نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره پنجم / تابستان ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 5 /September 2015

بررسی عددی تأثیر تغییرات ارتفاع شفت قائم بر شکل‌گیری کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری

مجید احسانی [۱]
سید علی‌اکبر صالحی نیشابوری *[۲]

چکیده

در قسمت زانویی سرریزهای نیلوفری انتظار می‌رود، به دلیل وجود سرعت بالای جریان که منجر به جداشدگی و افت فشار ناشی از زبری و انحناء می‌شود، کاویتاسیون اتفاق بیفتد و همین نکته این سرریزها را به‌عنوان یکی از مستعدترین سرریزها برای وقوع کاویتاسیون تبدیل می‌کند. در پژوهش حاضر تأثیر تغییر ارتفاع شفت قائم بر امکان‌پذیری وقوع کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری با مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده و نتایج با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. نتایج حاصل انطباق مطلوبی را بین مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نتایج فشار برای طول‌های مختلف شفت قائم و در دبی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس احتمال وقوع کاویتاسیون با به دست آوردن شاخص کاویتاسیون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بررسی بر روی تغییر طول شفت قائم، تأثیر مستقیم این پارامتر بر مقادیر فشار و شاخص کاویتاسیون را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که با افزایش طول شفت قائم در دبی و نقطه‌ای مشخص، فشار بیشتر شده و خطر کاویتاسیون کمتر می‌گردد. همچنین با افزایش دبی فشار وارد بر زانویی بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی

سرریز نیلوفری، مدل‌سازی عددی، کاویتاسیون، شفت، FLOW3D

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران،سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس
۲.* استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، salehi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۱۵

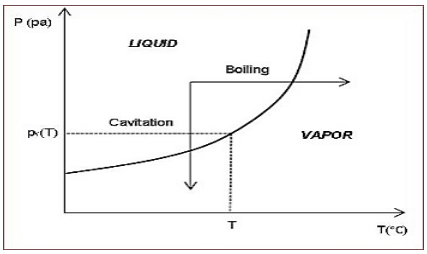
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

مقدمه

یکی از انواع رایج سرریزها برای تخلیه آب اضافی پشت سدها، مخصوصاً در مخازن سدهایی با دبی سرریز کم تا متوسط، سرریزهای نیلوفری هستند. سرریزهای نیلوفری در دره‌های تنگ و باریک و مکان‌هایی که محدودیت مکانی برای ساخت دیگر سرریزها وجود دارد، مؤثر هستند. مهم‌ترین مزیت سرریزهای نیلوفری کاهش هزینه‌های ساخت آن با استفاده از تونل انحرافی احداث‌شده در زمان ساخت سد به عنوان تونل افقی است. این سرریزها شامل سه قسمت اصلی، سرریز مدور در مدخل با یک تبدیل به شکل زنگوله وارونه، شفت قائم با یک زانویی ۹۰ درجه که به گلوگاه معروف است و مجرای افقی (در مواقعی با شیب ملایم) هستند.

ازآنجایی‌که سرریز یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های یک سازه سد محسوب می‌شود، شناخت مشکلات و خطراتی که با آن مواجه است، لازم و ضروری است. روحانی[1] (۱۳۸۵) بیان می‌کند که یکی از این خطرات که حتی ممکن است پایداری سازه سرریز را به خطر اندازد (نمونه‌هایی از این تخریب‌ها در سرریز سدهای، گلن‌کنیون[2]، بلومسا[3]، هوور[4] یلوتیل[5] و کارون۱ رخ داده است)، کاویتاسیون است.

سرریز بسیاری از سدهای متوسط و بزرگ دنیا با سرعت‌های جریان بیش از ۱۰ متر بر ثانیه تا ۴۵ متر بر ثانیه مواجه هستند. فالوی[6] (۱۹۸۲) بیان می‌کند که، در سرریز سدها معمولاً ناهمواری‌هایی وجود دارد که ممکن است ناشی از هندسه سازه، پله‌های تیز، درزهای اجرایی، نشست موضعی و یا ضعف اجرای بتن باشد. این ناهمواری‌ها موجب جدایی جریان همراه با کاهش شدید فشار موضعی در پشت ناهمواری‌ها می‌شود. با توجه به سرعت زیاد جریان، فشار در ناحیه جدایی ممکن است به حد فشار بخار آب رسیده و باعث تشکیل حباب‌های ریز از بخار آب گردد. وقتی یک رشته از حباب‌های مذکور از ناحیه کم‌فشار به پرفشار پایین‌دست، که در آن شرایط کاویتاسیون حاکم نیست، رانده می‌شود ناگهان درهم می‌شکند و آب اطراف آن برای پر کردن حفره‌های حاصل به سمت آن هجوم می‌آورد. در نقطه از بین رفتن این حباب‌ها، برخورد دسته‌های آبی که با سرعت بسیار به سمت هم حرکت می‌کنند، باعث یک انفجار کوچک شده و فشار درون آب در آن نقطه را به‌شدت بالا می‌برد. اگر فروپاشیدگی یک حباب در نزدیکی سطح بتن اتفاق افتد، انفجار نامتقارن بوده و تولید جت می‌کند. این جت با سرعت زیاد به سطح برخورد می‌کند. سرعت جت می‌تواند بیشتر از ۱۰۰ متر بر ثانیه باشد. ضربه‌های بسیار شدیدی از برخورد این جت‌های کوچک بر سطح بتن وارد می‌شود که درنهایت در اثر تنش موضعی حاصل، سطح بتن دچار گسیختگی شده و خراب می‌شود. پدیده کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی می‌تواند تابعی از سرعت جریان، فشار جریان، زمان عملکرد، زبری مرزها، مقاومت مواد و مقدار هوای مخلوط شده با آب باشد. به‌طور خلاصه، همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است تغییر فاز مایع به بخار در فشار تقریباً ثابت، جوشیدن نام دارد و همچنین کاویتاسیون پدیده‌ای است که از تغییر فاز مایع به بخار در دمای تقریباً ثابت در اثر کاهش فشار مایع رخ می‌دهد. این پدیده در منطقه‌ای که فشار از فشار بحرانی کمتر است اتفاق می‌افتد (اغلب فشار بخار را فشار بحرانی می‌گویند).



شکل(۱): طرح شماتیک رخ دادن کاویتاسیون

برای جلوگیری از خسارت‌های ناشی از کاویتاسیون روش‌های مختلفی وجود دارد. تغییرات هندسی در پروفیل و مقطع مجرای جریان از اقدامات اولیه بوده و درصورتی‌که مؤثر نباشد، می‌توان از طریق راه‌های دیگری از قبیل پرداخت سطح بتن و یا استفاده از ملات‌های رزینی و ... خرابی سطوح بتنی را به مقدار قابل‌توجهی کاهش داد. البته مؤثرترین روش برای کاهش یا حذف پتانسیل کاویتاسیون روش هوادهی است. بررسی‌ها نشان

[1] Rouhani
[2] Glen canyon
[3] Blue Mesa
[4] Hoover
[5] Yellowtail
[6] Falvey

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

می‌دهد اگر غلظت هوا در آب حدود ۸ درصد یا بیشتر باشد ناهمواری‌های سطح، سبب کاویتاسیون نخواهد شد.

تا مدت‌ها تنها معیار اساسی در خصوص تعیین احتمال وقوع کاویتاسیون، سرعت بحرانی بود. در سال ۱۹۸۷ آیزنهاور[1] سرعت بحرانی را برای شروع وقوع کاویتاسیون بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفت. اما ازآنجاکه این معیار نمی‌توانست تأثیر فشار و همچنین خرابی‌های شدید غیرعادی در پایین‌دست قوس‌های قائم را توجیه کند، برای اینکه بتوان حساسیت یک سازه را در برابر حباب‌های ایجادشده در فشار منفی تشخیص داد، از پارامتری به نام شاخص کاویتاسیون[2] استفاده می‌شود. شاخص کاویتاسیون که یک پارامتر بدون بعد است و از رابطه برنولی مشتق می‌شود، به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \qquad (1)$$

که در آن :

σ = شاخص کاویتاسیون، P_0 = فشار در محل، P_v = فشار بخار (۰/۳۳ متر ستون آب) و V_0 = سرعت در محل است.

فالوی در سال ۱۹۸۲ تحقیقی را بر اساس بررسی خرابی‌های سرریز تونلی چند سد ارائه نمود که بر اساس اطلاعات حاصل از این سرریزها، دیاگرامی توسط فالوی ارائه شده است. در حال حاضر از این دیاگرام برای بر اساس شاخص کاویتاسیون استفاده می‌شود. در این نمودار چنانچه عدد کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲ باشد، خطری از جانب کاویتاسیون سازه را تهدید نمی‌کند و اگر بین ۰/۱ تا ۰/۲ باشد، راهکارهای جلوگیری از خطر باید اعمال شود و نصب هواده ضروری است. اگر مقدار عدد کاویتاسیون کمتر از ۰/۱ باشد، سرریز باید مجدداً طراحی گردد.

طباطبایی[3] (۱۳۷۰) به بررسی پدیده کاویتاسیون، مکانیزم آن و ارائه روابط وابسته به این پدیده در حالات مختلف جریان پرداخت. برای مکانیزم کاویتاسیون، یک مدل بر اساس تعادل استاتیکی نیروهای وارده به یک حباب تشکیل یافته، پیشنهاد شد و تابع فشار وارد به حباب به دست آمد. سپس مقدار کمینه این تابع محاسبه شد. با استفاده از تعریف ضریب فشار (نسبت کاهش فشار در نقطه فشار کمینه به فشار دینامیکی سیال) و حذف جملات کوچک، درنهایت شاخص کاویتاسیون به دست آمد. سپس یک شاخص کاویتاسیون بحرانی برای سازه محاسبه گردید و اشاره شد که اگر مقدار شاخص جریان از شاخص بحرانی کمتر باشد، کاویتاسیون رخ خواهد داد.

روحانی و صالحی نیشابوری[4] (۱۳۸۹)، در مطالعه‌ای پدیده کاویتاسیون را بر روی سرریز سد شهید عباسپور با روش عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل هیدرولیکی این سد با نتایج حاصل از نرم‌افزار FLOW3D مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی حاصل از دقت مناسبی برای بررسی پدیده کاویتاسیون برخوردار است. همچنین تأثیر پارامترهای دبی و زبری بر شکل‌گیری کاویتاسیون در سرریز سد شهید عباسپور مورد مطالعه قرار گرفت.

اسدسنگابی و همکاران[5] (۲۰۱۴)، به بهینه‌سازی شکل ورودی سرریز نیلوفری با هدف افزایش آبگذری و کاهش امکان‌پذیری کاویتاسیون پرداختند.

غفاری[6] (۱۳۹۱)، به شبیه‌سازی عددی جریان در سرریز نیلوفری و در دبی‌های مختلف با AnsysFluent پرداخت. کاویتاسیون برای چهار دبی مختلف در سرریز نیلوفری مورد بررسی قرار گرفت، و میزان آسیب و خطر در نقاط معین‌شده بر روی بدنه سرریز با کمک منطق فازی بررسی شد. همچنین نقاط بحرانی سرریز نیلوفری مشخص شد.

رمضانی[7] (۱۳۹۲)، تأثیرات قطر تاج سرریز نیلوفری و عمق تقرب بر روی میدان جریان را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. وی، سپس مدل هیدرولیکی سرریز نیلوفری را در FLOW3D شبیه‌سازی کرد، و پس از صحت سنجی، بهترین مدل شبیه‌سازی را ارائه نمود.

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، اهمیت موضوع کاویتاسیون در سرریزها، روشن و مشخص است. سرریزهای نیلوفری به دلیل ماهیت آشفته جریان و ویژگی‌های هندسی، یکی از مستعدترین سرریزها برای وقوع پدیده کاویتاسیون محسوب می‌شوند. یکی از بخش‌هایی با حساسیت زیاد در این زمینه ، زانویی سرریز

[1] Aisenhauer
[2] Cavitation index
[3] Tabatabaie
[4] Rouhani & SalehiNeyshabouri
[5] Asadsangabi et al
[6] GHaffari
[7] Ramzani

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

نیلوفری است، که بنا به وجود سرعت بالای جریان، جداشدگی و افت فشار ناشی از انحنا در آن زیاد است. به همین منظور در پژوهش حاضر برای مطالعه کاویتاسیون در سرریز نیلوفری از مدل‌سازی عددی استفاده شده است. نتایج پارامترهای هیدرولیکی این سرریز مانند فشار و سرعت برای دبی‌های مختلف جریان و طول‌های مختلف شفت قائم، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس امکان‌پذیری وقوع کاویتاسیون با محاسبه شاخص کاویتاسیون به دست می‌آید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر روی سیستم تخلیه سیلاب سرریز نیلوفری سد البرز واقع بر رودخانه بابل‌رود شهرستان سوادکوه در استان مازندران انجام شده است. در این سرریز، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله $۲۷۲\frac{m^3}{s}$، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله $۶۲۶\frac{m^3}{s}$، دبی حداکثر سیلاب محتمل $۱۰۰۴\frac{m^3}{s}$، و بار آب روی سرریز به ازای دبی حداکثر سیلاب ۴/۷۴ متر است. با توجه به رعایت اصول و روابط هیدرولیکی و بهره‌گیری از امکانات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب ایران، مقیاس مدل (۴۲/۸۷۵ : ۱) انتخاب شده است.

مقیاس طول $L_r = \frac{L_m}{L_p} = 1/42.857$

مقیاس سرعت $V_r = \frac{V_m}{V_p} = (L)^{0.5} = 1/6.55$

مقیاس دبی $Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = (L_r)^{2.5} = 1/12024$

مقیاس فشار $P_r = \frac{P_m}{P_p} = L_r = 1/42.857$

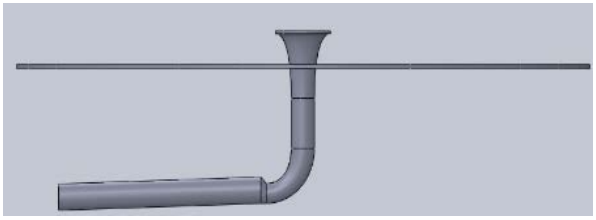
برای مدل‌سازی عددی جریان عبوری از این سرریز از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده است. نرم‌افزار FLOW3D یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم‌افزار برای تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌هایی با سطح آزاد با روش VOF است. FLOW3D از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهات محورهای سه‌گانه مختصات که به معادلات ناویر-استوکس معروف هستند بیان می‌شوند. این معادلات درواقع بیانگر پایداری جرم و مومنتم به بیان ریاضی هستند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (۲)$$

$$\underbrace{\frac{\partial \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{t}}}_{\text{شتاب محلی}} + \underbrace{\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{z}}}_{\text{شتاب جابجایی}} = \underbrace{-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{xi}}}_{\text{ترم فشار}} + \underbrace{\frac{\partial \mathrm{g}}{\partial \mathrm{xj}}}_{\text{ترم ثقل}} + \underbrace{\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{y}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{ui}}{\partial \mathrm{z}^2}\right)}_{\text{ترم پخش}} \qquad (۳)$$

در FLOW3D از پنج مدل آشفتگی استفاده شده است که عبارت‌اند از: طول اختلاط پرانتل، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای $K-\varepsilon$، مدل‌های RNG و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[1]. در بین مدل‌های آشفتگی، مدل RNG که بر اساس یک روش آماری به دست می‌آید نسبت به حالت استاندارد در جریان‌های چرخشی کارایی بیشتری دارد. به همین دلیل از این مدل در مدل‌سازی جریان در میدان‌های دارای انحناء و یا پیچیدگی هندسی بیشتر استفاده می‌شود. به‌طورکلی مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به مدل $K-\varepsilon$ استاندارد دارد. در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی آشفتگی، با توجه به مطالب گفته‌شده ، از مدل RNG استفاده شده است.

در این پژوهش برای ساخت هندسه مدل برای بررسی هیدرولیکی در نرم‌افزار FLOW3D بدنه صلب سرریز به‌صورت سه‌بعدی (همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود)، در نرم‌افزار SolidWorks2013 ساخته شد که شامل بخشی از مخزن، تاج، شفت قائم، زانویی، تبدیل و بخشی از تونل افقی است. سپس با فرمت stl *. به نرم‌افزار FLOW3D معرفی گردید.



شکل (۲): هندسه سه‌بعدی مدل سرریز نیلوفری البرز

جریان به‌صورت یک سیال تعریف می‌شود. همچنین سیال به‌صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار

[1] Large Eddy Simulation

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

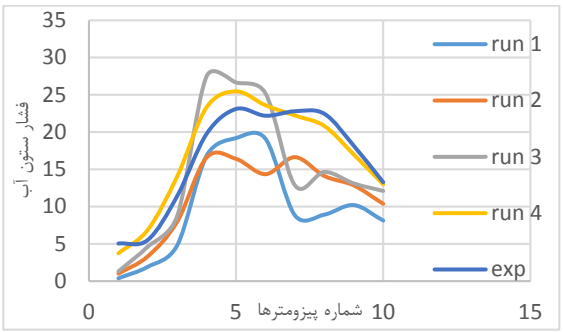
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

FLOW3D تحت شرایطی که شامل این تحقیق نیز می‌شود، VOF به‌صورت خودکار لحاظ می‌شود.

حساسیت مدل‌های عددی به شبکه‌بندی و انفصال میدان حل و همچنین شرایط مرزی یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی هستند. نرم‌افزار FLOW3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه-بندی، برخورد نسبتاً متفاوتی را نسبت به سایر بسته‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارد. ازاین‌رو برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه-های سازه موردنظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌گردد. در این پژوهش از سه بلوک برای نواحی مختلف سازه استفاده می‌شود که بعد از حساسیت‌سنجی‌ها نسبت به اندازه شبکه‌بندی (جدول (۱) و شکل (۲)) در مجموع برای سه بلوک، نزدیک به ۱۳۰۰۰۰۰ سلول در نظر گرفته شده است (اندازه سلول در بلوک ۱، ۰/۶۶ متر، در بلوک ۲، ۰/۴۲ متر و در بلوک ۳، ۰/۶۷ متر است. به دلیل حساسیت و اهمیت بیشتر زانویی سلول‌های ریزتری برای بلوک ۲ در نظر گرفته شده است). همچنین نسبت اندازه سلول در بلوک‌ها[1]، مقدار واحد در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): حساسیت سنجی سلول

تعداد سلول	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۳
اجرای ۱	۲۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
اجرای ۲	۳۵۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
اجرای ۳	۵۵۰۰۰۰	۳۷۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
اجرای ۴	۶۲۵۰۰۰۰	۴۷۵۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰



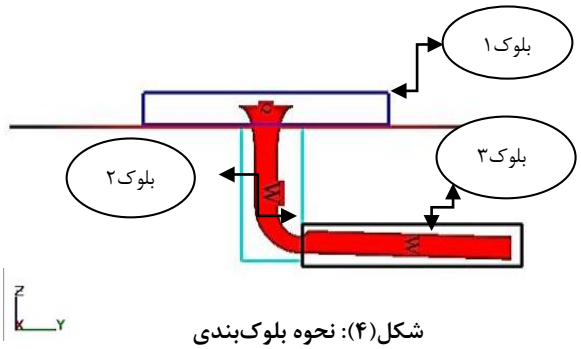
شکل (۳): منحنی تغییرات فشار در دبی $600 m^3/s$ برای اندازه‌های مختلف سلول

همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، اجرای شماره (۴) تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و به همین دلیل از نتایج این اجرا برای بخش‌های بعدی استفاده می‌گردد.

در مختصات کارتزین برای تعریف شرایط مرزی شش وجه مشخص وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورها شامل $Zmax, Zmin, Ymax, Ymin, Xmax, Xmin$ است(شکل۴). لازم به ذکر است که کلیه این مشخصات در هر بلوک به‌صورت جداگانه تعریف می‌شود. برای انجام محاسبات حل میدان جریان در هریک از این بلوک‌ها، بعد از اجراها و تحلیل حساسیت‌ها مناسب‌ترین شرایط مرزی به‌صورت جدول (۲) مورد استفاده قرار گرفته است :

جدول (۲): شرایط مرزی

جهت / بلوک	بلوک۱	بلوک۲	بلوک۳
Xmin	ورودی دبی	دیوار	دیوار
Xmax	ورودی دبی	دیوار	دیوار
Ymin	ورودی دبی	دیوار	متقارن
Ymax	ورودی دبی	متقارن	خروجی
Zmin	متقارن	دیوار	دیوار
Zmax	فشار ثابت	متقارن	دیوار



شکل(۴): نحوه بلوک‌بندی

معتبرسازی نتایج عددی

مدل‌سازی فیزیکی سرریز نیلوفری البرز، توسط موسسه تحقیقات آب ایران[2] انجام گرفته است. بر روی مدل فیزیکی سد البرز، به ازای چهار دبی(۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر

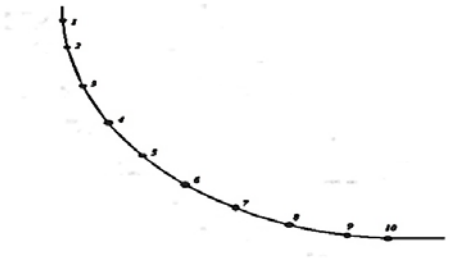
[1] Aspect ratio

[2] Iran Water Research Institute

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

ثانیه) آزمایش انجام شده است و نتایج فشار بر روی ۱۰ نقطه با کمک پیزومتر در بستر زانویی سرریز نیلوفری سد البرز، مشخص شده است (شکل ۵). در این پژوهش برای معتبرسازی نتایج عددی با مدل FLOW3D، برای چهار دبی مدنظر نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. در جدول (۳)، نتایج ارتفاع معادل فشار پیزومتریک در ده نقطه کف زانویی در مدل عددی و میزان تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی را در دبی‌های مشخص و در همان نقاطی که پیزومتر در آزمایشگاه کار گذاشته شده است، نشان می‌دهد.



شکل (۵): مکان پیزومترها بر روی کف زانویی

جدول (۳): مقایسه نتایج فشار

پیزومتر / دبی m^3/s	۲۵۰ آزمایشگاه	۲۵۰ عددی	۶۰۰ آزمایشگاه	۶۰۰ عددی	۸۰۰ آزمایشگاه	۸۰۰ عددی	۹۵۰ آزمایشگاه	۹۵۰ عددی
۱	۱/۸۳	۱/۵	۵/۰۴	۳/۷۳	۲/۰۴	۲/۱	۲۳/۷۶	۲۰/۴۷
۲	۲/۰۹	۱/۸۳	۵/۵۲	۶/۸۹	۳/۱۶	۳/۶۷	۲۶/۸۹	۲۴/۲
۳	۳/۵۳	۲/۸۱	۱۱/۲۴	۱۴/۰۶	۱۴/۲۴	۱۶/۸	۳۰/۶۴	۳۳/۶
۴	۱۳/۵۶	۱۵/۳۹	۱۹/۷۷	۲۳/۳۵	۲۶/۴۲	۲۵/۷	۳۳/۳۴	۳۶
۵	۱۵/۱۷	۱۶/۸۲	۲۳/۱	۲۵/۴۷	۲۸/۸۸	۲۹/۳	۳۳/۵۴	۳۶/۷۵
۶	۱۳/۸۳	۱۴/۵۸	۲۲/۱۹	۲۳/۶	۳۰/۷۶	۳۳/۲۱	۳۴/۴۱	۳۵/۶
۷	۹/۹۳	۸/۸۵	۲۲/۷۹	۲۲/۲۳	۲۸/۷۹	۲۶/۷۸	۳۳/۵	۳۱/۲
۸	۹/۳۸	۸/۴۱	۲۲/۴۵	۲۰/۸۲	۲۶/۹۵	۲۴/۴	۳۰/۵۹	۲۷
۹	۹/۳۷	۹/۰۸	۱۸/۱۶	۱۷	۲۳/۷۳	۲۲/۴	۲۶/۹۴	۲۴/۲
۱۰	۶/۶۲	۵/۸۵	۱۳/۲۷	۱۳	۱۸/۴۱	۲۰/۸	۲۱/۰۷	۱۹/۴

همان‌طور که در جدول (۳) مشخص است، تطابق مطلوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل عددی قابل استناد هستند. در این پژوهش برای مقایسه مدل‌های عددی و آزمایشگاهی در دبی‌های مختلف از روش MAER که به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود، استفاده شده است. مزیت پارامتر MAER این است که بدون درنظرگرفتن واحدها و کمیت‌های اندازه‌گیری، نسبت بین داده-های واقعی و محاسباتی را بیان می‌کند.

$$\mathrm{MAER} = \frac{\left|\frac{Ce-Ca}{Ce}\right|}{n} * 100 \qquad (۴)$$

که در آن :

Ce = مقدار عددی حاصل از مدل‌سازی، Ca = مقدار نتایج آزمایشگاهی و N = تعداد داده‌ها.

نتایج میزان خطا در جدول (۴) نشان می‌دهد که در پیزومترهای میانی، تطابق بیشتر بوده و به دلیل انحنای موجود در زانویی تغییر جهت جریان بیشتر شده و درنتیجه تغییر مومنتم افزایش می‌یابد. با افزایش مومنتوم، نیروی گریز از مرکز بیشتر می‌شود که سبب ضربات دینامیکی بزرگ‌تر (که دلیل به وجود آمدن فشار بیشتری برای این ناحیه از زانویی است) می‌گردد.

جدول (۴): برآورد میزان خطا

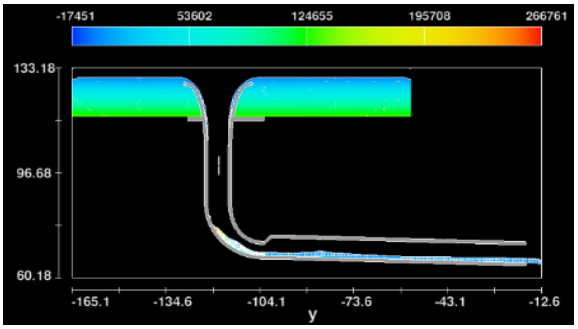
پیزومتر / دبی m^3/s	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۱	٪۲۲	٪۳۵	٪۳	٪۱۶
۲	٪۱۴	٪۱۹	٪۱۳	٪۱۱
۳	٪۲۵	٪۲۰	٪۱۵	٪۹
۴	٪۱۱	٪۱۵	٪۳	٪۷

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

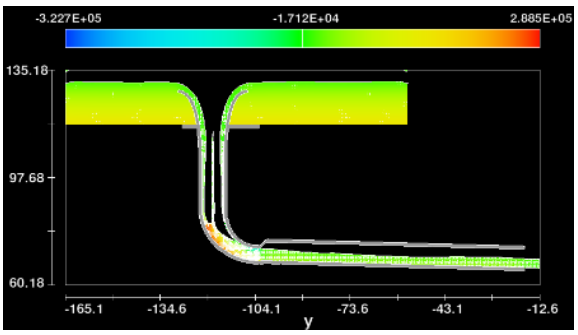
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

پیزومتر / دبی m^3/s	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۵	٪۹	٪۹	٪۱	٪۸
۶	٪۷	٪۶	٪۷	٪۳
۷	٪۱۲	٪۲	٪۷	٪۷
۸	٪۱۱	٪۷	٪۱۰	٪۱۳
۹	٪۳	٪۶	٪۶	٪۱۱
۱۰	٪۱۳	٪۲	٪۱۱	٪۸
خطای متوسط	٪۱۲/۷	٪۱۲/۱	٪۸/۲	٪۹/۳

همچنین میزان خطای متوسط در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دبی، متوسط خطا کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از پر شدن مقطع زانویی باشد. ارتفاع معادل فشار در طول زانویی، ابتدا حالت افزایشی دارد و سپس در نقاط انتهایی حالت کاهشی پیدا می‌کند و این رفتار برای تمام دبی‌ها به همین‌گونه است که می‌تواند به این علت باشد که در نقاط میانی (کاسه زانویی)، جریان با ضربات دینامیکی بزرگ‌تری به علت تغییر جهت جریان به کف زانویی برخورد می‌کند. همان‌گونه که در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود با افزایش میزان دبی، ارتفاع معادل فشار به دلیل ضربه‌های دینامیکی بزرگ‌تری که به وجود می‌آید بیشتر می‌شود و در دبی‌های بعد از استغراق زانویی (در دبی ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه) بیشتر نمایان می‌گردد. این امر به این دلیل است که بعد از مستغرق شدن، آب با سرعت کمتری (به دلیل پر بودن مقطع) جریان می‌یابد و درنتیجه فشار بیشتر می‌گردد.



شکل (۶): منحنی هم‌تراز الگوی جریان در حالت غیر استغراق زانویی



شکل (۷): منحنی هم‌تراز الگوی جریان در حالت استغراق زانویی

نتایج عددی سرعت متوسط برای دبی‌های درنظر گرفته‌شده در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): نتایج عددی سرعت سرریز نیلوفری البرز

پیزومتر / دبی m^3/s	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۱	۲۴/۵	۲۵/۶	۱۸	۲۲/۲۱
۲	۲۴/۷	۲۶/۵	۱۸/۴	۲۲/۳
۳	۲۲/۶	۲۲/۶	۱۷	۲۴/۵
۴	۱۶/۳	۲۱/۳۶	۲۰	۲۴/۷
۵	۱۷/۷۵	۲۰/۹۵	۲۰/۵	۲۲/۳
۶	۱۸/۴۱	۲۶/۰۱	۱۹	۲۴/۸
۷	۱۸/۸۲	۲۷/۵	۲۱	۲۸/۲
۸	۲۱/۶	۲۹/۱	۲۴/۹	۳۲/۵
۹	۲۳/۱۱	۲۹/۹	۲۷/۱	۳۷/۲
۱۰	۲۵/۲۰	۳۰	۲۸/۵۴	۴۲/۳

نتایج میزان سرعت نشان می‌دهد که هرچقدر به سمت انتهای زانویی نزدیک‌تر می‌شویم، سرعت حالت افزاینده خواهد داشت که می‌تواند به دلیل تأثیر هندسه انقباضی مقطع باشد. همچنین در نقاط ابتدایی کف زانویی به دلیل تغییر هندسه از شفت قائم به محیط انحنادار، سرعت زیاد است.

به کمک رابطه (۱) مقدار اندیس کاویتاسیون برای دبی‌های ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه بر اساس اطلاعات مقادیر سرعت و فشار بر روی کف زانویی در نقاط مشخص، محاسبه شده است. جدول (۶) نتایج شاخص کاویتاسیون را برای سرریز نیلوفری سد البرز نشان می‌دهد.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

جدول (۶): نتایج عددی سرعت سرریز نیلوفری البرز

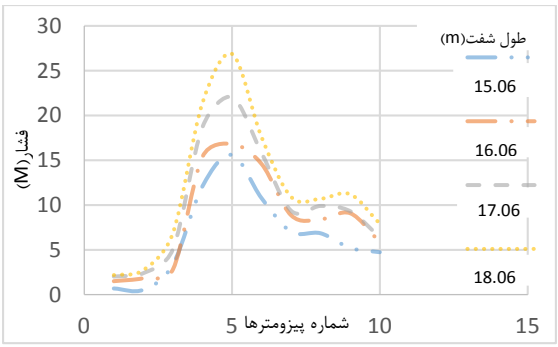
پیزومتر / دبی m^3/s	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۱	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۸۳
۲	۰/۰۶	۰/۲	۰/۲۱	۰/۹۸
۳	۰/۱۱	۰/۵۵	۱/۱۶	۱/۱۲
۴	۱/۱۶	۱/۰۲	۱/۲۴	۱/۲۴
۵	۱/۰۷	۱/۱۵	۱/۴۱	۱/۴۸
۶	۰/۸۶	۰/۷	۱/۸۳	۱/۱۶
۷	۰/۵	۰/۵۹	۱/۲۲	۰/۸۰
۸	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۷۸	۰/۵۱
۹	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۶۱	۰/۳۵
۱۰	۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۵۱	۰/۲۱

نتایج نشان می‌دهد که در محل اتصال شفت قائم به زانویی خطر کاویتاسیون وجود دارد. همچنین در کاسه زانویی به دلیل مومنتم بزرگ‌تر که سبب ایجاد فشار دینامیکی بیشتری می‌گردد، زانویی سرریز در منطقه ایمن قرار دارد. همچنین در انتهای زانویی همان‌طور که در بخش سرعت هم اشاره شده است هندسه انقباضی مقطع سبب به وجود آمدن سرعت بیشتری شده که درنتیجه شاخص کاویتاسیون دوباره حالت کاهشی پیدا می‌کند.

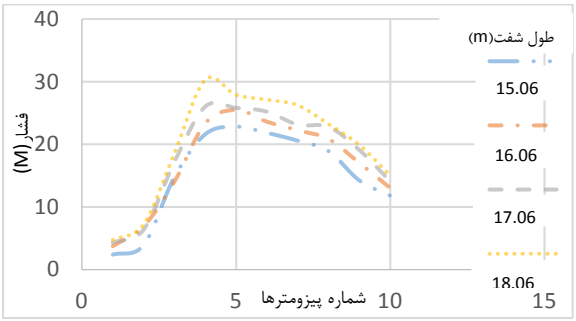
نتایج عددی برای بررسی کاویتاسیون

پارامتر فشار

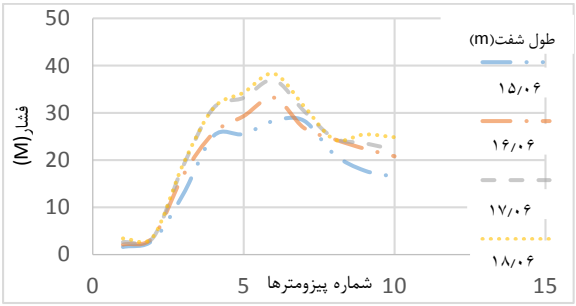
ازآنجایی‌که فشار به عنوان یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در بررسی کاویتاسیون است، در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر ارتفاع شفت قائم (فاصله زیر سرریز نیلوفری تا ابتدای زانویی) بر روی فشار وارد بر بستر زانویی، برای مقادیر مختلف طول شفت قائم و دبی‌های مختلف مدل‌سازی عددی انجام شده است. شکل‌های (۸) تا (۱۱)، نتایج فشار به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی برای دبی‌های ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه، در نقاط معین‌شده برای طول‌های مختلف شفت قائم (۱۵/۰۶، ۱۶/۰۶، ۱۷/۰۶، ۱۸/۰۶ متر)، را نشان می‌دهد.



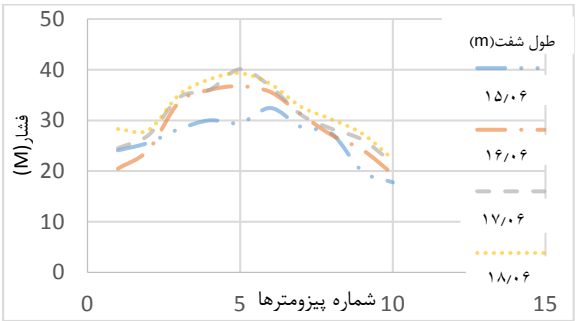
شکل (۸): مقایسه نتایج فشار برای طول‌های مختلف شفت قائم در کف زانویی در دبی ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل (۹): مقایسه نتایج فشار برای طول‌های مختلف شفت قائم در کف زانویی در دبی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل (۱۰): مقایسه نتایج فشار برای طول‌های مختلف شفت قائم در کف زانویی در دبی ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل (۱۱): مقایسه نتایج فشار برای طول‌های مختلف شفت قائم در کف زانویی در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه

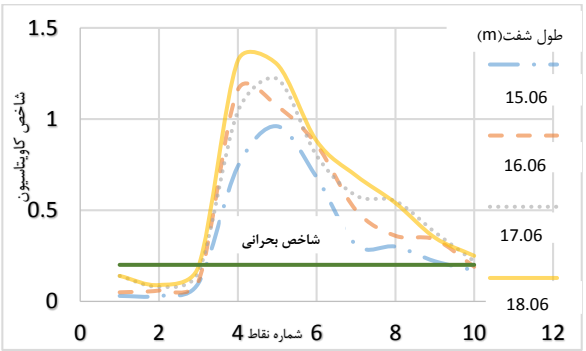
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

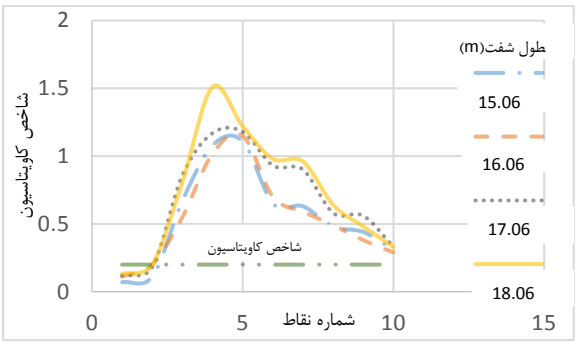
همان‌گونه که در اشکال (۸) تا (۱۱) نشان داده شده است، مقادیر ارتفاع معادل فشار در همه دبی‌ها و برای طول‌های مختلف شفت قائم، در پیزومترهای ابتدایی و انتهایی کمتر از نقاط میانی هستند. به‌عبارت‌دیگر بیشینه منحنی‌ها مربوط به پیزومترهای میانی است. در کاسه زانویی، آب با ضربه دینامیکی بزرگ‌تری به کف زانویی برخورد می‌کند و به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز جریان تماس بیشتری با نقاط میانی دارد. اما در انتهای زانویی، هندسه انقباضی مقطع سبب می‌شود که ارتفاع معادل فشار کاهش یابد. بررسی اشکال (۸) تا (۱۱) نشان می‌دهند که با تغییر ارتفاع شفت قائم، مقادیر فشار وارد بر بستر زانویی نیز با تغییرات مواجه می‌گردند. به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع شفت قائم، مقادیر فشار افزایش یافته است. همچنین با افزایش دبی، مخصوصاً در دبی‌های بعد از مستغرقی، که زانویی پر از آب می‌گردد، فشار ناشی از وزن آب وارد بر بستر زانویی بیشتر شده و کف زانویی در معرض ضربه‌های دینامیکی بزرگ‌تری قرار گرفته است. به‌طوری‌که با مستغرق شدن زانویی در دبی ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه به بعد، فشار در پیزومترهای میانی به بیشتر از ۴۰ متر ستون آب می‌رسد. همچنین با استغراق زانویی و آرام‌تر شدن جریان، اختلاف بین کمینه و بیشینه فشار نیز کمتر می‌شود.

شاخص کاویتاسیون

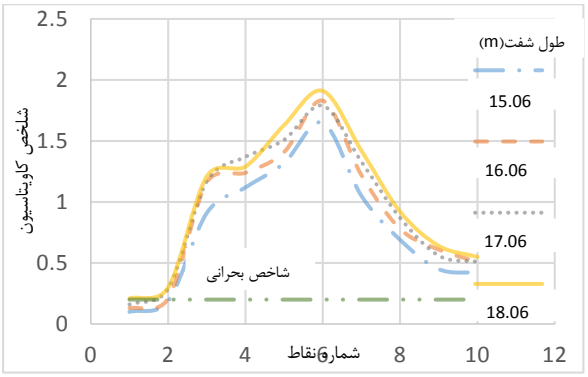
به کمک رابطه (۱) مقدار شاخص کاویتاسیون برای دبی‌های ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه بر اساس اطلاعات مقادیر سرعت و فشار بر روی کف زانویی در نقاط مشخص، محاسبه شده است. اشکال (۱۲) تا (۱۵) نتایج شاخص کاویتاسیون را برای دبی‌های مشخص در نقاط معین و برای طول‌های مختلف شفت قائم نشان می‌دهد.



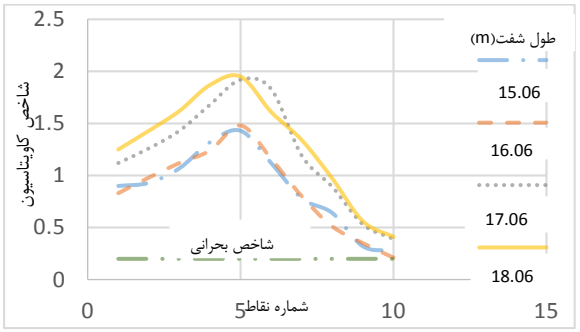
شکل (۱۲): نمودار شاخص کاویتاسیون برای طول‌های مختلف شفت قائم در دبی ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل (۱۳): نمودار شاخص کاویتاسیون برای طول‌های مختلف شفت قائم در دبی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل (۱۴): نمودار شاخص کاویتاسیون برای طول‌های مختلف شفت قائم در دبی ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه



شکل (۱۵): نمودار شاخص کاویتاسیون برای طول‌های مختلف شفت قائم در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه

در دبی ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه در نقاط ۱ تا ۳ که در محل ورود از شفت قائم به محیط دارای انحنا هستند، شاخص کاویتاسیون شرایط بحرانی را بر اساس مرجع (۳) نشان می‌دهد. برای بهبود شرایط حاکم، علاوه بر نیاز به قرار دادن هواده، به تغییرات هندسی تدریجی در محل ورودی نیز نیاز است. در دبی‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه فقط در دو نقطه ۱ و ۲ در محل ورودی،

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

شاخص در منطقه بحرانی قرار دارد که نیاز به هواده برای حفاظت وجود دارد. در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه، شاخص از میزان بحرانی فاصله دارد.

همان‌طور که در اشکال (۱۲) تا (۱۵) مشخص است، نمودارهای شاخص کاویتاسیون دارای روندی افزایشی و سپس کاهشی هستند. همچنین شاخص کاویتاسیون در نقاط میانی، به دلیل وجود ضربه‌های دینامیکی بزرگ‌تر که سبب بالا رفتن فشار می‌شوند بیشتر از سایر نقاط است و سبب می‌شود که در کاسه زانویی پدیده کاویتاسیون تهدیدی جدی برای سرریز نیلوفری ایجاد نکند.

همچنین با افزایش میزان دبی، شاخص کاویتاسیون بیشتر می‌گردد. به‌طورکلی، افزایش دبی سبب تماس بیشتر آب با زانویی و درنتیجه ایجاد وزن آب بیشتر و افزایش فشار می‌گردد. به‌طوری‌که در دبی‌هایی که زانویی در حالت مستغرقی قرار دارد، میزان شاخص کاویتاسیون در نقاط میانی به نزدیک ۲ رسیده است.

همچنین، با افزایش طول شفت قائم میزان شاخص کاویتاسیون نیز روندی افزایشی خواهد داشت. دلیل این نکته، همان‌طور که در بخش قبل نیز ذکر شده است، این است که با افزایش طول شفت قائم، اصطکاک بیشتر شده و درنتیجه هد ستون آب بیشتر می‌شود که سبب می‌شود وزن آب وارد بر کف زانویی بیشتر گردد. باوجود آن‌که هد پتانسیل اضافه شده سبب افزایش سرعت هم می‌گردد، اما در مجموع (با توجه به رابطه (۱))، شاخص کاویتاسیون بیشتر شده و در اکثر نقاط از شاخص کاویتاسیون بحرانی فاصله گرفته است. همچنین میزان افزایش شاخص ناشی از افزایش طول شفت در کاسه زانویی بیشتر از بقیه نقاط است که به دلیل ضربه‌های دینامیکی و تماس بیشتر آب با این ناحیه از زانویی است.

همچنین با تغییر طول شفت قائم از ۱۶/۰۶ متر به ۱۷/۰۶ متر، شاخص کاویتاسیون به خصوص در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه که دبی استغراق سرریز نیلوفری البرز است (احسانی و صالحی نیشابوری[1] ۱۳۹۴)، افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. البته از این طول به بعد، مثلاً در ۱۸/۰۶ متر، در اکثر نقاط اندازه‌گیری شده دارای تغییرات افزایشی اندکی است. درنتیجه با توجه به تحقیق حاضر و از منظر پدیده کاویتاسیون، بهترین طول شفت قائم برای سرریز نیلوفری سد البرز، ۱۷/۰۶ متر پیشنهاد می گردد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پارامترهای مهم هیدرولیکی اثرگذار بر پدیده کاویتاسیون مانند فشار توسط مدل‌سازی عددی در دبی‌های مختلف و در طول‌های مختلف شفت قائم با کمک نرم‌افزار FLOW3D محاسبه شدند. سپس برای نشان دادن نقاطی که خطر کاویتاسیون آن‌ها را تهدید می‌کند از شاخص کاویتاسیون استفاده شده است. نتایج فشار حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی سرریز نیلوفری البرز مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است، که نتایج تطابق مناسبی را بین مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نقطه بیشینه مقادیر ارتفاع معادل فشار در همه دبی‌ها و برای طول‌های مختلف شفت قائم، در پیزومترهای میانی که در کاسه زانویی قرار دارد، است. درنتیجه شاخص کاویتاسیون هم برای این نواحی بیشتر از سایر نقاط است. محتمل‌ترین نقاط برای رخداد خطر کاویتاسیون، نقاط ابتدایی ورودی به زانویی و نقاط انتهایی هستند، که می‌تواند به دلیل تغییرات هندسی در این نواحی باشد. درنتیجه توصیه می‌شود که در صورت امکان تغییرات شعاع در محل ورودی از شفت قائم به زانویی و همچنین از زانویی به تونل افقی به‌صورت تدریجی باشد. همچنین نشان داده شده است که با تغییر در ارتفاع شفت قائم، مقادیر فشار وارد بر بستر زانویی نیز تغییر می‌کند و افزایش طول شفت قائم (زمانی که دبی ورودی به مدل عددی یکسان است)، فشار وارد بر زانویی را زیاد می‌کند و سبب افزایش شاخص کاویتاسیون می‌گردد. درنتیجه پیشنهاد می‌شود که سایر سرریزهای نیلوفری، در صورت امکان با طول‌های بیشتری طراحی گردند. همچنین با افزایش دبی (مخصوصاً برای دبی‌های بعد از مستغرقی که زانویی پر از آب می‌شود، و کف زانویی در معرض ضربه‌های دینامیکی بزرگ‌تری قرار می‌گیرد)، فشار ناشی از وزن آب بیشتر شده که افزایش شاخص کاویتاسیون را در پی خواهد داشت. با توجه به نتایج این پژوهش و باوجودآنکه مبنای طراحی سرریزها دبی‌های نظیر ۱۰۰۰۰

[1] Ehsani & Salehi Neyshabouri

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]

ساله هستند، لازم است که در دبی‌های پایین‌تر نیز برای جلوگیری از خطر کاویتاسیون کنترل طرح صورت گیرد.

مراجع

۱- احسانی، م. و صالحی نیشابوری، س. ع. ا. (۱۳۹۴). "شبیه‌سازی عددی روند عبور جریان از سرریز نیلوفری." کنفرانس علوم و مهندسی آب، وزارت نیرو.

۲- رمضانی، س. (۱۳۹۲). "بررسی عددی و آزمایشگاهی میدان جریان در سرریزهای نیلوفری." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب،دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی.

۳- روحانی، م. (۱۳۸۵). "شبیه‌سازی عددی شکل‌گیری کاویتاسیون در سرریز شوت." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، آب، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- روحانی، م. و صالحی نیشابوری، س. ع. ا. (۱۳۸۹). "شبیه‌سازی عددی اثر دبی بر شکل‌گیری کاویتاسیون در سرریز سد شهید عباسپور." کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه رازی کرمانشاه.

۵- طباطبایی، ج. (۱۳۷۱). "کاویتاسیون در سازه‌های هیدرولیکی و راه‌های مقابله با آن." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی شریف.

۶- غفاری، م. (۱۳۹۱). "بررسی کاویتاسیون در سرریزهای نیلوفری با استفاده از منطق فازی و مدل‌های CFD." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۷- " گزارش مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد مخزنی البرز ."، موسسه تحقیقات آب ایران، ۱۳۸۰

8- Asadsangabi, F., Talebbeydokhti, N. and Rahnavard, M. (2014). “ Two phase flow modeling in shaft spillways using volume of fluid (VOF) method”. IJST, *Transactions of Civil Engineering*. 38(C1), 99-109.

9- Eisenhauer, N. (1987). “Location of aerators in spillways.” *Concrete International*. 9(3), 62-66.

10- Falvey, H. T. (1982). “Predicting cavitation in tunnel spillways”. *Water Power and Dam Construction*. 34, 13-15

11- FLOW3D, User Manual

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.6.1]