

بررسی تأثیر تغییر ابعاد مجرا بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در تخلیه کننده تحتانی سد

فاطمه غزالی^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، محمد رضا کاویانپور^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

salehi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۶/۱]

چکیده- در این مطالعه تخلیه کننده تحتانی سد جگین با مقیاس ۱ به ۱۰ به صورت عددی مدل شده و نتایج آن با مقادیر اندازه گیری شده از مدل آزمایشگاهی در مؤسسه پژوهش های آب مقایسه شد. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب مدل عددی در پیش بینی الگوی جریان است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر نسبت عمق به عرض مجرا بر هوادهی و نرخ جریان ورودی به مجرا است. برای این کار مدل های عددی متفاوتی در نرم افزار ساخته شد که وجه تمایز آن با مدل اولیه تفاوت در مقدار پارامتر عمق به عرض مجرا بود. این تغییرات در دو حالت عمق ثابت- عرض متغیر و عرض ثابت- عمق متغیر صورت پذیرفت. نتایج نشان می دهد با افزایش عمق و عرض مجرا، نرخ جریان ورودی و میزان هوادهی جریان افزایش می یابد، به گونه ای که از نقطه نظر هیدرولیکی محدوده ۱/۵ الی ۲ برای h/b ، محدوده مناسبی است و سایر نسبت های h/b روی کاهش هوادهی و ضریب β مؤثر است.

واژگان کلیدی: تخلیه کننده تحتانی، تحلیل عددی، هوادهی، هندسه مجرا، نرم افزار فلوئنت.

۱- مقدمه

تحت فشار که به وسیله ی یک دریچه با هد زیاد کنترل می شود و دیگری یک کانال خروجی که جریان فوق بحرانی را به اتمسفر تخلیه می کند. دریچه اندکی بالادست پرده تزریق سیمانی قرار می گیرد، به گونه ای که طول تونل آزاد و تحت فشار به صورت تقریبی برابر شود. بخش سطح آزاد به سبب اختلاط جریان آب و هوا، ورود و خروج هوا و سیستم تغذیه هوا و همچنین پتانسیل تخریب کاویتاسیون و ساییدگی با جریان دارای رسوب به صورت خاصی مورد ملاحظه هیدرولیکی قرار دارد.

تخلیه کننده تحتانی به علت مشکلات و محدودیت هایی مانند کاویتاسیون، نیروهای هیدرودینامیکی، ارتعاش و سایش،

تخلیه کننده تحتانی در سدهای بلند به دلایلی از جمله کنترل آبیاری اولیه، تخلیه رسوبات مخزن، رهاسازی آب برای آبیاری و کاهش تراز مخزن برای تعمیر و نگهداری ساخته می شود [۱]. تخلیه کننده ها را می توان بر حسب آنکه در مجاری روباز یا بسته جریان داشته باشند تعریف کرد. در مجاری بسته ممکن است تمام و یا قسمتی از مجرا تحت فشار باشد و یا به طور کلی به صورت مجرای رو باز جریان داشته باشد [۲].

یک تخلیه کننده طویل به دو بخش تقسیم می شود تا بتوان طول کانال دسترسی تحت فشار را کاهش داد. یک بخش

که در این رابطه Q_w دبی هوا، Q_a دبی آب و $\beta = Q_a / Q_w$ (ضریب بی بعد هوادهی) و Fr عدد فرود جریان در بالادست پرش هیدرولیکی می‌باشد.

شارما [۶] 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) به دست آورد:

برای جریان پودری:

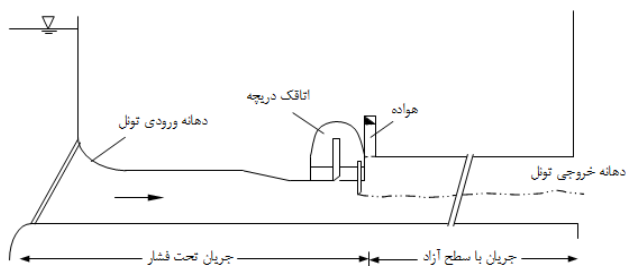
$$\beta = 0.2 Fr_c \quad (۳)$$

برای جریان سطح آزاد:

$$\beta = 0.09 Fr_c \quad (۴)$$

Fr_c عدد فرود جریان در مقطع انقباض در زیر دریچه

آلبوتو و همکاران [۷] به مطالعه ویژگی‌های هیدرولیکی تخلیه‌کننده پرداختند. این ویژگی‌ها شامل کانال دسترسی، نسبت عمق انتهایی، ضریب دبی میانگین، عمق پایاب و افت هیدرولیکی در طول تخلیه‌کننده است. ایشان توزیع سرعت در خروجی را مورد بررسی قرار داده و حدود یکصد آزمایش برای بررسی عدد فرود بالادست جریان صورت دادند. مطالعات ایشان نشان می‌دهد عدد فرود تأثیر عمده‌ای بر سازوکار جریان دارد.



شکل ۱: شماتیک تخلیه‌کننده تحتانی [۳]

حسینی و همکاران [۸] مدل فیزیکی مجرای تخلیه‌کننده و دریچه‌های سرویس و اضطراری سد نرماشیر را مورد مطالعه قرار داده و پس از انجام آزمایش روی آن و اندازه‌گیری مقادیر هد فشار در نقاط مختلف و میزان آبگذری دریچه به بررسی وقوع کاویتاسیون پرداختند.

سازه‌ای نیست که به طور دائمی استفاده شود. این سازه، باید توانایی تخلیه کامل مخزن را داشته باشد. در تونل‌های کوتاه، پیش‌بینی سیستم هواده مورد نیاز نیست، در تونل‌های بلند، مجرای هواده که پشت دریچه گذاشته شده، هوای کافی را از بیرون به داخل تونل هدایت می‌کند تا جریان با سطح آزاد در داخل تونل شکل گیرد. هوادهی کافی در این سازه باید انجام شود و تونل پایین دست باید به اندازه کافی بزرگ باشد که جریان موج در تونل ایجاد نشود. همچنین دبی سازه، کاملاً با دریچه کنترل می‌شود [۳] (شکل ۱).

اندازه ابعاد مجرای تخلیه‌کننده برای تأمین یک دبی معین، با ارتفاع موجود رابطه معکوس دارد. این رابطه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲]:

$$H_T = K_1 \cdot h_v \quad \text{یا} \quad H_T = K_2 \cdot \frac{Q^2}{a^2} \quad (۱)$$

که در آن H_T کل ارتفاع موجود برای ایجاد جریان، K_1 و K_2 ضرایب، h_v هد سرعت، Q دبی مورد نیاز تخلیه‌کننده و a سطح مقطع مجرای تخلیه‌کننده است.

پترکا [۴] از اولین افرادی بود که به بررسی اثر هوادهی در کاهش خطر وقوع کاویتاسیون پرداخت. مطالعات وی نشان داد که با تزریق ۲٪ هوا (نسبت دبی هوا به دبی جریان عبوری در داخل مجرا) به داخل جریان خطر وقوع کاویتاسیون به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و با افزایش میزان هوا به ۶ تا ۸ درصد هیچگونه خرابی ناشی از کاویتاسیون مشاهده نمی‌شود.

یکی از اولین مطالعات صورت گرفته در زمینه هوادهی در مجاری بسته به وسیله‌ی کالینسکی و رابرتسون [۵] صورت پذیرفت. ایشان جریان آب با پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند و با تحلیل ابعادی و مطالعات مدل نشان دادند که هوای وارد شده به وسیله‌ی پرش هیدرولیکی با رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066 (Fr - 1)^{1.4} \quad (۲)$$

معادله مومنتوم برای مخلوط می‌تواند از جمع معادلات مومنتوم برای تک تک فازها به دست آید [۱۱]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p \\ + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \rho_m \bar{g} + \bar{F} \\ + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 \bar{v}_{dr,1} \bar{v}_{dr,1} + \alpha_2 \rho_2 \bar{v}_{dr,2} \bar{v}_{dr,2}) \end{aligned} \quad (8)$$

\bar{F} نیروی حجمی و μ_m لزجت مخلوط است [۱۱]:

$$\mu_m = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (9)$$

$\bar{v}_{dr,1}$ سرعت رانش^۱ برای فاز اول و $\bar{v}_{dr,2}$ سرعت رانش برای فاز دوم است [۱۱].

$$\bar{v}_{dr,1} = \bar{v}_1 - \bar{v}_m \quad (10)$$

$$\bar{v}_{dr,2} = \bar{v}_2 - \bar{v}_m \quad (11)$$

با استفاده از معادله پیوستگی برای فاز دوم، می‌توان معادله جز، حجمی برای این فاز را به دست آورد [۱۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \bar{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \bar{v}_{dr,2}) \quad (12)$$

پس برای حل معادلات مطرح شده در بالا از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است.

۳- مشخصات مدل

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده به منظور صحت‌سنجی در این عبارت است از مدل ۱ به ۱۰ یکی از دو تخلیه‌کننده تحتانی سد بتنی وزنی جگین که در ارتفاع ۱۱۴ متر بالاتر از سطح دریا طراحی شده است [۱۲] (شکل ۲ 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 است.

از ویژگی طرح جگین آنست که دریچه اضطراری در مجاورت دریچه سرویس قرار نداشته و در قسمت قوس دهانه زنگوله‌ای شکل ورودی قرار دارد. به منظور حفاظت در مقابل پدیده کاویتاسیون، دو هواده بلافاصله در پایین دست دریچه‌های سرویس و اضطراری به ترتیب با قطرهای ۸۰۰ و ۲۲۰ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. همچنین مجرای تخلیه‌کننده عمقی در حد فاصل دو دریچه به طول تقریبی ۱۵ متر به

سلیمان‌زاده و شمسایی [۹] به حل عددی جریان آب و هوا در تخلیه‌کننده تحتانی پرداخته و میزان نیروی وارد بر دریچه را در دو حالت هواده‌ی و عدم هواده‌ی مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. آنان همچنین بررسی‌هایی در زمینه نسبت هوای ورودی به مجرا، اندیس کاویتاسیون، میانگین غلظت هوا و توزیع محوری هوا در عمق مجرا صورت دادند.

نجفی و همکاران [۱۰] با مدلسازی عددی تخلیه‌کننده تحتانی پرداخته میزان دبی و هوای عبوری از مجرای هواده پایین دست دریچه را مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به پژوهش‌های بالا و اهمیت بررسی پارامترهای جریان و هواده‌ی در تخلیه‌کننده‌ها از یک سو و اهمیت تأثیر ابعاد مجرا بر شرایط هیدرولیکی جریان و لزوم شناخت آن از سوی دیگر، مطالعه حاضر به بررسی تأثیر هندسه مجرا بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان می‌پردازد که با تغییر نسبت عمق به عرض مجرا و دریچه‌ها به وسیله‌ی مدل عددی صورت گرفته است.

۲- معادلات حاکم

یکی از مدل‌های عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی مدل مخلوط (mixture) است، که فازهای مختلف در آن به صورت 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 به صورت معادله (۵) است [۱۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = 0 \quad (5)$$

\bar{v}_m سرعت به وسیله‌ی جرمی و ρ_m دانسیته مخلوط است [۱۱]:

$$\bar{v}_m = \frac{\alpha_1 \rho_1 \bar{v}_1 + \alpha_2 \rho_2 \bar{v}_2}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\rho_m = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (7)$$

α_1 ، ρ_1 ، \bar{v}_1 به ترتیب جزء حجمی، دانسیته و بردار سرعت فاز اول و به همین ترتیب α_2 ، ρ_2 و \bar{v}_2 به ترتیب جزء حجمی، دانسیته و بردار سرعت فاز دوم است.

در این مقاله ابتدا برای اعتبار بخشی به مدل عددی نتایج حاصل از حل عددی در مجرای با $h/b=1.82$ با مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی مقایسه شد [۱۳]. سپس هندسه‌های متفاوتی با ابعاد متغیر مانند آنچه در

جدول ۱ قابل مشاهده است به صورت عددی مدل شد تا امکان مقایسه شرایط هیدرولیکی جریان در مجاری با ابعاد متغیر فراهم آید.

۳-۱- صحت سنجی مدل عددی

نتایج حل مدل عددی با به کارگیری چهار مدل آشفتگی مطابق

جدول ۲ قابل مشاهده است. همان‌گونه که از

جدول ۲ ملاحظه می‌شود از بین چهار مدل مورد استفاده در حل میدان جریان، دو مدل $k-\epsilon$ RNG و RSM نتایجی نزدیک‌تر به واقع حاصل نموده‌اند. با توجه به

جدول ۲ و شکل ۳، مدل $k-\epsilon$ RNG می‌تواند گزینه مناسبی برای لحاظ کردن آشفتگی جریان باشد.

جدول ۱: مشخصات هندسی مجرا در مقطع دریاچه در مدل‌های مختلف ساخته شده در نرم‌افزار.

| | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|
| تغییرات بر ارتفاع مجرا اعمال شده است | ۰/۲۰ | ۰/۲۷ | ۱/۳۳ |
| | ۰/۲۰ | ۰/۳۲ | ۱/۵۷ |
| | ۰/۲۰ | ۰/۳۷ | ۱/۸۲ |
| | ۰/۲۰ | ۰/۴۲ | ۲/۰۷ |
| تغییرات بر عرض مجرا اعمال شده است | ۰/۲۰ | ۰/۴۷ | ۲/۳۱ |
| | ۰/۳۷ | ۰/۳۷ | ۱/۰۰ |
| | ۰/۲۸ | ۰/۳۷ | ۱/۳۳ |
| | ۰/۲۴ | ۰/۳۷ | ۱/۵۸ |
| | ۰/۲۲ | ۰/۳۷ | ۱/۷۰ |
| | ۰/۲۰ | ۰/۳۷ | ۱/۸۲ |
| | ۰/۱۸ | ۰/۳۷ | ۲/۰۷ |
| | ۰/۱۶ | ۰/۳۷ | ۲/۳۱ |
| ۰/۱۵ | ۰/۳۷ | ۲/۵۰ | |

جدول ۲: نتایج اختلاف حل عددی با مقادیر آزمایشگاهی به ازای مدل‌های مختلف آشفتگی در بازشدگی ۷۰٪ دریاچه اضطراری

صورت فلزی اجرا شد تا در مقابل خسارت ناشی از کاویتاسیون و سایش ناشی از جریان پرسرعت مقاومت بیشتری داشته باشد. بیشینه ارتفاع آب در پشت تخلیه‌کننده ۳۸/۶ متر بوده که در این پژوهش نیز همین میزان بار آبی استفاده شده است [۱۲].

مدل عددی در حالت ۷۰٪ بازشدگی دریاچه اضطراری و ۱۰۰٪ بازشدگی دریاچه سرویس با حذف مجرای پایین‌دست از مدل به علت اهمیت مجرای بالادست، در نرم‌افزار گمبیت شبیه‌سازی شد (شکل ۲ ب). بازشدگی‌های مختلفی در مدل آزمایشگاهی انجام شد، اما از آنجا که در عمل بازشدگی‌های بالا بین ۶۰٪ تا ۸۰٪ معمولاً حائز اهمیت بوده و از نقطه نظر نیروی بالابری و ارتعاش و هوادهی بسیار مهم است. لذا بازشدگی ۷۰٪ برای این مقاله انتخاب و نتایج آن ارائه شدند. برای بررسی تأثیر هندسه مجرا بر هوادهی جریان، در چند حالت مختلف تغییراتی در ابعاد مجرا صورت گرفت که در

جدول ۱ برخی از این مقادیر ارائه شده است. در

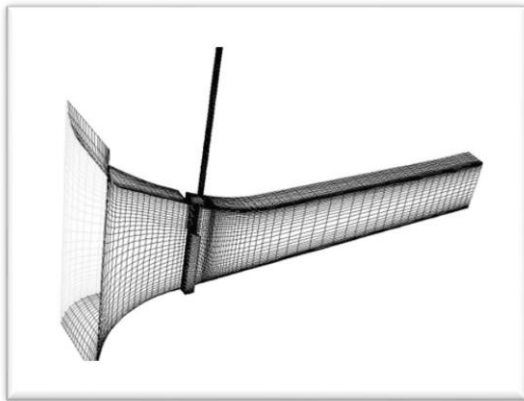
جدول ۱ h و b ، به ترتیب ارتفاع و عرض مجرا در مقطع قرارگیری دریاچه اضطراری می‌باشد. توجه شود در تمامی این مدل‌ها بازشدگی دریاچه ۷۰٪ است.

همان‌گونه که در شکل ۲ (ب) ملاحظه می‌شود هندسه به صورت ساختاریافته^۱ شبکه‌بندی شده و در نزدیکی دیواره شبکه‌ها ریزترند. تعداد سلول‌ها حدود ۸۰۰۰۰ است که به وسیله فرمول‌های مربوط به محاسبه اولین گره [۱۱] محاسبه و پس از سعی و خطا بهینه شد. برای مرز ورودی از شرط فشار معلوم استفاده شده، به گونه‌ای که هد ۳۸/۶ متر در واقعیت همواره برقرار باشد. در مرز ورودی هوادهی و خروجی مجرا شرط فشار صفر وجود دارد.

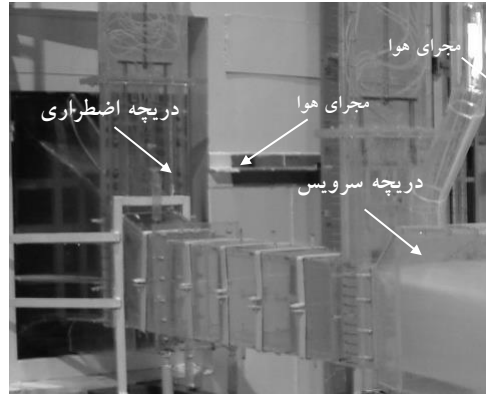
برای دیواره‌های مجرا شرط مرزی دیواره اعمال شد که در آن سرعت جریان روی دیواره صفر است. برای مدل‌سازی تنش‌های رینولدز، از مدل $k-\epsilon$ RNG بهره برده شد.

| باز شدگی دریچه | مدل آشفتگی | اختلاف دبی جریان (%) | اختلاف دبی هوا (%) | میانگین اختلاف فشار (%) |
|----------------------|----------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| %۷۰ | <i>STD k-ε</i> | ۹/۵۸ | -۱۲/۹۴ | ۱۶/۳۳ |
| | <i>RNG k-ε</i> | ۹/۰۵ | -۶/۳۶ | ۱۱/۸۰ |
| | <i>k-ω</i> | ۶/۶۸ | -۲۴/۳۱ | ۱۹/۵۷ |
| | <i>RSM</i> | ۹/۰۱ | -۹/۷۵ | ۱۲/۹۰ |
| %۱۰۰ | <i>RNG k-ε</i> | ۲/۰۱۸ | - | *۵/۱۲ |

* اندازه گیری فشار در کف و دیواره مجرا صورت گرفته است.

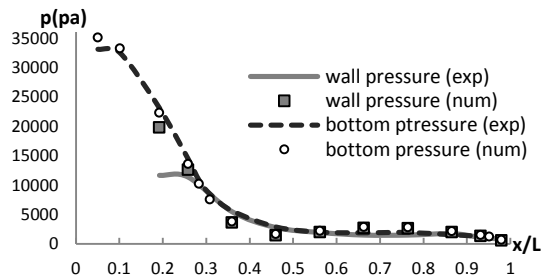


(ب)

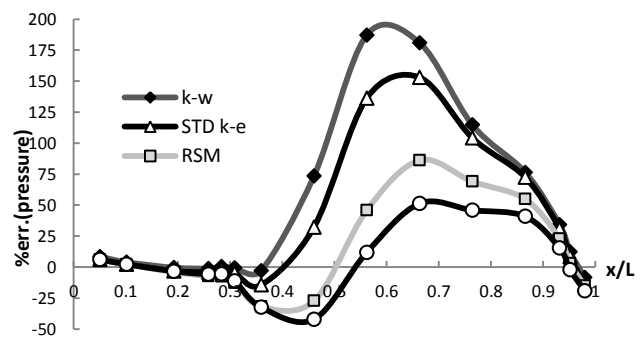


(الف)

شکل ۲: (الف) نمایی از مدل آزمایشگاهی تخلیه‌کننده تحتانی سد جگین ساخته شده در مؤسسه تحقیقات آب [۱۲]، (ب) مدل سه بعدی ساخته شده در نرم‌افزار گمبیت و چگونگی شبکه‌بندی در بازشدگی ۷۰٪ دریاچه اضطرابی، در هر دو حالت $h/b=1.82$.



شکل ۴: نمودار توزیع فشار در کف و دیواره مجرا در بازشدگی ۷۰٪ دریاچه اضطرابی در دو حالت عددی و آزمایشگاهی.



شکل ۳: نمودار بررسی دقت مدل‌های آشفتگی بر مقادیر فشار در کف مجرا در بازشدگی ۷۰٪ دریاچه اضطرابی

۴- تفسیر و تحلیل نتایج

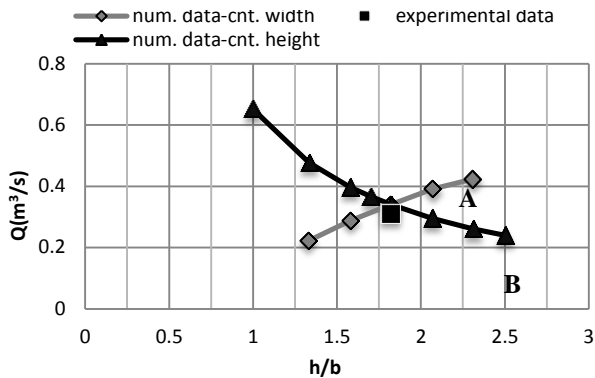
۴-۱- نرخ جریان ورودی به مجرا

برای بررسی تأثیر تغییر ابعاد مجرا بر میزان نرخ جریان ورودی به تخلیه‌کننده خاطر نشان می‌شود که این میزان نرخ جریان ورودی متأثر از سطح مقطع کنترل (محل قرارگیری دریاچه) است، چرا که با توجه به ثابت بودن بار آبی بالادست و استفاده از رابطه تعادل انرژی، سرعت در مقطع کنترل ثابت باقی می‌ماند [۱۴].

مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار، مطابق جدول ۳ خواهد بود (این مقادیر همگی در عدد ۲ ضرب شده‌اند تا مقادیر مربوط به نیمه چپ مجرا نیز که به دلیل شرط تقارن مدل نشده است، افزوده شود): نتایج این جدول در نمودار شکل ۵ ترسیم شده است. در این شکل مراد از cnt عبارت ثابت است. مطابق جدول ۳ و شکل ۵، مدل عددی با اختلاف حدود ۹ درصد برآورد دبی مجرا نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد.

در شکل ۳ منظور از x فاصله از ابتدای ورودی زنگوله‌ای شکل و L طول مجرا از ابتدای ورودی تا انتهای مجرای تحت فشار (۱/۹۸ متر) است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود مقادیر عددی از حوالی دریاچه (x/L حدود ۰/۲۲) تا به انتهای مجرا فاصله بیشتری از مقادیر واقعی دارند که علت آن وجود جریان دو فازی و گرادیان شدیدتر متغیرهاست که تخمین‌های عددی را با خطا همراه ساخته است.

شکل ۴ نشان دهنده توزیع فشار در کف تخلیه‌کننده و در ۱/۵ سانتی‌متری از کف، روی دیواره تخلیه‌کننده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل می‌توان دریافت مدل عددی با مدل آشفتگی $RNG\ k-\epsilon$ به خوبی توانسته است مقادیر فشار را محاسبه نماید.



شکل ۶: نمودار تغییرات دبی بر حسب h/b در دو حالت h متغیر، b ثابت (نمودار A) و b متغیر، h ثابت (نمودار B).

برای مقایسه تغییرات دبی نسبت به دبی اولیه (دبی در مجرای b با نسبت عمق به عرض $1/1.82$)، شکل ۷ ارائه شده که تغییر دبی نسبی را در ازای تغییرات h/b نسبت به h/b اولیه مورد ارزیابی قرار می‌دهد در این شکل مقصود از reverse constant height (constant height) قرینه داده‌های مثلثی (constant height) نسبت به محور افق است. h/b تغییرات مجرا با فرض ثابت ماندن ارتفاع مجرا (height) و تغییر در عرض (width) آن صورت می‌پذیرد. در شکل ۷ مبدأ مختصات معرّف داده مرجع است، که در این پژوهش نتایج مربوط به مجرای اولیه (بدون تغییر) است. مقادیر روی محورهای مختصات با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) به دست می‌آیند:

$$\% \Delta \left(\frac{h}{b} \right) = \frac{\left(\frac{h}{b} \right)_i - \left(\frac{h}{b} \right)_o}{\left(\frac{h}{b} \right)_o} \times 100 \quad (13)$$

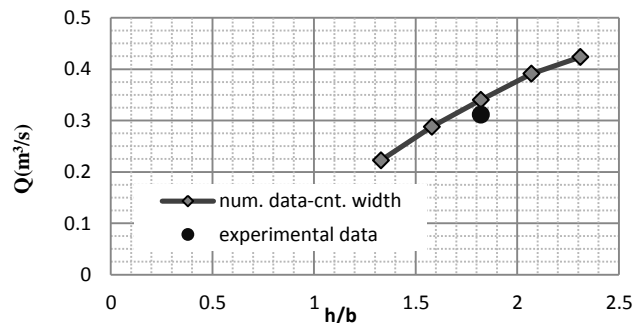
$$\% \Delta Q = \frac{Q_i - Q_o}{Q_o} \times 100 \quad (14)$$

که در این روابط اندیس صفر مربوط به مجرای اولیه می‌باشد. در شکل ۷ نمودار B'' قرینه نمودار B' نسبت به محور افق می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نمودارهای A' و B' تقریباً بر یکدیگر هماهنگ شده‌اند. خط متصل کننده نقاط در حقیقت برازش سهمی وار بر نقاط شکل است. این منحنی (B'') با انتقال نقطه مرجع از مجرای اولیه به مجرای با عمق و عرض برابر ($h/b=1$)، مطابق شکل ۸ مرتب می‌شود. دلیل

جدول ۳: دبی‌های حاصل از نرم‌افزار در h/b های مختلف (ب ثابت).

| h/b | Num. (m ³ /s) | Exp. (m ³ /s) | %err. |
|-------|--------------------------|--------------------------|-------|
| 1.33 | 0.22260 | - | - |
| 1.58 | 0.28794 | - | - |
| 1.82 | 0.34006 | 0.31184 | 9.05 |
| 2.07 | 0.39111 | - | - |
| 2.31 | 0.42360 | - | - |

همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است، با افزایش نسبت عمق به عرض مجرا بر میزان دبی مجرا افزوده می‌شود، که با فرض ثابت بودن عرض مجرا این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. این بدین مفهوم است که برای تخلیه سیلاب سد به وسیله‌ی تخلیه‌کننده، استفاده از یک هندسه مناسب می‌تواند پاسخگوی نیاز تخلیه آب سد در زمان مناسب در کنار شرایط هوادهی مناسب و توجه بر نیروهای هیدرودینامیک و سازه درپچه باشد.

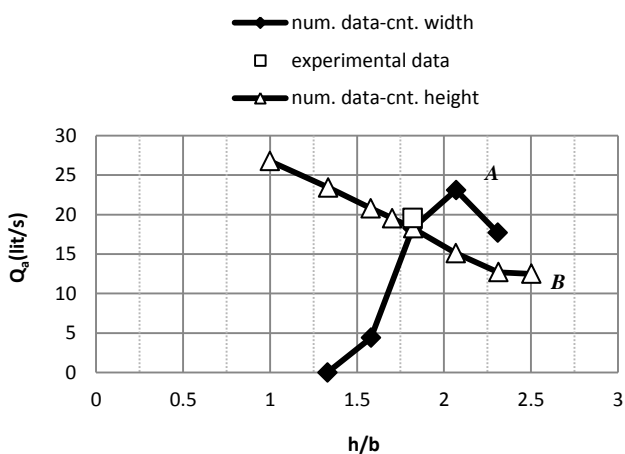


شکل ۵: نمودار تغییرات دبی بر حسب h/b .

برای بررسی دقیق‌تر تاثیر h/b ، مجرای مدل شده در فلونت بار دیگر در هندسه‌های متغیر اجرا شد، لیکن در این مرحله ارتفاع مجرا (h) ثابت و تغییر h/b از تغییرات عرض مجرا (b) حاصل شد. نتایج در شکل ۶ ترسیم شده است. توجه شود که در این نمودار نتایج حاصل از سه نسبت عمق به عرض $1/1.0$ ، $1/1.7$ و $2/5.3$ نیز به نسبت‌های چهارگانه بند قبل افزوده شد. دلیل سیر قرینه صعودی و نزولی هر یک از نمودارهای A و B آنست که افزایش h/b در نمودار A با افزایش ارتفاع و سطح مقطع همراه است، در حالی که در نمودار B افزایش نسبت فوق متعادل از کاهش عرض و در نتیجه کاهش سطح مقطع است. بنابراین در حالت اول افزایش دبی و در حالت دوم کاهش دبی ملاحظه می‌شود.

۴-۲- نرخ جریان هوای ورودی

برای بررسی تأثیر نسبت عمق به عرض مجرا بر هوادهی ابتدا دبی هوای ورودی از هواده به مجرا در شرایط مختلف مورد قیاس قرار می‌گیرد. (شکل ۹) دلیل تفاوت رفتاری دو نمودار A و B آنست که افزایش h/b در نمودار A منجر به افزایش سطح مقطع (و به تبع آن افزایش سطح هواگیری) شده و در نمودار B کاهش سطح مقطع را حاصل نموده است. با توجه به نمودار A ملاحظه می‌شود که تا یک نسبت مشخص، افزایش h/b با نرخ سریع افزایش هوادهی همراه است که این مسأله به دلیل وقوع فشارهای منفی پشت دریچه و مکش هوا از هواده است. این مقدار افزایش در h/b=2.07 متوقف شده است، از این نسبت به بعد دبی هوای ورودی کاهش می‌یابد. این مسأله به این دلیل است که در نسبت‌های عمق به عرض بیشتر نمودار A، با افزایش عمق جریان امکان ورود هوا از پایین دست مجرا نیز وجود داشته، نیاز شدید به هوا تا حدودی به وسیله‌ی پایین دست تأمین می‌شود [۱۵]. ضمناً در این حالت با برخورد هوای ورودی از هواده و انتهای مجرا به یکدیگر ناحیه‌ای متلاطم ایجاد می‌شود که مانع خروج بیشتر هوا از انتها است.



شکل ۹: نمودار تغییرات دبی هوا بر حسب h/b در دو حالت h متغیر، b ثابت (نمودار A) و b متغیر، h ثابت (نمودار B).

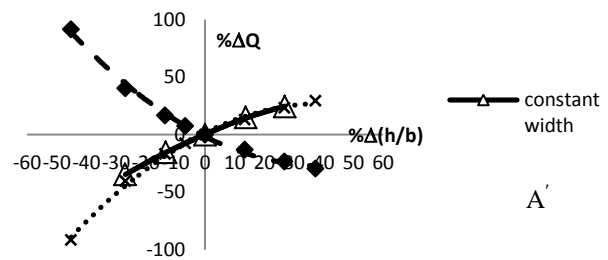
همان‌گونه که پیشتر در مرجع شماره [۱۵] اشاره شد وجود دبی صفر در h/b=1.33 به دلیل عدم ورود هوا از مجرای هوا

انتخاب این نقطه آن است که اولاً با هر مقدار افزایش عددی متغیر h/b، محاسبه درصد اختلاف بدون استفاده از رابطه (۱۳) به راحتی امکان‌پذیر است، ثانیاً مقدار ۱ را می‌توان حد پایین تغییرات h/b در نظر گرفت، چرا که در تخلیه‌کننده عمقی سدها اغلب h بزرگتر از b در نظر گرفته می‌شود.

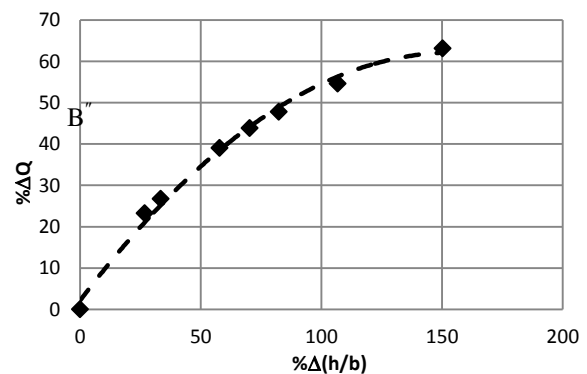
با تخصیص چند جمله‌ای از درجه ۲ (سه‌می) به بالا، منحنی برازش یافته با ضریب رگرسیون R^2 خوبی به ۱ میل می‌کند. این چند جمله‌ای درجه ۲ مطابق رابطه (۱۵) با ضریب همبستگی ۰/۹۹۳۸ ارائه می‌شود:

$$\Delta Q = 0.0025 \left(\Delta \left(\frac{h}{b} \right) \right)^2 + 0.773 \left(\Delta \left(\frac{h}{b} \right) \right) + 2.143 \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) همه مقادیر بر حسب درصد است. البته عمومیت دادن رابطه (۱۵) به هر نوع تخلیه‌کننده صحیح نیست و صحت آن باید حداقل با نتایج به دست آمده از یک هندسه دیگر مقایسه شود. اما باید توجه داشت در شرایط فعلی می‌توان از این فرمول برای درون‌یابی نقاط مورد نظر استفاده کرد.



شکل ۷: مقایسه نمودارهای A و B در حالت بدون بعد.



شکل ۸: منحنی تغییرات دبی بر حسب h/b نسبت به حالت h=b.

مقطع فشرده افزوده می‌شود و این تغییر بیشتر متأثر از افزایش ارتفاع است تا افزایش عرض. نمودار (شکل ۱۱ د) نشان می‌دهد همواره افزایش h/b مجرا با کاهش عدد فرود جریان در مقطع فشرده همراه است. (شکل ۱۱ ه) افزایش ضریب β تا یک نسبت مشخص h/b را نشان داده و با افزایش بیشتر h/b مقدار ضریب β کاهش می‌یابد.

تغییرات ضریب β در برابر عدد فرود مقطع فشرده که با Fr_v نشان داده شده، به ازای روابط تجربی مختلف ارائه شده به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف (که به برخی از این روابط در مقدمه اشاره شد) و نتایج حاصل از حل عددی در نمودار شکل ۱۱ ترسیم شده است. توجه شود در این نمودار اعداد فرود مختلف به ازای h/b های مختلف (در دو حالت عمق ثابت و عرض ثابت)، پس از محاسبه عمق و موقعیت مقطع فشرده‌ی هریک از مدل‌ها و محاسبه سرعت به دست آمده در مقطع فشرده با توجه به عمق جریان دو فاز (شکل ۱۱)، به دست آمده است [۶، ۵، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳].

مشخص است که هوای مورد نیاز در محدوده نسبی رابطه پیشنهادی کالینسکی و رابرتسون [۵] قرار گرفته است (رابطه (۲)). توجه شود در این نمودارها از مدل‌های با ارتفاع کم استفاده نشده است، چرا که در ابعاد کم مجرا امکان شناسایی دقیق مقطع فشرده فراهم نیست و همه‌ی اندازه‌گیری‌های مربوط به آن با درصد بالایی از خطا همراه است. 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 نسبت‌های h/b دارد [۱۵].

از دیگر شرایط نامطلوب هیدرولیکی در مجاری تخلیه امکان تماس آب با سقف مجراست. بررسی‌های آزمایشگاهی مدل فعلی نشان می‌دهد از حدود بازشدگی ۷۰ درصد دریاچه اضطرابی، مجرا به حالت نزدیک به پر رسیده که در حوالی دریاچه سرویس به دلیل داشتن کمترین سطح مقطع مشهودتر است. در این وضعیت جریان تپشی (لخته‌ای) در روی سطح آب تا سقف به صورت ناپایدار شروع به شکل گرفتن می‌نماید [۱۲].

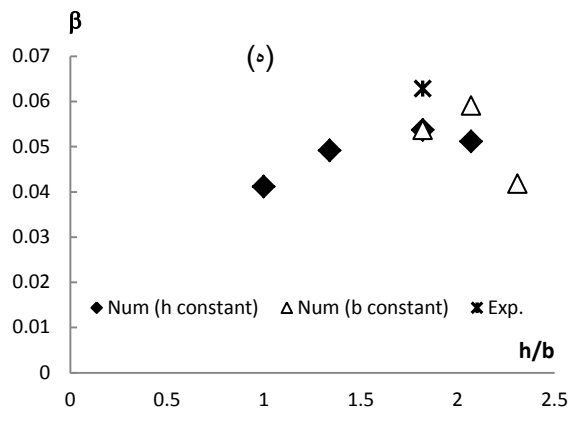
و بالازدگی آب از هواده است. همچنین بیشینه سرعت مجاز هوا در داخل مجرای هواده‌ی بین ۴۵ الی ۹۰ متر بر ثانیه توصیه شده است [۱۶ و ۱۷]، پس نمی‌توان در یک هندسه ثابت نسبت به افزایش دبی هوا بی‌تفاوت بود. در صورت افزایش دبی هوای ورودی از این مجرا، افزایش سرعت و افت انرژی وجود داشته و ممکن است حوادث پیش‌بینی نشده و مخربی ایجاد شود. پس در این گونه 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 دریاچه در محدوده بی‌خطر قرار گیرد [۱۸].

آهنگ کاهش نمودار B نسبت به آهنگ افزایشی نمودار A ملایم‌تر است، که مبین تأثیر بیشتر تغییرات عمق نسبت به تغییر در عرض مجرا در ورود هوا از داخل هواده است. این مطلب را این‌گونه می‌توان تفسیر کرد که با افزایش عمق، وقوع فشار منفی پشت دریاچه بسیار محتمل‌تر است تا وقوع این مقادیر منفی در ازای افزایش عرض مجرا (در هر دو حالت دبی هوا افزایش می‌یابد اما یکی با شیب تندتری نسبت به دیگری). در این نمودار با افزایش بیشتر h/b از مقدار ۲/۳۱ تغییر چندانی در دبی هوا حاصل نمی‌شود.

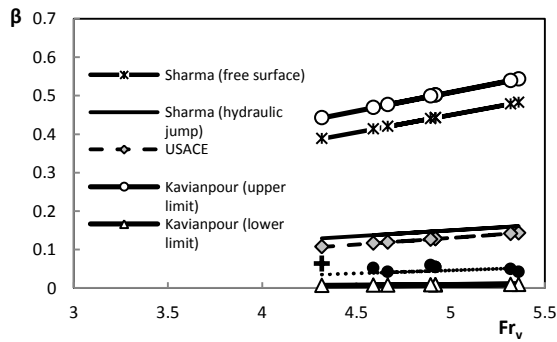
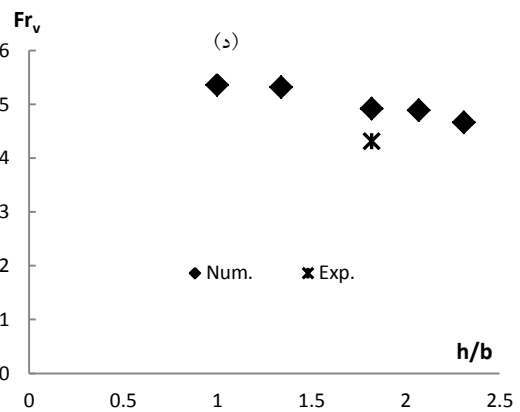
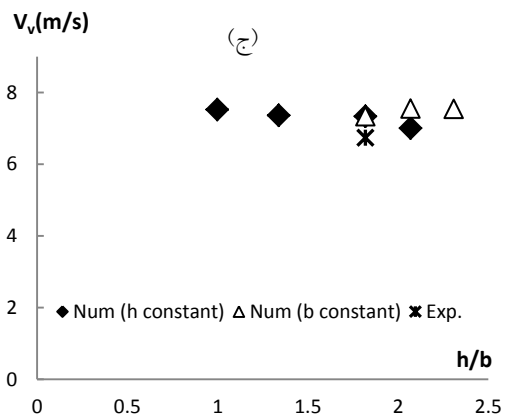
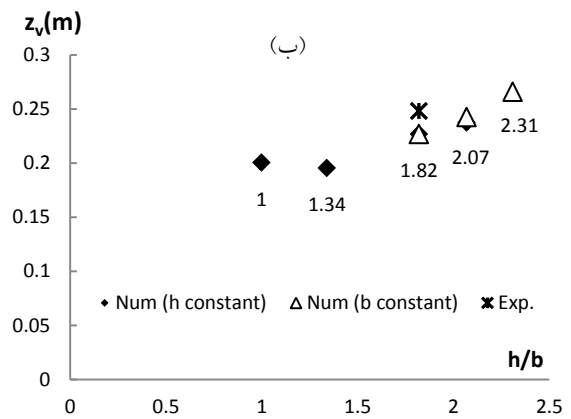
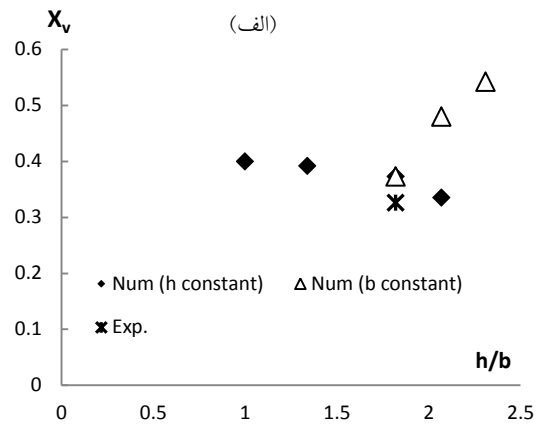
۴-۳- دبی بی‌بعد هوای

β پارامتر اصلی در طرح مجرای هوا بوده و به مشخصات جریان، هندسه تونل و ابعاد مجرای هوا بستگی دارد [۱۸]. تغییرات ضریب β بر حسب عدد فرود جریان در مقطع فشرده بعد از دریاچه به دست آمده است. این ضریب حساسیت زیادی به هندسه لوله هواده دارد و در صورت بالا بودن افت هد اصطکاکی در لوله هواده، به شدت افت می‌کند [۱۹]. مشخصات هیدرولیکی جریان مقطع فشرده در نمودارهای (الف) تا (د) شکل ۸ آمده است.

همان‌گونه که در (شکل ۱۱ الف) ملاحظه می‌شود با افزایش عمق و عرض مجرا، مقطع فشرده در فاصله دورتری از دریاچه رخ می‌دهد. (شکل ۱۱ ب) نشان می‌دهد که همواره با افزایش h/b مجرا چه با افزایش ارتفاع یا کاهش عرض مجرا، عمق جریان در مقطع فشرده افزایش نسبی می‌یابد. در (شکل ۱۱ ج) با افزایش ارتفاع و عرض مجرا بر مقدار سرعت جریان در



شکل ۱۰: تغییرات (الف) فاصله مقطع فشرده از محل دریچه (به صورت بدون بعد)، (ب) ارتفاع جریان در مقطع فشرده، (ج) سرعت متوسط در مقطع فشرده، (د) عدد فرود در مقطع فشرده، (ه) ضریب هوادهی β بر حسب تغییرات h/b مجرا.



شکل ۱۱: مقایسه مقادیر عددی β با روابط تجربی.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی با نسبت‌های عمق به عرض مختلف مجرا صورت گرفت و عملکرد مدل عددی در پیش بینی نرخ جریان ورودی و هوای ورودی به جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا فرمولی ارائه شد که می‌توان با جایگذاری نسبت عمق به عرض مجرا در آن دبی ورودی به مجرا را با تقریب خوبی در مدل به دست آورد. از دیگر نتایج آنکه اولاً افزایش عمق عرض مجرا منجر به افزایش دبی ورودی به مجرا و نیز افزایش هوادهی می‌شود که این افزایش هوادهی ناشی از افت فشار است. لیکن با افزایش بیشتر عمق جریان هوای ورودی از هوادهی کاهش می‌یابد که این به سبب ورود هوا از انتهای باز تونل می‌باشد. ثانیاً در عمق‌های کم، مجرا پر شده، هوادهی صورت نمی‌پذیرد. از سوی دیگر افزایش و کاهش هوادهی و

Air in Flowing Water, ASCE, USA. 1435-1447, (1943).

[6] Sharma, H.R., "Air-entrainment in high head gated conduits", Journal of Hydraulics Division, ASCE, 102(HY11). 1629-1646, (1976).

[7] Oliveto G., Biggiero V., and Hager W. H., Bottom outlet for sewers, Journal of irrigation and drainage, (1997).

[۸] حسینی س.ا.، حبیبی م.، پاره‌کار م.، "بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در مجاری تخلیه‌کننده تحتانی سدها (مطالعه موردی تخلیه‌کننده تحتانی سد نرماشیر)"، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، (پاییز ۱۳۸۸).

[۹] سلیمانزاده ر.، شمسایی ا.، "تحلیل عددی جریان دو فاز آب و هوا در اطراف دریچه کشویی تخلیه‌کننده تحتانی"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، (اردیبهشت ۱۳۸۵).

[10] Najafi M. R., Roshan R., Zarrati A. R., Kavianpour M. R., "Numerical modeling of flow condition in a bottom outlet", 16th IAHR-APD & 3rd IAHR-ISHS, (October 2008).

[11] Fluent Inc, "FLUENT User's guide", (2005).

[۱۲] مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، "گزارش نهایی مدل هیدرولیکی دریچه‌های تخلیه‌کننده سد جگین"، بخش تجهیزات و ابزار دقیق، شماره گزارش ۳۷۸، (۱۳۸۱).

[۱۳] غزالی ف.، صالحی نیشابوری ع.ا. و کاویانپور م. ر. "تحلیل عددی جریان هوادهی در تخلیه‌کننده تحتانی سد"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (اردیبهشت ۱۳۹۱).

[14] White F.M., Fluid Mechanics, University of Rhode Island, Fourth Edition.

[۱۵] غزالی ف.، صالحی نیشابوری ع.ا. و کاویانپور م. ر. "تحلیل عددی تأثیر هندسه مجرا بر هوادهی جریان در تخلیه‌کننده تحتانی سد"، اولین کنفرانس بین‌المللی سد و نیروگاه‌های برقابی، مرکز همایش‌های بین‌المللی صدا و سیما، (بهمن ۱۳۹۰).

[16] Smith C.D., Hydraulic Structures. Taylor & Francis.

[17] Davis C.V. and Sorensen K.E., Handbook of Applied hydraulics, McGraw-Hill Book Company, (1969).

[۱۸] صفوی خ.، زراتی ا. ر.، عطاری ج.، "مطالعه آزمایشگاهی مکانیزم هواگیری جریان پس از دریچه در

نیز نرخ جریان ورودی به مجرا بیشتر متأثر از تغییرات عمق است و تغییرات عرض مجرا نرخ ملایمتری از تغییرات دبی آب و هوا را به همراه دارد. همچنین مشخص شد که ضریب هوادهی β در محدوده نسبی رابطه پیشنهادی کالینسکی و رابرتسون قرار گرفته است و از نقطه نظر هیدرولیکی محدوده $1/5$ الی 2 برای h/b محدوده مناسبی است و سایر نسبت‌های h/b روی کاهش هوادهی و ضریب β مؤثر است.

جمع‌بندی نهائی و دستاورد مهم این پژوهش، تأثیر نسبت عمق به عرض مجرا و لزوم توجه طراحان در انتخاب مناسب آن برای عملکرد بهتر ضریب تخلیه، ضریب هوادهی و مباحث سازه ای و هیدرومکانیک است. در مباحث طراحی دریچه‌ها، طراحان فقط به مباحث ارتعاش و نیرو در انتخاب نسبت ارتفاع به عمق توجه داشتند و حال آنکه این پژوهش نشان داد که دبی و هوادهی نیز تحت تأثیر این انتخاب قرار خواهد گرفت. به عبارتی دیگر نسبت h/b نه تنها بر عملکرد سازه‌ای، که بر عملکرد هیدرولیکی و هوادهی مجاری تخلیه‌کننده تحتانی تأثیر گذار است.

۶- سپاسگزاری

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

۷- مراجع

[1] Speerli J. and Hager, W. H., "Air water flow in bottom outlets", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27. 454-462, (2000).

[۲] افشار ع. و نیک صفت غ.، طراحی سازه‌های هیدرولیکی سدهای کوچک، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۷۰).

[۳] قدسیان م.، هیدرولیک سد، دفتر نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۲).

[4] Peterka A. J., "The effect of entrained air on cavitations pitting", Proceedings of Minnesota International Hydraulic Convection, USA, (1953).

[5] Kalinske, A. A., Robertson, J. M., "Closed Conduit Flow", Transactions of Symposium on Entrainment of

تونل‌های تخلیه تحتانی"، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، (پاییز ۱۳۸۸).

[۱۹] معظمی ص.، "تحلیل عددی جریان دو فازی آب و هوا در تونل‌های تخلیه‌کننده تحتانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (تیر ۱۳۸۶).

[20] Kavianpour M.R., Najafi M.R., "A Fuzzy Genetic Method to Predict Air Demand Downstream of Bottom Outlet Gates", Amirkabir Journal of Science and Technology, Civil Engineering, Vol. 19, No. 69-C, Fall 2008, (Winter 2009).

[۲۱] کاویانپور م. ر.، طلوعی ا.، عطاری ج. و مقسومی ع.، "بررسی هوادهی در پایین دست هوادهای تونل‌های تحتانی با مقطع دایروی"، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، (۱۳۸۲).

[۲۲] کاویانپور م. ر.، "ارزیابی روابط تجربی تعیین ضریب هوادهی دریچه‌ها"، کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران (۱۳۸۰).

[۲۳] کاویانپور م. ر.، مقسومی ع. و هاشمیان س. ا.، "ارزیابی تجربی هوادهای در تخلیه‌کننده‌های سدها"، چهارمین کنفرانس سدسازی ایران، تهران، ایران (۱۳۷۹).

بررسی تأثیر تغییر ابعاد مجرا بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در

تخلیه کننده تحتانی سد

فاطمه غزالی^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، محمد رضا کاویانپور^۳

