

بررسی عددی خصوصیات جریان بعد از هواده در سرریز شوت

مهدی اژدری مقدم^۱، الهام نخعی زینلی^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه سیستان و بلوچستان

El.Nakhaie@gmail.com

خلاصه

با افزایش جمعیت جهان و افزایش نیاز به آب شیرین در سالهای اخیر، ساخت سدهای مرتفع و طراحی و بررسی خطرات تهدید کننده امنیت سد و اجزای آن اهمیت ویژه پیدا کرده است. سرریزها و شوتها، از مهمترین اجزاء سد جهت حفظ ایمنی و عبور سیلاب مازاد بر حجم مخزن به پایین دست سد بوده و مهم ترین عامل شکست سدها بعد از عدم در نظر گرفتن ظرفیت کافی برای سرریز، کاویتاسیون می باشد. بهترین راه ممکن برای جلوگیری از وقوع آسیب کاویتاسیون، استفاده از هواده ها می باشد. در این تحقیق از مدل عددی Flow_3D برای تعیین غلظت هوای وارد شده به جریان، در حالت هوادهی طبیعی به وسیله دفلکتور و تاثیر هندسه هواده در میزان غلظت متوسط هوا استفاده شده است. نتایج بدست آمده از این مدل با نتایج آزمایشگاهی فیشر مورد مقایسه قرار گرفت که از تطابق خوبی برخوردار می باشند.

کلمات کلیدی: سرریز شوت، کاویتاسیون، عدد فرود، Flow_3D.

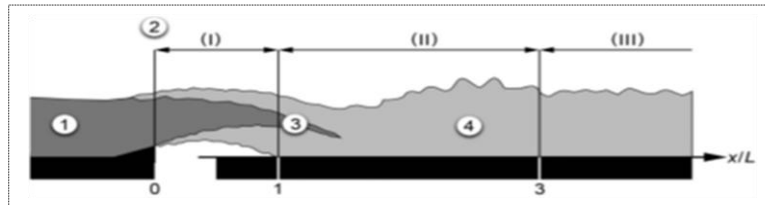
۱. مقدمه

سرریزها به عنوان تخلیه کننده سیلابها یکی از المانهای مهم در سدهای مخزنی بزرگ هستند. سرریزها جهت کنترل تراز سطح آب به هنگام سیلابهای بزرگی برای محافظت سد در برابر لبریز شدن بکار می رود. بین سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ چندین آسیب چشم گیر سرریز مشاهده شد. تخریب سطح بتن و فونداسیون به طور ویژه در ناحیه های جریان با سرعت بالا به علت کاویتاسیون پیدا شده بود. ثابت شده که برای اجتناب از آسیب کاویتاسیون، هواگیری جریان بحرانی بوسیلهی هواده های شوت بسیار مفید است. آزمایشات زیادی روی هواده های کف شوت در گذشته انجام شده است [1]. اولین مشاهدات در خصوص هوادهی شوت توسط مهندس اتریشی (1926) Rudolf Ehrenberger صورت گرفت. او مشاهده کرد که شکل گیری آب سفید رنگ مربوط به گسترش لایه مرزی جریان می باشد. بررسی های او روی سرعت سطحی و افزایش حجم جریان بود که برای تعیین ارتفاع آزاد مناسب ضروری می باشد. اولین بار فکر کاهش آسیب کاویتاسیون بوسیلهی وارد کردن هوا بوسیلهی Bradley (1945) و Warnock (1947) مطرح شد. بر مبنای آزمایشات Peterka (1953) یک عدد فرضی ثابت بین ۵ تا ۸ درصد غلظت متوسط هوا برای کاهش آسیب کاویتاسیون روی بتن پیشنهاد کرد [2].

Russell & Sheehan (1974) آزمایشهایی را روی نمونه های بتنی انجام دادند و نتیجه گرفتند که غلظت هوای ۲-۱ درصد فرسایش ناشی از کاویتاسیون را کم می کند و برای غلظت های بالای ۷-۵ درصد هیچگونه فرسایشی مشاهده نمی شود. آنها هوای وارد شده به جریان را به دلایل زیر موثر دانستند:

- اگر در حباب های بخار، هوا وجود داشته باشد باعث میرایی و استهلاک انفجارها شده و فشار ضربه قوچ حاصله را کاهش می دهد.
- وجود حباب های هوا در آب سرعت ضربه موج را کاهش داده و بنابراین بزرگی ضربه های موج بر مصالح سطح کاهش می یابد [3].

Volkart (1983) و Chervet اولین کسانی بودند که طراحی‌های گوناگون هوادها را پیشنهاد کردند. انواع اصلی هوادها، شامل صفحه‌ی منحرف کننده‌ی جریان (رمپ)، کانال (شیار)، پله (شکستگی) و ترکیبی از آنها می‌باشد. آزمایشات نشان دادند که عبور هوای پایین دست یک هواده offset و Deflector یا ترکیبی از هر دو، می‌تواند به سه منطقه کلی تقسیم شود (شکل ۱).
۱. منطقه جت ۲. منطقه پیوستگی و افشانه‌ها ۳. ناحیه دورتر.

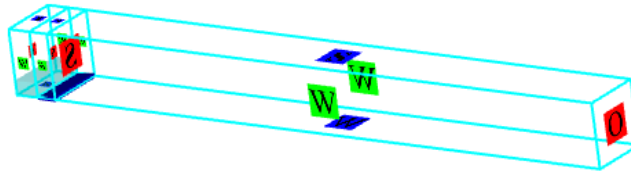


شکل ۱ - سه منطقه کلی عبور هوای پایین دست هواده. شماره یک: جریان ورودی، شماره دو: هواده، شماره سه: منطقه پیوستگی، شماره چهار: منطقه افشانه‌ها

جریان بوسیله رمپ منحرف شده و یک جت آزاد تولید می‌کند. ناهمواری‌های سطوح جت در مسیر جریان افزایش می‌یابد در حالی که ضخامت هسته‌ی آب کم می‌شود. در پایین دست یک نقطه‌ی معین، جت کامل هواده‌ی شده است و بعد از برخورد جت به کف شوت، در سطح آب اسپری قابل توجهی تولید می‌شود. جریان آشفته پایین دست منطقه پیوستگی به طور کامل هواده‌ی شده است. عمق جریان هواده‌ی شده از عمق ورودی جریان، بزرگتر می‌شود و سطح آب ناهموار و آشفته است [4]. غلظت هوا در کف شوت بدلیل تاثیرات ثقل در طول مسیر جریان کم می‌شود. تا جایی که مقدار غلظت برای محافظت ناکافی است و نیاز به یک هواده جدید است. متأسفانه هیچ ضوابط و معیار تعریف شده‌ای برای ارزیابی نرخ تغییرات غلظت هوا و تاثیر محافظت آن وجود ندارد. طراح معمولاً از نتایج پروژه‌های قبلی و تجربیات خودش، مسائل را توجیح می‌کند [5].

۲. مدل‌سازی عددی

تحقیق حاضر نتایج حاصل از پژوهش پایان‌نامه کارشناسی ارشد است در این مطالعه از نرم افزار Flow_3D جهت مدل‌سازی جریان استفاده شده است. نرم افزار Flow_3D یک نرم افزار قوی بر اساس روش حجم محدود است که در کدنویسی عددی موفقیت چشم‌گیری داشته است. یکی از قابلیت‌های عمده این برنامه برای آنالیز هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد با روش (VOF) است. قابلیت ورود هوا از نسخه ۹/۰ به این نرم افزار اضافه شده است [6]. معادلات مورد استفاده در تحلیل جریان‌های آشفته، شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم (ناویر-استوکس) می‌باشد. حل عددی این معادلات مشکل و وقت گیر است زیرا لازم است جزئیات اغتشاشات در مقیاسی کوچکتر از وسعت دامنه جریان در نظر گرفته شود. هندسه کانال اصلی به طول ۶، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۳ متر و شیب 30° مشابه مدل آزمایشگاهی در نرم افزار Auto CAD تولید شده است. دامنه جریان را به شبکه‌هایی با سلولهای مستطیل شکل که المان آجری (brick elements) نیز نامیده می‌شود تقسیم‌بندی شده است. هدف مطالعه تغییرات خصوصیات جریان و غلظت هوا در جهات طول و ارتفاع می‌باشد، با توجه به اینکه مدل متقارن است به منظور کاهش حجم محاسبات بصورت دوبعدی مدل‌سازی شده است. کنترل هندسه و کیفیت مش با استفاده از گزینه FAVORTM انجام شده است. از مدل آشفته‌نگی RNG برای شبیه‌سازی ورود هوا طبیعی به وسیله هواده استفاده شده است [7,8]. با توجه به اینکه کانال دارای سطح باز است شرط مرزی symmetry برای سطح در تماس با هوا و برای کف کانال و دیواره‌های جانبی از شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش (wall)، برای صفحه ورودی جریان سرعت ثابت و خروجی جریان شرط مرزی (Outflow) گرادین سرعت صفر استفاده شده است. شکل ۲ محدوده مش و شرایط مرزی اعمال شده در میدان جریان را نشان می‌دهد. با تعیین شرایط مرزی و اولیه مناسب امکان حل عددی معادلات توسط نرم افزار فراهم خواهد شد. مشخصات هیدرولیکی و هندسی مربوط به سرریز مدل شده در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- محدوده مش بندی مدل در Flow-3D

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی و هندسی سرریز شوت و هواده

F	h , mm ارتفاع جریان ورودی	α شیب رمپ (درجه)	S ,mm ارتفاع پله	t , mm ارتفاع رمپ	ϕ شیب شوت (درجه)	مشخصات هیدرولیکی و هندسی
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۱۰۰	۱۳/۳	۳۰°	مدل ۱
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۱۰۰	۱۰/۶۴	۳۰°	مدل ۲
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۱۰۰	۱۵/۹۶	۳۰°	مدل ۳
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۰	۱۳/۳	۳۰°	مدل ۴
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۰	۱۰/۶۴	۳۰°	مدل ۵
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۰	۱۵/۹۶	۳۰°	مدل ۶
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۴۵	۱۳/۳	۳۰°	مدل ۷
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۴۵	۱۰/۶۴	۳۰°	مدل ۸
۹	۶۷	$۸/۱^\circ$	۴۵	۱۵/۹۶	۳۰°	مدل ۹

۳. تحلیل نتایج

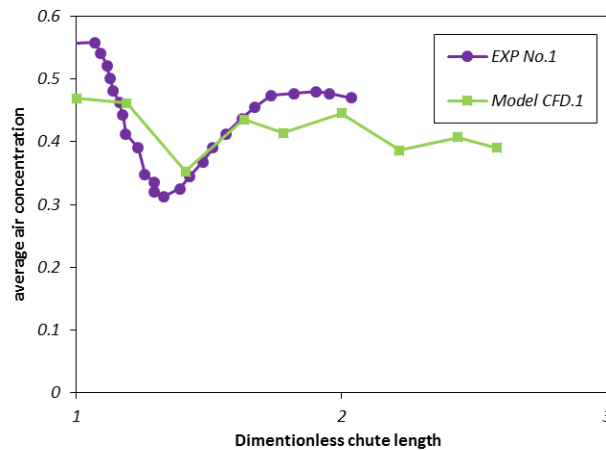
۳-۱. صحت سنجی نتایج مدل عددی

برای صحت سنجی نتایج مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی فیشر و هیگراستفاده شده است. مدل آشفتنگی بکار برده شده در این تحلیل RNG است که از دقت بهتری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردار می‌باشد. غلظت متوسط در عمق جریان بعد از برخورد جت به کف شوت، بصورت زیر بین کف شوت تا سطح جریان تعریف می‌شود:

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

که در آن C_a غلظت متوسط و z مختصات عمودی از کف شوت می‌باشد. نتایج اندازه گیری شده غلظت متوسط هوا در منطقه پیوستگی بعد از برخورد جت به کف شوت توسط هیگرا با نتایج حاصل از نرم افزار در شکل ۳ مقایسه شده است که از تطابق خوبی برخوردار می‌باشد. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی نیز دارای مقداری خطا است، میزان خطا در پروفیل غلظت متوسط هوا C_a ، حاصل از مدل CFD ایجاد شده در نرم افزار حداکثر ۱۷ درصد می‌باشد. در این شکل طول شوت نسبت به طول پرش جت جریان (L) بی‌بعد شده است. (Pfister(2008) طبق آزمایشات رابطه‌ای را برای طول جت بصورت زیر بیان کرد [1]:

$$\frac{L}{h_0} = 0.77 F_0 (1 + \sin \phi)^{1.5} \left[\sqrt{\frac{s+t}{h_0}} + F_0 \tan \alpha \right] \quad (2)$$



شکل ۳- مقایسه‌ی نتایج تغییرات غلظت متوسط هوا مدل عددی و آزمایشگاهی پس از برخورد جریان به بستر کانال آزمایش شماره ۱

جهت تعیین طول جت جریان، فاصله‌ی محل فشار ماکزیمم وارد به کف شوت تا لبه‌ی هواده اندازه گیری شده است. در جدول ۲ مقادیر طول پرش جت اندازه گیری شده در مدل عددی با مقادیر حاصل از رابطه‌ی ۲ مقایسه شده است.

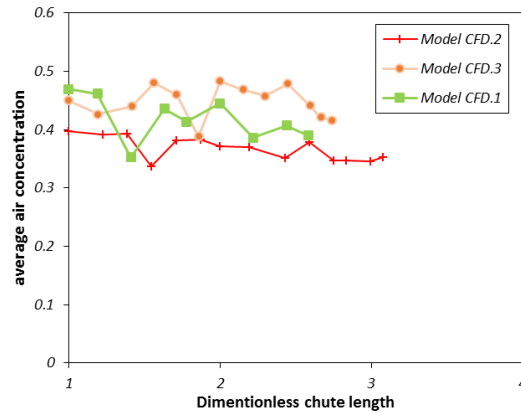
جدول ۲- مقایسه طول پرش جت جریان (L)

	نتایج رابطه ۲	نتایج مدل عددی	میزان خطا %
مدل ۱	۲/۲۰۱۸	۲/۵۲۸۴	۱۴
مدل ۲	۲/۱۸۸۷	۲/۲۹۹۷	۵
مدل ۳	۲/۲۱۴۷	۲/۵۲۷۱	۱۴
مدل ۴	۲/۴۷۲۶	۲/۶۸۸۴	۱۴
مدل ۵	۱/۴۳۲۵	۱/۶۲۹۷	۱۳
مدل ۶	۱/۵۰۸۹	۱/۹۵۷۱	۲/۹
مدل ۷	۱/۸۸۸۲	۱/۹۴۸۴	۳
مدل ۸	۱/۸۷	۲/۰۲۹۷	۸
مدل ۹	۱/۹۰۶۲	۲/۲۴۷۱	۱۷

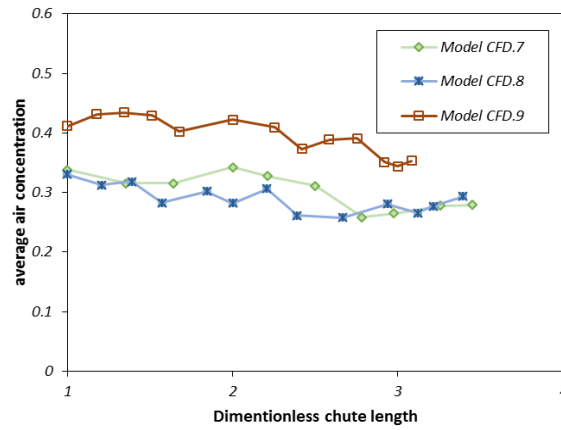
۳-۲. نتایج مربوط به تأثیر هندسه هواده

هدف ریمپ بالا بردن جریان از مرز است برای اینکه هوا بتواند از زیر سطح جریان وارد بشود. در این حالت هوا بدون استفاده از روشهای مکانیکی مثل پمپ‌های هوا که نیاز به انرژی برای کار کردن دارند، وارد می‌شود. حالت ریمپ عملکردش برای دبی‌های کوچک است. قرار گرفتن پله روی شیب‌های مسطح خط سیر جت را برای دبی‌های بزرگ گسترش می‌دهد و از غرق شدن هواده در آب، جلوگیری می‌کند. هنگام برخورد جت روی سطح شیب‌دار، یک بخش از جت به سمت بالا هدایت می‌شود و از هواده‌ی جلوگیری می‌کند [9].

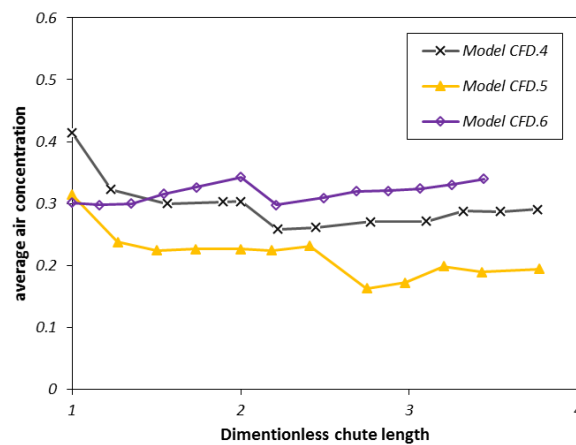
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ تغییرات غلظت متوسط هوا (Ca) را بعد از برخورد جت به کف شوت در ناحیه پیوستگی و ناحیه دورتر به صورت بی‌بعد (X/L) نشان می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات غلظت متوسط هوا C_a نسبت به طول بی بعد شوت، $S=100$

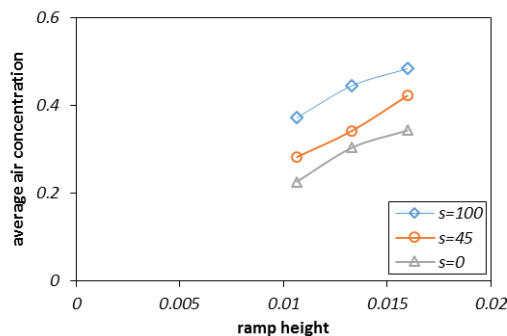


شکل ۵- تغییرات غلظت متوسط هوا C_a نسبت به طول بی بعد شوت، $S=40$



شکل ۶- تغییرات غلظت متوسط هوا C_a نسبت به طول بی بعد شوت، $S=0$

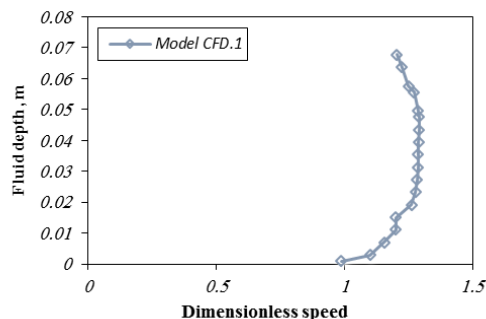
تغییر در هندسه هوا در میزان ورود هوا به جریان تاثیر دارد و افزایش و کاهش ارتفاع رمپ و ارتفاع پله باعث تغییر در غلظت متوسط شده است. در طول ناحیه پیوستگی بیشترین غلظت متوسط وجود دارد که در ادامه مسیر و در ناحیه دورتر از هوا در مقدار آن به تدریج کاهش می‌یابد. در شکل ۷ تاثیر وجود پله در تغییرات غلظت متوسط هوا نشان داده شده است.



شکل ۷- تاثیر پله در تغییرات غلظت متوسط هوا

۳-۳. نتایج مربوط به مشخصات میدان جریان

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 کننده‌ای در میدان‌های سرعت، فشار و سایر دارد. در آزمایش‌ها هوا در یک متری از ابتدا سرریز قرار گرفته است و شکل ۸ نشان می‌دهد که جریان قبل از رسیدن به هوا در فاصله ۰/۸۸۹ متری از ابتدا کانال به شکل توسعه یافته می‌باشد.



شکل ۸ - پروفیل سرعت قبل از هوا

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق از نرم افزار Flow_3D برای تحلیل جریان عبوری از روی سرریز شوت استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی بیانگر دقت بالای این نرم افزار در شبیه‌سازی هواها برای جلوگیری از کاویتاسیون می‌باشد و روند تغییرات غلظت هوا به خوبی مشخص می‌شود. در این تحقیق از جریان توسعه یافته برای بدست آوردن غلظت متوسط هوا استفاده شده است و طول توسعه یافته بدست آمده از مدل عددی مقدار ۰/۸۸۹ متر شده است. هندسه هوا و خصوصیات هیدرولیکی جریان تاثیر زیادی در میزان ورود هوا دارد. نتایج نشان می‌دهد که وجود پله و افزایش ارتفاع پله باعث بلندتر شدن طول جت و افزایش ورود هوا به جریان می‌شود و همچنین افزایش ارتفاع رمپ هم باعث افزایش طول جت و افزایش غلظت متوسط هوا می‌شود، در نتیجه در جلوگیری از وقوع کاویتاسیون و ایجاد فشار منفی در جریان تاثیر زیادی دارد.

۵. مراجع

1. Michael Pfister and Willi Hager, (2010). Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics, *Journal of hydraulic Engineering*, 136 (6), 352-359
2. Kramer, k (2004). Development of Aerated Chute Flow, Dipl.-Ing. *Technical University of Darmstadt (TUD), Zurich.*
3. Hubert Chanson (2009). EMBANKMENT OVERFLOW PROTECTION SYSTEMS AND EARTH DAM SPILLWAYS, *The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia.*
4. Michael Pfister and Willi H. Hager, F.ASCE (2010). Chute Aerators. II: Hydraulic Design, *Journal of hydraulic Engineering*, 136 (6), 360-367
5. NLS Pinto, SH Neidert, JJ Ota (1982). Aeration at high velocity flows. *NeiDert OTA.*
۶. هدایتی فر.م.، پورلک.م.، شبیه سازی دینامیک سیالات با Flow_3D ، چاپ اول، نشر آتی نگر، تهران، ایران، ۱۳۹۳.
۷. بهرامی.آ.، بارانی.غ.، بررسی روند تغییرات غلظت هوا در جریان های عبوری از روی شوت، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ۲۳-۲۱ اردیبهشت ۱۳۸۸.
8. Flow-3D Help, Ver.11.0.4, Flow science Inc.
9. Henry T. Flavey (1990). Cavitation in chutes and spillways, *engineering MonoGraph No.42, Denver office, Colorado.*