

بررسی عددی سامانه ی هوادهی برای جریانهای با سرعت بالا با کاربرد روش VOF

حسین خورشیدی^{۱*}

چکیده

حفره سازی مهمترین مشکلی است که به سبب سرعتهای بالای جریان در تخلیه‌کننده‌های زیرین سدها رخ می‌دهد. به علت بروز سرعتهای بیش از ۳۰ متر بر ثانیه، و ایجاد فشارهای منفی در تخلیه‌کننده ی زیرین سد سفیدرود، این مجرا متحمل آسیبهای شدیدی در پوششهای خود گردیده است. در این تحقیق از روش حجم‌محدود به کار رفته در نرم‌افزار فلوئنت، شبیه جریان برای این مجرا انجام گرفته، که در آن از نرم افزار حجم سیال در حالت سه بعدی شامل جریان دو حالتی آب و هوا سود برده شده است. مقایسه‌ی بین نتایج شبیه عددی و اندازه‌گیریهای نمونه آزمایشگاهی به منظور تایید نرم افزار انجام گرفته است که به دست آمدن خطاهای کمتر از ۲۰ درصد برای مقادیر سرعت و فشار، با توجه به هندسه ی پیچیده ی مجرا محدودده ای قابل قبول است. طی بازشدگیهای مختلف دریچه ی تنظیم جریان، مقادیر شاخص حفره سازی در نقاط بسیاری در پایاب دریچه در محدوده ی مقدار بحرانی ۰/۲۵ قرار گرفته است که استفاده از سامانه هوادهی در بعد از محل دریچه را ضروری می سازد. با هوادهی مناسب در این ناحیه، و کاهش سرعت جریان در مرزها، توزیع شاخص حفره سازی نسبت به حالت هوادهی نشده در حدود ۶ تا ۷ برابر افزایش یافته از مقدار بحرانی ۰/۲۵ به خوبی فاصله گرفته که در نهایت باعث بهبود وضعیت جریان از لحاظ ایجاد پدیده ی حفره سازی گردیده است.

واژه‌های کلیدی: تخلیه‌کننده تحتانی، سد سفیدرود، حفره سازی، سامانه ی هوادهی، نرم‌افزار فلوئنت.

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

مقدمه

تخلیه‌کننده ی تحتانی در سدها برای تخلیه ی مخزن در مواقع اضطراری، پایین‌انداختن تراز آب مخزن، انتقال رسوب به پایین‌دست و انحراف بده ی مازاد و سیلاب کاربرد دارد [1]. مجرای تخلیه‌کننده ی تحتانی برای سدهای قوسی و وزنی دارای طول نسبتاً کوتاهی است، در حالی که برای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، به دلیل اینکه در تکیه‌گاهها قرار می‌گیرند، دارای طول بیشتری می‌باشد. برای کاهش دادن طول تحت فشار در این مجراها، درازای آنها به وسیله ی دریچه تنظیم جریان به دو قسمت تحت فشار و سطح آزاد تقسیم می‌شود [2]. بازشدگیهای اندک دریچه ی تنظیم جریان منجر به جریانهایی با سرعت بالا در پایین‌دست دریچه گردیده، که معمولاً با کاهش شدید فشار در ناحیه ی مزبور همراه می‌باشد، که حتی می‌تواند به زیر فشار نیوار نیز کاهش یابد. این کاهش فشارها باعث ایجاد حبابهایی در جریان و انتقال آنها به پایین‌دست می‌شود که به اصطلاح پدیده ی حفره سازی رخ می‌دهد. به محض رسیدن این حبابها به یک ناحیه با فشار بالا ترکیده و ضربات شدیدی به مرزهای اطراف وارد می‌کنند. این پدیده قادر است آسیبهایی را به پوششهای بتنی و فولادی این مجراها وارد آورد [3]. کاویتاسیون یکی از مشکلات اصلی برای تخلیه‌کننده‌های تحتانی به حساب آمده و سدهای زیادی در جهان با پدیده حفره سازی دست و پنجه نرم می‌کنند و سالانه نیز متحمل خسارتهایی می‌شوند [1].

با توجه به پیچیدگیهای جریان در تخلیه‌کننده ی تحتانی، برای شناخت بهتر هیدرولیک جریان آب و هوا در این مجراها، ساخت نمونه های آزمایشگاهی پیشنهاد می‌گردد. از همان سالهای اولیه ساخت سد سفیدرود، پدیده ی حفره سازی مشکلاتی را برای مجراهای تخلیه‌کننده ی تحتانی آن به وجود آورده است. پاره‌شدگیهای پوشش فولادی دریچه و دیوارها و نیز از بین رفتن پوشش بتنی کف مجرا به وفور مشاهده گردیده اند. خسارات وارده به دریچه، دیوارها و کف تخلیه‌کننده‌های این سد به اندازه‌ای

بوده است که مسوولان امر تصمیم به ساخت نمونه ی آزمایشگاهی آنها گرفتند. نتایج حاصل از نمونه شامل مقادیر فشار و سرعت جریان، و همچنین تخمین مقادیر شاخص کاویتاسیون در طول مجرا حاصل شد و تحقیقاتی در مورد راهکارهایی برای از بین بردن پدیده ی حفره سازی انجام گردیده اند [5].

مدلسازی عددی جریان در تخلیه‌کننده‌های تحتانی به وسیله ی محققین مختلف مورد توجه قرار گرفته است که دلیل آن انتخاب مزبور، ارزانتر و سریعتر بودن روشهای عددی نسبت به نمونه های آزمایشگاهی می‌باشد. سلیمانزاده در سال ۱۳۸۵ تحلیل عددی جریان حالتی آب و هوا در اطراف دریچه کشویی تخلیه‌کننده ی تحتانی را با کاربرد نرم‌افزار فلوئنت^۱ انجام داد. پس از شبیه‌سازی تونل تحت بازشدگیهای مختلف، نتیجه گرفت که به ازای سرعتهای بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه در تخلیه‌کننده ی تحتانی، شاخص حفره سازی σ از مقدار بحرانی ۰.۲۵ کمتر می‌شود؛ لذا، برای سرعتهای بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه، هوادهی جریان باید انجام شود. همچنین، بحرانی‌ترین مقطع برای وقوع حفره سازی، لبه و زیر دریچه می‌باشد [۴]. با توجه به سابقه ی ضعیف شبیه عددی برای بررسی میدان جریان در تخلیه‌کننده‌های تحتانی، در این تحقیق سعی شده است که شبیه عددی جریان در تخلیه‌کننده ی تحتانی سد سفیدرود برای بازشدگیهای مختلف دریچه و تحت ترازهای مختلف مخزن سد، مقادیر فشار و سرعت جریان محاسبه شده، با نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی مقایسه گردد، سپس با تعبیه یک سامانه ی هوادهی، مقادیر شاخص حفره سازی در طول مجرا به نحو مناسبی از مقدار بحرانی فاصله گیرد.

معادلات حاکم

معادله ی پیوستگی

معادله ی پیوستگی برای یک حجم شاهد در حالت کلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

¹ Fluent

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \quad (6)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u'_i u'_j)$$

اندازه ی حرکت $\rho u_i u_j$ مربوط به تنش رینولدز بوده که اثر تلاطم را در معادله ی اندازه ی حرکت اعمال می کند.

معادله ی سطح آزاد

در تعیین سطح آزاد با کاربرد روش حجم سیال، فراسنج α_q استفاده می شود که اندازه ی سیال q را در هر سلول محاسباتی نشان می دهد. شکل گیری فصل-مشترک بین حالت های مختلف شبیه حجم سیال، با حل معادله ی پیوستگی برای نسبت حجم فازهای مختلف موجود حالت انجام می گیرد. برای q امین فاز، معادله ی پیوستگی به صورت زیر قابل نمایش است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (7)$$

در رابطه فوق، \dot{m}_{qp} انتقال جرم حالت q حالت p و \dot{m}_{pq} انتقال جرم حالت p حالت q می باشد. همچنین، α_q ، ρ_q و \vec{v}_q به ترتیب نسبت حجمی، چگالی و سرعت مربوط حالت q می باشند. با فرض ثابت بودن چگالی سیال، معادله ی (۷) به صورت رابطه ی زیر تبدیل می گردد.

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

که u ، v و w به ترتیب مولفه های سرعت در امتداد x ، y و z می باشند.

به منظور بررسی پدیده ی حفره سازی، شاخص حفره سازی به صورت رابطه ی (۹) در قالب ترکیبی از مقادیر فشار و سرعت بیان می گردد:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{c.v} \rho dv + \int_{c.s} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (1)$$

که پس از انتگرال گیری به شکل زیر تبدیل می شود:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن u ، v و w به ترتیب مولفه های سرعت جریان در امتدادهای x ، y و z می باشند. در نهایت با فرض غیرقابل تراکم و ماندگار بودن جریان، معادله ی پیوستگی به صورت رابطه ی زیر قابل بیان است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

معادله ی اندازه حرکت

برای معادله ی اندازه حرکت در راستای دلخواه n داریم:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{c.v} \rho \vec{V} dV + \oint_{c.s} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS = \quad (4)$$

$$\int_{c.v} \rho \vec{f}_e dV - \oint_{c.s} p \vec{n} dS + \oint_{c.s} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS$$

که معادله ی فوق همان قانون بقای اندازه حرکت درون یک حجم شاهد اختیاری می باشد که $(\rho \vec{f}_e)$ نیروی جسم در واحد حجم، جمله ی فشار همگن و $\vec{\tau}$ تنش گرانو است. با انتگرال گیری از معادله ی فوق و پس از یک گروه ساده سازی، معادله ی اندازه حرکت به صورت رابطه زیر قابل نمایش است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad (5)$$

که در رابطه ی بالا، u_i مولفه سرعت لحظه ای در جهت x_i ، g_{x_i} مولفه ی شتاب گرانش در جهت x_i و p نشان دهنده فشار در هر نقطه از سیال است. برای در نظر گرفتن آشفتگی های جریان، تغییراتی در معادله اندازه حرکت ایجاد می شود که در نهایت معادله ی مزبور به صورت رابطه ی زیر نشان داده شده است:

میدانهای سرعت و فشار در طول مجرا برای جریانهای هوادهی شده و هوادهی نشده حاصل گردید.

حفره زدایی مدل در قالب پارامتر ضریب زبری جداره ی تونل از طریق مقایسه نتایج حاصل از شبیه عددی با نتایج نمونه آزمایشگاهی انجام گرفت.

$$\sigma = \frac{(p - p_v)}{\frac{\rho V^2}{2}} \quad (9)$$

که P و p_v به ترتیب فشار موضعی و فشار بخار آب می باشد.

روش حل

نرم افزار گمیت برای ساخت هندسه و تولید شبکه برای مجرای تخلیه کننده ی تحتانی شماره ۵ سد سفیدرود استفاده شده است. به دلیل هندسه ی پیچیده ی این مجرا، از شبکه های نامنظم شامل ترکیبی از شبکه های مستطیلی و مثلثی در حالت سه بعدی (به دلیل وجود اعوجاجات بسیار در دیواره ها) استفاده گردیده است. به منظور شبیه سازی، از نرم افزار حجم محدود فلونت بهره وری گردیده است و دلیل این انتخاب، قابلیت بالای نرم افزار فلونت در شبیه سازی جریان در حالت ترکیب جریانهای تحت فشار و سطح آزاد می باشد؛ بنابراین، استفاده از شبیه سه بعدی در دستور کار قرار گرفت. همچنین آشفته گیهای جریان در قالب نرم افزار $k-\epsilon$ وارد شبیه گردید که دلیلش اعتبار این شبیه برای استفاده در کارهای مشابه و همچنین متداول بودن آن بوده است. از جریان حالتی آب و هوا به منظور شبیه سازی جریان استفاده شده است، به شکلی که ابتدا هوا به عنوان حالت اولیه در شبیه قرار گرفته است و با باز شدن دریچه تنظیم جریان، آب به عنوان حالت ثانویه در طول مجرا به حرکت درآمده تا به انتهای مجرا برسد. برای چگالی و لزجت آب مقادیر $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\mu = 0.001 \text{ kg/m.s}$ و نیز برای هوا مقادیر $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ و $\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ در نظر گرفته شده اند. با توجه به کارایی شبیه حجم سیال به کار رفته شده در نرم افزار فلونت در شبیه سازی جریانهای حالتی آب و هوا در سازه های تخلیه کننده ی تحتانی، این روش به عنوان ابزاری مناسب برای شبیه سازی میدان جریان در تخلیه کننده ی تحتانی سد سفیدرود انتخاب، و

تحلیل نتایج

الف: جریان هوادهی نشده

مقادیر سرعت در نقاط مختلف برای حالات ۲۰، ۶۰ و ۹۵ درصد بازشدگی مجرای شماره ۵ سد سفیدرود، تحت ترازهای ۲۶۰ و ۲۷۲ متر آب مخزن (نسبت به سطح دریا) در جداول (۱)، (۲) و (۳) مقایسه شده اند. روند تغییرات سرعت به این صورت بوده است که بیشترین سرعت در زیر دریچه ی تنظیم جریان رخ داده (به دلیل کم شدن سطح مقطع جریان عبوری) و با حرکت به سوی پایین دست سرعت جریان به تدریج کاهش یافته است. میزان خطای بین مقادیر سرعت در شبیه عددی در مقایسه با نتایج نمونه ی آزمایشگاهی، در تمام نقاط به مقداری کمتر از ۲۰ درصد محدود شده است، که با توجه به هندسه ی پیچیده ی مجرا (شامل بیش از ۸۰ حجم محاسباتی) محدوده ی قابل قبولی است. با توجه به مقادیر مجذور مربعات خطا (RMSE) برای بازشدگیهای مختلف دریچه، مشاهده می گردد که نتایج سرعت شبیه عددی طی بازشدگی ۶۰ درصد، بیشترین همخوانی را با نتایج نمونه آزمایشگاهی دارد، که این امر به سبب وجود شبکه منظمتر در بازشدگی ۶۰ درصد نسبت به بازشدگیهای دیگر است. در بسیاری از نقاط مجرا، سرعتهای بیش از ۳۰ متر بر ثانیه مشاهده شده است، که خود به تنهایی مؤید ایجاد حفره سازی در طول مجرای تخلیه کننده ی تحتانی شماره ۵ سد سفیدرود بوده است.

مقایسه ی بین مقادیر بارآبی فشار پایا برای شبه های عددی و نمونه آزمایشگاهی طی بازشدگیهای مختلف دریچه و ترازهای آب مخزن در شکل های (۱)، (۲) و (۳)

نتایج بارآبی فشار به دست آمده شبیه عددی در مقایسه با نتایج نمونه ی آزمایشگاهی، همخوانی مناسبی داشته و مقادیر RMSE به دست آمده برای بازشدگیهای مختلف دریاچه (مقادیر بین ۱/۶ تا ۴/۶)، نشان دهنده ی همخوانی مناسب بین نتایج شبیه نمونه ی آزمایشگاهی عددی و هیدرولیکی است. نتایج بارآبی فشار پایا در شبیه عددی، روندی مشابه نتایج نمونه ی آزمایشگاهی داشته و وجود فشارهایی در حدود صفر و منفی، زمینه را برای ایجاد پدیده حفره سازی هموار می نماید.

نشان داده شده است. بارآبی فشار پایا در ابتدای مخزن ناشی از وجود تراز آب مخزن بوده و تا قبل از دریاچه برای حالات مختلف بازشدگی دریاچه، دارای مقادیر بزرگی در حدود ۶۰ تا ۷۰ متر آب بوده، و به محض عبور از دریاچه تنظیم، به دلیل وجود سرعتهای بالای جریان و تماس جریان با هوای آزاد، بارآبی فشار به شدت افت پیدا کرده، در برخی نقاط حتی فشارهای منفی ایجاد گردیده، و تا انتهای مجرا با نوسانهای کمی همراه بوده است. همان گونه که در شکل های زیر مشاهده می شود،

جدول ۱- مقادیر سرعت در شبیه های عددی و نمونه ی آزمایشگاهی برای بازشدگی ۲۰٪ دریاچه (سرعتها بر حسب متر بر ثانیه)

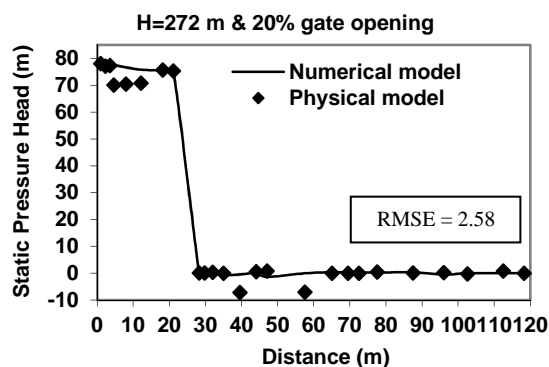
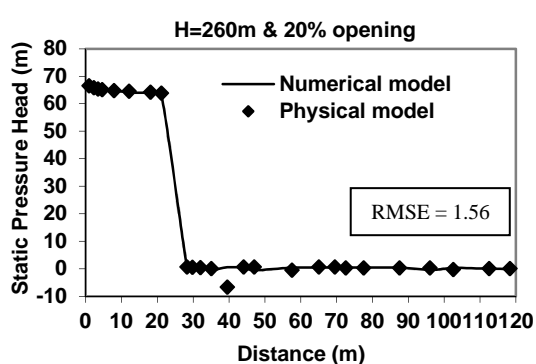
| تراز آب مخزن ۲۷۲ متر | | تراز آب مخزن ۲۶۰ متر | | نقاط اندازه گیری سرعت | |
|--|------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| سرعت شبیه عددی | سرعت شبیه نمونه ی آزمایشگاهی | سرعت مدل عددی | سرعت شبیه نمونه ی آزمایشگاهی | ارتفاع نسبت به سطح دریا (متر) | فاصله از ابتدای مجرا (متر) |
| 36.2 | 36.59 | 32.7 | 33.88 | 193.42 | 35.04 |
| 35.3 | 35.98 | 32.12 | 33 | 193.36 | 39.54 |
| 34.6 | 35.78 | 31.68 | 32.09 | 193.3 | 44.05 |
| 33 | 35.37 | 30.65 | 31.16 | 193.16 | 54.55 |
| 34.3 | 33.44 | 29.32 | 30 | 193.01 | 66.55 |
| 31.1 | 29.71 | 28.45 | 29.18 | 192.8 | 82.55 |
| 27.2 | 28.71 | 23.9 | 28.45 | 192.44 | 102.55 |
| بیشینه ی خطا (درصد): ۶/۷ کمینه ی خطا (درصد): ۱/۱ RMSE = 1.34 | | بیشینه ی خطا (درصد): ۱۶ کمینه ی خطا (درصد): ۱/۳ RMSE = 1.86 | | | |

جدول ۲- مقادیر سرعت در شبیه های عددی و نمونه ی آزمایشگاهی برای بازشدگی ۶۰٪ دریاچه (سرعتها بر حسب متر بر ثانیه)

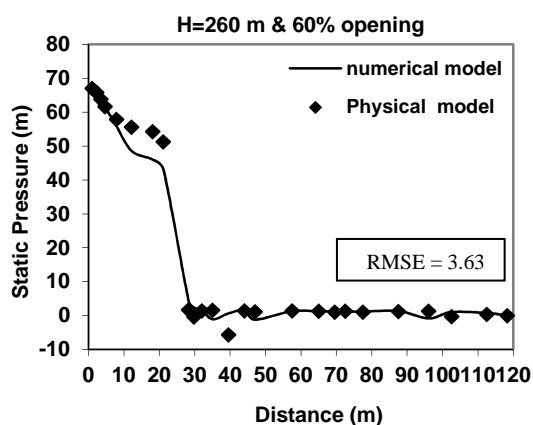
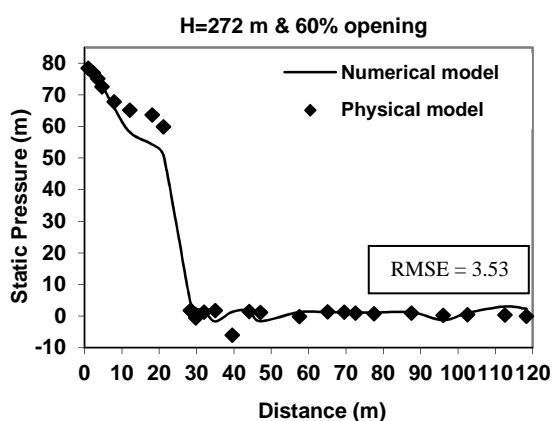
| تراز آب مخزن ۲۷۲ متر | | تراز آب مخزن ۲۶۰ متر | | نقاط اندازه گیری سرعت | |
|--|------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| سرعت شبیه عددی | سرعت شبیه نمونه ی آزمایشگاهی | سرعت شبیه عددی | سرعت شبیه نمونه ی آزمایشگاهی | ارتفاع نسبت به سطح دریا (متر) | فاصله از ابتدای مجرا (متر) |
| 37.15 | 37.97 | 34.7 | 34.8 | 193.42 | 35.04 |
| 36.8 | 37.5 | 33.9 | 34.31 | 193.36 | 39.54 |
| 35.7 | 37 | 33 | 32.63 | 193.3 | 44.05 |
| 36.3 | 36.5 | 31.5 | 32 | 193.16 | 54.55 |
| 35.22 | 34.8 | 31.1 | 31.7 | 193.01 | 66.55 |
| 35.1 | 33.88 | 30.7 | 31.5 | 192.8 | 82.55 |
| 34.9 | 33.44 | 29.5 | 31.2 | 192.44 | 102.55 |
| بیشینه ی خطا (درصد): ۴/۴ کمینه ی خطا (درصد): ۰/۵ RMSE = 0.98 | | بیشینه ی خطا (درصد): ۵/۴ کمینه ی خطا (درصد): ۰/۳ RMSE = 0.80 | | | |

جدول ۳- مقادیر سرعت در شبیه های عددی و نمونه ی آزمایشگاهی برای بازشدگی ۹۵٪ درپچه (سرعتها بر حسب متر بر ثانیه)

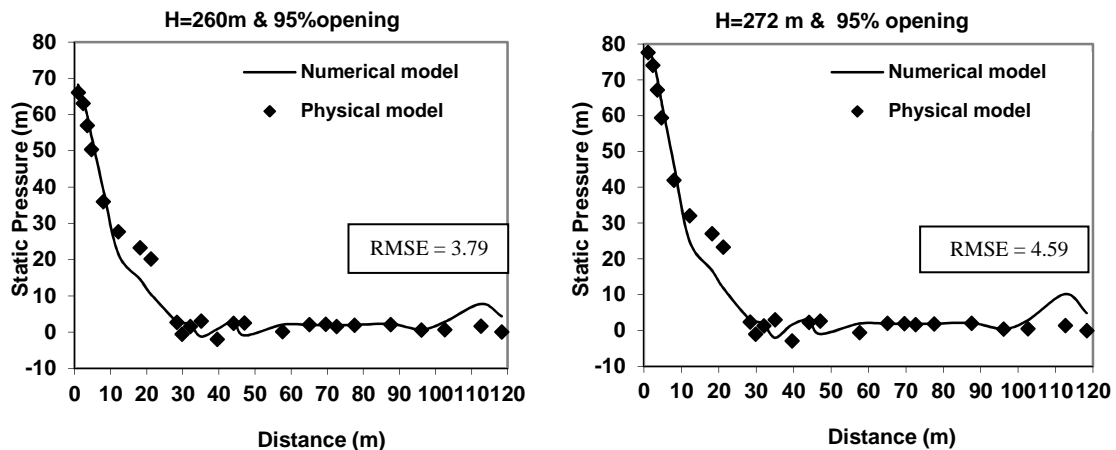
| تراز مخزن ۲۷۲ متر | | تراز مخزن ۲۶۰ متر | | نقاط اندازه گیری سرعت | |
|---|------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| سرعت شبیه عددی | سرعت شبیه نمونه ی آزمایشگاهی | سرعت شبیه عددی | سرعت شبیه نمونه ی آزمایشگاهی | ارتفاع نسبت به سطح دریا (متر) | فاصله از ابتدای مجرا (متر) |
| 36.42 | 36.8 | 29.9 | 34.6 | 193.42 | 35.04 |
| 34.1 | 36.5 | 28.7 | 34.2 | 193.36 | 39.54 |
| 33.2 | 36.4 | 28.1 | 33 | 193.3 | 44.05 |
| 32.83 | 36 | 27.85 | 32.55 | 193.16 | 54.55 |
| 32.12 | 35.16 | 27.17 | 32.45 | 193.01 | 66.55 |
| 30.82 | 34.31 | 26.25 | 32.1 | 192.8 | 82.55 |
| 27.73 | 33.88 | 20.72 | 31.4 | 192.44 | 102.55 |
| بیشینه ی خطا (درصد): ۱۸/۲ کمینه ی خطا (درصد): ۱/۰ RMSE = 3.50 | | بیشینه ی خطا (درصد): ۱۸/۲ کمینه ی خطا (درصد): ۱۵ RMSE = 5.25 | | | |



شکل ۱- توزیع بارآبی فشار پایا برای بازشدگی ۲۰٪ درپچه برای جریان هوادهی نشده



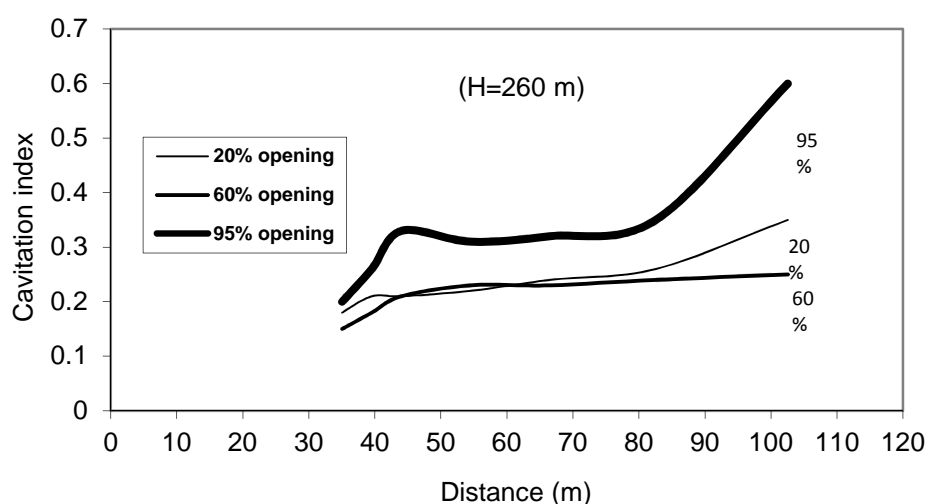
شکل ۲- توزیع بارآبی فشار پایا برای بازشدگی ۶۰٪ درپچه برای جریان هوادهی نشده



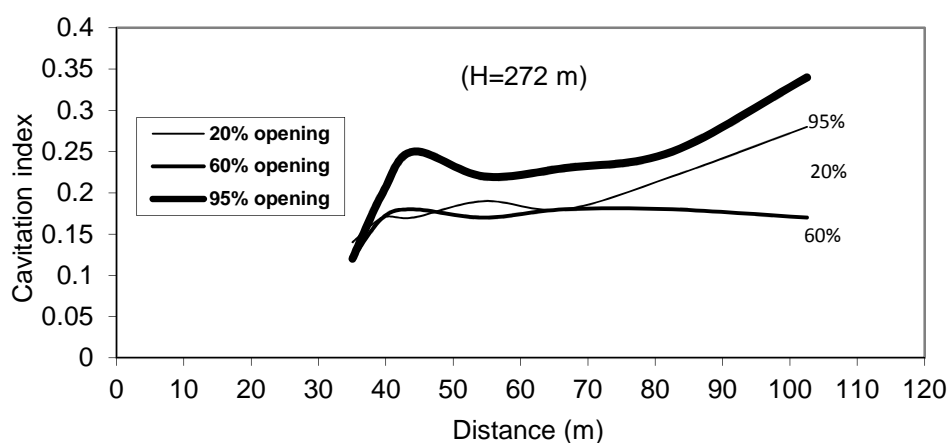
شکل ۳- توزیع بار آبی فشار پایا برای بازشدگی ۹۵٪ دریچه برای جریان هوادهی نشده

۲۶۰ متر، برای بازشدگی ۹۵ درصد دریچه تنظیم جریان، به علت وجود سرعت‌های کمتر و محدودیت کمتر جریان برای عبور از زیر دریچه کم نسبت به بازشدگیهای کمتر دریچه، کمی بالاتر از مقدار بحرانی ۰/۲۵ بوده ولی به ازای بازشدگیهای کمتر دریچه، شاخص حفره سازی همگی زیر مقدار بحرانی می‌باشند. این در حالی است که تحت تراز آب مخزن ۲۷۲ متر نسبت به سطح دریا، مقادیر شاخص حفره سازی برای همه ی بازشدگیهای دریچه کمتر از مقدار بحرانی می‌باشد [۵]. بطور کلی مقادیر شاخص حفره سازی طی حالات مختلف در محدوده ی، مقدار بحرانی ۰/۲۵ بوده و ایجاد پدیده حفره سازی در این شرایط بسیار محتمل است.

مقادیر شاخص حفره زدایی طی بازشدگیهای ۲۰، ۶۰ و ۹۵ درصد دریچه تحت تراز های ۲۶۰ و ۲۷۰ متر آب سطح مخزن در شکل‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده اند. به منظور تعیین مقادیر شاخص حفره سازی در شبیه عددی، نمونه ی آزمایشگاهی، با استفاده از مقادیر فشار و سرعت به دست آمده از نقاط مختلف مجرا و فرض مقدار ۱۰/۳ متر آب برای فشار بخار، مقادیر شاخص حفره سازی در طول مجرا محاسبه شده است. در تمام حالات نشان داده شده در شکل‌های زیر، شاخص حفره سازی به محض عبور از محل دریچه روندی افزایشی دارد و مقطع زیر دریچه بحرانی‌ترین مقطع از لحاظ پدیده ی حفره سازی می‌باشد. شاخص حفره سازی برای تراز آب مخزن برابر



شکل ۴- توزیع شاخص حفره سازی برای تراز آب مخزن ۲۶۰ متر نسبت به سطح دریا



شکل ۵- توزیع شاخص حفره سازی برای تراز آب مخزن ۲۷۲ متر نسبت به سطح دریا

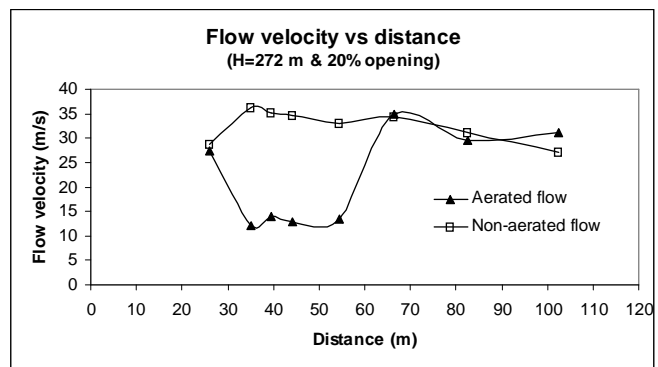
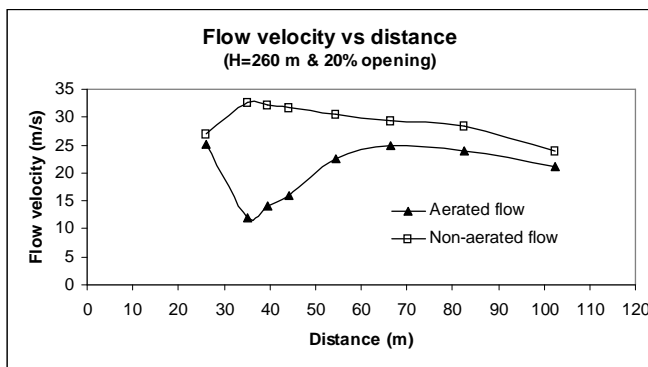
آب به تاج تونل وجود دارد، مکان گذرگاه شیب دار در فاصله ۷/۵ متری از دریچه و در فاصله ۷۰ سانتیمتری از محل افزایش ارتفاع مجرا تعبیه گردیده است. دشتگاه هوادهی با ابعاد ۲ متر طول برای گذرگاه شیب دار و زاویه ی ۵ درجه و تنگ شدگی دیواره‌ها از طریق یک تنگ شدگی ۵ درجه در دیواره ی سمت راست تونل و یک گذرگاه شیب دار ۲/۵ درجه در دیواره ی سمت راست تونل تعبیه گردید. همچنین بلافاصله پس از گذرگاه شیب دار، از شیار هواده در دیواره‌های طرف راست و چپ استفاده گردید که ابعاد آن به صورت ۴۰ سانتی متر عمق شیار و ۱ متر طول شیار بوده و برای

ب: جریان هوادهی شده

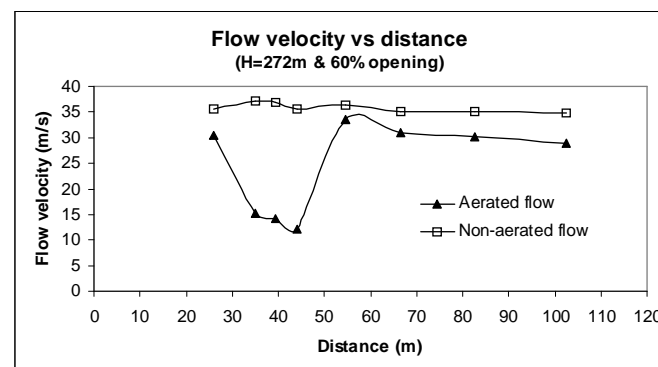
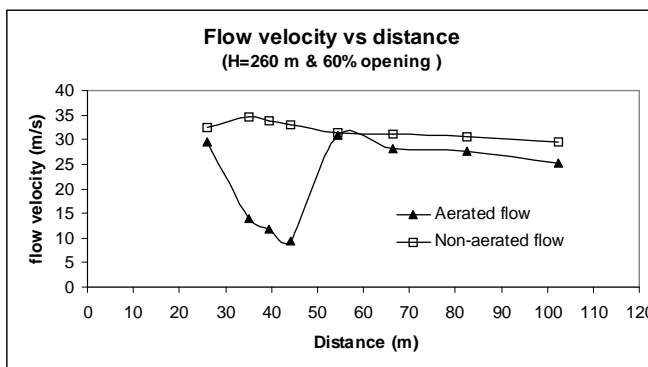
هوادهی به عنوان ساده‌ترین و ارزاترین روش برای جلوگیری از ایجاد پدیده ی حفره زدایی در سازه‌های آبی کاربرد دارد. به منظور حذف خطر حفره زدایی در طول مجرای شماره ۵ سد سفیدرود، از یک سیستم هواده شامل ترکیب گذرگاه شیب دار در کف و دیواره‌ها، و همچنین شیار هواده در دیوار جانبی بلافاصله بعد از گذرگاه شیب دار استفاده گردیده است. به دلیل این که کمترین فشارها در فاصله ی حدود ۴۰ متری از ابتدای مجرا (پایین دست محل دریچه) رخ داده بود، و همچنین با توجه به این که طی باز شدگیهای بزرگ دریچه امکان برخورد فشانه ی

گذرگاههای شیب دار کف و دیواره بوده که موجب جداسازی جریان آب از مرزها گردیده و تشکیل یک جریان حالتی آب و هوا در آن نواحی می‌باشد. از طرفی جریان هوا از طریق شیار هواده تعبیه شده در دیواره‌های جانبی به زیر نیمرخ جریان هدایت شده و باعث هوادهی جریان می‌گردد. بنابراین، سامانه ی هواده فوق توانسته است که سرعت جریان را از محل دریاچه تا فاصله ی حدود ۶۰ متری از ابتدای مجرا از مقدارهای شدید حدود ۳۵ متر بر ثانیه به سرعت‌های ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه کاهش دهد، که در نهایت باعث افزایش ۲ تا ۳ برابری مقادیر شاخص حفره سازی در این نواحی گردیده و در نتیجه موجب حذف خطر ایجاد حفره سازی شود [۷].

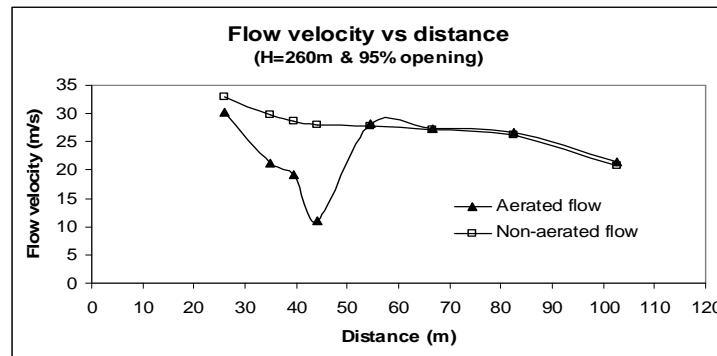
انتقال هوا به زیر فشانه مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. جریان هوا از طریق پایین دست مجرا به محل هوادهی منتقل شده و از طریق شیار هواده به زیر نیمرخ جریان هدایت گردیده و هوادهی جریان در آن ناحیه انجام می‌شود. شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) مقادیر سرعت جریان در حالات هوادهی شده و هوادهی نشده به ازای بازشدگیهای ۲۰، ۶۰ و ۹۵ درصد دریاچه ترسیم شده است. با توجه به شکل مشخص اند که سرعت جریان در حالت هوادهی، از ابتدای دریاچه تا فاصله حدود ۶۰ متری از ابتدای مجرا، نسبت به حالت هوادهی نشده، کاهش شدیدی داشته و حتی در برخی نقاط این کاهش برابر ۰/۳۰ مقدار بدون هوادهی رسیده است، که این امر ناشی از وجود



شکل ۶- توزیع سرعت برای بازشدگی ۲۰٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی



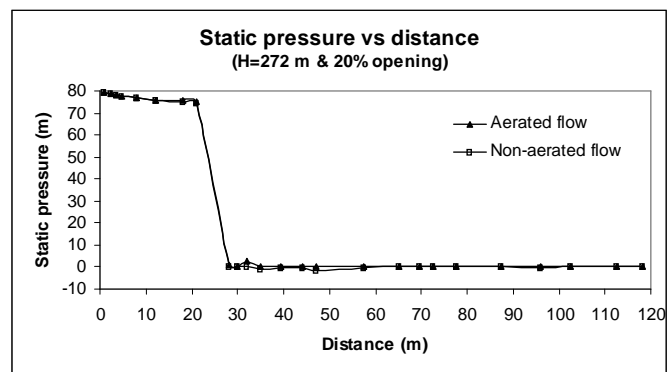
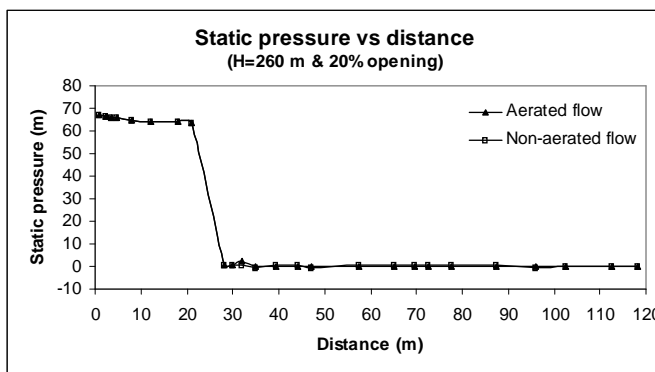
شکل ۷- توزیع سرعت برای بازشدگی ۶۰٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی



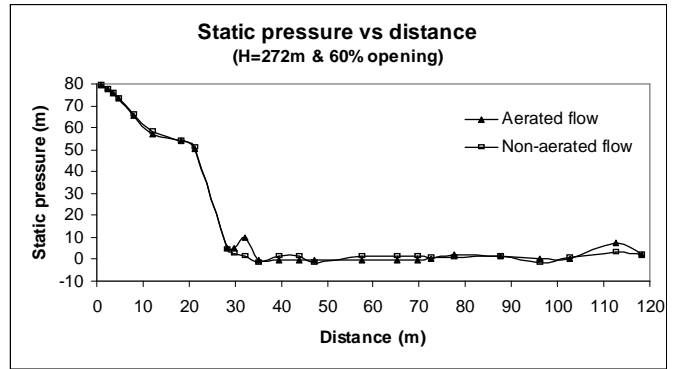
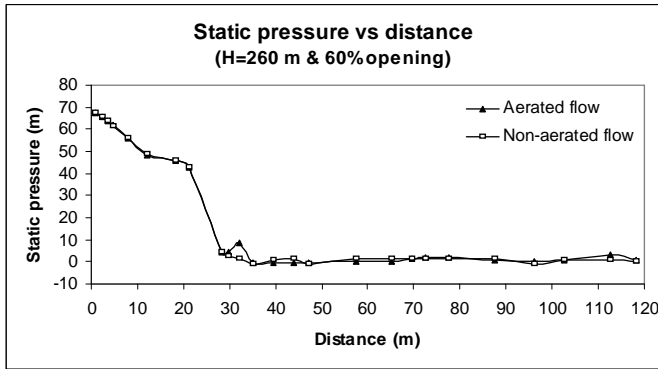
شکل ۸- توزیع سرعت برای بازشدگی ۹۵٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی.

طریق شیار هوادهی) به زیر نیمرخ جریان هدایت گردید، فشار در این ناحیه به صفر نزدیک شده، و پس از بازگشت دوباره جریان به کف، شرایط جریان شکل قبل از هوادهی نشده شبیه می‌گردد، با این تفاوت که جریان عبوری به خوبی هوادهی شده و خطر ایجاد حفره سازی از بین رفته است. بنابراین سامانه ی هوادهی به کار رفته در تخلیه‌کننده ی تحتانی سد سفیدرود قادر است با جداسازی جریان پرسرعت در کنار پوششهای کف و دیواره، جریان حالتی آب و هوا با سرعتهای خیلی کمتری (حدوداً ۳۳ درصد مقدار هوادهی نشده) را در آن نواحی تشکیل دهد که از اطراف هوادهی می‌شود و خطر ایجاد پدیده مخرب حفره زدایی را منتفی نماید.

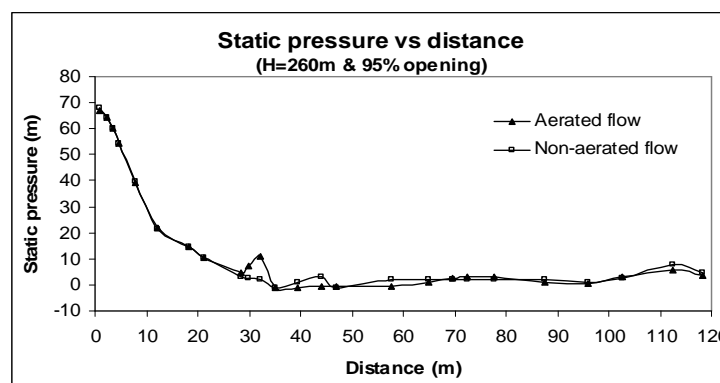
نتایج مربوط به مقادیر فشار پایا برای دو حالت جریان هوادهی شده و جریان هوادهی نشده برای بازشدگیهای مختلف دریاچه تحت دو تراز مخزن برابر ۲۶۰ و ۲۷۲ متر در شکلهای (۹)، (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده اند. با توجه به مقادیر فشار پایا می‌توان چنین درک کرد که با استفاده از سامانه ی هوادهی شامل ترکیب گذرگاه شیب دار و شیار هوادهی بلافاصله بعد از محل دریاچه تنظیم جریان، مقادیر فشار پایا در محل دریاچه تا فاصل چند متری در پایین دست، در حالت جریان هوادهی شده دارای افزایشی به میزان ۵ تا ۱۰ درصد نسبت به حالت هوادهی نشده بوده است. سازوکار کار هوادهی ی فوق به گونه‌ای است که در محل گذرگاههای شیب دار، جریان شکل پرشی از کف و مجراها فاصله گرفته و در این نواحی، جریان هوا (از



شکل ۹- توزیع فشار پایا برای بازشدگی ۲۰٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی



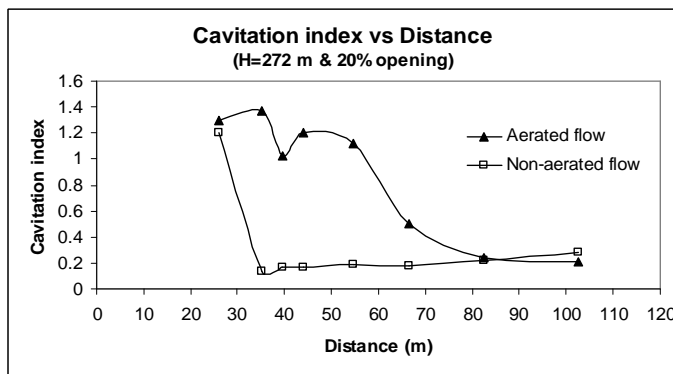
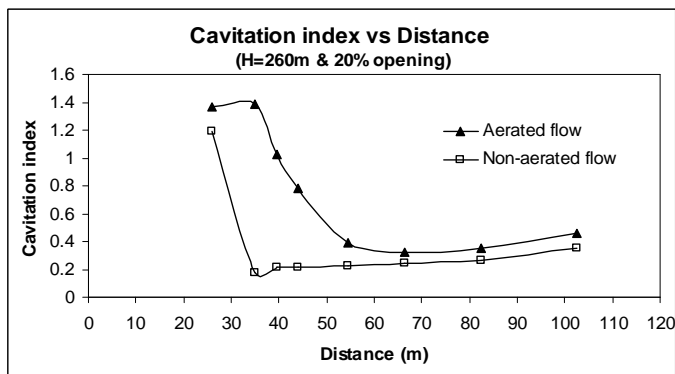
شکل ۱۰- توزیع فشار پایا برای بازشدگی ۶۰٪ دریچه، قبل و بعد از هوادهی



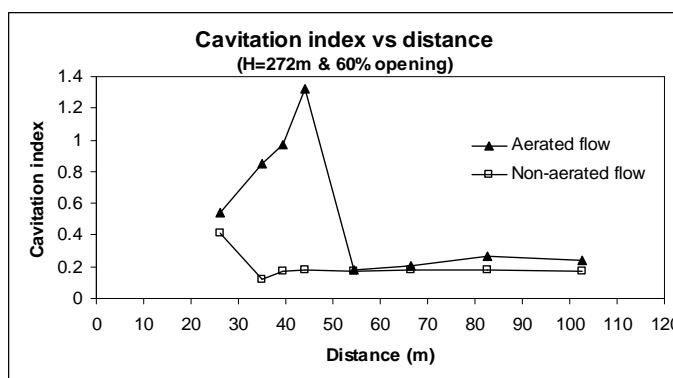
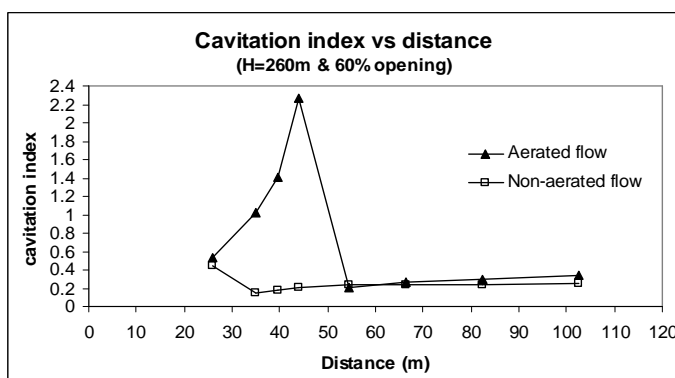
شکل ۱۱- توزیع فشار پایا برای بازشدگی ۹۵٪ دریچه، قبل و بعد از هوادهی

این ناحیه از مجرا می‌باشد. بنابراین، سامانه ی هوادهی استفاده شده در تخلیه‌کننده ی تحتانی از طریق جداسازی جریان پرسرعت از مرزهای کف و دیواره قادر بوده جریان حالتی شامل آب و هوا را در کنار سطوح بوجود آورد که دارای سرعت خیلی کمتری نسبت به حالت هوادهی نشده می‌باشد و همچنین، با فشارهای نزدیک به فشار نیوار (از طریق ارسال هوای آزاد به طرفین نشانه جریان ایجاد شده از روی گذرگاه شیب دار)، شرایطی را ایجاد نماید که در ناحیه ی بحرانی از نظر حفره سازی (از محل دریچه تا ۶۰ متری از ابتدای مجرا)، مقادیر شاخص حفره سازی به بین ۱/۲ تا ۱/۴ برسد که تا حد زیادی از مقدار بحرانی ۰/۲۵ دور شده است.

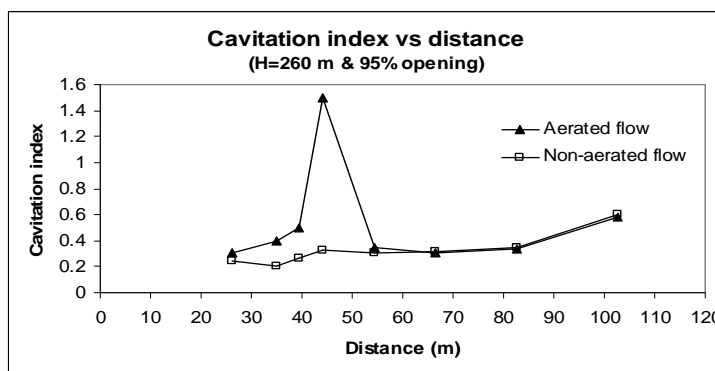
در نهایت با توجه به مقادیر سرعت و فشار در طول مجرا، به بررسی شاخص حفره سازی پرداخته شده است. شکلهای (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) نشان‌دهنده ی مقادیر شاخص حفره سازی برای دو حالت هوادهی شده و هوادهی نشده می‌باشد. طی بازشدگیهای ۲۰، ۶۰ و ۹۵ درصد دریچه تنظیم جریان، در فاصله محل دریچه تا حدود ۶۰ متری از ابتدای مجرا، مقادیر شاخص حفره سازی در جریان هوادهی شده در مقایسه با حالت عدم هوادهی دارای افزایش ۲ تا ۳ برابری بوده، و با ضریب اطمینان بالایی از مقدار بحرانی ۰/۲۵ دور شده است، که این امر به دلیل کاهش سرعت (به میزان ۲ تا ۳ برابر) و افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی فشار در حالت هوادهی شده در



شکل ۱۲- توزیع شاخص حفره سازی برای بازشدگی ۲۰٪ درپچه، قبل و بعد از هوادهی



شکل ۱۳- توزیع شاخص حفره سازی برای بازشدگی ۶۰٪ درپچه، قبل و بعد از هوادهی.



شکل ۱۴- توزیع شاخص حفره سازی برای بازشدگی ۹۵٪ درپچه، قبل و بعد از هوادهی.

حفره سازی در طول مجرا انجام شد، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- همخوانی مناسبی بین نتایج نمونه آزمایشگاهی و عددی مشاهده گردید که مبین صحت شبیه سازی جریان در تخلیه کننده ی تحتانی سد سفید رود بوده و درصد

نتیجه گیری

شبیه سازی جریان در مجرای تخلیه کننده ی تحتانی سد سفیدرود از طریق روش حجم محدود به کار رفته در نرم افزار فلوئنت با موفقیت انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده برای ویژگیهای جریان در دو حالت هوادهی- شده و هوادهی نشده و محاسباتی که برای میزان شاخص

۵. مطالعات علاج بخشی سد سفیدرود. ۱۳۸۵. گزارشات مربوط به آسیبهای تخلیه‌کننده های تحتانی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو.

۶. خورشیدی ح. ۱۳۸۷. بررسی پدیده کاویتاسیون در تخلیه‌کننده تحتانی سد سفیدرود به کمک فلونت، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران.

۷. خورشیدی ح. ۱۳۸۷. بررسی سیستم هوادهی در تخلیه‌کننده تحتانی سد سفیدرود با استفاده از روش حجم محدود، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت و برق شهید عباسپور، تهران.

۸. عباسپور ا، هاشمی‌کیا س. ۱۳۹۲. شبیه سازی عددی جریان بر روی سرریز استوانه ای با در نظر گرفتن مولفه ی زبری با استفاده از معیار E - k. مجله ی مهندسی منابع آب، دوره ۶، شماره ۱۸.

خطای بین نتایج شبیه عددی در مقایسه با نتایج نمونه ی آزمایشگاهی به کمتر از ۲۰ درصد محدود شده است.

۲- بر اساس مقادیر سرعت جریان در حالات هوادهی- شده و هوادهی نشده مشاهده گردد که سامانه ی هوادهی توانسته است مقادیر سرعت جریان را در مجاورت مرزها در حدود ۳۰ درصد مقدار خود در حالت هوادهی نشده کاهش داده و توان ایجاد پدیده حفره سازی را با اطمینان از مقدار بحرانی ۰/۲۵ دور کند.

۳- با توجه به مقادیر فشار پایا در حالات هوادهی شده و هوادهی نشده می توان چنین گفت که سامانه ی هوادهی قادر بوده است فشار را به اندازه ۵ تا ۱۰ درصد نسبت به حالت هوادهی نشده افزایش دهد که به نوبه خود باعث بزرگ شدن مقادیر شاخص حفره سازی، و در نتیجه بهبودی وضعیت جریان برای جلوگیری از حفره سازی گردد.

۴- با محاسبه مقادیر شاخص حفره سازی در نقاط مختلف تخلیه کننده ی تحتانی شماره ی ۵ سد سفیدرود مشاهده گردید که سامانه ی هوادهی مقادیر شاخص حفره سازی را در مقایسه با حالت هوادهی نشده ۳ تا ۴ برابر افزایش داده و با ضریب اطمینان مناسبی از مقدار بحرانی ۰/۲۵ دور نگه می دارد.

مراجع

1. Vischer, D.L., and Hager, W.H. 1999. Dam Hydraulics. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, United Kingdom.
2. Speerli, J., and Hager, W.H. 2000. Air-water flow in bottom outlets. Canadian Journal of Civil Engineering, 27:454-462.
3. Sharma, H.R. 1976. Air entrained in high head gated conduits. Journal Hydraulics Division ASCE, 102(HY11):1629-1646; 103(HY10):1254-1255.
۴. سلیمان‌زاده ر. ۱۳۸۵. تحلیل عددی جریان دو فاز آب و هوا در اطراف دریچه کشویی تخلیه‌کننده تحتانی. دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.