

مطالعه عددی الگوی جریان عبوری از تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره

توحید جمالی روش^{۱*} و محمد مناف پور^۲

چکیده

تخلیه‌کننده‌های تحتانی، به‌عنوان یکی از سازه‌های هیدرولیکی وابسته سد، وظیفه خطیر برداشت آب مورد نیاز از مخزن و تحویل آن به پایین‌دست سد را به عهده دارند. این سازه‌ها در دوره بهره‌برداری با پاره‌ای از مشکلات، مثل بروز جریان‌های چرخشی موضعی، نوسانات شدید فشار و ... روبرو هستند. برای شناسایی و مقابله با این عوامل، نیازمند درک صحیح از الگوی جریان عبوری در مجرای می‌باشیم. در تحقیق حاضر، به مطالعه عددی الگوی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره، در حالت تحت فشار و آزاد با کمک نرم‌افزار FLOW3D و مدل آشفتگی RNG (k-ε) به ازای بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس و کامل دریچه اضطراری پرداخته شده است. نتایج حاکی از افزایش سرعت جریان و کاهش فشار با پیشروی در جهت جریان است؛ به‌طوری که در بازشدگی کامل دریچه سرویس و هد شمال ۱۰۰ متر، حداکثر مقدار سرعت جریان برابر با $4.5/6 \text{ m/s}$ و حداقل مقدار فشار $4/1 \text{ kPa}$ - به‌دست آمد. در ضمن، با کاهش تدریجی بازشدگی دریچه، اختلاف مقادیر سرعت متوسط و همچنین فشار کف بلافاصله بالادست و پایین‌دست دریچه افزایش می‌یابد. با مقایسه پروفیل‌های سطح آزاد جریان مشاهده شد که وجود رمپ جداکننده جریان در انتهای مجرا، باعث افزایش سطح آب در بازشدگی‌های کوچک دریچه می‌شود و با افزایش بازشدگی، اثر آن قابل توجه نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبگیر تحتانی، بررسی عددی، سد سیمره، مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، FLOW3D.

ارجاع: جمالی روش ت. و مناف پور م. ۱۳۹۸. مطالعه عددی الگوی جریان عبوری از تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره. مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۱۴۷-۱۵۶.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه.
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه.

* نویسنده مسئول: tohidjamali71@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی سدسازی شاهد افزایش ارتفاع سدها در سال‌های اخیر بوده‌ایم. افزایش ارتفاع سد علاوه بر مزایا، سبب بروز مشکلاتی می‌شود که می‌توان به افزایش سرعت جریان آب در سازه‌های هیدرولیکی چون تخلیه‌کننده‌های تحتانی اشاره کرد.

تخلیه‌کننده‌های تحتانی، به‌عنوان یکی از سازه‌های هیدرولیکی سد برای کنترل آبیگری مخزن، تخلیه مخزن در مواقع ضروری و تخلیه رسوبات ورودی به مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد (سالازار و همکاران، ۲۰۱۶)؛ از این‌رو، آن‌ها نیازمند طراحی دقیق و شناسایی عوامل آسیب‌رسان می‌باشند. برای اطمینان از عملکرد مناسب مجرا، تأسیسات هیدرولیکی و هیدرومکانیکی وابسته آن، از جمله دریچه‌ها و شیرها و ظرفیت آبیگری جریان باید مورد بررسی دقیق توأم با انجام آزمایش‌های مدل هیدرولیکی قرار گیرند. با بررسی تخلیه‌کننده‌های تحتانی آسیب‌دیده در جهان، مشکلات ناشی از سایش، کاویتاسیون، ارتعاش دریچه‌ها به‌عنوان مهم‌ترین علل خرابی آبیگری‌های تحتانی شناخته شده‌اند (زونمات و شولز، ۲۰۱۳).

در پدیده‌های بالا، پارامترهایی همچون دبی جریان، سرعت جریان، فشار هیدرودینامیکی آب، سرعت هوای ورودی به جریان و عمق آب مؤثر می‌باشند که با اندازه‌گیری برخی از این پارامترها می‌توان پیش از خرابی از وقوع آن‌ها جلوگیری کرد (تاها و آوت، ۲۰۱۶) که بیش از پیش ضرورت طراحی دقیق تخلیه‌کننده‌ها را مورد توجه قرار داد. به دلیل وقت‌گیر بودن و بالابودن هزینه‌های مدل آزمایشگاهی برای بررسی تمامی پارامترها نیاز به بررسی عددی می‌باشد.

وو جیان (۲۰۰۷) به مطالعه پارامترهای هیدرولیکی نظیر فشار جریان، ضریب آبیگری و پروفیل سطح جریان پایین‌دست در بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس و هدهای متفاوت بالادست مجرا در تخلیه‌کننده تحتانی سد برق آبی Longtan به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که مقادیر فشار در کف جریان در قسمت پایین‌دست دریچه مجرا با افزایش بازشدگی دریچه سرویس افزایش می‌یابد و ضریب آبیگری جریان در بازشدگی‌های کوچک و بزرگ نسبت به بازشدگی‌های میانی از مقدار بیشتری برخوردار است.

دانشمند و همکاران (۲۰۱۴) پارامترهای هیدرولیکی جریان و نیروهای وارد بر دریچه را در بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس در تخلیه‌کننده تحتانی سد شهریار به‌صورت آزمایشگاهی و عددی (با استفاده از روش Finite Element) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل بیانگر بالابودن شاخص کاویتاسیون و دور بودن فرکانس‌های ارتعاشی دریچه سرویس از مقدار بحرانی در کلیه بازشدگی‌ها بوده و همچنین، کمترین ضریب آبیگری جریان مربوط به بازشدگی ۲۰ درصد می‌باشد.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی عددی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در یک مجرای تخلیه‌کننده ایستگاه برق آبی در چین پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از مثبت بودن مقادیر فشار جریان در شیر دریچه‌های سرویس، اضطرابی و دیواره‌های مجرا است؛ با این تفاوت که میزان مقادیر این پارامتر در دیواره‌های عمودی نسبت به دیواره‌های عرضی کم می‌باشد. همچنین، مقدار به‌دست آمده برای عمق جریان هوادهی شده توسط مدل VOF با میزان عمق جریان محاسبه شده توسط فرمول‌های تجربی مغایرت دارد که ضعف مدل VOF را در این زمینه نشان می‌دهد.

شیلپیکر و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه مشخصه‌های هیدرولیکی جریان از جمله سرعت و فشار جریان و طول کاویتی ایجادشده بعد از هوادهای موجود در مجرای تخلیه‌کننده تحتانی سد برق آبی Jingping-I در چین پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد بیشترین مقدار سرعت جریان ۴۶/۴ متر بر ثانیه، کمترین مقدار فشار جریان برابر با ۷- کیلو پاسکال و حداقل مقدار اندیس کاویتاسیون در طول مجرا برابر با ۰/۲ است که در محل آخرین هواده موجود در تخلیه‌کننده رخ می‌دهد و ضرورت وجود هواده را در محل حاضر نشان می‌دهد. همچنین طول کاویتی به‌دست آمده برای هوادهای موجود در مجرا مناسب و قابل قبول می‌باشد.

هدف از این تحقیق، بررسی عددی الگوی جریان عبوری از مجرا تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره در دو حالت تحت فشار و آزاد و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی، نظیر سرعت و فشار جریان در طول مجرا و پروفیل سطح آزاد جریان پایین‌دست دریچه می‌باشد. با تجزیه و تحلیل مشخصه‌های هیدرولیکی جریان تلاش شده است تا درک درستی از احتمال وقوع پدیده‌هایی همچون کاویتاسیون و ارتعاشات دریچه حاصل گردد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارت‌اند از: معادله پیوستگی و معادله مومنتم، که برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شود (فرزیگر و پریک، ۱۹۹۶).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - u_i u_j \right)$$

که در آن x_i مختصات کارتزین؛ t ، زمان؛ ρ ، چگالی سیال؛ و \bar{P} ، U_i ، $u_i u_j$ به ترتیب فشارمتوسط، سرعت و تانسور تنش رینولدز می‌باشند.

پروفیل سطح آزاد جریان در روش حجم سیال (VOF) با تعریف تابع $F(x, y, z, t)$ که بیانگر نسبت حجم اشغال شده توسط سیال به کل حجم می‌باشد، از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) \right] + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + x \frac{FA_x u}{x} \right] = FDIF + FSOR \quad (3)$$

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_y R \frac{\partial F}{\partial y} \right) \right) \right] \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \left(\frac{v_F A_x F}{X} \right) \right]$$

که V_F ، کسر حجمی جریان؛ (u, v, w) ، A_x ، A_y و A_z به ترتیب مؤلفه‌های سرعت و کسر سطحی جریان در جهات (x, y, z) می‌باشد. در سیستم مختصات کارتزین R برابر با ۱ بوده و ξ برابر با صفر بوده و $FSOR$ برابر با نرخ زمانی تغییرات کسر حجم سیال ناشی از منبع جرم می‌باشد، که در صورت اشغال فضای مورد نظر با آب $F=1$ و با هوا $F=0$ خواهد بود. برای نواحی اشغال شده با هوا، فشار یکنواختی حاکم می‌باشد (هیرت و نیکلز، ۱۹۸۱).

مشخصات کلی سد سیمره و تأسیسات وابسته

سد مخزنی سیمره همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از نوع بتنی دو قوسی، دارای دو مجرا در بدنه

سد به‌عنوان تخلیه‌کننده تحتانی می‌باشد که تراز کف ورودی دهانه‌های تخلیه‌کننده‌ها به ترتیب معادل ۶۲۰ و ۶۴۰ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشد، که به ترتیب حدود ۲۰ و ۴۰ متر بالاتر از کف رودخانه می‌باشند. با توجه به شکل ۲، دهانه ورودی تخلیه‌کننده به صورت زنگوله‌ای شکل و به ابعاد $۹/۵۶ \times ۱۷/۸۵$ متر (عرض \times ارتفاع) بوده که برای جلوگیری از ورود اجسام بزرگ در محل دهانه ورودی مجرا از آشغالگیر بتنی استفاده شده است؛ دریاچه اضطراری از نوع کشویی و دریاچه سرویس از نوع قطاعی می‌باشد. در تحقیق حاضر، به بررسی هیدرولیکی جریان در تخلیه‌کننده شماره ۱ به طول کلی $۴۵/۴$ m که در آن $۳۶/۵$ m جریان تحت فشار و $۸/۹$ m جریان آزاد برقرار است، پرداخته شده است. این تخلیه‌کننده برای حداکثر دبی ۶۵۴ مترمکعب بر ثانیه به ازای $۱۱۱/۵$ متر هد آب بالادست طراحی شده است (مؤسسه تحقیقات آب تهران، مدل هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره، ۱۳۸۴).



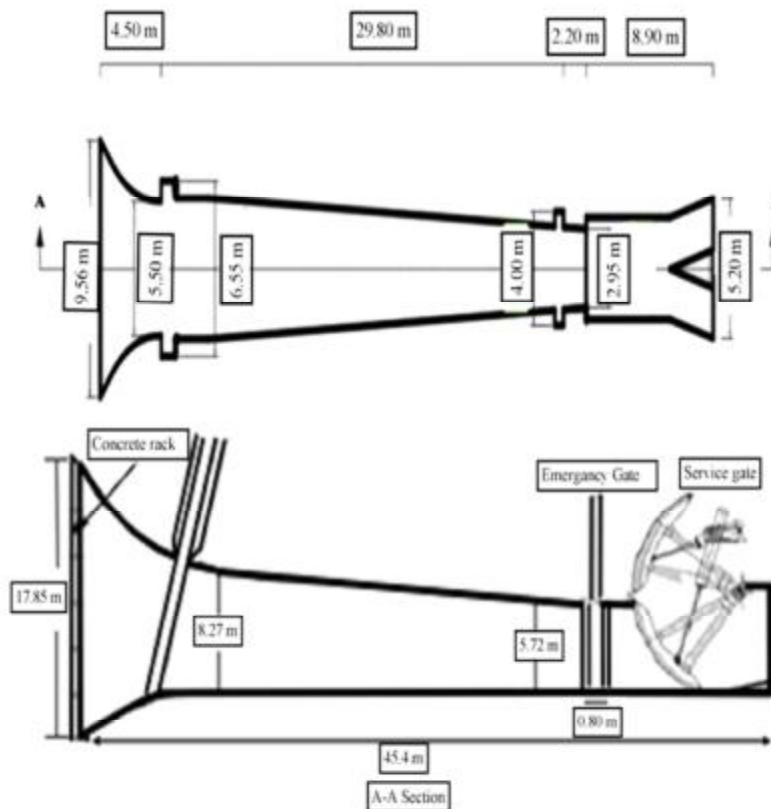
شکل ۱- جانمایی سد سیمره و سازه‌های وابسته آن (وب سایت سد و نیروگاه سیمره)

معرفی مدل فیزیکی تخلیه‌کننده: ابعاد مدل، ابزارهای اندازه‌گیری و نحوه آزمایش‌ها

مدل مجرای تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره که شامل ورودی مجرا، مجرای میانی، مجرای پایین‌دست و دریاچه اضطراری و سرویس، همراه با بلوک انتهایی انرژی‌گیر

در نظر گرفته شده است. دریچه اضطراری از نوع کشویی و دریچه سرویس از نوع قطاعی می‌باشد. برای اندازه‌گیری مقادیر متوسط فشار از تعداد ۷۴ پیزومتر در مکان‌های مختلف مجرا، برای اندازه‌گیری دبی از سرریز مستطیلی و جهت اندازه‌گیری هد آب مخزن از مانومتر قائم متصل به مخزن استفاده شده است. کلیه آزمایش‌ها به ازای هد ارتفاعی نرمال ۱۰۰ متر و تراز حداکثر ۱۱۱/۵ متر جهت ارزیابی میزان دبی، فشار جریان و شاخص کاویتاسیون در بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس و اضطراری صورت گرفته است (مؤسسه تحقیقات آب تهران، مدل هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره، ۱۳۸۴).

می‌باشد، با مقیاس ۱:۱۵ از جنس ورق شفاف (پلگسی گلاس) و در قسمت‌هایی از چوب ساخته شده است. برای تأمین ارتفاع آب لازم و دبی مورد نیاز، از یک مخزن روباز فلزی به قطر ۵ متر و ارتفاع ۶ متر استفاده شده و در ارتفاع ۶ متری مخزن دیگری به قطر ۲ متر و ارتفاع ۴ متر اضافه گردیده است که به وسیله چهار پمپ، هر یک به ظرفیت ۲۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه می‌گردد. دهانه زنگوله‌ای آن در ابعاد $۶۳/۷۳ \times ۱۱۹$ سانتی‌متر مربع و طول کل مجرا ۳۰۲ سانتی‌متر می‌باشد که قسمت بالادست دریچه اضطراری تا اتصال به قطعه ابتدایی زنگوله شکل به طول ۱۶۴ سانتی‌متر و ناحیه پایین دست به طول ۷۵ سانتی‌متر



شکل ۲- پلان و مقطع طولی تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره

در شبیه‌سازی، تراکم ناپذیر و به صورت تک فازی می‌باشد. همچنین با توجه به طبیعت معادلات حاکم، لازم است تحلیل جریان با شرایط مرزی ثابت آغاز شود تا در نهایت پس از گذشت زمان مناسب در مدل، جریان به حالت پایدار برسد که در شبیه‌سازی حاصل، مدت زمان تحلیل معادل ۳۰ ثانیه و مدل آشفتگی $RNG(k-\epsilon)$ به دلیل

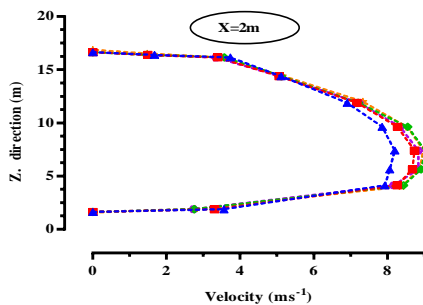
مدل عددی

در تحقیق برای شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان، ابتدا هندسه مدل با استفاده از نقشه‌های پلان و پروفیل طولی تخلیه‌کننده در ابعاد واقعی، توسط نرم‌افزار AutoCad 3D به صورت سه‌بعدی تهیه و سپس در نرم‌افزار FLOW 3D با فرمت Stl فراخوانی شد (شکل ۳). سیال در نظر گرفته شده

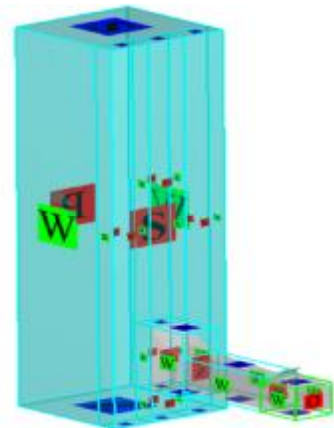
هم منطبق گردیده‌اند و ابعاد مخزن بر میدان سرعت داخل مجرا تأثیری ندارد.

جدول ۲- شرایط مخزن‌های محاسباتی

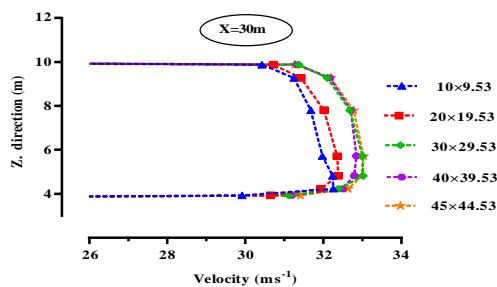
شماره مخزن	ابعاد مخزن به ترتیب:		تعداد مش محاسباتی
	عرض، طول (متر)	اندازه مش محاسباتی (متر)	
۱	۱۰×۹/۵۳	۰/۶	۵۰.۵۹۲
۲	۲۰×۱۹/۵۳	۰/۶	۲۱۹.۴۴۳
۳	۳۰×۲۹/۵۳	۰/۶	۵۰۷.۵۰۰
۴	۴۰×۳۹/۵۳	۰/۶	۸۸۴.۲۶۸
۵	۴۵×۴۴/۵۳	۰/۶	۱.۱۲۶.۶۵۰



شکل ۳- مرزهای جامد مدل سه بعدی



شکل ۴- مرزهای جامد و شبکه‌بندی مدل عددی



شکل ۵- پروفیل‌های سرعت جریان در اندازه مختلف مخزن در ۲ و ۲۰ و ۳۰ متری از دهانه مجرا

صحت‌سنجی مدل عددی

در تحقیق حاضر، برای صحت‌سنجی مدل عددی، از نتایج فشار در کف تخلیه‌کننده و دبی عبوری از مجرا در هد نرمال ۱۰۰m که از آزمایش‌های مدل هیدرولیکی

داشتن ترم‌های اضافی و محاسبه ضرایب ثابت، به‌عنوان مدل انتخابی می‌باشد (ویل کوکس، ۲۰۰۶). از مسائل تأثیرگذار بر افزایش دقت محاسبات، تعیین شرایط مناسب مرزی می‌باشد. در مدل عددی حاضر، شرایط مرزی برای خروجی جریان و دیواره‌ها به ترتیب از Outflow و Wall و شرایط ورودی مدل که همان مخزن تأمین هد است، از شرط مرزی Specified pressure استفاده گردید (شکل ۴ و جدول ۱).

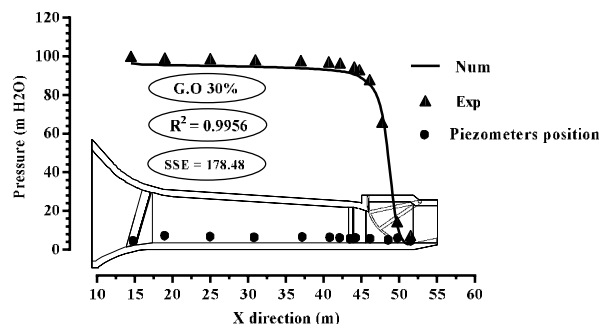
جدول ۱- شرایط مرزی مدل عددی

Specified pressure	ورودی مدل
Outflow	خروجی مدل
Wall	دیواره‌ها
Symmetry	مرز مشترک بین بلوک‌ها
۱.۵۰۳۰۱۹	تعداد کل مش محاسباتی

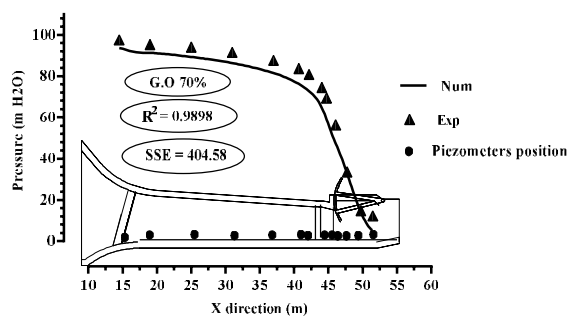
برای انتخاب ابعاد مخزن بالادست (عرض، طول) در مدل عددی، مدل با ابعاد مختلف مخزن ارائه شده در جدول ۲ اجرا گردیده و با بررسی پروفیل‌های سرعت جریان محاسبه شده در مقاطع مختلف از مجرای تخلیه‌کننده (شکل ۶)، ابعاد مخزن ۳۰×۲۹/۵۳ متر اختیار گردید. همان‌طوری که از شکل ۶ مشهود است، پروفیل‌های سرعت جریان محاسبه‌شده برای مخزن شماره ۳ به بعد بر

دبی خروجی از مجرای تخلیه کننده، به ازاء بازشدگی های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ...، ۱۰۰ درصد دریاچه سرویس صحت سنجی صورت گرفت.

تخلیه کننده تحتانی سد سیمره استخراج شده است، بهره برده شد؛ به طوری که برای پارامتر فشار در کف، دو بازشدگی ۳۰ و ۷۰ درصد دریاچه سرویس و برای پارامتر



شکل ۶- تغییرات فشار متوسط در کف در طول تخلیه کننده در بازشدگی ۳۰٪ (عددی و آزمایشگاهی)

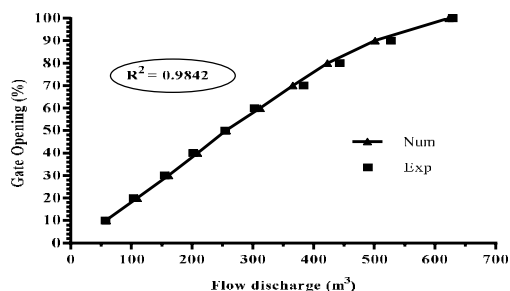


شکل ۷- تغییرات فشار متوسط در کف در طول تخلیه کننده در بازشدگی ۷۰٪ (عددی و آزمایشگاهی)

مقادیر به دست آمده برای ضریب همبستگی R^2 در شکل های ۶، ۷ و ۸ نشانگر تطابق خوب، بین نتایج آزمایشگاهی و عددی است که صحت نتایج مدل عددی را تأیید می نماید.

تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق

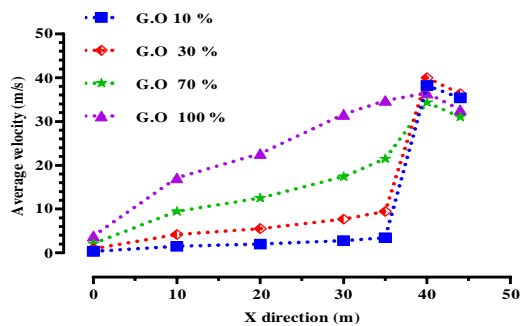
مقادیر سرعت و فشار جریان، از پارامترهای مهمی هستند که در تعیین الگوی جریان پایین دست و همچنین پیش بینی مشکلات مطرح در مجاری تحتانی نقش اساسی دارد. تخلیه کننده هایی که با هد بالا کار می کنند، به دلیل بالا بودن سرعت جریان و افت فشار در نزدیکی سیستم های کنترل (دریاچه ها)، وقوع آسیب هایی همچون پدیده کاویتاسیون دور از انتظار نمی باشد (تاها و آوت، ۲۰۱۶). همچنین، در اثر طراحی نادرست هندسه تخلیه کننده، امکان به وجود آمدن فشار منفی در مجرا و اطراف دریاچه وجود دارد که باعث وارد شدن ارتعاشات ناهنجاری بر سازه دریاچه و دیواره های مجرا می شود (هووا



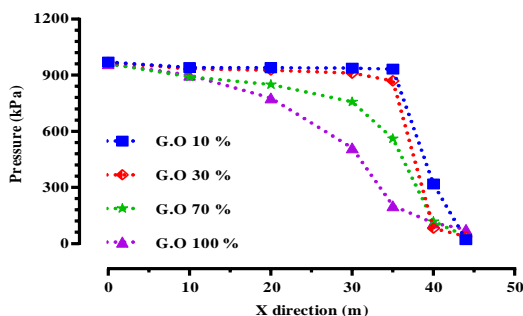
شکل ۸- تغییرات دبی جریان خروجی تخلیه کننده به ازای بازشدگی های مختلف دریاچه سرویس (عددی و آزمایشگاهی)

با توجه به نتایج حاصل ارائه شده در شکل های ۶ و ۷ بیشترین خطای پارامتر فشار در کف، از لحاظ مکانی در ناحیه پایین دست دریاچه سرویس و همچنین در دیواره، در شیار دریاچه اضطراری و بازشدگی دیواره های کناری در انتهای مجرای تخلیه کننده می باشد که دلیل آن وجود آشفته گی های شدید جریان در این نواحی است و میزان خطای وارد شده را می توان به همین خاطر دانست.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نمایشگر پروفیل‌های طولی سرعت متوسط جریان و فشار جریان در کف تخلیه‌کننده در ۴ بازشدگی مختلف دریچه سرویس می‌باشند. در بازشدگی‌های کوچک دریچه، روند افزایش سرعت در بالادست دریچه، تدریجی بوده و در محل دریچه افزایش ناگهانی سرعت جریان رخ می‌دهد؛ ولی به ازای بازشدگی‌های زیاد، شیب افزایش سرعت در مسیر جریان در بالادست دریچه تندتر بوده و تغییرات سرعت در محل دریچه کمتر می‌باشد. به دلیل افزایش سطح مقطع مجرا بعد از دریچه سرویس و تبدیل شدن جریان از حالت تحت فشار به حالت آزاد، پروفیل‌های سرعت جریان به ازای تمامی بازشدگی‌ها حالت کاهشی به خود گرفته‌اند. با حرکت در جهت جریان در داخل مجرای تخلیه‌کننده، به تدریج با کاهش سطح مقطع، از مقدار انرژی فشار هیدرولیکی سیال کاسته شده و به انرژی سنیتیک سیال افزوده شده است.



شکل ۱۱- پروفیل طولی سرعت متوسط جریان تخلیه‌کننده به ازای بازشدگی‌های مختلف دریچه (G.O)

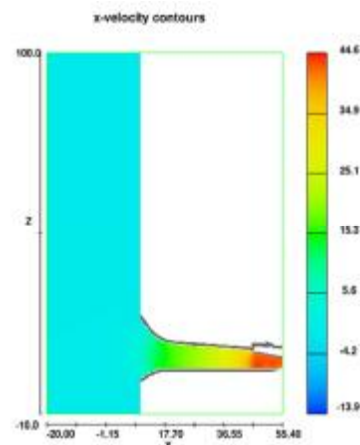


شکل ۱۲- پروفیل طولی فشار متوسط در کف تخلیه‌کننده به ازای بازشدگی‌های مختلف دریچه (G.O)

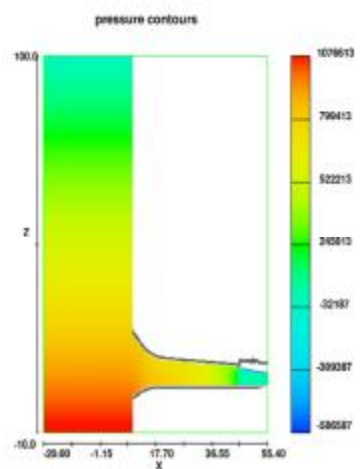
و جنهوا، (۲۰۱۱). از این رو، بررسی میدان‌های سرعت و فشار جریان در تخلیه‌کننده‌های تحتانی در مقاطع مختلف مجرا و اطراف دریچه سرویس حائز اهمیت می‌باشد.

الگوی جریان در مجرای تخلیه‌کننده در حالت تحت فشار

نتایج حاصل از مقادیر سرعت و فشار جریان در مجرای تخلیه‌کننده به ازای بازشدگی کامل دریچه سرویس و هد نرمال ۱۰۰ متر که در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده حاکی از افزایش سرعت جریان با پیشروی به طرف پایین‌دست مجرا به علت کاهش سطح مقطع عبوری می‌باشد که حداکثر مقدار سرعت برابر با $45/6 m/s$ و حداقل مقدار فشار که در دیواره مشاهده شد، برابر با $-4/1 kPa$ می‌باشد.

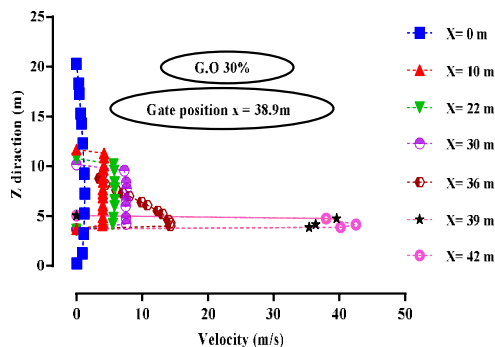


شکل ۹- کنتورهای سرعت در جهت جریان در بازشدگی کامل دریچه (بر حسب m/s)



شکل ۱۰- کنتورهای فشار جریان در بازشدگی کامل دریچه (بر حسب P_a)

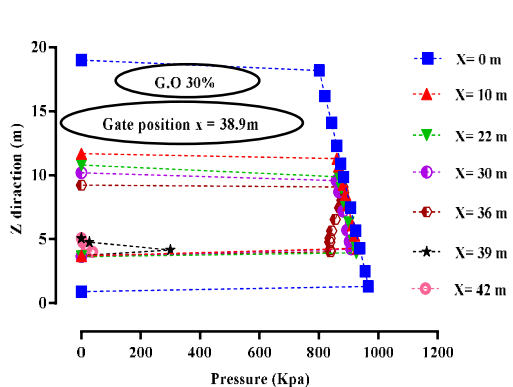
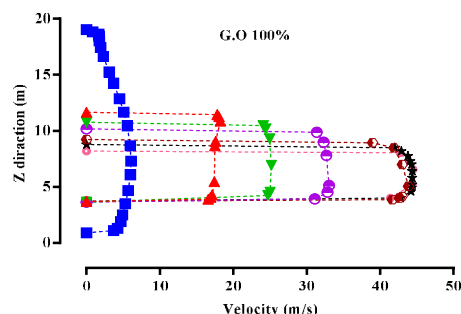
همان‌طور که قبلاً اشاره شد روند افزایش سرعت و کاهش فشار در بازشدگی کوچک در زیر دریچه بیشتر از بازشدگی‌های بزرگ‌تر می‌باشد. همچنین، به دلیل آزاد بودن جریان در مقاطع ۳۹ و ۴۲ متری از دهانه ورودی و تماس داشتن جریان با هوا، توزیع فشار در این مقاطع نسبتاً هیدرواستاتیک بوده و مقدار این پارامتر در سطح جریان برابر با فشار اتمسفر می‌باشد.



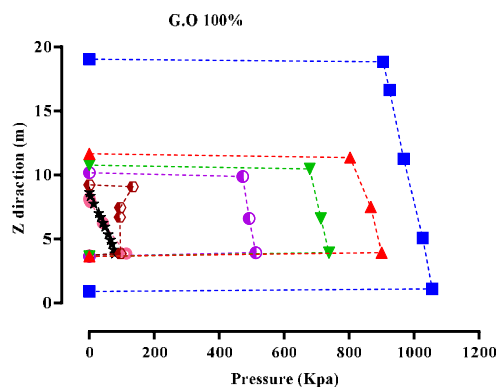
شکل ۱۳- پروفیل‌های توزیع سرعت جریان در مقاطع قائم از مجرای به ازای بازشدگی‌های ۳۰ و ۱۰۰ درصد دریچه سرویس

پروفیل توزیع سرعت و فشار جریان در مقاطع قائم از مجرای تخلیه‌کننده

شکل ۱۳ و ۱۴ روند تغییرات سرعت و فشار جریان را در مقاطع قائم از مجرا به ازای دو بازشدگی ۳۰ و ۱۰۰ درصد دریچه سرویس در هد نرمال ۱۰۰ متر نشان می‌دهد که نتایج حاصل، بیانگر افزایش سرعت جریان و کاهش فشار با پیشروی در جهت مجرا در هر دو بازشدگی می‌باشد.



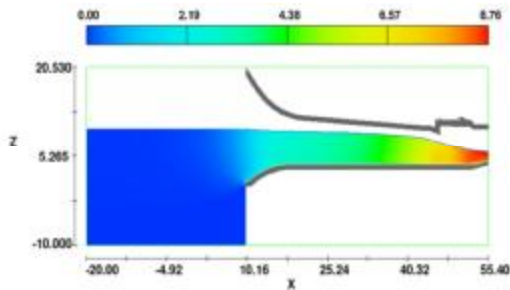
شکل ۱۴- پروفیل‌های توزیع فشار جریان در مقاطع قائم از مجرای به ازای بازشدگی‌های ۳۰ و ۱۰۰ درصد دریچه سرویس



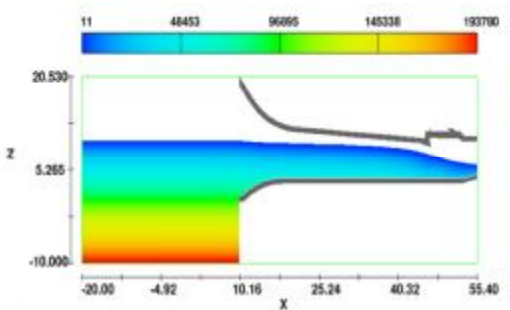
شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب پروفیل‌های عرضی و طولی سطح آزاد جریان را به ازای بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس در هد نرمال ۱۰۰ متر نشان می‌دهند. نتایج حاکی از افزایش سطح طولی جریان به ازای بازشدگی‌های کوچک‌تر در انتهای مجرای پایین‌دست بوده که دلیل آن، وجود بلوک استهلاک‌کننده انرژی می‌باشد. با افزایش بازشدگی دریچه سرویس، اثر بلوک چندان مشهود نبوده و پروفیل‌های سطح آزاد جریان سیر نزولی دارند. همچنین، در تمامی بازشدگی‌ها هیچ‌گونه جریان آشفته و چرخشی در پشت دریچه مشاهده نمی‌شود. به ازای بازشدگی‌های کوچک‌تر پروفیل‌های عرضی جریان به صورت قوسی رو به

پروفیل سطح آزاد جریان در بازشدگی‌های مختلف

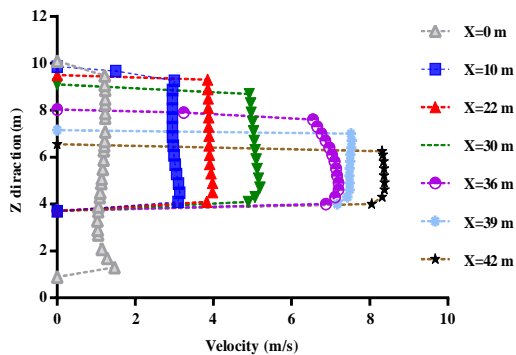
به دلیل تغییر الگوی جریان با عبور از زیر دریچه سرویس و تبدیل شدن آن از حالت تحت فشار به حالت آزاد، امکان پدید آمدن جریان‌های چرخشی و آشفته در پشت دریچه سرویس و همچنین بالا رفتن جریان از دیواره‌های کناری مجرا وجود دارد که باعث مشکلاتی، همچون وارد شدن ارتعاشات ناهنجار به سازه کنترل و وقوع پدیده کاویتاسیون در دیواره‌های مجرا می‌شود. از این‌رو، یکی از مسائل مهم در ایمنی عملکرد دریچه سرویس و مجرای تخلیه‌کننده، بررسی پروفیل‌های سطح آزاد جریان در بازشدگی مختلف دریچه سرویس می‌باشد.



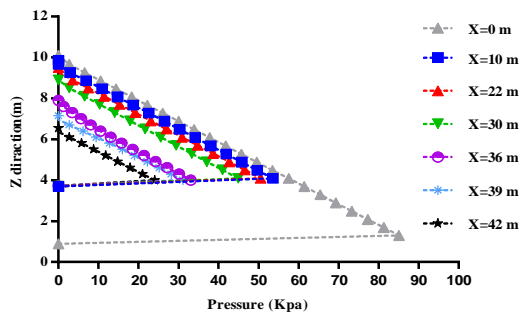
شکل ۱۷- کنتورهای سرعت در جهت جریان، در حالت آزاد (بر حسب m/s)



شکل ۱۸- کنتورهای فشار در جهت جریان، در حالت آزاد (بر حسب P_a)

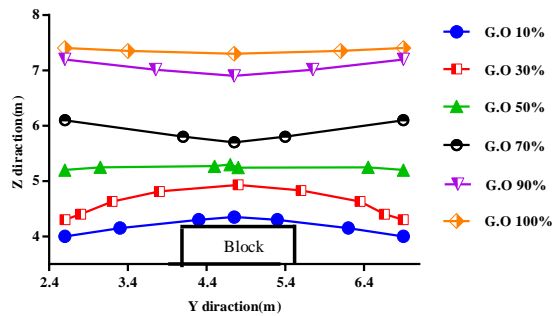


شکل ۱۹- پروفیل‌های سرعت جریان در مقاطع قائم از مجرای تخلیه‌کننده در حالت آزاد

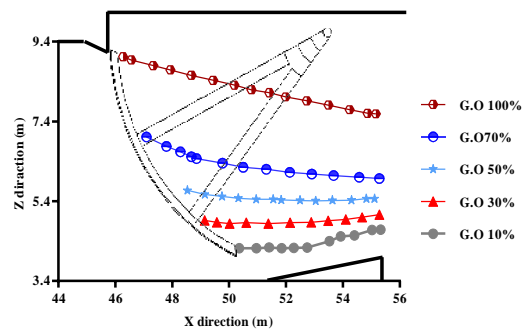


شکل ۲۰- پروفیل‌های فشار جریان در مقاطع قائم از مجرای تخلیه‌کننده در حالت آزاد

پایین‌اند که با افزایش بازشدگی این روند تغییر می‌کند و به حالت قوسی رو به بالا در می‌آید.



شکل ۱۵- پروفیل‌های عرضی سطح جریان در بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس در مقطع ۴۳ متری از ورودی مجرا



شکل ۱۶- پروفیل‌های طولی سطح جریان در بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس

الگوی جریان در مجرای تخلیه‌کننده در حالت آزاد شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشانگر کنتورهای سرعت و فشار جریان، و شکل‌های ۱۹ و ۲۰ پروفیل‌های سرعت و فشار جریان در مقاطع قائم از مجرا به ازای هد بالادست ۱۰ متر می‌باشند. مشابه نتایج جریان در حالت تحت فشار، با پیشروی در جهت پایین‌دست مجرا، میزان فشار جریان کاهش و میزان سرعت افزایش یافته است که بیشترین مقدار سرعت برابر با $1/4 m/s$ و کمترین مقدار فشار جریان مشاهده شده در دیواره مجرا برابر با $17/2 kPa$ می‌باشد و همچنین، به دلیل آزاد بودن جریان، در تمامی مقاطع توزیع فشار هیدرواستاتیک بوده و عمق جریان در قسمت انتهایی مجرا به دلیل افزایش سطح مقطع عبوری کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

- springer verlag. New York. ISBN 3-540-59434-5.
5. Hirt C. and Nichols B. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 39: 201-225.
 6. Hua G. and Genhua Y. 2011. Analysis of vibration mode of hydraulic gate structure. *Advanced Materials Research*. 199: 966-972.
 7. Salazar F. San-Mauro J. Celigueta M. and Onate E. 2016. Air Demand Estimation in Bottom Outlets with the Particle Finite Element Method. *Journal of Computational Particle Mechanics*. 4(3): 345-356.
 8. Shilpakar R. Hua Z. Manandhar B. Shrestha N. Zafar M. R. Iqbal T. and Hussain Z. 2017. Numerical Simulation on Tunnel Spillway of Jingping-I Hydropower Project with Four Aerators. 3rd International Conference on Water Resource and Environment. 26-29 June. Qingdao. China
 9. Taha M. and Awat O. 2016. Effects of Gate Lip Orientation on Bottom Pressure Coefficient of Dam Tunnel Gate. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 41(12): 4927-4936.
 10. Wilcox D. C. 2006. *Turbulence Modeling for CFD*. (Third Edition). Pp. 84-90.
 11. Wu jian H. 2007. Hydraulic characteristics of partial opening of the working gate for a discharge tunnel. *Journal of Hydrodynamics*. Ser. B. 19(4): 488-493.
 12. Zhang H. Wan W. Bao Z. Hu J and Ye L. 2016. Three-dimensional Numerical Simulation for a Spillway Tunnel with High Head and Large Discharge. The 1st EAI International Conference on Multimedia Technology and Enhanced Learning. 13-15 August. Inner Mongolia. China.
 13. Zounemat M. and Scholz M. 2013. Computing air demand using the Takagi-Sugeno model for dam outlets. *Journal of Water*. 5(3): 1441-1456.

۱- با مقایسه پروفیل‌های سرعت و فشار جریان به ازای بازشدگی‌های مختلف دریچه سرویس و هد نرمال ۱۰۰ متر در حالت تحت فشار مشاهده شد در بازشدگی‌های کوچک دریچه، روند افزایش سرعت در بالادست دریچه، تدریجی بوده است و در محل دریچه افزایش ناگهانی سرعت جریان رخ می‌دهد؛ ولی به ازاء بازشدگی‌های زیاد، شیب افزایش سرعت در مسیر جریان در بالادست دریچه تندتر بوده و تغییرات سرعت در محل دریچه کمتر می‌باشد. همچنین، با حرکت در جهت پایین‌دست، با کاهش سطح مقطع جریان از انرژی فشار هیدرولیکی سیال کاسته شده و به انرژی سنیتیک سیال افزوده می‌شود؛ به طوری که بیشترین مقدار سرعت جریان m/s $4.5/6$ و کمترین مقدار فشار که در دیواره مشاهده شد، برابر با $4/1 kPa$ می‌باشد.

۲- به ازای بازشدگی‌های کوچک‌تر به دلیل وجود بلوک استهلاک‌کننده انرژی، سطح جریان در ناحیه انتهایی مجرا افزایش می‌یابد که با افزایش بازشدگی دریچه، اثر مستهلاک‌کننده کاهش یافته و پروفیل‌های سطح آزاد جریان بعد از عبور از زیر دریچه سیر نزولی به خود می‌گیرند. همچنین، در کلیه بازشدگی‌ها هیچ‌گونه جریان چرخشی در اطراف دریچه دیده نشد.

۳- نتایج جریان در حالت آزاد حاکی از افزایش سرعت جریان و کاهش فشار جریان با پیشروی در جهت پایین‌دست می‌باشد که حداکثر مقدار سرعت برابر با m/s $8/4$ و حداقل مقدار فشار جریان برابر $17/21 kPa$ به دست آمد. همچنین، به دلیل آزادبودن جریان، در تمامی مقاطع توزیع فشار هیدرواستاتیک می‌باشد.

منابع

۱. مؤسسه تحقیقات آب تهران. مدل هیدرولیکی تخلیه‌کننده تحتانی سد سیمره. ۱۳۸۴.
۲. وب سایت سد و نیروگاه سیمره
(<http://www.mahabghodss.net>)
3. Daneshmand F. Adamowski J. and Liaghat T. 2014. Bottom outlet dam flow: physical and numerical modelling. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management*. pp. 176-184.
4. Ferziger J. and Peric M. 1996. *Computational methods for fluid dynamics*.