

تحلیل عددی عملکرد هیدرومکانیکی شیر غلافی ۱۸۰۰-۲۰۰۰ سد تالوار و مقایسه نتایج با داده‌های تجربی

فرید وکیلی تهامی^{۱*}، محمد زهساز^۲، شهریار نیمکز جاوید^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۱

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: f_vakili@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق رفتار هیدرودینامیکی شیر غلافی ۱۸۰۰-۲۰۰۰ که شیر کنترل سد تالوار می‌باشد، با روش تجربی و عددی بررسی شده است. ابتدا مدل‌های ۱:۱۰ و ۱:۱۵ از شیر تهیه و آزمایشات لازم بر روی آن‌ها انجام و سپس براساس معیارهای طراحی و به کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری، مدل‌های شیر نمونه و واقعی تهیه و رفتار هیدرودینامیکی آن‌ها با روش دینامیک سیالات محاسباتی، پیش‌بینی می‌شود. سپس، تحلیل عددی با استفاده از مدل شیر واقعی انجام و رفتار هیدرودینامیکی آن به همان روش و رفتار هیدرومکانیکی آن براساس حل اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته و عوامل معادل مثل توزیع تنش در اجزا اصلی شیر، ضریب اطمینان آن‌ها، میدان سرعت و فشار در بدنه آن در بارآبی بالادست ثابت و در میزان بازشدگی‌های مختلف بررسی و همچنین پاسخ گذرای ارتعاشی شیر به دست آمده‌اند. مقایسه نتایج حاصل با داده‌های تجربی، صحت آن‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که تنش در قطعات شیر از حد مجاز بالا نبوده و هیچ قطعه‌ای به حد تسلیم نمی‌رسد. تنش بیشینه به دست آمده از تحلیل ارتعاشی از طریق تحلیل مودال با تنش تسلیم قطعات اصلی مقایسه شده و ضریب اطمینان ۲/۵ به دست آمده است. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهند که در میدان عمل شیر، دبی‌های عبوری مورد نظر ۲۳/۵ متر مکعب بر ثانیه (در سطح آب سد ۵۵ متر از محور شیر و ۱۰۰ درصد بازشدگی) و ۱۲/۷ متر مکعب بر ثانیه (در سطح آب سد ۱۵ متر از محور شیر و ۱۰۰ درصد بازشدگی) تخلیه می‌شوند. در نهایت، روند طراحی برای شیرهای مشابه نیز تدوین شده که می‌تواند در تولیدات آتی به کار رود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش تجربی، پارامترهای عملکرد، توزیع تنش و کرنش، حل عددی، شیر غلافی

Studying the Hydro-Mechanical Behavior of 1800-2000 Sleeve Valve for Talvar Dam

F Vakili-Tahami^{1*}, M Zehsaz², SH Nimkaz-Javid³

Received: 23 April 2016 Accepted: 31 December 2016

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: f_vakili@tabrizu.ac.ir

Abstract

In this paper, hydrodynamic behavior of 1800-2000 sleeve valve, which is the main control valve of Talvar dam, has been studied using experimental tests and numerical solutions. Firstly, 10:1 and 15:1 models of the valve have been produced to carry out necessary tests. Then, using computer software, hydraulic models of the valve have been developed and their hydrodynamic behavior has been investigated using Computational Fluid Dynamic (CFD). Then, a numerical model of the valve has been developed based on Finite Element (FE) method and the hydro-mechanic behavior of the valve has been analyzed. Major parameters such as stress distribution in the main components of the valve and their safety factor, distribution of the velocity and pressure for different upstream head and discharge rates together with the valve's dynamic response have been obtained. Comparing the results of the numerical analysis with the experimental data shows that analytical results have good agreement with experimental data. Results also show that stress level in the hydrostatic solution is lower than the yield limit. Also, the maximum stress level obtained from the dynamic response of the valve is compared with the yield stress of the major parts and a safety factor of 2.5 has been obtained. In addition, the results show that in practice, the nominal discharge of 23.5 m³/s (at water level of 55 meters from the valve axis with 100% opening) and 12.7 m³/s (at water level of 15 meters from the valve axis with 100% opening) can be achieved. In general, a methodology is developed to design the same large size valves which can be implemented in future products.

Keywords: Experiment, Operating parameters, Stress-strain distribution, Numerical solution, Sleeve valve

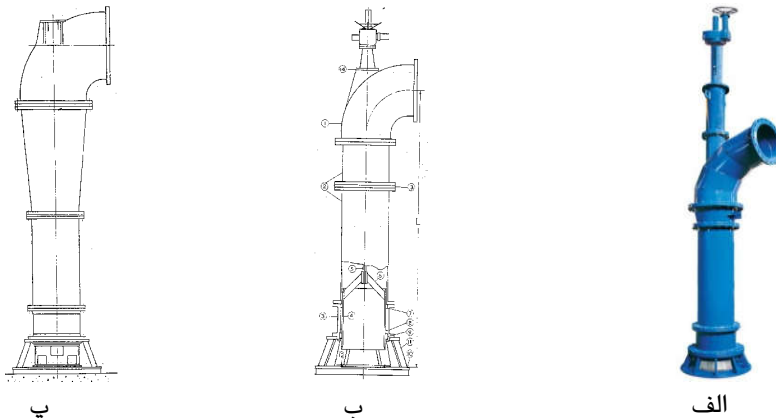
مقدمه

خروجی سدها و کانال‌های آبیاری را انجام دهند. این شیرها از یک لوله ورودی، زانویی و لوله عمودی تشکیل شده‌اند. لوله عمودی به دریچه کنترل غلافی مجهز بوده که خروجی شیر را تشکیل می‌دهد. نمونه‌ای از این نوع شیرها در شکل ۱ الف موجود است. در حالت استاندارد، لوله ورودی و لوله عمودی دارای قطر یکسان می‌باشند (شکل ۱ ب). از آنجا که لازم است سرعت بیشینه در زانوی ورودی شیر در حد ۷ متر بر ثانیه باشد، بهتر است مطابق آنچه در شکل ۱ پ نشان داده شده، سایز لوله ورودی و زانویی آن بزرگتر از لوله عمودی باشد. به این ترتیب افت فشار در زانویی نیز کاهش خواهد یافت. به همین دلیل،

شیرهای غلافی، شیرهایی هستند که می‌توانند بارآبی بالادست زیادی را تحمل کنند. در این نوع شیرها به دلیل نصب در داخل حوضچه بتنی و پاشش آن به کف حوضچه و بالا آمدن آب در داخل حوضچه و ریزش آب به بیرون حوضچه، جریان در خروجی به حالت سکون رسیده و از حوضچه خارج می‌شود. این شیرها در داخل حوضچه بتنی نصب شده و کار استهلاک انرژی در داخل حوضچه صورت می‌گیرد و آب بعد از وارد شدن به حوضچه به کانال‌های خروجی انتقال می‌یابد (اسمیت و زاپی ۲۰۰۳). شیرهای غلافی می‌توانند عمل تنظیم جریان

۱۳ متر بر ثانیه باشد. بنابراین قطر لوله عمودی معمولاً نباید کمتر از ۰/۷۵ قطر لوله ورودی باشد (تاتل و همکاران ۲۰۱۳).

اندازه این شیرها معمولاً با دو عدد قطر زانویی یا ورودی و قطر بدنه عمودی ذکر می‌شود. در هر حال توصیه می‌شود که سرعت آب عبوری از لوله عمودی نیز کمتر از



شکل ۱- (الف) شکل واقعی از شیر غلافی (ب) شیر غلافی استاندارد با قطر لوله افقی ورودی و لوله عمودی یکسان (پ) شیر غلافی استاندارد با قطر لوله ورودی بزرگتر نسبت به لوله عمودی.

داشته‌اند. ناصرالدین موسوی و همکاران (۲۰۱۱)، مطالعه‌ای در مورد مدل ریاضی غیرخطی شیر پروانه‌ای با محرک سولنوئید داشته‌اند که در آن، مدل کردن و تحلیل باز و بسته شدن شیر پروانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین معادلات با استفاده از روش عددی تحلیل گشته است. کوایمی و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه‌ای در موضوع دینامیک غیر خطی در شیر پروانه‌ای به‌کار گرفته شده به‌وسیله یک نیروی الکتروموتیو داشته‌اند. توفیق حسن و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعه‌ای در موضوع کاراکترهای انتقال جریان هوای مرطوب پیرامون شیر پروانه‌ای با تراکم خودبه‌خودی داشته‌اند که در آن تاثیر تراکم خودبه‌خودی هوای مرطوب بر روی دینامیک موج شوک پیرامون شیر پروانه‌ای با استفاده از روش‌های تجربی و عددی بررسی شده است. بررسی مطالعات پژوهشی در ادبیات فن آشکار می‌سازد که علی‌رغم کاربرد عملی و صنعتی فراوان شیرهای غلافی، تحقیق زیادی در

در سال‌های گذشته، مطالعات زیادی در مورد انواع شیرها انجام گرفته است. برای مثال، هوانگ و کیم (۱۹۹۶)، با کار مشترک به بررسی رفتار دینامیکی سیال عبوری از شیر پروانه‌ای در زاویه‌های مختلف دیسک و با کمک بسته نرم‌افزاری فولونت^۱ در حالت دو بعدی پرداخته‌اند. یانگ و همکاران (۲۰۰۵)، مطالعه‌ای در موضوع کشف پدیده خلزایی برای شیر پروانه‌ای استفاده شده در ساپورت ماشین‌های محوری داشته‌اند. چرن و همکاران (۲۰۰۷)، مطالعه‌ای در موضوع تست اجرایی و جریان پایداری شیر توپی انجام داده‌اند. براساس این مطالعه، الگوهای جریان و پدیده خلزایی شیر توپی به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. مسجیدیان و رحیم‌زاده (۲۰۰۹)، پژوهشی در موضوع یافتن پدیده خلزایی در شیرهای بشقابی، با دو روش دیگرام‌های ماهیتی و تحلیل‌های صوتی ارائه داده‌اند. فستر و اسلاتر (۲۰۰۹)، مطالعه‌ای با موضوع تشابه دینامیکی سیال‌های غیرنیوتنی در شیرهای بشقابی

^۱ Fluent

تالوار ۶۴۴۱ کیلومتر مربع است و میزان آورد متوسط رودخانه ۲۸۳ میلیون متر مکعب در سال و سیستم سرریز آن اوجی شکل آزاد است. شیر غلافی مورد نظر به قطر ورودی ۲۰۰۰ میلی‌متر، قطر لوله عمودی ۱۸۰۰ میلی‌متر و فاصله محور به کف ۱۰ متر می‌باشد. این شیر جهت عبور بیشینه دبی ۱۳/۵ متر مکعب بر ثانیه و بارآبی بیشینه ۴۲ متر، بارآبی نامی ۳۰ متر و بارآبی کمینه ۸ متر طراحی شده است.



شکل ۲- تصویر سد تالوار.

تحلیل عددی رفتار هیدرودینامیکی

ساخت و آزمایش شیرهای قطر بزرگ یک فرآیند پرهزینه می‌باشد؛ بنابراین، امروزه از روش‌های عددی برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی این نوع شیرها استفاده می‌کنند. در این پژوهش، تحلیل عددی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و به‌کارگیری نرم‌افزار کاسموس فلورکس^۳ رفتار هیدرودینامیکی شیر مورد نظر بررسی شده است. در این مدل، معادلات ناویراستوکس رینولدز متوسط^۴ (RANS) و پیوستگی به‌صورت عددی برای یک جریان تراکم‌ناپذیر حل می‌شوند. رابطه ۱ معادله ناویراستوکس را نشان می‌دهد.

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V - \rho \left(\frac{\partial v'_i v'_j}{\partial x_j} \right)$$

زمینه مطالعه رفتار هیدرومکانیکی این شیرها انجام نشده است. از سوی دیگر، این شیرها غالباً در سدها، در سامانه‌های آبرسانی و آبیاری کشاورزی استفاده شده و در ابعاد و قطرهای بزرگ (بیشتر از یک متر) تولید می‌شوند. بنابراین، طراحی آن‌ها بسیار حساس و آزمایش آن‌ها پرهزینه و گاهی غیرممکن می‌شود. این نکات، اهمیت تدوین یک متدولوژی مشخص را برای طراحی و تست شیرهای مذکور آشکار می‌سازد (اسلامی ۱۳۸۹). در این تحقیق مراحل طراحی یک شیر غلافی تدوین شده است. ابتدا طراحی اولیه شیر در نرم‌افزار سالیدورک^۲ انجام شده و ابعاد، جنس و عملکرد قطعات اصلی مشخص شده است؛ سپس، نمونه‌های ۱۰:۱ و ۱۵:۱ از آن براساس تشابه هیدرولیکی تهیه و آزمایش‌های هیدرودینامیکی بر روی آن‌ها انجام شده است. در مرحله بررسی عددی، مدل عددی از شیر نمونه تهیه و نتایج حاصل از تحلیل عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی که پارامترهای عملکردی شیر را ارائه می‌دهند، با نتایج تجربی مقایسه شده است. در نهایت مدل عددی از شیر با اندازه واقعی تهیه و براساس حل مبتنی بر روش اجزای محدود، رفتار هیدرومکانیکی آن شامل تنش و کرنش قطعات اصلی در شرایط مختلف به‌دست آمده و بر این اساس، طراحی نهایی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات شیر غلافی مورد نظر

شیر مذکور به‌عنوان شیر کنترل اصلی سد تالوار می‌باشد. این سد در مرز مشترک شهرستان بیجار استان کردستان و زنجان و همدان واقع شده است (شکل ۲). سد مذکور از نوع خاکی با هسته رسی بوده و دارای ارتفاع از پی ۸۸ متر، طول تاج ۵۲۹ متر و عرض تاج ۱۲ متر می‌باشد. این سد با حجم کل ۵۰ میلیون متر مکعب، سالانه ۲۳۱ میلیون متر مکعب آب را تنظیم می‌نماید. حوضه آبریز سد

^۴ Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)

^۲ Solid work

^۳ Cosmos FloWorks

عدد ناصافی سطح در تحلیل عددی ۱۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. برای مطالعه حساسیت شبکه، تحلیل برای اندازه شبکه‌های مختلف تکرار شده است تا زمانی که نتایج به دست آمده برای سرعت بیشینه و فشار بیشینه جریان با خطای قابل قبول ۱۰ درصد همگرا شوند.

این شیرها در نرم‌افزار کاسموس با استفاده از سه نوع جزء هرمی ۴ گرهی ۱۲۰، ۱۰۲ و ۹۲ شبکه‌بندی شده‌اند. چگونگی اجزاء مدل در دقت محاسبات تاثیر دارد. اجزاء می‌باید تا حد ممکن از اضلاع مساوی تشکیل شده و نیز اندازه آنها هماهنگ با اندازه واقعی قطعات انتخاب شوند. به خصوص، در مواضعی که امکان تمرکز تنش وجود دارد، می‌باید از اجزاء ریزتری استفاده نمود. از طرف دیگر استفاده از اجزاء خیلی ریز، حجم محاسبات و نیز خطای ناشی از آن را افزایش می‌دهد. به همین دلیل، تحلیل با چند نوع اجزاء انجام می‌گیرد و در هر مرحله اندازه اجزاء ریزتر می‌گردد تا نتایج همگرا گردند. جدول ۱ تغییرات بیشینه تنش محاسبه شده برای شیر اصلی با فشار ۶۳ متر ستون آب در حالت تمام بسته را برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به علت همگرایی حل عددی، جواب‌ها مستقل از شبکه می‌باشند، بنابراین صحت مدل مورد استفاده تایید می‌شود.

جدول ۱- تغییرات بیشینه تنش محاسبه شده برای شیر اصلی ۱۸۰۰-۲۰۰۰ با فشار ۶۳ متر ستون آب در حالت تمام بسته برای شبکه‌های مختلف.

شماره مدل	تعداد گره	تعداد جزء	تنش بیشینه (m H ₂ O)
۱	۱۳۵۴۷۳	۷۰۱۵۵	۸۴۶۹
۲	۱۴۳۸۷۵	۷۴۵۸۶	۸۵۴۹
۳	۱۸۴۴۳۵	۹۵۸۰۷	۸۶۰۲
۴	۲۷۳۲۲۹	۱۴۲۱۱۷	۸۶۰۲

در مرحله‌ی دوم، نتایج به دست آمده از تحلیل سیالاتی مرحله اول، به خصوص توزیع فشار هیدرودینامیکی، به صورت داده‌های اولیه در حل جامداتی مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\nabla V = 0 \quad [1]$$

که در آن‌ها V سرعت متوسط سیال بر حسب $(m s^{-1})$ ، P فشار متوسط سیال بر حسب (Pa) ، μ ویسکوزیته سینماتیکی بر حسب $(m s^{-2})$ ، ρ چگالی سیال بر حسب $(Kg m^{-3})$ ، t زمان بر حسب (S) و ρg نیروی وزن مخصوص بر حسب $(N m^{-3})$ می‌باشد. همچنین در این معادلات v' سرعت نوسانی می‌باشد که در جمله آخر با تنش‌های رینولدز ظاهر می‌شود. هدف مدل توربولانس در حقیقت ارائه مدل مناسب برای این تنش‌ها و مربوط ساختن آن‌ها به مقادیر متوسط می‌باشد. به این ترتیب دستگاه معادلاتی حاصل می‌گردد که قابلیت حل با روش‌های عددی را خواهد داشت. برای حل معادلات ناویراستوکس نزدیک دیواره‌ها، روند جریان سیال به صورت توربولانس لایه‌ای در نظر گرفته شده است. در مدل توربولانس، معادلات ناویراستوکس با رینولدز متوسط بکار برده شده است (شکوهی و همکاران ۱۳۹۴). به منظور حل معادلات فوق از متوسط زمانی پارامترهای مختلف از جمله سرعت استفاده شده است که برای هر پارامتر مانند u متوسط زمانی آن با رابطه ۲ به دست می‌آید.

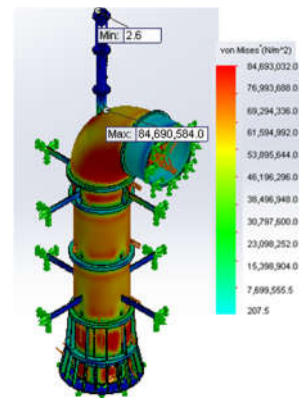
$$\bar{u} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t^*} u dt \quad [2]$$

که در آن t^* هر زمان دلخواه و t_0 مبدا زمانی می‌باشند. همراه با RANS، در مدل توربولانس، معادلات مومنتوم نیز به هم مرتبط می‌شوند. معمولاً در صنعت از مدل‌های توربولانس دو معادله‌ای مانند مدل $k - \epsilon$ ، مدل $k - \omega$ و مدل تنش برشی رینولدز استفاده می‌شود. برای حل این مدل، از مدل $k - \epsilon$ استفاده شده است، چرا که این مدل شامل تابع‌های غیر خطی پیچیده نمی‌شود و نسبت به مدل‌های دیگر قوی‌تر است (شکوهی و همکاران ۱۳۹۴). برای پیدا کردن لایه مرزی، طول توربولانس $18/45$ میلی‌متر همراه با شدت توربولانس ۲ درصد فرض شده است. جزء سه‌بعدی مکعبی با بیشینه اندازه 40 میلی‌متر برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است.

نتایج و بحث

تحلیل رفتار هیدرواستاتیکی شیر غلافی

تحلیل‌های انجام شده برای فشار از طرف بالادست شیر و در حالت کاملاً بسته و تخلیه آزاد از طرف دیگر انجام شده‌اند. شرایط تکیه‌گاهی به صورت کاملاً گیردار در انتهای لوله ورودی و پایه‌های نگهدارنده اعمال شده است. از ۱/۵ برابر فشار نامی که برابر ۶۳ متر ستون آب است، به عنوان فشار اعمال شده در بررسی هیدرواستاتیکی استفاده شده است. شکل ۳ کانتور توزیع تنش و شرایط تکیه‌گاهی را برای تحلیل هیدرواستاتیکی شیر اصلی، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، بیشترین تنش معادل در قسمت زانویی به وجود آمده و مقدار آن ۸۴۶۹ متر ستون آب می‌باشد و با توجه به جنس زانویی با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال، ضریب اطمینان با توجه به رابطه $n = S_y / \sigma_e$ (شیگی و همکاران ۲۰۰۴) که در آن σ_e تنش معادل و S_y تنش تسلیم می‌باشد، برابر با ۲/۷۶ به دست می‌آید.



شکل ۳- شرایط تکیه‌گاهی و توزیع تنش بر حسب پاسکال در حالت تمام بسته با بارآبی بالادست ۶۳ متر ستون آب.

جدول ۲- نتایج تحلیل عددی هیدرواستاتیکی شیر

غلافی در حالت بسته با بارآبی بالادست ۶۳ متر آب.

قطعه	بیشینه تنش معادل (m H ₂ O)	ضریب اطمینان	بیشینه کرنش (mm mm ⁻¹)
Elbow	۸۵۰۰	۲/۷۶	۲/۴×۱۰ ^{-۴}
Reducer	۴۱۰۰	۵/۸۷	۱/۳×۱۰ ^{-۴}
Piston	۵۱۰۰	۴/۶	۲/۱×۱۰ ^{-۴}

تحلیل ارتعاشی شیر

اگر فرکانس برانگیزش سیستمی با یکی از فرکانس‌های طبیعی آن برابر شود، حالت تشدید روی می‌دهد و ممکن است نوسان‌های بزرگ خطرناک به وجود آیند. بنابراین در طراحی سیستم‌های مکانیکی لازم است مقادیر فرکانس طبیعی برآورد شوند. وقتی یک سیستم دینامیکی با برانگیزش $F(t)$ که به طور ناگهانی اعمال می‌شود، برانگیخته شود، پاسخ گذرا حاصل می‌شود. در بررسی شیر غلافی مورد نظر، با استفاده از نرم‌افزار کاسموس پس از مدل‌سازی ارتعاشی از طریق تحلیل مودال، تحلیل پاسخ گذرای شیر در حالتی که بیشترین تنش می‌تواند در بدنه شیر رخ دهد، مدل‌سازی و تحلیل شده است. تنش بیشینه به دست آمده از این تحلیل با تنش تسلیم قطعه مقایسه شده و ضریب اطمینان به دست آمده است. در جدول ۳، مقادیر فرکانس‌های طبیعی به دست آمده برای شیر غلافی که از طریق تحلیل عددی حاصل شده‌اند، ارائه شده است.

جدول ۳- فرکانس‌های طبیعی شیر غلافی به دست

آمده از تحلیل مودال عددی.

شماره مود	فرکانس (Hz)	زمان تناوب (s)
۱	۷/۰۴۴۵	۰/۱۴۱۹۶
۲	۷/۸۴۷۴	۰/۱۲۷۴۳
۳	۳۱/۶۸۹	۰/۰۳۱۵۵۷
۴	۳۱/۷۷۹	۰/۰۳۱۴۶۸
۵	۳۵/۷۱	۰/۰۲۷۹۹۷

در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل هیدرواستاتیکی شیر کاملاً بسته با بارآبی بالادست ۶۳ متر ستون آب ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تنش معادل بیشینه، ضریب اطمینان و تغییر مکان در قطعات اصلی در محدوده قابل قبول می‌باشند.

این فشار به تمام سطح داخلی شیر در بازه زمانی کوتاه ۰/۵ ثانیه اعمال و برداشته شده است. این بازه در محدوده فرکانس اول سازه می‌باشد. در این حالت می‌توان تنش و تغییر فرم سازه را در طی اعمال شرایط بار گذرا شبیه‌سازی نمود. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه تنش در محل اتصال نگه‌دارنده بدنه شیر در لحظه ۰/۲۰۵ ثانیه رخ می‌دهد. شکل ۴ الف پاسخ دینامیکی سازه را در این لحظه نشان می‌دهد. به طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، تحت تاثیر بار دینامیکی، بیشینه تنش به ۹۲/۴ مگاپاسکال رسیده و پس از برداشتن بار، مقدار آن میرا می‌شود. جنس قطعه در این محل از فولاد St37 با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال می‌باشد و بنابراین ضریب اطمینان سازه با چنین شرایط بارگذاری دینامیک، ۲/۵۳ می‌شود. شکل ۴ ب، کانتور جابجایی نقاط مختلف شیر در پاسخ گذرا را در لحظه ۰/۲۰۵ ثانیه نشان می‌دهد. بیشینه جابجایی در قسمت تحتانی بدنه شیر غلافی رخ می‌دهد و مقدار آن برابر ۱/۶۲ میلی‌متر می‌باشد.

بررسی تجربی رفتار هیدرومکانیکی شیرهای نمونه ۱۰:۱ و ۱۵:۱

از آنجا که ساخت و آزمایش شیر غلافی ۱۸۰۰-۲۰۰۰ بسیار پرهزینه می‌باشد، ابتدا یک مدل ۱۰:۱ از شیر تهیه و آزمایش‌های لازم بر روی آن انجام شده و نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. نکته قابل ذکر در مورد نتایج ارائه شده در جدول ۴ این امر می‌باشد که به علت تجاوز دبی عبوری از شیر در درصدهای گشودگی بیش از ۲۵ درصد از حدمجاز، نتایج حاصل در نظر گرفته نشده‌اند. برای حل این مشکل، اقدام به ساخت نمونه ۱۵:۱ شده و نتایج آن در همان جدول ارائه شده است.

بررسی اثر تحریک ناشی از پدیده فون-کارمن^۵

موضوع تحریک بدنه شیر ناشی از اثر فون-کارمن نیز مورد نظر است که معمولاً می‌تواند به علت تشکیل نوار گردابه‌های جریان در پشت شیر موجب تحریک سازه گردد. به منظور بررسی احتمال تحریک ابتدا فرکانس تحریک این گردابه‌ها تعیین می‌شود. این فرکانس از عدد استروهال^۶ (St) به کمک رابطه ۳ تعیین می‌شود (وایت ۲۰۰۳).

$$\frac{fD}{V} = 0.198 \left(1 - \frac{19.7}{Re}\right) \quad \text{where} \quad Re = \frac{VD}{\nu} \quad [3]$$

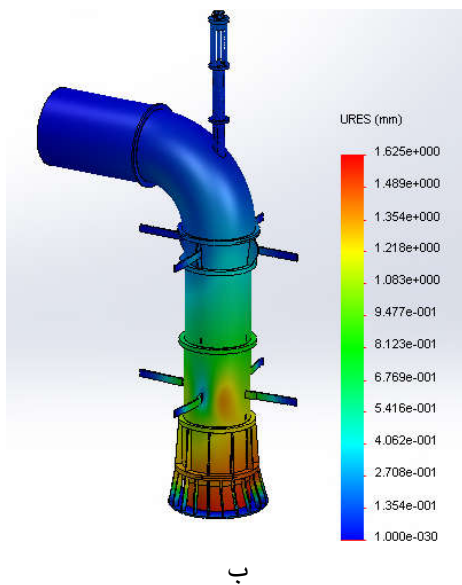
که در آن V سرعت نامی جریان در داخل لوله بر حسب $(m \cdot s^{-1})$ ، ν ویسکوزیته سینماتیک آب در دمای محیط برابر $(m^2 \cdot s^{-2})$ ، $1/0.004 \times 10^{-6}$ ، D قطر نامی شیر بر حسب (m) و f فرکانس تحریک بر حسب (Hz) می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت جریان برای دبی بیشینه شیر ۱۳/۵ مترمکعب بر ثانیه در لوله عمودی به قطر ۱/۸ متر، حدود ۵/۳ متر بر ثانیه می‌باشد، فرکانس تحریک برابر ۰/۵۸۳ هرتز و زمان تناوب برابر ۱/۷۲ ثانیه خواهد بود. با افزایش دبی یا سرعت جریان، زمان تناوب کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج حاصل برای فرکانس‌های طبیعی شیر واقعی که در جدول ۳ ارائه شده است، ملاحظه می‌گردد که تمامی پنج فرکانس اول بیشتر از این مقدار تحریک می‌باشند؛ بنابراین حتی اگر جریانی با سرعت نامی از شیر عبور کند امکان تشدید وجود نخواهد داشت.

تحلیل پاسخ گذرای دینامیکی

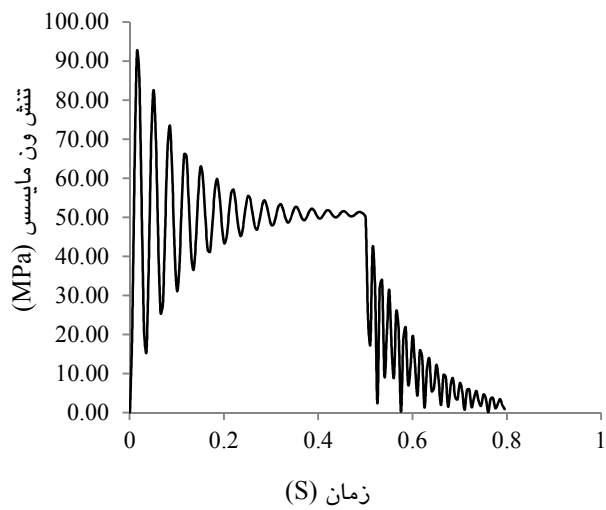
به منظور محاسبه تنش و تغییر فرم سازه در اثر ارتعاش، از روش تحلیل پاسخ گذرای دینامیکی استفاده شده و ۱/۵ برابر فشار بیشینه کارکرد شیر یعنی ۶۳ متر ستون آب به عنوان فشار مبنای محاسبات در نظر گرفته شده است.

⁶ Strouhal number

⁵ Von-Karman



ب



الف

شکل ۴- (الف) پاسخ گذرای دینامیکی در محل بیشینه تنش معادل (ب) کانتور توزیع تغییر مکان گذرا در زمان ۰/۲۰۵ ثانیه.

در معلوم بودن قطر مقطع لوله عمودی محاسبه می‌شود. با مشخص شدن اختلاف بارآبی و سرعت برای هر درصد بازشدگی شیر ضریب k متناظر با آن به دست می‌آید. جدول ۵ مقادیر تجربی ضریب اُفتِ بارآبی شیر را که توسط کمپانی گلن فیلد و کندی^۷ برای شیر غلافی استاندارد و شیر با نسبت قطر لوله عمودی به لوله ورودی ۰/۷۵ ارائه شده است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب مقاومت با باز شدن شیر کاهش می‌یابد و برای شیر استاندارد این ضریب در ۱۰۰ درصد بازشدگی ۱/۶۲ و برای شیر با نسبت قطر ۰/۷۵ برابر ۵/۱۲ می‌باشد. از آنجا که شیر غلافی اصلی مورد نظر در این بررسی نسبت قطر لوله عمودی به قطر لوله ورودی ۰/۹ را دارد، ضریب اُفتِ بارآبی آن باید بین این دو مقدار باشد که مقایسه داده‌های جدول‌های ۴ و ۵ نشانگر این موضوع هستند.

در بیشتر تحلیل‌های عددی و یا مدل‌سازی‌های هیدرولیکی، استفاده از ضرایب بی‌بعد دقت محاسبات و نیز سادگی کار را افزایش می‌دهد. گرچه هدف تحلیل ابعادی کاهش متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها به صورت بی‌بعد است ولی یک مزیت دیگر آن نیز تبدیل کردن داده‌های مربوط به یک مدل کوچک به داده‌های طراحی برای یک مدل واقعی به کمک قوانین تشابه حاصل از تحلیل ابعادی می‌باشد. در این پژوهش جهت مدل‌سازی هیدرولیکی از اعداد فرود و رینولدز استفاده شده است و از ضرایب بی‌بعد مقاومت جریان، خللازیی و عدد استروهال نیز در بیان نتایج استفاده گردیده است. یکی از پارامترهای مورد نیاز هیدرولیکی برای شیرهای غلافی، ضریب اُفتِ بارآبی است که از رابطه ۴ می‌توان به دست آورد (استاندارد AWWA ۲۰۰۰).

$$k = \frac{2g\Delta H}{V^2} \quad [4]$$

که در آن ΔH اختلاف بارآبی در طرفین شیر بر حسب (m) بوده و V سرعت در لوله عمودی بر حسب ($m s^{-1}$) است. در روش تجربی بارهای آبی در بالادست و پایین دست شیر بر حسب متر ستون آب اندازه‌گیری می‌شوند و سرعت با مشخص شدن دبی عبوری توسط دبی‌سنج مغناطیسی و

⁷ Glenfield & Kennedy limited

شده است. ابتدا شرایط مرزی دبی ثابت $13/5$ متر مکعب بر ثانیه که بیشینه دبی عبوری نامی از شیر می باشد با خروجی فشار اتمسفر، مد نظر گرفته شده است تا ضریب تخلیه، توزیع فشار و سرعت در مقطع شیر و حوضچه در این شرایط مشخص شوند. هر چند عبور چنین دبی بالایی از شیر به خصوص در بازشدگی کم مثل 25 درصد به دلیل بارآبی بالادست زیاد، توصیه نمی گردد. توزیع فشار استاتیکی و سرعت متوسط در طول لوله عمودی و حوضچه سکون شیر اصلی به ازای مقادیر بازشدگی 5 ، 10 ، 20 ، 25 ، 50 ، 75 و 100 درصد بازشدگی پیستون شیر به دست آمده است. شکل 5 الف توزیع فشار استاتیک در لوله عمودی و حوضچه سکون شیر اصلی در 100 درصد بازشدگی پیستون شیر را به ازای دبی عبوری ثابت $13/5$ متر مکعب بر ثانیه، نشان می دهد. همچنین شکل 5 ب توزیع سرعت را در شرایط مذکور نشان می دهد. در این اشکال به منظور توضیح بیشتر، فشار و سرعت نقاط مشخص نیز داده شده است. نتایج حاصل از حل عددی با این شرایط مرزی نشان می دهد که برای شیر حتی با عبور دبی بالای $13/5$ متر مکعب بر ثانیه خللازی رخ نمی دهد. با توجه به اینکه سرعت جریان متوسط در بالادست شیر برای دبی $13/5$ متر مکعب بر ثانیه با قطر لوله 2000 میلی متر به $4/29$ متر بر ثانیه می رسد و نظر به اینکه سرعت بیشینه توزیع سهموی سرعت در لوله ها به $1/5$ برابر سرعت متوسط می رسد، سرعت بیشینه ورودی به $6/44$ متر بر ثانیه خواهد رسید. بنابراین برای 25 درصد گشودگی انتظار می رود که سرعت بیشینه در گلوگاه به سطحی بالاتر از چهار برابر این مقدار یعنی $25/78$ متر بر ثانیه برسد که حل عددی نیز مقدار $22/7$ متر بر ثانیه را پیش بینی می کند.

جدول ۴- داده های به دست آمده از روش تجربی برای محاسبه ضریب اُفتِ بارآبی شیرِ مدل.

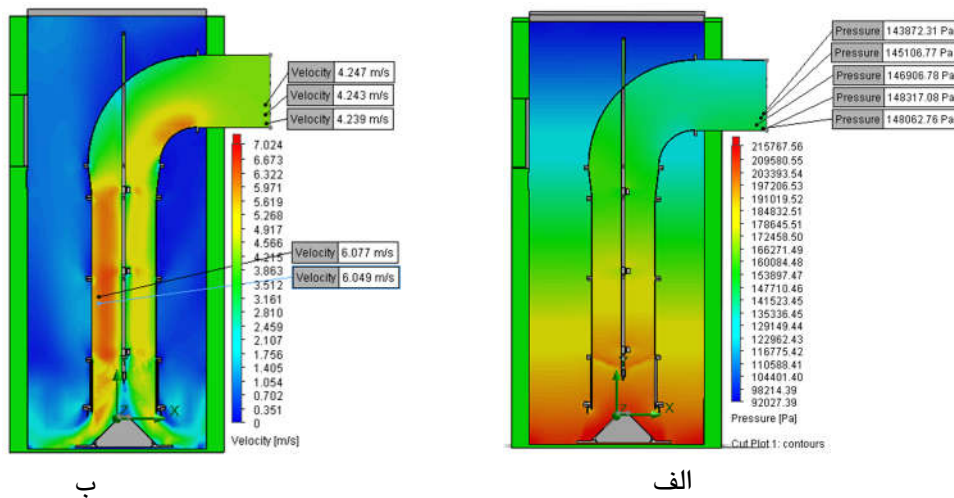
درصد بازشدگی پیستون	شیر مدل ۱۰:۱		شیر مدل ۱۵:۱	
	ضریب اُفت k	بارآبی بالادست (m H ₂ O)	ضریب اُفت k	بارآبی بالادست (m H ₂ O)
۵	۰/۰۰۳	۳/۷۶	۰/۰۰۰۹	۰/۴
۱۰	۰/۰۱۱	۳/۷۱۵	۰/۰۰۳۸۹	۰/۵۳
۲۰	۰/۰۲۹	۳/۶۴۵	۰/۰۰۹۲	۱/۳۳
۲۵	۰/۰۲۸	۳/۶۲	۰/۰۱۲۳	۱/۳۳
۵۰	-	-	۰/۰۲۵	۲
۷۵	-	-	۰/۰۳۹	۲/۸
۱۰۰	-	-	۰/۰۳۶	۲

جدول ۵- مقادیر ضریب اُفت k برای شیر استاندارد و شیر با ضریب تغییر قطر لوله عمودی و لوله ورودی $0/75$ ارائه شده توسط گلن فیلد و کندی.

درصد بازشدگی	ضریب اُفتِ بارآبی k		ضریب اُفتِ بارآبی k	
	شیر با قطر استاندارد	شیر با قطر استاندارد	شیر با قطر استاندارد	شیر با قطر استاندارد
۱۰	۹۹/۵	۳۱۴	۶۰	۲/۸۰
۲۰	۲۳/۷۵	۷۵	۷۰	۲/۲۵
۳۰	۱۰/۱۱	۳۱/۷۵	۸۰	۱/۹۷
۴۰	۵/۴۱	۱۷/۱	۹۰	۱/۷۸
۵۰	۳/۷۵	۱۱/۷۳	۱۰۰	۱/۶۲

تحلیل هیدرودینامیکی شیر غلافی اصلی با دبی ثابت $13/5$ (m³ s⁻¹)

تحلیل عددی انجام شده برای مدل شیر واقعی به منظور بررسی شرایط کارکرد هیدرودینامیکی آن انجام



شکل ۵- (الف) توزیع فشار استاتیک در بدنه شیر و حوضچه سکون (ب) توزیع سرعت در لوله عمودی و حوضچه سکون شیر اصلی در ۱۰۰ درصد بازشدگی پیستون شیر به ازای دبی عبوری ثابت ۱۳/۵ متر مکعب بر ثانیه.

دبی ۱۳/۵ متر مکعب بر ثانیه عملاً مشکل خللازی در شیر مورد نظر وجود نخواهد داشت.

جدول ۶- مقادیر ضریب خللازی برای درصدهای مختلف بازشدگی پیستون با دبی ثابت $13.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ برای شیر اصلی.

درصد بازشدگی پیستون	فشار (m H ₂ O)	ضریب خللازی	ضریب افت k
۲۵	۳۹/۲	۱/۹	۲۷/۳
۵۰	۱۹/۰	۲/۲۲	۱۳/۲۶
۷۵	۱۴/۹	۳/۰	۴/۰۱
۱۰۰	۱۴/۸	۲/۹۴	۳/۰۱

تحلیل هیدرودینامیکی شیر اصلی با بارآبی استاتیک بالادست ثابت

نتایج حاصل به ازای شرایط مرزی بارآبی استاتیک بالادست ثابت شیر ۴۲ متر ستون آب (بارآبی بیشینه کارکرد شیر)، ۳۰ متر ستون آب (بارآبی نامی کارکرد شیر) و ۸ متر ستون آب (کمینه بارآبی کارکرد شیر) در مقادیر درصد بازشدگی پیستون شیر به اندازه‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بررسی گردیده است. مقادیر دبی عبوری، ضریب خللازی و توزیع فشار و سرعت در مقطع شیر و حوضچه به دست آمده است ولی به منظور

جدول ۶ مقدار بارآبی کل بالادست شیر که نسبت به کف حوضچه محاسبه شده است را برای عبور دبی ثابت ۱۳/۵ متر مکعب بر ثانیه به همراه ضریب خللازی و همچنین ضریب افت بارآبی، k ، نشان می‌دهد. مقدار و ضریب خللازی از رابطه ۵ به دست آمده است (استاندارد AWWA ۲۰۰۰).

$$\sigma = \frac{p_u - p_v}{p_u - p_d} \quad [5]$$

که در آن σ ضریب خللازی با در نظر گرفتن فشار بالادست p_u ، پایین دست p_d و فشار بخار آب p_v (برابر ۰/۲۵ متر ستون آب) در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. باید خاطر نشان شد که مقدار کاویتاسیون قابل قبول نظری از نظر محاسباتی همان عدد ۱ می‌باشد. علاوه بر آن مقدار بحرانی عدد کاویتاسیون برای شیرهای غلافی در مقایسه با سایر انواع شیرها به دلیل اینکه این نوع از شیر در انتهای مسیر بوده و تخلیه آن به داخل حوضچه با سطح آزاد می‌باشد، بسیار پائین است. در تائید این موضوع گزارش ارائه شده از طرف کارخانه‌های سازنده شیرهای غلافی از جمله پرات (Pratt) نشان می‌دهد که حتی با ضریب کاویتاسیون ۰/۱۵ الی ۰/۲۵ مشکلی وجود نخواهد داشت. به همین دلیل می‌توان اذعان داشت که در هیچ حالتی برای

سپس نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند.

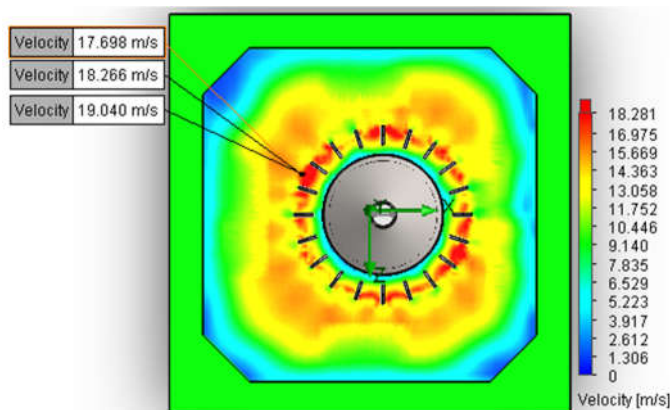
جدول ۷ - مقادیر دبی عبوری و ضریب خلزایی برای درصدهای مختلف بازشدگی پیستون شیر اصلی در بارآبی استاتیکی ۴۲ متر ستون آب بالادست.

درصد بازشدگی پیستون	دبی ($m^3 s^{-1}$)	سرعت بیشینه ($m s^{-1}$)	ضریب خلزایی
۱۰	۵/۲	۱۷/۷۴	۳/۳
۲۰	۱۲	۱۹/۳۵	۲/۷۷
۲۵	۱۴/۷	۱۹/۹	۲/۶۲
۵۰	۲۷/۳	۱۸/۴	۳/۰۶
۷۵	۳۵/۹	۱۸/۱	۳/۱۶
۱۰۰	۴۲/۲	۱۹/۹۴	۲/۶

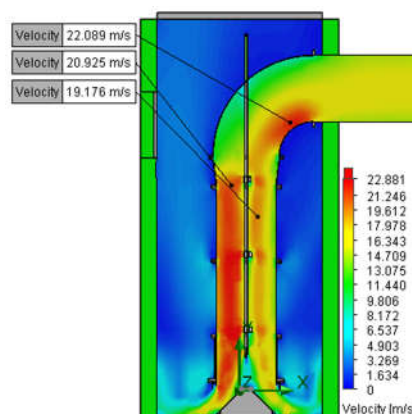
اجتناب از طولانی شدن مقاله تنها نتایج مربوط به شرط مرزی بارآبی بالادست ثابت ۴۲ متر ستون آب ارائه شده است. شکل ۶ الف توزیع سرعت در سطح مقطع شیر واقعی و همچنین شکل ۶ ب توزیع آن را در کف حوضچه شیر واقعی در ۱۰۰ درصد بازشدگی پیستون شیر نشان می‌دهد. در جدول ۷ مقادیر دبی عبوری برای درصد بازشدگی‌های مختلف پیستون شیر اصلی در بارآبی استاتیکی ۴۲ متر ستون آب بالادست شیر، نشان داده شده است.

عملکرد هیدرولیکی شیر اصلی و مقایسه آن با داده‌های تجربی

به‌منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی، دو مدل ۱۰:۱ و ۱۵:۱ از شیر ساخته شده و تحت شرایط مورد نظر با بارآبی بالادست ثابت آزمایش شده‌اند.



ب



الف

شکل ۶- (الف) توزیع سرعت در سطح مقطع شیر اصلی و حوضچه آن به‌ازای بارآبی استاتیکی ثابت ۴۲ متر ستون آب در بالادست شیر در ۱۰۰ درصد بازشدگی پیستون آن (ب) توزیع سرعت در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از کف حوضچه شیر اصلی به‌ازای بارآبی استاتیکی بالادست ثابت ۴۲ متر ستون آب و در ۱۰۰ درصد بازشدگی پیستون آن.

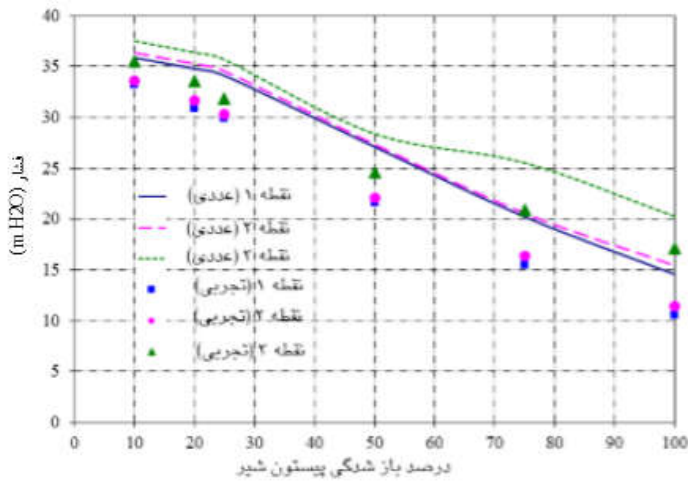
حوضچه اندازه‌گیری فشار انجام شده است. این اندازه‌گیری‌ها بر روی مدل ۱۵:۱ و در درصد بازشدگی‌های مختلف انجام شده است. شکل ۷ الف موقعیت نقاط اندازه‌گیری فشار در بدنه شیر مدل ۱۵:۱، کف حوضچه و دیواره آن را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۷ ب داده‌های

بررسی توزیع فشار در بدنه شیر اصلی

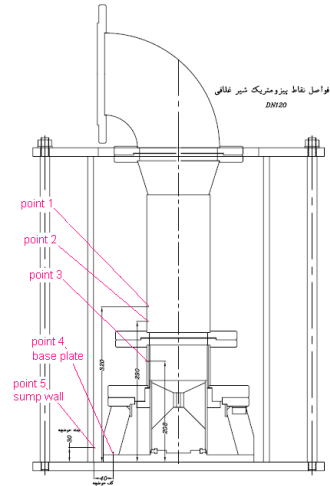
برای بررسی توزیع فشار در بدنه شیر اصلی و همچنین در حوضچه تخلیه شیر، در ۳ نقطه مختلف در بدنه شیر و همچنین ۱ نقطه در کف حوضچه و ۱ نقطه در دیواره

شیر در بارآبی ثابت استاتیک بالادست ۸ متر ستون آب در بازشدگی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

توزیع فشار اندازه‌گیری شده با آزمون تجربی و نتایج حاصل از حل عددی را برای نقاط ۱، ۲ و ۳ واقع در بدنه



ب



الف

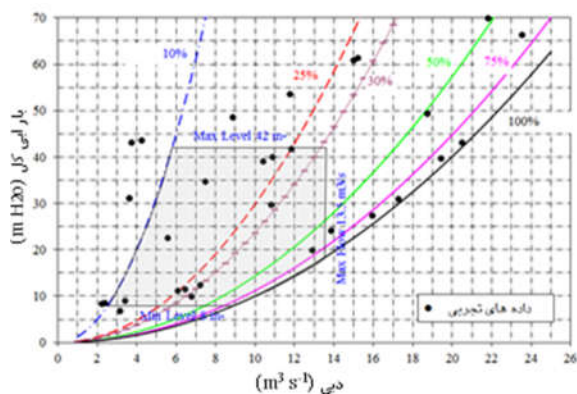
شکل ۷- (الف) موقعیت نقاط اندازه‌گیری فشار در بدنه، کف حوضچه و دیواره شیر مدل ۱۵:۱ (ب) مقایسه نتایج توزیع فشار تجربی و عددی برای نقاط ۱، ۲ و ۳ واقع در بدنه شیر بر حسب متر ستون آب در بازشدگی‌های مختلف و بار استاتیک بالادست ۸ متر ستون آب.

شده و همچنین داده‌های تجربی می‌توان منحنی‌های عملکرد شیر را از نظر دبی عبوری و بارآبی بالادست سد در یک دیگرام مطابق شکل ۸ ب ارائه داد. همچنین در این دیگرام نتایج تجربی به‌دست آمده برای شیرهای مدل ۱۰:۱ و ۱۵:۱ با اعمال ضرائب اصلاح مربوط به تشابه هیدرولیکی اضافه شده است تا در یک مجموعه، عملکرد شیر غلافی براساس نتایج محاسبات عددی و همچنین داده‌های تجربی نشان‌دهنده شود. در این دیگرام افت شیر و همچنین افت مسیر از محل سد تا محل شیر نیز لحاظ شده است. بنابراین منظور از بارآبی در این شکل در حقیقت ارتفاع آب در پشت سد می‌باشد. به‌طورکلی شکل ۸ ب نشان می‌دهد که نتایج تحلیلی با داده‌های تجربی تطبیق خوبی دارند. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهد که در میدان عمل شیر (ارتفاع سطح آب پشت سد تا محور شیر ۵۵ تا ۱۶ متر) دبی‌های عبوری مناسب ۲۳/۵ مترمکعب در ثانیه (بارآبی سطح آب ۵۵ متر از محور شیر و ۱۰۰ درصد بازشدگی) و ۱۲/۷ مترمکعب بر ثانیه (بارآبی سطح آب ۱۵ متر از محور شیر و ۱۰۰ درصد بازشدگی) تخلیه می‌شوند.

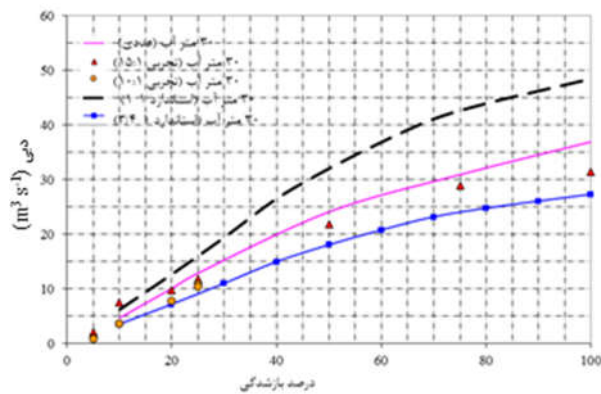
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج تجربی و عددی تطبیق خوبی دارند. در ۱۰ درصد گشودگی، اختلاف بین نتایج عددی و داده‌های تجربی کمتر از ۱۲ درصد بوده درحالی‌که در ۵۰ درصد گشودگی این اختلاف به ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علت این افزایش اختلاف، بالا بودن سرعت جریان در ۵۰ درصد گشودگی (۱۳/۷ متر مکعب بر ثانیه و سرعت ۵/۴ متر بر ثانیه) می‌باشد. با افزایش سرعت جریان این اختلاف نیز افزایش می‌یابد.

بررسی عملکرد عمومی شیر اصلی

شکل ۸ الف دبی‌های محاسبه‌شده برای شیر اصلی را با دبی‌های به‌دست آمده از نتایج تجربی، نشان می‌دهد. همچنین در این دیگرام‌ها دبی محاسبه شده برای شیر استاندارد و شیر با نسبت قطر ۰/۷۵ نیز ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، تطابق خوبی بین مقادیر محاسبه شده و داده‌های تجربی وجود دارد. علاوه بر آن، همان‌طور که انتظار می‌رفت، مقادیر دبی به‌دست آمده بین حد بالایی شیر استاندارد و شیر استاندارد با نسبت قطر ۰/۷۵ می‌باشند. با استفاده از محاسبات انجام



ب



الف

شکل ۸- (الف) مقایسه دبی محاسبه شده از حل عددی با داده‌های تجربی برای شیر اصلی در بارآبی استاتیک بالادست ثابت ۳۰ متر ستون آب (ب) منحنی‌های عملکرد شیر غلافی در بازشدگی‌های مختلف با در نظر گرفتن افت شیر و افت مسیر.

تجربی تطبیق خوبی دارند. در رفتار هیدرواستاتیکی شیر، نتایج نشان می‌دهند که تنش در قطعات شیر از حد مجاز بالا نبوده و حتی در فشار ۱/۵ برابر فشار نامی، ضریب اطمینان ۲/۷۶ می‌باشد. پس از مدل‌سازی ارتعاشی از طریق تحلیل مودال، تحلیل پاسخ گذرای شیر در حالتی که بیشترین تنش می‌تواند در بدنه شیر رخ دهد، مدل‌سازی و تحلیل شده است. تنش بیشینه به‌دست آمده از این تحلیل با تنش تسلیم قطعات اصلی مقایسه شده و ضریب اطمینان ۲/۵ به‌دست آمده است. نتایج تحلیل دینامیکی گذرا نشان می‌دهند که در صورت تحریک سازه با فشار ۶۳ متر ستون آب، حتی در یک بازه زمانی کوتاه نیم ثانیه، ضریب اطمینان قطعات شیر برابر ۲/۵۳ یا بیشتر خواهد بود. اثر فون کارمن و فرکانس تحریک ناشی از عبور جریان نیز به‌کمک عدد بی‌بعد استروهل بررسی شده و نشان داده شده است که اولاً امکان تشدید ناشی از این اثر عملاً در شیر وجود ندارد و ثانیاً در صورت تحریک با چنین فرکانسی، تنش‌های حاصل در بدنه بوده و قطعات اصلی شیر از نظر استحکام ایمن خواهند بود. به‌طور کلی بررسی عملکرد شیر نشان می‌دهد که در شرایط مورد نظر جریان نامی از شیر با افت فشار مورد قبول عبور کرده و در بازه عملکرد شیر خطر

جدول ۸ درصد خطای اندازه‌گیری شده برای دبی‌های محاسبه شده در بارآبی استاتیک بالادست ثابت ۳۰ متر ستون آب را نشان می‌دهد.

جدول ۸- درصد خطای اندازه‌گیری شده برای دبی‌های محاسبه شده در بارآبی استاتیک ثابت ۳۰ متر ستون آب

درصد خطای اندازه‌گیری شده	مقدار دبی عددی محاسبه شده ($m^3 s^{-1}$)	مقدار دبی تجربی برای مدل ۱۵:۱ ($m^3 s^{-1}$)	درصد بازشدگی پیستون شیر
۳۶	۴/۷	۷/۴	۱۰
۵/۲	۱۰/۱	۹/۶	۲۰
۹/۲	۱۲/۹	۱۱/۸	۲۵
۱۰	۲۴/۱	۲۱/۸	۵۰
۶/۹	۳۰/۹	۲۸/۹	۷۵

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از تحلیل عددی رفتار هیدرولیکی شیر غلافی اصلی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. به‌طور کلی مقایسه نتایج نشان می‌دهند که نتایج تحلیلی با داده‌های

آسیب ناشی از کاویتاسیون وجود ندارد. شیر غلافی (۱۸۰۰-۲۰۰۰) به دلیل کمک‌های فنی و در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی در انجام این پژوهش، تشکر و تقدیر: مولفین از مدیریت محترم، کارشناسان و پرسنل شرکت مکانیک آب (سازنده اصلی تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع مورد استفاده

- اسلامی ح، ۱۳۸۹. طراحی و تحلیل اجزاء محدود با Solid Works simulation 2009 (Cosmos Works) (ترجمه). انتشارات علمیران، تبریز.
- شکوهی ع، وکیلی ف، زهساز م و شکوهی ا، ۱۳۹۴. بررسی رفتار هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی شیر پروانه‌ای قطر بزرگ با استفاده از روش‌های عددی و تجربی. مجله مدل‌سازی در مهندسی، شماره ۴۱، صفحه‌های ۷۵ تا ۹۲.
- زارعی نژاد م و گرچی‌نژاد س، ۱۳۸۰. تحلیل به روش اجزاء محدود، انتشارات ارس رایانه، چاپ اول.
- Toufique Hasan ABM, Matsuo S and Setoguchi T, 2015. Characteristics of transonic moist airflows around butterfly valves with spontaneous condensation, Propulsion and Power Research 4(2):72–83.
- AWWA Standard for Rubber-Seated Butterfly Valves, American Water Work Association, 2012. ANSI/AWWA C504-00, Revision of ANSI/AWWA C504-94, American Water Works Association.
- Kwuimy CAK, Ramakrishnan S and Nataraj C, 2013. on thenonlinear on-off dynamicsofa butterfly valve actuated by aninduced electromotive force, Journal of Soundand Vibration 332: 6488–6504.
- Chern M, Wang C and Ma C, 2007. Performance test and flow visualization of ball valve, Experimental Thermal and Fluid Science 31: 505–512.
- Fester V and Slatter P, 2009. Dynamic similarity for non-Newtonian fluids in globe valves, chemical engineering research and design 87: 291–297.
- Huang C and Kim R, 1996. Three-dimensional Analysis of Partly Open Butterfly valve Flows, Journal of fluids Engineering Trans.ASMW 1185: 62-568.
- Masjedian Jazi A and Rahimzadeh H, 2009. Detecting cavitation in globe valves by two methods: Characteristic diagrams, Applied Acoustics 70(11):1440-1445.
- Naseradinmousavi P and Nataraj C, 2011. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators, Applied Mathematical Modelling 35 : 2324–2335.
- Shigley E, Mischke R and Budynas R, 2004. Mechanical Engineering Design, Seventh Edition, Mc Graw-Hill.
- Smith P and Zappe RW, 2003. Valve selection Handbook, Fifth edition: Engineering Fundamentals selection the Righth Valve design for every industrial Flow Application, Gulf professional publishing.
- Tuttle S, Chaudhuri Kopp-Vaughan K, Jensen T, Cetegen B, Renfro M and Cohen J, 2013. Lean blowoff behavior of asymmetrically-fueled bluff body-stabilized flames, Combustion and Flame, 160 (9), 1677-1692.
- White FM, 2003. Fluid Mechanics. Mc Graw-Hill.
- William J, 1982 . Rahmeyer, cavitation Noise from Butterfly Valves, Nuclear Engineering and Design 722: 97-301.
- Yang Bo-S, Hwang W, Ko M and J. Lee S, 2005. Cavitation detection of butterfly valve using support vector machines , Journal of Sound and Vibration 287: 25–43.