



بررسی تاثیر غلظت هوای جریان بر فاصله‌ی بین هوادهای تندآب سرریز

الهام نخعی زینلی، مهدی اژدری مقدم*

دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

کلمات کلیدی:

هواده، جریان دوفازی
دینامیک سیالات محاسباتی
تندآب سرریز
کاویتاسیون

خلاصه: هواده‌ی جریان با استفاده از هواده‌ها، از موثرترین روش‌ها برای جلوگیری از وقوع پدیده خلاءزایی (کاویتاسیون) در تندآب سرریز است. امروزه دسترسی به کامپیوترهای مجهز و نرم‌افزارهایی که اساس کار آنها دینامیک سیالات محاسباتی است، موجب افزایش کاربرد شبیه‌سازی عددی در تحلیل جریان شده است. در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی جریان عبوری از روی هواده تندآب سرریز، نرم‌افزار فلوتری دی مورد استفاده قرار گرفت. جهت صحت‌سنجی نتایج مدل عددی که ملاک آن غلظت هوا در پایین دست هواده است، از داده‌های آزمایشگاهی محققین استفاده شده است که نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی است. سپس به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی از جمله ارتفاع و زاویه رمپ، ارتفاع پله و شیب تندآب بر روند تغییرات غلظت هوا، خصوصیات جریان مانند سرعت و فشار جهت تعیین شاخص کاویتاسیون به منظور تعیین فاصله‌ی مناسب بین دو هواده، پرداخته شده است. تغییرات غلظت متوسط هوا بصورت لایه‌ای در عمق جریان و کاهش غلظت هوا بصورت تابع نمایی است. مقدار شاخص کاویتاسیون در طول ۱۱ متر پس از هواده روی تندآب سرریز، از مقدار بحرانی بیشتر است و خطر وقوع کاویتاسیون مشاهده نمی‌شود. با توجه به مقدار غلظت‌های محاسبه‌شده می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که با کاهش غلظت هوا در بستر تندآب تا مقادیر ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ به ترتیب برای تندآب‌هایی با شیب ۱۰، ۱۲، ۳۰ و ۵۰ درجه، احتیاجی به هواده‌ی بیشتر نیست.

۱- مقدمه

تندآب^۱ سرریز به عنوان یکی از سازه‌های مهم هیدرولیکی سد، جهت کنترل تراز سطح آب به هنگام سیلاب‌های بزرگ برای محافظت سد در برابر لبریزشدن بکار می‌رود. بین سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ چندین آسیب چشم‌گیر سرریز مشاهده شد. تخریب سطح بتن و فونداسیون به طور ویژه در ناحیه‌های جریان با سرعت زیاد، به علت خلاءزایی یا کاویتاسیون پیدا شده بود [۱]. تامین هوا در سطح تماس بین بتن و جریان آب جهت جلوگیری از وقوع این پدیده، اقتصادی‌ترین و ساده‌ترین راهکار است. امروزه، اغلب سرریزها جهت حفظ ایمنی در برابر آسیب‌های کاویتاسیون با هواده‌ها مجهز شده‌اند. در یک هواده جریان آب با سرعت بالا روی تندآب سرریز بوسیله‌ی یک رمپ و پله منحرف می‌شود و باعث ایجاد پرش جت جریان و شکل‌گیری حفره‌ای از هوا در زیر تیغه‌ی جریان شده و وجود داکت هوا مانع از خفگی هواده می‌شود. هوای اتمسفر در ناحیه‌ی فشار

حفره در زیر تیغه‌ی جریان، به علت وجود آشفتگی در سطح مشترک آب و هوا وارد جریان می‌شود و به این ترتیب هوا به پایین دست هواده انتقال می‌یابد [۲]. ورود هوا در بالای هواده به چند روش صورت می‌گیرد. ورود هوا از طریق سطح آزاد بالایی و پایینی جت به هنگام ریزش تیغه‌ی آب روی سرریز که هواده‌ی تیغه‌ای^۲ نامیده می‌شود. ورود هوا از طریق حوضچه^۳ ایجادشده در محل برخورد جت آب به کف شوت و تشکیل جریان‌های برگشتی^۴ چرخش هوا در حفره زیر جت و همچنین هواگیری قوی در سطح آزاد نزدیک برخورد جت با کف سرریز صورت می‌گیرد. این اختلاط آب و هوا در جریان رشد می‌یابد و به کف کانال توسعه پیدا می‌کند. هوا باعث کم‌شدن فشار منفی در نزدیک کف تندآب شده و در نتیجه از وقوع کاویتاسیون جلوگیری می‌شود [۳]. در این روش بدون استفاده از روش‌های مکانیکی نظیر پمپ‌های هوا، هوا وارد جریان می‌شود. با

1 Chute

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mazhdary@eng.usb.ac.ir

2 Nappe Entrainment
3 Plung
4 Roller





شکل ۱. هواده‌های تندآب

Fig. 1. Chute aerators

برای طراحی هیدرولیکی بهینه هواده پرداختند. در حالتی که فشار حفره زیر جت برابر با فشار اتمسفر است، معادلاتی برای توزیع غلظت هوا و طول جت استخراج نمودند. همچنین فیشر [۱۱]، در ادامه آزمایشات قبلی با در نظر گرفتن فشار حفره زیر جت، مشاهده کرد که مقادیر طول جت، غلظت‌ها و ضریب ورود هوا نسبت به حالت اول که ذکر شد، کاهش می‌یابد. اگر فشار حفره هواده خیلی زیاد کاهش یابد، حفره‌ی هوای زیر جت با آب پر می‌شود و در آب فرو رفتن هواده می‌تواند باعث تولید کاویتاسیون شود. طبق تحقیقات او برای عملکرد بهینه هواده باید ضریب فشار حفره کمتر از ۰/۱ باشد. سپهان آیدین [۱۲]، با ساخت مدل آزمایشگاهی، عملکرد هواده‌ی این نوع هواده را در عدد فرود مختلف و ارتفاع‌های متفاوت رمپ بررسی کرده است و چندین فرمول تجربی برای تخمین ضریب ورود هوا از دریچه‌ی پایینی هواده به دست آورده است. بای^۷ و همکاران [۱۳]، یکسری آزمایشات برای تعیین خصوصیات جریان دوفازی شامل شار ورودی هوا، انتشار و فرکانس حباب هوا برای یک رنج اعداد فرود بین ۳/۳ تا ۷/۴، انجام دادند.

آرامی فدافن [۱۴]، به مدلسازی هواده تندآب سرریز بوسیله نرم‌افزار فلونت^۸ و بررسی غلظت هوا در لایه‌ی تحتانی جریان بعد از هواده پرداخت. طبق نتایج، افزایش ارتفاع پله و رمپ، زاویه‌ی رمپ و عدد فرود جریان موجب افزایش طول پرش جت جریان و هوای وارد شده به جریان می‌شود. عرفانیان [۱۵]، جهت مکان‌یابی پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز اوجی و تندآب سد گتوند از نرم‌افزار فلوتری دی^۹ استفاده کرد. طبق نتایج وقوع پدیده‌ی خلا‌زائی در بستر تندآب محتمل بوده و اجرای سیستم هواده در دو مجاری تندآب ضروری است. گلپریان و همکاران [۱۶]، با بررسی عددی تاثیر ابعاد هواده سرریز در شاخص کاویتاسیون در سرریز سد آزاد با استفاده از نرم‌افزار فلوی تری دی، به این نتایج رسیدند که با افزایش شیب رمپ هواده، فشار منفی زیر جت و در نتیجه آن درصد هوای ورودی به جریان افزایش می‌یابد. رسولی [۱۷]، تاثیر سه پارامتر دبی، زبری و شیب رمپ هواده بر هواده‌ی جریان را با استفاده از نرم‌افزار فلوتری دی بررسی کرده است و طبق نتایج، با افزایش مقدار زبری، ابعاد هواده کاهش یافته است و میزان غلظت هوا در لایه تحتانی را افزایش یافته

حرکت جریان به پایین‌دست، غلظت هوا کاهش می‌یابد، زیرا به دلیل تاثیرات آشفتگی که در مرز تولید می‌شود، گرایش حباب‌های هوا به بالا رفتن است. اگر غلظت در مرز کوچک بشود، هواده دیگری نیاز خواهد بود [۱]. از این‌رو، اطلاع از چگونگی توزیع غلظت هوا و شاخص کاویتاسیون در طول سرریز به منظور تعیین فاصله‌ی مناسب هواده‌ها از یکدیگر و تامین غلظت هوای حداقل جهت جلوگیری از آسیب‌های کاویتاسیون امر مهمی است که در این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته شده است. در شکل ۱، نمونه‌ای هواده در تندآب سرریز سد ده‌ری^۱ در هند، نشان داده شده است.

تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌گرفته، پارامترهایی نظیر غلظت هوا، ضریب ورود هوا، طول جت را مطالعه نمودند. راتسچمن^۲ [۴]، چنسون^۳ [۵]، راتسچمن و هیگر^۴ [۶]، کاکپینار و گاگوس^۵ [۷]، مدل‌های فیزیکی را برای بررسی هواده‌های روی تندآب توسعه داده‌اند. آنها به مطالعه ضریب ورود هوا، پروسه هواگیری طبیعی و خروج هوا در جریان با سرعت بالا روی هواده‌های سرریز پرداختند. چنسون [۸]، در مطالعات آزمایشگاهی، با بررسی هواده، یک هواگیری قوی در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب مشاهده کرد. همچنین دو معادله برای بدست‌آوردن توزیع غلظت هوا و توزیع سرعت در نواحی دور پایین‌دست هواده پیشنهاد کرد. از جمله پژوهش‌های مهمی که اخیراً انجام شده است؛ فیشر^۶ و هیگر [۹]، [۱۰]، طی اقدامات آزمایشگاهی به بررسی خصوصیات عبور هوا پایین‌دست هواده‌های روی تندآب،

- 1 Thehri dam
- 2 Rutschmann
- 3 Chanson
- 4 Hager
- 5 Kokpınar & Goguş
- 6 Pfister

7 Bai
8 Fluent
9 Flow-3D

استفاده می‌کند. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات مورد استفاده نظیر معادلات گسسته‌شده در روش تفاضل محدود است و بر این اساس از روش‌های دقت مرتبه‌ی اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. همچنین این نرم‌افزار، از پنج مدل آشفتگی نظیر مدل‌های گروه نرمال‌شده رینولدز^۲ و کا اسپیلن^۳ استفاده می‌کند.

۲-۱- نحوه مدل‌سازی

مراحل شبیه‌سازی جریان عبوری از روی هواده تندآب سرریز در مطالعه حاضر به شرح زیر است:

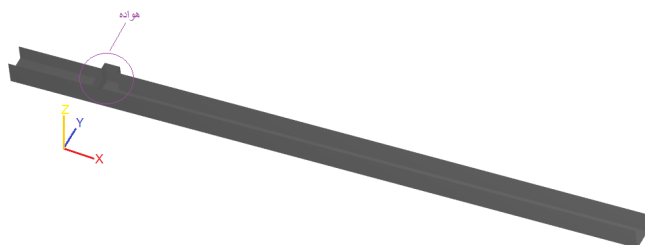
۱. ایجاد مدل سه‌بعدی از هندسه تندآب سرریز و هواده (شکل ۲)؛
۲. مش‌بندی: برای شبکه‌بندی از چهار مش بلوک در سیستم مختصات کارتزین استفاده شده است (شکل ۳). مش‌ها در سه جهت عمود بر هم به طور مستقل تعریف شده است. هدف این مطالعه تعیین تغییرات غلظت هوا در جهت طول (X) و ارتفاع (Z) است، با توجه به اینکه مدل متقارن است، به منظور کاهش حجم محاسبات، از شبکه‌بندی در عرض تندآب صرف نظر شده است. برای حساسیت‌سنجی شبکه، سلول‌های مربعی به ترتیب با ابعاد ۲، ۱/۵، ۱ و ۰/۸ سانتی‌متر و تعداد حدود ۱۵۷۴۵، ۲۰۵۷۱، ۲۵۴۸۶ و ۴۹۲۶۲ امتحان گردید. شکل ۵، مقایسه نتایج شبیه‌سازی به‌ازای سلول‌های ذکر شده را برای هواده با ارتفاع پله ۱۰۰ میلی‌متر، شیب رمپ ۸/۱ درجه و ارتفاع ۱۳/۳ میلی‌متر رمپ، مطابق شکل ۴، روی تندآب با شیب ۳۰ درجه نشان می‌دهد. با توجه به توانایی مدل‌کردن هندسه هواده و زمان شبیه‌سازی کمتر، مش مناسب انتخاب گردید. حساسیت‌سنجی شبکه تا رسیدن به نتایج ثابت و بدون تغییر انجام شده است. شبکه‌بندی با سلول‌های ۱ سانتی‌متر، نزدیک‌ترین نتایج به

است. همچنین افزایش شیب رمپ هواده باعث افزایش ابعاد هواده و میزان غلظت هوا در لایه تحتانی شده است که این امر در تاخیر وقوع کاویتاسیون موثر است. وجود دبی بالا باعث کاهش میزان غلظت هوا در لایه تحتانی شده و این عامل باعث می‌گردد که فاصله هواده‌ها کاهش یابد. مهرآبادی [۱۸]، تاثیر تغییرات دبی و زبری کف و دیواره سرریز را بوسیله نرم‌افزار هک رس^۱، بر روی سرریز سد چندبر بررسی کرد. نتایج نشان داد که کاهش ضریب زبری خطر وقوع پدیده کاویتاسیون را افزایش می‌دهد و با کاهش دبی این خطر به حداقل می‌رسد. تغییرات شاخص کاویتاسیون نیز با شیب خط انرژی رابطه عکس داشته و با افزایش شیب خط انرژی، شاخص کاویتاسیون به کمترین میزان می‌رسد. همچنین تغییرات دبی جریان عامل مهمتری در بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون نسبت به زبری کانال است. نقاط تغییر شیب‌ها در تندآب نیز محل شروع روند تغییرات کاهش‌ی افزایشی شاخص کاویتاسیون است.

همانطور که گفته شد، محققین گذشته خصوصیات جریان هواده‌ی شده را از جنبه‌های مختلفی بررسی کرده‌اند. روش کار اکثر این افراد بصورت آزمایشگاهی بوده که هم هزینه و هم زمان بیشتری لازم دارد. اگرچه مطالعات زیادی در مورد طراحی هواده‌های سرریز وجود دارد اما برای کاربرد عملی کافی نیست. آنچه در تحقیقات گذشته کمتر به آن توجه شده است، بررسی شکل‌های مختلف هواده و اثرات ترکیبی پارامترهای هندسی از جمله ارتفاع و زاویه‌ی رمپ، ارتفاع پله و شیب تندآب بر روند تغییرات غلظت هوا و شاخص کاویتاسیون است. در پژوهش حاضر، با استفاده از یک مدل عددی به بررسی تاثیر این پارامترها بر روی غلظت هوای بستر، غلظت متوسط هوا، سرعت جریان، فشار و شاخص کاویتاسیون پرداخته شده است که می‌تواند در تعیین فاصله‌ی هواده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از دیگر اهداف این تحقیق، بررسی توانایی نرم‌افزار فلوی تری دی در شبیه‌سازی جریان عبوری از هواده تندآب است.

۲- ابزار و روش

نرم‌افزار فلوتری دی، یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده سیالات است، که دارای بازه کاربرد وسیعی است. در شبیه‌سازی جریان هواده‌ی شده، از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی

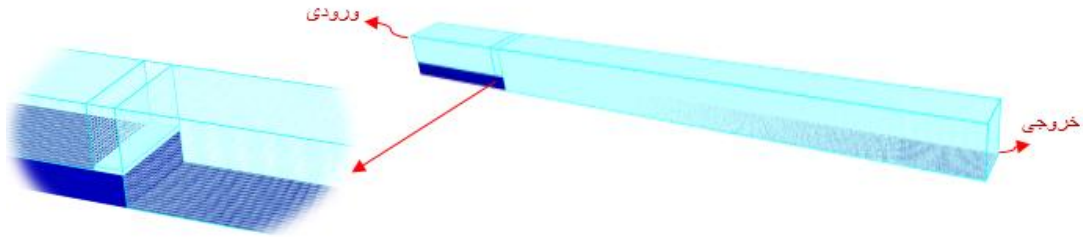


شکل ۲. هندسه صلب تندآب سرریز

Fig. 2. The solid geometry of spillway

- 2 RNG
- 3 k-ε

- 1 HEC-RAS

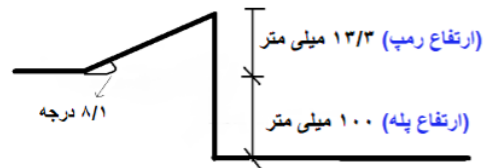


شکل ۳. هندسه و مش بندی شبکه حل و چهار مش بلوک لینک شده در محل هواده

Fig. 3. The geometry and Network mesh and Four mesh blocks linked at the aerator site

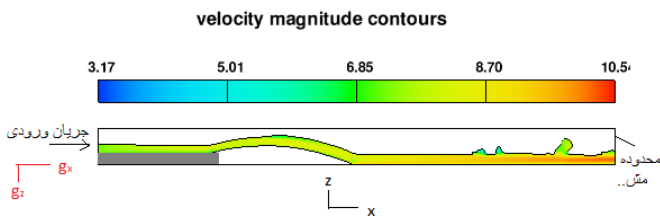
راستای جریان است و نیازی به مولفه‌های کردن سرعت ورودی نیست و همانطور که در شکل مشخص است، شتاب جاذبه‌ی زمین بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} g_x &= 9.81 \sin \varphi \\ g_z &= -9.81 \cos \varphi \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۴. مشخصات هواده جهت صحت سنجی نتایج

Fig. 4. Aerator specifications to validate the results



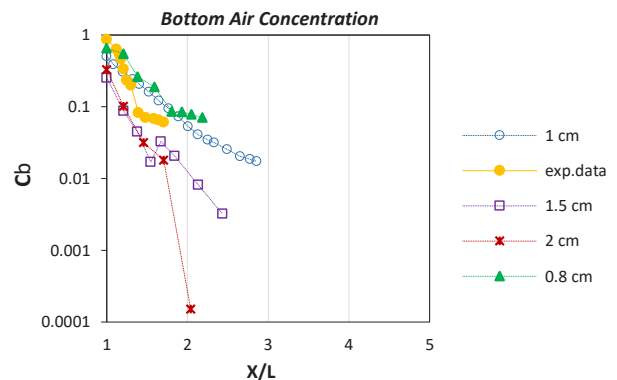
شکل ۶. مقطع طولی خطوط جریان

Fig. 6. Longitudinal section of flow lines

- _ خروجی کانال: بار هیدرولیکی ثابت؛
- _ بستر و جداره‌ها: دیوار؛
- _ مرزهای آزاد و مشترک بین دو بلوک: تقارن.

۲-۲- تعیین ماژولهای مناسب موجود در نرم افزار

در این مقاله، مسئله‌ی ورود هوا به جریان در نرم افزار فلوتری دی بصورت سطح آزاد در تماس با اتمسفر شبیه سازی شده است و در اینجا هواگیری طبیعی مورد نظر است. در یک جریان مخلوط آب و هوا، معاوضه حرکت‌ها بین فاز ناپیوسته هوا و فاز پیوسته و دائمی آب، روی نیروهای بین دو فاز تاثیر می‌گذارد. ورود هوا باعث تغییر چگالی سیال می‌شود و یک رابطه‌ی خطی بین چگالی آب و هوا بوجود می‌آید [۱۹]. این نرم افزار، برای حل معادلات میانگین رینولدزی ناویر-استوکس از تقریبات حجم محدود استفاده و سطح آزاد را به روش حجم سیال^۱، شبیه سازی می‌کند و در آن تمام معادلات با روش



شکل ۵. حساسیت سنجی نسبت به ابعاد مختلف سلول‌ها

Fig. 5. Sensitivity to different cell dimensions

مدل آزمایشگاهی را ارائه می‌دهد.

۳. خصوصیات سیال: آب به عنوان سیال غیر قابل تراکم، با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی (kg/m^3) ۱۰۰۰، لزجت دینامیکی ($kg/m.s$) ۰/۰۰۱ و فشار بخار (Pa) 2.383×10^3 و همچنین هوا با چگالی ۱/۲۲، لزجت دینامیکی ۰/۰۰۰۱۸۳ تعریف شده است.

۴. اعمال شرایط مرزی: شرایط مرزی برای هر یک از مرزها به صورت جداگانه به شرح زیر تعریف شده است:

_ ورودی کانال: سرعت ثابت؛

نرم افزار خطوط جریان ورودی را عمود بر مرز در نظر می‌گیرد.

برای اعمال شیب شوت (φ)، خطوط جریان ورودی عمود بر مرز در

1 VOF (Volume Of Fluid)

سیال محاط و یکی سیال پخش شده در آن می باشد توصیف می کند. برای جریان تراکم پذیر اختلاط آب و هوا، رابطه ی تعادل مومنتم برای فاز ترکیبی پیوسته برابر است با:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \cdot \nabla u_1 = -\frac{1}{\rho_1} \nabla P + G + f + \frac{K}{F \rho_1} u_r \quad (5)$$

برای فاز ناپیوسته بصورت زیر است:

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \cdot \nabla u_2 = -\frac{1}{\rho_2} \nabla P + G + f + \frac{K}{(1-F)\rho_2} u_r \quad (6)$$

با کم کردن این دو معادله از هم، رابطه زیر برای سرعت نسبی

حاصل می شود:

$$u_r = \left(\frac{V_p}{K_p} \right) \frac{F(\rho_2 - \rho_1)}{\bar{\rho}} \nabla P \quad (7)$$

$$V_p = \frac{(1-F)}{n} \quad (8)$$

در این روابط u_1 و u_2 سرعت های میکروسکوپی و ρ_1 و ρ_2 چگالی به ترتیب برای فاز پیوسته و فاز ناپیوسته است. f شتاب لزجت، G شتاب حجمی، F جزء حجمی فاز پیوسته، بخش کسری حجم سلول در هر شبکه محاسباتی است که توسط سیال پر شده است و در نواحی داخلی سیال مقدار آن یک است، K ضریب درگ مربوط به برهمکنش دو فاز، V_p حجم ذرات، n تعداد ذرات و u_r سرعت نسبی بین دو فاز است. در نتیجه چگالی متوسط جریان اختلاط آب و هوا، بصورت زیر به دست می آید [۲۰]:

$$\bar{\rho} = F \rho_1 + (1-F) \rho_2 \quad (9)$$

طبق راهنمای نرم افزار، برای گزینه ی مدل ورود هوا وقتی قرار است از مدل آشفتگی استفاده شود، پیشنهاد می شود که از مدل های دو معادله ای گروه نرمال شده رینولدز و کا اپسین استفاده شود. شکل ۷، مقایسه نتایج شبیه سازی برای این دو مدل را با نتایج آزمایشگاهی برای هواده با مشخصات شکل ۳، نشان می دهد.

از آنجایی که هدف اصلی در این تحقیق بررسی اختلاط است و مدل آشفتگی گروه نرمال شده رینولدز توانایی خوبی در مدل سازی جزئیات

کسر مساحت-حجم مانع^۱، نوشته می شود. موقعیت سیال توسط تابع حجم سیال، $F(x,y,z,t)$ تعریف می شود. این تابع، حجم سیال فاز پیوسته را در واحد حجم بیان می کند:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x}(F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(F A_z w) \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (2)$$

که در آن V_F کسری از حجم باز برای سیال آب، F_{DIF} ترم انتشار آشفتگی، F_{SOR} مربوط به منبع جرم است. پارامترهای (u,v,w) مولفه های سرعت در سیستم مختصات (x,y,z) هستند. Ax کسری از سطح باز در جهت x است. ترم انتشار آشفتگی بصورت زیر تعریف می شود:

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[u_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[u_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[u_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right] \right\} \quad (3)$$

که در آن u_F ضریب پخش است و طبق رابطه ی زیر تعریف می شود:

$$u_F = \frac{C_F \mu}{\rho} \quad (4)$$

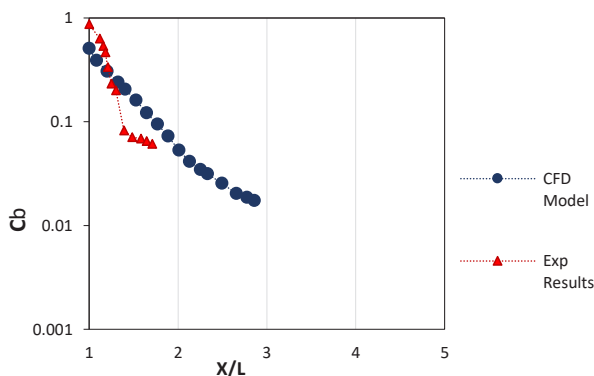
که در آن C_F ثابتی است که عکس آن بیانگر عدد اشمیت در حالت متلاطم است. این ترم انتشار، فقط تشخیص اختلاط آشفتگی دو سیال را نشان می دهد که توزیع آن توسط تابع F تعریف می شود. برای مدل سازی اختلاط آب و هوا به عنوان دو فاز مختلف، علاوه بر مدل ورود هوا^۲ و کشش سطحی^۳ و چگالی متغیر^۴ از مدل شار شناوری^۵ در نرم افزار استفاده شده است. ایده اصلی در مدل شار شناوری این است که حرکت نسبی بین مولفه ها می تواند بصورت پیوسته و زنجیروار نسبت به اجزاء گسسته مانند ذرات صورت بگیرد. این بازده محاسبات را بالا می برد و نیازی به دنبال کردن حرکت و فعل و انفعال اجزاء پراکنده در محاسبات نیست. در این مورد، حباب های هوا می توانند به علت تفاوت چگالی شان در آب حرکت کنند و اگر اجازه داشته باشند از سطح آزاد خارج شوند. در این صورت، مدل مقادیری را تحت عنوان جزء حجمی هوای ورودی محاسبه و ذخیره می کند. این مدل رابطه ی بین دو سیال مخلوط شده درهم را که یکی

- 1 FAVOR
- 2 Air Entrainment
- 3 Surface tension
- 4 Density evaluation
- 5 Drift-flux

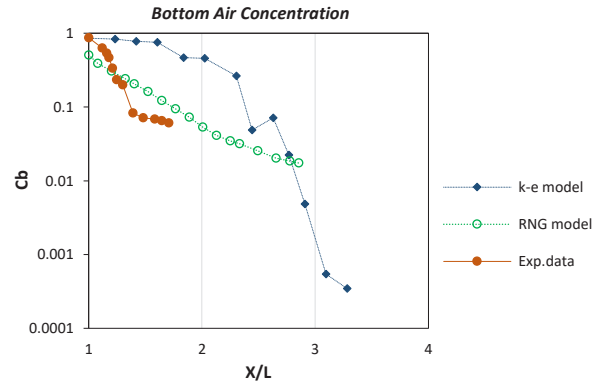
۳- نتایج و بحث ۳-۱- مدل فیزیکی

در پژوهش حاضر برای صحت‌سنجی نتایج، مدل آزمایشگاهی فیشر و هیگر در سال ۲۰۱۰، شامل یک تندآب به طول ۶ متر و عرض ۰/۳ متر در آزمایشگاه هیدرولیک زوریخ مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها ارتفاع ورودی برابر ۶۷ میلی‌متر و عدد فرود اولیه برابر ۹، بوسیله‌ی یک جت باکس ایجاد شده است. طول ناحیه‌ی جریان ورودی قبل از هواده حدود ۲ متر جهت توسعه‌یافتگی جریان در نظر گرفته شده است. پخش غلظت هوا با یک میله فیبر نوری اندازه گرفته شده و این وسیله $C(x,z)$ ، مجموع مقادیر هوای واردشده و بدام‌انداخته‌شده را نشان می‌دهد [۹]. مقدار غلظت هوای پایین‌دست هواده، ملاک صحت‌سنجی می‌باشد. شکل ۸، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای غلظت هوای بستر در طول تندآب با شیب ۳۰ درجه، برای هواده با ارتفاع پله ۱۰۰ میلی‌متر، شیب رمپ ۸/۱ درجه و ارتفاع ۱۳/۳ میلی‌متر رمپ (شکل ۴) را نشان می‌دهد. نتایج در مقیاس نیمه لگاریتمی ارائه شده است و مقادیر نقطه به نقطه تفاوت‌هایی دارند؛ اما نتایج عددی و آزمایشگاهی با وجود میزان خطای حداکثر ۴۰ درصد، روند تغییرات مشابه‌ای را نشان می‌دهند. توجه به این نکته ضروری است که حتی در مدل‌های آزمایشگاهی و برداشت‌های انجام‌شده، میزانی خطا وجود دارد.

علاوه بر مقایسه‌ی نتایج در طول تندآب، مقادیر غلظت هوا در عمق جریان با رابطه‌ی وود [۲۱]، مقایسه شده و در شکل ۹، نشان داده شده است. مقایسه‌ی نتایج در این حالت استناد به نتایج عددی را قابل قبول می‌نماید.



شکل ۸. مقایسه غلظت هوای تحتانی مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی
Fig. 8. Comparison of numerical & experimental Bottom air concentration



شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های k-ε و RNG
Fig. 7. Comparison of RNG and k-ε model results

کوچک جریان دارد، با توجه به نتایج نرم‌افزار، این مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی انتخاب گردید. این مدل بر اساس روش گروه نرمال شده است و از روشهای آماری برای استخراج معادلات متوسط برای کمیت‌های آشفتگی مانند انرژی جنبشی و نرخ پراکنش آن، استفاده می‌کند. این مدل از معادلاتی مانند مدل کا اسیلین استفاده می‌کند. با این وجود، ثابت‌هایی که بصورت تجربی در معادلات کا اسیلین استفاده شده است، در مدل گروه نرمال‌شده رینولدز بصورت صریح استخراج شده است. معادله انتقال برای انتشار آشفتگی برابر است با:

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + \omega A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{CDISI1/\varepsilon_T (P_T + CDISI3) + Diff_\varepsilon - CDISI2 \frac{\varepsilon_T^2}{K_T}}{K_T} \quad (10)$$

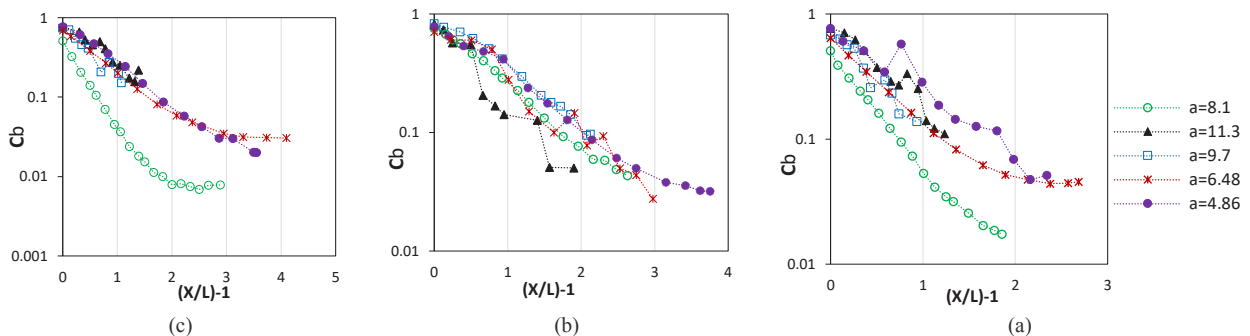
V_f کسری از حجم سیال، A_x ، A_y و A_z کسری از سطح، ω ، v ، u ، مولفه‌های سرعت در مختصات کارتزین هستند. در این معادله $CDISI1$ و $CDISI3$ به ترتیب دارای مقادیر پیش‌فرض ۱/۴۲ و ۰/۲ هستند. مقدار $CDISI2$ با استفاده از ترم‌های kT انرژی جنبشی و PT محصول آشفتگی محاسبه می‌شود. $Diff$ انتشار پراکندگی برابر است با:

$$Diff_\varepsilon = \frac{1}{V_f} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\varepsilon A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) \right\} \quad (11)$$

هدف اصلی هر مدل آشفتگی، فراهم کردن مکانیزمی برای تخمین تاثیر نوسانات آشفتگی در کمیت‌های متوسط جریان است. این تاثیر معمولاً با ترم‌های انتشار اضافی در معادلات متوسط پیوستگی، مومنتم و معادله‌ی انتقال انرژی بیان می‌شود.

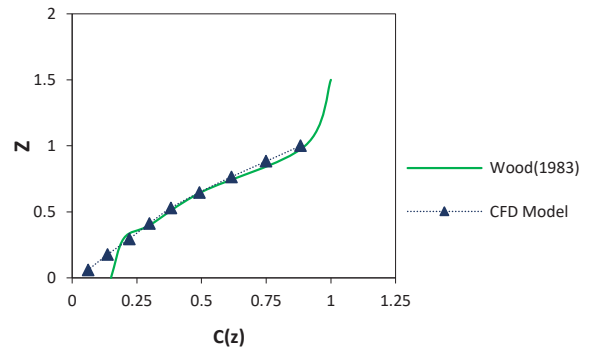
بعد از هواده در ناحیه‌ی اول ($0 < x/L < 1$)، بصورت جت با خط سیر سهمی شکل است. بعد از برخورد جت به کف تندآب، جریان در ابتدا خط سیر جت را دنبال می‌کند و در ناحیه‌ی دوم ($1 < x/L < 3$)، یعنی منطقه پیوستگی و افشانه‌ها، عمق جریان نسبت به عمق آن در ناحیه‌ی اول کاهش پیدا می‌کند و در طول مسیر به دلیل هواگیری سطح آزاد تحت نوسان است. بعد از این ناحیه، با دور شدن از هواده به دلیل کاهش هواگیری، جریان دچار افت سطح آب می‌شود.

شکل ۱۰، روند تغییرات غلظت هوای تحتانی بعد از برخورد جت به کف تندآب، برای هواده با ارتفاع ثابت رمپ برابر $13/3$ میلی‌متر، به ازای شیب‌های مختلف رمپ و ارتفاع متفاوت پله، روی تندآب با شیب 30° درجه را نشان می‌دهد. به طور کلی در نمودارها طول تندآب، نسبت به طول پرش جت جریان، بی‌بعد شده است. برای هواده‌های شکل ۱۰ (الف)، با افزایش زاویه‌ی رمپ از $4/86$ تا $8/1$ درجه، غلظت هوای تحتانی کاهش و در نتیجه مطابق شکل ۱۱، با افزایش زاویه‌ی رمپ، گرادیان خروج هوا افزایش یافته است. برای زاویه‌های رمپ $9/7$ و $11/3$ ، غلظت هوای تحتانی آن نسبت به زاویه‌ی $8/1$ درجه، افزایش یافته است و برای این زوایا، گرادیان خروج هوا کاهش می‌یابد. علت این امر این است که برای زاویه‌های $9/7$ و $11/3$ افزایش هواگیری سطحی، مانع خروج هوا از جریان شده است. برای هواده‌های شکل ۱۰ (ب)، با افزایش زاویه‌ی رمپ، تا $8/1$ درجه، رشد خروج هوا زیاد می‌شود و برای زاویه‌ی $9/7$ درجه، کمی کاهش می‌یابد و برای زاویه‌ی بعدی افزایش یافته است. همچنین برای شکل ۱۰ (ج)، گرادیان خروج هوا نوسان دارد. در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع پله به طور کلی گرادیان خروج هوا افزایش یافته است. در واقع افزایش ارتفاع پله موجب شده تا هوای بیشتری به جریان وارد شود و همچنین رشد خروج هوا از جریان نیز بیشتر شود.



شکل ۱۰. روند تغییرات غلظت هوای تحتانی به ازای شیب‌های مختلف رمپ، شیب تندآب 30° ارتفاع پله: (الف) $s=100$ ، (ب) $s=45$ ، (ج) $s=0$

Fig. 10. Bottom air concentration profiles- chute angle:30°-offset angle: (a)s=100, (b)s=45, (c)s=0



شکل ۹. مقایسه مقادیر غلظت هوا با رابطه‌ی وود (۱۹۸۳)

Fig. 9. Comparison of air concentration with Wood's relation(1983)

در ادامه حساسیت‌سنجی غلظت هوا و خصوصیات جریان نسبت به پارامترهای هندسی هواده ارائه می‌گردد.

۳-۲- تاثیر پارامترهای هندسی هواده بر روی غلظت هوای جریان

۳-۲-۱- غلظت هوا در بستر سرریز (Cb)

تغییرات غلظت هوای بستر مشابه روابط مای و کرامر [۱، ۲۲]، به صورت نمایی در نظر گرفته شده است و گرادیان خروج هوا بررسی شده است:

$$C_b = C_{x/L, jet=1} e^{-m((x/L)_{jet}-1)} \quad (12)$$

که در آن $C_{x/L, jet=1}$ ، غلظت هوای بستر در محل برخورد جت جریان به کف تندآب و L طول پرش جت جریان و m ضریبی است که حساسیت‌سنجی برای آن انجام می‌شود.

هیگر و فیشر [۹] در آزمایشات نشان دادند که عبور هوای پایین‌دست یک هواده می‌تواند به سه منطقه کلی تقسیم شود. جریان

ارتفاع رمپ، گرادیان خروج هوا افزایش می‌یابد. اما در ارتفاع ۱۰/۶۴ و ۱۸/۶۲ میلی‌متر نسبت به ارتفاع قبل خود کاهش داشته است؛ زیرا در این حالت افزایش ارتفاع رمپ باعث افزایش ورود هوا از طریق هواگیری سطحی شده و از خروج هوا جلوگیری شده است.

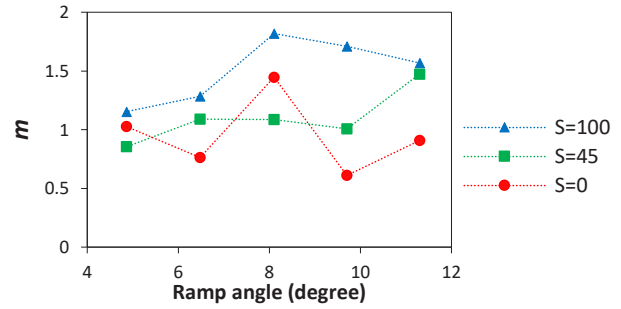
۲-۲-۳- غلظت متوسط هوا (Ca)

غلظت متوسط، نماینده‌ی هوای بدام انداخته شده در طول جریان است. غلظت متوسط در عمق جریان بعد از برخورد جت به کف تندآب، بصورت زیر بین کف تندآب تا سطح جریان تعریف می‌شود [۹]:

$$C_a = \frac{1}{z_u} \int_0^{z_u} C(z) dz \quad (13)$$

که در آن C_a ، غلظت متوسط و z ، مختصات عمودی از کف تندآب است. با مقایسه نتایج غلظت متوسط حاصل از نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی هیگر حداکثر میزان خطا، ۱۵ درصد است.

شکل ۱۲، تغییرات غلظت متوسط هوا بعد از هواده، در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب ($x/L=1$) و میانه‌ی ناحیه‌ی دوم ($x/L=2$) و همچنین ناحیه دورتر از هواده را به ازای شیب‌های مختلف رمپ، با ارتفاع ثابت رمپ برابر ۱۳/۳ میلی‌متر، برای سه ارتفاع پله، برابر ۱۰۰، ۴۵ و صفر نشان می‌دهد. شکل ۱۳، تغییرات غلظت متوسط هوا در ناحیه‌های مذکور بعد از هواده، به ازای تغییرات ارتفاع رمپ، با شیب ثابت رمپ برابر ۸/۱ درجه، روی تندآب با شیب ۵۰ درجه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، روند خاصی بین افزایش پارامترهای مذکور با غلظت متوسط هوا مشاهده نمی‌شود. به طور کلی این روند تغییرات برای تندآب‌هایی با شیب ۱۰، ۱۲،

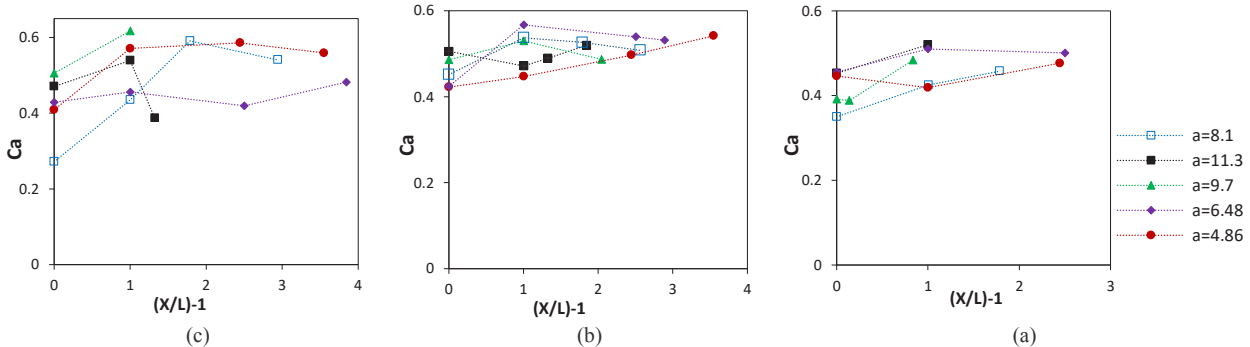


شکل ۱۱. تغییرات گرادیان خروج هوا به عنوان تابعی از شیب رمپ

Fig. 11. Airflow gradient changes as a function of ramp gradient

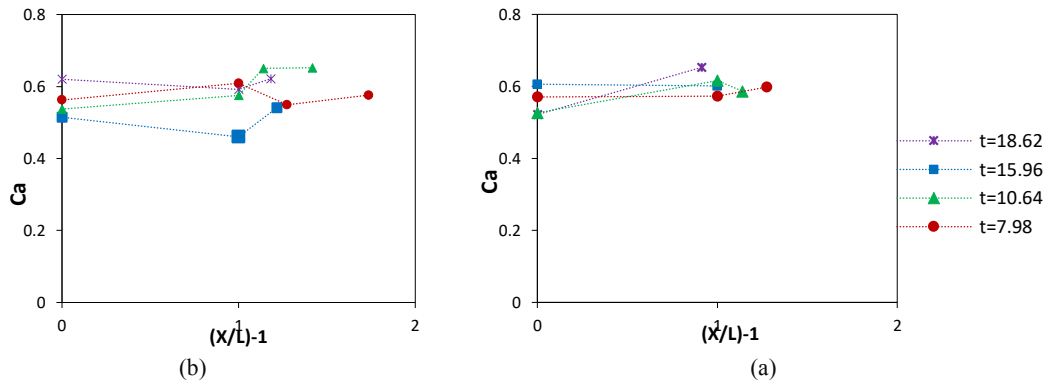
به همین ترتیب، روند تغییرات غلظت برای این هواده‌ها روی تندآب‌هایی با شیب ۱۲ و ۵۰ درجه هم بررسی گردید و نتایج حاصل، روند تغییرات مشابه را نشان می‌دهد.

همچنین به منظور بررسی تاثیر ارتفاع رمپ هواده، تغییرات غلظت هوای بستر سرریز در یک شیب ثابت رمپ برابر ۸/۱ درجه، به ازای تغییرات ارتفاع رمپ برابر ۱۳/۳، ۷/۹۸، ۱۰/۶۴، ۱۵/۹۶ و ۱۸/۶۲ میلی‌متر و تغییرات ارتفاع پله برابر ۱۰۰، ۴۵ و صفر بررسی گردید. نتایج به دست آمده برای تندآب با شیب ۳۰ درجه، نشان می‌دهد که برای هواده‌هایی با ارتفاع پله ۱۰۰ و صفر میلی‌متر، با افزایش ارتفاع رمپ، گرادیان خروج هوا افزایش یافته است و در ارتفاع ۱۵/۹۶ میلی‌متر، گرادیان خروج هوا نسبت به حالت قبل و بعد خود کاهش یافته است. برای هواده‌هایی با ارتفاع پله ۴۵ میلی‌متر، مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع رمپ، گرادیان خروج هوا کاهش یافته است. به طور کلی در این حالت، ملاحظه می‌گردد که افزایش ارتفاع پله، موجب افزایش گرادیان خروج هوا شده است. به همین ترتیب روند تغییرات غلظت برای این هواده‌های روی تندآب‌هایی با شیب ۱۰ و ۵۰ درجه هم بررسی گردید و مشاهده می‌شود، با افزایش



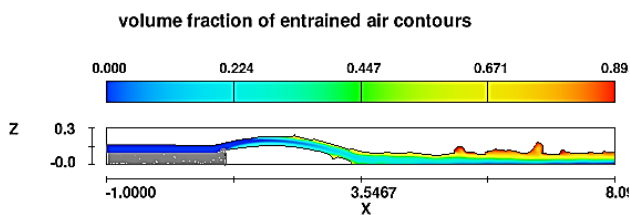
شکل ۱۲. روند تغییرات غلظت متوسط هوا به ازای شیب‌های متفاوت رمپ، شیب تندآب ۳۰° ارتفاع پله: الف) $s=100$ ، ب) $s=45$ ، ج) $s=0$

Fig. 12. Average air concentration profiles- chute angle:30°-offset angle: (a) $s=100$, (b) $s=45$, (c) $s=0$



شکل ۱۳. روند تغییرات غلظت متوسط هوا به ازای ارتفاع متفاوت رمپ، شیب تندآب -۵۰- ارتفاع پله: الف) $s=100$ ، ب) $s=45$.

Fig. 13. Average air concentration profiles- chute angle:50-offset angle: (a) $s=100$, (b) $s=45$



شکل ۱۴. نمایش توزیع لایه‌ای غلظت هوا

Fig. 14. Volume fraction of entrained air contours

تغییرات ارتفاع پله، با شیب ثابت رمپ برابر ۸/۱ درجه، روی تندآب با شیب ۳۰ درجه نشان می‌دهد.

طبق نتایج، برای هواده‌های شکل ۱۵ (الف)، با ارتفاع ۷/۹۸ میلی‌متر رمپ، با افزایش ارتفاع پله مقدار سرعت زیاد شده است. برای هواده‌های شکل ۱۴ (ب)، با ارتفاع ۱۰/۶۴ میلی‌متر رمپ، با بررسی سرعت‌ها در ناحیه‌ی اول ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع پله، مقدار سرعت اندکی کاهش می‌یابد و در ناحیه‌ی دوم، مقدار سرعت در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین مقدار و با پله ۱۰۰ میلی‌متر کمترین مقدار را دارد. در ناحیه‌ی سوم نیز با افزایش ارتفاع پله، سرعت روند کاهشی دارد و در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر کمترین مقدار سرعت وجود دارد. در شکل ۱۵ (ج)، برای هواده‌هایی با ارتفاع ۱۵/۹۶ میلی‌متر رمپ، با افزایش ارتفاع پله در ناحیه اول، مقدار سرعت اندکی کاهش یافته است و در ناحیه‌ی دوم، روند افزایشی دارد و در ناحیه‌ی سوم مقدار سرعت در حالت هواده با پله ۱۰۰ میلی‌متر بیشترین مقدار و با پله ۴۵ میلی‌متر کمترین مقدار را دارد. در شکل ۱۵ (د)، برای هواده‌هایی با ارتفاع ۱۸/۶۲ میلی‌متر رمپ، در ناحیه‌ی اول مقدار سرعت در حالت هواده با پله ۱۰۰ میلی‌متر، بیشترین مقدار و با پله ۴۵ میلی‌متر کمترین مقدار را دارد. در ناحیه‌ی دوم با افزایش ارتفاع پله نیز سرعت اندکی زیاد می‌شود. در ناحیه‌ی سوم مقدار

۳۰ و ۵۰ درجه هم بررسی گردید. ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب تندآب، غلظت متوسط هوا روند افزایشی دارد و این با نتایج وود در سال ۱۹۸۳ [۲۱]، مطابق است.

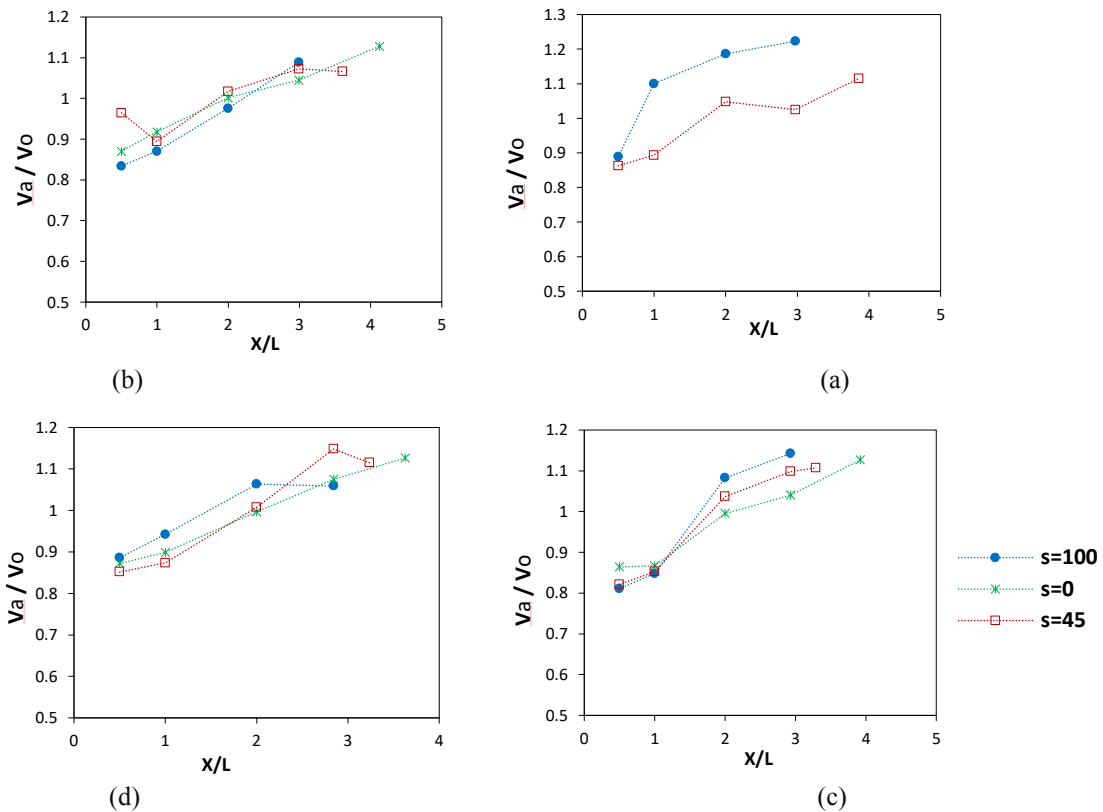
طبق شکل ۱۴، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که غلظت متوسط هوا توزیع لایه‌ای دارد. با توجه به شکل، عبور هوا در طول سطح فوقانی آب از ناحیه‌ی دوم به بعد، تحت تاثیر هیچ عاملی ادامه دارد. در لایه‌ی سطحی جریان، میزان غلظت متوسط به دلیل بدام‌انداخته شدن هوا بوسیله‌ی افشانه‌ها، بسیار زیاد است که برای محافظت بستر تندآب از کاویتاسیون در دسترس نیست.

۳-۳- تاثیر پارامترهای هندسی هواده بر روی خصوصیات

جریان

۳-۳-۱- سرعت

مهم‌ترین ویژگی یک جریان که سایر مشخصات نیز به طور مستقیم به آن بستگی دارند، میدان سرعت است. تشکیل گردابه‌های کوچک و بزرگ در اطراف جسم، جدایی جریان و موقعیت به وجود آمدن آنها نقش تعیین کننده در میدان‌های سرعت، فشار و سایر دارد. طبق نتایج، جریان قبل از رسیدن به هواده در فاصله‌ی ۱/۸۸۹ متری از ابتدا کانال به شکل توسعه یافته است. در طول جت جریان (ناحیه اول)، سرعت بدلیل ورود هوا کاهش می‌یابد. در ناحیه‌های بعدی در طول سرریز، سرعت جریان بدلیل خروج هوا روند افزایشی دارد. شکل ۱۵، تغییرات بی‌بعد شده‌ی سرعت متوسط جریان را بعد از هواده در میانه‌ی ناحیه‌ی اول ($x/L=0/5$) و نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب ($x/L=1$) و میانه‌ی ناحیه‌ی دوم ($x/L=2$) و همچنین ناحیه‌ی دورتر از هواده (ناحیه‌ی سوم)، به ازای تغییرات ارتفاع رمپ و



شکل ۱۵. سرعت متوسط جریان - شیب تندآب ۳۰°، ارتفاع رمپ: الف) $tr = 7/98$ ، ب) $tr = 10/64$ ، ج) $tr = 15/96$ ، د) $tr = 18/62$ mm
Fig. 15. Flow Dimensionless Velocity- chute angle:30° - Ramp height: (a) $tr = 7.98$, (b) $tr = 10.64$, (c) $tr = 15.96$, (d) $tr = 18.62$ mm

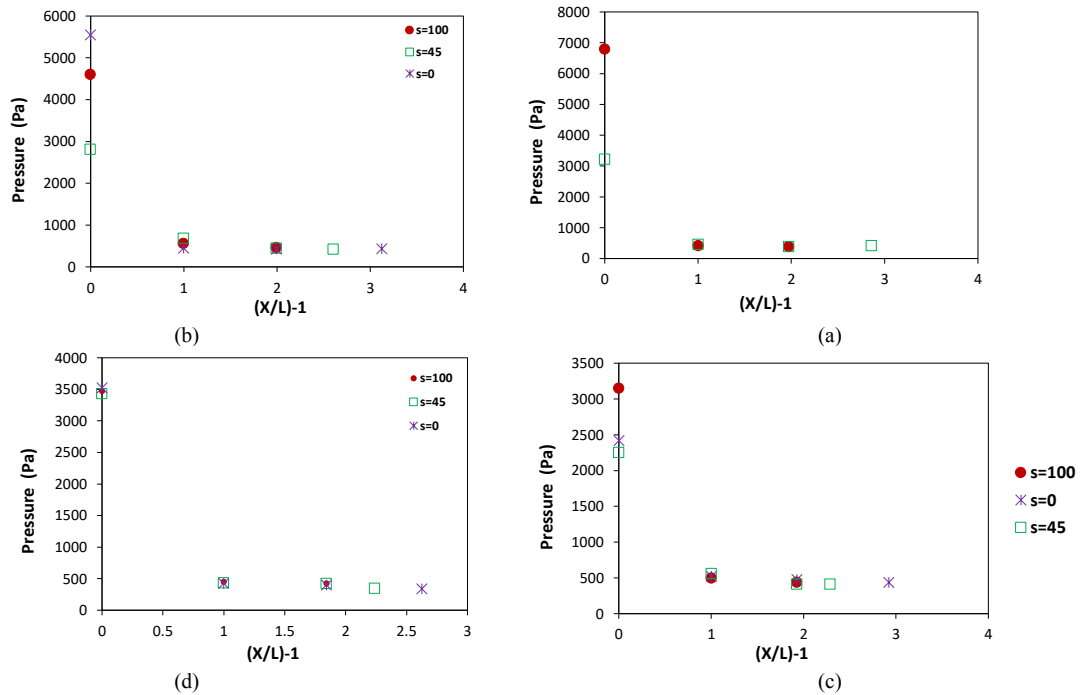
در طول تندآب کاهش می‌یابد. کاهش فشار در نزدیکی بستر تندآب موجب وقوع کاویتاسیون می‌شود. در طول بستر، بیشترین مقدار فشار در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب وجود دارد. در ادامه به حساسیت‌سنجی فشار وارد شده به بستر تندآب نسبت به پارامترهای هندسی هواده پرداخته شده است.

شکل ۱۶، تغییرات فشار در نزدیکی بستر در طول تندآب بعد از برخورد جت به کف تندآب، به ازای تغییرات ارتفاع رمپ و تغییرات ارتفاع پله، با شیب ثابت رمپ برابر ۸/۱ درجه، روی تندآب با شیب ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. برای هواده‌های شکل ۱۶ (الف)، با ارتفاع ۷/۹۸ میلی‌متر رمپ، مقدار فشار با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف زیاد شده است و در نواحی بعد اندکی کاهش یافته است. در شکل ۱۶ (ب)، برای هواده‌هایی با ارتفاع ۱۰/۶۴ میلی‌متر رمپ، مقدار فشار با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف، کاهش یافته است و در نواحی بعد اندکی زیاد شده است. در شکل ۱۶ (ج)، برای هواده‌هایی با ارتفاع ۱۵/۹۶ میلی‌متر رمپ، مقدار فشار در نقطه‌ی برخورد جت با کف، زیاد شده است و در ناحیه‌ی دوم،

سرعت با افزایش ارتفاع پله، کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع رمپ، مقدار سرعت اندکی کاهش می‌یابد. با بررسی این هواده‌ها برای شیب تندآب ۱۰ درجه نیز نتایج مشابه بدست آمد. اما در شیب ۵۰ درجه تندآب، با افزایش ارتفاع رمپ، مقدار سرعت اندکی افزایش می‌یابد و به طور کلی با افزایش شیب تندآب، مقدار سرعت افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، روند تغییرات سرعت متوسط در طول تندآب برای شیب‌های متفاوت رمپ شامل ۴/۸۶، ۶/۴۸، ۸/۱، ۹/۷ و ۱۱/۳ هم بررسی گردید و ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب رمپ هواده‌ها برای شیب تندآب ۳۰ و ۱۲ درجه، مقدار سرعت اندکی کاهش می‌یابد. اما در شیب ۵۰ درجه تندآب، با افزایش شیب رمپ، مقدار سرعت اندکی افزایش می‌یابد.

۳-۳-۲- فشار

همان‌طور که در قسمت قبل ملاحظه گردید، در طول تندآب، سرعت جریان بدلیل خروج هوا روند افزایشی دارد و در نتیجه فشار



شکل ۱۶. تغییرات فشار جریان - شیب تندآب ۳۰°، ارتفاع رمپ: الف) tr=۷/۹۸، ب) tr=۱۰/۶۴، ج) tr=۱۵/۹۶، د) tr=۱۸/۶۲
Fig. 16. Flow Pressure - chute angle:30° - Ramp height: (a) tr =7.98, (b) tr =10.64, (c) tr =15.96, (d) tr =18.62 mm

درجه تندآب، با افزایش شیب رمپ، مقدار فشار اندکی کاهش می‌یابد.

۳-۳-۳- شاخص کاویتاسیون

نرم‌افزار فلوتری دی برای مشخص کردن کاویتاسیون در فایل خروجی، مقداری به نام nf دارد که مشخص‌کننده وضعیت سیال در نقاط مورد نظر است و مقداری برابر با عدد ۷ در نرم‌افزار نمایانگر تشکیل کاویتاسیون در آن نقطه می‌باشد؛ ولی از مدل کاویتاسیون نرم‌افزار در تحقیق حاضر استفاده نشده است. لذا در این تحقیق با برداشت فشار در نقاط کف تندآب، شاخص کاویتاسیون از رابطه‌ی (۱۴) به دست آمده است.

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2}\rho u^2} \quad (14)$$

که در آن σ شاخص کاویتاسیون، P_o (N/m²) مجموع فشار پیزومتریک سیال و فشار اتمسفر است و P_v (N/m²) فشار بخار آب، ρ (kg/m³) چگالی جریان آب و هوا و u (m/s) سرعت متوسط جریان است [۲۳]. طبق نتایج ارائه‌شده به وسیله مصوبات دفتر ایالات متحده^۱، در صورتی که شاخص کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲۵

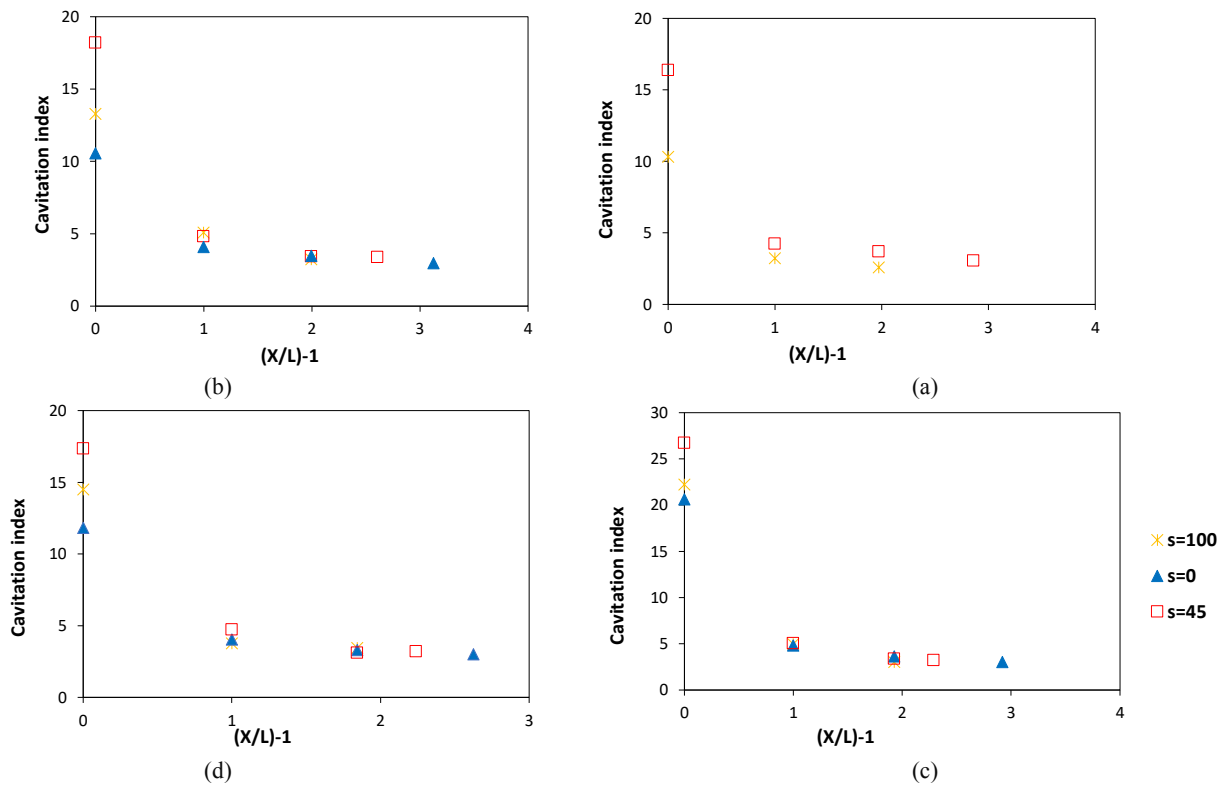
مقدار فشار در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر، بیشترین مقدار و با پله ۱۰۰ میلی‌متر، کمترین مقدار را دارد. در ناحیه‌ی سوم با افزایش ارتفاع پله، مقدار فشار اندکی زیاد می‌شود. برای هواده‌های شکل ۱۶ (د)، با ارتفاع ۱۸/۶۲ میلی‌متر رمپ، مقدار فشار با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف، کاهش می‌یابد و در ناحیه‌ی دوم و در ناحیه‌ی سوم، فشار روند افزایشی دارد.

همچنین با مقایسه‌ی شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع رمپ در ناحیه‌ی دوم و سوم بعد از هواده، مقدار فشار افزایش می‌یابد؛ اما مقدار این تغییرات بسیار ناچیز است.

با بررسی این هواده‌ها برای شیب تندآب ۱۰ درجه نیز نتایج مشابه بدست آمد. اما در شیب ۵۰ درجه تندآب، با افزایش ارتفاع رمپ، مقدار فشار اندکی کاهش می‌یابد. به طور کلی ملاحظه گردید که در ناحیه‌ی دوم و سوم، با افزایش شیب تندآب مقدار فشار در کف، کاهش می‌یابد.

به همین ترتیب روند تغییرات فشار در طول تندآب برای شیب‌های متفاوت رمپ شامل ۴/۸۶، ۶/۴۸، ۸/۱، ۹/۷، ۱۱/۳ هم بررسی گردید و ملاحظه می‌شود که برای تندآب با شیب ۳۰ و ۱۲ درجه، با افزایش شیب رمپ، در ناحیه‌ی دوم و سوم بعد از هواده، مقدار فشار افزایش می‌یابد؛ اما مقدار این تغییرات بسیار ناچیز است. اما در شیب ۵۰

1 United States Bureau of Reclamation (USBR)



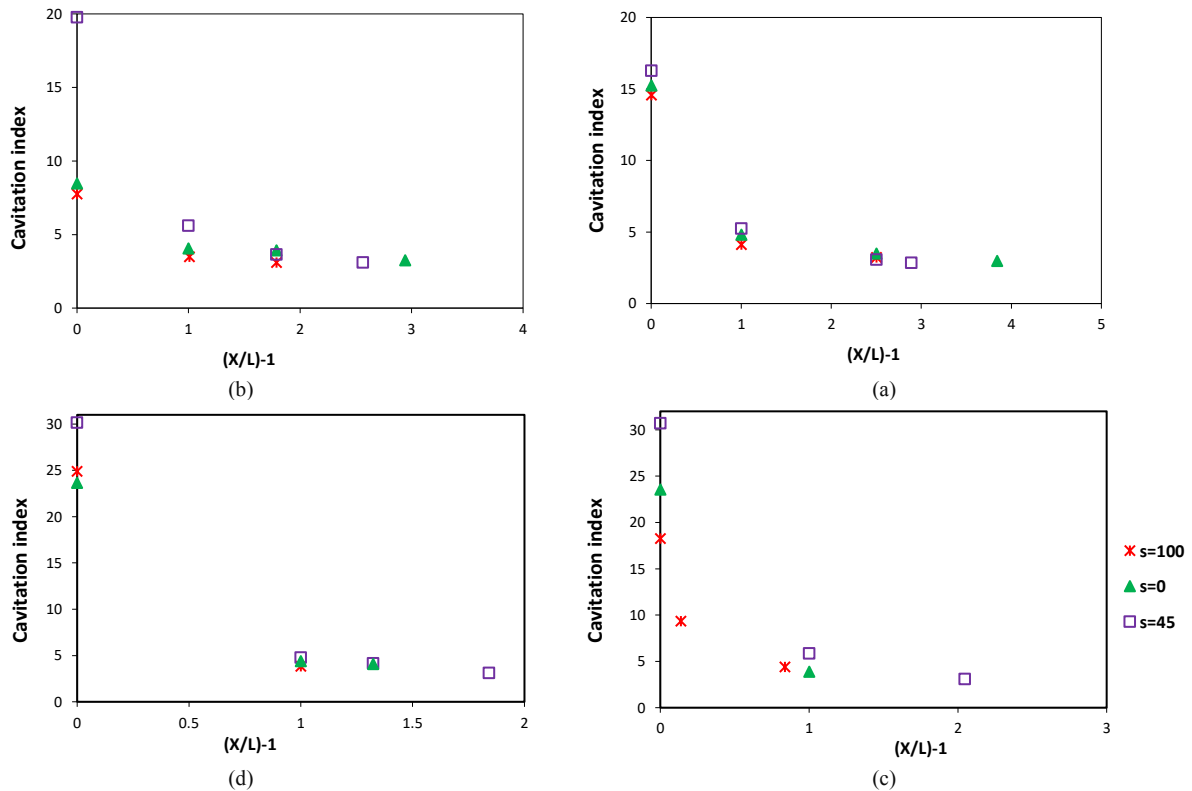
شکل ۱۷. روند تغییرات شاخص کاویتاسیون در طول تندآب شیب تندآب ۳۰° ارتفاع رمپ: الف) $tr = 7.98$ ، ب) $tr = 10.64$ ، ج) $tr = 15.96$ ، د) $tr = 18.62$ mm
Fig. 17. Flow Cavitation index - chute angle:30° - Ramp height: (a) $tr = 7.98$, (b) $tr = 10.64$, (c) $tr = 15.96$, (d) $tr = 18.62$ mm

ارتفاع پله، با شیب ثابت رمپ برابر ۸/۱ درجه، روی تندآب با شیب ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.

برای هواده‌های شکل ۱۷ (الف)، با ارتفاع ۷/۹۸ میلی‌متر رمپ، با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب و ناحیه‌ی دوم و سوم، شاخص کاویتاسیون کاهش یافته است؛ زیرا با افزایش ارتفاع پله، میزان خروج هوا و سرعت نیز افزایش و فشار کاهش می‌یابد. برای هواده‌های شکل ۱۷ (ب)، با ارتفاع ۱۰/۶۴ میلی‌متر رمپ، شاخص کاویتاسیون با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف و ناحیه‌ی دوم و ناحیه‌ی سوم زیاد شده است؛ و در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین مقدار شاخص وجود دارد. در این نواحی با افزایش ارتفاع پله، میزان سرعت کاهش یافته است و باعث زیاد شدن شاخص کاویتاسیون شده است. در شکل ۱۷ (ج)، برای هواده‌هایی با ارتفاع ۱۵/۹۶ میلی‌متر رمپ، شاخص کاویتاسیون با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف و ناحیه‌ی دوم و ناحیه‌ی سوم زیاد شده است؛ و در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین مقدار شاخص وجود دارد. در این نواحی با افزایش ارتفاع پله، میزان سرعت کاهش یافته است و باعث زیاد شدن شاخص کاویتاسیون شده است. در شکل

(برای شیب موافق جریان) باشد، پدیده کاویتاسیون به وجود نمی‌آید، زمانی که مقدار شاخص بین ۰/۲ تا ۰/۲۵ باشد، پدیده کاویتاسیون خسارت اندکی خواهد داشت که در نظر گرفتن هواده الزامی نیست و در نقاطی که کمتر از ۰/۲ باشد، احتمال وقوع این پدیده زیاد است. تجربیات نشان داده است اگر عدد کاویتاسیون بین ۰/۱ تا ۰/۲ باشد، وجود سیستم هواده برای جلوگیری از خسارات ضروری است و در صورتی که شاخص کاویتاسیون کمتر از ۰/۱ باشد، سرریز نیاز به طراحی مجدد دارد [۲۴]. در ادامه نتایج حساسیت‌سنجی شاخص کاویتاسیون جریان نسبت به پارامترهای هندسی هواده ارائه می‌گردد. طبق شکل‌های ۱۷ و ۱۸، در نقطه برخورد جت با کف تندآب ($x/L=1$)، بدلیل سرعت کم و فشار زیاد در این نقطه، میزان غلظت هوا زیاد است و شاخص کاویتاسیون بیشترین مقدار را دارد و با دور شدن از هواده به دلیل خروج هوا مقدار آن در طول تندآب کاهش می‌یابد و در نواحی دورتر یعنی ناحیه‌ی سوم احتمال خطر وقوع کاویتاسیون بیشتر می‌شود.

شکل ۱۷، تغییرات شاخص کاویتاسیون در نزدیکی بستر، بعد از برخورد جت به کف تندآب، به ازای تغییرات ارتفاع رمپ و تغییرات



شکل ۱۸. روند تغییرات شاخص کاویتاسیون در طول تندآب - شیب تندآب ۳۰°، شیب رمپ: الف) $\alpha = 6/48$ ، ب) $\alpha = 8/1$ ، ج) $\alpha = 9/7$ ، د) $\alpha = 11/3$

Fig. 18. Flow Cavitation index - chute angle:30° - Ramp angle: (a) $\alpha = 6.48$, (b) $\alpha = 8.1$, (c) $\alpha = 9.7$, (d) $\alpha = 11.3$

برای هواده‌های شکل ۱۸ (الف)، با زاویه‌ی ۶/۴۸° رمپ، شاخص کاویتاسیون با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف، زیاد می‌شود و مقدار آن در ناحیه‌ی دوم در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین و با پله ۱۰۰ میلی‌متر، کمترین است. مقدار شاخص کاویتاسیون با افزایش ارتفاع پله در ناحیه‌ی سوم، کاهش می‌یابد و در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر، کمترین مقدار را دارد، به این دلیل که با افزایش ارتفاع پله، میزان خروج هوا و سرعت زیاد شده است و جریان در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین میزان سرعت را دارد که باعث کاهش شاخص کاویتاسیون شده است.

در شکل ۱۸ (ب)، برای هواده‌هایی با زاویه‌ی ۸/۱۰° رمپ، شاخص کاویتاسیون در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب و ناحیه‌ی دوم، در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین مقدار و با پله ۱۰۰ میلی‌متر، کمترین مقدار را دارد، در این ناحیه نیز روند تغییرات شاخص کاویتاسیون تحت تاثیر تغییرات سرعت قرار دارد. در ناحیه‌ی سوم نیز با افزایش ارتفاع پله، مقدار شاخص کاویتاسیون کاهش یافته است؛ در این حالت با افزایش ارتفاع پله، میزان خروج هوا و سرعت زیاد شده و از طرفی فشار کاهش یافته است. عملکرد هواده در حالت

۱۷ (د)، برای هواده‌هایی با ارتفاع ۱۸/۶۲ میلی‌متر رمپ، با بررسی شاخص کاویتاسیون در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب، ملاحظه می‌شود که در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر بیشترین مقدار و با پله ۱۰۰ میلی‌متر کمترین مقدار شاخص کاویتاسیون وجود دارد. در ناحیه‌ی دوم و سوم با افزایش ارتفاع پله مقدار شاخص کاویتاسیون زیاد می‌شود؛ در این نواحی نیز روند تغییرات سرعت و فشار بیشترین تاثیر را بر شاخص کاویتاسیون دارد.

به طور کلی با بررسی شاخص کاویتاسیون در ناحیه‌ی دوم و سوم در شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع رمپ، مقدار شاخص کاویتاسیون اندکی زیاد می‌شود.

با بررسی این هواده‌ها برای شیب ۱۰ درجه تندآب، نیز روند تغییرات مشابه بدست آمد. اما در شیب ۵۰ درجه تندآب، با افزایش ارتفاع رمپ، مقدار شاخص کاویتاسیون اندکی کم می‌شود.

شکل ۱۸، تغییرات شاخص کاویتاسیون در نزدیکی بستر، بعد از برخورد جت به کف تندآب، به ازای تغییرات شیب رمپ و تغییرات ارتفاع پله، با ارتفاع ثابت رمپ برابر ۱۳/۳ میلی‌متر، روی تندآب با شیب ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

بدون پله بهتر بوده است.

برای هواده‌های شکل ۱۸ (ج)، با زاویه‌ی ۹/۷۰ رمپ، با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب، مقدار شاخص کم می‌شود و اما در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر، بدلیل تاثیر سرعت و فشار، مقدار شاخص زیاد شده است و در ناحیه‌ی دوم با افزایش ارتفاع پله مقدار آن افزایش یافته است. در شکل ۱۸ (د)، برای هواده‌هایی با زاویه‌ی ۱۱/۳۰ رمپ، با افزایش ارتفاع پله در نقطه‌ی برخورد جت با کف تندآب، مقدار شاخص کاویتاسیون کم می‌شود و در ناحیه‌ی دوم در حالت هواده با پله ۴۵ میلی‌متر، بدلیل کاهش سرعت نسبت به بقیه حالت‌ها مقدار شاخص کاویتاسیون آن زیادتر شده است و عملکرد بهتری دارد و هواده با پله ۱۰۰ میلی‌متر، بدلیل زیادبودن خروج هوا و سرعت، کمترین مقدار شاخص را دارد.

همچنین با بررسی شاخص کاویتاسون در ناحیه‌ی دوم و سوم، ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب رمپ برای هواده با پله ۱۰۰ میلی‌متر، مقدار شاخص زیاد شده است و فقط در زاویه‌ی ۶/۴۸۰ رمپ، کاهش شاخص رخ داده است؛ با اینکه خروج هوا افزایش یافته است اما با افزایش ارتفاع پله، روند کاهش سرعت باعث زیادشدن شاخص کاویتاسیون می‌شود. برای هواده‌های بدون پله و با پله ۴۵ میلی‌متر نیز با افزایش شیب رمپ، مقدار شاخص کاویتاسیون زیاد می‌شود؛ در اینجا نیز با افزایش شیب رمپ، مقدار سرعت کاهش و مقدار فشار افزایش می‌یابد و باعث زیادشدن شاخص کاویتاسیون می‌شود.

با بررسی این هواده‌ها برای شیب ۱۲ درجه تندآب، نیز روند تغییرات مشابه بدست آمد. اما در شیب ۵۰ درجه تندآب، با افزایش ارتفاع رمپ، مقدار شاخص کاویتاسیون اندکی کم می‌شود. به طور کلی ملاحظه گردید که با افزایش شیب تندآب، مقدار شاخص کاویتاسیون کم می‌شود؛ زیرا با توجه به نتایج بدست‌آمده در قسمت‌های قبل، با افزایش شیب تندآب، سرعت‌ها زیاد و فشار کم می‌شود. با افزایش شیب تندآب، افزایش سرعت باعث ایجاد آشفستگی زیاد و در نتیجه ورود هوای زیاد می‌شود و در نتیجه خروج هوا کم می‌شود. در شیب ۵۰ درجه تندآب، با اینکه خروج هوا نسبت به شیب‌های دیگر کمتر است اما میزان شاخص کاویتاسیون کاهش یافته است؛ با توجه به نتایج بدست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که علت این امر این است که با افزایش شیب تندآب، تاثیر سرعت بر شاخص کاویتاسیون بیشتر از دیگر پارامترها است.

۱. مقدار شاخص کاویتاسیون و روند تغییرات آن در طول ۱۱ متر پس از هواده روی تندآب سرریز مورد بررسی قرار گرفت و خطر وقوع کاویتاسیون مشاهده نگردید و با توجه به مقدار غلظت‌های محاسبه‌شده می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که با کاهش غلظت هوا در بستر تندآب تا مقادیر ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۱ به ترتیب برای تندآب‌هایی با شیب ۱۰، ۱۲، ۳۰ و ۵۰ درجه، احتیاجی به هواده دوم نیست. سرعت، فشار و خروج هوا پارامترهای موثر بر مقدار شاخص کاویتاسیون هستند و مشاهده گردید که تاثیر سرعت بر شاخص کاویتاسیون بیشتر از دیگر پارامترها است. روند تغییرات شاخص کاویتاسیون با افزایش ارتفاع پله، ارتفاع رمپ و شیب رمپ متناسب با روند تغییرات سرعت است. در تندآب با شیب ۱۰ و ۳۰ درجه، در ناحیه‌ی دوم و سوم بعد از هواده، با افزایش ارتفاع و شیب رمپ، مقدار شاخص کاویتاسیون اندکی افزایش یافته است و با شیب ۵۰ درجه، با افزایش ارتفاع و شیب رمپ، مقدار آن اندکی کاهش یافته است. همچنین با افزایش شیب تندآب مقدار شاخص کاویتاسون کاهش یافته است.

۲. مشاهده گردید به صورت کلی با افزایش شیب و ارتفاع رمپ و همچنین ارتفاع پله، میزان خروج هوا زیاد می‌شود؛ البته در برخی موارد زوایای بزرگ ۹/۷ و ۱۱/۳ درجه و ارتفاع‌های بلند ۱۵/۹۶ و ۱۸/۶۲ میلی‌متر رمپ مشاهده می‌شود که خروج هوا کاهش یافته است، زیرا در این حالت‌ها افزایش ارتفاع و یا شیب رمپ باعث افزایش ورود هوا از طریق هواگیری سطحی شده و از خروج هوا جلوگیری شده است. همچنین با افزایش شیب تندآب مقدار خروج هوا کاهش یافته است.

۳. روند خاصی بین افزایش ارتفاع و شیب رمپ و افزایش ارتفاع پله با غلظت متوسط هوا مشاهده نگردید؛ در ناحیه‌ی سوم پایین دست هواده، غلظت هوا به صورت لایه‌ای در سطح جریان است. با افزایش شیب تندآب، غلظت متوسط هوا روند افزایشی دارد.

۴. در تندآب با شیب ۱۰ تا ۳۰ درجه، در ناحیه‌ی دوم و سوم بعد از هواده، با افزایش ارتفاع و شیب رمپ، مقدار سرعت اندکی کاهش یافته است و در تندآب با شیب ۵۰ درجه، با افزایش ارتفاع و شیب رمپ، مقدار سرعت اندکی افزایش یافته است. همچنین با افزایش شیب تندآب، مقدار سرعت افزایش می‌یابد.

ρ	چگالی جریان، kg/m^3
ρ_1	چگالی فاز پیوسته، kg/m^3
ρ_2	چگالی فاز ناپیوسته، kg/m^3
φ	شیب تندآب سرریز

زیرنویس

۱	آب
۲	هوا
a	مقدار متوسط
b	بستر تندآب سرریز
r	رمپ

مراجع

- [1] H.T. Falvey, Cavitation in chutes and spillways, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation Denver, Colorado, 1990.
- [2] R. Bai, S. Liu, Z. Tian, W. Wang, F. Zhang, Experimental Investigation of Air–Water Flow Properties of Offset Aerators, Journal of Hydraulic Engineering, 144(2) (2017) 1-10.
- [3] H. Kobus, Introduction to air-water flows, in, Routledge, Germany, 1991, pp. 1-28.
- [4] P. Rutschmann, Belüftungseinbauten in Schussrinnen, in, ETH,Zurich_in German, Mitteilung,97,D. Vischer,ed., Laboratory of Hydraulics ,Hydrology and Glaciology VAW, 1988.
- [5] H. Chanson, A study of air entrainment and aeration devices on a spillway model, Ph.D. thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch, 1988.
- [6] P. Rutschmann, W.H. Hager, Air entrainment by spillway aerators, Journal of Hydraulic Engineering, 116(6) (1990) 765-782.
- [7] M.A. Kökpınar, M. Göğüş, High-speed jet flows over spillway aerators, Canadian Journal of Civil Engineering, 29(6) (2002) 885-898.
- [8] H. Chanson, Flow downstream of an aerator-aerator spacing, Journal of Hydraulic Research 27(4) (1989a) 519-536.
- [9] M. Pfister, W. Hager, Chute aerators. I: Air transport characteristics, Journal of Hydraulic Engineering,

۵. در تندآب با شیب ۱۰ تا ۳۰ درجه، در ناحیه‌ی دوم و سوم بعد از هواده، با افزایش ارتفاع و شیب رمپ، مقدار فشار وارد به بستر اندکی افزایش یافته است و در تندآب با شیب ۵۰ درجه، با افزایش ارتفاع و شیب رمپ، مقدار آن اندکی کاهش یافته است. همچنین با افزایش شیب تندآب، مقدار فشار در کف تندآب کاهش یافته است. روند تغییرات سرعت و فشار با افزایش ارتفاع پله مورد بررسی قرار گرفت و روند تغییرات آنها تحت تاثیر ورود و خروج هوا قرار دارد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

C	غلظت هوای پایین دست سرریز
C_a	غلظت متوسط هوا
C_b	غلظت هوای بستر
F	جزء حجمی فاز پیوسته
f	شتاب لزجت
g	شتاب جاذبه‌ی زمین
G	شتاب حجمی
K	ضریب درگ
L	طول جت، m
P	مجموع فشار پیزومتریک سیال و فشار اتمسفر، N/m^2
Pv	فشار بخار آب، N/m^2
t	ارتفاع رمپ، mm
S	ارتفاع پله، mm
u	سرعت متوسط جریان، m/s
u_1	سرعت‌های میکروسکوپی فاز پیوسته، m/s
u_2	سرعت‌های میکروسکوپی فاز ناپیوسته، m/s
V_a	سرعت متوسط جریان، m/s
V_o	سرعت ورودی جریان، m/s
Z	مختصات عمودی از کف تندآب
Zu	تراز سطح فوقانی آب

علائم یونانی

α	زاویه بین رمپ و سرریز
σ_{CFD}	شاخص کاویتاسیون

- aeration ramp on the flow aeration in the chute, in: 4th International Conference on New Horizons in Civil Engineering, Architecture and Urbanism, New Horizons Science and Technology Association, Tehran, 1397. (In Persian)
- [18] j. Mehrabady, Case study of variables affecting the probability of cavitation on chute, in: 3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management Sharif University of Technology, Tehran, 1398. (In Persian)
- [19] P. Teng, J. Yang, M. Pfister, Studies of two-phase flow at a chute aerator with experiments and CFD modelling, in: Modelling and Simulation in Engineering Hindawi Publishing Corporation, 2016, pp. 1-11.
- [20] M. Marosi, R. Roshan, Analysis and Designing using Flow-3d, FadakIstasis, Tehran, 1393. (In Persian)
- [21] I.R. Wood, Uniform region of self-aerated flow, Journal of Hydraulic Engineering 109(3) (1983) 447-461.
- [22] K. Kramer, Development of Aerated Chute Flow, ETH Zurich, Doctoral Thesis ETH No. 15428, Technical University of Darmstadt (TUD), 2004.
- [23] J.A. Kells, C.D. Smith, Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment, canadian journal of civil engineering 18(3) (1991) 358-377.
- [24] H. Hasanabady, A. Khosrojerdi, Effect of aeration on free dam overflow using Flow-3d, in: Eighth National Congress of Civil Engineering,, Babol, Iran, 1393.(In Persian)
- 136(6) (2010) 352-359.
- [10] M. Pfister, W. Hager, Chute aerators. II: Hydraulic design, Journal of Hydraulic Engineering 136(6) (2010) 360-367.
- [11] M. Pfister, Chute Aerators: Steep deflectors and cavity subpressure, Journal of hydraulic engineering 137(10) (2011) 1208-1215.
- [12] M.C. Aydin, Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways, ISH Journal of Hydraulic Engineering 24 (2017) 1-8.
- [13] R. Bai, S. Liu, Z. Tian, W. Wang, F. Zhang, Experimental investigation of bubbly flow and air entrainment discharge downstream of chute aerators, Environmental Fluid Mechanics, 19(6) (2019) 1455-1468.
- [14] M. Arami, Investigation of aeration on flow overflow, Master's thesis in Civil-Hydraulic Structures, Sistan& Balouchestan university, zahedan, 1390. (In Persian).
- [15] A. Erfanain, A.A. Kamanbedast, Determine the appropriate location of aerator system on gotvandoliadam's spillway using Flow 3D, American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences 13(3) (2013) 378-383.
- [16] k. Golparian, B. Amin nezhad, Numerical Investigation of the Impact of Overflow Aeration Dimensions on Cavitation Index in Free Dam Overflow and Comparison of Results with Laboratory Model in: 4th International Conference on Advanced Technology in Civil Engineering, Tehran, Tehran, 1396. (In Persian).
- [17] s. Rasouli, j. Bazargan, Check the slope of the

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

E. Nakhaei Zeinali, M. Azhdary Moghaddam, Investigation on flow air concentration effect on distance of the chute spillway aerators , Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3135-3150.

DOI: [10.22060/mej.2020.17587.6677](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17587.6677)

