

بررسی عددی تأثیر شعاع زانویی بر شکل‌گیری کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری

مجید احسانی^۱، احسان بهنام طلب^{۲*}، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

۳- استاد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران

*e.behnamtalab@hsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

چکیده

سرریز نیلوفری شامل سه بخش اصلی تاج دایره‌ای، شفت قائم همراه با یک زانویی معروف به گلوگاه و مجرای تقریباً افقی است. در بخش زانویی سرریزهای نیلوفری انتظار می‌رود به دلیل وجود جریان با سرعت بالا که منجر به جداسازی و افت فشار ناشی از زبری و انحناء می‌شود، کاویتاسیون اتفاق بیفتد. این موضوع باعث شده است این سازه‌ها یکی از مستعدترین سرریزها برای وقوع کاویتاسیون باشند. در این پژوهش امکان‌پذیری وقوع کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری با مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی که در مرکز تحقیقات آب در ایران ساخته شده نشان داد که هماهنگی مطلوبی بین مدل عددی و مدل فیزیکی وجود دارد. اثر شعاع زانویی بر نتایج فشار در بدنه سرریز نیلوفری در دبی‌های مختلف و احتمال وقوع کاویتاسیون با استفاده از شاخص کاویتاسیون در بخش دیگری از این پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد تغییر در شعاع زانویی با توجه به تأثیر آن بر انحناء خطوط جریان، اثر قابل توجهی بر بهبود یا افزایش خطر کاویتاسیون خواهد گذاشت. نکته قابل توجه این است که تغییر در شعاع زانویی در هر یک از حالت‌های رژیم جریان آزاد و رژیم جریان مستغرق دارای رفتارهای متفاوتی است. در رژیم جریان آزاد، افزایش شعاع زانویی خطر کاویتاسیون را تشدید ولی در رژیم جریان مستغرق یا پر بودن مقطع زانویی، افزایش شعاع زانویی خطر کاویتاسیون را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهند افزایش دبی در سرریزهای نیلوفری باعث افزایش شاخص کاویتاسیون و در نتیجه کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون می‌شود.

واژگان کلیدی: سرریز نیلوفری، مدلسازی عددی، کاویتاسیون، شعاع زانویی، Flow3D

۱- مقدمه

می‌توان به کارایی مناسب برای احداث دره‌های سنگی تنگ با کوله‌های پرشیب اشاره کرد. این سرریزها بدلیل ویژگی‌های خاص سازه‌ای و هیدرولیکی، در ارتفاع‌های

یکی از رایج‌ترین سرریزها برای تخلیه آب اضافی پشت سدها سرریزهای نیلوفری است. از ویژگی‌های این سرریزها

پدیده‌ای است که از تغییر حالت سیال از مایع به بخار در دمای تقریباً ثابت در اثر کاهش فشار مایع رخ می‌دهد. این پدیده در منطقه‌ای که فشار موجود از فشار بخار یا به عبارتی فشار بحرانی کمتر شود اتفاق می‌افتد [2].

شکل ۲. طرح شماتیک وقوع کاویتاسیون

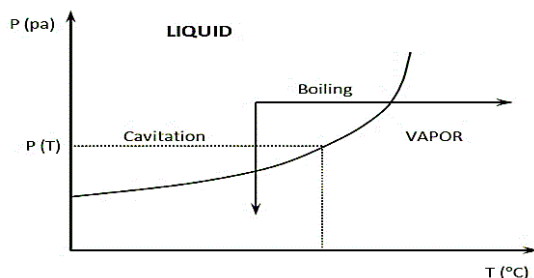


Fig. 2. Schematic diagram of cavitation occurrence

تا مدت‌ها تنها معیار اساسی در خصوص تعیین احتمال وقوع کاویتاسیون سرعت بحرانی بود. آیزنهاور در سال ۱۹۸۷ سرعت بحرانی را برای شروع وقوع کاویتاسیون بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفت [3]. اما از آنجا که 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 ایجاد شده در فشار منفی تشخیص داد از پارامتری به نام شاخص کاویتاسیون^۵ بهره گرفته شد. شاخص کاویتاسیون که یک پارامتر بدون بعد و از رابطه برنولی مشتق شده است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در این رابطه:

σ : شاخص کاویتاسیون، V_0 : سرعت در محل موردنظر

P_0 : فشار در محل موردنظر

P_v : فشار بخار که برابر ۰/۳۳ متر ستون آب است.

فالوی (۱۹۸۲) پژوهشی را براساس بررسی خرابی‌های سرریز تونلی چند سد ارائه نمود. براساس اطلاعات حاصل از این سرریزها، دیاگرامی توسط وی ارائه شده که امروزه معیاری برای بررسی کاویتاسیون براساس شاخص کاویتاسیون است. در این دیاگرام چنانچه شاخص کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲ باشد خطری از جانب کاویتاسیون سازه را تهدید نمی‌کند

محدود آب روی تاج، می‌توانند به سرعت به بیشینه بازدهی خود رسیده و بیشینه دبی را از خود عبور دهند (شکل ۱). مهمترین مزیت سرریزهای نیلوفری کاهش هزینه‌های ساخت آن با استفاده از تونل انحرافی احداث شده در زمان ساخت سد به عنوان تونل افقی است. این سرریزها شامل بخش‌های سازه کنترلی به شکل مدور یا حلزونی، شفت قائم یا مایل که با یک زانویی همراه است، تونل انتقال جریان و سازه پایانی می‌باشد.

شکل ۱. نمونه‌ای از سرریز نیلوفری



Fig. 1. Sample of morning glory spillway

از آنجایی که سرریز یکی از مهمترین و حساس‌ترین بخش‌های یک سد محسوب می‌شود، شناخت مشکلات و خطراتی که با آن مواجه است، لازم و ضروری است. یکی از این خطرات که ممکن است پایداری سازه سرریز را به خطر بیندازد و در نتیجه می‌تواند باعث تخریب کل سازه شود کاویتاسیون است. نمونه‌هایی از این نوع تخریب در سرریز سدهای گل‌کنیون^۱، بلومسا^۲، هوور^۳، یلوتیل^۴ و کارون^۱ رخ داده است [1].

سرعت جریان روی سرریزها در بسیاری از سدهای متوسط و بزرگ دنیا بیش از ۱۰ تا ۴۵ متر بر ثانیه است. در سطح سرریز 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. مطابق شکل (۲)، کاویتاسیون

- 1 Glen canyon
- 2 Blue Mesa
- 3 Hoover
- 4 Yellowtail

۲- مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی عددی جریان عبوری از سرریز نیلوفری از نرم‌افزار Flow3D استفاده شد. این نرم‌افزار، یک نرم‌افزار بسیار 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 تراکم ناپذیر و لزج توسط یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنت در جهت محورهای سه‌گانه مختصات که به معادلات ناویر-استوکس معروف هستند بیان می‌شوند [10].

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial g}{\partial x_i} \\ + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

نرم‌افزار Flow3D از شش مدل آشفتگی طول اختلاط پراتل، یک معادله‌ای، $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌کند. در بین مدل‌های آشفتگی، مدل RNG که براساس یک تکنیک آماری بدست می‌آید 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 [10]. بنابراین در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان آشفته بعد از درستی‌آزمای، از مدل RNG استفاده شده است. همه شبیه‌سازی‌ها زمانی همگرا می‌شوند که باقیمانده از مقدار تعریف‌شده نرم‌افزار یعنی 1×10^{-5} کمتر و شرایط جریان دائم توسط نرم‌افزار گزارش شود.

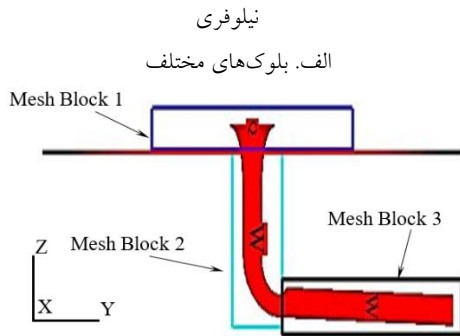
۳- درستی‌آزمایی نتایج مدل عددی

به منظور درستی‌آزمایی مدل عددی ساخته شده با نرم‌افزار Flow3D از مدل فیزیکی ساخته شده سرریز نیلوفری

و اگر بین ۰/۱ تا ۰/۲ باشد راهکارهای جلوگیری از خطر باید اعمال شود و نصب هواده ضروری می‌باشد، و اگر کمتر از ۰/۱ باشد سرریز باید دوباره طراحی شود [2]. اسدسنگابی و همکاران (۲۰۱۴)، به بهینه‌سازی شکل ورودی سرریز نیلوفری با هدف افزایش آبگذری و کاهش امکان پذیری کاویتاسیون پرداختند [4]. غفاری (۱۳۹۱)، به شبیه‌سازی عددی جریان در سرریز نیلوفری با AnsysFluent پرداخت [5]. حسینی و عالمی (۱۳۸۹)، در مطالعه‌ای عملکرد هیدرولیکی سرریزهای نیلوفری و اوجی را به‌وسیله مدل‌سازی عددی بررسی کردند [6]. رمضان (۱۳۹۲)، آثار قطر تاج سرریز و عمق تقرب روی میدان جریان را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرارداد [7]. انجیل‌زاده و نوهانی (۲۰۱۶) به بررسی عددی میدان جریان و اندازه‌گیری منحنی دبی-اشل در سرریز نیلوفری پرداختند [8].

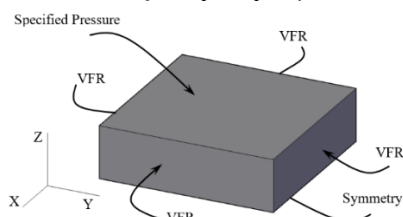
با توجه به مطالعات انجام گرفته، اهمیت موضوع کاویتاسیون در سرریزها، روشن و مشخص است. سرریزهای نیلوفری به دلیل ماهیت آشفته جریان و ویژگی‌های هندسی که دارند، یکی از مستعدترین سرریزها برای وقوع پدیده کاویتاسیون محسوب می‌شوند. یکی از بخش‌هایی که دارای حساسیت زیادی در این زمینه است زانویی سرریز نیلوفری است که بنا به وجود سرعت و ارتفاع بالای جریان، جداسدگی و افت فشار ناشی از انحناء در آن زیاد است [9]. به همین منظور در این پژوهش مطالعه کاویتاسیون در سرریز نیلوفری با کمک مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام شده است. یکی از نوآوری‌های انجام گرفته در این پژوهش بررسی اثر تغییرات شعاع زانویی بر شاخص کاویتاسیون است که در پژوهش‌های قبلی مورد توجه نبوده است. نتایج پارامترهای هیدرولیکی این سرریز مانند فشار و سرعت برای دبی‌های مختلف جریان و شعاع‌های مختلف زانویی، مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس امکان‌پذیری وقوع کاویتاسیون با محاسبه شاخص کاویتاسیون بررسی شده است. همچنین سعی شده است روند اثرگذاری تغییر شعاع بر کاویتاسیون در هر دو حالت رژیم جریان آزاد و مستغرق نیز بررسی شود.

شکل ۴. بلوک‌های مختلف و شرایط مرزی به منظور مش‌بندی سرریز



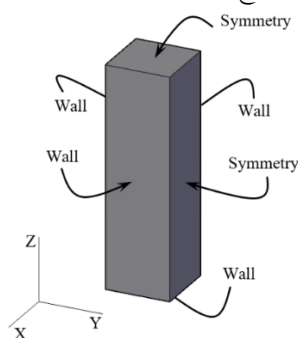
a. Different blocks

ب. شرایط مرزی بلوک ۱



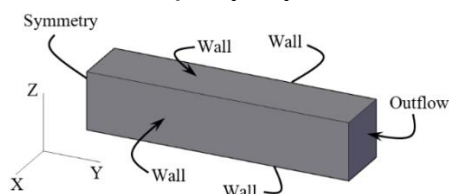
b. Boundary condition in Block 1

ج. شرایط مرزی بلوک ۲



c. Boundary condition in Block 2

د. شرایط مرزی بلوک ۳



d. Boundary condition in Block 3

Fig. 4. Different blocks and Boundary condition for meshing at morning glory spillway

در مختصات کارتزین که در شکل (۴) مشخص شده است برای تعریف شرایط مرزی در هر بلوک مکعبی، شش وجه وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورهای شامل X_{min} ، X_{max} ، Y_{min} ، Y_{max} ، Z_{min} و Z_{max} است. لازم به ذکر است که کلیه این مشخصات در هر بلوک بصورت جداگانه تعریف می‌شوند. مشخصات شرایط مرزی در وجوه مختلف بلوک‌های مش‌بندی در جدول (۱) و شکل (۴) ارائه شده‌اند.

سد البرز که در مؤسسه تحقیقات آب ساخته شده استفاده شد [11]. هندسه سرریز نیلوفری ابتدا در نرم افزار SolidWorks2013 ساخته و سپس به نرم‌افزار Flow3D منتقل شد که شامل بخشی از مخزن، تاج، شفت قائم، زانویی، تبدیل و بخشی از تونل افقی است. مشخصات هندسه ساخته‌شده در شکل (۳) ارائه شده است.

شکل ۳. مشخصات مدل فیزیکی سرریز نیلوفری سد البرز

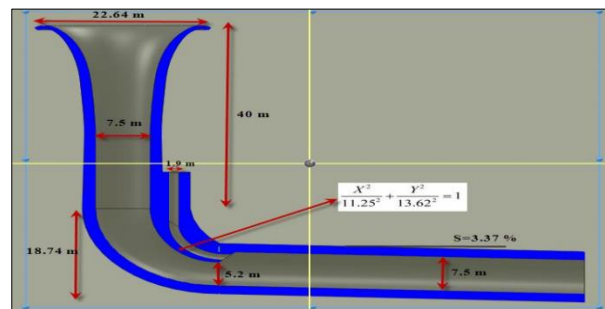


Fig. 3. Specifications of the Alborz morning glory spillway model

جریان به صورت تک‌فاز و سیال نیز تراکم‌ناپذیر تعریف شده است. نرم‌افزار Flow3D برای تشخیص سطح آب از روش حجم سیال^۶ استفاده می‌کند. در این روش برای سلول‌های سطح جریان، که به صورت نیمه‌پر هستند، کمیتی تعریف می‌شود که نسبت پرشدگی آن‌ها از آب را نشان می‌دهد که مقدار یک برای آن، نشان‌دهنده این است که سلول از آب پر شده و مقدار صفر آن، نشان‌دهنده این است که سیالی داخل سلول وجود ندارد. با معلوم بودن این کمیت محل سطح آزاد و زاویه آن در میان سلول‌های میدان حل توسط نرم‌افزار قابل تشخیص است. همچنین در مدل‌های این تحقیق، از شرایط No-Slip (شرایط بدون لغزش) در سطح تماس با دیوار استفاده شده است [10]. برای شبکه‌بندی مدل ساخته شده سرریز نیلوفری همانطور که در شکل (۴) مشخص است از ۳ بلوک مش‌بندی استفاده شد. بلوک شماره ۱ مربوط به تاج سرریز، بلوک شماره ۲ مربوط به شفت قائم و زانویی و بلوک شماره ۳ نیز مربوط به تونل افقی است. نحوه بلوک‌بندی مدل در شکل (۴) ارائه شده است.

جدول ۱. شرایط مرزی در هر بلوک

	Mesh Block 1	Mesh Block 2	Mesh Block 3
X_{min}	VFR	Wall	Wall
X_{max}	VFR	Wall	Wall
Y_{min}	VFR	Wall	Symmetry
Y_{max}	VFR	Symmetry	Outflow
Z_{min}	Symmetry	Wall	Wall
Z_{max}	Specified Pressure	Symmetry	Wall

Table 1. Boundary condition in each block

جدول ۲. حساسیت سنجی مدل نسبت به اندازه سلول

Number of Cells	Mesh Block 1	Mesh Block 2	Mesh Block 3
Model 1	250000	200000	100000
Model 2	350000	300000	150000
Model 3	550000	375000	150000
Model 4	625000	475000	200000

Table 2. Sensitivity of the model relative to cell size

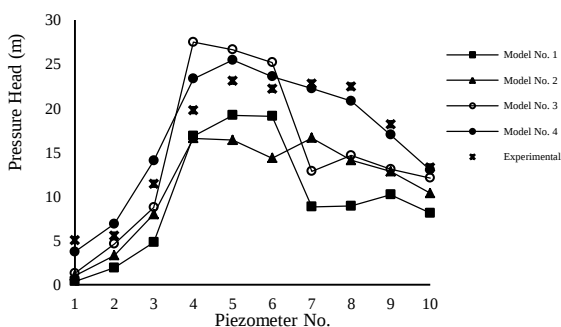
نتایج برداشت فشار در ۱۰ پیزومتر مختلف در کف زانوئی نشان داد که نتایج مدل عددی شماره ۴ به نتایج مدل فیزیکی نزدیکتر است. مقایسه نتایج ۴ مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی در ۱۰ پیزومتر مختلف در کف زانوئی در شکل (۶) نشان داده شده است. نتایج حاکی آن است که مدل شماره ۴ در هماهنگی بهتری با نتایج مدل فیزیکی است و بنابراین در ادامه مدلسازیها از مشخصات مشبندی مدل شماره ۴ استفاده شد. در این مدل در مجموع سه بلوک، نزدیک به $1/300/000$ سلول در نظر گرفته شد. اندازه سلول در بلوک شماره ۱، $0/66$ متر، در بلوک شماره ۲، $0/42$ متر و در بلوک شماره ۳، $0/67$ متر است. به دلیل حساسیت و اهمیت بیشتر زانوئی، سلولهای ریزتری برای بلوک ۲ در نظر گرفته شد.

در این جدول، VFR (Volume Flow Rate) شرایط مرزی دبی ورودی، Wall شرایط مرزی دیوار، Symmetry شرایط مرزی تقارن، Outflow شرایط مرزی خروجی که تمام گرادیانها برابر صفر است و Specified Pressure شرایط مرزی فشار ثابت است که معمولاً برای ثابت نگه داشتن عمق آب مورد استفاده قرار میگیرد.

به منظور تعیین بهترین اندازه سلول در بلوکهای مختلف مشبندی، در چهار مدل مختلف و با اندازه سلول مختلف که در جدول (۲) ارائه شدهاند، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در مدل فیزیکی موردنظر، ۱۹ پیزومتر مختلف به منظور برداشت فشار در بستر و سقف زانوئی قرار داده شده است. مشخصات دقیق پیزومترها در شکل (۵) ارائه شده است.

شکل ۶. فشارهای برداشت شده در نقاط مختلف در دبی ورودی

$600 \text{ m}^3/\text{s}$ برای اندازههای مختلف سلول

Fig. 6. Pressures taken at different points in the discharge $600 \text{ m}^3/\text{s}$ for different cell sizes

شکل ۵. مکان پیزومترها بر روی بستر و سقف زانوئی

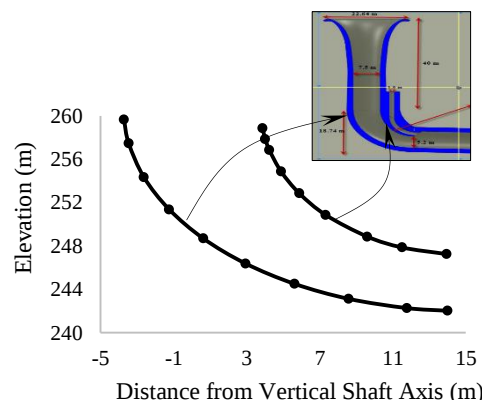


Fig. 5. Place of piezometers on the bottom and roof if the elbow

به منظور درستی‌آزمایی مدل عددی، فشارهای ثبت شده در محدوده زانویی سرریز نیلوفری در مدل عددی با مدل فیزیکی مقایسه شد. در مدل فیزیکی به‌ازای چهار دبی ورودی ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه، نتایج فشار در ۹ نقطه با استفاده از پیزومتر در بستر زانویی و ۹ نقطه در سقف

زانویی سرریز مطابق شکل (۵) اندازه‌گیری شده است. جدول‌های (۳ و ۴)، نتایج هد فشار در مدل عددی به همراه نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این جداول، درصد خطای فشار در مدل عددی بر مبنای نتایج فشار در مدل فیزیکی محاسبه شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی هد فشار بر حسب متر در بستر زانویی در پیزومترهای مختلف

Piezometer No.	Inlet Discharge (m ³ /s)											
	250			600			800			950		
	Experimental	Numerical	Error (%)	Experimental	Numerical	Error (%)	Experimental	Numerical	Error (%)	Experimental	Numerical	Error (%)
1	1.83	1.5	-18	5.04	3.73	-26	2.04	2.1	3	23.8	20.5	-14
2	2.09	1.83	-12	5.52	6.89	25	3.16	3.67	16	26.9	24.2	-10
3	3.53	2.81	-20	11.2	14.1	25	14.2	16.8	18	30.6	33.6	10
4	13.6	15.4	13	19.8	23.4	18	26.4	25.7	-3	33.3	36	8
5	15.2	16.8	11	23.1	25.5	10	28.9	29.3	1	33.5	36.8	10
6	13.8	14.6	5	22.2	23.6	6	30.8	33.2	8	34.4	35.6	3
7	9.93	8.85	-11	22.8	22.2	-2	28.8	26.8	-7	33.5	31.2	-7
8	9.38	8.41	-10	22.5	20.8	-7	27	24.4	-9	30.6	27	-12
9	9.37	9.08	-3	18.2	17	-6	23.7	22.4	-6	26.9	24.2	-10
10	6.62	5.85	-12	13.3	13	-2	18.4	20.8	13	21.1	19.4	-8

Table 3. Comparison of numerical and experimental results of the pressure at bottom of elbow

جدول ۴. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی هد فشار بر حسب متر در سقف زانویی در پیزومترهای مختلف

Piezometer No.	Inlet Discharge (m ³ /s)							
	250		600		800		950	
	Experimental	Numerical	Experimental	Numerical	Experimental	Numerical	Experimental	Numerical
1	-	-	-	-	-	-	9.28	8.81
2	-	-	-	-	-	-	9.43	8.95
3	-	-	-	-	-	-	9.14	9.32
4	-	-	-	-	-	-	8.53	9.51
5	-	-	-	-	-	-	6.58	10.8
6	-	-	-	-	-	-	4.85	9.75
7	-	-	-	-	-	-	9.11	-
8	-	-	-	-	-	-	8.9	-
9	-	-	-	-	-	-	8.43	-

Table 4. Comparison of numerical and experimental results of the pressure at roof of elbow

جدول ۵. شاخص کاویتاسیون در محدوده زانویی برای دبی‌های مختلف

Piezometer No.	Inlet Discharge (m ³ /s)				
	250	600	800	950 floor	950 roof
1	0.05	0.11	0.13	0.83	0.56
2	0.06	0.20	0.21	0.98	0.48
3	0.11	0.55	1.16	1.12	0.51
4	1.16	1.02	1.24	1.24	0.49
5	1.07	1.15	1.41	1.48	0.41
6	0.86	0.70	1.83	1.16	0.35
7	0.50	0.59	1.22	0.80	0.27
8	0.36	0.49	0.78	0.51	0.22
9	0.34	0.38	0.61	0.35	0.19
10	0.19	0.29	0.51	0.21	-

Table 5. Cavitation index at elbow for different discharge

شکل ۷. شاخص کاویتاسیون و محدوده بحرانی در محدوده زانویی

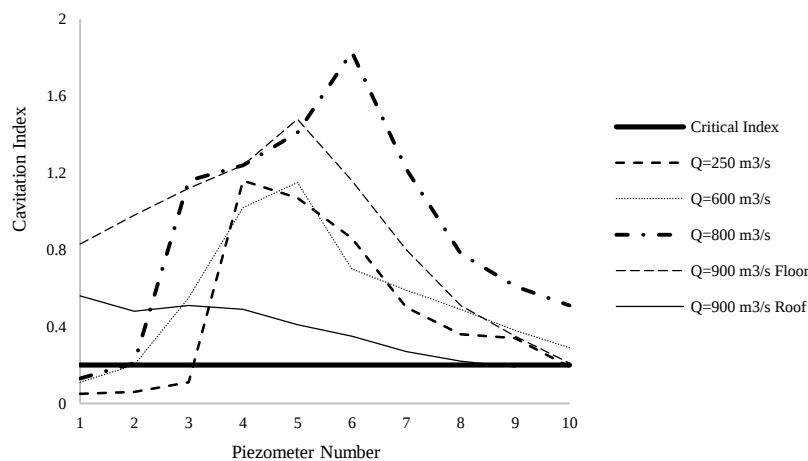


Fig. 7. Cavitation index and critical index in the elbow

۴- نتایج مدل عددی برای بررسی احتمال وقوع کاویتاسیون

با توجه به اهمیت زانویی سرریز نیلوفری در این بخش به بررسی تأثیر شعاع زانویی بر هد فشار و شاخص کاویتاسیون در محدوده زانویی سرریز نیلوفری پرداخته می‌شود. قبل از بررسی پارامتریک لازم است که محدوده دبی برای تشکیل جریان آزاد و مستغرق در سرریز نیلوفری سد البرز براساس نتایج مدل عددی پرداخته شود. نتایج مدل عددی نشان داد که در محدوده دبی‌های کمتر از ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه، زانویی سرریز نیلوفری بصورت آزاد و برای دبی‌های بالاتر از ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه، بصورت مستغرق عمل خواهد کرد. همچنین مشخص شد که در دبی‌های نزدیک به ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، سازه سرریز و شفت قائم نیز غرقاب بوده و خفگی و استغراق کامل پدیدار می‌شود.

۴-۱- تأثیر شعاع زانویی بر مقادیر فشار

برای بررسی تأثیر شعاع زانویی سرریز نیلوفری بر هد فشار وارد بر آن، برای مقادیر مختلف شعاع زانویی شامل ۳/۲۵، ۳/۵، ۳/۷۵، ۴/۰، ۴/۲۵ متر و نیز دبی‌های ورودی ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه مدل‌سازی عددی انجام گرفت. شکل (۸) نتایج پارامتر فشار در ترازهای مختلف در کف زانویی برای دبی‌های ورودی مختلف و شعاع‌های مختلف را نشان می‌دهند.

براساس جدول‌های (۳ و ۴) هماهنگی مناسبی بین نتایج مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در نتیجه می‌توان به نتایج مدل عددی برای بررسی هیدرولیک جریان در سرریز نیلوفری اعتماد نمود. هد فشار در طول زانویی، ابتدا حالت افزایشی دارد و سپس در نقاط انتهایی، حالت کاهشی خواهد داشت و این شرایط برای تمام دبی‌ها نیز به همین گونه است. علت این رفتار ممکن است به این دلیل باشد که در نقاط میانی یا به عبارتی در محدوده کاسه زانویی، جریان با ضربات دینامیکی بزرگتری به علت تغییر جهت جریان، به کف زانویی برخورد می‌کند.

در ادامه به بررسی احتمال وقوع کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری پرداخته می‌شود. به کمک رابطه (۱)، اندیس کاویتاسیون برای دبی‌های ورودی مختلف محاسبه شده است و در جدول (۵) و شکل (۷) ارائه شده است. در این جدول برای دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه در دو قسمت کف و سقف زانویی، شاخص کاویتاسیون ارائه شده است.

در ابتدا و انتهای زانویی سرریز نیلوفری البرز، تغییرات هندسی موجود باعث افزایش سرعت شده و شاخص کاویتاسیون در منطقه بحرانی قرار گرفته است. در این محدوده به ویژه در انتهای زانویی، احتمالاً حباب‌هایی تشکیل می‌شود که در صورت قرار ندادن هوا، در تونل انتهایی سبب ایجاد خطر کاویتاسیون می‌شود. در بقیه نقاط زانویی، بدلیل وجود هد بالای فشار، با وجود سرعت بالا، شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی کمتر بوده و پدیده کاویتاسیون تهدید چندانی را برای سرریز ایجاد نمی‌کند.

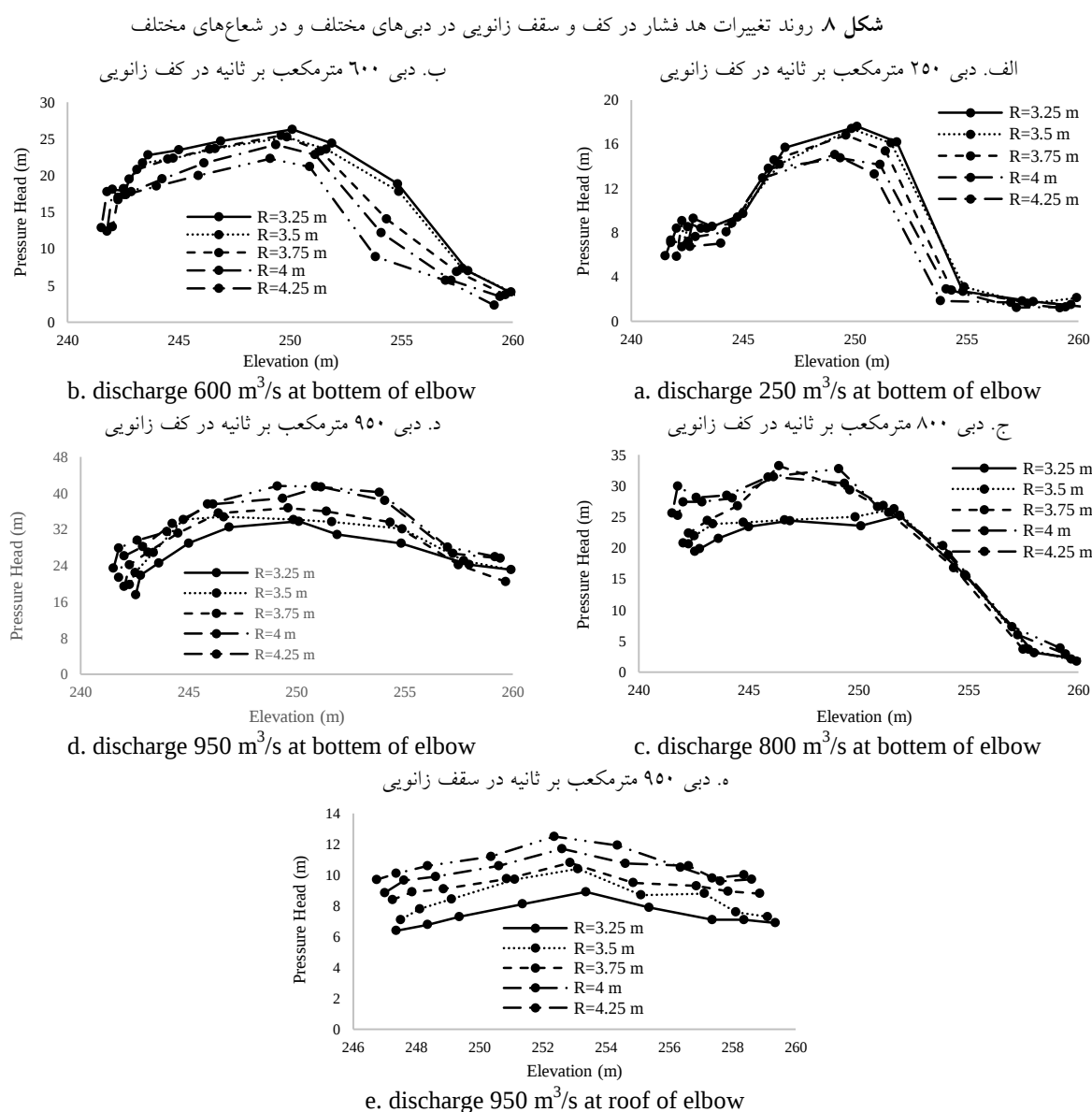


Fig. 8. Changes in the pressure in the elbow at different discharge and different radius of elbow

ضربه‌های دینامیکی که سبب ایجاد فشار دینامیکی می‌شود سازکار غالب محسوب می‌شوند و در نتیجه هرچقدر شعاع کمتر باشد افزایش فشار بیشتر خواهد بود. همچنین هرچقدر شعاع کمتر باشد، چون در دبی‌های کمتری به استغراق نزدیک می‌شود، دارای ضربات دینامیکی بزرگتری است که سبب افزایش فشار می‌شود. در حالت جریان مستغرق در زانویی، در شعاع‌های کمتر، جریان منقبض‌تر می‌شود و سبب خواهد شد جریان با سرعت بیشتری از زانویی عبور کند که براساس رابطه انرژی، فشار کمتر خواهد شد. به بیان دیگر، هرچقدر شعاع بیشتر شود، جریان راحت‌تر از زانویی عبور کرده و به دلیل انحناء کمتر جریان، تغییر جهت جریان کمتر شده و در نتیجه سرعت کم خواهد شد. بطور کاربردی می‌توان بیان

بررسی شکل (۸) نشان می‌دهد تغییر در شعاع زانویی بر تغییرات هد فشار بستر و سقف زانویی تأثیر چشم‌گیری داشته است. برای شعاع‌های مختلف زانویی، در تمامی دبی‌های مختلف ورودی، هد فشار در پی‌زومترهای میانی در بستر زانویی بیشتر از سایر پی‌زومترها است که دلیل عمده آن می‌تواند، وجود نیروی گریز از مرکز ناشی از تغییر جهت جریان که سبب ایجاد مومنتم می‌شود باشد.

در دبی‌های ماقبل غرق شدن زانویی، در شعاع‌های کمتر، از آنجایی که انحنای زانویی تیزتر است در نتیجه تغییر جهت جریان بیشتر شده که خود سبب تغییر مومنتم بزرگتری می‌شود و در نتیجه فشار بیشتر خواهد شد. پس بطور کاربردی برای دبی‌های قبل از استغراق زانویی می‌توان بیان داشت که

و تغییر رژیم جریان، تغییرات فشار متفاوت است. در دبی‌های ۲۵۰ و ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه با افزایش شعاع زانویی کاهش فشار و با کاهش شعاع زانویی، افزایش فشار رخ خواهد داد. این شرایط در دبی‌های ۸۰۰ و ۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه برعکس است.

جدول ۶. تغییرات فشار متوسط در زانویی در شعاع‌های مختلف نسبت

به شعاع اولیه (۳/۷۵ متر) بر حسب درصد

	R=3.25 m	R=3.5 m	R=4 m	R=4.25 m
Q=250 m ³ /s	5.84	2.90	-6.75	-14.15
Q=600 m ³ /s	10.54	6.22	-7.15	-13.56
Q=800 m ³ /s	-13.14	-8.72	9.38	14.25
Q=900 m ³ /s Bottom	-7.66	-0.69	10.17	13.54
Q=250 m ³ /s Roof	-20.35	-9.16	9.43	15.35

Table 6. Pressure Variation (%) in the elbow for different radius based on initial radius (3.75 m)

داشت در حالت جریان مستغرق، انرژی سازوکار غالب محسوب شده و شعاع‌های بزرگتر، باعث فشار بیشتر خواهد شد. در سقف زانویی با کمتر شدن شعاع و افزایش انحناء، با توجه به آنکه مقطع زانویی پر می‌باشد، به دلیل انقباض بیشتر جریان، سرعت افزایش یافته و فشار کمتر خواهد شد و امکان جدایش جریان نیز افزایش می‌یابد. برای سقف زانویی می‌توان به این نکته اشاره نمود که در نقاط ابتدایی و میانی زانویی، اثرگذاری مومنت بیشتر بوده و در قسمت انتهایی هر دو عامل مومنت و انرژی اثرگذاری هستند.

در جدول (۶) تغییرات فشار متوسط در زانویی (متوسط فشارهای برداشت شده در پیژومترهای مختلف) در شعاع‌های مختلف نسبت به شعاع اولیه (۳/۷۵ متر) بر حسب درصد ارائه شده است. در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش دبی

شکل ۹. روند تغییرات شاخص کاویتاسیون در کف و سقف زانویی در دبی‌های مختلف و در شعاع‌های مختلف

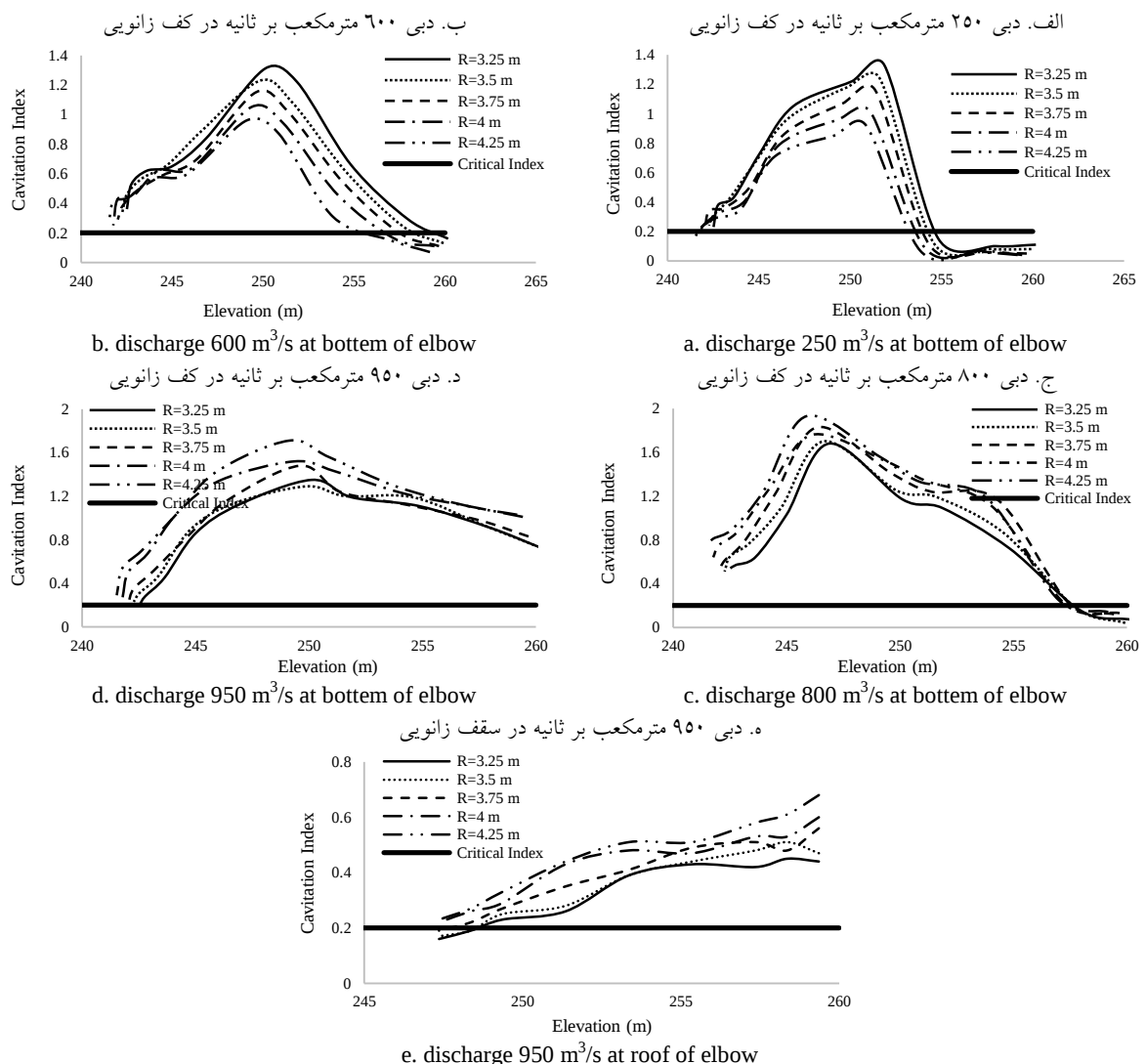


Fig. 9. Changes in the cavitation index in the elbow at different discharge and different radius of elbow

۲-۴- تأثیر شعاع زانویی بر شاخص کاویتاسیون

به کمک رابطه (۱) مقدار شاخص کاویتاسیون برای دبی‌های مختلف براساس مقادیر سرعت و فشار بر روی سقف و بستر زانویی محاسبه شده است. شکل (۹) نتایج شاخص کاویتاسیون برای دبی‌های موردنظر در نقاط معین و برای شعاع‌های مختلف زانویی را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود زمانی که جریان در حالت آزاد قرار دارد در نقاط ابتدایی زانویی (در محل اتصال شفت قائم و زانویی) شاخص کاویتاسیون در منطقه بحرانی می‌باشد. دلیل اصلی وجود شرایط بحرانی در این منطقه را می‌توان تغییر ناگهانی جهت جریان دانست و از آنجایی که در حالت پر بودن مقطع زانویی، جریان دیگر فضایی برای حرکت سریع ندارد پس تغییر جهت جریان کمتر بوده و در نتیجه خطر کاویتاسیون کمتر خواهد شد. این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش دبی ورودی به سرریز نیلوفری، شاخص کاویتاسیون در نقاط مختلف زانویی و با توجه به شعاع‌های متفاوت، بیشتر می‌شود. در همه دبی‌ها و شعاع‌های مختلف زانویی، شاخص کاویتاسیون برای بستر زانویی، ابتدا حالت افزایشی خواهد داشت و با نزدیک شدن به انتهای محیط انحنا دار، شاخص کاویتاسیون کمتر می‌شود. دلیل عمده روند افزایشی را می‌توان در ضربه‌های دینامیکی وارد شده به کاسه زانویی دانست. همچنین انقباض انتهای مقطع نیز دلیل اصلی روند کاهشی شاخص کاویتاسیون در ادامه مقطع است.

همچنین این پژوهش نشان می‌دهد تغییر در شعاع زانویی، تأثیر عمده‌ای روی بهبود یا افزایش خطر کاویتاسیون داشته و نیز تغییر در شعاع زانویی در هر یک از حالت‌های رژیم جریان آزاد و مستغرق دارای رفتارهای متفاوتی است. در جدول (۷) تغییرات شاخص کاویتاسیون متوسط در زانویی (متوسط شاخص محاسبه شده در پیرومترهای مختلف) در شعاع‌های مختلف نسبت به شعاع اولیه (۳/۷۵ متر) بر حسب درصد ارائه شده است. در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش دبی و تغییر رژیم جریان، تغییرات شاخص کاویتاسیون متفاوت است. در دبی‌های ۲۵۰ و ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه با افزایش شعاع زانویی کاهش شاخص کاویتاسیون و با کاهش شعاع زانویی، افزایش شاخص کاویتاسیون رخ

خواهد داد. این شرایط در دبی‌های ۸۰۰ و ۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه برعکس است.

جدول ۷. تغییرات شاخص کاویتاسیون متوسط در زانویی در شعاع‌های

مختلف نسبت به شعاع اولیه (۳/۷۵ متر) بر حسب درصد

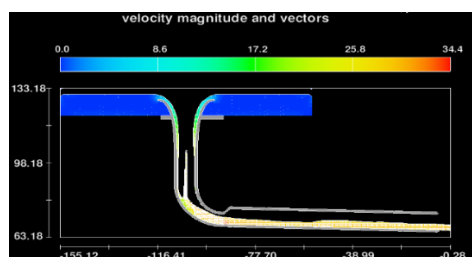
	R=3.25 m	R=3.5 m	R=4 m	R=4.25 m
Q=250 m ³ /s	22	13	-12	-22
Q=600 m ³ /s	21	13	-7	-15
Q=800 m ³ /s	-16	-9	5	11
Q=900 m ³ /s Bottom	-6	-3	17	23
Q=250 m ³ /s Roof	-15	-9	9	20

Table 7. Cavitation index Variation (%) in the elbow for different radius based on initial radius (3.75 m)

بعلاوه یکی از پارامترهایی که تأثیری مستقیم بر شاخص کاویتاسیون دارد، سرعت است. در شکل (۱۰) میدان سرعت در دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه که جریان حالت آزاد دارد و در دبی ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه که جریان حالت مستغرق دارد، ارائه شده است.

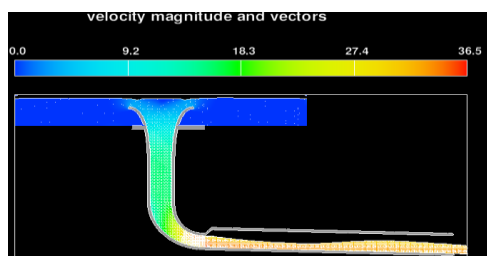
شکل ۱۰. کانتور سرعت در دو رژیم جریان آزاد و مستغرق

الف) دبی ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه



a) Q=600 m³/s

ب) دبی ۹۵۰ مترمکعب بر ثانیه



b) Q=950 m³/s

Fig. 10. Velocity contours in free surface and submerged flow regime

در دبی‌های قبل از استغراق زانویی، افزایش شعاع زانویی، سبب بیشتر شدن خطر کاویتاسیون می‌شود. از آنجایی که کاهش شعاع زانویی، سبب افزایش انحناء می‌شود، تغییر

جهت جریان بیشتر شده و در نتیجه به دلیل مومنتم بزرگتر، فشار بیشتری ایجاد خواهد شد و در نتیجه باعث بزرگتر شدن شاخص کاویتاسیون می‌شود. زمانیکه زانویی در حالت استغراق قرار دارد، در شعاع‌های کمتر زانویی، به دلیل انقباض بیشتری که بوجود می‌آورد، باعث افزایش سرعت جریان شده، که سبب افزایش خطر پدیده کاویتاسیون خواهد شد. بطور خلاصه و کاربردی با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی می‌توان بیان کرد، که در حالت رژیم جریان آزاد، افزایش شعاع زانویی خطر کاویتاسیون را تشدید می‌نماید و سازکار غالب، نیروی مومنتم خواهد بود ولی در حالت پر بودن مقطع زانویی، افزایش شعاع زانویی خطر کاویتاسیون را کاهش می‌دهد و سازکار غالب، انرژی است.

بررسی شکل (9-e) نشان می‌دهد در طول سقف زانویی، با نزدیک شدن به تونل افقی، بدلیل انقباض بیشتر مقطع در انتهای زانویی، سرعت افزایش یافته و در نتیجه سبب کاهش شاخص کاویتاسیون و افزایش شعاع زانویی سبب بهبود عملکرد سقف زانویی از منظر پدیده کاویتاسیون می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر پارامترهای مهم هیدرولیکی تأثیرگذار بر کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری، در دبی‌های مختلف ورودی به سرریز و در شعاع‌های مختلف زانویی توسط مدل‌سازی عددی به کمک نرم افزار Flow3D بررسی شدند. برای اعتبارسنجی مطالعه حاضر، نتایج فشار حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی سرریز نیلوفری سد البرز که در مؤسسه تحقیقات آب ایران ساخته شده، مقایسه شد که هماهنگی مطلوبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی مشاهده شد.

برای پیدا نمودن نقاط با خطرپذیری کاویتاسیون بالا از شاخص کاویتاسیون استفاده شد. بیشینه هد فشار در دبی‌های مختلف و برای شعاع‌های مختلف زانویی، در پیرومترهای میانی که در کاسه زانویی قرار دارد، اتفاق می‌افتد. بنابراین شاخص کاویتاسیون هم برای این نواحی بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. نقاط ورودی به زانویی و نقاط انتهایی به دلیل تغییرات هندسی که سبب بوجود آمدن تغییر جهت جریان

می‌شود، محتمل‌ترین نقاط برای احتمال وقوع کاویتاسیون هستند. در نتیجه پیشنهاد می‌شود در صورت امکان، تغییرات انحنا در محل ورودی از شفت قائم به زانویی و همچنین از زانویی به تونل افقی بصورت تدریجی باشد. بطور کلی در سقف زانویی بدلیل نبود فشارهای دینامیکی بزرگ، شاخص کاویتاسیون کمتر از سایر نقاط است. در دبی‌های مختلف و شعاع‌های مختلف زانویی، شاخص کاویتاسیون برای بستر زانویی، بدلیل ضربه‌های دینامیکی وارده به کاسه زانویی حالت افزایشی خواهد داشت و با نزدیک شدن به انتهای محدوده انحنا، به علت انقباض انتهای مقطع، شاخص کاویتاسیون کمتر می‌شود. همچنین این پژوهش نشان داد تغییر در شعاع زانویی، تأثیر عمده‌ای روی بهبود یا افزایش خطر کاویتاسیون دارد و از طرف دیگر تغییر در شعاع زانویی در هر یک از حالت‌های رژیم جریان آزاد و مستغرق دارای رفتارهای متفاوتی است. در دبی‌های قبل از استغراق زانویی، از آنجایی که کاهش شعاع زانویی، سبب افزایش انحنا می‌شود، تغییر جهت جریان بیشتر شده و در نتیجه بدلیل مومنتم بزرگتر، فشار بیشتری ایجاد خواهد شد که سبب بزرگتر شدن شاخص کاویتاسیون شده و در واقع در این حالت مومنتم سازوکار غالب محسوب می‌شود. در دبی ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه با افزایش شعاع زانویی از ۳/۷۵ به ۴ و ۴/۲۵ متوسط شاخص کاویتاسیون در کف زانویی به ترتیب باندازه ۱۲ و ۲۲ درصد کاهش و با کاهش شعاع زانویی از ۳/۷۵ به ۳/۵ و ۳/۲۵ متوسط شاخص کاویتاسیون در کف زانویی به ترتیب باندازه ۱۳ و ۲۲ درصد افزایش خواهد یافت.

زمانیکه زانویی در حالت استغراق قرار دارد، در شعاع زانویی کمتر، به دلیل انقباض جریان، سرعت بیشتر شده که منجر به افزایش کاویتاسیون می‌شود و در این حالت، پارامتر انرژی، سازکار غالب است. همچنین افزایش شعاع زانویی سبب بهبود عملکرد سقف زانویی از منظر پدیده کاویتاسیون است. در نتیجه پیشنهاد می‌شود، از آنجاییکه معمولاً طراحی سرریزهای نیلوفری برای رژیم جریان آزاد صورت می‌گیرد، در صورت امکان و با در نظر گرفتن همه پارامترها، طراحی با شعاع کمتری انجام شود. در دبی ۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه با افزایش شعاع زانویی از ۳/۷۵ به ۴ و ۴/۲۵ متوسط شاخص

کاویتاسیون در کف زانویی بترتیب باندازه ۱۷ و ۲۳ درصد افزایش و با کاهش شعاع زانویی از ۳/۷۵ به ۳/۵ و ۳/۲۵ متوسط شاخص کاویتاسیون در کف زانویی بترتیب باندازه ۳ و ۶ درصد کاهش خواهد یافت.

References

۶- مراجع

- 1- Rouhani, S. 2005. Numerical simulation of the formation of cavitation in the chute spillway. M.Sc.Thesis. Faculty of Civil & Environmental Engineering. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (in Persian)
- 2- Falvey, H.T., 1982. Predicting cavitation in tunnel spillways. Water power & dam construct., 34(8), pp.13-15.
- 3- Eisenhauer, N., 1987. Location of Aerators in Spillways. Concrete International, 9(3), pp.62-66.
- 4- Asadsangabi, F., Talebbeydokhti, N. and Rahnavard, M., 2014. Two phase flow modeling in shaft-spillways using volume of fluid (VOF) method. Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering, 38(C1), p.99.
- 5- Ghaffari Jounaghani, M. 2013. Cavitation review in morning glorian spillways using fuzzy logic and CFD models. M.Sc.Thesis. Faculty of civil Engineering. Sistan & Baluchestan University. Zahedan. Iran. (in Persian)
- 6- Hosseini, S.A. and Alami, M., 2010. Numerical modeling of the flow through the overflow and morning glory spillways. 9th Iranian Hydraulic Conference. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (in Persian)
- 7- Ramzani, S. 2014. Experimental and numerical study of the flow regime in morning glory spillways. M.Sc.Thesis. Faculty of civil Engineering. K.N.Toosi University of Technology. Tehran. Iran. (in Persian)
- 8- Enjilzadeh, M.R. and Nohani, E., 2016. Numerical Modeling of Flow Field in Morning Glory Spillways and Determining Rating Curve at Different Flow Rates. Civil Engineering Journal, 2(9), pp.448-457.
- 9- Vischer, D., Hager, W.H. and Cischer, D., 1998. Dam hydraulics (No. 978-0, pp. 471-97289). Chichester, UK: Wiley.
- 10- Flow3D. User Manual. 2008.
- 11- Report of the hydraulic model of Alborz dam reservoir. 2001. Iran Water Research Institute

Investigation of Elbow Radius Effect on Formation of Cavitation in Morning Glory Spillway

M. Ehsani¹, E. Behnam talab^{2*}, S. A. A. Salehi Neyshabouri³

1- Ph.D. Candidate of Hydraulic structure, Civil Engineering, Isfahan University of Technology

2- Assistant professor of Civil Engineering, Engineering Department, Hakim Sabzevari University

3- Professor of Hydraulic structure, Dept. of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

*e.behnamtalab@hsu.ac.ir

Abstract:

Morning glory spillway is one of the most susceptible cases for the occurrence of the cavitation phenomena. At the entrance of the spillway, the junction location of the funnel entrance, the vertical shaft and within the elbow, cavitation is expected. In the present study, the flow characteristics included the inlet and outlet discharge and the velocity and pressure close to the elbow walls were calculated for Alborz dam spillway by using of Flow3D software and the results were compared with the experimental data. The experimental data has been presented by water research institute. The VOF method was used to simulate the flow surface and the RNG turbulence model was used for flow turbulence simulation. The comparison of the numerical model results and the experimental data showed the good agreement between them. Also, the occurrence probability of the cavitation in various parts of the morning glory spillway was investigated using of the cavitation index. The results showed, the maximum pressure head in different discharges and for different elbow radius, have been located in median of piezometer in the bottom of elbow. Therefore, the cavitation index for these areas is more than the other points. The points of the entry to the elbow and the end points are the most probable points for the probability of the occurrence of the cavitation due to geometric changes that cause the change of direction to flow. As a result, it is suggested that, if possible, the curvature changes in the entrance area from the vertical shaft to the elbow and also from the elbow to the horizontal tunnel gradually. In different discharge and different radius of the elbow, the cavitation index for bottom of the elbow will increase as a result of dynamic impacts on the bottom of the elbow, but the cavitation index, toward to the end of the curvature, will be lower due to the contraction end of the cross section. The results showed that radius change of the elbow due to considerable effect on the flow field, has the significant effect on the occurrence probability of the cavitation. The radius change of the elbow has the different results for the submerged flow and free surface regimes. In the free flow regime, by increasing the radius of the elbow, the occurrence probability of the cavitation will increase, and in the submerged flow regime, by increasing the radius of the elbow, the occurrence probability of the cavitation will decrease. It was also determined that in the free flow regime, the momentum is the dominant mechanism and in the submerged flow regime, the energy parameter is the dominant mechanism. Also, increasing the radius of the elbow will improve the performance of the elbow roof in terms of the cavitation phenomenon. Consequently, it is suggested, as usually morning glory spillway is designed for the free flow regime, this spillway to be designed with a smaller radius. Also, by increasing of the discharge in these spillways, the cavitation index increases and the occurrence probability of the cavitation decreases.

Keywords: Morning Glory Spillway, Physical Model, Numerical Model, Hydraulic Parameter, Cavitation