

# Numerical Study on the Effect of the Bed Roughness on Discharge Coefficient and Energy Dissipation on Ogee Spillway

Hoshyar Ahmadian <sup>1</sup>, Mohammad Mehdi Heidari <sup>2\*</sup>, Mohammad Hossein Adib Rad <sup>3</sup>

1- Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Razi University, Iran.

2- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Iran.

\* [mm.heidari@razi.ac.ir](mailto:mm.heidari@razi.ac.ir)

Received: 18 April 2020, Accepted: 11 June 2020



J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** The diversion dams are used to increase the water level and flow diversion from river to intakes. Increasing the water level in the river will increase the potential flow energy upstream of the dam. As a result, the flow velocity on the overflow increases. Flow at the toe of a spillway is supercritical. If the high energy of water does not dissipate, cause scouring of the river's materials. Therefore, stilling basins are usually employ as to dissipate the energy of water exiting the spillway of a dam. If the flow energy in the toe is high, the stilling basins have a larger dimension and the cost of the design will increase. Information about how to change the speed and depth of the flow during the spillway and calculating the flow characteristics in the in the toe of a dam is the most important factor in determining the type and dimensions of the stilling basins. Few studies have been conducted on the amount of energy loss and the flow characteristics in the toe of a dam. One of the objectives of this study is to provide an appropriate formula for determining the amount of energy depreciation on the spillway that can be used to calculate the amount of depth and flow velocity in the toe of the dam. Investigation of the effect of surface roughness on discharge coefficient, flow velocity profile and the energy dissipation rate are other goals of this research.

**Methodology:** In this paper, Savage and Johnson's (2001) experimental data were used for evaluating the accuracy of the FLUENT model results. A physical model of a typical ogee spillway with a design head ( $H_d$ ) of 301 mm, was fabricated and tested at the UWRL. The model was constructed of Plexiglas and was fabricated to conform to the distinctive shape of an ogee crest. The model also included a tangent section and a typical flip bucket. Plexiglas was chosen because it could be fabricated with smooth curves and easily instrumented with pressure taps. The model was 1.83 m wide and approximately 0.80 m high. The  $P/H_d$  ratio (height of crest/design head) was 2.7. Wall boundary condition was applied to the spillway body and vertical walls and floor of reservoir. Zero pressure boundary condition is applied in output and upper flow field. Zero pressure is applied in air inlet and velocity inlet in upstream boundary. VOF (volume of fluid) was used to determine free surface for solving flow field and to determine boundary condition of two-phase flow. The value of volume fraction is considered zero on all boundaries, except that the water inlet flow value is applied equal to one. Using available experimental data, the depth of water on the weir crest and the pressure

on the overflow body were calculated and compared with the observed results. In order to study the effect of bed roughness on velocity profile, flow coefficient and energy loss, the values of 0.01, 1 and 3 mm were considered for roughness and the FLUENT model was again applied for these values. By performing some simulations, relation to energy loss over ogee spillway was presented.

**Results and discussion:** Based on the simulations carried by the FLUENT model, the k- $\epsilon$  RNG turbulence model and the PISO algorithm are suitable for separating the governing equations. The water depth and pressure on spillway calculated by the FLUENT model is too close to the observed data. The average relative errors of the numerical model in estimating the water depth is 3.35% and average errors in estimating pressure on spillway are 0.88, 1.22 and 1.51cm for  $Q/Q_d=1.33, 1, 0.625$  respectively, which are suitable for predicting the characteristics of flow passing through an ogee spillway. Comparison of the results in the numerical model and observational values shows that the correlation coefficient of the pressure data is about 97.5%, which indicates the proper accuracy for simulating the flow through the overflow. One of the factors influencing the characteristics of the flow through the overflow is the body roughness. The discharge flow rate decreases slightly as surface roughness height and maximum velocity at any section is slightly decreasing as the surface roughness.

**Conclusions:** The results show that with increasing roughness of the weir crest at low discharge, about 6% of the discharge coefficient decreases compared to the smooth state. Also, with an increase in roughness at low discharge, about 50 percent of the energy in the toe of a spillway is reduced. In this study, a relationship was also proposed for the amount of energy loss over ogee spillway, which provides an accurate precision for calculating the amount of energy at the beginning of the stilling basins.

**Keywords:** Discharge coefficient, FLUENT model, Friction coefficient, Navier-Stokes equations, Two-phase flow.



© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی عددی تاثیر زبری بستر بر ضریب دبی جریان و استهلاك انرژی در سرریزهای اوجی

هوشیار احمدیان<sup>۱</sup>، محمد مهدی حیدری<sup>۲\*</sup>، محمد حسین ادیب راد<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه رازی.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی.

\* mm.heidari@razi.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۳۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** مدل‌های آزمایشگاهی که قبلاً برای بررسی جریان روی سرریزهای اوجی مورد مطالعه قرار گرفته است اکثراً از جنس فیبر شیشه‌ای می‌باشد. این در حالی است که سرریز اوجی در واقعیت از بتن ساخته می‌شود. از این رو هدف از این تحقیق بررسی زبری تاج و بدنه سرریز بر ضریب تخلیه سرریز و استهلاك انرژی می‌باشد که کمتر مورد توجه محققین بوده است. در این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر زبری بستر بر خصوصیات جریان سه مقدار ۰/۰۱، ۱ و ۳ میلی‌متر برای زبری در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی‌هایی با حل عددی انجام شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش زبری در دبی‌های کم حدود ۶ درصد ضریب دبی نسبت به حالت صاف کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زبری حدود ۵۰ درصد میزان انرژی در پنجه سرریز در دبی‌های کم کاهش می‌یابد. در این پژوهش، همچنین یک رابطه‌ای برای میزان افت انرژی جریان در سرریز اوجی ارائه شد که دقت مناسبی برای محاسبه مقدار انرژی در ابتدای حوضچه آرامش دارد.

**کلیدواژگان:** افت نسبی انرژی، جریان دوفاز، ضریب دبی سرریز، ضریب اصطکاک، نرم افزار فلوئنت.

Rahmanshahi and Shafai Bajestan (2012). افزایش افت

انرژی روی سرریز باعث افزایش تراز کف حوضچه آرامش و کاهش عمق حفاری پی، کاهش طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی شده و هزینه اجرای سد کمتر می‌شود. (Savage and Johnson (2001) فشار روی بدنه سرریز اوجی و ضریب دبی جریان را با استفاده از نرم‌افزار فلوئوردی شبیه‌سازی کردند و با داده‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی ارائه شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا مقایسه کردند. مقدار ضریب دبی و فشار روی تاج سرریز برای ۱۰ سری آزمایش اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان داد مقدار خطای حل عددی برای محاسبه ضریب دبی بستگی به عمق آب روی سرریز دارد و مقدار خطا با افزایش عمق کاهش می‌یابد. (Chanson (1994) استفاده از پله بر روی سرریز را به عنوان یکی از راهکارهای افزایش افت

## ۱- مقدمه

احداث سد انحرافی در رودخانه باعث افزایش تراز سطح آب و انرژی پتانسیل می‌شود و در نتیجه جریان عبوری از روی سرریز سد در موقع سیلاب با سرعت زیادی به پایین‌دست منتقل می‌شود. انرژی جنبشی زیاد آب می‌تواند باعث آبشستگی مصالح کف رودخانه شود، بنابراین برای مستهلک کردن انرژی جنبشی زیاد در پایاب سدهای انحرافی معمولاً حوضچه آرامش طراحی می‌شود. هرچه انرژی منتقل شده به پایین‌دست بیشتر باشد، حوضچه آرامش ابعاد بزرگتری خواهد داشت و در نتیجه به همان نسبت، هزینه‌های اجرایی و نیز پایداری بند انحرافی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. ایجاد پله روی بدنه سرریز، استفاده از بلوک روی تندآب و زیر کردن بستر باعث افزایش افت انرژی و کاهش ابعاد سازه مستهلک کننده انرژی در پایین‌دست سازه می‌شود

مقایسه کردند. دبی عبوری از سرریز و توزیع فشار روی تاج توسط مدل عددی با دقت مناسبی شبیه‌سازی شده است. آنان همچنین تاثیر شیب وجه بالادست سازه را بر توزیع فشار روی بدنه سرریز ارزیابی کردند. نتایج نشان داد کاهش شیب وجه بالادست سبب کاهش فشار منفی روی تاج و افزایش ضریب دبی جریان می‌شود. Daneshfaraz et al. (2014) به مقایسه نتایج خروجی نرم‌افزار آدینا (روش المان محدود) و نرم‌افزار فلوئنت (روش احجام محدود) در شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان روی سرریز اوجی و سرریز پلکانی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که هر دو روش خوبی در شبیه‌سازی جریان روی سرریز دارند، اما روش احجام محدود خطای کمتری نسبت به روش المان محدود دارد. (Rahmanshahi and Shafai Bajestan (2012) به بررسی تاثیر اندازه زبری بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب پرداختند. بدین منظور آزمایش‌ها روی مدل‌های فیزیکی با شیب و زبری مختلف انجام شد. نتایج آنان نشان می‌دهد که با وجود زبری بستر تندآب، میزان استهلاک انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. Toozandehjani and Kashefipour (2012) در مدل آزمایشگاهی به بررسی تغییرپذیری افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان روی بدنه سرریز اوجی پرداختند. در این بررسی به منظور کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و در پی آن کاهش ابعاد حوضچه آرامش، جریان عبوری از روی سد را با جت آبی که از شکاف ایجاد شده در بدنه سد خارج می‌شود، با سه زاویه مختلف و همچنین دبی‌های مختلف تلاقی داده شد و تاثیر آن روی کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و عدد فرود بررسی شد. Rahmanshahi (2012) and Shafai با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیر اندازه زبری بر استهلاک انرژی تندآب پرداختند. نتایج آنان نشان داد که با وجود زبری بستر تندآب، میزان استهلاک انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. Alhashimi (2013) با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مدل آزمایشگاهی سرریز سد ماندلی در عراق را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی کرد و تاثیر مدل‌های آشفتگی بر نتایج را ارزیابی کرد. ایشان از مدل‌های  $k-\epsilon$

انرژی روی سرریز اوجی پیشنهاد داد. در سرریز پلکانی بخش صاف سرریزهای اوجی استاندارد با پله‌هایی به ارتفاع و طول معین جایگزین می‌شود، پله‌ها همانند زبری‌های بزرگ و مقاوم در برابر جریان عمل کرده و استهلاک انرژی جریان را افزایش می‌دهد. (Boes and Hager (2003) استهلاک انرژی روی سرریزهای پلکانی را تابعی از ارتفاع سرریز، زاویه شیب وجه پایین‌دست سرریز، دبی جریان، ارتفاع پله‌ها و انرژی جریان در بالادست دانست و رابطه‌ای برای افت انرژی سرریز پلکانی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارائه داد. (Chatila and Tabbara (2004) استفاده از نرم‌افزار ADINA که به روش المان محدود معادله‌های ناویر استوکس را حل می‌کند، شبیه‌سازی نیمرخ جریان روی سرریز اوجی را انجام دادند. آنان برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل  $k-\epsilon$  استفاده کردند و نیمرخ سطح آب شبیه‌سازی را با داده‌های مشاهده‌ای برای دبی‌های مختلف مقایسه کردند. نتایج آنان نشان داد که دقت نرم‌افزار ADINA برای شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریز اوجی مناسب است. Pagliara and Chiavaccini (2006) با ساخت مدل‌هایی با شیب‌های مختلف و استفاده از مصالح سنگی با اندازه‌های متفاوت به بررسی افت انرژی روی شیب‌های سنگی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که با افزایش اندازه زبری مقاومت جریان زیاد شده و در پی آن افت انرژی افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش شیب در آزمایش‌ها میزان افت انرژی کاهش یافت. (Zeynali (2007) مدل یک سد انحرافی جدید به نام ایلخانی‌پور را پیشنهاد داد که با تعبیه یک روزنه در بدنه سد و ترکیب جریان ورودی از روی سرریز اوجی استاندارد و جریان خروجی از روزنه، بدون استفاده از بلوک‌های حوضچه آرامش، انرژی آب را تلف کرده و همزمان عمل تخلیه رسوب و همچنین کاهش بار آبی روی تاج سرریز را موجب می‌شود. این مدل با استفاده از سازوکار ویژه‌ای که دارد از برخورد دو جت آب در استهلاک انرژی استفاده می‌کند و می‌تواند با کاهش طول تاسیسات مستهلک‌کننده انرژی، در هزینه ساخت سد انحرافی صرفه‌جویی کند. (Daneshfaraz et al (2012) جریان عبوری از سرریز اوجی را با استفاده از مدل فلوئنت شبیه‌سازی و نتایج خروجی مدل را با داده‌های آزمایشگاهی

سبب شده است که علم پویایی سیال‌های محاسبه‌ای به صورت یک ابزار توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال در سامانه‌های با هندسه ناموزون برای محققان و مهندسان در دهه گذشته توسعه یابد. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی جریان روی سرریز از نرم‌افزار عددی فلوئنت استفاده شده است و برای صحت‌سنجی و بررسی دقت نرم‌افزار فلوئنت از داده‌های آزمایشگاهی Savage and Johnson (2001) که شامل دبی عبوری از سرریز، عمق آب بالادست و توزیع فشار روی سرریز است، استفاده شد.

## ۲-۱- معادله‌های حاکم بر جریان روی سرریز اوجی و معرفی نرم‌افزار فلوئنت

معمولی‌ترین و در عین حال پرکاربردترین سرریز که دارای ضریب دبی بالاتری نسبت به دیگر سرریزها می‌باشد، سرریز اوجی است. این سرریز بر مبنای محاسبه‌های هیدرولیکی مربوط به سرریزهای با تاج مدور به گونه‌ای طراحی می‌شود که نیمرخ تاج آن منطبق بر سطح زیرین آب لبریز شده از یک سرریز لبه تیز مستطیلی باشد. دبی جریان عبوری از روی سرریز اوجی روگذر آزاد از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_d = CL_e H_e^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $Q_d$  دبی طراحی سرریز بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $C$  ضریب دبی جریان،  $L_e$  طول مؤثر سرریز اوجی بر حسب متر،  $H_e$  ارتفاع خط انرژی بالادست سرریز نسبت به تاج سرریز بر حسب متر است. ضریب دبی جریان به ارتفاع سرریز، شیب بدنه سرریز در سراب، رقوم کف پایین‌دست و تراز سطح آب در پایاب بستگی دارد. به منظور طراحی مستهلک کننده انرژی پایین‌دست سد نیاز به ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در پنجه سرریز می‌باشد. سرعت تئوری جریان آب در پنجه سرریز را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) محاسبه کرد:

$$V_t = \sqrt{2g(z - 0.5H_d)} \quad (2)$$

که در آن،  $V_t$  سرعت جریان در پنجه سرریز بر حسب متر بر ثانیه،  $H_d$  عمق آب روی تاج سرریز بر حسب متر،  $z$  اختلاف رقوم سطح آب در سراب و رقوم پنجه سرریز بر حسب متر است. شکل ۱ نیمرخ سطح آب روی سرریز اوجی و متغیرهای هیدرولیکی جریان را نشان می‌دهد.

Standar،  $k-\varepsilon$  RNG،  $k-\varepsilon$  Realizable و  $k-\omega$  برای شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریز اوجی استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد که مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG نتایج بهتری نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی دارد و خطای محاسبه دبی آن حدود ۳/۷ درصد است. Kamanbedast et al. (2014) با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیر زبری بستر بر جدارخوردگی و ضریب دبی سرریز اوجی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که ضریب دبی جریان عبوری از سرریز اوجی رابطه عکس با زبری بستر دارد. با افزایش زبری بستر ضریب دبی جریان و شاخص جدارخوردگی کاهش می‌یابد. Fleit et al. (2018) با استفاده از مدل عددی REEF3D جریان عبوری از سرریز اوجی در شرایط آزاد و مستغرق به صورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند و نتایج بدست آمده را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. میزان میانگین درصد خطای شبیه‌سازی عمق آب در بالادست سرریز در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب ۱/۹۶ و ۲/۳ درصد است.

نتایج بررسی‌ها گویای آن است، مدل‌های آزمایشگاهی که پیشتر توسط محققین برای بررسی هیدرولیک جریان روی سرریز ارزیابی شده است بیشتر از جنس فیبر شیشه‌ای می‌باشد. این در حالی است که سرریز اوجی که در واقعیت ساخته می‌شود از جنس بتن می‌باشد. از این رو هدف از این تحقیق بررسی تاثیر زبری تاج و بدنه سرریز بر روی ضریب تخلیه سرریز و استهلاک انرژی با استفاده از مدل عددی می‌باشد که کمتر مورد توجه محققین پیشین بوده است. همچنین ارائه رابطه‌ای مناسب برای تعیین میزان استهلاک انرژی روی سرریز اوجی که با استفاده از آن بتوان میزان عمق و سرعت جریان در پنجه سرریز را محاسبه کرد، از هدف‌های دیگر این پژوهش می‌باشد. برای این منظور با استفاده از اطلاعات موجود از مدل آزمایشگاهی در آغاز دقت نرم‌افزار فلوئنت در شبیه‌سازی جریان روی سرریز ارزیابی شد، آنگاه تاثیر زبری بستر و تاج سرریز بر نیمرخ سرعت، ضریب دبی سرریز و افت انرژی بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

زمان بر بودن احداث مدل‌های فیزیکی و هزینه بالای ساخت

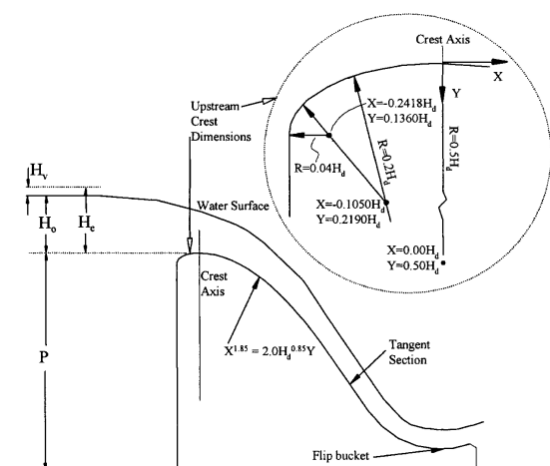


Fig. 2 Characteristic of ogee spillway model (Savage and Johnson, 2001)

شکل ۲ ویژگی‌های مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی

شکل نیمرخ اوجی سرریز مدل آزمایشگاهی از رابطه (۵) پیروی می‌کند:

$$X^{1.85} = 2H_e^{0.85}Y \quad (5)$$

که در آن،  $H_e$  بار آبی طراحی است که در مدل آزمایشگاهی ۰/۳۰۱ متر در نظر گرفته شده است و  $X$  و  $Y$  نیز مختصات نیمرخ اوجی نسبت به تاج سرریز می‌باشد. در جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی آورده شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی سرریز اوجی آزمایشگاهی

Table 1 Physical and hydraulic characteristics of ogee spillway model

Parameter	Value
Design discharge	376 l/s
Crest length	1 m
Design head	0.301 m
Height of dam	0.805 m

مدل آزمایشگاهی از جنس فیبر شیشه ساخته شده است و برابر شکل ۳، تعداد ۲۹ عدد پیژومتر در بدنه سرریز قرار دارد. میزان فشار وارد بر بدنه سرریز در سه دبی مختلف توسط پیژومترها ثبت شده است.

۲-۳- شبکه‌بندی، شرایط مرزی و انفصال معادله‌ها  
بررسی میدان جریان عبوری از سرریز در این پژوهش به صورت دوبعدی انجام شده است. محدوده شبیه‌سازی

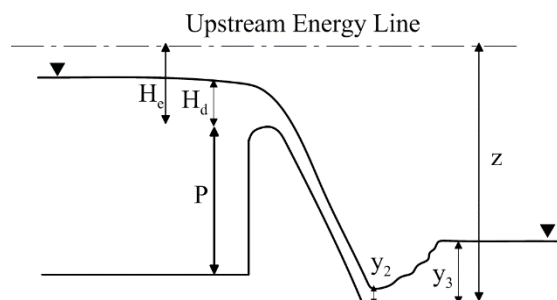


Fig. 1 Profile of water surface over ogee spillway and flow parameters

شکل ۱ نیمرخ سطح آب روی سرریز اوجی و متغیرهای جریان

معادله‌های حاکم بر جریان در سیال‌ها عبارت‌اند از معادله پیوستگی و اندازه حرکت که برای جریان آشفته و با فرض غیرقابل تراکم بودن سیال، به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) بیان می‌شوند. این معادله‌ها به معادله‌های ناویر استوکس معروف می‌باشند (Fluent, 2006):

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (4)$$

در رابطه‌های بالا،  $u_i$  سرعت لحظه‌ای در جهت  $x_i$  (در حالت دو بعدی  $i=1,2$  به ترتیب برای جهت‌های  $x$  و  $y$ )،  $\mu$  لزوجت پویایی،  $p$  فشار در هر نقطه از سیال و جمله‌های  $\rho \overline{u_i u_j}$  تنش‌های رینولدزی هستند. فلونت برای مدل‌سازی سطح آزاد، از روش حجم سیال استفاده می‌کند. افزون بر آن از طرح پرستو برای گسسته‌سازی فشار، طرح کوئیک برای انفصال جمله‌های جابه‌جایی معادله‌های مومنتم، طرح مرتبه اول آپویند برای انفصال جمله‌های جابه‌جایی معادله‌های آشفته‌گی و همچنین از الگوریتم سیمپل و پیژو برای حل همزمان سرعت و فشار استفاده شده است. در این پژوهش گام‌های زمانی برای حل مسئله، ۰/۰۰۱ ثانیه و ملاک همگرایی برای هر متغیر بر مبنای میزان باقی‌مانده خطای نسبی برابر ۰/۰۰۰۱ انتخاب شد.

## ۲-۲- داده‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، برای صحت‌سنجی نرم‌افزار فلونت از داده‌های آزمایشگاهی (Savage and Johnson (2001) استفاده شده است. در شکل ۲ طرح و نقشه مدل آزمایشگاهی به صورت نمای کلی ارائه شده است.

در همه مدل‌ها، در مرز ورودی، شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی محاسبه و به عنوان شرایط اولیه داده شد. شدت آشفتگی برابر میانگین مربعات نوسان‌های سرعت،  $u'$  تقسیم بر سرعت میانگین جریان،  $u_{avg}$  است. برای محاسبه شدت آشفتگی از رابطه تجربی (۶) استفاده شد:

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16Re_e^{-\frac{1}{8}} \quad (6)$$

$$Re = \frac{4VR}{g} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $Re$  عدد رینولدز،  $R$  شعاع هیدرولیکی و  $\vartheta$  لزوجت سینماتیکی است. قطر هیدرولیکی نیز چهار برابر شعاع هیدرولیکی در نظر گرفته شد. شدت آشفتگی زیر ۱ درصد پایین و شدت آشفتگی بیشتر از ۱۰ درصد بالا در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق شدت آشفتگی در محدوده ۳ الی ۴ درصد محاسبه شد. اندازه شبکه، نوع مدل‌های آشفتگی و شمای عددی حل از عامل‌های تاثیر گذار بر شبیه‌سازی جریان می‌باشد. برای حل همزمان فشار-سرعت، از دو الگوریتم Simple و PISO استفاده شده است که برای الگوریتم PISO تصحیح چولگی و تصحیح همسایگی برابر مقدار ۲ قرار داده شده است. الگوریتم PISO امکان بالا بردن گام زمانی را برای جلوگیری از واگرایی می‌دهد. در این تحقیق از مدل‌های آشفتگی k-ε Standard، k-ε RNG و k-ε Realizable برای شبیه‌سازی استفاده شده است. به منظور بررسی موارد بالا بر نتایج خروجی، برای چهار دبی  $Q/Q_d=0.625$ ،  $Q/Q_d=1$ ،  $Q/Q_d=1.33$  و  $Q/Q_d=0.343$  که در آن دبی طراحی و برابر ۰/۳۷۶ مترمکعب بر ثانیه است با نرم‌افزار فلوئنت جریان روی سرریز شبیه‌سازی شد و بار انرژی روی تاج سرریز محاسبه و با مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. در جدول ۲ ویژگی‌های مدل‌های مختلف مورد استفاده در تحقیق و میانگین درصد خطای محاسبه هد انرژی توسط مدل عددی آورده شده است. در این تحقیق سه شبکه درشت، متوسط و ریز برای شبیه‌سازی مدل فلوئنت در نظر گرفته شد. اندازه سلول‌ها در شبکه درشت، متوسط و ریز به ترتیب حدود ۱۰ میلی‌متر (۴۹۳۲ سلول)، ۵ میلی‌متر (۱۰۹۵۹ سلول) و ۲/۵ میلی‌متر (۱۹۱۱۲ سلول) است.

جریان و هندسه سرریز بر مبنای بعدهای مدل فیزیکی با نرم‌افزار اتوکد ترسیم و برای شبکه‌بندی به نرم‌افزار پیش‌پردازنده گمبیت نسخه ۲.۴.۶ منتقل شد. پس از اجرای اولیه، تعداد مش روی تاج سرریز و بدنه تا رسیدن به مش بهینه افزایش داده شد. شرایط مرزی و اولیه برای اجرای جریان ناماندگار توسط فلوئنت از اساسی‌ترین مرحله‌های شبیه‌سازی است. در این تحقیق برابر شکل ۴، برای کف فلویم و سرریز شرط مرزی دیواره، در قسمت خروجی شرط مرزی فشار نسبی صفر، در بخش بالایی شرط مرزی هوای ورودی که به صورت فشار نسبی صفر و در قسمت ورودی شرط مرزی سرعت آب انتخاب شد. برای شرط مرزی سرعت ورودی لازم است یک عمق تقریبی در مدل عددی وارد کرد، بدین منظور از رابطه عمق بحرانی بر مبنای دبی عبوری از سرریز کمترین انرژی مخصوص محاسبه و ارتفاع آب بالادست با اضافه کردن ارتفاع سرریز به انرژی مخصوص تعیین شد. همچنین محدوده شرط مرزی هوای ورودی، طوری در نظر گرفته شد که یک-سوم محدوده را هوا و دوسوم آن را آب در بر می‌گیرد. لازم به یادآوری است با توجه به آنکه جنس سرریز از فیبر شیشه می‌باشد، برای مرز دیواره زبری ۰/۰۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

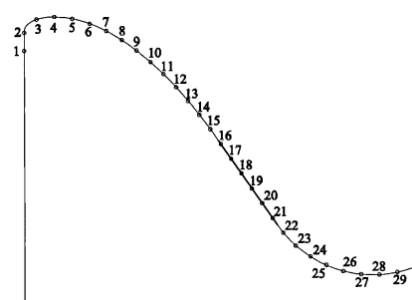


Fig. 3 Location of the pressure taps along the spillway  
شکل ۳ موقعیت پیزومترهای روی سرریز اوجی آزمایشگاهی

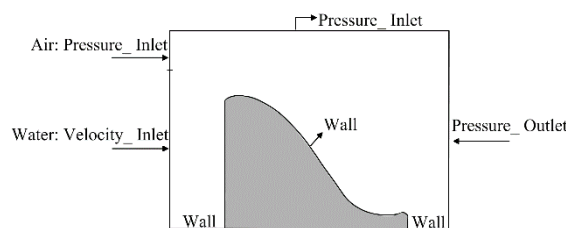


Fig. 4 Boundary conditions for the modeling of ogee spillway

شکل ۴ شرایط مرزی در شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریز اوجی

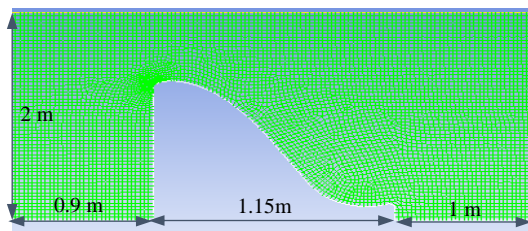


Fig. 5 Defined mesh for the laboratory ogee spillway in Fluent

شکل ۵ محدوده شبکه‌بندی مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار فلوئنت

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی

برای تعیین دقت مدل فلوئنت در شبیه‌سازی هیدرولیکی سرریز اوجی از داده‌های (Savage and Johnson (2001 که شامل عمق و دبی در بالادست سرریز و نیمرخ فشار در نقطه‌های مختلف برای سه دبی نسبی  $Q/Q_d=1/33$ ،  $Q/Q_d=1$  و  $Q/Q_d=0.625$  می‌باشد، استفاده شد. عمق آب بالادست سد در مدل آزمایشگاهی برای ۱۰ دبی اندازه‌گیری شده است. برای دبی‌های مورد نظر شبیه‌سازی صورت گرفت و عمق آب بالادست از نتایج استخراج شد. برای تعیین مرز بین آب و هوا، VOF برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ برای دبی نسبی  $Q/Q_d=1/33$  خروجی نرم‌افزار فلوئنت آورده شده است.

در جدول ۳ نسبت بار انرژی به عمق طراحی،  $H_0/H_d$ ، برای داده‌های آزمایشگاهی و حل عددی برای هر دبی آورده شده است.

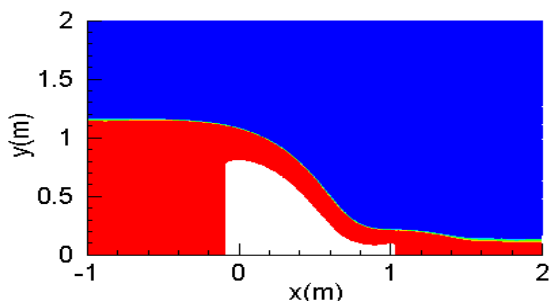


Fig. 6 Computed free surface profile for  $Q/Q_d=1.33$

شکل ۶ تراز سطح آب شبیه‌سازی شده برای دبی  $Q/Q_d=1/33$

به منظور تعیین دقت حل عددی در تعیین عمق آب در بالادست سرریز، میزان خطا از رابطه (۸) محاسبه و برای دبی‌های مختلف در شکل ۷ آورده شده است. همچنین

جدول ۲ ویژگی‌های مدل‌های شبیه‌سازی و متوسط درصد

خطای هد انرژی محاسباتی بالادست سرریز اوجی

Table 2 Characteristic of simulated models and mean percentage error of computed energy head upstream ogee spillway

No.	Cell Number	Turbulence model	Discretization algorithm	Error (%)
A1	4932	k-ε Standard	PISO	7.57
A2	4932	k-ε RNG	PISO	6.5
A3	4932	k-ε Realizable	PISO	6.9
B1	4932	k-ε Standard	Simple	7.95
B2	4932	k-ε RNG	Simple	7.1
B3	4932	k-ε Realizable	Simple	7.35
C1	10959	k-ε Standard	PISO	4.4
C2	10959	k-ε RNG	PISO	3.2
C3	10959	k-ε Realizable	PISO	3.8
D1	10959	k-ε Standard	Simple	5.1
D2	10959	k-ε RNG	Simple	4.5
D3	10959	k-ε Realizable	Simple	4.7
E1	19112	k-ε Standard	PISO	3.8
E2	19112	k-ε RNG	PISO	2.8
E3	19112	k-ε Realizable	PISO	3.1
F1	19112	k-ε Standard	Simple	4.5
F2	19112	k-ε RNG	Simple	3.4
F3	19112	k-ε Realizable	Simple	3.5

خطای مدل عددی با افزایش شمار سلول‌های شبکه کاهش می‌یابد اما مدت زمان شبیه‌سازی توسط رایانه بسیار بیشتر می‌شود. با توجه به اختلاف ناچیز دقت حل عددی برای شمار شبکه‌های ۱۰۹۵۹ با ۱۹۱۱۲، بدلیل مدت زمان اجرای کمتر، شمار سلول‌های شبکه معادل ۱۰۹۵۹ برای شبیه‌سازی انتخاب شد. همچنین مدل آشفتگی k-ε RNG که برای حل همزمان فشار-سرعت، از الگوریتم PISO استفاده شده، یعنی مدل C2 برای شبیه‌سازی الگوی جریان روی سرریز مناسب تشخیص داده شد. به طور میانگین اندازه سلول‌های شبکه حدود ۵ میلی‌متر انتخاب شد. دلیل این انتخاب مستقل بودن نتایج نسبت به شمار سلول‌ها و رعایت میزان  $y^+$  در لایه‌های مرزی دیواره‌ها و جریان بوده است، زیرا برای مدل‌سازی دیواره از توابع دیوار استاندارد استفاده شده است که باید رابطه  $30 < y^+ < 300$  برقرار باشد. در شکل ۵ نمایی از محدوده شبکه‌بندی مدل آزمایشگاهی سرریز در نرم‌افزار فلوئنت آورده شده است.



همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دبی نسبی میزان خطای نسبی حل عددی کاهش می‌یابد. میانگین درصد خطا و ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطا برای محاسبه عمق آب در بالادست سرریز برای نرم‌افزار فلوئنت ۳/۳۵ درصد و ۰/۱۴ می‌باشد. بنابراین حل عددی بخوبی عمق آب روی سرریز را پیش‌بینی کرده است.

نیم‌رخ فشار برای سه دبی نسبی ۱/۳۳، ۱ و ۰/۶۲۵ در مدل آزمایشگاهی توسط پیژومترهایی که در کف سرریز نصب

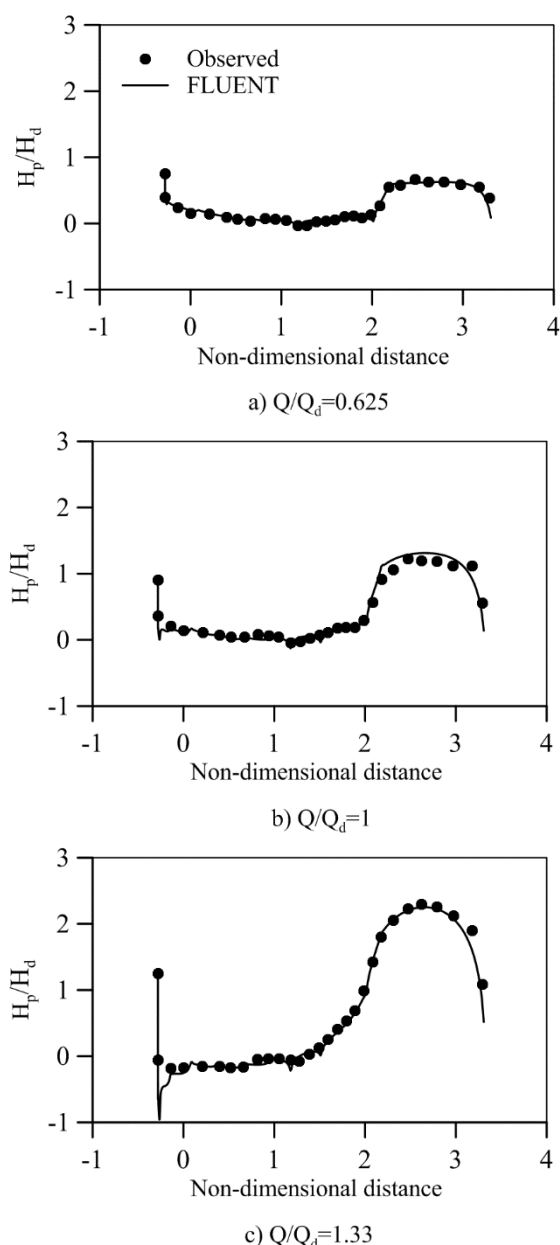


Fig. 8 Comparison of observed and computed pressure profile over ogee spillway

شکل ۸ مقایسه فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای روی سرریز اوجی

جدول ۳ بار انرژی بدون بعد مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای دبی‌های مختلف

Table 3 Observed and calculated dimensionless energy head for different discharge

No.	Q/Q <sub>d</sub>	H <sub>e</sub> /H <sub>d</sub>	
		Numerical	Observed
1	0.019	0.079	0.07
2	0.075	0.203	0.19
3	0.126	0.284	0.27
4	0.236	0.422	0.41
5	0.343	0.529	0.51
6	0.429	0.611	0.59
7	0.625	0.759	0.76
8	0.786	0.873	0.87
9	1	1.013	1.01
10	1.33	1.177	1.2

میانگین درصد خطا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا برابر رابطه‌های (۹) و (۱۰) محاسبه شد.

$$AE = \frac{100}{o_i} |o_i - s_i| \quad (8)$$

$$MAE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n |o_i - s_i| / o_i \quad (9)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

در رابطه‌های بالا، AE درصد خطا، MAE میانگین درصد خطا، RMSE ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطا،  $o_i$  میزان متغیر مشاهده شده،  $s_i$  میزان پارامتر محاسبه شده توسط مدل عددی و  $n$  شمار متغیرهای مشاهده شده می‌باشد.

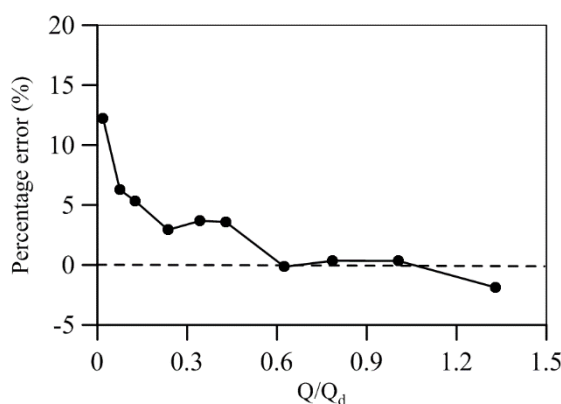


Fig. 7 Relative percent error in calculated water depth on the upstream of ogee spillway using fluent model

شکل ۷ درصد خطای محاسبه عمق آب بالادست سرریز اوجی توسط نرم‌افزار فلوئنت

شده بودند، برداشت شده است. در شکل ۸ فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای بدون بعد (نسبت بار فشاری به عمق طراحی) در فاصله بدون بعد نقطه‌ها روی سرریز اوجی (نسبت فاصله نقطه‌ها از تاج سرریز به عمق طراحی) آورده شده است.

در صورتی که دبی عبوری از سرریز بیش از دبی طراحی شود، بدلیل تحذب در تاج سرریز فشار منفی ایجاد می‌شود. این کاهش فشار روی تاج باعث مکش آب و در نتیجه افزایش ضریب دبی سرریز می‌شود. در صورتی که فشار روی تاج از فشار بخار کمتر شود باعث جدار خوردگی و تخریب بتن سرریز می‌شود.

به منظور تعیین دقت مدل فلونت در محاسبه فشار، خطای مطلق بار فشاری برای هر پیزومتر حساب شد و در شکل ۹ آورده شده است. میانگین خطای مطلق محاسبه هد فشار توسط نرم افزار فلونت برای دبی نسبی ۱/۳۳، ۱ و ۰/۶۲۵ به ترتیب ۰/۸۸، ۱/۲۲ و ۱/۵۱ سانتی‌متر است.

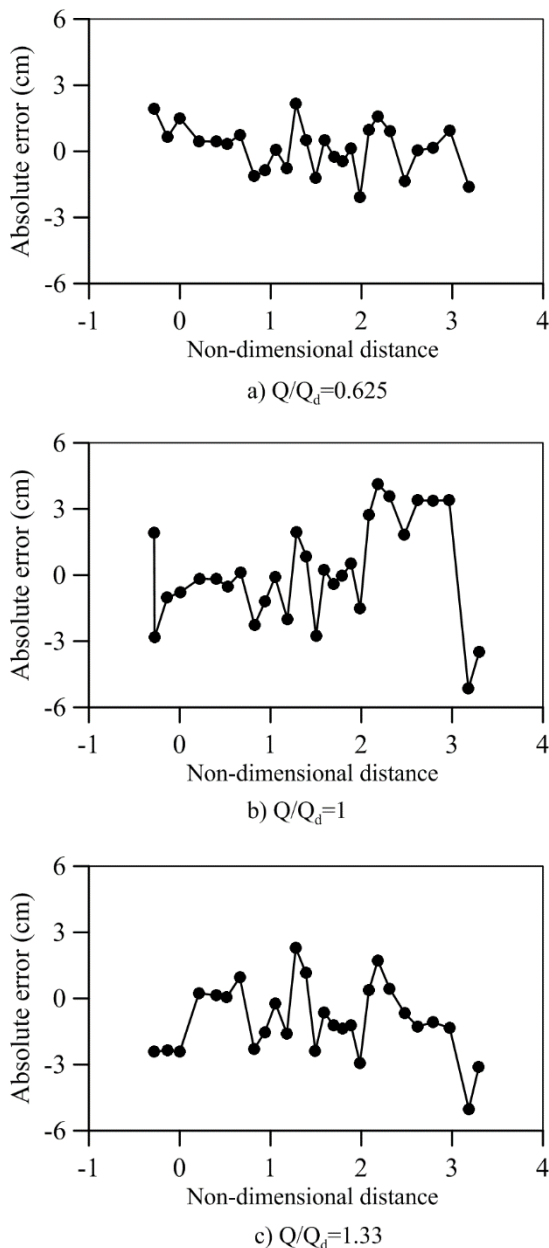
برای بررسی دقت حل عددی در پیش‌بینی فشار نقطه‌ها مختلف بر روی سرریز، ضریب همبستگی نتایج ( $R^2$ ) بر مبنای رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$R^2 = \frac{[\sum(P_c - \bar{P}_c)(P_o - \bar{P}_o)]^2}{\sum(P_c - \bar{P}_c)^2 \sum(P_o - \bar{P}_o)^2} \quad (11)$$

که در آن  $P_c$  و  $P_o$  به ترتیب مقادیر فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای،  $\bar{P}_c$  و  $\bar{P}_o$  متوسط فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای است. با استفاده از رابطه بالا، شاخص هم‌روندی داده‌ها شبیه‌سازی فشار برای دبی نسبی ۱/۳۳، ۱ و ۰/۶۲۵ به ترتیب ۹۴/۸، ۹۸/۱ و ۹۹/۵ درصد است. میزان بالای این شاخص نشان‌دهنده توانایی بالای نرم‌افزار فلونت در پیش‌بینی توزیع فشار روی سرریز اوجی است.

### ۲-۳- تاثیر زبری بر نیمرخ سرعت جریان روی سرریز اوجی

یکی از عوامل موثر بر هیدرولیک جریان روی سرریز اوجی زبری بدنه سرریز می‌باشد که تحقیقات اندکی روی آن انجام شده است. به‌منظور بررسی تاثیر ارتفاع زبری بر هیدرولیک جریان روی سرریز آزمایشگاهی سه میزان ۱/۰، ۱ و ۳ میلی‌متر برای آن در نظر گرفته شد و مدل فلونت برای این میزان‌ها اجرا شد و تاثیر تغییرپذیری میزان زبری،  $k$  بر رفتار جریان بررسی شد. تاثیر زبری بر



**Fig. 9** Absolute error of calculated pressure head using fluent model for different discharge

شکل ۹ خطای مطلق بار فشاری محاسبه‌ای توسط مدل فلونت برای دبی‌های مختلف

یادآوری است، ارتفاع زبری ۰/۰۱ میلی‌متر مربوط به فیبر شیشه است که در بیشتر آزمایشگاه‌ها برای آزمایش روی سرریز از آن استفاده می‌شود و ارتفاع زبری ۱ و ۳ میلی‌متر به ترتیب مربوط به کمینه و بیشینه زبری بتن است. شکل ۱۲ تاثیر ارتفاع زبری بر ضریب آبگذری سرریز را به ازاء میزان‌های مختلف دبی عبوری نشان می‌دهد.

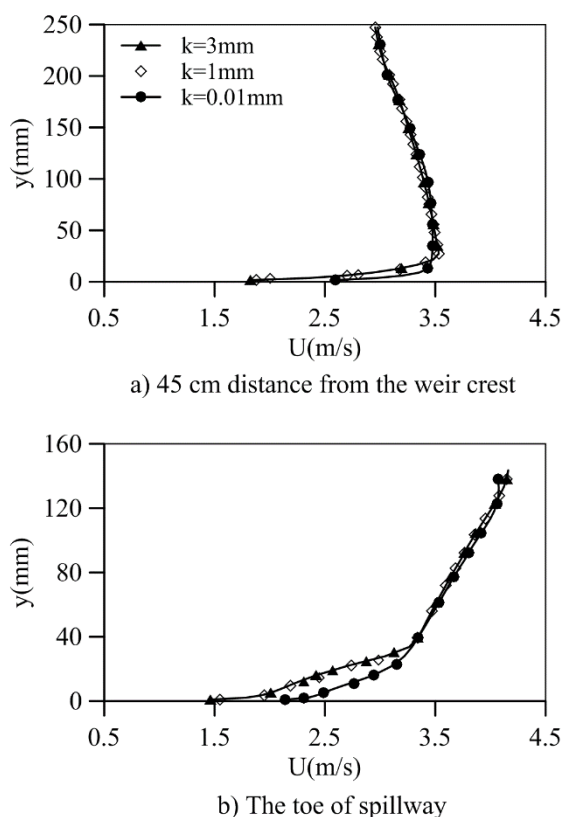


Fig. 11 The effect of surface roughness of ogee weir on the vertical velocity distribution for  $Q/Q_d=1.33$

شکل ۱۱ تاثیر زبری بستر سرریز اوجی بر نیمرخ سرعت برای دبی نسبی ۱/۳۳

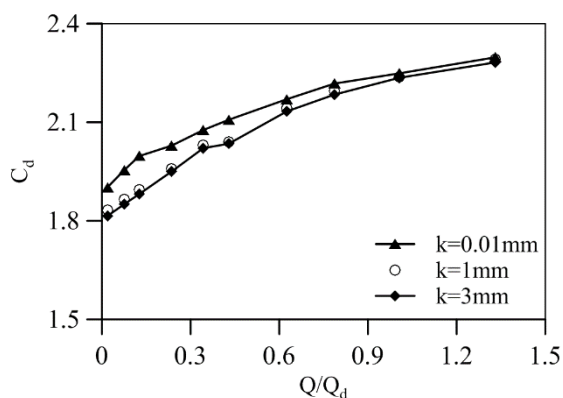


Fig. 12 Effect of surface roughness on discharge coefficient of ogee spillway

شکل ۱۲ تاثیر زبری بستر بر ضریب دبی سرریز اوجی

افزایش دبی جریان، عمق آب در بالادست سرریز افزایش یافته و در نتیجه انرژی پتانسیل جریان در بالادست زیاد می‌شود. حرکت آب به سمت پایین دست باعث تبدیل انرژی پتانسیل به جنبشی و افزایش سرعت جریان می‌شود. با افزایش زبری بستر، مقاومت جریان افزایش یافته و در نتیجه میزان انرژی جنبشی جریان و سرعت جریان کاهش می‌یابد. در صورتی که عمق جریان کمتر باشد تاثیر زبری بستر بر جریان بیشتر می‌باشد به طوری که در دبی نسبی ۰/۰۱۹ تاثیر زبری بدلیل کم بودن عمق جریان نسبت به دبی نسبی ۱/۳۳ بسیار بیشتر می‌باشد.

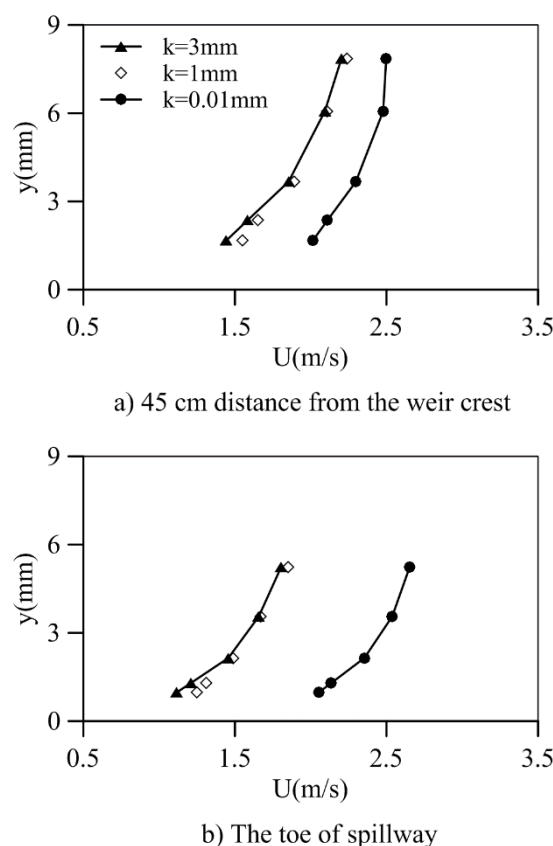


Fig. 10 The effect of surface roughness of ogee weir on the vertical velocity distribution for  $Q/Q_d=0.019$

شکل ۱۰ تاثیر زبری بستر سرریز اوجی بر نیمرخ سرعت برای دبی نسبی ۰/۰۱۹

### ۳-۳- تاثیر زبری تاج سرریز اوجی بر ضریب دبی

برای بررسی تاثیر ارتفاع زبری بر ضریب آبگذری سرریز آزمایشگاهی سه میزان ۰/۰۱، ۱ و ۳ میلی‌متر برای زبری در نظر گرفته شد و در محیط نرم‌افزار فلوئنت اجرا شد و ضریب دبی برای دبی‌های مختلف محاسبه شد. لازم به

میزان افت انرژی کاسته می‌شود. علت این است که در دبی‌های کم، عمق آب کمتر بوده و زبری نمود بیشتری پیدا می‌کند. برای دبی نسبی ۱/۳۳ میزان استهلاک نسبی انرژی برای سه مقدار زبری ۰/۰۱، ۱ و ۳ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۰۸۳ انرژی بالادست است، همچنین به ازاء دبی نسبی ۰/۰۷۱ میزان استهلاک نسبی انرژی برای میزان‌های مختلف زبری به ترتیب برابر با ۰/۶۵، ۰/۸۱ و ۰/۸۳ می‌باشد. در یک زبری بستر ثابت با افزایش دبی و به دنبال آن افزایش عمق از تاثیر زیرلایه لزوج بر نیمرخ سرعت کاسته شده و در پی آن تنش برشی وارد به جریان کم می‌شود. با کاهش تنش برشی وارد به جریان، تاثیر عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی کم می‌گردد، در نتیجه تاثیر زبری بر مقاومت جریان کمتر و افت انرژی کمتری رخ می‌دهد. افزون بر این در یک دبی ثابت با افزایش ارتفاع زبری میزان نسبی افت انرژی افزایش پیدا می‌کند، زیرا با افزایش اندازه زبری بستر، مقاومت جریان افزایش و در نتیجه انرژی جریان کاهش می‌یابد.

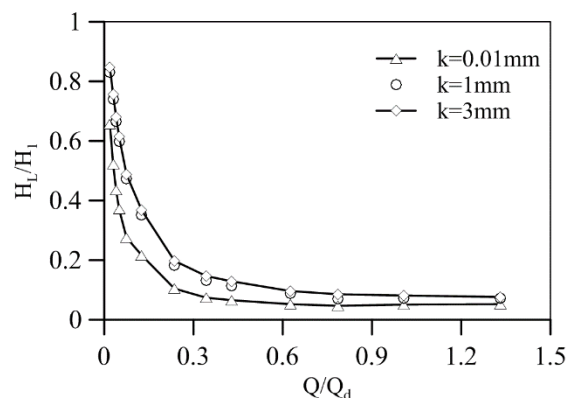


Fig. 13 Effect of surface roughness on energy dissipation on ogee spillway for different discharge

شکل ۱۳ تاثیر زبری بستر بر افت انرژی در سرریز اوجی برای دبی‌های مختلف

در این تحقیق به منظور ارائه رابطه‌ی مناسب برای محاسبه میزان افت نسبی انرژی جریان در سرریز اوجی رابطه‌های مختلفی به نتایج خروجی مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برازش داده شد و در نهایت بهترین رابطه که کمترین میزان خطا را داشت، برابر رابطه (۱۵) ارائه شد:

$$\frac{H_L}{H_1} = 1 - \exp\left(-0.0551 \frac{H_{dam}}{y_c} \left(\frac{k}{y_c}\right)^{0.1}\right) \quad (15)$$

افزایش ارتفاع زبری سبب می‌شود که ارتفاع بیشتر از زبری بستر از ضخامت لایه مرزی جریان بیرون آید. در پشت زبری‌هایی که از لایه مرزی خارج شدند، گرداب‌های کوچکی ایجاد می‌شود که برای چرخیدن، انرژی را از جریان می‌گیرند و این امر سبب افزایش افت انرژی و کاهش ضریب دبی سرریز می‌شود. در صورتی که عمق آب روی تاج سرریز کمتر باشد تاثیر زبری جریان بر میزان افت انرژی و ضریب دبی بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در دبی‌های پایین میزان عمق آب روی تاج کم بوده و افزایش زبری از ۰/۰۱ به ۳ میلی‌متر حدود ۶ درصد و در دبی‌های بالا حدود ۰/۲ درصد ضریب دبی را کاهش می‌دهد.

### ۳-۴- تاثیر زبری بستر سرریز اوجی بر افت انرژی جریان

متغیرهای سرعت، فشار و عمق جریان در بالادست سرریز و پنجه سرریز استخراج و با استفاده از آن‌ها افت انرژی ناشی از اصطکاک جداره سرریز محاسبه شد. برای محاسبه افت انرژی جریان عبوری از سرریز، بین مقطع بالادست و پنجه سرریز معادله انرژی مطابق برابر (۱۲) تا (۱۴) نوشته می‌شود.

$$H_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} + \Delta Z \quad (12)$$

$$H_2 = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2} \quad (13)$$

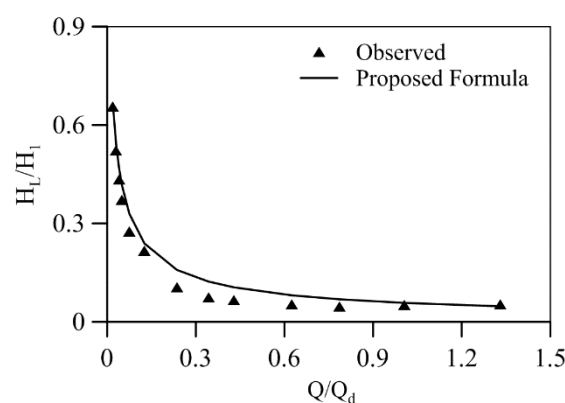
$$H_L = H_1 - H_2 \quad (14)$$

در روابط بالا، زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب برای مقطع بالادست و پنجه سرریز،  $H$  انرژی کل جریان،  $y$  عمق آب،  $q$  دبی در واحد عرض،  $\Delta Z$  اختلاف رقوم کف رودخانه در بالادست و پایین‌دست سرریز،  $g$  شتاب ثقل و  $H_L$  افت ناشی از اصطکاک جداره سرریز است. همان‌طور که اشاره شد، افت انرژی به ازاء سه میزان مختلف از ارتفاع زبری (۰/۰۱، ۱ و ۳ میلی‌متر) و مقادیر دبی‌های گوناگون بررسی می‌شود. در شکل ۱۳ افت نسبی انرژی جریان روی سرریز،  $H_L/H_1$ ، ناشی از زبری بستر برای دبی‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دبی‌های کم تاثیر ارتفاع زبری بر افت انرژی جریان بیشتر بوده و با افزایش دبی از

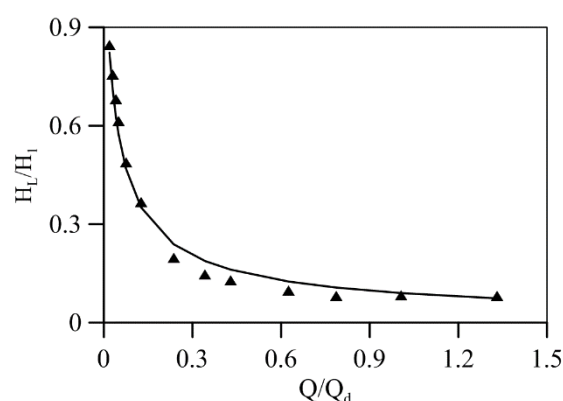
زبری در نظر گرفته شد و خروجی عددی در فلونت با نتایج رابطه ارائه شده در شکل ۱۴ آورده شده است. همان طوری که ملاحظه می شود، رابطه ارائه شده برای افت انرژی جریان روی سرریز اوجی دقت مناسب دارد. ضریب همبستگی رابطه ارائه شده و نتایج حل عددی در فلونت برای زبری ۰/۰۱، ۱ و ۳ میلی متر به ترتیب ۹۹/۵، ۹۷/۲۱ و ۹۶/۳۷ و ریشه ی دوم میانگین مربعات خطا نیز به ترتیب ۰/۰۳۵، ۰/۰۳۸ و ۰/۰۴۱ می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

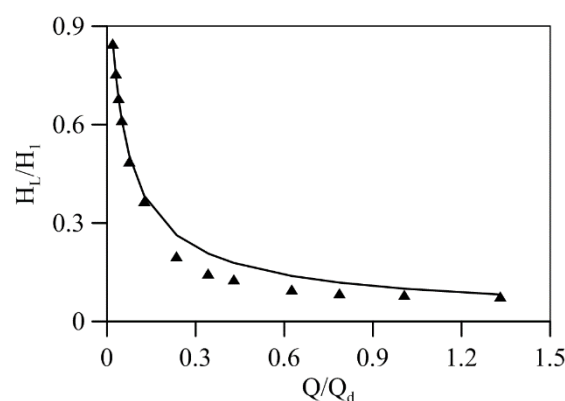
در این تحقیق در آغاز با استفاده از داده های آزمایشگاهی به بررسی دقت نرم افزار فلونت در شبیه سازی جریان عبوری از سرریز اوجی پرداخته شد و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و RNG و الگوریتم PISO برای گسسته سازی معادله های حاکم مناسب تشخیص داده شد. با استفاده از خروجی نرم افزار فلونت برای دبی نسبی ۰/۰۶۲۵، ۱ و ۱/۳۳ فشار وارد بر بستر سرریز محاسبه و با میزان های مشاهده ای مقایسه شد. نتایج نشان می دهد که ضریب همبستگی نتایج حدود ۹۷/۵ درصد برای شبیه سازی فشار می باشد که نشان دهنده دقت مناسب برای شبیه سازی جریان عبوری از سرریز است. یکی از عامل های موثر بر هیدرولیک جریان روی سرریز اوجی زبری بدنه سرریز است. نتایج تحقیق نشان می دهد با افزایش زبری تاج سرریز مقاومت جریان بیشتر شده و در نتیجه ضریب دبی جریان کاهش می یابد. در صورتی که عمق آب روی تاج سرریز کمتر باشد تاثیر زبری بر ضریب دبی بیشتر است به طوری که در عمق های کم، افزایش زبری حدود ۶ درصد ضریب دبی را کاهش می دهد. زبری بستر بر میزان استهلاك انرژی جریان عبوری از سرریز اوجی نیز تاثیر می گذارد با افزایش زبری میزان افت انرژی افزایش یافته و میزان سرعت جریان در ابتدای حوضچه آرامش کاهش می یابد. در دبی های پایین تاثیر زبری بر استهلاك انرژی بیشتر است به طوری که برای دبی نسبی ۱/۳۳ میزان افت نسبی انرژی برای سه میزان زبری ۰/۰۱، ۱ و ۳ میلی متر به ترتیب برابر ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۰/۰۸۳ و برای دبی نسبی ۰/۰۷۱ میزان استهلاك انرژی به ترتیب با ۰/۱۶۵، ۰/۱۸۱ و ۰/۱۸۳ می باشد. همچنین در این پژوهش یک



a) 0.01mm height of Surface Roughness



b) 1mm height of Surface Roughness



c) 3mm height of Surface Roughness

Fig. 14 Comparison of computed energy dissipation using fluent model and proposed equation

شکل ۱۴ مقایسه افت انرژی محاسبه ای توسط نرم افزار فلونت و رابطه ارائه شده

در رابطه بالا،  $H_{dam}$  ارتفاع سد نسبت به رقوم کف حوضچه آرامش و  $y_c$  عمق بحرانی جریان می باشد. برای مقایسه رابطه فوق و نتایج نرم افزار فلونت میزان های مختلف برای ارتفاع

Chanson, H. (1994). Comparison of energy dissipation in nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *J. Hyd. Res.*, 32(2), 213-218.

Chatila, J. and Tabbara, M. (2004). Computational modeling of flow over an ogee spillway. *J. Computer and Structures*, 82(22), 1805-1812.

Rahmanshahi Zahabi, M. and Shafai Bajestan, M. (2012). Experimental investigation of the effect of chute bed roughness height on energy dissipation. *J. Water and Soil Science*, 22(2), 96-101. (In Persian)

Daneshfaraz, R., Vakili, S., Majedi-Asl, M. and Rostami, M. (2012). Numerical investigation of upstream face slope and curvature of ogee spillway on flow pattern. *J. Environmental Science and Engineering*, 5(1), 589-596.

Daneshfaraz, R., Kaya, B., Sadeghfam, S. and Sadeghi, H. (2014). Simulation of flow over ogee and stepped spillways and comparison of finite element volume and finite element methods. *J. Water Resource and Hydraulic Eng.*, 3(2), 37-47.

Fleit, G., Baranya, S. and Bihs, H. (2018). CFD modeling of varied flow conditions over an ogee-weir. *J. Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 26-32.

Fluent Inc. (2006). *Fluent 6.3 user guide manual*. Lebanon. New Hampshire, USA.

Kamanbedast, A.A., Bahmani, M. and Aghamajidi, R. (2014). The effect of surface roughness on discharge coefficient and cavitations of ogee spillways using physical models. *J. Applied Science and Agriculture*, 9(6), 2442-2448.

Pagliara, S. and Chiavaccini, P. (2006). Energy dissipation on block ramps. *J. Hydraulic Engineering*, 132(1), 41-48.

Rahmanshahi Zahabi, M. and Shafai Bajestan, M. (2012). Experimental investigation of the effect of chute bed roughness height on energy dissipation. *J. Water and Soil Science (Agricultural Science)*, 22(2), 95-106. (In Persian)

Savage, B.M. and Johnson, M.C. (2001). Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study. *J. Hydraulic Engineering*, 127(8), 640-649.

Toozandehjani, M. and Kashfipour, M. (2012). Investigation of the head loss of ogee spillway and the length of hydraulic jump due to the confection of the stream lines over the body of ogee spillway. *J. Irrigation and water engineering*, 8(2), 1-13. (In Persian)

Zeynali, R.I. (2007). Ilkhanipour model for diversion dams. *Proc. of 9nd International Symposium on Fluid control measurement and visualization*, Tallahassee, USA.

رابطه برای مقدار افت انرژی جریان در سرریز اوجی ارائه شد که دقت مناسبی برای محاسبه میزان انرژی در ابتدای حوضچه آرامش دارد.

## ۵- فهرست نشانه‌ها

C	ضریب دبی جریان
g	شتاب ثقل ( $ms^{-2}$ )
H	انرژی کل جریان (m)
$H_d$	عمق آب روی تاج سرریز (m)
$H_{dam}$	ارتفاع سرریز (m)
$H_e$	بار آبی طراحی سرریز (m)
$H_L$	افت ناشی از اصطکاک جداره سرریز (m)
K	میزان زبری مطلق سرریز (mm)
$L_e$	طول مؤثر سرریز اوجی (m)
p	فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
q	دبی در واحد عرض ( $m^2s^{-1}$ )
$Q_d$	دبی طراحی سرریز ( $m^3s^{-1}$ )
R	شعاع هیدرولیکی (m)
$R^2$	ضریب همبستگی
Re	عدد رینولدز
$u_i$	سرعت لحظه‌ای در جهت i ( $ms^{-1}$ )
$V_t$	سرعت جریان در پنجه سرریز ( $ms^{-1}$ )
X, Y	مختصات نیمرخ اوجی سرریز (m)
y	عمق آب (m)
$y_c$	عمق بحرانی جریان (m)
	نشانه‌های یونانی:
$\rho$	جرم مخصوص سیال ( $kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزوجت پویایی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\vartheta$	لزوجت سینماتیکی ( $m^2s^{-1}$ )
$\theta$	زوایه شیب وجه پایین دست سرریز

## ۶- منابع

Alhashimi, S.A.M. (2013). CFD modeling of flow over ogee spillway by using different turbulence models. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 15(2), 1682-1687.

Boes, R.M. and Hager, W.H. (2003). Hydraulic design of stepped spillways. *J. Hydraulic Engineering*, 129(9), 671-679.