

اندازه‌گیری تجربی مشخصه‌های جریان سوپر کاویتاسیونی در پایین دست یک کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه در دو حالت طبیعی و همراه با تزریق هوا

محمود سالاری^۱ و سید حسین دشتی^۲

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۱۰)

چکیده

در این مقاله مشخصه‌های حباب سوپر کاویتاسیون ایجاد شده در پایین دست یک کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه در سرعت‌های مختلفی از جریان آب، در دو حالت طبیعی (بدون تزریق هوا) و حالت همراه با هوادهی اندازه‌گیری و تحلیل تجربی شده است. در آزمایش‌های تجربی، برای هر حالت از شرایط جریان، تغییرات نیروی مقاوم در برابر حرکت و پروفیل توزیع فشار در راستای طولی بدنه، به کمک ترانسدیوسرهای الکترونیکی اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. همچنین بیشترین قطر و طول حباب سوپر کاویتاسیون ایجاد شده نیز از تصاویر یک دوربین سرعت بالا استخراج شده است. برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم‌های اندازه‌گیری، ابتدا جریان سوپر کاویتاسیونی طبیعی بر روی یک دیسک تخت، مشابه با شرایط اندازه‌گیری‌های تجربی فرانس و میشل، انجام گردید. مقایسه نتایج حاضر با داده‌های آنها تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در حالت سوپر کاویتاسیون طبیعی با کاهش سرعت جریان، طول حباب کاویتی در حالت کاویتاسیون طبیعی کاهش می‌یابد و طول حباب آن به مراتب کوچک‌تر از حالت سوپر کاویتاسیون همراه با هوادهی است. در حالت همراه با هوادهی، طول حباب کاویتاسیون وابستگی کمتری به سرعت جریان دارد و به نظر می‌رسد که میزان هوای مکش شده به داخل حباب بسیار مؤثر بوده و در حالی که قطر حباب در حالت سوپر کاویتاسیون طبیعی در بعد از کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه، تقریباً یکنواخت و ثابت می‌ماند.

واژه‌های کلیدی: سوپر کاویتاسیون طبیعی، سوپر کاویتاسیون هوادهی شده، کاویتاتور مخروطی، اندازه‌گیری تجربی.

Experimental Analysis of the Characteristics of Both the Natural and Ventilated Supercavities behind a 30 Degree Conical Cavitator

M. Salari and S.H. Dashti

Imam Hossein Univ.

(Received: 18 August, 2013; Accepted: 1 September, 2013)

ABSTRACT

In this paper, the characteristics of both the natural and ventilated supercavities occurred behind a 30 degree conical cavitator were investigated experimentally. For all cases, the drag force of the cavitator and the streamwise distribution of pressures downstream of the cavitator were measured using the corresponding electronic devices. Both of the maximum diameter and the length for the supercavities, formed behind the cavitator, were measured from the captured pictures using a high speed camera. Experimental results of France and Michel reported for natural supercavitation flow over a flat disk was utilized for validating the present test setup. For the natural supercavitating cases, the results show that the lengths of supercavities decreased as the inlet velocity decreased, while their lengths were many times shorter than those related to the ventilated cases. Also, the sensitivity of the length of the supercavities to the inlet velocity of flows was reduced for the ventilated cases. For the ventilated cases, the lengths of supercavities were influenced most by the mass flow rate of the injected air.

Keywords: Natural Supercavitation, Ventilated Supercavitation, Conical Cavitator, Experimental Analysis.

۱- استادیار (نوسینده پاسخگو): msalari@ihu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد

۱- مقدمه

دو تفاوت اساسی بین سوپرکاویتی طبیعی و مصنوعی (هوادهی شده) وجود دارد [۴]. اول اینکه مشخصه‌های گازهای نامحلول منجر به تفاوت‌هایی در رفتار قسمت انتهایی حباب کاویتی می‌شود. این تفاوت بیشتر به علت تأثیر فشار محیط و تأثیر آن بر تراکم‌پذیری گاز مورد نظر است. دومین تفاوت، اثرات جاذبه می‌باشد که بر حباب‌های بزرگ همراه با هوادهی و در سرعت‌های کم حرکت بدنه بیشترین تأثیر را می‌گذارد.

یکی از روش‌های کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت برای متحرک‌های زیرسطحی، استفاده از مبانی سوپرکاویتاسیون می‌باشد. سوپرکاویتاسیون ایجاد شده می‌تواند به صورت طبیعی و یا هوادهی شده باشد. امروزه برای دسترسی راحت‌تر به حباب‌های بزرگ سوپرکاویتاسیونی، کاویتاتورهای نقشی اساسی را به عهده دارند. کاویتاتورهای متقارن محوری دارای انواع مخروطی و یا دیسکی و یا نیمکره‌ای می‌باشند. این کاویتاتورها معمولاً در نوک بدنه‌های زیرسطحی نصب شده و یک حباب بزرگ مناسب بر روی بدنه اصلی پایین دست خود ایجاد می‌کنند. شکل‌گیری یک حباب بزرگ و دست‌یابی به یک سوپرکاویتی پایدار در اطراف بدنه، از الزامات اولیه برای انتخاب یک کاویتاتور مناسب می‌باشد. همچنین یافتن روابطی منطقی بین شکل کاویتی، اندازه کاویتی و عدد کاویتاسیون جریان برای دست‌یابی به یک سوپرکاویتی پایدار، از اولین خواسته‌های تحقیقاتی این موضوع است.

در خصوص یافتن کاویتاتور مناسب و بهینه، کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است. آلیاناک^۱ و همکارانش [۵] شکل‌های متفاوتی از کاویتاتورها را طراحی نمودند و آنها را برای یافتن فرم بهینه برای کاویتاتور یک اژدر سوپرکاویتاسیونی مورد مطالعه قرار دادند. آنها چندین پارامتر بدون بعد برای مدل‌سازی کاویتاتورها معرفی نمودند [۶]. چاو^۲ [۷] نیز یک روش دیگر برای بهینه‌سازی شکل کاویتاتور و بر مبنای آنالیز حساسیت طراحی و ارائه نمود. همچنین تحقیقات زیادی در زمینه مدل‌سازی عددی سوپرکاویتاسیون در کشورهای اوکراین و روسیه نیز انجام شده است که بیشتر تمرکز آنها بر مطالعه این پدیده بر روی بدنه‌های متقارن محوری بوده است [۸-۱۱]. تعدادی آزمایش تجربی نیز برای کاویتاسیون همراه با هوادهی، بر روی بدنه‌های تقارن محوری نازک توسط ژنگ و یو^۳ [۱۲] انجام شده است. در این آزمایش‌ها، شکل حباب، فشار پایه و نیروهای هیدرودینامیکی و گشتاورهای وارده

پدیده کاویتاسیون و یا حباب‌زایی، در بسیاری از موضوعات کاربردی از جمله در جریان عبوری از داخل پمپ‌ها، نازل‌ها و بر روی بدنه بسیاری از متحرک‌های زیرسطحی قابل مشاهده است [۱]. ایجاد کاویتاسیون در مسائل صنعتی ممکن است منجر به ایجاد اثرات منفی نظیر صدمات سازه‌ای، اغتشاشات صوتی و افت توان گردد و یا اینکه با اثرات مثبتی همچون کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت برابر بدنه‌های متحرک در سیال همراه شوند [۲]. سوپرکاویتاسیون به حالتی از پدیده کاویتاسیون اطلاق می‌شود که منجر به ایجاد یک حباب به نسبت بزرگ با یک مرز پایدار و متمایز بین داخل حباب و جریان آب می‌گردد. این نوع حباب کاویتاسیون می‌تواند بر روی بدنه‌های متحرک زیرسطحی شکل گرفته و منجر به کاهش قابل ملاحظه نیروی مقاوم در برابر حرکت بدنه و در نتیجه افزایش سرعت آنها گردد.

توجه شود که نیروی مقاوم اصطکاک برای یک بدنه متحرک در زیر سطح آب، چندین برابر نیروی مقاوم در برابر حرکت همان متحرک در هوا است و این به علت بزرگ‌تر بودن ویسکوزیته آب نسبت به هوا است. به همین دلایل عملاً دسترسی به سرعت‌های زیاد برای بدنه‌های متحرک در زیر سطح آب، یکی از چالش‌های اساسی در کاربردهای مهندسی است.

معمولاً سوپرکاویتاسیون طبیعی در اعداد کاویتاسیون کمتر از حدود ۰/۱ رخ می‌دهد. روش‌های متفاوتی برای رسیدن به سوپرکاویتاسیون وجود دارند [۳] که برخی از آنها عبارتند از:

- با شتاب‌دهی بدنه و رسیدن به سرعت‌های زیاد، به عنوان مثال بالاتر از حدود ۴۵ متر بر ثانیه برای متحرک‌های زیر سطحی در دریا.

- با کاهش فشار محیط، که البته این تنها در تونل‌های آب آزمایشگاهی مدار بسته قابل اجرا می‌باشد.

- با افزایش فشار داخل حباب از طریق هوادهی به حباب با گازهای نامحلول.

سوپرکاویتاسیون ایجاد شده از روش‌های اول و دوم ذکر شده را سوپرکاویتاسیون طبیعی و سوپرکاویتاسیون ناشی از روش سوم را سوپرکاویتاسیون هوادهی شده می‌نامند. بنابراین برای ایجاد حباب‌های سوپرکاویتاسیونی معادل با آنچه در حالت طبیعی رخ می‌دهند می‌توان از تزریق گازهای نامحلول به نواحی کم فشار در داخل جریان آب بر روی بدنه‌ها نیز بهره برد.

1- Alyanak

2- Choi

3- Zheng and You

در جریان روی یک بدنه متحرک زیرسطحی، با افزایش سرعت جریان و یا کاهش فشار استاتیک، عدد کاویتاسیون به تدریج روی بدنه کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در ابتدا یک حباب کوچک کاویتاسیون در جریان نزدیک به دیواره بدنه تشکیل می‌شود و با افزایش سرعت جریان آزاد به تدریج توسعه و رشد می‌کند. هنگامی که حباب تشکیل شده کل و یا قسمت عمده‌ای از بدنه پایین دست را در برگیرد، اصطلاحاً بر روی بدنه پدیده سوپر کاویتاسیون رخ داده است.

(ب) **طول حباب سوپر کاویتی:** طول حباب یک سوپر کاویتی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای جریان سوپر کاویتاسیونی است. این طول که فاصله بین شروع توسعه کاویتی تا نقطه بسته شدن کاویتی است، در عمل دارای عدم قطعیت به نسبت زیادی است که عموماً به دلیل ناپایداری‌های قسمت عقبی کاویتی می‌باشد. طول سوپر کاویتی معمولاً با کاهش اختلاف فشار کاویتی افزایش می‌یابد [۱۵]. این افزایش طول به این دلیل است که با کاهش اختلاف فشار بین نقطه مرجع و فشار کاویتی، گرادیان فشار در کل میدان جریان کاهش می‌یابد. بنابراین خطوط جریان با انحنای کمتری تشکیل می‌شوند و به خطوط جریان مستقیم جریان بالادست نزدیک می‌شوند. در بسیاری از موارد می‌توان وابستگی طول کاویتی با مقدار عدد کاویتاسیون σ را به صورت زیر نشان داد:

$$L/C = A \sigma^{-n}, \quad (2)$$

که در آن، C طول مشخصه بدنه است. مقدار توان n برای مواردی که بدنه در محیط بیکران قرار گرفته، تقریباً برابر با ۲ است. مقادیر مورد استفاده برای ضریب A به شکل و موقعیت بدنه بستگی دارد [۱۶].

(ج) **ضریب انسداد:** در تست‌های تجربی بر روی مدل‌ها در تونل‌های آب، چنانچه فاصله دیواره‌های تونل از بدنه مدل از حد معینی کمتر باشد، تأثیرات دیواره بر طول و شکل حباب کاویتی سوپر کاویتاسیون قابل ملاحظه خواهد بود. برای این منظور، چنانچه بخواهیم تأثیرات دیواره بر طول حباب ناچیز باشد، می‌بایست عدد کاویتاسیون جریان مورد مطالعه از عدد کاویتاسیون بحرانی برای ایجاد انسداد جریان (ضریب انسداد) بیشتر باشد. مقدار ضریب انسداد جریان با استفاده از معادله بقای جرم و معادله برنولی و مطابق شکل ۱ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{blockage} = \frac{S_u^2}{S_d^2} - 1.0, \quad (3)$$

به دست آورده شده‌اند. هیا^۱ و همکارانش [۱۳] نیز آزمایشاتی را در یک تونل آب بر روی چهار بدنه متقارن محوری با زوایای حمله مختلف انجام دادند. در این آزمایش‌ها مشخصه‌های فرکانسی نیروهای هیدرودینامیکی بر روی بدنه‌های متقارن محوری نازک، به دست آورده شده است.

در عمل با افزایش تدریجی سرعت حرکت بدنه‌های متحرک زیرسطحی، در ابتدا پدیده کاویتاسیون جزئی در میدان جریان اطراف بدنه ایجاد خواهد شد. حباب‌ها و نواحی کاویتاسیونی حول بدنه‌های استوانه‌ای، در ابتدا با فاصله معینی از بدنه شکل می‌گیرند و با افزایش بیشتر سرعت، این ناحیه هر چه بیشتر به سطح بدنه نزدیک شده و در نهایت با قسمت‌هایی از بدنه تماس خواهد یافت. در همین راستا، جیان^۲ و همکارانش [۱۴] ویژگی‌های چهار مرحله از ورود یک پرتابه به آب (۱- برخورد ۲- شکل‌گیری جریان ۳- باز شدن حباب ۴- بسته شدن حباب در اطراف پرتابه) را مطالعه نمودند.

در تحقیق حاضر، نیروهای هیدرودینامیکی، توزیع فشار هیدرودینامیکی، شکل حباب و اندازه حباب سوپر کاویتاسیونی ایجاد شده در پشت یک کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه در دو حالت سوپر کاویتاسیون طبیعی و همراه با تزریق هوا، اندازه‌گیری تجربی شده‌اند. نتایج حاصل از این دو حالت با یکدیگر مقایسه شده و تأثیر هر یک از این پدیده‌های فیزیکی بر نیروهای هیدرودینامیکی به صورت کمی تحلیل شده‌اند.

۲- عدد کاویتاسیون، طول حباب و ضریب انسداد

(الف) **عدد کاویتاسیون:** پدیده حباب‌زایی و تبخیری را که در داخل یک محیط مایع و به علت کاهش فشار استاتیکی مایع تا حد فشار اشباع بخار، $P_v(T)$ ، ایجاد می‌شوند را کاویتاسیون گویند. بر همین مبنا، نزدیک و یا دور بودن از شرایط ایجاد کاویتاسیون در یک جریان مایع را با عدد کاویتاسیون بیان می‌کنند. البته مقدار فشار اشباع بخار تابعی از دمای سیال می‌باشد. بر این اساس عدد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود:

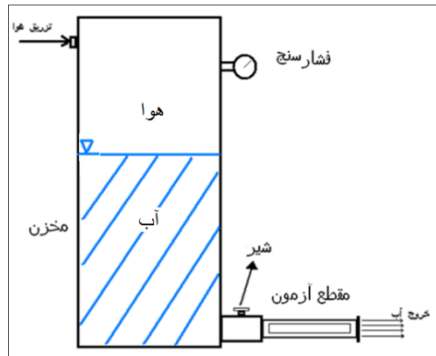
$$\sigma_v = \frac{P_0 + \rho gh - P_v(T)}{0.5 \rho U_\infty^2}, \quad (1)$$

که در آن، P_0 ، ρ ، U_∞ به ترتیب سرعت جریان آزاد آب بر روی بدنه، چگالی آب و فشار اتمسفر در سطح آب آزاد می‌باشند. همچنین g ، h به ترتیب شتاب جاذبه و عمق کاری بدنه متحرک زیر سطحی هستند [۴].

1- Hua

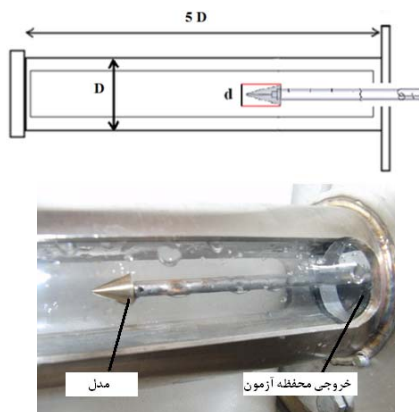
2- Jian

استوانه‌ای اصلی پمپ وارد می‌شود. لازم به ذکر است که در طول هر آزمایش، با کاهش ارتفاع آب در داخل مخزن اصلی و افزایش حجم قسمت فوقانی، فشار هوای مخزن نیز به تدریج کاهش می‌یابد. شماتیکی از اجزای تونل آب مدار باز مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است. سرعت بیشینه آب عبوری از مقطع آزمون این تونل آب تا ۴۰ متر بر ثانیه نیز می‌رسد.



شکل (۲): شماتیک تونل آب مدار باز.

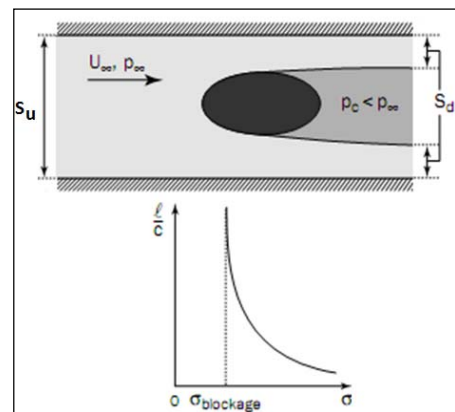
ب) هندسه مقطع آزمون و کاویتاتور: مقطع آزمون به صورت استوانه‌ای بوده که دارای قطر داخلی D و طولی برابر با $5D$ می‌باشد. جنس بدنه آن از پلکسی گلاس با صافی سطح بسیار بالا انتخاب شده است (شکل ۳).



شکل (۳): نمایی از مقطع آزمون و وضعیت قرارگیری مدل.

مدل نصب شده دارای یک کاویتاتور با قطر بیشینه d است که به کمک یک بدنه استوانه‌ای که دارای سوراخ‌هایی برای اندازه‌گیری فشار می‌باشد به مجموعه نیروسنج که در خارج از مقطع آزمون قرار می‌گیرد متصل شده است (شکل ۴). قطر کاویتاتور این تحقیق برابر با ۱۰ میلی‌متر بوده است.

که در این معادله، مقادیر s_{II} و s_{II} به ترتیب نشان دهنده سطح مقطع جریان در بالادست و پائین‌دست مدل می‌باشند. نتایج تجربی مختلف نشان داده که با کاهش هر چه بیشتر عدد کاویتاسیون، طول حباب کاویتیتی نیز بزرگ‌تر می‌شود، تا اینکه در عدد کاویتاسیونی برابر و یا کمتر از ضریب انسداد جریان و در شرایطی که مقدار فشار کاویتیتی کمتر از فشار محیط باشد، طول حباب بسیار بزرگ و از نظر تئوری به سمت بی‌نهایت میل خواهد نمود [۴]. شماتیکی از این تغییرات در شکل ۱ ترسیم شده است.



شکل (۱): نمایش انسداد جریان.

۳- سخت‌افزار آزمایشگاهی

الف) تونل آب مدار باز: کلیه آزمایش‌های مرتبط با موضوع این تحقیق، در تونل آب مدار باز سازمان تحقیقات و خودکفایی ندسا انجام شده است. این تونل از این منظر به صورت مدار باز طراحی شده که بتواند به سرعت‌های بالای لازم برای ایجاد پدیده سوپرکاویتاسیون دست یابد. تونل آب مورد نظر دارای مخزن استوانه‌ای با ارتفاع ۴ متر و قطر ۱ متر است که تا ارتفاع مشخصی از آب پر می‌شود و بر روی آن، هوای تحت فشار با فشار معینی تزریق می‌شود. بسته به سرعت لازم برای اندازه‌گیری، فشار هوای تزریق شده در هر تست می‌تواند متغیر باشد. در قسمت پایین این مخزن، یک مقطع آزمون استوانه‌ای افقی با قطر ۵ سانتی‌متر و طولی حدود ۴۰ سانتی‌متر، طراحی شده و بین مقطع آزمون و مخزن اصلی، یک شیر کروی تعبیه شده است. مکانیزم داخلی شیر به گونه‌ای است که پس از باز شدن، هیچ مانعی بین مخزن اصلی و مقطع آزمون وجود ندارد و جریانی بدون اغتشاش از روی مدل عبور می‌نماید. انتهای مقطع آزمون به فشار اتمسفر می‌رسد و آب تخلیه شده به یک مخزن رو باز تخلیه می‌شود. در پایان هر تست، به طور مجدد، آب از این مخزن به داخل مخزن

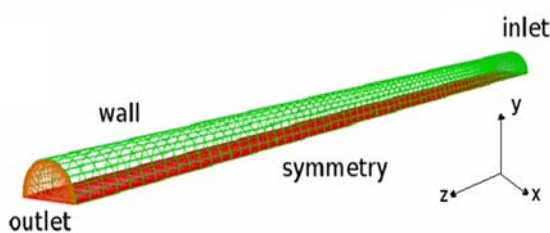
بوده و به تدریج لایه مرزی روی دیواره این مقطع رشد خواهد نمود. به عبارت دیگر در مقطع آزمون، جریان به صورت کاملاً توسعه یافته نمی‌باشد بلکه در حال توسعه خواهد بود. در کلیه این تست‌ها فاصله نوک کاویتاتور از ورودی مقطع آزمون به اندازه ۳ برابر قطر D بوده است. اثبات این ادعا در ادامه به صورت کمی بیان شده است.

از آنجا که عدد رینولدز جریان داخل لوله، بر مبنای قطر مقطع آزمون، در کمترین سرعت روی مدل در این آزمایش‌ها (یعنی حدود ۱۲ متر بر ثانیه) برابر با ۴۷۹۰۴۰ است و بسیار بزرگ‌تر از مقدار ۲۳۰۰ مربوط به جریان توربولانس داخل لوله‌ها است، بنابراین می‌توان طول ناحیه ورودی برای چنین جریانی را از روابط مربوط به لوله‌ها تخمین زد:

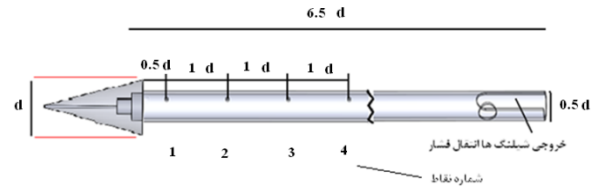
$$\frac{L_e}{D} \cong 4.4 \text{Re}_D^{1/6} \quad (۴)$$

برای این مقطع آزمون، فاصله لازم برای توسعه‌یافتگی پروفیل سرعت جریان در داخل مقطع، طبق رابطه فوق بیشتر از حدود 39D به دست می‌آید. این بدان معنی است که مقطع آزمون این تونل آب دارای شرایط توسعه یافته کامل نبوده و قسمت اعظمی از مقطع، دارای پروفیل سرعت یکنواخت خواهد بود. با افزایش سرعت جریان سهم ضخامت لایه مرزی روی دیواره مقطع آزمون باز هم کاهش می‌یابد.

برای بررسی و تحلیل دقیق‌تر وضعیت جریان در داخل مقطع استوانه‌ای، از نتایج تحلیل عددی جریان سه‌بعدی داخل لوله استفاده شده است. تحلیل عددی انجام شده در حالت سه‌بعدی داخل یک لوله با قطری برابر با قطر مقطع آزمون و سرعت ۳۵ متر بر ثانیه انجام شده است. مدل توربولانسی مورد استفاده، مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ بوده است. تمامی الزامات و ملاحظات یک حل عددی از قبیل مطالعه شبکه و اعمال شرایط مرزی در این کار عددی در نظر گرفته شده است. این تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار فلونت انجام شده است. به منظور جلوگیری از طولانی شدن مقاله، جزئیات تحلیل عددی بیان نمی‌شوند و تنها از نتایج آن بهره‌برداری می‌شود. در شکل ۵ شماتیکی از شرایط مرزی مسئله حل شده آورده شده است.



شکل (۵): شماتیکی از مدل عددی محفظه آزمون.



شکل (۴): شماتیکی از مدل و موقعیت سوراخ‌های اندازه‌گیری فشار.

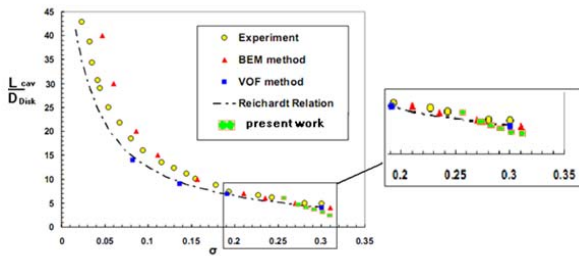
تجهیزات اندازه‌گیری: موقعیت‌های اندازه‌گیری فشار بر روی بدنه استوانه‌ای مدل در چهار موقعیت با فاصله d از یکدیگر (فشارهای نقاط ۱ تا ۴) و همچنین در نوک کاویتاتور مخروطی (فشار نقطه ۵) تعبیه شده است. به صورت همزمان سوراخ‌هایی بر روی مقطع آزمون (فشار نقطه ۵) و مخزن استوانه‌ای حاوی آب (فشار نقطه ۶) ایجاد شده و فشار لحظه‌ای آنها نیز ثبت گردیده است. محل اندازه‌گیری فشار بر روی دیواره مقطع آزمون از منظر طولی، به طور دقیق رو به روی نوک دماغه کاویتاتور و محل اندازه‌گیری فشار مخزن اصلی نیز در ارتفاع یکسان با خروجی مقطع آزمون قرار دارند.

از آنجا که در حین هر آزمایش، فشار داخلی مخزن و همچنین سرعت جریان آب داخل مقطع آزمون بر حسب زمان کاهش می‌یابد، بنابراین اندازه‌گیری فشارها و نیروی وارده بر مدل می‌بایست به صورت لحظه‌ای انجام گیرد. به همین دلیل کلیه سنسورها از نوع الکترونیکی انتخاب و خروجی آنها از طریق یک کارت A/D به دیجیتال تبدیل شده و نهایتاً در یک محیط نرم‌افزاری ثبت و پردازش شده‌اند. لازم به ذکر است که فرکانس داده برداری نهایی در آزمایش‌ها برای تمامی سنسورها برابر با ۱۰۰۰ هرتز بوده است. این فرکانس داده برداری بسیار سریع‌تر از نرخ زمانی تغییرات سرعت و همچنین نرخ زمانی تغییرات فشار در پشت کاویتاتور بوده و بنابراین با دقت بسیار خوبی رفتار جریان قابل مطالعه است.

همچنین برای اندازه‌گیری قطر و طول حساب سوپرکاویتاسیون در پشت کاویتاتور، از یک دوربین فیلم‌برداری با سرعت ۶۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است.

۴- تحلیل شرایط جریان ورودی به مدل در مقطع آزمون

از آنجا که در این آزمایش‌های تجربی شرایط جریان بر روی مدل در یک مقطع استوانه‌ای و محدود انجام شده است، بنابراین قبل از همه، وضعیت پروفیل سرعت جریان در بالادست کاویتاتور شناسایی شده است. با توجه به نزدیک بودن موقعیت کاویتاتور به دهانه ورودی جریان، واضح است که جریان ورودی به این مقطع استوانه‌ای، ابتدا به صورت یکنواخت



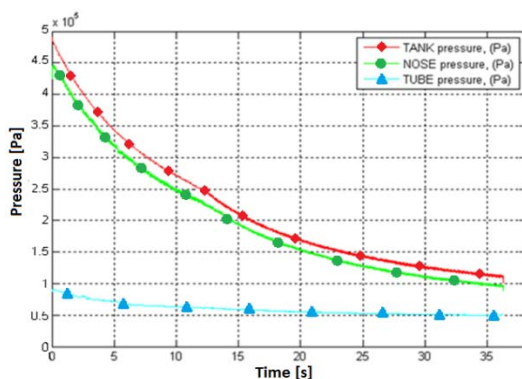
شکل (۷): مقایسه نتایج تحقیق حاضر برای کاویتاتور دیسکی با داده‌های سایرین.

۶- ارائه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

پس از انجام تست‌های اعتبارسنجی و اطمینان از صحت عملکرد تجهیزات آزمایش، تست‌های آزمایشگاهی جریان آب مورد نظر بر روی یک کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه در دو حالت طبیعی و همراه با هوادهی انجام شده است.

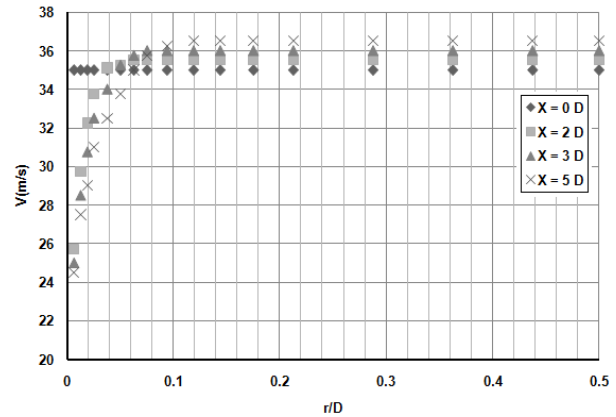
الف) نتایج حالت سوپرکاویتاسیون طبیعی: در این آزمایش‌ها برای محاسبه سرعت لحظه‌ای جریان ورودی آب بر روی مدل کاویتاتور، داده‌های ثبت شده توسط دو سنسور فشارسنج، یکی فشار در نوک کاویتاتور به عنوان فشار کل و دومی فشار استاتیک روی دیواره مقطع آزمون در همان موقعیت طولی استفاده شده است. در شکل ۸ تغییرات فشار در موقعیت‌های مختلف در طول آزمایش بر حسب زمان نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای تفکیک منحنی‌ها از نشانه‌ها استفاده شده و تعداد نشانه‌ها بیانگر تعداد داده‌های تجربی برای ترسیم نمودارها نمی‌باشند. همچنین سرعت جریان متناظر با این زمان‌ها در شکل ۹ محاسبه و ترسیم شده است.

فرم و اندازه حباب‌های سوپرکاویتاسیون ایجاد شده در پایین دست کاویتاتور مخروطی مورد نظر در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل (۸): تغییرات فشار در مقطع آزمون، دماغه کاویتاتور و فشار مخزن در طول آزمایش.

تغییرات ضخامت لایه مرزی دیواره در راستای طولی مقطع آزمون (در حالت بدون مدل) در شکل ۶ ترسیم شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در موقعیت قرارگیری کاویتاتور، که به فاصله ۳ برابر قطر D از ورودی نصب شده، ضخامت لایه مرزی دیواره حدود $0.06D$ بوده و قسمت اعظم جریان ورودی به صورت کاملاً یکنواخت می‌باشد.



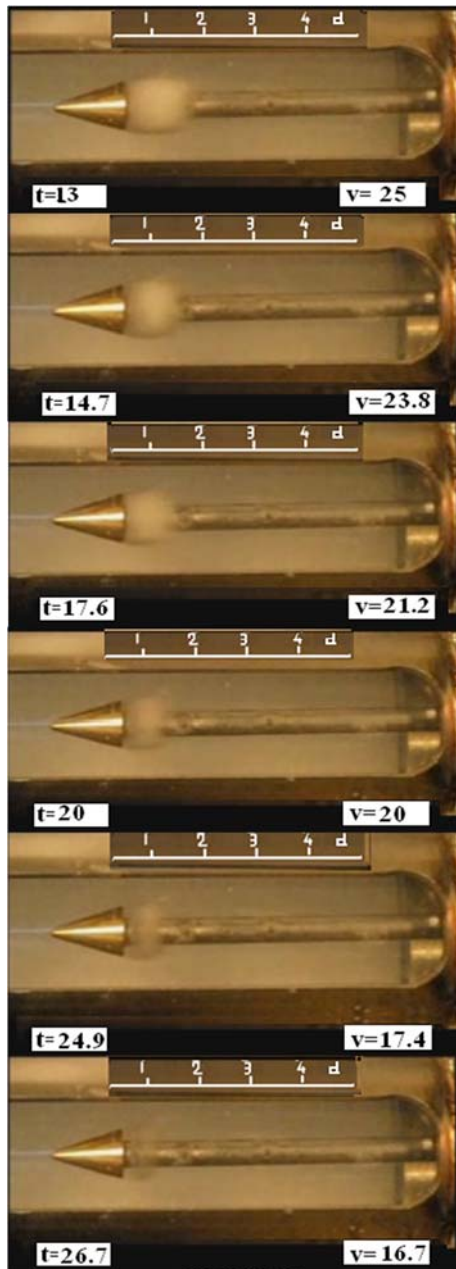
شکل (۶): تغییرات ضخامت لایه مرزی در ناحیه ورودی مقطع آزمون.

۵- کالیبراسیون سنسورها و اعتبارسنجی

تمامی سنسورهای فشارسنج و نیروسنج به‌کار رفته در این آزمایش‌ها در یک آزمایشگاه مرجع کالیبره شده‌اند. خوشبختانه خروجی این سنسورها به صورت توابع خطی بوده که این خود پیچیدگی‌های کالیبراسیون را کاهش داده است. این بدان معنی است که سیگنال خروجی هر سنسور بر حسب میلی‌ولت را می‌توان به صورت یک رابطه خطی به مقدار کمیت اندازه‌گیری مورد نظر ارتباط داد.

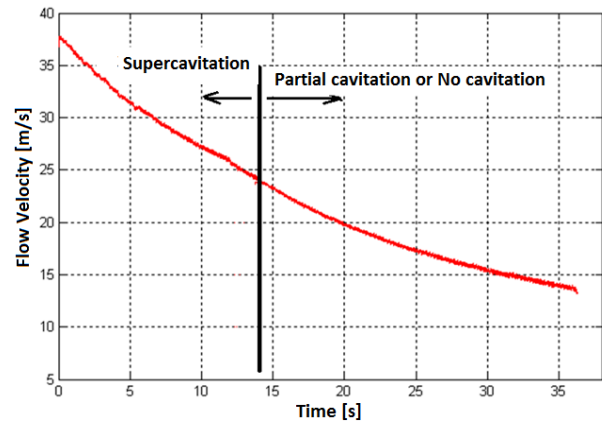
قبل از انجام آزمایش‌ها بر روی کاویتاتورهای مخروطی مورد نظر در این تحقیق، ابتدا می‌بایست از صحت عملکرد تجهیزات داده‌برداری و ایجاد شرایط مناسب در مقطع آزمون اطمینان حاصل می‌شد. در این راستا، ابتدا شرایط آزمایش جریان سیال بر روی یک دیسک تخت که داده‌های تجربی آن در مرجع [۴] موجود بوده تأمین و اندازه‌گیری‌های تجربی مرتبط با آن انجام شده است. در شکل ۷ نتایج حاصل از این تحقیق برای نسبت طول کاویتی به قطر دیسک تخت بر حسب تغییرات عدد کاویتاسیون جریان با داده‌های تجربی میشل^۱ و ریچاردسون^۲ و نتایج سایر روش‌های عددی مقایسه گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده تطابق خوبی با داده‌های تجربی موجود دارد.

1- Michael
2- Richardson

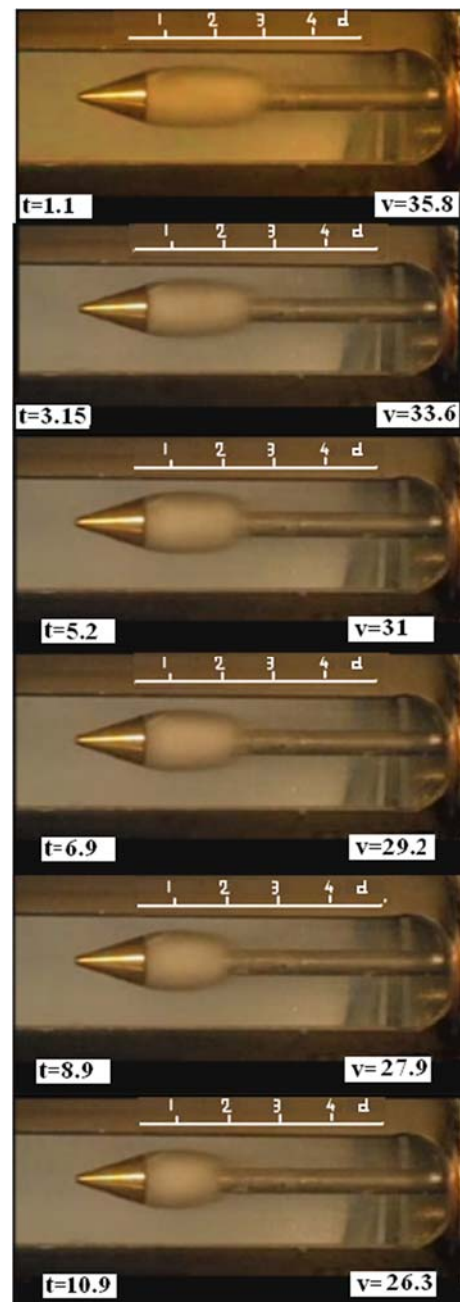


شکل (۱۰): ادامه.

از روی شاخص معین شده در تصویر، می‌توان طول حباب کاویتا بر حسب d را در هر سرعتی از جریان مشاهده نمود. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در این شرایط، برای سرعت‌های کمتر از حدود ۲۴ متر بر ثانیه، کاویتاسیون از حالت حباب بزرگ (سوپرکاویتا) به حالت کاویتاسیون جزئی تبدیل می‌شود. در سرعت‌های کمتر تنها ناحیه کاویتا محدود به لبه‌ها فرار جریان در رینگ بیرونی کاویتاتور محدود شده و در نهایت در سرعت‌های کمتر ناحیه کاویتاسیون نیز از بین می‌رود. همچنین مقادیر فشارهای ثبت شده در موقعیت‌های ۴-۱ در پشت کاویتاتور در طول آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۹): تغییرات سرعت بر حسب زمان.

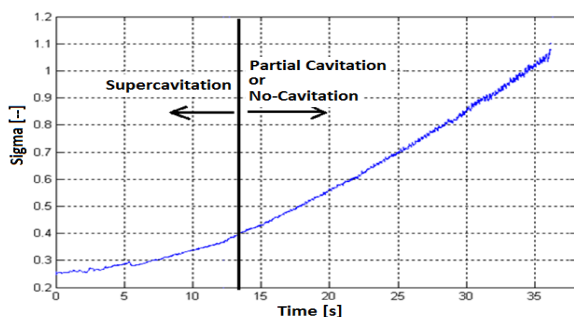


شکل (۱۰): کاویتا حاصل از دماغه مخروطی ۳۰ درجه.

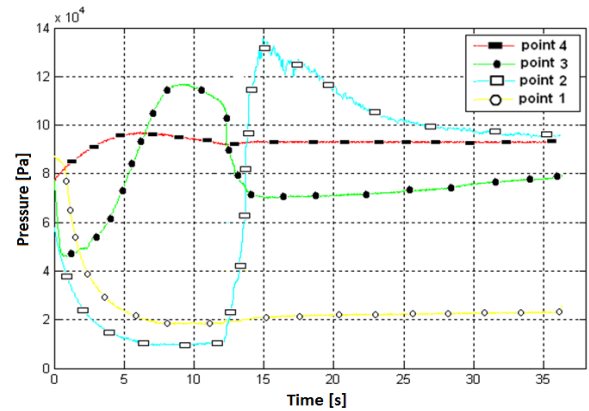
فشارسنج شماره ۴ قرار داشته و با کاهش سرعت در حین آزمایش دنباله حباب نیز به سمت موقعیت نصب فشارسنج شماره ۳ حرکت نموده و در ثانیه ۹ آزمایش موقعیت انتهایی حباب کاویتی به آن رسیده است. این روند کاهش سرعت منجر به این شده تا دنباله حباب در ثانیه ۱۵ از شروع آزمایش به موقعیت سنسور شماره ۲ برسد. با کاهش هر چه بیشتر سرعت دیگر حباب کاویتی پشت کاویتاتور از حالت بسته به حالت باز تبدیل شده و در نهایت با تبدیل به کاویتاسیون جزئی از بین رفته است. یکی از نکات قابل توجه در این منحنی‌ها این است که مقدار فشار سکون در نقاط ۲، ۳ و ۴ به تدریج افزایش یافته است. این بدان علت است که با کاهش طول حباب کاویتی، زاویه نسبی خطوط جریان در انتهای دنباله بیشتر شده و باعث هر چه بیشتر شدن فشار سکون در آن موقعیت‌ها شده است.

در تست‌های انجام شده، به دلیل سرعت متغیر و روند کاهش آن، طول حباب نیز متغیر بوده و به صورت لحظه‌ای دنباله حباب به سمت جلو حرکت نموده است. با کاهش طول حباب و با عبور از چهار موقعیتی که فشارسنج‌ها در آنجا نصب شده‌اند، می‌توان موقعیت دقیق پایان حباب را در زمان‌های مختلف به دست آورد.

در شکل ۱۳ تغییرات عدد کاویتاسیون جریان در حین آزمایش محاسبه و ترسیم شده است. تغییرات عدد کاویتاسیون نشان می‌دهد که مقدار کمینه آن در حالت سرعت بیشینه تست‌های انجام شده برابر با ۰/۲۵ بوده است. از طرفی اگر طبق رابطه ۳ مقدار ضریب انسداد محاسبه شود، خواهیم دید که برای بیشینه سرعت تست، مقدار ضریب انسداد برابر با ۰/۲۱۱ است. بزرگ‌تر بودن مقدار عدد کاویتاسیون جریان از ضریب انسداد، بیانگر این موضوع است که دیواره تأثیری بر طول حباب کاویتی نداشته است. البته هر چه سرعت جریان کمتر شده و عدد کاویتاسیون جریان بزرگ‌تر شود، این مطلب قطعی‌تر می‌گردد.

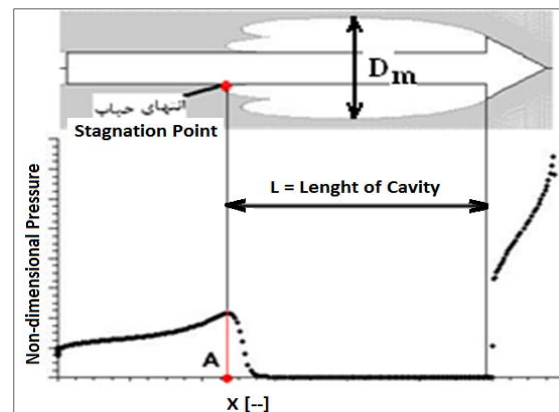


شکل (۱۳): تغییرات عدد کاویتاسیون در مدت آزمایش بر حسب زمان.



شکل (۱۱): تغییرات فشار در چهار نقطه روی بدنه.

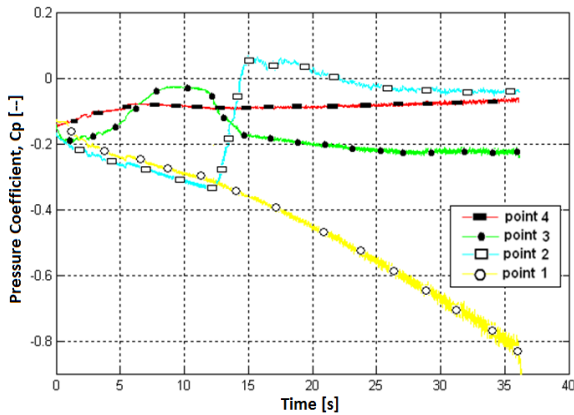
ذکر این نکته ضروری است که مقادیر فشارهای ارائه شده در این نمودارها فشار مطلق می‌باشد. برای تفسیر بهتر منحنی تغییرات فشار در پشت کاویتاتور، بهتر است تا شماتیکی از تغییرات فشار در پشت یک حباب کاویتی در یک سرعت مشخص از جریان ترسیم شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، در موقعیت انتهایی حباب کاویتی معمولاً راستای خطوط جریان سیال به سمت خط مرکزی بدنه بوده و بنابراین در انتهای دنباله کاویتی، یک نقطه سکون A در جریان ایجاد می‌شود و در این موقعیت فشار بالاتر از سایر نقاط مجاور خود می‌باشد.



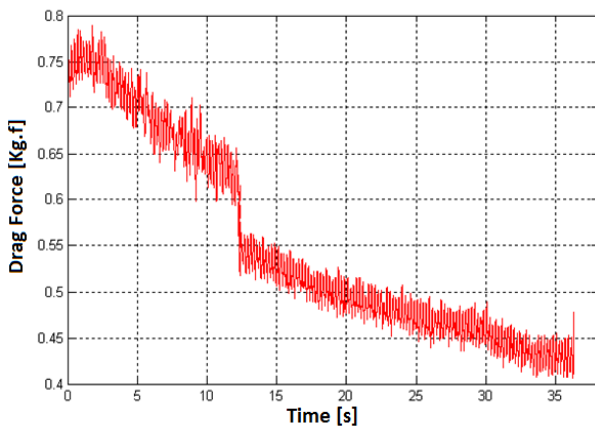
شکل (۱۲): شماتیکی از تغییرات مورد انتظار فشار در پشت کاویتاتور مخروطی.

بدین ترتیب می‌توان چنین نتیجه گرفت که در نتایج شکل ۱۱ در هر زمان که یکی از فشارسنج‌ها روی بدنه استوانه‌ای بیشترین فشار را نشان می‌دهد، بدین معنی است که انتهای حباب کاویتی در آن لحظه در آن موقعیت بوده است. نکته حائز اهمیت در منحنی‌های ترسیم شده در شکل ۱۱ این است که در ثانیه‌های اول، رفتار جریان به صورت گذرا بوده و مربوط به فرایند شکل‌گیری حباب کاویتی است. در ثانیه پنجم آزمایش، موقعیت دنباله حباب کاویتی در موقعیت نصب

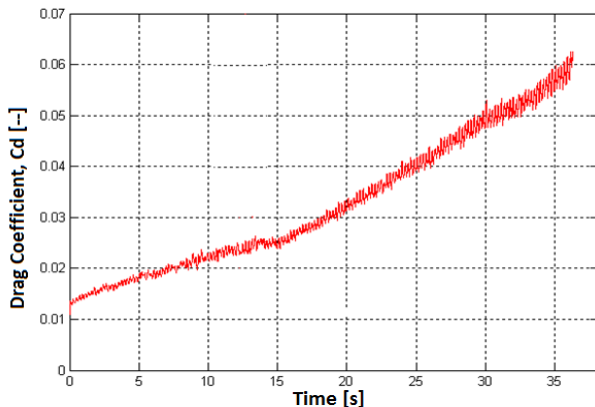
مقاوم روندی افزایشی نسبت به زمان دارد، زیرا ضریب نیروی مقاوم در برابر حرکت از تقسیم نیروی مقاوم بر $0.5 U_{\infty}^2$ به دست می‌آید که روند کاهشی مجذور سرعت در این رابطه سریع‌تر از کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت است.



شکل (۱۶): تغییرات ضریب فشار در چهار نقطه روی بدنه بر حسب زمان.

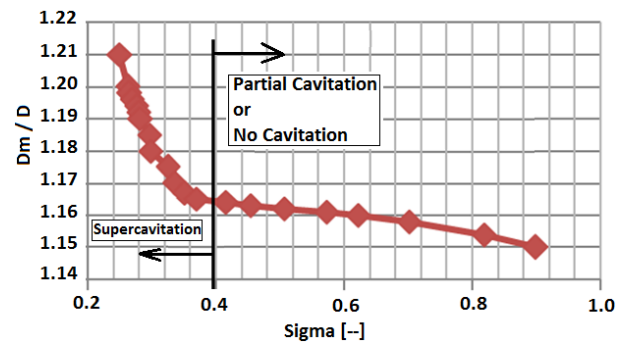


شکل (۱۷): تغییرات اندازه نیروی مقاوم در برابر حرکت بر حسب زمان.

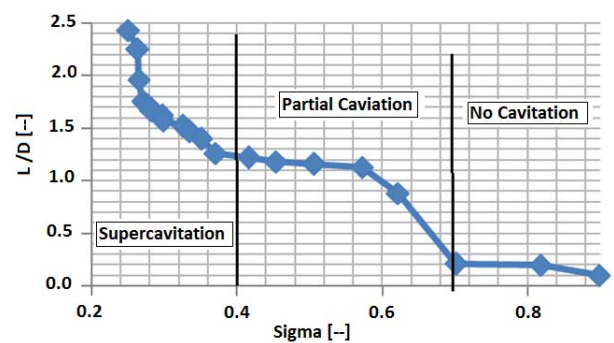


شکل (۱۸): تغییرات ضریب نیروی مقاوم در برابر حرکت بر حسب زمان.

حال اندازه‌های هندسی قطر بیشینه حباب کاویتا D_m و طول حباب کاویتا L ، در حالت بدون بعد بر حسب عدد کاویتاسیون لحظه‌ای جریان در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ترسیم شده است. از منحنی‌های این شکل‌ها مشاهده می‌شود که قطر حباب کاویتا و طول حباب کاویتا تا عدد کاویتاسیون 0.4 حساسیت مناسبی به تغییرات عدد کاویتاسیون دارد و پس از آن دیگر حباب به صورت حباب بسته نمی‌باشد و به تدریج تبدیل به کاویتاسیون جزئی و در نهایت حذف کامل می‌شود.



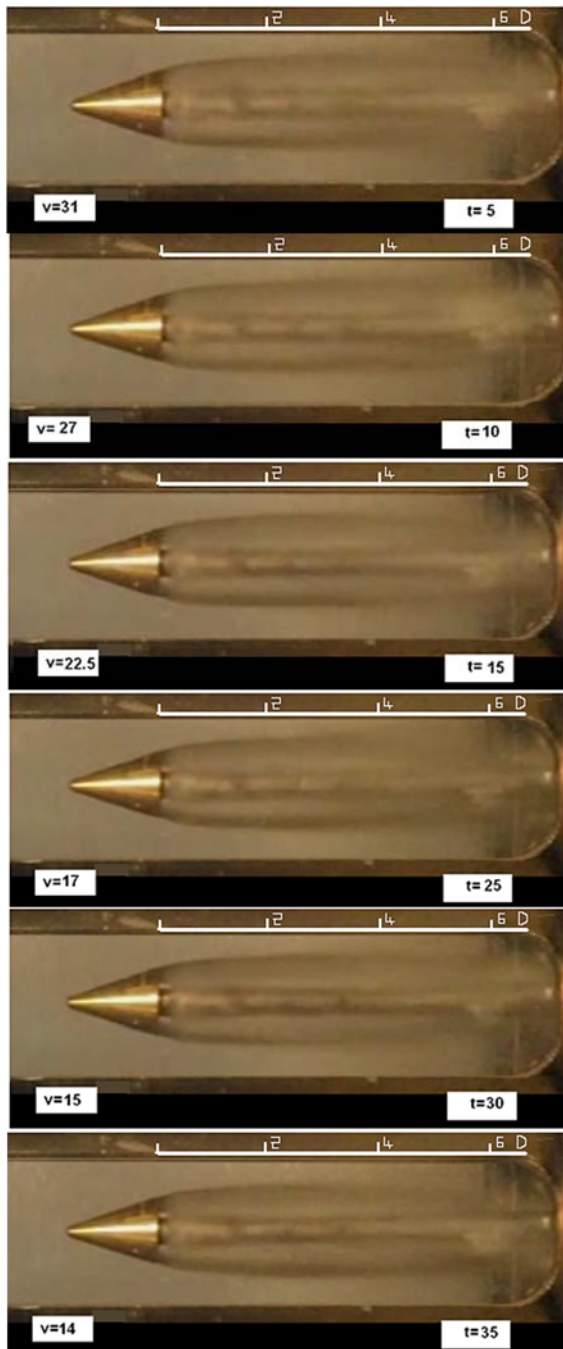
شکل (۱۴): تغییرات نسبت اندازه قطر بیشینه حباب به قطر کاویتاتور در سرعت‌های مختلف بر حسب سیگما.



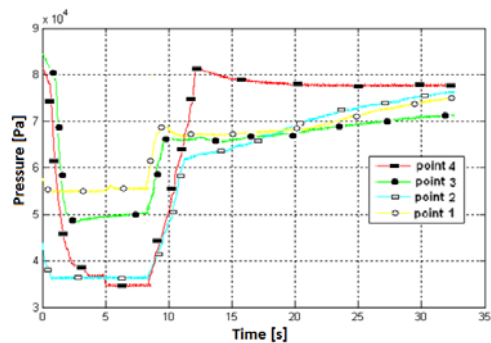
شکل (۱۵): تغییرات نسبت اندازه طول حباب به قطر کاویتاتور در سرعت‌های مختلف بر حسب سیگما.

همچنین در شکل ۱۶ تغییرات ضریب بدون بعد فشار در راستای طولی بدنه در نقاط معین روی بدنه نشان داده شده است. شایان ذکر است که این تغییرات تحت تأثیر تغییرات فشار سنسورها در موقعیت‌های مختلف نسبت به فشار استاتیکی مقطع آزمون و همچنین تغییرات سرعت جریان سیال در حین آزمایش می‌باشند.

نیروی مقاوم در برابر حرکت و ضریب نیروی مقاوم به دست آمده در این آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشخص است، با کاهش سرعت جریان، نیروی مقاوم در برابر حرکت کاهش یافته ولی ضریب نیروی



شکل (۱۹): کاویتی حاصل از دماغه مخروطی ۳۰ درجه در حالت هوادهی شده.



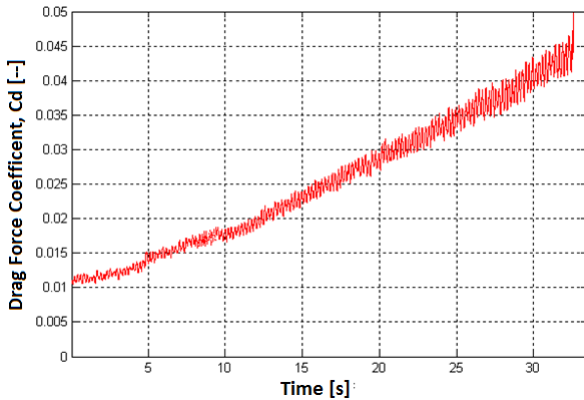
شکل (۲۰): تغییرات فشار در چهار نقطه روی بدنه بر حسب زمان در آزمایش همراه با هوادهی.

نکته جالب و قابل توجه در شکل ۱۷ این است که به جز در ۲ ثانیه اول که کاویتی در حال شکل‌گیری بوده، در سایر موارد نیروی مقاوم در برابر حرکت با شیب معینی در حال کاهش است و البته در ثانیه ۱۳ که تقریباً حباب سوپرکاویتاسیون جای خود را به حباب کاویتاسیون جزئی می‌دهد، به صورت ناگهانی افت شدیدی در میزان نیروی مقاوم مشاهده می‌شود و این بدان معنی است که به صورت لحظه‌ای فشار در ناحیه کاویتی پشت کاویتاتور افزایش یافته و همچنین جریان برگشتی آب بر روی سطح قسمت استوانه‌ای پشت کاویتاتور برقرار می‌شود و در نتیجه نیروی مقاوم در برابر حرکت وارده بر کاویتاتور به یک‌باره کم می‌شود. بعد از این مرحله، به طور مجدد نرخ کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت، به صورت پیوسته نسبت به سرعت جریان کاهش می‌یابد.

تغییرات ضریب نیروی مقاوم در برابر حرکت در شکل ۱۸ نیز نشان می‌دهد که با افزایش طول حباب کاویتی، مقدار ضریب نیروی مقاوم در برابر حرکت نیز کاهش می‌یابد. این خود یکی از دلایل اساسی برای بهره‌گیری از مبانی سوپرکاویتاسیون برای بدنه‌های متحرک زیر سطحی است.

ب) نتایج حالت سوپرکاویتاسیون همراه با هوادهی: مطابق با شرایط مطرح شده قبلی، برای جریان بر روی کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه، آزمایش‌هایی به منظور تأثیر هوادهی بر اندازه هندسی حباب سوپرکاویتاسیون ایجاد شده در پشت کاویتاتور انجام گردید. دامنه سرعت و سایر شرایط جریان مشابه حالت آزمایش‌های سوپرکاویتاسیون طبیعی (حالت الف) بوده است. به منظور تأمین هوا به داخل کاویتی، چهار سوراخ در چهار طرف بدنه استوانه‌ای و به فاصله $0.5D$ از قاعده کاویتاتور تعبیه شده است. دبی هوای تزریق شده برابر با 0.851 لیتر بر ثانیه بوده است. برای محاسبه دبی هوای تزریق شده از یک قطعه ونتوری شکل در مسیر جریان هوا استفاده شده و از اختلاف فشار ایجاد شده در مسیر ورود هوا میزان دبی عبوری هوا اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۹ وضعیت هندسی اندازه حباب ایجاد شده در زمان‌های مختلف ارائه شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشخص است اندازه قطر و طول حباب پس از ثانیه ۱۲ تست که حباب به صورت بسته درآمده است، به سبب دمش هوا در کاویتی تقریباً ثابت و در حالت تعادلی باقی مانده است. این موضوع از تغییرات فشار بر روی نقاط روی بدنه نیز قابل نتیجه‌گیری است.



شکل (۲۲): تغییرات ضریب نیروی مقاوم در برابر حرکت بر حسب زمان در آزمایش همراه با هوادهی.

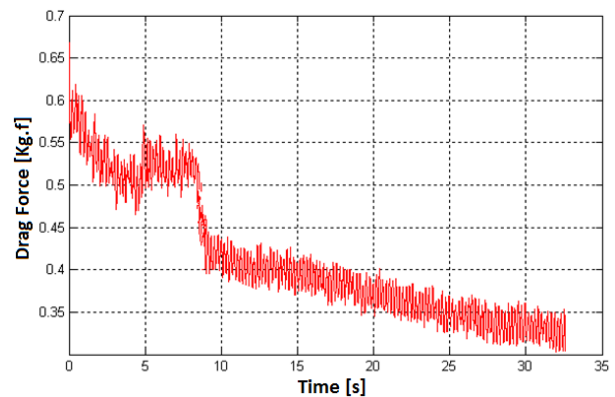
۷- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده نشان دادند که با افزایش سرعت جریان نسبت به بدنه، حجم و طول حباب بزرگ‌تری در حالت سوپرکاویتاسیون طبیعی ایجاد می‌گردد. البته مرز حباب کاویتا به صورت لحظه‌ای دچار تغییرات بوده و به ویژه در ناحیه انتهایی خود ناپایدار است. در حالت سوپرکاویتاسیون طبیعی، در داخل ناحیه حباب، فشار تقریباً ثابت بوده و برابر با فشار جزئی بخار آب می‌باشد. نقطه‌ای که کاویتا با بدنه برخورد می‌کند، دارای بیشترین فشار نسبی (ناحیه سکون) بوده و با گذر انتهای کاویتا از هر نقطه، به طور مجدد فشار کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های انجام شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهند که در حالت سوپرکاویتاسیون طبیعی با کاهش سرعت جریان، طول حباب کاویتا در حالت کاویتاسیون طبیعی کاهش یافته و طول حباب آن به مراتب کوچک‌تر از حالت سوپرکاویتاسیون هوادهی شده می‌باشد. در حالت هوادهی و پس از بسته شدن حباب، طول و قطر حباب کاویتا وابستگی کمتری به سرعت جریان دارد و به نظر می‌رسد که میزان هوای مکش شده به داخل حباب بسیار مؤثر بوده و حالتی تعادلی را برای حباب فراهم نموده است. همچنین مقایسه نیروها و ضرایب نیروی مقاوم بین دو حالت طبیعی و هوادهی نشان می‌دهد که تزریق هوا به داخل حباب باعث کاهش قابل ملاحظه ضریب نیروی مقاوم خواهد شد.

۸- مراجع

1. Knapp, R.T., Daily, J.W., and Hammit, F.G. "Cavitation", McGraw-Hill, New York, 1970.
2. Lecoffre, Y. "Cavitation Bubble Trackers", A.A. Balkema, Brookfield, VT, 1999.

در شکل ۲۱ تغییرات فشار در نقاط ۱-۴ برای حالت هوادهی ارائه شده است. همچنین در این شکل تغییرات نیروی مقاوم بدنه و کاویتاتور بر حسب زمان ارائه شده است. همان‌طور که در قبل نیز مطرح شد، تا ثانیه ۸ حباب سوپرکاویتی در انتهای خود باز بوده و جریان به طور مستقیم به بیرون تخلیه شده است. از ثانیه ۸ به بعد، انتهای حباب سوپرکاویتی بسته شده و همین امر باعث شده تا نیروی مقاوم حرکت نیز به صورت ناگهانی دچار افت قابل ملاحظه‌ای شود. این به علت افزایش فشار در داخل حباب است.



شکل (۲۱): تغییرات اندازه نیروی مقاوم در برابر حرکت بر حسب زمان در آزمایش همراه با هوادهی.

تغییرات فوق نشان می‌دهد که تا ثانیه ۸ که سرعت جریان بیشتر از ۲۸ متر بر ثانیه است، حباب سوپرکاویتی در انتهای خود باز بوده و جریان هوای دمیده شده به صورت مستقیم به بیرون تخلیه شده است. در این حالت فشار در موقعیت سنسورهای ۱-۴ بسیار پایین بوده است. لیکن در بعد از این زمان با کاهش سرعت جریان طول حباب نیز کاهش یافته و انتهای حباب بسته شده است، به طوری که در ثانیه ۱۲ موقعیت انتهای حباب به نقطه ۴ روی بدنه رسیده است. در این حالت یک جریان چرخشی در داخل حباب ایجاد شده و مقدار فشار داخل حباب نیز به مراتب بیشتر از حالت حباب با انتهای باز گردیده است.

در شکل ۲۲ نیز تغییرات ضریب نیروی مقاوم در طول مدت تست ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که ضریب نیروی مقاوم با کاهش طول حباب سوپرکاویتی و یا افزایش فشار داخل حباب، نسبت به زمان روندی افزایشی داشته است. البته مقایسه این نتایج با نتایج حالت طبیعی (شکل ۱۸) نشان دهنده کاهش ضریب نیروی مقاوم در حالت هوادهی می‌باشد.

3. Wosink, M. and Arndt, R.E.A. "Measurements in High Void-Fraction Bubbly Wakes Created by Ventilated Supercavitation", Proc. of 6th Int. Symposium on Cavitation, Wageningen, the Netherlands, 2006.
4. Franc, J. and Michel, J. "Fundamentals of Cavitation" Dordrecht, the Netherlands: Springer, Vol. 76, No. 1, pp. 193-221, 2005.
5. Alyanak, E., Venkayya, V., Grandhi, R., and Penmetsa, R. "Variable Shape Cavitator Design for a Supercavitating Torpedo", Dayton, 2004.
6. Alyanak, E., Grandhi, R., and Penmetsa, R. "Optimum Design of a Supercavitating Torpedo Considering Overall Size, Shape, and Structural Configuration", Dayton, 2005.
7. Choi, J.H., Penmetsa, R.C., and Grandhi, R.V. "Shape Optimization of the Cavitator for a Supercavitating Torpedo", In: Struct. Multidiscip. Optim, Vol. 29, No. 2, pp. 159-167, 2005.
8. Logvinovich, G.V. "Hydrodynamics of Free Surface Flows", NauvokaDunka, Kiev, 1969.
9. Logvinovich, G.V. and Serbryakov, V.V. "The Methods for the Calculation of the Shape of Slender Axisymmetric Cavities, Hydrodynamics", NauvokaDunka, Kiev, 1975.
10. Semenenko, V.N. "Artificial Supercavitation, Physics and Calculation", VKI/RTO Special Course on Supercavitation, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels, 2001.
11. Vasin, A. "The Principle of Independence of the Cavity Sections Expansion as the Basis for Investigation on Cavitation Flows", VKI/RTO Special Course on Supercavitation, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels, 2001.
12. Zheng, T.X. and You, S.H. "Water Tunnel Investigation on Ventilated Cavitation for Slender Body at Small Angles of Attack", J. Exp. Mechanics, Vol. 14, No. 3, pp. 279-287, 1999.
13. Hua, L., Qing, H.L., and Tain, Q.H. "An Experimental Study on Fluctuating Hydrodynamic Loads on Cavitating Axisymmetric Slender Bodies", J. Hydrodynamics, Ser. A., Vol. 19, No. 6, pp. 794-800, 2004.
14. Jian, N. G., Zhang, Z.H., and Zheng, X.L. "A Review of the Body's Water-Entry Ballistics Research", J. Naval Univ. of Eng., Vol. 12, No. 1, pp. 17-23, 2000.
15. Savchenko Y.N. "On Motion in Water on Supercavitation Flow Regimes", J. Gidromehanika, Vol. 70, No. 1, pp. 105 – 115, 1996.
16. Kunz, R.F., Boger, D.A., Chyczewski, T.S., Stinebring, D.R., and Gibeling, H.J. "Multiphase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies", Proc. 3 ASME/JSME Joint Fluid Eng. Conf., Paper FEDSM99-7364, 1999.