

مدل‌سازی عددی جریان و سیستم هوادهی در تخلیه‌کننده تحتانی سد سفیدرود

حسین خورشیدیⁱ; ناصر طالب‌بیدختیⁱⁱ; امیر حسین نیک‌سرشتⁱⁱⁱ

چکیده

کاویتاسیون مهمترین مشکلی است که به سبب سرعت‌های زیاد جریان در مجراهای تخلیه‌کننده تحتانی سدها ممکن است رخ دهد. طراحان معمولاً از طریق هوادهی مناسب جریان از ایجاد کاویتاسیون جلوگیری می‌کنند. سد سفیدرود در شمال کشور سالهاست که به علت وجود سرعت‌های در حدود ۳۰ متر بر ثانیه و ایجاد فشارهای منفی در نقاطی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی خود، متحمل آسیب‌های شدیدی شده است. در این تحقیق از طریق دینامیک سیالات محاسباتی در قالب روش حجم محدود بکار رفته در نرم-افزار فلوئنت، مدل‌سازی جریان در این مجراها انجام شده است. از مدل حجم سیال (VOF) در حالت سه بعدی شامل جریان دوفازی آب و هوا استفاده شده، که برای در نظر گرفتن آشفتگی‌های جریان نیز مدل $k-\epsilon$ بکار گرفته شده است. برای رفع مشکل کاویتاسیون، از یک سیستم هوادهی شامل پله (Ramp) در کف و دیواره مجرا با شیب مناسب و نیز تعبیه شیار هواده در دیواره استفاده شده که باعث فرستادن هوا به نزدیکی کف و دیواره‌ها خواهد شد. پارامترهای جریان از قبیل سرعت، فشار و شاخص کاویتاسیون بررسی شده است. برای تایید نتایج مدل، مقایسه‌ای با نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی اجرا شده از تخلیه‌کننده تحتانی سد سفیدرود در موسسه تحقیقات آب تهران انجام شده است.

کلمات کلیدی: تخلیه‌کننده تحتانی، سد سفیدرود، کاویتاسیون، سیستم هوادهی، نرم‌افزار فلوئنت.

ⁱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه شیراز: khorshidi398@yahoo.com

ⁱⁱ استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شیراز: taleb@shirazu.ac.ir

ⁱⁱⁱ استادیار بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز: nikser@sutech.ac.ir

۱- مقدمه

برای سدهای خاکی و سنگریزه‌ای به دلیل اینکه در تکیه-گاهها قرار می‌گیرند، دارای طول بزرگتری هستند. برای کاهش دادن طول تحت فشار مجرای تخلیه‌کننده تحتانی معمولاً توسط یک دریچه مجرا را به دو قسمت تحت فشار و سطح آزاد که جریان به فرم فوق بحرانی به فشار اتمسفر مرتبط می‌شود تقسیم می‌کند [۵]. بازشدگی‌های

سازه تخلیه‌کننده تحتانی برای تخلیه مخزن در مواقع اضطراری، پایین انداختن تراز آب مخزن، شستن رسوبات به پایین دست و انحراف دبی مازاد و سیلاب کاربرد دارد [۴]. مجرای تخلیه‌کننده تحتانی برای سدهای قوسی و وزنی دارای طول نسبتاً کوتاهی است، در حالیکه

۲-۱- معادلات حاکم بر مدل

الف- معادله پیوستگی

معادله پیوستگی برای یک حجم کنترلی در حالت کلی به صورت زیر نوشته می‌شود.

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

پس از انتگرال‌گیری برای حالت سه بعدی داریم:

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

که در آن u, v, w مولفه‌های سرعت جریان در امتدادهای مختلف است. در نهایت با فرض غیرقابل تراکم و ماندگار بودن جریان، معادله پیوستگی به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ب- معادله مومنتوم

برای معادله مومنتوم در راستای دلخواه n داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \\ = \int_{\Omega} \rho \vec{f} d\Omega - \int_{\partial\Omega} \rho \vec{p} n dS + \int_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS \end{aligned} \quad (4)$$

که معادله فوق همان قانون بقای مومنتوم درون یک حجم کنترل اختیاری Ω می‌باشد که مستقل از مکان است. با انتگرال‌گیری از معادله فوق و پس از ساده‌سازی، معادله مومنتوم به صورت رابطه زیر برای جریان غیر قابل تراکم 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 بالا، u_i و g_{x_i} به ترتیب مولفه سرعت لحظه‌ای و شتاب ثقل در جهت x_i و همچنین p نشان-دهنده فشار در هر نقطه از سیال است. برای در نظر گرفتن آشفتگیهای جریان، تغییراتی در معادله مومنتوم ایجاد می‌شود که در نهایت معادله مومنتوم به صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود.

اندک دریچه تنظیم جریان منجر به جریانهای با سرعت بالا در پایین دست دریچه شده که نتیجه آن کاهش شدید فشار در پایین دست دریچه بوده که حتی می‌تواند به زیر فشار اتمسفر نیز برسد. این کاهش فشارها باعث ایجاد حبابهایی در جریان و ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌گردد که در نهایت منجر به آسیبهایی به سطوح بتنی و فولادی مجرا می‌شود [۶]. از همان سالهای اولیه ساخت سد سفیدرود در شمال کشور، کاویتاسیون مشکلاتی را برای مجراهای تخلیه‌کننده تحتانی بوجود آورده است. خسارات وارده به دریچه، دیواره‌ها و کف این مجراها به اندازه‌ای شدید بوده است که مسئولین تصمیم به ساخت مدل فیزیکی آن در موسسه تحقیقات آب تهران گرفتند. نتایج مربوط به ویژگیهای جریان در طول مجرا بدست آمد و تحقیقاتی برای از بین بردن کاویتاسیون در طول این سازه‌ها انجام گرفت که در نهایت سیستم هوادهی برای این منظور استفاده شد [۳]. در این تحقیق سعی شده است که برای جریان هوادهی شده، ویژگیهای جریان محاسبه شده و با حالت هوادهی نشده مقایسه گردد و تاثیرات سیستم هوادهی را برای از بین بردن کاویتاسیون بررسی کنیم.

۲- مدل عددی

فلوئنت یک برنامه کامپیوتری برای مدل‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده است. این نرم‌افزار انعطاف‌پذیری کاملی از شبکه را فراهم می‌کند و قابلیت استفاده برای مشهای منظم و نامنظم را داراست [۱]. این برنامه دارای مدل‌های مختلفی می‌باشد که مدل حجم سیال مناسبترین مدل برای حل مسئله ما می‌باشد و دلیل آن مزیت این روش در مدل کردن سطح آزاد جریان است. مدل حجم سیال بر این حقیقت استوار است که دو یا چند سیال با فازهای مختلف در کنار یکدیگر با هم تداخلی ندارند و به ازای اضافه شدن هر فاز جدید به مدل، یک متغیر جدید به نام نسبت حجمی در هر سلول محاسباتی برای فاز جدید ایجاد می‌شود.

سطح آزاد است. به دلیل اینکه دیواره‌های جانبی این مجراها دارای اعوجاجات زیادی است، بنابراین استفاده از مدل سه‌بعدی در دستور کار قرار گرفت. همچنین برای مدل‌کردن آشفتگیهای جریان از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است که دلیلش اعتبار این مدل برای استفاده در کارهای مشابه و همچنین متداول بودن آن بوده است. جهت مدل‌کردن سطح آزاد در جریان دوفازی شامل آب و هوا از روش حجم سیال استفاده شده است. هوا به عنوان فاز اولیه در تمام مدل قرار گرفته است و با باز شدن دریچه تنظیم جریان، آب به عنوان فاز ثانویه در طول مجرا به حرکت درآمده تا به انتهای مجرا برسد که نوع حل را به فرم نامانگار تبدیل کرده است. برای دانسیته 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 است. شرایط مرزی استفاده شده برای مدل، به صورت جدول (۱) است.

جدول (۱): شرایط مرزی مدل عددی

Pressure-inlet	ورودی مدل
Pressure-outlet	خروجی مدل
Wall	دیواره‌ها
Wall	دریچه

۲-۳- تحلیل نتایج

الف- جریان هوادهی نشده

نتایج بدست آمده از مدل‌سازی، شامل مقادیر فشار و سرعت بوده و به دنبال آن، تخمین شاخص کاویتاسیون در طول مجرا طی بازشدگیهای مختلف دریچه انجام گرفته است. مقادیر فشار بدست آمده از مدل عددی همخوانی مناسبی با نتایج حاصل از مشاهدات مدل هیدرولیکی دارد. مقادیر سرعت جریان در نقاط اندازه‌گیری شده در مدل عددی و مدل هیدرولیکی، همگی بزرگتر از ۲۰ متر بر ثانیه است. با فرض ۱۰/۳ متر برای فشار اتمسفر، مقادیر شاخص کاویتاسیون در طول مجرا محاسبه شده و با نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی مقایسه شده است. شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) مقادیر شاخص کاویتاسیون را

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u'_i u'_j)$$

(۶)

که $\rho u_i u_j$ مربوط به ترم تنش رینولدز بوده که اثر تلاطم را در معادله مومنتوم اعمال می‌کند.

ج- معادله سطح آزاد

در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال (VOF)، از پارامتر α_q استفاده می‌شود که میزان سیال q را در هر سلول محاسباتی نشان می‌دهد. شکل‌گیری فصل‌مشتک بین فازهای مختلف در مدل حجم سیال، با حل معادله پیوستگی برای نسبت حجم فازهای مختلف موجود در مدل انجام می‌گیرد. برای q امین فاز، معادله پیوستگی به صورت زیر قابل نمایش است [۷].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (۷)$$

در رابطه فوق، \dot{m}_{qp} انتقال جرم از فاز q به فاز p و \dot{m}_{pq} انتقال جرم از فاز p به فاز q می‌باشد. همچنین α_q ، ρ_q و \vec{v}_q به ترتیب نسبت حجمی، دانسیته و سرعت مربوط به فاز q است. با فرض ثابت بودن دانسیته سیال، معادله مومنتوم به صورت رابطه زیر تبدیل می‌شود.

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha_q}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha_q}{\partial z} = 0 \quad (۸)$$

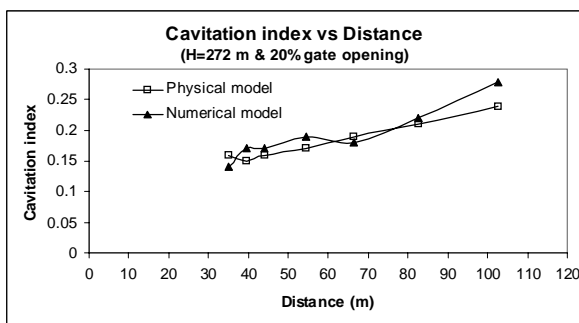
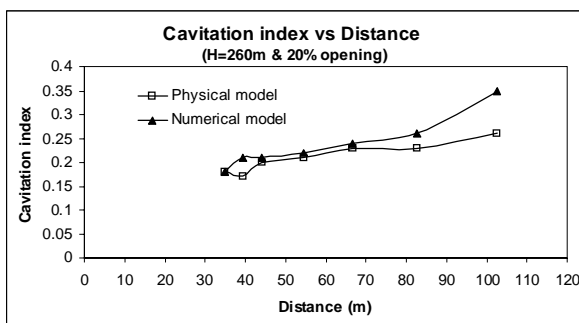
که در رابطه بالا u ، v و w به ترتیب مولفه‌های سرعت در امتداد x ، y و z است.

۲-۲- روش حل

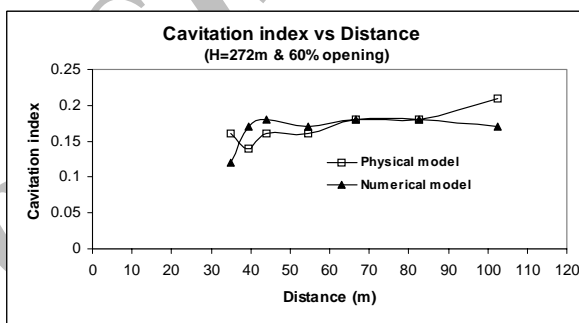
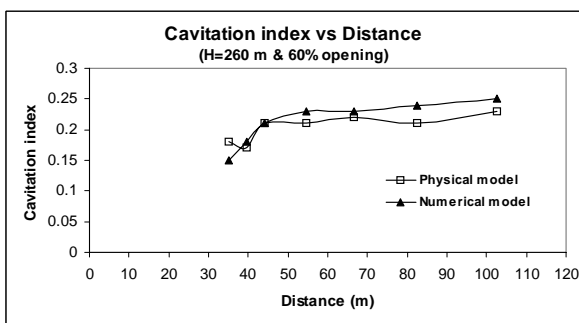
نرم‌افزار Gambit برای ساخت مدل و تولید شبکه برای مجرای تخلیه‌کننده تحتانی شماره ۵ سد سفیدرود استفاده شده است. به دلیل هندسه پیچیده این مجرا، از ترکیبی از شبکه‌های منظم و نامنظم مثلثی در حالت سه‌بعدی استفاده شده است. به منظور حل معادلات ناویر استوکس از نرم‌افزار فلونتت که بر اساس روش حجم محدود کار می‌کند استفاده شده است و دلیل آن قابلیت بالای این نرم‌افزار در مدل‌کردن جریان در حالت ترکیب جریانهای تحت فشار و

برابر ۲۶۰ و ۲۷۲ متر نسبت به سطح دریا نشان می‌دهد
[۲].

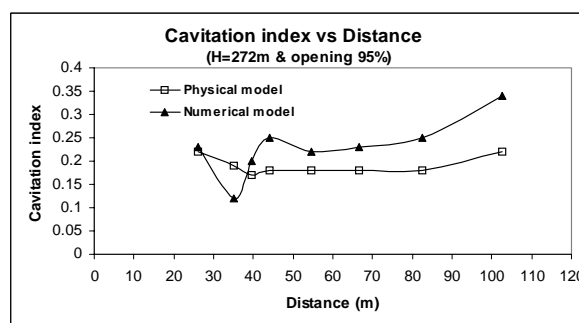
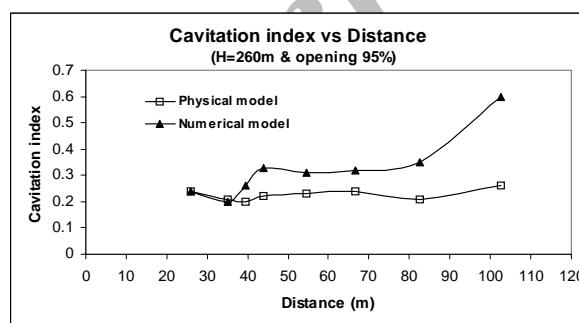
برای بازشدگیهای مختلف دریاچه تحت ترازهای مخزن



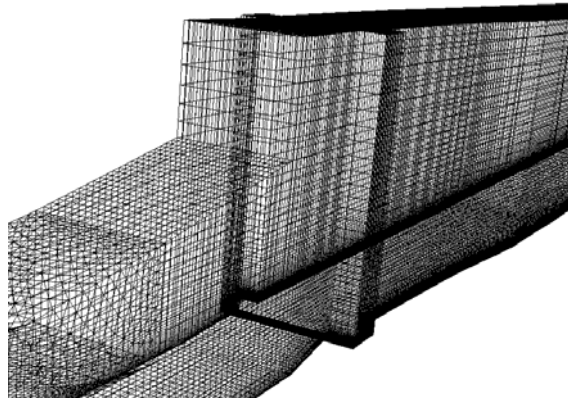
شکل (۱): توزیع شاخص کاویتاسیون برای بازشدگی ۲۰٪ دریاچه برای جریان هوادهی نشده.



شکل (۲): توزیع شاخص کاویتاسیون برای بازشدگی ۶۰٪ دریاچه برای جریان هوادهی نشده.



شکل (۳): توزیع شاخص کاویتاسیون برای بازشدگی ۹۵٪ دریاچه برای جریان هوادهی نشده.

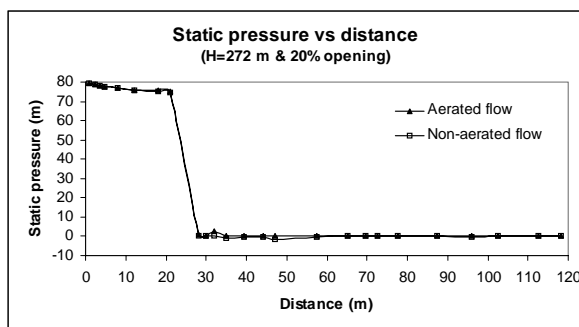
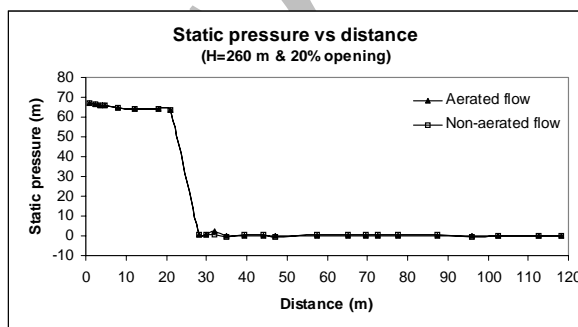


شکل (۴): سیستم هوادهی بکار رفته در مجرای شماره ۵ سد سفیدرود.

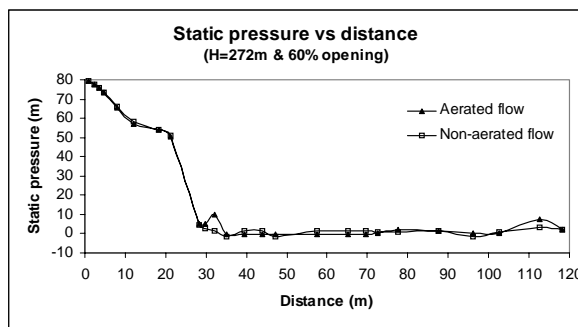
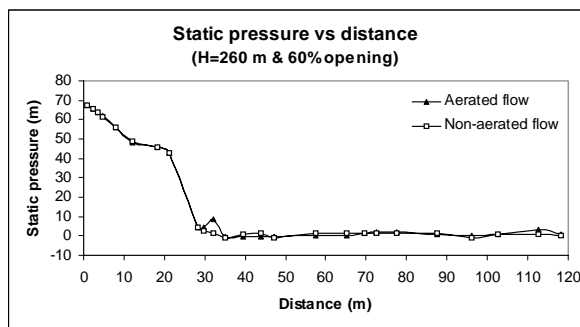
ب- جریان هوادهی شده

برای از بین بردن کاویتاسیون در طول مجرای شماره ۵ سد سفیدرود، از یک سیستم هوادهی شامل ترکیب رمپ در کف و دیوارها و شیار هوادهی در دیوارهای جانبی بلافاصله بعد از رمپها استفاده شده است. با توجه به نقطه بحرانی مجرا از لحاظ ایجاد کاویتاسیون، جانمایی سیستم هوادهی انجام گرفته است. برای اینکه بیشترین فشار منفی در فاصله ۴۰ متری از ابتدای مجرا رخ داده است و با توجه به اینکه طی بازشدگیهای بزرگ دریچه امکان برخورد آب به تاج مجرا وجود دارد، رمپ در فاصله ۷/۵ متری از دریچه و در فاصله ۷۰ سانتیمتری از محل افزایش ارتفاع مجرا تعبیه شده است [۴]. رمپی به طول ۲ متر با زاویه ۵ درجه نسبت به افق در کف و همچنین رمپهایی ۵ درجه و ۲/۵ درجه به ترتیب در دیواره سمت راست و سمت چپ انتخاب شده است. بلافاصله پس از

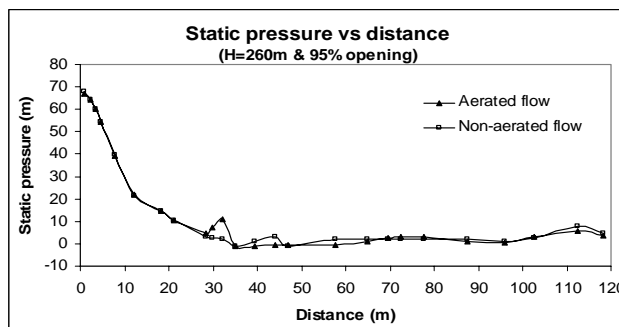
رمپ، از شیار هوادهی استفاده شده که ابعاد آن به فرم ۴۰ سانتی متر عمق و ۱ متر طول است. در شکل (۴) سیستم هوادهی بکار رفته شده در مدل عددی، مشاهده می شود. بعد از تعبیه سیستم هوادهی، مقادیر فشار استاتیکی و سرعت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به مقادیر فشار استاتیکی برای دو حالت جریان هوادهی شده و هوادهی نشده برای بازشدگیهای مختلف دریچه تحت دو تراز مختلف مخزن در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر فشار استاتیکی می توان چنین درک کرد که فشار برای جریان هوادهی شده تنها در محل قرارگیری هوادهی، دارای اختلاف ناچیزی نسبت به حالت هوادهی نشده می باشد.



شکل (۵): توزیع فشار استاتیک برای بازشدگی ۲۰٪ دریچه، قبل و بعد از هوادهی.



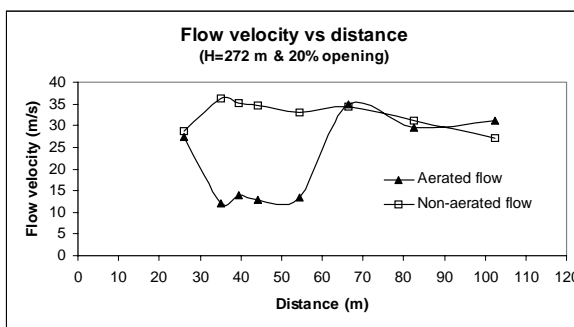
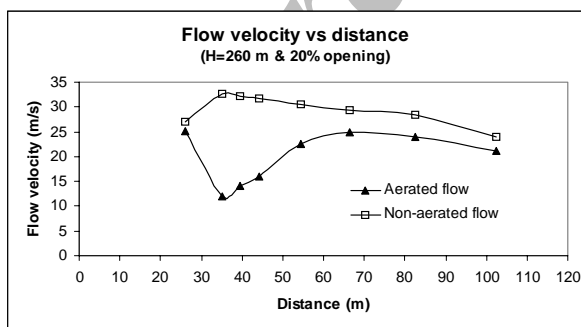
شکل (۶): توزیع فشار استاتیک برای بازشدگی ۶۰ درصدی، قبل و بعد از هوادهی.



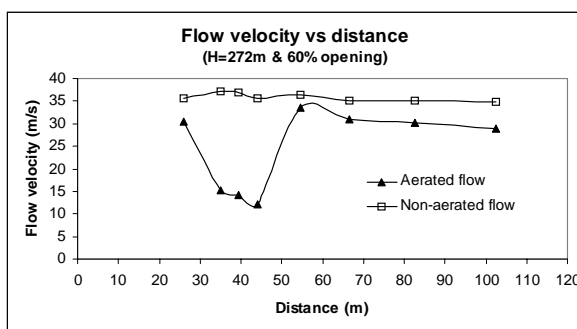
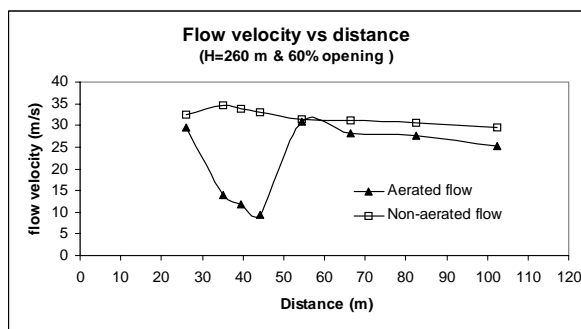
شکل (۷): توزیع فشار استاتیک برای بازشدگی ۹۵ درصدی، قبل و بعد از هوادهی.

بخوبی توانسته باعث کاهش سرعت جریان در مجاورت پوششهای مجرا در نواحی بحرانی گردد و در نهایت باعث بهبود وضعیت جریان از لحاظ ایجاد پدیده کاویتاسیون شود.

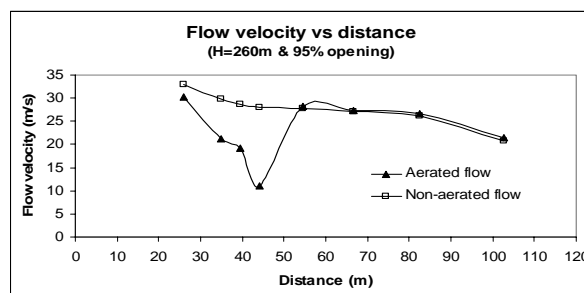
شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) مقادیر سرعت جریان را طی بازشدگیهای مختلف نشان می‌دهد. مقادیر سرعت از محل سیستم هواده تا مسافت قابل توجهی در پایین‌دست، کاهش چشمگیری داشته است. می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که برخلاف مقادیر فشار استاتیکی، سیستم هواده



شکل (۸): توزیع سرعت برای بازشدگی ۲۰ درصدی، قبل و بعد از هوادهی.



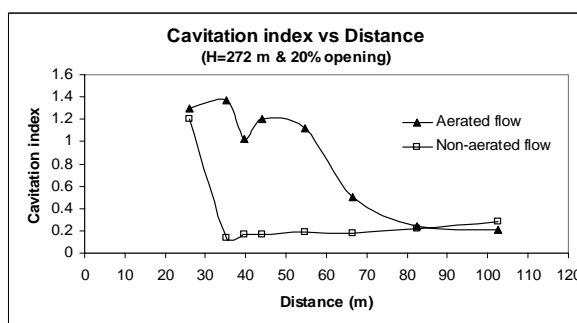
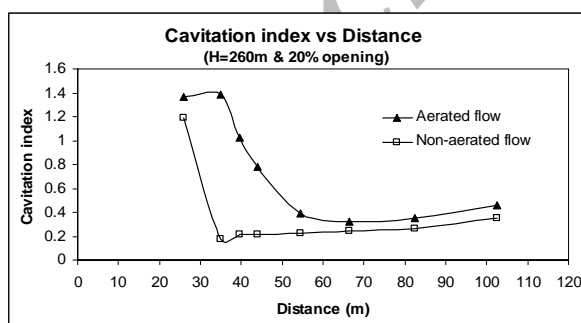
شکل (۹): توزیع سرعت برای بازشدگی ۶۰٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی.



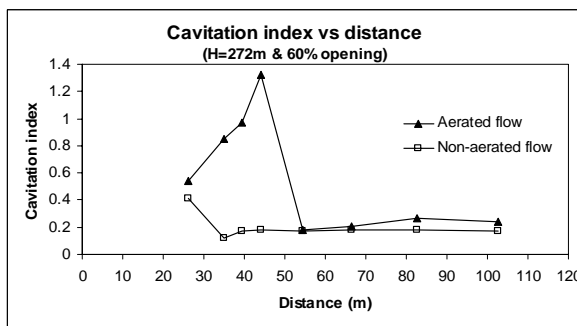
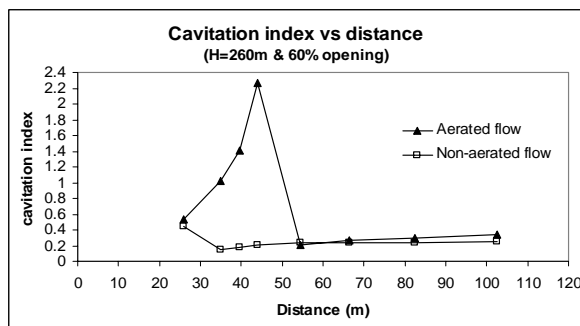
شکل (۱۰): توزیع سرعت برای بازشدگی ۹۵٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی.

به حالت هوادهی نشده می‌باشد که می‌توان تاثیر سیستم هوادهی برای افزایش شاخص کاویتاسیون را مشاهده کرد. بنابراین مقادیر شاخص کاویتاسیون در حالت هوادهی شده برای بازشدگیهای مختلف دریاچه در محدوده مناسبی قرار گرفته است.

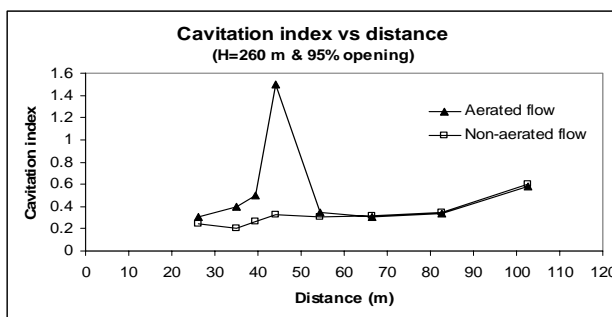
در نهایت با توجه به مقادیر سرعت و فشار در طول مجرای شماره ۵، به بررسی پدیده کاویتاسیون پرداخته شده است. شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) نشان‌دهنده مقادیر شاخص کاویتاسیون در نقاط مختلف مجرا برای دو حالت هوادهی شده و هوادهی نشده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، شاخص کاویتاسیون برای جریان هوادهی شده دارای وضعیت مناسبتری نسبت



شکل (۱۱): توزیع شاخص کاویتاسیون برای بازشدگی ۲۰٪ دریاچه، قبل و بعد از هوادهی.



شکل (۱۲): توزیع شاخص کاویتاسیون برای بازشدگی ۶۰٪ درپچه، قبل و بعد از هوادهی.



شکل (۱۳): توزیع شاخص کاویتاسیون برای بازشدگی ۹۵٪ درپچه، قبل و بعد از هوادهی.

افزایش ناچیز فشار استاتیکی نسبت به حالت هوادهی نشده شود. اما بر اساس مقادیر سرعت جریان، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم هوادهی بخوبی توانسته باعث کاهش سرعت‌های جریان در کنار سطوح گردد، به طوری که در برخی مواقع سرعت جریان در حالت هوادهی شده به کمتر از نصف مقدار خود در حالت هوادهی نشده کاهش یافته است.

۳- در نهایت با محاسبه شاخص کاویتاسیون، مشاهده شد که سیستم هوادهی بخوبی توانسته موجب بهبود وضعیت جریان از لحاظ کاویتاسیون شود، به طوری که مقادیر شاخص کاویتاسیون در محدوده سیستم هوادهی و پایین دست آن، بخوبی از مقدار بحرانی فاصله گرفته است.

۳- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده برای ویژگی‌های جریان در دو حالت جریان هوادهی شده و هوادهی نشده و محاسباتی که برای میزان شاخص کاویتاسیون در طول مجرا انجام شده است، می‌توان به نتایج زیر رسید.

۱- با مقایسه‌ای که برای ویژگی‌های جریان بین نتایج مدل هیدرولیکی و عددی بعمل آمد، همخوانی مناسبی مشاهده شد که مبین اعتبار فلوننت برای مدل سازی جریان در این مجراها است.

۲- با توجه به مقادیر فشار استاتیکی، مشخص شد که تاثیر سیستم هوادهی برای بهبود وضعیت جریان برای جلوگیری از ایجاد پدیده کاویتاسیون از طریق افزایش مقادیر فشار استاتیکی ناچیز بوده و تنها در محل قرارگیری هوادهی توانسته موجب

ع- مراجع

- تحقیقات آب، وزارت نیرو، ۱۳۸۵.
- Vischer, D. L.; Hager, W. H.; *Dam Hydraulics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, United Kingdom, 1999.
- Speerli, J.; Hager, W. H.; "Air-water flow in bottom outlets", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27:454-462, 2000.
- Sharma, H. R.; "Air entrained in high head gated conduits", *Journal of Hydraulics Division ASCE*, 102(HY11):1629-1646; 103(HY10):1254-1255, 1976.
- Fluent team; *Manual and user guide of fluent software*, Fluent Inc. Centerra Resource Park 10 Cavendish Court Lebanon, NH 03766, 2005.
- [۴] سلطانی، مجید؛ رحیمی اصل، روح الله؛ **دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم افزار FLUENT**. انتشارات طراح، تهران، ۱۳۸۵.
- [۵] خورشیدی، حسین؛ طالب بیدختی، ناصر؛ نیک سرشت، امیر حسین؛ "بررسی پدیده کاویتاسیون در تخلیه کننده تحتانی سد سفیدرود به کمک فلوئنت"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۷.
- [۶] "مطالعات علاج بخشی مدل هیدرولیکی مجرای تخلیه کننده تحتانی شماره ۵ سد سفیدرود"، موسسه
- [۷]

Archive of SID