

یادداشت تحقیقاتی

توسعه رابطه‌ای جهت تعیین فاصله بین هواده اول و دوم سرریز شوت بر اساس غلظت هوای مینیمم (مطالعه موردی سد آزاد کردستان)

احسان جعفری ندوشن^{۱*}، مسعود آرامی فدافن^۲، مهدی اژدری مقدم^۳

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

۲- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

*e. jafari@iaubijar.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۲۵

چکیده

افزایش روز افزون جمعیت به همراه تقاضای بیشتر برای آب در بخش‌های کشاورزی و نیرو، رشد سریع ساخت سدها را به همراه داشته است. در این میان افزایش ارتفاع سدها به منظور افزایش ذخیره مخزن و برآورد نیاز آب، موجب افزایش سرعت آب روی سرریزها می‌گردد که به دنبال آن نیاز به بررسی کاویتاسیون و راهکارهای مقابله و یا کاهش خسارات آن اجتناب ناپذیر می‌باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته در دهه‌های اخیر ساده‌ترین، اقتصادی‌ترین و مؤثرترین راهکار جهت کاهش و جلوگیری از این آسیب‌ها، تعبیه‌ی هواده‌ها در مکان‌های مناسب و وارد نمودن هوا به جریان می‌باشد. لذا در این تحقیق با استفاده از ۱۲۰۰ داده تجربی حاصل از ۹۰ آزمایش صورت گرفته توسط Pfister (2007) رابطه‌ای جهت تعیین روند خروج هوا از جریان تحت شرایط فشار حفزهای صفر و ضریب همبستگی بیش از ۰/۸۴ به عنوان تابعی از طول بی‌بعد شده‌ی جت جریان با استفاده از تحلیل رگرسیونی ارایه شده است که با توجه به سادگی با دقت مناسب می‌تواند در تعیین فاصله بین هواده‌ها بر اساس حداقل میزان غلظت هوای بستر مورد استفاده قرار گیرد. نتایج مطالعه حاضر با فواصل مربوط به هواده‌های سرریز سد آزاد بر اساس غلظت هوای بستر مینیمم مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: هواده، سرریز شوت، آسیب‌های کاویتاسیون، غلظت هوای بستر

۱. مقدمه

کاویتاسیون در ماشین‌های هیدرولیکی و سازه‌های هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. فشارهای کم همراه با سرعت‌های بالا معمولاً در طول مرزهای سازه‌های هیدرولیکی مانند شوت‌ها، سرریزها و تخلیه‌کننده‌های تحتانی اتفاق می‌افتد [3]. زمانی که فشار آب پایین‌دست ناحیه تشکیل کاویتاسیون افزایش می‌یابد، حباب‌های بخار از داخل منفجر می‌شود. انفجارها در فرکانس‌های بالا رخ داده و فشارهای کاویتاسیون به بزرگی (Mpa) ۱۵۰۰ ثبت شده

کاویتاسیون یا خلأزایی به فرایند شکل‌گیری حفره یا فضای خالی موضعی در یک مایع به دلیل کاهش فشار تا زیر فشار بخار گفته می‌شود [1]. فرایند اساسی کاویتاسیون، رشد ناگهانی حباب‌های بخار می‌باشد. بزرگ شدن حباب‌ها می‌تواند در اثر کاهش فشار، افزایش دما و یا ترکیبی از این فرایندها باشد [2]. بیشترین وقایع

است [4]. زمانی که این انفجارها نزدیک مرزهای جامد اتفاق بیفتند، برای نمونه سطح بتن یک شوت، فشارهای آنی و لحظه‌ای از انفجارها به وجود می‌آید که می‌تواند منجر به شکست‌های ناشی از خستگی شده و در پی آن مقادیر کوچکی از مصالح سطح را جدا کند. جدا کردن پیوسته مصالح سطحی می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی برای سازه شود [5]. بیشتر آسیب‌های مشاهده شده ناشی از اعداد کاویتاسیون کوچک به همراه سرعت های بالای جریان و فشارهای کم است که می‌تواند مربوط به سطح تمام شده نامناسب بتن باشد [6]. راه‌های مختلفی برای محاسبه عدد کاویتاسیون بحرانی (σ_c) با در نظر گرفتن ارتفاع زبری، ارتفاع پله، پخی‌ها، ارتفاع معادل زبری ماسه، لایه مرزی آشفته و سرعت جریان پیشنهاد شده است.

را برای محاسبه σ_c ارایه کردند [3]:

$$\sigma_c = c \left(\frac{h_r}{\delta} \right)^m \left(\frac{\bar{u}\delta}{u\phi} \right)^n \quad (1)$$

که در آن δ ضخامت لایه مرزی، $\bar{u}$ سرعت متوسط جریان، h_r ارتفاع نامنظمی‌ها و m, c و n ضرایب ثابتی هستند که به شکل و نوع نامنظمی‌ها و ارتفاع آن‌ها بستگی دارند. u تغییرات سرعت آشفته‌گی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

Kells & Smith (1991) و Arndt (1977) رابطه کلی زیر

را برای محاسبه σ_c ارایه کردند [3]:

$$\sigma_c = c \left(\frac{h_r}{\delta} \right)^m \left(\frac{\bar{u}\delta}{u\phi} \right)^n \quad (1)$$

که در آن δ ضخامت لایه مرزی، $\bar{u}$ سرعت متوسط جریان، h_r ارتفاع نامنظمی‌ها و m, c و n ضرایب ثابتی هستند که به شکل و نوع نامنظمی‌ها و ارتفاع آن‌ها بستگی دارند. u تغییرات سرعت آشفته‌گی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$u\phi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (2)$$

بر اساس مشاهدات آسیب‌های کاویتاسیون، Falvey (1983) راهنمای عمومی طراحی را که تنها به عدد کاویتاسیون بحرانی بستگی دارد به صورت جدول زیر ارایه داد [7]:

جدول ۱. ضوابط طراحی برای پیشگیری از خسارات کاویتاسیون [7]

Design Considerations	Cavitation index σ
No need to protect against cavitation.	>1.8
The flow level can be protected by modifying the level (irregularity correction)	0.25-1.8
Design correction (for example, increasing the curvature of the boundaries)	0.17-0.25
Protecting by Air Galleries or Stairs	0.12-0.17
The surface can not be protected and requires a new design	<0.12

Table 1. Design Criteria for preventing cavitation damage [7]

پرداخته‌اند و به تأثیر مثبت غلظت هوا اشاره کردند [9].

Erfanain-Azmoudeh & Kamanbedast (2013) با نرم‌افزار Flow-3D روی محل نصب هواده در سرریز گتوند کار کردند که نتایج نشان داد نرم افزار توافق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد و چهار کانال هواده برای پیشگیری از خلأ‌زایی در سرریز گتوند کافی است [10].

Mahdavi Meymand & Ahadiyan (2015) به مقایسه روش‌های آماری، تجربی، شبکه عصبی و ترکیبی از فازی عصبی در برآورد هوای مورد نیاز هواده سرریز پرداختند و نتایج نشان داد که روش ترکیبی عصبی و فازی بهترین عملکرد را دارد [11].

در این پژوهش همان‌گونه که بیان شد رابطه‌ای برای تعیین روند خروج هوا از جریان تحت شرایط فشار حفره ای صفر به عنوان تابعی از طول بی‌بعد شده‌ی جت جریان با استفاده از تحلیل رگرسیونی ارائه شده است در انتها براساس رابطه غلظت مینیمم برای دبی‌های مختلف فاصله هواده‌نده اول و دوم برای سرریز سد آزاد تعیین شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سد مورد مطالعه

سد مخزنی آزاد در شمال غربی ایران در استان کردستان شهرستان مریوان در مسیر رودخانه چم گوره از سرشاخه‌های مهم رودخانه آزاد در فاصله ۸۱ کیلومتری از شهر سنندج قرار گرفته است. نوع سد سنگریزه‌ای با هسته نفوذناپذیر رسی است. تراز آستانه سد ۱۴۸۰ متر بالاتر از سد دریا و تراز بستر رودخانه ۱۳۶۲ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. سیستم تخلیه سیلاب شامل کانال ورودی، سرریز دریچه دار، تنداب، پرتاب کننده و پایاب پرتاب کننده است که در سمت چپ بدنه سد جانمایی شده است در پوشش سطح تنداب دو واحد سیستم هواده‌نده

نقطه شروع هواگیری را می‌توان در فاصله منحنی (Δx) از تاج سرریز در طول کف کانال در نظر گرفت، جایی که هوا شروع به وارد شدن به بدنه جریان می‌کند و فرایند هواگیری طبیعی آغاز می‌شود (شکل ۲).

شکل ۲. موقعیت نقطه شروع هواگیری [13].

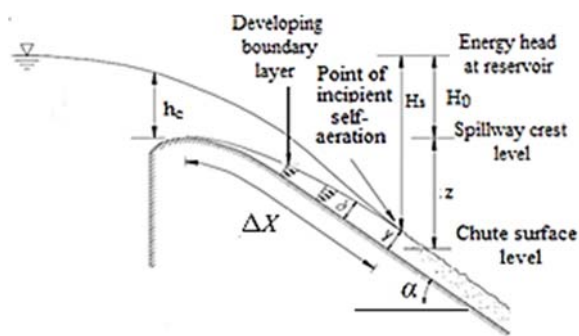


Fig. 2. Position of the starting point of aering [13].

معادلاتی برای توسعه لایه مرزی توسط پژوهشگران ارائه شده است که به چند نمونه در ادامه اشاره می‌شود:

معادله ارائه شده توسط Bauer (1954) [3]:

$$\frac{\delta}{\Delta x} = 0.0447 \left(\frac{\Delta x}{k_s} \right)^{-0.154} \quad (3)$$

معادله ارائه شده توسط wood et al. (1983) [13 و 3]:

$$\frac{\delta}{\Delta x} = 0.0212 \left(\frac{\Delta x}{H_s} \right)^{0.11} \left(\frac{k_s}{\Delta x} \right)^{0.10} \quad (4)$$

معادله ارائه شده توسط Ferrando & Rico (2002) [13]:

$$\Delta x = \left(\frac{q}{0.05642 k_s^{0.056} (\sin \alpha)^{0.34}} \right)^F \quad (5)$$

$$F = (1.46443 k_s^{0.0054} (\sin \alpha)^{0.0027})^{-1} \quad (6)$$

معادله ارائه شده توسط Hager & Blaser (1997) [3]:

$$\frac{\Delta x}{h_c} = 16 (\sin \alpha)^{-0.60} \left(\frac{k_s}{h_c} \right)^{-0.08} \quad (7)$$

در روابط بالا k_s زبری معادل ماسه، h_c عمق جریان بحرانی، δ ضخامت لایه مرزی و Δx موقعیت مکانی است که در آن عمق جریان برابر با ضخامت لایه مرزی است و سایر پارامترها در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

چنانچه هوای وارد شده از سطح آزاد جریان، غلظت هوای کافی را در لایه‌های نزدیک سطح سرریز تأمین نماید، می‌تواند این سطوح را از آسیب‌های کاویتاسیون محافظت کند. اگر میزان هوای وارد شده از سطح آزاد کافی نباشد و یا اگر رواداری سطح تمام شده سرریز زیاد باشد، می‌توان هوا را به طور مصنوعی

در فاصله افقی ۱۶۵ متر (تراز ۱۴۲۱ متر) و ۲۱۰ متر (تراز ۱۴۰۵ متر) از آستانه سرریز تعبیه شده است.

۲-۲- هواگیری جریان

هوا به شکل مصنوعی از طریق وسایلی به نام هوادهنده‌ها به جریان‌های با سرعت بالا در بالادست اولین نقطه‌ای که کاویتاسیون می‌تواند در آنجا اتفاق بیفتد، وارد می‌شود. این وسایل با جدا کردن جریان‌های با سرعت بالا از سطح شوت، باعث می‌شوند جریان مشابه یک جت آزاد رفتار کرده و مقدار زیادی هواگیری مصنوعی در لایه زیرین جریان اتفاق بیفتد (شکل ۱).

شکل ۱. هواده و سیستم تأمین هوا [۳].

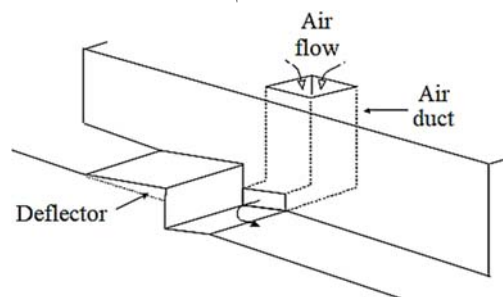


Fig. 1. Aerator and air supply systems [3]

زمانی که جریان از روی یک سرریز طویل عبور می‌کند، نواحی مختلفی از جریان به وجود می‌آید. در ابتدا لایه مرزی از سطح سرریز به سطح آزاد جریان توسعه پیدا می‌کند. در این ناحیه، جریان روی لایه مرزی می‌تواند رفتار غیرچرخشی داشته باشد. لبه بیرونی لایه مرزی نامنظم بوده و زمانی که این ناحیه بیرونی به همراه آشفتگی‌هایش به سطح آزاد جریان برسد، هواگیری سطحی رخ خواهد داد. پایین‌دست این نقطه که نقطه شروع هواگیری سطحی نامیده می‌شود، مخلوط آب-هوا به آرامی گسترش پیدا می‌کند تا به سطح سرریز برسد. برای سدهای بلند این نقطه در فاصله دوری از تاج سد قرار دارد و سرعت‌های نزدیک سطح سرریز می‌تواند به اندازه کافی بزرگ باشد و موجب کاویتاسیون شود [12]. به عنوان یک قانون، هواگیری طبیعی یا سطحی جایی شروع می‌شود که لایه مرزی توسعه یافته و به سطح جریان برسد. برای ورود هوا به جریان دو شرط رژیم جریان آشفته و بیشتر بودن انرژی گردابه‌های سطحی از نیروهای کشش سطحی لازم است [13].

اغلب، غلظت هوای متوسط روی شوت‌های صاف توسط عمق جریان مخلوط روی نمونه اصلی به عنوان شاخصی برای حجم هوای حبس شده در جریان مشاهده و اندازه‌گیری می‌شود. در زیر خلاصه‌ای از مهم‌ترین معادلات تعیین غلظت هوای متوسط یکنواخت $\bar{C}_{99u}$ و غلظت هوای تحتانی (C_b) ارائه می‌شود: Hager (1991) با استفاده از داده‌های (Straub & Anderson (1958) رابطه زیر را برای غلظت هوای تحتانی در ناحیه جریان متعادل ارائه نمود [17 و 16]:

$$\bar{C}_{99u} = 0.180 \quad (8-الف)$$

$$C_b = 0.65 \sin \alpha \quad 40^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ \quad (8-ب)$$

Anderson (1965) رابطه زیر را برای تعریف غلظت متوسط

جریان پیشنهاد کرد [3]:

$$\bar{C} = \frac{1}{h_{99}} \int_0^{h_{99}} C dh \quad (9)$$

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

Hager (1991) ثابت کرد که غلظت هوای متوسط سطح

مقطع جریان، فقط تابعی از شیب کف است و رابطه (۱۰) را پیشنهاد داد [17 و 3]:

$$\bar{C}_{99u} = 0.75(\sin \alpha)^{0.75} \quad (10)$$

Chanson (1993) با استفاده از داده‌ها آزمایشگاهی

(Anderson & Aivazy (1987) و داده‌های میدانی (1958) رابطه زیر را برای تخمین غلظت متوسط هوا ارائه نمود [18 و 3]:

$$C_{99u} = 0.9 \sin \alpha \quad \alpha \leq 50^\circ \quad (11)$$

Wood (1983) با استفاده از داده‌های

(Cian (1987) و (1958) رابطه‌ی بی‌بعد زیر را برای توزیع غلظت هوا در ناحیه جریان یکنواخت ارائه داد [18 و 3]:

$$C(z) = \frac{\gamma}{\beta + e^{-\gamma \cos \alpha Z_0^2}} \quad (12)$$

$\gamma \cos \alpha$ تابعی از $\bar{C}_{99u}$ هستند و $\bar{C}_{99u}$ ، $Z_0 = h/h_{99}$ به ترتیب معرف غلظت هوای متوسط در ناحیه جریان یکنواخت

با استفاده از هواده‌ها و قرار دادن آن‌ها روی سطح و گاهی دیواره‌های جانبی سرریز، به جریان وارد نمود [14].
نواحی جریان روی هواده تحتانی واقع بر یک سرریز طویل و با شیب تند در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۳. نواحی جریان روی هواده، مکانیزم ورود هوا، نمایش تغییرات فشار و غلظت هوای بستر [3].

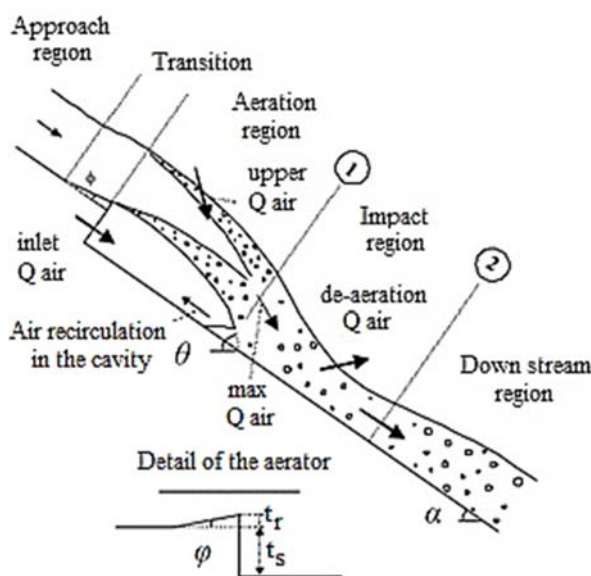


Fig. 3. Areas of flow on aerator, Air entry mechanism, Display the pressure changes, Concentration of air [3].

ناحیه برخورد جریان از نقطه برخورد جت آب، جایی که بیشترین فشار در کف ایجاد می‌شود، شروع شده و تا ناحیه جریان پایین‌دست ادامه می‌یابد. در مکان برخورد جت، تغییرات سریع توزیع فشار از گرادیان فشار منفی تا گرادیان فشار ماکزیمم که بیشتر از گرادیان فشار هیدروستاتیک است، رخ داده و در نهایت به توزیع فشار هیدروستاتیک پایین‌دست می‌رسد. گرادیان فشار زیاد در ناحیه برخورد دلیل خروج هوای زیاد مشاهده شده در سطح جریان است. در ناحیه جریان پایین‌دست، توزیع سرعت و توزیع غلظت هوا به تدریج تغییر کرده و به پروفیل‌های پایدار در فاصله دوری از پایین‌دست هواده متمایل می‌شوند [15 و 7].

۳-۲- غلظت هوا

داده‌های کمی مربوط به غلظت هوا در ناحیه جریان در حال توسعه بین نقطه شروع هواگیری و جریان متعادل وجود دارد.

ممکن است در طول شوت، نیاز به هواده جدید باشد (شکل ۵).

شکل ۵. تعیین موقعیت هواده‌ها و هیدرولیک جریان دوفازی [3]

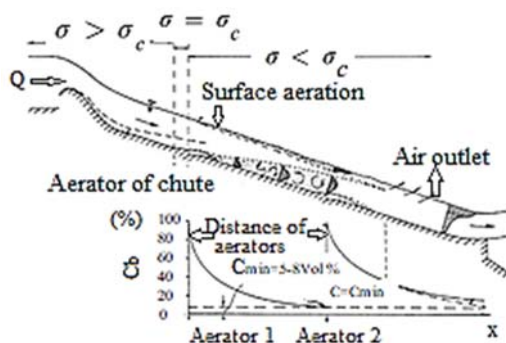


Fig. 5. Location of aerators and hydraulic two-phase flow [3].

همان‌گونه که در شکل بالا مشاهده می‌شود، موقعیت اولین هواده، نقطه آغازین شروع کاویتاسیون است. فاصله هواده دوم به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- میزان هوای خارج شده از جریان پایین دست هواده اول

۲- هواگیری طبیعی جریان از سطح آزاد

معمولاً هوای وارد شده از سطح جریان به بستر شوت نمی‌رسد و نیاز است که اولین هواده با توجه به شرایط توپوگرافی و شاخص کاویتاسیون در مکان مناسب تعبیه شود. با تعیین روند تغییرات غلظت هوای بستر می‌توان فاصله بین دو هواده را تعیین نمود. هوای موجود در جریان موجب تراکم پذیری جریان شده و سبب میرایی ضربات ناشی از انفجار و ترکیدن حباب‌ها می‌شود و در نتیجه خسارات ناشی از کاویتاسیون را کاهش می‌دهد؛ از طرفی چنانچه بیش از مقدار لازم جهت جلوگیری از کاویتاسیون، هوا وارد جریان شود باعث حجیم شدن جریان شده و باید دیواره‌های بلندتری برای شوت در نظر گرفت که به لحاظ اقتصادی مناسب نیست. از این‌رو تعیین کمینه غلظت هوای مورد نیاز برای جلوگیری از آسیب های کاویتاسیون حایز اهمیت است. پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه بسیار اندک بوده و می‌توان به آزمایش‌های انجام شده توسط Kramer (2004) و Pfister (2007) اشاره نمود، پس

و عمق بی بعد شده جریان در جایی هستند که غلظت هوا $C=90\%$ باشد. رابطه‌ی فوق نشان می‌دهد که غلظت متوسط هوا در ناحیه جریان یکنواخت به هندسه بالادست مانند دبی، عدد فرود، زبری نسبی و نظایر آن، بستگی نداشته و فقط تابعی از شیب کف است. مقادیر β و $\gamma \cos \alpha$ را می‌توان از شکل (۴) استخراج نمود. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش شیب بستر، غلظت متوسط هوا نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۴. توزیع غلظت هوا در ناحیه جریان یکنواخت برای شیب‌های مختلف شوت و عمق بی بعد شده جریان h/h_{90} [3].

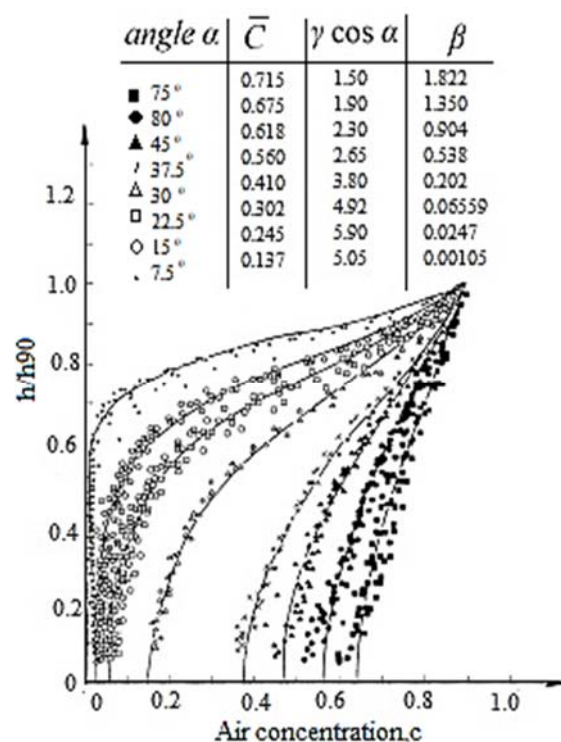


Fig. 4. Distribution of air concentration in the uniform flow region for different slopes of the chute and the flow depth h/h_{90} [3].

شکل (۵) خروج هوا را از جریان بلافاصله پس از برخورد جت جریان به سطح شوت و روند تغییرات غلظت هوا را در طول آن نشان می‌دهد. بنابراین فرآیند خروج هوا از جریان به طور مستقیم به هوای وارد شده از سطح آزاد بستگی دارد؛ تا زمانی که میزان غلظت هوای جریان به میزان آن در ناحیه جریان متعادل که در آن هوای وارد شده در اثر آشفستگی جریان با هوای خروجی از آن برابر می‌شود، برسد [3]. در این ناحیه غلظت هوای تحتانی (C_b) به میزان مینیمم خود می‌رسد و

شکل ۶. غلظت هوای بستر به عنوان تابعی از طول پرش بی بعد شده جت جریان

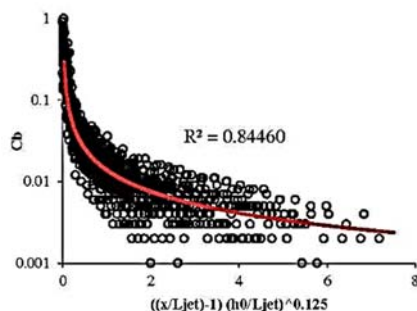


Fig. 6. Bed air concentration as a function of dimensionless jump over the jet flow

بنابراین با استفاده از این رابطه و فاصله بین هواده‌های سرریز سد آزاد میزان حداقل غلظت هوا را می‌توان بر اساس ارتفاع جریان و طول پرش آن از روی هواده محاسبه نمود. برای این منظور طول پرش از روابط (۱۶ و ۱۷) بر اساس شرایط جریان و هندسه هواده تعیین شده و با استفاده از رابطه (۱۵) میزان تغییرات غلظت هوا پایین دست هواده اول تعیین شده است.

۲-۴- طول پرش جت جریان

مطالعات زیادی برای تعیین طول پرش جت جریان انجام شده است و میزان هوای وارد شده به جریان را تابعی از طول پرش جریان دانسته‌اند. (Pfister, Kökpinar & Göğüs (2002)

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \varphi \leq 9.45^\circ, 0^\circ \leq \tan \alpha_2 \leq 1.25 \\ 0.00684 \leq A_a / A_w \leq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_0 \\ 0 < L_{jet} / h_0 < 50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{jet} &= V_0 (\cos \varphi) t + \frac{1}{2} g (\sin \alpha_2) t^2 \\ t &= \frac{V_0 \sin \varphi}{g (\cos \alpha_2 + P_N)} \left[1 + \sqrt{1 + 2(t_r + t_s) \frac{g (\cos \alpha_2 + P_N)}{(V_0 \sin \varphi)^2}} \right] \\ t &= \sqrt{\frac{2t_s}{g (\cos \alpha_2 + P_N)}} \end{aligned}$$

در این بخش به بررسی تغییرات غلظت هوا در طول شوت و همچنین عمق آن در ناحیه جریان یکنواخت پرداخته می‌شود. تغییرات غلظت هوای بستر پس از برخورد جت جریان به بستر شوت توسط Kramer (2004) و Pfister (2007) به صورت روابط (۱۳ و ۱۴) ارائه شده است:

$$5 \leq Fr \leq 12, \sin \alpha_2 \leq 50\%$$

$$1 \leq x / L_{jet} \leq 3$$

$$\begin{aligned} n &= -1 - (1.5 \sin \alpha_2)^3 \text{ \& } \\ m &= 0.5 - (1.5 \sin \alpha_2)^3 \end{aligned}$$

در معادلات بالا C_{b0} مشخصه غلظت هوای بستر بالادست هواده، $X_{90u} = x/h_{90u}$ فاصله‌ی بدون بعد بعد جریان و h_{90u} عمق جریان در ناحیه جریان یکنواخت از بستر تا جایی که غلظت هوا در سطح برابر 90% باشد، است. معادله‌ی (۱۴-الف) برای هواده‌های پله و معادله‌ی (۱۴-ب) برای هواده شامل رمپ است [20 و 19].

در این پژوهش با استفاده از ۱۲۰۰ داده تجربی حاصل از ۹۰ آزمایش صورت گرفته توسط Pfister (2007) رابطه‌ای برای تعیین روند خروج هوا از جریان تحت شرایط فشار حفره صفر و ضریب همبستگی $R^2 > 0.84$ به عنوان تابعی از طول بی بعد شده‌ی جت جریان با استفاده از تحلیل رگرسیون ارائه شده است که با توجه به سادگی و دقت مناسب می‌تواند در تعیین فاصله بین هواده‌ها بر اساس کمینه میزان غلظت هوای بستر استفاده شود.

$$\frac{x}{L_{jet}} > 1.012 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (16) \\ (17) \\ (18) \\ (19) \end{aligned}$$

$$(18-b)$$

Froude number	Velocity(m/s)	Water depth(m)	Q(m ³ /s)
7.04	23.44	1.13	500
6.58	24.12	1.37	800
6.52	25.57	1.57	1000
6.23	26.20	1.8	1226
5.97	27.30	2.13	1545
5.57	28.13	2.6	1800

Table. 2. Discharge and the depth of the flow before the first aerators

شکل ۸ طول بی‌بعد شده جت جریان نسبت به عدد فرود محاسبه شده از روابط ۱۶ و ۱۷

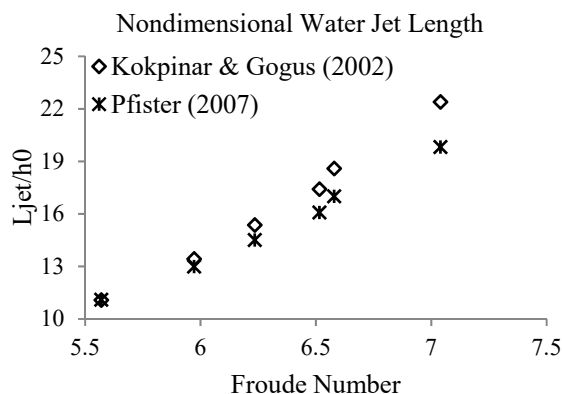
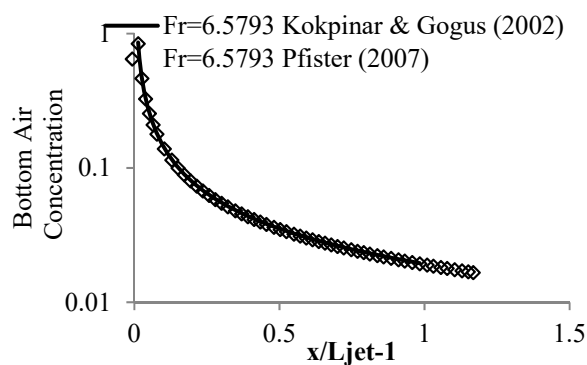


Fig. 8. Dimensionless length of the flow jet Relative to Froude number calculated from equations 16 and 17

شکل (۸) ارتباط معناداری را بین عدد فرود و طول پرش جریان عبوری از هوا ده نشان می‌دهد. با افزایش عدد فرود طول پرش افزایش می‌یابد و همچنین رابطه‌ی ارایه شده توسط Kökpinar & Gögüs (2002) مقادیر بیشتری را برای طول پرش به ازای افزایش عدد فرود نشان می‌دهد. مقادیر حاصل از رابطه‌ی (۱۵) برای تعیین توزیع غلظت هوای بستر در طول شوت برای طول پرش‌های محاسبه شده از روابط (۱۶ و ۱۷) در شکل (۹) برای دبی‌های ارایه شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل ۹. توزیع غلظت هوای بستر در طول شوت به ازای طول پرش‌های محاسبه شده از روابط ۱۶ و ۱۷ با استفاده از رابطه ۱۵



(2007) و Tan (1984) به ترتیب روابط (۱۶ تا ۱۸) را در تعیین طول جت جریان ارایه کردند.

در روابط (۱۸) معرف زمانی است که جت جریان از لبه هوا ده تا برخورد به سطح سرریز می‌پیماید، Fr معرف عدد فرود، A_a مساحت ورودی مجرای تأمین هوا، A_w مساحت جریان بالادست هوا ده، P_N عدد فشار، g شتاب گرانش بوده و سایر پارامترها در شکل (۷) نشان داده شده است. رابطه‌ی (۱۸-الف) برای هوا ده شامل رمپ و رابطه‌ی (۱۸-ب) برای هوا ده پله در محاسبه‌ی زمان به کار می‌روند [21].

شکل ۷. پارامترهای هندسی هوا ده و جریان عبوری از آن

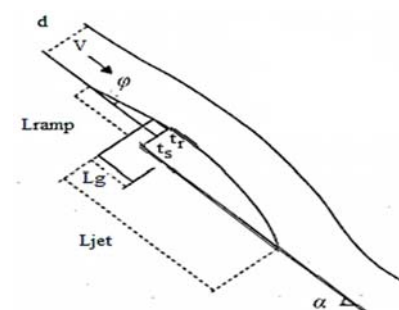


Fig. 7. Aerator Geometric Parameters and Flow over it

۳- نتایج و بحث

در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، شرایط جریان روی هوا ده سرریز آزاد بازای دبی‌های معادل ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۲۶، ۱۵۴۵ و ۱۸۰۰ متر مکعب بر ثانیه‌ی سرریز واقعی، بررسی شده است. بر اساس شرایط جریان جدول (۲) و مشخصات هندسی هوا ده شماره ۱ سرریز سد آزاد، طول پرش جریان برای ۶ دبی عبوری از این هوا ده در شکل (۸) نسبت به عدد فرود ترسیم شده است. جدول ۲. دبی و عمق جریان قبل از اولین هوا دهنده

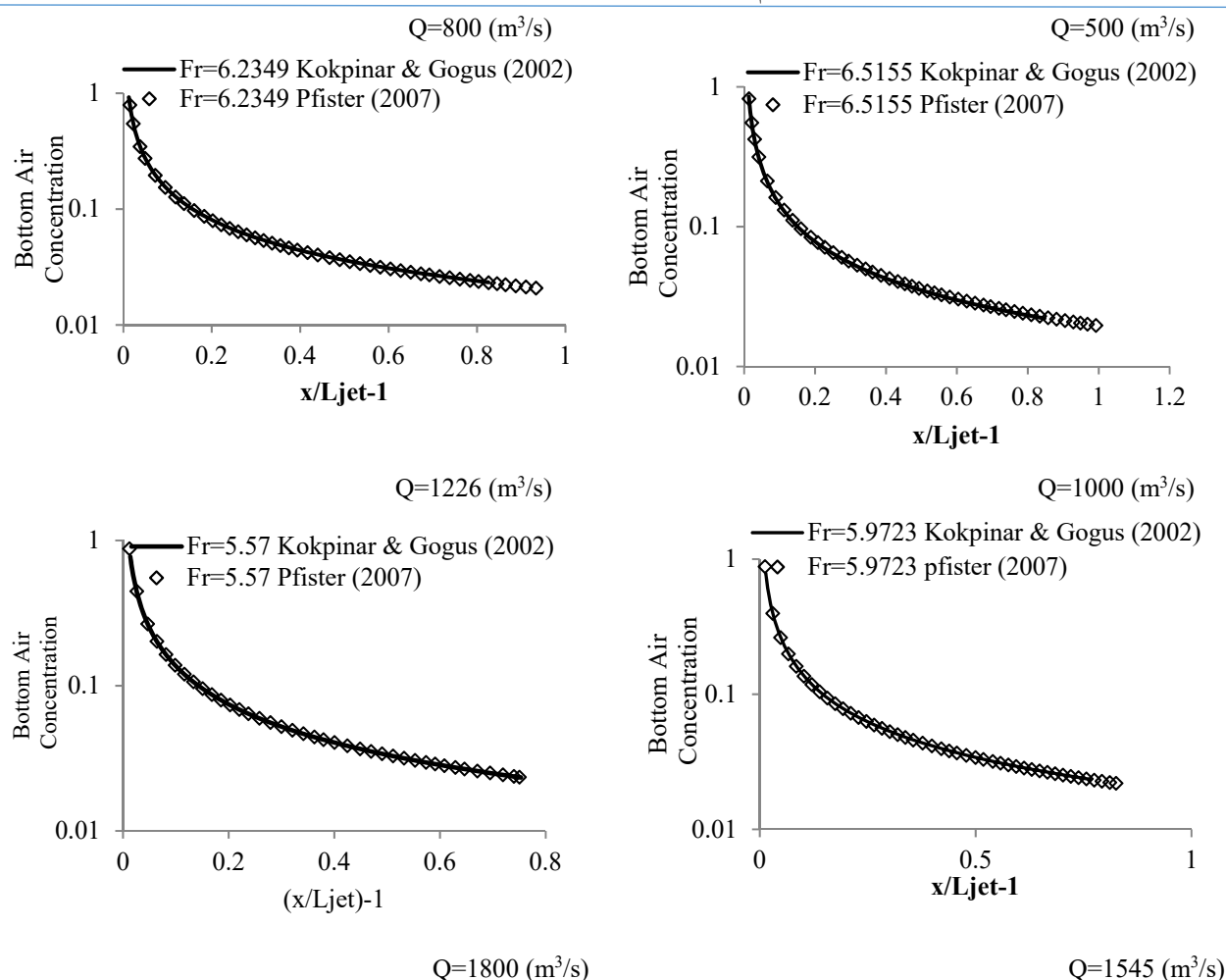


Fig. 9. The distribution of the air concentration during the chute for the length of the jumps calculated from relations 16 and 17 using the relationship of 15

جدول ۳. فاصله‌ی بین هواده اول و دوم سرریز سد آزاد بر اساس غلظت هوای بستر ۰/۰۱

Q (m^3/s)	فاصله بر اساس رابطه‌ی Kökpinar & Gögüs (2002)	فاصله بر اساس رابطه‌ی Pfister (2007)
	رابطه‌ی Kökpinar & Gögüs (2002)	رابطه‌ی Pfister (2007)
500	50.55	45.08
800	51.46	47.33
1000	55.48	51.49
1226	56.57	53.61
1545	59.01	57.19
1800	60.16	60.26

Table. 3. The distance between the first and second aerator of Azad dam according to Concentration of air 0.01

همان‌گونه که شکل (۹) نشان می‌دهد، تغییرات غلظت هوای بستر حاصل از رابطه‌ی ۱۵ برای طول پرش‌های به دست آمده از روابط Kökpinar & Gögüs (2002) و Pfister (2007) مسیر یکسانی را طی می‌کنند، اما با توجه به اینکه رابطه Pfister (2007) طول پرش کمتری را ارائه می‌دهد، پس مقدار فاصله مجاز بین هوادهنده‌ها را بر اساس غلظت هوای مینیمم کمتر از رابطه Kökpinar & Gögüs (2002) می‌داند. برای نمونه چنانچه غلظت هوای بستر مینیمم ۰/۰۱ در نظر گرفته شود، فاصله بین هواده اول و دوم سرریز سد آزاد برای دبی‌های ارائه شده در جدول (۱) به صورت زیر خواهد بود.

هوادهنده دانست. ایجاد کانال یا مجرای توزیع هوای مناسب برای هوادهنده‌ها به منظور تأمین فشار حفره ای منفی، موجب عملکرد بهتر هواده شده و بدین طریق می‌توان فاصله بین هواده‌ها را افزایش داد.

در این پژوهش همان‌گونه که بیان شد رابطه‌ای برای تعیین روند خروج هوا از جریان تحت شرایط فشار حفره ای صفر و ضریب همبستگی بیش از ۰/۸۴ به عنوان تابعی از طول بی‌بعد شده جت جریان با استفاده از تحلیل رگرسیونی ارایه شد که با توجه به سادگی با دقت مناسب می‌تواند در تعیین فاصله بین هواده‌ها بر اساس حداقل میزان غلظت هوای بستر مورد استفاده قرار گیرد. رابطه ارائه شده نشان داد که با کاهش غلظت هوای مینیمم فاصله بین هواده‌ها افزایش می‌یابد.

Reference

۵- مراجع

- [1] Totten, G.E., Sun, Y.H., Bishop, R.J., 1999 Hydraulics System cavitation,
- [2] Chanson, H., 1988 Study of Air Entrainment and Aeration Devices on Spillway Model, PHD Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March.
- [3] Kramer, K., 2004 Development of Aerated Chute Flow, PHD Thesis, Mitteilungen 183, Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen, Technischen Hochschule Zürich,
- [4] Lesleighter, E.J., 1988 Cavitation in Hydraulic Structures, Prototype Correlation of Hydraulic Structures, Colorado Springs, Colorado, 74-94.
- [5] Kells, J.A., Smith, C.D., 1999 Reduction of Cavitation on Spillways by Induced Air Entrainment, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 18, pp. 358-377.
- [6] Rutschmann, P., 1988 Belüftungseinbauten in Schussrinnen, VAW Mitteilung 97, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich, (in German).
- [7] Falvey, H.T., 1983 Prevention of Cavitation on Chutes and Spillways, Frontiers in Hydraulic Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 432-437.
- [8] Falvey, H.T., 1990 Cavitation in Chutes and Spillways, Engineering Monograph No.42, Bureau of Reclamation, Denver Office, Colorado, April.
- [9] Dong, Z., Wu, Y. and Zhang, D., 2010. Cavitation characteristics of offset-into-flow and effect of aeration. Journal of hydraulic research, 48(1), pp.74-80.
- [10] Erfanain-Azmoudeh, M.H. and Kamanbedast, A.A., 2013. Determine the appropriate location of aerator

برای تعیین فاصله بین دو هواده در جهت اطمینان باید مینیمم مقدار به دست آمده را انتخاب نمود. اما توجه به این نکته ضروری است که مقادیر حاصل از جدول (۳) برای مینیمم غلظت هوای بستر ۰/۰۱ محاسبه شده است و چنانچه مقادیر کمتری مد نظر باشد، فاصله بین هواده‌ها افزایش می‌یابد؛ این موضوع برای طول پرش حاصل از رابطه (۱۶) و مقادیر غلظت هوای بستر مینیمم در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شکل ۱۰. فاصله بین دو هواده حاصل از رابطه‌ی ۱۵ برای مقادیر غلظت هوای بستر مینیمم

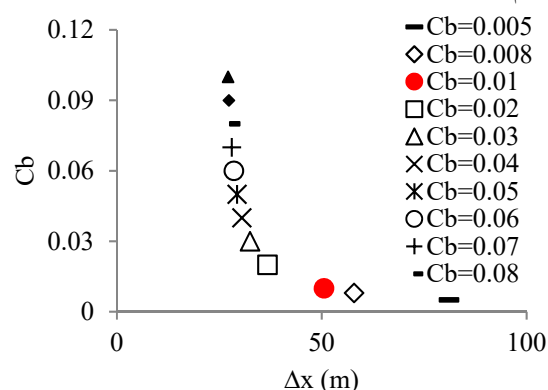


Fig.10. The distance between the two aerator from the relationship is 15 For minimum concentrations of air in the bed

۴- نتیجه‌گیری

طول پرش جت جریان نقش اساسی در تعیین فاصله بین دو هوادهنده دارد. با افزایش طول پرش، سطح تماس لایه‌های فوقانی و تحتانی جت با هوا در تماس بیشتری قرار داشته و بر میزان ورود هوا به جریان اثر گذار است. هوای جذب شده پس از برخورد جت با بستر از جریان خارج می‌شود و با تعیین غلظت هوای بستر مینیمم مناسب می‌توان فاصله بهینه را بین دو هواده برای جلوگیری از آسیب‌های کاویتاسیون انتخاب نمود. انتخاب غلظت هوای بستر مینیمم طبق رابطه ارایه شده توسط Wood (1983) به معنای در نظر گرفتن غلظت هوای متوسط بیشتر در جریان است که موجب حجیم شدن جریان شده و نیازمند دیواره‌های بلندتر برای کناره‌های شوت است که به لحاظ اقتصادی مناسب نیست. تغییرات غلظت هوای بستر را می‌توان تنها تابعی از طول پرش جریان و ارتفاع جریان بالادست

- Spillways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(9), 908- 915.
- [17] Hager, W.H., 2006 Uniform Aerated Chute Flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(4) 528-533.
- [18] Chanson, H., 1993 Self-Aerated Flows on Chutes and Spillways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(2). 220-243.
- [19] Kökpınar, M.A., Göğüs, M., 2002 High-Speed Jet Flows over Spillway Aerators, NRC Research Press, Canadian Journal of Civil Engineering., 29(), 885-898.
- [20] Pfister, M.U., 2007 Schussrinnenbelüfter, Lufttransport Ausgelöst Durch Interne Abflussstruktur, PHD Thesis, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich.
- [21] Tan, T.P. 1984 Model studies of aerators on spillways. Department of Civil Engineering Report University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- system on Gotvan doliadam's spillway using Flow 3D. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 13(3), pp.378-383.
- [11] Mahdavi Meymand, A., Ahadiyan, J. 2015. Evaluation of Statistical, Empirical, Neural Networks and Neural – Fuzzy Techniques for Estimation of Spillway Aerators. Irrigation Sciences and Engineering, 38(3), pp. 51-61. (In Persian)
- [12] Rutschmann, P., 1986 Volkart, P., Wood, I.R., Air Entrainment at Spillway Aerators, 9th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, 8-12 December.
- [13] Ferrando, A.M., Rico, J.R., 2002 On the Incipient Aerated Flow in Chutes and Spillways, Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, No. 1.
- [14] Chanson, H., Study of air Entrainment and Aeration Devices, Journal of Hydraulic Research, Vol. 27, No. 3, 1989.1
- [15] Chanson, H., 1991 Aeration of a Free Jet above a Spillway, Journal of Hydraulic Research, 29(5).
- [16] Kramer, K., Hager, W.H., 2006 Minor, H-E., Development of Air Concentration on Chute

investigate relationship to determine the distance between the first and second aerator over the chute overflow based on the minimum air concentration (Case study of Kurdistan Azad Dam)

Ehsan Jafari Nodoushan^{1*}, Masoud Arami Fadafan², Mehdi Azhdary Moghadam³

Ehsan Jafari Nodoushan^{1*}, Masoud Arami Fadafan², Mehdi Azhdary Moghadam³

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

2- Ph.D. Graduated, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

*e. jafari@iaubijar.ac.ir

Abstract

The increase of population and demand for water, agriculture and energy cause rapid increase construction of the dam has been. Moreover, the increase of dam height to increase storage and estimate the need for water cause increase the velocity of water over the spillway has been. Spillways, chutes and bottom outlets are important hydraulic structures for dam safety. Due to high velocities combined with low pressures, cavitation damages may occur on chute bottom and cause major damages or endanger the dam stability. Damage experience for flows in spillway tunnels and chutes indicates that damage becomes significant when water velocities exceed 30m/s, this velocity or head can be considered as the borderline for high velocity or high head flows. Introducing air to high-speed flow is necessary to prevent pressure reduction and its events such as cavitation. It is possible to protect spillway surfaces from cavitation damages using aerator devices. Usually, the air entering the flow is not reached to the bed chute. It is necessary to install the first aerated according to topographic conditions and cavitation index at the appropriate location. By determining the process of changing the air concentration of the bed, the distance between the two aerators can be determined. The air in the flow causes the compression and damping that cause Bursting bubbles. In result, the damage caused by cavitation is reduced. So cavitation investigations will be necessary and need to reduce and prevent cavitation damages. The length of the flow jet has a fundamental role in determining the distance between two aerators. With increases the length of the jump, the contact surface of the upper and lower layers of the jet is in more contact with the air and affects the amount of air entering the flow. The absorbed air is removed from the flow after the Jet collision. By determining the minimum concentration of air in the bed, an optimal distance between the two aerations can be selected to prevent cavitation damage. Select the minimum air concentration of bed is based on the relationship provided by Wood (1983). It means that the concentration of average air in the stream is higher, which causes the flow of bulking and requires taller walls for the sides of the shut Which is not economically feasible. The variation in the air concentration of the bed can only be considered as a function of the length of the jump flow and the upstream heights. Creating a suitable duct for providing A negative cavity pressure Lead to better performance that causes increases the distance between aeration. So use of aerators in suitable places and the entrance of air to water flow is a most effective way to reduce this damage, therefore in this study, an equation has been derived to estimate the distance between two aerators base on 1200 data of 90 experiments with R^2 more than 0.84. Results of the present study with distance aerators of the Azad dam based on the minimum air concentration of bed have been compared and investigated.

Keywords: Aerator, chute overflow, Cavitation Damages, Bottom Air Concentration.