

Study of Hydraulic characteristics of flow over the asymmetric hydrofoil weirs


Elham Bahman¹, Abdorreza Kabiri-Samani^{2*}, Mohammad Navid Moghim³

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology.

2- Associate Prof., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology.

3- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology.

*akabiri@cc.iut.ac.ir

Received: 5 October 2019, Accepted: 15 February 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Weirs are one of the most common hydraulic structures and are used to regulate the upstream approach flow depth, measure the flow discharge, and evacuate the excess flow discharge in dams, irrigation and drainage networks. Based on the ratio of the total head of the upstream approach flow to the length of the weir, weirs of finite crest length are categorized into four main groups, namely sharp-crested, short-crested, broad-crested, and long-crested type weirs. The thickness of the crest results in different velocity and pressure profiles over the weir crest and consequently tends to various flow behaviors. The short-crested weirs are categorized as three different types, including ogee, circular-crested, and hydrofoil weirs. The hydrofoil weirs are a type of short-crested weirs that are designed on the basis of the airfoil theory. This kind of weirs has some merits compared to the other types, such as the high discharge coefficient, stability and submergence limit, and low fluctuations of pressure and water free-surface profile. Despite the extensive studies have been carried out on the hydraulic characteristics of the ogee and circular-crested weirs, there is a lack of comprehensive studies on the hydrofoil weirs, and therefore the flow characteristics over the hydrofoil weirs are still unknown.

Methodology: A hydrofoil weir is designed, on the basis of the Joukowski transformation function to the equation of a reference circle on the source coordinate plane. The weir pattern generated on the destination coordinate plane is a function of the radius and the coordinate of the center of the circle on the source coordinate plane. If the center of a circle in the source coordinate plane is offset just on the horizontal axis, the Joukowski transformation yields a symmetric hydrofoil. In this situation, if the center of a circle in the source coordinate plane is offset as large as the radius of the reference circle, the Joukowski transformation yields a circular-crested weir. On the other hand, if the center of the circle in the source coordinate plane is offset on both the horizontal- and vertical axis, the Joukowski transformation yields an asymmetric hydrofoil. So far, only three published studies have examined the flow characteristics over symmetrical hydrofoil weirs. In symmetric hydrofoil weirs, the height of the weir is small, therefore these weirs have received less attention by the researchers till now. Whereas, by applying the asymmetric hydrofoil weirs instead of the symmetric ones, the weir height increases to be used for practical purposes. The present research subjects to study the flow behavior over the asymmetric hydrofoil weirs using experimental and numerical models. An experimental and numerical study was conducted, applying three and five models of the

asymmetric hydrofoil weirs, respectively, designed on the basis of the Joukowski transform function. Numerical simulations were performed using open source, OpenFoam v.4.0.1, CFD software. The interFoam solver and the VOF (volume of fluid) method is used to achieve the water free surface profiles and the other hydrodynamic characteristics of the flow field. The PIMPLE (pressure implicit method for pressure linked equations) algorithm was applied to couple the pressure and velocity equations in two-phase flows. In the present study, structured meshes with hexahedral elements were created by the blockMesh utility of OpenFOAM software. To generate a finer grid mesh close to the weir body and along the water free surface, snappyHexMesh utility was applied. To validate the numerical results, former experimental results and the present experimental data of different hydrofoil weirs were applied. Based on the recommendations of former studies, the $k-\omega$ SST turbulence model was used for the determination of flow characteristics over the hydrofoil weirs.

Results and discussion: The results of the numerical simulations including different geometrical characteristics, showed that the asymmetric hydrofoil weirs decrease the possibility of cavitation and the range of positive pressure downstream of the weir compared to those of circular-crested weirs, without decreasing the weir height. Also, in the asymmetric hydrofoil weirs, the results demonstrated that the greatest bed shear stresses and the compressive forces occur at the downstream end of the hydrofoil weir with a more camber, therefore, the downstream zone of these weirs is responsible for large values of bed erosion. Furthermore, the possibility of the downstream bed erosion is the same for the circular-crested weirs and the asymmetric hydrofoil weirs, having equal height.

Conclusion: Finally, by applying asymmetric hydrofoil weirs instead of circular-crested weirs, unfavorable flow conditions would be removed, leading to a more safe and economic hydraulic structures, without decreasing the weir structural height.

Keywords: Bed shear stress, Joukowski transform function, OpenFoam software, Pressure distribution, Velocity profile.

ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در سرریزهای هیدروفویل نامتقارن

الهام بهمن^۱، عبدالرضا کبیری سامانی^{۲*}، محمدنوید مقیم^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

*akabiri@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶ ††††† وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: هدف از پژوهش حاضر بررسی و ارزیابی عددی و آزمایشگاهی جریان روی سرریزهای هیدروفویل نامتقارن (دارای خمیدگی) است. در این پژوهش به منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار متن‌باز OpenFoam v. 4.0.1 استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بررسی‌های پیشین و مدل‌های آزمایشگاهی سرریز هیدروفویل طراحی شده با استفاده از تابع تبدیل ژوکوفسکی در پژوهش حاضر، ارزیابی شدند. بنا بر توصیه‌های بررسی‌های پیشین، مدل آشفتگی SST k- ω برای شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزهای هیدروفویل استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به ازای ویژگی‌های هندسی متفاوت، نشان داد که استفاده از سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی، می‌تواند احتمال رخداد خلأزایی (کاویتاسیون) و دامنه فشارهای مثبت در پایین دست سرریز را نسبت به سرریز تاج‌دایره‌ای کاهش دهد؛ بدون آنکه ارتفاع سرریز کاهش یابد. همچنین نتایج نشان دادند که در سرریزهای هیدروفویل دارای خمیدگی، بیشترین تنش‌های برشی بستر و نیروهای فشاری در پایین دست سرریز هیدروفویل با خمیدگی بیشتر رخ می‌دهند و در نتیجه احتمال فرسایش در پایین دست این نوع از سرریزها بیشتر است. افزون بر این، احتمال رخداد فرسایش در پایین دست سرریز تاج‌دایره‌ای و سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی هم‌ارتفاع با آن یکسان است؛ اما محدوده رخداد فرسایش در سرریزهای تاج‌دایره‌ای بزرگتر از سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی هم‌ارتفاع آن است. بر مبنای نتایج به دست آمده، استفاده از سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی، می‌تواند مشکلات یاد شده در سرریزهای تاج‌دایره‌ای را مرتفع سازد، بدون آن که ارتفاع سرریز کاهش یابد.

کلید واژگان: تبدیل ژوکوفسکی، نرم‌افزار OpenFoam، نیم‌رخ سرعت، توزیع فشار، تنش برشی بستر.

۱- مقدمه

تقسیم‌بندی سرریزها، ضخامت تاج سرریز است. بر این مبنای سرریزها در سه گروه، سرریزهای لبه‌تیز، لبه‌باریک و لبه‌پهن تقسیم‌بندی می‌شوند. ضخامت تاج سبب می‌شود که توزیع فشار و سرعت روی تاج سرریز و در نتیجه آن رفتار سرریزها متفاوت باشد (Bos, 1976). در سرریزهای لبه‌باریک خطوط جریان عبوری از روی تاج سرریز دارای انحنا بوده و توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک است. اگرچه اجرای سرریزهای لبه‌باریک دشوارتر از سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن است، اما این سرریزها به علت چگونگی توزیع فشار و سرعت در بالای تاج خود دارای ضریب دبی بالاتری نسبت به

سرریزها از جمله سازه‌های مورد استفاده در سدها و شبکه‌های آبیاری هستند. این سازه‌ها در شبکه‌های آبیاری برای تنظیم و توزیع آب و در سدها به منظور کنترل ارتفاع و حجم آب و تخلیه سیلاب استفاده می‌شوند و بخش قابل توجهی از هزینه‌های ساخت سد را به خود اختصاص می‌دهند. این سازه‌ها دارای انواع گوناگونی هستند و به گونه‌ای طراحی می‌شوند که بیشترین سازگاری را با شرایط موجود و محیط پیرامون خود داشته باشند. سرریزها از جنبه‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین مورد در

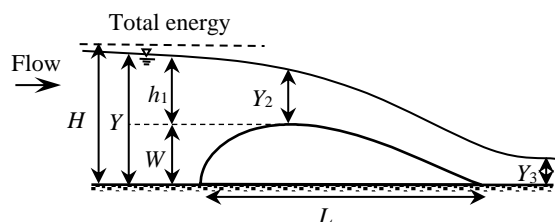


Fig. 1 Schematic view of a hydrofoil weir

شکل ۱ شمایی از سرریز هیدروفویل

Lakshmana Rao and Jagannadha Rao (1973) نخستین تحقیق را روی ویژگی‌های جریان در سرریزهای هیدروفویل متقارن انجام دادند. آنان از چهار مدل سرریز هیدروفویل متقارن و یک سرریز نیم‌استوانه‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که احتمال رخداد فشارهای منفی و در نتیجه آن خلأزایی در سرریزهای نیم‌استوانه‌ای بیشتر از سرریزهای هیدروفویل است. (Castro-Orgaz and Hager (2014) اثرگذاری‌های مقیاس بر جریان در روی سرریزهای لبه‌گرد، شامل سرریزهای هیدروفویل را بررسی کردند. آنان نشان دادند که در سرریزهای لبه‌گرد با کمترین شعاع انحنا تاج $R_b = 0.1 \text{ m}$ به‌ازای $H_1 \geq 0.4 \text{ m}$ ، جریان تحت تأثیر اثرگذاری‌های مقیاس نیست. (Bagheri (2017) ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در ۱۲ مدل سرریز هیدروفویل متقارن را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کرد. وی به منظور شبیه‌سازی عددی جریان در سرریزهای هیدروفویل از نرم‌افزار متن باز OpenFoam استفاده کرد و مدل آشفتگی SST $k-\omega$ را به عنوان یک مدل آشفتگی مناسب در شبیه‌سازی جریان عبوری از روی این سرریزها معرفی کرد. نتایج وی نشان داد که در یک دبی ثابت، کمترین فشار کف و در نتیجه آن بیشترین احتمال رخداد خلأزایی مربوط به سرریز تاج دایره‌ای است. همچنین بیشترین تنش‌های برشی بستر و در نتیجه بیشترین احتمال فرسایش در پایین‌دست سرریزهای تاج دایره‌ای رخ می‌دهد.

ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در سرریزهای هیدروفویل تاکنون تنها با در نظر گرفتن پارامتر خروج از مرکزیت نسبی در طراحی سرریز که نشان‌دهنده ضخامت ایرفویل در نظریه باله‌هاست، بررسی شده است. در این حالت یک سرریز هیدروفویل متقارن حاصل می‌شود. در صورتی که اگر تنها

سرریزهای لبه‌پهن و لبه‌تیز هستند. سرریزهای لبه‌باریک دارای انواع مختلفی هستند که از آن جمله می‌توان به سرریزهای لبه‌آبریز و سرریزهای خط جریانی یا هیدروفویل^۱ اشاره کرد. در طراحی سرریزهای هیدروفویل از نظریه (تئوری) باله‌ها استفاده می‌شود (شکل ۱) (Jacobs et al., 1933). در این شکل ارتفاع سرریز، L طول سرریز، H_1 و h_1 به ترتیب بار (هد) کل و عمق آب در بالادست نسبت به تاج سرریز و Y_1 و Y_2 به ترتیب عمق جریان در بالادست، روی تاج و پایین‌دست سرریز هستند. سرریز تاج دایره‌ای نوع خاصی از سرریزهای هیدروفویل است. سرریزهای هیدروفویل به‌علت دارا بودن مقطع خط‌جریانی دارای برتری‌های فراوانی هستند که از آن جمله می‌توان به بالا بودن ضریب دبی در این سرریزها اشاره کرد. این سرریزها نسبت به سرریزهای دیگر آشفتگی کمتری را در طول مسیر جریان ایجاد می‌کنند و دارای حد استغراق و پایداری بیشتری هستند و جریان فرو (زیر) بحرانی بالادست را به آرامی و با سطحی هموار و بدون آشفتگی به جریان فرا (فوق) بحرانی در پایین‌دست تبدیل می‌کنند (Bagheri, 2017; Bagheri and Kabiri-Samani, 2017). با توجه به شکل خاص سرریزهای هیدروفویل، این نوع از سرریزها در صورتی که به صورت معکوس در مسیر جریان فرابحرانی به فروبحرانی قرار گیرند، می‌توانند باعث حذف پرش هیدرولیکی در تبدیل جریان فرابحرانی به فروبحرانی شوند (Kabiri-Samani et al., 2014). سرریزهای لبه‌آبریز تا به امروز توجه بسیاری از محققین را به خود معطوف داشته‌اند (Hager, 1991; Savage and Johnson, 2001; Johnson and Savage, 2006; Tullis, 2011; Hong et al., 2018). در میان سرریزهای هیدروفویل نیز تاکنون بررسی‌های زیادی در زمینه سرریزهای تاج دایره‌ای انجام شده است (Matthew, 1963; Montes, 1970; Sarginson, 1972; Ramamurthy and Vo, 1993; Chanson and Montes, 1998; Heidarpour and Chamani, 2006; Castro-Orgaz, 2008; Schmockler et al., 2011; Kabiri-Samani and Bagheri, 2014; Castro-Orgaz and Hager, 2017). در مقابل بررسی‌های انجام شده در زمینه دیگر سرریزهای هیدروفویل اندک است.

¹ Streamlined or hydrofoil weirs

راستای محور افقی ($\lambda = c_v/R$) و خمیدگی β است. در صورتی که دایره در مبدأ مختصات واقع شده باشد، نتیجه تبدیل، یک خط در صفحه z خواهد بود. در صورتی که دایره دارای خروج از مرکزیت در راستای ξ باشد، یک هیدروفویل متقارن (بدون خمیدگی) و در شرایطی که دایره دارای خروج از مرکزیت در راستای η باشد، یک هیدروفویل نامتقارن (با خمیدگی) به وجود می آید (Olver, 2014). نوع خاصی از سرریز هیدروفویل با خروج از مرکزیت نسبی برابر یک، سرریز تاج دایره‌ای است (شکل ۲b).

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور ارزیابی نتایج مدل سازی عددی و مقایسه رفتار جریان عبوری از روی سرریزهای هیدروفویل نامتقارن با خمیدگی‌های متفاوت و سرریز تاج دایره‌ای با شعاع ۲۰ سانتی متر در بررسی‌های Bagheri and Kabiri- Samani (2017)، مدل آزمایشگاهی سرریز هیدروفویل نامتقارن با شعاع دایره مرجع ۲۰ سانتی متر، خروج از مرکزیت نسبی ۰/۳۷۵، خمیدگی‌های ۰/۱ و ۰/۲ و شیب بالادست 90° با استفاده از رابطه (۲) طراحی و به صورت آزمایشگاهی مدل سازی شدند. ویژگی‌های هندسی مدل‌های یاد شده در جدول ۱ ارائه شده است. برای ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، در آغاز نیمرخ طولی همه‌ی مدل‌ها با نرم افزار AutoCad رسم شد. آنگاه برای هر طرح ترسیم شده، دو مقطع طولی بر روی ورق آهن ایجاد و این دو مقطع با استفاده از ورق آهن ضدزنگ با عرضی برابر با عرض کانال به یکدیگر متصل شدند. به منظور برداشت نیمرخ تغییرهای فشار وارد بر کف سازه، سوراخ‌هایی به قطر ۲ میلی متر در خط مرکزی سازه و به فاصله‌های مشخص ایجاد شدند و لوله پیزومتر به هر یک از این سوراخ‌ها متصل شد. هر یک از مدل‌های ساخته شده در کانال آزمایشگاه با طول ۱۱، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۷ متر مستقر و توسط چسب آکواریوم آب بندی شدند.

برای اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از یک دبی‌سنج الکترومغناطیس، برای برداشت نیمرخ‌های سرعت از دستگاه سرعت‌سنج صوتی داپلر ADV و برای تعیین عمق جریان از

پارامتر خروج از مرکزیت نسبی در طراحی سرریزها استفاده شود؛ ارتفاع سرریز کم شده و باعث غیرکاربردی شدن این نوع سرریزها خواهد شد. به همین دلیل استفاده از این نوع سرریزها تا به امروز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در صورتی که در طراحی سرریز هیدروفویل افزون بر پارامتر خروج از مرکزیت نسبی، از پارامتر خمیدگی در نظریه باله‌ها نیز استفاده شود، ارتفاع سرریز بیشتر می‌شود، بدون آنکه طول سرریز تغییر کند. در این حالت یک سرریز هیدروفویل نامتقارن حاصل می‌شود. هدف از پژوهش حاضر بررسی جامع‌تر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزهای هیدروفویل نامتقارن (دارای خمیدگی) با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی است.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- طراحی سرریز هیدروفویل نامتقارن

یک سرریز هیدروفویل با اعمال تبدیل همدیس ژوکوفسکی^۱ به مقطع دایره ایجاد می‌شود. شکل ۲a مقطع دایره را در صفحه w با خروج از مرکزیت c نشان می‌دهد. معادله این دایره با شعاع R در صفحه w به صورت زیر است:

$$w - w_0 = R \exp(i\theta)$$

$$w = \kappa + R[\exp(i\theta) - \exp(-i\beta)]$$

$$-\beta \leq \theta \leq 2\pi - \beta \quad (1)$$

با اعمال تبدیل ژوکوفسکی ($z = w + \kappa^2/w$) معادله هیدروفویل در صفحه z به صورت زیر به دست می‌آید:

$$z = \kappa + R[\exp(i\theta) - \exp(-i\beta)] + \frac{\kappa^2}{\kappa + R[\exp(i\theta) - \exp(-i\beta)]} \quad (2)$$

در رابطه‌های بالا، $z = x + iy$ متغیر مختلط در صفحه جدید و $w = \xi + i\eta$ متغیر مختلط در صفحه اصلی است. پارامترهای ξ ، η ، x و y اعداد حقیقی و i یکه موهومی با ویژگی $i^2 = -1$ است. پارامتر ثابت تبدیل ژوکوفسکی $\kappa = |c_v|/R$ است و پارامتر خمیدگی $\beta = \sin^{-1}(c_v/R)$ است. ویژگی‌های هیدروفویل حاصل از تبدیل ژوکوفسکی وابسته به شعاع و میزان خروج از مرکزیت نسبی دایره اصلی در

¹ Joukowski conformal transformation

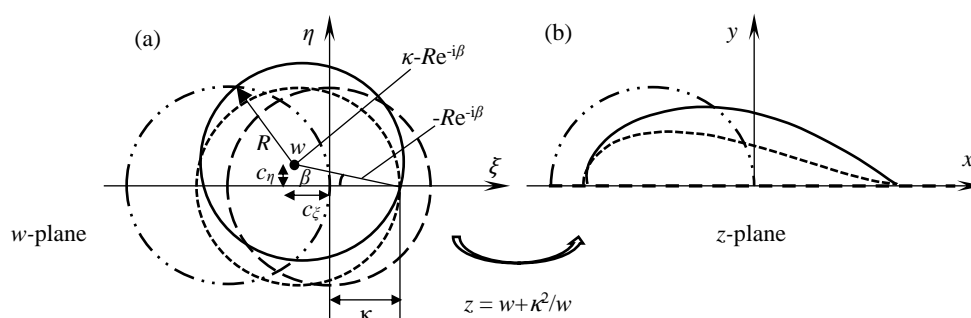


Fig. 2 (a) Reference circles with eccentricity $w_0 = (c_\xi, c_\eta)$ and (b) hydrofoil shapes created from Joukowski transformation
شکل ۲ (a) مقطع دایره مرجع با خروج از مرکزیت $w_0 = (c_\xi, c_\eta)$ (b) مقطع هیدروفویل به دست آمده از تبدیل ژوکوفسکی

corrected برای ترم لاپلاسین و Gauss linearUpwind و Gauss vanleer به ترتیب برای مقادیر سرعت و آلفا در ترم دیورژانس استفاده شد. به منظور حل معادله‌های گسسته شده ناپیراستوکس، از الگوریتم PIMPLE که یک روش ضمنی فشار مبنا برای معادله‌های وابسته به فشار است، بر مبنای ترکیبی از الگوریتم‌های حل SIMPLE و PISO، استفاده شد (Gourbesville et al., 2016; HU et al., 2018). به منظور ترسیم هندسه و تولید شبکه، در آغاز شبکه پایه به طول ۳، ارتفاع ۰/۵ و عرض ۰/۳ متر با استفاده از فایل blockMesh ایجاد شد. آنگاه برای ترسیم سرریزها از نرم‌افزار Salome و برای تولید مش سه‌بعدی و ریز کردن مش از ابزار SnappyHexMesh استفاده شد. شکل ۴ نمونه‌ای از مش ایجاد شده در اطراف یک سرریز هیدروفویل را نشان می‌دهد. در این بررسی به علت نتایج بهتر مدل آشفتگی SST $k-\omega$ در سرریزهای هیدروفویل، از مدل آشفتگی SST $k-\omega$ استفاده شد (Bagheri, 2017).

یک عمق‌سنج مکانیکی با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. نمایی از مدل‌های ساخته شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی مدل‌های آزمایشگاهی

Table 1 Geometric characteristics of the experimental models

model	R (m)	λ	β	W (m)	L (m)
E_1	0.2	0.375	0	0.137	0.582
E_2	0.2	0.375	0.1	0.159	0.581
E_3	0.2	0.375	0.2	0.182	0.578



Fig. 3 A number of experimental models

شکل ۳ شماری از مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی

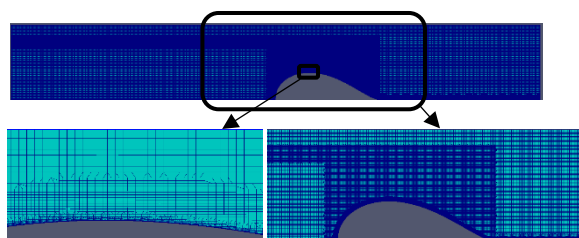


Fig. 4 Mesh generation around a hydrofoil weir
شکل ۴ مش ایجاد شده در اطراف سرریز هیدروفویل

در این مدل‌سازی به دلیل کاهش هزینه محاسبات، برای دیواره‌های جانبی کانال از شرط مرزی symmetry Plane استفاده شد. برابر با این شرط، به جای شبیه‌سازی سه‌بعدی

۲-۳- مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر به منظور مدل‌سازی عددی جریان روی سرریزهای مورد بحث از نرم‌افزار OpenFoam v. 4.0.1 استفاده شد. نرم‌افزار OpenFoam به زبان C++ نگارش یافته است. برای حل جریان دوفازی از حلگر interFoam که بر مبنای روش جزء حجم سیال (VOF) توسعه یافته، استفاده شده است (Lopes, 2013). برای گسسته‌سازی رابطه‌های اندازه حرکت و پیوستگی در دامنه حل از روش حجم محدود و روش‌های گسسته‌سازی Euler برای ترم زمانی، Gauss linear برای ترم گرادیان، Gauss linear

تغییر چندانی را در نتایج ایجاد نمی‌کند که این امر نشان‌دهنده کفایت شمار مش مورد استفاده است. به‌منظور بررسی کیفیت مش در نزدیکی بدنه سرریز مقدار y^+ برابر ۵۱ محاسبه شد که در محدوده مجاز قرار دارد.

جدول ۲ شمار سلول‌ها و نقاط در سه حالت شبکه‌بندی سرریز هیدروفویل

Table 2 Number of cells and points in three meshing around a hydrofoil weir

	Number of points	Number of cells
Mesh 1	80569	63175
Mesh 2	164489	130860
Mesh 3	200268	159534

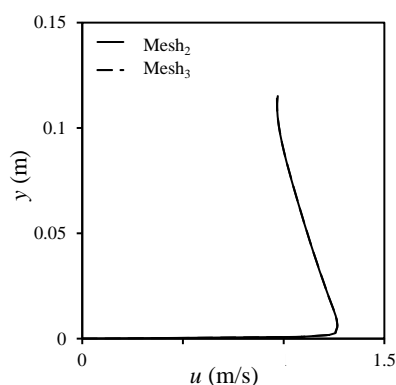


Fig. 5 Velocity distribution over the crest of a hydrofoil weir with different meshing for $Q = 50 \text{ lit/s}$

شکل ۵ توزیع سرعت روی تاج سرریز هیدروفویل به‌ازای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه حاصل از دو شبکه‌بندی متفاوت

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی، مدل آشفتگی SST $k-\omega$ در ارتباط با مدل آزمایشگاهی E_2 استفاده شد. ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی جریان به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳ ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی جریان استفاده

شده برای صحت‌سنجی مدل عددی

Table 3 Geometric and hydraulic characteristics of flow applied for verification of the numerical model

model	Q (lit/s)	Y_1 (m)	Y_2 (m)	Y_3 (m)
E_2	70	0.349	0.142	0.075

به شبیه‌سازی دوبعدی مدل پرداخته شده و نتایج حاصل از مدل دوبعدی به کل سیستم تعمیم داده می‌شود. در فایل فشار (فایل P-rgh که بیانگر فشار پویایی یا دینامیکی است) برای ورودی، خروجی و دیواره‌ها از شرط مرزی گرادینان صفر و برای مرز بالایی کانال از شرط مرزی total Pressure استفاده شد که مقدار آن برابر فشار اتمسفر است. برای سرعت در ورودی کانال از شرط مرزی variable Height Flow Rate Inlet Velocity استفاده شد که با توجه به آن، مقدار ثابت دبی در واحد عرض برای ورودی کانال در نظر گرفته شد. سرعت در خروجی کانال توسعه یافته هیدرودینامیکی فرض شد و از شرط مرزی zero Gradient استفاده شد. مقدار سرعت روی دیواره‌ها برابر اصل عدم لغزش صفر در نظر گرفته شد که با توجه به آن شرط مرزی fixed Value به مدل اعمال شد. در فایل‌های k و ω ، برای ورودی از شرط مرزی fixed Value و برای خروجی و اتمسفر از شرط مرزی inlet Outlet استفاده شد (Farshi et al., 2018). در فایل‌های k و ω ، برای شرایط مرزی روی دیواره‌ها از تابع دیواره^۱ استفاده شد که با توجه به آن مقدار $y^+ = yu^*/\nu$ در محدوده بین ۳۰ تا ۳۰۰ قرار می‌گیرد. در رابطه یاد شده، u^* سرعت برشی، y فاصله از بستر و ν لزجت سینماتیکی سیال است (Tennekes and Lumley, 1972).

بررسی همگرایی با استفاده از کنترل خطا در رابطه پیوستگی نسبت به زمان انجام شد که تغییرپذیری‌های خطای جرم با زمان کمتر از 10^{-9} بود. همچنین دبی در مقطع ورودی و خروجی کانال مقایسه شد که پس از گذشت در حدود ۵ ثانیه از آغاز حل، دبی ورودی با میانگین زمانی دبی خروجی یکسان بود که دلیل بر همگرایی نتایج است. به‌منظور تحلیل (آنالیز) حساسیت شبکه و بررسی شمار مش بهینه، مدل E_2 در سه حالت مش‌بندی ارزیابی شد (جدول ۲). در حالت شبکه‌بندی درشت (Mesh1) حل واگرا و در دو حالت دیگر حل همگرا شد. شکل ۵ نیمرخ‌های سرعت را روی تاج سرریز مورد بررسی، حاصل از شبکه‌بندی مورد استفاده در این بررسی (Mesh 2) و شبکه‌بندی ریزتر شده (Mesh 3) نشان می‌دهد. برابر با این شکل، شبکه ریزتر

¹ Wall function

شبهه‌سازی دوبعدی مدل به جای شبهه‌سازی سه‌بعدی و تعمیم نتایج حاصل از مدل دوبعدی به مدل سه‌بعدی، نیمرخ‌های سطح آب و نیمرخ‌های سرعت در تاج و بالادست سرریز افزون بر صفحه مرکزی کانال، در صفحه‌ای واقع در فاصله ۵ سانتی متری از دیواره کانال برای مدل آزمایشگاهی E_2 اندازه‌گیری شدند. شکل ۹ نتایج نیمرخ سرعت حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV را در صفحه مرکزی و صفحه واقع در فاصله ۵ سانتی متری از دیواره کانال نشان می‌دهد. بنا بر نتایج، بیشینه تفاوت سرعت‌ها بر روی تاج سرریز در حدود ۲ درصد و در بالادست سرریز در حدود ۷ درصد است. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت که استفاده از شرط مرزی صفحه متقارن و شبهه‌سازی دوبعدی جریان بر روی سرریز هیدروفویل دارای دقت قابل قبول بوده و نتایج قابل تعمیم هستند.

۳-۲- تحلیل نتایج به‌دست آمده از شبهه‌سازی عددی

در این بخش، به منظور بررسی تأثیر تغییر پارامتر خمیدگی بر رفتار جریان عبوری از سرریزهای هیدروفویل و مقایسه سرریز هیدروفویل نامتقارن با سرریز تاج دایره‌ای، رفتار جریان در ۴ سرریز هیدروفویل با خمیدگی‌های متفاوت و یک سرریز تاج دایره‌ای به‌ازای دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه ارزیابی می‌شود. ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی جریان در سرریزهای مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است.

در شکل ۱۰ نیمرخ‌های بی‌بعد سطح آب عبوری از روی سرریزهای هیدروفویل با خمیدگی‌های متفاوت و سرریز تاج دایره‌ای نشان داده شده است. بر مبنای این شکل، با افزایش خمیدگی، انحنای خطوط جریان افزایش می‌یابد. دلیل این امر پیروی جریان عبوری از شکل سازه مستقر در مسیر جریان است. برابر با جدول ۴، تغییرپذیری‌های اعماق جریان روی تاج این سرریزها اندک است و لذا برابر با رابطه پیوستگی، سرعت جریان روی تاج سرریز با افزایش خمیدگی تغییر نمی‌کند در سرریزهای یاد شده با افزایش ارتفاع سرریز، انرژی پتانسیل تیغه ریزشی جریان افزایش یافته و در نتیجه سرعت جریان در پایین‌دست سرریز افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان در پایین‌دست سرریز، برابر با رابطه پیوستگی، عمق جریان در پایین‌دست

در این جدول Q دبی جریان است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نتایج نیمرخ سطح آب و توزیع فشار کف در طول کانال و سرریز حاصل از مدل عددی اجرا شده را همراه با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند. در شکل ۷، ΔP اختلاف فشار کف در بالادست سازه و فشار کف در نقطه مورد بررسی و وزن مخصوص سیال است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی عددی به داده‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و تفاوت‌ها در حد میلی‌متر است. این اختلاف در شکل ۶ ناشی از نوسان‌های سطح آب و دقت عمق‌سنج و در شکل ۷ مربوط به دقت خط‌کش در خواندن پیژومترها و نوسان‌های پیژومترها است. نتایج نیمرخ سرعت به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی، همراه با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سرعت‌سنج ADV در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تفاوت در نیمرخ‌های سرعت حاصل از مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی تنها در حد چند صدم متر بر ثانیه است. با توجه به نتایج حاصل، مدل $SST k-\omega$ دارای دقت قابل قبولی در شبهه‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریزهای هیدروفویل بوده است. به‌منظور ارزیابی فرض

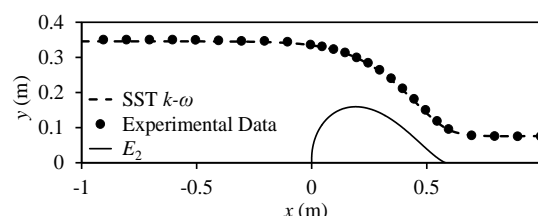


Fig. 6 Measured water free-surface profile compared with the numerical results

شکل ۶ مقایسه نیمرخ سطح آب اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

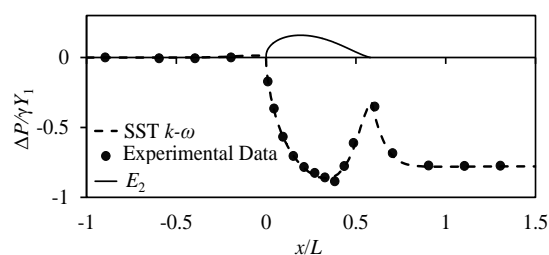


Fig. 7 Measured bed pressure profiles compared with the numerical results

شکل ۷ مقایسه نیمرخ فشار کف اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

در شکل ۱۱ نیمرخ‌های بی‌بعد فشار کف در طول کانال و سرریزهای هیدروفویل مختلف و سرریز تاج دایره‌ای برای یک دبی ثابت ترسیم شده‌اند. با ورود جریان به محدوده سرریز و افزایش سرعت، فشار وارد بر کف کاهش یافته و این کاهش فشار تا پس از تاج سرریز ادامه می‌یابد. سپس تا انتهای سرریز افزایش یافته و پس از آن بار دیگر کاهش می‌یابد. به منظور تفسیر چگونگی تغییرپذیری‌های فشار در راستای طولی این سازه به بحث در ارتباط با تأثیر نیروی مرکزگرا پرداخته می‌شود (Bagheri, 2017).

سرریز کاهش می‌یابد. این امر نیاز به کف‌بند و پیش‌بینی تمهیدهای لازم برای مقاوم سازی بستر پایین‌دست سرریزهای هیدروفویل با خمیدگی بیشتر را تقویت می‌کند. همچنین در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین سرریز تاج دایره‌ای (مدل N_1) و سرریز هیدروفویل هم‌ارتفاع با سرریز تاج دایره‌ای (مدل N_5) انجام شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نیمرخ سطح آب جریان عبوری از روی سرریز تاج دایره‌ای نسبت به سرریز هیدروفویل هم‌ارتفاع با آن دارای انحنای بیشتری است.

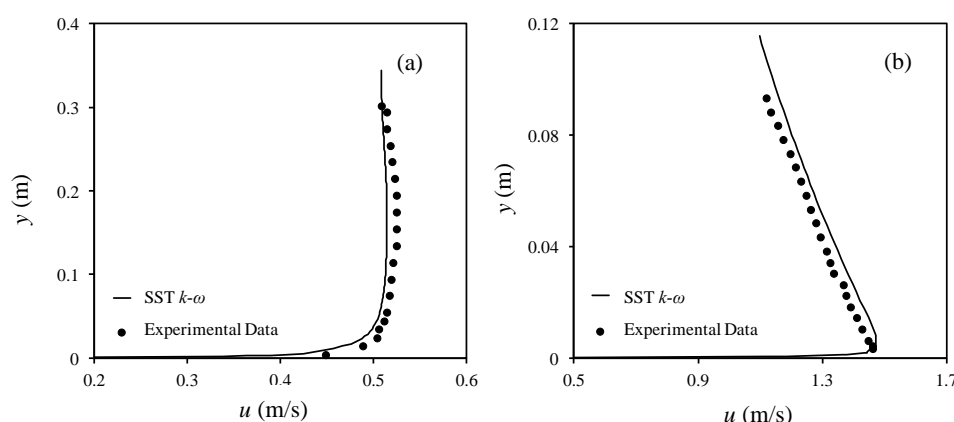


Fig. 8 Measured velocity profiles compared with the numerical results (a) upstream of the weir and (b) over the weir crest
شکل ۸ مقایسه نیمرخ‌های سرعت اندازه‌گیری شده با نتایج به‌دست آمده از مدل سازی عددی (a) بالادست سرریز (b) تاج سرریز

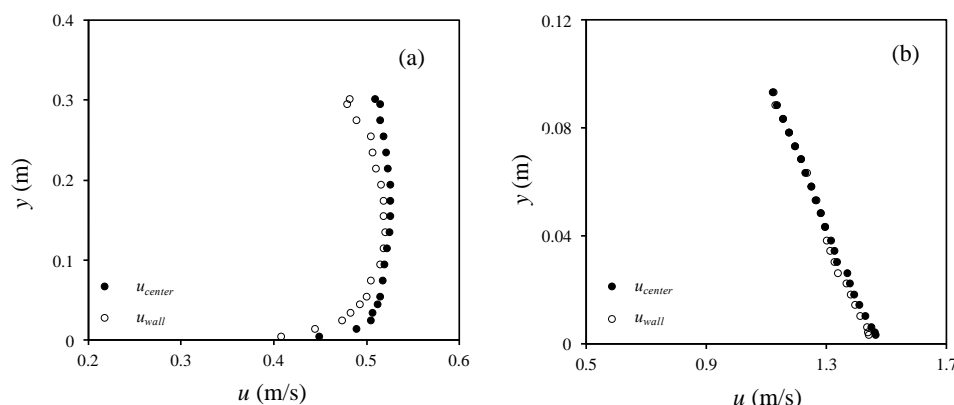


Fig. 9 Measured velocity profiles in the central plane of the experimental channel compared to those at a plane 5 cm from the channel side-wall (a) upstream of the weir and (b) over the weir crest

شکل ۹ مقایسه نیمرخ‌های سرعت اندازه‌گیری شده در صفحه مرکزی و صفحه واقع در فاصله ۵ سانتی‌متری دیواره کانال آزمایشگاهی (a) بالادست سرریز (b) تاج سرریز

جدول ۴ ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی جریان در سرریزهای هیدروفویل دارای خمیدگی به ازای دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

Table 4 Geometric and hydraulic characteristics of flow over the asymmetric hydrofoil weirs with $Q = 70$ lit/s

model	R (m)	λ	β	W (m)	Q (lit/s)	Y_1 (m)	Y_2 (m)	Y_3 (m)
N_1	0.2	1	0	0.2	70	0.382	0.132	0.075
N_2	0.2	0.375	0	0.137	70	0.325	0.141	0.078
N_3	0.2	0.375	0.1	0.159	70	0.347	0.141	0.075
N_4	0.2	0.375	0.2	0.182	70	0.372	0.139	0.071
N_5	0.2	0.375	0.3	0.2	70	0.392	0.141	0.073

کند. همچنین در سرریز تاج دایره‌ای، فشارهای مثبت، دامنه گسترده‌تری از پایین‌دست سرریز را فرا می‌گیرند و لذا این مشکل نیز در سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی و ارتفاعی معادل با ارتفاع سرریز تاج‌دایره‌ای رفع شده است. این امر را می‌توان به وجود امواج ضربه‌ای در پایین‌دست سرریز تاج دایره‌ای نسبت داد. در صورتی‌که بنا بر مشاهده‌های آزمایشگاهی جریان عبوری از روی سرریزهای هیدروفویل مورد آزمایش، روی یک سطح پیوسته در امتداد سازه سرریز حرکت کرده و از بالادست تا پایین‌دست سرریز بدون آشفتگی است (شکل ۱۲). شکل ۱۳a توزیع سرعت روی تاج سرریزهای هیدروفویل را به‌ازای دبی ثابت نشان می‌دهد. در این شکل سرعت روی تاج سرریز با سرعت معادل $(2gh_1)^{1/2}$ بی‌بعد شده است. بنا بر نتایج به‌دست آمده، در همه‌ی سرریزهای هیدروفویل، بیشینه سرعت جریان در نزدیکی سطح تاج سرریز رخ داده و به سمت سطح آب میزان سرعت کاهش می‌یابد. این امر تا حدودی ناشی از اثر "کواندا" است که در آن جریان شتاب‌دار موجود بر تاج سرریز سبب ایجاد بیشینه سرعت در لبه لایه مرزی می‌شود (Chanson and Montes, 1998).

برابر با اثر کواندا، جت سیالی که در راستای خط راست از نزدیکی یک سطح محدب می‌گذرد، به سمت آن سطح متمایل می‌شود. چرا که بر اثر انتقال جت سیال به هوای بین سطح محدب و جت، این بخش از هوا شتاب می‌گیرد؛ اما به‌علت وجود سطح و مانع شدن آن از جایگزین شدن هوا، فشار در آن ناحیه کاهش می‌یابد که خود منجر به کشیده شدن جت سیال به سمت این ناحیه می‌شود

برابر با انحنای سازه سرریز، انحنای خطوط جریان از آغاز تا نقطه‌ای پس از تاج سرریز محدب است. این امر ناشی از تفاوت در جهت نیروهای مرکزگرا و ثقل بوده و در نتیجه سبب کاهش فشار در قسمت ابتدایی سرریز می‌شود. در قسمت انتهایی سرریز، انحنای سازه سرریز به صورت مقعر بوده و در نتیجه نیروهای مرکزگرا و ثقل هم‌جهت شده و سبب افزایش فشار می‌شوند. در انتهای سرریز انحنای خطوط جریان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که این امر سبب کاهش ناگهانی فشار می‌شود. بعد از سازه سرریز نیز عمق، سرعت جریان و فشار به میزان به نسبت ثابتی می‌رسند. برابر با این شکل، در سرریزهای هیدروفویل با خمیدگی‌های متفاوت، هر چه خمیدگی سرریز بیشتر شود، نقطه کمینه فشار به فاصله‌های دورتر از تاج منتقل می‌شود. چرا که با افزایش خمیدگی، نقطه تبدیل انحنای محدب به مقعر در فاصله دورتری از تاج سرریز رخ می‌دهد. کمینه فشار کف در این سرریزها با افزایش خمیدگی افزایش یافته و در نتیجه احتمال رخداد خلأزایی نیز افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین فشار وارد بر پایین‌دست و در نتیجه آن بیشترین لزوم مقاوم‌سازی بستر متعلق به سرریز هیدروفویل با خمیدگی بیشتر است. در شکل ۱۱ مقایسه‌ای بین سرریز تاج‌دایره‌ای (مدل N_1) و سرریز هیدروفویل هم‌ارتفاع با آن (مدل N_5)، انجام شده است. بر مبنای این مقایسه، احتمال رخداد خلأزایی در سرریز تاج‌دایره‌ای بیشتر از سرریز هیدروفویل هم‌ارتفاع با آن است. در نتیجه بهره‌گیری از سرریز هیدروفویل با خمیدگی می‌تواند مشکل خلأزایی را تا حدود زیادی برطرف کند، بدون آنکه ارتفاع سرریز تغییر

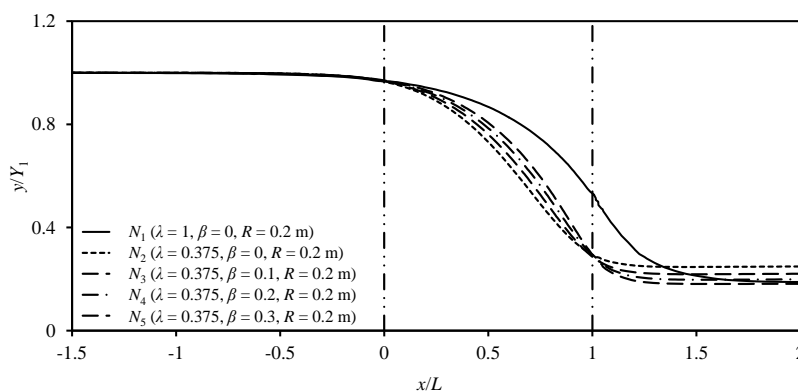


Fig. 10 Dimensionless water surface profiles for different hydrofoil weirs with $Q = 70$ lit/s
شکل ۱۰ نیمرخ‌های بی‌بعد سطح آب در سرریزهای هیدروفویل مختلف به‌ازای دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

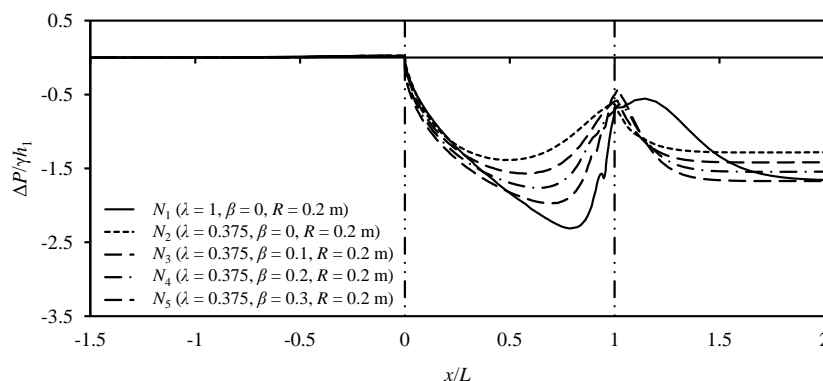


Fig. 11 Dimensionless bed pressure profiles for different hydrofoil weirs with $Q = 70$ lit/s
 شکل ۱۱ نیمرخ‌های بی‌بعد فشار کف در سرریزهای هیدروفویل مختلف به‌ازای دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

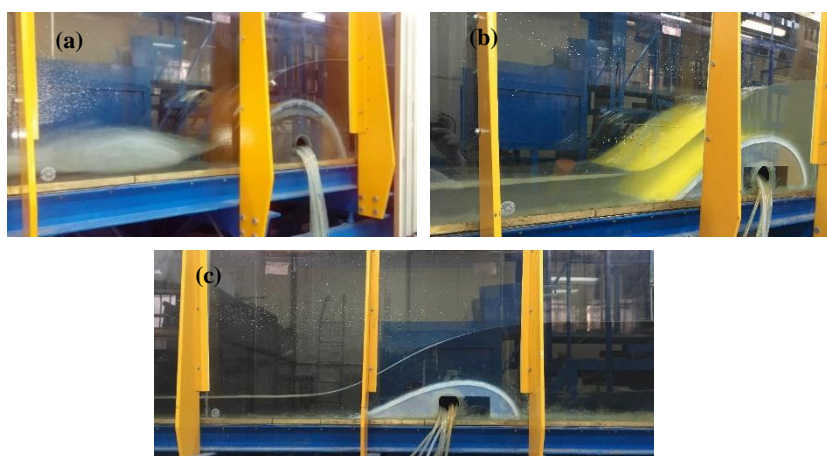


Fig. 12 Flow behavior over (a) circular-crested weir (Bagheri and Kabiri-Samani, 2017) compared to that over (b) asymmetric hydrofoil weir E_3 , with $\beta = 0.2$ and (c) symmetric hydrofoil weir E_1 , with $\beta = 0$
 شکل ۱۲ مقایسه رفتار جریان عبوری از روی (a) سرریز تاج دایره‌ای (Bagheri and Kabiri-Samani, 2017)، (b) سرریز هیدروفویل نامتقارن E_3 با $\beta = 0.2$ و (c) سرریز هیدروفویل متقارن E_1 با $\beta = 0$

پارامتر تنش برشی بستر برای تعیین پتانسیل فرسایش و رسوب‌گذاری در طول کانال در بررسی سرریزها دارای اهمیت است. در شکل ۱۴ تغییرپذیری‌های نیمرخ‌های بی‌بعد تنش برشی بستر در طول کانال و سازه سرریز به‌ازای مقادیر مختلف خمیدگی نشان داده شده است. در این شکل τ_b تنش برشی بستر و τ_{bmax} بیشترین تنش برشی بستر است. با توجه به شکل، در بالادست سازه سرریز میزان تنش برشی بستر اندک بوده و این محل مستعد رسوب‌گذاری است. در طول سازه سرریز، در آغاز با کاهش فشار و در نتیجه افزایش سرعت، تنش برشی بستر افزایش یافته و این افزایش تا نقطه‌ای پس از تاج سرریز ادامه می‌یابد. آنگاه با افزایش فشار و در نتیجه کاهش سرعت، تنش برشی بستر کاهش یافته و کمترین تنش برشی در انتهای سرریز مشاهده می‌شود با توجه به کاهش چشمگیر انحنای خطوط

(Jensch et al., 2008). در سرریزهای هیدروفویل با خمیدگی‌های متفاوت، طول سازه سرریز به نسبت ثابت است و با افزایش خمیدگی، انحنای سازه سرریز در نقطه‌ای دورتر از تاج سرریز تغییر می‌کند. در نتیجه در سرریزهای یاد شده، تغییرپذیری‌های اعماق جریان روی تاج سرریز اندک بوده و برابر با رابطه پیوستگی سرعت جریان و در نتیجه آن فشار روی تاج سرریز با افزایش خمیدگی تغییر نمی‌کند (شکل ۱۳b). افزون بر این، از آن‌جا که انحنای تاج در سرریز تاج دایره‌ای بیشتر از سرریزهای هیدروفویل مورد بررسی است، فشار در تاج سرریز تاج دایره‌ای کمتر از سرریزهای هیدروفویل مورد بررسی است. در نتیجه احتمال رخداد خلأزایی در تاج سرریز تاج دایره‌ای بیشتر از سرریزهای هیدروفویل نامتقارن است.

و نیروهای فشاری در پایین‌دست سرریز هیدروفویل با خمیدگی بیشتر رخ می‌دهند و در نتیجه احتمال فرسایش در پایین‌دست این از نوع از سرریزها بیشتر است. افزون بر این، احتمال رخداد فرسایش در پایین‌دست سرریز تاج دایره‌ای و سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی و هم‌ارتفاع با آن یکسان است؛ اما محدوده رخداد فرسایش در سرریزهای تاج دایره‌ای بزرگتر از سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی هم‌ارتفاع با آن است. دلیل این امر رخداد امواج ضربه‌ای در پایین‌دست سرریزهای تاج دایره‌ای است (شکل ۱۲).

جریان در انتهای سازه سرریز، سرعت جریان بار دیگر افزایش یافته و در نتیجه تنش برشی بستر نیز افزایش می‌یابد. بیشترین تنش برشی بستر نیز در فاصله‌ای معادل L تا $1/5L$ پس از سرریزهای هیدروفویل مورد بررسی و در فاصله‌ای معادل L تا $2L$ پس از سرریز تاج دایره‌ای مشاهده می‌شود و این ناحیه بیشترین استعداد را برای فرسایش داراست. پس از این ناحیه تنش برشی به میزان ثابتی متناسب با سرعت جریان میل می‌کند. مطابق با شکل ۱۴ در سرریزهای هیدروفویل، بیشترین تنش‌های برشی بستر

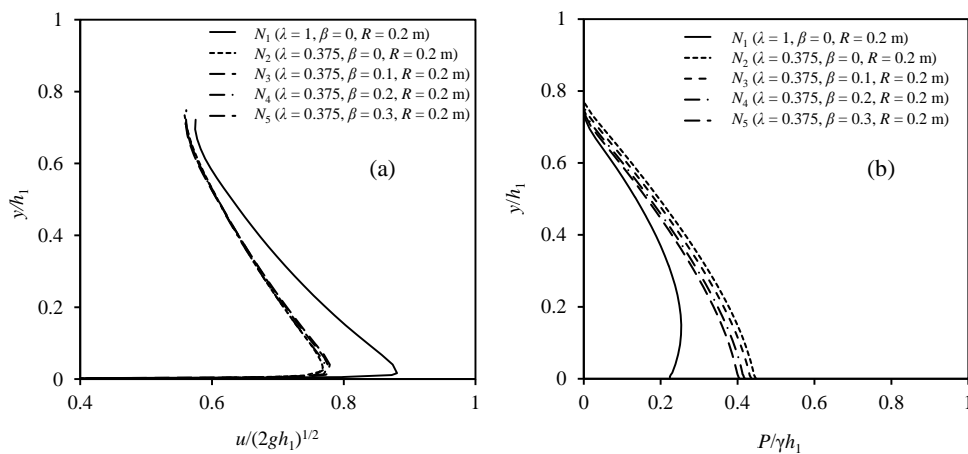


Fig. 13 Dimensionless profiles of (a) velocity and (b) pressure over the crest of different hydrofoil weirs with $Q = 70$ lit/s
 شکل ۱۳ نیمرخ‌های بی‌بعد (a) سرعت و (b) فشار روی تاج سرریزهای هیدروفویل مختلف به‌ازای دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

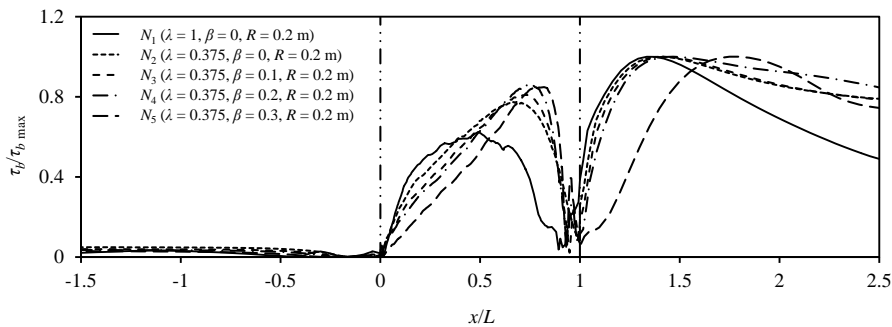


Fig. 14 Dimensionless bed shear stress profiles for different hydrofoil weirs with $Q = 70$ lit/s
 شکل ۱۴ نیمرخ‌های بی‌بعد تنش برشی بستر در سرریزهای هیدروفویل مختلف به‌ازای دبی ۷۰ لیتر بر ثانیه

تابع تبدیل ژوکوفسکی طراحی و ساخته شدند و هر یک در آزمایشگاه بررسی شدند. در بررسی عددی، جریان عبوری از روی سرریز هیدروفویل با استفاده از نرم‌افزار OpenFoam شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی SST $k-\omega$ گویای آن بود که نتایج مدل‌سازی عددی به داده‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی جامع‌تر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از روی سرریزهای هیدروفویل با بهره‌گیری از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی پرداخته شد. بدین منظور، مدل‌های مختلف سرریز هیدروفویل با در نظر گرفتن پارامترهای خروج از مرکزیت نسبی و خمیدگی بر اساس

L	طول سرریز (m)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Q	دبی جریان (m^3s^{-1})
R	شعاع دایره مرجع (m)
R_b	شعاع انحناى تاج سرریز (m)
u	سرعت در عمق y (ms^{-1})
W	ارتفاع سرریز (m)
w	متغیر مختلط در پلان مختصات مبدأ (-)
x	فاصله در جهت طولی (m)
Y_1	عمق آب بالادست سرریز (m)
Y_2	عمق آب بر روی تاج سرریز (m)
Y_3	عمق آب پایین دست سرریز (m)
y	فاصله در جهت عرضی (m)
z	متغیر مختلط در پلان مختصات مقصد (-)
β	خمیدگی هیدروفویل ($^\circ$)
γ	وزن مخصوص سیال ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$)
κ	ثابت تبدیل ژوکوفسکی (m)
λ	خروج از مرکزیت نسبی (-)
τ_b	تنش برشی بستر ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

۶- منابع ها

- Jacobs, E.N., Ward, K.E. and Pinkerton, R.M. (1933). The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel. National Advisory Committee for Aeronautics Report. 460, 299-354.
- Montes, J.S. (1970). Flow over round-crested weirs. L'Energia Elettrica. 47(3), 155-164.
- Sarginson, E. J. (1972). The influence of surface tension on weir flow. J. Hydraulic Res. 10(4), 431-446.
- Tennekes, H. and Lumley, J.L. (1972). A First Course in Turbulence. The MIT Press. Massachusetts, United States, 300 p.
- Lakshmana Rao, N.S. and Jagannadha Rao, M.V. (1973). Characteristics of hydrofoil weirs. J. Hydraulic Div., 99(HY2), 259-283.

Bos, M.G. (1976). Discharge measurement structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands, 401 p.

Hager, W.H. (1991). Experiments on standard spillway flow. Proc. Instn Civ. Engrs., 91(3), 399-416.

تفاوت‌ها ناچیز است و مدل $k-\omega$ SST دارای دقت قابل قبول در تحلیل جریان عبوری از روی سرریز هیدروفویل نامتقارن است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که در سرریزهای هیدروفویل با تغییر پارامتر خمیدگی سرعت جریان روی تاج سرریز و در نتیجه آن فشار در این محل تغییر نمی‌کند. اما فشار در تاج سرریز تاج دایره‌ای کمتر از فشار در سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی هم‌ارتفاع با آن بوده و در نتیجه احتمال رخداد خلأزایی در تاج سرریز تاج دایره‌ای بیشتر از سرریز هیدروفویل هم‌ارتفاع با آن است. نتایج توزیع فشار کف نشان داد که در سرریزهای هیدروفویل، با افزایش خمیدگی، کمترین فشار در فاصله‌ای دورتر از تاج سرریز رخ داده و احتمال رخداد خلأزایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که استفاده از سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی می‌تواند احتمال رخداد خلأزایی و دامنه فشارهای مثبت در پایین دست سرریز را نسبت به سرریز تاج دایره‌ای کاهش دهد، بدون آنکه ارتفاع سرریز کاهش یابد. در نهایت نتایج تنش برشی بستر نشان داد که در سرریزهای هیدروفویل، بیشترین تنش‌های برشی بستر و نیروهای فشاری در پایین دست سرریز هیدروفویل با خمیدگی بیشتر رخ می‌دهد و در نتیجه احتمال فرسایش در پایین دست این نوع از سرریزها بیشتر است. افزون بر این، احتمال رخداد فرسایش در پایین دست سرریز تاج دایره‌ای و سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی هم‌ارتفاع آن یکسان است؛ اما محدوده رخداد فرسایش در سرریزهای تاج دایره‌ای بزرگتر از سرریز هیدروفویل دارای خمیدگی هم‌ارتفاع آن است. دلیل این امر رخداد امواج ضربه‌ای در پایین دست سرریزهای تاج دایره‌ای است. پس می‌توان اظهار داشت که استفاده از سرریز هیدروفویل نامتقارن (دارای خمیدگی) می‌تواند مشکلات یاد شده در سرریزهای تاج دایره‌ای را تا حدود زیادی برطرف کند، بدون آن که ارتفاع سرریز کاهش یابد.

۵- فهرست نشانه‌ها

c	مختصات مرکز دایره مرجع (m)
H_1	بار (هد) کل آب بالادست سرریز (m)
h_1	بار (هد) آب بالادست سرریز (m)

- Kabiri-Samani, A. and Bagheri, S. (2014). Discharge coefficient of circular-crested weirs based on combination of flow around a cylinder and circulation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 140(5), 04014010.
- Kabiri-Samani, A., Rabiei, M.H., Safavi, H. and Borghei, S.M. (2014). Experimental-analytical investigation of super- to subcritical flow transition without a hydraulic jump. *J. Hydraulic Res.*, 52(1), 129–136.
- Olver, P.J. (2014). *Introduction to Partial Differential Equations*. Springer, New York, 636 p.
- Hu, Z.Z., Greaves, D. and Raby, A. (2016). Numerical wave tank study of extreme waves and wave-structure interaction using OpenFoam®. *J. Ocean Eng.* 126, 329-342.
- Bagheri, S. (2017). Hydraulic characteristics of flow over the streamlined weirs. PhD Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, 106 p. (in Persian)
- Bagheri, S. and Kabiri-Samani, A. (2017). Hydraulic characteristics of flow over the streamlined weirs. *Modares Civil Engineering Journal*. 17(6), 29–42. (in Persian)
- Castro-Orgaz, O. and Hager, W. H. (2017). *Non-Hydrostatic Free Surface Flows*. Springer, New York, 696 p.
- Farshi, F., Kabiri-Samani, A.R., Chamani, M.R. and Atoof, H. (2018). Evaluation of the secondary current parameter and depth-averaged velocity in curved compound open channels. *J. Hydraulic Eng.* 144(9), 04018059.
- Gourbesville, P., Cunge, J. and Caignaert, G. (2018). *Advances in Hydroinformatics*. Springer, New York, 560 p.
- Hong, H. H., Sturm, T. W. and González-Castro, J. A. (2018). Transitional flow at low-head ogee spillway. *J. Hydraulic Eng.* 144(2), 04017062.
- Ramamurthy, A. S. and Vo, N. D. (1993). Characteristic of circular crested weir. *J. Hydraulic Eng.*, 119(9), 1055–1063.
- Chanson, H. and Montes, J. S. (1998). Overflow characteristics of circular weir. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 124(3), 152–162.
- Savage, B. and Johnson, M. (2001). Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *J. Hydraulic Eng.*, 127(8), 640–649.
- Heidarpour, M. and Chamani, M. R. (2006). Velocity distribution over cylindrical weir. *J. Hydraulic Res.*, 44(5), 708–711.
- Johnson, M. and Savage, B. (2006). Physical and numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tailwater. *J. Hydraulic Eng.*, 132(12), 1353–1357.
- Castro-Orgaz, O. (2008). Curvilinear flow over round-crested weirs. *J. Hydraulic Res.*, 46(4), 543–547.
- Jensch, C., Pfingsten, K.C. and Radespiel, R. (2008). Numerical investigation of leading edge blowing and optimization of the slot geometry for a circulation control airfoil. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 112, 183-190.
- Schmocker, L., Halldórsdóttir, B. R. and Hager, W. H. (2011). Effect of weir face angles on circular-crested weir flow. *J. Hydraulic Eng.*, 137(6), 637–643.
- Tullis, B. P. (2011). Behavior of submerged ogee crest weir discharge coefficients. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137(10), 677–681.
- Lopes, P. (2013). Free-surface flow interface and air-entrainment modeling using OpenFoam. PhD Thesis, University of Coimbra, Portugal, 187p.
- Castro-Orgaz, O. and Hager, W. H. (2014). Scale effects of round-crested weir flow, *J. Hydraulic Res.*, 52(5), 653–665.