



بررسی تجربی رفتار حدی پدیده کاویتاسیون حول استوانه با اندازه‌های مختلف در تونل کاویتاسیون سرعت بالا

ایرج جعفری گاوزن^{۱*} و امیر محمد جدیدی^۱

^۱ استادیار، دانشکده مکانیک دانشگاه سمنان، سمنان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۴/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

چکیده

برای بررسی رفتارهای حدی پدیده جریان کاویتاسیون حول استوانه مدور در تونل کاویتاسیون سرعت بالا، استوانه‌هایی با قطرهای مختلف از جنس استیل ساخته شده‌اند که قطر آن‌ها ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی متر است. با تعبیه دو سوراخ راه بدر محوری و شعاعی و نصب فشارسنج، فشار پشت مدل به ازا اعداد مختلف کاویتاسیون اندازه‌گیری می‌شود. قبل از ایجاد حالت شفاف نقره‌ای در پشت مدل، نوسان فشار پشت مدل شدید بوده، بعد از ظاهر شدن حالت مذکور، شدت نوسان کاهش یافته، طول حباب به شدت افزایش می‌یابد. نوسان طول بصورت نامنظم و تصادفی اتفاق می‌افتد. فشار حدی کمینه برای تمامی مدل‌ها، تقریباً یکسان و برابر ۱۳۵۰۰ نیوتن بر مترمربع است؛ همچنین با افزایش فشار اولیه، مقدار فشار حدی تقریباً ثابت است. وقتی طول حباب کاویتاسیون کوتاه است، نشر گردابه‌ها بر اساس الگوی ون-کارمن بصورت منظم رخ می‌دهد. در حالت سوپرکاویتاسیون، صدای انهدام برای استوانه با قطر ۲۰ میلی متر بسیار شدیدتر از مدل ۱۰ میلی متر است. با کاهش قطر مدل، عدد کاویتاسیون کمینه به شدت کاهش می‌یابد. عدد کاویتاسیون کمینه، به ترتیب برای مدل ۱۰ و ۲۰ میلی متری برابر با ۰/۱۲۵ و ۰/۴۹ است. نتایج حاکی از آنست که اختلاف عدد کاویتاسیون کمینه میان محاسبات تئوری و آزمایشگاهی تقریباً ۱۴٪ است.

کلمات کلیدی: تونل کاویتاسیون سرعت بالا؛ رژیم ابری؛ استوانه؛ رفتار حدی؛ اندازه گیری آزمایشگاهی.

Investigating the Limit Behavior of Cavitation Phenomana Around Circular Cylinder with Various Diameters at High Speed Cavitation Tunnel

I. Jafari Gavzan^{1,*}, A. M. Jadidi²

¹ Assistant Professor, Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

Abstract

To investigate the limit behaviours of cavitation flow around a circular cylinder at a high speed cavitation tunnel, stainless steel models with different diameters, including 10 mm, 15 mm and 20 mm were made and tested in a supercavitation tunnel. Two holes designed in a way that the radial hole is connected to the axial one to measure the back pressure of models at various cavitation numbers. Before appearing clear silver regime at the back of model, pressure fluctuating is violent and after forming visible stable clear silver regime the fluctuating pressure will be reduced and the length of attached bubble will be increased strongly. In this case, the longitudinal oscillation occurs randomly. The measure of minimum back pressure for all models is the same and is equal to 13500 Pa. When the cavitation length is small, shedding vortices occur regularly, based on von-karman pattern. In supercavitation regime, the collapse noise of bubble for the 20 mm model is very stronger than the 10 mm model. The ultimate cavitation number (choking regime), will be reduced by decreasing the model diameter. The minimum cavitation number for 10 and 20 mm models are 0.125 and 0.49 respectively. The results show that the difference in ultimate cavitation number between experimental and theory methods are approximately 14%.

Keywords: High Speed Cavitation Tunnel; Cloud Cavitation; Cylinder; Limit Behavior; Experimental Measurement.

۱- مقدمه

حاکمی از آن است که اندازه مدل، نقش مهمی در تبدیل رژیم ابری به لایه‌ای خواهد داشت.

آسونی و سایر همکاران، روی اثر کاویتاسیون بر نشر گردابه ون-کارمن به صورت تجربی کار کردند [۸]. مدل مورد آزمایش آن‌ها، یک ایرفویل ۲ بعدی در رینولدزهای بالا بوده است. آن‌ها دریافتند که فرکانس نشر گردابه‌ها، از قانون اشتروهل تبعیت می‌کند؛ همچنین سرعت عرضی لبه عقبی قدرت گردابه را بصورت خطی افزایش می‌دهد.

کاستلانی در مطالعه تجربی، به نقش جت بازگشتی در تشکیل کاویتاسیون پوسته‌ای پرداخته است [۹]. جدایی جریان و پدیده پسماند، خفگی و جت‌های بازگشتی را مشاهده نموده است و بین طول کاویتاسیون و عدد کاویتاسیون ارتباط برقرار کرده است.

ماهش و ناسکاندان طی یک بررسی عددی مشخصات دنباله نزدیک جریان کاویتاسیونی روی یک استوانه دایره‌ای در دو عدد رینولدز ۲۰۰ و ۳۹۰۰ را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده نمودند که کل حالات شبیه‌سازی شده در دو رژیم کاویتاسیونی مختلف مشاهده می‌شود: رژیم گذرا و رژیم دوره ای. کاویتاسیون روی توزیع فشار و لایه مرزی روی سطح استوانه اثر می‌گذارد [۱۰].

در کار حاضر استوانه‌هایی به طول ۱۰ سانتی متر با قطرهای ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر در مقطع آزمایش تونل کاویتاسیون سرعت بالا به منظور بررسی اثر اندازه مدل بر رفتار حدی پدیده کاویتاسیون مورد آزمایش از شروع تا فاز سوپر کاویتاسیون قرار گرفته‌اند. نوآوری این کار، بررسی رفتار فشار در پشت مدل با اندازه‌های گوناگون، اندازه‌گیری طول حباب کاویتاسیون، مقایسه عدد کاویتاسیون خفگی در ۲ حالت آزمایشگاهی و تئوری و بررسی رفتار حباب کاویتاسیون، به صورت کیفی و کمی است. لازم بذکر است، تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه سوپر کاویتاسیون دانشگاه سمنان انجام شده است.

۲- شرح دستگاه آزمایش

دستگاه انجام آزمایش یک تونل کاویتاسیون سرعت بالا با سرعت و فشار متغیر است که شامل، مولد جریان از نوع گریز از مرکز است. وظیفه آن به جریان درآوردن آب درون مدار است. این پمپ آب را وارد یک نازل و سپس وارد قسمت

کاویتاسیون، گسیختگی مایع ناشی از تقلیل فشار موضعی تعریف می‌شود. با ایجاد حباب‌های بخار گسیختگی القا می‌شود. وقتی حباب‌ها توسط جریان مایع به ناحیه‌ای با فشار بالاتر منتقل می‌شوند، به صورت ناگهانی دچار فروپاشی می‌گردند. در یک تونل کاویتاسیون با پهنای محدود، عدد کاویتاسیون بحرانی σ_c موجود است که به ازای آن طول حفره بخار نامحدود می‌شود، به این حالت حدی جریان، خفگی گویند؛ زیرا به ازای فشار ثابت تونل و فشار ثابت حفره بخار، عدد کاویتاسیون کمینه، حد بالایی برای سرعت تونل ایجاد می‌کند [۱].

راد و جعفری گاوزن [۲] در سال ۲۰۰۸، در بررسی تجربی جریان مایع حول یک گوه و پس جسم نشان دادند که پس جسم، موجب به تاخیر انداختن خفگی می‌شود. میشل و فرانک در کتاب اصول کاویتاسیون، انسداد جریان کاویتاسیونی حول گوه متقارن را بررسی کرده، برای یک گوه با زاویه راس ۱۶ درجه و نسبت یال گوه به ارتفاع تونل در قسمت آزمایش برابر با ۰/۲، عدد کاویتاسیون خفگی ۰/۲۵ را ارائه کردند [۳].

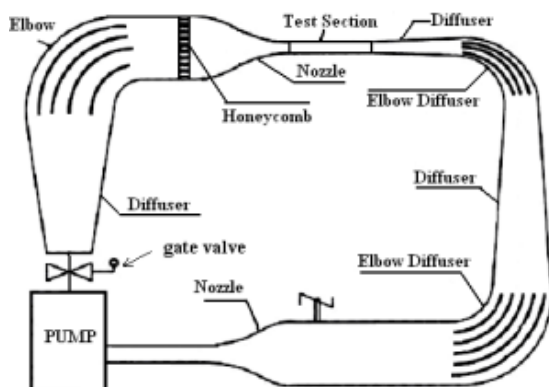
وو با سایر همکاران، نقش آثار جداره در جریان‌های کاویتاسیونی را روی ضرایب نیروی پسا به صورت تجربی بررسی نموده‌اند، دیواره جامد در قابلیت تست‌های آزمایشگاهی اثر زیادی دارد [۴]. گریشما و سایر همکاران، جریان کاویتاسیونی حول یک هیدروفویل متقارن دو بعدی را به صورت عددی از شروع تا سوپر کاویتاسیون بررسی کرده، خطای زیادی در فاز شروع و حالت ابر کاویتاسیونی، فروپاشی و محل بسته شدن ایجاد می‌شود که فقط نشان دهنده این مساله است که باید کاویتاسیون را به صورت آزمایشگاهی بررسی کنند [۵].

دولاور با سایر همکاران با بررسی نقش اندازه مقطع آزمایش روی سازه و دینامیک کاویتاسیون، به این نتیجه رسیدند که مقیاس‌های کوچک روی کاویتاسیون اثر چشمگیری دارد، به‌ویژه ارتفاع مقطع آزمایش تونل در دینامیک جت بازگشتی نقش اساسی دارد [۶]. برای بررسی اثر اندازه مدل در گذر از کاویتاسیون لایه‌ای به فاز ابری کار تجربی دیگری انجام شده است [۷]. نتیجه این آزمایش

برای ساخت آن‌ها مواد اولیه خام توسط دستگاه CNC به ابعاد مورد نظر می‌رسند. سپس رزوه‌ای به قطر ۸ میلی‌متر از ابتدا تا وسط نمونه استوانه‌ای ایجاد شده که برای پیچ شدن نمونه روی دستگاه است. برای خواندن فشار پشت قطعه ابتدا لازم است، سوراخ بسیار ریزی روی بدنه نمونه به صورت شعاعی ایجاد شود که این مهم توسط مته‌های بسیار باریک به انجام می‌رسد. این کار نیازمند دقت بسیار بالا است و مقاومت بسیار زیاد نمونه‌های فولادی، باعث شکستن مته‌ها می‌شود؛ همچنین باید پیچ رابط سوراخ گردد تا با فضای پشت استوانه از طریق این دو سوراخ به فشارسنج راه پیدا کند. لازم به ذکر است که سوراخ‌ها نباید به گونه‌ای باشند که روی جریان تاثیر گذارند. دلیل استفاده از استوانه با مواد اولیه مختلف این است که هر جنس دارای زبری سطحی ذاتی خاص خود است که بررسی تاثیر این زبری در تسریع شروع کاویتاسیون، حائز اهمیت است.

شماتیکی از تونل سوپرکاویتاسیون مدار بسته، در شکل ۲ آورده شده است.

همچنین رابط مورد نظر باید به وسیله یک تبدیل به شیر تخلیه متصل شود. به کمک شیر در انتهای آزمایش، هواگیری به خوبی انجام می‌شود و چنانچه آب در سوراخ‌ها حبس شده باشد، از این خروجی خارج می‌شود. در عکس برداری از دوربین p530 با سرعت شاتر ۰/۰۰۰۲۵ ثانیه و حسگر BSI CMOS17 مگاپیکسل با لنز ۱۰۰۰-۲۴ و بزرگنمایی ۴۲ استفاده شده است.



شکل ۲- شماتیک تونل سوپرکاویتاسیون بسته

مقطع آزمایش می‌کند و پس از کاهش سرعت در دو دیفیوزر به منبع ذخیره و جداساز هوا و آب انتقال می‌دهد (شکل ۱). در قسمت آزمایش، از چهار پنجره پلکسی گلس جداشونده استفاده شده است که با پیچ‌های ۸ میلی‌متری مهار شده‌اند. نمونه‌های مورد آزمایش، به شکل استوانه به طول ۱۰ سانتی‌متر و با قطرهای متفاوت ۱۰،۲۰ و ۲۵ mm و از جنس‌های برنج، آلومینیوم و فولاد ساخته شدند.

حداکثر سرعت سیال در مقطع آزمایش بدون نصب مدل، ۲۵ متر بر ثانیه است. حداکثر فشار درست قبل از نازل، ۲/۳ اتمسفر است. ابعاد مقطع آزمایش، ۹۴×۱۵×۱۰ سانتی‌متر است. شدت توربولانس در خروجی نازل، تقریباً ناچیز است (نوسان عقربه فشارسنج بدون گلیسرین، تقریباً از لحاظ فرکانس و اندازه صفر است). توان اسمی پمپ ۵۵ کیلو وات است که در زمان آزمایش بسته به اندازه باز بودن شیر تنظیم دی، کم یا زیاد می‌شود.



شکل ۱- نمایی از تونل کاویتاسیون سرعت بالای دانشگاه سمنان

۳- نحوه انجام آزمایش

برای انجام آزمایش، ابتدا شیر ورودی به منبع را باز کرده تا تونل کاملا پر شود؛ سپس با همکاری تیم داده برداری یک نفر مسئولیت عکس برداری و نفر دیگر، فرآیند افزایش دبی و ثبت داده‌ها را در حالت‌های مختلف بر عهده می‌گیرد و داده‌های پایا را در جداول از قبل تنظیم شده ثبت می‌کند.

لازم بذکر است که نمونه‌های آزمون، از جنس استیل زنگ نزن با قطرهای ۱ و ۲ سانتی متر و طول ۱۰ سانتی متر بوده که برای صیقلی کردن آن‌ها از سنباده ۱۲۰۰ استفاده شده است. در حین کار با دستگاه آب به صورت پیوسته وارد تونل شده، گازهای آزاد شده در آب از آن خارج می‌شود که باعث می‌شود، چنانچه تونل با حداکثر دبی عبوری کار کند، افزایش دمای سیال برای مدت ۲ دقیقه تقریباً ناچیز باشد؛ اما اگر مدت انجام آزمایش زیاد گردد، افزایش دمای سیال محسوس بوده، سبب افزایش فشار بخار می‌شود.

برای انجام آزمایش، مدل‌ها را بصورت مجزا در مقطع آزمایش نصب کرده و با بازکردن تدریجی شیر تنظیم دبی، فشار ورودی نازل و خروجی آن و همچنین فشار پشت مدل از حالت بدون کاویتاسیون، شروع کاویتاسیون تا سوپر کاویتاسیون ثبت می‌شود. همزمان عکسبرداری، فیلمبرداری و اندازه‌گیری به همراه سایر داده‌ها درج می‌شود.

هدف از انجام آزمایش، بررسی رفتار حدی در تونل کاویتاسیون سرعت بالا برای مدل‌های استوانه‌ای خواهد بود که عدد کاویتاسیون در یک همسایگی کوچک تغییر می‌کند و به مقدار ثابت و حداقلی می‌رسد. در این حالت خفگی رخ داده است؛ چرا که کمینه شدن عدد کاویتاسیون، باعث می‌شود با افزایش دبی دیگر سرعت جریان در تونل افزایش پیدا نکند و توسعه کاویتاسیون متوقف شود. برای یافتن عدد کاویتاسیون خفگی به دو روش اقدام می‌شود، در روش اول از تعریف عدد کاویتاسیون استفاده کرده، در روش دوم از معادله ای که در ادامه به آن اشاره می‌شود، بهره گرفته می‌شود.

۴- معادلات و روابط

در آزمایش مورد نظر سعی بر این است تا با افزایش دبی در تونل، تغییرات عدد کاویتاسیون برای نمونه‌های مختلف بررسی شود. همزمان فشارهای بالا دست و پایین دست نازل

نیز قرائت می‌شود. عدد کاویتاسیون به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_c}{0.5\rho U_{\infty}^2} \quad (1)$$

که σ عدد کاویتاسیون، U_{∞} سرعت در بالادست دور، P_c فشار کمینه حدی پشت استوانه (در این آزمایش برابر با $\frac{N}{m^2}$ ۱۳۵۰۰ است)، P_{∞} فشار در بالادست دور و ρ چگالی آب می‌باشند. حال سعی می‌شود، با توجه به شکل ۲ و با استفاده از معادلات پیوستگی و برنولی، رابطه ساده دیگری برای عدد کاویتاسیون خفگی بر حسب پارامترهای شکل به دست آید.

در فرمول (۱) می‌توان از فشار P_c به جای P_v استفاده کرد که P_v فشار بخار سیال در دمای مربوطه است. از یک فشار مرجع به جای P_v استفاده شده است که برای یافتن آن در مدل مورد آزمایش، دو سوراخ یکی محوری و دیگری شعاعی طوری در مدل ایجاد می‌شود که راه به در باشد. سوراخ شعاعی در وسط طول استوانه با مته بسیار باریک ایجاد شده است که با سوراخ محوری در ارتباط است. برای اندازه‌گیری فشار P_c پشت مدل، مدل با یک پیچ سوراخدار به قسمت اندازه‌گیری تونل متصل می‌شود. پیچ مذکور دو سر رزوه بوده که به انتهای بیرون از مقطع آزمایش آن یک سه راهی وصل می‌شود. ۳ مجرای سه راهی یکی به پیچ، دومی به شیر تخلیه گازهای تخلیه شده و سومی به فشار سنج بدون گلیسیرین نصب می‌شود. فشار P_c مربوط به فاز سوپر کاویتاسیون در پشت مدل است که در این حالت عقربه فشارسنج هیچ گونه نوسانی نخواهد داشت.

اگر جداره بالایی موجود نباشد، سوپر کاویتاسیون با طول محدود ایجاد می‌شود که نیازمند داشتن یک مقطع آزمایش با طول خیلی زیاد خواهد شد. فاصله جداره‌ها نقش اساسی در عدد کاویتاسیون خفگی دارد. با کاهش h_T برای یک مدل با قطر معین، تداخل مدل با جداره زیاد می‌شود که یک موضوع مجزا و پیچیده است. از طرفی افزایش طول جداره‌ها منجر به کاهش σ خفگی می‌شود. به عبارت دیگر، جداره اثر خود را از دست خواهد داد. از طرفی با افزایش h_T تامین دبی امکان پذیر نبوده یا باید پهنای مقطع آزمایش را کوچک کرد.

همانگونه که در یافتن رابطه (۶) ذکر شده، در بسط $(1+\sigma)^{-1}$ از جملات σ^2 و جملات مرتبه بالاتر صرف نظر شده است؛ همچنین در بسط $(1-h_c/h_T)^2$ ، جمله h_c^2/h_T^2 صرف نظر شده است. جریان سیال مایع در قسمت تر شده مدل، لزج است و دارای لایه مرزی است که در نوشتن معادله برنولی از آن صرف نظر شده است. اندازه گیری ضخامت حباب در حالت سوپرکاویتاسیون با توجه به وجود نیروی شناوری (نوسان عمودی) همراه با خطای قابل ملاحظه‌ای است.

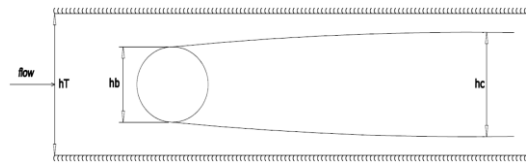
۵- نتایج

داده‌های ثبت شده در جدول در هر حالت برحسب کاهش عدد کاویتاسیون به همراه عدد کاویتاسیون حدی کمینه درج می‌شود. لازم به ذکر است که به علت حجم زیاد داده‌ها، فقط جداول دو مورد از نمونه‌ها (نمونه‌های به قطر ۱۰ و ۲۰ میلی متری) ارائه می‌شود. در ابتدا، نتایج نمونه 20 mm به شرحی که در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده، ارائه می‌گردد. در جدول ۱ طول کاویتاسیون، حالت فیزیکی حباب کاویتاسیون و سرعت بالادست آورده شده است و در جدول ۲، فشار پشت نمونه و فشار ورودی و خروجی نازل بر حسب عدد کاویتاسیون آمده است.

مطابق شکل ۴، به محض نهایی شدن طول حباب و از بین رفتن نوسان طول، ضخامت حباب قبل از محل انهدام اندازه گیری می‌شود. وقتی طول حباب کوتاه باشد، نشر گردابه‌ها از پشت حباب (همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود) بصورت منظم بر اساس الگوی ون-کارمن صورت می‌گیرد که در این حالت صدای انهدام گسسته و با فاصله زمانی مشخص رخ می‌دهد.



شکل ۴- اندازه گیری طول حباب از محل شروع تا انتهای آن



شکل ۳- نمای شماتیکی مقطع آزمایش تونل همراه با مدل استوانه‌ای در حالت حدی

در رژیم سوپر کاویتاسیون، تنش برشی روی فصل مشترک مایع و بخار ناچیز بوده، همچنین جریان مایع پایا و تراکم ناپذیر است. معادله برنولی برای یک نقطه بالا دست و یک نقطه روی فصل مشترک رژیم سوپر کاویتاسیون نوشته می‌شود.

$$m_i = m_o, \quad \rho U_\infty h_T = \rho U_c (h_T - h_c) \quad (2)$$

$$\rightarrow \frac{U_\infty}{U_c} = \frac{h_T - h_c}{h_T}$$

$$P_\infty + 0.5\rho U_\infty^2 = P_c + 0.5\rho U_c^2 \quad (3)$$

$$\rightarrow P_\infty - P_c = 0.5\rho(U_c^2 - U_\infty^2)$$

چون:

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_c}{0.5\rho U_\infty^2} \rightarrow U_\infty^2 = \frac{P_\infty - P_c}{0.5\rho\sigma} \quad (4)$$

که P_c فشار کمینه حدی پشت استوانه است. با ترکیب رابطه (۳) و (۴) داریم:

$$0.5\sigma\rho U_\infty^2 = P_\infty - P_c = 0.5\rho(U_c^2 - U_\infty^2) \quad (5)$$

$$\rightarrow \frac{U_\infty}{U_c} = \frac{1}{\sqrt{1+\sigma}}$$

$$\frac{1}{1+\sigma} = \left(1 - \frac{h_c}{h_T}\right)^2 \rightarrow \sigma \cong 2\frac{h_c}{h_T} \quad (6)$$

دلیل رابطه ۶ بشرح زیر است:

$$\frac{1}{1+\sigma} = 1 - \sigma + \sigma^2 + \dots$$

$$\left(1 - \frac{h_c}{h_T}\right)^2 = 1 - 2\frac{h_c}{h_T} + \left(\frac{h_c}{h_T}\right)^2 + \dots$$

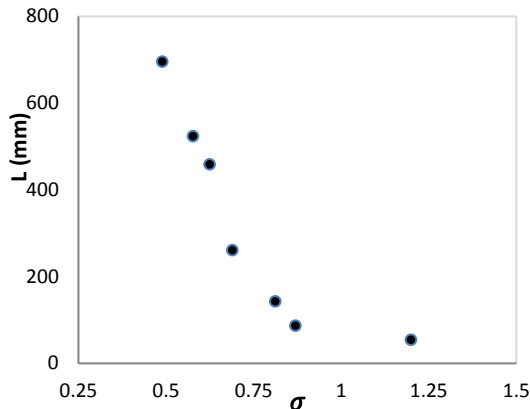
In supercavitatin: $h_c^2 \ll h_T^2$ and $\sigma^2 \ll 1$ then

$$\sigma \cong 2\frac{h_c}{h_T}$$

لازم بذکر است که در رابطه فوق h_c ضخامت حباب کاویتاسیون قبل از انهدام و h_T ارتفاع مقطع آزمایش قبل از مدل است. رابطه مذکور با نتایج تجربی بدست آمده از تونل کاویتاسیون سرعت بالا، هم خوانی خوبی دارد و σ در رابطه (۶)، همان عدد کاویتاسیون کمینه حدی است.

جدول ۱- داده‌ها و اعداد کاویتاسیون نمونه ۲۰ میلی متری

عدد کاویتاسیون	حالت فیزیکی حباب کاویتاسیونی	طول کاویتاسیون (mm)	U_{∞} (m/s)
۱/۲	نوسانی شدید طول حباب، صدای شدید	۵۳	۹
۰/۸۷	نوسانی	۸۶	۱۰
۰/۸۱۳	نوسانی نامنظم و تصادفی	۱۴۲	۱۰/۳
۰/۶۹	ظاهر شدن ناحیه شفاف نقره‌ای به صورت تصادفی در پشت مدل	۲۶۰	۱۱/۵۴
۰/۶۲۵	شفاف نقره‌ای بدون نوسان	۴۵۸	۱۲
۰/۵۷۸	شفاف نقره‌ای و نوسان عرضی قابل ملاحظه	۵۲۳	۱۳/۰۷
۰/۴۹	بالا و پایین شدن حباب در امتداد عمود بر جریان و صدای انهدام بسیار قوی در انتهای حباب	۶۹۵	۱۴/۴



شکل ۶- نمودار طول حباب کاویتاسیون بر حسب عدد کاویتاسیون برای استوانه به قطر ۲۰ mm

جدول ۳- داده‌ها و اعداد کاویتاسیون نمونه ۱۰ میلی متری

عدد کاویتاسیون	حالت فیزیکی حباب کاویتاسیونی	U_{∞} (m/s)
۲/۲	فرکانس نوسان فشار پشت مدل زیاد ولی دامنه نوسان کم است.	۷/۳۴
۱/۲۲	نوسان تصادفی فشار پشت و صدای انهدام قوی و گسسته	۹/۹۴
۱/۰۸	دامنه نوسان فشار پشت مدل کم است.	۱۰/۳۹
۰/۶۴۷	دامنه نوسان فشار پشت بسیار کم، اما صدای انهدام شدید.	۱۲/۵۸
۰/۵۴	صدای انهدام شدید ولی دامنه نوسان کم است.	۱۴/۶۹
۰/۵۰۷	حالت شفاف نقره‌ای بدون نوسان ظاهر شده و نوسان فشار پشت صفر شده است.	۱۵/۶۴
۰/۱۲۵	صدای انهدام مهیب	۱۸/۹۷

جدول ۲- داده‌ها و اعداد کاویتاسیون نمونه ۲۰ میلی متری با فشار اولیه ۱ اتمسفر

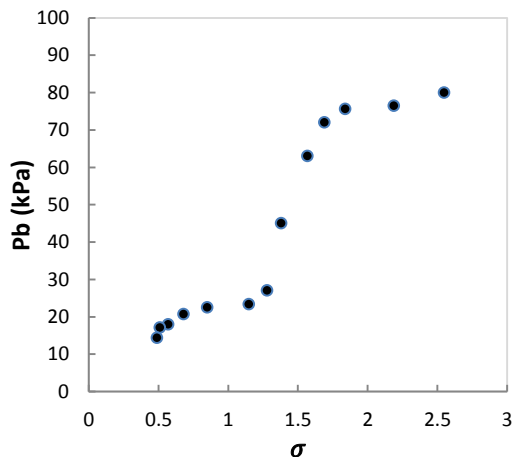
عدد کاویتاسیون	فشار پشت نمونه (X_b)	فشار خروجی نازل (X_g)	فشار ورودی نازل (X_L)
۱/۲	-۰/۸	-۰/۳	۰/۱۵
۰/۸۷	-۰/۸	-۰/۳۶	۰/۲
۰/۸۱۳	-۰/۸	-۰/۳۷	۰/۲۲
۰/۶۹	-۰/۸۴	-۰/۳۴	۰/۴
۰/۶۲۵	-۰/۸۵	-۰/۳۵	۰/۴۵
۰/۵۷۸	-۰/۸۴	-۰/۳	۰/۶۵
۰/۴۹	-۰/۸۵	-۰/۲۸	۰/۸۸

همانطور که از شکل ۶ پیداست، قبل از ظاهر شدن حالت شفاف نقره‌ای، تغییر طول حباب با عدد کاویتاسیون به آرامی صورت می‌پذیرد، ولی بعد از ظاهر شدن حالت شفاف نقره‌ای ($\sigma=0/69$)، افزایش طول شدید خواهد بود. لازم بذکر است که در شکل ۶، محور قایم طول حباب کاویتاسیون در پشت مدل ۲۰ میلی‌متری از حالت جزئی تا سوپر کاویتاسیون است.



شکل ۵- نشر گردابه‌های ابری شکل در عقب حباب به صورت منظم ($\sigma=1/2$)

در ادامه به عنوان نمونه، عدد کاویتاسیون خفگی برای قطعه به قطر ۲۰ میلی متر به دست می‌آید و با مقدار حاصل از اندازه‌گیری مقایسه می‌شود:



شکل ۷- نمودار فشار پشت استوانه بر حسب عدد کاویتاسیون برای استوانه به قطر ۲۰ mm با فشار اولیه ۲ اتمسفر

۱- روش اول (تعریف):

$$P_{\infty} = P_{atm}(1 + X_S) = (1 - 0.28) \times 90000 = 64800$$

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_c}{0.5\rho U_{\infty}^2} = \frac{64800 - 13500}{104400} = 0.49$$

۲- روش دوم (استفاده از رابطه ۶):

$$\sigma \cong 2 \frac{h_c}{h_T} \rightarrow \sigma = \frac{2 \times (1.7 \times 2.54)}{15} = 0.576$$

لازم بذکر است که خطای مابین دو روش فوق ۱۴٪ است. سایر محاسبات نیز به همین منوال پیش رفته‌اند. همچنین با توجه به قابل قبول بودن خطا (منشا این خطا بدلیل ذات گذرا و نوسانی شدید آزمایش، مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده و تقریباتی است که در بدست آوردن رابطه (۶) اعمال شده است)، به دقت آزمایش و معتبر بودن آن پی برده می‌شود.

در شکل ۸ طول حباب بر حسب زمان به صورت متناوب نوسان می‌کند. دامنه نوسان و فرکانس هر دو زیاد است که مکانیزم آن ناشی از جت بازگشتی خواهد بود.

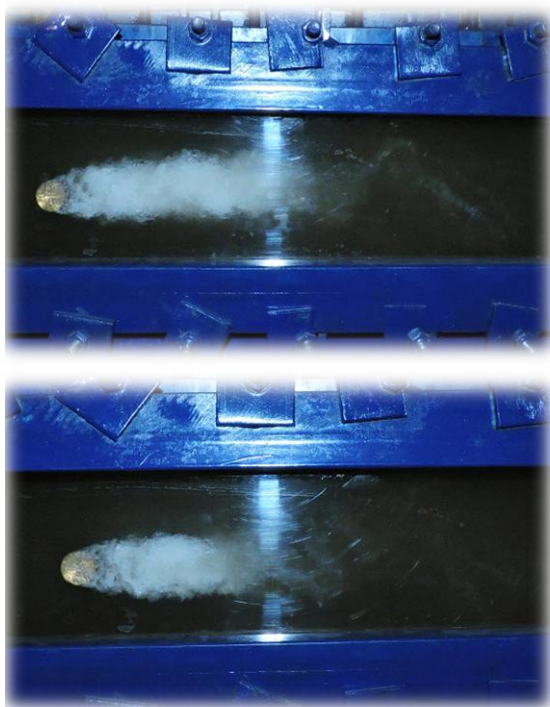
جدول ۴- داده ها و اعداد کاویتاسیون نمونه ۱۰ میلی متری

فشار ورودی نازل (X_L)	فشار خروجی نازل (X_S)	فشار پشت نمونه (X_B)	عدد کاویتاسیون
۰/۱	-۰/۲	-۰/۶	۲/۲
۰/۳۷	-۰/۱۸	-۰/۷۶	۱/۲۲
۰/۴	-۰/۲	-۰/۷۷	۱/۰۸
۰/۶	-۰/۲۸	-۰/۸۱	۰/۶۴۷
۱/۰	-۰/۲	-۰/۸۱	۰/۵۴
۱/۲	-۰/۱۶	-۰/۸۴	۰/۵۰۷
۱/۴	-۰/۶	-۰/۸۵	۰/۱۲۵

جدول ۵- اندازه گیری فشار پشت مدل از حالت بدون کاویتاسیون تا سوپر کاویتاسیون (قطر مدل ۲۰ میلی متر، فشار اولیه تونل ۲ اتمسفر است)

P_b (N/m ²)	σ
۸۶۴۰۰	۵/۸۷
۸۳۷۰۰	۴/۹۰
۸۰۰۰۰	۲/۵۵
۷۶۵۰۰	۲/۱۹
۷۵۶۰۰	۱/۸۴
۷۲۰۰۰	۱/۶۹
۶۳۰۰۰	۱/۵۷
۴۵۰۰۰	۱/۳۸
۲۷۰۰۰	۱/۲۸
۲۳۴۰۰	۱/۱۵
۲۲۵۰۰	۰/۸۵
۲۰۷۰۰	۰/۶۸
۱۸۰۰۰	۰/۵۷
۱۷۱۰۰	۰/۵۱
۱۴۴۰۰	۰/۴۹

بر اساس جدول ۵، در این آزمایش فشار اولیه تونل را دو برابر کرده، آزمایش تکرار می‌شود تا اثر فشار اولیه بر مقدار فشار حدی کمینه مشخص شود. افزایش فشار اولیه مقدار فشار حدی را تغییر نمی‌دهد. همانطور که از شکل ۷ پیداست، به محض ظاهر شدن حالت شفاف نقره ای ($\sigma=1/69$) فشار پشت مدل به شدت کاهش می‌یابد.



شکل ۹- در این حالت نوسان طول حباب نامنظم و عدد کاویتاسیون ۰/۸۱۳ است

همانطور که از شکل پیداست، تغییرات طول حدود ۵ برابر قطر مدل است. به محض ظاهر شدن حالت شفاف نقره ای در پشت مدل، رفتار نوسانی از حالت منظم به حالت نامنظم درآمده و فشار پشت مدل از حالت نوسانی خارج شده و به حالت دائمی نزدیک حالت کمینه می‌رسد که شکل ۹ نشان دهنده این موضوع است؛ همچنین با کاهش جزیی عدد کاویتاسیون، افزایش طول حباب چسبیده به مدل شدیدتر می‌شود که یکی از دلایل آن کاهش اثر جت بازگشتی مابعد از انتهای حباب به سمت بالادست خواهد بود. دلیل دیگر آن، موازی شدن جداره حباب کاویتاسیون با دیواره مقطع آزمایش تونل است (به شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مراجعه شود).

در حالت سوپرکاویتاسیون بجز در انتها، جداره‌های حباب در تمام زمان‌ها موازی با جداره مقطع آزمایش بوده، فشار پشت مدل به فشار حدی کمینه رسیده است و در این حالت هیچ گونه نوسان در عقربه فشارسنج دیده نمی‌شود؛ اما در انتهای مدل صدای فروپاشی گسسته و بسیار شدید است. با بزرگ کردن تصویر انتهای حباب، دو گردابه بزرگ مختلف الجهد مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- ظاهر شدن ناحیه شفاف نقره ای در پشت مدل با عدد کاویتاسیون ۰/۶۹



شکل ۸- در این حالت نوسان طول حباب شدید و عدد کاویتاسیون ۰/۸۷ است

۱- همانطور که داده‌های جدول ۱ تا ۴ نشان می‌دهند، با کوچک شدن قطر مدل استوانه‌ای، عدد کاویتاسیون خفگی کوچکتر می‌شود که دلیل آن کاهش ضخامت حباب سوپر کاویتاسیونی است.

۲- قبل از ظاهر شدن حالت شفاف نقره‌ای، نوسان طول حباب منظم و با فرکانس بالا صورت می‌گیرد که عامل اصلی آن جت برگشتی مایع از انتهای حباب کاویتاسیونی چسبیده به مدل است.

۳- با توجه به جداول ۱ تا ۵ می‌توان مشاهده کرد که قبل از شروع حالت شفاف نقره‌ای، حالت نوسانی شدید فشار پشت مدل وجود دارد که به محض پیدایش حالت شفاف نقره‌ای، به مقدار فشار حدی کمینه نزدیک می‌شود.

۴- حداکثر صدای ناشی از فروپاشی حباب‌ها در فاز سوپر کاویتاسیون و در قسمت انتهایی آن شنیده می‌شود. با افزایش فشار اولیه تونل این صدا از دور شنیده می‌شود. با کوچک شدن قطر مدل، صدای انهدام در فاز سوپر کاویتاسیون به لحاظ شدت کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش قطر ۲ گردابه انتهایی سوپر کاویتاسیون خواهد بود.

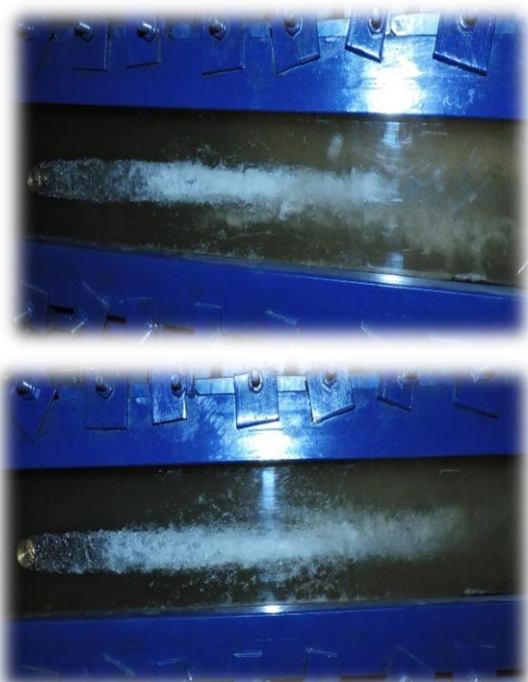
۵- به محض ایجاد سوپر کاویتاسیون ضخامت حباب در تمام طول حباب با زمان پایا خواهد شد.

۷- علایم، نشانه‌ها و ارقام

سرعت سیال، m/s	U
سرعت سیال در دوردست، m/s	U_{∞}
فشار سیال، N/m^2	P
فشار سیال در دور دست، N/m^2	P_{∞}
فشار پشت مدل، N/m^2	P_b
فشار کمینه حدی پشت استوانه، N/m^2	P_c
عدد کاویتاسیون	σ
ضخامت حباب کاویتاسیون قبل از انهدام، m	h_c
ارتفاع مقطع آزمایش قبل از مدل، m	h_T
چگالی، kg/m^3	ρ

۸- مراجع

- [1] Brennen CE (1995) Cavitation and bubble dynamics. Oxford university.



شکل ۱۱- ظاهر شدن ناحیه شفاف نقره‌ای بدون نوسان در پشت مدل با عدد کاویتاسیون ۰/۶۲۵



شکل ۱۲- پدیدار شدن حالت سوپر کاویتاسیون همراه با اندازه‌گیری ضخامت حباب

لازم بذکر است با کاهش قطر استوانه، صدای انهدام از لحاظ شدت کاهش می‌یابد، عدد کاویتاسیون خفگی کم می‌شود و طول سوپر کاویتاسیون افزایش می‌یابد؛ اما فشار نهایی پشت مدل با حفظ سایر شرایط آزمایش ثابت باقی می‌ماند.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌ها و بررسی‌های حاصله می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- [7] Keil T, Pelz PF (2017) On the transition from sheet to cloud cavitation. 3th int sym on cavitation
- [8] Ausoni P, Farhat M, Avellan F (2007) Cavitation influence on von karman vortex shedding and induced hydrofoil vibrations. J Fluids Eng Trans ASME 129: 966-973.
- [9] Castellani I (2006) Cavity length and re-entrant jet in 2D sheet cavitation. Adv in fluid Mech 52: 341-350
- [10] Gnanaskandan A, Mahesh K (2016) Numerical investigation of near-wake characteristics of cavitating flow over circular cylinder. JFM 790: 453-491.
- [2] Jafari I, Rad M (2009) influence of afterbody and boundary layer on cavitating flow. IJE 22: 185-196
- [3] Marie J, Franc A (2004) Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, London, U.K.
- [4] Wu TY, Arthur K (1971) Cavity-flow wall effects and correction roles. JFM 68: 223-256.
- [5] Greshma P, Likith K (2012) Numerical analysis of cavitating flow over a 2D symmetrical hydrofoil. IJCER 2: 1462-1469
- [6] Dular M, Khilifa S (2013) Scale effect on unsteady cloud cavitation. Exp Fluids 53: 1233-1250.