

تحقیقات عددی و آزمایشی بر روی خصوصیات حفره ای^۱ یک پمپ سانتریفیوژ سرعت

بالای دارای القا کننده^۲ تیغه شکاف^۳

چکیده

در این تحقیق یک پمپ سانتریفیوژ با سرعت بالایی که دارای القا کننده تیغه شکاف است مورد بررسی قرار می گیرد. جریان با استفاده از کاویتاسیون دوار شبیه سازی شده است که در آن ویژگی های خارجی تحت آزمایش های تجربی قرار می گیرند و جریان داخلی نیز سازی تجسم می شود. این روش ها برای به دست آوردن فشار، سرعت و توزیع فراوانی حجم بخار در القا کننده و پروانه ی پمپ گریز از مرکز، انجام می شود. زمان تشکیل، توسعه و فروپاشی حباب نیز بررسی می شود. منحنی های $H-Q$ و $\eta-Q$ پیش بینی شده با نتایج تجربی حاصل از خصوصیات خارجی موافق و مطابق هستند. کسر حجمی بخار محاسبه شده نیز با نتایج تجربی بدست آمده از سیستم تجسم سازگار است. مکانیسم تکامل حباب و عملکرد ضد خستگی پمپ سانتریفیوژ دارای سرعت بالا با القا کننده تیغه شکاف نیز به وضوح تشریح شده است.

واژگان کلیدی: پمپ های سانتریفیوژ؛ آزمایشات مربوط به ویژگی های خارجی؛ کاویتاسیون دوار؛ القا کننده تیغه شکاف، آزمایشات تجسم سازی

1- مقدمه

از پمپ های سانتریفیوژ به طور گسترده ای در صنایع مختلف، از جمله مواد شیمیایی پتروشیمی، هوا فضا و صنایع انرژی استفاده می شود. با توسعه سریع این صنایع، پمپ های گریز از مرکز نیازمند افزایش سرعت هستند که در چنین مواردی نیز کاویتاسیون اتفاق می افتد. تجهیز القایی واقع در در جلو پروانه مرکزی گریز از مرکز، یک روش موثر برای

¹ Cavitation: حفره سازی، حفره، کاویتاسیون

² inducer

³ splitter-blade

مهار کاویتاسیون است [1]. القاکننده تیغه شکاف یک نوع معمولی است و به شدت به عملکرد ضد کاویتاسون پمپ ها کمک می کند. جریان موجود در القاکننده تیغه-شکاف مخصوصا در هنگام کاویتاسیون بسیار آشفته است. به تازگی چندین مطالعه عددی و تجربی به بررسی جریان حفره ای پمپ های سانتریفیوژ دارای یک القا کننده متناوب پرداخته اند. لی¹ و همکاران [2] و اوکیتا² و همکاران [3] نشان دادند که شبیه سازی عددی عملکرد پمپ سانتریفیوژ دارای القا کننده با آزمایش های انجام شده بر روی مدل های آزمایش موافق است. سمنو³ و همکاران [4] نیز به شبیه سازی و آزمایش بر روی جریان حفره ای در القا کننده پرداختند. آنها یک نوع جدید از بی ثباتی حفره ای در پمپ را کشف کردند. پافاری⁴ و همکاران [5] رفتار کاویتاسیون یک موتور القایی توربو موتور راکت چهار تیغه ای را شبیه سازی کرده و پنج الگوی کاویتاسیون را مشاهده کردند. کیم⁵ و همکاران [6] تاثیرگذاری نوک لیزر بر روی عملکرد و ویژگی های جریان یک توربین پمپ القایی را با استفاده از رویکرد دینامیکی سیالات محاسباتی (CFD) مورد بررسی قرار دادند. آنها متوجه شدند که کاویتاسیون بر روی تیغه طولانی برای نوک بزرگ ایجاد می شود و این کاویتاسیون گلوی موجود بین دو تیغ مجاور را مسدود می کند. لی⁶ و همکاران [7] تحقیقات تجربی و عددی بر بی ثباتی کاویتاسیون القا کننده دو طرفه انجام دادند و دریافتند که جریان محلی که در اطراف بسته شدن حفره رخ داده است به طور قابل ملاحظه ای موجب وقوع کاویتاسون نامتقارن می شود. ایگا⁷ و همکاران [8] نیز بر اساس ویژگی های نوسان و زمینه های جریان، سه نوع حفره را در یک القاگر یافتند. کمپسو آموسو⁸ و همکاران [9] نیز به صورت عددی جریان ناپایدار حفره ای را شبیه سازی کرده و بی ثباتی های کاویتاسیون محلی، مانند کاویتاسیون متناوب تیغه و کاویتاسیون تیغه دوار، که می تواند در القاء محوری ظاهر شود را بررسی نمودند. تامورا⁹ و همکاران [10] یک مدل دینامیکی حباب را برای بهبود کیفیت شبیه سازی ایجاد کردند. یوشیدا¹⁰ و همکاران [11] القا کننده های چهار تیغه ای را با استفاده از مقادیر

¹ Li

² Okita

³ Semenov

⁴ Pouffary

⁵ Kim

⁶ Lee

⁷ Iga

⁸ Campos-Amezcu

⁹ Tamura

¹⁰ Yoshida

مختلف برش برای جلوگیری از کاویتاسیون چرخشی ایجاد شده از برش متناوب پیشرو لبه، مورد آزمایش قرار دادند و نشان دادند که مناطق دارای کاویتاسیون متناوب تیغه ای و کاویته نامتقارن با افزایش مقدار برش افزایش می یابد. یوشیدا و همکاران [12] رابطه طول حفره ناهموار و نیروی پویای روتور را در یک القا کننده حفره ای دارای سه تیغه بررسی کردند و نشان دادند که ارتعاش شفت به علت کاویتاسیون چرخشی نوعی از ارتعاش خود هیجانی می باشد که ناشی از اتصال بی ثباتی حفره و دینامیک روتور است. تانی¹ و همکاران [13] رابطه بین کاویتاسیون چرخشی و ضریب جریان یک القاگر را از طریق شبیه سازی های عددی بررسی کردند و دریافتند که ضریب جریان بر شروع ناپایداری کاویتاسیون، مانند کاویتاسیون چرخشی و نامتقارن تأثیر می گذارد. هوریگوچی² و همکاران [14] جریان کاویته ثابت در آبشارها را بررسی کرد و دریافتند که ثبات جریان بر ضخامت کمر بند و تیغه اثر می گذارد. هم چنین هوریگوچی و همکاران [15] متوجه شدند که جریان سه بعدی حفره ای باعث تغییر زاویه حمله می شود که آن نیز با تغییر سرعت میانه ای رابطه دارد. کیمورا³ و همکاران [16] ساختار گرداب موجود در القایی را برای سه نوع هندسه پوشش ورودی به همراه سرعت جریان های مختلف مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که توسعه نشت نوک گرداب به هندسه پوشش ورودی و سرعت جریان وابسته است.

هنگ⁴ و همکاران [17] یک پمپ را با استفاده از القا کننده آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که القا کننده اثرات ناپیزی بر سر و کارایی پمپ دارد، اما تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ضد کاویتاسیون دارد. بسیاری از محققان [22-22] بر حفره سازی تمرکز کرده و به نتایج خاصی دست یافته اند. با این حال، تحقیق در مورد ویژگی های ضد حفره ای یک پمپ سانتریفوژی که دارای سرعت بالا و القا کننده تیغه شکاف است، ناکافی می باشد. علاوه بر این، ویژگی های خارجی و تجسم جریان داخلی به ندرت مورد آزمایش قرار گرفته اند. بنابراین، تحقیقات در خصوص ویژگی های حفره چرخشی یک پمپ گریز از مرکز با القا کننده تیغه شکاف، ضروری و مورد نیاز است.

¹ Tani

² Horiguchi

³ Kimura

⁴ Hong

هدف از این مطالعه بررسی عددی و آزمایشگاهی ویژگی های حفره ی چرخشی یک پمپ سانتریفیوژ با سرعت بالایی است که دارای القا کننده ی تیغه ی شکاف می باشد. هدف از این کار این است که کاویتاسیون را در اطراف القا کننده تیغه شکاف و پروانه ی پمپ گریز از مرکز تجزیه و تحلیل شود. کاویتاسیون چرخشی با استفاده از مدل ترکیبی و از طریق رویکرد CFD به صورت عددی مورد بررسی قرار می گیرد. آزمایشات انجام گرفته بر روی ویژگی های خارجی پمپ سانتریفیوژ نیز در یک سیستم بسته انجام می شود. جریان حفره ای موجود در القا کننده از طریق تجسم سازی و با استفاده از یک سیستم ویدئویی سرعت بالا مشاهده می شود. رفتار ناپایدار کاویتاسیون با مقایسه نتایج عددی با داده های تجربی مورد بحث قرار می گیرد.

2- محاسبات عددی حفره سازی چرخشی

پمپ سانتریفیوژی که دارای سرعت بالا و القا کننده تیغه شکاف است، در شکل 1 نشان داده شده است که از آن به عنوان یک شیء تحقیقاتی استفاده می شود و در نهایت پارامترهای طراحی و ابعاد اصلی آن نیز در جدول 1 ذکر شده است. مش بندی نهایی موجود در امتداد القایی و پروانه نیز در شکل 2 نشان داده شده است. برای هندسه D3 پیچیده تیغه، از شبکه های بدون ساختار در شبیه سازی استفاده می شود. تعداد شبکه کل پمپ گریز از مرکز با القا کننده تیغه شکاف دار 93 در 109 است. جریان آشفته حفره ای D3 نیز با استفاده از معادلات ناپایدار ناوی-استوکس، همراه با رویکرد شبیه سازی میانگین رینولدز و مدل کاویتاسیون انتقال جرم حل می شود. نرم افزار تجاری ANSYS-CFX برای شبیه سازی استفاده می شود.

در آخر شرایط مرزی به شرح زیر است:

فشار ورودی در ورودی مشخص شده است. در این نمونه، فشار کلی برابر $15,590 \text{ Pa}$ تعیین شده است. نرخ جریان جرمی در خروجی مشخص شده است و برابر $0.875 \text{ m}^3/\text{s}$ می باشد. این مقادیر از طریق آزمایشات انجام گرفته بر روی خصوصیات خارجی بدست می آید. برای جریان دو فاز، یک مدل مخلوط [23-25] استفاده می شود. دو فاز به صورت آب و بخار در نظر گرفته شده است [2, 26, 27]. دمای آب در طی شبیه سازی 25 درجه سانتیگراد است در نتیجه فشار بخار اشباع 3167 Pa است.

برای سرعت بخشیدن به همگرایی، محاسبه تکرار می شود تا آنجایی که در جریان ثابت تک فاز، محاسبات همگرا شوند. سپس نتیجه به عنوان جریان اولیه از یک جریان دوفازی نامنظم در نظر گرفته می شود.

در طی شبیه سازی، بر اساس این فرض که مخلوط آب و بخار در جریان حفره ای به عنوان یک مایع همگن محسوب می شود، یک مدل فیزیکی در نظر گرفته می شود. در این مطالعه روش شبیه سازی میانگین رینولدز استفاده شده است. یک مدل مخلوط نیز استفاده می شود و تعداد فازها برابر دو است. این دو فاز همان آب مایع و بخار آب هستند. پیوستگی جرم و مومنتوم به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (2)$$

که در آن

$$\rho = \alpha_w \rho_w + \alpha_v \rho_v. \quad (3)$$

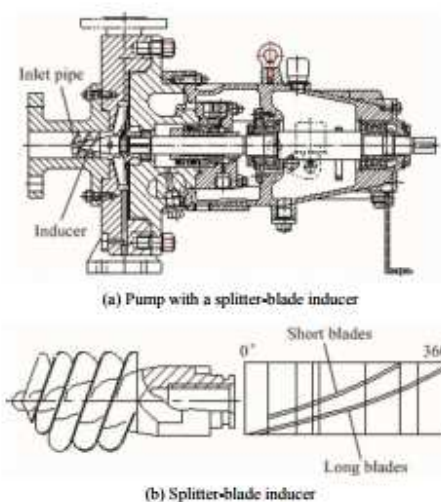
کسر حجمی معادله برای فاز بخار نیز برابر است با:

$$\frac{\partial}{\partial t} (a_v \rho_v) + \nabla \cdot (a_v \rho_v \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (a_v \rho_v \vec{v}_{dr,v}). \quad (4)$$

هیچ شرایط مرزی لغزشی در دیوار مشخص نشده است. در اینجا از سیستم مختصات حرکتی در عبور از القا کننده و پروانه با سرعت چرخش 6000 دور در دقیقه استفاده می شود، در حالی که در عبور لوله ورودی و ولتاژ از سیستم مختصات استاتیک استفاده می شود.

Main design parameters			
Flow rate Q (m ³ /h)	Head H (m)	Rotation speed n (r/min)	Specific speed $n_s/n_s = 3.65 \times n \times (Q/H)^{0.75}$
4	100	6000	23.08
Main dimensions			
Inlet diameter, D_1	40 mm	Number of blades of the impeller Z_1	8
Outlet diameter, D_2	40 mm	Height from the centerline of the inlet to the outlet, Z	196 mm

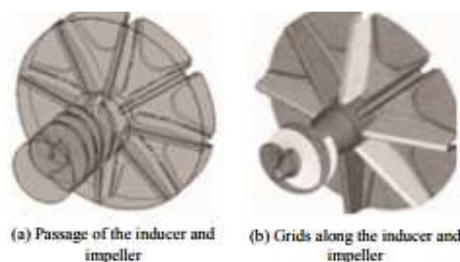
جدول 1



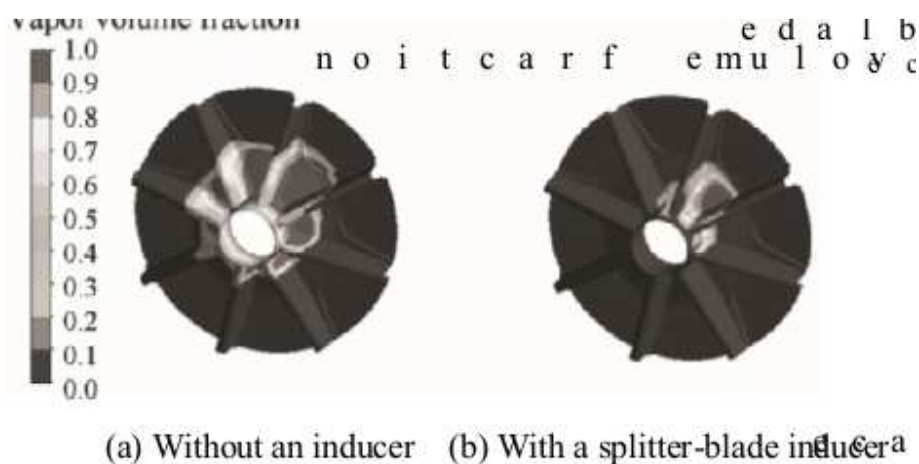
شکل 1

محاسبات جریان برابر پمپ بدون و با القا کننده تیغه شکاف انجام می شود. توزیع کسری حجمی محاسبه شده بر روی پروانه بدون و با القا کننده تیغه شکاف در شکل 3 نشان داده شده است.

شکل 3 (الف) نشان می دهد که توزیع کسر حجمی بخار در پروانه متمرکز و گسترده است. هر عبوری نیز حاوی حباب های بسیاری است، تقریباً سه چهارم عبوری پروانه را پر می کند. در نتیجه کاویتاسیون مشاهده شده بسیار شدید است. ناحیه کاویتاسیون حدود 2،827 mm² است. بنابراین، عملکرد ضد کاویتاسیون پمپ سانتریفیوژ با سرعت بالا بدون القاء کننده بسیار ضعیف است. شکل 3 (ب) نشان می دهد در زمانی که پمپ دارای یک القا کننده تیغه شکافدار است، کسر حجمی بخار به طور واضح کاهش می یابد. حباب ها فقط در یک گذر اتفاق می افتد و حباب های روی سطح مکش تیغه ها بیشتر از سطح فشار است. منطقه کاویتاسیون حدود 314 میلیمتر است. بنابراین، عملکرد ضد کاویتاسیون پمپ گریز از مرکز می تواند به طور قابل توجهی با استفاده از یک القا کننده تیغه شکاف بهبود یابد.



شکل 2



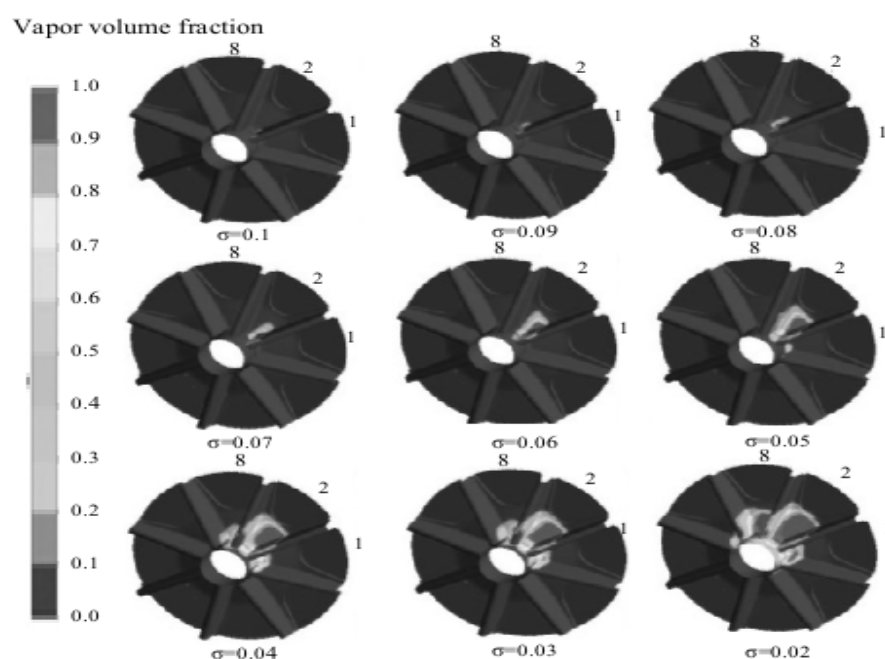
شکل 3

توزیع فراوانی حجم بخار در القا کننده تیغه شکاف در شکل 4 نشان داده شده است. کاویتاسیون بر روی سطح مکش پره های بلند تمرکز دارد. محل کاویتاسیون عمدتاً بر لبه بیرونی و نزدیک ورودی تیغه است یعنی جایی که مقدار کسر حجمی بخار بزرگ است. توزیع بر روی دو تیغه بلند نامتقارن است. منطقه کاویتاسیون در طول تیغه 1 تقریباً 69 میلیمتر می باشد، در حالیکه بر روی تیغه بلند 2 تقریباً 58 میلی متر است. سمت هاب در نزدیکی تیغه خروجی نیز حفره هایی مشاهده می شود که ممکن است تحت فشار پایین عقی قرار گیرد. تقریباً هیچگونه حبابی بر روی سطح فشار تیغه وجود ندارد. کسر حجمی بخار در تیغه های کوتاه 1.25×10^{-6} است که این نیز مقدار ناچیزی است. برای تعریف کاویتاسیون، جریان حفره ای چرخشی پمپ های سانتریفیوژ با سرعت بالا با القا کننده به صورت عددی به وسیله ضرایب کاویتاسیون مختلف محاسبه می شود. اشکال 5 و 6 به ترتیب توزیع فراوانی حجم بخار در هر دو پروانه و القا کننده را تحت ضریب های مختلف کاویتاسیون نشان می دهد.



شکل 4

از شکل 5 می توان نتیجه گرفت که توسعه کاویتاسیون بر روی پروانه می تواند به سه مرحله همراه با کاهش ضریب کاویتاسیون تقسیم شود. که این سه مرحله نیز به شرح زیر است.



شکل 5

مرحله 1: مرحله توسعه آهسته

هنگامی که ضریب کاویتاسیون از 0.1 تا 07.07 تغییر می کند، منطقه کاویتاسیون عمدتاً بر روی سطح مکش عبور 1 از تیغه است. در اینجا منطقه کاویتاسیون کوچک است و به آرامی از 38 میلیمتر تا 97 میلی متر گسترش می یابد. در این مرحله، سرعت پیشرفت کاویتاسیون بسیار کند است.

مرحله 2: مرحله رشد سریع

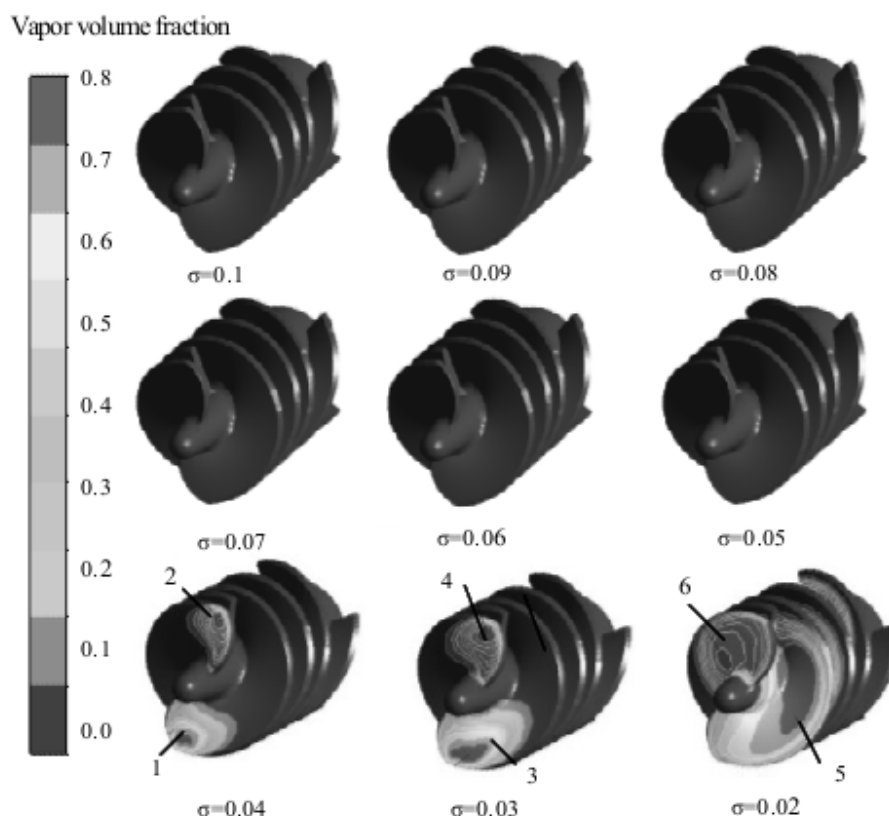
وقتی که ضریب کاویتاسیون از 0/06 تا 0/02 تغییر می کند، حفره ها در پروانه به سرعت رشد می کنند. این محل به دو طرف عبوری گسترش می یابد. این ناحیه از حدود 241 میلی متر تا 1216 میلی متر گسترش می یابد و در این مرحله کاویتاسیون به سرعت رشد می کند.

مرحله 3: مرحله تکامل عقب گرد

هنگامی که ضریب کاویتاسیون از 0.04 تا 02.02 تغییر می نماید، کاویتاسیون عمدتاً در گذر 8 توسعه می یابد. همچنین در گذر 2 نیز بیشتر می شود، اما به آن شدت در قسمت گذر 8 پیشرفت نمی کند. این نتیجه با جهت چرخشی ارتباط دارد. در این نمونه، چرخش در جهت عقربه های ساعت است، بنابراین عمدتاً عقبگرد است (عبور 8). این مرحله و مرحله دوم نیز همپوشانی دارند.

شکل 6 نشان می دهد که کسر حجمی بخار به تدریج با کاهش ضریب حفره ای افزایش می یابد. هنگامی که σ در محدوده 0.05-0.1 قرار دارد، مقدار حجم بخار در القایی کم است و نسبت آن فقط حدود 2.384×10^{-7} است. هنگامی که σ برابر 0.04 و 0.03 است، منطقه حفره ای در قسمت های 1، 2، 3، و 4 قرار دارد که همه در لبه خارجی سطح مکش و در نزدیکی ورودی قرار دارند. منطقه کاویتاسیون تقریباً 338 و 367 میلیمتر است. وقتی σ برابر 0.02 است، کاویتاسیون القا کننده یک ناحیه بزرگ (حدود 1000 میلی متر) را پوشش می دهد و آن محل نیز متفاوت است. محل کاویتاسیون به سمت خروجی تیغه ها و سمت هاب تعویض می شود (مناطق 5 و 6 را ببینید). ناحیه ای که کاویتاسیون اتفاق می افتد نامتقارن است. هنگامی که σ برابر است با 0.04، اختلاف بین منطقه 1 و 2 تقریباً 21 میلی متر است. وقتی σ برابر است با 0.03، اختلاف بین منطقه 3 و 4 تقریباً 31 میلیمتر است. وقتی σ برابر است با

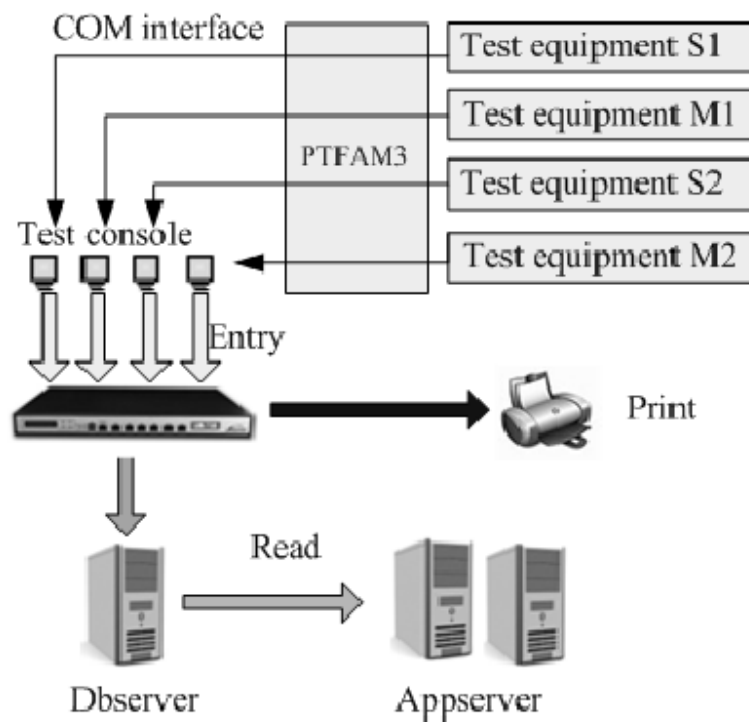
0.02، اختلاف بین منطقه 5 و 6 تقریباً 85 میلی متر است. بنابراین، عدم تقارن با کاهش ضریب کاویتاسیون چشم گیر و قابل توجه است.



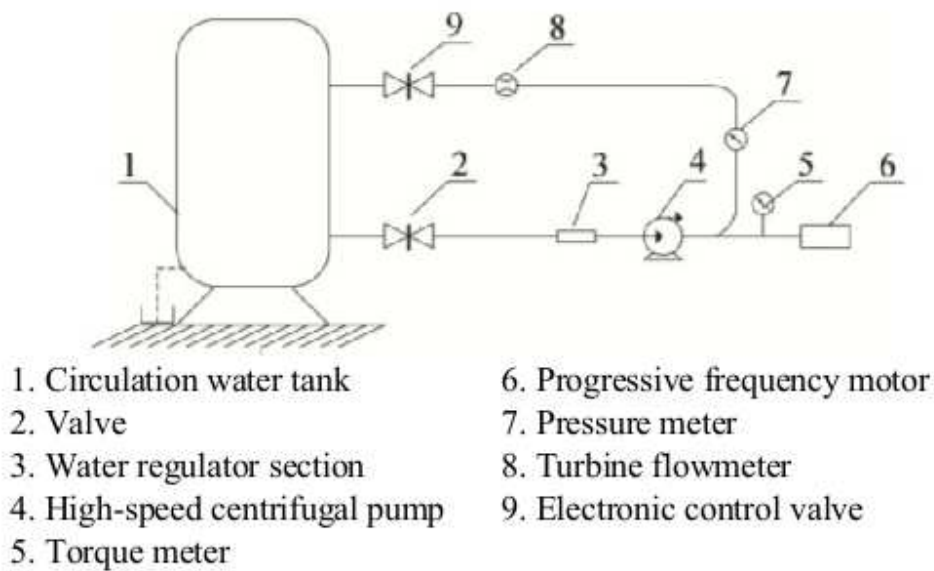
شکل 6

3- آزمایشات بر روی ویژگی های خارجی

مجموعه آزمایش در شکل 7 نشان داده شده است. در اینجا یک سیستم کنترل توزیع (DCS) استفاده می شود که توزیع آن در شکل 8 نشان داده شده است. پمپ گریز از مرکز با یک القا کننده تیغه شکاف نیز در سیستم بسته بندی شده مونتاژ می شود. حجم مخزن آب در گردش 31 مترمکعب است. پمپ خلاء به سیستم وصل شده است و فضای خالی آن تا 6×10^{-2} Pa است. یک گشتاور چرخشی نوع NJ1G برای اندازه گیری سرعت چرخش و قدرت شفت استفاده می شود. سرعت چرخش مجاز از 0 r/min تا $10,000 \text{ r/min}$ متغیر است. موتور، سنسور و پمپ باید در محدوده خوبی جمع شوند.



شکل 7



شکل 8

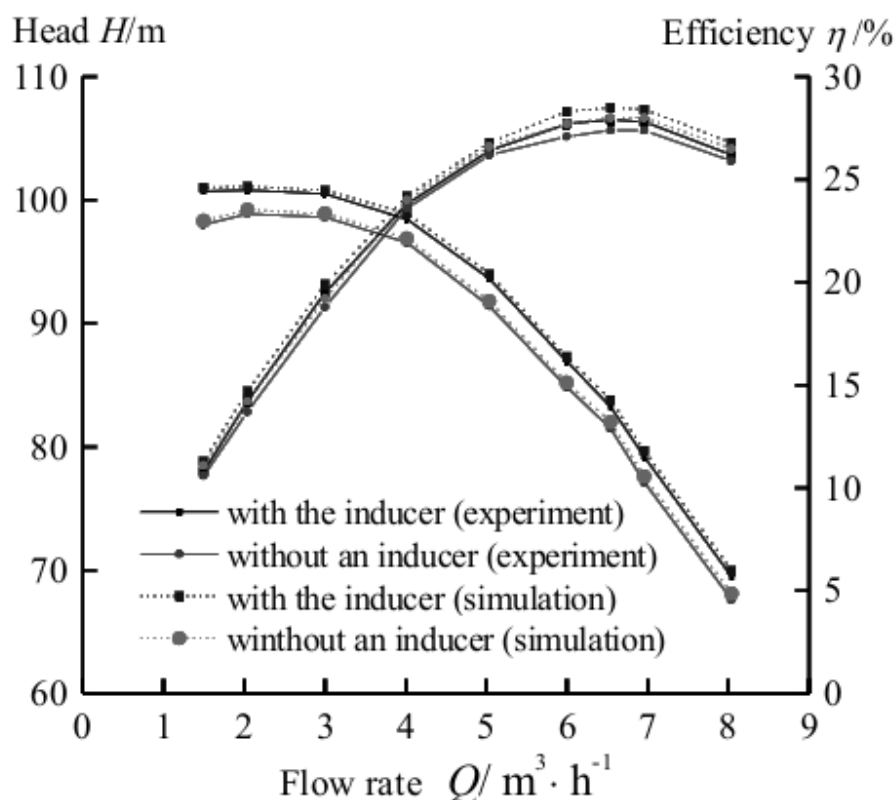
منحنی های مشخصه خارجی از طریق آزمایشات و شبیه سازی ها به دست می آید (شکل 9). معادلات هد و کارایی

نیز به شرح زیر است.

$$H = \Delta P / \rho g + \Delta z \quad (5)$$

$$\eta = \frac{nM}{9552 \rho g QH} \times 100\% . \quad (6)$$

شکل 9 نشان می دهد که منحنی های مشخص شده در آزمایش ها با منحنی های به دست آمده در شبیه سازی سازگار است. در یک سرعت جریان (Q) یکسان، هد (H) پمپ سانتریفوژ با سرعت بالا با القا کننده تیغه شکاف بالاتر از هد به دست آمده از پمپ بدون القا کننده است. مقدار هد بدست آمده در شبیه سازی نیز بالاتر از هد حاصل از آزمایش است و بزرگترین تفاوت تقریباً 0.5 متر است. روندهای منحنی η -Q که در آزمایش و شبیه سازی به دست آمده اند نیز مشابه هستند. مقدار کارایی حاصل از محاسبات عددی بیشتر از کارایی حاصل از آزمایش ها بوده و خطای نسبی 2.3٪ است. دلیل اصلی این تفاوت، تلفاتی مانند از دست دادن خط می باشد. با این حال، در محاسبه عددی تلفات می تواند نادیده گرفته شود. این خطا می تواند یک خطای سیستم در پیش بینی عملکرد پمپ سانتریفوژ با سرعت بالا باشد. جدول 2 فشار ورودی را نشان می دهد که در آن ناگهان هد کاهش می یابد. این تفاوت شبیه سازی و نتایج تجربی حداقل است. در نرخ جریان $Q = 2 \text{ m}^3 / \text{h}$ ، خطای نسبی تقریباً 4.42٪ است. در نرخ جریان طراحی $Q = 4 \text{ m}^3 / \text{h}$ نیز خطای نسبی تقریباً 4٪ است.



شکل 9

Inlet pressure value (Pa) $Q = 2 \text{ m}^3/\text{h}$			Inlet pressure value (Pa) $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$		
By simulation	By experiment	relative error	By simulation	By experiment	Relative error
-96314	-92206	4.42%	-101085	-95245	3.91%

جدول 2

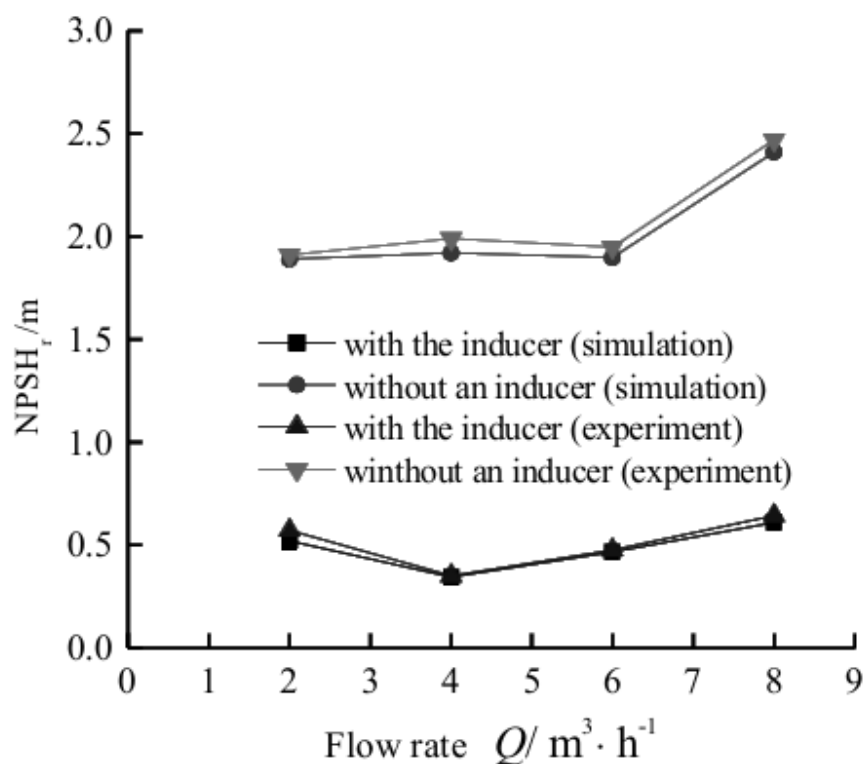
شکل 10 مقدار NPSHr را نشان می دهد. بر اساس شکل 10 می توان نتیجه های زیر را بدست آورد:

NPSHr پمپ بدون القاگر بزرگتر از پمپ با القاگر است البته این در زمانی است که از آن در شرایط کار طراحی

بدون توجه به سرعت جریان استفاده می شود. این نتیجه نشان می دهد که پمپ بدون القاء دارای عملکرد ضد

کاویتاسیون ضعیفی است. NPSHr پمپ زمانی کاهش می یابد که القا کننده تیغه شکاف در مقابل پروانه قرار گیرد.

این یافته نشان می دهد که پمپ با القاگر دارای عملکرد ضد کاویتاسیون خوبی است.



شکل 10

مقایسه بین شبیه سازی ها و آزمایش ها نشان می دهد که مقدار NPSHr حاصل از شبیه سازی ها بسیار نزدیک

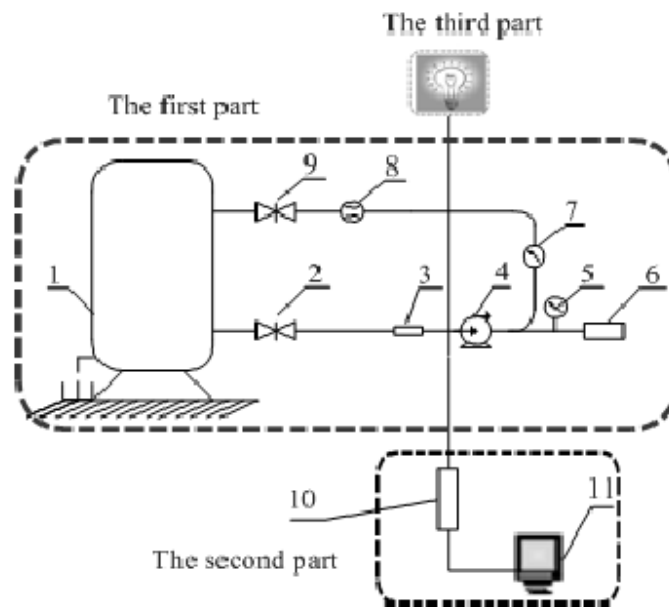
و تنها کمی کمتر از مقدار حاصل از آزمایش ها است.

4- سیستم تجسم سازی

تجسم سازی تجربی در شکل 11 نشان داده شده است که شامل سه بخش است: سیستم آزمایشی بسته (شکل

8)، سیستم دوربین های با سرعت بالا و بخش نورانی. در این نمونه دوربین با سرعت بالا PCO.1200 hs توسط شرکت

American Cooke ساخته شده است.



شکل 11

مطابق با شکل 12، به منظور مشاهده کاویتاسیون و تکامل، بدن پمپ به دو قسمت یعنی واردات (I) و اصلی (II) تقسیم بندی می شود. بخش واردات شفاف است و با شیشه آلی تولید می شود. برای اینکه دوربین به خوبی تمرکز کند، یک روکش مستطیلی شفاف خارج از لوله دایره ای وارداتی تولید می شود. در طول آزمایش، روکش مستطیلی باید با آب پر شود. هنگامی که آزمایش انجام شود، اثر انکسار برای تقویت خواهد شد.

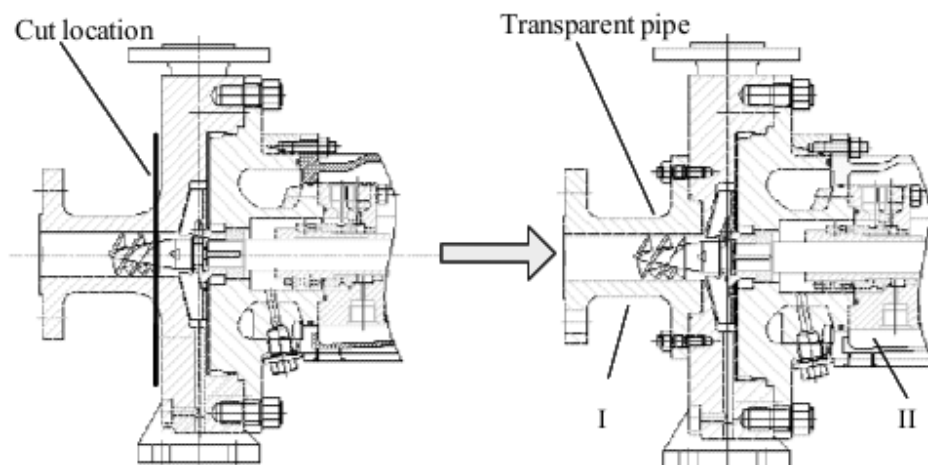
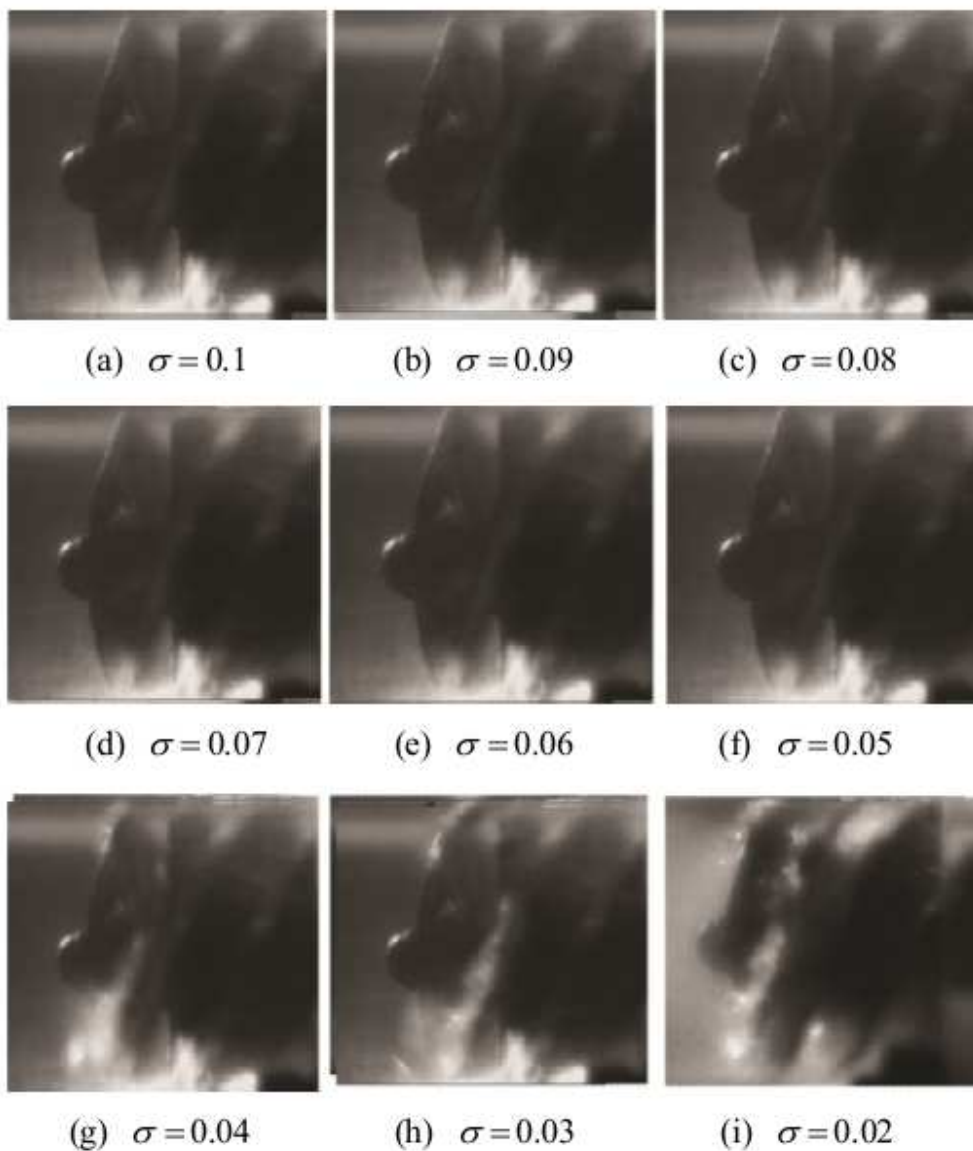


Fig. 12. Import pipe.

ضریب کاویتاسیون σ از 0.1 تا 02.02 است. تصاویری از توسعه حبابی که با استفاده از ضریب کاویتاسیون مختلف و با استفاده از یک دوربین با سرعت بالا (شکل 13) گرفته شده است.

محاسبات عددی نشان دهنده کسر حجمی بخار و مکان کاویتاسیون است. اثر کوانتیزا نیز واضح است، اما نمی توان به طور مستقیم اندازه، شکل و توسعه حباب ها را مشاهده کرد. سیستم تجسم سازی باید برای مشاهده وقوع، توسعه و سقوط حباب ها بسیار مناسب و حسی و بصری باشد. با مقایسه شکل 6 با شکل 13 می توان دید که داده های تجربی با نتایج عددی موافق هستند.

هنگامی که σ از 0.1 به 0.05 می رسد، حباب ها در القایی بسیار کوچک هستند و تقریباً وجود ندارد (شکل 13). هنگامی که σ از 0/04 به 0/03 می رسد، حباب ها به آسانی قابل مشاهده می باشند. منطقه کاویتاسیون عمدتاً بر روی سطح مکش تیغه ای است که در آن لبه خارجی نزدیک ورودی قرار دارد. با توجه به اندازه گیری و برآورد بیرونی، قطر حباب های شکل گرفته از 2 تا 2.5 میلی متر و پوشش حباب ها تقریباً 350 و 400 میلی متر است. هنگامی که σ به 0/02 کاهش می یابد، مکان حفره به طور همزمان به خروجی تیغه و سمت هاب وصل می شود. بسیاری از حباب ها این قسمت ها را پر می کنند که حدود 1350 میلی متر است. شکل 14 نشان دهنده منطقه حفره و منحنی σ است که در شبیه سازی ها و آزمایشات تعیین شده است و این شکل نشان می دهد که نتایج شبیه سازی با نتایج حاصل از آزمایش ها سازگار هستند.



شکل 13

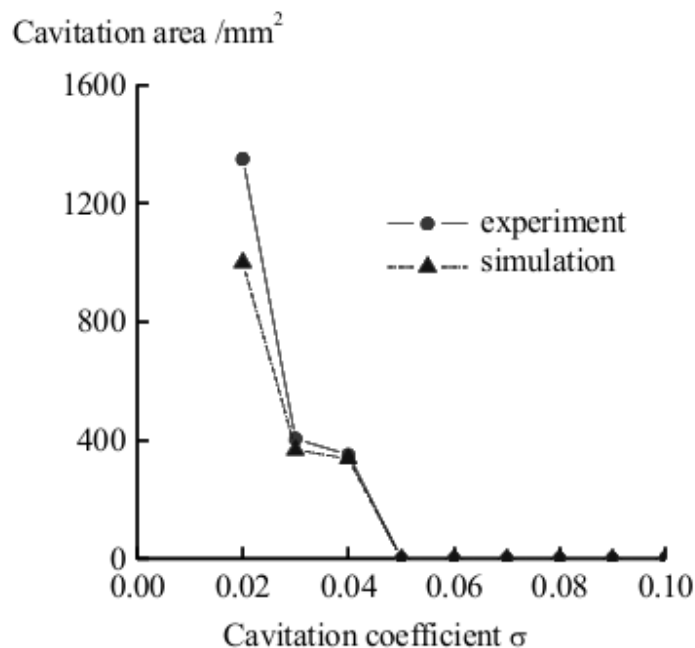
بنابراین، نتایج حاصل از محاسبات عددی و تجسمسازی تجربی سازگار بوده و می توان آنها را به سه مرحله زیر تقسیم کرد:

مرحله 1: مراحل تشکیل حفره در القا گر

هنگامی که ضریب کاویتاسیون σ از 0.1 به 0.05 میرسد، تشکیل حباب در القاگر تقریباً غیر قابل مشاهده است و

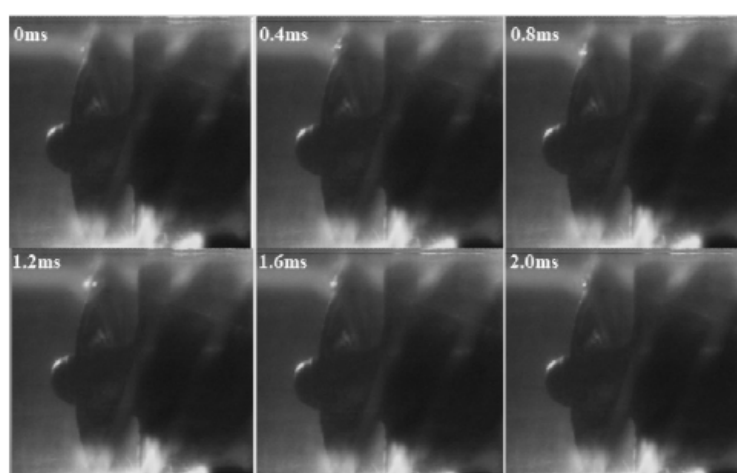
تقریباً می توان آن را نادیده گرفت. از دوربین با سرعت بالا می توان برای گرفتن حباب های کوچک تحت این ضرایب

کاویته استفاده نمود. نتایج به دست آمده نشان می دهد که حباب ها در خارج از سطح مکش در نزدیکی ورودی قرار دارند. این حباب ها از زمان تشکیل تا زمان فروپاشی، اشکال نامنظمی دارند و فاصله زمانی بین این دو فرایند بسیار کوتاه است. نتایج حاصل نیز با شبیه سازی سازگار است که در شکل 6 و 14 نیز نشان داده شده است.



شکل 14

مرحله ابتدای کاویتاسیون در القا کننده در شکل 15 نشان داده شده است.



شکل 15

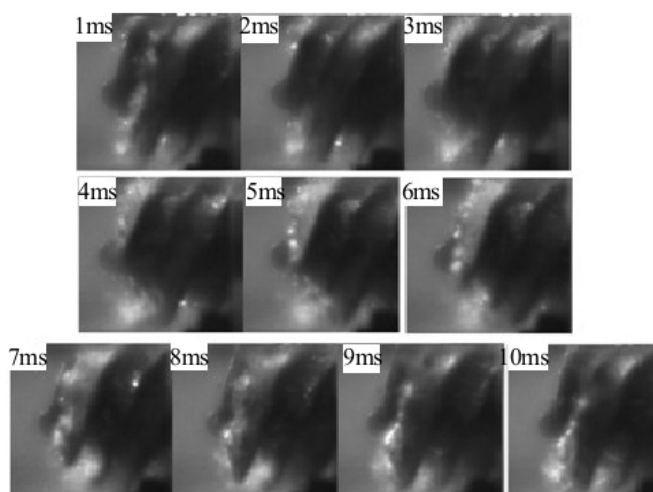
حباب ها دارای شکل دایره ای بوده و قطر آنها حدود 0.6 میلی متر است. سپس این قطر به سرعت در حال افزایش است و شکل بی قاعده می شود. این حباب تمایل دارد دو تکه شده و کل منطقه تقریباً دو برابر منطقه اصلی می گردد. پس از گذشت 0.4 میلی ثانیه، حباب ها به دو قسمت تقسیم می شود. بعد از اینکه 0.4 میلی ثانیه نیز می گذرد، این دو قسمت به تدریج کوچک می شود تا زمانی که به طور کامل فرو می پاشند و در 2.0 میلی ثانیه یا بیشتر از بین می روند.

مرحله 2: مرحله توسعه

هنگامی که ضریب کاویتاسیون σ از 0.04 به 0.03 تغییر می نماید ، موقعیت حفره و تشکیل گروه های حباب اساساً پایدار بوده و دسته بندی حباب ها نیز وجود دارد. با توجه به نتایج عددی، بسیاری از حباب ها تحت محدوده ضریب کاویتاسیون از 0.04 تا 0.03 ظاهر می شوند و منطقه حفره ای عمدتاً در لبه ورودی سطح مکش قرار دارد. این منطقه نامتقارن است و عدم تقارن با کاهش ضریب کاویتاسیون بیشتر می شود.

مرحله 3: مرحله تخریب و فروپاشی

وقتی که کاویتاسون σ برابر با 0.02 است، عملکرد پمپ به سرعت و با وقوع کاویتاسیون کاهش می یابد. موقعیت این حباب در گذرگاه القایی یعنی زمانی که پمپ چرخش می کنند در شکل 16 نشان داده شده است.



شکل 16

شکل 16 نشان دهنده زمان 10 ms در فواصل 1 ms است و این زمان حرکت انتقالی پمپ است. شکل و مرحله تخریب حباب ها به وضوح مشاهده می شود. حباب ها در لبه بیرونی سطح مکش تیغه های طولانی، شکل می گیرند. بعضی از حباب ها نیز بر روی سطح مکش کوتاه ظاهر می شوند. با چرخش القا کننده، حباب ها از چرخش تیغه ها پیروی می کنند. تحت نیروی گریز از مرکز، حباب ها به دیواره شفاف پرتاب می شوند. در طول آزمایش، ارتعاش و نویز آشکار می شود. حباب های نزدیک به سطح مکش خیلی بزرگتر از حباب های نزدیک به سطح فشار تیغه بعدی هستند. در طول تمام حرکت، شکل حباب ها بی نظم و غیر سیستمی است. این حباب ها در گذرگاه تیغه یک اثر "jam" تولید می کنند که به سرعت عملکرد پمپ را کاهش می دهد.

5- نتیجه گیری

ویژگی های حفره ای چرخشی یک پمپ سانتریفیوژ با سرعت بالا با القا کننده ی تیغه ی شکاف، با استفاده از شبیه سازی عددی، ویژگی های خارجی و سیستم تجسم سازی بررسی شد و در نهایت نیز نتیجه گیری های زیر به دست آمدند:

یک روشی که شامل یک مدل کاویتاسیون بوده و بر اساس معادله ریلی پلیست و یک مدل مخلوط است را می توان برای شبیه سازی جریان حفره ای چرخشی پمپ گریز از مرکز با القا کننده تیغه شکاف استفاده نمود. نتایج عددی به دست آمده نیز با مشاهدات آزمایشی سازگار هستند.

شبیه سازی ها و آزمایش ها نشان می دهند که توسعه کاویتاسیون بر روی پروانه می تواند به سه مرحله همراه با کاهش ضریب کاویتاسیون تقسیم بندی شود. این مراحل رشد آهسته، رشد سریع و گسترش عقبگرد است. توسعه کاویتاسیون بر روی القا کننده تیغه شکاف می تواند به سه مرحله یعنی ابتدای کاویتاسیون، توسعه و تخریب تقسیم بندی شود.

علاوه بر این، رابطه القا کننده و درجه حفره ی پروانه اصلی نی در اینجا نشان داده شده است. عدم تقارن نیز با کاهش ضریب کاویتاسیون بسیار قابل توجه است.