


Numerical Modeling of Parameters Affecting the Flow Over the Chute Spillway Aerator and the Air Concentration in Downstream of it

Mohanna Tajnesaie ^{1*}, Ehsan Jafari Nodoushan ²

1- Department of Civil Engineering, Bijar Branch, Islamic Azad University, Bijar, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Bijar Branch, Islamic Azad University, Bijar, Iran.

* mtajnesaie@gmail.com

Received: 1 October 2020, Accepted: 29 December 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: To protect hydraulic structures like spillways, chutes, and bottom outlets against damage caused by cavitation, the air is usually pumped into the regions with a cavitation index below the critical value. Using the aerators, the erosion of the spillway surfaces caused by cavitation can be eliminated. The aerators are usually mounted on the bottom or the lateral walls of the spillway and cause the separation of high speed flows from the spillway surface and prevent erosion on the rigid surfaces. Most of the experiments have focused on the average air concentration of flow, while the amount of the air and the way it comes out the flow must be determined. Therefore, in the present study, the experimental data presented by Pfister (2007) for numerical simulation of flow over the aerator was used to investigate variations of the air concentration along the chute bottom. FLUENT software was used for the simulation of the two-phase air-water flow. Jump length has been considered as an important and effective factor in entering air into the flow and a criterion for verification.

Methodology: According to the importance of the determination of the minimum volume of required air to prevent cavitation damages, the numerical effects of the air concentration during chute has been studied in this research. Eulerian and K- ϵ (RNG) models have been selected for two-phase simulation and for studying the turbulence effect respectively. The structured and unstructured mesh has been reviewed for the meshing model, finally, the use of structured mesh has been considered. As mentioned, the result of Pfister (2007) model has been utilized for validation and the length of the jet in crossflow was the criteria of validation. Therefore, parameters affecting the length of jet flow include the ramps with angles of 5.7, 8.1, and 11.3 degrees, the steps with the heights of 23, 25, 44, 45, and 100 millimeters, the combination of the ramp and the steps, various Froude numbers in the range of 5.8 to 10.4, different ramp heights include 0, 6.7, 13.3, and 26.7 millimeters and the chute slopes of 12, 30, and 50 degrees have been studied. The proper estimate of the jump length from the aerators has been simulated for 93 models. Additionally, the bed air concentration during chute and the air concentration at the depth, in the downstream of the impact point, has been modeled using Computational Fluid Dynamics and FLUENT software that can be employed in determining the distance of aerators.

Results and Discussion: In this research, the effects of Froude number, the slope of the ramp, the initial height of the flow, the height of the step, and the ramp height on coefficient m has been studied considering the equation of changes in the bed air concentration

($C_b = C_{(x/L_{jet}-1)} \times e^{-m((x/L_{jet})-1)}$). In this equation, $C_{x/L_{jet}-1}$ represents the bed air concentration in the point of impact to the chute bottom and m is a coefficient for which sensitivity has been tested.

According to the result, air outflow decreases by increasing the Froude number. This shows a reverse trend for aerators with the ramp. Increasing the height of the step speeds up the increasing amount of m as well. The air outflow gradient goes up with the increasing the slope of the ramp so that the air outflow gradient has a significant rise by increasing the step height. The result does not show the specific trend for air outflow gradient as a function of the initial height of the flow. An increase in the step height results in increasing the length of the jump and increases the amount of the air entering the flow and the growth of air outlet from flow also increases. The air outlet gradient rises by increasing the ramp height.

After determining the jump length of jet, the rate of the air entering the flow and the variability of the bottom airflow can be investigated by the equations suggested by the authors, accordingly, the appropriate distance between two aerators can be defined.

The location of the first aerator is the initial point of cavitation and the distance of the second aerator can be affected by factors as follows:

1. The rate of the air coming out of the downstream of the first aerator
2. Natural aeration of the flow from the free surface.

Conclusion: A comparison of the results indicates the numerical and experimental models are compatible. According to the importance of the point of the impact, where the flow collides at the chute bottom (sudden outlet of air due to collision), the point was considered as the reference point for the calculations in the equation. Generally, the results showed that the air concentration downstream of the aerators increases with an increase in Froude Number, ramp height, steps height, and ramp angle. This decreases as the height of water upstream of the aerator increases.

Keywords: Minimum air concentration, Cavitation, Computational Fluid Dynamics, Overflow, Aeration.



© 2021 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/>)

مدل سازی عددی فراسنجه‌های مؤثر بر جریان از روی هواده سرریز تنداب و غلظت هوا در پایین دست آن

مهنا تاج‌نسایی^{۱*}، احسان جعفری‌ندوشن^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد بیجار، دانشگاه آزاد اسلامی، بیجار، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد بیجار، دانشگاه آزاد اسلامی، بیجار، ایران

* mtajnesaie@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: برای حفاظت سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریزها، تنداب‌ها و تخلیه‌کننده‌های پایینی در مقابل آسیب‌های حفره‌زایی، به‌طور معمول میزانی هوا به جریان در ناحیه‌های با شاخص حفره‌زایی کمتر از میزان بحرانی، اضافه می‌شود. با استفاده از هواده‌ها می‌توان از فرسایش‌هایی که به دلیل حفره‌زایی بر سطح‌های سرریز رخ می‌دهد، جلوگیری کرد. اغلب هواده‌ها روی کف و گاهی اوقات بر دیواره‌های جانبی سرریز نصب و باعث جدایی جریان‌های با سرعت بالا از سطح سرریز شده و با وارد کردن مصنوعی هوا به جریان، از فرسایش در مرزهای سخت جلوگیری می‌کنند. بیشتر آزمایش‌های انجام شده ورود و خروج هوا، بر غلظت میانگین هوای جریان متمرکز بوده و نیاز به اندازه‌گیری میزان و چگونگی خروج هوا از جریان می‌باشد. لذا در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی فیشر (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از هواده، به بررسی تغییرپذیری‌های غلظت هوا در طول بستر تنداب پرداخته شده است. بدین منظور برای مدل‌سازی جریان دوفازی هوا-آب از نرم‌افزار FLUENT استفاده شده و طول پرش فواره جریان به عنوان عاملی مهم و تأثیرگذار در ورود هوا به جریان ملاک واسنجی قرار گرفته است. مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دهنده سازگاری بسیار خوب بین مدل آزمایشگاهی و عددی می‌باشد به گونه‌ای که نتایج طول پرش بی‌بعد شده‌ی فواره جریان عددی نسبت به آزمایشگاهی با ضریب تعیین $R2 = 0.9739$ نشان از دقت بالای مدل عددی به کار رفته در این بررسی دارد. در نهایت رابطه‌ای برای توزیع غلظت هوا در بستر ارایه شد که برازش مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. با توجه به اهمیت نقطه برخورد جریان به بستر تنداب (خروج ناگهانی هوا در اثر برخورد)، نقطه مذکور به عنوان مرجع محاسبات در رابطه قرار گرفت. به طور کلی نتایج نشان داد که غلظت هوای بستر پایین دست هواده‌ها با افزایش عدد فرود، ارتفاع شیب‌راهه، ارتفاع پله و زاویه شیب‌راهه افزایش و با افزایش ارتفاع آب بالادست هواده، کاهش می‌یابد و با افزایش شیب تنداب ورود هوا به جریان افزایش یافته و همچنین تغییرپذیری‌های غلظت هوا کاهش می‌یابد، لذا نیاز به حضور هواده کمتر می‌شود.

کلید واژگان: حداقل غلظت هوا، حفره‌زایی، دینامیک سیالات محاسباتی، سرریز، هواده.

۱- مقدمه

و سنگریزه‌ای چشمگیر بوده و با توجه به سرریزهای مورد استفاده برای این نوع سدها که اغلب به صورت تونلی و تنداب می‌باشند، افزایش ارتفاع سد، افزایش سرعت جریان را روی تنداب موجب شده و احتمال رخداد حفره‌زایی را افزایش می‌دهد. تاکنون راه‌های گوناگونی برای کاهش و جلوگیری از آسیب‌های حفره‌زایی پیشنهاد شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Kramer, 2004; Chanson, 1988). کاهش عدد حفره‌زایی بحرانی با از بین بردن نامنظمی‌های

سدها نقش مهمی در پیشرفت تمدن بشری داشته‌اند. ساده‌ترین نقش آن‌ها تأمین منابعی برای آب در بخش کشاورزی می‌باشد؛ در حال حاضر با احداث سدها، انرژی هیدروالکتریک، آب در بخش صنعت و آشامیدنی نیز تأمین می‌شود. با افزایش رشد جمعیت بشر و افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های یادشده نیاز به ساخت سدهایی با ظرفیت بالای ذخیره افزایش یافته و موجب افزایش ارتفاع سدها شده است (Blake, 1989). از این میان سهم سدهای خاکی

می‌شود (Falvey, 1990). اغلب ترکیبی از سه نوع ذکر شده بهترین طرح را ایجاد می‌کند؛ شیب‌راهه در دبی‌های پایین عملکرد مناسب دارد و آبراهه، فضا را برای تأمین هوا فراهم می‌آورد و پله مسیر فواره آب را در دبی‌های بالا افزایش می‌دهد (Chanson, 1988).

نخستین بررسی‌های مربوط به هوادهی تنداب‌ها توسط یک مهندس اتریشی به نام Ehrenberger (1926) انجام شد. او دریافت که به وجود آمدن آب سفید رنگ مربوط به توسعه لایه مرزی جریان می‌باشد. بررسی‌های او متمرکز بر سرعت سطحی و افزایش حجم جریان بود که برای تعیین ارتفاع آزاد^۱ مناسب ضروری می‌باشد. نظریه‌ی کاهش آسیب‌های حفره‌زایی با استفاده از وارد کردن هوا، نخستین بار توسط Bradley (1945) و Warnock (1947) پیشنهاد شد (Kramer, 2004). شکل ۲ کاهش آسیب‌های حفره‌زایی را در شرایط حضور حباب‌های هوا در جریان نشان می‌دهد.

در حال حاضر راهنمای طراحی معتبر و قابل اطمینانی برای تعیین فاصله مورد نیاز بین دو هواده که غلظت هوای تحتانی کافی را تأمین کنند وجود ندارد. اغلب استانداردهای به کار رفته در عمل بر مبنای مشاهده‌های نمونه اصلی بوده است. داده‌های کمی مربوط به غلظت هوا در ناحیه‌ی جریان در حال توسعه بین نقطه‌ی آغاز هواگیری و جریان متعادل وجود دارد. اغلب، غلظت هوای میانگین روی تنداب‌های صاف توسط عمق جریان مخلوط روی نمونه اصلی به عنوان شاخصی برای حجم هوای حبس شده در جریان مشاهده و اندازه‌گیری می‌شود.

در ادامه خلاصه‌ای از مهم‌ترین معادله‌ها جهت تعیین غلظت هوای میانگین یکنواخت \hat{C}_{99u} و غلظت هوای پایینی C_b ارائه می‌شود.

(Hager, 1991) با استفاده از داده‌های Straub & Anderson (1958)، رابطه‌ی زیر را برای غلظت هوای پایینی در ناحیه جریان متعادل ارائه داد (Kramer et al., 2006; Hager, 2006):

$$C_b = 1.2 \left(\frac{\pi}{180} \alpha \right)^3 \quad 0 \leq \alpha \leq 40^\circ$$

$$C_b = 0.65 \sin \alpha \quad 40^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ \quad (1)$$

سطحی و افزایش مقاومت مصالح سطحی مانند استفاده از ورق‌های فولادی، بتن الیافی، اپوکسی‌ها و ترکیب‌های بس‌پاری امکان‌پذیر می‌باشد، اما این راهکار به لحاظ اقتصادی برای تنداب‌های طویل راه حل مناسبی نمی‌باشد. استفاده از هواده‌ها، در حال حاضر از نظر فنی و اقتصادی وارد کردن هوا در ناحیه‌های پیرامون سطح‌های سرریزها در شرایط فشار کم و سرعت بالای جریان مناسب‌ترین راهکار برای مقابله با حفره‌زایی می‌باشد (Kramer, 2004).

ورود هوا به جریان آب می‌تواند از راه‌های گوناگونی مانند هوادهی سطحی در جریان‌های با سرعت بالا، هوادهی موضعی به دلیل برخورد فواره‌های جریان به گودال‌ها یا مخازن آب، ورود هوا به دلیل پرش هیدرولیکی، عبور فواره آب در هوا، هوادهی در اثر انتقال جریان سطح آزاد به مجراهای جریان و یا هوادهی موضعی توسط ابزار تأمین هوا مانند هواده‌ها صورت پذیرد (Kramer, 2004). هواده‌ها ابزاری هستند که به منظور وارد کردن هوا به‌طور مصنوعی به جریان‌های با سرعت بالا در بالادست نخستین نقطه‌ای که حفره‌زایی می‌تواند در آنجا رخ دهد، طراحی می‌شوند. این ابزار با جدا کردن جریان‌های با سرعت بالا از سطح تنداب، باعث می‌شوند جریان مشابه یک فواره آزاد رفتار کرده و میزان زیادی هواگیری مصنوعی در لایه زیرین جریان رخ دهد (شکل ۱).

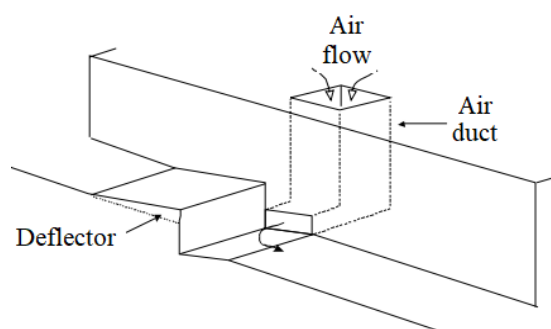


Fig.1 Air conditioning and air supply system (Kramer, 2004)

شکل ۱ هواده و سامانه تأمین هوا (Kramer, 2004)

انواع اصلی هواده‌ها شامل شیب‌راهه یا انحراف دهنده جریان، شیار یا آبراهه، پله یا شکستگی و یا ترکیبی از این‌ها

¹ Free board

$$\bar{C}_{90u} = 0.9 \sin \alpha \quad \alpha \leq 50^\circ \quad (4)$$

او با تحلیل داده‌های بالا غلظت هوای میانگین $\bar{C}_{99u}=30\%$ را برای تأمین غلظت هوای پایینی $C_b=5\%$ لازم دانست. این میزان برای جلوگیری سطح بستر سرریز از آسیب و زیان‌های حفره‌زایی کافی می‌باشد. او همچنین فرض کرد که در سرریزی با شیب تند و $20^\circ \leq \alpha$ توزیع غلظت هوا به شرایط متعادل نزدیک می‌شود. این نظریه با نظریه $5\%/7\%$ Peterka (1953) غلظت هوای میانگین ارائه شده توسط (Kramer, 2004) برای جلوگیری از آسیب و زیان‌های حفره‌زایی مغایرت دارد (Kramer, 2004). (Chanson (1997) میزان هوای وارد شده به جریان را به صورت زیر بیان کرد (Kramer, 2004; Chanson, 1993):

$$\bar{C}_{90u} = 1.44 \sin \alpha - 0.08 \quad (5)$$

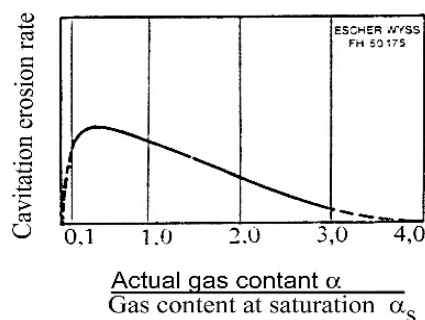
رابطه‌ی بالا با استفاده از داده‌های گردآوری شده از پروژه‌های مختلف مربوط به رودخانه‌های کوهستانی و آبراهه‌های نامنظم و برای دامنه گسترده‌ای از زبری به دست آمده است. تغییرپذیری‌های غلظت هوا مشابه آنچه May (1987) و Kramer (2004) به ترتیب در رابطه‌های (۶) و (۷) ارائه کرده‌اند، به صورت نمایی در نظر گرفته شده است (Kramer, 2004; Falvey, 1990).

$$\frac{C_x}{C_0} = e^{-0.017(L_x - L_i)} \quad (6)$$

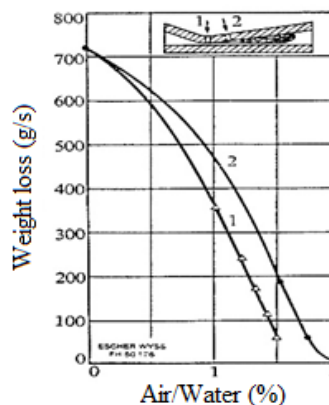
$$C_{b,det} = C_{bo} e^{-30 \times 0.006^{50} Fr^{-2.50} X_{90u}} \quad (7)$$

در رابطه‌های بالا C_x غلظت میانگین هوا در فاصله‌ی x از لبه‌ی هواده، C_0 غلظت میانگین هوا در آغاز هواگیری، L_x فاصله مایل پایین دست از هواده و L_i فاصله مایل پایین دست از هواده تا نقطه‌ی آغاز هواگیری، $C_{b,det}$ غلظت هوای بیرون شده از لایه‌ی تحتانی جریان، C_{b0} غلظت هوای تحتانی بالادست، X_{90u} فاصله‌ی بی بعد در جهت طول آبراهه، Fr عدد فرود جریان، $S_0 = \tan \alpha$ و α شیب تنداب است.

با توجه به اینکه یکی از راه‌های بررسی و ارزیابی پدیده‌های فیزیکی مانند مسائل هیدرولیکی پیچیده، که از لحاظ بررسی‌های تجربی با مسئله‌های فراوانی مواجه می‌باشند، بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی است، در این



(a)



(b)

Fig. 2 a) Erosion rate of cavitation versus relative air concentration b) Display the effect of adding air on reducing cavitation losses (Kramer, K.,2004)

شکل ۲ الف) نرخ فرسایش حفره‌زایی در مقابل غلظت هوای نسبی ب) نمایش تأثیر افزودن هوا بر کاهش خسارات حفره‌زایی (Kramer, K.,2004)

Anderson (1965) رابطه‌ی زیر را برای تعریف غلظت میانگین جریان پیشنهاد کرد (Kramer, 2004):

$$\bar{C} = \frac{1}{h_{99}} \int_0^{h_{99}} C dh \quad (2)$$

که در آن h_{99} حد بالایی سطح آب جایی که غلظت هوا $C=99\%$ می‌باشد، تعریف می‌شود و می‌توان آن را به شکل \bar{C}_{99u} نمایش داد (شکل ۳).

Hager (1991) ثابت کرد که غلظت هوای میانگین سطح مقطع جریان، تنها تابعی از شیب کف است و رابطه‌ی (۳) را پیشنهاد داد (Kramer, 2004; Hager, 2006).

$$\bar{C}_{90u} = 0.75(\sin \alpha)^{0.75} \quad (3)$$

Chanson (1993) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی Straub & Anderson (1958) و داده‌های میدانی Aivazyan (1987) رابطه‌ای برای برآورد غلظت میانگین هوا ارائه داد (Kramer, 2004; Chanson, 1993).

به نسبت موثرتر است. آنان هوای ورودی در سطح آزاد جریان را برای تمرکز بهتر روی ورودی هوا در قسمت lower nappe نادیده گرفتند و بیان داشتند که در صورت در نظر گرفتن آن نتایج واقع‌بینانه‌تری به دست می‌آید.

Yang et.al. (2019) به مدل‌سازی دوفازی جریان آب-هوا با سرعت بالا در هواده سرریز به روش‌های عددی و آزمایشگاهی پرداختند و دریافتند که در ناحیه خلاء وجود حباب‌های کوچکتر منجر به سازگاری بهتر نتایج مدل عددی با آزمایشگاهی می‌شود.

Aydin et al. (2020) با استفاده از یک مدل عددی دوفازی دینامیک سیالات محاسباتی، عمل هواده سرریز را بررسی و اظهار داشتند که با توجه به نتیجه‌های مدل عددی، می‌توان گفت که میزان هوادهی واقعی به دلیل تأثیر مقیاس آنها بسیار بیشتر از میزان حاصل از آزمایش‌های مدل است. از این رو، هنگامی که داده‌های نمونه واقعی در دسترس نیستند، مدل‌های عددی معتبر را می‌توان با یا بدون بررسی‌های تجربی ترجیح داد.

بنابراین، به کلی روشن است که شبیه‌سازی عددی جریان‌های روی سرریز در رابطه با ظرفیت تخلیه و فشار روی سرریز در طول دهه گذشته به کلی مناسب و کارا است. با این حال، شبیه‌سازی جریان هوا و آب هنوز در مرحله توسعه است. طراحی هواده در سرریز تاکنون بر روی مدل‌های فیزیکی بررسی شده است و مدل‌های عددی به علت جریان آب هوایی دو فاز پیچیده کمتر استفاده شده‌اند. Ozturk et al. (2008); Aydin and Ozturk (2009); Ozturk and Aydin (2009) ثابت کرده‌اند که دسترسی به دینامیک سیالات محاسباتی با کارایی بالا و نرم‌افزارهای پویا و کارآمد، امکان بررسی هیدرولیکی هواده‌ها به روش عددی را فراهم می‌کند. با توجه به این پیشینه، در این تحقیق جریان عبوری از روی هواده‌نده و تغییرپذیری‌های غلظت هوای ستر در پایین‌دست هواده‌ها بررسی شده است. به این منظور با استفاده از نرم‌افزار FLUENT 6.3.26 طول پرش فوران جریان و غلظت هوای جریان برای شیب‌های مختلف تنداب و شیب‌راهه، ارتفاع‌های متفاوت پله و جریان آب بالادست هواده و اعداد فرود گوناگون مدل شده و با نتایج آزمایشگاهی Pfister (2007) مقایسه شده است.

بررسی از نرم‌افزار FLUENT برای مدل‌سازی عددی جریان دوفازی هوا-آب استفاده شده است. از این رو در ادامه به برخی از بررسی‌های عددی صورت گرفته در این زمینه اشاره خواهد شد.

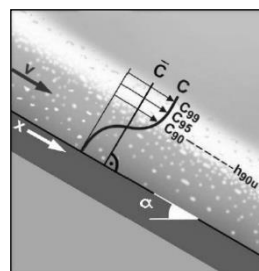


Fig. 3 Flow of water-air and water surface (Kramer, 2004)

شکل ۳ جریان آب-هوا و سطح آب (Kramer, 2004).

Azhdary Moghadam and Nakhaei Zeinali (2017) از مدل عددی FLOW-3D برای تعیین غلظت هوای وارد شده به جریان، در حالت هوادهی طبیعی به وسیله منحرف‌کننده و تأثیر هندسه هواده در میزان غلظت میانگین هوا استفاده و بیان کردند که نتیجه‌های به دست آمده از این مدل در مقایسه با نتیجه‌های آزمایشگاهی فیشر دارای سازگاری خوبی می‌باشد، همچنین هندسه هواده و خصوصیات هیدرولیکی جریان تأثیر زیادی در میزان ورود هوا دارد. آنها در این تحقیق از جریان توسعه‌یافته برای به دست آوردن غلظت میانگین هوا استفاده کردند و طول توسعه یافتگی به دست آمده از مدل عددی را میزان ۰/۸۸۹ متر بیان کردند. Tokyay and Kurt (2019) یک مدل عددی سه‌بعدی ANSYS (FLUENT (2011)) را برای بررسی جریان دوفازی فراتر از بحرانی با دبی متوسط تا زیاد از یک سرریز شیبدار با یک پله برای هوادهی جریان استفاده کردند. آنان ۱۸ مدل را با استفاده از روش کسر حجمی برای ردیابی فصل مشترک آب و هوا و مدل آشفتگی k-ε شبیه‌سازی کردند. متغیرهای در نظر گرفته شده در این بررسی شامل دبی، ابعاد هواده، ترتیب‌های مختلف هواده، عدد فرود جریان، وجود سطح شیبدار پیش از پله و زاویه آن می‌باشد. میزان‌های طول فواره مشاهده شده در این بررسی با دو سری رابطه تجربی اعتبارسنجی شد و بیان کردند که ترکیب‌بندی شکل هواده‌ها در افزایش طول فواره جریان

۲- مدل عددی

برای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در هر مسئله‌ای، نخست باید نتایج مدل عددی را با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی و مقایسه و پس از اطمینان از درستی و دقت نتایج و سازگاری قابل قبول آنها بر کارهای آزمایشگاهی، به آن استناد کرد. پس از اطمینان از درستی و دقت و سازگاری نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی آنگاه می‌توان تغییرپذیری‌های موردنظر را اعمال کرد و مدل‌سازی‌های جدید را انجام داد. یکی از مسئله‌های اصلی در حل عددی معادلات با مشتقات جزئی، ایجاد شبکه‌بندی مناسب می‌باشد. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان حل یک سیستم معادله‌های دیفرانسیل را تا حد زیادی ساده کرد و برعکس انتخاب نامناسب محل نقاط شبکه می‌تواند باعث ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات شود.

۲-۱- معادله‌های حاکم

۲-۱-۱- معادله پیوستگی

معادله پیوستگی برای فاز q به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (8)$$

که در آن v_q سرعت فاز q و m_{pq} مشخصه جرم انتقال یافته از فاز p به فاز q و m_{qp} مشخصه جرم انتقال یافته از فاز q به فاز p می‌باشد. در حالت پیش فرض برنامه، ترم S_q در سمت راست معادله‌ی بالا برابر صفر می‌باشد.

۲-۱-۲- معادله مومنتوم

از برقراری رابطه‌ی تعادل مومنتوم برای فاز q ، معادله‌ی (۹) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & \\ -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} & \\ + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) & \\ + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) & \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن τ_q آرایه (تانسور) تنش-کرنش فاز q می‌باشد.

$$\begin{aligned} \vec{\tau}_q = & \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) \\ & + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \end{aligned} \quad (10)$$

μ_q و λ_q گرانیوی برشی و حجمی فاز q ، F_q نیروی حجمی بیرونی، $F_{lift,q}$ نیروی لیفت، $F_{vm,q}$ نیروی جرم مجازی، R_{pq} نیروی اندرکنش بین فازها و P سهم فشار هر فاز v_{pg} سرعت فاز میانی و \vec{I} آرایه شناسایی است (FLUENT Inc., 2006).

۲-۱-۳- انتخاب مدل آشفتگی و مدل دو فازی

بر مبنای بررسی صورت گرفته، همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، پراکندگی نتایج مدل‌های VOF و Eulerian در حالت‌های RSM و $k-\epsilon$ در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای طول پرش با شیب تنداب ۵۰ درجه بیانگر این است که تنها مدل چندفازی اوپلر^۱ برای همه آزمایش‌ها واگرا نمی‌شود و مدل‌های چندفازی VOF و Mixture برای بسیاری از آزمایش‌ها واگرا شده‌اند. بنابراین در این بررسی برای شبیه‌سازی جریان دوفازی مدل اوپلر و برای در نظر گرفتن اثرگذارهای آشفتگی مدل $k-\epsilon$ (RNG) انتخاب شده‌اند.

در مدل اوپلر فضای اشغال شده توسط هر فاز با فراسنجه‌ای به نام کسر حجمی^۲ نشان داده می‌شود. برای هر یک از فازها معادله‌های بقا و مومنتوم به طور جداگانه تعریف می‌شود. شکل ۵ کسرهای حجمی جریان دوفازی را نشان می‌دهد.

۲-۱-۳- مدل آزمایشگاهی فیشر

این مدل شامل بخشی از یک تنداب به طول ۶ متر و عرض ۰/۳ متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک، هیدرولوژی و یخبندان شناسی^۳ زوریخ سوئیس می‌باشد. دیواره‌ی راست مدل از جنس شیشه بوده و دیگر قسمت‌های آن از PVC ساخته شده است. شیب کف آبراهه را می‌توان بین ۱۲ تا ۵۰ درجه نسبت به افق تنظیم کرد. بیشینه عمق ورودی جریان ۱۲ سانتی‌متر و دبی ۱۸۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد که

³ VAW

¹ Eulerian

² Volume Fraction

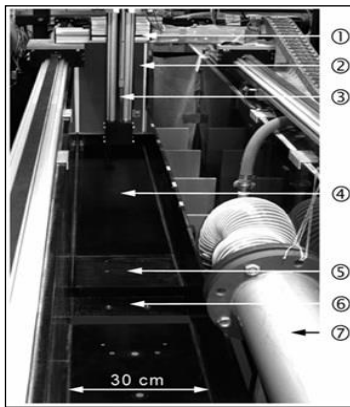


Fig. 6 Pfister experimental model 1) Auto Positioning System 2) Jet box 3) Base sighting 4) Approximate flow area 5) Ramp 6) Step 7) Air supply duct (Pfister, 2007)

شکل ۶ مدل آزمایشگاهی فیشر (۱ سیستم خودکار

موقعیتیابی، ۲) جعبه فوران، ۳) پایه نشانه روی، ۴) ناحیه

جریان تقرب، ۵) شیب راهه، ۶) پله ۷) مجرای تأمین هوا

(Pfister, 2007)

در خروجی برای استفاده در ورودی مدل اصلی به کار گرفته شد. با توجه به راهنمای نرم افزار، از شرط مرزی فشار ورودی^۲ (فشار اتمسفر یا هوا سپهر) برای مدل کردن مرزهای آزاد شامل خروجی جریان، ورودی هواده و مرز بالایی شبکه محاسباتی استفاده شد. از شرط مرزی دیوار^۳ برای تعریف بستر و اعمال زبری برابر با مدل آزمایشگاهی ۰/۰۰۰۲ میلی متر برای جداره ها استفاده شد.

۴- استقلال شبکه

در این تحقیق دو نوع مش ساختاریافته و بی ساختار امتحان شد و با توجه به این موضوع که در اندازه ی یکسان شبکه برای دو نوع مش بالا، شمار مش های ساختاریافته بسیار کمتر از شمار مش های بی ساختار می باشد، استفاده از شبکه بندی ساختاریافته مورد توجه قرار گرفت، در ضمن برای مش های مثلثی با شمار سلول های ۳۰۰۰۰۰ حجم های کسری پایین دست هواده نشان دهنده ی نامناسب بودن شمار و ابعاد سلول ها می باشد، لذا تعداد سلول های ۶۰۰۰۰۰ نیز امتحان شد که در این تعداد سلول، جریان آب پایین دست هواده تا حدی قابل رؤیت می باشد. اما

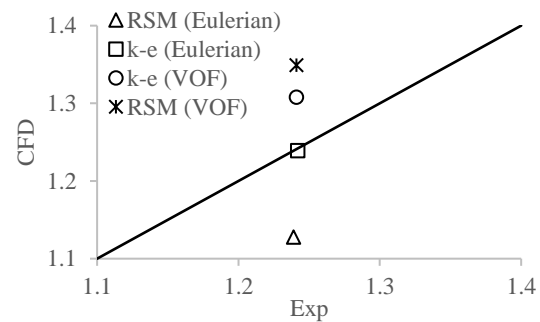


Fig. 4 Dispersion diagrams of the results of VOF and Eulerian models in RSM and k-ε modes for jump length for 50 degree slope

شکل ۴ نمودار پراکندگی نتایج مدل های VOF و Eulerian در حالت های RSM و k-ε برای طول پرش با شیب تنداب ۵۰ درجه

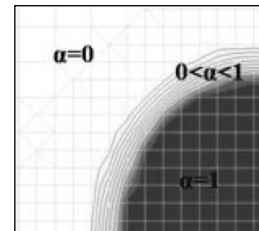


Fig. 5 Display of biphasic flow volume fractions (FLUENT Inc)

شکل ۵ نمایش کسرهای حجمی جریان دوفازی

توسط جعبه فوران (جت باکس) تولید می شود. همچنین زبری معادل آبراهه ۰/۰۰۰۲ میلی متر بوده و هواده در فاصله ی ۲ متری از ابتدای آبراهه قرار دارد. شکل ۶ این مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد.

هوا از طریق مجرای جانبی به زیر تیغه جریان وارد شده و شرایط فشار حدود صفر برای حفره ایجاد شده زیر فواره فراهم شده است.

۳-۱- شرایط مرزی

توزیع همه متغیرهای جریان نیازمند تعریف آن ها در مرزهای ورودی است. به این منظور با توجه به استفاده از جعبه فوران در مدل آزمایشگاهی برای ایجاد شرایطی همانند با آنچه که در نمونه اصلی رخ می دهد، از شرط سرعت^۱ به عنوان شرط مرزی ورودی استفاده شد و با مدل کردن آبراهه ای به طول ۲ متر، نیمرخ جریان توسعه یافته

³ Wall

¹ Velocity inlet

² Pressure inlet

نتایج طول پرش آزمایشگاهی را نشان نمی‌دهد، لذا مش‌های ساختاریافته با ابعاد سلول‌های به ترتیب ۰/۷، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر و شمار حدود ۱۲۶۸۰۰۰، ۶۳۰۰۰۰ و ۱۸۳۰۰۰ انجام شد. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ این موضوع را نشان می‌دهد.

نتایج طول پرش آزمایشگاهی را نشان نمی‌دهد، لذا مش‌های ساختاریافته با ابعاد سلول‌های به ترتیب ۰/۷، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر و شمار حدود ۱۲۶۸۰۰۰، ۶۳۰۰۰۰ و ۱۸۳۰۰۰ انجام شد. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ این موضوع را نشان می‌دهد.

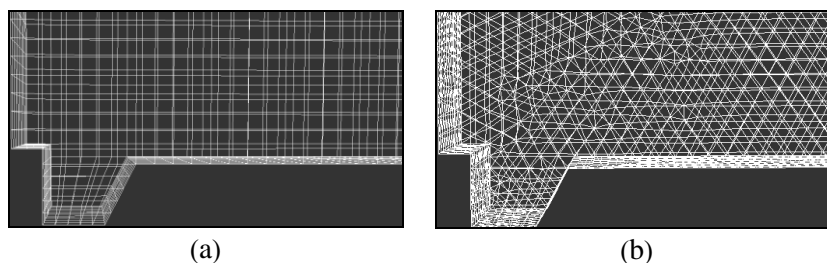


Fig. 7 Grid view (a) Structured (b) Unstructured used

شکل ۷ نمایش شبکه‌بندی‌های (a) ساختاریافته، (b) بی‌ساخت مورد استفاده

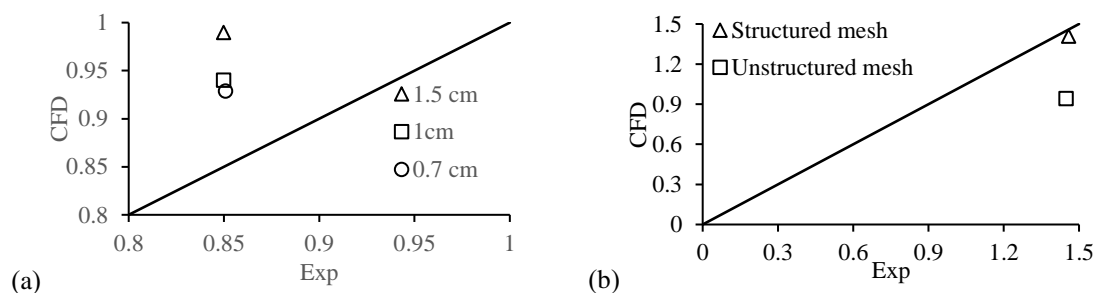


Fig. 8 (a) Sensitivity to different cell dimensions (Structured grid) (b) Structured and unstructured grid sensitivity

شکل ۸ (a) حساسیت‌سنجی ابعاد مختلف سلول‌ها (b) حساسیت‌سنجی شبکه ساختاریافته و بی‌ساخت طول پرش

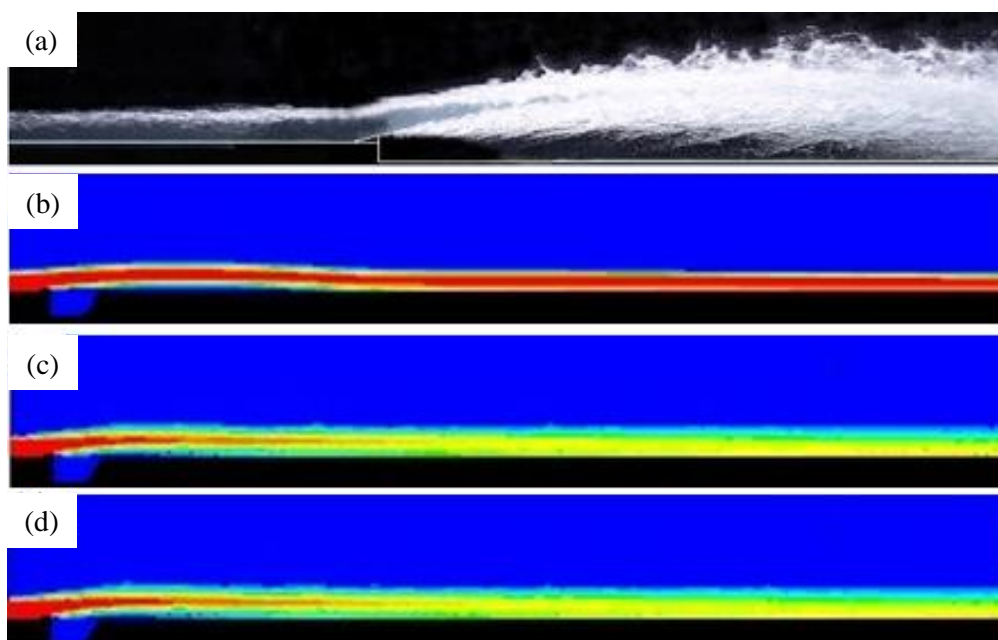


Fig. 9 Representation of volume fractions (a) Laboratory model (pfisher) (b) Structured mesh with dimensions of 1cm (c) unstructured grid with cell number 600000 (d) unstructured grid with cell number 300,000

شکل ۹ نمایش کسرهای حجمی (a) مدل آزمایشگاهی (فیشر) (b) مش ساختاریافته به ابعاد ۱cm (c) مش بی‌ساخت با شمار سلول ۶۰۰۰۰۰ (d) مش بی‌ساخت با شمار ۳۰۰۰۰۰ سلول

و طراحی فراسنجه‌های هندسی پایین‌دست هواده سودمند می‌باشد؛ مانند تعیین عرض آبراهه عرضی توزیع هوا که با توجه به شیب تنداب، طول پرش فواره جریان و طول جریان برگشتی تعیین می‌شود. فراسنجه‌های هندسی هواده و جریان عبوری شامل زاویه شیب‌راهه ϕ ، شیب تنداب α ، ارتفاع شیب‌راهه t_r ، ارتفاع پله t_s و عدد فرود جریان Fr در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در جدول ۱ ویژگی‌های جریان و فراسنجه‌های هندسی هواده‌های مدل شده ارائه شده است.

در این تحقیق برای صحت‌سنجی از نتایج مدل آزمایشگاهی (2007) Pfister بهره گرفته و ملاک صحت‌سنجی، طول فواره جریان عبوری از روی هواده در نظر گرفته شده است. برای این منظور فراسنجه‌های تأثیرگذار بر طول پرش فواره جریان شامل شیب‌راهه با زاویه‌های $5/7$ ، $8/1$ و $11/3$ درجه، پله با ارتفاع‌های 23 ، 25 ، 44 ، 45 و 100 میلی‌متر، ترکیبی از شیب‌راهه و پله، اعداد فرود مختلف در محدوده‌ی $5/8$ تا $10/4$ ، ارتفاع‌های مختلف شیب‌راهه شامل 0 ، $6/7$ ، $13/3$ ، $26/7$ میلی‌متر و شیب‌های تنداب 12 ، 30 و 50 درجه بررسی شده‌اند. برآورد مناسب طول پرش در تعیین

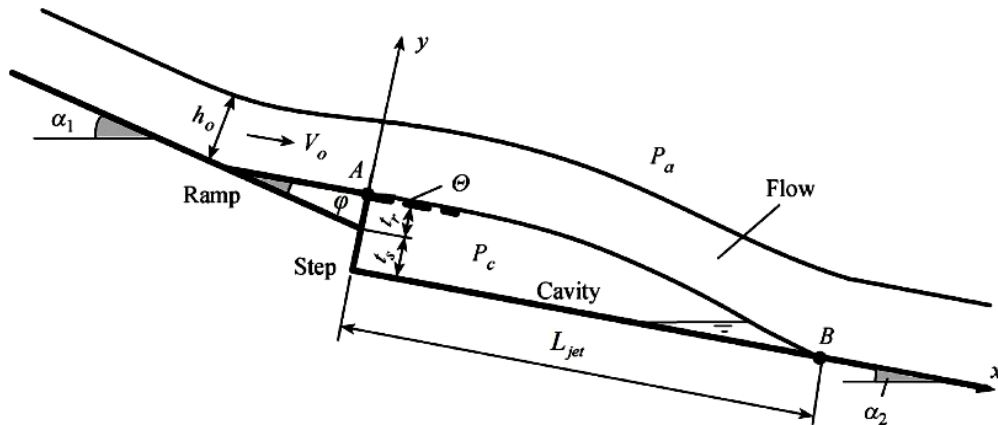


Fig. 10 Geometrical parameters of aeration and flow
شکل ۱۰ فراسنجه‌های هندسی هواده و جریان عبوری از آن

جدول ۱ مشخصات جریان و فراسنجه‌های هندسی هواده‌های مدل شده

Table 1 Flow characteristics and geometric parameters of the modeled aeration

Row	(α) Channel slope (Degree)	(t_s) Stair height (mm)	(t_r) Ramp height (mm)	(ϕ) Ramp slope (mm)	(h_0) Initial flow height (mm)	(Fr) Froude number
1	12	0	0	0	40	6.1
2	30	23	6.7	5.7	48	6.2
3	50	25	13.3	8.1	60	6.6
4	--	44	26.7	11.3	65	7.3
5	--	45	--	--	66	7.5
6	--	100	--	--	67	8.8
7	--	--	--	--	80	9.2
8	--	--	--	--	86	9.5
9	--	--	--	--	94	10.3

بین نقطه‌ی انتهایی هواده تا محل بیشینه فشار در نقطه‌ی برخورد فواره جریان، طول پرش در نظر گرفته شده است

شکل ۱۱ نشان‌دهنده نتایج طول پرش بی‌بعد شده‌ی فواره جریان عددی نسبت به آزمایشگاهی است که در آن فاصله‌ی

Kramer et al. (2006) اغلب شامل غلظت هوای ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد در ناحیه‌ی بالایی جریان می‌باشد. اغلب غلظت هوای ۹۰ درصد در تعیین سطح آب استفاده می‌شود. شکل ۱۲ مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نیمرخ سطح آب را در این سه غلظت نمایش می‌دهد.

(Arantes et al., 2010). سازگاری بسیار بالای میزان‌های عددی و آزمایشگاهی بیانگر انتخاب مناسب مدل‌های چندفازی، آشفتگی و همچنین اندازه‌ی شبکه‌ی محاسباتی می‌باشد. تعیین سطح آزاد جریان دوفازی آب و هوا دشوار می‌باشد و اغلب در تعیین سطح آب میزان‌های متفاوتی از غلظت هوا استفاده می‌شود که بر مبنای بررسی‌های

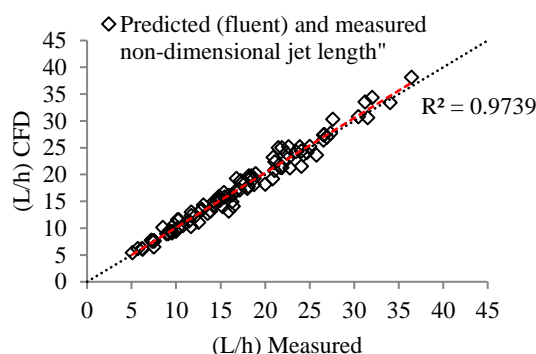


Fig. 11 Dimensionless numerical jump length versus the laboratory jump length

شکل ۱۱ طول پرش بی‌بعد شده‌ی عددی در مقابل طول پرش آزمایشگاهی

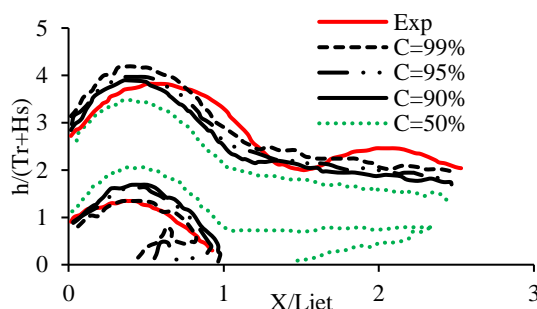


Fig. 12 Comparison of water surface profiles at C=90, 95, 99% numerically and laboratory values

شکل ۱۲ مقایسه‌ی پروفیل سطح آب در غلظت‌های C=90, 95, 99% عددی و مقادیر آزمایشگاه

جلوگیری از آسیب‌های حفره‌زایی حایز اهمیت می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بسیار اندک بوده و می‌توان به آزمایشات انجام شده توسط Kramer (2004) و Pfister (2007) اشاره کرد. لذا در این بخش به بررسی عددی تغییرپذیری‌های غلظت هوا در طول تنداب و همچنین عمق آن در ناحیه‌ی جریان یکنواخت پرداخته می‌شود.

با توجه به روابط (۶) و (۷)، چنانچه رابطه‌ی تغییرپذیری غلظت هوای بستر به فرم رابطه‌ی (۱۱) نوشته شود، می‌توان تغییرپذیری غلظت هوای بستر را نسبت به فراسنجه‌های مؤثر در آن، بررسی کرد.

۵- نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با تعیین روند تغییرپذیری غلظت هوای بستر می‌توان فاصله‌ی بین دو هواده را تعیین کرد. هوای موجود در جریان موجب تراکم‌پذیری جریان شده و سبب میرایی ضربات ناشی از انفجار و ترکیدن حباب‌ها می‌شود و در نتیجه خسارات ناشی از حفره‌زایی را کاهش می‌دهد؛ از طرفی چنانچه بیش از میزان لازم برای جلوگیری از حفره‌زایی، هوا وارد جریان شود باعث حجیم شدن جریان شده و می‌بایست دیواره‌های بلندتری برای تنداب در نظر گرفت که به لحاظ اقتصادی مناسب نمی‌باشد. از این‌رو تعیین حداقل غلظت هوای مورد نیاز برای

تأثیر گذار عدد فرود جریان، شیب شیب‌راهه، ارتفاع اولیه جریان، ارتفاع پله و ارتفاع شیب‌راهه بر ضریب m پرداخته می‌شود.

$$C_b = C_{(x/L_{jet}-1)} \times e^{-m((x/L_{jet})-1)} \quad (11)$$

که در آن $C_{x/L_{jet}-1}$ غلظت هوای بستر در محل برخورد فواره جریان به کف تنداب و m ضریبی است که حساسیت‌سنجی برای آن انجام می‌شود. در ادامه به بررسی فراسنجه‌های

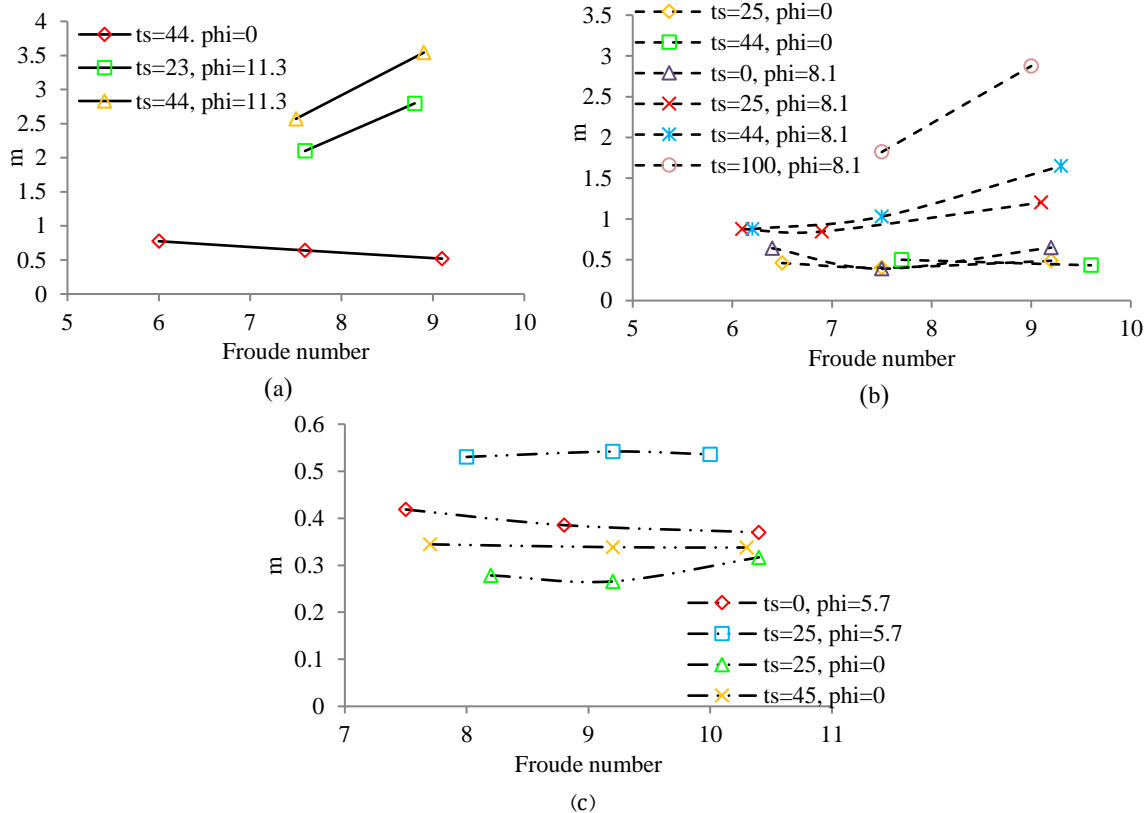


Fig. 13 Slope of the gradient of air outflow as a function of Froude number and the slope of the chute (a) 12, (b) 30, (c) 50 degree

شکل ۱۳ گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از عدد فرود، شیب تنداب (a) ۱۲، (b) ۳۰، (c) ۵۰ درجه

توزیع بهتر هوا در آبراهه در نتیجه افزایش ارتفاع آن دانست. همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است به طور کلی با افزایش شیب شیب‌راهه، گرادیان خروج هوا افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش ارتفاع پله گرادیان خروج هوا افزایش بیشتری پیدا می‌کند.

شکل ۱۵ روند ویژه‌ای را برای گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از ارتفاع اولیه‌ی جریان نشان نمی‌دهد که با توجه به یکسان انتخاب شدن شرایط جریان و فراسنجه‌های هندسی هوا در هر یک از نمودارها، افزایش تماس لایه‌های بالایی و پایینی جریان به ازای افزایش طول پرش جریان عامل غالب می‌باشد.

همان‌طور که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، برای هواده پله (هواده‌ی است که شیب شیب‌راهه صفر درجه و پله‌ای می‌باشد) ($\phi = \phi = 0$) با افزایش عدد فرود، خروج هوا از جریان کاهش می‌یابد. این مورد برای هواده‌های شامل شیب‌راهه ($\phi = \phi = 0$) روندی معکوس دارد. فراسنجه بسیار تأثیرگذار در تعیین گرادیان خروج هوا از جریان، شیب تنداب (S) می‌باشد. لذا مشاهده می‌شود برای هواده‌ها، با افزایش شیب تنداب، تغییرپذیری میزان m با عدد فرود رشد کمتری را نشان می‌دهد. علت این امر افزایش هواگیری سطحی به ازای افزایش شیب تنداب باشد. همچنین مشاهده می‌شود که رشد میزان‌های m با افزایش ارتفاع پله سرعت می‌یابد. این موضوع را می‌توان مربوط به

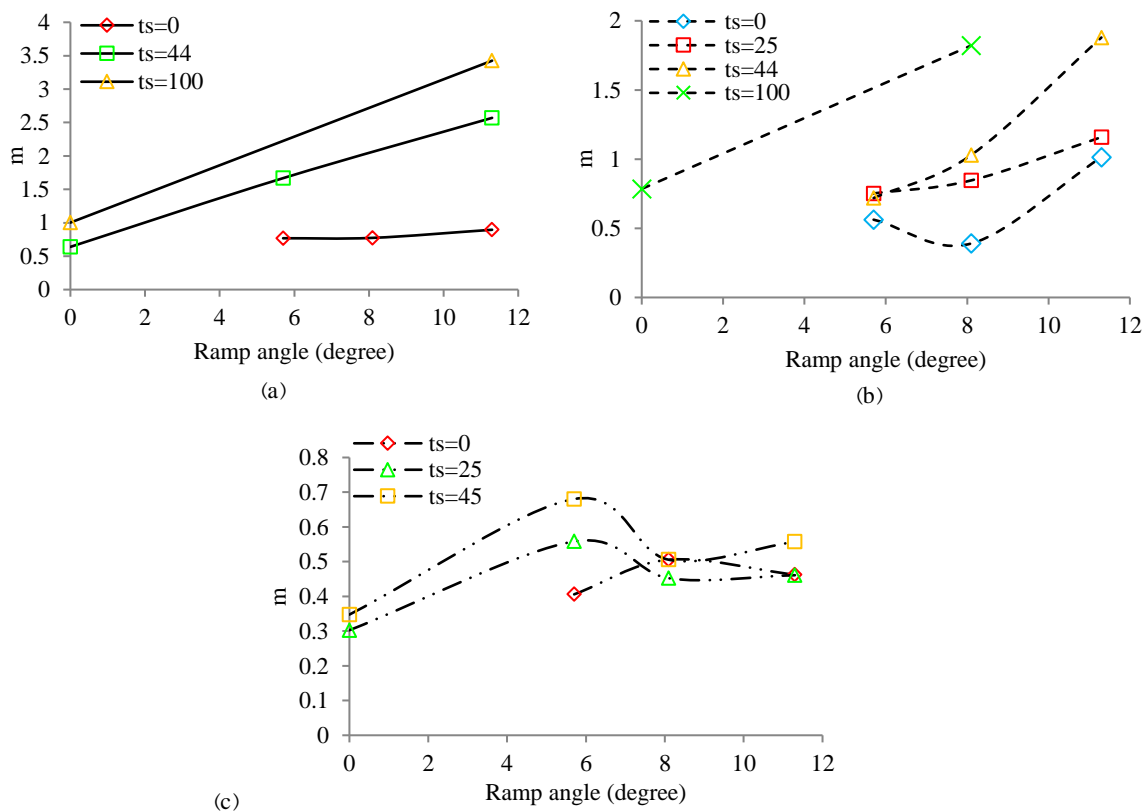


Fig. 14 Gradient of air outflow as a function of the slope of the ramp and the chute (a) 12, (b) 30, (c) 50 degree
 شکل ۱۴ گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از شیب شیب‌راهه، شیب تنداب (a) ۱۲، (b) ۳۰، (c) ۵۰ درجه

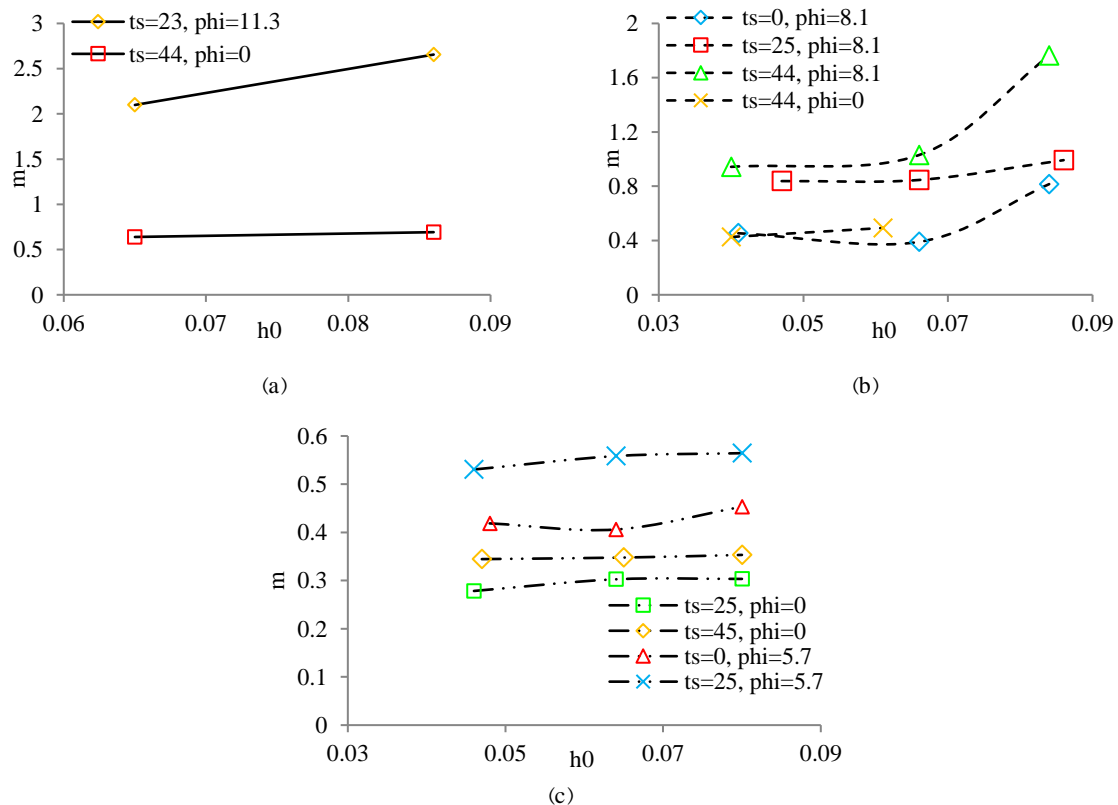


Fig. 15 Slope of the gradient of air outflow as a function of the initial flow height and the slope of the chute (a) 12, (b) 30, (c) 50 degree

شکل ۱۵ گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از ارتفاع اولیه جریان، شیب تنداب (a) ۱۲، (b) ۳۰، (c) ۵۰ درجه

شده از جریان متناسب با هوای وارد شده به آن می‌باشد. شکل ۱۶-۱ اهمیت عامل‌های هندسی تشکیل دهنده‌ی زیر فواره جریان را نشان می‌دهد. هر چه فضای بیشتری زیر فواره جریان تأمین شود، توزیع هوا در این ناحیه بهتر شده و شرایط بهتری را برای هواده فراهم می‌آورد.

شکل ۱۶ افزایش رشد خروج هوا را به ازای افزایش ارتفاع پله نشان می‌دهد. بایستی به این نکته توجه داشت که افزایش ارتفاع پله موجب افزایش طول پرش جریان شده و هوای بیشتری به جریان وارد می‌شود و همچنین رشد خروج هوا از جریان نیز بیشتر می‌شود. در واقع شدت هوای بیرون

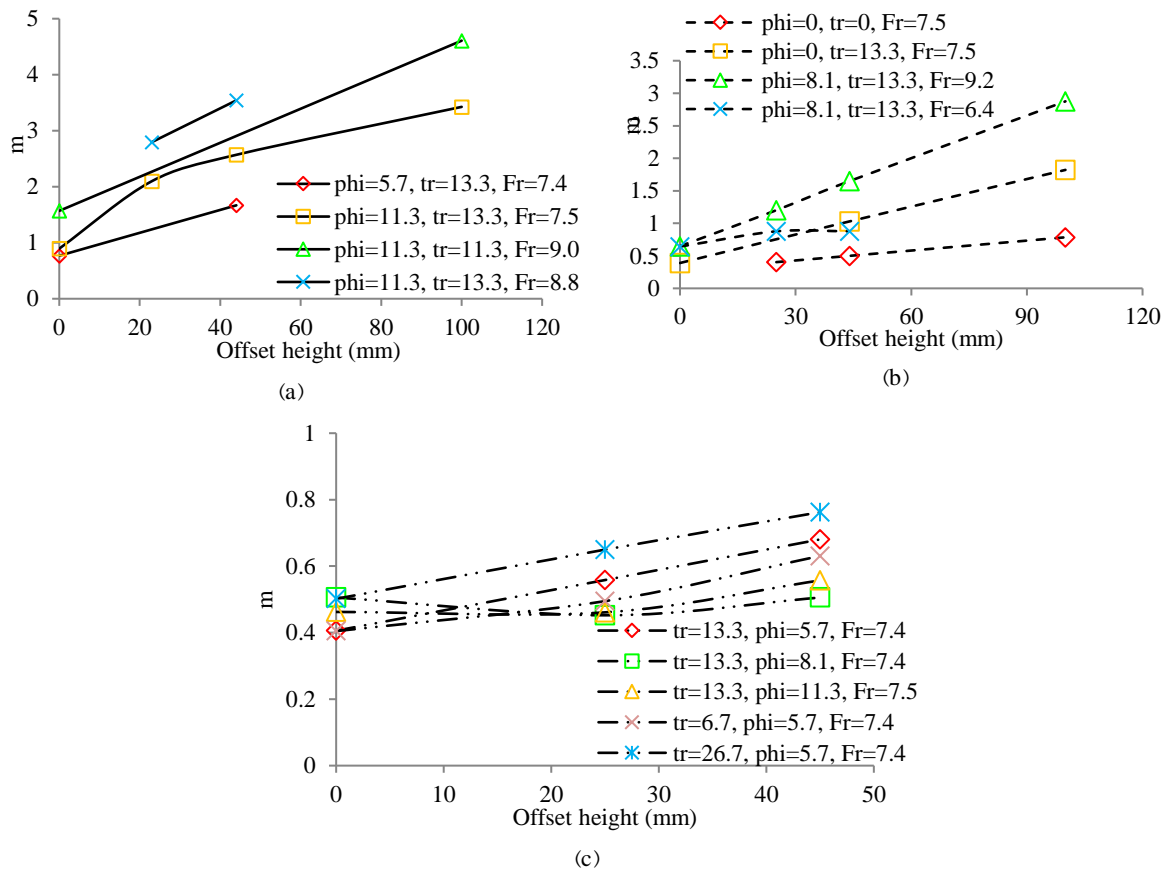


Fig. 16 Slope of the gradient of air outflow as a function of the step height and the slope of the chute (a) 12, (b) 30, (c) 50 degree

شکل ۱۶ گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از ارتفاع پله، شیب تنداب (a) ۱۲، (b) ۳۰، (c) ۵۰ درجه

هوای پایینی اولیه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر هواگیری سطحی نیز افزایش یافته و در حالت کلی هوای بیشتری در جریان حضور خواهد داشت، لذا در تنداب‌های تند خطر حفره‌زایی و آسیب‌های ناشی از آن کمتر می‌باشد. لازم به یادآوری است آنچه در طول پرش و یا غلظت هوای جریان مؤثر می‌باشد مربوط به پایین دست هواده بوده و اثرگذاری عامل‌های بالادست هواده در V_0 یا به عبارتی عدد فرود جریان نمود پیدا می‌کند.

شکل ۱۷ نیز افزایش گرادیان خروج هوا را به ازای افزایش ارتفاع شیب‌راه نشان می‌دهد. به طور کلی هر عاملی که باعث افزایش ارتفاع حفره‌ی ایجاد شده زیر فواره جریان شود، موجب ایجاد فضا یا مجرا بزرگتر و در نتیجه باعث ورود هوای بیشتر به سطح سرریز می‌شود.

غلظت اولیه‌ی هوا در معادله‌ی (۱۱) در محل برخورد فواره جریان به بستر تنداب $C_b(x/L_{jet-1})$ نیز تابعی از شیب تنداب می‌باشد که در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان‌طور که شکل ۱۸ نشان می‌دهد با افزایش شیب تنداب غلظت

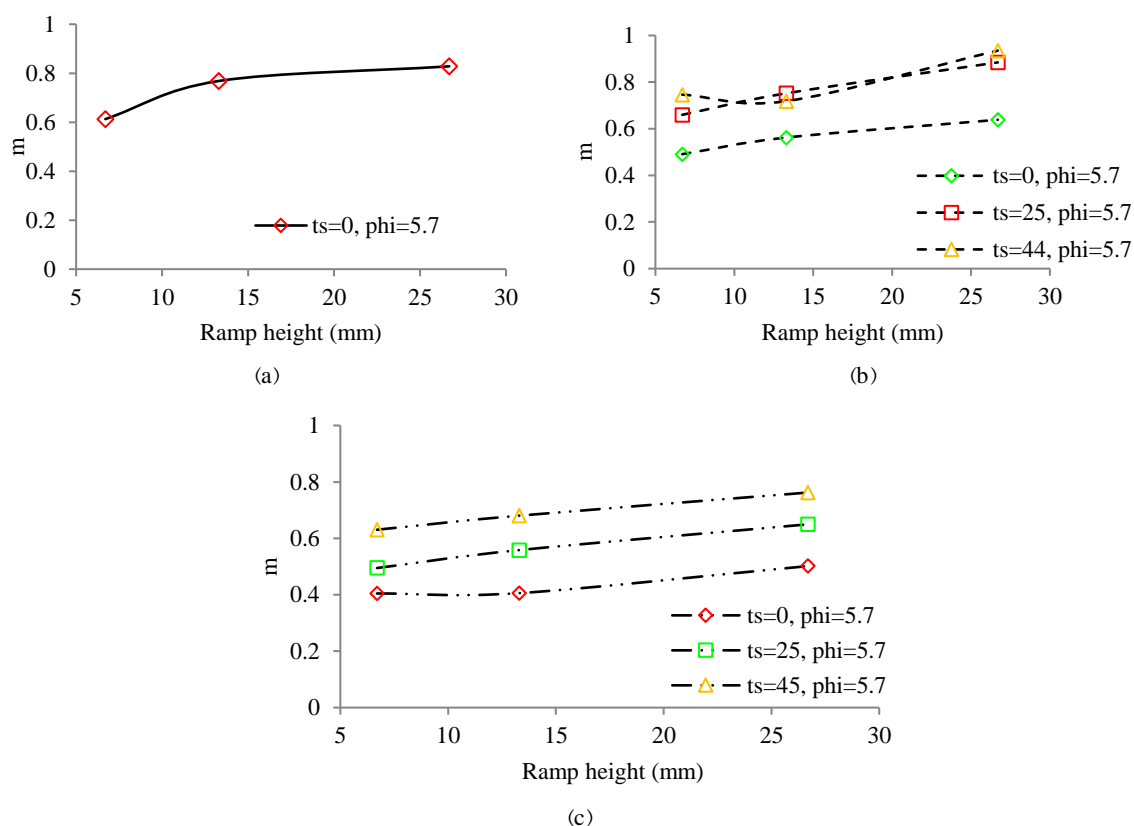


Fig. 17 Slope of the gradient of air outflow as a function of the ramp height and the slope of the chute (a) 12, (b) 30, (c) 50 degree

شکل ۱۷ گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از ارتفاع شیب‌راهه، شیب تنداب (a) ۱۲، (b) ۳۰، (c) ۵۰ درجه

هوا استفاده کرد. با افزایش شیب تنداب ورود هوا به جریان افزایش یافته و همچنین تغییرپذیری غلظت هوا کاهش می‌یابد، لذا نیاز به حضور هواده کمتر می‌شود. در این تحقیق طول پرش فواره جریان عبوری از هواده‌ها برای ۹۳ مدل، شبیه‌سازی شده است. همچنین غلظت هوای بستر در طول تنداب و غلظت هوا در عمق جریان در ناحیه جریان یکنواخت پایین‌دست نقطه‌ی برخورد فواره با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به کمک نرم‌افزار FLUENT مدل شده است که می‌تواند در تعیین فاصله‌ی هواده‌ها استفاده شود.

با تعیین طول پرش فواره جریان، می‌توان با استفاده از رابطه‌های ارائه شده توسط نویسندگان میزان هوای وارد شده به جریان و تغییرپذیری‌های غلظت هوای پایینی را بررسی کرد و در پی آن فاصله مناسب بین دو هواده را تعیین کرد. در ادامه به نتایج به دست آمده از این بررسی اشاره خواهد شد.

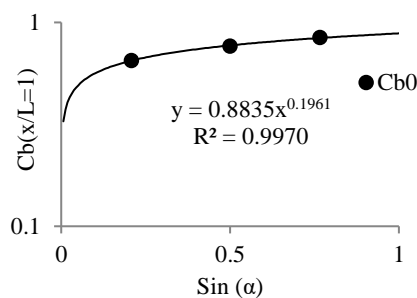


Fig. 18 The initial concentration of air at the location of the jet stream hits the bed of the canal as a function of the slope of the Chute

شکل ۱۸ غلظت اولیه‌ی هوا در محل برخورد فواره جریان به بستر آبراهه به عنوان تابعی از شیب تنداب

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در کنار مدل‌های فیزیکی راهکاری مناسب برای کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان می‌باشد. با توجه به دقت بالای این روش در تعیین طول پرش فواره جریان می‌توان از نتایج آن در تعیین فراسنجه‌های هندسی هواده‌ها مانند عرض مجرای توزیع

F_q	نیروی حجمی بیرونی	موقعیت نخستین هواده، نقطه‌ی آغازین حفره‌زایی می‌باشد
F_r	عدد فرود	و فاصله‌ی هواده دوم به عامل‌های زیر بستگی دارد:
$F_{vm,q}$	نیروی جرم مجازی	۱- میزان هوای بیرون شده از جریان پایین‌دست هواده‌ی اول
h_{99}	حد بالایی سطح آب	۲- هواگیری طبیعی جریان از سطح آزاد
$k-\varepsilon$ (RNG)	مدل آشفتگی	اغلب هوای وارد شده از سطح جریان به بستر تنداب نمی‌رسد و نیاز است که نخستین هواده با توجه به شرایط پستی و بلندی‌ها و شاخص حفره‌زایی در مکان مناسب تعبیه شود. بنابراین مکان هواده دوم را می‌توان با توجه به غلظت هوای کمینه مورد نیاز و طول فواره جریان برای ارتفاع و عدد فرود بالادست هواده اول تعیین کرد. به طور کلی نتایج نشان داد که غلظت هوای بستر پایین‌دست هواده‌ها با افزایش عدد فرود، ارتفاع شیب‌راهه، ارتفاع پله و زاویه شیب‌راهه افزایش و با افزایش ارتفاع آب بالادست هواده، کاهش می‌یابد.
L	فاصله مایل پایین‌دست از هواده	با تعیین روند تغییرپذیری‌های غلظت هوای بستر می‌توان فاصله‌ی بین دو هواده را تعیین کرد. هوای موجود در جریان موجب تراکم‌پذیری جریان شده و سبب میرایی ضربه‌های ناشی از انفجار و ترکیدن حباب‌ها می‌شود و در نتیجه آسب و زیان‌های ناشی از حفره‌زایی را کاهش می‌دهد؛ از سوی دیگر چنانچه بیش از میزان لازم برای جلوگیری از حفره‌زایی، هوا وارد جریان شود باعث حجیم شدن جریان شده و می‌بایست دیواره‌های بلندتری برای تنداب در نظر گرفت که به لحاظ اقتصادی مناسب نمی‌باشد. از این‌رو تعیین کمینه غلظت هوای مورد نیاز برای جلوگیری از آسیب‌های حفره‌زایی دارای اهمیت می‌باشد.
m	ضریب	تعیین چگونگی تغییرپذیری‌های غلظت هوا در پایین‌دست هواده تنداب برای محاسبه‌ی فاصله‌ی هواده‌ها از یکدیگر دارای اهمیت می‌باشد و FLUENT روند این تغییرپذیری‌ها را به خوبی مدل می‌کند.
m_{pq}	مشخصه جرم انتقال یافته از p به q	
m_{qp}	مشخصه جرم انتقال یافته از q به p	
P	سهام فشار هر فاز	
R_{pq}	نیروی اندرکنش بین فازها	
$S_{\theta}=\tan\alpha$	شیب تنداب	
t_r	ارتفاع شیب‌راهه	
t_s	ارتفاع پله	
V_{pg}	سرعت فاز میانی	
V_q	سرعت فاز q	
X	فاصله بی‌بعد در برای طول آبراهه	
α	زاویه تنداب	
τ_q	آرایه تنش-کرنش فاز q ام	
μ_q	گرانروی برشی فاز q ام	
λ_q	گرانروی حجمی فاز q ام	
$\ddot{\Gamma}$	آرایه شناسایی	
ϕ	زاویه شیب‌راهه	

۸- منبع‌ها

Arantes, E.J., Porto, P.M., Gulliver, J.S., Lima, A.C.M. and Schulz, H.E. (2010). Lower Nappe Aeration in Smooth Channels: Experimental Data and Numerical Simulation. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 82(2), 521-537.

Aydin, M.C. and Ozturk, M. (2009). Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators. *Can. J. Civ. Eng.*, 36(5), 826-838.

Aydin, M.C., Isik, E. and Ulu, A.E. (2020). Numerical modeling of spillway aerators in high-head dams. *Applied Water Science* 10, 42. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1126-2>.

Azhdary Moghadam, M. and Nakhaei Zeinali, E. (2017). Numerical investigation of the flow characteristics of aerated overflow after shooting. 16th Iranian Hydraulic Conference, Ardabil, Iran. (in Persian).

۷- فهرست نشانه‌ها

C	غلظت هوا
C_b	غلظت هوای پایینی
\hat{C}_{99u}	غلظت هوای میانگین یکنواخت
C_x	غلظت هوای میانگین در فاصله x از لبه
$F_{liff,q}$	نیروی لیفت

- Memorandum Report, Water Resources Research Laboratory, Water Resources Services, Denver Technical Centre, Bureau of Reclamation, US Department of Interiors, Denver, Colorado.
- Ho, D.K.H., Boyes, K.M. and Donohoo, S.M. (2001). Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by Computational Fluid Dynamics technique. 14th Australian Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia.
- Kjellesvig, H.M. (1996). Numerical modeling of flow over a spillway, Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, 697–702.
- Kramer, K. (2004). Development of Aerated Chute Flow, PHD Thesis, Mitteilungen 183, Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen, Technischen Hochschule Zürich.
- Kramer, K., Hager, W.H. and Minor, H-E. (2006). Development of Air Concentration on Chute Spillways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(9), 908-915.
- Ozturk M., Aydin M.C. and Aydin S. (2008). Damage limitation – A new spillway aerator. Int. Water Power Dam Constr., 6(June), 36–40.
- Ozturk, M. and Aydin, M.C. (2009). Verification of a 3D numerical model for spillway aerator. Math. Comput. App., 14(1), 21–30.
- Pfister, M.U. (2007). Schussrinnenbelüfter, Lufttransport Ausgelöst Durch Interne Abflussstruktur, PHD Thesis, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich.
- Savage, B. and Johnson, M. (2001). Flow over Ogee spillway: physical and numerical model case study. J. Hydraul. Eng., 127(8), 640–649.
- Tokay, T. and Kurt, C. (2019). Application of VOF and k-ε turbulence model in simulation of flow over a bottom aerated ramp and step structure. Water SA, 45(2), <https://doi.org/10.4314/wsa.v45i2.15>.
- Yang, J., Teng, P. and Zhang, H. (2019). Experiments and CFD modeling of high-velocity two-phase flows in a large chute aerator facility. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 13(1), 48-66, DOI: 10.1080/19942060.2018.1552201.
- Bhajantri, M.R. (2007). Numerical investigations on hydrodynamic characteristics of spillway flows, PhD thesis, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai.
- Blake, L.S. (1989). Civil Engineer's Reference Book. Fourth Edition. Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Bruce, M.S. and Johnson, M.C. (2001). Flow over Ogee spillway: physical and numerical model case study. J. Hydraul. Eng., 127(8), 640–649.
- Burgisser, M.F. and Rutschmann, P. (1999). Numerical solution of viscous 2D free surface flows: flow over spillway crest. Proc. 28th IAHR Congress, Technical University, Graz, Austria.
- Cederstrom, M., Hammar, L., Johansson, N. and Yang, J. (2000). Modelling of spillway discharge capacity with computational fluid dynamics (CFD). Proceedings of 20th International Congress, ICOLD, Beijing, China.
- Channel, P.G. and Doering, J.C. (2007). An evaluation of computational fluid dynamics for spillway modeling. 16th Australian Fluid Mechanics Congress, Gold Coast, Australia.
- Chanson, H. (1993). Self-Aerated Flows on Chutes and Spillways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(2), 220-243.
- Ehrenberger, R. (1926). Wasserbewegung in steilen Rinnen (Schußtinnen) mit bes. Berücks. d. Selbstbelüftung. Hydrograph. Zentralbureau im Bundesminist. f. Land- u. Forstwirtschaft.
- Falvey, H.T. (1990) Cavitation in Chutes and Spillways, Engineering Monograph No.42, Bureau of Reclamation, Denver Office, Colorado.
- FLUENT Inc. (2006). User's Guide, version 6.3.
- Gessler D. (2005). CFD modeling of spillway performance. Proceedings of the 2005 World Water and Environmental Resources Congress, R. Walton, ed., Anchorage.
- Hager, W.H. (2006). Uniform Aerated Chute Flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(4) 528-533.
- Higgs J.A. (1997). Folsom dam spillway vortices computational fluid dynamics model studies.