

Numerical Modeling of Flow Patterns in Ogee Spillways with Culverts under Free Flow Conditions

Elham Soleimani¹, Mohammadreza Zayeri^{2*}, SeyedMahmood Kashefipour³, Mehdi Daryae²

1- Phd Student, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Associate Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*m.zayri@scu.ac.ir

Received: 23 May 2025

Revised: 11 July 2025

Accepted: 1 August 2025

Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Spillways and gates serve as flow measurement and water level control structures in both natural and artificial irrigation channels. Ogee spillways, in particular, not only regulate reservoir levels but are also widely used for power generation, irrigation, and flood control. An ogee spillway allows excess reservoir water to flow downstream. However, due to high-velocity flow at the downstream end of these structures, hydraulic jumps commonly occur, characterized by sudden transitions from supercritical to subcritical flow, turbulent air entrainment, and energy dissipation.

Combined spillway-gate or spillway-culvert systems are designed to enhance hydraulic efficiency and sediment flushing by separating the ogee profile from the channel bed via gates or culverts. These configurations typically pass higher discharge than simple weirs due to dual flow paths—over the spillway and under the gate. The interaction of these flows significantly increases downstream energy dissipation, reducing scouring risks.

Numerous studies have examined the hydraulic performance of various geometries, including sharp-ogeed, inclined, rectangular, and cylindrical weirs. Research has highlighted how geometric parameters like gate opening, spillway height, and flow head affect discharge and flow characteristics. Modern research increasingly relies on numerical and experimental methods to investigate hydraulic jumps and two-phase (air-water) flow behavior in such systems, ensuring safe and efficient hydraulic structure designs.

Methodology: A three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) model was developed using FLOW-3D software to simulate flow behavior in a composite hydraulic structure consisting of an ogee spillway integrated with a culvert under free-flow conditions. The FLOW-3D code solves Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations using the finite volume method, incorporating the VOF and FAVOR techniques for tracking free surfaces and representing solid boundaries, respectively. Turbulence was modeled using four approaches: standard $k-\epsilon$, RNG, LES, and $k-\omega$, with calibration based on experimental data from Toozandehjani & Kashefipour (2012, 2013). The physical model consisted of a 12-meter-long rectangular flume. For numerical efficiency, the model domain was

shortened to 5 meters.

Experimental results identified a 45° outlet angle as optimal for energy dissipation. Numerical simulations evaluated the performance of different turbulence models, showing that $k-\omega$ achieved the best agreement with experimental data, with $R^2 = 0.97$ and $RMSE = 0.0112$. Mesh independence analysis confirmed that a cell size of 0.0007 m provided stable velocity profiles. Simulations also investigated the influence of culvert elevation within the spillway body across four configurations. The model reached steady-state flow after 72 seconds, validating its temporal convergence.

Finally, variations in culvert positioning significantly affected flow patterns and energy dissipation. This study highlights the effectiveness of FLOW-3D in simulating complex free-surface flows and optimizing hydraulic structure designs through combined experimental and numerical analysis.

Results and Discussion: This study numerically investigates flow behavior in a ogee overflow spillway equipped with culverts under free flow conditions, focusing on velocity patterns, Froude number variations, and total energy loss.

Velocity Distribution: Two-dimensional velocity vectors and vertical velocity profiles before and after the hydraulic jump were analyzed for minimum and maximum discharges. Vortex formation and air-water mixing were observed in the hydraulic jump region, particularly when culverts were present. Two primary vortices were identified: one near the culvert outlet close to the bed and another above the jet stream. Unlike the classical hydraulic jump, the velocity profiles with culverts showed the maximum velocity occurring above the bed, indicating altered jet behavior due to culvert interactions. When culverts were placed at 50% and 75% of the spillway height, the surface jet velocity was higher than the culvert jet, causing more concentrated downstream flow. Dual-culvert configurations reduced peak velocity by 40% and shifted its location 14% higher compared to the spillway without culverts.

Froude Number Analysis: The longitudinal profile of the Froude number showed that culvert placement significantly influenced flow regimes. For low discharge, the flow remained subcritical longer when culverts were elevated (e.g., at 75% height). Dual-culvert setups caused submerged hydraulic jumps near the toe of the spillway. At high discharges, subcritical flow extended further downstream across all culvert placements. The greatest Froude number reduction occurred when culverts were placed at the base or used in pairs, reducing subcritical zones by up to 25% along the spillway slope.

Energy Loss: Energy loss contours indicated that the presence of culverts shifted energy dissipation toward the spillway body, weakening the hydraulic jump and reducing its length. At low discharges, energy loss was more pronounced due to the dominant culvert flow. As discharge increased, energy losses decreased due to reduced upstream-downstream water level differences. Culvert-spillway systems also reduced the secondary depth of hydraulic jumps, further enhancing energy dissipation efficiency.

Conclusion: The hydrodynamics of flow downstream of ogee spillway-culvert structures were investigated numerically using a series of laboratory-based studies under various culvert placement scenarios. The hydraulic assessment of the proposed spillway-culvert configuration under free flow conditions indicated that the structure possesses a higher discharge capacity compared to a conventional ogee spillway. Variations in turbulent kinetic energy at different flow rates revealed that the location of maximum energy dissipation shifts toward the toe of the spillway as the culvert is positioned closer to it. This shift in energy dissipation results in a reduced energy loss rate, thereby increasing the potential for erosion. It was also found that, at peak discharges, the formation of dual vortices in the dual-culvert configuration enhances energy dissipation, making the proposed structure more effective and potentially suitable as a fish passage route.

Keywords: Combined spillway-culvert system, Discharge measurement, Flow-3D, Numerical simulation.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1404.4352 and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Shahid Chamran University of Ahvaz for their support.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Data analysis.

Second Author: Review of results.

Third Author: Writing the article.

Fourth Author: Review of the accuracy of the results and comparison with previous studies.

Acknowledgment: The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1404.4352 and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Shahid Chamran University of Ahvaz for their support.

مدل سازی عددی الگوی جریان در سرریزهای اوجی همراه با کالورت در شرایط جریان آزاد

الهام سلیمانی^۱، محمدرضا زایری^{۲*}، سید محمود کاشفی پور^۳ و مهدی دریایی^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشیار، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*m.zayri@scu.ac.ir

نشریه هیدرولیک
انجمن هیدرولیک ایران
وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰
نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

چکیده: اندازه‌گیری دبی و سازه‌های کنترل جریان به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مهندسی هیدرولیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف این مطالعه، مدل‌سازی عددی جریان عبوری از سیستم ترکیبی سرریز اوجی با استاندارد USBR و سازه کالورت به‌عنوان شکاف در بدنه سد می‌باشد. علاوه بر این، به‌منظور بررسی الگوی جریان، اثر قرارگیری این کالورت در چهار حالت ارتفاعی مختلف در بدنه سرریز اوجی در نسبت‌های متفاوتی از دبی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی، معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده (RANS) با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار Flow-3D حل شده‌اند. ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی و یافته‌های عددی برای سرریز اوجی بدون کالورت نشان می‌دهد که با استفاده از مدل آشفتگی $K - \omega$ اختلاف نیم‌رخ سطح آب با آماره‌های ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب مقدار ۰/۹۷ و ۰/۱۱۲ تطابق دارند. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد در حالت به‌کارگیری دو کالورت حداکثر سرعت جریان به میزان ۴۰ درصد در پنجه سرریز اوجی کاهش داشته و به میزان ۱۴ درصد موقعیت آن بالاتر از حالت سرریز بدون کالورت می‌باشد. بررسی عدد فرود در این حالت نشان می‌دهد که رژیم جریان، به دلیل کاهش مومنوم به‌صورت پرش هیدرولیکی مستغرق در پنجه سرریز تشکیل می‌شود. همچنین نتایج افت انرژی نشان دادند که وجود کالورت باعث انتقال محل اتلاف انرژی به بدنه سرریز شده و پرش هیدرولیکی را تضعیف کرده و طول آن را کاهش می‌دهد.

کلیدواژگان: سیستم ترکیبی سرریز - کالورت، اندازه‌گیری دبی، Flow-3D، شبیه‌سازی عددی.

۱- مقدمه

مخزن اجازه می‌دهد که به سمت پایین‌دست جریان پیدا کند (Kocaer & Yarar, 2020). در پایین‌دست سرریزهای اوجی به دلیل افزایش سرعت جریان پدیده پرش هیدرولیکی رخ دهد. پرش هیدرولیکی انتقال ناگهانی از جریان فرا بحرانی به جریان فروبحرانی است. این پدیده به‌عنوان یک اختلال بسیار آشفته در سطح آب شناخته می‌شود که با نوسان‌ها بزرگ سرعت و فشار، جذب هوا و

سرریزها و درجه‌ها به‌عنوان سازه‌های اندازه‌گیری جریان و مدیریت و مهار سطح آب در آبراهه‌های آبیاری طبیعی و مصنوعی به کار می‌روند. سرریزها افزون بر نگهداری آب در یک سطح مشخص در مخزن سدها برای هدف‌های مختلف دیگری مانند تولید انرژی، آبیاری، مدیریت و مهار سیلاب و غیره استفاده می‌شوند. سرریز با شکل اوجی به آب مازاد در

تبدیل انرژی همراه است که اصلی ترین دلیلی است که این پدیده هیدرولیکی به طور گسترده در انواع مختلف سازه های هیدرولیکی بررسی و پیاده سازی شده است. (Bung et al., 2021). ساختار سرریز-دریچه بطور معمول به منظور افزایش کارایی هیدرولیکی و امکان برداشت رسوب ها در پای سرریزها، از طریق جدا کردن سرریز از بستر آبراهه به واسطه دریچه یا آبگذر، بسته به طول سرریز طراحی می شود. نمونه هایی از سازه های سرریز-دریچه در منبع های مختلفی گزارش شده است (Alhamid, 1999; Hayawi et al., 2008; Negm et al., 2002; Norouzi Banis, 1992; Salehi & Azimi, 2019; Samani & Mazaheri, 2009; Severi et al., 2015). برای یک هد بالادست ثابت، دبی عبوری از سازه سرریز-دریچه یا سرریز-آبگذر بیشتر از دبی عبوری از سرریزی با هندسه همانند است، زیرا آب به طور هم زمان هم از روی سرریز و هم از زیر دریچه یا آبگذر عبور می کند. افزون بر این، برهمکنش جریان خروجی از دریچه یا آبگذر و جریان پرتابی از سرریز، به طور قابل توجهی موجب افزایش افت انرژی در پایین دست این سازه ها می شود. در نتیجه، در مقایسه با سرریزها یا دریچه های کلاسیک، فرسایش بستر و ایجاد حفره های آبستگگی در پایین دست سرریز-دریچه ها یا سرریز-آبگذرها به دلیل افت هیدرولیکی قابل توجه، کاهش می یابد. ضریب دبی بالاتر و نرخ هدرروی انرژی قوی تر، سرریز-آبگذر را به گزینه ای مناسب برای استفاده در سامانه های آبیاری تبدیل کرده است (Uyumaz, 1988). همچنین، سرریز-آبگذرها می توانند به عنوان توزیع کننده جریان مناسب در تصفیه خانه های فاضلاب و آبراهه های آبیاری به کار گرفته شوند (Salehi & Azimi, 2019). ارزیابی پژوهشی گسترده ای در زمینه هیدرولیک سرریزها با هندسه های گوناگون صورت گرفته است. این هندسه ها شامل سرریزهای لبه تیز با عرض کامل (Ferro, 2000; Norouzi Banis, 1992; Samani & Mazaheri, 2009) سرریزهای مایل (Jalil & Sarhan, 2013)، سرریزهای مستطیلی (Altan- Sakarya & Kökpinar, 2013)، سرریزهای مثلثی با دریچه های مستطیلی (Hayawi et al., 2008)، سرریزهای

مستطیلی با دریچه های مثلثی (Alhamid, 1999)، دریچه های سرریز استوانه ای (Masoudian et al., 2013; Severi et al., 2015) و سرریزهایی با طول تاج محدود که به عنوان آبگذرهای سرریز¹ شناخته می شوند، می باشند (Altan-Sakarya, 2019; Ferro, 2000; Salehi & Azimi, 2019). Kökpinar & (2013) با ارزیابی های آزمایشگاهی به بررسی ویژگی های هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزهای مستطیلی همراه با دریچه مستطیلی، موسوم به سرریز H، پرداخته اند. این پژوهش برای دامنه گسترده ای از دبی ها و عرض های سرریز-دریچه (b) انجام شد. نتایج گویای آن بود که فراسنجه های هندسی همچون بازشدگی دریچه (a)، عرض دریچه (b) و ارتفاع سرریز (P)، تأثیر قابل توجهی بر رابطه بین ارتفاع آب و دبی در شرایط جریان آزاد دارند. همچنین مشخص شد که لزجت و کشش سطحی در هندسه هایی با بازشدگی بسیار کم ($b/a < 1$) و نسبت $a/(P - a) > 2$ ، تأثیرهای بارزی بر رفتار هیدرولیکی جریان دارند. در همین راستا، Jalil & Sarhan (2013b) نیز مجموعه ای از آزمایش های را بر روی سرریزهای با دریچه های مورب انجام دادند و رابطه های تجربی برای پیش بینی دبی، مبتنی بر تحلیل ابعادی، ارائه کردند. آنان نشان دادند که عامل هایی مانند ارتفاع آب روی سرریز، زاویه میان دیواره و برای جریان، طول و ارتفاع سرریز، مؤلفه های اصلی تأثیرگذار بر دبی می باشند. بر مبنای هندسه سرریز و شرایط هیدرولیکی حاکم، سرریزهایی با طول تاج محدود در چهار دسته طبقه بندی می شوند: سرریزهای کوتاه تاج، باریک تاج، عریض تاج و بلند تاج (Azimi et al., 2012; Azimi & Rajaratnam, 2009). مواردی که تاج سرریز نسبت به بستر آبراهه به صورت عمودی فاصله می گیرد و فضای برای عبور جریان از زیر سازه فراهم می سازد، ساختاری موسوم به سرریز-آبگذر شکل می گیرد. هیدرولیک سرریز-آبگذرهای باریک تاج نخستین بار توسط فرو (Ferro, 2000) بررسی و ارزیابی شد. در ادامه، با گسترش این تحقیق به سرریزهای عریض تاج، رفتار هیدرولیکی جریان را برای نسبت های گوناگونی از

تحلیل‌های محدودی در حوزه ریاضی انجام شده‌اند. در دوران حاضر، بررسی‌های پرش هیدرولیکی هنوز یکی از فعال‌ترین حوزه‌های تحقیق در جامعه مهندسی هیدرولیک جریان دو فاز (هو-آب) را تشکیل می‌دهند. برای بررسی دقیق‌تر، در شکل ۱ واژگان کلیدی پرکاربرد توسط محقق پیشین در زمینه‌های پژوهشی جریان در سرریزها در پایگاه استنادی Scopus بررسی شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ارتباط درک پویایی پیچیده جریان در سازه سرریز با تمرکز بر اندازه‌گیری و مهار جریان در آبراهه‌های طبیعی و مصنوعی برای کاربردهای مختلف مهندسی و محیط زیستی در بیست سال اخیر مشهود است.

$0.1 < h_0/P < 1.3$ (که در آن h_0 ارتفاع آب تحت جریان آزاد است) بررسی گردید (Salehi & Azimi, 2019). مسعودیان و همکاران (Masoudian et al., 2013) عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های سرریز استوانه‌ای را برای بازه‌های گسترده‌ای از هندسه‌های دریچه بررسی کردند. در این بررسی‌ها، نسبت بین بازشدگی دریچه (a) و ارتفاع سرریز (قطر استوانه یا P) در محدوده $0.07 < a/P < 0.44$ لحاظ شد. در شرایطی که مقدار زیادی از انرژی جنبشی^۱ جریان روی سازه‌های هیدرولیکی هدرروی می‌شود، باید یک سازه مستهلک‌کننده انرژی به‌طور اصولی طراحی شود تا بتواند اضافه انرژی را به‌طور ایمن هدرروی کند. بیشتر پیشرفت‌ها از طریق آزمایش‌های تجربی و تجزیه و

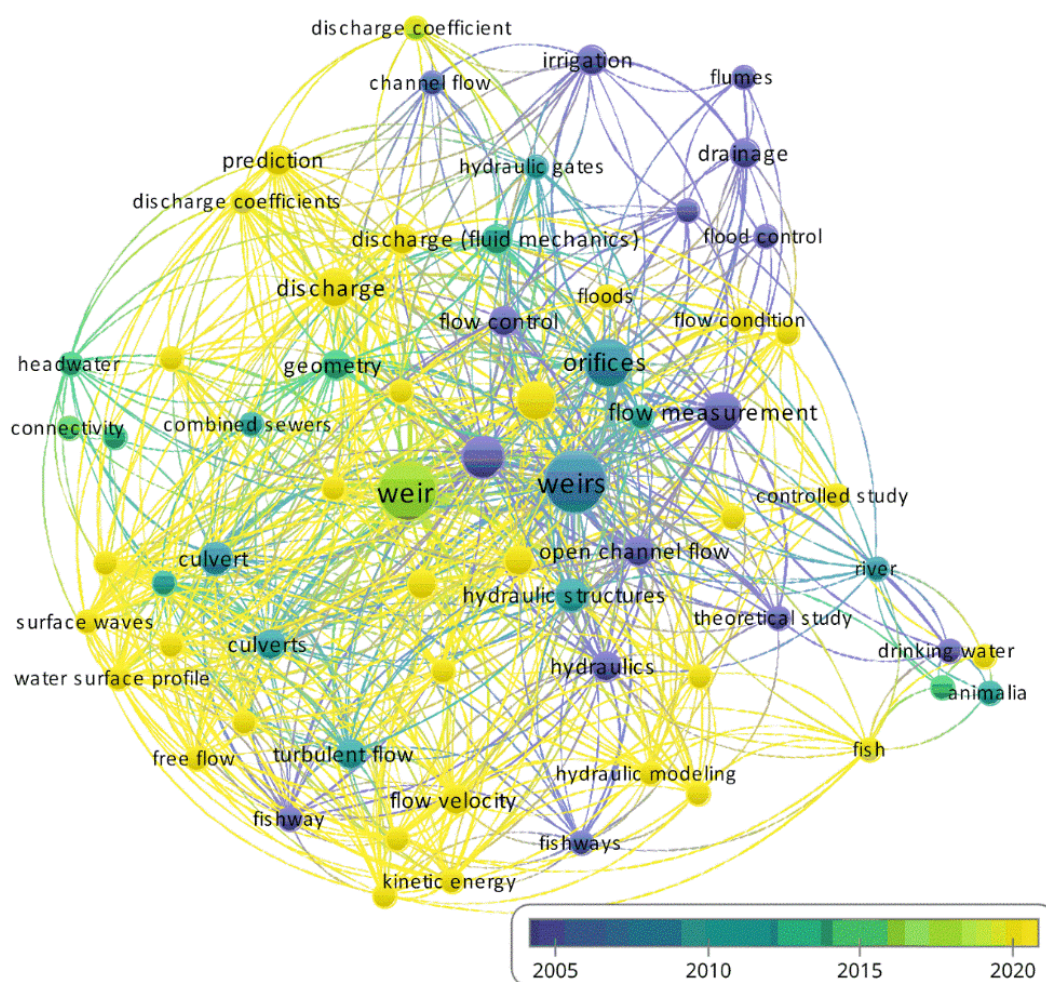


Fig. 1 keywords commonly found in reported research on hydraulic modeling of spillways
 شکل ۱ واژگان کلیدی در تحقیقات گزارش شده در مدل‌سازی هیدرولیکی سرریز

1. Kinetic Energy

مدل عددی برای بررسی اثر قرارگیری ارتفاع آبگذر بر هیدرودینامیک جریان و هدرروی انرژی در سرریزهای اوجی است. این موضوع برای طراحان در بهینه سازی ساختار سرریز و نیز پیش بینی دقیق دبی در پروژه های آبیاری و زهکشی اهمیت دارد. در این بررسی، دو مسئله متفاوت با استفاده از یک حل گر عددی تجاری بررسی شده اند. این مسئله ها شامل سرریز اوجی و یک سامانه ترکیبی از سرریز اوجی و آبگذر می باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- معادله های حاکم و روش عددی

کد دینامیک سیالات محاسبه شدنی (CFD) سه بعدی برای شبیه سازی سازه ترکیبی شامل سرریز اوجی و آبگذر به کار گرفته شد. نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق FLOW-3D نسخه ۱۱.۲ بوده که از روش حجم محدود برای حل معادله های ناویر-استوکس میانگین گیری شده بر مبنای رینولدز (RANS) بهره می برد (Safarzadeh & Mohajeri, 2018). معادله های ناویر-استوکس به عنوان معادله های حرکت سیال در سه برای (w, v, u) شناخته می شوند که شامل برخی ترم های اضافی نیز هستند. معادله های ناویر-استوکس میانگین گیری شده در نرم افزار FLOW-3D که برای مدل سازی سه بعدی سازه ترکیبی سرریز اوجی و آبگذر استفاده شده اند، به صورت زیر بیان می شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ - \zeta \frac{A_y v^2}{x V_f} \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Gx + fx \\ - bx \\ - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} (u - u_w - \delta u_s) \end{aligned} \quad (1)$$

شبیه سازی های عددی چندی به منظور بررسی هیدرولیک و هیدرودینامیک جریان عبوری از سرریزها انجام شده است. Hargreaves et al. (2007) یک مدل سازی عددی دو بعدی (2D) برای شبیه سازی جریان سطح آزاد عبوری از سرریزی با طول تاج محدود با استفاده از نرم افزار پویایی سیال های محاسبه شدنی FLUENT انجام دادند. در آن بررسی، مدل آشفتگی استاندارد k-ε، مدل (RNG¹) و مدل تنش رینولدز^۲ (RSM) به کار گرفته شدند و نتایج آنان نشان داد که مدل RNG بهترین پیش بینی را برای جریان سطحی و دبی ارائه داده است. گوموش و همکاران (Gumus et al., 2016) میدان سرعت جریان و نیم رخ سطح آب در پرش هیدرولیکی مستغرق ایجاد شده توسط دریچه کشویی را به صورت عددی با استفاده از نرم افزار FLUENT شبیه سازی کردند. در این بررسی، مدل های استاندارد k-ε، مدل RNG، مدل انتقال تنش برشی (SST) k-ω و مدل RSM آزمایش شدند. نتایج نشان داد که میدان سرعت افقی شبیه سازی شده توسط مدل های RSM، RNG و k-ε با اندازه گیری های تجربی همخوانی خوبی داشتند. همچنین مشخص شد که مدل های یاد شده تا حدودی یک ناحیه چرخشی همانند در پرش هیدرولیکی مستغرق پیش بینی کرده اند. آلتان و همکاران (Altan-Sakarya et al., 2020) یک بررسی عددی سه بعدی (3D) برای بررسی میدان سرعت در سازه های سرریز و سرریز-دریچه ای با استفاده از نرم افزار FLOW-3D انجام دادند. مقایسه بین مدل آشفتگی RNG و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ^۳ (LES) نشان داد که هر دو مدل دقت شبیه سازی همانندی دارند. ناحیه جریان چرخشی نزدیک به سطح آزاد و در کف آبراهه در پایین دست سازه سرریز-دریچه مشاهده شد. همچنین، یک ناحیه با سرعت صفر در سمت بالادست مدل سرریز-دریچه شناسایی شد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، هدف این بررسی ارزیابی میزان مناسب بودن یک

1. Re-Normalisation Group

2. Reynolds Stress Model

3. Large Eddy Simulation (LES)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] \quad (4)$$

Hirt & Sicilian (1985) روش FAVOR را که برای تعیین میزان نفوذ بدنه جامد در یک سلول خاص استفاده می‌شود را معرفی کردند. این روش همچنین می‌تواند حجم سلول‌های خالی از جسم جامد را مشخص کند. کدی که در این تحقیق استفاده شده است، شامل چهار مدل آشفتگی می‌باشد که عبارت‌اند از: مدل‌های (بر پایه عادی سازی رینولدز) و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) (Dehdar- behbahani & Parsaie, 2016).

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

برای مقایسه بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی از بررسی‌های آزمایشگاهی Toozandehjani & Kashefipour (2013) استفاده شد. مدل آزمایشگاهی، مطابق شکل ۲ یک آبراهه مستطیلی افقی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۵ متر است. نتایج آنان نشان داد در بررسی زاویه‌های افقی ۴۵ و ۶۰ درجه، زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد را از منظر هدرروی انرژی داشته است. زاویه انتهایی آبگذر خروجی از بدنه سرریز اوجی ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. اگرچه طول فلوم آزمایشگاهی ۱۲ متر بود، در بررسی عددی حاضر این طول به ۵ متر کاهش یافته تا عملکرد محاسبه شدنی بهبود یابد و شمار سلول‌های کلی کاهش یابد.



Fig. 2 Physical model of a crest Ogee spillway combined with a culvert at the bed level.

شکل ۲ مدل فیزیکی سرریز اوجی همراه با آبگذر در موقعیت کف بستر

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ - \zeta \frac{A_y uv}{xV_f} \\ = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + Gy + fy \quad (2) \\ - by \\ - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} (v - vw - \delta v_s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ - \zeta \frac{A_y v^2}{xV_f} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Gz + fz \quad (3) \\ - bz \\ - \frac{R_{SOR}}{\rho V_f} (w - ww \\ - \delta ws) \end{aligned}$$

در این معادله‌های، مقادیرهای Gx تا Gz نشان‌دهنده شتاب‌های بدنه، fx تا fz شتاب‌های گرانی و bx تا bz هدرروی جریان در محیط متخلخل هستند. ضریب‌های A_x ، A_y و A_z به ابعاد مقطع جریان اشاره دارند. ρ چگالی آب است و V_F نشان‌دهنده نسبت حجمی جریان در روش FAVOR (نمایش بازدارنده‌ها به صورت کسری از حجم و سطح) می‌باشد. R_{SOR} ترم منبع و p فشار را نمایش می‌دهد. ترم‌های پایانی نیز بیانگر ورود جرم از یک منبع هندسی خاص هستند. بردار سرعت منبع با $Us = (us, vs, ws)$ و سرعت نسبی سطح منبع با $Uw = (uw, vw, ww)$ نمایش داده می‌شوند. ضریب R بسته به نوع سامانه مختصات انتخاب‌شده، مقدار متفاوتی دارد.

در این مدل، روش‌های کسری حجم سیال (VOF) و FAVOR برای تعیین وضعیت سلول‌ها در سطح آب و همچنین تعیین هندسه محیط استفاده می‌شوند (Hirt & Nichols, 1981). با استفاده از این روش، کد امکان نادیده‌گرفتن هوا و تأثیر آن بر روی جریان آب را فراهم می‌کند و در عین حال یک مرز مشخص بین آب و هوا بدون نیاز به مش‌بندی بسیار دقیق ایجاد می‌کند (Bayon et al., 2016).

۲-۳- مدلسازی و اعتبارسنجی مدل عددی

همان گونه که بیان شد در این تحقیق، هدف شبیه سازی یک سازه ترکیبی شامل سرریز اوجی به همراه آبگذر با استفاده از نرم افزار FLOW-3D بوده است. به منظور انجام این کار، اعتبارسنجی کد عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است. مرور منبع ها نشان می دهد که تاکنون تاثیر قرارگیری ارتفاع آبگذر در سازه ترکیبی سرریز اوجی بررسی و ارزیابی نشده است. از این رو، نتایج آزمایشگاهی مربوط به یک سرریز اوجی با آبگذر که صرفاً در کف سرریز به عنوان تخلیه کننده تحتانی نصب شده بود (Toozandehjani & Kashefipour, 2012)، برای واسنجی کد CFD مورد استفاده قرار گرفت.

به برای اینکه مقایسه عملکرد بهتری در سازه ترکیبی صورت بگیرد تا مدل های فیزیکی و عددی سرریز با دقت بیشتری توسعه یابند. مطابق با جدول (۱) از مقادیرهای به کار گرفته شده در مدل فیزیکی برای شبیه سازی جریان در مدل عددی استفاده شده است. شایان یادآوری است با توجه به روند خطی نتایج فراسنجه های هیدرولیکی بین دبی ۱۶/۶۷ تا ۵۷/۷۶ لیتر بر ثانیه در ادامه نتایج برای این دو مقدار کمینه و بیشینه برای مقایسه آورده شده است.

جدول ۱ تغییرپذیری های مؤلفه های هیدرولیکی آزمایش های (Toozandehjani & Kashefipour, 2012)
Table 1 Variations of hydraulic components in the experiments by Toozandehjani and Kashefipour (Toozandehjani & Kashefipour, 2012)

Downstream (Cm) water depth (h _a)	Headwater over the spillway (h _o) (Cm)	Q (L/s)
15.9	10.8	16.67
19.6	12.9	23.85
22	14.3	28.43
24.7	16.5	35.53
28	17.7	44.62
31.6	20.1	53.76

برای انتخاب یک مدل آشفتگی با دقت بالا بر مبنای داده های آزمایشگاهی، نتایج بدست آمده از مدل های k- ω

و RNG با نتایج اندازه گیری های شده مقایسه شدند. سپس، دقیق ترین مدل برای ادامه بررسی و ارزیابی ها انتخاب شد. معادله های ناویر-استوکس لحظه ای با بهره گیری از نظریه گروه بازنرمال سازی^۱ برای استخراج مدل استفاده شدند (Yakhot & Orszag, 1986). در مدل دو معادله ای RNG، برای در نظر گرفتن هدرروی انرژی جنبشی آشفتگی، یک ترم اضافی در معادله های انتقال وارد می شود (Cable, 2009). معادله های RNG به صورت زیر ظاهر می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (6)$$

در این معادله های، k بیانگر انرژی جنبشی آشفتگی و ε نشان دهنده نرخ هدرروی انرژی جنبشی آشفتگی است. μ_{eff} به لزوجت مؤثر اشاره دارد. G_k و G_b به ترتیب نشان دهنده تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گرادیان های سرعت متوسط و نیروهای شناوری هستند. Y_M هدرروی ناشی از انبساط نوسانی در جریان های تراکم پذیر را بیان می کند. S_k و S_ε ترم های منبعی هستند که توسط کاربر تعیین می شوند. ضریب های α_k و α_ε به ترتیب معکوس عدد پرانتل مؤثر برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ هدرروی آن هستند. همچنین، ضریب های $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، $C_{3\varepsilon}$ و ضریب های تجربی می باشند.

افزون بر این، R_ε تفاوت اصلی بین مدل های عددی مورد استفاده را مشخص می کند. در این تحقیق، کد CFD از مدل استاندارد k- ω استفاده می کند. این مدل تجربی برای نخستین بار توسط ویلوکس ارائه شده است (Nouri et al., 2022). به دلیل ساختار خاص این مدل، از آن برای محاسبه بهتر جریان های برشی، در نظر گرفتن اثرات عدد

یادشده، همخوانی نیمرخ‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده در بخش‌های مختلف سرریز مناسب بوده و نشانگر صحت مدل‌سازی عددی است.

جدول ۲ نتایج درصد اختلاف حل عددی با مقادیرهای

آزمایشگاهی به ازای مدل‌های آشفتگی مختلف

Table 2 shows the percentage deviation of the numerical results from the experimental data for different turbulence models.

Average Pressure Difference (%)	Water Level Difference (%)	Turbulence Model	Flow Rate (L/s)
15.17	3.34	$K - \epsilon$	16.67
10.8	4.74	RNG	
8.76	2.43	$K - \omega$	
11.23	4.89	LES	

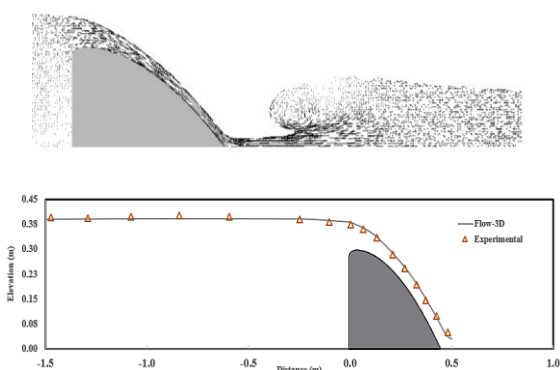


Fig. 3 Longitudinal profile of the water surface over the crest Ogee spillway compared with experimental results.

شکل ۳ نیمرخ طولی سطح آب بر روی سرریز اوجی با نتایج آزمایشگاهی

پس از صحت‌سنجی نتایج مدل عددی و انتخاب مدل آشفتگی، برای بررسی اثرگذاری قرارگیری آبگذر، در چهار حالت ارتفاعی مختلف در بدنه سرریز اوجی، در نسبت‌های متفاوتی از دبی مطابق شکل ۴ بررسی و ارزیابی شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پیش‌فرض‌های هندسی شامل چهار موقعیت قرارگیری آبگذر به ترتیب در کف بستر، قرارگیری آبگذر در موقعیت مانند ۵۰ درصد ارتفاع سرریز، ۷۵ درصد ارتفاع مانند سرریز و در نهایت ترکیب دو آبگذر در کف و ارتفاع ۵۰ درصد سرریز از بستر آبراهه می‌باشد.

رینولدز پایین و تراکم‌پذیری استفاده می‌شود. در این مدل نیز، معادله‌های انتقال برای برآورد انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ هدرروی آن (ω) به کار گرفته می‌شوند. معادله‌های مدل آشفتگی $k-\omega$ که برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفتگی استفاده می‌شود، به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (8)$$

که در آن، G_ω تولید (ω) یا نرخ هدرروی انرژی جنبشی آشفتگی، Y_ω هدرروی ω به دلیل آشفتگی، Y_k هدرروی k به دلیل آشفتگی، σ_ω و σ_k اعداد پراکتل برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ هدرروی آن هستند (در اینجا به صورت ثابت و برابر ۲ در نظر گرفته شده‌اند). S_ω ترم منبع تعیین‌شده توسط کاربر و μ_t لزوجت آشفتگی می‌باشد.

نتایج حل مدل عددی با به‌کارگیری چهار مدل آشفتگی مطابق جدول ۲ برای دبی ۱۶/۶۷ در حالت سرریز اوجی بدون آبگذر قابل‌مشاهده است. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود از بین چهار مدل مورد استفاده در حل میدان جریان، دو مدل $K - \omega$ و $k - \epsilon$ نتایج نزدیک‌تر به واقع حاصل کرده‌اند. به‌منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیرهای آزمایشگاهی از آماره‌های ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) استفاده شده است که به ترتیب مقدار ۰/۹۷ و ۰/۱۱۲ می‌باشد. با توجه به مقادیرهای حاصل، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج مدل حاصل از مدل آشفتگی $k-\omega$ و داده‌های آزمایشگاهی موجود برقرار می‌باشد.

در شکل ۳ نیمرخ طولی سطح آب بر روی سرریز اوجی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در دبی ۱۶/۶۷ لیتر بر ثانیه مقایسه شده است. با توجه به شکل

1. Root mean square error

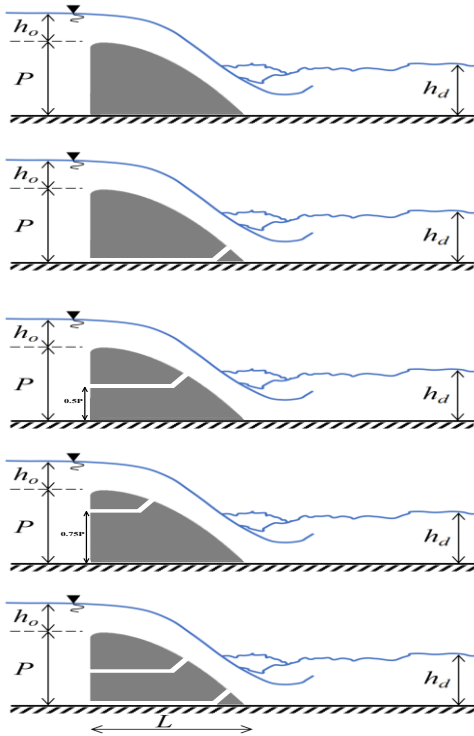


Fig. 4 Different scenarios of culvert placement within the body of the crest Ogee spillway.

شکل ۴ پیش فرض های مختلف قرارگیری آبگذر در بدنه سرریز اوجی

۲-۴- بررسی استقلال حل از شبکه

در شبیه سازی عددی، خطای محاسبه شدنی که با بهبود مش کاهش می یابد، به عنوان خطای گسسته سازی شناخته می شود لذا یکی از مرحله های مهم در شبیه سازی عددی اطمینان از اینکه شبکه بندی انجام شده مستقل از اندازه و ابعاد مش باشد تا بررسی و برآورد نتایج ناشی از شبیه سازی عددی با دقت صورت پذیرد. بدین منظور در این پژوهش می بایست فرآیند تجزیه و تحلیل حساسیت به شبکه برای نیمرخ طولی صورت پذیرد. نتایج مدل FLOW-3D نشان می دهد نیمرخ سرعت در قسمت تاج سرریز مطابق با شکل ۵ با کاهش اندازه مش از $Dx=0.01$ تا $Dx=0.001$ تغییرپذیرهای محسوسی داشته است ولی از مقدار $Dx=0.0007$ تا $Dx=0.0005$ تغییرپذیری هایی در میزان بیشینه نیمرخ سرعت نداشته است لذا برای انتخاب اندازه مش بندی از $Dx=0.0007$ استفاده شد. همچنین مقدارهای اندازه مش در سه راستا برابر با $0.7/7$ میلی متر در نظر گرفته شد.

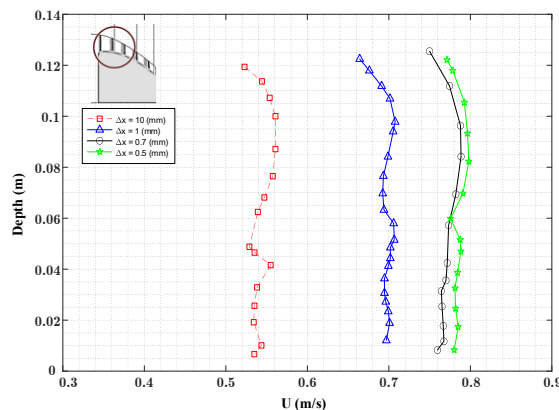


Fig. 5 Variations of the vertical velocity profile in different grid configurations.

شکل ۵ تغییرپذیری های نیمرخ عمودی سرعت در شبکه بندی متفاوت

مدت زمان اجرای شبیه سازی عددی در شکل ۶ تغییرپذیری های دبی ورودی و خروجی آبراهه نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود پس از زمان ۷۲ ثانیه مدل عددی به حالت ماندگار رسیده است لذا بعد از این مدت زمان می توان نتایج هیدرولیکی مدل را استخراج کرد.

۲-۵- بررسی استقلال حل از زمان

با توجه به شرایط مرزی و شرایط اولیه در نظر گرفته شده، تحلیل جریان به صورت غیردائمی آغاز می شود و تا رسیدن به حالت دائمی ادامه می یابد مدت زمان برای شبیه سازی عددی تا زمانی که شرایط جریان ماندگار بین مرز ورودی و خروجی برقرار می گشت ادامه می یافت. برای بررسی

هیدرولیکی با آبگذر، مقدار سرعت جریان از بستر آبراهه افزایش می‌یابد تا به بیشینه خود برسد.

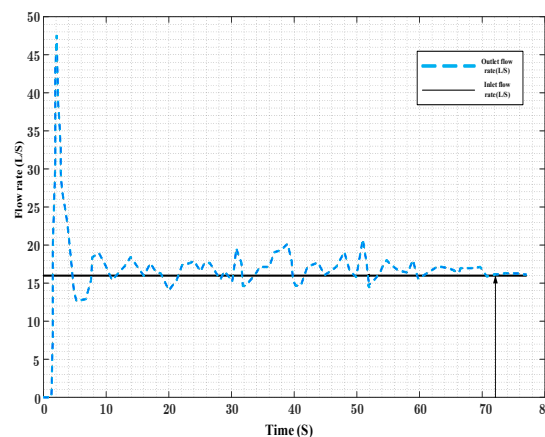
مطابق شکل ۸ این تفاوت‌ها در هر دو دبی کمینه و بیشینه مشاهده شد. به این معنا که در بخش قابل توجهی از پرش هیدرولیکی که در ساختار هدرروی انرژی توسعه یافته بود، بیشینه سرعت در پایین‌ترین قسمت نیم‌رخ عمودی رخ داده است. می‌توان بیان داشت این پدیده ناشی از تأثیر انحرافی است که جت خروجی از آبگذر منجر به هدرروی انرژی شده و باعث تمرکز جریان در نزدیکی بستر آبراهه می‌شود و در نتیجه بیشینه سرعت در پایین‌ترین بخش نیم‌رخ‌ها رخ می‌دهد.

در حالت قرارگیری آبگذر در کف سرریز، جریان جتی که از روی تاج سرریز عبور می‌کند با جریان خروجی از آبگذر ترکیب می‌شود و جت ترکیبی جدیدی در پایین‌دست آبراهه و در زیر پرش هیدرولیکی آزاد شکل می‌گیرد. مقایسه نیم‌رخ سرعت در شکل ۸ در دبی کمینه نشان می‌دهد که در حالت قرارگیری آبگذر در ارتفاع ۵۰ درصد و ۷۵ درصد ارتفاع سرریز سرعت جت روی سرریز اوجی بیشتر از جت خروجی آبگذر بوده و جت ترکیبی برای فاصله‌ی بیشتری در پایین‌دست متمرکز باقی می‌ماند. مشاهده می‌شود در حالت به‌کارگیری دو آبگذر بیشینه سرعت جریان به میزان ۴۰ درصد در پنجه سرریز اوجی کاهش داشته و به میزان ۱۴ درصد موقعیت آن بالاتر از حالت سرریز بدون آبگذر می‌باشد.

همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود قرارگیری آبگذر در کف منجر به کاهش توسعه جت به دلیل مومنتم کمتر نسبت به دیگر حالت‌های قرارگیری آبگذر شده لذا نیم‌رخ سرعت در پایین‌دست پرش یکنواخت‌تر بوده است.

۳-۲- بررسی تغییرپذیری های عدد فرود

به‌منظور بررسی تغییرپذیری های عدد فرود روی بدنه سرریز طبق پیش فرض های تعریف‌شده نیم‌رخ موردنظر مطابق با شکل ۹ از تاج سرریز تا پنجه آن در نظر گرفته شد.



شکل ۶ نمودار تغییرپذیری های دبی ورودی و خروجی به آبراهه برحسب زمان شبیه‌سازی

Fig. 6 Graph of inflow and outflow discharge variations in the channel over simulation time.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی الگوی سرعت

بردارهای دوبعدی سرعت و همچنین نیم‌رخ‌های عمودی سرعت جریان پیش‌وپس از پرش هیدرولیکی برای حالت‌های مختلف قرارگیری آبگذر به ازای دبی‌های کمینه و بیشینه به ترتیب در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، در ناحیه پرش هیدرولیکی، حرکت‌های گردابه‌ای و اختلاط هوا-آب مشاهده می‌شود، زیرا جریان ترکیبی جت با ستون آب پایین‌دست ترکیب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، دو گردابه با وجود دو آبگذر در ناحیه پرش هیدرولیکی غرقاب‌شده شناسایی می‌شوند. یکی گردابه محبوس به دقت در خروجی آبگذر نزدیک بستر و دیگری بالای جت روی سرریز که نتیجه توسعه سرعت جت سطحی است و جریان جت آبگذر را محدود می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که نیم‌رخ‌های سرعت برای پرش هیدرولیکی کلاسیک پایین‌دست سرریز اوجی با و بدون آبگذر تفاوت دارند و بنابراین امکان تطبیق با رابطه تحلیلی ارائه‌شده توسط (McCorquodale & Khalifa (1983 وجود نداشت. تفاوت اصلی ناشی از آن است که در مدل بدون آبگذر، بیشینه سرعت در پایین‌ترین قسمت نیم‌رخ‌های عمودی قرار دارد. درحالی‌که در پرش

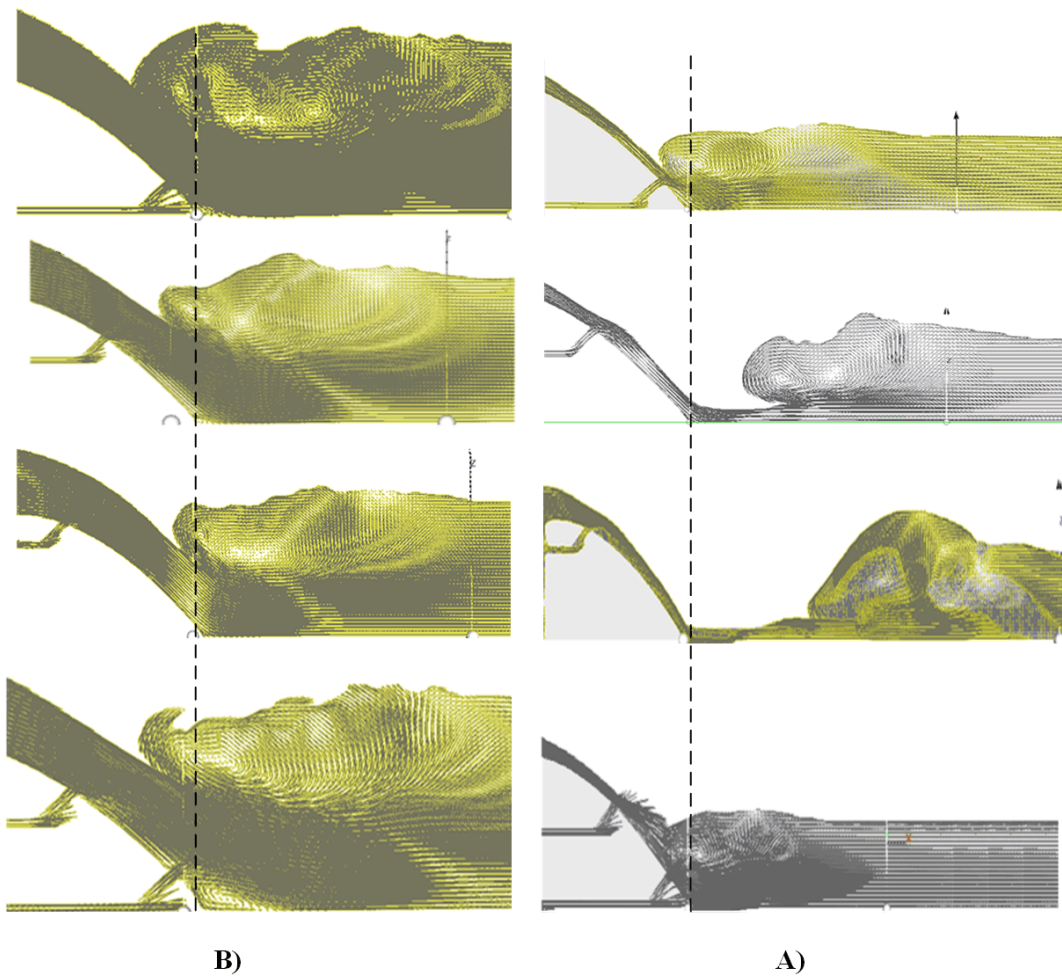


Fig. 7 Two-dimensional variations of velocity vectors in the hydraulic jump region downstream of the crest overflow spillway with different culvert positions at: (A) discharge of 16.67 liters per second, and (B) discharge of 53.76 liters per second.

شکل ۷ تغییرپذیری های دو بعدی بردارهای سرعت در محدوده پرش هیدرولیکی پایین‌دست سرریز اوجی همراه با موقعیت‌های مختلف آبگذر در (A) دبی ۱۶/۶۷ لیتر بر ثانیه و (B) دبی ۵۳/۷۶ لیتر بر ثانیه

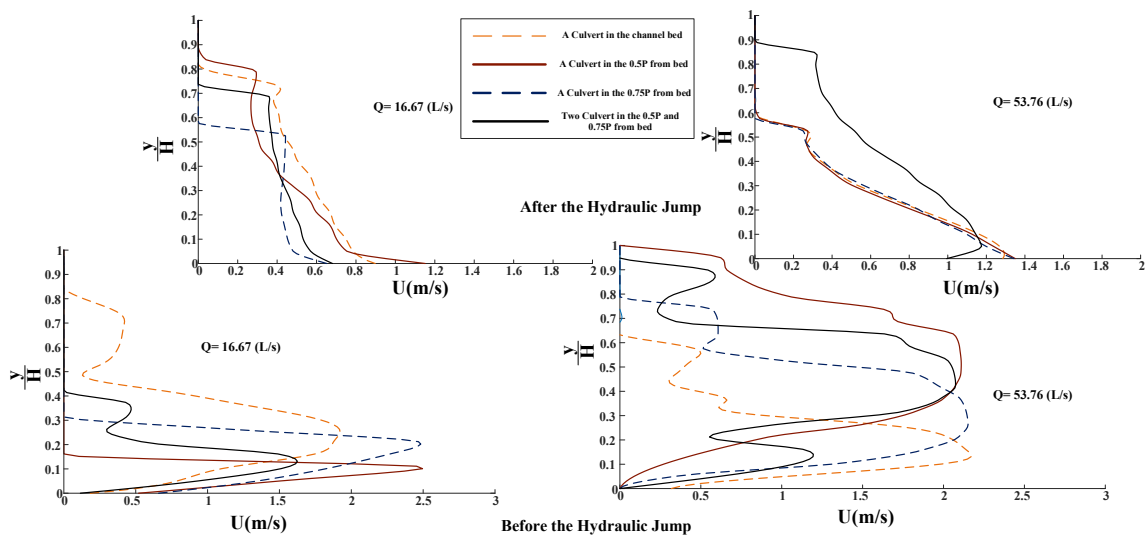


Fig. 8 Vertical velocity profile before and after the hydraulic jump downstream of the crest Ogee spillway with different culvert placement positions.

شکل ۸ نیم‌رخ عمودی سرعت پیش و پس از پرش هیدرولیک در پایین‌دست سرریز اوجی همراه با موقعیت‌های مختلف قرارگیری آبگذر

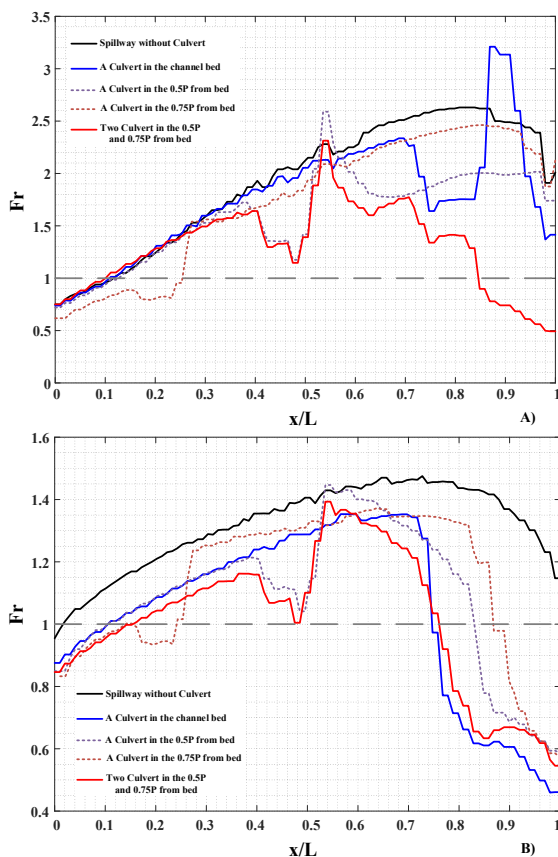


Fig. 10 Analysis of Froude number variations comparing the spillway without a culvert to different culvert placement scenarios at discharges of: (A) 16.67 L/s and (B) 53.76 L/s.

شکل ۱۰ بررسی تغییرپذیری های عدد فرود در مقایسه بین سرریز بدون آبگذر با حالت های مختلف قرارگیری آبگذر در دبی ۱۶/۶۷ (L/s) (A) و ۵۳/۷۶ (L/s) (B)

در شکل ۱۱ مقدار متوسط کاهش عدد فرود در طول شیب وجه پایین دست سرریز در حالت قرارگیری آبگذر نسبت به حالت سرریز بدون آبگذر، به ازای دو دبی کمینه و بیشینه نشان داده شده است. مشاهده می شود که افزایش دبی و افزایش عمق آب در میزان کاهش عدد فرود مؤثر می باشد. با این وجود در حالت قرارگیری دو آبگذر در بدنه سرریز اوجی، کاهش متوسط ۵۰ درصد عدد فرود نسبت به سرریز بدون آبگذر صورت می پذیرد که همان گونه که توضیح داده شد می تواند نوع پرش هیدرولیکی را آزاد به مستغرق تغییر دهد.

۳-۳- بررسی افت کل انرژی

میزان افت کل انرژی که معرف اختلاف انرژی هیدرولیکی

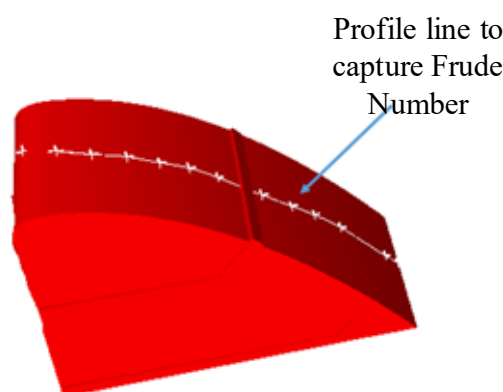


Fig. 9 Longitudinal profile of the measured Froude number along the body of the crest Ogee spillway.

شکل ۹ نیم رخ طولی عدد فرود برداشتی در بدنه سرریز اوجی

مطابق شکل ۱۰-A برای دبی کمینه ۱۶/۶۷ لیتر بر ثانیه، در فاصله ۱۰ درصدی از طول نیمرخ مورد بررسی مقدار عدد فرود فروبهرانی بوده است و پس از آن جریان در رژیم فرا بحرانی قرار می گیرد. با این وجود در حالت قرار آبگذر در ارتفاع ۷۵ درصدی ارتفاع سرریز (P)، رژیم جریان به دلیل اختلاط جت خروجی از آبگذر، در ابتدای تاج سرریز تا فاصله ۲۶ درصد از نیمرخ وجه پایین دست سرریز، رژیم فرو بحرانی خود را حفظ کرده است. همچنین در این میزان دبی مشاهده می شود در همه پیش فرض های قرارگیری آبگذر نوع پرش هیدرولیکی از نوع آزاد بوده ولی در حالت قرارگیری دو آبگذر همزمان، رژیم جریان در فاصله ۱۶ درصدی از پنجه سرریز، فروبهرانی شده که به معنی رخداد پرش هیدرولیکی از نوع مستغرق می باشد.

در شکل ۱۰-B، که مقدار عدد فرود را در نیمرخ مورد بررسی در شکل نشان می دهد، مشاهده می شود که با افزایش دبی به مقدار ۵۳/۷۶ لیتر بر ثانیه، رژیم جریان فرو بحرانی را از حال سرریز بدون آبگذر ۱۰ درصد به پایین دست تاج در همه پیش فرض های قرارگیری آبگذر منتقل کرده است. همچنین مشاهده می شود وجود آبگذر در تمامی پیش فرض های قرارگیری منجر به وقوع پرش هیدرولیکی مستغرق در پنجه سرریز می شود. مشاهده تغییرپذیری های عدد فرود نشان می دهد که بیشترین کاهش عدد فرود، در حالت قرارگیری آبگذر در بستر و در حالت قرارگیری دو آبگذر، به میزان ۲۵ درصد طول شیب وجه پایین دست سرریز در رژیم جریان فروبهرانی واقع شده است.

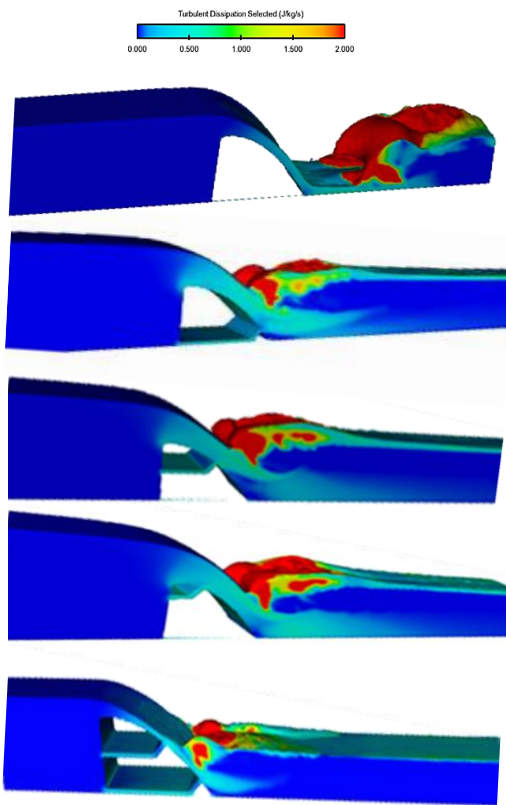


Fig. 12 Energy loss contour in the crest overflow spillway and culvert spillway system at a discharge of 53.76 L/s

شکل ۱۲ خط تراز افت انرژی در حالت سرریز اوجی و سامانه سرریز آبگذر در دبی ۵۳/۷۶ (L/s)

در شکل ۱۳ مقایسه‌ی نتایج عددی ناشی از درصد هدرروی انرژی در مدل‌های ترکیبی سرریز به همراه آبگذر نسبت به حالت سرریز اوجی بدون آبگذر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار این افت انرژی، می‌توان مشاهده کرد که در دبی کمینه، جایی که نقش آبگذر برجسته‌تر بوده و سهم بیشتری از جریان کل از آن عبور می‌کند، کاهش تراز آب در بالادست محسوس‌تر است و این امر می‌تواند منجر به افت کلی بیشتر نسبت به حالت دبی‌های بیشینه شود. با افزایش دبی عبوری، میزان افت انرژی در همه پیکربندی‌های مدل‌سازی شده روندی کاهشی را نشان می‌دهد. این امر بدان سبب است که با بالا رفتن دبی، اختلاف ارتفاع میان تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست سازه کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود در سامانه ترکیبی سرریز-آبگذر، ادغام خطوط جریان خروجی از دو بخش روی سرریز و قسمت آبگذر، به کاهش عمق ثانویه‌ی

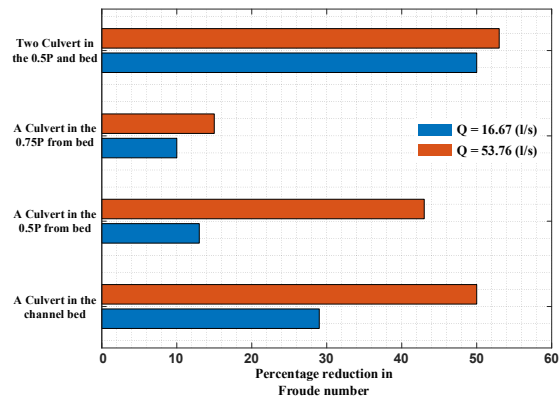


Fig. 11 Analysis of the percentage reduction in Froude number for culvert placement scenarios compared to the spillway without a culvert, at minimum and maximum discharge.

شکل ۱۱ بررسی تغییرپذیری های درصد کاهش عدد فرود در حالت قرارگیری آبگذر نسبت به حالت سرریز بدون آبگذر، به ازای دو دبی کمینه و بیشینه

میان مقطع‌های بالادست و پایین‌دست سازه می‌باشد، از طریق تفاضل میان تراز سطح آب در بالادست سرریز و تراز سطح آب پس از پرش هیدرولیکی در پایین‌دست تعیین می‌شود. در شکل ۱۲ خط تراز رنگی هدرروی انرژی جنبشی در دو حالت سرریز اوجی و سامانه سرریز-آبگذر به ازای قرارگیری در ارتفاع‌های مختلف در دبی بیشینه ۵۳/۷۶ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌گونه که بیشتر در بررسی عدد فرود نیز بیان شد به دلیل اثرگذاری‌های جت خروجی آبگذر رژیم جریان در پنجه سرریز اوجی فروبهرانی و پرش هیدرولیکی مستغرق تشکیل می‌شود. بر مبنای شکل ۱۲، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب جریان‌های خروجی از سرریز و آبگذر (با فرض ترازهای مختلف برای آبگذر)، به طور عمده منجر به بازتوزیع محل استهلاک انرژی می‌شود. بدین معنا که بخشی از انرژی که پیش‌تر اغلب توسط پرش هیدرولیکی (و به میزان کمتر توسط جریان روی سرریز) هدرروی می‌شد و به افزایش طول پرش می‌انجامید، حال در پیکربندی جدید، به نسبت بیشتری بر روی سازه سرریز مستهلاک می‌شود. این تغییر در ساز و کار هدرروی، سرانجام به تضعیف پرش هیدرولیکی منجر می‌شود، چرا که انرژی کمتری برای زایل شدن توسط پرش باقی می‌ماند.

دبی‌های کم، جریان در صورت قرارگیری آبگذرها در ارتفاع بالا (برای مثال در ۷۵٪ ارتفاع سرریز) مدت بیشتری از نقطه تاج سرریز فروبحرانی باقی ماند. پیکربندی‌های دو آبگذری باعث ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق نزدیک پای سرریز شد. در دبی‌های بالا، جریان فروبحرانی در همه حالت‌های قرارگیری آبگذرها تا پایین دست ادامه یافت.

- خط ترازهای افت انرژی نشان دادند که وجود آبگذر باعث انتقال محل هدرروی انرژی به بدنه سرریز شده و پرش هیدرولیکی را تضعیف کرده و طول آن را کاهش می‌دهد. در دبی‌های کم، افت انرژی به دلیل غلبه جریان آبگذر، محسوس‌تر بود. با افزایش دبی، افت انرژی کاهش یافت که ناشی از کاهش اختلاف سطح آب بالادست و پایین دست بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH1404.4352 صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تجزیه و تحلیل داده‌ها.

نویسنده دوم: بررسی نتایج.

نویسنده سوم: نگارش مقاله.

پرش هیدرولیکی منجر می‌شود و بر این مبنا انتظار می‌رود که برای یک دبی مشخص، افت انرژی در قیاس با مدل سرریز بدون آبگذر افزایش یابد.

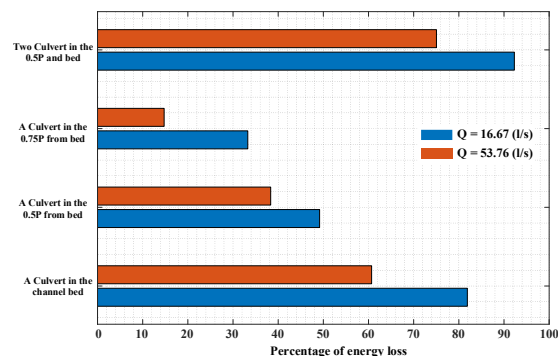


Fig. 13 Percentage of energy loss in different culvert placement scenarios compared to the spillway without a culvert.

شکل ۱۳ درصد افت انرژی در پیش فرض‌های مختلف قرارگیری آبگذر نسبت به حالت سرریز بدون آبگذر

۴- نتیجه‌گیری

هیدرودینامیک جریان در پایین دست سرریز-آبگذرهای با استفاده از مجموعه‌ای از بررسی‌های آزمایشگاهی به صورت عددی با پیش فرض‌های مختلف قرارگیری آبگذر بررسی شد. بررسی هیدرولیکی سرریز-آبگذر پیشنهادی در شرایط جریان آزاد نشان داد که این سازه دارای ظرفیت عبور جریان بیشتر نسبت به سرریز اوجی ساده است. در دبی کم، جایی که نقش آبگذر برجسته‌تر بوده و سهم بیشتری از جریان کل از آن عبور می‌کند، افزایش سه برابری دبی منجر به کاهش افت کلی انرژی تا ۳۰ درصد می‌شود. تغییرپذیری‌های انرژی جنبشی آشفتگی در دبی‌های مختلف جریان نشان داد که موقعیت بیشینه هدرروی انرژی با قرارگیری آبگذر به سمت پنجه سرریز حرکت می‌کند. این جابه‌جایی کاهش نرخ هدرروی انرژی منجر به افزایش توان بالقوه فرسایش می‌شود. مشخص شد که در دبی‌های بیشینه وجود تشکیل دو گردابه در حلت دو آبگذر منجر می‌شود که سازه پیشنهادی نرخ بالاتری از هدرروی انرژی دارد که آن را به گذرگاه مناسبی برای عبور ماهی نیز تبدیل می‌کند. نتایج کلی شامل:

- نیم رخ طولی عدد فرود نشان داد که محل قرارگیری آبگذر تأثیر قابل توجهی بر رژیم‌های جریان دارد. در

convective flow in Atria, PhD Thesis, Queen's University.

Dehdar-behbahani, S. & Parsaie, A. (2016). Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.006>

Ferro, V. (2000). Simultaneous Flow over and under a Gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(3), 190–193. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:3\(190\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(190)).

Gumus, V., Simsek, O., Soydan, N.G., Akoz, M.S. & Kirkgoz, M.S. (2016). Numerical Modeling of Submerged Hydraulic Jump from a Sluice Gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(1), 04015037. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000948](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000948).

Hargreaves, D.M., Morvan, H.P. & Wright, N.G. (2007). Validation of the Volume of Fluid Method for Free Surface Calculation: The Broad-Crested Weir. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 1(2), 136–146. <https://doi.org/10.1080/19942060.2007.11015188>.

Hayawi, H.A.M., Yahia, A.A.G. & Hayawi, G.A. M. (2008). Free combined flow over a triangular weir and under rectangular gate. *Damascus University Journal*, 24(1), 9–22.

Hirt, C.W. & Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).

Hirt, C.W. & Sicilian, J.M. (1985). A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes. International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 4th. <https://trid.trb.org/View/394627>.

Jalil, S.A. & Sarhan, S.A. (2013). Experimental study of combined oblique weir and gate structure. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4), 306–315.

Kocaer, Ö. & Yarar, A. (2020). Experimental and Numerical Investigation of Flow Over Ogee Spillway. *Water Resources Management*, 34(13), 3949–3965. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02558-9>.

Masoudian, M., Fendreski, R. & Gharahgezlou, M. (2013). The effects of laboratory canal size and cylindrical weir-gate diameter on discharge coefficient. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(15), 1630–1634.

نویسنده چهارم: بررسی صحت نتایج و مقایسه با مطالعات پیشین.

تقدیر و تشکر

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH1404.4352 صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تقدیر می‌شود.

۵- منبع‌ها

Alhamid, A.A. (1999). Analysis and formulation of flow through combined V-notch-gate-device. *Journal of Hydraulic Research*, 37(5), 697–705. <https://doi.org/10.1080/00221689909498524>.

Altan-Sakarya, A.B., Kokpinar, M.A. & Duru, A. (2020). Numerical modelling of contracted sharp-crested weirs and combined weir and gate systems. *Irrigation and Drainage*, 69(4), 854–864. <https://doi.org/10.1002/ird.2468>.

Altan-Sakarya, A.B. & Kökpinar, M.A. (2013). Computation of discharge for simultaneous flow over weirs and below gates (H-weirs). *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 32–38.

Azimi, A.H. & Rajaratnam, N. (2009). Discharge Characteristics of Weirs of Finite Crest Length. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1081–1085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000117).

Azimi, A.H., Rajaratnam, N. & Zhu, D.Z. (2012). A note on sharp-crested weirs and weirs of finite crest length. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(11), 1234–1237. <https://doi.org/10.1139/12012-106>.

Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F. José & López-Jiménez, P.A. (2016). Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>.

Bung, D.B., Crookston, B.M. & Valero, D. (2021). Turbulent free-surface monitoring with an RGB-D sensor: The hydraulic jump case. *Journal of Hydraulic Research*, 59(5), 779–790. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1844810>.

Cable, M. (2009). An evaluation of turbulence models for the numerical study of forced and natural

- doi.org/10.1061/(ASCE)0733-429(2009)135:3(224)
- Severi, A., Masoudian, M., Kordi, E. & Roettcher, K. (2015). Discharge coefficient of combined-free over-under flow on a cylindrical weir-gate. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 21(1), 42–52. <https://doi.org/10.1080/09715010.2014.939503>.
- Toozandehjani, M. & Kashefipour, M. (2012). Investigation of the head loss of ogee spillway and the length of hydraulic jump due to the conflation of the stream lines over the body of ogee spillway. *Irrigation and Water Engineering*, 2(4), 1–13. https://www.waterjournal.ir/article_70428_en.html.
- Toozandehjani, M. & Kashefipour, M. (2013). Laboratory Investigation of the Effect of Diversion Dam Underflow on the Hydraulic Jump Characteristics. *JWSS - Isfahan University of Technology*, 16(62), 205–216. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2505-en.html>.
- Uyumaz, A. (1988). Scour Downstream of Vertical Gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(7), 811–816. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:7\(811\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:7(811)).
- Yakhot, V. & Orszag, S.A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3–51. <https://doi.org/10.1007/BF01061452>.
- McCorquodale, J.A. & Khalifa, A. (1983). Internal Flow in Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(5), 684–701. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:5\(684\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:5(684)).
- Negm, A.-A.M., Al-Brahim, A.M. & Alhamid, A.A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 359–365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>
- Norouzi Banis, Y. (1992). Simultaneous underflow and over flow past a vertical gate, PhD Thesis. M.Sc. thesis, Dept. of Civil Engineering, Roorkee Univ.
- Nouri, M., Sihag, P., Kisi, O., Hemmati, M., Shahid, S. & Adnan, R.M. (2022). Prediction of the Discharge Coefficient in Compound Broad-Crested-Weir Gate by Supervised Data Mining Techniques. *Sustainability*, 15(1), 433. <https://doi.org/10.3390/su15010433>.
- Safarzadeh, A. & Mohajeri, S.H. (2018). Hydrodynamics of Rectangular Broad-Crested Porous Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(10), 04018028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001338).
- Salehi, S. & Azimi, A.H. (2019). Discharge Characteristics of Weir-Orifice and Weir-Gate Structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), 04019025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001421](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001421).
- Samani, J.M. & Mazaheri, M. (2009). Combined Flow over Weir and under Gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 224–227. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-429\(2009\)135:3\(224\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-429(2009)135:3(224)).



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.