

تحلیل عددی تأثیر هندسه مجرا بر هوادهی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی سد

فاطمه غزالی^۱

سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

محمد رضا کاویانپور^۳

چکیده

در سدهای بلند به دلایلی مانند کنترل آبگیری اولیه، تخلیه رسوبات مخزن، رهاسازی آب جهت آبیاری و کاهش تراز مخزن برای تعمیر و نگهداری، تخلیه‌کننده تحتانی ساخته می‌شود. به علت وجود جریان با سرعت زیاد در قسمت تحت فشار مجرا - که در سدهای بلند به ازای بار آبی مخزن سد ایجاد می‌شود - احتمال وقوع کاویتاسیون (Cavitation) خصوصاً در اطراف دریچه، در این سازه بسیار زیاد است. لذا هوادهی جریان، جزء لاینفک جریان در این مجاری محسوب می‌شود که خود را در کانون توجه ویژه‌ای قرار داده است. در پژوهش حاضر، مدل ۱ به ۱۰ تخلیه‌کننده تحتانی سد جگین به صورت عددی مدل گردیده و نتایج آن با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی ساخته شده در مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، با همان مقیاس مورد تأیید قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر هندسه مجرا بر هوادهی جریان، مدل‌های عددی مشابه با مدل اولیه ولی با ارتفاع متفاوت شبیه‌سازی شد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر گسترده ارتفاع مجرا بر هوای ورودی از هواده و توزیع غلظت هوا در عمق می‌باشد. در حالت ثابت نگره داشتن عرض مجرا با افزایش نسبت عمق به عرض مجرا، تا حد مشخصی میزان هوای ورودی از هواده افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. غلظت در عمق نیز با افزایش نسبت عمق به عرض مجرا افزایش پیدا می‌کند. براساس مطالعات انجام گرفته از نقطه نظر هیدرولیکی محدوده ۱/۵ الی ۲ برای نسبت عمق به عرض، محدوده مناسبی است و سایر نسبت‌ها بر کاهش هوادهی و ضریب β مؤثر است.

واژه‌های کلیدی

تخلیه‌کننده تحتانی، تحلیل عددی، هوادهی، نرم‌افزار فلوئنت.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۲. استاد دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. salehi@modares.ac.ir
۳. دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

مقدمه

در سدهای بلند، تخلیه‌کننده‌ها برای مقاصد مختلفی از جمله تخلیه اضطراری مخزن سد، تنظیم تراز سطح آب برای نگهداری و گاهی تخلیه رسوبات طراحی می‌شوند. [۱] جریان در بالا دست دریچه تخلیه‌کننده تحتانی، تحت فشار است؛ اما جریان پس از دریچه، باتوجه به خصوصیات آن در تونل تخلیه، ممکن است دارای سطح آزاد باش. [۲] حرکت هوا در پایین دست جریان پرسرعت آب، منجر به ایجاد فشارهای منفی می‌گردد که این فشارهای منفی، احتمال کاویتاسیون و ارتعاش را افزایش می‌دهد؛ لذا برای اجتناب از این پدیده، معمولاً یک مجرای هوا بدون هیچ فاصله‌ای پس از دریچه برای هوادهی و جلوگیری از کاویتاسیون تعبیه می‌شود. [۳] به دلیل اینکه جریان با سطح آزاد به‌طور قابل ملاحظه‌ای از ارتعاش دریچه و کاویتاسیون می‌کاهد؛ لذا تخلیه‌کننده تحتانی باید برای جریان با سطح آزاد طراحی شود. هوادهی جریان را می‌توان به سه روش زیر انجام داد: [۲]

۱. از انتهای تونل خروجی که هوا در خلاف جهت جریان در امتداد سقف تونل وارد می‌شود؛
 ۲. از طریق مجرای هوادهی که به کاهش فشار منفی در سطح جریان منجر می‌شود؛
 ۳. از طریق هوادهی تعبیه شده در کف.
- چنانچه هوادهی از کف صورت نگیرد، مقدار کمی هوای تزریق شده به جریان (\bar{C}) با فرض Q_a دبی هوا؛ Q_w : دبی آب و $\beta = Q_a / Q_w$ را می‌توان از رابطه (۱) برآورد نمود: [۸]

$$\bar{C} = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (1)$$

تخمین دبی هوای مجرا یکی از جنبه‌های اساسی در طرح مجرای هوا به‌شمار می‌رود. [۳] طراحان هوادهی، از روابط تجربی برای محاسبه مقدار هوای مورد نیاز هوادهی استفاده می‌کنند. [۱۱] یکی از اولین مطالعات در زمینه هوادهی در مجاری بسته توسط « کالینسکی و رابرتسون » [۱۲] در سال ۱۹۴۳ صورت گرفت. آنها بر جریان آب با

پرش هیدرولیکی مطالعه کردند و با تحلیل ابعادی و مطالعات مدل نشان دادند که هوای وارده توسط پرش هیدرولیکی با رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(Fr - 1)^{1.4} \quad (2)$$

که در این رابطه، Fr عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی است.

شارما^۲ [۹] برای تعیین مقدار هوای مورد نیاز در جریان قطره‌ای (پودری) و جریان سطح آزاد، آزمایش‌هایی در یک تخلیه‌کننده تحتانی با مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر در ۱۵ سانتیمتر انجام داد. وی میزان هوای مورد نیاز در جریان پودری را بیشتر از جریان با سطح آزاد با عدد فرود یکسان به‌دست آورد:

برای جریان پودری از رابطه (۳) استفاده شد:

$$\beta = 0.2Fr_c \quad (3)$$

و برای جریان سطح آزاد، رابطه (۴) به کار گرفته شد:

$$\beta = 0.09Fr_c \quad (4)$$

کویانپور [۲] مطالعاتی بر روی مدل‌های فیزیکی چندین تخلیه‌کننده تحتانی سدهای مختلف ایران انجام داد و حد بالا و پائین هوادهی جریان توسط هوادهی را به‌صورت معادلات زیر ارائه نمود:

$$\beta = 0.18(Fr - 1)^{0.75} \quad UpperLimit \quad (5)$$

$$\beta = 0.0012(Fr - 1)^{1.39} \quad LowerLimit \quad (6)$$

معادلات حاکم

یکی از مدل‌های عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی مدل مخلوط^۳ است. در این مدل، فازهای مختلف به‌صورت محیط‌های نفوذپذیر رفتار می‌کنند. مدل مخلوط در جریان‌های دو فاز، معادله پیوستگی و معادله مومنتوم را برای مخلوط و معادله جزء حجمی را برای فاز دوم حل می‌کند. معادله پیوستگی برای مخلوط به‌صورت معادله (۷) می‌باشد: [۹]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \cdot \vec{v}_m) = 0 \quad (7)$$

که در این رابطه، \vec{v}_m سرعت متوسط جرمی و ρ_m دانسیته مخلوط می‌باشد: [۷]

2. Sharma
3. Mixture.

1. Kalinske and Robertson

دریچه سرویس قرار ندارد و در قسمتی از قوس دهانه زنگوله‌ای شکل ورودی طراحی شده است. به منظور حفاظت در مقابل پدیده کاویتاسیون، دو هواده بدون فاصله در پایین دست دریچه‌های سرویس و اضطراری به ترتیب با قطرهای ۸۰۰ میلی‌متر و ۲۲۰ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. همچنین مجرای تخلیه‌کننده عمقی در حد فاصل دو دریچه به طول تقریبی ۱۵ متر به صورت فلزی اجرا می‌شود تا در مقابل خسارات ناشی از کاویتاسیون و سایش ناشی از جریان پرسرعت مقاومت بیشتری داشته باشد.

حداکثر ارتفاع آب پشت تخلیه‌کننده ۳۸/۶ متر پیش‌بینی شده است که در این تحقیق نیز همین میزان بار آبی مبنای محاسبات قرار گرفته است. [۹]

مدل عددی در حالت ۷۰٪ بازشدگی دریچه اضطراری و ۱۰۰٪ بازشدگی دریچه سرویس و در حالتی که مجرای پائین دست مدل به علت اهمیت مجرای بالادست از مدل حذف شد، در نرم‌افزار گمبیت شبیه‌سازی گردید. (شکل ۱-ب) پس از آن برای بررسی تأثیر هندسه مجرا بر هوادهی جریان، در چند حالت مختلف تغییراتی در ارتفاع مجرا (h) صورت گرفت که در جدول (۱) برخی از این مقادیر ارائه شده است.

در جدول (۱) منظور از h و b به ترتیب ارتفاع و عرض مجرا در مقطع قرارگیری دریچه اضطراری می‌باشد. در تمامی این مدل‌ها بازشدگی دریچه مقدار یکسان ۷۰٪ است.

جدول (۱): مشخصات هندسی مجرا در مقطع دریچه در مدل‌های مختلف ساخته شده در نرم‌افزار.

b(m)	h(m)	h/b
۰/۲	۰/۲۷	۱/۳۳
۰/۲	۰/۳۲	۱/۵۷
۰/۲	۰/۳۷	۱/۸۲
۰/۲	۰/۴۲	۲/۰۷
۰/۲	۰/۴۷	۲/۳۱

$$\bar{v}_m = \frac{\alpha_1 \rho_1 \bar{v}_1 + \alpha_2 \rho_2 \bar{v}_2}{\rho_m} \quad (۸)$$

$$\rho_m = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (۹)$$

α_1 ، ρ_1 ، \bar{v}_1 به ترتیب جز، حجمی، دانسیته و بردار سرعت فاز اول و به همین ترتیب α_2 ، ρ_2 ، \bar{v}_2 به ترتیب جز، حجمی، دانسیته و بردار سرعت فاز دوم می‌باشد. معادله مومنتوم برای مخلوط می‌تواند از جمع معادلات مومنتوم برای تک تک فازها به دست آید و به این صورت نوشته شود: (۸)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] \quad (۱۰)$$

در این رابطه \bar{F} نیروی حجمی و μ_m لزجت مخلوط می‌باشد: [۷]

$$\mu_m = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (۱۱)$$

$\bar{v}_{dr,2}$ سرعت رانش^۱ برای فاز اول و $\bar{v}_{dr,1}$ سرعت رانش برای فاز دوم می‌باشد: [۷]

$$\bar{v}_{dr,1} = \bar{v}_1 - \bar{v}_m \quad (۱۲)$$

$$\bar{v}_{dr,2} = \bar{v}_2 - \bar{v}_m \quad (۱۳)$$

با استفاده از معادله پیوستگی برای فاز دوم، می‌توان معادله جز، حجمی برای این فاز را به دست آورد: [۸]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \bar{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \bar{v}_{dr,2}) \quad (۱۴)$$

استفاده از روش‌های عددی، رایج‌ترین راه حل معادلات با پیچیدگی‌های نسبی است؛ لذا برای حل معادلات مطرح شده در بالا از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است.

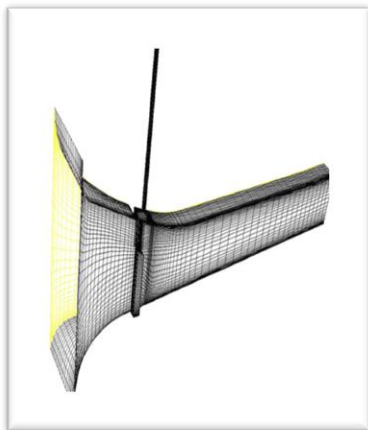
مشخصات مدل

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر، مدل ۱ به ۱۰ یکی از دو تخلیه‌کننده تحتانی سد بتنی وزنی جگین است که در ارتفاع ۱۱۴ متر بالاتر از سطح دریا طراحی گردیده است. (شکل ۱-الف). این تخلیه‌کننده دارای آشغال‌گیر، دهانه زنگوله‌ای شکل، یک دریچه چرخ‌دار به عنوان دریچه اضطراری (رأس) با ارتفاع ۳/۹ متر و عرض ۲ متر، مجرای فلزی تخلیه‌کننده و یک دریچه کشویی سرویس با ارتفاع ۲/۵ متر و عرض ۲ متر می‌باشد. از ویژگی‌های این طرح اینکس؛ دریچه اضطراری در مجاورت

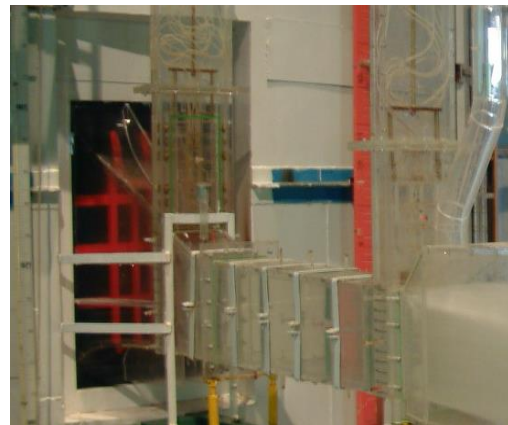
1. Drift velocity.

شکل (۱- الف) نمایی از مدل آزمایشگاهی تخلیه‌کننده تحتانی سد جگین ساخته‌شده در مؤسسه تحقیقات آب است [۹] و شکل (۱- ب) مدل سه‌بعدی ساخته‌شده در

نرم‌افزار گمبیت و نحوه شبکه‌بندی در بازشدگی ۷۰٪ در بچه اضطراری در هر دو حالت $h/b=1.82$ می‌باشد.



شکل (۱- ب)



شکل (۱- الف)

ارائه نتایج

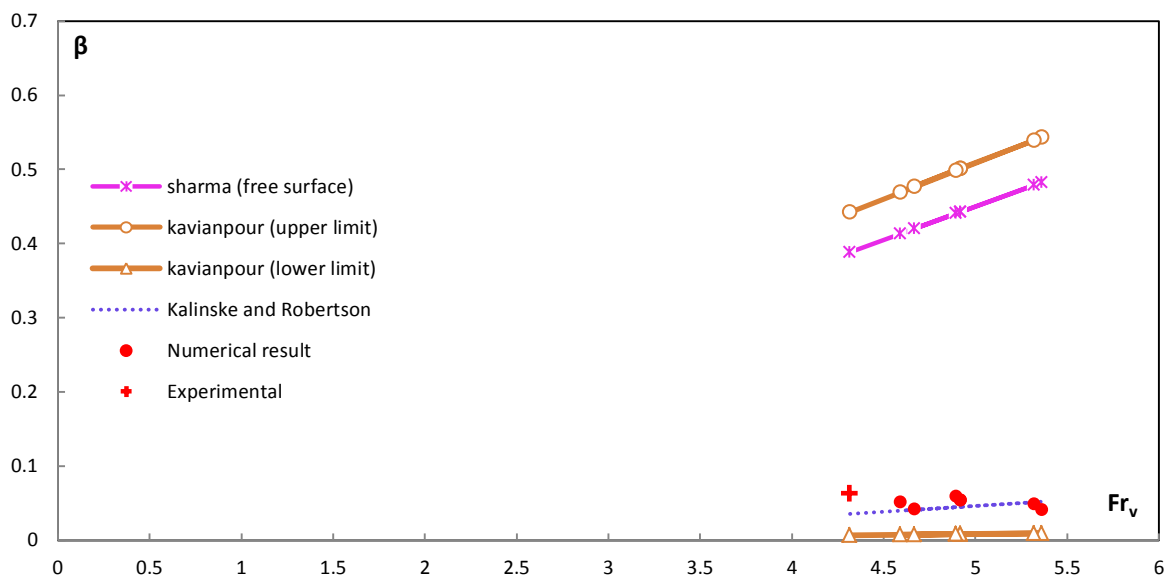
تغییرات ضریب β در برابر عدد فرود مقطع فشرده که با Fr_v نشان داده شده است، به‌ازای روابط تجربی مختلف و نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی در نمودار شکل (۲) ترسیم شده است. باید توجه داشت که در این نمودار اعداد فرود مختلف به‌ازای h/b های متفاوت پس از محاسبه عمق و موقعیت مقطع فشرده هریک از مدل‌ها و محاسبه سرعت به‌دست‌آمده در مقطع فشرده با توجه به عمق جریان دو فاز به‌دست آمده است.

مشخص است که هوای مورد نیاز در محدوده نسبی رابطه پیشنهادی « کالینسکی و رابرتسون » (۶) قرار گرفته است. ذکر این مهم لازم است که در این نمودارها از مدل‌های با ارتفاع کم (کمتر از حدود ۱/۵ به دلیل شرایط نزدیک به پرشدگی مجرا) استفاده نشده است. اجرای مدل‌های مختلف در نرم‌افزار نشان داد که در عمق کم مجرا امکان شناسایی دقیق مقطع فشرده فراهم نیست و همه اندازه‌گیری‌های مربوط به آن با درصد بالایی از خطا همراه است.

همان‌طور که در شکل (۱- ب) ملاحظه می‌شود، هندسه به‌صورت ساختاریافته^۱ شبکه‌بندی شده که در نزدیکی دیواره، شبکه‌ها ریزترند. تعداد سلول‌ها حدود ۸۰۰۰۰ می‌باشد که به‌وسیله فرمول‌های مربوط به محاسبه اولین گره موجود در مرجع (۸) محاسبه و پس از سعی و خطا بهینه شد.

برای مرز ورودی از شرط فشار معلوم استفاده شده است؛ به‌طوری که هد $38/6$ متر در واقعیت همواره برقرار باشد. در مرز ورود هوا و خروجی مجرا شرط فشار صفر وجود دارد. برای دیواره‌های مجرا شرط مرزی دیواره اعمال گردید که در آن سرعت جریان روی دیواره صفر می‌باشد.

برای مدل‌سازی تنش‌های رینولدز از مدل $k-\epsilon$ بهره برده شده است.

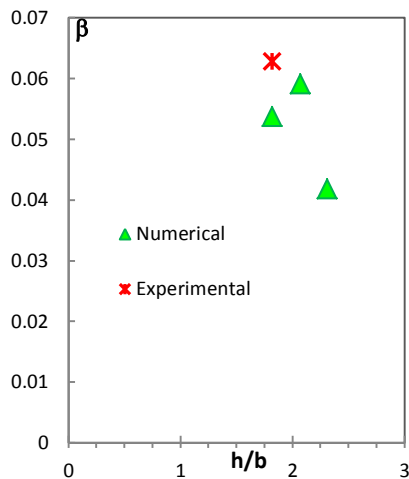


شکل (۲): مقایسه مقادیر عددی β با روابط تجربی.

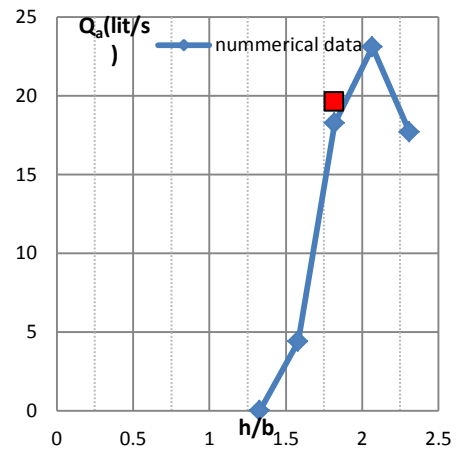
نسبت‌های h/b دارد. نکته قابل توجه در این قسمت اینکه؛ رعایت استاندارد سرعت هوا در مجرای هواده است؛ زیرا با شرط ثابت ماندن هندسه هواده، افزایش دبی هوا با افزایش سرعت هوا در مجرا همراه است و با توجه به اینکه حداکثر سرعت مجاز هوا در داخل مجرای هوادهی بین ۴۵ الی ۹۰ متر بر ثانیه توصیه شده است [۶ و ۱۰] نمی‌توان در یک هندسه ثابت نسبت به افزایش دبی هوا بی‌تفاوت بود. در صورت افزایش دبی هوای ورودی از این مجرا، افزایش سرعت و افت انرژی وجود دارد و ممکن است حوادث پیش‌بینی نشده و مخربی ایجاد شود؛ لذا در این‌گونه موارد به طراحان توصیه می‌شود؛ هندسه مجرای هوا را به اندازه‌ای بزرگ طراحی نمایند که با توجه به افت‌های موجود در مسیر فشار منفی پس از دریچه در محدوده بی‌خطر قرار

با توجه به نمودار شکل (۳) ملاحظه می‌شود که تا یک نسبت مشخص، افزایش h/b با نرخ سریع افزایش هوادهی توسط مجرای هوا همراه است که این مسئله به دلیل وقوع فشارهای منفی پشت دریچه و مکش هوا از هواده است. این مقدار افزایش در $h/b=2.07$ متوقف شده، از این نسبت به بعد دبی هوای ورودی کاهش می‌یابد. این مسئله به این دلیل است که در نسبت‌های عمق به عرض بیشتر، با افزایش عمق جریان مطابق شکل (۴) که امکان ورود هوا از پایین‌دست مجرا نیز وجود دارد، نیاز شدید به هوا تا حدودی توسط پائین دست تأمین می‌گردد. وجود دبی صفر در $h/b=1.33$ به دلیل عدم ورود هوا از مجرای هوا و بالازدگی آب از هواده می‌باشد. با این تفاسیر می‌توان دریافت که از نظر هیدرولیکی، h/b در محدوده ۱/۵ الی ۲ به لحاظ هوادهی شرایط مناسب‌تری نسبت به سایر

گیرد [۴]

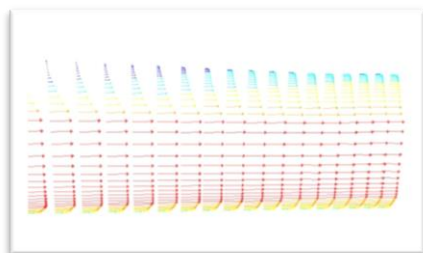


شکل (۳ - ب)

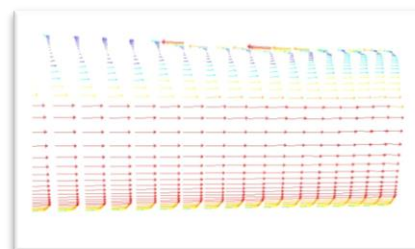


شکل (۳ - الف)

شکل (۳): نمودار تغییرات (الف) دبی هوا (ب) ضریب هوادهی β ، برحسب تغییرات h/b مجرا.



شکل (۴ - ب)



شکل (۴ - الف)

شکل (۴): توزیع عددی سرعت در خروجی مجرا، (الف) $h/b=2.31$ و ورود هوا از پائین دست، (ب) $h/b=2.07$ و عدم ورود هوا از پائین دست.

نتیجه گیری

مدلهایی با هندسه‌های مختلف در نرم‌افزار نشان می‌دهد؛ اولاً افزایش عمق مجرا منجر به کاهش فشارهای پشت و زیر دریچه شده است که افزایش هوادهی جریان را به همراه دارد؛ اما با افزایش بیشتر عمق جریان هوای ورودی از هوادهی کاهش می‌یابد که این به سبب ورود هوا از انتهای باز تونل است؛ ثانیاً، در عمق‌های کم، مجرا پر شده و هوادهی صورت نمی‌پذیرد. هم‌چنین مشخص شد که ضریب هوادهی β در محدوده نسبی رابطه پیشنهادی کالینسکی و رابرتسون قرار گرفته است و از نقطه نظر هیدرولیکی محدوده ۱/۵ الی ۲ برای h/b ، محدوده مناسبی است و سایر نسبت‌های h/b بر روی کاهش هوادهی و ضریب β مؤثر است.

مجاری تخلیه‌کننده تحتانی یکی از اصلی‌ترین سازه‌های جانبی سدها می‌باشد که وجود سرعت‌های بالا و کاهش فشار در این مجاری مشکلات جدی در ارتباط با وقوع پدیده کاویتاسیون به بار می‌آورد. لذا طراحان سازه‌ها به دنبال مدل‌سازی توزیع فشار و نحوه هوادهی جریان در این سازه‌ها می‌باشند. در این تحقیق شبیه‌سازی عددی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی با عمق‌های مختلف بررسی گردید که نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده عمل کرد قابل قبول مدل عددی در پیش‌بینی هوای ورودی به جریان است. اجرای

سپاسگزاری

از مسؤولین محترم مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌شود

مراجع

۱. صفوی، خ.، زراتی، ا. ر.، عطاری، ج.، «مطالعه آزمایشگاهی مکانیزم هواگیری جریان پس از دریچه در تونل‌های تخلیه تحتانی»، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، (پاییز ۱۳۸۸).
 ۲. کاویانپور، م. ر.، "ارزیابی روابط تجربی هوادهی دریچه‌ها، کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی"، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۲۰۰۱).
 ۳. مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، «گزارش نهایی مدل هیدرولیکی دریچه‌های تخلیه‌کننده سد جگین»، بخش تجهیزات و ابزار دقیق، شماره گزارش ۳۷۸، (۱۳۸۱).
 4. Davis, C.V. and Sorensen, K.E., "HandBook of Applied hydraulics", Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company. (1993)
 5. Falvey H.T., "Air-water Flow in Hydraulic Structures", USBR Engineering Monograph No.41, Denver, USA, (1980).
 6. Fluent Inc, "FLUENT User's guide", (2005).
7. Kalinske, A. A., Robertson, J. M., "Closed Conduit Flow", Transactions of Symposium on Entrainment of Air in Flowing Water, ASCE, USA, pp. 1435-1447, (1943).
 8. Safavi, K., Zarrati, A. R. and Attari, J., "Experimental study of air demand in high head gated tunnels", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management 161, pp. 105-111, (April 2008)
 9. Sharma, H.R., "Air-entrainment in high head gated conduits", Journal of Hydraulics Division, ASCE, 102(HY11), pp. 1629-1646, (1976).
 10. Smith, "Hydraulic Structures", Taylor & Francis.
 11. Vischer, D.L., Hager, W.H., "Dam Hydraulics", John Wily & Sons, Chichester, pp. 190-213, (1997).
 12. Yazdi J. and Zarrati, A. R., "An algorithm for calculating air demand in gated tunnels using a 3D numerical model", Journal of Hydro-environment Research, Vol. 5, pp. 3-13, (2011).