

بررسی تاثیر پارامترهای جریان در شیرهای پروانه ای در بازشدگی های مختلف بر فرایند کاویتاسیون

محمد حامد شعلائی^۱، محمدرضا جعفرزاده^۲، ابراهیم علامتیان^۳

۱-۲- دانشگاه فردوسی مشهد دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران

۳- موسسه آموزش عالی خاوران مشهد گروه عمران

h.shaelaie@gmail.com

خلاصه

شیرهای پروانه‌ای در سیستمهای انتقال آب و تخلیه کننده های تحتانی سد کاربرد زیادی دارند. شناسایی شرایط کارکرد ایمن و عاری از کاویتاسیون این شیرها جهت اجتناب از وقوع خسارت دارای اهمیت است. در این تحقیق جریان عبوری از شیر پروانه ای در بازشدگی های مختلف با استفاده از کد تجاری ANSYS CFX 14.5 و مدل تکفازی و دوفازی شبیه سازی شد. هم‌نواپی مناسبی بین نتایج عددی دو فازی با داده‌های آزمایشگاهی مشاهده گردید. استفاده از مدل تکفازی برای شبیه‌سازی جریان در شیرهای پروانه‌ای نتایج نادرستی در پی داشت و مشاهده شد در تمام زوایای بازشدگی تا پیش از رخداد کاویتاسیون، ضرایب تخلیه و گشتاور با افزایش فشار در ورودی افزایش یافته و پس از آن سیر نزولی به خود می‌گیرند.

کلمات کلیدی: شیر پروانه‌ای، کاویتاسیون، ضریب جریان، ضریب گشتاور، مدل عددی دوفازی

۱. مقدمه

شیر پروانه‌ای متشکل از دیسکی مدور درون پوسته‌ای فلزی است که توسط محوری با یکدیگر هم‌مرکز و متصل شده اند. در این شیر با چرخش دیسک، عبور جریان سیال کنترل می‌شود. اهمیت فراوان شیرهای پروانه‌ای در صنعت آب سبب شده است مطالعات زیادی بر روی آنها انجام گیرد. هدف عمده این تحقیقات، شناسایی پارامترهای جریان، بهینه سازی کارکرد، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کارایی این شیرها می‌باشد. یکی از محدودیت های کارکرد این شیرها پدیده کاویتاسیون^۱ است. هنگامی که در دمای ثابت، فشار هیدرواستاتیک در نقاطی از جریان کمتر از فشار بخار سیال شود کاویتاسیون رخ می‌دهد. در این حالت فشار نسبی منفی توسط تولید حباب‌های بخار جبران می‌گردد و انهدام حباب های بخار در پایین دست منجر به بروز آسیب در شیر می‌شود [۱]. با توجه به هزینه بسیار زیاد انجام آزمایشات مربوط به کاویتاسیون، اطلاعات زیادی در این زمینه توسط شرکت‌های سازنده اینگونه شیرها ارائه نشده است؛ این امر سبب گردیده است از این نوع شیر تنها جهت برقراری و بستن جریان سیال استفاده شود؛ حال آنکه با شناخت محدوده کاویتاسیون و گشتاور وارد بر دیسک، می‌توان از این نوع شیر جهت کنترل دبی نیز استفاده کرد. امروزه با پیشرفت روش‌های مدل‌سازی عددی، مطالعه پدیده کاویتاسیون با دقت بالا و هزینه قابل قبول ممکن شده است.

هندرسون و همکاران [۲] ضریب گشتاور و افت فشار را در شیر پروانه‌ای متقارن برای بازشدگی های ۱۰ تا ۸۰ درجه توسط کد تجاری ANSYS CFX با مدل آشفتگی SST بررسی کردند و نتایج عددی را با داده‌های تجربی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که در

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-آب دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ عضو هیئت علمی گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران مشهد

بازشدگی های بیشتر از ۲۰ درجه، جریان در پایین دست شیر به شدت تحت تاثیر گردابه های گذرا^۱ می باشد. ایشان برای مشاهده شکل گیری گردابه ها و بررسی فرکانس وقوع آنها از دامنه کامل لوله بدون شرط مرزی تقارن استفاده کردند. هرچند در مطالعه هندرسون روند کلی تغییرات ضریب گشتاور حاصل از نتایج عددی با نتایج تجربی همسو بود؛ ولی تقریباً در نیمی از حالات بازشدگی اختلاف ۲۵ درصدی میان نتایج وجود داشت. هندرسون و همکاران علت این اختلاف را خطای فشارسنج ها، افت فشار ناشی از اصطکاک در مخزن روغن هیدرولیک و اثر اصطکاک یاطاقانها میدانند. این افت فشار با افزایش گشتاور هیدرودینامیکی افزایش می یابد ولی در محاسبات از آن صرف نظر شده است. ایشان همچنین احتمال رخداد کاویتاسیون را نیز از دلایل محتمل خطا میدانند.

چاپوراپک [۳] عبور جریان سیال تراکم ناپذیر از دو شیر پروانه ای با قطرهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلیمتر را در بازشدگی های ۱۵ تا ۹۰ درجه با کد تجاری FLUENT و مدل آشفتگی k-ε بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. گردابه ها در نزدیکی نوک دیسک شیر پروانه ای شکل می گرفتند و با کاهش بازشدگی شیر توسعه می یافتند. برآورد ضریب افت شیر در این مطالعات، اختلاف ۵۰ درصدی با داده های آزمایشگاهی داشت.

گوان سانگ و پارک [۴] با مدلسازی عددی شیر پروانه ای با قطر ۱/۸ متر ضرایب افت فشار، جریان و گشتاور هیدرودینامیکی در بازشدگی های مختلف را بررسی کردند. مدلسازی توسط کد تجاری ANSYS CFX 10 و کاربرد مدل آشفتگی k-ε انجام شد. در این مطالعات تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی در بازشدگی های کمتر از ۲۰ درجه وجود نداشت. ایشان پیشنهاد دادند که از مدل جدیدتر SST برای ادامه تحقیقات استفاده شود.

و کیلی تهامی و همکاران [۵] ضریب گشتاور هیدرودینامیکی در چند نمونه دیسک شیر پروانه ای را با شکل های هندسی متفاوت بررسی کردند. مدلسازی در بازشدگی های گوناگون و با استفاده از کد تجاری Cosmos Flow Work با کاربرد مدل آشفتگی k-ε انجام شد. در این مطالعه با تغییر اختلاف فشار بالا و پایین دست، تاثیر شکل هندسی، زبری سطح و خروج از مرکزیت محور دیسک بر روی ضریب گشتاور هیدرودینامیکی شیر بررسی گردید و عدم بروز پدیده کاویتاسیون در بازشدگی های بیش از ۲۵ درجه و در فشار کاری ۱۰ بار گزارش شد. همچنین نتایج نشان داد بر خلاف رابطه ارائه شده در استاندارد AWWA C504 بین اختلاف فشار بالادست و پایین دست با گشتاور هیدرودینامیکی رابطه خطی برقرار نیست.

تحقیقات پیشین در شیرهای پروانه ای نشان می دهد پدیده کاویتاسیون و مدلسازی دوفازی جریان به صورت متمرکز مورد توجه نبوده و اکثراً از آن صرف نظر شده است. در تحقیق حاضر به کمک کد تجاری ANSYS CFX 14.5 و در ادامه تحقیقات هندرسون و همکاران [۲]، پدیده کاویتاسیون در شیرهای پروانه ای با زوایای مختلف بازشدگی دیسک بررسی و شاخص آستانه کاویتاسیون برای این شیرها محاسبه می شود.

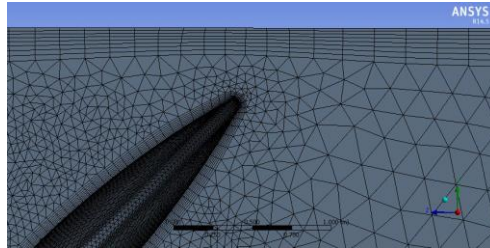
۲. مدلسازی عددی

در این تحقیق مدلسازی برای شیری مشابه مدل هندرسون [۲] انجام شد. حداکثر ضخامت دیسک $t=500\text{mm}$ ، قطر آن $D=3048\text{mm}$ و سایر مشخصات هندسی شیر بر اساس اطلاعات ارائه شده در مطالعه هندرسون انتخاب گردید. هندسه مدل با استفاده از نرم افزار Ansys Design Modeler ترسیم شد. جهت اطمینان از توسعه یافتگی جریان قبل از دیسک و عدم تاثیر شرط مرزی بر نتایج، دامنه مدل ۵۸ برابر قطر در بالادست و ۱۵ برابر قطر در پایین دست در نظر گرفته شد [۲]. از مدل آشفتگی SST برای محاسبه لزجت گردابه ای و انتقال تنش برشی ناشی از آشفتگی استفاده شد، [۲]، [۴]. در ورودی فضای حل از شرط مرزی فشار کل و در خروجی از شرط فشار نسبی صفر برای در نظر گرفتن تخلیه به اتمسفر استفاده شد. شرط مرزی تقارن نیز برای کاهش زمان حل در مقطع میانی دیسک بکار گرفته شد.

از المان های چهار وجهی Tetrahedron و پنج وجهی Prism برای شبکه بندی فضای حل استفاده شد. حداکثر طول المان های سطحی در لوله ۰/۲ متر و در سطح دیسک ۰/۰۰۶ متر بود. در نزدیکی کلیه جدارها به منظور افزایش دقت نرم افزار در محاسبه پروفیل سرعت،

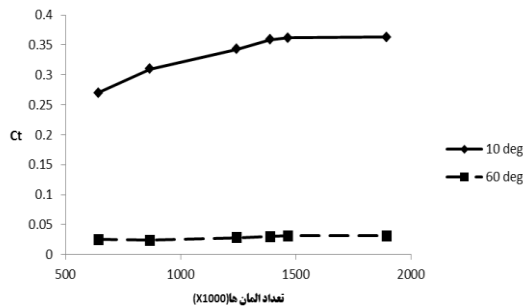
¹ Unsteady Vortical flow

لایه مرزی و جدایش سیال از سطوح، از المان های متورم^۱ استفاده شد، [۶]. در شکل ۱ نمایی از شبکه المان مورد استفاده نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمایی از شبکه اجزا محدود

به منظور استقلال نتایج از تراکم شبکه، با افزایش تراکم سلول ها برای دو زاویه دیسک ۱۰ و ۶۰ درجه، ضریب گشتاور محاسبه شده و در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل تعداد ۱/۴ میلیون سلول انتخاب گردید. در این حالت حداکثر ضریب چولگی^۲ در المان ها برابر ۰/۸۸ بود که با توجه به راهنمای نرم افزار در بازه قابل قبول است، [۷].



شکل ۲- بررسی استقلال از شبکه المان در دو زاویه ۱۰ درجه و ۶۰ درجه
در سرعت ورودی ۲.۹۱ متر بر ثانیه

جریان تحت فشار در این پژوهش را میتوان به دو صورت تک فاز و دو فاز مدلسازی نمود. در مدل تکفازی سیال فقط به صورت جریان مایع فرض می شود؛ در حالی که در مدلسازی دو فاز در صورت رسیدن فشار مایع به فشار بخار، امکان تبدیل آن به بخار و شبیه سازی نحوه ترکیب مایع و بخار مایع وجود دارد. اساس شبیه سازی تک فاز و دو فاز در این مساله مشابه است و کلیه شرایط مرزی، مدل اغتشاش و تعداد المان یکسان میباشد و تنها تفاوت در مدلسازی دوفازی به فعال ساختن قابلیت نرم افزار در تشخیص شکلگیری حباب بخار در نقاط با فشار موضعی پایین میباشد.

شکل گیری پدیده کاویتاسیون و همچنین پارامترهای جریان شامل ضرایب تخلیه، گشتاور و شاخص کاویتاسیون در عبور سیال آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد از شیر در باز شدگی های ۱۰ تا ۷۰ درجه با افزایش میزان باز شدگی ۱۰ درجه در هر مرحله بررسی می شود. برای مدلسازی کاویتاسیون، در گام اول، مدل در فشاری که جریان فاقد پدیده کاویتاسیون است حل می شود و تعداد تکرارهای حل^۳ تا همگرایی کامل معادلات مونتوم، پیوستگی و آشفتگی ادامه می یابد. تفاضل میانگین باقیمانده ها^۴ در حل تمام معادلات از مرتبه 10^{-5} در نظر گرفته می شود. در گام بعد، با استفاده از نتایج حاصل از گام اول به عنوان حدس اولیه، مدل دو فاز^۵ به کار میرود و در گام های

¹ Inflated

² Skewness

³ Iterations

⁴ Root Mean Square

⁵ Multiphase Homogenous Model

متوالی، فشار کل در مرز ورودی به مرور افزایش یافته و حالت قبل و بعد از شکل گیری پدیده کاویتاسیون بررسی و شاخص ها و ضرایب مربوطه محاسبه می شوند.

ضرایب مورد استفاده در این مطالعه جهت استخراج نتایج به شرح زیر میباشند:

الف- ضریب گشتاور C_t [۲]

$$C_t = \frac{T}{\Delta P \cdot D^3} \quad (1)$$

$T(N.m)$ گشتاور وارد بر دیسک، $\Delta P(Pa)$ اختلاف فشار بالادست و پایین دست شیر و $D(m)$ قطر دیسک شیر پروانه ای می باشد.

ب- ضریب تخلیه شیر C_d [۸]

$$C_d = \frac{V}{(2g\Delta H + V^2)^{0.5}} \quad (2)$$

$V(m/s)$ سرعت متوسط جریان ورودی، $\Delta H(m)$ اختلاف هد بالادست و پایین دست شیر و $g(m/s^2)$ شتاب گرانش می باشد.

ج- شاخص کاویتاسیون در شیر های پروانه ای [۸]

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_d} \quad (3)$$

P_d فشار هیدرواستاتیک در فاصله ۱۰ برابر قطر در پایین دست، P_u فشار هیدرواستاتیک در فاصله ۵ برابر قطر در بالادست و P_v فشار بخار سیال معادل ۳۱۶۹ پاسکال در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می باشد.

۳. نتایج

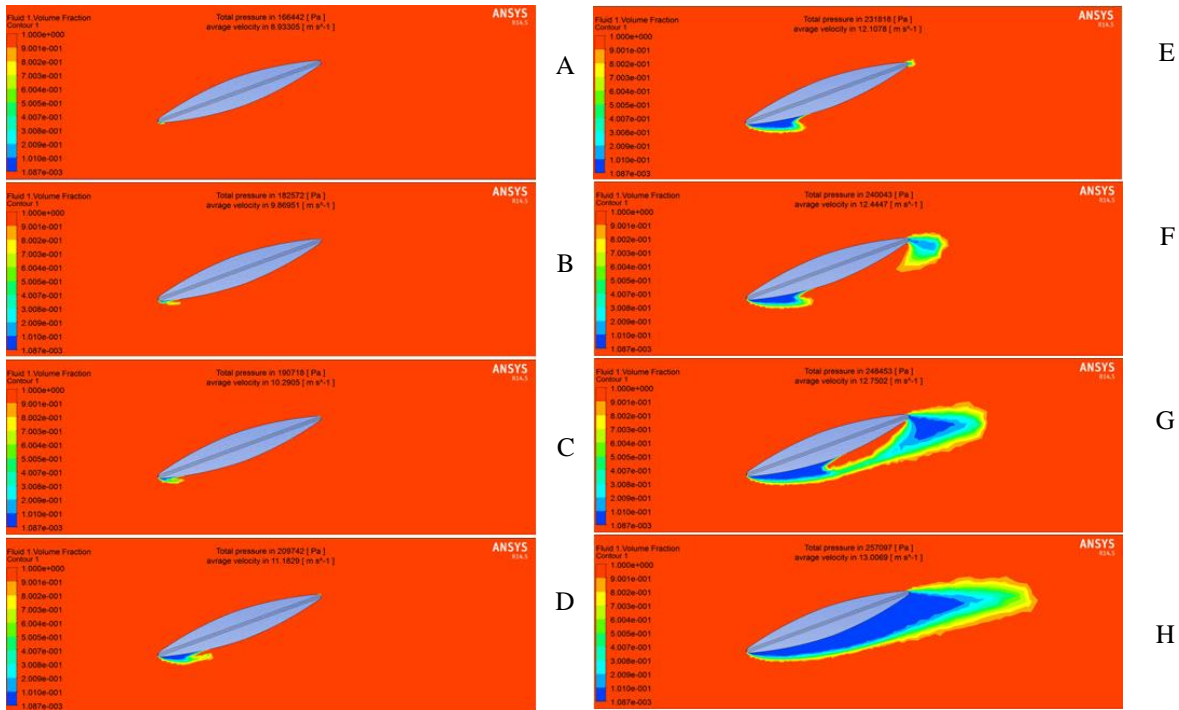
افزایش فشار در ورودی باعث ایجاد کاویتاسیون در محل دیسک می شود. در شکل ۳ نحوه شکل گیری بخار سیال در مدل سازی دوفازی در شیر پروانه ای با زاویه دیسک ۲۰ درجه در پی افزایش فشار نشان داده شده است. این کار با استفاده از نمایش سطوح تراز^۱ نسبت حجم بخار به آب^۲ در هر سلول انجام شده است. در این شکل سطوح به رنگ آبی بیانگر وجود بخار آب (فاز بخار) در پی پدیده کاویتاسیون و رنگ قرمز بیانگر وجود آب به صورت مایع میباشد. لازم به ذکر است با توجه به مدل سازی تخلیه به اتمسفر، فشار استاتیک ورودی معادل با افت فشار در شیر است و نه فشار کار کرد. در شکل ۳ فشار کل ورودی از ۱۶۶Kpa در حالت A به ۲۵۷Kpa در حالت H افزایش یافته است. مطابق تصویر A در فشار کل ورودی ۱۶۶Kpa، کاویتاسیون از لبه پایینی دیسک شروع می شود و در فشار کل ۲۳۲Kpa کاویتاسیون در لبه بالایی نیز مشاهده می گردد، (حالت E). ملاحظه می شود با افزایش فشار، حباب بخار بصورت مستمر روند افزایشی دارد و در تصویر H نهایتاً حباب تشکیل شده تمام دیسک را در بر می گیرد و جریان به حالت اَبَر کاویتاسیون^۳ می رسد. تجربیات عددی برای زوایای بازشدگی تا ۶۰ درجه نشان داد که با فرض جریان پایدار مدل مساله کاملاً همگرا میشود. اما در زاویه بازشدگی ۶۰ و ۷۰ درجه با فرض جریان پایدار مساله همگرا نمیگردد و می بایست با فرض جریان گذرا مدل سازی انجام شود.

در شکل ۴ و شکل ۵ سطوح تراز نسبت حجم بخار به آب در زاویه ۶۰ درجه در نمای ایزومتریک از پشت دیسک برای فشارهای ۱۷۹kpa و ۲۷۹kpa ترسیم شده است. مشاهده می شود همانند زاویه بازشدگی ۲۰ درجه محل رخداد کاویتاسیون لبه پایینی دیسک می باشد. مدل سازی سایر زوایای بازشدگی نتایج مشابهی را به دست می دهد در نتیجه پیش بینی میشود بیشترین تخریب ناشی از کاویتاسیون در لبه پایینی دیسک رخ دهد. در شکل ۶ نمونه ای از تخریب دیسک و بدنه شیر پروانه ای ارائه شده است. مشاهده میشود، مطابق پیش بینی انجام شده عمده تخریب در لبه پایین دیسک و بر روی سطح پوسته و در محلی که انهدام حباب مورد انتظار است رخ داده است. در شکل ۷ توزیع فشار بر روی سطوح زیرین و زبرین دیسک در فشار کل ورودی ۲۵۰kpa در زاویه دیسک ۷۰ درجه برای دو حالت تحلیل تک فازی و دوفازی ترسیم شده است. در این شکل محور افقی بیانگر طول بی بعد شده دیسک و محور قائم فشار مطلق می باشد.

¹ Contour

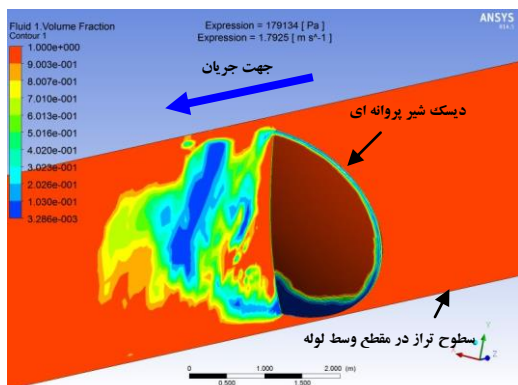
² Volume Fraction

³ Super cavitation

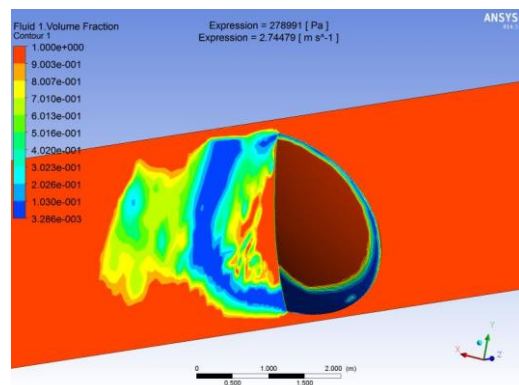


شکل ۳- شکل گیری حباب بخار ناشی از کاویتاسیون در دیسک با زاویه 20 درجه

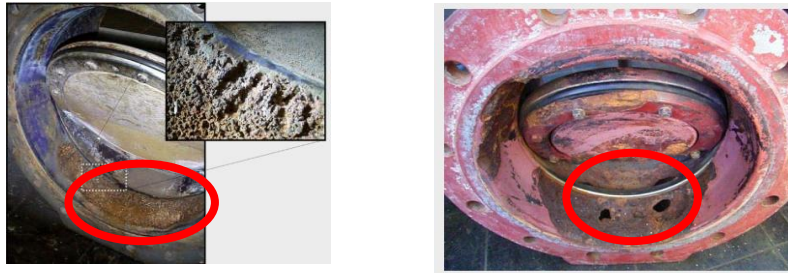
ملاحظه می شود هر دو مدل در بیشتر قسمتهای سطح زیرین دیسک نتایج مشابهی ارائه کرده اند ولی در سطح زیرین و در نواحی نزدیک نوک آن نتایج متفاوتی بدست می دهند. در مدل تک فازی فشار مثبت در زیر دیسک توزیع شده است در حالیکه مدل دوفازی کاویتاسیون و ایجاد فشار مطلق برابر با فشار بخار را نشان می دهد. مدل تک فازی در انتهای دیسک فشار مطلق 150kPa را نشان می دهد در حالی که در فاصله بسیار کوتاهی از آن بر روی دیسک فشار $250\text{kPa}+$ محاسبه شده است. از نظر فیزیکی وقوع چنین رفتاری امکان پذیر نیست. علت این اختلاف را میتوان به ایجاد کاویتاسیون و ناتوانی مدل تک فازی در تحلیل میدان جریان در این حالت مربوط دانست؛ بنابراین نتایج مدل دوفازی اعتبار بیشتری دارد.



شکل ۵- کاویتاسیون در لبه پایین دیسک به روش عددی در زاویه 60 درجه- فشار 179KPa

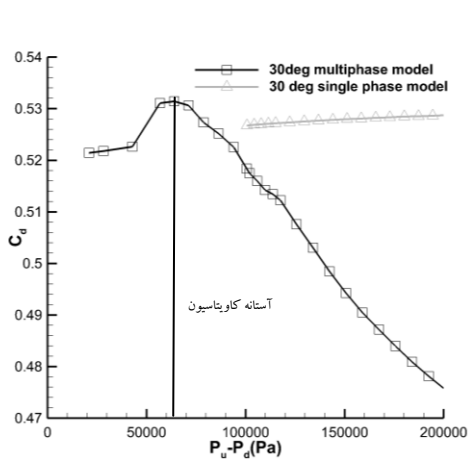


شکل ۴- کاویتاسیون در لبه پایین دیسک به روش عددی در زاویه 60 درجه- فشار 279KPa

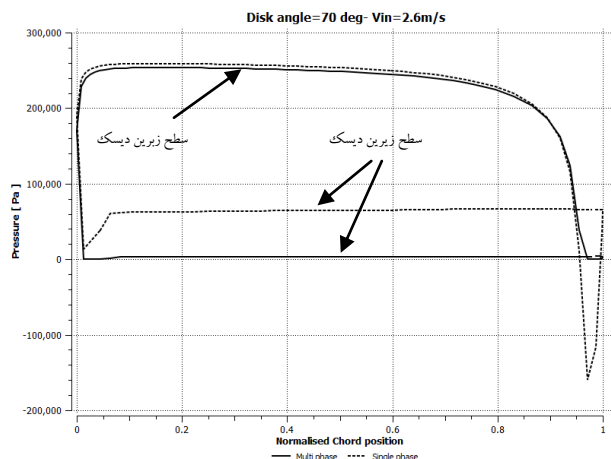


شکل ۶- نمونه‌ای از تخریب دیسک در لبه پایین به واسطه کاویتاسیون [۹]

شکست مدل تکفازی در محاسبه توزیع فشار در جریان دارای کاویتاسیون، منجر به بروز خطا در محاسبه ضرایب گشتاور و تخلیه و کلیه پارامترهای وابسته به فشار در شیرهای پروانه ای می‌شود. در نتیجه استفاده از مدل دوفازی در مطالعات جریان تحت فشار در شیرآلات الزامی است. به عنوان نمونه در شکل ۸ تغییرات ضریب تخلیه در مدل تک فازی و دوفازی برای زاویه دیسک ۳۰ درجه مقایسه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش فشار کل ورودی و آغاز کاویتاسیون، ضریب تخلیه در مدل دوفازی کاهش می‌یابد. علت این امر ایجاد حباب‌های بخار در میدان جریان است. ضریب تخلیه در مدل تکفازی به علت عدم تشخیص کاویتاسیون پیوسته افزایش می‌یابد. بنابراین در ادامه تنها از مدل دوفازی استفاده می‌شود. در شکل ۹ تغییرات ضرایب گشتاور و تخلیه در مقابل افزایش فشار برای دیسک با زاویه ۲۰ درجه ترسیم شده است. مشابه دیسک ۳۰ درجه، با افزایش فشار، تا پیش از رخداد کاویتاسیون هر دو ضریب افزایش می‌یابند تا آنکه در آغاز کاویتاسیون به حداکثر مقدار خود میرسند. پس از رویداد کاویتاسیون هر دو ضریب کاهش می‌یابند.

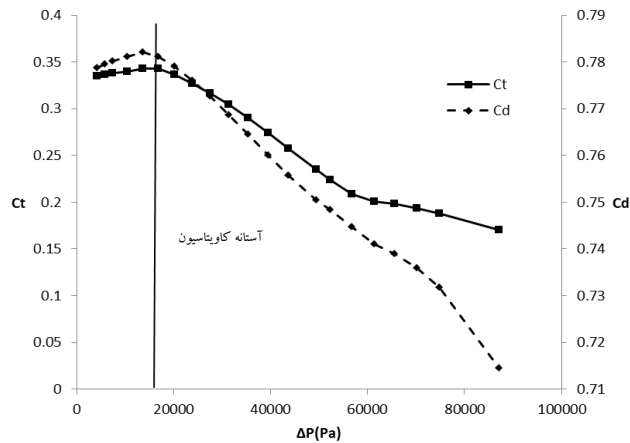


شکل ۸- مقایسه تغییرات ضریب تخلیه در مدل دوفاز و تک فازی در زاویه 30 درجه



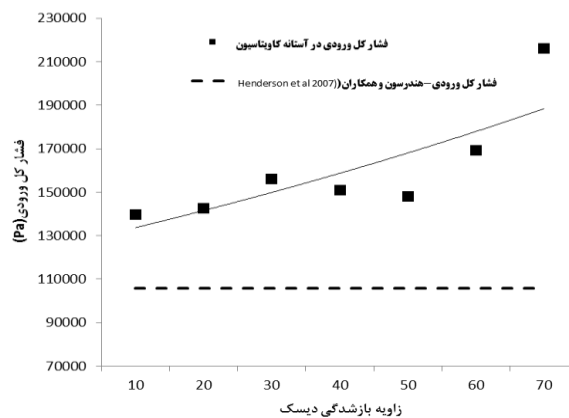
شکل ۷- توزیع فشار بر سطح دیسک فشار 250 کیلوپاسکال 70 درجه

در کلیه آزمایشهای عددی برای سایر بازشدگی ها روند مشابهی مشاهده شد. در حالیکه معمولا محققین [۸] با توجه به محدودیت های اندازه گیری، ضریب تخلیه را برای تمام فشارها در هر بازشدگی تقریبا ثابت در نظر میگیرند.



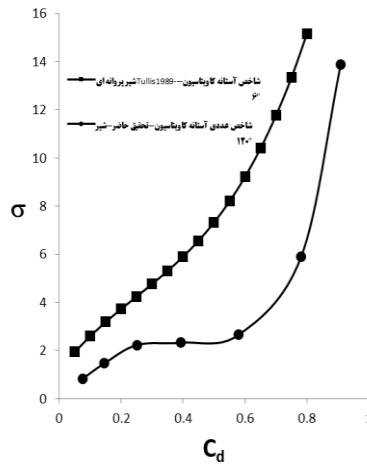
شکل ۹ تغییرات ضرایب گشتاور و تخلیه در مقابل افزایش فشار برای دیسک با زاویه 20

با بدست آوردن فشار در آستانه کاویتاسیون به روش عددی حاضر برای هر یک از بازشدگی ها و مقایسه با فشار استفاده شده توسط هندرسون، مشاهده میشود آستانه کاویتاسیون همواره در فشاری بالاتر از فشار مورد استفاده توسط هندرسون رخ می دهد، (شکل ۱۰)؛ بنابراین احتمال تاثیر کاویتاسیون به عنوان علت بروز خطا در نتایج هندرسون (مطابق ادعای ایشان که در مقدمه ذکر شد) منتهی است و علت خطا را می بایست در ساده سازی مساله و فرضیات اولیه جستجو کرد.



شکل ۱۰ مقایسه فشار کل ورودی در آستانه کاویتاسیون در زوایای بازشدگی مختلف با فشار کل ورودی در مدل هندرسون و همکاران

در شکل ۱۱ شاخص کاویتاسیون و ضریب تخلیه معادل آن، برای هر یک از زوایای دیسک در آستانه کاویتاسیون ترسیم شده است. در همین شکل نتایج تجربی ارائه شده توسط تالیس برای شیر پروانه ای به قطر ۶ اینچ [۸] نشان داده شده است. مشاهده می شود همنوایی مناسبی بین نتایج مدلسازی عددی این تحقیق و نتایج تجربی وجود دارد. علت اختلاف میتواند مربوط به تفاوت هندسه و مقیاس دیسک در مدل عددی و آزمایشگاهی باشد.



شکل ۱۱ شاخص کاویتاسیون و ضریب تخلیه معادل آن برای هر یک از زوایای دیسک در آستانه کاویتاسیون

۱۰. نتیجه گیری

در این تحقیق جریان عبوری از شیر پروانه ای در بازشدگی های مختلف با استفاده از کد تجاری ANSYS CFX 14.5 با مدل های تکفازی و دوفازی شبیه سازی شد. علل رقم سرعت همگرایی و پایداری بالای مدل تکفازی، این مدل توانایی لازم در شبیه سازی شکل گیری کاویتاسیون و تخمین حجم حباب بخار ایجاد شده در جریان به عنوان عامل افت فشار را ندارد بنابراین در محاسبه پارامترهای جریان در این تحقیق به نتایج صحیحی نرسید و استفاده از مدل دوفازی ارجحیت دارد. مقایسه نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی، همخوانی مناسبی بین تغییرات شاخص کاویتاسیون آغازین در مقابل ضریب تخلیه برای بازشدگی های مختلف وجود دارد. در تمام زوایای بازشدگی تا پیش از رخداد کاویتاسیون، ضرایب تخلیه و گشتاور با افزایش فشار ورودی افزایش می یابند و پس از شکل گیری کاویتاسیون سیر نزولی به خود می گیرند.

۱۱. قدردانی

نویسندگان بر خود لازم میدانند از همفکری و مشاوره جناب آقای مهندس علی وکیلی تهمانی مدیر عامل شرکت مکانیک آب و دکتر سینا وکیلی تهمانی که باعث غنای این تحقیق شدند تشکر نمایند.

۱۲. مراجع

- [۱] G. K. Batchelor, *An introduction to fluid mechanics*: Cambridge University Press, 1967.
- [۲] A. Henderson, J. Sargison, G. Walker, and J. Haynes, "A numerical study of the flow through a safety butterfly valve in a hydro-electric power scheme," in *16th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC)*, 2007, pp. 1116-1122.
- [۳] W. Chaiworapuek, "The Engineering Investigation of the Water Flow past the Butterfly Valve," 2007.
- [۴] X. guan Song and Y. C. Park, "Numerical analysis of butterfly valve-prediction of flow coefficient and hydrodynamic torque coefficient," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2007, pp. 24-26.
- [۵] F. Vakili-Tahami, M. Zehsaz, M. Mohammadpour, and A. Vakili-Tahami, "Analysis of the hydrodynamic torque effects on large size butterfly valves and comparing results with AWWA C504 standard recommendations," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 26, pp. 2799-2806, 2012.
- [۶] I. ANSYS, "ANSYS-CFX Solver Theory Guide," *ANSYS CFX Release*, vol. 11, pp. 69-118, 2010.
- [۷] Ansys.inc, "Introduction to the ANSYS Meshing Application," ed, 2009.
- [۸] J. P. Tullis, *Hydraulics of pipelines: pumps, valves, cavitation, transients*: Wiley-Interscience, 1989.
- [۹] ERHARD, "valve & pipeline cavitation," in *comercial catalog*, E. VALVES, Ed., ed. Germany, 2010.



هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل
۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳

