

## بررسی عددی تأثیر تغییرات ارتفاع شفت قائم بر شکل گیری کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری

مجید احسانی<sup>۱</sup>

سید علی اکبر صالحی نیشابوری\*<sup>۲</sup>

### چکیده

در قسمت زانویی سرریزهای نیلوفری انتظار می‌رود، به دلیل وجود سرعت بالای جریان که منجر به جداسازی 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، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. \* استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، salehi@modares.ac.ir

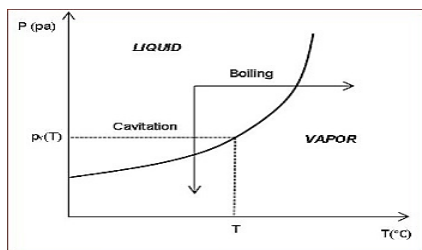
## مقدمه

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.

از آنجایی که 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<sup>۱</sup> (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، گلن کنیون<sup>۲</sup>، بلومسا<sup>۳</sup>، هوور<sup>۴</sup> یلوتیل<sup>۵</sup> و کارون<sup>۱</sup> 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<sup>۶</sup> (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 به شدت 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 در نهایت 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. به طور 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 در صورتی که 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 قابل توجهی کاهش داد. البته مؤثرترین روش برای کاهش یا حذف پتانسیل کاویتاسیون روش هوادهی است. بررسی‌ها نشان

<sup>5</sup> Yellowtail  
<sup>6</sup>Falvey

<sup>1</sup> Rouhani  
<sup>2</sup> Glen canyon  
<sup>3</sup>Blue Mesa  
<sup>4</sup> Hoover

کاهش فشار در نقطه فشار کمینه به فشار دینامیکی سیال) و حذف جملات کوچک، در نهایت 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<sup>۴</sup> (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<sup>۵</sup> (۲۰۱۴)، به بهینه‌سازی شکل ورودی سرریز نیلوفری با هدف افزایش آبگذری و کاهش امکان‌پذیری کاویتاسیون پرداختند.

غفاری<sup>۶</sup> (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 معین شده بر روی بدنه سرریز با کمک منطق فازی بررسی شد. همچنین نقاط بحرانی سرریز نیلوفری مشخص شد.

رضانی<sup>۷</sup> (۱۳۹۲)، تأثیرات قطر تاج سرریز نیلوفری و عمق تقرب بر روی میدان جریان را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. وی، سپس مدل هیدرولیکی سرریز نیلوفری را در FLOW3D شبیه‌سازی کرد، و پس از صحت‌سنجی، 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

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<sup>۱</sup> سرعت بحرانی را برای شروع وقوع کاویتاسیون بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفت. اما از آنجا که این معیار نمی‌توانست تأثیر فشار و همچنین خرابی‌های شدید غیرعادی در پایین دست 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<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. شاخص کاویتاسیون که یک پارامتر بدون بعد است و از رابطه برنولی مشتق می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (1)$$

که در آن:

$\sigma$  = 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<sup>۳</sup> (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

<sup>۵</sup>Asadsangabi et al  
<sup>۶</sup>GHaffari  
<sup>۷</sup>Ramzani

<sup>۱</sup>Aisenhauer  
<sup>۲</sup>Cavitation index  
<sup>۳</sup>Tabatabaie  
<sup>۴</sup>Rouhani & SalehiNeyshabouri

مومنتم در جهات محورهای سه گانه مختصات که به معادلات ناور-استوکس معروف هستند بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنتم به بیان ریاضی هستند.

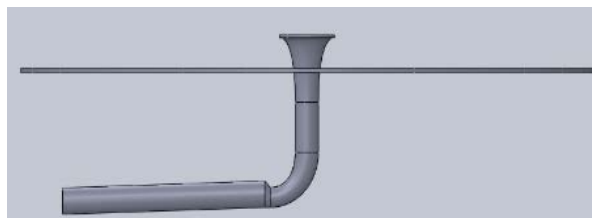
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} =$$

$$\underbrace{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{شتاب محلی}} + \underbrace{\frac{\partial g}{\partial x_i}}_{\text{شتاب جابجایی}} + \underbrace{\frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right)}_{\text{ترم پخش}} \quad (3)$$

در FLOW3D از پنج مدل آشفتگی استفاده شده است که عبارتند از: طول اختلاط پرناتل، یک معادله‌ای، دو معادله-ای  $K - \epsilon$ ، مدل‌های RNG و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۱</sup>. 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. به‌طور کلی مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به مدل  $K - \epsilon$  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، زانوپی، 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 به-صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار

نیلوفری است، که بنا به وجود سرعت بالای جریان، جداسازی و افت فشار ناشی از انحناء 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  $\frac{272 m^3}{s}$ ، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله  $\frac{626 m^3}{s}$ ، دبی حداکثر سیلاب محتمل  $\frac{1004 m^3}{s}$  و بار آب روی سرریز به ازای دبی حداکثر سیلاب  $\frac{4}{74}$  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.

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

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

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

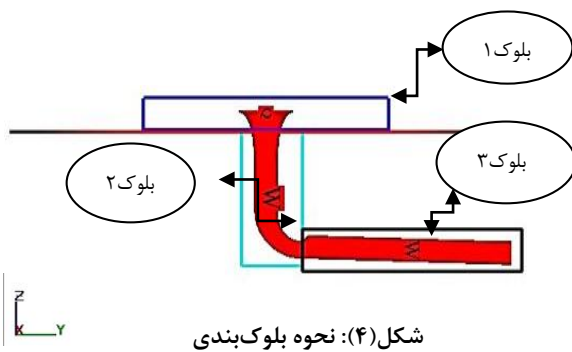
$$P_r = \frac{P_m}{P_p} = L_r = 1/42.857 \quad \text{مقیاس فشار}$$

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

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 کارترین برای تعریف شرایط مرزی شش وجه مشخص وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورها شامل  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Y_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $X_{min}$  است (شکل ۴). لازم به ذکر است که کلیه این مشخصات در هر بلوک به صورت جداگانه تعریف می‌شود. برای انجام محاسبات حل میدان جریان در هر یک از این بلوک‌ها، بعد از اجرا و تحلیل حساسیت‌ها مناسب‌ترین شرایط مرزی به صورت جدول (۲) مورد استفاده قرار گرفته است:

جدول (۲): شرایط مرزی

بلوک	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۳	جهت
Xmin	ورودی دبی	دیوار	دیوار	
Xmax	ورودی دبی	دیوار	دیوار	
Ymin	ورودی دبی	دیوار	مقارن	
Ymax	ورودی دبی	مقارن	خروجی	
Zmin	مقارن	دیوار	دیوار	
Zmax	فشار ثابت	مقارن	دیوار	



### معتبرسازی نتایج عددی

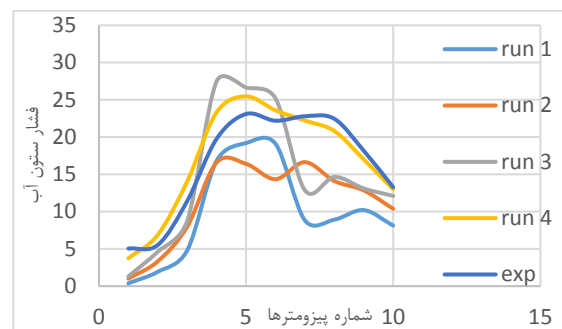
مدل‌سازی فیزیکی سرریز نیلوفری البرز، توسط موسسه تحقیقات آب ایران<sup>۲</sup> انجام گرفته است. بر روی مدل فیزیکی سد البرز، به ازای چهار دبی (۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر

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

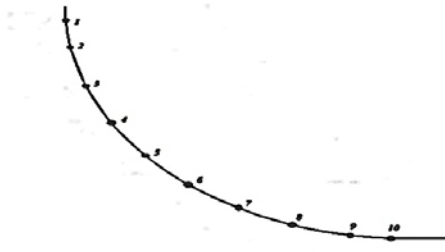
حساسیت مدل‌های عددی به شبکه‌بندی و انفصال میدان حل و همچنین شرایط مرزی یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی هستند. نرم‌افزار FLOW3D نسبت به مرزهای جامد و شبکه‌بندی، برخورد نسبتاً متفاوتی را نسبت به سایر بسته‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارد. از این رو برای مشخص کردن حدود شبکه‌بندی، بلوک‌هایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه‌های 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<sup>۱</sup>، مقدار واحد در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): حساسیت سنجی سلول

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



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



شکل (۵): مکان پیزومترها بر روی کف زانویی

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.

جدول (۳): مقایسه نتایج فشار

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

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 در نتیجه تغییر مومنتم افزایش می‌یابد. با افزایش مومنتم، 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

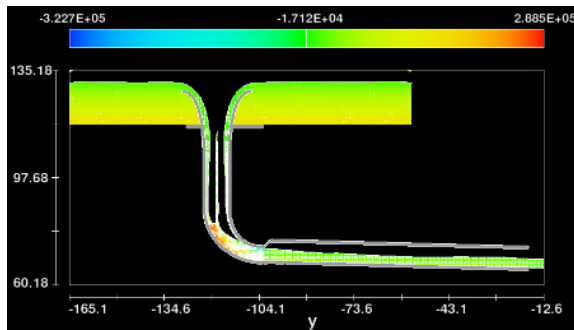
دبی $m^3/s$	پیزومتر	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۱	۱	۲۲٪	۳۵٪	۳٪	۱۶٪
۲	۲	۱۴٪	۱۹٪	۱۳٪	۱۱٪
۳	۳	۲۵٪	۲۰٪	۱۵٪	۹٪
۴	۴	۱۱٪	۱۵٪	۳٪	۷٪

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 به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود، استفاده شده است. مزیت پارامتر MAER این است که بدون در نظر گرفتن واحدها و کمیت‌های اندازه‌گیری، نسبت بین داده‌های واقعی و محاسباتی را بیان می‌کند.

$$MAER = \frac{\left| \frac{Ce - Ca}{Ce} \right|}{n} * 100 \quad (4)$$

که در آن:

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



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

نتایج عددی سرعت متوسط برای دبی‌های در نظر گرفته شده در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): نتایج عددی سرعت سرریز نیلوفری البرز

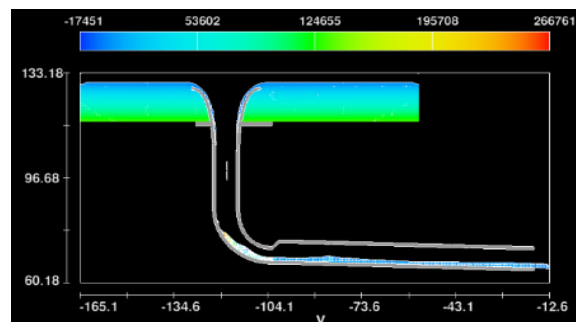
دبی $m^3/s$	پیزومتر	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۱	۲۴/۵	۲۵/۶	۱۸	۲۲/۲۱	
۲	۲۴/۷	۲۶/۵	۱۸/۴	۲۲/۳	
۳	۲۲/۶	۲۲/۶	۱۷	۲۴/۵	
۴	۱۶/۳	۲۱/۳۶	۲۰	۲۴/۷	
۵	۱۷/۷۵	۲۰/۹۵	۲۰/۵	۲۲/۳	
۶	۱۸/۴۱	۲۶/۰۱	۱۹	۲۴/۸	
۷	۱۸/۸۲	۲۷/۵	۲۱	۲۸/۲	
۸	۲۱/۶	۲۹/۱	۲۴/۹	۳۲/۵	
۹	۲۳/۱۱	۲۹/۹	۲۷/۱	۳۷/۲	
۱۰	۲۵/۲۰	۳۰	۲۸/۵۴	۴۲/۳	

نتایج میزان سرعت نشان می‌دهد که هرچه قدر به سمت انتهایی زانویی نزدیک‌تر می‌شویم، سرعت حالت افزایشده 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.

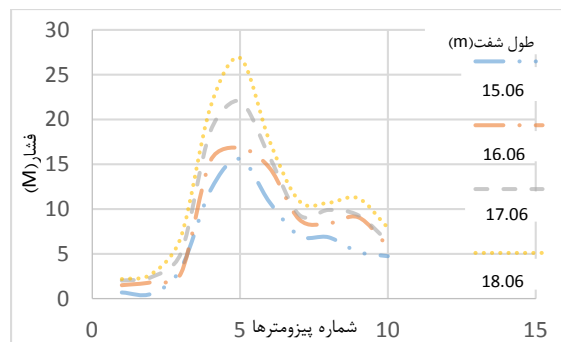
به کمک رابطه (۱) مقدار اندیس کاویتاسیون برای دبی‌های ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه بر اساس اطلاعات مقادیر سرعت و فشار بر روی کف زانویی در نقاط مشخص، محاسبه شده است. جدول (۶) نتایج شاخص کاویتاسیون را برای سرریز نیلوفری سد البرز نشان می‌دهد.

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

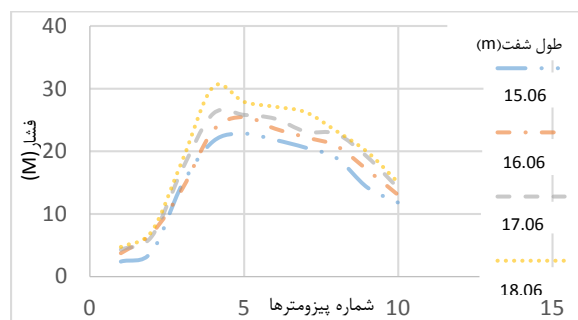
همچنین میزان خطای متوسط در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دبی، متوسط خطا کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از پر شدن مقطع زانویی باشد. ارتفاع معادل فشار در طول زانویی، ابتدا حالت افزایشی دارد و سپس در نقاط انتهایی حالت کاهش پیدا می‌کند و این رفتار برای تمام دبی‌ها به همین گونه است که می‌تواند 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 در نتیجه فشار بیشتر می‌گردد.



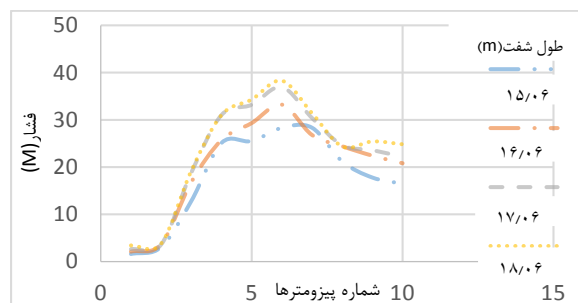
شکل (۶): منحنی هم‌تراز الگوی جریان در حالت غیر استغراق زانویی



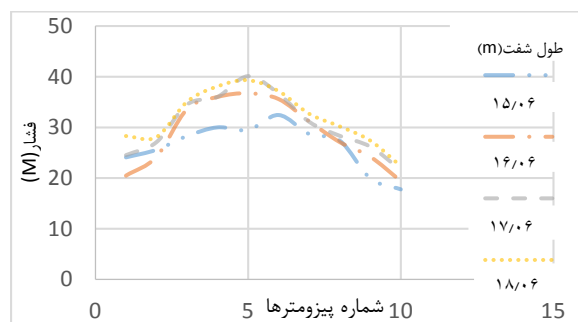
شکل (۸): مقایسه نتایج فشار برای طول‌های مختلف شفت قائم در کف زانویی در دبی ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه



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

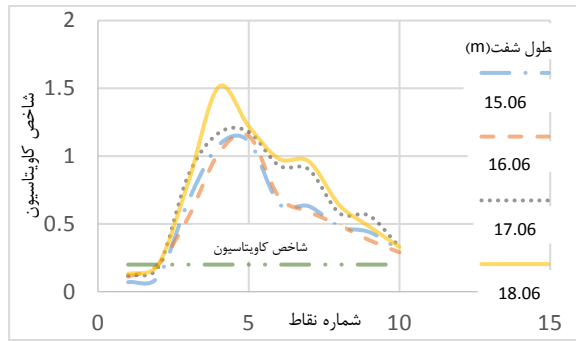
جدول (۶): نتایج عددی سرعت سرریز نیلوفری البرز

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

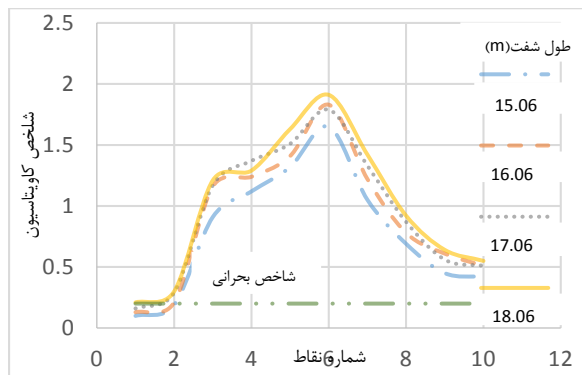
نتایج نشان می‌دهد که در محل اتصال شفت قائم به زانویی خطر کاویتاسیون وجود دارد. همچنین در کاسه زانویی به دلیل مومنتم بزرگ‌تر که سبب ایجاد فشار دینامیکی بیشتری می‌گردد، زانویی سرریز در منطقه ایمن قرار دارد. همچنین در انتهای زانویی همان‌طور که در بخش سرعت هم اشاره شده است هندسه انقباضی مقطع سبب به وجود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

### نتایج عددی برای بررسی کاویتاسیون پارامتر فشار

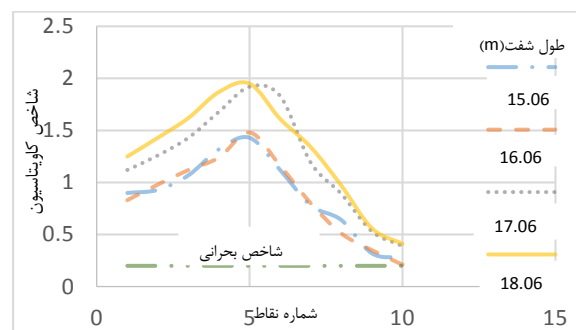
از آنجایی که فشار به عنوان یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در بررسی کاویتاسیون است، در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر ارتفاع شفت قائم (فاصله زیر سرریز نیلوفری تا ابتدای زانویی) بر روی فشار وارد بر بستر زانویی، برای مقادیر مختلف طول شفت قائم و دبی‌های مختلف مدل‌سازی عددی انجام شده است. شکل‌های (۸) تا (۱۱)،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



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



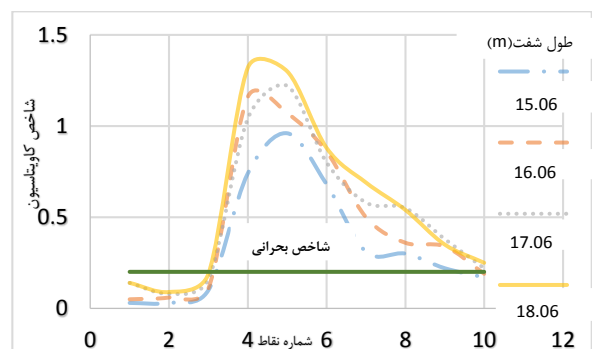
شکل (۱۵): نمودار شاخص کاویتاسیون برای طول‌های مختلف شفت قائم در دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه

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 هوا، 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،

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 پیرومترهای ابتدایی و انتهایی کمتر از نقاط میانی هستند. به عبارت دیگر بیشینه منحنی‌ها مربوط به پیرومترهای 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. به طوری که با افزایش ارتفاع شفت قائم، مقادیر فشار افزایش یافته است. همچنین با افزایش دبی، مخصوصاً در دبی‌های بعد از مستغرق، 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. به طوری که با مستغرق شدن زانویی در دبی ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه به بعد، فشار در پیرومترهای 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 (۱۶): نمودار شاخص کاویتاسیون برای طول‌های مختلف شفت قائم در دبی ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه

تحقیق حاضر و از منظر پدیده کاویتاسیون، بهترین طول شفت قائم برای سرریز نیلوفری سد البرز، ۱۷/۰۶ متر پیشنهاد می گردد.

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر پارامترهای مهم هیدرولیکی اثرگذار بر پدیده کاویتاسیون مانند فشار توسط مدل سازی عددی در دبی های مختلف و در طول های مختلف شفت قائم با کمک نرم افزار FLOW3D محاسبه شدند. سپس برای نشان دادن نقاطی که خطر کاویتاسیون آنها را تهدید می کند از شاخص کاویتاسیون استفاده شده است. نتایج فشار حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی سرریز نیلوفری البرز مورد صحت سنجی قرار گرفته است، که نتایج تطابق مناسبی را بین مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد. نقطه بیشینه مقادیر ارتفاع معادل فشار در همه دبی ها و برای طول های مختلف شفت قائم، در پیژومترهای میانی که در کاسه زانویی قرار دارد، است. در نتیجه شاخص کاویتاسیون هم برای این نواحی بیشتر از سایر نقاط است. محتمل ترین نقاط برای رخداد خطر کاویتاسیون، نقاط ابتدایی ورودی به زانویی و نقاط انتهایی هستند، که می تواند به دلیل تغییرات هندسی در این نواحی باشد. در نتیجه توصیه می شود که در صورت امکان تغییرات شعاع در محل ورودی از شفت قائم به زانویی و همچنین از زانویی به تونل افقی به صورت تدریجی باشد. همچنین نشان داده شده است که با تغییر در ارتفاع شفت قائم، مقادیر فشار وارد بر بستر زانویی نیز تغییر می کند و افزایش طول شفت قائم (زمانی که دبی ورودی به مدل عددی یکسان است)، فشار وارد بر زانویی را زیاد می کند و سبب افزایش شاخص کاویتاسیون می گردد. در نتیجه پیشنهاد می شود که سایر سرریزهای نیلوفری، در صورت امکان با طول های بیشتری طراحی گردند. همچنین با افزایش دبی (مخصوصاً برای دبی های بعد از مستغرقی که زانویی پر از آب می شود، و کف زانویی در معرض ضربه های دینامیکی بزرگتری قرار می گیرد)، فشار ناشی از وزن آب بیشتر شده که افزایش شاخص کاویتاسیون را در پی خواهد داشت. با توجه به نتایج این پژوهش و با وجود آنکه مبنای طراحی سرریزها دبی های نظیر ۱۰۰۰۰

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.

همان طور که در اشکال (۱۲) تا (۱۵) مشخص است، نمودارهای شاخص کاویتاسیون دارای روندی افزایشی و سپس کاهش می هستند. همچنین شاخص کاویتاسیون در نقاط میانی، به دلیل وجود ضربه های دینامیکی بزرگتر که سبب بالا رفتن فشار می شوند بیشتر از سایر نقاط است و سبب می شود که در کاسه زانویی پدیده کاویتاسیون تهدیدی جدی برای سرریز نیلوفری ایجاد نکند.

همچنین با افزایش میزان دبی، شاخص کاویتاسیون بیشتر می گردد. به طور کلی، افزایش دبی سبب تماس بیشتر آب با زانویی و در نتیجه ایجاد وزن آب بیشتر و افزایش فشار می گردد. به طوری که در دبی هایی که زانویی در حالت مستغرق 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، همان طور که در بخش قبل نیز ذکر شده است، این است که با افزایش طول شفت قائم، اصطکاک بیشتر شده و در نتیجه هد ستون آب بیشتر می شود که سبب می شود وزن آب وارد بر کف زانویی بیشتر گردد. با وجود آن که هد پتانسیل اضافه شده سبب افزایش سرعت هم می گردد، 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 ضربه های 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<sup>۱</sup> ۱۳۹۴)، افزایش چشمگیری پیدا می کند. البته از این طول به بعد، مثلاً در ۱۸/۰۶ متر، در اکثر نقاط اندازه گیری شده دارای تغییرات افزایشی اندکی است. در نتیجه با توجه به

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

## مراجع

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

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.

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.

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

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

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

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

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.

11- FLOW3D, User Manual

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