

## بررسی آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی جانبی با کلیدهای مورب

محمود کریمی<sup>۱</sup>، محمد رضا جلیلی قاضی زاده<sup>۲\*</sup>، مجتبی صانعی<sup>۳</sup>، جلال عطاری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری عمران-آب دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
<sup>۳</sup>دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران  
<sup>۴</sup>دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۰۶  
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

### کلمات کلیدی:

سرریز جانبی  
سرریز کلید پیانویی  
سرریز مورب  
ضریب دبی، خط جریان

**خلاصه:** سرریز جانبی کاربردهای زیادی در توزیع و تنظیم آب در کانال های آبیاری و انتقال سیلاب دارد. در یک عرض بازشدگی ثابت، تاج سرریز را به شکل های مختلف از جمله کنگره ای یا کلید پیانویی می توان طراحی کرد تا طول توسعه یافته تاج و در نتیجه ضریب دبی سرریز جانبی افزایش یابد. روش دیگر برای افزایش راندمان سرریز جانبی طراحی آن به صورت مورب است تا تاج سرریز تقریباً با جریان منحرف شده از کانال اصلی همراستا شود. ترکیب دو عامل ذکر شده، منجر به طراحی یک سرریز با طول تاج توسعه یافته و به شکل مورب می شود که راندمان بالایی خواهد داشت. در این تحقیق، سرریزهای کلید پیانویی جانبی با کلیدهای مورب با زوایای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. خصوصیات جریان از جمله زاویه انحراف و خطوط جریان و همچنین ضریب دبی سرریزها با زوایای کلید مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که زاویه دار کردن کلیدها در جهت همسو با جریان خروجی از سرریز، ضریب دبی سرریز کلید پیانویی جانبی را در اعداد فرود بالا تا ۱۲ درصد افزایش می دهد. مورب کردن کلیدها می تواند تلاطمی که معمولاً در سرریز کلید پیانویی متقارن اتفاق می افتد را کاهش دهند و ضریب دبی بالاتری را نتیجه دهد. نتایج بدست آمده می تواند برای طراحی سرریز جانبی که در اعداد فرود بالا عمل می کنند برای مثال انتقال سیلاب مورد استفاده قرار بگیرد.

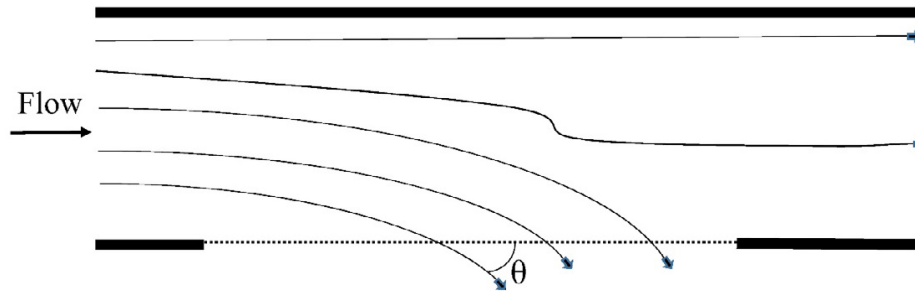
### ۱- مقدمه

بر اساس عدد فرود برای محاسبه آن ارائه کردند [۲]. میشلز و همکاران توزیع سرعت و زاویه انحراف را در سرریزهای جانبی خطی مورد مطالعه قرار دادند.

به منظور افزایش راندمان سرریز جانبی اقدام به طراحی سرریز مورب توسط برخی از محققین پیشنهاد شده است. سرریز مورب باعث می شود که اولاً طول تاج سرریز جانبی افزایش یابد و در ثانی جریان با زاویه نسبتاً قائم به تاج سرریز برخورد کند که باعث افزایش راندمان سرریز می شود. محققین نشان دادند که سرریز مورب جانبی ضریب دبی بالاتری نسبت به سرریز متقارن دارد [۵، ۶]. مارائونی و همکاران سرریز مورب جانبی قرار گرفته در یک کانال همگرا را بررسی و نتیجه گرفتند که در شرایط هیدرولیکی مشابه، سرریز مورب جانبی عملکرد هیدرولیکی بهتری دارد [۷].

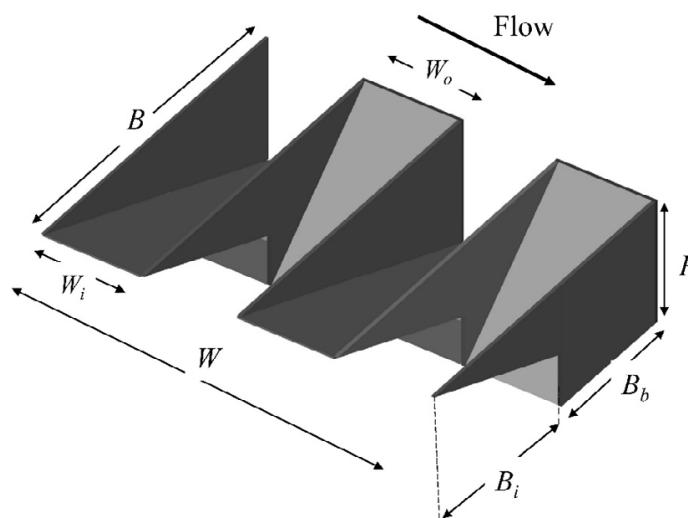
سرریز جانبی معمولاً در دیواره کناری کانال قرار گرفته و بخشی از دبی کانال اصلی را تخلیه می کند [۱]. جریان سرریز شده با محور جریان اصلی زاویه ساخته و به سمت کانال جانبی منحرف می شود (شکل ۱). با حرکت به سمت پایین دست مقدار زاویه انحراف در طول سرریز افزایش می یابد و مقدار آن به عدد فرود بستگی دارد [۲]. ساپرامانیا و آواستی برای محاسبه زاویه انحراف رابطه ای را بر اساس عدد فرود ارائه کردند [۳]. هگر با فرض توزیع یکنواخت سرعت و فشار هیدرواستاتیک، برای محاسبه زاویه انحراف در سرریزهای جانبی رابطه ای را ارائه داد [۴]. باقری و حیدرپور در یک تحقیق آزمایشگاهی زاویه برخورد را در طول سرریز جانبی خطی اندازه گیری و رابطه ای

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: m\_jalili@sbu.ac.ir



شکل ۱. شماتیک جریان بر روی یک سرریز جانبی و زاویه انحراف ( $\theta$ )

Fig.1 . Schematic plan view of flow over a side weir and deflection angle ( $\theta$ )



شکل ۲. نمای سه بعدی از یک سرریز کلید پیانویی با کنسول پایین دست

Fig. 2. 3D sketch of Piano Key weir with downstream overhangs

سرریز به دلیل پی کوچک به نسبت سرریز کنگره‌ای هم طول خود، در مکان‌هایی با محدودیت توپوگرافیک می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [۱۳]. سرریز کلید پیانویی با توجه به وجود کنسول بالا یا پایین دست به انواع مختلفی تقسیم می‌شود. شکل ۲ نمایی از یک سرریز کلید پیانویی با کنسول پایین دست را نشان می‌دهد. تحقیقات زیادی در مورد سرریزهای کلید پیانویی مستقیم صورت گرفته است. ولی در مورد سرریزهای کلید پیانویی جانبی تحقیقات انجام شده محدود است. کریمی و همکاران سرریز کلید پیانویی جانبی را با سرریز کنگره‌ای مستطیلی جانبی با طول توسعه یافته یکسان، مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه نشان داد که دو سرریز مورد مطالعه، تفاوت چشم‌گیری در ضریب آگذری ندارند ولی با توجه مزیت‌های سازه‌ای و اجرایی سرریز کلید پیانویی جانبی، این نوع سرریز می‌تواند گزینه

استفاده از یک سرریز با تاج کنگره‌ای می‌تواند در یک عرض ثابت، طول موثر سرریز و در نتیجه ضریب دبی سرریز را افزایش بدهد. امیراغلو و همکاران و برقی و همکاران سرریز کنگره‌ای مثلثی جانبی را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که ضریب دبی آن به صورت قابل توجهی از سرریز جانبی خطی بیشتر است [۸، ۹]. امیراغلو و کایا و نظامی و همکاران نتیجه مشابهی برای سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای جانبی بدست آوردند [۱۰، ۱۱]. همانند سرریز خطی، مورب کردن سرریز کنگره‌ای جانبی می‌تواند عملکرد سرریز را بهبود ببخشد که این موضوع قسمتی از نتیجه تحقیق پروانه و همکاران بر روی سرریز کنگره‌ای مثلثی است [۱۲].

سرریز کلید پیانویی نوعی از سرریز کنگره‌ای است که در بالادست یا پایین دست آن کنسول و صفحات شیب‌دار قرار گرفته است. این نوع

که در آن  $P$  ارتفاع سرریز است.

برای محاسبه ضریب دبی علاوه بر مدل دیمارچی روش های دیگری نیز ارائه شده است. برای مثال اشمیت، بر اساس ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی، مقدار متوسط عمق بالادست و پایین دست سرریز را  $(\frac{y_1+y_2}{2})$  در رابطه سرریز مستقیم قرار می دهد [۱۶]. مطالعات تحلیلی بر اساس روش اشمیت انجام شده است که کارایی مناسب این روش را در محاسبه ضریب دبی نشان داده است [۱۷].

### ۳- مواد و روش ها

#### ۳-۱ تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایش شامل یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۶ متر بود. در شکل ۳ پلان شماتیک کانال نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ آب به وسیله یک پمپ از مخزن اصلی به بالادست کانال هدایت می شود. سرریز جانبی در فاصله ۶ متری از بالادست کانال قرار گرفته و یک شبکه فلزی برای آرام کردن جریان استفاده می شود. در پایین دست کانال اصلی یک دریچه لولایی برای کنترل سطح آب پایین دست قرار دارد. برای انتقال یک کانال جانبی برای انتقال آب تخلیه شده از سرریز جانبی در کنار کانال اصلی قرار گرفته است. برای بخشی از آزمایش ها یک دیواره فلزی در درون کانال اصلی قرار گرفت تا عرض کانال را به ۰/۴ متر کاهش دهد تا هم تاثیر تغییر عرض مورد مطالعه قرار بگیرد و هم و سرعت جریان برای دبی ثابت افزایش یابد. دبی آب در کانال اصلی و کانال جانبی به ترتیب توسط سرریز مثلثی و مستطیلی کالیبره شده، اندازه گیری شد.

#### ۳-۲ روش انجام آزمایش

در مقاله حاضر از سیستم مختصات بدون بعد به صورت زیر استفاده می شود:

$X^*$  که برابر  $X/W$  است که در آن  $W$  عرض بازشدگی و نقطه صفر لبه بالادست سرریز است.  
 $Y^*$  که برابر  $Y/y_1$  است که در آن  $y_1$  برابر عمق آب در بالادست سرریز و نقطه صفر کف کانال اصلی است.  
 $Z^*$  که برابر  $Z/b$  است که در آن  $b$  برابر عرض کانال اصلی است و نقطه صفر لبه سرریز است.

مناسبتی برای طراحی باشد [۱۴]. در آن تحقیق تمام سرریز های کلید پیانویی به شکل متقارن بودند.

با توجه به مزیت های سرریز کلید پیانویی جانبی، طراحی شکل غیر متقارن آن می تواند به افزایش راندمان سرریزهای جانبی کمک کند. اهداف مقاله حاضر عبارتست از: ۱- مطالعه خصوصیات جریان بر روی سرریز کلید پیانویی جانبی با کلیدهای مورب ۲- بدست آوردن بهترین زاویه برای کلیدهای سرریز کلید پیانویی جانبی که منجر به بالاترین راندمان شود.

### ۲- مبانی تئوریک

دبی عبوری از یک سرریز مستقیم را با رابطه کلاسیک سرریز می توان محاسبه کرد [۱]:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} W h^{1.5} \quad (1)$$

که در آن  $Q$  دبی،  $C_d$  ضریب دبی،  $g$  شتاب جاذبه،  $W$  عرض سرریز و  $h$  هد پیزومتریک است. جریان بر روی یک سرریز جانبی یک جریان متغیر مکانی با کاهش دبی است. بر اساس رابطه انرژی معادله دیفرانسیل پروفیل سطح آب برای این نوع جریان به صورت زیر است [۱]:

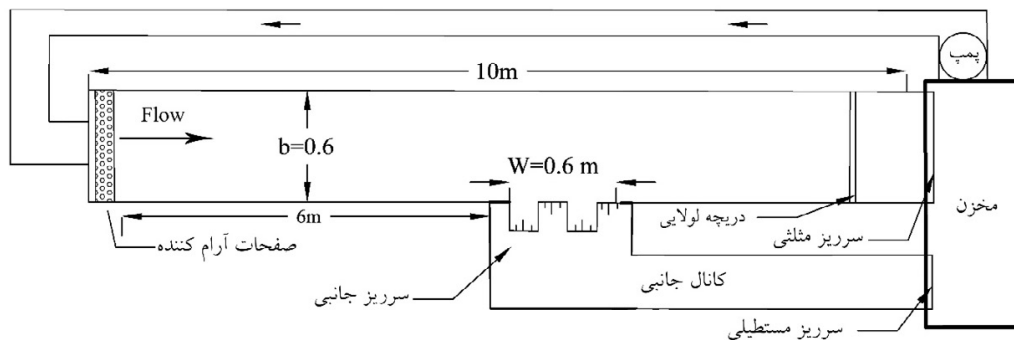
$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left( \frac{\alpha Q}{g A^2} \right) \cdot \left( \frac{dQ}{dx} \right)}{1 - \alpha Q^2 \cdot \frac{T}{g A^3}} \quad (2)$$

که در آن  $y$  عمق آب در کانال،  $x$  فاصله طولی،  $S_0$  و  $S_f$  به ترتیب شیب کف کانال و شیب اصطکاکی،  $T$  عرض کانال در سطح آزاد آب،  $A$  سطح مقطع آب،  $\alpha$  ضریب تصحیح انرژی است. دی مارچی بر اساس فرض ثابت ماندن مقدار انرژی در طول سرریز، رابطه زیر را برای محاسبه ضریب دبی ارائه کرد [۱۵]:

$$C_M = \frac{3}{2} \frac{b}{W} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (3)$$

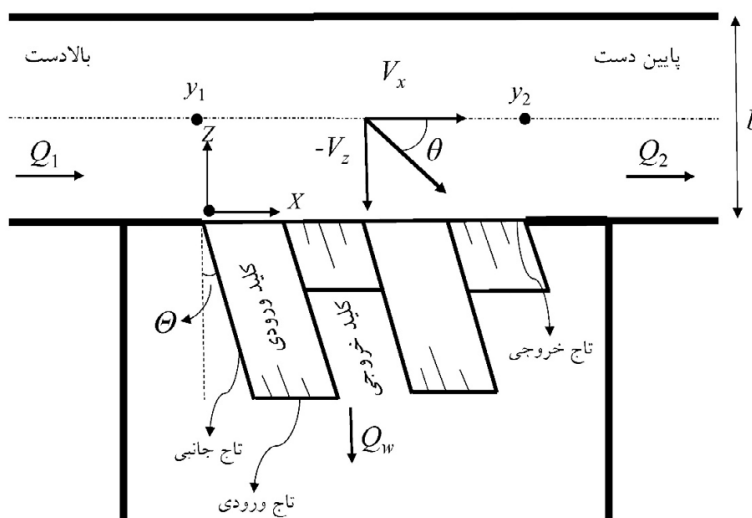
که در آن زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب معرف انتهای بالادست و پایین دست سرریز و  $\Phi$  تابعی است که به صورت زیر محاسبه میشود [۱]:

$$\Phi = \frac{2E-3P}{E-P} \sqrt{\frac{E-y}{y-P}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{E-P}} \quad (4)$$



شکل ۳. پلان شماتیک از کانال اصلی و سرریز مورد استفاده در آزمایشگاه

Fig. 3. Plan view of experimental setup



شکل ۴. طرح شماتیک از مشخصات هندسی سرریز و کانال اصلی

Fig. 4. Schematic view of geometrical characteristic of the main channel and the side weir

تنظیم می‌شود. با برداشت مقادیر بالادست و پایین دست (شکل ۴) و دبی کانال اصلی و کانال جانبی ضریب دبی محاسبه می‌شود. در جدول ۱ بازه تغییرات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای مورد مطالعه نشان داده شده است. در جدول ۱ زاویه کلید،  $P$  ارتفاع سرریز،  $b$  عرض کانال اصلی،  $L$  طول توسعه یافته سرریز،  $W$  عرض بازشدگی،  $Q_1$  دبی بالادست کانال اصلی،  $F_1$  عدد فرود در بالادست سرریز، و  $h_1$  هد آب در بالادست سرریز است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱ مشاهده رفتار جریان

جریان آب در کانال اصلی در حضور سرریز جانبی با یک زاویه

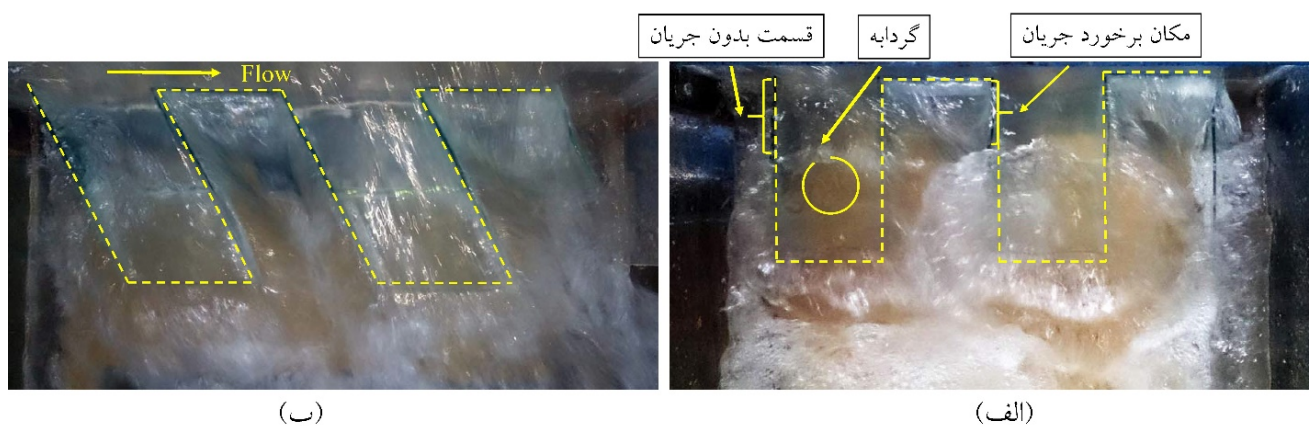
برای اندازه‌گیری سرعت در جهت طول کانال  $V_x$  و عرض کانال  $V_z$  از یک سرعت سنج دو بعدی مغناطیسی با دقت  $0.001$  متر بر ثانیه استفاده شد. محل برداشت نقاط سرعت در چهار مسیر عرضی ( $Z^* = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ) و چهار عمق ( $Y^* = 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ) بود. به وسیله یک پروفایلر دیجیتالی، پروفیل سطح آب در چهار مسیر عرضی ( $Z^* = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ) و به فواصل  $10$  سانتی متری اندازه‌گیری شد.

در شکل ۴ مشخصات هندسی سرریزها نشان داده شده است. تعداد ۱۶ سرریز کلید پیانویی جانبی و ۳ سرریز خطی با استفاده از شیشه ۴ میلیمتری ساخته شد. برای هر سرریز دبی‌های بالادست تقریباً یکسان توسط دریچه پمپ وارد کانال اصلی می‌شود. برای هر دبی دریچه لولایی پایین دست بر روی میزان باز شدگی مختلف

جدول ۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی

Table 1. Geometrical and hydraulic characters of Piano key side weirs

$h_1/P$	$F_1$	$Q_1(L/s)$	$L/W$	$b$ (m)	$P$ (cm)	$\theta$	نام سرریز
۰/۲ - ۲	۰/۱ - ۰/۷	۱۴ - ۶۰/۵	۲/۷	۰/۴، ۰/۶	۱۵، ۱۰، ۵	۰	PKSW <sub>0°</sub>
۰/۲ - ۲	۰/۱ - ۰/۷	۱۴ - ۶۰/۵	۲/۷	۰/۴، ۰/۶	۱۵، ۱۰، ۵	۱۵	PKSW <sub>15°</sub>
۰/۲ - ۲	۰/۱ - ۰/۷	۱۴ - ۶۰/۵	۲/۷	۰/۴، ۰/۶	۱۵، ۱۰، ۵	۳۰	PKSW <sub>30°</sub>
۰/۲ - ۲	۰/۱ - ۰/۷	۱۴ - ۶۰/۵	۲/۷	۰/۴، ۰/۶	۱۵، ۱۰، ۵	۴۵	PKSW <sub>45°</sub>
۰/۲ - ۲	۰/۱ - ۰/۳۵	۱۸ - ۵۸	۲/۷	۰/۶	۱۵، ۱۰	-۱۵	PKSW <sub>-15°</sub>
۰/۲ - ۲	۰/۱ - ۰/۳۵	۱۸ - ۵۸	۲/۷	۰/۶	۱۵، ۱۰	-۳۰	PKSW <sub>-30°</sub>



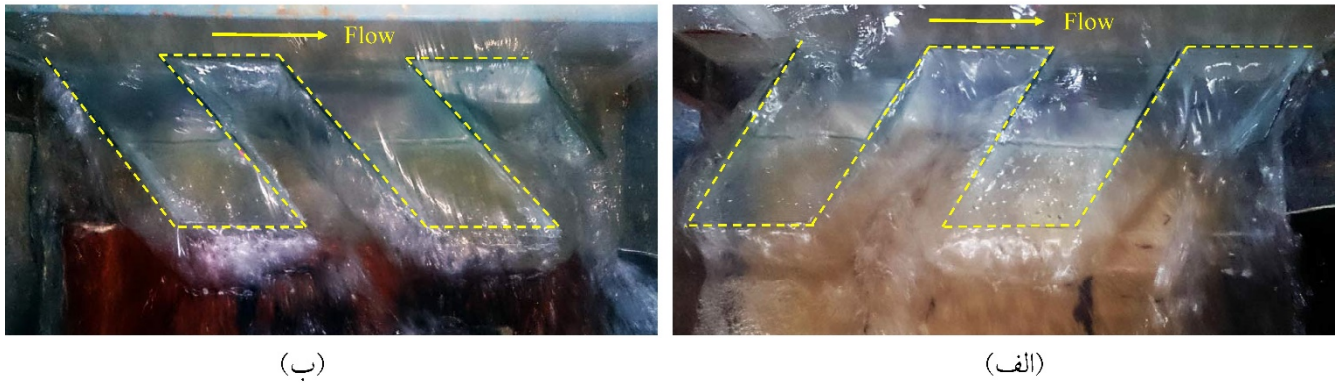
شکل ۵. الگوی جریان در عدد فرود ۰/۴ (الف) سرریز با زاویه کلید صفر (ب) سرریز با زاویه کلید ۳۰+

Fig. 5. Flow pattern in  $F_1 = 0.4$  for (a) PKSW<sub>0°</sub> and (b) PKSW<sub>+30°</sub>

انحرافی به تاج سرریز می‌رسد که این موضوع معمولاً باعث ایجاد تلاطم در محدوده تاج سرریز می‌شود. در اعداد فرود پایین، به دلیل سرعت کمتر، تلاطم جریان و افت انرژی با شدت کمتری اتفاق می‌افتد اما در اعداد فرود زیاد به دلیل زیاد بودن سطح انرژی جنبشی میزان تلاطم بیشتر است. در سرریزهای کلید پیانویی جانبی میزان این پدیده به دلیل شکل خاص کلیدها تشدید می‌شود. شکل ۵ جریان آب را برای دو سرریز کلید پیانویی با زاویه کلید صفر و ۳۰+ در عدد فرود ۰/۴ نشان می‌دهد. در بالادست سرریز به دلیل زاویه انحراف کم، یک گردابه در کلید ورودی اول تشکیل می‌شود (شکل ۵ الف). همانطور که در شکل ۵ الف نشان داده شده است، در سرریزهای با زاویه کلید صفر ( $\theta = 0$ ) و ( $\theta < 0$ ) منفی از روی بخشی از تاج جانبی در

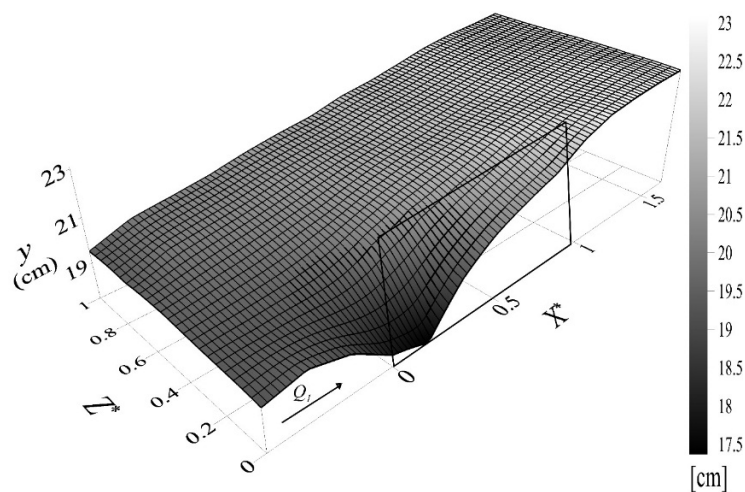
کلید اول جریانی عبور نمی‌کند. در اعداد فرود زیاد در جریان عبوری از تاج جانبی و جریان عبوری از تاج خروجی یک برخورد اتفاق می‌افتد که باعث ایجاد تلاطم شدید می‌شود (شکل ۵ الف). در سرریزهای با زاویه کلید مثبت این پدیده گردابه و برخورد جریان با شدت کمتری اتفاق می‌افتد یا اصلاً پدیدار نمی‌شود (شکل ۵ ب). همانگونه که در شکل ۵ ب مشخص است، در اعداد فرود زیاد سرریزهای با زاویه کلید مثبت جریان یکنواخت‌تری نسبت به سرریزهای با زاویه کلید صفر دارند. دلیل این موضوع این است که در سرریز جانبی با کلیدهای با زاویه مثبت، جهت کلیدها به ویژه کلیدهای ورودی، همراستایی بیشتری با جهت جریان دارند که این امر باعث سهولت بیشتر ورود آب به داخل کلیدها مورب میشوند. این پدیده مشخصاً تاثیر خود





شکل ۶. جریان در عدد فرود ۰/۲ (الف) سرریز با زاویه کلید -۳۰ (ب) سرریز با زاویه کلید +۴۵

Fig. 6. Flow behavior in  $F_1 = 0.17$  for (a)  $PKSW_{-30}$  and (b)  $PKSW_{+45}$



شکل ۷. پروفیل سطح آب برای سرریز  $PKSW_{+45}$  ارتفاع ۱۰ سانتی متر و دبی بالادست ۶۰ لیتر بر ثانیه

Fig. 7. Water surface profile for  $PKSW_{+45}$  with  $P = 10$  cm and  $Q_1 = 60$  L/s

بالادست کانال افت قابل توجهی دارد که به دلیل افزایش شتاب جریان در آن بخش است. پروفیل سطح آب در طول سرریز روند صعودی دارد که با تئوری جریان متغیر مکانی در جریان زیر بحرانی تطابق دارد [۱]. در جهت عرض کانال یک روند نزولی به سمت سرریز وجود دارد که نرخ تغییرات آن با نزدیک شدن به سرریز افزایش می‌یابد که نشان دهنده تأثیرپذیری بیشتر جریان جانبی در نزدیکی سرریز است. در دیواره مقابل سرریز، جریان جانبی تقریباً اثری بر پروفیل جریان طولی کانال ندارد و لذا تغییرات سطح آب بسیار اندک است. این رفتار برای همه سرریزهای کلید پلانویی روند مشابهی دارد با این توضیح که در سرریزهای با ارتفاع کمتر نوسانات آب به دلیل حجم بیشتر آب تخلیه شده، افزایش می‌یابد.

را در مقدار ضریب دبی در اعداد فرود زیاد نشان می‌دهد که در بخش ضریب دبی به آن پرداخته خواهد شد. شکل ۶ دو سرریز کلید پلانویی جانبی را با زاویه کلید +۴۵ و -۳۰ درجه در عدد فرود ۰/۲ نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در اعداد فرود نسبتاً کم به دلیل سرعت کمتر در کانال اصلی، تلاطم جریان یا گردابه تقریباً در هیچ کدام از سرریزها اتفاق نمی‌افتد یا شدت کمتری دارد.

#### ۴-۲ پروفیل سطح آب

شکل ۷ پروفیل سه بعدی سطح آب را برای سرریز با زاویه +۴۵ به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و در دبی بالادست ۶۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، سطح آب در ابتدای

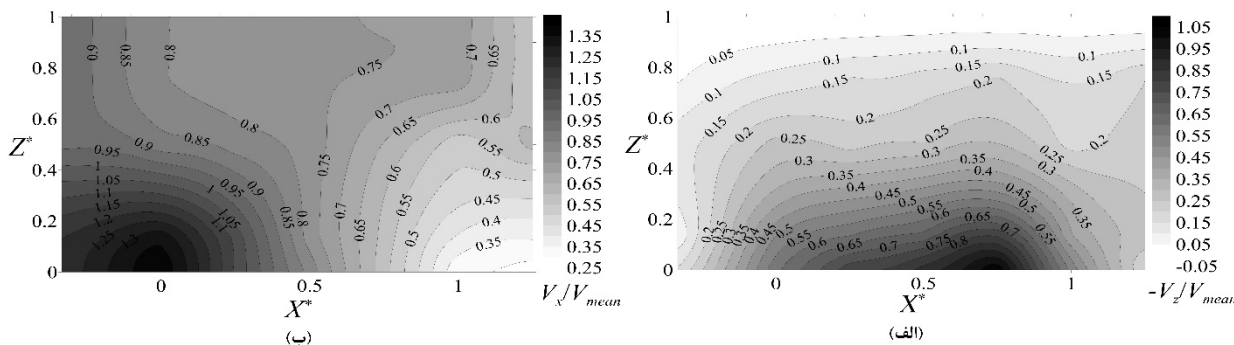
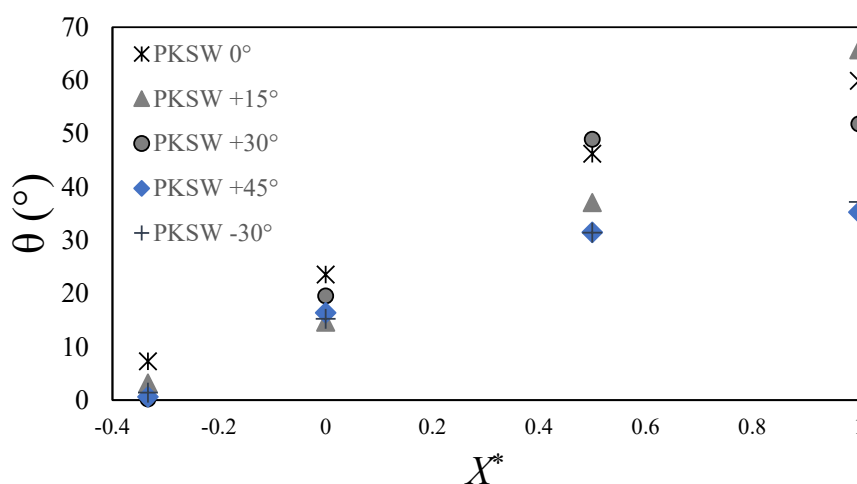


Fig. 8. Plan view of velocity field at the surface for PKS $W_0$  with  $P = 15$  cm and  $Q_1 = 28$  L/s (a) longitudinal component (b) lateral component

شکل ۸. پلان توزیع سرعت در سطح آب برای سرریز PKS $W_0$ ، ارتفاع ۱۵ سانتی متر و دبی بالادست ۲۷ لیتر بر ثانیه (الف) سرعت جانبی (ب) سرعت طولی



شکل ۹. زاویه انحراف در طول سرریز کلید پیانویی در عدد فرود ۰/۱۷ برای سرریزهای کلید پیانویی با زوایای مختلف

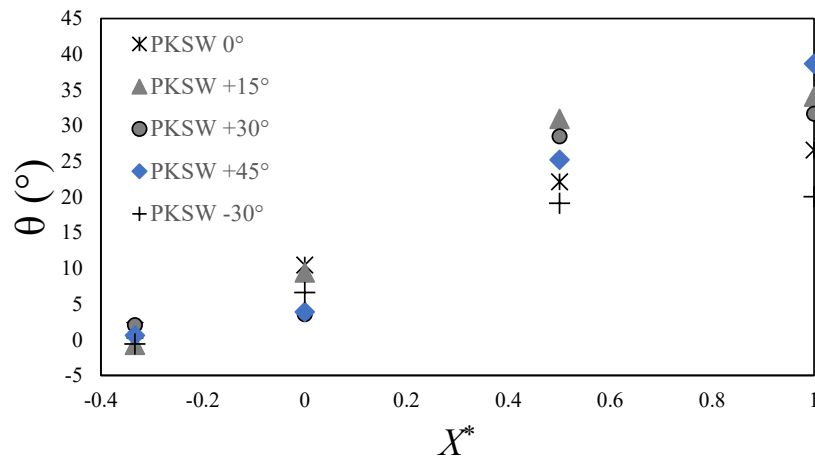
Fig. 9. Deflection angle at surface and along the side weir for PKS $W$  with different  $\Theta$  in  $F_1 = 0.17$

را برای انحراف در اختیار دارد. در انتهای بالادست جریان طول لازم برای انحراف باز زاویه بالا را در اختیار ندارد. با فاصله گرفتن از تاج سرریز در جهت عرض کانال مقدار سرعت جانبی کاهش می‌یابد و در نزدیکی دیوار مقابل سرریز سرعت جانبی تقریباً صفر است که نشان دهنده تاثیر ناچیز سرریز بر روی جریان کانال اصلی در آن ناحیه ( $Z^* \approx 1$ ) است. نتایج مربوط به توزیع سرعت در با نتایج دیگر تحقیقات پیشین بر روی سرریز جانبی خطی مطابقت دارد [۲، ۷].

اشکال ۹ و ۱۰ زاویه انحراف جریان در طول سرریز کلید پیانویی با ارتفاع ۱۵ سانتی متر و زوایای مختلف را به ترتیب برای اعداد فرود ۰/۱۷ و ۰/۳۳ نشان می‌دهند. برای هر دو عدد فرود زاویه انحراف در بالادست سرریز به سمت پایین دست سرریز افزایش می‌یابد. برای عدد فرود ۰/۱۷ سرریز با زاویه کلید صفر درجه بالاترین مقدار متوسط

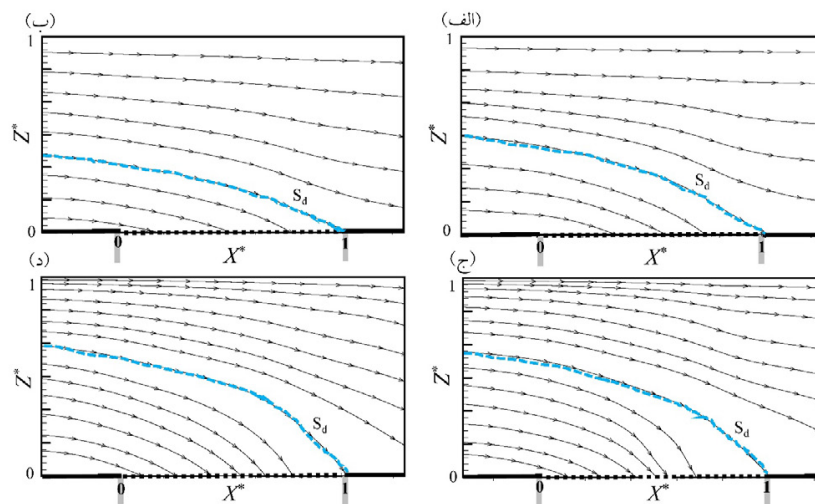
۳-۴ توزیع سرعت، زاویه انحراف و خطوط جریان

شکل ۸ پلان توزیع سرعت طولی ( $V_x$ ) و عرضی ( $V_z$ ) را در سطح آب در سرریز با زاویه کلید صفر، ارتفاع ۱۵ سانتی متر و دبی بالادست ۲۷ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مقدار حداکثر سرعت طولی در انتهای بالادست و در مجاورت سرریز اتفاق می‌افتد که علت آن افت سطح آب و شتاب گرفتن جریان در آن ناحیه است. با حرکت به سمت پایین دست سرریز، سرعت طولی به تدریج با بالا آمدن سطح آب و کاهش دبی، کاهش می‌یابد. سرعت عرضی از مقادیر نزدیک به صفر در بالادست سرریز به تدریج به سمت پایین دست افزایش می‌یابد و مقدار حداکثر آن در نزدیکی انتهای پایین دست سرریز اتفاق می‌افتد. دلیل این توزیع سرعت عرضی این است در انتهای پایین دست، جریان در کانال اصلی حداکثر طول ممکن



شکل ۱۰. زاویه انحراف در طول سرریز کلید پیانویی در عدد فرود ۰/۳۳ برای سرریزهای کلید پیانویی با زوایای مختلف

Fig. 10. Deflection angle at surface and along the side weir for PKSW with different  $\Theta$  in  $F_1 = 0.33$



شکل ۱۱. خطوط جریان در تراز سطح آب برای سرریز با ارتفاع ۱۵ سانتی متر (الف)  $\Theta = 0^\circ, F_1 = 0/33$  (ب)  $\Theta = 30^\circ, F_1 = 0/33$

(ج)  $\Theta = 0^\circ, F_1 = 0/17$  (د)  $\Theta = 30^\circ, F_1 = 0/17$

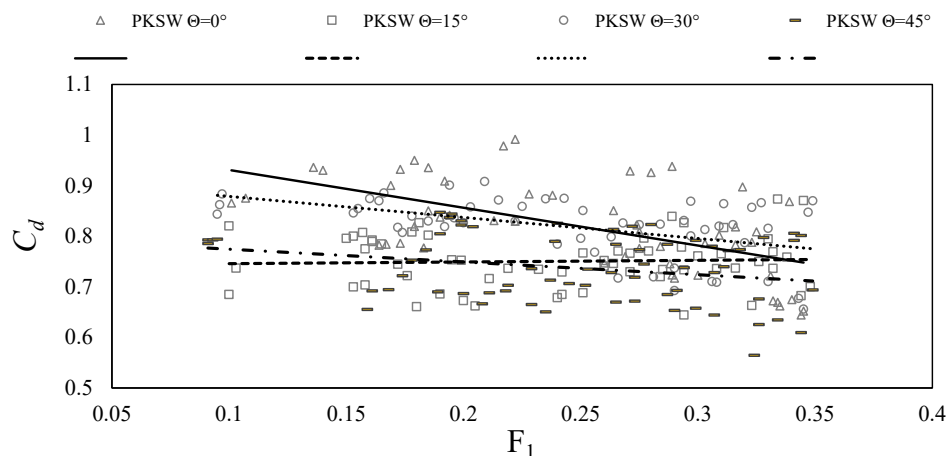
Fig. 11. Streamlines at surface for PKSW with  $P=15$  cm (a)  $\Theta = 0^\circ, F_1 = 0.33$ , (b)  $\Theta = 30^\circ, F_1 = 0.33$ , (c)  $\Theta = 0^\circ, F_1 = 0.17$ , (d)  $\Theta = 30^\circ, F_1 = 0.17$

در اعداد فرود بالا که در بخش مشاهدات رفتار جریان مورد بحث قرار گرفت، مطابقت دارد. رابطه زاویه انحراف با عدد فرود و همچنین شکل تغییرات آن در طول سرریز با نتایج دیگر محققین مطابقت دارد [۲، ۳].

با داده‌های سرعت طولی و عرضی، خطوط جریان با استفاده از نرم افزار تکپلات رسم شدند. خطوط جریان برای دو سرریز با زاویه کلید صفر و  $30^\circ$ ، ارتفاع ۱۵ سانتی متر و اعداد فرود بالادست ۰/۱۷ و ۰/۳۳ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. خط جدا کننده ( $S_d$ ) که

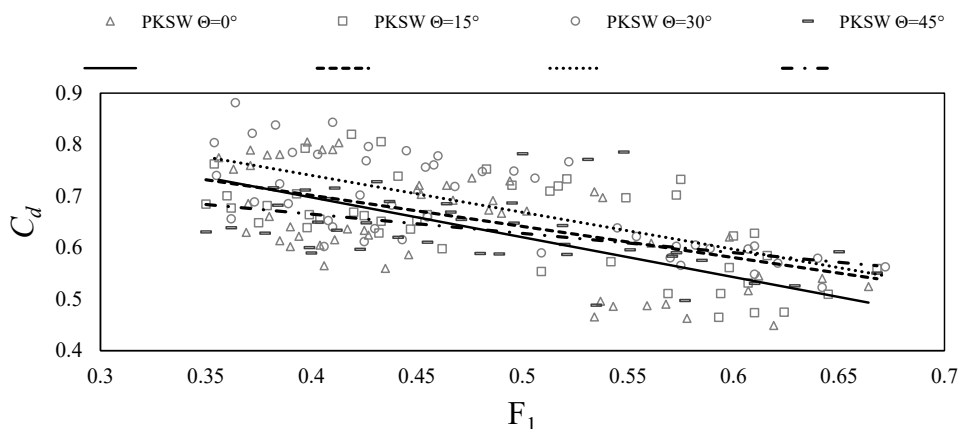
زاویه انحراف را در میان سرریزها دارد. سرریزهای با زاویه کلید  $45^\circ$  و  $30^\circ$  کمترین زاویه انحراف را در عدد فرود پایین دارند. هرچند در عدد فرود ۰/۳۳ سرریز با زاویه کلید  $30^\circ$  بالاترین زاویه انحراف را نسبت به دیگر زوایای کلید دارا می‌باشد که نشان دهنده عملکرد بهتر این سرریز در اعداد فرود نسبتا بالاتر است. در این عدد فرود، سرریزهای با زاویه صفر و  $30^\circ$  کمترین زاویه انحراف را در میان سرریزها دارا می‌باشند. این نتایج با پدیده تشکیل گردابه و ناحیه برخورد جریان برای سرریز با زاویه صفر و منفی





شکل ۱۲. ضریب دبی برای سرریز های کلید پیانویی جانبی با زاویه کلید مثبت و سرریز خطی در بازه عدد فرود ۰ تا ۰/۳۵.

Fig. 12. Discharge coefficient versus  $F_1$  for PKSWS with positive  $\Theta$  and linear side weir for  $0.1 < F_1 < 0.35$



شکل ۱۳. ضریب دبی برای سرریز های کلید پیانویی جانبی با زاویه کلید مثبت و سرریز خطی در بازه عدد فرود ۰/۳۵ تا ۰/۷.

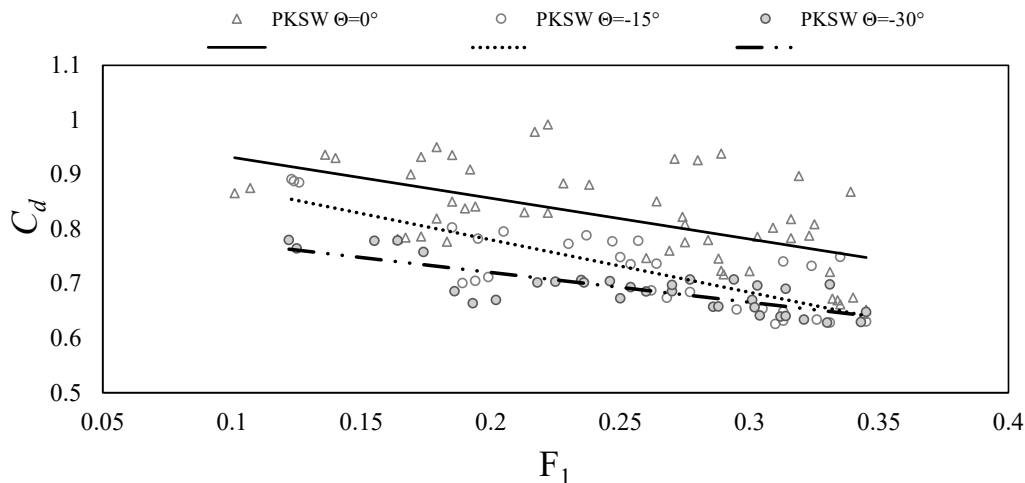
Fig. 13. Discharge coefficient versus  $F_1$  for PKSWS with positive  $\Theta$  and linear side weir for  $0.35 < F_1 < 0.7$

می‌دهد که در عدد فرود پایین زاویه دار کردن کلید ها تاثیر مثبت چندانی بر تخلیه جریان ندارد.

#### ۴-۴ ضریب دبی

در این بخش ضرایب دبی برای مقایسه عملکرد سرریز های کلید پیانویی با زوایای مختلف و سرریز خطی ارائه شده است. روش های مختلفی برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی وجود دارد که روش دیمارچی یکی از معمول ترین آنهاست. مقایسه روش دیمارچی و اشمیت در تحقیق حاضر نشان داد که با وجود روند کاملا مشابه، پراکندگی داده‌ها در روش دیمارچی به نسبت بیشتر است به همین دلیل در تحقیق حاضر تصمیم گرفته شد که از مقادیر محاسبه شده با روش اشمیت برای نمایش ضریب دبی استفاده شود. در پایان بخش

سطح تحت تاثیر از جریان خروجی را نشان می‌دهد در شکل نشان داده شده است. خطوط جریان در پایین خط جدا کننده از روی سرریز تخلیه می‌شوند و خطوط در بالای آن به مسیر خود در کانال اصلی ادامه می‌دهند. در عدد فرود ۰/۳۳ کمتر از نیمی از عرض کانال تحت تاثیر جریان سرریز قرار می‌گیرد و به دلیل انرژی جنبشی زیاد، جریان تمایل به ادامه مسیر در کانال اصلی را دارد. شکل ۱۱ همچنین نشان می‌دهد که سرریز با زاویه کلید ۳۰+ نسبت به زاویه کلید صفر توانایی بیشتری در تخلیه جریان در اعداد فرود بالا دارد. در عدد فرود ۰/۱۷ به نسبت عدد فرود ۰/۳۳ به دلیل زاویه انحراف بیشتر بخش بیشتری از عرض کانال تحت تاثیر جریان جانبی قرار می‌گیرد. شکل ۱۱ همچنان نشان



شکل ۱۴. تغییرات ضریب دبی با عدد فرود برای سرریزهای کلید پیانویی جانبی با زاویه کلید منفی و سرریز خطی

Fig. 14. Discharge coefficient versus  $F_1$  for PKSW with negative  $\Theta$  and linear side weir in  $0.35 < F_1 < 0.7$

جدول ۲. مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای جانبی تحقیق حاضر و دیگر محققین

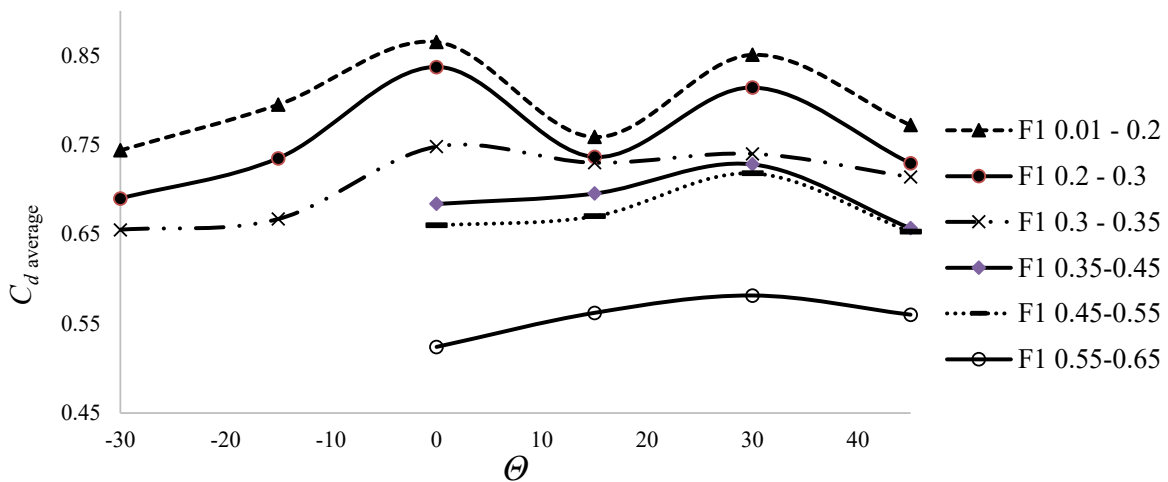
Table 2. Geometrical and hydraulic characters of side weirs for present study and other researchers

$Q_1$ (L/s)	$L/W$	$W$ (cm)	$b$ (m)	$P$ (cm)	منبع	نام سرریز
۱۴ - ۶۰/۵	۲/۷	۶۰	۰/۴، ۰/۶	۱۵، ۱۰، ۵	تحقیق حاضر	کلید پیانویی
۱۰ - ۳۰	۲/۶	۶۰، ۵۰، ۳۰	۰/۳	۱۰، ۷/۵	زاهدی خامنه و همکاران [۱۸]	کنگره‌های مثلثی
۱۹ - ۳۰	۲/۴	۶۰، ۴۰، ۳۰	۰/۴	۱۵، ۱۰، ۷/۵	پروانه و همکاران [۱۲]	کنگره‌های مثلثی
۹/۸ - ۲۲/۹	۲	۴۰	۰/۴	۱۵، ۱۰، ۵	نکویی [۱۹]	کنگره‌های مثلثی
۱۴ - ۶۳	۱	۶۰	۰/۴، ۰/۶	۱۵، ۱۰، ۵	تحقیق حاضر	خطی

می‌دهد که با افزایش عدد فرود مقدار ضریب دبی سرریز با زاویه صفر به طور ناگهانی افت می‌کند و سرریزهای با زاویه کلید مثبت عملکرد بهتری نسبت به سرریز متقارن از خود نشان می‌دهند. دلیل این موضوع این است که تلاطم جریان در اعداد فرود بالا عملکرد سرریز کلید پیانویی را کاهش می‌دهد. با توجه به مسیر جریان بخصوص در کلیدهای ورودی و سطح شیب‌دار آنها که می‌تواند جریان بیشتری را از کف کانال را انتقال دهد [۱۴] زاویه دار کردن کلید با زاویه‌ای نزدیک به زاویه برخورد جریان بازدهی سرریز را افزایش می‌دهد. سرریز با زاویه  $+30^\circ$  بالاترین ضریب دبی متوسط را در اعداد فرود بالا در میان سرریزهای کلید پیانویی جانبی در آزمایش‌های حاضر دارد که مطابق با مباحث مطرح شده در بخش زاویه جریان و شکل خطوط جریان

ضریب دبی یک نمودار ضریب دبی محاسبه شده با روش دیمارچی نیز برای مقایسه ارائه شده است.

برای بررسی تاثیر عدد فرود بر ضریب دبی، ضریب دبی سرریز جانبی در دو بازه  $0$  تا  $0/35$  و همچنین  $0/7$  تا  $0/7$  به ترتیب در اشکال ۱۲ و ۱۳ برای زوایای مختلف کلید نشان داده شده است. در این اشکال میزان ضریب دبی برای سرریزهای کلید پیانویی با زوایای مختلف نمایش داده شده است. در اعداد فرود کم (شکل ۱۲)، سرریزهای کلید پیانویی جانبی با زاویه صفر (PKSW) عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای با زاویه کلید مثبت ( $+15^\circ$ ،  $+30^\circ$ ،  $+45^\circ$ ) دارد. دلیل این امر این است که در اعداد فرود پایین میزان طولی از تاج جانبی که در معرض جریان عمود بر تاج قرار دارد بیشتر است. شکل ۱۳ نشان



شکل ۱۵. تغییرات ضریب دبی با زاویه کلید در سرریزهای کلید پیانویی جانبی در بازه های مختلف فرود

Fig. 15. Discharge coefficient versus  $\Theta$  for PKSW for different  $F_1$  ranges

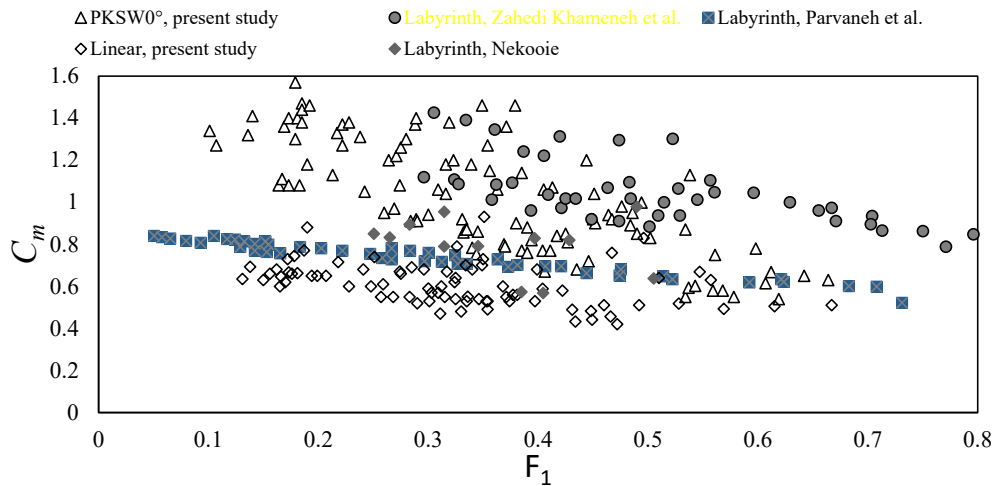
صفر مقدار ضریب دبی سیر صعودی داشته و در زاویه صفر، ضریب دبی به مقدار حداکثر خود می‌رسد. دلیل کم شدن میزان ضریب دبی در زاویه ۱۵+ کم شدن میزان طول تاج جانبی است که در معرض جریان عمود بر تاج قرار دارد و در عین حال زاویه ۱۵+ با زاویه انحراف در آن بازه عدد فرود اختلاف زیادی دارد که مجموع این عوامل باعث کاهش ضریب دبی شده است. در اعداد فرود پایین نیز بعد از زاویه صفر، زاویه ۳۰+ بیشترین میزان ضریب دبی را دارا می‌باشد. در اعداد فرود بالا حداکثر بودن ضریب دبی سرریز با زاویه ۳۰+ نشان دهنده تاثیر بیشتر همراستا بودن خطوط جریان با کلیدهای سرریز در این بازه از اعداد فرود است. در بازه اعداد فرود زیاد ضریب دبی سرریزهای با زاویه ۱۵+ و ۴۵+ تقریباً میزان مساوی دارد که نشان می‌دهد که انحراف از میزان بهینه زاویه کلید (در جهت بیشتر یا کمتر) به یک میزان باعث کاهش ضریب دبی می‌شود.

در ادامه برای مقایسه ضریب دبی محاسبه شده به روش اشمیت و دیمارچی و همینطور مقایسه نتایج ضریب دبی در تحقیق حاضر و سایر محققین، نتایج با سه تحقیق دیگر مقایسه شده است. شکل ۱۶ مقایسه ضریب دبی محاسبه شده با روش دیمارچی برای سرریز کلید پیانویی جانبی و خطی تحقیق حاضر و سرریزهای کنگره‌ای مثلثی تحقیقات زاهدی خامنه و همکاران [۱۸]، پروانه و همکاران [۱۲] و نکویی [۱۹] را نشان می‌دهد. جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی و هندسی تحقیقات مورد مقایسه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در آزمایش‌های حاضر مقدار ضریب دبی در اعداد فرود پایین (۰/۳۵

است. سرریز کلید پیانویی جانبی با زاویه ۳۰+ می‌تواند تا ۱۲ درصد ضریب دبی را نسبت به حالت متقارن در اعداد فرود بالا افزایش دهد. نتایج همچنین نشان می‌دهد سرریز کلید پیانویی با زاویه ۴۵+ ضریب دبی کمتری از سرریز با زاویه ۳۰+ دارد. افزایش زاویه کلید بیشتر از مقدار بهینه ۳۰+ درجه باعث تمایل خطوط جریان در جهتی معکوس مسیر معمول می‌شود و باز به کاهش ضریب دبی منجر می‌شود.

شکل ۱۴ ضریب دبی را برای سرریزهای با زاویه کلید منفی نشان می‌دهد. اگرچه این سرریزها نیز طول بیشتری از تاج جانبی را در معرض جریان عمود تاج دارند، اما به دلیل همراستا نبودن کلیدها که مسیر اصلی انتقال جریان هستند ضریب دبی کمتری نسبت به زوایای صفر و مثبت دارند.

دو عامل در عملکرد سرریز کلید پیانویی جانبی موثر است. یک عامل تاثیر عمود بودن جریان بر تاج جانبی است و عامل دیگر همراستا بودن جریان با زاویه کلیدها بخصوص کلیدهای ورودی است. این دو عامل در زوایای کلید مختلف و در اعداد فرود مختلف می‌توانند اثر متقابل داشته باشند و باعث هم‌افزایی شوند. برای نمایش بهتر تاثیر زاویه کلید، تغییرات ضریب دبی با زاویه کلید در سرریزهای کلید پیانویی جانبی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. بازه عدد فرود در شکل ۱۵ به شش بازه مختلف تقسیم بندی شده است و برای هر بازه متوسط عدد فرود به عنوان ضریب دبی بازه مورد بررسی بر روی نمودار نشان داده شده است. شکل ۱۵ نشان می‌دهد در بازه های عدد فرود کم، با افزایش مقدار زاویه کلید از زوایای منفی به طرف زاویه



شکل ۱۶. ضریب دبی دیمارچی برای سرریزهای جانبی  $PKSW_0^\circ$  و سرریز جانبی خطی تحقیق حاضر و سرریز جانبی دیگر محققین

Fig. 16. De-Marchi discharge coefficient for  $PKSW_0^\circ$  and linear side weir of the present study and side weirs of other studies

پروانه و همکاران [۱۲] و نکویی [۱۹] با مشخصات هندسی تقریباً مشابه نشان می‌دهد. بر اساس مقاله کریمی و همکاران [۱۴]، دو دلیل می‌تواند بالاتر بودن ضریب دبی سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز کنگره‌ای را توجیه کند. یک دلیل وجود سطوح شیب دار در کلیدهای ورودی است که جریان بیشتری از کف کانال به کلید وارد می‌کند. دلیل دیگر می‌تواند زاویه کمتر رئوس سرریز کلید پیانویی نسبت به پلان مستطیلی باشد که تداخل کمتری نسبت به رئوس زاویه‌دار سرریز کنگره‌ای مثلثی ایجاد می‌کند. با وجود نزدیکی نسبی، اختلاف موجود در بین نتایج تحقیقات می‌تواند به دلیل اختلاف در بازه هیدرولیکی و هندسی و همچنین در روش اندازه‌گیری و محاسبه ضریب دبی باشد.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر زوایای مختلف کلید در سرریز کلید پیانویی جانبی مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۱۶ سرریز شامل زوایای صفر، مثبت و منفی و سه ارتفاع مختلف همراه با سرریز خطی آزمایش شد. مشاهده رفتار جریان در سرریزها نشان داد که در اعداد فرود بالا تلاطم جریان و گردابه در سرریزهای با زاویه کلید صفر و منفی وجود دارد اما در سرریزهای با زاویه کلید مثبت این پدیده کمتر اتفاق می‌افتد. بررسی زاویه انحراف و خطوط جریان نشان داد که در اعداد فرود بالا، سرریزهای با زاویه کلید مثبت زاویه انحراف بیشتری از سرریزهای دیگر دارند و همچنین بخش بیشتری از عرض کانال را تحت تاثیر جریان سرریز قرار می‌دهد. بررسی رفتار جریان همچنین ضریب

$(F_1 < 2)$ ، در سرریزهای کلید پیانویی تحقیق حاضر تقریباً بیش از دو برابر سرریز خطی است که به دلیل مقدار بیشتر طول توسعه یافته تاج در سرریزهای کلید پیانویی است. اگرچه میزان افزایش ضریب دبی لزوماً به طور خطی با نسبت طول توسعه یافته سرریز (در این آزمایش  $L/W = 2/1$ ) افزایش نمی‌یابد. دلیل این موضوع تداخل جریان در زوایای برخورد تاج در سرریزهای با طول توسعه یافته است. نتایج نشان می‌دهند که میزان تداخل با افزایش سرعت بیشتر می‌شود. این نتیجه را می‌توان در شکل ۱۵ برای اعداد فرود بالاتر مشاهده کرد. در سرریزهای کلید پیانویی با افزایش سرعت جریان (افزایش عدد فرود) به شکل قابل توجهی از ضریب دبی کاسته می‌شود و به ضریب دبی سرریز خطی نزدیک می‌شود. همچنین نتایج شکل ۱۵ نشان می‌دهد که در سرریز خطی میزان کاهش ضریب دبی با افزایش فرود کمتر از سرریزهای کلید پیانویی است که دلیل آن کمتر بودن میزان تلاطم ایجاد شده در سرریزهای خطی است. مقایسه شکل ۱۵ با اشکال ۱۲ و ۱۳ همچنین نشان می‌دهد که با استفاده روش دیمارچی، روند تغییرات ضریب دبی یکسان است و تنها پراکندگی داده‌ها بیشتر است که با نتایج مقایسه روش دیمارچی و اشمیت در تحقیقات قبلی همخوانی دارد [۱۷]. به غیر از عدد فرود، عوامل دیگری نیز در ضریب دبی سرریز جانبی موثر هستند از جمله  $h/P$  که یکی از دلایل پراکندگی داده‌ها در نتایج ضریب دبی در برابر عدد فرود نیز همین است [۱۴]. شکل ۱۵ ضریب دبی بالاتر سرریز کلید پیانویی تحقیق حاضر را نسبت به سرریز کنگره‌ای تحقیق

$\theta$  زاویه انحراف °

$\theta$  زاویه کلید °

### زیرنویس

۱ بالادست سرریز

۲ پایین دست سرریز

### مراجع

- [1] K. Subramanya, Flow in open channels, 3 ed., Tata McGraw-Hill, New Delhi, India, 2008.
- [2] S. Bagheri, & Heidarpour M. , Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(6) (2012) 541-547.
- [3] K. Subramanya, & Awasthy, S. C. , Spatially varied flow over side weirs, Journal of Hydraulic Engineering Division, 98(1) (1972) 1-10.
- [4] W.H. Hager, Lateral outflow over side weirs, Journal of Hydraulic Engineering, 113(4) (1987) 491-504.
- [5] M. Ura, Kita, Y., Akiyama, J., Moriyama, H., & Jha, A. K. , Discharge coefficient of oblique side-weirs, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 19(1) (2001) 85-96.
- [6] T. Honar, & Javan, M. , Discharge coefficient in oblique side weirs, Iran Agricultural Research, 25-26(1-2) (2007) 27-36.
- [7] A. Maranzoni, Pilotti, M., & Tomirotti, M. , Experimental and Numerical Analysis of Side Weir Flows in a Converging Channel, Journal of Hydraulic Engineering, 143(7) (2017).
- [8] M.E. Emiroglu, Kaya, N., & Agaccioglu H. , Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel, Journal of Irrigation and Drain Engineering, 136(1) (2010) 37-46.
- [9] S. Borghei, Nekooie, M.A., Sadeghian, H., & Ghazizadeh M.R. , Triangular labyrinth side weirs with one and two cycles, Proc. ICE-Water Management, 166 (2013) 27-42.
- [10] F. Nezami, Farsadizadeh, D., & Nekooie, M. A. , Discharge coefficient for trapezoidal side weir,

دبی در اعداد فرود مختلف نشان داد که سرریز با زاویه ۳۰+ بهترین عملکرد را در میان سرریزهای با زوایای کلید دیگر (۰، ۱۵، ۴۵+) در اعداد فرود بالا دارد. سرریز های با زاویه کلید منفی عملکرد خوبی از خود نشان ندادند و ضریب دبی کمتر از سرریز متقارن با زاویه کلید صفر داشتند. با استفاده از دو روش اشمیت و دیمارچی برای محاسبه ضریب دبی مشخص شد در روش دیمارچی پراکندگی داده ها بیشتر از روش اشمیت است هرچند در نمایش نوع رفتار تفاوتی چندانی در دو روش وجود ندارد. نتایج این تحقیق می تواند به طراحی سرریز جانبی کلید پیاپی با حداکثر عملکرد در اعداد فرود مختلف کمک کند.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$A$	سطح مقطع آب $m^2$
$b$	عرض کانال $m$
$B$	عرض سرریز $m$
$C_d$	ضریب دبی اشمیت
$C_m$	ضریب دبی دیمارچی
$E$	انرژی مخصوص $m$
$F$	عدد فرود
$g$	شتاب ثقل $m/s^2$
$h$	هد پیژومتریک $m$
$P$	ارتفاع سرریز $cm$
$Q$	دبی در کانال اصلی $m^3/s$
$S_f$	شیب خط انرژی
$S_0$	شیب کف کانال
$T$	عرض کانال در سطح آزاد آب
$W$	عرض بازشدگی $m$
$W$	عرض بازشدگی $m$
$W_i$	عرض کلید ورودی $m$
$W_o$	عرض کلید خروجی $m$
$y$	عمق آب $m$

#### علائم یونانی

$\alpha$  ضریب تصحیح انرژی



- Hydraulic Engineering, 144(12) (2018).
- [15] G. De Marchi, Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali, L'Energia Elettrica 11(11) (1934) 849-860.
- [16] M. Schmidt, Zur frage des abflusses uber streichwehre, Techuniv Berlin Charlottenbury, NY41 (1954) 1-68.
- [17] M. Emiroglu, & Ikinociogullari, E. , Determination of discharge capacity of rectangular side weirs using Schmidt approach, Flow Measurement and Instrumentation, 50 (2016) 158-168.
- [18] H. Zahedi Khameneh, Khodashenas, S.R., Esmaili, K. , The effect of increasing the number of cycles on the performance of labyrinth side weir, Flow Measurement and Instrumentation, 39 (2014) 35-45.
- [19] M.A. Nekooie, Experimental study of discharge coefficient of a triangular labyrinth side weir, Sharif University. of Technology, 2006.
- Alexandria Engineering Journal, 54(3) (2015) 595-605.
- [11] M.E. Emiroglu, & Kaya, N. , Discharge coefficient for trapezoidal labyrinth side weir in subcritical flow, Water Resources Management, 25(3) (2011) 1037-1058.
- [12] A. Parvaneh, Borghei, S. M., & Jalili Ghazizadeh, M.R. , Hydraulic performance of asymmetric labyrinth side weirs located on a straight channel, Journal of Irrigation and Drain Engineering, 138(8) (2012) 766-772.
- [13] S. Erpicum, Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M, Hydraulics of Piano Key Weirs: A review, in: Labyrinth and Piano Key weirs III-PKW 2017, CRC press, 2017, pp. 27-36.
- [14] M. Karimi, Attari, J., Saneie, M., & Jalili Ghazizadeh, M.R. , Side Weir Flow Characteristics: Comparison of Piano Key, Labyrinth, and Linear Types, Journal of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. karimi, M.R. Jalili Ghazizadeh, M. Saneie, J. Attari, *Experimental study of piano key side weir with oblique keys*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7) (2020) 1671-1684.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15599.5970](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15599.5970)

