



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

مطالعه عددی تاثیر قطر شفت قائم بر پدیده کاویتاسیون در زانویی سرریز نیلوفری

علی غفوری^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Alighafouri.9770@gmail.com

چکیده

سرریزهای نیلوفری یکی از مستعدترین سرریزها برای وقوع پدیده کاویتاسیون می‌باشند و با توجه به وجود انحنای زیاد و تنگ شدگی مقطع در زانویی سرریز، احتمال وقوع کاویتاسیون در زانویی این نوع سرریزها به علت سرعت بالای جریان وجود دارد. در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار Flow3D به بررسی تاثیر قطر شفت قائم بر رخداد کاویتاسیون پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی در قیاس با نتایج مدل فیزیکی از دقت خوبی برخوردار است و انطباق مطلوبی بین دو روش وجود دارد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند که تغییر قطر شفت قائم تاثیر مستقیمی بر پارامترهای فشار و شاخص کاویتاسیون دارند. افزایش قطر شفت قائم باعث افزایش فشار و در نتیجه شاخص کاویتاسیون در نقاط معین می‌گردد، و با کاهش قطر شفت قائم به علت تنگ شدگی ایجاد شده سرعت جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار کمتری در زانویی سرریز ایجاد می‌شود.

کلمات کلیدی: سرریز نیلوفری، مدل‌سازی عددی، کاویتاسیون، Flow3D



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۱- مقدمه

سرریزهای نیلوفری یکی از انواع مختلف سرریز می‌باشند که معمولاً در شرایط عدم امکان ایجاد سرریز در بدنه سد و با دبی طراحی کم تا متوسط استفاده می‌شوند. همچنین منطقه‌هایی که خطر زلزله در آنها کمتر است برای ساخت سرریز نیلوفری مناسب‌تر می‌باشد. سدها جز بزرگترین و پرهزینه‌ترین پروژه‌های عمرانی و یکی از مهمترین آنها به حساب می‌آیند، از این رو طراحی مناسب سرریز سد و شناسایی خطرهای وارده بر آن حائز اهمیت است. از آنجایی که طراحی سرریزهای نیلوفری بسته به اینکه سرریز در رژیم جریان آزاد قرار دارد و یا در حالت مستغرق، متفاوت می‌باشد، بررسی رفتار جریان و عملکرد هیدرولیکی این سرریزها یکی از مسائل مورد بحث محققان بوده است. همچنین به دلیل وجود تغییرات هندسی گسترده در قسمت‌های مختلف سرریز نیلوفری و وجود انحنای تیز، که می‌توانند سبب جدایش جریان شوند، بررسی عوامل موثر بر کاویتاسیون نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از اولین روش‌های استفاده شده برای تعیین وقوع پدیده کاویتاسیون سرعت بحرانی جریان می‌باشد. آیزنهاور^۱ سرعت بحرانی ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه را برای وقوع کاویتاسیون در نظر گرفت. اما سرعت بحرانی شاخص کافی‌ای نبود و تاثیر فشار و خرابی‌های ایجاد شده در سازه را توجیه نمی‌کرد. در نهایت برای تشخیص حساسیت یک سازه در برابر حباب‌های ایجاد شده در فشار منفی، از پارامتری به نام شاخص کاویتاسیون بهره گرفته شد. شاخص کاویتاسیون که یک پارامتر بدون بعد است و از رابطه برنولی مشتق می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

محققان همواره در تلاش برای بدست آوردن پارامتری که مقدار خسارت کاویتاسیون را توسط آن پیش‌بینی کنند، بوده‌اند. به طور کلی در این تحقیقات اندیس کاویتاسیون، سرعت جریان، مصالحی که سطح از آنها ساخته شده و مدت زمان در معرض خطر بودن را، به عنوان پارامترهای مهم معرفی کرده‌اند. به عنوان مثال فالوی^۲ در تلاش بود تا پایین‌ترین اندیس کاویتاسیون جریان را با زمان وسعت خسارت، به هم مرتبط سازد. در نتیجه این آزمایشات فالوی به دیاگرامی دست یافت که توسط آن می‌توان در خطر بودن سازه از لحاظ کاویتاسیون را پیش‌بینی کرد (شکل ۱). در این نمودار اگر شاخص کاویتاسیون بیشتر از ۰/۲ باشد، خطرناک

^۱ Eisenhour

^۲ Falvey

جانب کاویتاسیون سازه را تهدید نمی‌کند، و اگر این شاخص بین ۰/۱-۰/۲ باشد، باید راهکارهایی برای جلوگیری از خطر کاویتاسیون اتخاذ شود و نصب هواده اجباری است. اگر این عدد کمتر از ۰/۱ باشد، سرریز باید از نو طراحی شود.

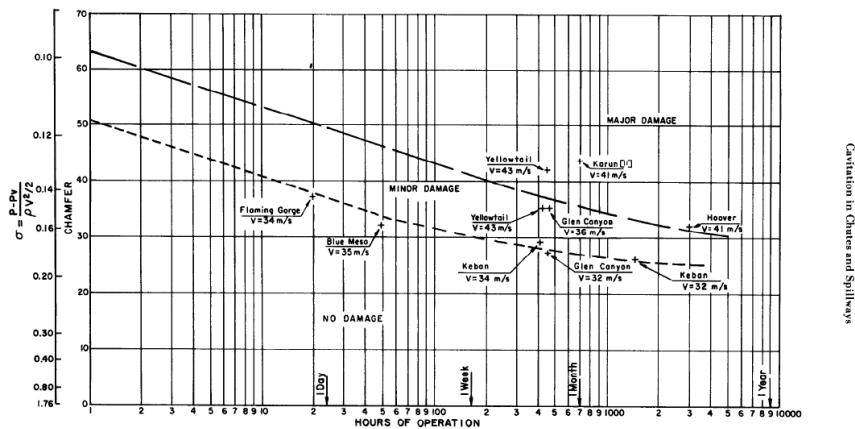


FIGURE 3-8.—Damage experience in spillways (Falvey [9]).

شکل ۱) نمودار تعیین خرابی فالوی

داده‌های آزمایشگاهی شالنو^۳ (۱۹۵۱) نشان می‌داد که کاویتاسیون با نسبت ارتفاع ناهمواری به سرعت در لایه مرزی و ضخامت لایه مرزی ارتباط دارد. بال^۴ (۱۹۵۹، ۱۹۶۳، و ۱۹۷۶) تبعات ناهمواری‌های سطح را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد، و رابطه‌ای بین فشار بحرانی، سرعت بحرانی و تاثیرات آن بر پدیده کاویتاسیون برای چند ناهمواری معمول بدست آورد. وی این پیشنهاد را داد که اگر عدد کاویتاسیون جریان عبوری از عدد کاویتاسیون ابتدایی ناهمواری بیشتر باشد، از خسارات ناشی از پدیده کاویتاسیون می‌توان جلوگیری کرد. هال^۵ (۱۹۶۰) آزمایشاتی بر روی شروع کاویتاسیون در ناهمواری‌های قوسی و مثلثی انجام داد تا اثر لایه مرزی بر آغاز کاویتاسیون را بررسی کند. جورج مانس (۲۰۲۲) به بررسی فشارهای بالا و خطر کاویتاسیون در سرریزهای پلکانی با شیب زیاد در سدهای بزرگ پرداخت. وی با مطالعات آزمایشگاهی خود به این نتیجه رسید که دبی بیشینه برای سرریزهای پلکانی بزرگ در حالت بدون هواده‌ی مصنوعی و یا پله‌های به بلندی ۰/۶ تا ۱/۲ متر، ۱۵ تا ۲۰ متر مربع بر ثانیه می‌باشد. برای دبی‌های بزرگتر قسمت قابل توجهی از سرریز ممکن است در

^۳ Shalnev

^۴ Ball

^۵ Holl



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

خطر وقوع کاویتاسیون فرار بگیرد. کریمی (۱۳۹۹) در یک مطالعه عددی با مدل فلوئنت به بررسی تاثیر مدل های آشفتگی و پدیده کاویتاسیون در سرریز سیاه بیشه پرداخت. وی از مدل های آشفتگی $k-\epsilon$, RNG و $k-\omega$ برای مدل های عددی خود استفاده کرد. نتایج او نشان دادند که احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در دبی ۲۰۳ متر مکعب بر ثانیه در پایین دست سرریز پلکانی سد سیاه بیشه بیشتر از حالت های آزمایش شده دیگر بود.

میرسولاو بروسک^۶ (۲۰۲۱) به بررسی عددی و آزمایشگاهی عملکرد تیغه های ایجاد کننده گرداب در سرریز نیلوفری سدی در جمهوری چک پرداخت. وی در مدل عددی خود از نرم افزار Ansys استفاده کرد و به آنالیز دبی-اشل سرریز، کیفیت شبکه بندی و تاثیرات مدل های آشفتگی در نتایج پرداخت. وی در آزمایشات خود به این نتیجه رسید که برداشتن تیغه های ایجاد کننده گرداب باعث افزایش ظرفیت سرریز خواهد شد اما در عین حال وجود این تیغه ها نوسانات فشار در سرریز را به طول قابل توجهی کاهش می داد. غفاری (۱۳۹۲) به بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریز نیلوفری پرداخت. وی در تحقیق خود از مدل Ansys-Fluent بهره برد. وی دلیل اختلاف نتایج حاصل از مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی را در زانویی سرریز به دلیل ماهیت اغتشاش جریان و افزایش شدت تلاطم در زانویی سرریز دانست. وی همچنین مشاهده کرد که با افزایش دبی جریان مکان نقاطی که جدایش در آنها شکل می گیر به سمت پایین تر از شفت قائم منتقل می شود. ثابتی (۲۰۱۹) به بررسی عددی تاثیر نوع ورود جریان در سرریز نیلوفری بر عملکرد هیدرولیکی آن پرداخت. وی در تحقیق خود به بررسی مشخصه های جریان پرداخت و در نهایت رابطه ای برای نرخ دبی عبوری از سرریز پیشنهاد داد. وی با تغییر هندسه سرریز و بوجود آوردن چهار نوع مختلف جریان که با زاویه های متفاوتی وارد تاج سرریز می شدند، نرخ دبی عبوری از سرریز را مطالعه کرد. اسدسنگایی (۲۰۱۴) به بررسی عددی جریان دو فازی در سرریزهای نیلوفری با روش حجم سیال پرداخت. وی در تحقیق خود به مطالعه شکل ورودی سرریز نیلوفری و تاثیر برخی پارامترها بر بیشینه ضریب تخلیه سرریز و همچنین کمترین شاخص کاویتاسیون محتمل در این سرریزها پرداخت. وی از روش دینامیک سیالات محاسباتی در شکل روش حجم محدود بهره برد و از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای حل میدان جریان خود استفاده کرد.

^۶ Mirsolav Broucek



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۲- روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر روی سیستم تخلیه سیلاب سرریز نیلوفری سد البرز واقع بر رودخانه بابلرود در استان مازندران انجام شده است. در این سرریز، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله ۲۷۲ متر مکعب بر ثانیه، دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله ۶۲۶ متر مکعب بر ثانیه، دبی حداکثر سیلاب محتمل ۱۰۰۴ متر مکعب بر ثانیه و بار آب روی سرریز به ازای دبی حداکثر سیلاب ۴/۷۴ متر است. مدل هیدرولیکی ساخته شده از این سرریز در آزمایشگاه موسسه تحقیقات آب دارای مقیاس (۱:۴۲/۸۵۷) می باشد. مقادیر نسبت‌ها در زیر آورده شده است.

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

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

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = (L_r^{2.5}) = \frac{1}{12.24} \quad (\text{مقیاس دبی})$$

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

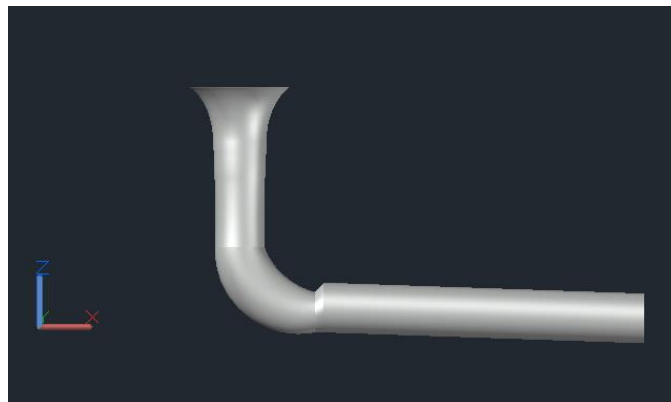
$$T_r = \frac{T_m}{T_p} = (L_r^{0.5}) = \frac{1}{6.5} \quad (\text{مقیاس زمان})$$

برای ایجاد مدل عددی سرریز نیلوفری سد البرز از نرم‌افزار Flow3D در این تحقیق استفاده شده است. نرم‌افزار Flow3D یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که کاربردهای فراوانی برای شبیه‌سازی جریان در هندسه‌های پیچیده دارد. یکی از ویژگی‌های مهم این نرم‌افزار مدل‌سازی مسائل وابسته به زمان و جریان‌های در تماس با سطح آزاد با استفاده از روش VOF می‌باشد. Flow3D معادله‌های حاکم بر میدان جریان را با استفاده از تقریب حجم محدود حل می‌کند و همه پارامترها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند، برخلاف سرعت که در مرکز وجوه هر سلول محاسبه می‌شود. در این نرم‌افزار از مدل‌های آشفتگی مختلفی استفاده شده است که عبارت‌اند از: طول اختلاط پیرانتل، یک معادله‌ای، دو



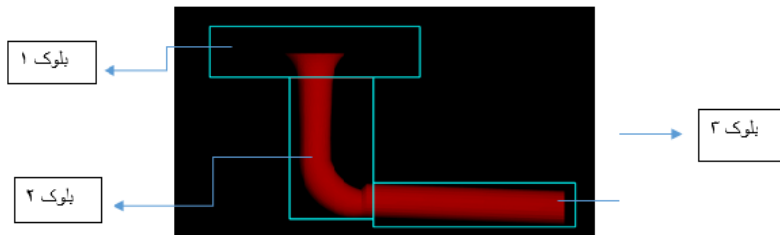
معادله‌ای $k-\epsilon$ ، مدل‌های RNG و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ. در بین این مدل‌ها، مدل RNG که بر اساس یک روش آماری بدست می‌آید نسبت به حالت استاندارد در جریان‌های چرخشی کارایی بیشتری دارد. به همین دلیل از این مدل در مدل‌سازی جریان در میدان‌های دارای انحنا و یا پیچیدگی هندسی بیشتر استفاده می‌شود. به طور کلی مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به مدل $k-\epsilon$ استاندارد دارد. در مدل‌سازی پژوهش حاضر از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است.

برای ایجاد هندسه سه بعدی سرریز نیلوفری سد البرز در این پژوهش، از نرم افزار AutoCad 3D استفاده شده است که سرریز نیلوفری ایجاد شده در محیط نرم‌افزار اتوکد در شکل (۲) ارائه شده است. مدل سه بعدی ایجاد شده شامل بخشی از مخزن، تاج، شفت قائم، زانویی، تبدیل و بخشی از تونل افقی می‌باشد. سپس مدل ایجاد شده با فرمت stl به نرم‌افزار Flow 3D معرفی شده است.



شکل (۲) نمایی از مدل سه بعدی سرریز نیلوفری سد البرز در نرم افزار اتوکد

یکی از مهمترین فاکتورها در مطالعات عددی نحوه شبکه بندی مدل و ایجاد بلوک‌های شبکه می‌باشد. حساسیت این مدل‌ها به نحوه شبکه بندی بسیار بالا بوده و برای بدست آوردن نتایج مناسب نیاز به ایجاد یک شبکه بندی بهینه وجود دارد. در مدل عددی ایجاد شده از سه بلوک شبکه بندی در قسمت‌های مختلف سازه استفاده شد. نحوه بلوک بندی در شکل (۳) ارائه شده است.



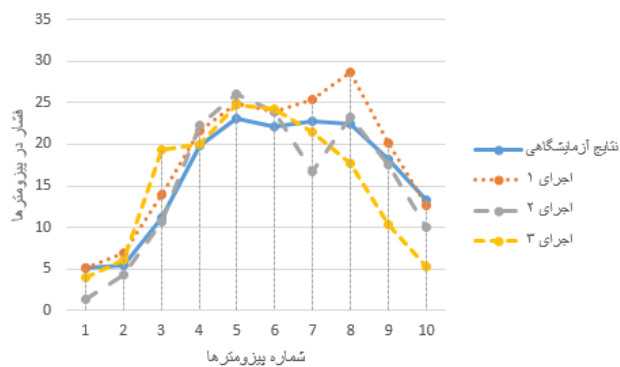
شکل (۳) نحوه بلوک بندی

برای تعیین تعداد سلول شبکه بندی مورد نظر و انجام حساسیت سنجی نسبت به تعداد سلول سه اجرای مختلف انجام شد و در نهایت شبکه بندی با درصد تطابق بالاتر با نتایج مدل هیدرولیکی برای ادامه کار انتخاب شد. در جدول (۱) تعداد سلول استفاده شده در هر بلوک شبکه برای اجراهای مختلف ارائه شده است.

جدول (۱) مقایسه تعداد سلولها در اجراهای مختلف

	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۳
اجرای ۱	۶۵۰۰۰۰	۴۱۰۰۰۰	۳۳۰۰۰۰
اجرای ۲	۷۲۵۰۰۰	۵۳۵۰۰۰	۳۳۰۰۰۰
اجرای ۳	۵۹۵۰۰۰	۳۳۱۵۰۰	۲۵۰۰۰۰

همچنین در شکل (۴) نمودار تغییرات فشار در پیزومترهای زانویی در حالات مختلف نشان داده شده است.





ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

شکل (۴) مقایسه نتایج اجراهای مختلف در دبی $600 \text{ m}^2/\text{s}$ در پیژومترهای زانویی

با توجه به درصد خطای اجراهای مختلف و مطابقت آنها با نتایج مدل هیدرولیکی، از اجرای شماره یک برای ادامه کار استفاده شده است.

برای رسیدن به یک شرایط مرزی ایده‌آل در این پژوهش شرایط مرزی مختلفی بررسی شد، و نحوه شکل‌گیری جریان و رسیدن به یک جریان یکنواخت، که دبی مورد نظر سرریز را بدهد مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از انجام حساسیت سنجی‌های لازم شرایط مرزی مطابق جدول (۲) برای هر یک از وجوه بلوک‌ها استفاده گردید.

جدول (۲) شرایط مرزی مدل عددی

شماره بلوک	جهت مرز	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۳
Xmin	ورودی دبی	دیوار	تقارن	تقارن
Xmax	ورودی دبی	تقارن	خروجی	خروجی
Ymin	ورودی دبی	دیوار	دیوار	دیوار
Ymax	ورودی دبی	دیوار	دیوار	دیوار
Zmin	متقارن	دیوار	دیوار	دیوار
Zmax	فشار معین	متقارن	دیوار	دیوار

بر روی مدل فیزیکی سرریز سد البرز، به ازای چهار بی (۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه) آزمایش انجام شده است و نتایج فشار بر روی ده نقطه معین توسط پیژومترها در کف زانویی سرریز مشخص شده است شکل (۵). برای صحت سنجی نتایج مدل عددی در این پژوهش برای چهار دبی مدر نظر نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول (۳) نتایج هد فشار در پیژومترهای کف زانویی در مدل عددی و میزان تطابق آنها با نتایج آزمایشگاهی در دبی‌های مشخص آورده شده است.



شکل (۵) مکان پیزومترها در کف زانویی

جدول (۳) مقایسه مقادیر هد فشار (m) در کف زانویی

پیژومتر m ^۳ /s	۲۵۰	۲۵۰	۶۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۹۵۰	۹۵۰
	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی	آزمایشگاه	عددی
۱	۱/۸۳	۲/۵۲	۵/۰۴	۵/۱۳	۲/۰۴	۲/۶۹	۲۳/۷۶	۲۱/۴۲
۲	۲/۰۹	۲/۲۷	۵/۵۲	۶/۹۷	۳/۱۶	۳/۸۶	۲۶/۸۹	۲۲/۷۹
۳	۳/۵۳	۳/۳	۱۱/۲۴	۱۴/۰۲	۱۴/۲۴	۱۵/۲۴	۳۰/۶۴	۲۸/۷۸
۴	۱۳/۵۶	۱۳/۲۶	۱۹/۷۷	۲۱/۵۸	۲۶/۴۲	۲۵/۴۵	۳۳/۳۴	۳۱/۳۸
۵	۱۵/۱۷	۱۵/۱۹	۲۳/۱	۲۴/۸۷	۲۸/۸۸	۲۹/۹۶	۳۳/۵۴	۳۵/۰۹
۶	۱۳/۸۳	۱۰/۸۱	۲۲/۱۹	۲۳/۹۷	۳۰/۷۶	۲۹/۴۱	۳۴/۴۱	۳۶/۵۸
۷	۹/۹۳	۹/۶۲	۲۲/۷۹	۲۵/۳۳	۲۸/۷۹	۲۹/۴۱	۳۳/۵	۳۵/۶۱
۸	۹/۳۸	۱۱/۳۱	۲۲/۴۵	۲۸/۶۳	۲۶/۹۵	۲۴/۹۳	۳۰/۵۹	۳۵/۰۲
۹	۹/۳۷	۱۱/۱۷	۱۸/۱۶	۲۰/۱	۲۳/۷۳	۲۶/۵۹	۲۶/۹۴	۲۹/۴۳
۱۰	۶/۶۲	۸/۶۲	۱۳/۲۷	۱۲/۶۲	۱۸/۴۱	۲۰/۰۳	۲۱/۰۷	۱۸/۳۱

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۳) می‌توان مشاهده کرد که مطابقت مطلوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد و می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل عددی قابل استناد هستند. برای تعیین میزان خطا در پژوهش حاضر از روش MAER استفاده شده است که بصورت زیر می‌باشد.



$$MAER = \frac{\sum^n |(C_e - C_a) / C_e| * 100}{n} \quad (2)$$

که در آن:

C_e = نتایج عددی مدل سازی، C_a = نتایج عددی آزمایشگاهی و n = تعداد داده‌ها می‌باشد. مزیت پارامتر MAER این است که بدون در نظر گرفتن واحدها و کمیت‌های اندازه‌گیری، نسبت بین داده‌های واقعی و محاسباتی را بیان می‌کند.

در جدول (۴) درصد خطاهای مقادیر هد فشار در پیژومترهای اندازه‌گیری شده در هر یک از دبی‌های آزمایش شده ارائه شده است.

جدول (۴) درصد خطا در پیژومترهای کف زانویی

دبی m^3/s / پیژومتر	۲۵۰	۶۰۰	۸۰۰	۹۵۰
۱	۳۸٪/۲۷	۷۷٪/۱	۴۱٪/۲۴	۸۹٪/۱۰
۲	۹۲٪/۷	۸٪/۲۰	۳٪/۱۸	۹۸٪/۱۷
۳	۹۶٪/۶	۸۴٪/۱۹	۵۶٪/۶	۴۵٪/۶
۴	۲۶٪/۲	۴۱٪/۸	۷۹٪/۳	۲۴٪/۶
۵	۴۲٪/۳	۱۴٪/۷	۶۲٪/۰	۴۴٪/۴
۶	۹۳٪/۲۷	۴۴٪/۷	۸٪/۳	۹۴٪/۵
۷	۲۲٪/۳	۰۴٪/۱۰	۱۳٪/۲	۴۴٪/۱۱
۸	۰۶٪/۱۷	۶٪/۲۱	۰۶٪/۸	۰۴٪/۲۳
۹	۱۱٪/۱۶	۶۸٪/۹	۷۶٪/۱۰	۴۸٪/۸



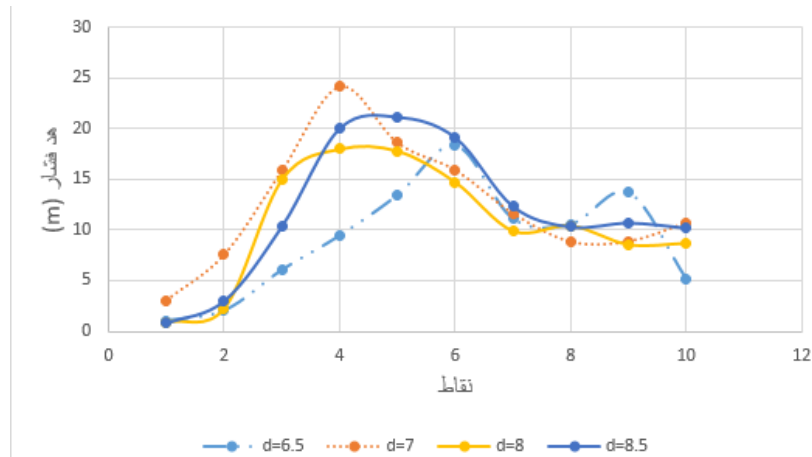
۱۰	۲/۲۳	۱۱/۵	۱/۸	۰۲/۱۵
متوسط خطا	۵۵/۱۳	۱۸/۱۱	۶۵/۸	۹/۱۰

با توجه به جدول (۴) از پیزومترهای ۳ الی ۷ در همه دبی‌ها درصد خطای کمتر و دقت بیشتری در مدل عددی وجود دارد و در پیزومترهای ابتدایی و انتهایی درصد خطا افزایش دارد. همچنین با افزایش دبی میانگین درصد خطا کاهش یافته و در دبی ۸۰۰ متر مکعب بر ثانیه کمترین میانگین درصد خطا مشاهده می‌شود.

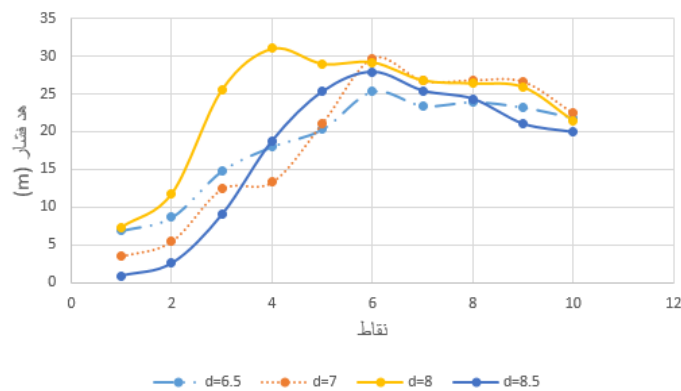
۳- بررسی تغییرات ایجاد شده بر پارامترهای موثر بر کاویتاسیون

۳-۱- فشار

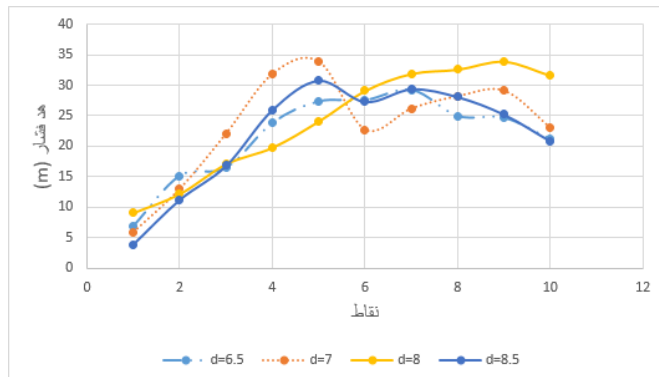
فشار یک پارامتر بسیار موثر در شکل‌گیری یا عدم شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون می‌باشد. در این قسمت به بررسی تغییرات ایجاد شده در هد فشار با تغییر قطر شفت قائم از ۷/۵ متر به چهار قطر مختلف (۶/۵، ۷، ۸ و ۸/۵) در چهار دبی ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه، پرداخته می‌شود و در اشکال ۶ الی ۹ نمودار تغییرات هد فشار ارائه می‌شود.



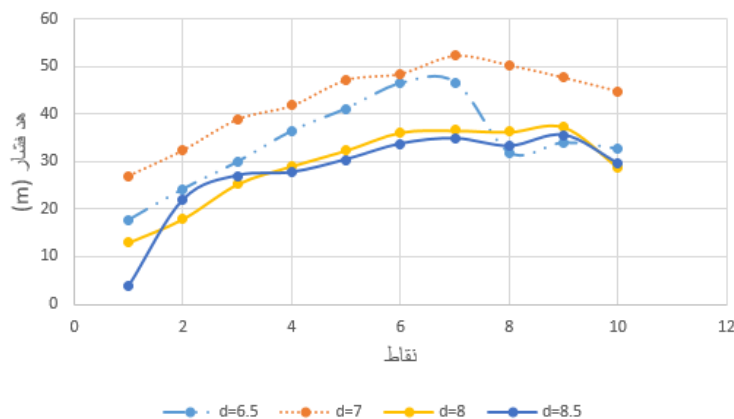
شکل (۶) روند تغییرات هد فشار در کف زانویی در دبی $۲۵۰\text{m}^3/\text{s}$



شکل (۷) روند تغییرات هد فشار در کف زانویی در دبی $۶۰۰\text{m}^3/\text{s}$



شکل (۸) روند تغییرات هد فشار در دبی $800 \text{ m}^3/\text{s}$



شکل (۹) روند تغییرات هد فشار در دبی $950 \text{ m}^3/\text{s}$

با توجه به نمودارهای ارائه شده در بالا بیشینه فشار در تمامی حالات در نقاط میانی زانویی اتفاق می‌افتد، که علت این امر برخورد جریان آب با سرعت بالا به کف زانویی و ایجاد هد فشار دینامیکی بالا در این نواحی می‌باشد. در اکثر قطرها کمینه فشار نیز در ابتدای زانویی و در برخی حالات در انتهای آن اتفاق می‌افتد که به دلیل تنگی مقطع در این دو ناحیه و همچنین تغییر هندسه ایجاد شده می‌باشد و جریان با سرعت بالاتری حرکت می‌کند و فشارهای کمتری ایجاد می‌شود. در دبی 250 متر مکعب بر ثانیه و قطر 6 متر بیشینه فشار در پیزومتر شماره 6 اتفاق افتاده و افزایش فشار حالت خطی تری دارد. کاهش قطر شفت قائم در این حالت باعث کاهش تماس جریان در ابتدای زانویی با دیواره می‌شود و در نتیجه در



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

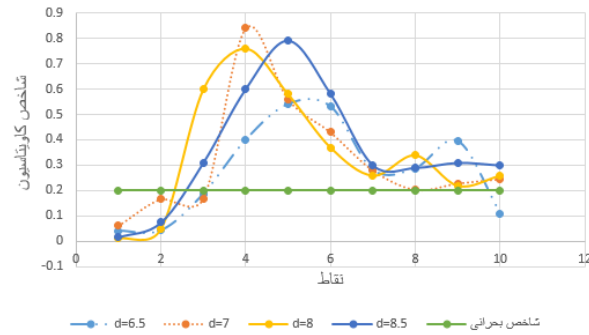
ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

نقاط ابتدایی و میانی فشار نسبت به نقطه ۶ کمتر می‌باشد و فشار بیشینه در این پیژومتر مشاهده می‌شود. با کاهش قطر شفت قائم به ۸ متر می‌توان مشاهده کرد که در سه نقطه میانی از زانویی فشار بیشینه اتفاق افتاده و مقادیر فشار فاصله کمی با یکدیگر دارند. افزایش قطر شفت قائم تماس جریان با کف زانویی را افزایش داده و برخورد جریان در نقاط میانی فشار بیشینه را در چند نقطه نتیجه می‌دهد. در دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش قطر شفت تا پیژومتر ۴ در زانویی کاهش مقادیر فشار در این نقاط را نشان می‌دهد و منحنی فشار زیر منحنی فشار با قطر کمتر قرار می‌گیرد و در باقی نقاط مقادیر فشار نزدیک به هم بوده. با افزایش دبی و نزدیک شدن به دبی استغراقی، همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود با کاهش قطر شفت، افزایش در مقادیر فشار نسبت به مقادیر بیشتر قطر شفت محسوس‌تر بوده. این امر به علت پر شدن مقطع زانویی و ایجاد اصطکاک بیشتر در دیواره‌ها بوده و تاثیر تغییر قطر شفت قائم بر فشارهای وارده بر زانویی بیشتر مشاهده می‌شود.

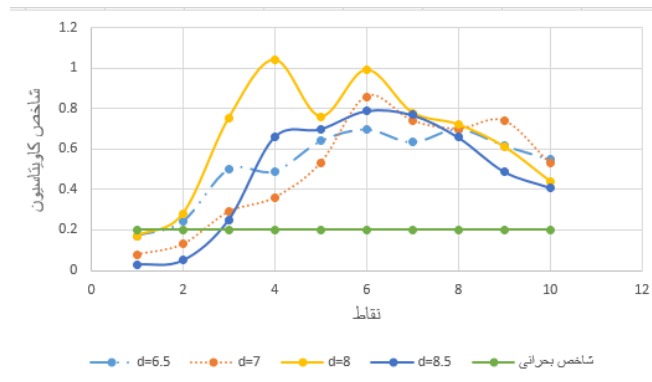
به طور کلی با مقایسه نتایج با مقادیر فشار در قطر ۷/۵ متر، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در قطر شفت قائم تاثیر بسزایی در فشارهای ایجاد شده در زانویی خواهد گذاشت، همچنین کاهش و افزایش قطر شفت قائم در پر شدن مقطع زانویی نیز تاثیرگذارند، به این صورت که با کاهش قطر شفت مقطع زانویی در دبی‌های حالت استغراقی دیرتر پر شده و با افزایش قطر شفت به علت بالارفتن آبگذری سرریز زانویی زودتر از قبل پر خواهد شد.

۲-۳- شاخص کاویتاسیون

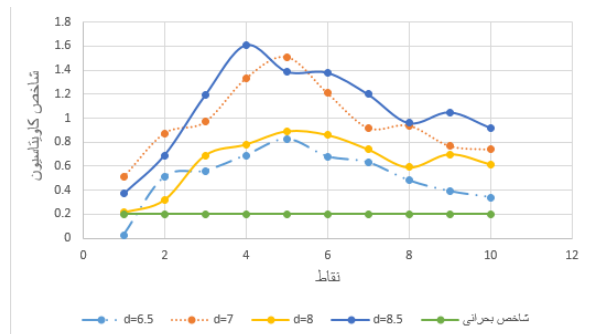
با استفاده از رابطه (۱) مقدار شاخص کاویتاسیون بر اساس اطلاعات سرعت و فشار بدست آمده در نقاط معین پیژومترها در کف زانویی، در چهار دبی ۲۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه بدست آمده است. اشکال ۱۰ الی ۱۳ نمودار تغییرات شاخص کاویتاسیون در حالات مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) نمودار تغییرات شاخص کابیتاسیون برای قطرهای مختلف در دبی $250\text{m}^3/\text{s}$



شکل (۱۱) نمودار تغییرات شاخص کابیتاسیون برای قطرهای مختلف در دبی $600\text{m}^3/\text{s}$

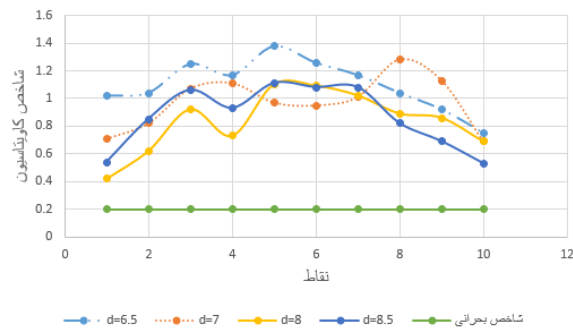


شکل (۱۲) نمودار تغییرات شاخص کابیتاسیون برای قطرهای مختلف در دبی $800\text{m}^3/\text{s}$



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶



شکل (۱۲) نمودار تغییرات شاخص کاونتاسیون برای قطرهای مختلف در دبی $۹۵۰\text{m}^3/\text{s}$

در دبی ۲۵۰ متر مکعب بر ثانیه با توجه به نمودار می‌توان دید که در تمامی حالات در دو نقطه ابتدایی شاخص کاونتاسیون زیر حالت بحرانی قرار دارد و در سومین نقطه در دو حالت انتهایی با افزایش قطر شفت، شاخص کاونتاسیون از مقادیر ابتدایی فاصله داشته و برخلاف آنها از شاخص بحرانی فاصله دارد. در نقاط میانی زانویی با توجه به وجود فشار بالا به علت برخورد جریان آب با کف زانویی شاخص کاونتاسیون مقدار بالایی داشته و نزدیک به عدد یک می‌باشد. در نقاط انتهایی نیز تنها در دو حالت شاخص کاونتاسیون نزدیک عدد بحرانی می‌باشد. به طور کلی وجود هوا به توجه به امکان وقوع پدیده کاونتاسیون در برخی نقاط ابتدایی و انتهایی ضروری می‌باشد. در دبی‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ متر مکعب بر ثانیه نیز تنها در دو نقطه ابتدایی در برخی از حالات شاخص کاونتاسیون کمتر از عدد بحرانی بوده و در تمامی نقاط شاخص کاونتاسیون بزرگتر از مقدار بحرانی است. در دبی ۶۰۰ متر مکعب بر ثانیه به طور کلی می‌توان بیان داشت با افزایش قطر شفت شاخص کاونتاسیون افزایش می‌یابد و وجود قطرهای بالاتر فشار بزرگتری را در سرریز ایجاد می‌کند. به طور کلی با افزایش دبی مقدار شاخص کاونتاسیون در تمامی حالات افزایش داشته و در برخی از حالات حتی نزدیک به عدد دو بوده است. علت این امر دور شدن سرریز از عملکرد در حالت رژیم جریان آزاد و نزدیک بودن آن به حالت مستغرق می‌باشد، زیرا که با پر شدن مقطع زانویی اصطکاک بیشتری بوجود آمده و سرعت جریان کاسته می‌شود در نتیجه فشارهای بالاتری در زانویی بوجود می‌آید. در دبی ۹۵۰ متر مکعب بر ثانیه در تمامی حالات و نقاط اندازه‌گیری شده شاخص کاونتاسیون با عدد بحرانی فاصله داشته و خطری از جانب کاونتاسیون وجود ندارد. در این دبی با قطرهای کمتر شفت قائم شاخص کاونتاسیون اعداد بزرگتری نسبت به قطرهای بیشتر نشان می‌دهد. این اتفاق در خصوص دبی ۸۰۰ متر مکعب بر ثانیه نیز صدق می‌کند.



بصورت کلی افزایش قطر در دبی‌های بالا به علت کمتر بودن اصطکاک و حرکت راحت‌تر جریان شاخص کاویتاسیون نسبت به حالات ابتدایی کاهش خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مدل عددی سرریز نیلوفری سد البرز توسط نرم‌افزار Flow3D ایجاد شد، سپس مقادیر فشار و سرعت در نقاط معین پیزومترها برداشت گردید و با نتایج مدل هیدرولیکی مورد مقایسه گرفت. با توجه به نتایج و درصد خطای مقادیر فشار اندازه‌گیری شده، می‌توان نتیجه گرفت مدل عددی ایجاد از دقت خوبی در شبیه‌سازی جریان در سرریز نیلوفری داشته و درصد خطاها قابل قبول بوده. تغییر قطر شفت قائم تاثیر مستقیم بر مقادیر فشار و سرعت جریان در سرریز نیلوفری داشته. افزایش قطر شفت قائم به طور کلی سبب کاهش فشار در سرریز می‌شود و جریان با اصطکاک کمتری در سرریز حرکت خواهد کرد. همچنین کاهش قطر شفت قائم فشار ایجاد شده را افزایش می‌دهد که این افزایش در دبی‌های بیشتر محسوس‌تر است. شاخص کاویتاسیون در دبی‌های کمتر با افزایش قطر شفت حالت افزایش داشته و در دبی‌های نزدیک به رژیم جریان استغراقی افزایش قطر باعث کاهش اصطکاک و فشار شده و در نهایت شاخص کاویتاسیون نیز کاهش می‌یابد.



مراجع

- ۱- اسد سنگابی، شبیه سازی دو فازى جریان در سرریزهای نیلوفرى با استفاده از روش حجم سیال، ۲۰۱۴
- ۲- پرهام ثابتى، بررسی عددی تاثیر طول موثر سرریز نیلوفرى بر عملکرد آن، ۲۰۱۹
- ۳- مسعود غفارى، بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریز نیلوفرى با کمک Ansys-Fluent، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، اریبهبشت ۱۳۹۲
- ۴- فریده کریمی، شبیه سازی عددی پدیده کاویتاسیون در سرریز پلکانی به کمک نرم افزار Fluent، شهریور ۱۳۹۹
- ۵- گزارش مدل هیدرولیکی سیستم تخلی سیلاب سد مخزنى البرز، موسسه تحقیقات آب ایران، ۱۳۸۰
- ۶- Ball, J.W. (۱۹۷۶). Cavitation from surface irregularities in high velocity. J. Hydraulics Div. ASCE ۱۰۲(HY۹), ۱۲۸۳-۱۲۹۷
- ۶- Eisenhauer, N., ۱۹۸۷. Location of Aerators in Spillways. Concrete international, ۹(۳).
- ۷- Falvey, H., ۱۹۸۲. Predicting cavitation in tunnel spillways. Water Power & Dam Construction., ۳۴(۸): p.۱۳-۱۵
- ۸- Holl, J.W. (۱۹۶۰). The inception of cavitation on isolated surface irregularities. , J, Basic Engng. ASME ۸۲(۱), ۱۶۹-۱۸۳.
- ۹- Jorge Matos, Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams, ۲۰۲۲.
- ۱۰- Mirsolav Broucek, Numerical and Physical Modeling of the Performance of the Pro-vortex Vanes in Shaft Spillways, (۲۰۲۱)
- ۱۱- Shalnev, K.K (۱۹۵۱). Cavitation due to unevenness of the surface and erosion caused by it. Dokl. Akad. Nauk SSSR ۷۸(۱), ۳۳-۳۴.