

## بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای بر ضریب دبی و پروفیل‌های سطح آب

علیرضا افیلیان<sup>۱</sup>، سیدمحسن سجادی<sup>۲\*</sup>، محمود شفاعی بجنستان<sup>۳</sup>، جواد احدیان<sup>۴</sup>

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ استادیار؛ استاد؛ و دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۱

### چکیده

سرریزهای جانبی کاربرد وسیعی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، سدها و شبکه‌های آب و فاضلاب دارند. اهداف اصلی پژوهش حاضر بررسی تاثیر ارتفاع سرریز کلید پیانویی جانبی دوزنقه‌ای بر ضریب دبی آن و بررسی پروفیل‌های سطح آب در انتهای بالادست، پایین‌دست و در محدوده جانمایی سرریز است. بدین منظور ۴ سرریز کلید پیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، یک سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و یک سرریز لبه تیز مستطیلی (مدل شاهد)، تحت اعداد فرود زیر بحرانی در محدوده ۱۰/۰ تا ۷۴/۰ آزمایش شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد برای استفاده از فرضیه دیمارچی برای برآورد ضریب دبی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای باید احتیاط کرد. همچنین ظرفیت تخلیه سرریزهای کلید پیانویی با افزایش ارتفاع به دلیل یکنواخت‌تر شدن سطح آب، کاهش تداخل تیغه‌ها و کاهش ورتکس در دهانه‌های کلیدهای ورودی، افزایش می‌یابد. در مدل کلید پیانویی با ارتفاع ۲۵، ۲۰، ۱۵ و دوزنقه‌ای ساده ظرفیت تخلیه جریان به ترتیب ۲/۶۰، ۱/۹۲، ۱/۵۹ و ۱/۳۸ برابر بیشتر است تا در مدل شاهد. در پژوهش حاضر عمق آب در انتهای بالادست و نزدیک تاج سرریز کاهش می‌یابد. این کاهش عمق به دلیل افزایش شتاب طولی جریان و متاثر شدن از مکش جریان توسط سرریز در این محدوده است.

### واژه‌های کلیدی

شبکه‌های آبیاری و زهکشی، فرضیه دی‌مارچی، ظرفیت تخلیه سرریزهای جانبی

### مقدمه

ظرفیت بیش از حد به آنها، جریان مازاد ایجاد می‌شود که می‌تواند به آنها آسیب جدی وارد کند و اقتصاد طرح را با چالش مواجه سازد و همچنین می‌تواند خطرهای جانی به دنبال داشته باشد. در طراحی سدها نیز با توجه به جانمایی سد و به منظور

در شبکه‌های آبیاری و زهکشی که با ظرفیت مشخصی طراحی می‌شوند به دلایل متعدد از جمله بهره‌برداری غیر اصولی توسط تشکل‌های آب‌بران و در رودخانه‌ها و سایر مجاری طبیعی با تحمیل

زیر بحرانی به آنالیز پروفیل سطح آب روی سرریز و سرعت‌های جریان در طول و در عمق سرریز پرداختند و نشان دادند که ضریب دبی سرریز در حالت زیگزاگی حدود ۱/۵ تا ۴ برابر بیشتر از ضریب دبی سرریزهای مستطیلی است.

باقری و حیدرپور (Bagheri & Heydarpour, 2012)، با اندازه‌گیری مولفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان در کانال اصلی در مجاورت سرریز جانبی مستطیلی به این نتیجه رسیدند که مولفه سرعت افقی جریان در انتهای پایین‌دست جریان کاهش پیدا می‌کند. این محققان همچنین با بررسی مولفه‌های عرضی و عمقی جریان به این نتیجه رسیدند که عمده جریان از انتهای پایین‌دست سرریز تخلیه می‌شود. میچلازو (Michelazzo, 2015)، با استفاده از مدل‌های فیزیکی رویکردی جدید در حل رابطه دیمارچی برای سرریزهای جانبی با ارتفاع صفر در مجاری روباز ارائه دادند. برای حل این مدل شرایط جریان را زیر بحرانی و بستر را ثابت در نظر گرفتند. روش آنها در حل این مدل بدون استفاده از روش‌های عددی امکان برآورد دبی خروجی از سرریز را با توجه به شرایط هیدرولیکی بالادست و پایین‌دست به وجود می‌آورد.

آیدین (Aydin, 2016)، با قرار دادن آستانه در کف و در سه موقعیت انتهای بالادست، انتهای پایین‌دست و در میانه سرریز به این نتیجه رسید که وجود مانع در انتهای پایین‌دست سرریز باعث افزایش ضریب گذردهی سرریزهای مستطیلی جانبی می‌شود. آیدین و اولو (Aydin & Ulu, 2017) با انجام آزمایشات روی سرریزهای جانبی دوزنقه‌ای با وجود سازه آنتی‌ورتکس به این نتیجه رسیدند که

استفاده بیشتر از حجم سدها برای اهداف کنترل سیلاب یا صرفاً حجم بیشتر مخزن، گاهی جانمایی سد به گونه‌ای است که امکان احداث سرریز جلویی عمود بر جریان اصلی را به لحاظ فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر نمی‌کند. از این رو در چنین مواقعی سرریز جانبی را به عنوان سرریز اصلی سد معرفی و طراحی می‌کنند. در برخی از سدها که با اطلاعات هیدرولوژیکی قدیمی احداث شده‌اند و امار و اطلاعات هواشناسی نشان می‌دهند که سرریز برای سیلاب‌های آینده با خطر احتمالی مواجه خواهد بود، گزینه اصلاح سرریز یا استفاده از سرریزهای جانبی به عنوان سرریزهای کمکی پیشنهاد می‌شود. در شبکه‌های فاضلاب نیز به منظور اختلاط بیشتر آب و هوا و کمک به تصفیه بیشتر جریان، همزمان با عبور جریان از سرریزهای جانبی عملکرد سرریز از منظر هوادهی نیز مورد نظر است. از سویی دیگر، تنظیم سطح آب در هنگام آبگیری و نبود اختلال در آبگیرهای بالادست و پایین دست یکی از عواملی است که توجه کارشناسان حوزه آبیاری و زهکشی را در استفاده از آبگیرهای مختلف در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به خود جلب می‌کند. در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که سرریزهای جانبی از جمله سرریزهایی هستند که کاربردهای وسیعی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، شبکه‌های آب و فاضلاب و کنترل سیلاب در مخازن سدها دارند.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای روی انواع سرریزهای جانبی و تاثیر مشخصات هندسی و هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز بر ضریب دبی آنها شده است. امین امیروقلو و همکاران (Emin Emiroglu et al., 2010) با حدود ۲۹۰۰ آزمایش در حالت جریان

کلیدپیانویی مستطیلی را بررسی کردند و نشان دادند افزایش ارتفاع سرریز منجر به کاهش ضریب دبی عبوری از سرریز می‌شود. بررسی‌های باقری و همکاران (Bagheri *et al.*, 2016) در حالت تشکیل پرش هیدرولیکی روی سرریز جانبی خطی نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع منجر به کاهش ضریب دبی عبوری از سرریز می‌شود. آنها این کاهش دبی را ناشی از انحراف کمتر جریان به سمت سرریز در حالت تشکیل پرش هیدرولیکی روی سرریز دانسته‌اند.

رویکرد مطالعات در سال‌های اخیر به سمت افزایش راندمان و نوآوری در استفاده از هندسه‌های جدید سرریزهای جانبی و نیز راهکارها و شیوه‌های جدید برآورد ضریب دبی این سرریزها متمایل شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به این موارد اشاره کرد: مطالعات قادری و همکاران (Ghaderi *et al.*, 2020) به منظور استفاده از مدل‌های عددی برای تخمین ضریب دبی جریان سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای؛ مطالعات کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2018) در خصوص استفاده از سرریزهای کلید پیانویی با پلان مستطیلی به عنوان سرریزهای جانبی؛ مطالعات ساغری و همکاران (Saghari *et al.*, 2019) و مطالعات سیدجوادی و همکاران (Seyed javad *et al.*, 2019) در خصوص استفاده از سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای؛ و مطالعات دیباکو و اسکورزینی (Di bacco & Scorzini., 2019) به منظور تخمین ضریب دبی سرریزهای جانبی با استفاده از روش‌های شبکه عصبی.

با توجه به پارامترهای هندسی متعددی که بر ضریب دبی سرریزهای جانبی کلیدپیانویی دوزنقه‌ای

سازه آنتی‌ورتکس استفاده شده بطور متوسط باعث افزایش ۲۶ درصدی در دبی خروجی از سرریز جانبی دوزنقه‌ای شده است. مارانزونی و همکاران (Maranzoni *et al.*, 2017) به صورت عددی و آزمایشگاهی تحلیل‌هایی را روی سرریز جانبی در یک کانال همگرای مستطیلی ارائه دادند. آزمایش‌های آنها که در شرایط جریان زیر بحرانی و ماندگار اجرا شده بود نشان می‌دهد عدد فرود پایین دست و ارتفاع بدون بعد سرریز بیشترین تأثیر را بر دبی عبوری از سرریز جانبی در کانال همگرا دارند.

عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2020) با شبیه‌سازی عددی جریان از سرریز مثلثی مجهز به سازه‌های ضد گرداب نفوذپذیر و غیرقابل نفوذ به این نتیجه رسیدند ساختار ضد ورتکس نفوذپذیر تأثیر بیشتری بر ضریب دبی نسبت به ساختار غیرقابل نفوذ دارد. امین امیروقلو و همکاران (Emin Emiroglu *et al.*, 2017) پیرامون استفاده از سازه‌ی ضد ورتکس بر راندمان هیدرولیکی نصب سازه ضد گرداب (نوع ۶-d) در دهانه ورودی سرریز جانبی دوزنقه‌ای منجر به افزایش ۳۵ درصدی ضریب دبی آن می‌شود.

نظامی و همکاران (Nezami *et al.*, 2013) رفتار هیدرولیکی جریان سرریز جانبی کنگره‌ای دوزنقه‌ای تک سیکل را با ارتفاع‌های مختلف بررسی کردند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داده است که افزایش ارتفاع سرریز جانبی کنگره‌ای منجر به افزایش ضریب دبی سرریز می‌شود. پوراهری و همکاران (Pourahari *et al.*, 2021) به صورت عددی رفتار جریان فوق بحرانی عبوری از سرریزهای جانبی

توزیع نامتقارن دبی خروجی از سرریز در طول تاج سرریز برآورد ضریب دبی سرریز توسط رابطه ۱ و قرار دادن عمق متناظر برای تخمین آن را در عمل ناممکن می‌کند. دی‌مارچی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۳۴ برای تخمین ضریب دبی جریان در سرریزهای جانبی با فرضیاتی رابطه ۲ را پیشنهاد داد.

$$C_M = \frac{3B}{2L} [\varphi_2 - \varphi_1] \quad (2)$$

که در آن،

$C_M$  = ضریب دبی سرریز جانبی؛  $B$  = عرض کانال اصلی (متر)؛  $L$  = طول سرریز جانبی (متر)؛ و  $\varphi$  = تابع جریان دی‌مارچی است که به مشخصات هندسی و هیدرولیکی جریان کانال اصلی در انتهای بالادست و پایین دست سرریز بستگی دارد و با رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\varphi = \frac{2E-3P}{E-P} \sqrt{\frac{E-Y}{Y-P}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-Y}{E-P}} \quad (3)$$

که در آن،

$E$  و  $Y$  = به ترتیب انرژی ویژه جریان (متر)؛ و عمق جریان در کانال اصلی (متر). اندیس‌های ۱ و ۲ در رابطه (۲) نیز به ترتیب معرف انتهای بالادست و پایین دست سرریز جانبی هستند. ظرفیت تخلیه سرریزهای جانبی ( $\varepsilon$ ) به صورت نسبت دبی عبوری از سرریز جانبی ( $Q_s$ ) به دبی کانال اصلی ( $Q_1$ ) تعریف و توسط رابطه ۴ برآورد می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{Q_1} \quad (4)$$

امکانات آزمایشگاهی و معرفی مدل‌ها

تمام آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز و در فلومی

تاثیرگذار هستند، این پژوهش برای رسیدن به دو هدف اصلی طرح ریزی شد: یکی بررسی تاثیر ارتفاع سرریز جانبی کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بر ضریب دبی آن و دیگری بررسی پروفیل‌های طولی عمق جریان در کانال اصلی. به موازات این دو هدف اصلی، این پژوهش بررسی فرضیه دی‌مارچی را در برآورد ضریب دبی سرریزهای کلیدپیانویی و ظرفیت تخلیه سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نیز دنبال می‌کند. در این راستا، چهار مدل سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای، که فقط از نظر ارتفاع و در نتیجه شیب کلیدهای ورودی و خروجی با یکدیگر تفاوت دارند، یک مدل سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای ساده و یک مدل سرریز خطی به عنوان مدل شاهد در اعداد فرود مختلف آزمایش خواهند شد.

#### تئوری

جریان متغیر مکانی یکی از انواع جریان‌های ماندگار است. این نوع جریان در دو دسته جریان متغیر مکانی با افزایش دبی و جریان متغیر مکانی با کاهش دبی تقسیم می‌شود. جریان عبوری از سرریزهای جانبی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است. معادلات جریان حاکم بر جریان متغیر مکانی، رابطه پیوستگی و مومنتم هستند. دبی عبوری از سرریز جانبی با رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$Q_s = \frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g(Y-P)^{1.5}} \quad (1)$$

که در آن،

$Q_s$  = دبی عبوری از سرریز جانبی (مترمکعب بر ثانیه)؛  $g$  = شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)؛  $(Y-P)$  = عمق آب نسبت به تاج سرریز و  $C_M$  = ضریب دبی سرریز.

تغییرات عمق جریان در طول تاج سرریز و

سرریز جانبی افزایش و با عبور از تاج سرریز، جریان از روی سرریز جانبی برقرار می‌شود. جریان عبوری از سرریز جانبی به کانال جمع‌کننده وارد و در انتهای آن توسط سرریز مستطیلی کالیبره‌شده با دقت  $\pm 0.10$  لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری و به این صورت امکان ایجاد اعداد فرود مختلف در بالادست سرریز جانبی فراهم می‌گردد. شایان ذکر است، محل نصب سرریزهای جانبی، ۴ متر از شروع انتهای بالادست کانال، جایی که کانال به دو کانال اصلی و جمع‌کننده تقسیم شده بود، قرار داشت. بازشدگی محل قرارگیری سرریز جانبی برابر ۴۶ سانتی‌متر بود. عمق جریان در بالادست، پایین‌دست و در محدوده محل قرارگیری سرریز جانبی در کانال اصلی، در صفحه مش‌بندی شده و توسط یک پوینت‌گیج با دقت  $\pm 0.50$  میلی‌متر برداشت شده است.

#### معرفی مدل‌های آزمایشگاهی

در راستای هدف پژوهش حاضر، شش مدل آزمایشگاهی طرح‌ریزی و ساخته شد. این مدل‌ها شامل یک مدل سرریز لبه تیز مستطیلی (مدل شاهد)، یک مدل سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای و چهار مدل سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر بودند (شکل ۲). در شکل ۲، کلیه مدل‌ها در سه نمای پرسپکتیو، پلان و برش عرضی نمایش داده شده‌اند. جدول ۱ مشخصات هندسی مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

به طول ۱۲ متر، عرض کف ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، کف فلوم از جنس استیل و دیواره‌ها از جنس شیشه اجرا شد. به منظور حفظ شرایط مشابه برای مدلسازی جریان متغیر مکانی عبوری از سرریز جانبی، فلوم در راستای طولی توسط ورق پی‌وی‌سی با ضخامت ۱ سانتی‌متر به دو کانال اصلی و جمع‌کننده تقسیم شده است. عرض کانال اصلی ۴۱ سانتی‌متر و عرض کانال جمع‌کننده ۳۸ سانتی‌متر است. در انتهای کانال جمع‌کننده نیز سرریز مستطیلی لبه تیزی به عرض ۳۸ سانتی‌متر و با دقت برای اندازه‌گیری دبی سرریز جانبی نصب شده است. همچنین کف کانال اصلی به منظور جلوگیری از استغراق سرریز ۱۵ سانتی‌متر از کف کانال جمع‌کننده بالاتر قرار داده شد. جریان آب از مخزن توسط پمپ با ظرفیت ۱۸۰ لیتر بر ثانیه تامین می‌شد.

#### اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان

دبی ورودی به کانال توسط شیر فلکه از منبع اصلی هدایت و تنظیم و توسط سرریز مستطیلی کالیبره شده‌ای به عرض ۱ متر که در انتهای کانال قرار داشت با دقت  $\pm 0.10$  لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد. همچنین در انتهای کانال اصلی از یک دریچه کشویی به منظور تنظیم سطح آب کانال اصلی (برای ایجاد شرایط جریان مورد نظر) در بالادست سرریز جانبی استفاده شد. به این نحو که پس از برقراری جریان در کانال اصلی، با تنظیم سطح آب توسط این دریچه، عمق آب در بالادست

جدول ۱- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر

Table 1- Characteristics of Experimental models in this Research

ارتفاع سرریز (سانتی-متر)	نسبت شیب	نسبت عرض پایین دست	شیب کلید	شیب ورودی	نسبت ارتفاع به عرض یک سیکل	طول موثر به عرض	نام مستعار	مدل سرریز
P (cm)	*bi/bo (-)	*W <sub>d</sub> /W <sub>ou</sub> (-)	S <sub>o</sub> (-)	S <sub>i</sub> (-)	(بعد) P/W <sub>u</sub> (-)	**L <sub>eff</sub> /W (-)		
20	-	-	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۰	۲/۶۵	TNRSW	دوزنقه‌ای ساده
10	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۲/۶۵	TPKSW <sub>p10</sub>	کلیدپیانویی دوزنقه‌ای
15	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۰	۲/۶۵	TPKSW <sub>p15</sub>	کلیدپیانویی دوزنقه‌ای
20	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۰	۲/۶۵	TPKSW <sub>p20</sub>	کلیدپیانویی دوزنقه‌ای
25	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۱۰	۲/۶۵	TPKSW <sub>p25</sub>	کلیدپیانویی دوزنقه‌ای مستطیلی
20	-	-	-	-	-	1	Lisw	لبه تیز (مدل شاهد)

\*W<sub>d</sub>=W<sub>ou</sub>=7/5cm, bi=bo=5cm, \*\*L<sub>eff</sub>=130cm

محدوده  $X^*$ ، از ۰/۵۰- (بالادست سرریز) تا ۱/۵۰+ (پایین دست سرریز)،  $Z^*$ ، از صفر (نزدیک جداره کانال اصلی) تا ۱/۰۰ (نزدیک سرریز) و  $Y^*$  نیز از صفر (عبور نکردن جریان از سرریز) تا ۰/۶۰ متغیر و تقسیم بندی شدند.

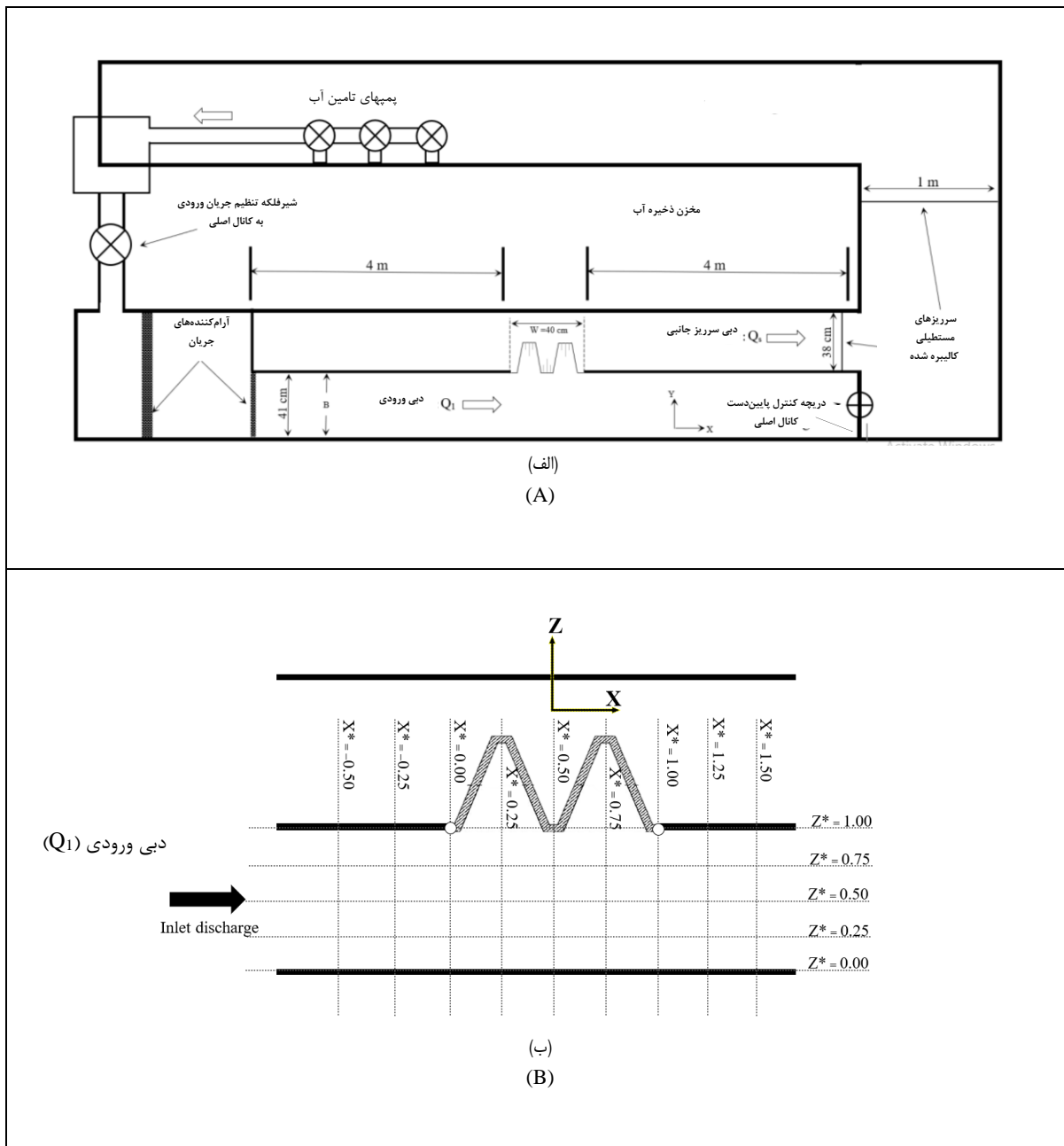
برای مقایسه و نمایش بهتر در نمودارها، از سه محور بدون بعد  $X^*$ ،  $Y^*$  و  $Z^*$  استفاده شده است که به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$X^* = \frac{X}{W} = \text{نسبت فاصله از انتهای بالادست سرریز به عرض سرریز}$$

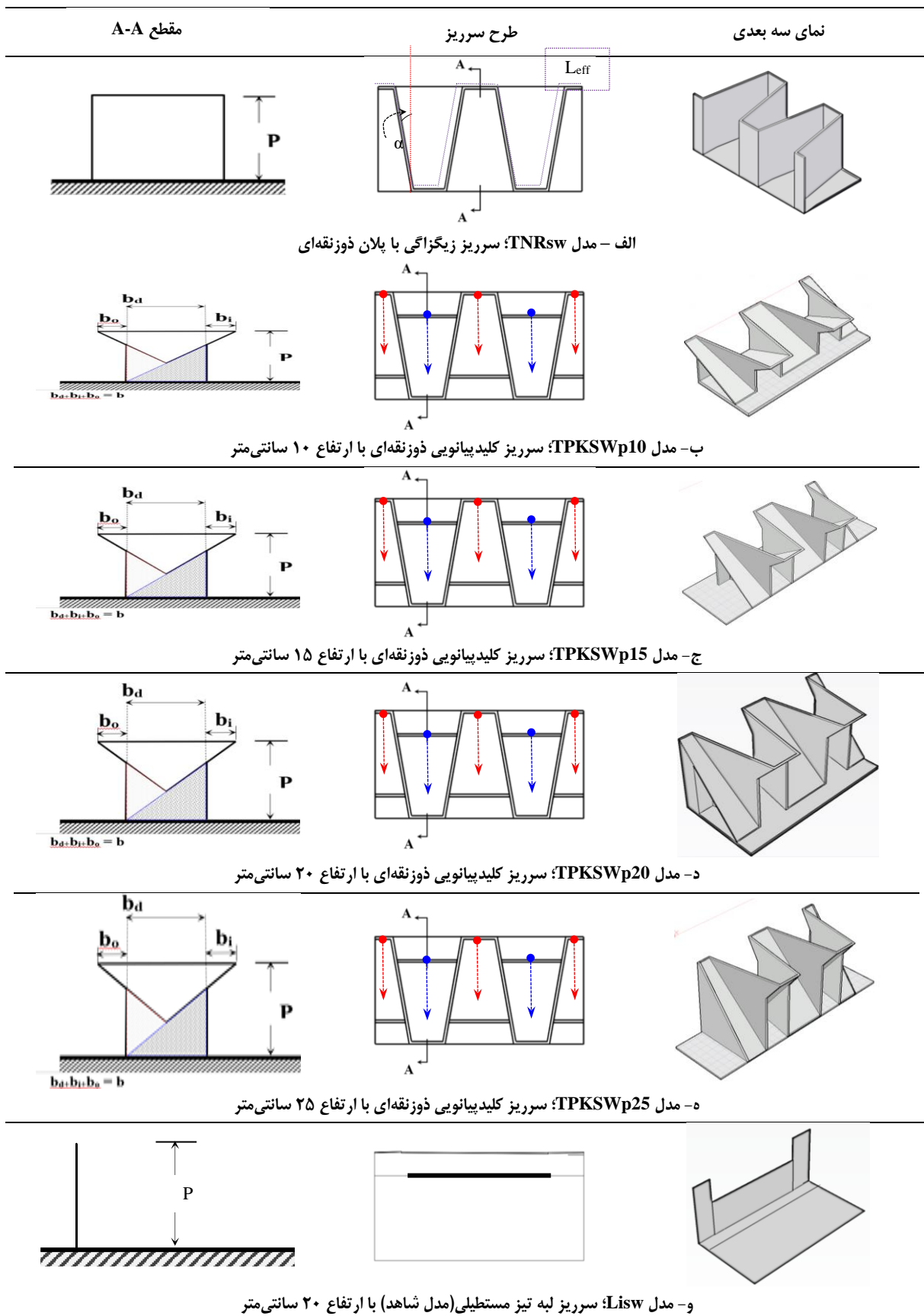
$$Y^* = \frac{Y}{P} = \text{نسبت عمق جریان روی سرریز به ارتفاع سرریز}$$

$$Z^* = \frac{Z}{B} = \text{نسبت فاصله از سرریز به عرض کانال اصلی}$$

بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای...



شکل ۱- الف- فلوم آزمایشگاهی و ب- شبکه بندی برداشت عمق جریان در محدوده جانبی سرریز  
Fig. 1- A) Laboratory flume and B) Meshing points for Flow depth reading in the location of the weir



شکل ۲- جزئیات مدل‌های آزمایشگاهی

Fig. 2- details of Experimental models

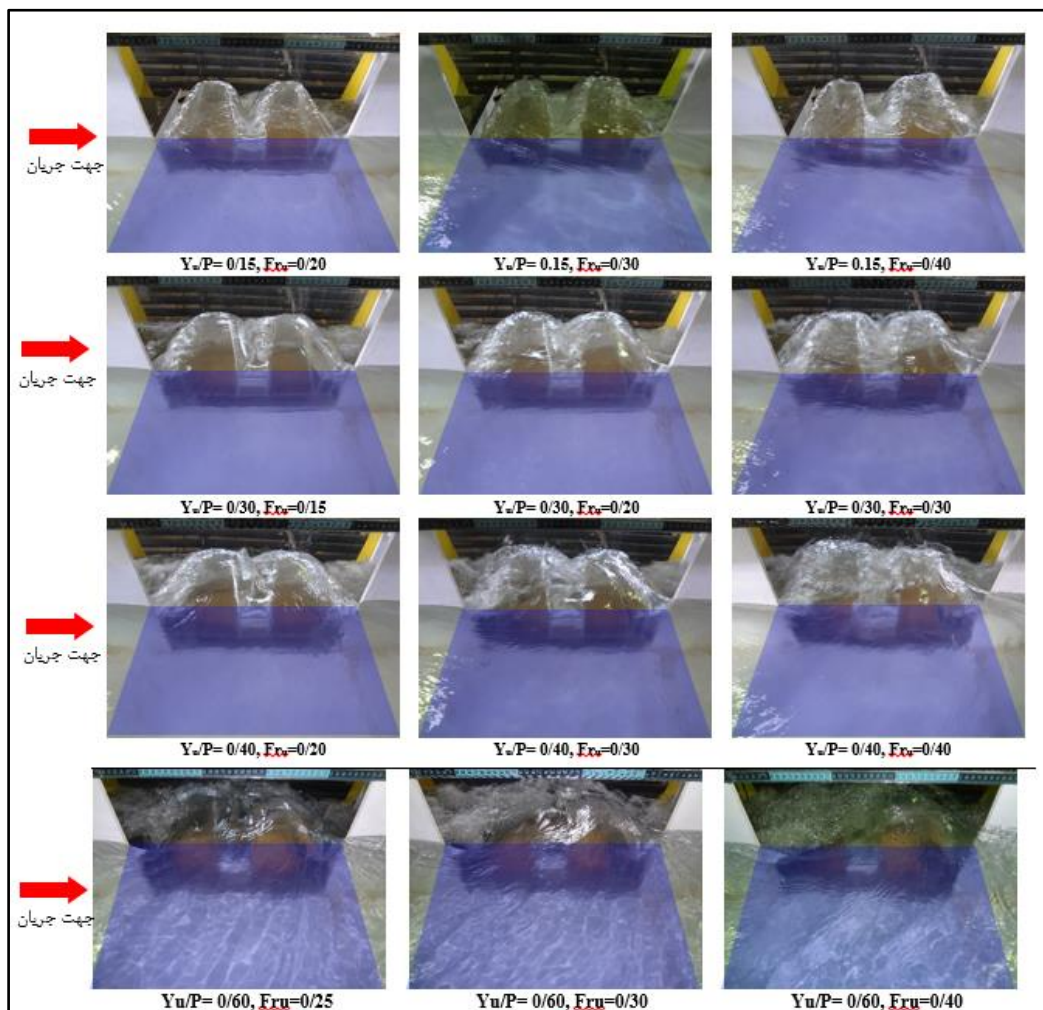


## نتایج و بحث

### بررسی رژیم جریان در مدل‌های آزمایشگاهی

تاج سرریز در تخلیه جریان خواهد انجامید. از این رو، برای دریافت بهتر از این عملکرد با سرریزهای خطی که انواع جت‌های جریان عبوری از آن اتفاق نمی‌افتد، مقایسه نسبت دبی عبوری از سرریز خطی سرریز کلیدپیانویی با دبی عبوری از سرریز خطی می‌تواند تاثیر وجود انواع جت‌های جریان روی تاج سرریز را بیشتر نمایان کند. به همین منظور پس از تجزیه و تحلیل پروفیل‌های جریان در بخش بررسی ظرفیت تخلیه مدل‌های آزمایشگاهی، این مقایسه صورت گرفته است که با نتایج حاصل از آن می‌توان به توجیه عملکرد تاج سرریز کلیدپیانویی پی برد.

شکل شماره ۳ انواع جت‌های جریان و ورتکس‌های ایجاد شده روی مدل TPKSWp20 در نسبت‌های  $Y_u/P=0/15, 0/40, 0/60$  و در محدوده اعداد فرود پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. در سرریزهای کلیدپیانویی جانبی و به‌طور کلی سرریزهای جانبی با توجه به غیریکنواختی پروفیل‌های سرعت و عمق آب روی تاج این سرریزها، انواع جت‌های جریان اعم از فشرده، چسبیده و پرشی روی تاج سرریز قابل مشاهده است و همین موضوع به کاهش یا افزایش عملکرد طول

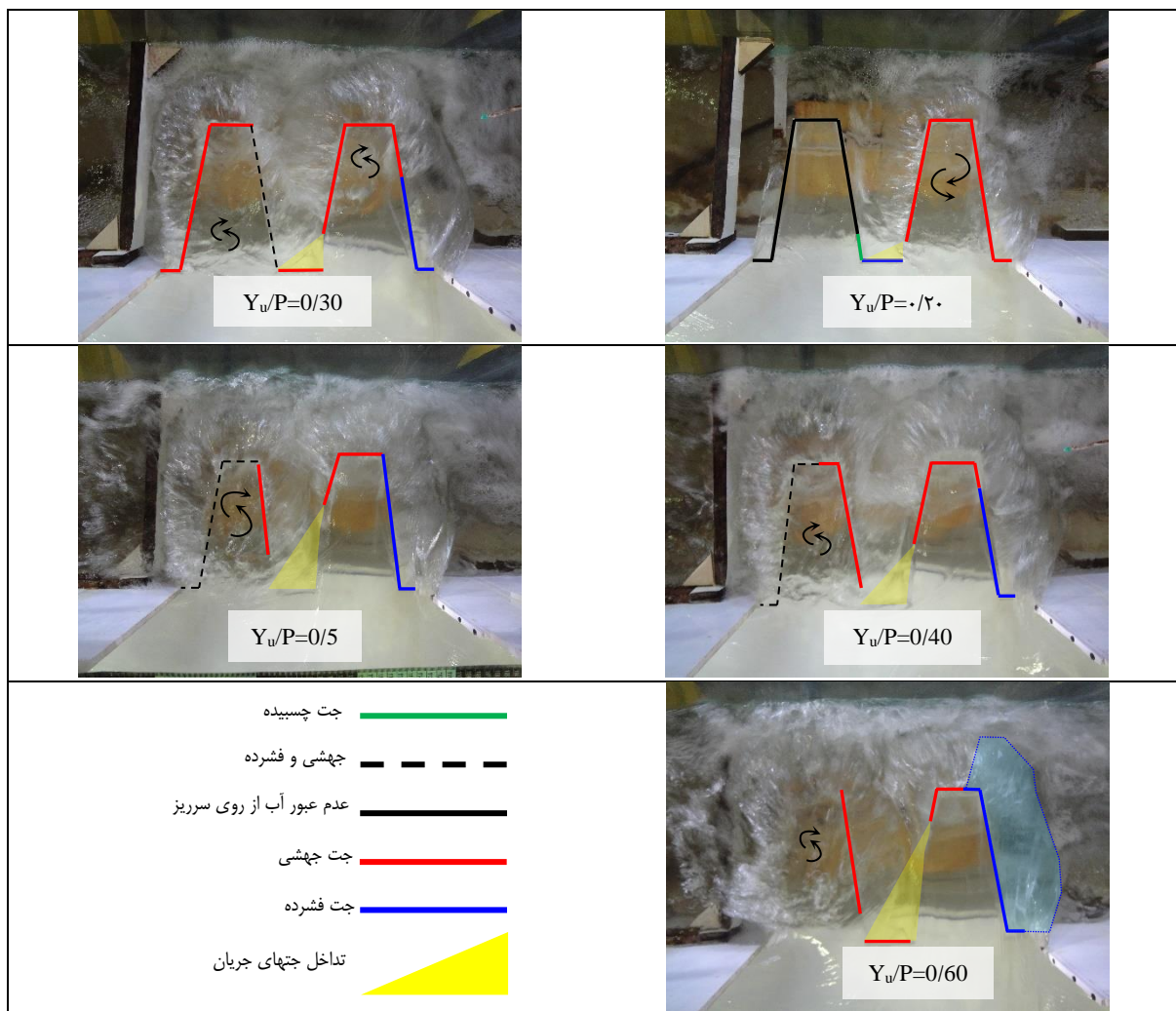


شکل ۳- الگوی جریان روی مدل TPKSWp20 در نسبت‌های  $Y_u/P=0/15, 0/30, 0/40, 0/60$

Fig. 3- Flow regime on the TPKSWp20 for  $Y_u/P= 0/15, 0/30, 0/40, 0/60$

سرریز را تا قبل از استغراق کامل افزایش می‌دهد. افزایش نسبت عمق آب به ارتفاع سرریز در تمام مدل‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر باعث می‌شود تا اولاً جت چسبیده در سیکل اول از بین برود و رشد جت جهشی و فشرده یعنی وجود فشار هوا در زیر تاج سرریز بیشتر شود و ثانیاً نوسان‌های جت خروجی از سرریز نیز کاهش یابد. البته این موضوع با کاهش عدد فرود به ازای نسبتی ثابت از عمق آب به ارتفاع سرریز نیز رخ می‌دهد. برای نمونه، در مدل TPKSWp15 (شکل ۴) این اتفاقات به شکل کشیده شده‌اند.

تشکیل و شدت ورتکس‌ها در دهانه کلیدهای ورودی سرریز، که با افزایش عدد فرود بالادست و نسبت عمق آب به ارتفاع سرریز مشاهده می‌شود، از عواملی هستند که به‌طور کلی در تمام سرریزهای جانبی از جمله سرریزهای کلیدپیانویی باعث اختلال در مکش آب توسط سرریز می‌شوند. نوسان‌های جت خروجی روی تاج سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در نسبت‌های  $Y_u/P > 0/25$  و تا قبل از استغراق کامل سرریز کاهش می‌یابد. این موضوع ناشی از افزایش سطح آب در انتهای پایین‌دست سرریز است که بر ورتکس‌های ایجاد شده غلبه می‌کند و عملکرد



شکل ۴- انواع جت‌های جریان روی مدل TPKSWp15  
 Fig. 4- The blades flow on the TPKSWp15 model.

## تأثیر مقیاس

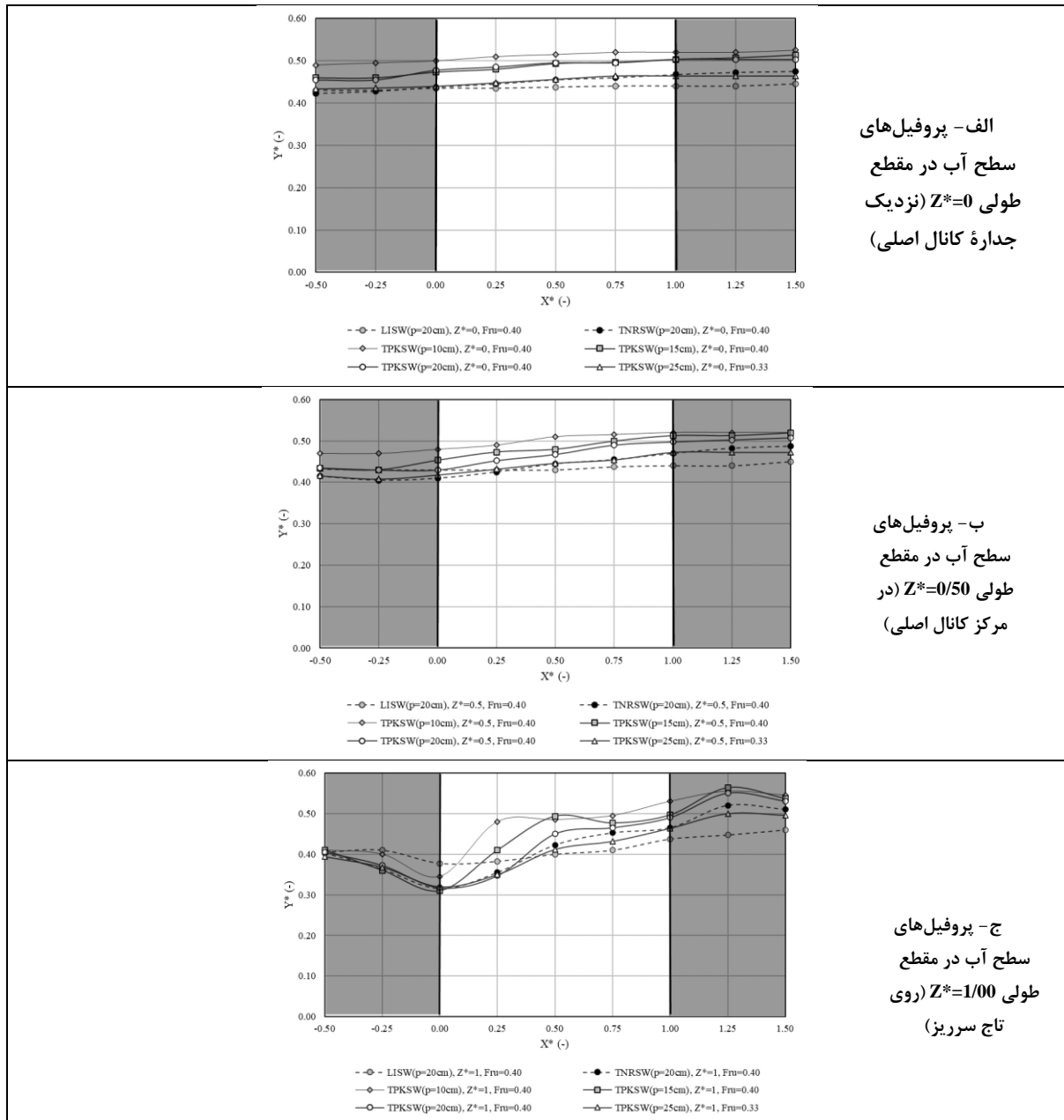
جریان در رودخانه‌ها و مجاری باز در اصل تحت تاثیر نیروی ثقل است. برای حصول اطمینان از کاربردی بودن نتایج این تحقیق در اصل، شرایط جریان در مدل آزمایشگاهی باید طوری باشد که نیروهای لزوجت و کشش سطحی تاثیر کمتری بر شرایط جریان نداشته باشند یا به عبارتی اثر مقیاس ناچیز باشد. بر اساس یافته‌های تالیس (Tullis, 2018)، در صورتی که مقدار  $H/p > 0.11$  و حداقل عمق روی سرریز بیشتر از ۱۶ میلی‌متر باشد، می‌توان از تاثیر مقیاس چشم‌پوشید. توصیه نواک و کابلکا (Novák & Čabelka, 1981) و اریکام و همکاران (Erpicum et al., 2016) نیز برای ناچیز بودن اثر مقیاس در سرریزها داشتن حداقل عمق بالای سرریز برابر ۳۰ میلی‌متر است. در این تحقیق عمق جریان در کانال طوری تنظیم می‌شد تا مقدار عمق بالای سرریز بیش از ۳۰ میلی‌متر باشد.

## بررسی پروفیل‌های سطح آب

تنظیم سطح آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به منظور عدم اخلال در عملکرد آبیگرها مهم است. همچنین، با توجه به ایجاد پروفیل سطح آب در انتهای بالادست آبیگر و فشار وارد بر بدنه سرریزهای کلیدپیانویی، به‌ویژه تاج جانبی و شیروانی‌های ورودی و خروجی، مهندسان طراح باید به ضخامت تاج و مصالح به‌کار رفته در ساخت چنین سرریزهایی دقت بسیار زیادی داشته باشند. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی تاثیر ارتفاع سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای بر پروفیل سطح آب با توجه به پیچیدگی الگوی جریان و تاثیر همزمان پارامترهای هندسی و هیدرولیکی سرریز و تحلیل بهتر این پارامترها بر پروفیل سطح آب، از دو تیپ نمودار استفاده شده است. با کنترل سطح آب در پایین‌دست سرریزهای جانبی توسط دریچه کنترل و تنظیم دبی ورودی به کانال اصلی می‌توان سرریزهای جانبی را با اعداد

فرود مختلف و نسبت‌های بدون بعد عمق بالادست به ارتفاع سرریز آزمایش کرد. در تیپ اول، به منظور بررسی جداگانه اثر ارتفاع سرریز بر پروفیل‌های سطح آب، صرف‌نظر از عدد فرود بالادست ( $Fr_u$ ) و نسبت عمق آب در بالادست سرریز به ارتفاع سرریز ( $Y_u/P$ )، برای کلیه مدل‌های آزمایشگاهی پروفیل‌های سطح آب در یک عدد فرود بالادست و نسبت عمق جریان به ارتفاع سرریز رسم شدند. شکل ۵ پروفیل‌های بدون بعد سطح آب را برای تمام مدل‌های آزمایشگاهی در عدد فرود بالادست ۰/۴۰ و در نسبت بدون بعد عمق به ارتفاع سرریز ۰/۴۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، سطح آب در مقطع طولی  $Z^*=1$  (روی تاج سرریز) و در انتهای بالادست به دلیل افزایش شتاب طولی جریان و متأثر شدن از مکش جریان توسط سرریز در این محدوده در تمام مدل‌های آزمایشگاهی کاهش می‌یابد. این کاهش سطح آب برای مدل‌های TPKSWp15,20,25 و مدل TNRSW تقریباً یکسان و برابر ۲۵ درصد است. همچنین، کمترین کاهش مربوط به مدل Lisw و برابر ۵۰٪ است (مقایسه پروفیل‌های شکل ۵-ج در  $X^*$ های ۰/۵۰ و ۰). مشاهده دقیق‌تر پروفیل‌های سطح آب در شکل ۵-ج این نتایج را به‌دنبال دارد که اولاً به‌جز مدل Lisw برای سایر مدل‌های آزمایشگاهی پروفیل سطح آب تا انتهای پایین‌دست سرریز روندی افزایشی دارد. این افزایش ناشی از کاهش دبی در کانال اصلی و در طول سرریز به دلیل ماهیت جریان متغیر مکانی و منحنی انرژی ویژه جریان است. ثانیاً برای مدل‌های TNRSW، TPKSWp25 و Lisw و تاحدودی مدل TPKSWp20 در مرکز سرریز ( $X^*=0/50$ ) سطح آب به حالت اولیه خود یعنی نسبت  $Y_u/P=0/40$  باز می‌گردد. این نکته احتمال تشکیل مقطع کنترل را در این محدوده متصور می‌سازد که البته آزمایش‌های بیشتری برای

بررسی این موضوع نیاز خواهد بود. ثالثاً عمق آب در انتهای پایین دست سرریز برای تمام مدل‌ها نسبت به انتهای بالادست بیشتر است. شایان ذکر است که افزایش بیش از حد عمق آب در مدل‌های TPKSWp15 و TPKSWp10 در عدد فرود و نسبت  $Y_u/P$  مورد آزمایش نسبت به سایر مدل‌ها ناشی از تشکیل پرش هیدرولیکی در انتهای پایین دست سرریز و تشکیل ورتکس‌های در انتهای سیکل دوم است که جریان را برای عبور از سرریز و غلبه بر این ورتکس‌ها مجبور به افزایش سطح آب می‌کند.



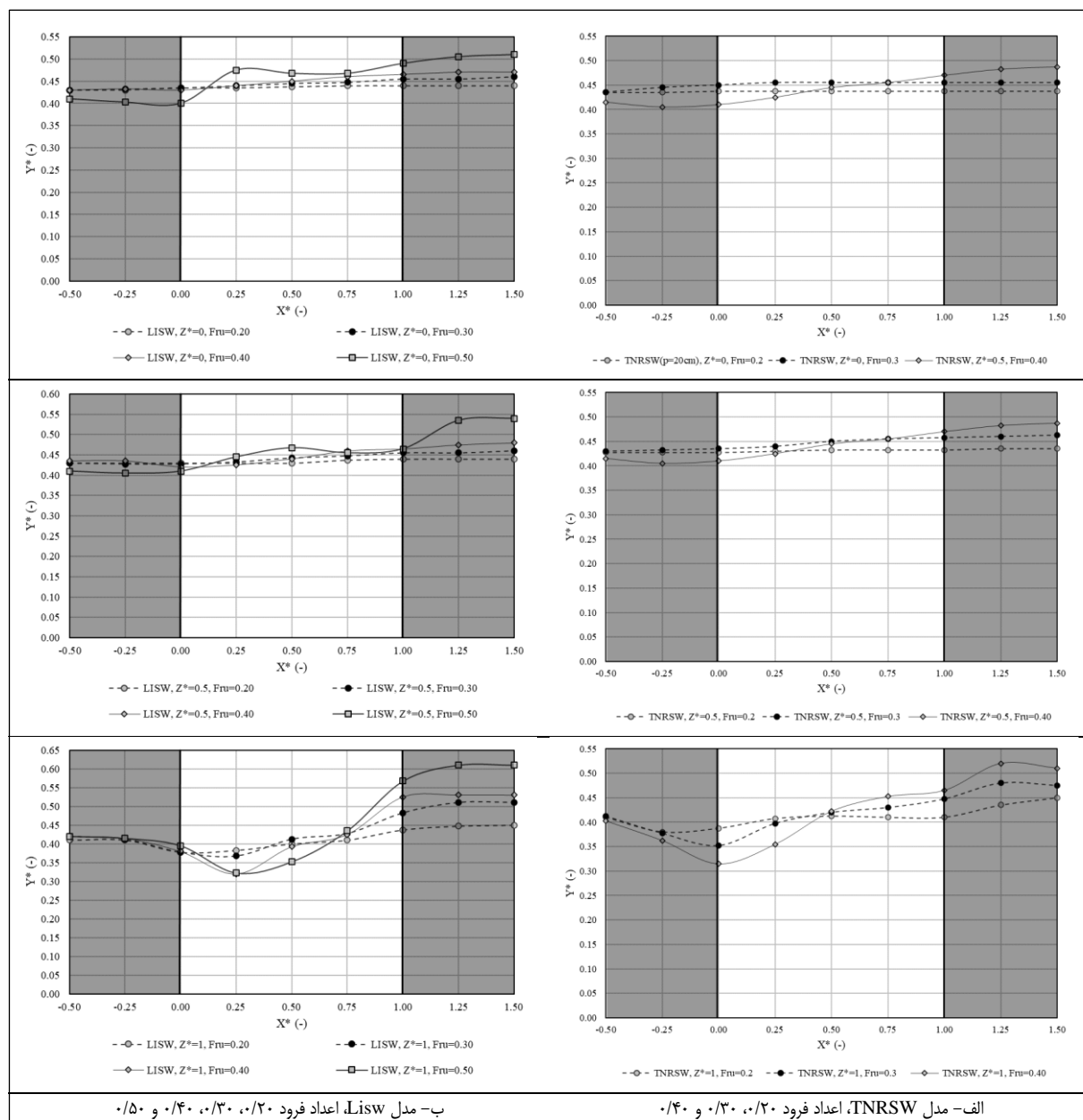
شکل ۵- پروفیل‌های سطح آب برای همه مدل‌های آزمایشگاهی در  $Y_u/P=0/40$  و  $Fr_u=0/40$  و در  $Z^*$  های  $0$ ،  $0/50$  و  $1$  برای مدل آزمایشگاهی TPKSWp25 عدد فرود بالادست  $0/33$  است.

Fig. 5- Water surface profiles for all experimental models in  $Y_u/P=0/40$  and  $Fr_u=0/40$  and in  $Z^*=0, 0/50, 1$  \*\* Froude Number for TPKSWp25 is  $0/33$

تیپ دوم پروفیل‌های سطح آب، بررسی افزایش عدد فرود در یک نسبت ثابت  $Y_1/P$  را برای مدل‌های آزمایشگاهی دنبال می‌کند.

تصویرهای ۶، ۷ و ۸ به ترتیب پروفیل‌های سطح آب را برای مدل‌های Lisw و TNRSW، TPkSW10 و TPkSW15، و نیز TPkSW20 و TPkSW25 در اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد.

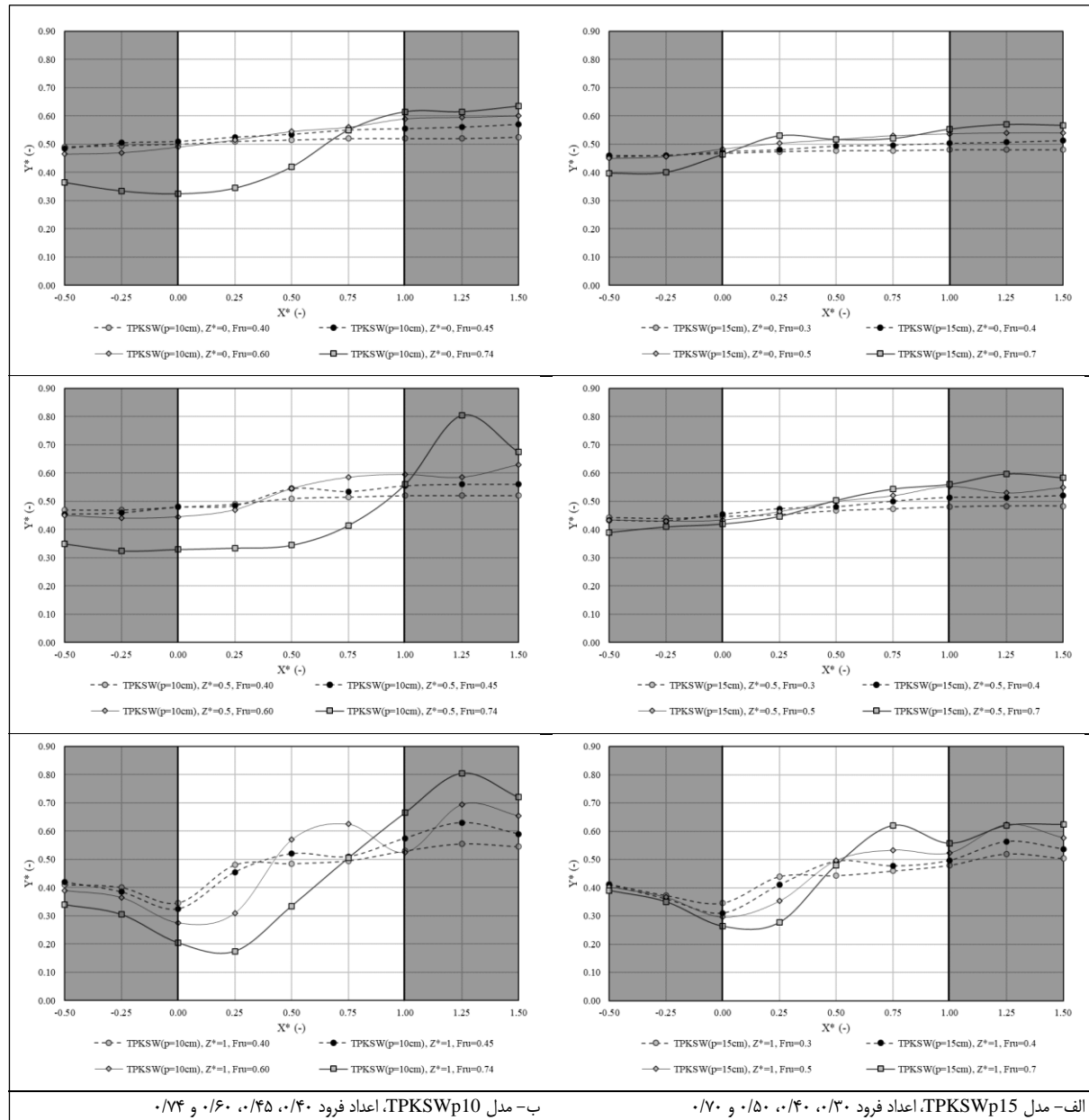
مقایسه تصویرهای ۵ الف و ۵ ب نشان می‌دهد که سطح آب در  $Z^*=0$  و  $0.5$  نسبت به  $Z^*=1$  بالاتر است یا به عبارتی دیگر عمق آب با نزدیک شدن به تاج سرریز ( $Z^*=1/00$ ) کاهش می‌یابد. می‌توان به این مورد نیز اشاره کرد که پروفیل سطح آب در  $Z^*=0$  و  $0.5$  برای مدل‌های TPkSW25، TNRSW تقریباً روندی مشابه و در  $Z^*=0$  مدل‌های TPkSW20 و Lisw چنین روند مشابهی دارند.



شکل ۶- پروفیل‌های سطح آب برای مدل‌های TNRSW و Lisw در اعداد فرود مختلف و در  $Z^*$  و  $X^*$ های مختلف  
 Fig. 6- Water surface profiles for TNRSW and Lisw Models in All Froude Number,  $X^*$  and  $Z^*$

خواهد داشت و در مقطع  $X^*=0/50$  (در انتهای سیکل اول از بالادست یعنی در مرکز سرریز) نیز برای تمام اعداد فرود بررسی شده در این پژوهش سطح آب تقریباً یکسان است.

همانطور که در شکل ۶ (الف و ب) مشخص است، برای مدل‌های TNRSW و Lisw در مقاطع  $Z^*=1$  (نزدیک تاج سرریز) افزایش عدد فرود، کاهش سطح آب بیشتری را در انتهای بالادست به دنبال



شکل ۷- پروفیل‌های سطح آب برای مدل‌های TPKSWp10 و TPKSWp15 در اعداد فرود مختلف و در  $Z^*$  و  $X^*$ های مختلف  
 Fig. 7- Water surface profiles for TPKSWp10 and TPKSWp15 Models in All Froude Number,  $X^*$  and  $Z^*$

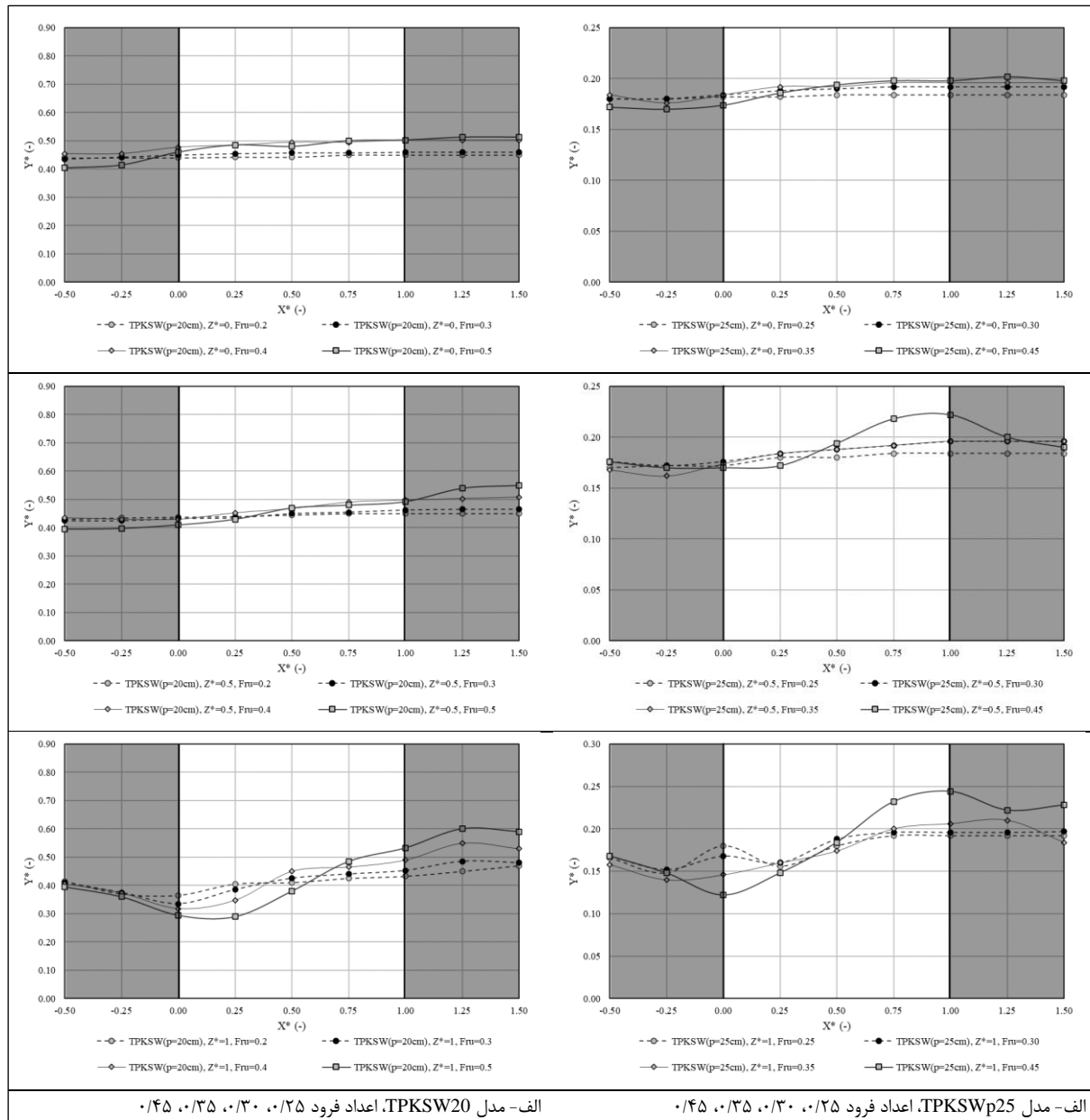
بالادست و پایین‌دست مدل TPKSWp10 که با افزایش عدد فرود و در مقطع  $Z^*=1$  (نزدیک تاج سرریز) مشهود است، به دلیل وجود ورتکس‌هایی

نمودارهای شکل ۷ پروفیل‌های سطح آب را در مدل‌های TPKSWp10 و TPKSWp15 نشان می‌دهد. اختلاف بیش از حد اعماق آب در انتهای

بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع سرریز جانبی کلید پیاپویی ذوزنقه‌ای...

از ۰/۴۵ و در مدل TPkSWp15 در اعداد فرود کمتر از ۰/۷۰ از  $X^*$ های ۰/۲۵ تا ۱/۵۰ سطح آب نوسان‌های چندانی ندارد. در شکل ۸، پروفیل‌های سطح آب در مدل‌های TPkSWp20 و TPkSWp25 رسم شده‌اند.

شدید در دهانه ورودی کلید ورودی، منجر به کاهش عملکرد سیکل اول سرریز شده است. مقایسه شکل ۷ (الف و ب) نشان می‌دهد که سطح آب با نزدیک شدن به تاج سرریز کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت که در مدل TPkSWp10 در اعداد فرود کمتر



شکل ۸- پروفیل‌های سطح آب برای مدل‌های TPkSWp20 و TPkSWp25 در اعداد فرود مختلف و در  $Z^*$  و  $X^*$ های مختلف  
 Fig. 8- Water surface profiles for TPkSWp20 and TPkSWp25 Models in All Froude Number,  $X^*$  and  $Z^*$

ناشی از ماهیت جریان متغیر مکانی است. با مقایسهٔ پروفیل‌های جریان در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که افزایش ارتفاع سرریز منجر به یکنواختی پروفیل‌های سطح آب و کنترل بهتر سطح آب در انتهای بالادست و پایین دست سرریز خواهد شد و استفاده از این سرریزها را در محل‌هایی که محدودیت ارتفاع در ساحل رودخانه یا در کانال‌های مصنوعی و نیز محدودیت بودجه عمرانی وجود ندارد، به لحاظ فنی توجیه پذیرتر می‌کند. جدول ۲ بخشی از داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

کاهش سطح آب در انتهای بالادست سرریز در مدل TPKSWp20 یکنواختی بیشتری دارد، بدین معنی که نسبت کاهش سطح آب در انتهای بالادست با افزایش عدد فرود تقریباً به یک میزان است. علاوه بر آن، برای تمام مدل‌های آزمایشگاهی با نزدیک شدن به تاج سرریز ( $Z^*=1$ ) عمق جریان کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش مولفهٔ عرضی سرعت و کاهش مولفه‌های عمقی و طولی سرعت در نزدیکی تاج سرریز است. افزایش عمق جریان در انتهای پایین دست سرریز در تمام مدل‌های آزمایشگاهی نیز به دلیل کاهش دبی در این مقطع

جدول ۲- بخشی از داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر

Table 2- Some of the experimental data in this research

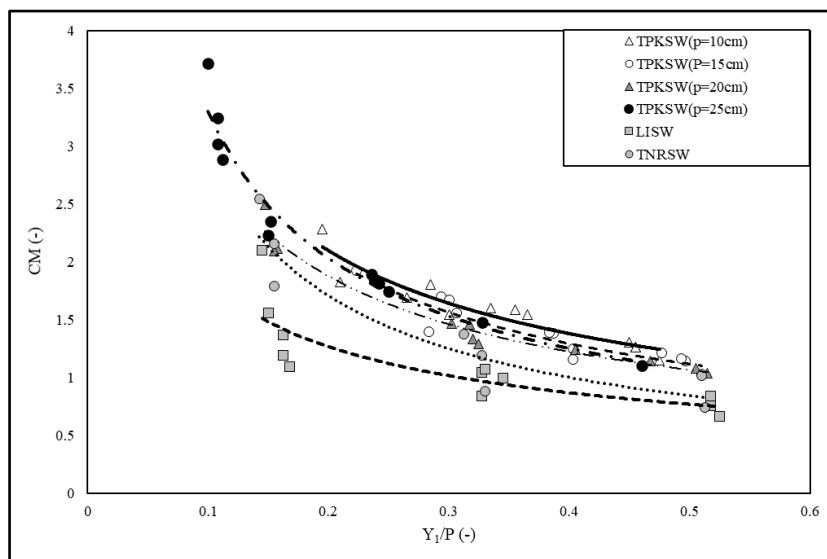
مدل	عمق بالادست سرریز $Y_1$ (mm)	عمق پایین دست سرریز $Y_2$ (mm)	انرژی ویژه انتهای بالادست سرریز $E_1$ (m)	انرژی ویژه انتهای پایین دست سرریز $E_2$ (m)	عدد فرود انتهای بالادست $F_{r1}$ (-)	عدد فرود انتهای پایین دست $F_{r2}$ (-)	دبی خروجی از سرریز $Q_s$ (lit/s)	ظرفیت تخلیه $\epsilon$ (-)	ضریب دبی $C_d$ (-)
TPKSW p10	2.10	3/55	0/13	0/14	0/47	0/46	5/23	0/21	1/83
	3/00	4/55	0/14	0/15	0/42	0/42	10/88	0/44	1/54
	1/95	4/15	0/14	0/15	0/56	0/57	7/92	0/26	2/28
	4/55	6/70	0/16	0/17	0/40	0/42	18/13	0/60	1/26
	3/35	6/80	0/16	0/17	0/59	0/64	15/91	0/40	1/60
	4/50	7/40	0/17	0/18	0/54	0/56	20/42	0/51	1/30
4/55	8/95	0/18	0/20	0/70	0/61	21/09	0/42	1/26	
TPKSW p15	4/60	6/80	0/21	0/22	0/36	0/15	20/75	0/52	1/55
	6/05	7/70	0/22	0/23	0/32	0/09	27/71	0/69	1/25
	7/65	8/85	0/24	0/24	0/29	0/05	32/50	0/81	1/03
	5/80	8/75	0/23	0/24	0/41	0/15	27/35	0/55	1/38
	7/45	10/10	0/24	0/25	0/37	0/10	34/40	0/69	1/14
	6/05	8/30	0/24	0/24	0/48	0/22	28/07	0/47	1/16
5/75	10/70	0/25	0/27	0/57	0/27	29/16	0/39	1/39	
7/15	11/80	0/26	0/27	0/52	0/22	35/55	0/47	1/22	
TPKSW p20	6/40	8/00	0/27	0/28	0/23	0/05	30/63	0/77	1/34
	2/95	4/70	0/24	0/25	0/35	0/24	12/89	0/26	2/50
	6/05	8/25	0/27	0/28	0/10	0/29	29/89	0/60	1/47
	3/15	4/90	0/25	0/26	0/42	0/29	13/19	0/22	2/11
	6/35	9/60	0/28	0/30	0/40	0/19	30/63	0/44	1/46
	10/30	13/25	0/32	0/33	0/33	0/08	49/70	0/71	1/04
TPKSW p25	10/10	13/75	0/32	0/34	0/38	0/12	50/13	0/63	1/08
	2/70	4/10	0/29	0/30	0/27	0/17	14/99	0/30	3/24
	6/05	9/80	0/32	0/35	0/27	0/11	31/00	0/52	1/81
	6/00	9/60	0/33	0/35	0/32	0/15	30/26	0/43	1/83
	11/50	24/00	0/38	0/49	0/25	0/04	53/97	0/77	1/10
	5/90	10/00	0/33	0/36	0/39	0/21	28/43	0/33	1/89
TNRSW	3/80	6/50	0/32	0/33	0/45	0/32	18/45	0/21	2/35
	3/10	4/15	0/24	0/24	0/21	0/13	9/77	0/33	1/79
	6/60	7/70	0/27	0/28	0/17	0/05	19/76	0/66	0/88
	10/25	11/70	0/31	0/32	0/23	0/07	34/02	0/68	0/74
	6/55	8/60	0/28	0/29	0/28	0/12	25/92	0/52	1/20
	6/25	9/40	0/28	0/30	0/41	0/22	25/92	0/37	1/38
Lisw	10/20	13/35	0/32	0/33	0/33	0/09	47/19	0/67	1/02
	6/55	8/65	0/28	0/29	0/32	0/19	20/09	0/35	1/05
	2/90	4/65	0/25	0/26	0/43	0/34	5/93	0/10	2/10
	10/35	12/95	0/32	0/33	0/33	0/16	32/12	0/46	0/75
	3/25	4/50	0/26	0/27	0/52	0/44	5/93	0/08	1/19
	6/60	9/50	0/29	0/31	0/43	0/28	17/49	0/23	1/07
6/90	10/35	0/31	0/32	0/53	0/36	17/49	0/18	1/00	



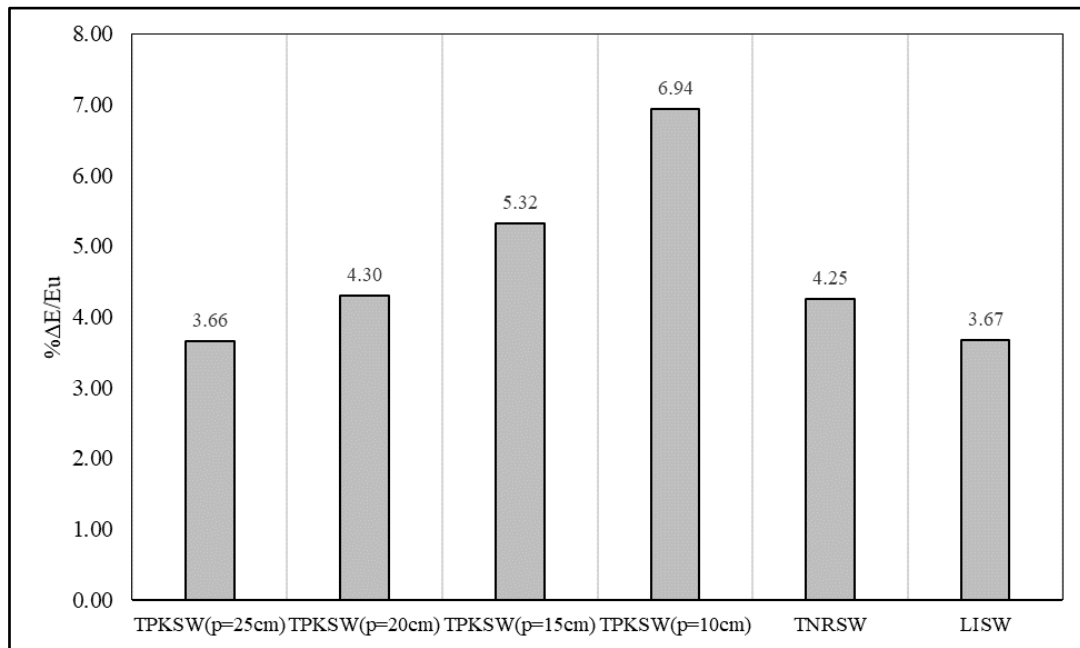
سرریزهای کلیدپیانویی دوزنقه‌ای دقت بیشتری شود و محدوده قابل استفاده برای ضریب دبی دی مارچی را یا کمتر از ۴ درصد در نظر گرفت یا در مقایسه مدل‌های مختلف محدوده  $\Delta E/E_1$  نزدیک به هم باشد تا خطای احتمالی ناشی از یکسان نبودن انرژی ویژه در انتهای بالادست و پایین‌دست سرریز به یک نسبت بین مدل‌ها باشد (کریمی و همکاران Karimi *et al.*, 2018). با توجه به توضیحات ارائه شده، از آنجا که نسبت خطای انرژی ویژه در مدل‌های TPkSWp20، TPkSWp25 و TNRSW، LISW به ترتیب برابر ۴/۳۰، ۳/۶۶، ۴/۲۵ و ۳/۶۷ درصد است مقایسه ضریب‌های دبی با احتیاط قابل پذیرش است؛ بدین شکل می‌توان گفت که اولاً روند کاهش ضریب دبی با افزایش نسبت  $Y_1/P$  به دلیل کاهش طول موثر تاج سرریز ناشی از افزایش تداخل تیغه‌های کلیدهای ورودی با تاج جانبی است. ثانیاً با افزایش ارتفاع سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای مولفه عرضی سرعت جریان در انتهای پایین‌دست سرریز نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر می‌شود که به افزایش دبی عبوری از سرریز مدل TPkSWp25 می‌انجامد.

### ضریب دبی سرریز و بررسی فرضیه دی مارچی

شکل ۷ ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از رابطه دی مارچی را در مقابل نسبت  $Y_1/P$  نشان می‌دهد. در این نمودار مشخص است که ضریب دبی مدل‌های TPkSWp15، TPkSWp10، TPkSWp20، TPkSWp25 و TNRSW از ضریب دبی مدل سرریز مستطیلی لبه‌تیز (مدل شاهد) بیشتر است. مقایسه نسبت انرژی ویژه بالادست و پایین‌دست سرریز (شکل ۹) نشان می‌دهد که ضریب دبی به‌دست آمده از رابطه دی‌مارچی با مبنای این فرضیه یعنی ثابت بودن انرژی ویژه در انتهای بالادست و پایین‌دست سرریز در تضاد است. تصاویر پدیده‌های هیدرولیکی مشاهده شده در مدل‌های TPkswp15 و TPkswp10 و بررسی پروفیل‌های سطح آب نیز این موضوع را تایید میکند. لذا در این پژوهش احتمالاً استفاده از رابطه دی مارچی برای به‌دست آوردن ضریب دبی را با خطایی جزئی مواجه می‌کند و نتایج درستی از این مقایسه به‌دست نخواهد آمد. از این رو پیشنهاد می‌شود که به‌صورت کلی در استفاده از فرضیه دی مارچی برای



شکل ۹- مقایسه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی در مقابل نسبت  $Y_1/P$   
 Fig. 9- Comparing  $C_m$  vs  $Y_1/P$  for Experimental models

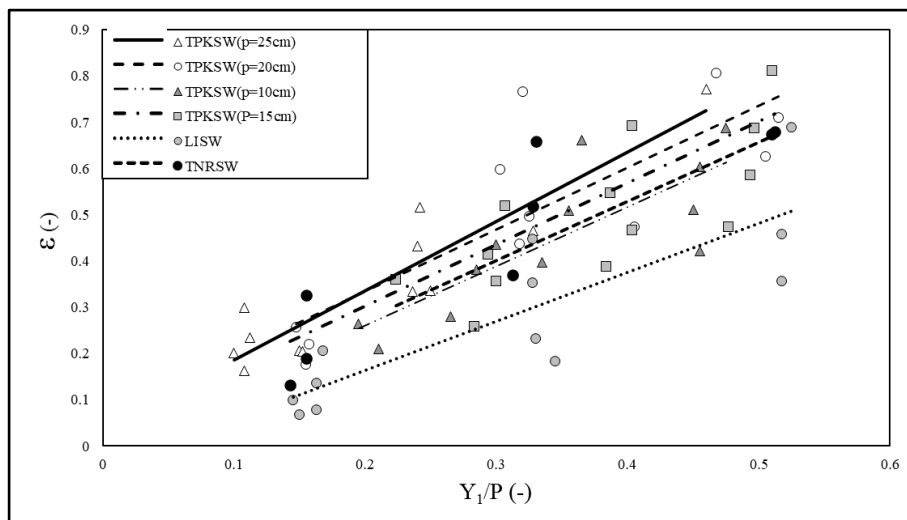


شکل ۱۰- مقایسهٔ اختلاف انرژی ویژه ( $\Delta E/E_1$ ) در مدل‌های آزمایشگاهی  
 Fig. 10- Comparing Specific Energy ( $\Delta E/E_1$ ) for All experimental Models

#### بررسی ظرفیت تخلیهٔ مدل‌های آزمایشگاهی

ظرفیت تخلیهٔ جریان مازاد توسط سرریزهای جانبی در هنگام استفاده به عنوان سرریز جانبی سدها اهمیت دارد. شکل ۱۱ ظرفیت تخلیهٔ جریان با افزایش عمق جریان در بالادست سرریز برای تمام مدل‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش بررسی پروفیل‌های سطح آب به یکنواختی عمق جریان با افزایش ارتفاع سرریز اشاره شد و همچنین در شکل ۳ رژیم جریان در مدل‌های

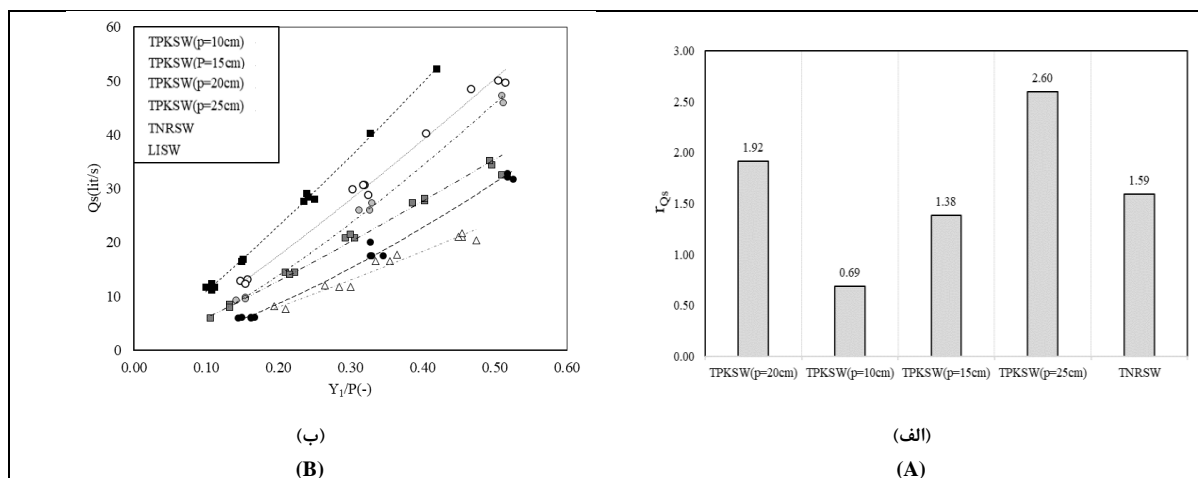
آزمایشگاهی بیان شد، در شکل ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که ظرفیت تخلیهٔ مدل TPKSWp25 نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. شکل ۱۱ می‌تواند در انتخاب ارتفاع سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در هنگام طراحی در محل‌هایی که طراح با محدودیت ارتفاع سد و عمق آب روی آن مواجه هست، دستیار طراح باشد و با انتخاب نسبت  $Y_1/P$  ظرفیت تخلیهٔ سرریزها را مقایسه و بهترین سرریز را که از لحاظ هیدرولیکی و اقتصادی بهینه باشد انتخاب کند.



شکل ۱۱- بررسی ظرفیت تخلیه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی

Fig. 11- Comparing of the Discharge Capacity of Experimental models

شکل ۱۲- الف منحنی دبی اشل مدل‌های آزمایشگاهی و ۱۲- ب مقایسه متوسط دبی‌های عبوری از مدل‌های آزمایشگاهی را نسبت به مدل شاهد نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، به ازای تمام نسبت‌های بدون بعد  $Y_1/P$ ، دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای (TNRSW)، از دبی عبوری از مدل شاهد (LISW) بیشتر است. دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر (TPKSWp20) از دبی عبوری از مدل سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای TNRSW بیشتر است. شایان ذکر است که در تمام نسبت‌های بدون بعد  $Y_1/P$ ، دبی عبوری از سرریز کلیدپیانویی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از دبی عبوری از تمام مدل‌ها کمتر است. این میزان حتی در مقایسه با مدل شاهد نیز ۳۰ درصد کمتر است. سرعت بالای جریان در کانال اصلی و ناممکن بودن تخلیه جریان حتی از سیکل پایین‌دست، که بیشترین نقش را در تخلیه‌ی جریان سرریزهای جانبی دارد، در مدل TPKSWp10 منجر به کاهش طول موثر تاج سرریز در تخلیه‌ی جریان می‌شود و دلیل عمده این اختلاف است. همان‌طور که در شکل ۱۲- ب مشخص است دبی عبوری از مدل TPKSWp25 از سایر مدل‌ها بیشتر است. مقایسه متوسط دبی عبوری از سرریزها در نسبت‌های  $Y_1/P$  و محدوده اعداد فرود پژوهش حاضر نشان می‌دهد که متوسط دبی‌های عبوری از مدل‌های TPKSWp25، TPKSWp20، TNRSW و TPKSWp15 به ترتیب ۲/۶۰، ۱/۹۲، ۱/۵۹ و ۱/۳۸ برابر بیشتر از متوسط دبی‌های عبوری از مدل شاهد است.

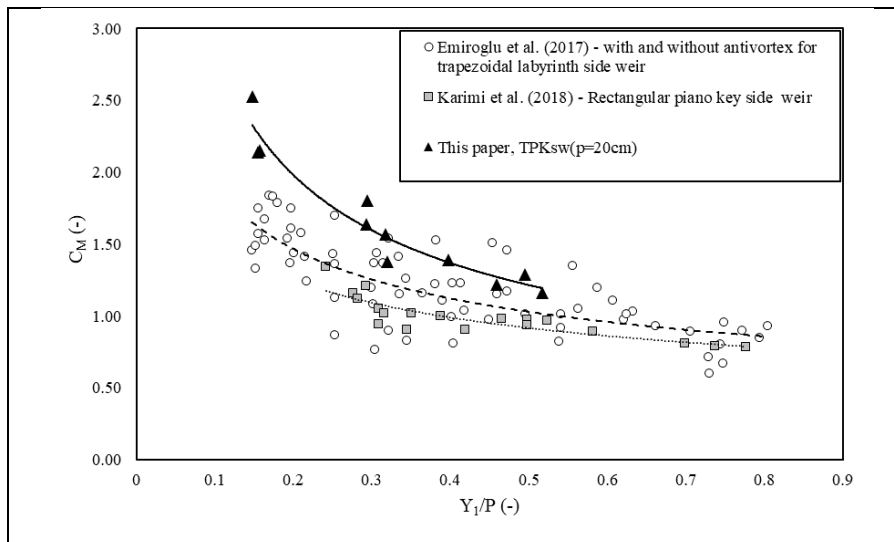


شکل ۱۲- الف) منحنی‌های دبی-اِشل، ب) مقایسه متوسط دبی‌های عبوری از مدل‌های آزمایشگاهی نسبت به مدل شاهد  
 Fig. 12- A) The head-discharge, and B) Comparison of average discharges of the experimental models compared to the control model (Lisw).

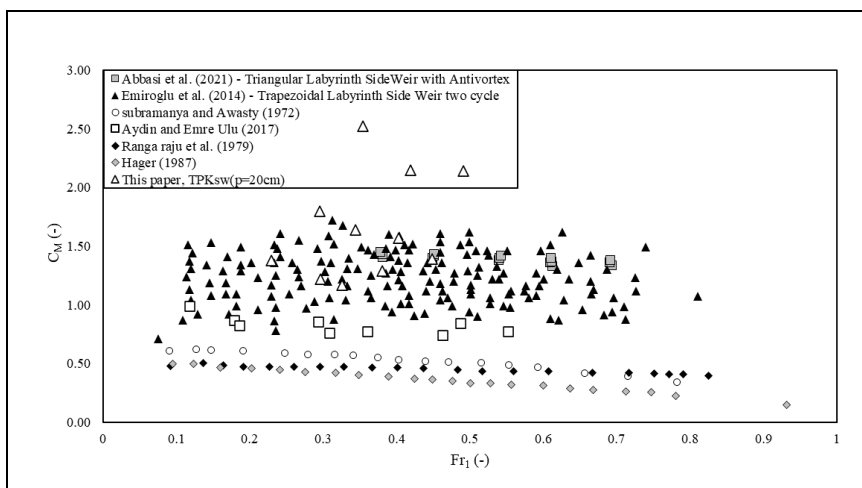
### مقایسه با نتایج تحقیقات دیگر محققان

کلیدپیانویی مستطیلی. شکل ۱۴ نیز نتایج حاصل از تمام مدل‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر را با سایر پژوهش‌های صورت گرفته در مقادیر  $C_M$  نسبت به  $Fr_1$  مقایسه می‌کند. عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2020) از سازه‌های آنتی ورتکس نفوذپذیر و غیر نفوذپذیر برای افزایش ضریب دبی جریان در سرریزهای زیگزاگی مثلثی استفاده کردند. با مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از این پژوهش‌های دیگر محققان می‌توان دریافت که عملکرد سرریزهای جانبی کلیدپیانویی دوزنقه‌ای نسبت به دیگر سرریزهای جانبی و دیگر راهکارهایی که به منظور افزایش ضریب دبی سرریز پیشنهاد شده‌اند بیشتر است.

شکل ۱۳ مقایسه نتایج مدل TPKsw(P=20cm) در تحقیق حاضر را با نتایج تحقیقات دیگر محققان در مقادیر  $C_M$  نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌های امین امیروقلو و همکاران (Emin Emiroglu *et al.*, 2017)، از سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای با سازه آنتی‌ورتکس و بودن آن و در مقادیر  $L/B = 1$  مشابه تحقیق حاضر و آزمایش‌های کریمی و همکاران (Karimi *et al.*, 2018) نیز روی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی است. همانطور که در شکل شماره ۱۳ مشخص است ضریب دبی سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای (مدل TPKsw(P=20cm) در تحقیق حاضر) در تمام نسبت‌های  $Y1/P$  در حدود ۱ تا ۲/۵۰ برابر بیشتر است تا در سرریز جانبی



تصویر ۱۳- مقایسه ضریب دبی مدل TPKsw(p=20cm) در پژوهش حاضر با سایر محققین در نسبت  $Y_1/P$  و هندسه یکسان  
**Fig. 13- Comparison of The TPKsw(p=20cm) model in the present study with another researchers in CM values**



تصویر ۱۴- مقایسه ضریب دبی بدست آمده در مدل TPKsw(p=20) پژوهش حاضر با سایر محققین در اعداد Fr مشابه  
**Fig. 14- Comparison of obtained CM in the present study with another researchers**

### نتیجه‌گیری

دوزنقه‌های زیگزاگی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر (TNRSW) و یک مدل سرریز لبه تیز مستطیلی با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر (Lisw) (به عنوان مدل شاهد). تمام آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود جریان زیر بحرانی و به دور از تاثیر کشش سطحی اجرا شد. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها می‌توان گفت:

- ظرفیت تخلیه مدل TPKSWp25 از ظرفیت

پژوهش حاضر به منظور بررسی تاثیر ارتفاع بر ضریب دبی و پروفیل‌های سطح آب سرریز جانبی کلید پیانویی دوزنقه‌ای پایه‌ریزی شد. در این راستا شش مدل آزمایشگاهی ساخته شد چهار مدل سرریز کلید پیانویی با ارتفاع ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر (TPKSWp10، TPKSWp15، TPKSWp20 و TPKSWp25)، یک مدل سرریز

سرریز) و در انتهای بالادست، به دلیل افزایش شتاب طولی جریان و متأثر شدن از مکش جریان توسط سرریز در این محدوده، در تمام مدل‌های آزمایشگاهی کاهش می‌یابد. این کاهش سطح آب برای مدل‌های TPkSWp15,20,25 و مدل TNRSW تقریباً یکسان و برابر ۲۵ درصد است. کمترین کاهش نیز مربوط به مدل Lisw و برابر ۰.۵۰ درصد است.

• برای مدل‌های TPkSWp25، TNRSW، Lisw و تاحدودی مدل TPkSWp20 در مرکز سرریز ( $X^*=0/50$  و  $Z^*=1/00$ ) سطح آب به حالت اولیه خود باز می‌گردد. این نکته احتمال تشکیل مقطع کنترل را در این محدوده متصور می‌سازد.

• ضریب دبی به‌دست آمده از رابطه دی‌مارچی در کنار نتایج حاصل از بررسی ظرفیت انتقال و منحنی‌های دبی-اشل مدل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقایسه (و نه برآورد) ضریب دبی رابطه دی‌مارچی برای سرریزهای کلیدپیانویی ذوزنقه‌ای باید با احتیاط صورت گیرد.

• در مدل‌های TPkSWp10 و TPkSWp15 و در محدوده اعداد فرود حدود  $0/65 < Fr_u < 0/75$  در انتهای پایین‌دست سرریز پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. با توجه به تخلیه دبی در سیکل بالادست سرریز (ماهیت جریان متغییر مکانی)، جریان برای اینکه به سطح انرژی ویژه خود برای عبور از کانال اصلی در پایین‌دست برسد، باید از حالت جریان متغیر مکانی (یا با حفظ این حالت) به جریان متغیر سریع (تشکیل پرش) تغییر ماهیت دهد. این موضوع به تحلیل‌های بیشتری نیاز دارد.

• ساخت مدل‌های سرریزهای کلیدپیانویی هزینه زیادی خواهد داشت، از این رو به منظور کاهش هزینه و نیز به منظور تحلیل بیشتر، بهتر و

تخلیه دیگر مدل‌های آزمایشگاهی بیشتر است. این موضوع ناشی از تداخل کمتر تیغه‌های جانبی با تیغه‌های خروجی از کلیدهای خروجی، تشکیل نشدن و ضعیف بودن ورتکس‌ها در دهانه کلیدهای ورودی و یکنواختی پروفیل‌های سطح آب روی تاج سرریز است.

• انواع جت‌های جریان اعم از چسبیده (در تماس با بدنه)، فشرده (فقط در تماس با پهنای تاج) و جهشی (ورود فشار هوا در زیر جت خروجی از تاج) روی تاج سرریزها مشاهده می‌شود. محل شکل‌گیری این جت‌ها به عدد فرود جریان بالادست و نسبت  $Y_u/P$  بستگی دارد، بگونه‌ای که در نسبت‌های  $Y_u/P < 0/25$  و در مدل‌های کلیدپیانویی، تاج کلید خروجی جت چسبیده و تاج سیکل پایین‌دست آن جت جهشی را تجربه می‌کند. در نسبت‌های  $0/25 < Y_u/P < 0/35$  روی تاج کلید خروجی در انتهای پایین‌دست سرریز و تاج جانبی سیکل دوم در پایین‌دست سرریز جت فشرده و در بقیه طول تاج سرریز جت جهشی مشاهده می‌شود.

• تداخل تیغه‌های جریان خروجی از کلید ورودی تا تاج جانبی سرریز، تشکیل ورتکس و شدت و ضعف آنها در دهانه کلیدهای ورودی، به‌ویژه در بالادست سرریز، یکی از دلایل اصلی کاهش دبی خروجی از سرریزهای جانبی است.

• مقایسه متوسط دبی عبوری از سرریزها در نسبت‌های  $Y_1/P$  و محدوده اعداد فرود نشان می‌دهد که متوسط دبی‌های عبوری از مدل‌های TPkSWp25، TPkSWp20، TNRSW و TPkSWp15 به ترتیب ۲/۶۰، ۱/۹۲، ۱/۵۹ و ۱/۳۸ برابر بیشتر است تا از مدل شاهد.

• سطح آب در مقطع طولی  $Z^*=1$  (روی تاج

بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع سرریز جانبی کلید پیانویی ذوزنقه‌ای...

سریع‌تر الگوی جریان و پارامترهای هندسی  
تاثیرگذار روی سرریز پیرامون این سرریزها  
پیشنهاد می‌شود تا از مدل‌های عددی و  
شبکه‌های عصبی نیز استفاده شود.

## تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت‌های مالی سازمان آب و برق خوزستان در قالب قرارداد شماره ۹۹-۲۲-۲۲-۰۰۸ تشکر و قدردانی می‌گردد.

## مراجع

- Abbasi, S., Fatemi, S., Ghaderi, A., & Di Francesco, S. (2020). The effect of geometric parameters of the antivortex on a triangular labyrinth side weir. *Water*, 13(1), 14.
- Ackers, P. (1957). A theoretical consideration of side-weirs as storm water overflows. *Proc. ICE*, 6(2), 250-269.
- Anderson, R. M., & Tullis, B. P. (2012). Comparison of piano key and rectangular labyrinth weir hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4), 358-361.
- Aydin, M. C. (2016). Investigation of a sill effect on rectangular side-weir flow by using CFD. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(2), 04015043.
- Aydin, M. C., & Ulu, A. E. (2017). Antivortex effects on two-cycle trapezoidal labyrinth side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(7), 06017004.
- Bagheri, S., & Heidarpour, M. (2012). Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(6), 541-547.
- Bagheri, N., Toranji, M.S., Eghbalzadeh, A. (2016). numerical Investigation of The Impact on The Flow Patterns in the Spillway Crest Elevation Hydraulic Jump Along the Side Weirs in Open Channel. *Specialized scientific quarterly journal of engineering and construction management*. 1(2) 6-10. (In Persian).
- Chow V.T. 1959 Open-channel hydraulic. McGraw-Hill. New York.
- Di Bacco, M., & Scorzini, A. R. (2019). Are We Correctly Using Discharge Coefficients for Side Weirs? Insights from a Numerical Investigation. *Water*, 11(12), 2585.
- Emiroglu, M. E., Kaya, N., & Agaccioglu, H. (2010). Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136(1), 37-46.
- Emiroglu, M. E., Gogus, M., Tunc, M., & Islamoglu, K. (2017). Effects of antivortex structures installed on trapezoidal labyrinth side weirs on discharge capacity and scouring. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(6), 04017006.
- Erpicum, S., Tullis, B. P., Lodomez, M., Archambeau, P., Dewals, B. J., & Piroton, M. (2016). Scale effects in physical piano key weirs models. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 692-698.
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Abbasi, S., & Abraham, J. (2020). Investigation of trapezoidal sharp-crested side weir discharge coefficients under subcritical flow regimes using CFD. *Applied Water Science*, 10(1), 1-12.
- Hager, W. H. (1987). Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4), 491-504.
- Karimi, M., Attari, J., Saneie, M., & Jalili Ghazizadeh, M. R. (2018). Side weir flow characteristics: comparison of piano key, labyrinth, and linear types. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018075.

- Maranzoni, A., Pilotti, M., & Tomirotti, M. (2017). Experimental and numerical analysis of side weir flows in a converging channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 04017009.
- Nezami, F., Farsadizadeh, D., Hoseinzadeh Dalir, A., Salmani F. (2013). Experimental Study of Discharge Coefficient of Trapezoidal Labyrinth Side-Weirs. *Journal of Water and soil sciences. 1 (23)*. (In Persian).
- Novák, P., & Čabelka, J. (1981). Models in hydraulic engineering: Physical principles and design applications. *Monographs & surveys in water resources engineering*.
- mohamadali pourahari, A., Jalili-Ghazizadeh, M., attari, J., karimi, M. (2021). A numerical study on the behavior of a supercritical flow over piano key side weirs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(11). (In Persian)
- Saghari, A., Saneie, M., & Hosseini, K. (2019). Experimental study of Various Types of Trapezoidal Piano Key Side Weirs. *Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 30-40.



## **Experimental Investigation of the Effect of the Height of the Trapezoidal Piano Key Side Weir on the Discharge Coefficient and Water Level Profiles**

**A. Afzalian, S. M. sajjadi\*, M. shafai bajestan, J. Ahadiyan**

\* Corresponding Author: Assistant professor, Faculty of Water and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz (SCU), Ahvaz, Iran. Email: sajjadi.mohsen@gmail.com

Received: 4 July 2022, Accepted: 3 October 2022

### **Extended Abstract**

The side weirs are widely used in sewage networks to aerate streams, irrigation and drainage networks to control water levels for dewatering, rivers for coastal management, and flood management of dams. One of the newest types of weirs researchers have considered in recent years is the piano key weir. Piano key weirs have a higher efficiency than other weirs due to their special geometry, especially the presence of upstream and downstream overhangs, as well as inlet and outlet keys. The use of piano key weirs as side weirs has received less attention from researchers, and because these weirs show better performance in discharge, more and more research is needed. The main objectives of the present study are first to investigate the effect of trapezoidal piano key weir height as one of the geometric parameters affecting the discharge coefficient and second to investigate the water surface profiles at the upstream and downstream ends and within the location of the weir in the main channel. In parallel with the main objectives, the study of the Dimarchi hypothesis in estimating the discharge coefficient and the study of discharge efficiency of the trapezoidal piano key is also followed. In this regard, four models of trapezoidal piano key overflow with a height of 10, 15, 20, and 25 cm (TPKSWp10, TPKSWp15, TPKSWp20, and TPKSWp25), a labyrinth trapezoidal weir model with a height of 20 cm (TNRSW) and also rectangular sharp crest weir as The control model (Lisw) was tested under the subcritical flow with the Froude numbers in the range of 0/10 to 0/74. De Marchi, in 1934, assuming that the specific energy was constant at the upstream and downstream ends, calculated an equation for estimating the discharge coefficient of the side weirs that were related to the hydraulic parameters of the flow at both the upstream and downstream ends of the weir. In this study, the main hypothesis for estimating the piano key weirs' discharge coefficient is the Di Marchi hypothesis. The results show that, firstly, due to the specific energy changes at the upstream and downstream ends of the trapezoidal piano key models ( $\Delta E/E1$ ), especially in the TPKSWp10 and TPKSWp15 models, and the occurrence of hydraulic jump that affects the essence of the flow, use the Dimarchi hypothesis And comparing the discharge coefficients of trapezoidal piano key side weirs should be done with caution. The discharge capacity of the side weirs is defined as the ratio of flow spill from them to the inflow to the main channel. The results of this study show that the discharge capacity of

trapezoidal piano key weirs increases with increasing height due to the more uniform water surface profile, reducing the interference of the outlet blades of the inlet and side crest and reducing the vortex in the inlet openings and faster exiting than the outlet keys. In the TPKSWp25 model, the discharge capacity is 2/60 times higher than the Lisw, and for the TPKSWp20, TPKSWp15, and TNRSW models, it is 1/92, 1/59, and 1/38 times higher than the Lisw, respectively. Also, the water level decreases in the longitudinal section  $Z^*=1$  (on the crest weirs) and at the upstream end of the weir due to the increase in the longitudinal acceleration of the flow and being affected by the suction of the flow by the weir in this range in all experimental models. This water level reduction for TPKSWp15,20,25 models, and TNRSW models is almost the same and equal to 25%.

### **Introduction**

In irrigation and drainage networks that are designed with a certain capacity, for various reasons, including improper operation by water collectors and in rivers and other natural channels, by imposing excessive capacity currently on them, excess current is created which can cause serious damage to them. And the economy of the project will be challenged and of course, it can lead to life-threatening risks. In the design of dams, according to the location of the dam and in order to use more of the volume of dams for flood control purposes or just more reservoir volume, sometimes the dam is located in such a way that the possibility of constructing a main weir perpendicular to the mainstream is technically and economically justified. Therefore, in such cases, the side weirs are introduced and designed as the main weirs of the dam. Also, in some dams that have been constructed with old hydrological information and meteorological statistics and information indicate that the weir will be potentially dangerous for future floods, the option of overflow correction or using side overflows as auxiliary overflows are suggested. Emin Emiroglu et al. (2010) performed about 2,900 experiments in the subcritical flow mode to analyze the water surface profile on the weir and the flow velocities along with the weir. Their results showed that the weir discharge coefficient in labyrinth weir mode is about 1.5 to 4 times higher than in rectangular weirs. Bagheri and Haidarpour (2012), by measuring the three-dimensional components of the flow velocity in the main channel near the rectangular side weir, concluded that the horizontal flow velocity component at the lower end of the stream decreases. Also, by examining the transverse and deep components of the flow, it was concluded that most of the flow is discharged from the lower end of the weir. Using physical models, Michelazzo (2015) proposed a new approach to solving the Dimarchi equation for zero-height side weirs in an open canal. To solve this model, the flow conditions were considered subcritical and the substrate constant. Solving them without using numerical methods makes it possible to estimate the weir outflow according to upstream and downstream hydraulic conditions. Aydin (2015), by placing the sill on the bed of the canal in three positions of the upstream end, the downstream end and in the middle of the weir, concluded that the presence of an obstacle at the lower end of the weir increases the lateral rectangular weir coefficient. Maranzoni et al. (Maranzoni, 2017) performed numerical and laboratory analyses on a side weir in a rectangular convergent channel. Their

experiments, which were performed under subcritical and sustained flow conditions, show that the number of downstream landings and the dimensionless height of the weir has the greatest effect on the flow rate through the lateral weir in a converging channel. The approach of studies in recent years has tended to increase the efficiency and innovation in the use of new geometries of lateral weirs as well as new strategies and methods for estimating the discharge coefficient of these weirs. These findings include Ghaderi et al.'s (2020) studies to use numerical models to estimate the flow rate of trapezoidal zigzag weirs, Karimi et al. (2018) on the use of piano key weirs with a rectangular plan As side weirs, Saghari et al.'s (2019) studies and Seyed Javad et al. (2019) studies on the use of trapezoidal piano key weirs and Dibaco & Scorzini (2019) studies to estimate The lateral weir flow coefficient using neural network methods was pointed out.

### **Methodology**

Considering several geometric parameters that affect the discharge coefficient of trapezoidal piano key side weirs, this study was designed to achieve the two main objectives of investigating the effect of trapezoidal piano key side weir height on its discharge coefficient and investigating the longitudinal profiles of flow depth in the main channel. In parallel with the main objectives, this study follows the study of the Dimarchi hypothesis in estimating the discharge coefficient of the piano key weir as well as its discharge capacity of it. In this regard, four trapezoidal piano key weir models differ only in height and therefore the inclination of the inlet and outlet keys, one trapezoidal labyrinth weir model, and a rectangular linear model as a control model will be tested in different Froude numbers.

In line with the purpose of the present study, six models were designed and built. These models included a sharp rectangular linear model (control model), a trapezoidal labyrinth model, and four trapezoidal piano key weir models with heights of 10, 15, 20, and 25 (Figure 1). Figure 1 shows all the models in three perspective views, plan and cross-section.

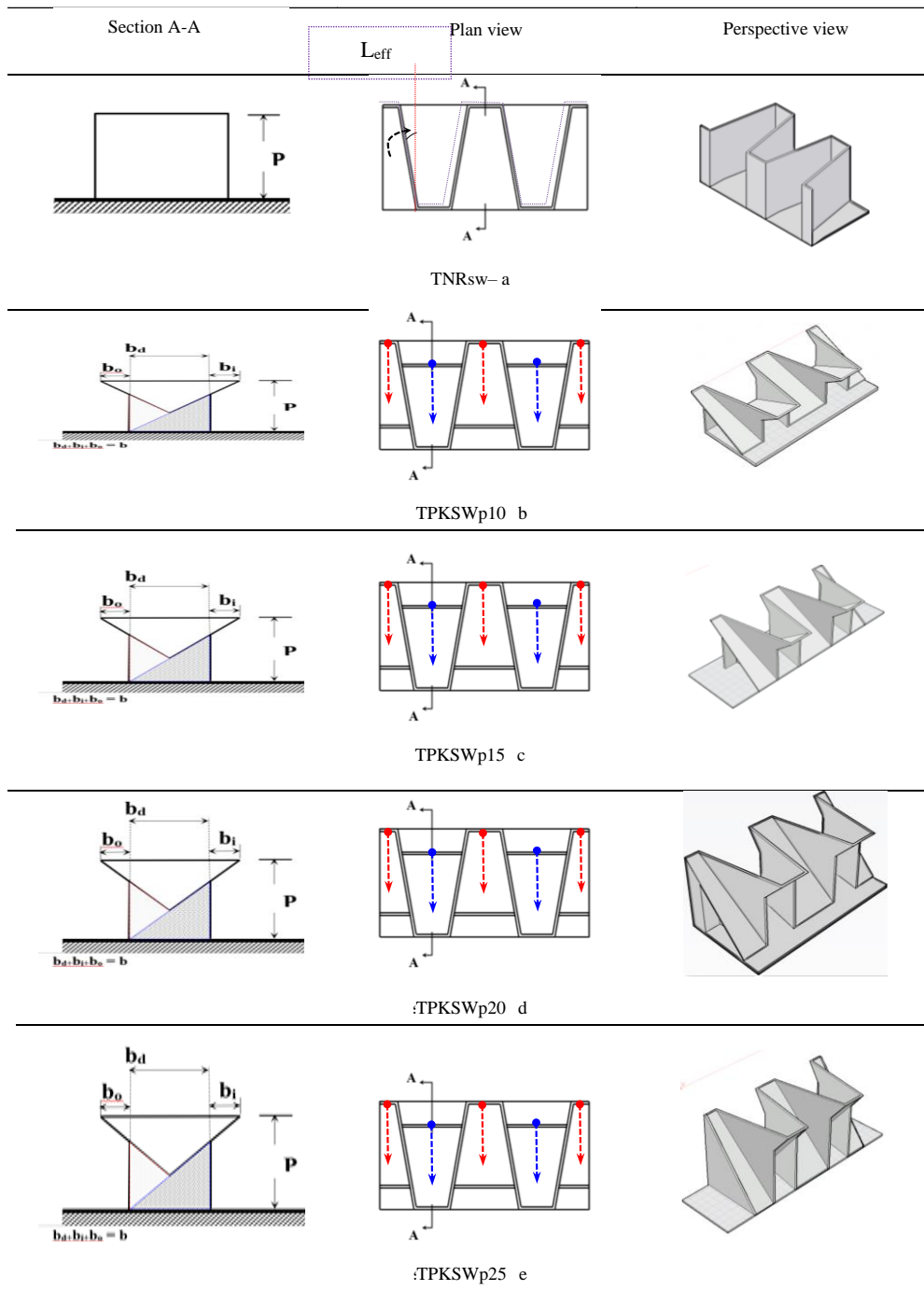


Fig. 1- details of Experimental models

Table 1 shows the geometrical specifications of the models made.

Table 1- Characteristics of Experimental models in this Research

model	$L_{eff}/W(-)$	$P/Wu(-)$	$S_i(-)$	$S_o(-)$	$W_i/W_o(-)$	$b_i/b_o(-)$	P(cm)
TNRSW	2/65	0/90	1/00	1/00	-	-	20
TPKSWp <sub>10</sub>	2/65	0/40	0/50	0/50	1/00	1/00	10
TPKSWp <sub>15</sub>	2/65	0/70	0/75	0/75	1/00	1/00	15
TPKSWp <sub>20</sub>	2/65	0/90	1/00	1/00	1/00	1/00	20
TPKSWp <sub>25</sub>	2/65	1/10	1/25	1/25	1/00	1/00	25
Lisw	1	-	-	-	-	-	20

- **Results and Discussion**

- Adjusting the water level in irrigation and drainage networks in order not to disrupt the operation of reservoirs by creating a water level profile at the upstream end of the reservoir and also the pressure on the body of piano s, especially the side crown and inlet and outlet gutters according to the thickness and materials used. They are important topics for design engineers in irrigation and drainage networks and spillway design. In the present study, two types of diagrams have been used to investigate the effect of the height of trapezoidal piano weirs on the water surface profile due to the complexity of the flow pattern and the simultaneous effect of geometric and hydraulic parameters of the weir and better analysis of these parameters on the water surface profile.

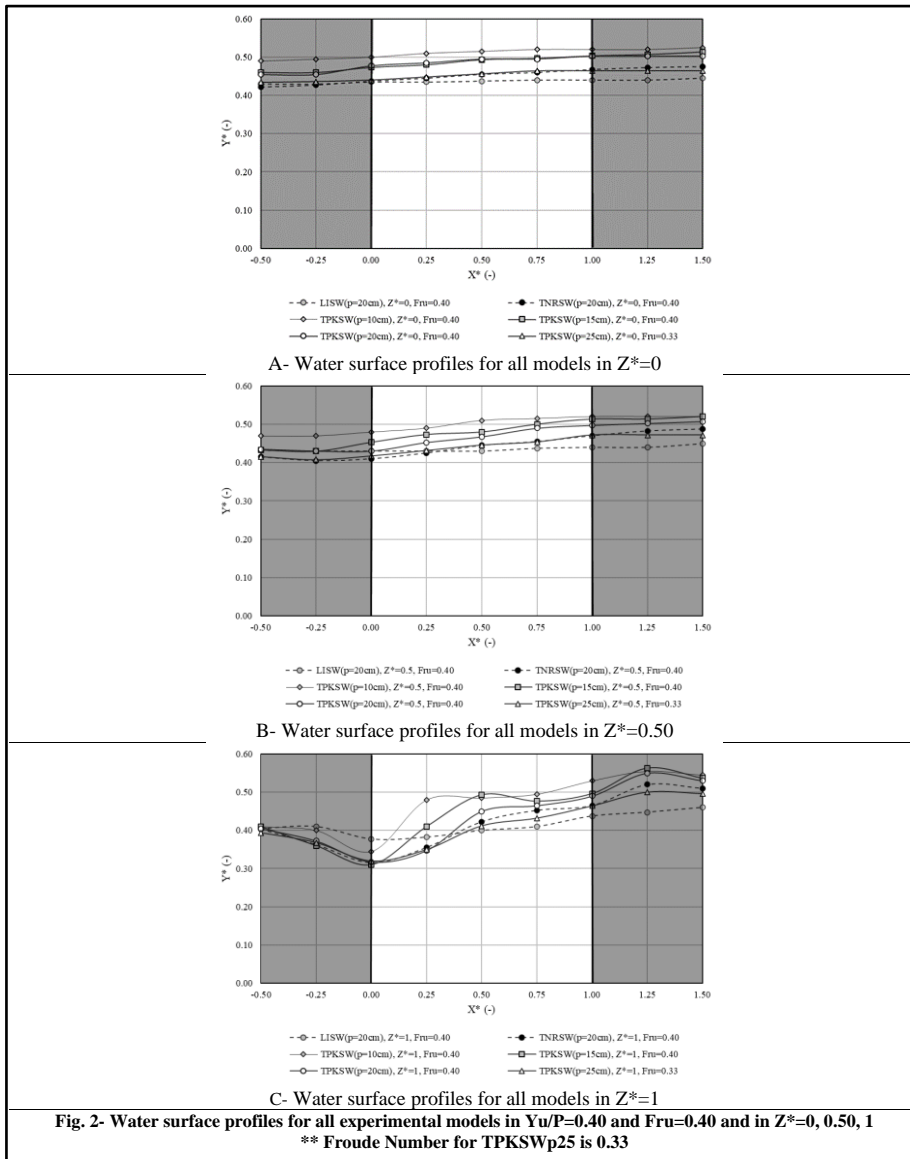


Figure 3-a shows the Head-discharge curve of experimental models and 3-b shows the average flow rate of experimental models compared to the control model. As shown in this figure, for all dimensionless  $Y_1/P$  ratios, the discharge through the TNRSW is higher than the control model (Lisw). Also, the flow rate through TPKSWP20 is higher than the TNRSW model. It is worth noting that in all dimensionless dimensions  $Y_1/P$ , the flow through the piano key weir with a height of 10cm is less than all models. This rate is even 30% lower compared to the control model. The high velocity of the flow in the main channel and the impossibility of discharging the current even from the downstream cycle, which plays the greatest role in discharging the side weir, in the TPKSWp10 model reduces the effective length of the overflow crest in discharging the flow and is the main reason for this difference. Also, as shown in this figure, the flow rate of the TPKSWp25 model is higher than other models. A comparison of average flow rate overflows in  $Y_1/P$  ratios and the Froude range of the present study shows that the average flow rates of TPKSWp25, TPKSWp20, TNRSW, and TPKSWp15 models are 2/60, 1/92, 1/59 and 1/38 times higher than the control model, respectively.

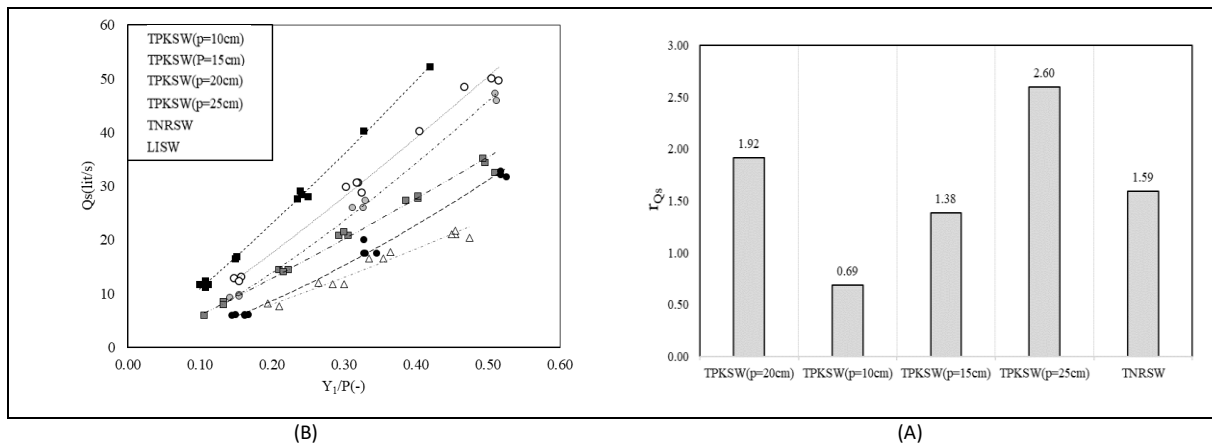


Fig. 3- A) The head-discharge, and B) Comparison of average discharges of the experimental models compared to the control model (Lisw).

**Keywords:**

Irrigation and drainage networks, Dimarchi hypothesis, the discharge capacity of side weir.