



Undular Flow Conditions and Discharge Coefficients in Rectangular Broad-Crested Weirs

B. Nourani, F. Salmasi*, H. Arvanaghi, F. Rezaei

Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Review History:

Received: Apr. 23, 2020

Revised: Sep. 10, 2020

Accepted: Aug. 26, 2021

Available Online: Aug. 31, 2021

Keywords:

Broad-crested weir

Discharge coefficient

Undular flow

Finite volume method

ABSTRACT: Weirs are common hydraulic structures that can be used in conveyance water canals for increasing the water depth upstream of turnouts or measurement of flow discharge. In this study, the effect of hydraulic parameters and creation conditions of undular flow in the broad-crested weirs were investigated numerically using the finite volume method and the results were evaluated by the experimental method of other researchers. Results indicated that discharge coefficients (C_d) for experimental data are between 0.321-0.332, whereas the C_d for numerical simulation (using ANSYS FLUENT) is between 0.301-0.354. Over the crest where the minimum water depth (d_{min}) happens, when Fr_1 is less than 1.5 ($Fr_1 < 1.5$), the creation of waves was observed. This type of flow is known as the undular flow. In this situation, measuring water depth over the broad crested weir is not easy and can introduce error for discharge estimation. For preventing of the undular flow, the flow depth cannot be less than a specified value. In this study, this limitation was observed for $H/L > 0.1$. Thus it can result that long broad-crested weirs ($H/L < 0.1$) are more susceptible than the broad-crested weirs ($0.1 \leq H/L < 0.4$) in the creation of the undular flows. Additionally, a regression equation for estimation of the C_d in the broad-crested weirs is proposed with reasonable accuracy.

1- Introduction

Weirs are used to achieve aims such as regulating the upstream water surface level in a hydraulic structure for turn out or measuring discharge. Weirs allow water to pass through a structure with known dimensions and determine the discharge as a function of flow depth. Therefore, one of the simple and accurate methods of measuring discharge in open channels is the use of weirs. The geometry of broad-crested weirs can influence the flow conditions and discharge capacity. Numerous experimental and numerical studies have been conducted on the flow over broad-crested weirs, including, and not limited to, Singer [1], Hager and Schwalt [2], Ramamurthy et al. [3]. Shaima et al. [4] simulated the water surface profiles in broad-crested weirs in 2D and 3D mode using FLUENT software and compared the results with the results of the experimental model. The results indicated that the relative error ($RE\%$) and the root mean square error ($RMSE$) for the 2D numerical model were 2.5 and 0.6, respectively, and for the 3D numerical model were 2.1 and 0.5, respectively. That study also showed that the results of the 3D model are almost similar to the 2D model, but the 3D model requires a lot of time to simulate a similar condition. Nourani et al. [5] numerically simulated the flow in triangular plan weirs using ANSYS FLUENT software. In that study, the $k-\epsilon$ (*Re-normalization group*, RNG) turbulence model was

used to solve the Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) equations. The results showed that this model in providing flow simulation on triangular plan weirs provides logical and acceptable answers. Effects of upstream face slope and radius of curvature of weir upstream corner in rectangular broad-crested weirs on the undular flow were investigated by Madadi et al. [6]. That study established that curvature and slope have similar effects on wave elimination. The experimental results showed that the wave was not generated above the weir with 21° upstream face.

Undular flow in broad-crested weirs can occur under conditions where the water head on the weir is less than a certain value. This condition causes sinusoidal waves and oscillating currents on the crest. According to the literature, the conditions for creating a wave current on broad-crested weirs have not been fully and comprehensively investigated. Therefore, in this study, in addition to investigating the hydraulic parameters of the flow in this type of weirs, the simulation of how and conditions of creating the undular flow is investigated using a numerical model by applying ANSYS FLUENT software.

2- Methodology

The use of computer models for flow investigation in hydraulic structures has become widespread with the

*Corresponding author's email: Salmasi@tabrizu.ac.ir



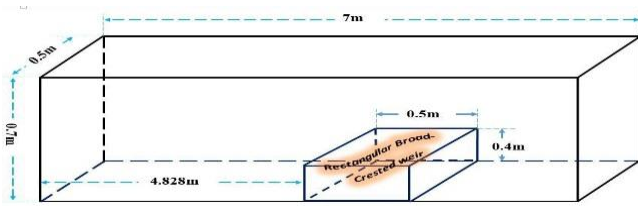


Fig. 1. Characteristics of flume and weir geometry in Hager and Schwalt [2] experimental study and numerical model in the present study

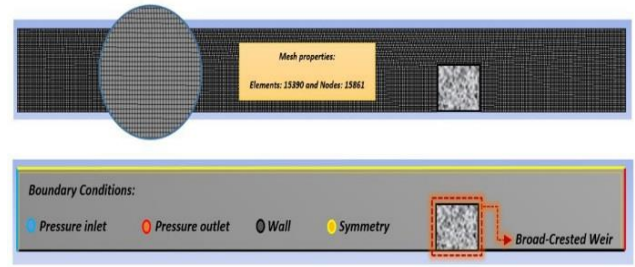


Fig. 2. Mesh properties and boundary conditions in numerical simulations

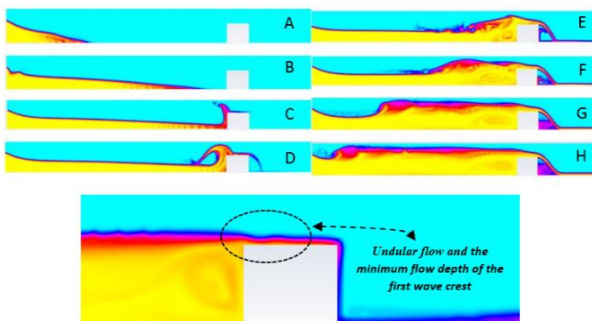


Fig. 3. Illustrations of the entry flow in the flume and creation of undular flow waves on the weir crest

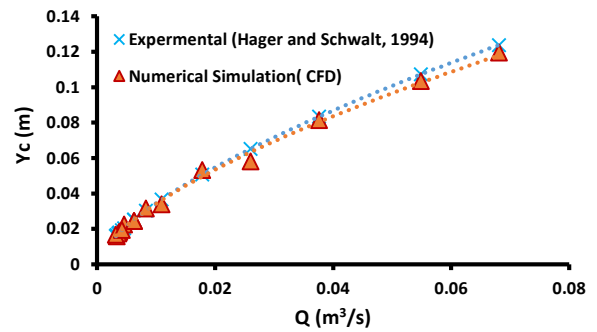


Fig. 4. Comparison of the relationship between flow discharge versus critical depth with experimental and numerical results

development of numerical methods. In this study, in order to investigate the hydraulic properties of the flow in broad-crested weirs, a numerical simulation is used. To simulate the flow over weir, a rectangular flume with length, height and width of 7.0 m, 0.7 m and 0.5 m was considered. The crest of the weir was placed at a distance of 4.83 m from the entry of the flume fixed in all simulations (Figure 1). These conditions correspond to the conditions of the physical-hydraulic model of Hager and Schwalt [2]. In this study, the $k - \varepsilon$ (RNG) turbulence model was applied in computational fluid dynamic (CFD) simulations by using ANSYS FLUENT software. The boundary conditions (BCs) for flume bottom, weir body, flume top, inlet and outlet were selected as wall, symmetry, pressure-inlet and pressure-outlet, respectively. It should be noted that all simulations were implemented in such a way that the number of elements is greater than or equal to 15390 for this computational domain (Figure 2).

3- Results and Discussion

According to the study of Govinda Rao and Muralidhar [7], one of the special features of broad-crested weirs is the creation of sinusoidal waves on the crest of the weir with the ratio of the depth of flow to the length of the crest less than 0.1 ($H/L < 0.1$). The main cause of this type of undular flow is viscosity, which reduces the flow velocity in long weir crest. Chanson [8] introduced the possibility of creating wave on a rectangular broad-crested weir at low flow discharges for a Froude number (F_r) of less than 1.5 ($F_r < 1.5$) at the location where the lowest depth occurs. According to Figure 3, near the upstream corner of the weir crest, after setup the steady conditions, a wave has formed due to the low ratio of the depth of flow to the length of the crest.

Figure 4 shows the relationship between flow discharge versus depth at the control section (or critical depth) for experimental and numerical models. As can be seen, with increasing critical depth on the crest of weir, the discharge flow over the weir increases exponentially. It is also observed

that there is a good agreement between experimental and numerical results. Also, in this study, with the obtained results, a regression equation was extracted for the discharge coefficients (C_d) of broad-crested weirs (Eqs. 1-3).

$$C_d = 0.385\left(\frac{H}{L} - 0.07\right)^{0.018} - 0.028 \quad (1)$$

$$Q = C_d b \sqrt{2gH_1^3} \quad (2)$$

$$Q = (0.385\left(\frac{H}{L} - 0.07\right)^{0.018} - 0.028) b \sqrt{2gH_1^3} \quad (3)$$

4- Conclusions

In this study, using available experimental data, first numerical simulations were performed using the *FVM* with *ANSYS FLUENT* software and then, in addition to investigating the flow discharge in these types of weirs, the creation of undular flow was studied. The following outcomes are provided:

1. The mean *RE%* between the experimental data and the numerical simulation method is 4%.

2. For preventing undular flow, the flow depth cannot be less than a specified value. This limitation was observed for $H/L > 0.1$. Thus it can result that long broad-crested weirs are more susceptible than the broad-crested weirs to the creation of undular flows.

3. The changes of the discharge coefficients with respect to the H/L parameter under conditions of $H/L > 0.1$ are gradual and almost linear.

4. A regression equation was also extracted to estimate the discharge coefficient of broad-crested weirs. The results indicated that this extracted equation can be used to estimate the flow discharge with acceptable accuracy.

References

- [1] J. Singer, Square-edged broad-crested weir as a flow measurement device, *Water and Water Engrg*, 68(6) (1964) 229-235.
- [2] W.H. Hager, M. Schwalt, Broad-crested weir, *J. Irrig. Drain. Eng*, 120(1) (1994) 13-26.
- [3] A.S. Ramamurthy, U.S. Tim, M.V.J. Rao, Characteristics of square-edged round-nosed broad-crested weirs.”
- [4] *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 114(1) (1988) 61-73.
- [5] A.M. Shaymaa, Al-Hashimi., Huda M M., M.K. Rasul, N.N. Thameen, A.A.-A. Nadhir, Flow over broad-crested weirs: Comparison of 2D and 3D Models, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11 (2017) 769-779.
- [6] B. Nourani, R. Norouzi, F. Rezaei, F. Salmasi, Investigation the Stage- Discharge Relationship and Discharge Coefficient in Sharp-Crested Weirs with Triangular Shape in Plan, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019).
- [7] M.R. Madadi, D. Farsadizadeh, A. Hosseinzadeh Dalir, Effective Parameters on Formation of Undular Flow on the Broad-Crested Weirs, *Journal of Water and Soil* 26 (6) (2013) 1428-1439
- [8] R.N. Govinda, D. Moralindhar, Discharge characteristics of weirs of finite crest width, *La Houille Blanch*, 18(5) (1963) 537-545.
- [9] H. Chanson, *Hydraulics of open channel flow*, 2nd Edition ed., 2004.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Nourani, F. Salmasi, H. Arvanaghi, F. Rezaei, *Undular Flow Conditions and Discharge Coefficients in Rectangular Broad-Crested Weirs*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 31-34.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18314.6830](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18314.6830)





شرایط جریان موجکی و ضریب دبی جریان در سرریزهای لبه پهن مستطیلی

بهرام نورانی، فرزین سلماسی*، هادی ارونقی، فائزه رضایی

گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:

سرریز لبه پهن
ضریب دبی جریان
عدد فرود
جریان موجکی
روش حجم محدود

خلاصه: سرریزها یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که در سیستم‌های انتقال آب به منظور اهداف خاصی مانند افزایش عمق جریان در بالادست سازه جهت آب‌گیری و یا اندازه‌گیری دبی جریان به کار گرفته می‌شوند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان و چگونگی وقوع جریان موجکی در سرریزهای لبه پهن مستطیلی به روش عددی با استفاده از روش حجم محدود (FVM) پرداخته شد و نتایج آن با روش آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که محدوده ضریب دبی برای داده‌های آزمایشگاهی بین $0/۳۲۱$ تا $0/۳۳۲$ است و با استفاده از مدل عددی این محدوده بین $0/۳۰۱$ الی $0/۳۵۴$ می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که در صورتی که عدد فرود جریان در مقطعی که حداقل عمق در روی تاج (dmin) اتفاق می‌افتد، کمتر از مقدار $۱/۵$ باشد ($Fri < 1/5$)، در بالای تاج سرریز موجک‌هایی به فرم سینوسی تشکیل می‌شود، که می‌تواند دقت در قرائت اشل را کاهش و باعث ایجاد خطا در برآورد دبی عبوری گردد. برای جلوگیری از وقوع جریان موجکی، عمق جریان نباید از حد معینی کمتر گردد. در تحقیق حاضر جریان موجکی در شرایطی که نسبت عمق آب روی تاج سرریز به طول تاج سرریز در جهت جریان بزرگتر از $0/۱$ باشد ($H/L > 0/1$)، مشاهده نشد. بنابراین می‌توان گفت برقراری جریان موجکی در سرریزهای لبه پهن طولانی ($H/L < 0/1$) مستعدتر از سرریزهای لبه پهن حقیقی ($0/4 < H/L < 0/1$) است. همچنین با استفاده از روش رگرسیونی، رابطه‌ای برای تعیین ضریب دبی سرریزهای لبه پهن حقیقی با دقت مناسب و بالا ارائه شد.

۱- مقدمه

اندازه‌گیری سرعت جریان در کانال‌های باز به خصوص در کانال‌های غیریکنواخت و رودخانه‌ها به دلیل متغیر بودن ابعاد و سرعت جریان امری بسیار دشوار می‌باشد. سرریزها امکان حرکت آب از میان ساختاری با ابعاد شناخته شده را فراهم می‌آورند و دبی جریان را به عنوان تابعی از عمق جریان تعیین می‌کنند. بنابراین یکی از روش‌های ساده و دقیق اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های باز، استفاده از سرریزها می‌باشد.

سرریز کانال‌ها بر اساس ضخامت تاج به سه گروه سرریزهای لبه تیز^۱، لبه‌باریک^۲ و لبه پهن^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین سرریزها بر حسب شکل مقطع تاج در جهت عمود بر جهت جریان به صورت‌های مختلفی هم‌چون

امروزه با توجه به محدودیت منابع آب، مصرف صحیح و مناسب آن اهمیت خود را بیش از پیش نشان می‌دهد. به طوری که هر جا صحبت از مصرف بهینه یک منبع آب باشد، اندازه‌گیری صحیح مقدار آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. لذا ضرورت خواهد داشت تا در هر پروژه آبی، مقدار آب مصرفی به طور دائم اندازه‌گیری گردد. با گذر زمان و با پیشرفت تکنولوژی، علم هیدرومتری^۱ تکامل یافته است و روش‌های متفاوت و ابزارها و سازه‌های مختلفی ساخته شده‌اند که به کمک آن‌ها می‌توان دبی جریان آب را اندازه‌گیری نمود، که از عمومی‌ترین آن‌ها می‌توان به سرریزها اشاره نمود.

سرریز کانال‌ها به منظور دستیابی به اهدافی چون تنظیم سطح آب در بالادست سازه جهت آب‌گیری و یا اندازه‌گیری دبی جریان به کار می‌رود.

- 2 Sharp-Crested Weirs
- 3 Short-Crested Weirs
- 4 Broad-Crested Weirs

- 1 Hydrometry

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Salmasi@tabrizu.ac.ir



سرعت و پروفیل جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن منحنی الخط پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل آشفتگی $k - \varepsilon(\text{RNG})$ نسبت به سایر مدل‌هایی همچون $k - \varepsilon(\text{Standard})$ ، $k - \varepsilon(\text{Realizable})$ و $k - \omega$ نتایج با دقت بالایی را نشان می‌دهد. شایما و همکاران [۹] پروفیل سطح آب در سرریزهای لبه‌پهن را در حالت 2D و 3D را با استفاده از نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی کردند و نتایج آن را با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که خطای نسبی (RE)٪ و جذر میانگین مربعات (RMSE) برای مدل عددی 2D به ترتیب ۲/۵ و ۰/۶ و برای مدل عددی 3D به ترتیب ۲/۱ و ۰/۵ به دست می‌آید. ایشان در تحقیقات خود اشاره کردند که نتایج مدل سه بعدی تقریباً شبیه به مدل دو بعدی است، ولی مدل سه بعدی به ازای یک شرایط مشابه به زمان زیادی جهت شبیه‌سازی نیازمند می‌باشد. لی و همکاران [۱۰] ضریب دبی جریان و ناحیه جدانشدگی جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن با وجه شیب‌دار بالادست را با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM مورد بررسی قرار دادند و اعلام کردند که مدل عددی مذکور به خوبی پروفیل سطح جریان و ضریب دبی را پیش‌بینی می‌کند. همچنین مشاهده گردید که با افزایش زاویه شیب بالادست (β_1) ضریب دبی جریان کاهش می‌یابد. ضمناً در تحقیقات ایشان مشاهده گردید که ناحیه جدا شدگی در تاج سرریز در زوایای بیش از ۶۰ درجه اتفاق می‌افتد و با افزایش این زاویه، ابعاد ناحیه جدا شدگی افزایش می‌یابد. مددی و همکاران [۱۱] به مطالعه آزمایشگاهی عوامل شکل‌گیری جریان موجکی^۹ در سرریزهای لبه‌پهن پرداختند. نتایج نشان داد شیب‌دار کردن وجه بالادست و ایجاد شعاع انحنا در پیشانی سرریز به ترتیب ۷۸ و ۸۰ درصد کاهش در ارتفاع نسبی موجک را نشان دهد. طبق نظر ایشان، زبر کردن سطح سرریز می‌تواند نقش مهمی را در تضعیف شدت این موج‌ها داشته باشد. محمدزاده هبیلی و همکاران [۱۲] به بررسی و مقایسه شرایط هیدرولیکی جریان در سرریزهای لبه‌پهن با نوع خاصی از سرریزهای لبه‌پهن با تاج ربع دایره‌ای^{۱۰} پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب دبی در سرریزهای لبه‌پهن به دلیل ایجاد ناحیه جدانشدگی کمتر از سرریزهای لبه‌پهن با تاج ربع دایره‌ای می‌باشد و همچنین سرریزهای با تاج دایره‌ای نسبت به سرریزهای لبه‌پهن استاندارد کمتر در معرض خطر ناشی از پدیده کاویتاسیون^{۱۱} هستند. فشار منفی در روی تاج در سرریز لبه‌پهن تاج دایره‌ای

مستطیلی^۱، مثلثی^۲، ذوزنقه‌ای^۳، دایره‌ای^۴ و سهموی^۵ ساخته می‌شوند، که هر یک ویژگی خاص خود را دارا می‌باشند [۱].

در سرریزهای لبه‌پهن معمولاً انحراف از توزیع فشار هیدرواستاتیک^۶ که به علت شتاب جانب مرکز ایجاد می‌شود، نادیده گرفته می‌شود (خطوط جریان مستقیم و موازی در نظر گرفته می‌شود). برای رسیدن به چنین وضعیتی باید نسبت عمق آب بالای تاج سرریز (H) به طول تاج سرریز در جهت جریان (L)، در محدوده $0.5 < L/H < 0.7$ قرار گیرد. در غیر این صورت افت انرژی قابل چشم‌پوشی نبوده و نوساناتی در سطح آب و همچنین خروج از حالت توزیع فشار هیدرواستاتیک دیده خواهد شد [۱].

مطابق تحقیقات سینگر [۲] در صورتی که $H_1 < P/2$ انرژی کل روی سرریز و P ارتفاع سرریز) باشد، می‌توان اثر ارتفاع سرریز را نادیده گرفت. هریسون [۲] به اهمیت زیاد سرریزهای با گوشه تیز در بالادست اشاره کرده و تاثیر عدد رینولدز در سرریزهای لبه‌پهن را مورد بررسی قرار داد. کراب [۴] محدودیت‌های پیشنهاد شده توسط سینگر [۲] از لحاظ طول سرریز و ارتفاع سرریز را به صورت $0.6 < H_1/P < 4$ و $0.8 < H_1/L < 5/6$ گسترش داد. طبق نظر کراب [۴] برای مقادیر بزرگ H_1/L ، هوادهی جریان عبوری از روی تاج لازم و ضروری خواهد بود. رامامورتی و همکاران [۵] پیشنهاد کردند که می‌توان گوشه بالای سرریز لبه‌پهن را به صورت انحنا دار با شعاع انحنای $R < P \times 0.94$ در نظر گرفت که در این صورت می‌توان تاثیر لبه تیز بالادست بر روی جریان را نادیده گرفت. فرهودی و همکاران [۶] با بررسی اثر شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریز لبه‌پهن به این نتیجه رسیدند که کاهش زاویه شیب بالادست سرریز باعث افزایش ضریب دبی جریان می‌شود و این مقدار در زاویه ۲۵ درجه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. عظیمی و همکاران [۷] جریان مستغرق بر روی سرریزهای لبه‌پهن با لبه تیز و لبه گرد در نوک بالادست سرریزهای با طول تاج محدود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای این کار از داده‌های دیگران و همچنین نتایج آزمایشگاهی خود بهره برده و روابطی را برای فاکتور کاهش دبی در کلاس‌بندی‌های مختلف سرریز لبه‌پهن کوتاه (SCW)، سرریز لبه‌پهن حقیقی (BCW) و سرریز لبه‌پهن باریک (NCW) ارائه دادند. سیمسک و همکاران^۸ [۸] به بررسی انواع مدل‌های آشفتگی در مدل عددی برای تعیین

- 1 Rectangular
- 2 Triangular
- 3 Trapezoidal
- 4 Circular
- 5 Parabolic
- 6 Hydrostatic Pressure
- 7 Simsek et al.

8 Lei et al.

9 Undular Flow

10 Quarter-Circular Crested Weir

11 Cavitation

بر روی سرریز لبه‌پهن مستطیلی پرداختند. مشخصات هیدرولیکی جریان در تحقیق ایشان در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایشات هاگر و اسچوالت [۱۶] در کانالی به طول ۷ متر، عرض ۰/۴۹۹ متر و ارتفاع ۰/۷ متر انجام گرفت. سرریز لبه‌پهن مستطیلی به ارتفاع ۰/۴۰۱ متر، طول تاج ۰/۵ متر و نصب شده در فاصله ۴/۸۳ متری از ورودی کانال مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۱، Q دبی جریان، H_1 بار آبی کل روی تاج سرریز، H ارتفاع آب روی تاج، C_d ضریب دبی جریان، F_0 عدد فرود در بالادست سرریز و R_0 عدد رینولدز در بالادست سرریز می‌باشند.

در شکل ۱ مشخصات هندسی کانال و سرریز لبه‌پهن نشان داده شده است. می‌توان رابطه دبی عبوری از روی سرریز لبه‌پهن را به صورت رابطه (۱) نشان داد:

$$Q = C_d b \sqrt{2gH_1^3} \quad (1)$$

که در آن Q دبی جریان، C_d ضریب دبی جریان، b عرض کانال، g شتاب ثقل و H_1 بار آبی کل روی سرریز می‌باشند. بار آبی کل روی تاج سرریز به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود (شکل ۲).

$$H_1 = H + \frac{Q^2}{2gb^2(H+P)^2} \quad (2)$$

که در آن P ارتفاع سرریز است. رابطه (۲) نشان می‌دهد که مقدار C_d به H_1 وابسته است. از این رو اثر سرعت نزدیک شونده به صورت $\frac{Q^2}{2gb^2(H+P)^2}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- معادلات حاکم بر جریان

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در رشته مهندسی هیدرولیک حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و معادلات ممتنم است که اصطلاحاً به معادلات ناویر-استوکس معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم‌ناپذیر با ویسکوزیته ثابت، معادلات مذکور به ترتیب به فرم روابط (۳) و (۴) نوشته می‌شوند:

در H/L های بالاتری نسبت به سرریزهای لبه‌پهن استاندارد اتفاق می‌افتد. نورانی و همکاران [۱۳] به شبیه‌سازی عددی جریان در سرریزهای پلان مثلثی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT پرداختند. در این بررسی جهت حل معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدزی^۱ (RANS) از مدل آشفتگی^۲ ($k-\epsilon$, RNG, Re-normalization group) استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی ($k-\epsilon$ (RNG)) شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای پلان مثلثی جواب‌های منطقی و قابل قبولی را ارائه می‌نماید. ایشان هم‌چنین یک رویکرد جدیدی را در تخمین ضریب دبی جریان سرریزهای لبه‌پهن ارائه نمودند که در استخراج داده‌های مورد نیاز با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای توسعه این رویکرد جدید، مدل آشفتگی ($k-\epsilon$ (RNG)) را به عنوان مدل آشفتگی برتر در مقایسه با سایر مدل‌های آشفتگی تعیین و مورد استفاده قرار دادند [۱۴]. ورجاوند و همکاران [۱۵] نیز برتری مدل آشفتگی ($k-\epsilon$ (RNG)) بر مدل آشفتگی $k-\omega$ در بررسی هیدرولیکی جریان در سرریزهای استوانه‌ای را گزارش نمودند.

جریان موجکی پدیده‌ای است که در سرریزهای لبه‌پهن تحت شرایط هیدرولیکی معین می‌تواند ایجاد گردد. وقتی بار آبی روی سرریز از مقدار مشخصی کمتر شود، در سطح جریان روی تاج سرریز موج‌های سینوسی^۳ ایجاد می‌شوند و سبب ایجاد جریان موج و نوسانی در روی تاج می‌گردد. تحت این شرایط، جریان اغتشاشی ایجاد شده به پایین‌دست کانال انتقال یافته و سطح آب پایاب را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به تحقیقات انجام شده همان‌طور که اشاره گردید، شرایط ایجاد جریان موجکی بر روی سرریزهای لبه‌پهن به طور کامل، جامع و گسترده تا به حال مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در این مطالعه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود توسط سایر محققان، ابتدا شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود^۴ (FVM) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT انجام شد و سپس در کنار بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان در این نوع سرریزها، شبیه‌سازی چگونگی و شرایط ایجاد جریان موجکی نیز بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

هاگر و اسچوالت [۱۶]^۵ به بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان عبوری

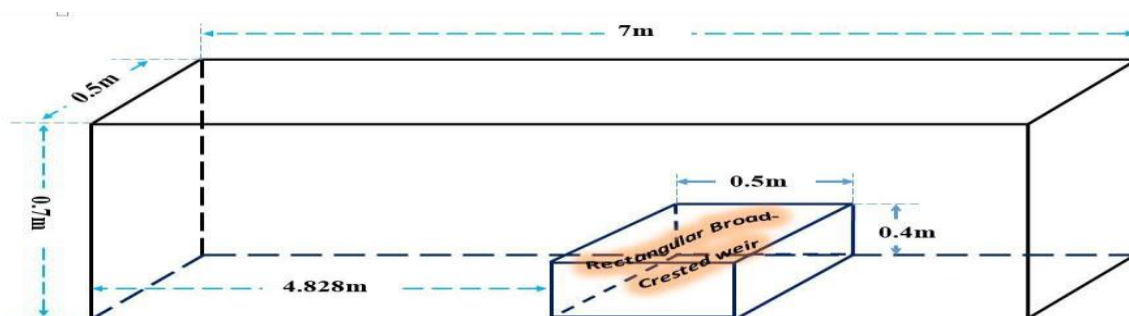
- 1 Reynolds Averaged Navier-Stokes
- 2 Turbulence Model
- 3 Sinusoidal Waves
- 4 Finite Volume Method
- 5 Hager and Schwalt

جدول ۱. خصوصیات هیدرولیکی جریان در مطالعه آزمایشگاهی هاگر و اسچوالت [۱۶]

Table 1. Hydraulic properties of flow in experimental study of Hager and Schwalt [16]

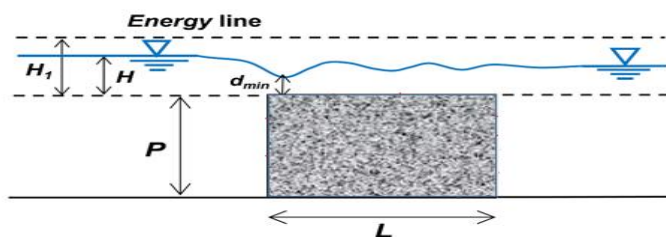
No.	Q (Lit/ s)	V (m/s)	H (cm)	H ₁ (cm)	C _d (-)	Fr ₀ (-)	R ₀ (-)
۱	۸/۲۵	۰/۰۳۶۶	۵/۰۸	۵/۰۹	۰/۳۲۴	۰/۰۱۷۴	۴۱۳۰۰
۲	۴/۵۵	۰/۰۲۰۹	۳/۴۲	۳/۴۲	۰/۳۲۵	۰/۰۱۰۱	۲۲۷۰۰
۳	۳/۳۲	۰/۰۱۵۵	۲/۷۸	۲/۷۸	۰/۳۲۳	۰/۰۰۷۶	۱۶۷۰۰
۴	۳/۷۷	۰/۰۱۷۵	۳/۰۳	۳/۰۳	۰/۳۲۳	۰/۰۰۸۵	۱۹۰۰۰
۵	۶/۲۶	۰/۰۱۵۳	۴/۲۱	۴/۲۱	۰/۳۲۷	۰/۰۱۳۶	۳۱۱۰۰
۵ (*)	۶/۲۶	۰/۰۱۵۳	۴/۲۱	۴/۲۱	۰/۳۲۷	۰/۰۱۳۶	۳۱۱۰۰
۶ (*)	۱۰/۹	۰/۰۴۷۳	۶/۰۷	۶/۰۷	۰/۳۲۹	۰/۰۲۲۲	۵۳۹۰۰
۷ (*)	۱۷/۸۱	۰/۰۷۵۳	۸/۴۱	۸/۴۴	۰/۳۲۸	۰/۰۳۳۷	۸۸۳۰۰
۸ (*)	۲۵/۹۸	۰/۱۰۲۳	۱۰/۷۹	۱۰/۸۴	۰/۳۲۹	۰/۰۴۵۸	۱۲۸۶۰۰
۹ (*)	۳۷/۵۹	۰/۱۳۹۷	۱۳/۸۲	۱۳/۹۲	۰/۳۲۷	۰/۰۶۰۷	۱۸۷۱۰۰
۱۰ (*)	۵۴/۸۳	۰/۱۸۸۷	۱۷/۶۲	۱۷/۸۰	۰/۳۳۰	۰/۰۸۰	۲۷۰۵۰۰
۱۱ (*)	۶۸/۰۷	۰/۲۲۶۱	۲۰/۲۱	۲۰/۴۷	۰/۳۳۲	۰/۰۹۳	۳۳۳۶۰۰
۱۲	۳/۶۰	۰/۰۱۶۷	۲/۹۳	۲/۹۵	۰/۳۲۲	۰/۰۰۸۲	۱۸۳۰۰
۱۳	۳/۱۵	۰/۰۱۴۷	۲/۷۰	۲/۷۰	۰/۳۲۱	۰/۰۰۷۲	۱۶۰۰۰
۱۴	۴/۱۹	۰/۰۱۹۴	۳/۲۲	۳/۲۳	۰/۳۲۶	۰/۰۰۹۴	۲۰۹۰۰

توجه: علامت ستاره (*) در آزمایشات (ستون اول) اشاره به عدم تشکیل موج روی تاج سرریز دارد.



شکل ۱. مشخصات کانال و هندسه سرریز در مطالعه آزمایشگاهی هاگر و اسچوالت [۱۶] و مدل عددی در تحقیق حاضر

Fig. 1. Characteristics of canal and weir geometry in Hager and Schwalt [16] experimental study and numerical model in the this study



شکل ۲. مشخصات جریان موجکی در روی تاج سرریز لبه‌پهن مستطیلی

Fig. 2. Undular flow properties on the crest of rectangular broad-crested weir

شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از روی سرریز لبه‌پهن در یک کانال روباز، یک جریان دو فاز و متلاطم می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد در تحقیق حاضر از روش VOF که توسط هیث و نیکولس^۴ [۱۷] ارائه شده است، استفاده گردیده است که رابطه انتقالی کسر سیال در آن با رابطه (۵) بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i F}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

این روش بر این اساس استوار است که دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند. پس مشخصات و مقادیر هر سلول به‌طور خالص نشان دهنده یکی از فازها و یا مخلوطی از فازها است که بسته به مقادیر نسبت حجمی بین صفر و یک متغیر است. در شبیه‌سازی جریان دو فاز شامل آب و هوا، در صورتی که سلولی پر از هوا باشد، مقدار نسبت حجمی صفر ($F=0$)، در صورتی که سلول کاملاً پر از آب باشد، مقدار یک ($F=1$) و در صورتی که سلولی هر دو سیال را داشته باشد، مقدار عددی بین صفر و یک ($0 < F < 1$) را به خود اختصاص می‌دهد که تحت این شرایط المان دارای سطح آزاد سیال می‌باشد [۱۸].

۲-۲-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

جهت ایجاد شبکه قابل فراخوانی در نرم افزار FLUENT ابتدا در میز کار (Workbench) نرم‌افزار ANSYS هندسه مدل طراحی و سپس از قسمت Meshing اقدام به شبکه‌بندی محدوده مسئله گردید. برای این منظور در تحقیق حاضر از المان مربعی با کیفیت مناسب ($\text{Ortho} < 1$)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i) = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = f_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (4)$$

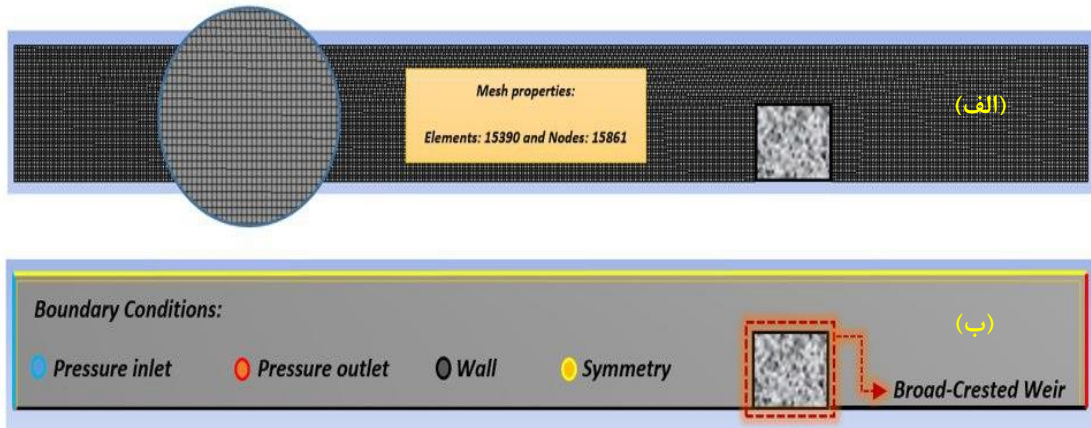
در روابط فوق u_i و u_j مولفه بردار سرعت در راستای فضایی i و j ، f_i نیروی حجمی در راستای i ، p بیانگر فشار، μ ویسکوزیته سیال، ρ چگالی سیال و $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ تنش رینولدزی می‌باشند. برای حل معادله حاکم بر جریان می‌توان از یکی از نرم افزارهای CFD بهره برد که در تحقیق حاضر از نرم افزار ANSYS FLUENT که به روش حجم محدود به شبیه‌سازی عددی جریان می‌پردازد، استفاده گردید.

۲-۲-۱- مدل عددی

در شبیه‌سازی جریان از روی سرریز لبه‌پهن مستطیلی به روش حجم محدود، برای حل معادلات آشفتگی از مدل اغتشاش $k - \varepsilon(\text{RNG})$ ، برای حل معادلات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال (VOF)، برای گسسته‌سازی عبارت فشار از روش PISO^۲ و برای گسسته‌سازی عبارت ممتهم از روش مرتبه دوم بالادست (SOU)^۳ استفاده شد.

- 1 Volume of Fluid (VOF) Model
- 2 Pressure-Implicit with Splitting of Operator
- 3 Second Order Upwards

4 Hirt and Nichols



شکل ۳. نحوه شبکه بندی (شکل الف در بالا) و اعمال شرایط مرزی در شبیه سازی عددی (شکل ب در پایین)

Fig. 3. Mesh properties (a): boundary conditions, (b): numerical simulations

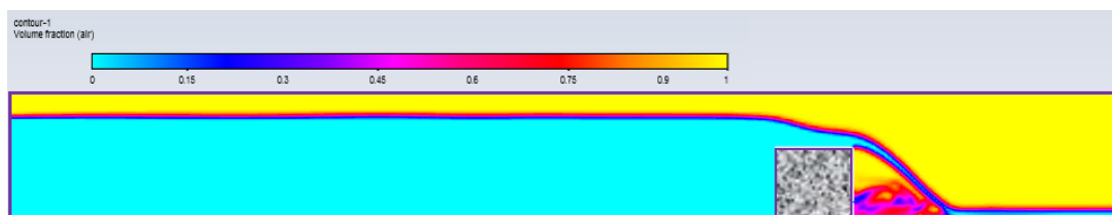
۳- نتایج و بحث

در شکل ۴ (الف، ب و ج) به ترتیب کنترهای پروفیل سطح آب، تغییرات سرعت جریان عبوری از روی سرریز و تغییرات فشار بعد از شبیه سازی عددی به روش حجم محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS FLU-ENT، در شرایطی که ارتفاع سرریز ۰/۴۰۱ متر، طول تاج سرریز ۰/۵ متر و دبی ۶۸/۰۷ لیتر بر ثانیه باشد، نشان داده شده است. برای تعیین سطح آزاد جریان، در این تحقیق از روش حجم سیال^۱ استفاده گردید که این روش بر اساس مقدار حجم سیال در هر سلول، پروفیل سطح جریان را ترسیم می کند. به این ترتیب که برای سلول خالی مقدار صفر و برای سلول پر مقدار عددی یک و برای سلول های دارای حجم مشخصی از سیال مقداری بین صفر و یک را اختصاص می دهد و بعد از اتصال این اعداد به هم پروفیل سطح جریان تشکیل می گردد. شکل ۴-الف پروفیل سطح آب را نشان می دهد که در آن دو فاز آب و هوا از یکدیگر قابل تفکیک هستند. مقداری از جت آب برخوردی به کف کانال، به سمت پایین دست حرکت کرده و مقداری نیز به سمت سرریز برگشت می کند. این برگشت آب، جریان های چرخشی را در پای سرریز تولید می کند. همان طور که در شکل ۴-ب نشان داده شده است، با عبور جریان از روی سرریز بر سرعت جریان افزوده شده و مقدار سرعت جریان در ابتدای ورود به تاج ۰/۴۹ متر بر ثانیه بوده و بعد از جدا شدن جریان از روی تاج سرریز تحت یک جت آبی به کف کانال برخورد کرده و بعد از این مرحله سرعت در انتهای کانال به حداکثر مقدار خود یعنی ۳/۳ متر بر

ثابت Quality $0/7$) با استفاده از دستور (Face Meshing) استفاده شده است. در تحقیق حاضر برای جلوگیری از تاثیر اندازه شبکه ها در حل معادلات حاکم، آزمون مستقل از شبکه صورت گرفت و تعداد شبکه مناسب انتخاب شد. در نهایت آنالیز حساسیت برای شبکه بندی نشان داد که با افزایش تعداد شبکه ها اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی کمتر می شود. به طوری که در تعداد شبکه حدود ۱۵۳۹۰ و بیشتر اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی تقریباً ثابت می ماند و این نشان می دهد که کوچک تر کردن ابعاد شبکه به بیش از مقدار فوق الذکر تاثیری در دقت نتایج ندارد. به همین خاطر در این شبیه سازی، تعداد شبکه مناسب در حدود ۱۵۳۹۰ انتخاب شد. لازم به ذکر است که تعداد گره ها در این حالت ۱۵۸۶۱ به دست آمد. نحوه شبکه بندی مربعی در محدوده محاسباتی در شکل ۳-الف نشان داده شده است. یکی از مهم ترین مسائل در شبیه سازی عددی تعریف مناسب شرایط مرزی^۱ است که در تحقیق حاضر شرایط مرزی برای جریان ورودی به صورت فشار جریان آب (Pressure Inlet)، برای خروجی به صورت فشار خروجی صفر (Pressure outlet)، برای کف و خود سرریز لبه پهن داخل کانال به صورت دیوار (Wall) و برای بالای کانال شرط مرزی متقارن (Symmetry) معرفی گردید (شکل ۳-ب). شبیه سازی عددی جریان در تحقیق حاضر به صورت غیردائمی با گام زمانی^۲ ۰/۰۰۱ ثانیه انجام گردید و تا رسیدن به حالت دائمی ادامه یافت.

- 1 Boundary Conditions
- 2 Time step

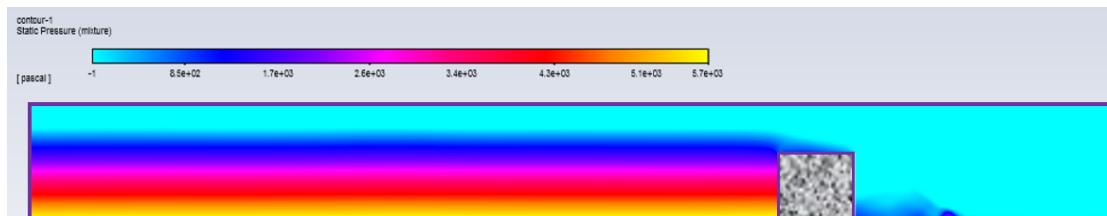
3 Volume of Fraction, VOF



الف- کنتورهای پروفیل سطح آب



ب- کنتورهای تغییرات سرعت جریان



ج- کنتورهای تغییرات فشار

شکل ۴. نتایج حاصل از مدل عددی بعد از شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز لبه‌پهن

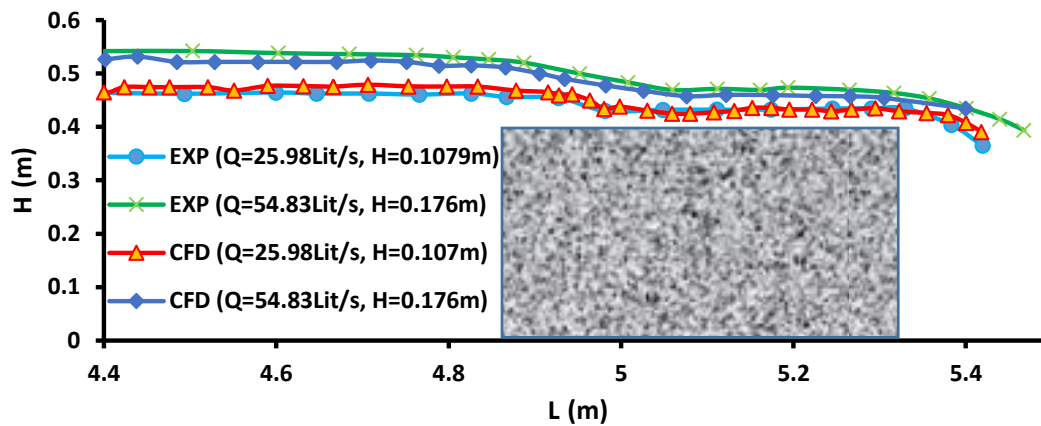
Fig. 4. The results of the numerical model after flow simulation on the broad-crested weir

سطح آب به صورت تدریجی و به صورت ملایم از بالادست تا پایاب تغییر می‌یابد. شایان ذکر است که وجود سرریز در مسیر جریان با رژیم زیربحرانی باعث کاهش انرژی مخصوص و کاهش عمق آب و تراز سطح آب در هنگام عبور از روی تاج شده است و این کاهش در عمق در روی تاج تا محل مقطع کنترل (محل ایجاد عمق بحرانی) ادامه پیدا می‌کند. در شبیه‌سازی با مدل عددی جهت حل معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدزی از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (RNG) استفاده شد. بنابراین می‌توان گفت که این مدل آشفتگی می‌تواند در شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن جواب‌های منطقی و قابل قبولی را ارائه نماید.

در شکل ۶-الف و ب شبیه‌سازی پروفیل توزیع عمقی سرعت به ترتیب در تاج سرریز، در بالادست و پایین‌دست سرریز نشان داده شده است. در

ثانیه می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که فشار ناشی از بار آبی ایجاد شده تحت جریان با مقدار $68/07$ لیتر بر ثانیه، در روی تاج سرریز با افزایش طول تاج به دلیل کاهش عمق آب در روی تاج در نزدیکی‌های پایین‌دست تاج نسبت به قسمت بالادست تاج سرریز، کاهش می‌یابد (شکل ۴-ج). ضمناً در قسمت پایین‌دست سرریز به دلیل برخورد جت آبی ایجاد شده در اثر جریان عبوری از روی سرریز، فشار در محل برخورد جت آبی بر کف کانال بیشتر از بقیه نقاط در کانال پایاب می‌باشد.

در شکل ۵ به مقایسه پروفیل سطح آب بین نتایج آزمایشگاهی هاگر و اسچوالت و روش عددی در تحقیق حاضر پرداخته شده است. در هنگام عبور جریان از روی تاج، یک افت موضعی در پروفیل سطح آب در رسیدن به سرریز مشاهده می‌شود. این افت در دبی‌های بیشتر کمتر شده و پروفیل



شکل ۵. مقایسه پروفیل‌های سطح آب برای شرایط معین در مدل آزمایشگاهی و عددی

Fig. 5. Comparison of water surface profiles for specific conditions in experimental and numerical models

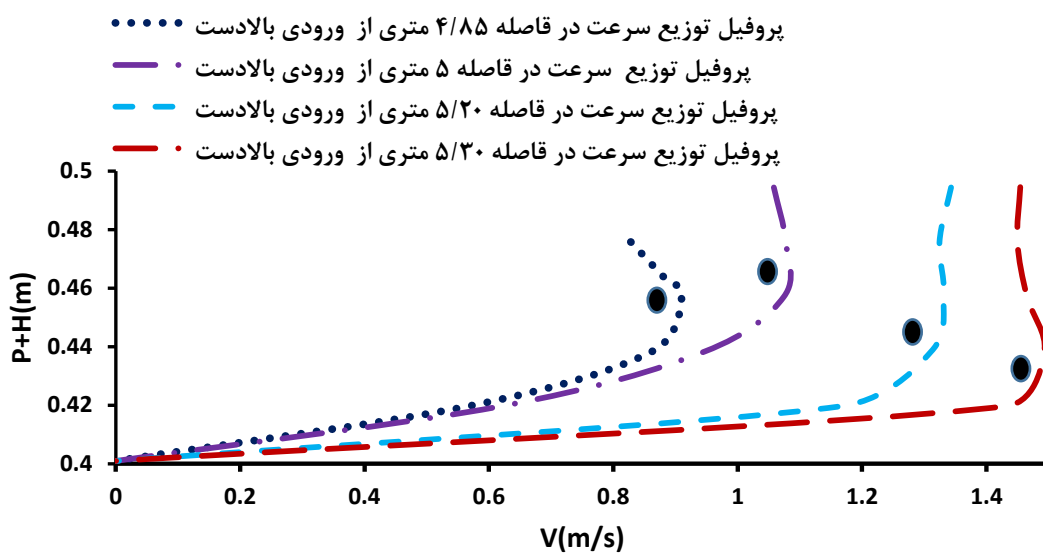
شکل ۷ شبیه‌سازی عددی مسیر حرکت خطوط جریان عبوری بر روی سرریز لبه‌پهن دارای گوشه تیز در بالادست را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تیز گوشه بودن سرریز در بالادست باعث جدایی خطوط جریان در ابتدا و ارتباط مجدد آب با تاج سرریز در یک فاصله معین گردیده است.

در شرایطی که نسبت H/L از $0/1$ کمتر می‌شود، سرریز از نوع تاج طولانی بوده و در نتیجه عمق بحرانی در نزدیکی‌های گوشه پایین‌دست تاج تشکیل می‌گردد، ولی در صورتی که این مقدار از $0/1$ بیشتر شود، محل تشکیل عمق بحرانی به نزدیکی‌های گوشه بالادست منتقل می‌گردد. چنانچه گوشه بالادست سرریز تیز باشد، جریان در قسمت بالادست دچار جدا شدگی می‌گردد. در صورتی که ابعاد ناحیه جدا شدگی از لحاظ طولی و عمقی در ورودی تاج قابل توجه باشد، فشردگی جریان افزایش و در نتیجه سطح مقطع جریان کاهش و به تبع آن ضریب دبی جریان کمتر می‌شود. بنابراین لازم است جهت جلوگیری از پدیده جدایش، شکل هندسی سرریزهای لبه‌پهن تغییر نماید که در صورت گرد کردن لبه بالادست تاج سرریز، این جدایی آب و ایجاد حباب هوا وجود نخواهد داشت. در نتیجه خطوط جریان دارای انحنا کم و فشار آب روی تاج هیدرواستاتیکی خواهد بود.

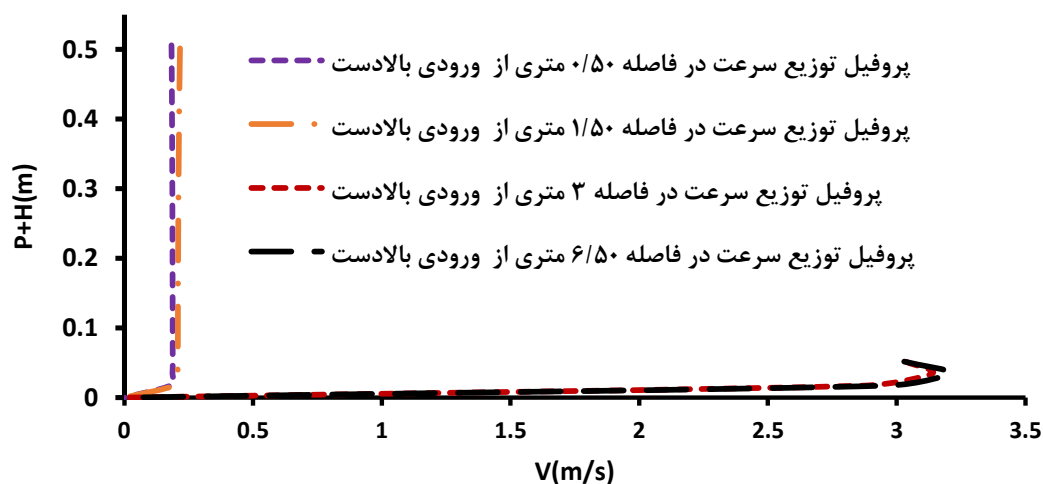
طبق تحقیقات گویندا رائو و مورالیدهار [۱۹] یکی از ویژگی‌های خاص از سرریزهای لبه‌پهن ایجاد جریان موجکی روی تاج سرریز با $H/L < 0/1$ است. عامل اصلی این نوع جریان موجکی،

تاج سرریز به دلیل اختلاف تراز آب در ابتدا و انتهای تاج، الگوی جریان به ویژه الگوی توزیع سرعت تغییر می‌کند. شایان ذکر است که سرعت جریان از گوشه بالادست به گوشه پایین‌دست سرریز افزایش و عمق جریان کاهش پیدا کرده است (سرعت‌های حداکثر با علامت دایره روی شکل ۶-الف نشان داده شده است). پروفیل توزیع سرعت در مقاطع مختلف از بالادست تا پایین‌دست بالای تاج به گونه‌ای است که با دور شدن از تاج، ابتدا بر مقدار سرعت افزوده شده و بعد از اینکه به حداکثر مقدار خود می‌رسد سرعت جریان به تدریج کاهش می‌یابد و در نزدیکی‌های سطح آب به کمترین مقدار خود می‌رسد.

هم‌چنین با ثابت بودن تراز آب در بالادست و پایین‌دست سرریز به دلیل برقراری جریان یکنواخت در ورودی و خروجی کانال، پروفیل توزیع سرعت در هر مقطع تقریباً به هم نزدیک بوده و تغییرات اندک مقدار سرعت در این مقاطع را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد سرعت در کف کانال، بنا به دلیل عدم لغزش نزدیک‌ترین مولکول‌ها جریان آب به دیوار و برقراری تنش برشی مقاوم در مقابل حرکت سیال از سوی بستر، حداقل مقدار را دارد و هر چه از بستر کانال فاصله گرفته می‌شود رفته رفته اثر دیوار بر روی جریان کم می‌شود. هم‌چنین بر سرعت جریان آب افزوده می‌شود تا به حداکثر مقدار خود در نزدیکی‌های سطح آب برسد. در سطح آب بنا به تاثیر نیروی اصطکاک هوا و جریان‌های ثانویه مقداری از سرعت جریان کاسته می‌شود (شکل ۶-ب).



الف- در روی تاج سرریز

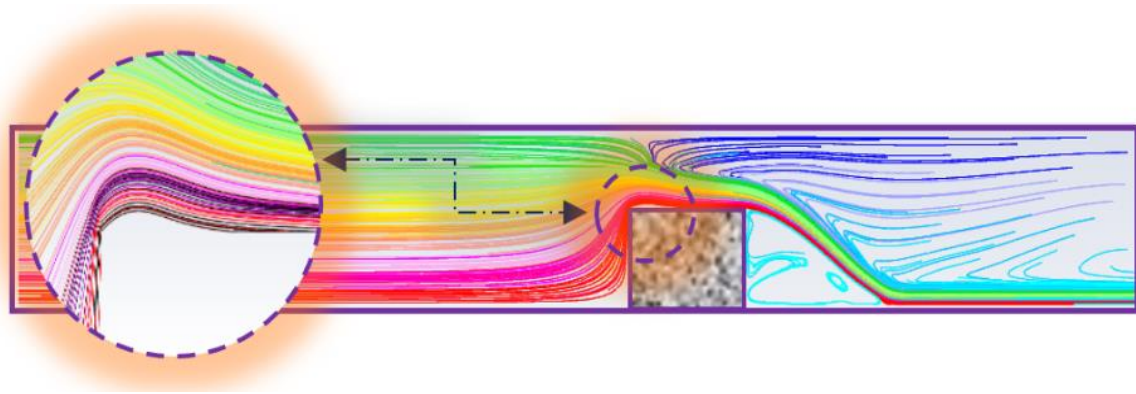


ب- بالادست و پایین‌دست سرریز

شکل ۶. شبیه سازی پروفیل توزیع عمقی سرعت در مقاطع مختلف کانال $\left(Q = 68.01 \frac{\text{lit}}{\text{s}}, H = 0.2021\text{m}, P = 0.4\text{m} \right)$

Fig. 6. Simulation of velocity distribution profiles in different sections of the canal

$$\left(Q = 68.01 \frac{\text{lit}}{\text{s}}, H = 0.2021\text{m}, P = 0.4\text{m} \right)$$



شکل ۷. چگونگی حرکت خطوط جریان و جدا شدگی جریان در ابتدای تاج سرریز

Fig. 7. Illustrations of stream lines and flow separation at the crest of weir

نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد بعد از برخورد جریان آب با سرریز لبه‌پهن، مقدار بیشتری از جریان به سمت بالادست و تنها مقدار بسیار کمی از جریان ورودی از روی تاج سرریز عبور می‌کند و با گذشت زمان با افزایش عمق آب در بالادست سرریز، مقدار جریان عبوری از روی سرریز افزایش ولی هم‌زمان جبهه پیشروی سطح آب به سمت بالادست عمل می‌کند و در پایاب نیز به دلیل اوج گرفتن بار آبی در بالادست سرریز، یک جت آبی ایجاد می‌گردد. بعد از به تعادل رسیدن سطح آب در بالادست سرریز در عمق معین و برقراری جریان ماندگار، رفته رفته این جت آبی ایجاد شده در دبی‌های کم از بین می‌رود و جریان در تماس با سرریز به پایین دست حرکت می‌نماید. این در حالی است که این جت آبی در دبی‌های بیشتر وجود داشت.

با توجه به شکل ۸ در نزدیکی‌های گوشه بالادست تاج سرریز جریان موجکی به دلیل کم بودن نسبت عمق جریان به طول تاج تشکیل گردیده است. در جدول ۲ حداقل عمق جریان در شرایط ایجاد جریان موجکی (برای شرایط با علامت بدون * در جدول ۱) در مدل عددی و رابطه پیشنهادی چانسون [۲۰] آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد از آنجایی که عدد فرود جریان در مقطع با حداقل عمق در تاج در هر یک از شرایط هیدرولیکی کمتر از ۱/۵ می‌باشد، جریان موجکی به وقوع می‌پیوندد.

در شکل ۹ رابطه دبی در مقابل عمق در مقطع کنترل (یعنی عمق بحرانی) برای شرایط آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد با افزایش عمق بحرانی روی تاج سرریز، دبی عبوری از روی تاج سرریز به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در جدول ۳ نیز نتایج

ویسکوزیته است که باعث کاهش سرعت جریان در سرریزهای تاج طولانی می‌گردد. چانسون [۲۰] به امکان ایجاد جریان موجکی روی سرریز لبه‌پهن مستطیلی اشاره کرده است. این حالت در دبی‌های کم روی می‌دهد و در این شرایط بایستی از سرریز به عنوان سازه اندازه‌گیری جریان استفاده نشود. یکی از معیارهای تشخیص جریان موجکی به صورت رابطه (۶) است، که در آن d_{min} حداقل عمق در بالادست اولین موج در روی تاج سرریز می‌باشد (شکل ۲).

$$Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{gd_{min}^3}} < 1.5 \quad (6)$$

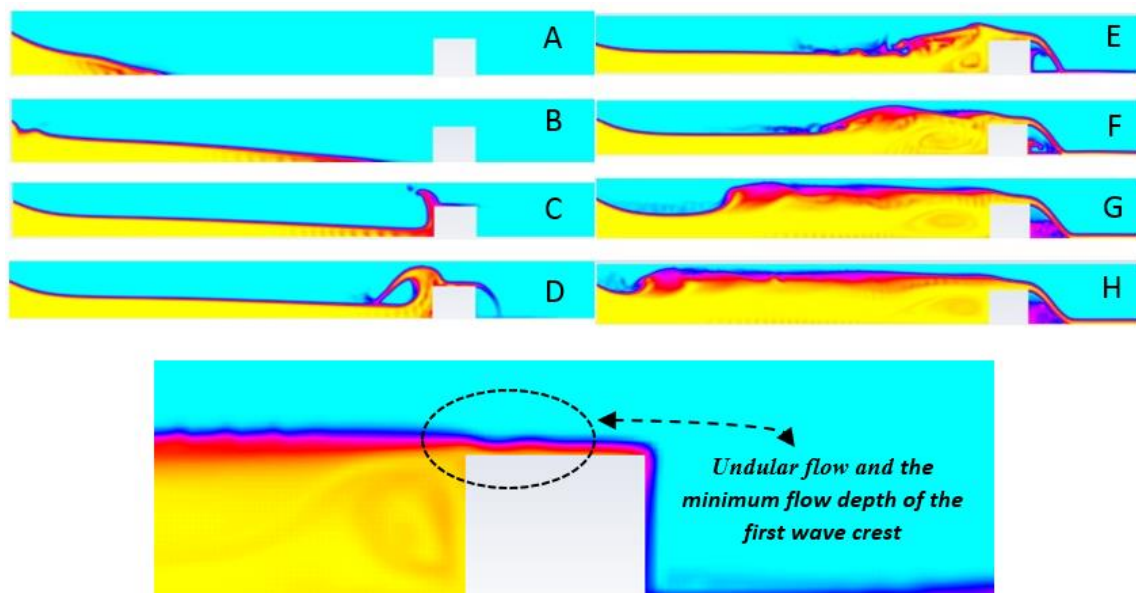
در شرایط آزمایشگاهی هاگر و اسپوالت [۱۶] که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است، برای شرایط با علامت (*) هیچ‌گونه موجی در تاج سرریز تشکیل نشد. با بررسی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مشاهده گردید که در شرایط با دبی کم موج‌هایی در روی تاج شروع به تشکیل شدن می‌کنند که شدت و موقعیت این موج تحت تاثیر بار آبی جریان بالادست و میزان جدا شدگی می‌باشد. بنابراین در صورتی که از سرریز به عنوان وسیله اندازه‌گیری استفاده می‌شود، بایستی اجازه داد تا تراز آب از یک حداقل مقداری کمتر گردد زیرا در این شرایط موج‌های سینوسی ایجاد می‌گردد که علاوه بر ایجاد خطا در اندازه‌گیری، باعث انتشار این موج به پایین دست و اغتشاش جریان پایاب خواهد شد.

در شکل ۸ نحوه ورود جریان در کانال و برخورد آن با سرریز لبه‌پهن

جدول ۲. مقایسه حداقل عمق جریان موجکی و عدد فرود در مقطع حداقل عمق جریان روی تاج

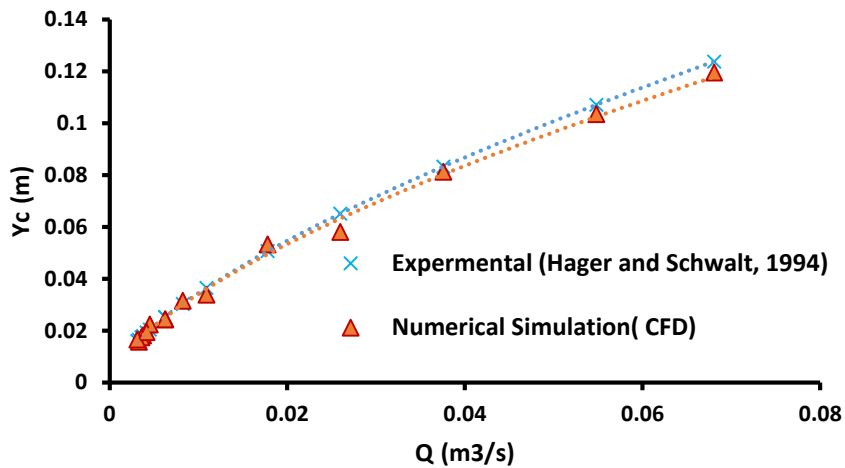
Table 2. Comparison of minimum depth and Froude number on the weir crest

H/L	d_{\min} (m), (Chanson [20])	d_{\min} (m), (CFD)	F_{r1} (Chanson [20])	F_{r1} (CFD)
۰/۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۶	۱/۵	۱/۳۳
۰/۰۶۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸	۱/۵	۱/۳۹
۰/۰۵۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۱/۵	۱/۱۹
۰/۰۶۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۷	۱/۵	۱/۱۱
۰/۰۸۴	۰/۰۱۹	۰/۰۲۱	۱/۵	۱/۲۴
۰/۰۵۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۱/۵	۱/۳۹
۰/۰۵۴	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۱/۵	۰/۹۶
۰/۰۶۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۹	۱/۵	۱/۰۴



شکل ۸. نحوه ورود جریان به کانال و ایجاد جریان موجکی بعد از برقراری جریان پایدار در روی تاج سرریز

Fig. 8. Illustrations of the entry flow in the canal and creation of undular flow waves after setup steady flow on the weir crest



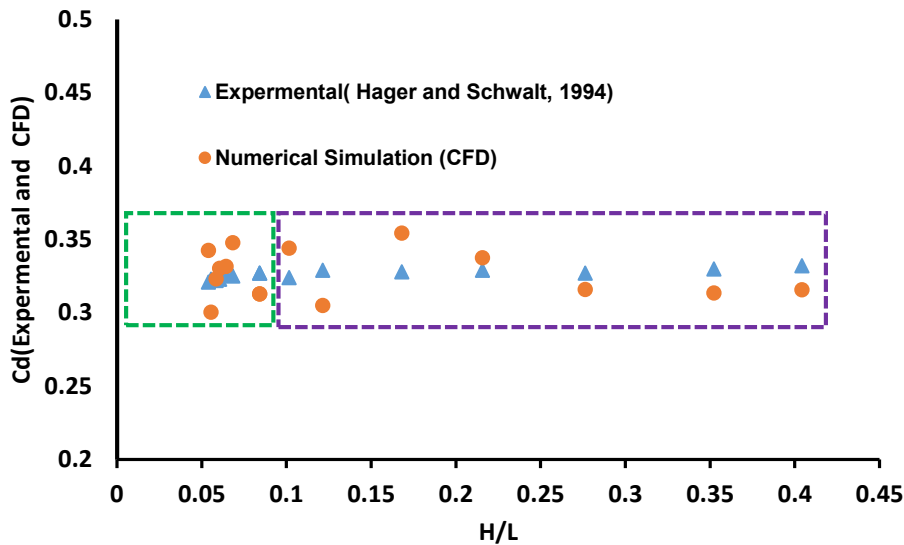
شکل ۹. مقایسه رابطه دبی در مقابل عمق بحرانی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

Fig. 9. Comparison of the relationship between flow discharge versus critical depth with experimental and numerical results

جدول ۳. مقایسه ضریب دبی به دست آمده از روش عددی (CFD) و آزمایشگاهی (هاگر و اسچوالت [۱۶])

Table 3. Comparison of discharge coefficient obtained by numerical (CFD) and experimental methods (Hager and Schwalt [16])

Ca (Experimental)	Ca (CFD)	RE%
۰/۳۲۴	۰/۳۴۴	۶/۱۸
۰/۳۲۵	۰/۳۴۸	۷/۰۱
۰/۳۲۳	۰/۳۰۱	۶/۹۵
۰/۳۲۳	۰/۳۳۱	۲/۳۱
۰/۳۲۷	۰/۳۱۳	۴/۳۳
۰/۳۲۷	۰/۳۱۳	۴/۳۳
۰/۳۲۹	۰/۳۰۵	۷/۲۶
۰/۳۲۸	۰/۳۵۴	۸/۰۲
۰/۳۲۹	۰/۳۳۸	۲/۶۲
۰/۳۲۷	۰/۳۱۶	۳/۳۷
۰/۳۳۰	۰/۳۱۴	۵/۰۱
۰/۳۳۲	۰/۳۱۶	۴/۸۹
۰/۳۲۲	۰/۳۲۴	۰/۳۳
۰/۳۲۱	۰/۳۴۳	۶/۶۹
۰/۳۲۶	۰/۳۳۲	۱/۷۶



شکل ۱۰. تغییرات Cd به ازای مقادیر H/L استخراجی از نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی

Fig. 10. Variations of Cd versus H/L for experimental results and numerical simulations

می‌کنند. این عوامل در این سرریزها باعث می‌شوند که از سرریز لبه‌پهن طولانی به عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان به کار گرفته نشود. لازم به ذکر است که تغییرات ضریب دبی نسبت به پارامتر H/L در شرایطی ۰/۱ > H/L باشد، تدریجی و تقریباً خطی می‌باشد که این نوع از سرریزها به سرریز لبه‌پهن حقیقی شناخته می‌شوند و مقطع کنترل در این شرایط در نزدیکی‌های بالادست تشکیل می‌گردد و این در صورتی است که در سرریز لبه‌پهن طولانی (H/L < ۰/۱)، مقطع کنترل در پایین‌دست تاج شکل می‌گیرد.

با بررسی‌های انجام گرفته یک رابطه رگرسیونی برای ضریب دبی سرریزهای لبه‌پهن حقیقی استخراج گردید (رابطه ۷) که با قرار دادن در رابطه (۱) می‌توان دبی عبوری از روی سرریزهای لبه‌پهن حقیقی را با استفاده از رابطه (۸) به دست آورد. ارزیابی نتایج حاصل از رابطه (۸)، با شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است.

$$C_d = 0.385 \left(\frac{H}{L} - 0.07 \right)^{0.018} - 0.028 \quad (7)$$

$$\Rightarrow \frac{H}{L} > 0.08$$

حاصل ضریب دبی جریان عبوری از سرریز لبه‌پهن مستطیلی با گوشه تیز در بالادست با روش آزمایشگاهی و عددی آورده شده است. محدوده ضریب دبی برای کل داده‌های آزمایشگاهی بین ۰/۳۲۱ تا ۰/۳۳۲ بوده که با روش عددی تحقیق حاضر (CFD) با محدوده تغییرات ضریب دبی بین ۰/۳۰۱ الی ۰/۳۵۴ تطابق مناسبی دیده می‌شود. لذا مدل عددی با خطای نسبی (RE) کمتر از ۰/۸٪ می‌تواند ضریب دبی جریان را برآورد نماید.

در شکل ۱۰ تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به مقدار H/L در شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، روند ضریب دبی با مقدار H/L دچار یک سری تغییراتی می‌گردد. طبق تحقیقات گویندا راثو و مورالیدهار [۱۹] یکی از ویژگی‌های خاص از سرریزهای لبه‌پهن ایجاد جریان موجکی روی تاج سرریز برای H/L < ۰/۱ است. این شرایط باعث می‌گردد تا به دلیل نوسانات زیاد و تولید موج‌هایی در تاج، روند تغییرات ضریب دبی منظم نباشد. مطابق شکل ۱۰، به ازای مقادیر H/L > ۰/۱ روند تغییرات ضریب دبی تقریباً خطی می‌باشد که گویندا راثو و مورالیدهار [۱۹] نیز یک رابطه خطی برای ضریب دبی بر حسب H/L را ارائه نمودند. بنابراین عواملی هم‌چون وقوع جریان موجکی در تاج و بیشتر بودن مقاومت سطح این نوع از سرریزها (سرریز لبه‌پهن طولانی) نقش عمده‌ای را در محاسبه مقدار ضریب دبی ایفا

جدول ۴. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و رابطه رگرسیونی با نتایج آزمایشگاهی

Table 4. Comparison of numerical simulation results and regression equation with experimental results

H/L	Q (Experimental) Lit/s	Q (CFD) Lit/s	Q (Eq.8) Lit/s	RE% (CFD)	RE% (Eq.8)
۰/۱۰۱۶	۸/۲۵	۸/۷۲	۸/۵۲	۵/۶۹	۳/۲۷
۰/۰۸۴۲	۶/۲۶	۵/۹۸	۶/۳۲	۴/۴۷	۰/۹۵
۰/۱۲۱۴	۱۰/۹	۱۰/۱۰	۱۱/۲۲	۷/۳۰	۲/۹۳
۰/۱۶۱۸	۱۷/۸۱	۱۹/۱۲	۱۸/۵۴	۷/۴۰	۴/۱۰
۰/۲۱۵۸	۲۵/۹۸	۲۶/۵۳	۲۷/۱۵	۲/۱۱	۲/۱۱
۰/۲۷۶۴	۳۷/۵۹	۳۵/۹۵	۳۹/۶۲	۴/۴۰	۵/۴۰
۰/۳۵۲۴	۵۴/۸۳	۵۱/۴۳	۵۷/۳۷	۶/۲۰	۴/۶۳
۰/۴۰۴۲	۶۸/۰۷	۶۳/۵۸	۷۰/۷۲	۶/۵۹	۳/۸۹

گردید. نتایج نشان داد که با دقت قابل قبولی می توان از این رابطه به دست آمده برای برآورد ضریب دبی جریان استفاده نمود.

$$Q = (0.385(\frac{H}{L} - 0.07)^{0.018} - 0.028)b\sqrt{2gH_1^3} \quad (8)$$

۵- فهرست علائم

- H: ارتفاع آب در بالای تاج سرریز، m
- H₁: انرژی آب در بالای تاج سرریز، m
- L: طول تاج سرریز، m
- P: ارتفاع سرریز، m
- d_{min}: حداقل عمق جریان در مقطع تشکیل اولین موج روی تاج سرریز، m
- Q: دبی جریان عبوری از روی تاج سرریز، m³/s
- q: دبی در واحد عرض جریان عبوری از روی تاج سرریز، m²/s
- C_d: ضریب دبی جریان، بدون بعد
- B: عرض کانال، m
- Fr₀: عدد فرود جریان، بدون بعد
- Fr₁: عدد فرود جریان در مقطعی که اولین موج ایجاد می گردد، بدون بعد
- R₀: عدد رینولدز جریان ورودی، بدون بعد

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از داده های آزمایشگاهی در دسترس، ابتدا شبیه سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS FLUENT انجام گرفته و سپس علاوه بر بررسی ضریب دبی جریان (C_d) در این نوع سرریزها، به چگونگی ایجاد جریان موجکی پرداخته شد. نتایج نشان داد که محدوده ضریب دبی برای داده های آزمایشگاهی بین ۰/۳۲۱ تا ۰/۳۳۲ است. این در حالی است که با روش شبیه سازی عددی این محدوده بین ۰/۳۰۱ تا ۰/۳۵۴ می باشد. متوسط درصد خطای نسبی (RE%) بین داده های آزمایشگاهی و روش شبیه سازی عددی در حدود ۴ درصد به دست آمد. همچنین مشاهده گردید که در صورتی که عدد فرود جریان در مقطعی که کمترین عمق در روی تاج (d_{min}) اتفاق می افتد، کمتر از مقدار ۱/۵ باشد (Fr₁ < ۱/۵)، در بالای تاج سرریز موجک هایی به فرم سینوسی تشکیل می شود، که می تواند دقت در قرائت اشل را کاهش و باعث ایجاد خطا در برآورد دبی جریان عبوری گردد. لازم به ذکر است که تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به پارامتر H/L در شرایطی که H/L > ۰/۱ باشد، تدریجی و تقریباً خطی می باشد. یک رابطه رگرسیونی نیز جهت محاسبه ضریب دبی سرریزهای لبه پهن حقیقی (۰/۴ < H/L ≤ ۰/۱) استخراج

- [11] M.R. Madadi, D. Farsadizadeh, A. Hosseinzadeh Dalir, Effective parameters on formation of Undular Flow on the broad-crested weirs, *Journal of Water and Soil* 26 (6) (2013) 1428-1439 (in persian).
- [12] J. Mohammadzadeh-Habili, M. Heidarpour, A. Haghiabi, Comparison the hydraulic characteristics of finite crest length weir with quarter-circular crested weir, *Flow Measurement and Instrumentation* 52 (2016) 77-82.
- [13] B. Nourani, R. Norouzi, F. Rezaei, F. Salmasi, Investigation the stage- discharge relationship and discharge coefficient in sharp-crested weirs with triangular shape in plan, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019) (In Persian).
- [14] B. Nourani, H. Arvanaghi, F. Salmasi, A novel approach for estimation of discharge coefficient in broad-crested weirs based on Harris Hawks Optimization algorithm, *Flow Measurement and Instrumentation*, 79(101916) (2021).
- [15] P. Varjavand, D. D Farsadizadeh, P. Khosravinia, Z. Rafieey, Simulation of flow over cylindrical weirs using fluent model and comparison with experimental data, *Soil and Water Science*, 20(1(2)) (2009) (in persian).
- [16] W.H. Hager, M. Schwalt, Broad-crested weir, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120(1) (1994) 13-26.
- [17] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys*, 39 (1981) 201–225.
- [18] Anonymous, ANSYS FLUENT Tutorial Guide, (2015).
- [19] R.N. Govinda, D. Moralindhar, Discharge characteristics of weirs of finite crest width, *La Houille Blanch*, 18(5) (1963) 537-545.
- [20] H. Chanson, *Hydraulics of open channel flow*, 2nd Edition, 2004.
- [1] A. Kabiri Samani, S. Bagheri, Design of channels and water conveyance structures, Arkan danesh, Esfahan, 2014 (In Persian).
- [2] J. Singer, Square-edged broad-crested weir as a flow measurement device, *Water and Water Engrg*, 68(6) (1964) 229-235.
- [3] A.J.M. Harrison, Some comments on the square-edged broad-crested weir, *Water and Water Engrg*, 68(11) (1964) 445-448.
- [4] A.D. Crabbe, Some hydraulic features of the square-edged broad-crested weir, *Water and Water Engrg*, 78(10) (1974) 354-358.
- [5] A.S. Ramamurthy, U.S. Tim, M.V.J. Rao, Characteristics of square-edged round-nosed broad-crested weirs, *J. Irrig. and Drain. Engrg*, ASCE, 114(1) (1988) 61-73.
- [6] J. Farhoudi, H. Shah Alami, Slope effect on discharge efficiency in rectangular broad crested weir with sloped upstream face, *Int. J. Civ. Eng.*, 3 (2005) 58–65.
- [7] A.H. Azimi, N. Rajaratnam, M. David Z Zhu, Submerged Flows over Rectangular Weirs of Finite Crest Length, *J. Irrig. Drain Eng.*, 140(5) (2014).
- [8] O. Simsek, M. Sami Akoz, N. Goksu Soydan, Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 16(6) (2016) 6364-6378.
- [9] A.M. Shaymaa, Al-Hashimi., Huda M M., M.K. Rasul, N.N. Thameen, A.A.-A. Nadhir, Flow over broad-crested weirs: Comparison of 2D and 3D Models, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11 (2017) 769-779.
- [10] J. Lei, M. D., S. Haomiao, R. Yu, Numerical modeling of flow over a rectangular broad-crested weir with a sloped upstream face, *Water*, 10. (2018) (11)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Nourani, F. Salmasi, H. Arvanaghi, F. Rezaei, *Undular Flow Conditions and Discharge Coefficients in Rectangular Broad-Crested Weirs*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 125-140.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18314.6830



