

## تأثیر استغراق خروجی تخلیه‌کننده تحتانی بر میزان هوادهی بین دو دریچه اضطراری و

### سرویس در سدهای بلند

مهدی جورابلو<sup>۱\*</sup>، مهدی فولادی‌پناه<sup>۲</sup>، فاطمه ناصری<sup>۳</sup>، حامد سرکرده<sup>۴</sup> و مرتضی ماروسی<sup>۵</sup>

(۱) استادیار، گروه مهندسی آب، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران.

(۲) استادیار، گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

(۴) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

(۵) کارشناس ارشد پژوهش، گروه سازه های هیدرولیکی، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول: [jorabloo.mehdi@gmail.com](mailto:jorabloo.mehdi@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۲۰

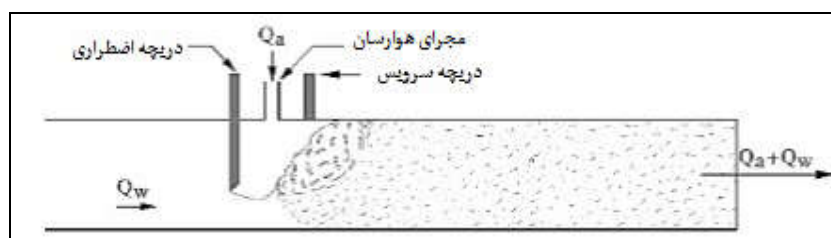
### چکیده

استفاده از تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی به منظور تخلیه و نیز تنظیم سطح آب مخزن از اهمیت بسیار زیادی در مدیریت عملکرد سد برخوردار هستند. میزان بازشدگی دریچه سرویس و دریچه اضطراری در تونل‌ها نقش مهمی در تغییرات فشار، سرعت و ضریب آبگذری و در نهایت عملکرد تونل دارند. در این تحقیق میزان هوادهی جریان بین دریچه سرویس و اضطراری در دو مدل فیزیکی سد کارون ۴ و قیزقلعه‌سی با شرایط پایاب آزاد و مستغرق مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا ضریب هوادهی برای هر مدل به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور بررسی نوسانات فشار حاصل از جت خروجی از دریچه‌ها در محل حوضچه آرامش، شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Flow3D انجام شد. نتایج نشان داد که استغراق خروجی اثر کاهنده به میزان ۵۰ درصد بر هوادهی جریان دارد. این بدان معنی است که چنانچه تخلیه‌کننده در خروجی مستغرق باشد، امکان رخداد پدیده کاویتاسیون بیشتر خواهد بود و در نتیجه نیاز به سازه هوارسان با ابعاد بزرگتر می‌باشد. همچنین مشاهده شد با انجام هوادهی در جت میزان نوسانات در کف حوضچه کاهش پیدا می‌کند و امکان رخداد کاویتاسیون نیز از بین می‌رود.

واژه‌های کلیدی: تخلیه‌کننده تحتانی، ضریب هوادهی، خلزایی، استغراق خروجی، مدلسازی عددی و آزمایشگاهی.

## مقدمه

تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی در سدها به منظور تخلیه سیلاب در مواقع اضطراری، تنظیم سطح آب مخزن و در بعضی مواقع برای رسوب‌شویی مخزن استفاده می‌شوند (Vischer and Hager, 1997). برای کنترل آب رهاسازی شده به پایین‌دست، از دریچه‌های سرویس و اضطراری استفاده می‌شود. با توجه به این که در اکثر مواقع، دریچه بهره‌برداری به صورت نیمه‌باز عمل می‌کند، جریانی با سرعت بالا در پایین‌دست دریچه بوجود می‌آید که سبب ایجاد فشارهای منفی می‌گردد و باعث پدیده کاویتاسون و بروز خسارات ناشی از ارتعاشات در سازه می‌شود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ورود هوا به داخل جریان می‌تواند خسارت ناشی از خلأزایی را با هوادهی به جریان و افزایش فشار متوسط و کم کردن شدت تغییرات فشارهای دینامیکی کاهش دهد (Kavianpour and Rajabi, 2005). وقتی فشار درون مجرا به زیر فشار اتمسفر برسد، هوادهای هوا را به صورت خودکار به درون مجرا می‌مکند. میزان هوای ورودی متناسب با بازشدگی دریچه و دبی عبوری از تونل تغییر می‌کند. در نتیجه طراحی سازه هوادهی یکی از نکات مهم در تخلیه‌کننده‌های تحتانی به شمار می‌رود. در طراحی هواده معمولاً از نسبت دبی هوا به دبی آب استفاده می‌شود.



شکل ۱: مجرای هوارسان بین دو دریچه سرویس و اضطراری

اگر میزان دبی هوای مورد نیاز در هواده  $Q_a$  و دبی آب جاری در تونل تخلیه‌کننده  $Q_w$  نامیده شود، ضریب هوادهی در مجرا،  $\beta$  از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w}$$

رابطه ۱:

در گذشته در مورد هوای مورد نیاز در پایین‌دست تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی سدها تحقیقاتی صورت گرفته است. در این تحقیقات میزان هوادهی به جریان بعد از دریچه سرویس بررسی شده است. اولین مطالعه جامع در رابطه با ویژگی‌های هواگیری در مجرای بسته توسط Robertson و Kalisnke (۱۹۴۳) انجام گرفت. این محققین با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی توانستند برای تعیین هوای مورد نیاز جریان هنگامی که پرش هیدرولیکی در مجرا رخ می‌دهد، رابطه (۲) را ارائه نمایند:

$$\beta = 0.0066(Fr - 1)^{1.4} \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این رابطه  $Fr$  عدد فرود جریان قبل از پرش هیدرولیکی می‌باشد و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g y_c}} \quad \text{رابطه ۳:}$$

که در این معادله  $V$  سرعت متوسط جریان و  $y_c$  عمق موثر جریان قبل از پرش هیدرولیکی و  $g$  شتاب جاذبه می‌باشد. رابطه دیگری توسط Guyton و Campbell (۱۹۵۳) برای میزان هوای مورد نیاز در مجرای عبوری پیشنهاد شده است:

$$\beta = 0.04(Fr - 1)^{0.85} \quad \text{رابطه ۴:}$$

مهندسين ارتش آمریکا با اندازه‌گیری مقدار هوای مورد نیاز جریان مربوط به چند سد مختلف در نمونه‌های واقعی و تحلیل این داده‌ها توانستند رابطه (۵) را برای تعیین میزان هوای مورد نیاز ارائه دهند (USACE, 1964):

$$\beta = 0.03(Fr - 1)^{1.01} \quad \text{رابطه ۵:}$$

Winser (۱۹۶۵) رابطه (۶) را برای جریان با سطح آزاد پیشنهاد نمود:

$$\beta = 0.03(Fr - 1)^{1.4} \quad \text{رابطه ۶:}$$

Sharma (۱۹۷۶) برای تعیین مقدار هوای مورد نیاز جریان، آزمایش‌هایی را در یک مجرای مستطیلی انجام داد و رابطه (۷) را به دست آورد و بصورت زیر ارائه نمود:

$$\beta = 0.06 Fr_c \quad \text{رابطه ۷:}$$

در این رابطه،  $Fr_c$  عدد فرود جریان در فشردگی بعد از دریاچه می‌باشد. Kavianpour (۲۰۰۳) نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی مربوط به میزان هوای ورودی به جریان را در چند سد ساخته شده در ایران مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داد و توصیه‌های لازم را ارائه نمود. تحقیقات انجام گرفته در این زمینه شامل تخلیه کننده سدهای کوثر، کرخه و جره می‌باشد. براساس بررسی و تحلیل صورت گرفته، روابط جدیدی جهت حد بالا و حد پائین هوادهی به صورت تابعی از عدد فرود به شکل رابطه (۸) ارائه گردید.

$$\beta = 0.18(Fr - 1)^{0.74} \quad \text{رابطه ۸- الف:}$$

$$\beta = 0.0012(Fr - 1)^{1.39}$$

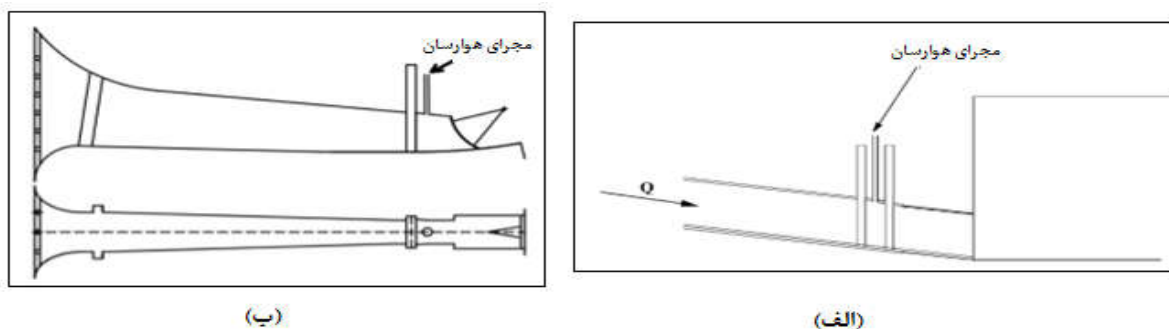
رابطه ۸ - ب:

در مطالعه‌ای که توسط Tullis و Larchar (۲۰۱۱) به صورت آزمایشگاهی روی سازه هوارسان در سدهای کوتاه انجام گرفت بیان گردید روابط مربوط به میزان هوادهی به جریان در سدهای بلند قابل استفاده در سدهای کوتاه نیست. آنها همچنین ضریب دبی را برای یک تخلیه‌کننده در شرایط هوادهی و عدم هوادهی محاسبه و ارائه کردند. به موازات کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته در خصوص این پدیده، مطالعات عددی نیز صورت گرفته است. Shamsai و Soleymanzadeh (۲۰۰۶) به صورت عددی جریان دو فازی آب و هوا را در یک تخلیه‌کننده بررسی کردند و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها همچنین شرایط جریان را با و بدون هوادهی مورد بررسی قرار دادند. غزالی و همکاران (۱۳۹۰) با شبیه‌سازی هوادهی در تخلیه‌کننده سد جگین به این نتیجه رسیدند که ارتفاع مجرا تأثیر بسزایی بر هوای ورودی از هوادهی و توزیع غلظت هوا در عمق جریان دارد. Zarrati و Najafi (۲۰۱۰) نتایج حاصل از مدلسازی عددی هوادهی به جریان را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند و نشان دادند که مدل‌های عددی به خوبی قادر به شبیه‌سازی این پدیده هستند. استفاده از مدل‌های عددی در کنار مدل‌های آزمایشگاهی در مسائل مختلف سازه‌های هیدرولیکی انجام شده است (مردانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ خان‌آرمویی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Roshan et al., 2010؛ Amiei et al., 2011؛ Rahimzadeh et al., 2012). این تحقیقات نشان داده است که این دو روش می‌توانند به صورت موازی به حل مسائل پیچیده هیدرولیکی کمک کنند (Taghvaei et al., 2012؛ Nazari et al., 2015؛ Jorabloo et al., 2011؛ Maghsoodi et al., 2012). یکی از پارامترهای تأثیرگذار در میزان هوادهی جریان، شرایط استغراق خروجی تخلیه‌کننده تحتانی است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تخلیه‌کننده تحتانی سدهای قیزقلعه‌سی و کارون ۴ به ترتیب تحت شرایط خروجی مستغرق و آزاد، تأثیر استغراق خروجی بر میزان هواگیری جریان با اندازه‌گیری پارامتر ضریب هوادهی مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نتایج اندازه‌گیری هوای ورودی به تونل در مدل فیزیکی تخلیه‌کننده تحتانی سدهای قیزقلعه‌سی با مقیاس ۱:۱۷ و کارون ۴ با مقیاس ۱:۱۵ که در آزمایشگاه موسسه تحقیقات منابع آب ایران ساخته شده‌اند، استفاده شد. انتخاب این دو مدل فیزیکی به این سبب بوده است که طول بالادست دریچه در این دو تخلیه‌کننده و همچنین شرایط جریان و مجرا به هم شبیه هستند و تنها تفاوت بارز آن‌ها شرایط استغراق در خروجی است. سیستم تخلیه تحتانی سد قیزقلعه‌سی شامل یک ورودی شیپوری می‌باشد که جریان را وارد یک مقطع مربع مستطیلی به عرض و ارتفاع ۴ و ۵ متر

با مقطع ثابت می‌کند. سپس جریان توسط دو دریچه سرویس و اضطراری کنترل و وارد یک حوضچه آرامش باز شونده می‌گردد. طول مجرای تخلیه‌کننده با مقطع ثابت ۵۲/۵ متر است (شکل ۲-الف). مجرای تخلیه‌کننده تحتانی سد کارون ۴ به طول ۵۱ متر می‌باشد که شامل ورودی مجرا، آشغالگیر، دریچه اضطراری، دریچه سرویس، هواده بین دو دریچه و مجرای پایین دست دریچه سرویس می‌باشد. عرض و ارتفاع مجرا در محل دریچه اضطراری به ترتیب ۳ متر و ۵ متر هستند. برای جلوگیری از پدیده خلازایی، یک مجرای هواده بعد از دریچه اضطراری نصب شده است. بعد از آن دریچه سرویس قرار دارد و جریان خروجی توسط یک پرتاب کننده به اتمسفر پرتاب می‌شود (شکل ۲-ب). اندازه‌گیری هوای ورودی به مجرای تونل در هر دو مدل به ازای بازشدگی‌های ۵۰ تا ۹۰ درصد دریچه اضطراری انجام گرفته است. به ازای این محدوده بازشدگی، دبی در این دو تخلیه‌کننده به قرار جدول ۱ است. برای اندازه‌گیری سرعت هوا داخل لوله هواده، از حسگر سیم داغ استفاده شد. دامنه و دقت به ترتیب (۰ تا ۲۰) و (۰/۰۱ متر بر ثانیه) است. با تعیین سرعت متوسط، دبی هوای عبوری از هواده قابل محاسبه می‌باشد. برای تامین شرایط جریان هوای یکنواخت در داخل لوله‌های هواده از ورودی های شیپوری استفاده شده است تا افت ورودی آن‌ها به حداقل برسد. در شکل ۳ مدل فیزیکی تخلیه‌کننده تحتانی هر دو سد همراه هواده نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان آب عبوری از مجرای تخلیه‌کننده از سرریز مستطیلی با خطای یک درصد در پایاب استفاده شده است.



شکل ۲: مجرای تخلیه‌کننده تحتانی سد قیزقلعه سی (شکل الف) و کارون ۴ (شکل ب)

جدول ۱: دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌ها به ازای بازشدگی‌های مختلف

بازشدگی دریچه (درصد)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	قیز قلعه سی	کارون ۴
۵۰	۲۱۰	۲۶۸	
۶۰	۲۴۷	۳۳۵	
۷۰	۳۲۲	۳۷۱	
۸۰	۳۱۸	۳۹۷	
۹۰	۳۵۷	۴۱۷	



(ب)

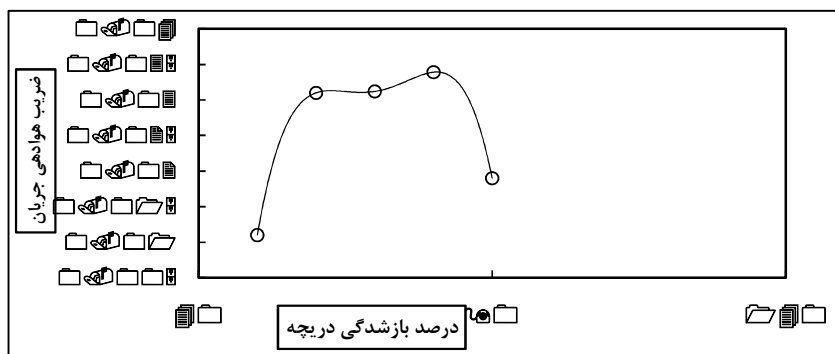


(الف)

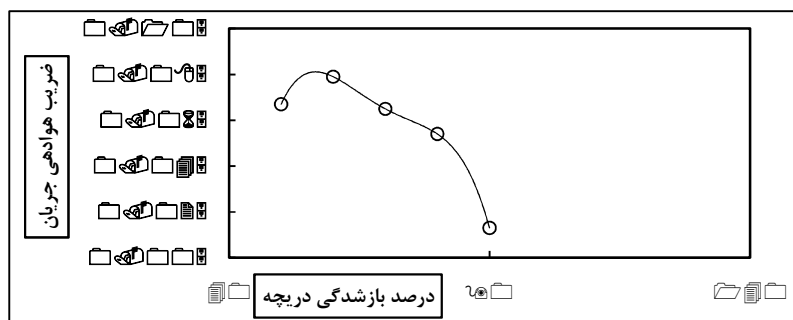
شکل ۳: نصب هواده در مدل فیزیکی تخلیه‌کننده تحتانی سد کارون ۴ و سد قیزقلعه‌سی

### نتایج و بحث

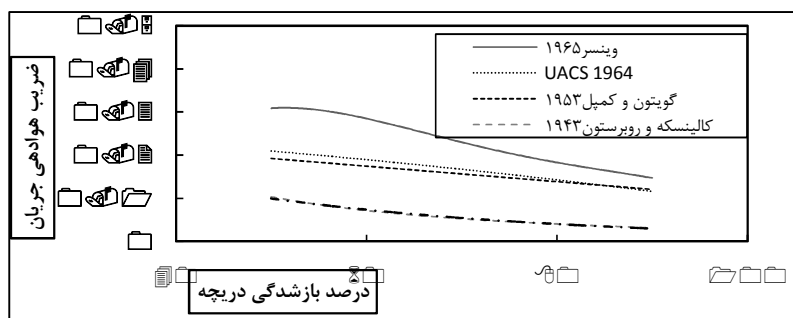
به ازای بازشدگی کامل دریچه سرویس و بازشدگی های ۵۰ تا ۹۰ درصد دریچه اضطراری، اندازه گیری هوای ورودی به هواده در دو مدل انجام شده است. شکل ۴ ضریب هوادهی جریان برای بازشدگی های مختلف دریچه اضطراری در تخلیه کننده تحتانی سد قیز قلعه سی را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، بیشترین مقدار ضریب هوادهی در بازشدگی ۸۰٪ دریچه اضطراری با مقدار ۳/۴٪ رخ داده است. شکل ۵ میزان ضریب هوادهی برای بازشدگی های مختلف دریچه اضطراری در تخلیه کننده تحتانی سد کارون ۴ را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۴ دیده می شود بیشترین میزان ضریب هوادهی در بازشدگی ۶۰ درصد دریچه اضطراری با مقدار حدود ۸/۵٪ رخ می دهد. آنچه به طور کلی می توان گفت اینکه با افزایش عدد فرود جریان، ضریب هوادهی به طور کلی افزایش می یابد. در واقع این شرایط مربوط به زمانی است که بازشدگی دریچه کم و سرعت جریان زیاد می باشد. در این حالت، جریان نیاز به هوادهی بیشتری دارد تا از پدیده خلزایی جلوگیری شود. در شکل ۵ مقدار ضریب هوادهی به ازای درصد بازشدگی دریچه با استفاده از روابط موجود و نتایج آزمایشگاهی رسم شده است. همانطور که در شکل ۴ دیده می شود، با افزایش بازشدگی دریچه، ضریب هوادهی کاهش می یابد. به علت اینکه با افزایش بازشدگی دریچه، سرعت جریان کمتر شده و فشار نسبی جریان افزایش می یابد. در نتیجه هوای کمتری به درون جریان وارد می شود. ضریب هوادهی در تخلیه کننده تحتانی سد قیز قلعه سی نسبت به کارون ۴ کمتر است. همچنین بازه هواگیری در تخلیه کننده تحتانی سد قیز قلعه سی با خروجی مستغرق کمتر از حالت آزاد است. در این راستا، طبق شکل ۶، معادله کالینسکی و روبرتسون نتایجی مشابه آنچه در تخلیه کننده تحتانی سد کارون ۴ اندازه گیری شده است بدست می دهد. به عبارتی این معادله برای یک تخلیه کننده تحتانی با خروجی آزاد نتایج نزدیک تری نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی نشان می دهد. مقدار ضریب همبستگی معادله کالینسکی و روبرتسون با مقادیر اندازه گیری شده کارون ۴ برابر با ۰/۹۳۷۷ محاسبه شده است. این درحالی است که مطابق شکل تمام معادلات مورد مقایسه، میزان هوادهی را برای یک تخلیه کننده تحتانی با خروجی مستغرق، بالاتر از آنچه اندازه گیری شده است، نشان می دهند.



شکل ۴: تغییرات ضریب هوادهی نسبت به بازشدگی‌های مختلف دریاچه اضطراری سد قیز قلعه سی



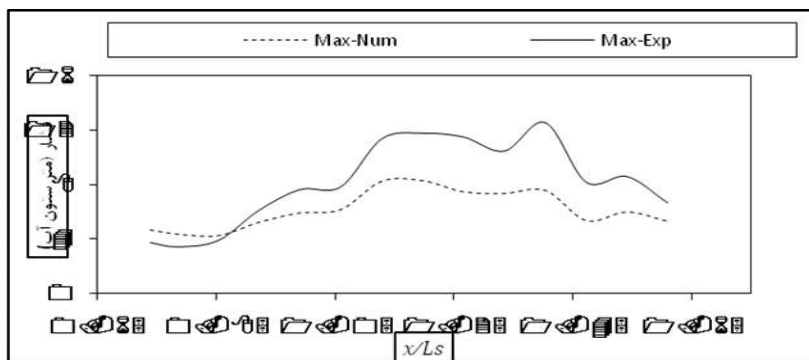
شکل ۵: تغییرات ضریب هوادهی نسبت به بازشدگی‌های مختلف دریاچه اضطراری سد کارون ۴



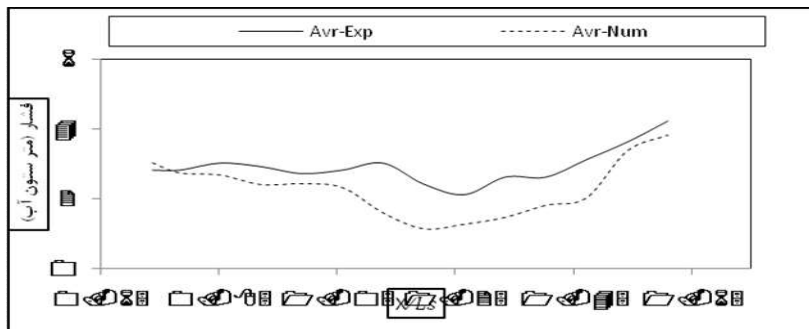
شکل ۶: ضریب هوادهی نسبت به درصد بازشدگی

در این پژوهش به منظور بررسی دقیق تر جریان خروجی از دریاچه‌ها، شبیه سازی عددی جریان در حوضچه آرامش پایین دست انجام شد. برای شبیه سازی از نرم افزار FLOW-3D استفاده شد. این نرم افزار معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات احجام محدود حل می کند. شبیه سازی آشفتگی با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ به انجام رسیده است. بررسی و تحلیل فشارهای دینامیکی یکی از مباحث مهم در مطالعه مدل های هیدرولیکی است. از جمله مناطق مهمی که به دلیل آشفته بودن جریان و افزایش سرعت، مطالعه نوسانات فشار دینامیکی در آن توصیه می گردد،

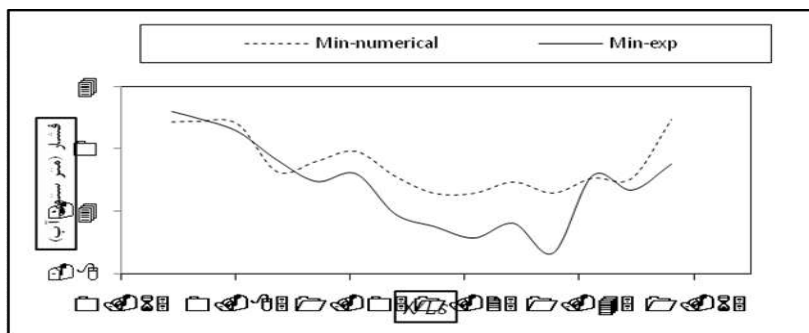
حوضچه آرامش است. شکل‌های ۷ تا ۹ تغییرات فشار دینامیکی در محور میانی کف حوضچه آرامش با بازشدگی ۰.۹٪ را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برای سد قیزقلعه‌سی نشان می‌دهد. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که در محل برخورد جت آب که در ناحیه  $1/45 \leq \frac{x}{L_s} \leq 1/0.5$  قرار دارد، تغییرات فشار دینامیکی ماکزیمم و متوسط اندازه‌گیری آزمایشگاهی، بیشتر از مقدار شبیه‌سازی عددی است. این در حالی است که با توجه به شکل ۹ تغییرات فشار دینامیکی مینیمم اندازه‌گیری شده، کمتر از مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد.



شکل ۷: فشارهای دینامیکی حداکثر وارد بر محور میانی



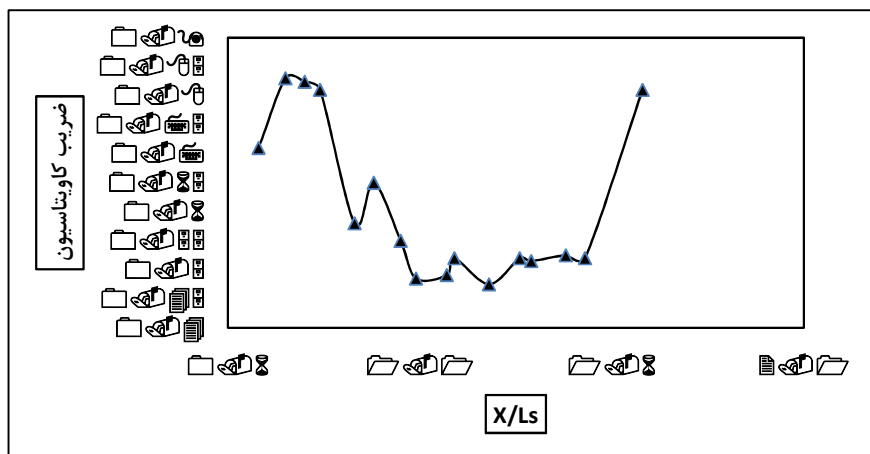
شکل ۸: فشارهای دینامیکی میانگین وارد بر کف محور میانی



شکل ۹: فشارهای دینامیکی حداقل وارد بر کف محور میانی



کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی عموماً در اثر جدایش جریان که با سرعت زیاد روی بستر سازه عبور می‌کند اتفاق می‌افتد. این پدیده بخصوص در مجاری تخلیه کننده تحتانی، سرریزها، شیار دریچه و حوضچه‌های آرامش قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۱۰ تغییرات ضریب کاویتاسیون را در محور میانی کف حوضچه نشان می‌دهد. طبق این شکل، می‌توان دریافت مقدار این ضریب در بحرانی‌ترین نقطه از ۰/۵ کمتر نمی‌شود. از این رو می‌توان گفت از نظر هیدرولیکی سازه با مشکل کاویتاسیون مواجه نیست.



شکل ۱۰: ضریب کاویتاسیون در محور میانی کف حوضچه

### نتیجه گیری

تونل‌های تخلیه کننده تحتانی از جمله سازه‌های مهم در سدها به شمار می‌روند. سرعت بالای جریان بعد از دریچه باعث افت فشار موضعی می‌شود و باعث پدیده مخرب خلازایی و در نتیجه تخریب سازه می‌شود. برای هوادهی به جریان در پایین دست این دریچه‌ها از سازه هواده استفاده می‌شود که طراحی بهینه آن از موارد مهم در تخلیه کننده‌ها محسوب می‌شود. به علت پیچیدگی جریان و تاثیر شرایط مختلف بر روی میزان هوای مورد نیاز، ساخت مدل‌های فیزیکی لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق تاثیر خروجی مستغرق و آزاد بر میزان هوادهی جریان در دو تخلیه کننده تحتانی سدهای کارون ۴ و قیزقلعه سی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با روابط موجود مقایسه گردید. نتایج نشان داد میزان هوای مورد نیاز جریان به طور کلی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد و با افزایش بازدهی دریچه کاهش می‌یابد. در تخلیه کننده تحتانی سد قیزقلعه سی، خروجی مستغرق باعث کاهش میزان هوادهی به جریان نسبت به شرایط خروجی آزاد شده است. می‌توان نتیجه گرفت که استغراق خروجی تخلیه کننده تحتانی می‌تواند تاثیر منفی بر میزان هواگیری جریان بین دو دریچه داشته باشد. همچنین رابطه کالینسکی-رابرتسون منجر به نتایج نزدیک به نتایج مدل آزمایشگاهی تخلیه کننده تحتانی سد کارون ۴ شده است. این در حالی است که تمامی روابط موجود هواگیری جریان را بیش از آنچه در یک تخلیه کننده تحتانی مستغرق (سد قیزقلعه سی) اتفاق می‌افتد، پیش‌بینی می‌کنند.

### تقدیر و تشکر

این مقاله از نتایج طرح پژوهشی انجام شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار مستخرج شده است. بدین وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری این واحد دانشگاهی و گروه سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، برای در اختیار قرار دادن اطلاعات تشکر و قدردانی نمایند.

### منابع

- خان آرمویی، م.ر.، رحیم‌زاده، ح. و سرکرده ح. (۱۳۹۳). تاثیر زاویه آبیگری بر عمق استغراق بحرانی و قدرت گرداب. مجله علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، (۱۴): ۴۲-۳۵.
- غزالی، ف.، صالحی نیشابوری، ا.ا. و کاویانپور، م.ر. (۱۳۹۰). تحلیل عددی تأثیر هندسه مجرا بر هوادهی جریان در تخلیه کننده تحتانی سد. اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی (ص ۸۰-۶۲). تهران، ۱۹ و ۲۰ بهمن، تهران، ایران.
- مردانی، م.، رحیم‌زاده، ح. و سرکرده ح. (۱۳۹۴). تحلیل و بررسی استفاده از بلوک در عملکرد حوضچه‌های آرامش. مجله علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، مقاله ۸، (۶): ۴۱-۳۱.
- Amiri, S. M., Zarrati, A. R., Roshan, R., and Sarkardeh, H. (2011).** Prevention of Vortex at Power Intakes by Horizontal Plates, Proceedings of the ICE, Journal of Water Management, 164(4), pp: 193-200.
- Campbell, F. B., Guyton, B. (1953).** Air demand in gated outlet works. In Proceedings of the 5th International Association for Hydraulic Research (IAHR) and American Society of Civil Engineers (ASCE) Joint, Reston, VA, USA, pp: 529-533.
- Jorabloo, M., Maghsoodi, R. and Sarkardeh, H. (2011).** 3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams, Journal of American Science, 7(6), pp: 931-936.
- Kalinske, A. A., Robertson, J. W. (1943).** Closed conduit flow. ASCE Trans. 108, pp: 1435-1447.
- Kavianpour, M. R., Rajabi, E. (2005).** Air demand downstream of bottom outlet leaf gates. Proceedings of the 73rd Annual Meeting of ICOLD (pp 34-42), Tehran, Iran, 2005
- Khodashenas, S. R., Sarkardeh, H., Marosi, M., and Safavi, K. H. (2010).** Vortex Study at Orifice Spillways of Karun III Dam, Journal of Dam Engineering, 2 , pp:131-142.

- Maghsoodi, R., Roozgar, M.S., Chau, K.W. and Sarkardeh, H. (2012).** 3D Simulation of Dam Break Flows, *Journal of Dam Engineering*, 2, pp: 1-17.
- Najafi, M. R., Zarrati, A. R. (2010).** Numerical simulation of air–water flow in gated tunnels, *Water Management*, 163, pp: 289-295.
- Nazari, O., Jabbari, E., and Sarkardeh, H. (2015).** Dynamic Pressure Analysis at Chute Flip Buckets of Five Dam Model Studies, *International Journal of Civil Engineering, Transaction A: Civil Engineering*, 13(1), pp: 45-54.
- Rahimzadeh, H., Abdolahpour, M., Roshan, R. and Sarkardeh, H. (2012).** Hydraulic Optimization of Flow Over a Gated Spillway, *Journal of Dam Engineering*, 22(4): pp:1.
- Roshan, R., Azamathulla, H. M. D., Marosi, M., Sarkardeh, H., Pahlavan, H. and Ghani, A. B. (2010).** Hydraulics of Stepped Spillways with Different Numbers of Steps, *Journal of Dams and Reservoirs (ICE)*, 20, 3, pp:131-136.
- Shamsai , A., Soleymanzadeh, R. (2006).** Numerical simulation of Air-Water flow in bottom outlet, *International Journal of Civil Engineering*, 4(1), pp: 14-33.
- Sharma, H. R. (1976).** Air-entrainment in high head gated conduits. *Journal of Hydraulic Division*, 102, 11, pp:1629–1646.
- Taghvaei, S.M., Roshan, R., Safavi, K.H., and Sarkardeh, H. (2012).** Anti-Vortex Structures at Hydropower Dams, *International Journal of the Physical Sciences*, 7(28), pp: 5069-5077.
- Tullis, B. P., Larchar, J. (2011).** Determining air demand for small- to medium-sized embankment dam low-level outlet works. *Journal of Irrigation and Drain Engineering*, 137, pp: 793-800.
- U.S. Army Corps of Engineers (1964).** Hydraulic Design Criteria: Air Demand-regulated Outlet Works; USACE: Washington, DC, USA.
- Vischer, D. L. Hager, W. H. (1997).** *Dam Hydraulics*. Wiley, Chichester, pp. 190–213.
- Wisner, P. (1965).** On the role of the Froude criterion for the study of air entrainment in high velocity flows. *Proceedings of the 11th IAHR Congress, USSR, Leningrad.*



