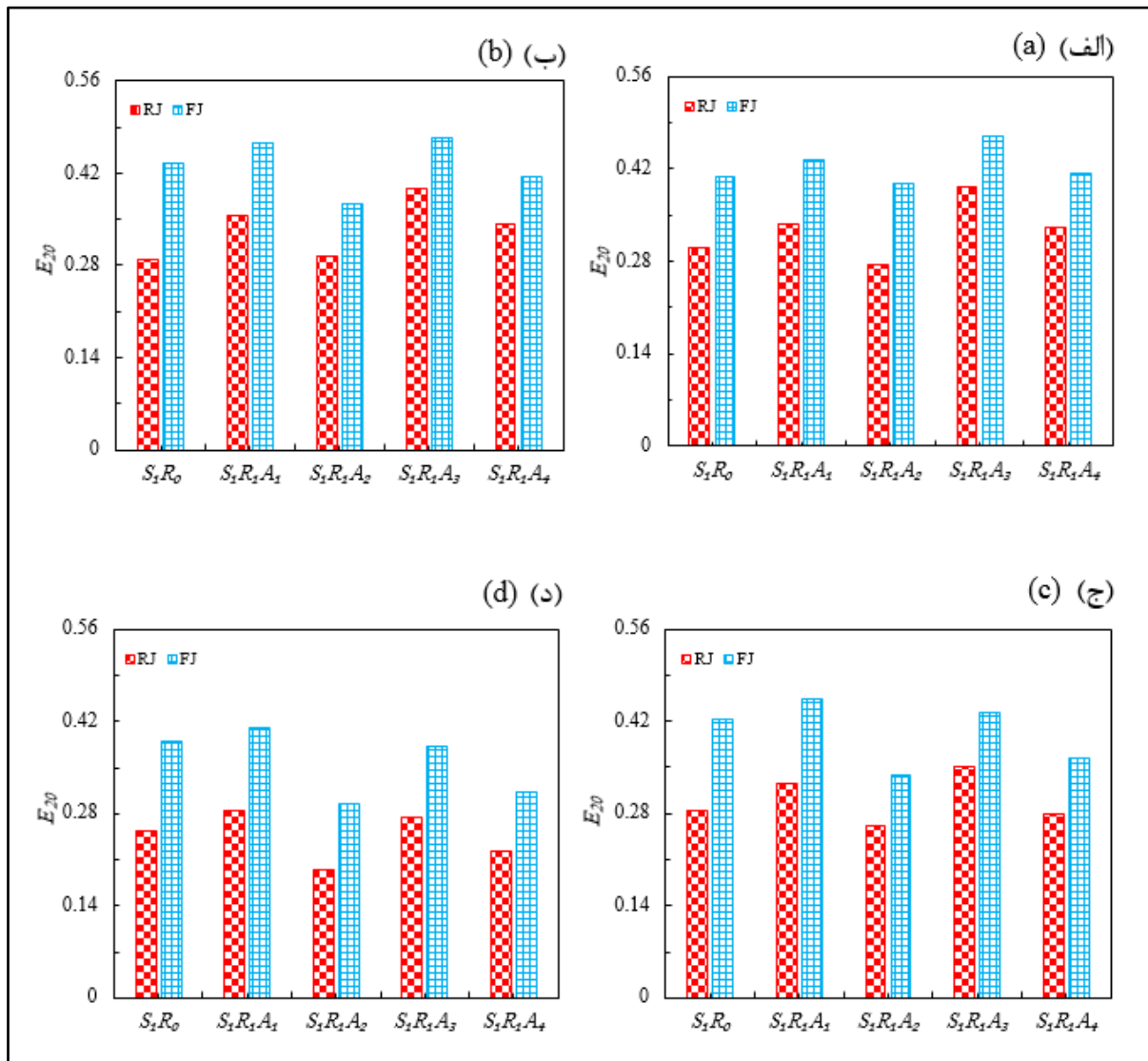


شکل ۸- تأثیر موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد (FJ) و مستغرق (RJ)، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس با شیب ۱:۳ بر متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول (E_f) در غلظت‌های مختلف اکسیژن بالادست (C_{ii}):

(الف) $C_u = 2\text{mg/l}$ ، (ب) $C_u = 3\text{mg/l}$ ، (ج) $C_u = 4\text{mg/l}$ و (د) $C_u = 5\text{mg/l}$

Fig. 8. Effect of free hydraulic jump (FJ) and ramp hydraulic jump (RJ) position, different arrangements of intermediate-scale roughness with slope of 1:3 on mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) at different upstream dissolved oxygen concentrations (C_u):

a) $C_u = 2\text{mg/l}$, b) $C_u = 3\text{mg/l}$, c) $C_u = 4\text{mg/l}$ and d) $C_u = 5\text{mg/l}$



شکل ۹- تأثیر موقعیت برش هیدرولیکی آزاد (F_J) و مستغرق (R_J)، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس با شیب ۱:۳ بر متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (E_{20}) در غلظت‌های مختلف اکسیژن بالادست (C_u):

الف) $C_u = 2\text{ mg/l}$ ، ب) $C_u = 3\text{ mg/l}$ ، ج) $C_u = 4\text{ mg/l}$ و د) $C_u = 5\text{ mg/l}$

Fig. 9. Effect of free hydraulic jump (F_J) and ramp hydraulic jump (R_J) position, different arrangements of intermediate-scale roughness with slope of 1:3 on mean performance of increase of dissolved oxygen at 20° (E_{20}) at different upstream dissolved oxygen concentrations (C_u):

a) $C_u = 2\text{ mg/l}$, b) $C_u = 3\text{ mg/l}$, c) $C_u = 4\text{ mg/l}$ and d) $C_u = 5\text{ mg/l}$

جدول ۱- متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (E_{20}) و متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول در سازه کنترل تراز بستر شیب‌دار با شیب ۱:۳ در دامنه $3/6 < H/y_c < 7$ (E_f)

Table. 1. Mean performance of increase of dissolved oxygen at 20° (E_{20}) and mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) at block ramp with slope of 1:3 for $3.6 < h/y_c < 7$

E_f				E_{20}				موقعیت پرش هیدرولیکی	نام سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار
غلظت (mg/l)				غلظت (mg/l)					
۵	۴	۳	۲	۵	۴	۳	۲		
۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۸۸	۱/۳۵	۰/۳۹	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۱	F_J	S_1R_0
۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۵۹	۰/۹۹	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۳۰	R_J	
۰/۳۴	۰/۵۷	۰/۹۳	۱/۴۶	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۴	F_J	$S_1R_1A_1$
۰/۲۴	۰/۴۱	۰/۷۱	۱/۰۹	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۴	R_J	
۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۷۶	۱/۳۵	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۴۰	F_J	$S_1R_1A_2$
۰/۱۶	۰/۳۳	۰/۶	۰/۹۰	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۳۰	۰/۲۸	R_J	
۰/۳۱	۰/۵۵	۰/۹۶	۱/۵۲	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۴۷	F_J	$S_1R_1A_3$
۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۷۹	۱/۳۰	۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۳۹	R_J	
۰/۲۶	۰/۴۶	۰/۸۵	۱/۳۹	۰/۳۱	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۴۱	F_J	$S_1R_1A_4$
۰/۱۸	۰/۳۴	۰/۶۹	۱/۰۸	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۳۳	R_J	

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) و نیز در جدول (۲)، تأثیر چیدمان‌های مختلف زبری متوسط‌مقیاس بر مقدار عملکرد سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ بر تغییرات غلظت اکسیژن محلول در آب برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد (F_J) و مستغرق (R_J) نشان داده شده است. مقایسه نتایج در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست (C_{II})، ۲، ۳، ۴ و ۵ mg/l نشان می‌دهد که در وضعیت بدون زبری (S_2R_0) و برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد (F_J) و مستغرق (R_J)، راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) با افزایش دبی (کاهش H/y_c) به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده $H/y_c=5/1$ (دبی‌های بیشتر از ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه) برای پرش هیدرولیکی F_J و $H/y_c=4/4$ (دبی‌های بیشتر از ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه) برای پرش هیدرولیکی R_J روند افزایشی متوقف می‌شود و افزایش بیشتر دبی (کاهش بیشتر

تا حدودی منجر به کاهش عملکرد سازه مذکور در افزایش غلظت اکسیژن محلول در پایین‌دست می‌گردد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با کاهش H/y_c ، مقدار عدد فرود عمق اولیه پرش هیدرولیکی از ۵/۳ به ۳/۴ کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار اختلاط غلتابه‌ها در پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین‌دست سازه کم می‌شود. مقایسه نتایج تغییرات غلظت اکسیژن محلول در سازه S_2R_0 حاکی از آن است که با افزایش غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست از ۲ به ۳، ۴ و ۵ mg/l متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برای پرش هیدرولیکی F_J به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۵۳، ۰/۵۳ و ۰/۳۱، و برای پرش هیدرولیکی R_J به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۳۳ و ۰/۱۸ به دست می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پرش هیدرولیکی F_J نسبت به پرش هیدرولیکی R_J در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول

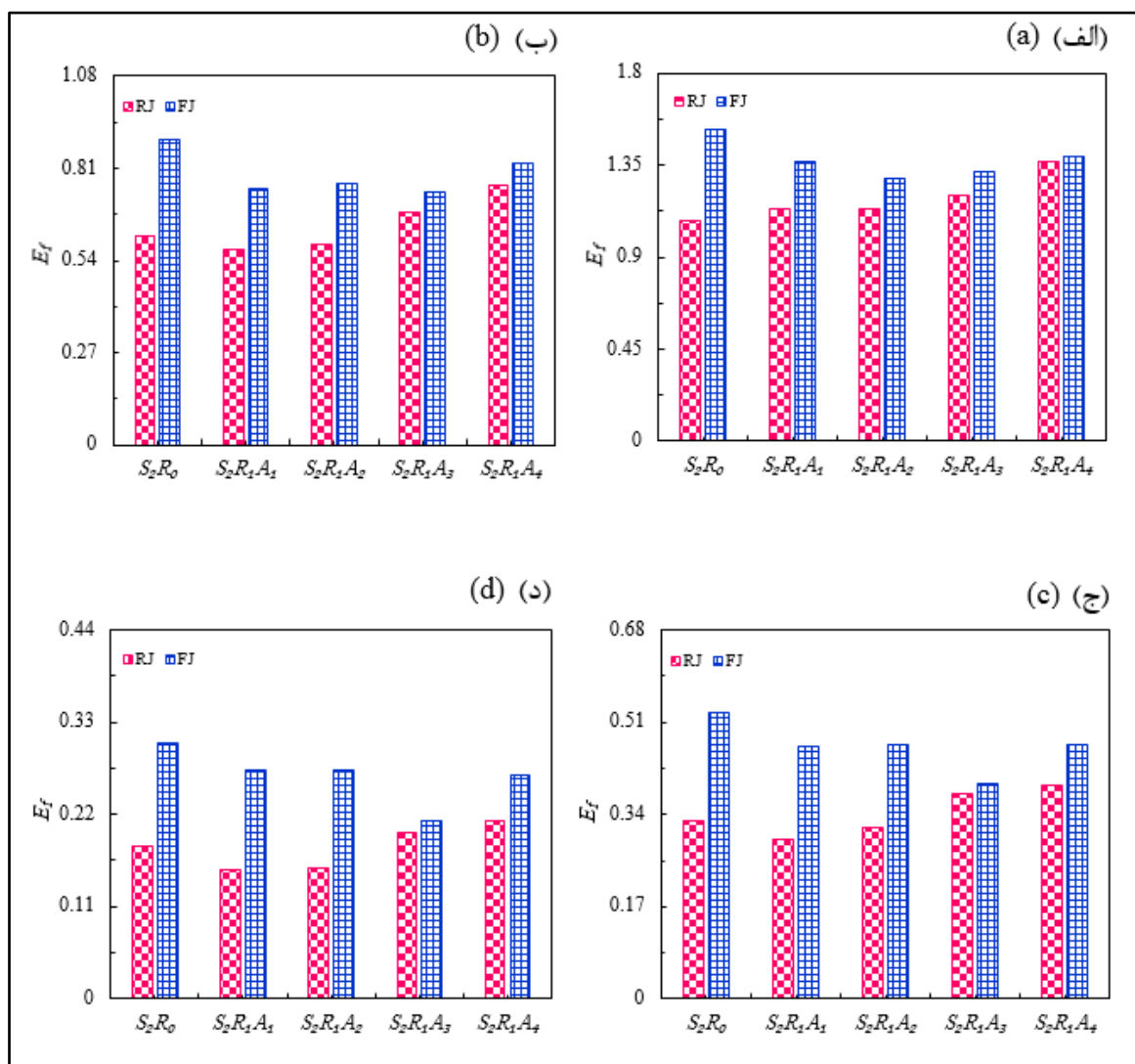
بالادست است.

هیدرولیکی R_I ، ۶ درصد افزایش می‌یابد ولی با تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی به F_I ، تمامی چیدمان‌های $S_2R_1A_1$ ، $S_2R_1A_2$ ، $S_2R_1A_3$ و $S_2R_1A_4$ به میزان ۱۲، ۱۳، ۲۱ و ۱۰ درصد کاهش عملکرد دارند (به‌طور متوسط ۱۴ درصد)، کاهش عملکرد در سازه‌ها با زبری متوسط مقیاس مشاهده گردید. با اعمال زبری روی سطح سازه کنترل ترزاز بستر، به دلیل افزایش مقاومت جریان و استهلاک انرژی جریان عبوری از آن، عدد فرود جریان خروجی از سازه به محدوده ۲ کاهش می‌یابد و پرش هیدرولیکی شکل گرفته از تلاطم و آشفتگی برای تشکیل حباب‌های هوا کافی نیست. از این‌رو، عملکرد سازه‌ها با اعمال زبری‌های متوسط مقیاس در موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد نسبت به وضعیت بدون زبری کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در غلظت اکسیژن محلول $C_u=2\text{mg/l}$ ، بهترین عملکرد در افزایش راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به وضعیت بدون زبری (S_2R_0) از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، در سازه $S_2R_1A_4$ (چیدمان کامل) و شرایط پرش هیدرولیکی مستغرق مشاهده می‌شود که با راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برابر با ۱/۳۷، مقدار اکسیژن محلول را به میزان ۲۷ درصد افزایش می‌دهد. در شکل (۱۲) تصویرهایی از نمای نیم‌رخ جریان را روی سازه کنترل ترزاز بستر سطح شیب‌دار در شیب ۱:۵ نشان می‌دهد.

مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی روند تغییرات عملکرد سازه‌های کنترل ترزاز بستر سطح شیب‌دار $S_2R_1A_1$ ، $S_2R_1A_2$ ، $S_2R_1A_3$ و $S_2R_1A_4$ با چیدمان‌های مختلف زبری‌ها در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست (C_u) ۲، ۳، ۴ و 5mg/l و موقعیت‌های پرش هیدرولیکی F_I و R_I نشان می‌دهد که راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) با کاهش H/y_c به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده $H/y_c=4/7$ (دبی‌های بیشتر از ۰/۰۴۵ متر مکعب بر ثانیه) برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی F_I و R_I روند افزایشی متوقف می‌شود و کاهش بیشتر H/y_c تا حدودی به کاهش عملکرد سازه مذکور در افزایش غلظت اکسیژن محلول در پایین دست می‌انجامد.

بررسی نتایج عملکرد سازه‌های $S_2R_1A_1$ ، $S_2R_1A_2$ ، $S_2R_1A_3$ و $S_2R_1A_4$ در افزایش اکسیژن محلول حاکی از آن است که با افزایش غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست از ۲ به ۳، ۴ و 5mg/l متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برای پرش هیدرولیکی F_I به ترتیب ۱/۳۴، ۰/۷۷، ۰/۴۵ و ۰/۲۶ و برای پرش هیدرولیکی R_I به ترتیب ۱/۲۱، ۰/۶۵، ۰/۳۵ و ۰/۱۸ به دست می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پرش هیدرولیکی F_I نسبت به پرش هیدرولیکی R_I در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست است. افزون بر این، در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست، به‌طور متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به سازه S_2R_0 برای موقعیت پرش

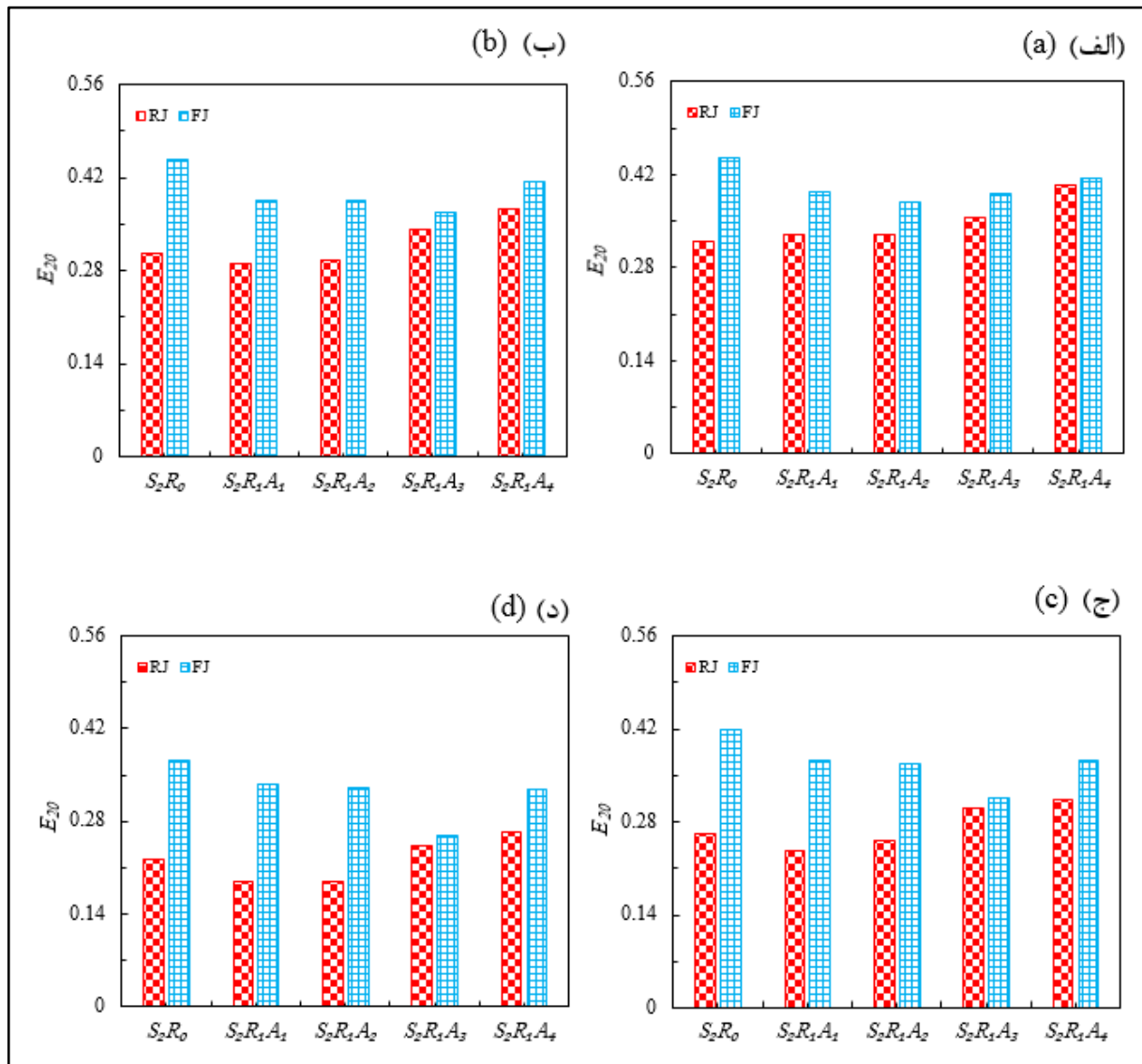


شکل ۱۰- تأثیر موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد (FJ) و مستغرق (RJ)، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس با شیب ۱:۵ بر متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب (E_f) در غلظت‌های مختلف اکسیژن بالادست (C_u):

الف) $C_u = 2 \text{ mg/l}$ ، ب) $C_u = 3 \text{ mg/l}$ ، ج) $C_u = 4 \text{ mg/l}$ و د) $C_u = 5 \text{ mg/l}$

Fig. 10. Effect of free hydraulic jump (FJ) and ramp hydraulic jump (RJ) position, different arrangements of intermediate-scale roughness with slope of 1:5 on mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) at different upstream dissolved oxygen concentrations (C_u):

a) $C_u = 2 \text{ mg/l}$, b) $C_u = 3 \text{ mg/l}$, c) $C_u = 4 \text{ mg/l}$ and d) $C_u = 5 \text{ mg/l}$



شکل ۱۱- تأثیر موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد (FJ) و مستغرق (RJ)، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس با شیب ۱:۵ بر متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (E_{20}) در غلظت‌های مختلف اکسیژن بالادست (C_u):

الف) $C_u = 2\text{mg/l}$ ، ب) $C_u = 3\text{mg/l}$ ، ج) $C_u = 4\text{mg/l}$ و د) $C_u = 5\text{mg/l}$

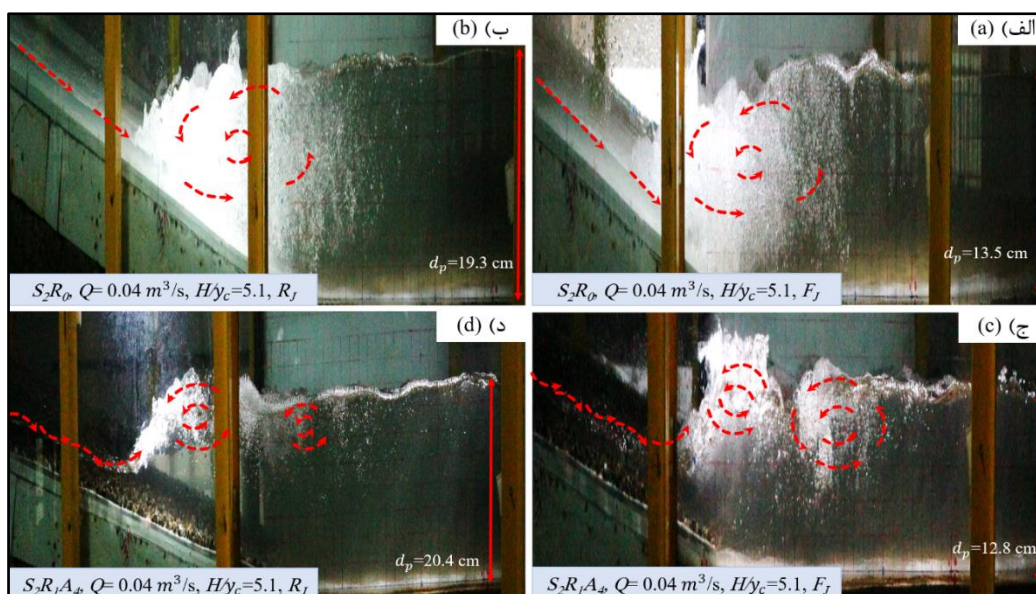
Fig. 11. Effect of free hydraulic jump (FJ) and ramp hydraulic jump (RJ) position, different arrangements of intermediate-scale roughness with slope of 1:5 on mean performance of increase of dissolved oxygen at 20°C (E_{20}) at different upstream dissolved oxygen concentrations (C_u):

a) $C_u = 2\text{mg/l}$, b) $C_u = 3\text{mg/l}$, c) $C_u = 4\text{mg/l}$ and d) $C_u = 5\text{mg/l}$

جدول ۲- متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (E_{20}) و متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب (E_f) در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ و در دامنه $3/6 < H/y_c < 7$

Table 2. Mean performance of increase of dissolved oxygen at 20° (E_{20}) and mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) at block ramp with slope of 1:5 for $3.6 < h/y_c < 7$

E_f				E_{20}				موقعیت پرش هیدرولیکی	نام سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار
غلظت (mg/l)				غلظت (mg/l)					
۵	۴	۳	۲	۵	۴	۳	۲		
۰/۳۱	۰/۵۳	۰/۸۹	۱/۵۳	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۴۵	F_J	S_2R_0
۰/۱۸	۰/۳۳	۰/۶۱	۱/۱۰	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۳۲	R_J	
۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۷۵	۱/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۹	F_J	$S_2R_{1A_1}$
۰/۱۶	۰/۲۹	۰/۵۷	۱/۱۴	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۳۳	R_J	
۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۷۷	۱/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۸	F_J	$S_2R_{1A_2}$
۰/۱۶	۰/۳۲	۰/۵۹	۱/۱۴	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳۳	R_J	
۰/۲۱	۰/۴۰	۰/۷۴	۱/۳۲	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۳۹	F_J	$S_2R_{1A_3}$
۰/۲۰	۰/۳۸	۰/۶۸	۱/۲۰	۰/۲۴	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۳۶	R_J	
۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۸۳	۱/۳۹	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۴۱	F_J	$S_2R_{1A_4}$
۰/۲۱	۰/۳۹	۰/۷۶	۱/۳۷	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۴۱	R_J	



شکل ۱۲- الف) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار S_2R_0 و موقعیت پرش هیدرولیکی F_J ، ب) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار S_2R_0 و موقعیت پرش هیدرولیکی R_J ، ج) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_2R_{1A_4}$ و موقعیت پرش هیدرولیکی F_J و د) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_2R_{1A_4}$ و موقعیت پرش هیدرولیکی R_J

Fig. 12. a) Side view of S_2R_0 structure and F_J hydraulic jump position, b) Side view of S_2R_0 structure and R_J hydraulic jump position, c) Side view of $S_2R_{1A_4}$ structure and F_J hydraulic jump position and d) Side view of $S_2R_{1A_4}$ structure and R_J hydraulic jump position

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) و نیز در جدول (۳)، نتایج تأثیر چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس بر مقدار عملکرد سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۷ بر تغییرات غلظت اکسیژن محلول در آب برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد (F_I) و مستغرق (R_I) نشان داده شده است. نتایج عملکرد اکسیژن محلول در شیب ۱:۷ حاکی از آن است که در وضعیت بدون زبری (S_3R_0) در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست (C_{II}) ۲، ۳، ۴ و 5 mg/l ، مقدار راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) به‌طور متوسط ۰/۷۵ به‌دست می‌آید و با نصب زبری روی این سازه، مقدار این پارامتر به ۰/۸۱ افزایش می‌یابد. در این شیب به دلیل طول زیاد سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و گردش بیشتر جریان در میان المان‌های زبری، عملکرد مثبتی برای هر دو نوع پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در افزایش راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به وضعیت بدون زبری (S_3R_0) مشاهده می‌شود.

تجزیه و تحلیل نتایج در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست (C_u) ۲، ۳، ۴ و 5 mg/l نشان می‌دهد که در سازه S_3R_0 راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) با کاهش H/y_c به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده $H/y_c=4/4$ (دبی‌های بیشتر از ۰/۰۵ متر مکعب بر ثانیه) برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی F_I و R_I ، روند افزایشی متوقف می‌شود و کاهش بیشتر H/y_c تا حدودی به کاهش عملکرد سازه مذکور در افزایش غلظت اکسیژن محلول در پایین‌دست می‌انجامد. مشابه با شیب‌های قبل، با کاهش H/y_c مقدار عدد فرود عمق اولیه پرش هیدرولیکی از $5/3$ به $3/2$ کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار شدت اختلاط غلتابه‌ها در پرش هیدرولیکی شکل‌گرفته در پایین‌دست سازه کم می‌شود. افزون بر

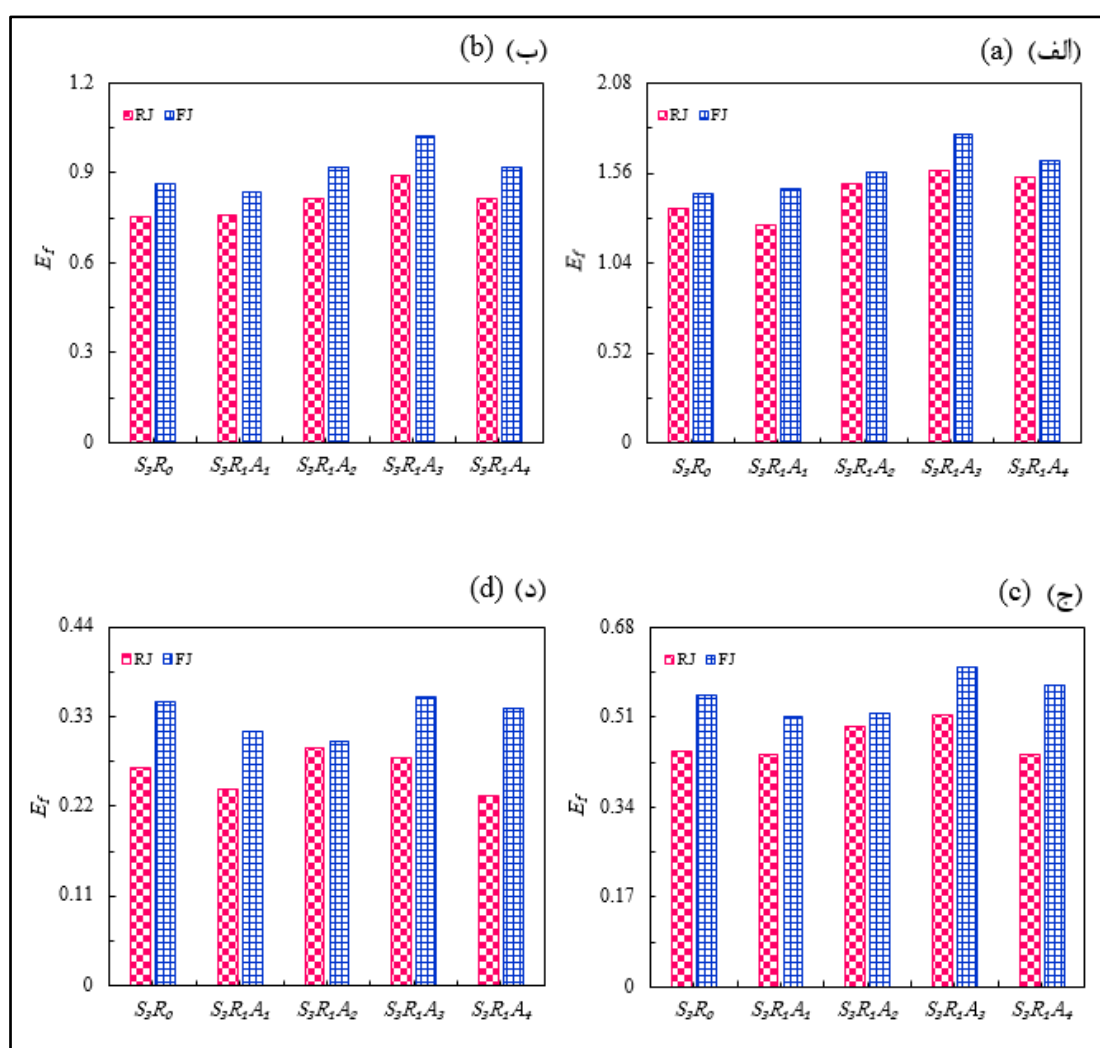
این، بررسی نتایج تغییرات غلظت اکسیژن محلول در سازه S_3R_0 نشان می‌دهد که با افزایش غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست از ۲ به ۳، ۴ و 5 mg/l متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برای پرش هیدرولیکی F_I به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۵ و ۰/۳۵ و با تغییر به پرش هیدرولیکی R_I به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۷۵، ۰/۴۵ و ۰/۲۷ به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پرش هیدرولیکی F_I نسبت به پرش هیدرولیکی R_I در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست است.

مقایسه نتایج و بررسی روند تغییرات عملکرد سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_3R_1A_1$ ، $S_3R_1A_2$ ، $S_3R_1A_3$ و $S_3R_1A_4$ در غلظت‌ها و موقعیت‌های پرش هیدرولیکی ذکر شده حاکی از آن است که راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) با کاهش H/y_c به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده $H/y_c=4/7$ (دبی‌های بیشتر از ۰/۰۴۵ متر مکعب بر ثانیه) برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی F_I و R_I روند افزایشی متوقف می‌شود و کاهش بیشتر H/y_c تا حدودی به کاهش عملکرد سازه مذکور در افزایش غلظت اکسیژن محلول در پایین‌دست می‌انجامد.

بررسی نتایج سازه‌های $S_3R_1A_1$ ، $S_3R_1A_2$ ، $S_3R_1A_3$ و $S_3R_1A_4$ حاکی از آن است که با افزایش غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست از ۲ به ۳، ۴ و 5 mg/l متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) برای پرش هیدرولیکی F_I به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۸۷ و ۰/۵۵ و برای پرش هیدرولیکی R_I به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۸۲، ۰/۴۷ و ۰/۲۶ به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد بهتر پرش هیدرولیکی F_I نسبت به پرش هیدرولیکی R_I در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست است. علاوه‌براین، در تمامی

نسبت به سازه S_3R_0 ، در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_3R_1A_3$ (چیدمان یک درمیان) با E_f برابر با $1/79$ ، به میزان ۲۴ درصد برای موقعیت پرش هیدرولیکی F_J مشاهده می‌شود. شکل (۱۵) تصویرهایی از نمای نیمرخ جریان را روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در شیب ۱:۷ نشان می‌دهد.

غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست، به‌طور متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به سازه S_3R_0 برای موقعیت‌های پرش هیدرولیکی F_J و R_J به ترتیب ۳ و ۷ درصد افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج عملکرد چیدمان‌های مختلف در شیب مذکور برای غلظت اکسیژن محلول $C_u=2mg/l$ نشان می‌دهد که بهترین عملکرد در افزایش E_f

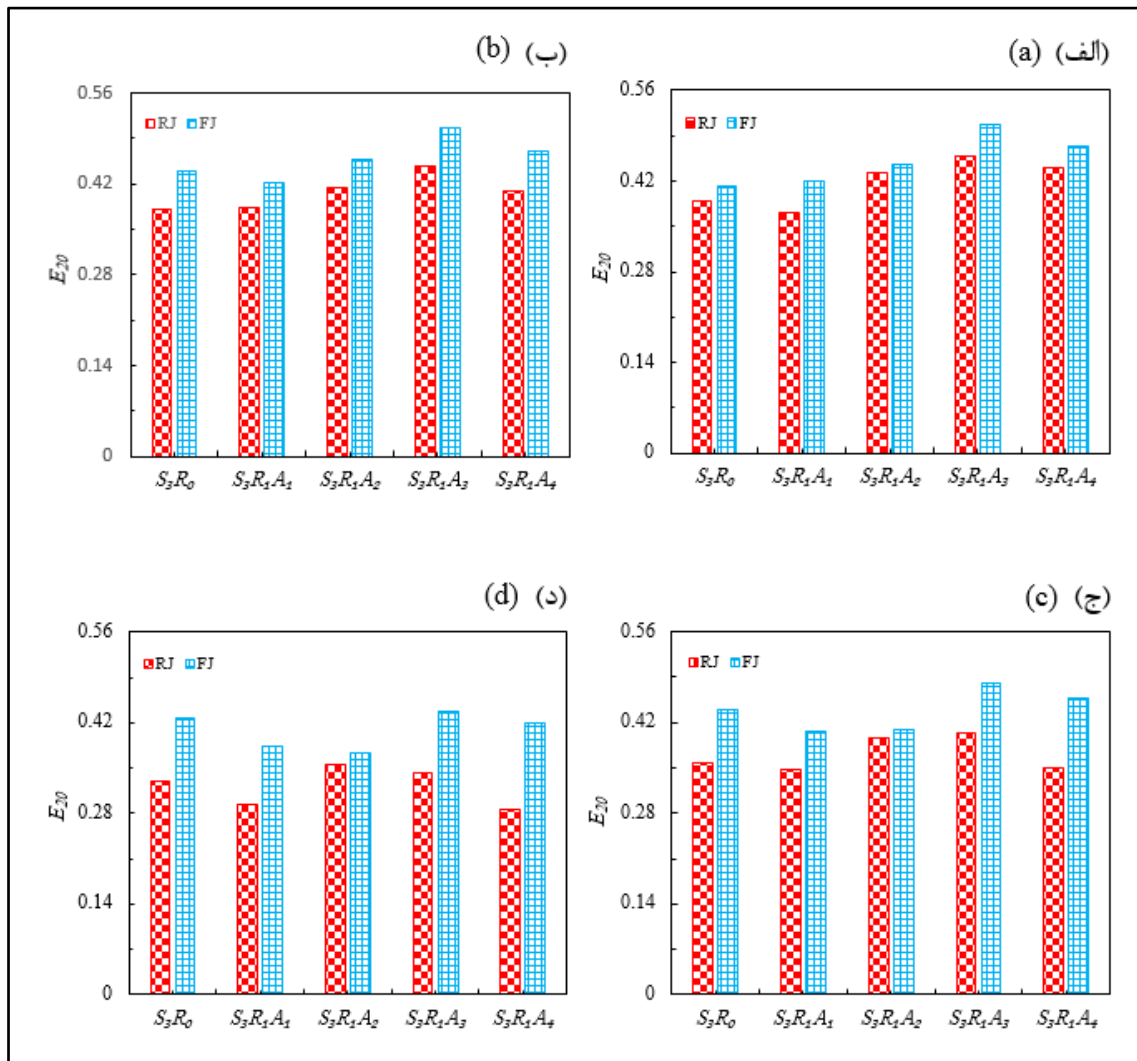


شکل ۱۳- تأثیر موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد (F_J) و مستغرق (R_J)، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس با شیب ۱:۷ بر متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب (E_f) در غلظت‌های مختلف اکسیژن بالادست (C_u):

(الف) $C_u = 2mg/l$ ، (ب) $C_u = 3mg/l$ ، (ج) $C_u = 4mg/l$ و (د) $C_u = 5mg/l$

Fig. 13. Effect of free hydraulic jump (F_J) and ramp hydraulic jump (R_J) position different arrangements of intermediate-scale roughness with slope of 1:7 on mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) at different upstream dissolved oxygen concentrations (C_u):

a) $C_u = 2mg/l$, b) $C_u = 3mg/l$, c) $C_u = 4mg/l$ and d) $C_u = 5mg/l$



شکل ۱۴- تأثیر موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد (FJ) و مستغرق (RJ)، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس با شیب ۱:۷ بر متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (E_{20}) در غلظت‌های مختلف اکسیژن بالادست (C_u):

الف) ($C_u = 2\text{mg/l}$) ، ب) ($C_u = 3\text{mg/l}$) ، ج) ($C_u = 4\text{mg/l}$) و د) ($C_u = 5\text{mg/l}$)

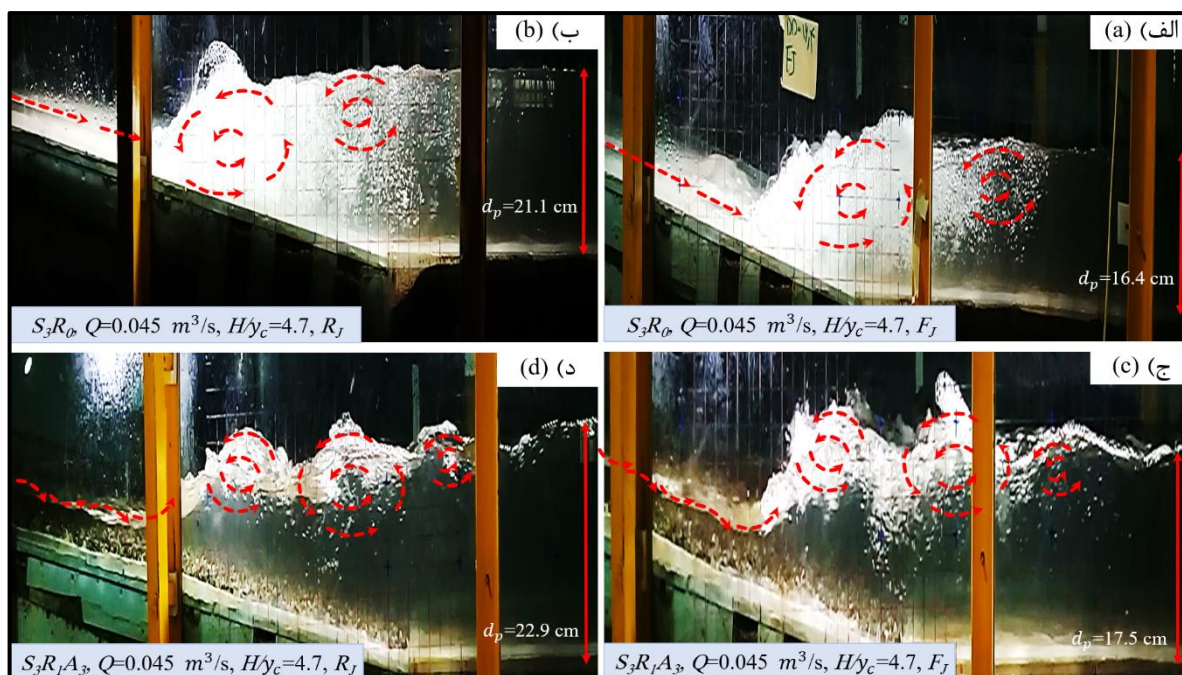
Fig. 14. Effect of free hydraulic jump (FJ) and ramp hydraulic jump (RJ) position, different arrangements of intermediate-scale roughness with slope of 1:7 on mean performance of increase of dissolved oxygen at 20° (E_{20}) at different upstream dissolved oxygen concentrations (C_u):

a) $C_u = 2\text{mg/l}$, b) $C_u = 3\text{mg/l}$, c) $C_u = 4\text{mg/l}$ and d) $C_u = 5\text{mg/l}$

جدول ۳- متوسط راندمان افزایش اکسیژن محلول در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (E_{20}) و متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب (E_f) در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ و در دامنه $3/6 < H/y_c < 7$

Table 3. Mean performance of increase of dissolved oxygen at 20° (E_{20}) and mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) at block ramp with slope of 1:5 for $3.6 < h/y_c < 7$

E_f				E_{20}				موقعیت پرش هیدرولیکی	نام سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار
غلظت (mg/l)				غلظت (mg/l)					
۵	۴	۳	۲	۵	۴	۳	۲		
۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۸۷	۱/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۱	F_J	S_3R_0
۰/۲۷	۰/۴۵	۰/۷۵	۱/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۳۹	R_J	
۰/۳۱	۰/۵۱	۰/۸۳	۱/۴۷	۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۴۲	F_J	$S_3R_1A_1$
۰/۲۴	۰/۴۴	۰/۷۶	۱/۲۶	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۳۷	R_J	
۰/۳۰	۰/۵۲	۰/۹۲	۱/۵۷	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۴۵	F_J	$S_3R_1A_2$
۰/۲۹	۰/۴۹	۰/۸۱	۱/۵۰	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۴۳	R_J	
۰/۳۶	۰/۶۱	۱/۰۲	۱/۷۹	۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۵۱	F_J	$S_3R_1A_3$
۰/۲۸	۰/۵۱	۰/۸۹	۱/۵۸	۰/۳۴	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۴۶	R_J	
۰/۳۴	۰/۵۷	۰/۹۲	۱/۶۳	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۷	F_J	$S_3R_1A_4$
۰/۲۳	۰/۴۴	۰/۸۲	۱/۵۴	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۴۴	R_J	



شکل ۱۵- الف) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار S_3R_0 در موقعیت پرش هیدرولیکی F_J ، ب) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار S_3R_0 در موقعیت پرش هیدرولیکی R_J ، ج) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_3R_1A_3$ در موقعیت پرش هیدرولیکی F_J و د) تصویر نیمرخ سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار $S_3R_1A_3$ در موقعیت پرش هیدرولیکی R_J

Fig. 15. a) Side view of S_3R_0 structure and F_J hydraulic jump position, b) Side view of S_3R_0 structure and R_J hydraulic jump position, c) Side view of $S_3R_1A_3$ structure and F_J hydraulic jump position and d) Side view of $S_3R_1A_3$ structure and R_J hydraulic jump position

اکسیژن محلول (E_f) به میزان ۳ و ۷ درصد نسبت به شیب‌های ۱:۳ و ۱:۵ است. در موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق نیز عملکرد شیب‌های ۱:۳ و ۱:۵ در افزایش میزان راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به وضعیت بدون زبری، نزدیک به عملکرد شیب ۱:۷ به میزان به ترتیب ۸ و ۶ درصد است. افزون بر این، مقایسه نتایج صورت گرفته نشان می‌دهد که از میان شیب‌ها و چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس مورد بررسی، سازه $S_3R_1A_3$ (چیدمان یک درمیان در شیب سازه ۱:۷) با متوسط افزایش غلظت اکسیژن محلول (E_f) ۱/۷۹ مربوط به غلظت اکسیژن محلول بالادست $C_u=2\text{mg/l}$ و موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد، بهترین عملکرد را دارد.

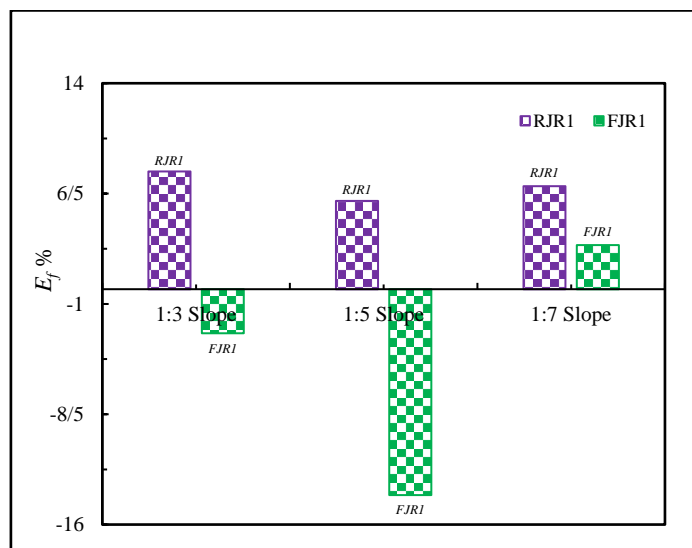
در جدول (۴) و نیز در شکل (۱۶) مقادیر متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول برای بهترین چیدمان‌ها در هر شیب و عملکرد کلی نصب زبری و موقعیت پرش هیدرولیکی شکل گرفته روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در هر شیب نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل نتایج و بررسی روند تغییرات عملکرد سازه‌ها در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست برای شیب‌های ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷ نشان می‌دهد که راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به وضعیت بدون زبری، در دامنه چیدمان‌ها و دبی‌های مختلف برای زبری متوسط مقیاس، در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۷ برای هر دو موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق دارای بهترین عملکرد در افزایش غلظت

جدول ۴- مقادیر بهترین عملکرد در افزایش E_{20} و E_f نسبت به وضعیت بدون اعمال زبری (SR_0) در

سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در شیب‌های مختلف

Table 4. Values of best performance in increasing E_{20} and E_f compared to the situation with no roughness (SR_0) on block ramp in different slopes

وضعیت بدون زبری و بهترین زبری‌ها در افزایش E_{20} و E_f	موقعیت پرش هیدرولیکی	غلظت ۲ (mg/l)		وضعیت بدون زبری (%)	وضعیت بدون زبری (%)
		E_{20}	E_f		
۱:۳	R_f	۰/۳	۰/۹۹	-	-
	F_f	۰/۴۱	۱/۳۵	-	-
	R_f	۰/۳۴	۱/۱	٪۱۰	٪۱۲
	F_f	۰/۳۹	۱/۳	٪۳۱	٪۳۱
۱:۵	R_f	۰/۳۲	۱/۱	-	-
	F_f	۰/۴۵	۱/۵۳	-	-
	R_f	۰/۳۶	۱/۲	٪۱۱	٪۱۱
	R_f	۰/۴	۱/۳۷	٪۲۷	٪۲۶
۱:۷	R_f	۰/۳۹	۱/۳۶	-	-
	F_f	۰/۴۱	۱/۴۴	-	-
	R_f	۰/۴۶	۱/۵۸	٪۱۶	٪۱۸
	F_f	۰/۵۱	۱/۷۹	٪۲۴	٪۲۳
	R_f	۰/۴۴	۱/۵۴	٪۱۳	٪۱۳
	F_f	۰/۴۷	۱/۶۳	٪۱۳	٪۱۵



شکل ۱۶- تأثیر موقعیت پرش هیدرولیکی، چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس بر متوسط راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب (E_f) نسبت به وضعیت بدون اعمال زبری (SR_0) در شیب‌های ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷

Fig. 16. Effect of hydraulic jump position, different arrangements of intermediate-scale roughness on mean performance of increase of dissolved oxygen concentration (E_f) compared with no roughness (SR_0) for slopes of 1:3, 1:5 and 1:7

ابتدای سطح شیب‌دار و تا پیش از تشکیل پرش هیدرولیکی به صورت سطحی و تقریباً شفاف و بدون هواست. تجزیه و تحلیل نتایج برای سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست ۲ تا 5 mg/l و موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق نشان داد که راندمان غلظت اکسیژن محلول با افزایش دبی (کاهش H/y_c) به تدریج افزایش می‌یابد و در محدوده H/y_c های ۵/۱ تا ۴/۴ (محدوده دبی‌های $0.104 \text{ m}^3/\text{s}$ تا $0.104 \text{ m}^3/\text{s}$) روند افزایشی متوقف می‌شود و افزایش بیشتر دبی (کاهش بیشتر H/y_c) تا حدودی به کاهش عملکرد سازه‌ها در افزایش غلظت اکسیژن محلول در پایین دست می‌انجامد.

نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر را می‌توان در دو دسته تغییرات شیب و تغییرات زبری سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار بر روند تغییرات راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) دسته‌بندی کرد:

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر چیدمان‌های مختلف زبری متوسط مقیاس IR (محدوده $2/5 < y_c/k_s < 6/6$) در دامنه دبی‌های $0.1025 \text{ m}^3/\text{s}$ تا $0.1065 \text{ m}^3/\text{s}$ (محدوده $6/9 \text{ H/y}_c$ تا $3/7$) و موقعیت‌های پرش هیدرولیکی آزاد (F_I) و مستغرق (R_I) بر راندمان افزایش غلظت اکسیژن محلول آب به عنوان یکی از پارامترهای مهم کیفی آب به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. مشاهدات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با ایجاد زبری متوسط مقیاس روی سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، در حد پایین عمق جریان عبوری از روی سازه، تیغه‌های جریان در جهت‌های مختلف از روی المان‌های زبری ریزش می‌گردد. در نتیجه، تداخل جریان در طول سازه افزایش می‌یابد و میزان راندمان اکسیژن محلول در آب بیشتر می‌شود. در حالی که برای شرایط بدون اعمال زبری و نیز حد بالای عمق جریان عبوری از این زبری‌ها، جریان عبوری از

سازه از ۱:۳ به ۱:۵ کاهش اندکی در متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) از ۱/۴۳ به ۱/۳۴ رخ می‌دهد ولی با تغییر شیب سازه به ۱:۷ مقدار E_f به ۱/۶۱ افزایش می‌یابد.

(۲) بررسی روند نتایج به‌دست آمده در تمامی غلظت‌های اکسیژن محلول بالادست و ایجاد زبری متوسط مقیاس نشان می‌دهد که به‌طور متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) نسبت به وضعیت بدون اعمال زبری برای موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق و شیب‌های ۱:۳، ۱:۵ و ۱:۷ به ترتیب ۸، ۶ و ۷ درصد افزایش می‌یابد ولی با تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی به آزاد عملکرد شیب‌های ۱:۳ و ۱:۵ به میزان ۳ و ۱۴ درصد نسبت به وضعیت بدون اعمال زبری کاهش می‌یابد. همچنین، در شیب ۱:۷ به دلیل طول زیاد سازه و گردش بیشتر جریان در میان المان‌های زبری، عملکرد مثبتی در موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد به میزان ۳ درصد نسبت به وضعیت بدون اعمال زبری به‌دست می‌آید.

(۱) تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده برای غلظت اکسیژن محلول $C_u=2mg/l$ و وضعیت بدون اعمال زبری نشان می‌دهد که با کاهش شیب سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار از ۱:۳ به ۱:۵ و ۱:۷ متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) از ۰/۹۹ به ۱/۱ و ۱/۳۶ برای موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق افزایش می‌یابد. برای موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد با کاهش شیب سازه از ۱:۳ به ۱:۵ متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) از ۱/۳۵ به ۱/۵۳ افزایش یافته ولی با تغییر شیب سازه به ۱:۷ کاهش جزئی در E_f به ۱/۴۴ رخ داده‌است. مقایسه نتایج به‌دست آمده برای غلظت اکسیژن محلول $C_u=2mg/l$ و ایجاد زبری متوسط مقیاس با چیدمان‌های مختلف نشان می‌دهد که با کاهش شیب سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار از ۱:۳ به ۱:۵ و ۱:۷، متوسط راندمان غلظت اکسیژن محلول (E_f) از ۱/۱ به ۱/۲ و ۱/۴۷ برای موقعیت پرش هیدرولیکی مستغرق افزایش می‌یابد. افزون بر این، برای موقعیت پرش هیدرولیکی آزاد با کاهش شیب

مراجع

- Ahmad, Z., Petappa, N. M. & Westrich, B. (2009). Energy Dissipation on Block Ramps with Staggered Boulders. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135(6), 522-526.
- Ahmad, Z., & Srisvastava, D. (2014). Energy dissipation on block ramps with large scale roughness. *International Symposium on Hydraulic Structures*. 237-244.
- Alborzi Varaki, S., Bijankhan, M. & Daneshkar Arasteh., P. (2018). Application of dimensional analysis to investigate the dissolved oxygen increase using classical hydraulic jump. *Iranian Journal of Soil Water Research*. 48(5), 975-983.
- Baylar, A., & Bagatur, T. (2000). Aeration performance of weirs. *Water Engineering and Management*. 26(4), 521-526.
- Baylar, A., Bagatur, T., & Emiroglu, M. E. (2007). Prediction of oxygen content of nappe, transition and skimming flow regimes in stepped-channel chutes. *Sci, Journal of Environmental Engineering*. 6(2), 201-208.
- Bung, D., & 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.
- Chao, A., Chang, S., & Galler, W. (1988). Effect of temperature on oxygen transfer laboratory studies. *Journal of Environmental Engineering*. 113(5), 1089-1101.
- Emiroglu, M. E., & Baylar, A. (2005). Influence of included angle and sill slope on air entrainment of triangular planform labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(3), 184-189.
- Esmaili varaki, M., Habibpanah, M., Biabani, R., & Navabian, M. (2021). Experimental investigation of dissolved oxygen efficiency stepped-labyrinth weirs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management*. 1-14. <https://doi.org/10.1680/jwama.20.00075>.
- Gameson, A. L. H. (1957). Weirs and the aeration of rivers. *Journal Institution of Water Engineering*. 2(6), 477-490.
- Gulliver, J. S. & Rindels, A. J. (1993). Measurement of Air-Water Oxygen Transfer at Hydraulic Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119(3), 327-349.
- 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), 24-35.
- Ghare, A. D. Ingle, R. N. Porey, P. D. & Gokhale, S. (2010). Block ramp design for efficient energy dissipation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136(1), 01–05.
- Mohan, S., & Kumar, K. P. (2016). Waste load allocation using machine scheduling: model application. *Environmental Processes*. 3(1), 139-151.
- Mansori konsestani, R., Esmaili 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 Water Research*. 49(5), 977-990.
- Nakasone, H. (1987), Study of aeration at weirs and cascades. *Journal of Hydraulic Engineering*. 113(1), 64-81.
- Oertei, M. (2013). In-Situ Measurements on Cross-Bar Block Ramps. *Journal of Hydraulic Engineering Repository*. 111-119.
- Pagliara, S., & Chiavaccini, P. (2006a). Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(1), 41–48.
- Pagliara, S., & Chiavaccini, P. (2006b). Energy dissipation on reinforced block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 132(3), 293-297.
- Pagliara, S., & Chiavaccini, P. (2006c). Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(6), 545–552.
- Pagliara, S., Das, R., & Palermo, M. (2008). Energy dissipation on submerged block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 134(4), 527–532.
- Pagliara, S., Carnacina, I., & Roshni, T. (2010). Self-aeration and friction over rock chutes in uniform flow conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136(11), 959-964.

- Pagliara, S., Roshni, T., & Palermo, M. (2015). Energy dissipation over large-scale roughness for both transition and uniform flow conditions. *International Journal of Civil Engineering*. 13(3),341-346.
- Subramanya, K. (1986). Flow in Open Channel. *Second Edition, Tata McGraw-Hill New Delhi*.
- Tamagni, S., Weitbrecht, V., & Boes, R. (2010). Design of unstructured block ramps: A state-of-the-art review. *Journal of Hydraulic Engineering Repository*. 729-736.

Experimental Investigation of Effect of the Efficiency Block Ramp on Increasing the Dissolved Oxygen in Semi-Uniform Regime

S. Kamakoly, M. Esmaili-Varaki* and M. Navabian

* Corresponding Author: Associate Professor, Dept. of Water Engineering and Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran.

Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

Received: 18 September 2021, Accepted: 11 June 2022

Introduction

The dissolved oxygen concentration in water is one of the most important parameters of water quality and plays an important role in improving the environmental conditions of rivers as well as the processes of removing iron and manganese from drinking water in water treatment plant. One of method to increase level of the dissolved oxygen in water is installation of structures that by increasing turbulence of water lead to entrainment of small bubbles of air into water body. Block ramps are one of the gravity-falling structures that in addition to the optimal performance in the stability of riverbeds, due to the structure of over passing flow and the possibility of applying various roughness's in size and arrangement, can also act as an aerator structure.

Experimental Setup and procedure

In this study, the effect of different arrangements of intermediate-scale roughness on increasing the performance of dissolved oxygen in water in the downstream of the block ramp with slopes of 1:3, 1:5 and 1:7 was investigated experimentally. Experiments were performed for a wide range of flow rate, free and ramp hydraulic jump conditions (hydraulic jump on ramp block), different arrangements of intermediate-scale roughness and different upstream dissolved oxygen concentrations.

Experimental measurements were conducted in the hydraulics modeling laboratory of the University of Guilan, Iran, in a flume with a rectangular cross-section with, 0.88 m width, 1 m depth and 8.6 m length. A centrifugal pump controlled with an adjustable frequency AC motor supplied a range of discharges in semi-uniform regimes. It should be noted that the flow rate was adjusted using an ultrasonic flow meter with an accuracy of ± 0.1 l/s.

The DO measurements were conducted with two calibrated portable HQ30D Model DO meters 0.7 m upstream and 2.5 m downstream from the toe of the weirs where air bubbles completely disappeared from view. Since the difference in the upstream and downstream concentrations is proportional to the concentration gradient, the deoxygenating process is an important step in the preparation of water for quantifying the influence of grade control structures on dissolved oxygen values. Thus, in this study, a water and Na_2SO_3 solution with a concentration of 70 (mg/l) was used for chemical deoxygenation. For this purpose, a storage tank of Na_2SO_3 solution was installed at 4 m upstream of the weirs. Each experiment was started by regulating inflow discharge and tailwater depth. The Na_2SO_3 solution was injected by a multi injector that was inserted along the width of the flume and at mid-depth of flow. The deoxygenating chemicals were added to water until C_u reached 1.5 (mg/l), approximately. After disconnecting the storage tank, measurements were made upstream and downstream of the structures until reaching the initial saturation level of C_d . During this process, the DO meters continuously recorded the DO measurements.

To investigate the performance the block ramp with different slope and arrangements of roughness particles with intermediate scale ($2.5 < y_o/k_s < 6.5$), flow discharges ($3.7 < H/y_c < 6.9$), and free and submerged hydraulic jump, 248 tests were carried out.

Results and discussion

Experimental observations and analysis of the results showed that by creating intermediate-scale roughness on block ramps, the flow overpasses in different directions on the rough elements at lower approaching flow depth. Therefore, diffusion of flow along the structure intensifies and performance of increase of dissolved oxygen increases. Experimental observation showed that for smooth block ramp and high level of overpassing flow over roughed surface of block ramp, flow regime is skimming and there is no aeration occurred along structures. Comparison of results showed that for upstream dissolved oxygen of 2 to 5 mg/l at both free and submerged hydraulic jump, performance of the blokrams to increase of E_f increase by increase of flow discharges and corresponding H/y_c . However, more increase of flow discharge caused to slightly decrease of E_f .

Comparison of results indicated that at $C_u = 2\text{mg/l}$ and submerged hydraulic jump, by increasing the slope of smooth block ramps from 1:3 to 1:5 and 1:7, E_f changed from 0.99 to 1.1 and 1.36, respectively. Furthermore, for free hydraulic jump, reduction of slope of smooth blockramp from 1:3 to 1:5 and 1:7, E_f changed from 1.35 to 1.53 and 1.44, respectively.

By installing intermediate-scale roughness with various arrangement, on average by increasing the slope of block ramps from 1:3 to 1:5 and 1:7, E_f changed from 1.1 to 1.2 and 1.47, respectively. Furthermore, for free hydraulic jump, reduction of slope of smooth blockramp from 1:3 to 1:5 and 1:7, E_f changed from 1.43 to 1.34 and 1.61, respectively.

Comparison of results showed that by installing intermediate-scale roughness with various arrangement E_f increases 7 percent on average for submerged hydraulic jump.

Conclusion

Comparison of performance of tested structures in all upstream dissolved oxygen concentrations shows that for block ramp with a slope of 1:3, installation of intermediate-scale roughness with different arrangements, performance of dissolved oxygen concentration (E_f) compared to no roughness conditions in ramp hydraulic jump conditions, it has improved by 8%, however, by changing the hydraulic jump to free, the performance of these structures decreased by 3%. Comparison of the results shows that by changing the slope of the structure to 1:5, create intermediate-scale roughness with different arrangements in ramp hydraulic jump conditions a 6% increase in performance of dissolved oxygen concentration was observed compared to no roughness conditions, however, by changing the hydraulic jump to free, the performance of these structures decreased by 14%. By changing the slope of the block ramp to 1:7 and create intermediate-scale roughness with different arrangements like other slopes studied, performance of dissolved oxygen concentration for ramp and free hydraulic jump conditions, improved by 7 and 3%, respectively, compared to no roughness conditions.

Keywords: Aeration, Block Ramp, Dissolved oxygen, Protruding Boulder, Rock Chutes