

بررسی عددی مشخصات جریان در انواع مختلف هوادهای سرریز شوت

فاطمه صفی‌لو، فرزین سلماسی*، هادی ارونقی، اکرم عباس‌پور

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

هوادهای سرریز شوت به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش آسیب‌های فرسایشی ناشی از کاویتاسیون، نقش مهمی در حفاظت از سازه‌های شوت ایفا می‌کند. میزان حفاظت ایجاد شده به‌وسیله هوادهی، عمدتاً به طراحی هواده و نحوه توزیع غلظت هوا در جریان وابسته است. در تحقیق حاضر، ویژگی‌های هواده‌های مختلف شوت و عملکرد آنها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده است. مدل‌های مورد استفاده شامل هواده پله، هواده رمپ، ترکیب رمپ و پله و همچنین هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی هستند. برای تحلیل هیدرولیکی جریان، از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و روش سیال چندفازی استفاده گردید. نتایج نشان داد فاصله هواده‌ها در هواده رمپ کف و دیواره جانبی نسبت به هواده‌های رمپ، پله و ترکیب هواده رمپ و پله به دلیل ایجاد ناحیه کاویتی در کف و دیواره جانبی، ایجاد آشفتگی و همچنین اختلاط بیشتر آب و هوا در جریان آب بیشتر است. علاوه بر این، ترکیب رمپ کف و دیواره جانبی در مقایسه با سایر روش‌ها، هوادهی مؤثرتری ایجاد کرده و با تشکیل ناحیه کاویتی در هر دو بخش کف و دیواره، موجب بهبود راندمان و یکنواختی غلظت هوا می‌شود. در این حالت، طول ناحیه کاویتی حدود ۵۰ درصد بیشتر از شرایط استفاده از رمپ کف به تنهایی است.

کلمات کلیدی: هواده؛ رمپ کف و دیواره جانبی؛ کاویتاسیون؛ طول ناحیه کاویتی؛ مدل آشفتگی

۱. مقدمه

با پیشرفت فناوری در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در زمینه سدسازی، تعداد قابل توجهی از سدهای مرتفع با ارتفاعی بیش از ۲۰۰ متر طراحی و احداث شده‌اند. این سازه‌های عظیم متشکل از اجزای متعددی می‌باشند که یکی از حیاتی‌ترین آن‌ها سرریز^۱ است. سرریزها از جمله سازه‌های هیدرولیکی کلیدی در سدها به شمار می‌روند که وظیفه آن‌ها تخلیه ایمن رواناب ناشی از سیلاب‌های شدید در کوتاه‌ترین زمان

* Corresponding Author; Email: salmasi@tabrizu.ac.ir

^۱ Spillway

ممکن است. به دلیل دبی و سرعت بالای جریان در این سازه‌ها، طراحی آن‌ها باید با دقت بالا و بر پایه اصول هیدرولیکی پیشرفته انجام شود تا عملکرد مطمئن و ایمن آن‌ها تضمین گردد. از میان عوامل تهدیدکننده پایداری سازه سرریز، پدیده کاویتاسیون^۱ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پدیده در جریان‌های با سرعت بالا به‌طور جدی محتمل است و در صورت وقوع می‌تواند به آسیب‌های شدید سازه‌ای از جمله تخریب موضعی و فرسایش شدید منجر شود. لذا شناخت دقیق رفتار جریان‌های آشفته و دو فازی در طراحی و تحلیل عملکرد سرریزها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در جریان عبور آب از سرریزهای بلند، به‌ویژه در تندآب‌ها، وجود ناصافی‌ها و ناهمواری‌های سطح بستر سرریز، موجب جدا شدن خطوط جریان از کف شده و نواحی گردابی در پایین‌دست محل جداشدگی ایجاد می‌شود. در این مناطق گردابی، به دلیل سرعت بالای جریان گاهی بیش از ۲۵ متر بر ثانیه کاهش فشار قابل توجهی رخ می‌دهد که ممکن است به فشار بخار آب برسد. در چنین شرایطی، پدیده کاویتاسیون به وقوع می‌پیوندد؛ به‌طوری‌که حباب‌های بخار تشکیل شده و با انتقال به نواحی پرفشارتر در پایین‌دست، دچار انفجار می‌شوند. با وجود سطح تماس محدود این حباب‌ها با بستر سرریز، انرژی آزادشده ناشی از انفجار آن‌ها نیروی بسیار زیادی را به سطح بتن وارد می‌کند. تکرار این فرآیند می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی در سازه بتنی کف سرریز شود [۱]. سرعت بالای جریان و افت فشار در سرریزهای بلند، احتمال بروز پدیده کاویتاسیون را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در صورت عدم کنترل این پدیده، خسارات سنگینی به سازه‌های هیدرولیکی وارد خواهد شد. بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰، موارد متعددی از تخریب شدید در سطوح بتنی و پی سرریزها به‌علت کاویتاسیون گزارش شده است. از جمله این نمونه‌ها می‌توان به آسیب‌های گسترده در سرریز سد کارون ۱ در ایران (سال ۱۹۷۷) و نیز سرریز سد گلن کانیون^۲ در ایالت کلرادو ایالات متحده آمریکا (سال ۱۹۸۳) اشاره کرد [۲، ۳].

هواده‌های شوت به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای کاهش خطرات ناشی از کاویتاسیون در سرریزها به‌کار می‌روند. هواده‌ها در کف یا دیواره‌های جانبی سرریز شوت نصب می‌شوند و با ایجاد حفره هوایی و تزریق کنترل‌شده هوا به جریان، سطح سازه را در برابر پدیده کاویتاسیون محافظت می‌کنند. مکانیزم عملکرد هواده‌ها بر مبنای ایجاد جدایش موقت جریان از سطح شوت است؛ به این ترتیب یک حفره هوایی تشکیل می‌شود و امکان ورود هوا از سطح آزاد به درون جریان فراهم می‌گردد. هوا به صورت حباب‌های متعدد در جریان انتقال یافته و به پایین‌دست منتقل می‌شود. این حباب‌ها نقش حفاظتی کلیدی در برابر تخریب‌های ناشی از پدیده کاویتاسیون دارند [۴]. کارایی هواده‌ها معمولاً با توجه به نرخ جذب هوا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این نرخ به عواملی چون هندسه هواده، زبری سطح، شیب و شرایط هیدرولیکی جریان وابسته است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، سه شکل هندسی متداول برای طراحی هواده‌ها شامل: (۱) رمپ (۲) پله و (۳) ترکیب رمپ و پله می‌باشد. فرآیند اصلی ورود هوا به جریان از طریق یک سیستم تأمین هوا انجام می‌شود که به فضای باز متصل بوده و اغلب شامل دو مجرای جانبی به همراه یک شیار عرضی است. این ترکیب امکان توزیع عرضی و یکنواخت هوا در زیر جت آب را فراهم می‌سازد و موجب

¹ Cavitation

² Glen Canyon Dam

بهبود کارایی هواده می‌شود [۵]. ورود هوا به جریان تحت تأثیر مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل قرار دارد. این متغیرها شامل شیب سرریز و هواده، ارتفاع رمپ و پله، عمق جریان، عدد فرود جریان و میزان زیر فشار در ناحیه کاویتی می‌باشند [۶].

بر اساس مطالعات پترکا^۱ و راسموسن^۲ [۷]، حفظ غلظت متوسط هوا به صورت $C = Q_a / Q_a + Q_w$ در بازه ۱ تا ۶ درصد، روشی مؤثر برای جلوگیری از بروز پدیده کاویتاسیون محسوب می‌شود. در این رابطه Q_a ، بیانگر دبی هوای ورودی و Q_w نشان‌دهنده دبی جریان آب است. چانسون [۸] در مطالعات آزمایشگاهی خود نشان داد که میزان تقاضای هوا عمدتاً تحت تأثیر هندسه هواده، دبی جریان و فشار زیرسطحی ناحیه کاویتی قرار دارد. آیدین^۳ [۹] با انجام آزمایش‌های مدل بر روی هوادهی با ورودی از پایین و در شرایط مختلف نرخ جریان و زاویه سرریز، روابط تجربی جدیدی را برای برآورد میزان ورود هوا ارائه کرد. افزون بر این، تولیس و لارچار^۴ [۱۰] در بررسی‌های خود بر روی عملکرد تخلیه‌کننده‌های تحتانی، نشان دادند که عواملی نظیر هندسه و میزان بازشدگی دریچه، ارتفاع سطح آب و شرایط غوطه‌وری پایاب تأثیر قابل توجهی بر تقاضای هوا دارند. لیان و همکاران^۵ [۱۱] با ارزیابی روش‌های تجربی موجود برای تخمین تقاضای هوا، یک رویکرد پیش‌بینی نوین توسعه دادند. در همین راستا، آیدین و اوزتورک^۶ [۱۲] از مدل‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۷ استفاده کردند و نشان دادند که این روش می‌تواند پیش‌بینی‌های دقیقی از فرآیند ورود هوا در هواده‌ها ارائه دهد که با داده‌های تجربی و مشاهدات میدانی سازگاری بالایی دارد. وی و همکاران^۸ [۱۳] نیز با به‌کارگیری مدل عددی برای شبیه‌سازی تقاضای هوا در یک هواده تونلی، میانگین انحرافی حدود ۲۵٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی گزارش کردند.

یانگ و همکاران^۹ [۱۴] با انجام مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی، تأثیر انتقال مومنوم بین آب و هوا را بر مدل دو سیاله ی دوفازی آب-هوا مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، اصلاحاتی بر روی مدل اعمال شد تا نیروی درگ وارد بر گروهی از حباب‌ها و نیروی بالابری دیواره‌ها، که پاسخ فازها در نزدیکی دیواره را نشان می‌دهد، بهتر شبیه‌سازی گردد. نتایج نشان داد که در ناحیه کاویتی، استفاده از حباب‌های با قطر کوچک‌تر تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد، در حالی که غلظت هوای نزدیک کف در پایین‌دست ناحیه برخورد جت تا حدودی پیش‌بینی شده و دارای انحراف نسبت به مقادیر آزمایشگاهی بود. هانگ وانگ و همکاران^{۱۰} [۱۵] به بررسی و تخمین میزان هوای وارد شده به سرریز شوت اصلاح‌شده با استفاده از سیستم هواده پله‌ای پرداختند. مدل هواده پله‌ای مورد مطالعه دارای شیب بالادست

¹ Peterka

² Rasmussen

³ Aydin

⁴ Tullis and Larchar

⁵ Lian et al.

⁶ Aydin and Ozturk

⁷ Computational Fluid Dynamic

⁸ Wei et al.

⁹ Yang et al.

¹⁰ Wang

ثابت ۱۴ درجه، سه ارتفاع نسبی پله ۱، ۰/۵، ۰/۳ و h_s/h_0 و دو شیب پایین دست جریان برابر با ۱۴ و ۱۹/۷ درجه بود. این مدل از نظر ویژگی‌های هوادهی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات نرخ ورود هوا تحت تأثیر کسر فضای خالی و توزیع سرعت سطحی جریان است و فرایند حذف هوا هنگام برخورد جت با کف بستر شوت، که ناشی از ورود هوا و محبوس شدن آن در امتداد سطح جت پایینی رخ می‌دهد، تأیید شد. درصد حذف هوا در برخورد جت با کف شوت عمدتاً به زاویه برخورد جت بستگی داشت یی، شو و وی^۱ [۱۶] به بررسی دینامیک جریان دوفازی و نحوه پراکندگی غلظت هوا در پایین دست هواده‌های شوت پرداختند. آن‌ها در این تحقیق سه نوع هواده شامل هواده کف، هواده جانبی و هواده تمام مقطع (ترکیب کف و جانبی) را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که هواده کف به تنهایی اگرچه موجب ورود هوا به جریان از طریق ایجاد حفره در بستر می‌شود، اما در گسترش یکنواخت هوا در سراسر مقطع جریان محدودیت دارد. در مقابل، هواده جانبی نیز به تنهایی قادر است ورود هوا به جریان را تسهیل کرده و علاوه بر بهبود هوادهی، در کاهش انرژی و توان تخریبی جریان نقش مؤثری ایفا کند. با این حال، بیشترین کارایی زمانی حاصل شد که هواده کف و جانبی به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند. سلماسی و آبراهام [۱۷] به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی و شوت پرداخته و سد زيردان را به عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند. این نوع سرریزها با تقویت فرآیند هوادهی خودبه خودی، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون را نسبت به سرریزهای صاف کاهش می‌دهند. نتایج این مطالعه نشان داد که راندمان اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از سرریزهای صاف است. در مقابل، در سرریزهای صاف احتمال بروز فشارهای منفی در پایین دست وجود دارد که می‌تواند ریسک کاویتاسیون را افزایش دهد. نیکرو و پیربوداگی [۱۸] با استفاده از نرم افزار Flow 3D پدیده کاویتاسیون در سرریز سرویس سد آغچای را شبیه سازی کردند. در این تحقیق، روش حجم سیال (VOF) برای مدل سازی جریان سطح آزاد به کار گرفته شد و شبیه سازی‌ها در دو دبی ۱۰۶۵ و ۴۴۰۰ متر مکعب بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که مدل عددی قادر است ویژگی‌های جریان و نواحی ایجاد کاویتاسیون را با دقت بالایی پیش بینی کند و تطابق قابل توجهی با داده‌های تجربی داشته باشد. تحلیل‌ها همچنین نشان داد که افزایش دبی جریان موجب افزایش شدت و گستره کاویتاسیون می‌شود، همچنین استفاده از روش‌های عددی می‌تواند ضمن کاهش نیاز به آزمایش‌های تجربی پرهزینه، پیش بینی دقیقی از رفتار جریان‌های پیچیده و نقاط بحرانی کاویتاسیون ارائه کند.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی الگوهای جریان و تأثیرات ناشی از هوادهی در سرریزهای مختلف پرداخته‌اند. با این حال، خلأ پژوهشی قابل توجهی در درک جامع ارتباط میان ترکیب بهینه انواع هواده‌ها و کاهش مؤثر خسارات کاویتاسیون همچنان وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین یا بر روی یک نوع خاص از هواده تمرکز داشته‌اند، یا فاقد تحلیل عددی دقیق برای پارامترهای حیاتی جریان دوفازی بوده‌اند. در این تحقیق، به منظور ارتقای کارایی هوادهی و کاهش مؤثر آسیب‌های کاویتاسیون، عملکرد انواع مختلف هواده‌ها شامل

¹ Ye, Xu and Wei

رمپ^۱، پله^۲، ترکیب رمپ با پله^۳ و همچنین ترکیب رمپ کف و رمپ دیواره جانبی^۴ بررسی شده است. این تحقیق فراتر از مطالعات گذشته، نه تنها انواع هوادهای متداول مانند رمپ و پله را مورد بررسی قرار می‌دهد، بلکه به‌طور ویژه بر ارزیابی اثر هم‌افزایی ترکیب رمپ با پله و ترکیب رمپ کف و رمپ دیواره جانبی تمرکز دارد. همچنین، در این تحقیق رفتار هیدرولیکی سرریزهای مجهز به هواده با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم‌افزار انسیس فلوئنت^۵ تحلیل شده است. در این مسیر، از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG و رویکرد چندفازی مخلوط^۶ برای شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان استفاده شده است. علاوه بر این، در این راستا، فاصله بهینه بین هواده‌ها نیز تعیین گردیده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱- تعریف مطالعه موردی و انواع سیستم‌های هوادهی

در این تحقیق به شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از هواده‌های مختلف سرریز شوت شامل: رمپ، پله، ترکیب پله با رمپ و همچنین ترکیب هواده رمپ کف و دیواره‌ی جانبی پرداخته شده است. ابتدا به‌منظور اطمینان از صحت نتایج عددی، فرآیند اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بای و همکاران [۱۹] و بر پایه توزیع غلظت هوا در پایین‌دست هواده صورت گرفت. سپس به تحلیل عددی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان عبوری از هواده‌ها شامل طول ناحیه کاویتی در پایین‌دست هواده، نرخ ورود هوا، توزیع غلظت هوا، پروفیل‌های غلظت هوا و پروفیل‌های سطح آب در انواع مختلف هواده‌ها انجام شد. در نهایت، با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، فاصله بهینه بین هواده‌ها تعیین گردید.

۲-۱-۱- مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های بای و همکاران [۱۹] بر روی یک سرریز شوت مستطیلی از جنس پلی‌متیل متاکریلات) با طول ۵ متر و عرض ۰/۵ متر انجام شد. برای تأمین آب مورد نیاز آزمایش‌ها، از سیستم با هد ثابت استفاده گردید که امکان تأمین دبی تا حداکثر ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه را

¹ Ramp

² Offset

³ Ramp and offset aerator combination

⁴ Bottom and side wall ramp

⁵ Ansys Fluent

⁶ Mixture

فراهم می‌کرد. اندازه‌گیری دبی جریان با بهره‌گیری از سرریز لبه‌تیز مستطیلی نصب‌شده در بخش بالادست صورت گرفت و دقت اندازه‌گیری‌ها در حدود ۱ درصد حفظ شد. سرعت جریان دو فازی هوا-آب و همچنین نمودارهای توزیع غلظت هوا، با استفاده از پروب سوزنی آشکارساز فاز اندازه‌گیری شدند. ناحیه کاویتی در حالت باز نگه داشته شد تا در تماس مستقیم با فشار اتمسفر قرار گیرد و بدین ترتیب تعادل فشار برقرار شود. عمق جریان ورودی ثابت بوده و برابر با ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شد. سرعت جریان در محدوده ۴ تا ۹ متر بر ثانیه و همچنین عدد فرود بین مقادیر ۳/۸ تا ۷/۴ متغیر بودند.

۲-۲-۲-۲ مدل‌سازی عددی

۲-۲-۲-۱-۱ معادلات حاکم بر جریان

پایه و اساس تمام روش‌های عددی در مهندسی هیدرولیک حل معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی و معادلات مومنتم می‌باشد که اصطلاحاً به معادلات ناویر-استوکس معروف می‌باشند. برای یک جریان تراکم‌ناپذیر با لزجت ثابت معادلات مذکور به ترتیب به فرم روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{x}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = B_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

در روابط فوق u_i و u_j مولفه بردار سرعت در راستای فضایی i ، j و B_i نیروی حجمی در راستای i ، p بیانگر فشار، μ لزجت سیال، P چگالی سیال می‌باشد [۲۰].

۲-۲-۲-۲ آنالیز ابعادی

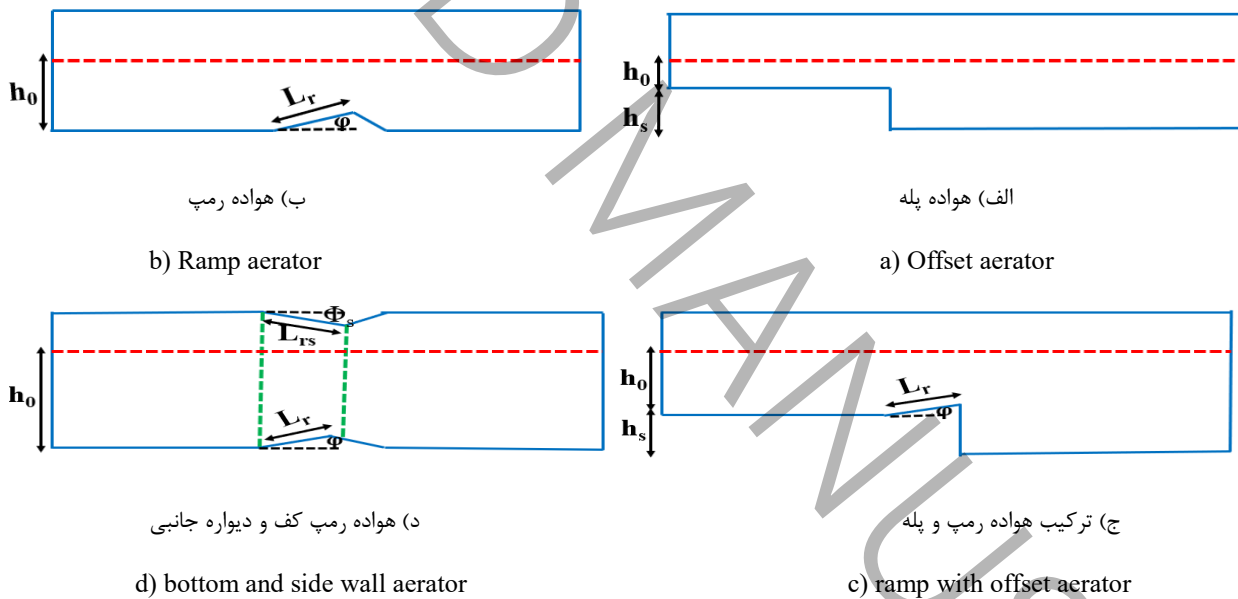
مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر هوادهی جریان ضریب هوادهی است که به صورت $\beta = Qa/Q_w$ تعریف می‌شود. ضریب هوادهی جریان تابعی از پارامترهای هندسی، شرایط هیدرولیکی و خصوصیات سیال می‌باشد که بر اساس این سه پارامتر، ضریب هوادهی جریان با رابطه (۳) بیان می‌گردد:

$$\beta = f(Q_w, Q_a, h_s, h_0, L_r, L_{rs}, \phi, \phi_s, V, \rho, \mu, \sigma, g, b) \quad (3)$$

در رابطه فوق Q_w دبی آب؛ Q_a دبی هوا؛ h_0 عمق جریان ورودی، h_s ارتفاع پله، L_r طول رمپ، L_{rs} طول رمپ دیواره جانبی، Φ زاویه رمپ، Φ_s زاویه رمپ دیواره جانبی، V سرعت جریان، ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته سیال، σ کشش سطحی سیال، g شتاب گرانشی و b عرض سرریز می‌باشند که در شکل (۱) شماتیکی از انواع مختلف هواده‌ها و مشخصات آن‌ها نمایش داده شده است. پس از آنالیز ابعادی، ضریب هواده‌ی به عنوان تابعی از پارامترهای بی‌بعد، طبق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = f\left(\frac{\rho V h_0}{\mu}, \frac{V^2}{g h_0}, \frac{\rho h_0 V^2}{\sigma}, \frac{h_s}{b}, \frac{L_r}{b}, \frac{L_{rs}}{b}, \phi, \phi_s\right) \quad (4)$$

در رابطه فوق، $\rho V h_0 / \mu$ عدد رینولدز، $V^2 / g h_0$ عدد فرود بالادست، $\rho h_0 V^2 / \sigma$ عدد وبر، h_s / b نسبت ارتفاع پله به عرض سرریز، L_r / b نسبت طول رمپ به عرض سرریز، L_{rs} / b نسبت طول رمپ دیواره جانبی به عرض سرریز، Φ زاویه رمپ و Φ_s زاویه رمپ دیواره جانبی است.



شکل ۱- شماتیکی از انواع مختلف هواده‌های سرریز شوت

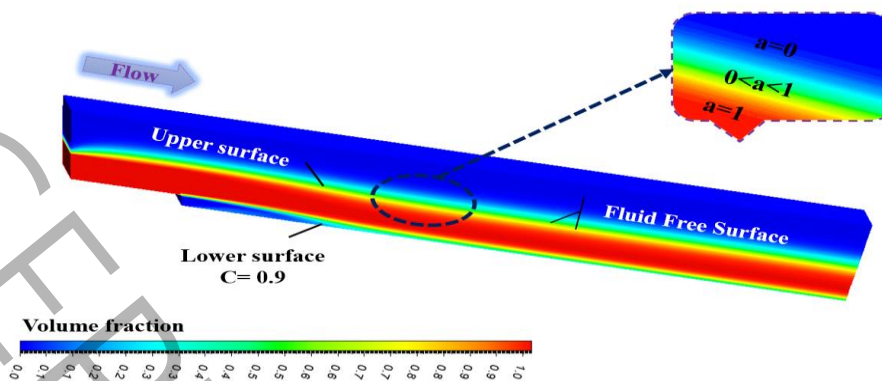
Fig.1. Schematic design of different types of chute spillway aerators

تشابه فرود معمولاً در آزمایش‌های مدل برای مقایسه نیروهای گرانشی و اینرسی به کار گرفته شده است. با این حال، وقتی صحبت از مدل‌سازی جریان‌های هوا-آب می‌شود، اغلب اثرات مقیاس وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. این اثرات مقیاس شامل تغییرات در غلظت هوا و اندازه و فرکانس حباب‌ها می‌شود. فیشر و چانسون [۲۱] تأثیر مقیاس مدل را بر آزمایش‌های هیدرولیکی بررسی کردند. آنها دریافتند که وقتی دو عدد بدون بعد از آستانه‌های خاصی فراتر می‌روند، حداقل تأثیر را بر اندازه‌گیری غلظت هوا دارند. این اعداد شامل عدد وبر و عدد رینولدز می‌باشند. عدد وبر باید بیشتر از ۱۴۰ و عدد رینولدز باید بیشتر از ۱۰^۵ باشد. عدد وبر، کشش سطحی (σ) و خواص آب (چگالی ρ_w و ویسکوزیته دینامیک μ_w) را به سرعت جریان (V_0) و طول مشخصه (h_0) مرتبط می‌کند. عدد رینولدز، همان سرعت جریان و طول مشخصه را به ویسکوزیته آب مرتبط می‌کند.

۲-۳-۲- روش جزء حجم سیال

یکی از چالش‌های مطرح شده در بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی تعیین مرز یا سطح مشترک دو یا چند فاز سیال می‌باشد. مدل VOF به ندرت برای شبیه‌سازی جریان در یک هواده استفاده می‌شود، اما مدل مخلوط (Mixture) برای بررسی جریان در یک هواده استفاده می‌شود و برای شبیه‌سازی جریان هواده، به ویژه در مناطقی با غلظت هوای بالا مناسب‌تر است. در مطالعه حاضر، سطح آزاد با استفاده از رویکرد مخلوط، که یک ابزار محاسباتی قدرتمند است، شبیه‌سازی شده است. مدل مخلوط برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی که اجزای مختلف سیال در سطح مولکولی با هم مخلوط می‌شوند، استفاده می‌شود. با تعریف فازها و خواص آنها، مانند چگالی و ویسکوزیته، این مدل تعامل و رفتار فازها را در دامنه جریان محاسبه می‌کند. کسر حجمی و کسر جرمی پارامترهای مهمی در این مدل هستند که به ترتیب کسری از کل حجم و کل جرم اشغال شده توسط یک فاز یا جزء خاص در یک سلول محاسباتی را نشان می‌دهند. در این رویکرد، از کسر حجمی (α) استفاده می‌شود که بین صفر و یک ($0 < \alpha < 1$) متغیر است. اگر $\alpha = 1$ باشد، آن سلول با آب پر شده است، در حالی که اگر $\alpha = 0$ باشد، المان پر از هوا است. هر مقداری بین ۰ و ۱ نشان دهنده الماتی است که حاوی آب و هوا است و مقدار ۰/۵ نشان دهنده سطح مشترک هوا-آب است [۲۲]. کسر حجمی (α) را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد [۲۳]. همچنین مشخصات سطوح آب از روش مدل مخلوط در شکل (۲) نشان داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha) + u_i \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha) = 0 \quad (5)$$

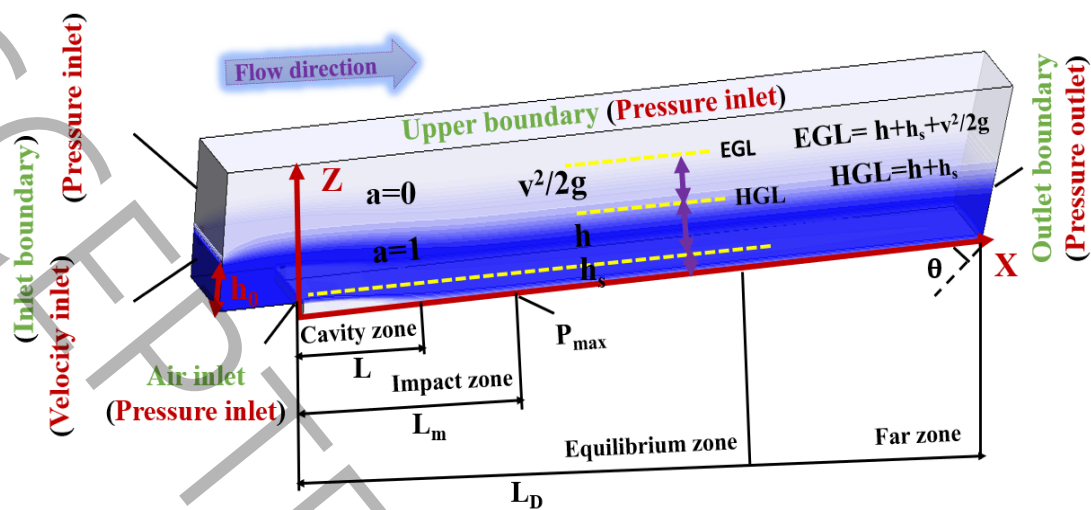


شکل ۲- کانتورهای کسر حجمی آب در هوا در سرریز شوت

Fig. 2. Water volume fraction contours at the chute spillway aerator

۲-۲-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی شبیه‌سازی تحقیق حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است. شرایط مرزی برای جریان ورودی به صورت سرعت ورودی (Velocity Inlet) که به عمق آب بستگی دارد، و همچنین یک ورودی برای فشار هوا که روی فشار اتمسفر تنظیم شده است، مرز بالایی و هوا به عنوان شرایط ورودی فشار (pressure inlet) تعریف شدند. برای خروجی به صورت فشار خروجی (Pressure outlet) تعریف شد که نشان می‌دهد آب و هوا می‌توانند بدون محدودیت از کانال تخلیه شوند، شدت آشفتگی و نسبت ویسکوزیته به عنوان پارامترهای مدل‌سازی آشفتگی در مرزهای ورودی برای شرایط ورودی فلوام مشخص شدند. مقادیر تعبیه شده مورد استفاده در برنامه ۳٪ برای شدت آشفتگی و ۵٪ برای نسبت ویسکوزیته می‌باشد. در مواردی که مرزها به صراحت ذکر نشده‌اند، به عنوان دیوار (wall) در نظر گرفته شدند و همچنین شرط عدم لغزش برای دیوارها اعمال شد، به این معنی که هیچ حرکت نسبی بین سیال و مرز وجود ندارد. پس از تعیین شرایط مسئله، شرایط مرزی، نوع معادلات و گسسته‌سازی آن‌ها، برنامه اجرا می‌شود. زمان مورد نیاز برای اجرای برنامه به عوامل مختلفی همانند حجم مسئله، تعداد و نوع عناصر شبکه، نوع معادلات، سیستم پردازش گر مورد استفاده و حافظه آن بستگی دارد [۲۴]. در شکل (۴) کلیه مراحل طی شده برای شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر به صورت کامل آورده شده است.



شکل ۳- نحوه اعمال شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی عددی در تحقیق حاضر

Fig.3. How to apply boundary and initial conditions for numerical simulation in the present study



شکل ۴- فلوچارت شبیه سازی عددی

Fig.4. Flowchart for numerical modeling

۵-۲-۲- تعریف محدوده و هندسه هواده‌ها

در تحقیق حاضر ابعاد دامنه حل شامل یک کانال یا فلومی به طول ۵ متر، ارتفاع ۰/۴۵ متر و عرض ۰/۲ متر در نظر گرفته شد و هواده‌ها در فاصله ۰/۵ متری از بالادست قرار گرفتند. جدول (۱) تعریف کلی از تمامی حالت‌های ممکن شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تاثیر تغییرات هندسی در هواده‌های سرریز شوت در مجموع ۳۸ مدل با ترکیب‌های مختلفی از شرایط هیدرولیکی و هندسی مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. لازم به ذکر است که عمق آب و شیب شوت در همه مدل‌ها ثابت فرض شد و به ترتیب مقادیر ۰/۱۶ متر و ۱۵ درجه در نظر گرفته شدند. تنظیمات پارامتر برای شیب دیواره جانبی و شیب کف برابر صفر در نظر گرفته شد.

جدول ۱- پارامترهای هندسی و هیدرولیکی هواده شوت در تحقیق حاضر

Table 1. Chute aerator's geometrical and hydraulic properties in the present study

Test	V (m/s)	h_s (m)	L_r (m)	Φ (degree)	L_{rs} (m)	Φ_s (degree)	Fr	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	Re (10 ⁵)	We
T ^۱	۸	۰/۰۲	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۳۹۲	۱۲	۳۶۰
T ^۲	۱۲	۰/۰۲	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۵۸۸	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۳	۸	۰/۰۴۵	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۷۱	۱۲	۳۶۰
T ^۴	۱۲	۰/۰۴۵	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۱/۳۲۳	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۵	۸	۰/۰۶	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۱۷۶	۱۲	۳۶۰
T ^۶	۱۲	۰/۰۶	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۱/۷۶۴	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۷	۸	۰/۱	.	.	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۸۶۲	۱۲	۳۶۰
T ^۸	۱۲	۰/۱	.	.	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۲/۷۹۳	۱۹/۲	۵۷۲
T ^۹	۶	.	۰/۰۴	۱۰	.	.	۴/۷۹	۰/۱۹۲	۰/۱۰۵	۹/۶	۲۷۰
T ^{۱۰}	۸	.	۰/۰۴	۱۰	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۱۴	۱۲	۵۷۲
T ^{۱۱}	۸	.	۰/۰۸	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۲۷۶	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۲}	۱۲	.	۰/۰۸	۱۰	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۴۱۳	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۳}	۸	.	۰/۱۲	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۴۱۳	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۴}	۱۲	.	۰/۱۲	۱۰	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۶۲۰	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۵}	۸	.	۰/۰۴	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۲۱۰	۱۲	۳۶۰
T ^{۱۶}	۱۲	.	۰/۰۴	۱۵	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۳۱۵	۱۹/۲	۵۷۲
T ^{۱۷}	۸	.	۰/۰۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۴۲۰	۱۲	۳۶۰

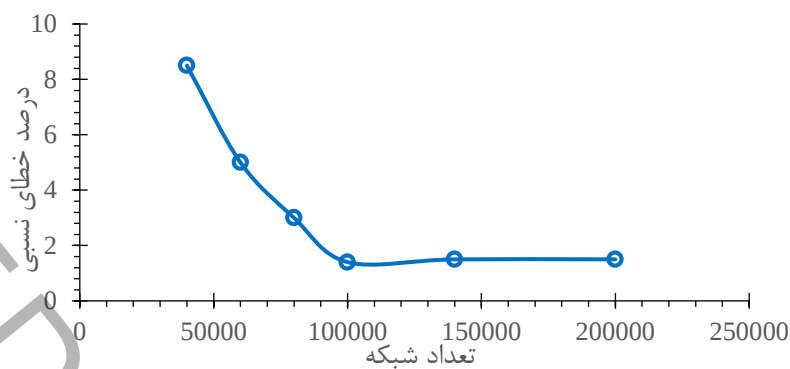
T18	۱۲	.	۰/۰.۸	۱۵	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۶۳۰	۱۹/۲	۵۷۲
T19	۸	.	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۶۳۰	۱۲	۳۶۰
T20	۱۲	.	۰/۱۲	۱۵	.	.	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۹۴۵	۱۹/۲	۵۷۲
T21	۸	۰/۰.۴۵	۰/۰.۴	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۸۲	۱۲	۳۶۰
T22	۸	۰/۰.۴۵	۰/۰.۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۸۲	۱۲	۳۶۰
T23	۸	۰/۰.۴۵	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۸۸۲	۱۲	۳۶۰
T24	۸	۰/۰.۴۵	۰/۰.۴	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۰.۱۶	۱۲	۳۶۰
T25	۸	۰/۰.۴۵	۰/۰.۸	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۱۵۴	۱۲	۳۶۰
T26	۸	۰/۰.۴۵	۰/۱۲	۱۰	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۲۹۲	۱۲	۳۶۰
T27	۸	۰/۰.۶	۰/۰.۴۵	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۱۸۶	۱۲	۳۶۰
T28	۸	۰/۰.۶	۰/۰.۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۵۹۶	۱۲	۳۶۰
T29	۸	۰/۰.۶	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۱/۸۰۶	۱۲	۳۶۰
T30	۸	۰/۱	۰/۰.۴۵	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۲/۰.۴۳	۱۲	۳۶۰
T31	۸	۰/۱	۰/۰.۸	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۲/۳۸۰	۱۲	۳۶۰
T32	۸	۰/۱	۰/۱۲	۱۵	.	.	۶/۶	۰/۲۵۵	۲/۵۹۰	۱۲	۳۶۰
T33	۶	.	۰/۰.۸	۵	۰/۰.۸	۵	۴/۷۹	۰/۱۹۲	۰/۱۰۵	۹/۶	۲۷۰
T34	۸	.	۰/۰.۸	۵	۰/۰.۸	۵	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۱۲	۳۶۰
T35	۶	.	۰/۰.۴	۱۰	۰/۰.۴	۱۰	۴/۷۹	۰/۱۹۲	۰/۱۰۵	۹/۶	۲۷۰
T36	۸	.	۰/۰.۴	۱۰	۰/۰.۴	۱۰	۶/۶	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۱۲	۳۶۰
T37	۱۲	.	۰/۰.۴	۱۰	۰/۰.۴	۱۰	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۲۰	۱۹/۲	۵۷۲
T38	۱۲	.	۰/۰.۸	۵	۰/۰.۸	۵	۹/۹	۰/۳۸۳	۰/۲۱	۱۹/۲	۵۷۲

۶-۲-۲- شبکه‌بندی و اعتبارسنجی مدل عددی

به‌منظور ارزیابی دقت مدل آشفتگی و اطمینان از استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه محاسباتی، شبکه‌ای متشکل از المان‌های چهارضلعی و شش‌ضلعی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی استقلال از شبکه با اصلاح تدریجی شبکه‌های محاسباتی در پنج وضوح مختلف (۴۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰، ۱۴۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰) انجام شد. در طول این آزمون، توزیع حداکثر غلظت هوا (C) در نواحی مختلف هواده سرریز

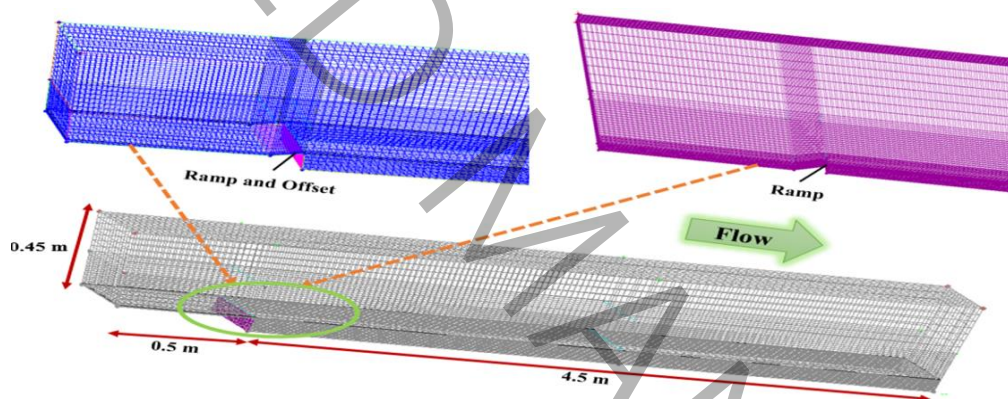
شوت شامل ناحیه‌ی کاویت، ناحیه‌ی برخورد و ناحیه‌ی تعادل با داده‌های آزمایشگاهی بای و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه گردید. مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های تجربی نشان داد که نتایج مستقل از گسسته‌سازی یا اندازه شبکه مورد استفاده در حوزه محاسباتی هستند. در شکل (۵) نتایج حاصل از استقلال شبکه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت مقدار درصد خطای نسبی بین شبکه‌های متوسط و ریز کمتر از ۴٪ است. این نشان می‌دهد که وضوح شبکه متوسط به اندازه کافی متراکم است تا رفتارهای جریان را به طور دقیق ثبت کند. از این رو، در این مطالعه تعداد شبکه محاسباتی ۱۰۰۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد و مقدار درصد خطا با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد. که در آن O_i نشان دهنده مقدار غلظت هوای آزمایشگاهی و E_i مقدار غلظت هوای شبیه‌سازی عددی می‌باشد. همچنین چگالی شبکه در نزدیک دیواره‌های شوت و نواحی اطراف هواها افزایش یافت تا لایه مرزی آشفته و شدت آشفتگی را با دقت بیشتری ثبت کند. شکل (۶) شبکه‌بندی سرریز هوا در شوت را با پله، رمپ و ترکیبی از پله و رمپ نشان می‌دهد. علاوه بر این، در شکل (۷) مقایسه توزیع غلظت هوا در ناحیه پایین‌دست هوا در بخش‌های مختلف هوا در سرریز شوت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق قابل توجهی میان نتایج حاصل از مدل‌سازی CFD و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

$$E \% = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (6)$$



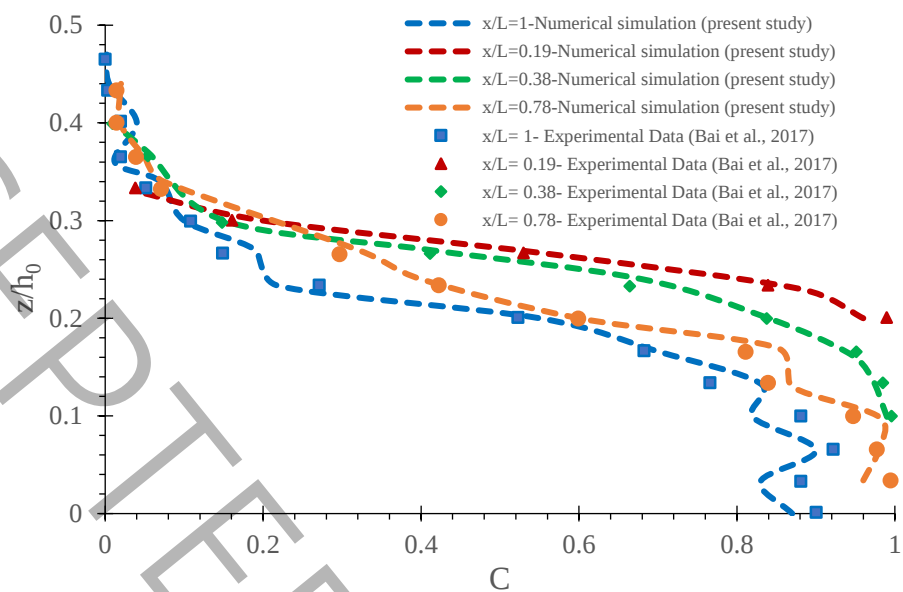
شکل ۵- میانگین خطای نسبی نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی

Fig.5. Average relative error of numerical model results and experimental data



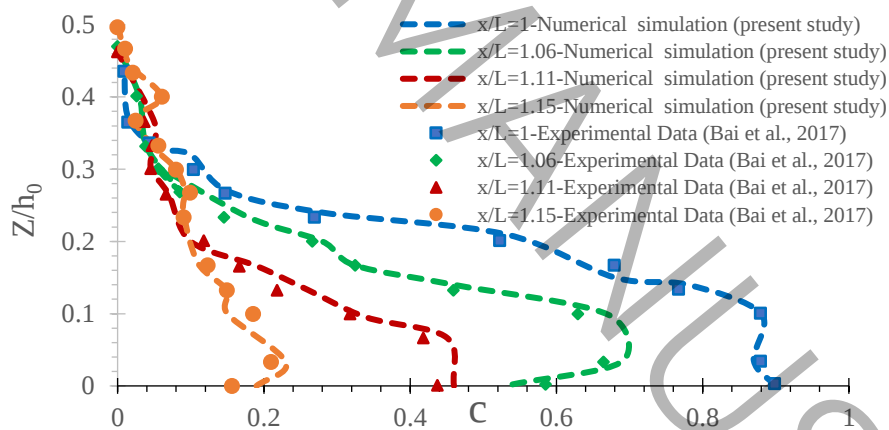
شکل ۶- شبکه‌بندی مدل عددی در تحقیق حاضر

Fig. 6. Numerical model mesh generation in the present study



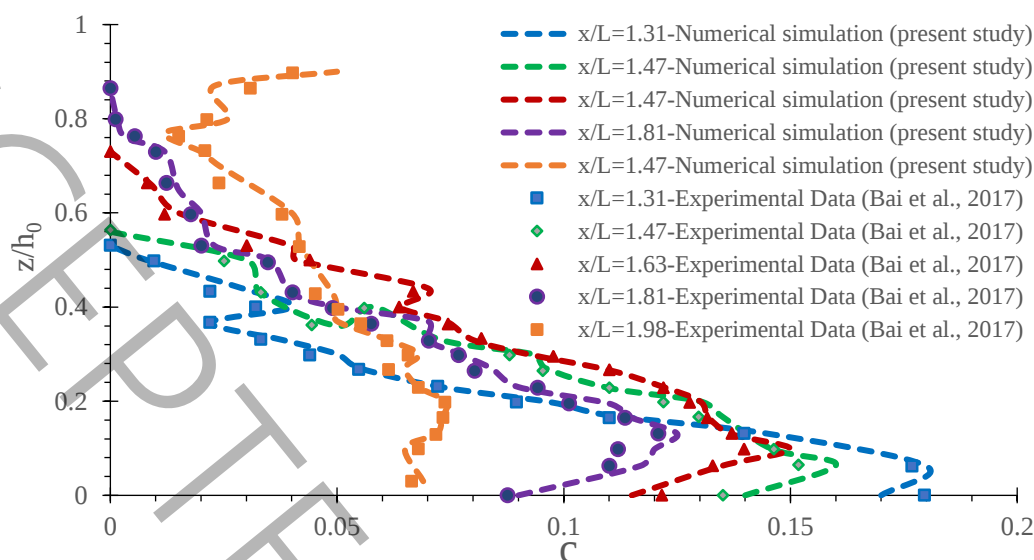
الف) ناحیه کاویتی

a) The cavity area



ب) ناحیه برخورد

b) Impact area



ج) ناحیه تعادل

c) Equilibrium area

شکل ۷- مقایسه داده‌های عددی و تجربی غلظت هوا در نواحی پایین‌دست هواده سرریز شوت

Fig.7. Comparison of numerical and experimental data of air concentration in different areas downstream of the chute spillway aerator

۳. نتایج و بحث

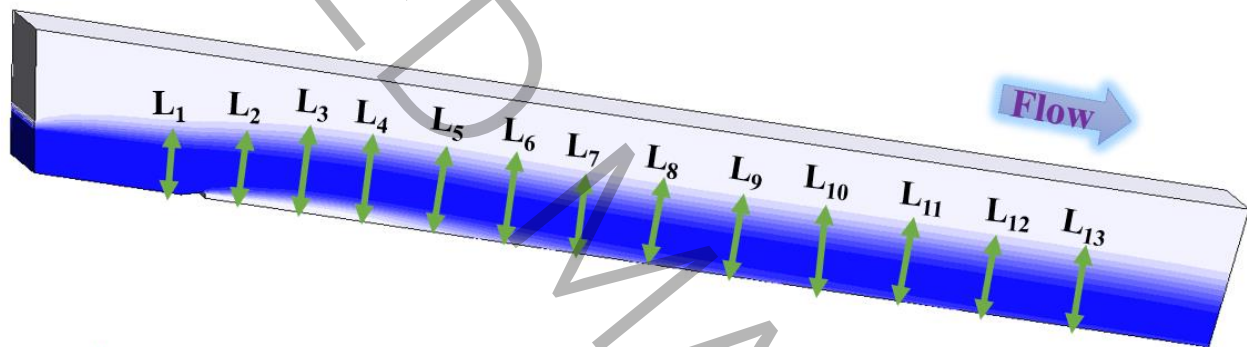
میدان جریان در پایین‌دست سیستم هواده به چهار ناحیه مجزا شامل ناحیه کاویتی، ناحیه برخورد، ناحیه تعادل و ناحیه میدان دور تقسیم می‌شود. مرز پایینی جریان با استفاده از خط ایزو-غلظت که در آن غلظت هوا (C) برابر با 0.9 است، تعیین می‌شود. بر این اساس، طول کاویتی (L) به صورت بازه‌ای از موقعیت اولیه هواده $x = 0$ تا نقطه برخوردی که در آن فشار برابر با $P = P_{max}$ است، تعریف می‌گردد. در این رابطه، بیشینه فشار در کف شوت با نماد P_{max} بیان می‌شود که تابعی از طول مشخصه L_m است. همچنین فاصله L_D به عنوان پارامتر هندسی دیگری معرفی می‌گردد که فاصله بین موقعیت اولیه ($x = 0$) و محل تلاقی نواحی هواده‌ی بالایی و پایینی جریان را مشخص می‌کند. برای تحلیل دقیق‌تر، دستگاه مختصات (x, z) در نظر گرفته شد؛ به گونه‌ای که محور x در امتداد کف شوت و محور z عمود بر آن تعریف شده است (شکل ۳).

به منظور نمایش و تحلیل تغییرات جریان، ۱۳ مقطع عرضی با نمادهای L_1 تا L_{13} تعریف شد که هر یک عمود بر کف شوت قرار دارند. در این نواحی پارامترهای جریان از جمله توزیع غلظت هوا، سرعت و فشار مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۸). علاوه بر این، فاصله بین مقاطع متوالی (ΔL) طبق جدول (۲) برابر با ۰/۲ متر در نظر گرفته شد که امکان مطالعه تغییرات جریان در طول مسیر را با دقت مناسب فراهم می‌سازد.

جدول ۲- موقعیت مقاطع عرضی

Table 2. Positions of the cross-sections

Section	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}
X (m)	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲	۲/۲	۲/۴



شکل ۸- شماتیکی از مکان مقاطع در امتداد مسیر جریان

Fig.8. Schematic of the location of sections along the flow path

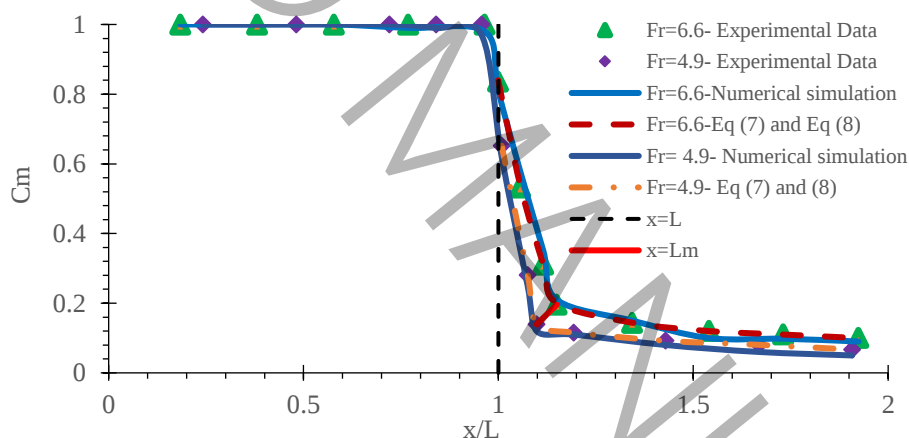
شکل (۹) تغییرات حداکثر غلظت هوا (C_m) را برای دو عدد فرود مختلف، ۴/۹ و ۶/۶ در x/L های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در ناحیه کاویتی ($0 < x < L$) مشاهده می‌شود، سطح زیرین جریان در معرض هوا قرار داشته و مقدار بیشینه غلظت هوا ثابت و برابر با $C_m = ۱$ باقی می‌ماند. این وضعیت در نقطه $x = L$ تحت تأثیر برخورد جت ایجاد شده و پس از آن کاهش اندکی در مقدار C_m رخ می‌دهد. با حرکت جریان به سمت پایین‌دست، مقدار C_m به تدریج در طول شوت کاهش می‌یابد. با این حال، نرخ کاهش در ناحیه برخورد ($L < x < L_m$) با ناحیه تعادل ($L_m < x < LD$) متفاوت است. علاوه بر این، مقایسه نتایج عددی و داده‌های تجربی بای و همکاران [۱۹]، و همچنین معادلات (۷) و (۸)، تطابق قوی بین شبیه‌سازی عددی، اندازه‌گیری‌های تجربی و راه‌حل‌های تحلیلی را ارائه می‌دهد که نشان می‌دهد

دهد مدل عددی پدیده‌های فیزیکی مورد مطالعه را به طور دقیق شبیه‌سازی می‌کند. مقادیر به‌دست‌آمده برای R^2 ، $RMSE$ و $RE\%$ بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به ترتیب 0.997 ، 0.034 و 3% به دست آمد. همچنین، نمودارهای پراکندگی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در شکل (۱۰) نشان دهنده دقت بالای تخمین مقادیر C_m بر اساس این داده‌ها می‌باشد.

$$\frac{C_m}{C_0} = \left(1 - \frac{x-L}{L}\right)^{1.9Fr-1.4} \quad (7)$$

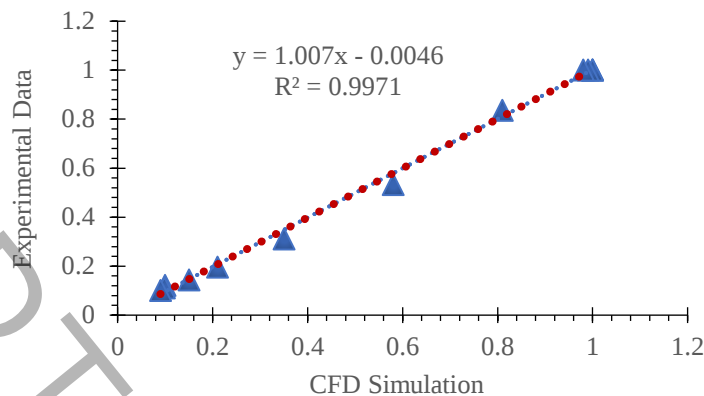
در رابطه فوق C_m نشان دهنده حداکثر غلظت هوای اندازه‌گیری شده در فاصله Z_m از کف تا مکانی با $C=C_m$ ، L طول کاویتی و $(C_0 = 0.1(V_0 + 0.2))$ نشان دهنده حداکثر غلظت هوا در $x=L$ است.

$$\frac{C_m}{C_{0,x=L_m}} = \left(\frac{x}{L_m}\right)^{-0.31Fr+0.055} \quad (8)$$



شکل ۹- تغییرات غلظت هوا (C_m) در مقابل فاصله نسبی (x/L)

Fig. 9. Variation of air concentration (C_m) versus relative distance (x/L)



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی برای حداکثر غلظت هوا

Fig. 10. Scatter plot for the maximum air concentration

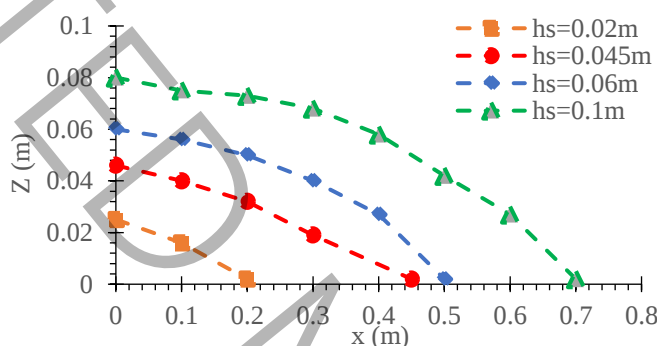
۳-۱- پروفیل‌های سطح آب در ناحیه کاویتی

پروفیل‌های سطح آب در ناحیه کاویتی ($0 < x < L$) در امتداد شوت در شکل (۱۱) ارائه شده‌اند. در بررسی هوادهی سرریز شوت، سطح مشترک هوا - آب بر اساس خطوط ایزو-غلظت $C = 0.9$ تعریف می‌گردد؛ به‌طوری‌که این خط، مرز میان ناحیه مخلوط هوا - آب و جریان آب شفاف را مشخص می‌کند. حداکثر غلظت هوا و موقعیت آن در عمق جریان، وابسته به طول و زاویه رمپ، ارتفاع پله و عدد فرود بالادست است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش این پارامترها منجر به افزایش غلظت هوا در ناحیه حفره می‌گردد. همان‌طور که در شکل‌های (۱۱-الف و ب) مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع هواده پله (hs) منجر به افزایش محل برخورد جت و طول ناحیه کاویتی شده است. به‌طور مثال، افزایش ارتفاع هواده پله در شرایط عدد فرود $Fr = 9/9$ منجر به افزایش طول ناحیه حفره به میزان حدود ۳۰ درصد نسبت به شرایط $Fr = 6/6$ شده است. همچنین مطابق شکل‌های (۱۱-ج و د)، افزایش ۵۰ درصدی زاویه رمپ در شرایط یکسان عدد فرود بالادست و طول رمپ هواده، طول ناحیه کاویتی را تا بیش از ۲۵ درصد افزایش داده است. این امر نشان می‌دهد که ترکیب شرایط هیدرولیکی و هندسی نقش به‌سزایی در تقویت فرایند هوادهی دارد.

نتایج مربوط به ترکیب هواده پله و رمپ با عدد فرود $Fr = 6/6$ شکل‌های (۱۱-ه تا ح) نشان می‌دهد که طول ناحیه برخورد جریان در این حالت نسبت به استفاده منفرد از پله یا رمپ حدود ۳۵ تا ۵۰ درصد افزایش یافته است. این موضوع بیانگر راندمان بالاتر ترکیب پله و رمپ در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها است. همچنین، همان‌طور که در شکل (۱۱-ط) مشاهده می‌شود، استفاده همزمان از هواده‌های رمپ

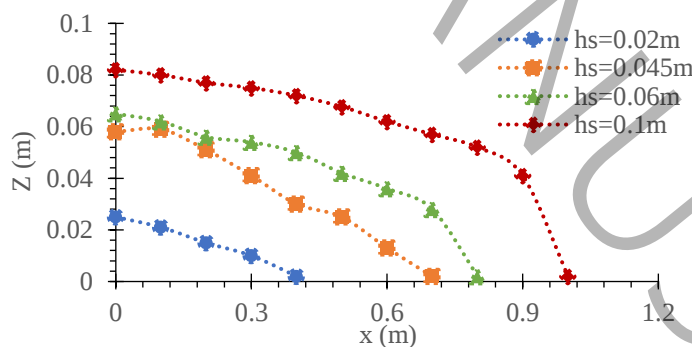
کف و دیواره جانبی، غلظت متوسط هوا در ناحیه کاویتی را به میزان قابل توجهی (در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد) افزایش داده است. دلیل این امر، ورود جریان‌های جانبی هوا از طریق مجراهای دیواره و افزایش شدت تلاطم در این بخش است.

در شکل (۱۲) پروفیل‌های سطح آب در ناحیه کاویتی برای دو حالت هواده رمپ کف (Lr) و ترکیب رمپ کف با دیواره جانبی (Lrs) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول ناحیه کاویتی در حالت ترکیبی به‌طور میانگین ۴۵ درصد بیشتر از حالت صرفاً رمپ کف است. با توجه به اینکه افزایش طول جت ارتباط مستقیمی با افزایش نرخ هوادهی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ترکیب رمپ کف و دیواره جانبی باعث بهبود قابل ملاحظه ویژگی‌های جریان شده و آن را به طرحی مؤثرتر برای کاهش خطر کاویتاسیون در سرریزهای شوت تبدیل می‌کند.



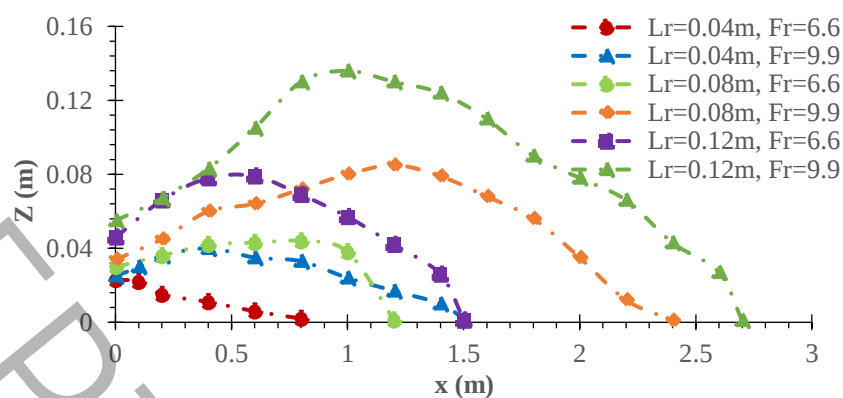
الف) پروفیل سطح آب برای ارتفاع‌های مختلف برای هواده پله با عدد فرود ۶/۶

a) Water surface profile for various offset heights with $F_r=6.6$



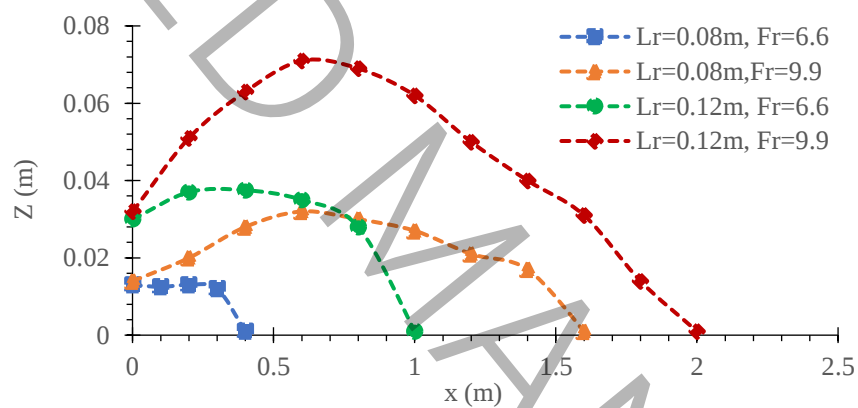
ب) پروفیل سطح آب برای ارتفاع‌های مختلف هواده پله با عدد فرود ۹/۹

b) Water surface profile for various offset heights with $F_r=9.9$



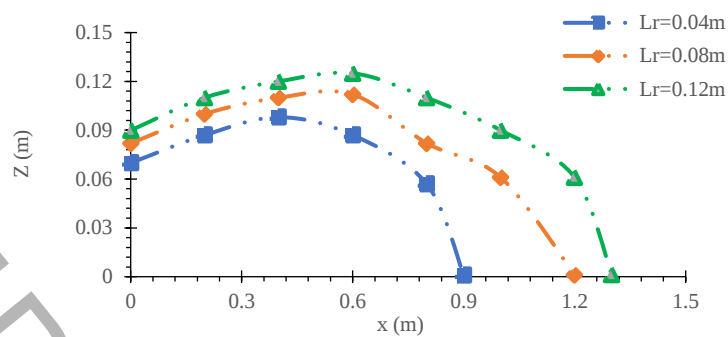
ج) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف هواده رمپ با زاویه $\Phi = 15^\circ$

c) Water surface profile for various ramp lengths with $\Phi = 15^\circ$



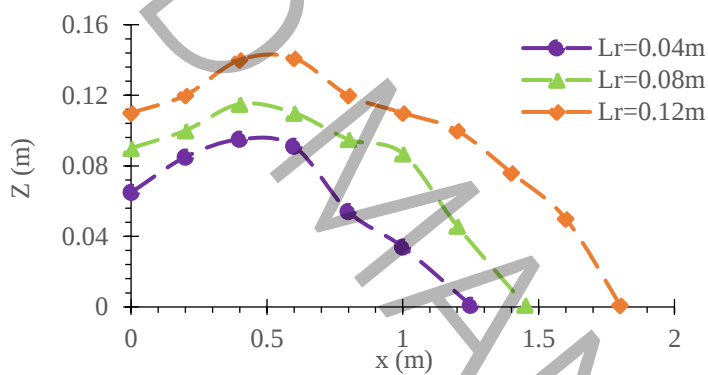
د) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف هواده رمپ با زاویه $\Phi = 10^\circ$

d) Water surface profile for various ramp lengths with $\Phi = 10^\circ$



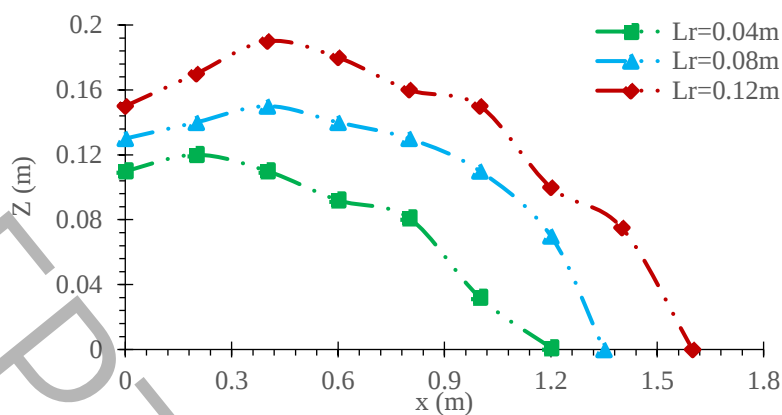
ه) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هواده رمپ و پله با $h_s=0.045$ m و $\Phi=10^\circ$

e) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s=0.045$ m and $\Phi=10^\circ$



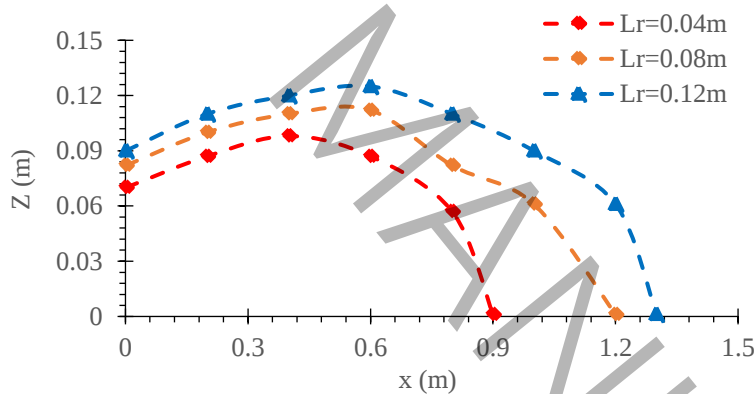
و) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هواده رمپ و پله با $h_s=0.06$ m و $\Phi=15^\circ$

f) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s=0.06$ m and $\Phi=15^\circ$



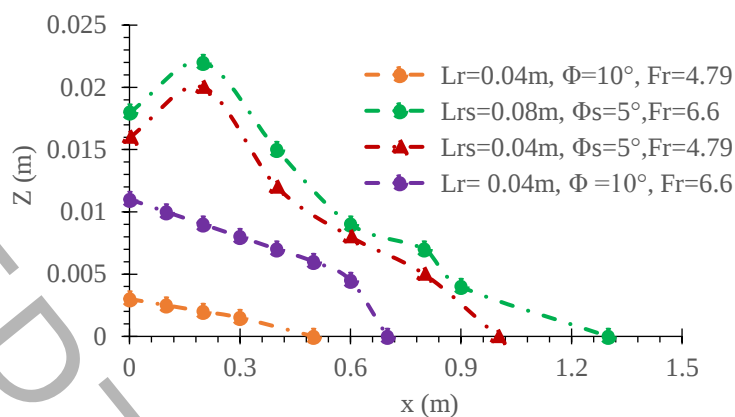
ز) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هوا ده رمپ و پله با $h_s = 0.1$ m و $\Phi = 15^\circ$

g) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s = 0.1$ m and $\Phi = 15^\circ$



ح) پروفیل سطح آب برای طول‌های مختلف ترکیب هوا ده رمپ و پله با $h_s = 0.45$ m و $\Phi = 10^\circ$

h) Water surface profile for different lengths of ramps and offsets with $h_s = 0.45$ m and $\Phi = 10^\circ$

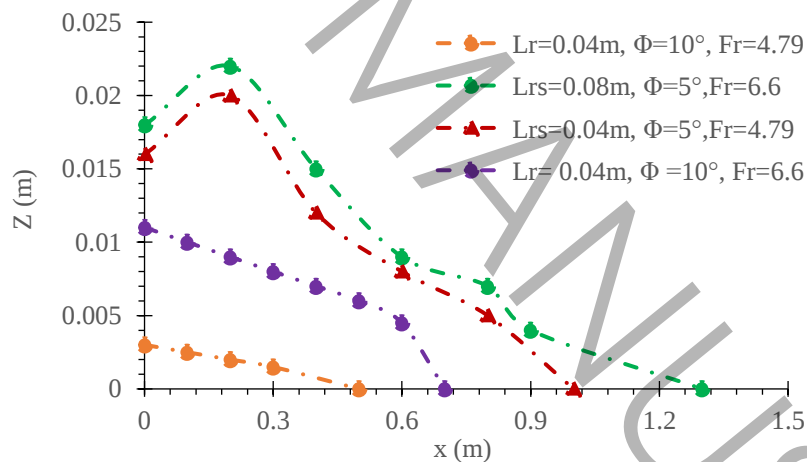


ط) پروفیل سطح آب برای طول‌ها و زوایای مختلف هوا ده رمپ کف و دیواره جانبی

i) Water surface profile for different lengths and angles of bottom and side wall ramp

شکل ۱۱- پروفیل سطح آب برای انواع مختلف هوا ده‌های شوت در ناحیه کانونی

Fig. 11. Water surface profile for various types of chute aerators in the cavity zone

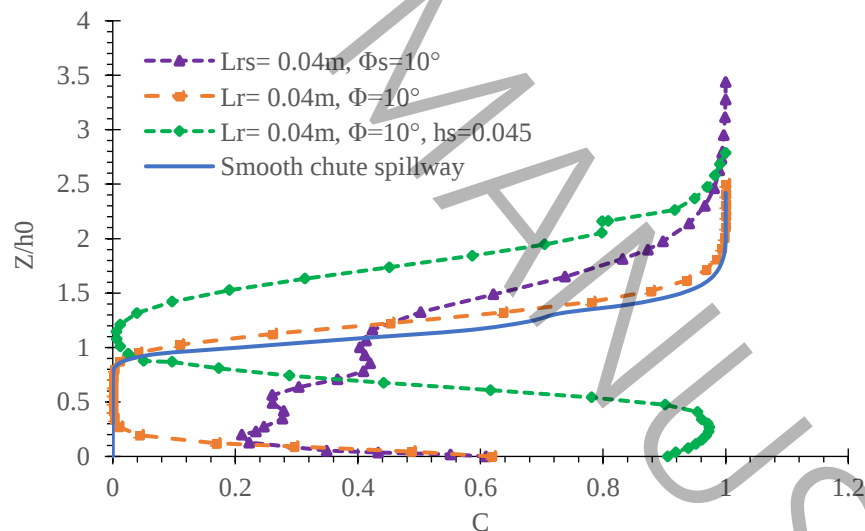


شکل ۱۲- مقایسه پروفیل سطح آب برای طول‌ها و زوایای مختلف رمپ کف و رمپ دیواره جانبی

Fig. 12. Comparison of water surface profile for different lengths and angles of ramp and bottom and side wall ramp

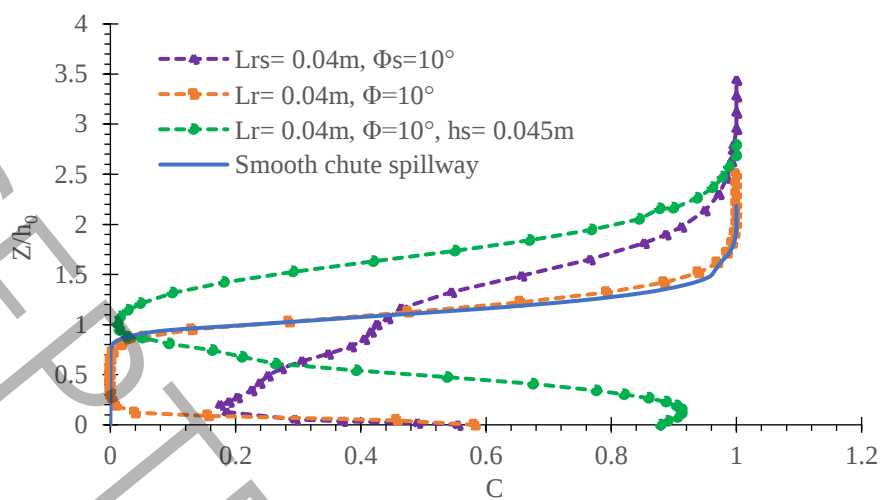
۲-۳- توزیع غلظت هوا در عمق جریان

در شکل (۱۳)، توزیع غلظت هوا در یک سرریز شوت صاف (بدون هوادهی) و انواع مختلف هوادهای شوت شامل هواده رمپ، رمپ کف، رمپ دیواره جانبی و ترکیب رمپ با پله، در مقاطع مختلف ($L6-L10$) و در عدد فرود $Fr=6/6$ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود در شوت صاف، هوادهی در کف جریان وجود ندارد؛ در حالی که استفاده از هوادهای رمپ کف و دیواره جانبی سبب افزایش چشمگیر غلظت هوا در عمق جریان می شود. همچنین، حضور مجرای تعبیه شده در دیواره جانبی، امکان ورود هوای بیشتری به داخل جریان فراهم کرده و در نتیجه، غلظت هوا نسبت به سایر روش های هوادهی افزایش می یابد. اگرچه ترکیب پله و رمپ نیز افزایش محسوسی در غلظت هوا ایجاد می کند، اما هواده رمپ کف همراه با دیواره جانبی، کارایی بالاتری نشان داده است؛ به گونه ای که غلظت هوا در ناحیه میانی جریان به طور قابل توجهی بیشتر از حالتی است که تنها از رمپ کف استفاده شود. علاوه بر این، در هواده رمپ کف به تنهایی، ناحیه ای با هوای متراکم در نزدیکی کف و یک ناحیه آب شفاف (بدون هوادهی) در مرکز جریان مشاهده می شود. در حالی که ترکیب رمپ کف و دیواره جانبی این ناحیه آب شفاف را به طور کامل حذف کرده و جریان کاملاً هوادهی شده ای ایجاد می کند. این ویژگی موجب افزایش حفاظت سازه در برابر فرسایش ناشی از کاویتاسیون خواهد شد.



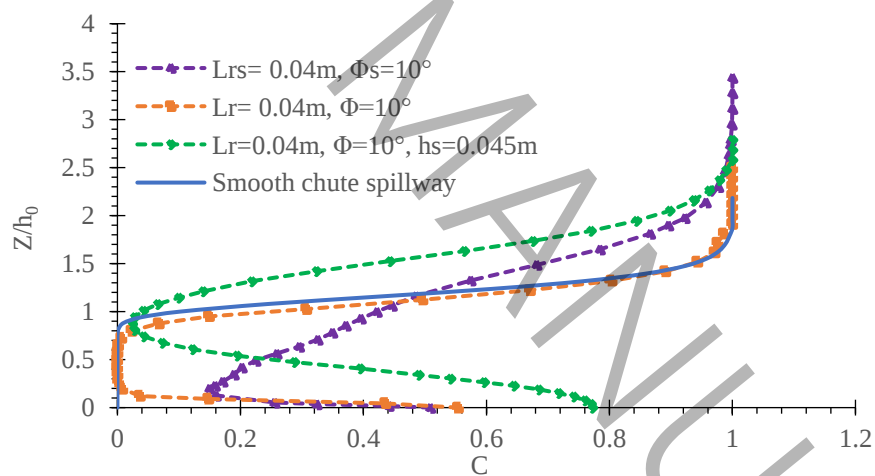
الف) پروفیل غلظت هوا در بخش $L6$

a) Air concentration profile at section $L6$



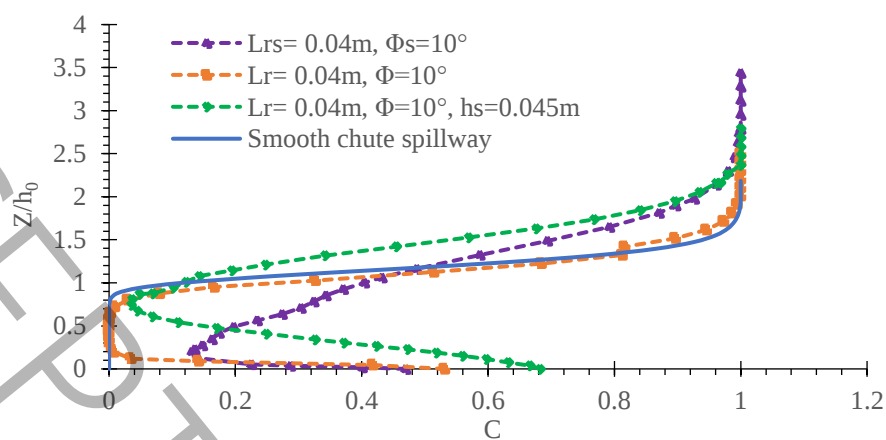
(ب) پروفیل غلظت هوا در بخش L7

b) Air concentration profile at section L7



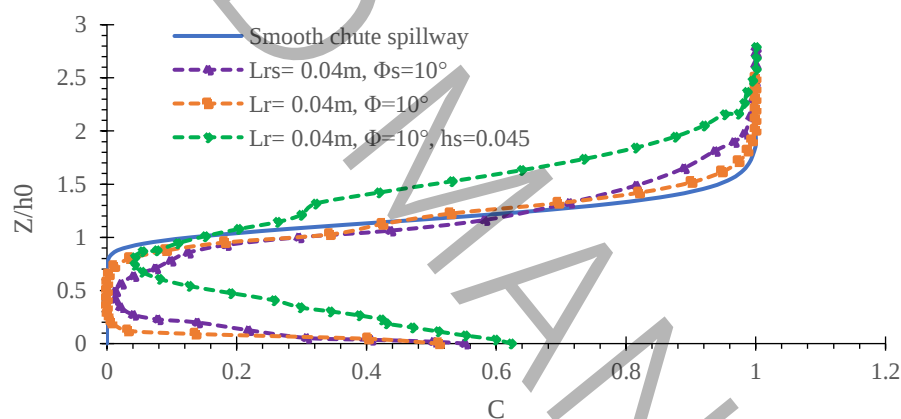
(ج) پروفیل غلظت هوا در بخش L8

c) Air concentration profile at section L8



(د) پروفیل غلظت هوا در بخش L_9

d) Air concentration profile at section L9



(ه) پروفیل غلظت هوا در مقطع L_{10}

e) Air concentration profile at section L10

شکل ۱۳- مقایسه توزیع غلظت هوا بین سرریز شوت صاف و انواع مختلف هواده‌های شوت در مقاطع مختلف هواده‌ها با $Fr = 6/6$

Fig. 13. Comparison of air concentration distribution between smooth chute spillway and different types of chute aerators in various sections of aerators with $Fr = 6.6$

۳-۳- طول ناحیه کاویتی

طول ناحیه کاویتی (L) یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد هوادهای شوت محسوب می‌شود. این پارامتر فاصله‌ای است که جریان پس از جدایش از لبه بالایی یا منحرف‌کننده طی می‌کند تا مجدداً به بستر شوت برخورد کند یا به نقطه‌ای با بیشینه فشار پایه در ناحیه برخورد برسد. طول کاویتی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله طول رمپ (L_r)، زاویه رمپ (φ)، زاویه کف شوت (α)، سرعت جریان ورودی (V)، عمق آب (h_0)، ضریب ورود هوا (β) و عدد فرود (Fr) قرار دارد. ورود هوای ناشی از ناحیه کاویتی به جریان متناسب با طول این ناحیه بوده و با افزایش سرعت جت (فوران)، طول ناحیه کاویتی بیشتر شده و در نتیجه حجم هوای ورودی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج جدول (۳) تا (۶)، تغییرات طول ناحیه کاویتی در انواع مختلف هوادهای شامل رمپ، ترکیب رمپ و پله، رمپ کف و دیواره جانبی و پله مورد بررسی قرار گرفته است.

مطابق جدول (۳)، با افزایش دبی آب از $0/192$ متر مکعب بر ثانیه به $0/255$ متر مکعب بر ثانیه، طول ناحیه کاویتی از 1 متر به $1/3$ متر افزایش می‌یابد (برای زاویه رمپ 10° درجه). به عبارت دیگر، افزایش 33 درصدی دبی باعث افزایش 30 درصدی طول ناحیه کاویتی می‌شود. همچنین، افزایش زاویه رمپ دیواره از 5° درجه به 10° درجه، طول ناحیه کاویتی را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر افزایش 100 درصدی زاویه رمپ دیواره، باعث افزایش 10 درصدی طول ناحیه کاویتی می‌شود.

جدول (۴) ترکیب هوادهای پله و رمپ را نشان می‌دهد. در این نوع هوادهای، طول ناحیه کاویتی با افزایش ارتفاع پله، طول رمپ و زاویه رمپ افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر طول ناحیه کاویتی مربوط به هوادهای با ارتفاع پله $0/1$ متر، طول رمپ $0/12$ متر، زاویه 15° درجه و عدد فرود بالادست $6/6$ است که طول آن $1/8$ متر است.

با توجه به ویژگی‌های ارائه شده در جدول (۵)، می‌توان دریافت که در رمپ هوادهای، طول ناحیه کاویتی با افزایش عدد فرود به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. طول ناحیه کاویتی در رمپ هوادهای با طول $0/12$ متر، زاویه 15° درجه و عدد فرود $6/6$ ، $1/5$ متر است، در حالی که ناحیه کاویتی با عدد فرود $9/9$ ، $2/7$ متر است. بنابراین، با افزایش 50 درصدی عدد فرود، طول ناحیه کاویتی 87 درصد افزایش می‌یابد. جدول (۶) مربوط به هوادهای پله است و مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع پله و عدد فرود بالادست، طول ناحیه کاویتی افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع پله از $0/06$ متر به $0/1$ متر با دبی آب $0/383$ متر مکعب بر ثانیه، طول ناحیه کاویتی تقریباً 6 درصد افزایش می‌یابد.

هوادهای رمپ کف و دیواره جانبی، هوادهای بهتری نسبت به سایر هوادهای ارائه می‌دهند، زیرا هم در کف شوت و هم در دیواره جانبی شوت دیواره، ناحیه کاویتی ایجاد می‌کنند. بنابراین، طول ناحیه کاویتی در این هوادهای بیشتر از هوادهای است که ویژگی‌های مشابهی دارد.

جدول ۳- مشخصات جریان در هوادهای رمپ

Table 3. Flow characteristics in ramps aerators

L_r (m)	Φ (degree)	Q_w (m^3/s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m^3/s)	β %	Fr	C%	L (m)	L_a (m)
۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۲۱	۰/۸۴	۶/۶	۹	۰/۸	۱/۴
۰/۰۴	۱۵	۰/۳۸۳	۰/۳۱۵	۰/۸۳	۹/۹	۱۱	۱/۵	۱/۸
۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۴۲	۱/۶۵	۶/۶	۸	۱/۲	۱/۵
۰/۰۸	۱۵	۰/۳۸۳	۰/۶۳۲	۱/۶۵	۹/۹	۸/۵	۲/۴	۱/۲
۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۳	۲/۴۷	۶/۶	۱۰	۱/۵	۱/۶
۰/۱۲	۱۵	۰/۳۸۳	۰/۹۴۵	۲/۴۷	۹/۹	۹	۲/۷	۲/۲
۰/۰۴	۱۰	۰/۱۹۲	۰/۱۰۴	۰/۵۵	۴/۹۷	۹	۰/۵	۱
۰/۰۴	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۱۴	۰/۵۵	۶/۶	۹/۵	۰/۸	۱/۲
۰/۰۸	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۲۷۵	۱/۰۸	۶/۶	۱۰	۰/۹	۱/۳
۰/۰۸	۱۰	۰/۳۸۳	۰/۴۱۳	۱/۰۸	۹/۹	۱۱	۱.۶	۱/۹
۰/۱۲	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۴۱۳	۱/۶۲	۶/۶	۱۲	۱	۱/۶
۰/۱۲	۱۰	۰/۳۸۳	۰/۶۲	۱/۶۲	۹/۹	۸	۲	۱/۸

جدول ۴- مشخصات جریان در هوادهایی ترکیبی رمپ و پله

Table 4. Flow characteristics in ramp with offset aerators

h_s (m)	L_r (m)	Φ (degree)	Q_w (m^3/s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m^3/s)	β %	Fr	C%	L (m)	L_a (m)
۰/۰۴۵	۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۸۲	۲/۶۷	۶/۶	۹	۰/۹	۱/۵
۰/۰۴۵	۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۸۲	۲/۶۷	۶/۶	۱۲	۱/۳	۱/۸
۰/۰۴۵	۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۸۲	۲/۶۷	۶/۶	۸	۱/۴	۱/۹
۰/۰۶	۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۹۷	۲/۷۳	۶/۶	۸/۵	۱/۲۵	۱/۲
۰/۰۶	۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۶۹۹	۲/۷۴	۶/۶	۱۱	۱/۴۵	۲/۲
۰/۰۶	۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۲۳	۲/۸۳	۶/۶	۱۰	۱/۶	۲/۷
۰/۱	۰/۰۴	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۵۶	۲/۹۶	۶/۶	۹	۱/۲	۲/۴
۰/۱	۰/۰۸	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۸۱	۳/۰۶	۶/۶	۱۱	۱/۳۵	۲/۵

۰/۱	۰/۱۲	۱۵	۰/۲۵۵	۰/۷۹۸	۳/۱۳	۶/۶	۸	۱/۸	۲/۶
۰/۰۴۵	۰/۰۴	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۶۷۱	۲/۶۳	۶/۶	۱۱۲	۰/۹	۱/۸
۰/۰۴۵	۰/۰۸	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۶۸۳	۲/۶۸	۶/۶	۹/۵	۱/۲	۱/۹
۰/۰۴۵	۰/۱۲	۱۰	۰/۲۵۵	۰/۶۹۴	۲/۷۲	۶/۶	۱۰	۱/۳	۲/۴

جدول ۵- مشخصات جریان در هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی

Table 5. Flow characteristics in bottom and side wall ramp aerators

Lr	Φ (degree)	L_{rs} (m)	Φ_s (degree)	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	β %	Fr	C%	L (m)	La (m)
/۰.۴	۱۰	۰/۰.۴	۱۰	۰/۱۹۲	۱/۰.۵	۰/۵۵	۴/۹۷	۱۱	۱	۲/۲
.										
/۰.۴	۱۰	۰/۰.۴	۱۰	۰/۲۵۵	۱/۴	۰/۵۵	۶/۶	۹	۱/۳	۲/۷
.										
/۰.۸	۵	۰/۰.۸	۵	۰/۱۹۲	۱/۰.۵	۰/۵۵	۴/۹۷	۱۰	۰/۹	۲
.										
/۰.۸	۵	۰/۰.۸	۵	۰/۲۵۵	۱/۴	۰/۵۵	۶/۶	۸	۱/۴۵	۲/۶
.										
/۰.۴	۱۰	۰/۰.۴	۱۰	۰/۳۸۳	۰/۲	۰/۵۴	۹/۹	۸/۵	۱/۶	۳
.										
/۰.۸	۵	۰/۰.۸	۵	۰/۳۸۳	۰/۲۱	۰/۵۵	۹/۹	۱۲	۱/۵	۲/۹
.										

جدول ۶- مشخصات جریان در هواده پله

Table 6. Flow characteristics in offsets aerators

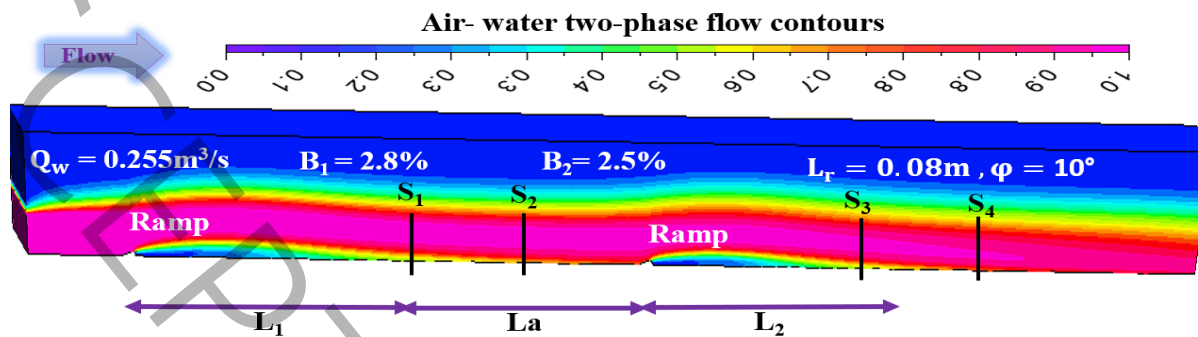
h_s (m)	Q_w (m ³ /s)	$Q_a \times 10^{-3}$ (m ³ /s)	β %	Fr	C%	L (m)	La (m)
۰/۰.۲	۰/۲۵۵	۰/۳۹۲	۰/۱۵۳	۶/۶	۱۲	۰/۲	۱/۱
۰/۰.۲	۰/۳۸۳	۰/۵۸۸	۰/۱۵۴	۹/۹	۸	۰/۴	۱/۲
۰/۰.۴۵	۰/۲۵۵	۰/۸۷۱	۰/۳۴۲	۶/۶	۱۰	۰/۴۵	۱/۳
۰/۰.۴۵	۰/۳۸۳	۱/۳۲۳	۰/۳۴۵	۹/۹	۸/۵	۰/۷	۱/۵
۰/۰.۶	۰/۲۵۵	۱/۱۷۶	۰/۴۶	۶/۶	۹	۰/۵	۱/۴

۰/۰۶	۰/۳۸۳	۱/۷۶۴	۰/۴۶۱	۹/۹	۱۱	۰/۸	۱/۶
۰/۱	۰/۲۵۵	۱/۸۶۲	۰/۷۳	۶/۶	۱۱/۵	۰/۷	۱/۵
۰/۱	۰/۳۸۳	۲/۷۹۳	۰/۷۳۲	۹/۹	۹/۵	۱	۱/۷

۴-۳- تعیین فاصله بین هوادها

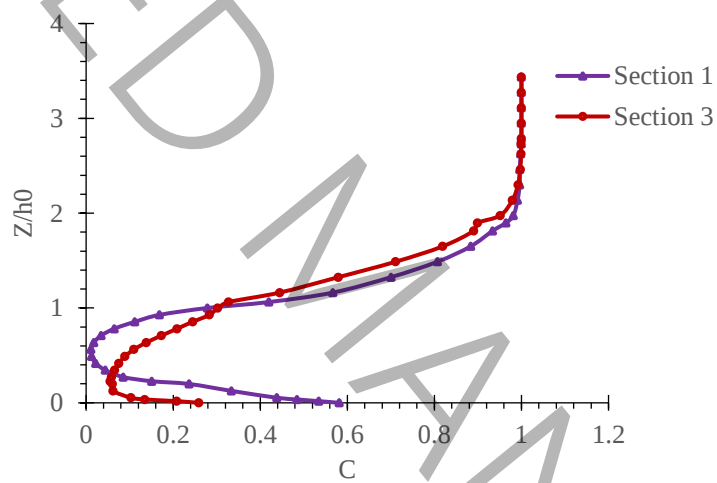
تعیین فاصله مناسب هوادها و تأمین حداقل غلظت هوای مورد نیاز برای جلوگیری از آسیب کاویتاسیون در پایین دست هوادهای شوت ضروری است. ناحیه کاویتی زیر هواده، که تحت تأثیر فاصله هواده و تأمین هوا قرار دارد، تأثیر قابل توجهی بر ورود هوا و محافظت در برابر کاویتاسیون دارد. فاصله بین هوادها به حداقل غلظت هوا، نرخ خروج هوا در امتداد شوت و هندسه خاص شوت و شرایط جریان بستگی دارد. جداول (۳) تا (۶) فاصله بین هوادها (La) و درصد غلظت متوسط هوا (C)، در منطقه‌ای که هواده دوم قرار دارد را نشان می‌دهند. فاصله هوادها بر اساس غلظت متوسط هوا در طول سرریز شوت به دست می‌آید. برای تعیین فاصله بهینه هوادها و افزایش راندمان هوادهی، غلظت متوسط هوا بین ۸ تا ۱۲ درصد در نظر گرفته شد. در شکل (۱۴)، طول ناحیه هواده با Li و فاصله بین دو هواده با La نشان داده شده است که برابر با $1/5$ متر است و دبی آب $0/255$ متر مکعب بر ثانیه فرض شده است. مشاهده می‌شود که طول LI برابر با $1/2$ متر و طول $L2$ برابر با $1/1$ متر است. دلیل تغییر جزئی در طول $L2$ این است که بیشتر هوادهی اولیه در رمپ اول اتفاق می‌افتد و بنابراین راندمان هوادهی در رمپ دوم کمی کاهش می‌یابد. در این هواده، راندمان هوادهی یا ضریب غلظت هوا ($\beta = Q_a/Q_w$) برای رمپ اول، $2/8\%$ و برای رمپ دوم $2/5\%$ است.

در شکل (۱۵)، پروفیل‌های غلظت هوا با توجه به عمق نسبی جریان نشان داده شده است. بخش‌های مورد بررسی مطابق شکل (۱۳) با $S1$ تا $S4$ مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بخش ۱، غلظت هوا از $0/6$ آغاز شده و در عمق نسبی $0/5$ (منطقه آب زلال) به صفر می‌رسد. با افزایش عمق، غلظت هوا مجدداً افزایش یافته و در سطح جریان به حداکثر مقدار خود (۱) می‌رسد. این روند تا حدودی در بخش ۳ نیز مشاهده می‌شود، در حالی که در بخش‌های ۲ و ۴، غلظت هوا با فاصله گرفتن از هواده‌ها کاهش می‌یابد. شکل (۱۶) توزیع غلظت هوا در برابر زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، غلظت هوا در هواده دوم بیشتر از هواده اول است که نشان می‌دهد هواده اول هوای کافی وارد جریان می‌کند و هوادهی در هواده دوم بهینه بوده است. علاوه بر این، با گذشت زمان، غلظت هوا به مقدار ثابتی رسیده است که نشان دهنده توزیع یکنواخت غلظت هوا در هواده‌های شوت است. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که دبی هوا در انتهای سرریز شوت با زمان تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که دبی هوا در ابتدا به صورت نوسانی افزایش می‌یابد و با گذشت زمان، کاهش و دوباره افزایش می‌یابد و در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که جریان هوا به طور یکنواخت در طول شوت توزیع شده و به مقدار بهینه رسیده است.



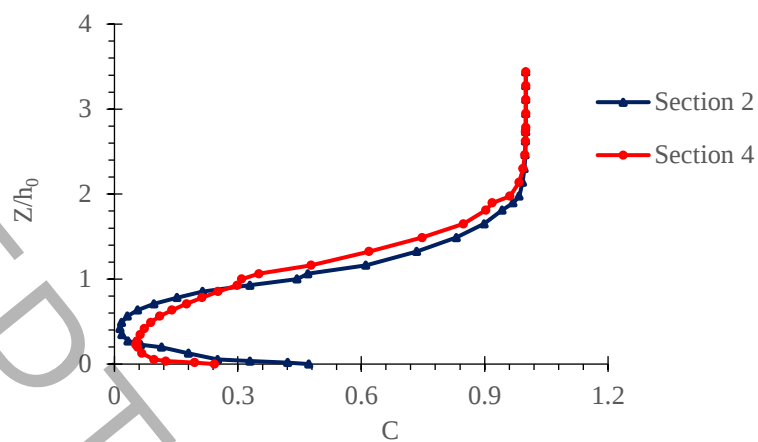
شکل ۱۴- فاصله بین دو هوا ده در سرریز شوت

Fig.14. Distance between two aerators in the chute spillway



الف) پروفیل غلظت هوا در بخش ۱ و ۳

a) The profile of air concentration at sections 1 and 3

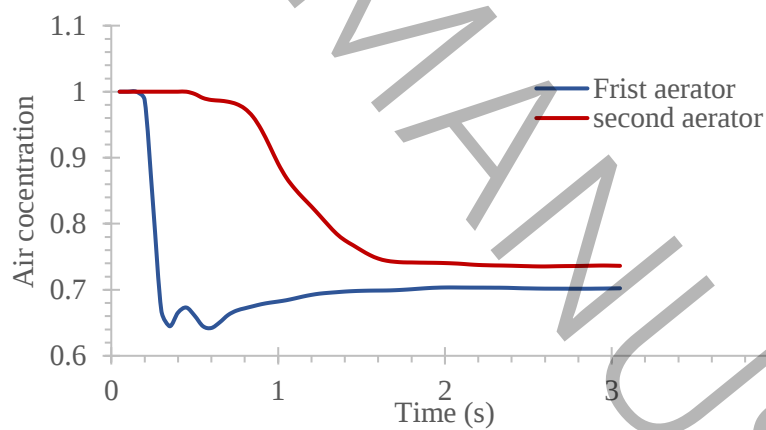


ب) پروفیل غلظت هوا در بخش‌های ۲ و ۴

b) The profile of air concentration at sections 2 and 4

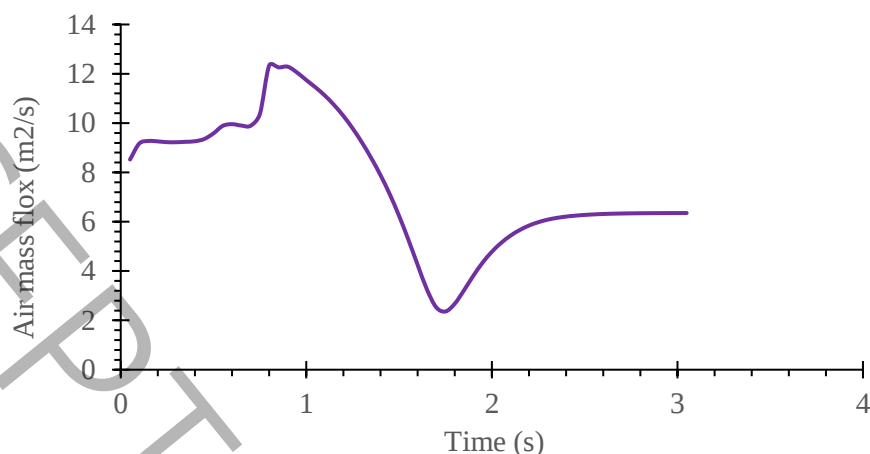
شکل ۱۵- پروفیل توزیع غلظت هوا

Fig. 15. Air concentration distribution profile



شکل ۱۶- توزیع غلظت هوا در مقابل زمان

Fig. 16. Air concentration distribution versus time



شکل ۱۷- تغییرات شار جرمی هوا نسبت به زمان

Fig. 17. Air mass flux changes versus time

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، جریان هوادهی در پایین‌دست هواده شوت مورد بررسی عددی قرار گرفت. به‌منظور بررسی مشخصات جریان و تعیین فاصله میان دو هواده، مدل عددی سه‌بعدی برای انواع مختلف هواده‌ها شامل رمپ، پله، ترکیب رمپ و پله و همچنین رمپ‌های کف و دیواره جانبی بررسی شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و با تطابق بسیار خوبی اعتبارسنجی شدند؛ به‌طوری‌که خطای نسبی حدود ۴٪ برآورد گردید. همچنین مشخص شد که غلظت هوا تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله طول رمپ، زاویه رمپ، ارتفاع پله و عدد فرود بالادست قرار می‌گیرد. افزایش مقادیر این پارامترها منجر به غلظت هوای بالاتر در ناحیه کاویتی هواده می‌شود. در میان هندسه‌های مختلف بررسی‌شده، هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی عملکرد بهتری داشتند، زیرا تشکیل ناحیه کاویتی در هر دو ناحیه پایینی و جانبی سبب افزایش طول ناحیه کاویتی، بهبود یکنواختی توزیع هوا در شوت و در نهایت ارتقای راندمان هوادهی می‌شود. بر اساس یافته‌های عددی، فاصله بین هواده‌ها برای جلوگیری از بروز کاویتاسیون در پایین‌دست سرریز و حفظ غلظت هوای موردنیاز در طول شوت تعیین شد. نتایج نشان داد که حداقل غلظت متوسط هوای لازم برای پیشگیری از کاویتاسیون بین ۸ تا ۱۲ درصد متغیر است. از این‌رو، در طراحی سرریزهای بلند که در آن یک هواده به‌تنهایی قادر به تأمین هوادهی کافی نیست، استفاده از چندین هواده ضروری است. همچنین بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، هواده‌های رمپ کف و دیواره جانبی در مقایسه با سایر

پیکربندی‌های بررسی شده (شامل رمپ ساده، پله، و ترکیب رمپ و پله)، به عنوان حالت بهینه شناسایی گردید. زیرا عملکرد مکانیکی این هواده در ایجاد ناحیه کاویتی پایدار در کف و دیواره جانبی سرریز شوت است. این پدیده منجر به تشدید آشفته‌گی جریان و تسهیل اختلاط بهینه آب و هوا می‌گردد. نتایج نشان داد که به دلیل بهره‌گیری از این مکانیسم، در آرایش رمپ کف و دیواره جانبی، فرآیند هوادهی با بازدهی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها انجام شده و توزیع غلظت هوا در جریان آب به وضعیت مطلوب‌تری می‌رسد.

مراجع

- [1] H. Chanson, Flow downstream of an aerator-aerator spacing, *Journal of Hydraulic Research*, 27(4) (1989) 519-536.
- [2] M. Pfister, J. Lucas, W.H. Hager, Chute aerators: preaerated approach flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11) (2011) 1452-1461.
- [3] M. Akbari, A. Afshar, S. Mousavi, Multi-objective reservoir operation under emergency condition: A bbaspour reservoir case study with non-functional spillways, *Journal of Flood Risk Management*, 7(4) (2014) 374-384.
- [4] K. Kramer, W.H. Hager, H.-E. Minor, New model investigations on two-phase chute flow, *Hydraulics of dams and river structures*, (2004) 33-41.
- [5] M. Pfister, W.H. Hager, Closure to "Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics" by Michael Pfister and Willi H. Hager, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(7) (2012) 668-669.
- [6] P. Rutschmann, W.H. Hager, Air entrainment by spillway aerators, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(6) (1990) 765-782.
- [7] R. Rasmussen, Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air, in :Proc., Int. Symp. on Cavitation in Hydrodynamics, National Physical Laboratory London, 1956, pp. 1-25.
- [8] H. Chanson, Study of air demand on spillway aerator, *Journal of Fluids Engineering*, 112(3) (1990) 343-350.
- [9] M.C. Aydin, Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(3) (2018) 330-336.
- [10] B.P. Tullis, J. Larchar, Determining air demand for small-to medium-sized embankment dam low-level outlet works, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137(12) (2011) 793-800.

- [11] J. Lian, C. Qi, F. Liu, W. Gou, S. Pan, Q. Ouyang, Air entrainment and air demand in the spillway tunnel at the Jinping-I Dam, *Applied Sciences*, 7(9) (2017) 930.
- [12] M.C. Aydin, M. Ozturk, Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(5) (2009) 826-836.
- [13] W. Wei, J. Deng, W. Xu, Numerical investigation of air demand by the free surface tunnel flows, *Journal of Hydraulic Research*, 59(1) (2021) 158-165.
- [14] J. Yang, P. Teng, H. Zhang, Experiments and CFD modeling of high-velocity two-phase flows in a large chute aerator facility, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1) (2019) 48-66.
- [15] H. Wang, X. Liu, R. Bai, S. Liu, Modified bottom Air entrainment estimate by chute offset aerator, *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(11) (2020) 06020016.
- [16] F. Ye, W. Xu, W. Wei, Experimental study of the air concentration diffusion in aerated chute flows downstream of lateral and bottom aerators, *AIP Advances*, 12(2)(2022).
- [17] F. Salmasi, J. Abraham, Hydraulic characteristics of flow over stepped and chute spillways (case study: Zirdan Dam), *Water Supply*, 23(2) (2023) 851-866.
- [18] P. Nikrou, S. Pirboudaghi, Numerical Analysis of Cavitation Dynamics on Free Ogee Spillways Using the Volume of Fluid (VOF) Method, *arXiv preprint arXiv:2412.00695*, (2024).
- [19] B.R. Bai RuiDi, L.S. Liu ShanJun, T.Z. Tian Zhong, W.W. Wang Wei, Z.F. Zhang FaXing, Experimental investigation of air-water flow properties of offset aerators, (2018).
- [20] L. Jiang, M. Diao, H. Sun, Y. Ren, Numerical modeling of flow over a rectangular broad-crested weir with a sloped upstream face, *Water*, 10(11) (2018) 1663.
- [21] M. Pfister, H. Chanson, Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(2) (2014) 291-298.
- [22] F. Safiloo, F. Salmasi, H. Arvanaghi, A. Abbaspou, J. Abraham, Investigating flow characteristics in different types of chute spillway aerators, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 31 (4), (2025) 686-706.

[23] F. Safiloo, F. Salmasi, H. Arvanaghi, A Abbaspour, J Abraham, CFD Modeling of Air–Water Flow Characteristics in Chute Spillway Aerators, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 026-02125 (2026) 190-205.

[24] A. Taheri Aghdam, A. Hosseinzadeh Dalir, F. Salmasi, A. Abbaspour, J. Abraham, Numerical and Experimental Study of Trajectory for Free-Falling Jets, Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering, 9(5), (2023) 62-70