



بررسی تجربی پدیده کاویتاسیون حول جسم با دماغه مخروطی و پس جسم استوانه‌ای

حجت برازنده^۱ و ایرج جعفری گاوزن^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان

^۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

در این مقاله به صورت تجربی، ایجاد، رشد و گسترش کاویتاسیون حول یک جسم ترکیبی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. قطر پس جسم ۲۵ و طول مدل ۲۱۰ میلی‌متر بوده که دارای نوک مخروطی با زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه هستند. مدل‌ها در یک تونل کاویتاسیون مدار بسته، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. روی پس جسم و در مرحله بعد روی دماغه، شیار محیطی ایجاد کرده و آزمایش‌ها تکرار می‌گردند و بین دو حالت اخیر و حالت بدون شیار مقایسه صورت می‌گیرد. در حالت ۳۰ درجه، چه بدون شیار و چه با شیار روی پس جسم کاویتاسیون در یک فاصله کوتاهی از پس جسم شروع می‌شود، اما هنگامی که شیار روی دماغه ایجاد شود، کاویتاسیون درون شیار ایجاد می‌شود. در حالت ۴۵ درجه کاویتاسیون در هر سه حالت روی فصل مشترک اتفاق می‌افتد. کاویتاسیون درون شیار و پشت پس جسم در مرکز گردابه ناشی از جدایی آغاز می‌شود. با گسترش طول کاویتاسیون روی پس جسم، نوسانات طولی حباب به صورت منظم رخ خواهد داد. در پشت مدل، درون فضای دنباله‌ای جسم، کاویتاسیون درون گردابه‌های حلقوی شکل شروع می‌شود. پس از رشد کاویتاسیون از نظر طولی، در قسمت انتهایی آن نشر حباب‌ها به صورت منظم رخ می‌دهد که با تولید صدا همراه است. با نوسان طول، نشر حباب به صورت نامنظم هم صورت می‌گیرد.

کلمات کلیدی: بررسی تجربی؛ کاویتاسیون؛ جسم ترکیبی؛ تونل کاویتاسیون؛ شروع و توسعه کاویتاسیون.

Experimental Investigation of Cavitation Phenomena Around the Body with the Conic Nose and Cylindrical Afterbody

H. Barazandeh¹, I. Jafari Gavzan^{2,*}

¹ MS Student, Mech. Eng., semnan Univ., semnan, Iran.

² Assistant professor, Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

Abstract

In this paper, the inception, growth and development of cavitation are investigated around the combined body experimentally. The diameter of afterbody and the length of model are 25 and 210 mm respectively. The angles of conic nose are 30° and 45°. Models were tested in a high speed closed circuit cavitation tunnel. A peripheral groove is established on the afterbody and then one conic nose, experiments are repeated in these cases. A comparison was done between all cases. For 30° model with groove on afterbody and without groove, cavitation is initiated at a small distance behind the body. If the groove is established on the nose then cavitation is initiated into it. In 45° model, cavitation is initiated on the interface of the nose and afterbody. Into the groove and behind of afterbody, cavitation will be initiated at the center of vortex resulted by separation. By developing the length of cavitation on the afterbody, regular longitudinal oscillations will be occurred. Behind the model, inside the wake of body, cavitation initiates at the center of annular vortex. After developing the length of cavitation area, bubble shedding occurs at the end of cavitation region. During the fluctuating of cavitation area, bubble shedding occurs randomly. In these cases, intense noise is heard.

Keywords: Experimental Study; Cavitation; Combined Body; Cavitation Tunnel.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۰۲۷۶۳۳۱؛ فکس: ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱

آدرس پست الکترونیک: i.jafari@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

کاویتاسیون در بسیاری از سیستم‌های هیدرودینامیکی مانند، پمپ‌ها، سرریزها، هیدروفیل‌ها، پره‌های توربین کاپلان، پرتابه‌ها، بدنه شناورهای زیر سطحی و پروانه موتور کشتی‌ها اتفاق می‌افتد. تقریباً در همه موارد، تولید کاویتاسیون تاثیر منفی روی نیروی لیفت هیدروفیل‌ها، افت بهره‌وری پمپ‌ها و موجب آسیب به پره توربین‌ها و پروانه موتور شناورها می‌شود.

برای موارد ذکر شده، رخ دادن کاویتاسیون غیرقابل اجتناب است؛ بنابراین باید در طراحی سعی شود یا اثرات کاویتاسیون به حداقل برسد یا از مزایای تشکیل کاویتاسیون طبیعی بهره گرفت که بهره‌برداری در حالت سوپر کاویتاسیون و در شناورهای زیر سطحی کاربرد دارد. این امر موجب کاهش درگ و دسترسی به سرعت‌های بالاتر می‌شود. البته اجرای این امر کار آسانی نیست؛ زیرا دینامیک سوپر کاویتاسیون هنوز به طور کامل شناخته نشده است و به همین دلیل آزمایش‌های تجربی در این زمینه، مورد توجه قرار دارد و بسیار پراهمیت هستند و جهت برطرف ساختن ابهامات موجود و شناخت این پدیده، آزمایش‌های بسیاری انجام می‌پذیرد.

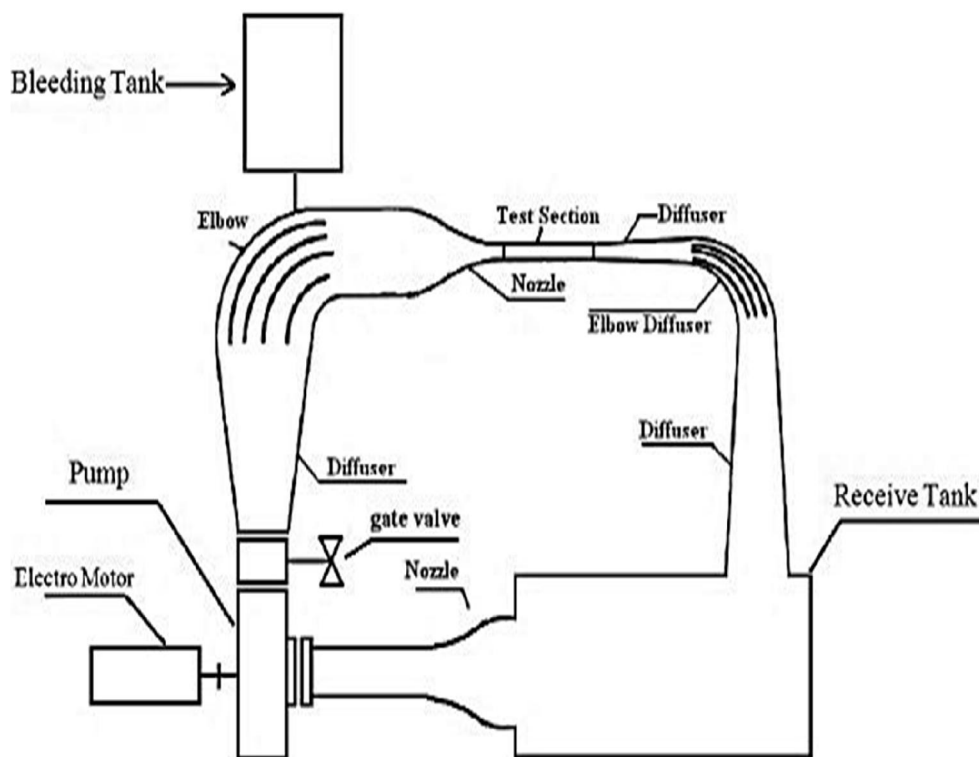
برای بررسی تجربی پدیده کاویتاسیون، مدل مورد آزمایش باید به طور کامل در سیال مغروق باشد و درک صحیحی از تمام مراحل کاویتاسیون نیز، لازم و ضروری است. جریان کاویتاسیونی معمولاً با عدد کاویتاسیون توصیف می‌شود که به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1)$$

P و V به ترتیب فشار و سرعت مرجع، P_c فشار درون حباب سوپر کاویتاسیونی چسبیده به مدل و ρ چگالی مایع می‌باشند. چنانچه یک آزمایش کاویتاسیون با ثابت نگه داشتن سرعت و تغییر در فشار مرجع انجام شود، مقادیر مختلف عدد کاویتاسیون حاصل می‌شود و باید توجه شود که سوپر کاویتاسیون، معرف تشکیل یک حفره بخار بسیار طولانی حول جسم است که در فشار بسیار پایین رخ می‌دهد. برای بررسی پدیده کاویتاسیون تاکنون تحقیقات بسیاری انجام شده است که یکی از اولین تحقیقات تجربی که در آن به بررسی جریان سوپر کاویتاسیون با تقارن محوری پرداخته

شده است، توسط ریچارد [۱] انجام شده است. ساوچنکو و همکاران [۲] و ولانسکو [۳]، یک رابطه تجربی برای شکل و ابعاد سوپر کاویتاسیون حول جسم متقارن محوری به دست آوردند. هرپس [۴] جریان سوپر کاویتاسیونی، حول پرتابه‌های زیر آب را توسط دوربین سرعت بالا تصویربرداری نمود. مارتین و همکاران [۵]، به صورت تجربی مقدار گاز تزریق شده برای ایجاد یک کاویتاسیون مصنوعی در سرعت‌های مختلف را تعیین کردند. چاو و همکاران [۶]، به بررسی رابطه بین طول سوپر کاویتاسیون و عدد کاویتاسیون پرداختند. یو و همکاران [۷]، اثر یک کاویتاتور را روی شکل حباب و کاهش نیروی پسا، مورد مطالعه قرار دادند. آهن و همکاران [۸]، دو کاویتاتور مخروطی ۴۵ و ۹۰ درجه را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. آرنند [۹] تلاش کرد تا یک دید کلی بر اساس مطالعات انجام شده تا سال ۱۹۸۰، مروری در مورد آثار فیزیکی پدیده کاویتاسیون و بررسی عواملی مانند، زبری سطح، لزجت، هسته‌های کاویتاسیون ارائه دهد. فرانک و میش [۱۰] به شرح مفاهیم فیزیکی و تئوری نظری کاویتاسیون در کتاب خود پرداختند، این کتاب شامل، بررسی دینامیک حباب و انواع مختلف کاویتاسیون است و برای درک ماهیت کلی کاویتاسیون مفید است. لینگ و همکاران [۱۱]، شکل‌گیری گردابه‌های کاویتاسیون در ابعاد میکرو روی یک جسم متقارن بدون دماغه را بررسی کردند.

ظاهر حفره‌های نازک ایجاد شده، مانند تارهای مو به نظر می‌رسد. سیسی سیو و برن [۱۲] رشد، گسترش، فروپاشی و حرکت حباب‌های کاویتاسیون را در جریان حول دو جسم با دماغه متقارن، مورد بررسی قرار دادند و به مطالعه ارتباط بین دینامیک حباب و فشار موثر بر آن پرداختند. آراکری و آکوستا [۱۳] مطالعات مشابهی بر شروع و توسعه کاویتاسیون روی دو جسم متقارن محوری انجام داده و دریافتند که شروع کاویتاسیون، ارتباط نزدیکی با میزان ضریب فشار در محل جدایی جریان دارد؛ همچنین هو و همکاران [۱۴]، به مطالعه شروع کاویتاسیون حول یک جسم متقارن محوری بدون دماغه پرداختند و اثر متقابل بین نوسانات توربولانسی و شروع کاویتاسیون را تحلیل نمودند. شمس‌الدینی و قدسی [۱۵]، به صورت عددی نشان دادند که با تزریق هوا در اطراف یک زیرسطحی، نیروی مقاوم وارد بر آن کاهش یافته



شکل ۱- شماتیک تونل آب مورد استفاده در دانشگاه سمنان

به ترتیب ۱۰، ۹۰ و ۱۵ سانتی‌متر است و حداکثر سرعت در آن به ۲۵ متر بر ثانیه می‌رسد، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

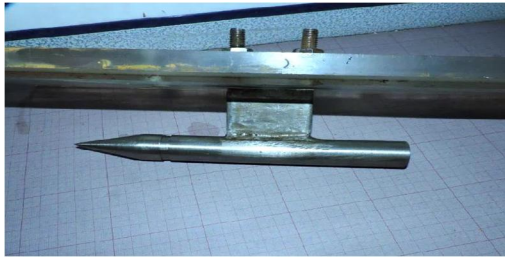
تونل کاویتاسیون مورد استفاده دارای شیرکنترل تنظیم دبی است که درست بعد از پمپ گریز از مرکز نصب شده است.

مدل‌های بررسی شده به صورت ترکیبی شامل یک دماغه و پس جسم استوانه با قطر ۲۵mm و طول کلی ۲۱۰mm می‌باشند (جدول ۱). این مدل‌ها از جنس فولاد ضد زنگ بوده که با اتصال به یک صفحه نازک به ضخامت ۲mm در مرکز مقطع تست قرار گرفته‌اند و از سوی دیگر، این صفحه نازک به یکی از صفحات شفاف عمودی مقطع تست متصل می‌شود. شیارهای ایجاد شده در مدل‌ها دارای طول ۵ و عمق ۲ میلی‌متر می‌باشند. برای ثبت داده‌ها و اندازه‌گیری فشار داخل شیار و پشت جسم، از فشارسنج‌هایی با قابلیت اندازه‌گیری فشار زیر جو استفاده می‌شود. علاوه بر آن در ورود و

است. جعفری و جدیدی [۱۶]، طی یک کار تجربی رفتار حدی پدیده کاویتاسیون را حول استوانه مدور، مورد بررسی قرار دادند. فروزانی و همکاران [۱۷] در یک مطالعه تجربی و عددی نحوه شکل‌گیری حباب سوپرکاویتاسیونی و اثر آن بر کاهش نیروی پسا را بررسی کردند. در مقاله حاضر، اثر زاویه نوک بر محل شروع اولیه کاویتاسیون بررسی شده است. همچنین تاثیر شروع کاویتاسیون در فصل مشترک بر عدد شروع کاویتاسیون دنباله جسم ترکیبی بیان شده است. رفتار گسترش و فروپاشی کاویتاسیون فصل مشترک با کاهش عدد کاویتاسیون بررسی شده است.

۲- شرح آزمایش‌ها و مدل‌ها

در این کار تحقیقاتی مدل‌هایی از جسم ترکیبی متقارن محوری با دماغه مخروطی و پس جسم استوانه به قطر ۲۵mm و طول ۲۱۰mm در تونل کاویتاسیون سرعت بالای مداربسته که مقطع تست آن دارای طول، عرض و ارتفاع



شکل ۳- نحوه اتصال مدل‌ها به صفحه شفاف جانبی

جدول ۱- ابعاد و پارامترهای هندسی مدل‌ها

مدل	طول کلی	طول دماغه	قطر پس جسم
۳۰ درجه	210mm	21.65mm	25mm
۴۵ درجه	210mm	30.17mm	25mm

۳- آزمایش‌ها

آزمایش‌ها روی دو جسم متقارن محوری با دماغه مخروطی که مشخصات آن‌ها در بخش قبل ذکر گردید، انجام پذیرفته است. فشار در ابتدا و انتهای نازل، انتهای پس جسم و درون ناحیه شیار، اندازه‌گیری شده است.

خروج نازل از فشار سنج‌های با قابلیت اندازه‌گیری فشارهای بالای جو و زیر جو استفاده شده است. برای عکس برداری از حالت‌های مختلف کاویتاسیونی، از یک دوربین با سرعت شاتر 1/4000 ثانیه و بزرگنمایی ۴۲ استفاده شده است. تمام آزمایشات در آزمایشگاه کاویتاسیون سرعت بالای دانشگاه سمنان انجام شده است و برای پر کردن تونل از آب چاه استفاده شده و برای مدل‌های هم‌شکل و هم‌اندازه به علت وجود ناخالصی‌های زیاد در آب دانشگاه سمنان، شروع کاویتاسیون در اعداد متفاوت دیگری رخ می‌دهد.



شکل ۲- مدل‌های مورد آزمایش



(ب) $V=13(m/s)$



(الف) $V=12(m/s)$



(ت) $V=15(m/s)$



(پ) $V=14(m/s)$

شکل ۴- تشکیل و گسترش کاویتاسیون ایجاد شده بر روی جسم با دماغه ۳۰ درجه در سرعت ۱۲ تا ۱۵ متر بر ثانیه

ایجاد شیار بر تغییرات عدد کاویتاسیون را در سرعت‌های مختلف مشاهده کرد.

۴- تحلیل

هر دو نوع کاویتاسیون ایجاد شده از نوع کاویتاسیون گردابی خواهند بود که از جدایی جریان حاصل می‌شود. گردابه جدایی بصورت حلقوی بوده و نشر حباب بصورت حلقوی اتفاق افتاده است که سرعت نشر آن کم است و به علت حلقوی و بسته بودن، حالت کاویتاسیون ابری اتفاق نمی‌افتد. فشار حداقل در یک گردابه در مرکز آن رخ داده و برابر است:

$$C_{pm} = -2 \left(\frac{\Gamma}{2\pi aU} \right)^2 \quad (2)$$

که Γ سیرکولاسیون حول گردابه و a شعاع هسته است. عدد رینولدز دو مدل بر اساس قطر استوانه در سرعت‌های یکسان، برابر است؛ اما وضعیت کاویتاسیونی آن‌ها یکسان نخواهد بود؛ چون اندازه زاویه دماغه نقش کلیدی دارد. محدوده عدد رینولدز بر اساس قطر استوانه ۲۲۵۰۰۰ الی ۴۰۰۰۰۰ است. بررسی تحلیلی نشان می‌دهد که در حالت کاویتاسیون جزئی پس از فصل مشترک، نیروی پسا افزایش می‌یابد.

مرتبه شعاع هسته برابر با مرتبه ضخامت لایه مرزی قبل از جدایی خواهد بود.

برآورد مقدار Γ خود نیازمند نگارش یک مقاله دیگری خواهد بود. برای مدل با زاویه دماغه ۴۵ درجه، ضخامت لایه مرزی در انتهای دماغه کمتر از حالت ۳۰ درجه خواهد بود، زیرا مقدار گرادیان فشار منفی $\frac{\partial p}{\partial s}$ آن بیشتر از ۳۰ درجه خواهد بود که s از نوک دماغه در راستای یال اندازه‌گیری می‌شود. اثرات پخش لایه‌ای و تلاطمی ورتیسیتی باعث ضخیم شدن هسته شده و C_{pm} را تقلیل می‌دهند.

در دنباله مدل، درحالتی که زاویه دماغه ۴۵ درجه است، کاویتاسیون بعد از فصل مشترک اتفاق افتاده و باعث متلاطم کردن لایه‌ی مرزی روی پس جسم می‌شود. در این حالت ضخامت لایه مرزی در انتهای پس جسم بیشتر از ضخامت لایه مرزی روی پس جسم با دماغه ۳۰ درجه خواهد بود؛ بنابراین عدد شروع کاویتاسیون، کوچک‌تر از مدل ۳۰ درجه خواهد بود؛ یعنی کاویتاسیون در پشت مدل ۴۵ درجه دیرتر اتفاق می‌افتد. شروع کاویتاسیون در فصل مشترک، درست در

در شکل ۴ دو ناحیه کاویتاسیونی برقرار شده است: ناحیه اول در فصل مشترک دماغه و پس جسم و دومی پس از پس جسم رخ داده است. زاویه دماغه ۳۰ درجه بوده و مدل فاقد شیار محیطی در دماغه و در پس جسم است. تصاویر ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهند که تاثیر تغییرات سرعت در محدوده ۱۲ تا ۱۵ متر بر ثابته روی طول ناحیه حباب قابل ملاحظه است. حباب ناحیه دنباله و فصل مشترک به صورت حلقوی بوده که طول حباب دنباله قابل ملاحظه است.

در شکل ۵، ناحیه حباب تشکیل شده در حالت نهایی (سرعت ۱۵ متر بر ثانیه) روی دو جسم با زوایای مخروط ۳۰ و ۴۵ درجه نشان داده شده است. اثر زاویه نوک مخروط روی شدت و ابعاد ناحیه حباب در فصل مشترک قابل ملاحظه است. همانطور که در شکل ۵ مشخص است، زاویه نوک مخروط روی تشکیل ناحیه حباب و نوع کاویتاسیون ایجاد شده موثر است. در قسمت فصل مشترک دماغه ۴۵° نشر حباب‌های کاویتاسیونی به صورت گردابه‌های حلقوی اتفاق افتاده است که در حال تقطیر شدن هستند.

شکل‌های ۶-۱ و ۶-۲ اثر ایجاد شیار روی پس جسم و فصل مشترک بر حالت کاویتاسیون ایجاد شده به ازای سرعت‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ متر بر ثانیه را به ترتیب برای مدل‌های ۳۰ و ۴۵ درجه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ایجاد شیار در پس جسم تاثیر چندانی روی ابعاد حباب ندارد؛ اما از جدایش سریع ناحیه حباب از سطح جسم جلوگیری می‌کند؛ همچنین نشر حباب در پایین دست ناحیه کاویتاسیونی مشهود نیست.

نمودار سرعت جریان بالادست مدل بر حسب عدد کاویتاسیون برای مدل‌های ۳۰ درجه و ۴۵ درجه به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ رسم شده است.

در شکل ۱۰ اعداد کاویتاسیون بر حسب سرعت برای مدل ۳۰ درجه و در سه حالت: ساده، شیار روی پس جسم و شیار روی دماغه و پس جسم نشان داده شده است. در شکل ۱۱ نیز اعداد کاویتاسیون بر حسب سرعت برای مدل ۴۵ درجه و در سه حالت ساده، شیار روی پس جسم و شیار روی دماغه و پس جسم نشان داده شده است که می‌توان تاثیر



(ب) ۴۵ درجه - $V=15\text{m/s}$



(الف) ۳۰ درجه - $V=15\text{m/s}$

شکل ۵- کاویتاسیون بر روی مدل‌های ۳۰ و ۴۵ درجه بدون شیار در سرعت‌های یکسان



مدل با دماغه ۴۵ درجه بدون شیار



مدل با دماغه ۳۰ درجه بدون شیار

(الف)



پس جسم شیار دار و دماغه ۴۵ درجه



پس جسم شیار دار و دماغه ۳۰ درجه

(ب)



دماغه شیار دار ۴۵ درجه و پس جسم شیار دار

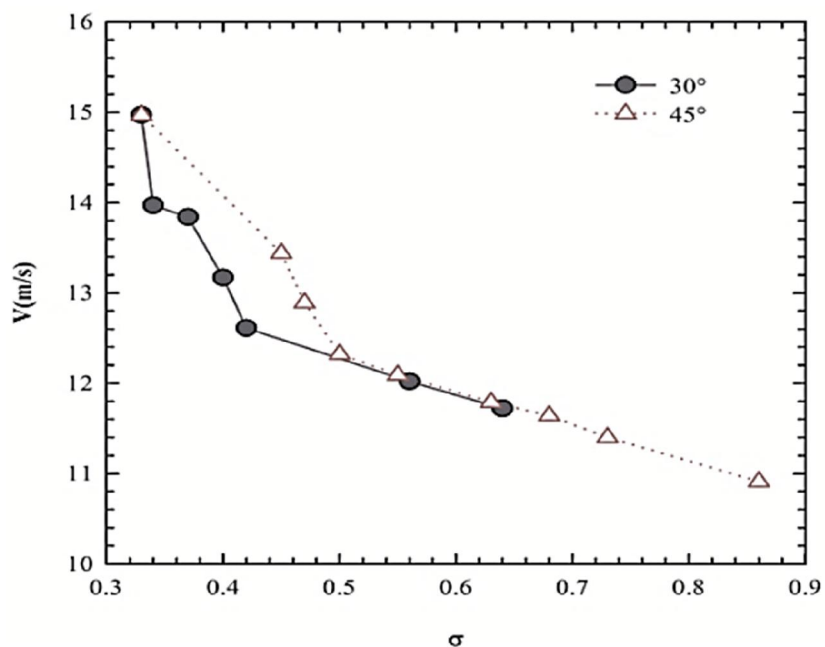


دماغه شیار دار ۳۰ درجه و پس جسم شیار دار

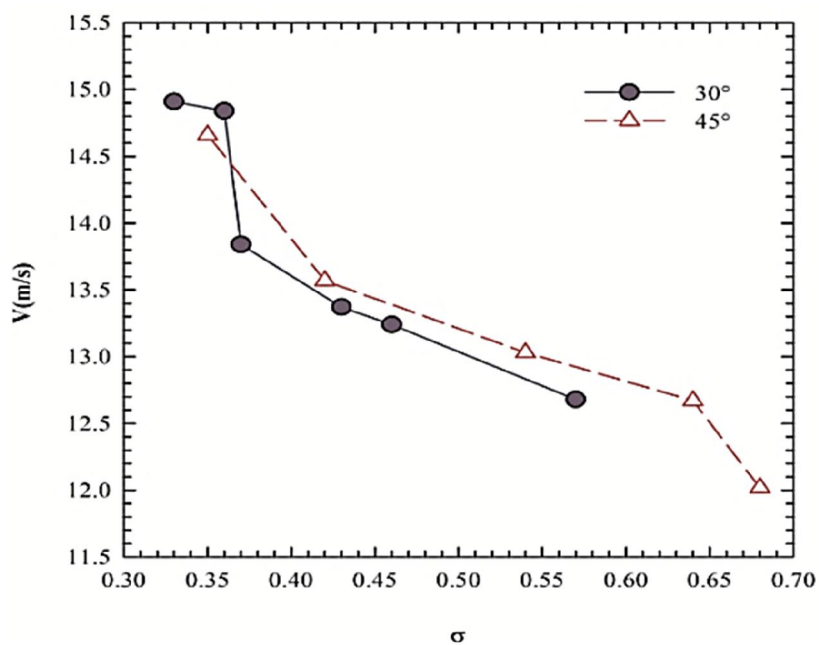
(ب)

شکل ۶- کاویتاسیون توسعه یافته بر روی مدل‌های با دماغه (۱) ۳۰ درجه و (۲) ۴۵ درجه در سه حالت (الف) بدون شیار،

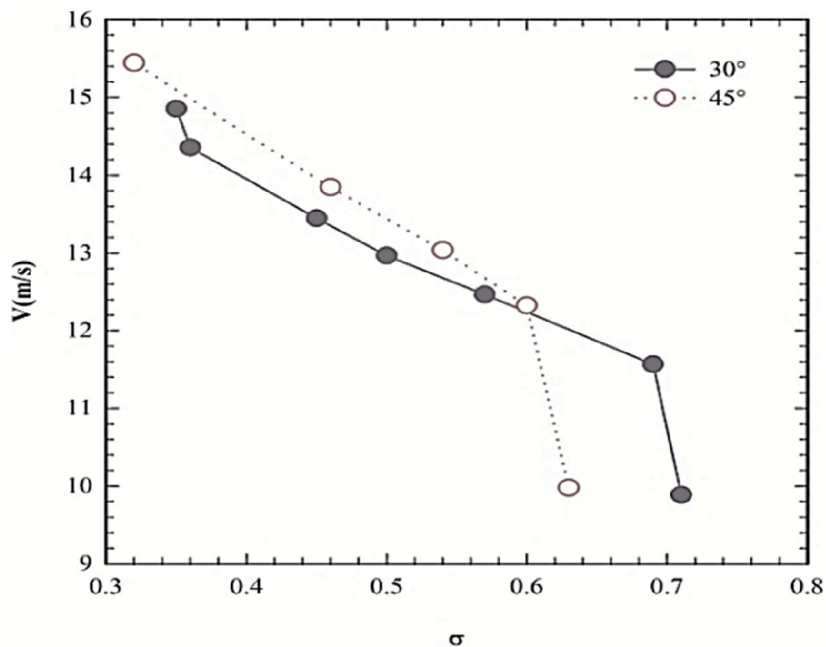
(ب) شیار روی پس جسم و (پ) شیار روی دماغه و پس جسم



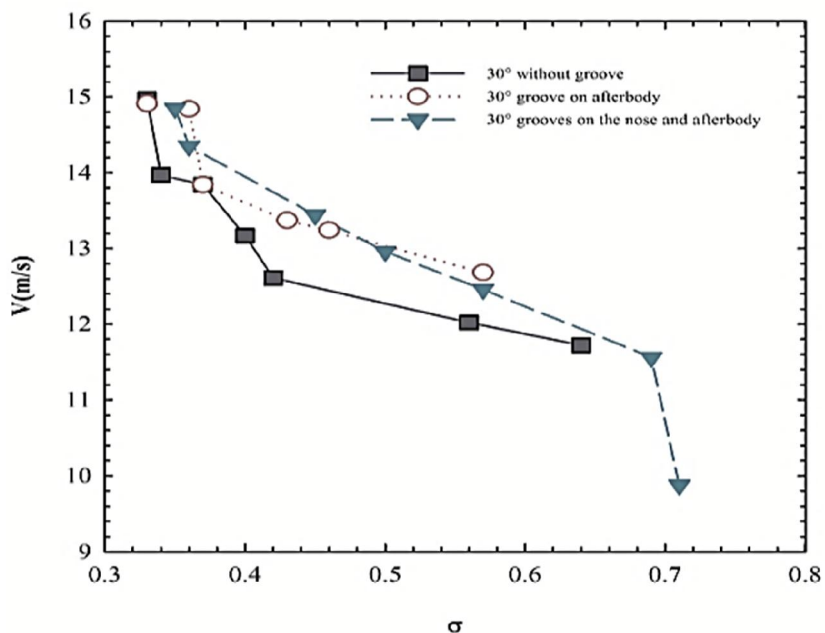
شکل ۷- نمودار سرعت جریان بالادست برحسب عدد کاویتاسیون روی مدل‌های ۳۰ و ۴۵ درجه بدون شیپار



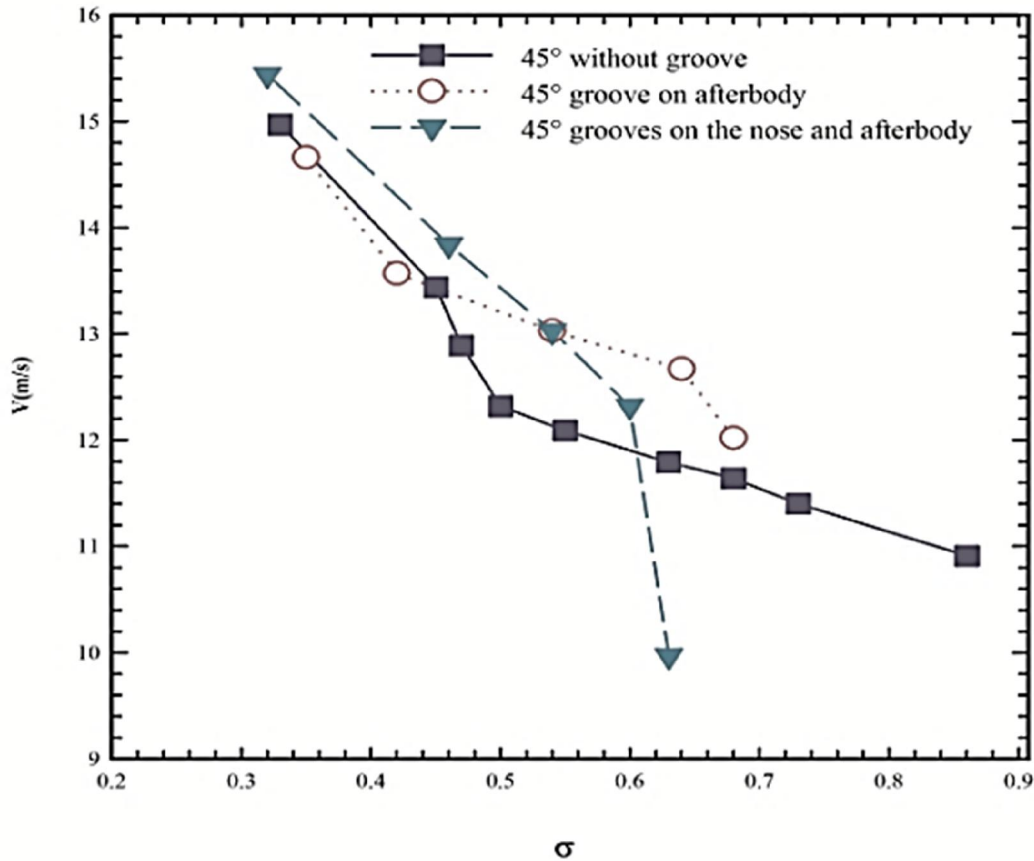
شکل ۸- نمودار سرعت جریان بالادست برحسب عدد کاویتاسیون برای مدل‌های با دماغه ۳۰ و ۴۵ درجه با شیپار روی پس جسم



شکل ۹- نمودار سرعت بر حسب عدد کاویتاسیون برای مدل‌های با دماغه ۳۰ و ۴۵ درجه با شیار روی دماغه و پس جسم



شکل ۱۰- نمودار سرعت جریان بالادست بر حسب عدد کاویتاسیون برای مدل با دماغه ۳۰ درجه در سه حالت: بدون شیار، شیار روی پس جسم و شیار روی دماغه و پس جسم



شکل ۱۱- نمودار سرعت جریان بالا دست برحسب عدد کاویتاسیون برای مدل با دماغه ۴۵ درجه در سه حالت: بدون شیار، شیار روی پس جسم و شیار روی دماغه و پس جسم

حلقوی خواهد بود که حداقل فشار، در میدان جریان قبل از دنباله مدل، در مرکز گردابه حلقوی رخ می‌دهد که تقریباً از نظر مرتبه، معادل مرتبه نصف اندازه فشار روی خط مشترک است. بر اساس مدل یک گردابه واقعی، فشار حداقل در مرکز گردابه حلقوی برای مدل ۴۵° کمتر از ۳۰° است؛ یعنی کاویتاسیون مدل اولی پس از فصل مشترک در عدد کاویتاسیون بزرگتر رخ می‌دهد.

با کاهش بیشتر عدد کاویتاسیون، توسعه فقط در جهت پایین دست صورت می‌گیرد. جت بازگشتی مایع، سبب جدا کردن منظم گردابه حلقوی کاویتاسیونی می‌شود که به آهستگی در جهن پایین دست حمل می‌شود. در طی فرآیند انتقال به سمت پایین دست تقطیر هم صورت می‌گیرد. هر گردابه حلقوی بسته، دارای سیرکولاسون $\Gamma(s)$ است که s

خط مشترک رخ نمی‌دهد، زیرا بنا به معادله $\frac{\partial p}{\partial r} = \rho u^2/r$ برای جریان پتانسیلی، فشار حداقل روی خط مشترک رخ می‌دهد؛ اما در حالت حقیقی گرادیان فشار معکوس پس از فصل مشترک، به اندازه کافی بالا است؛ یعنی درست پس از فصل مشترک، شیب فشار برای جدایی مهیاست که به زاویه دماغه هم وابسته است؛ اما از طرفی با افزایش زاویه دماغه، شعاع انحنای r در فصل مشترک کوچکتر می‌شود که سبب بزرگتر شدن گرادیان فشار در راستای r می‌گردد که r شعاع انحنای خط جریان برای حالت جریان پتانسیلی است.

با بیشتر شدن زاویه دماغه، گرادیان فشار معکوس پس از فصل مشترک، بزرگ تر خواهد شد. جدایی پس از فصل مشترک برای مدل‌های مورد آزمایش، به صورت یک گردابه

قرار گرفته است؛ همچنین فرایند شروع مکانیکی کاویتاسیون تحت زوایای مختلف دماغه، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تجربی کاویتاسیون ایجاد شده حول دو جسم متقارن محوری مرکب (دماغه و پس جسم) در زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه و در حالت‌های بدون شیار، شیار روی پس جسم و شیار روی دماغه و پس جسم پرداخته و نتایج به صورت زیر به دست آمده است.

- مقایسه بین دو جسم در حالت بدون شیار نشان می‌دهد که با افزایش زاویه نوک مخروط کاویتاسیون اولیه در سرعت پایین‌تر رخ می‌دهد. برای مدل با دماغه ۳۰ درجه کاویتاسیون در ابتدا درست پشت جسم و سپس بعد از فصل مشترک رخ می‌دهد. برای مدل با دماغه ۴۵ درجه کاویتاسیون ابتدا بعد از فصل مشترک و سپس در پس جسم تشکیل می‌شود.
- ایجاد شیار روی پس جسم موجب تاخیر در جدایی کاویتاسیون تشکیل شده در فصل مشترک می‌گردد.
- ایجاد شیار روی دماغه مدل با زاویه ۳۰ درجه موجب می‌شود که کاویتاسیون در لبه دوم شیار زودتر از فصل مشترک تشکیل گردد.
- ایجاد شیار روی پس جسم مدل‌ها موجب می‌شود که کاویتاسیون ابتدایی در سرعت بالاتر مشاهده گردد، اما در حالتی که شیار روی دماغه و پس جسم وجود دارد، کاویتاسیون ابتدایی در سرعت پایین‌تر رخ خواهد داد.
- در تمام حالت‌های آزمایش با افزایش عدد کاویتاسیون طول و قطر ناحیه حباب کاهش و با افزایش سرعت طول و قطر ناحیه حباب افزایش می‌یابد.
- براساس شکل (۶) حباب کاویتاسیون بعد از فصل مشترک بصورت حلقوی در پایین دست منتشر شده و در طی حرکت تقطیر می‌شود.

فاصله گردابه حلقوی تا فصل مشترک خواهد بود. آزمایش در هر دو شکل نشان می‌دهد که فشار در طول پس جسم نه تنها ثابت نیست بلکه در طول آن در جهت پایین دست افزایش می‌یابد.

برای مدل ۳۰ درجه، کاویتاسیون در دنباله شدیدتر و بزرگتر از مدل ۴۵ درجه خواهد بود؛ اما برای مدل ۴۵ درجه کاویتاسیون بعد از فصل مشترک، شدیدتر از کاویتاسیون دنباله خواهد بود.

براساس شکل ۷ اختلاف سرعت، کوچکتر از عدد کاویتاسیون ۰/۵ مشهود می‌شود. بنابر شکل ۸ با ایجاد شیار روی پس جسم، جدایی پس از فصل مشترک از بین رفته، ولی کاویتاسیون درون شیار ایجاد می‌شود. در مدل‌ها به خصوص مدل ۴۵ درجه پس از ناحیه کاویتاسیونی فصل مشترک، گردابه‌های حلقوی در حال تقطیر ایجاد شده‌اند.

ایجاد کاویتاسیون در دنباله مدل تأثیر ناچیزی بر کاویتاسیون فصل مشترک خواهد داشت؛ اما ایجاد کاویتاسیون در فصل مشترک، تأثیر اساسی بر کاویتاسیون دنباله خواهد داشت. پایین دست ناحیه کاویتاسیون بعد از فصل مشترک بعلاوه فروپاشی حباب‌ها، دارای شدت توربولانس بالاست؛ بنابراین لایه مرزی بعد از آن متلاطم است؛ یعنی شروع کاویتاسیون در این حالت در دنباله دیرتر اتفاق می‌افتد. با ایجاد شیار روی دماغه محل تشکیل جلوتر آمده و از تنش اصطکاکی دماغه کاسته می‌شود.

به علت جت بازگشتی مایع پس از کاویتاسیون روی فصل مشترک، تنش اصطکاکی مطلوب ایجاد می‌شود. برآورد مقدار تنش نیازمند مشخص بودن پروفیل سرعت جت بازگشتی در قسمت زیرین حباب در حال کنده شدن است. هیچ کدام از مراجع به بررسی اثر زاویه دماغه بر محل شروع کاویتاسیون در فصل مشترک و دنباله مدل نپرداختند. آنها غالباً برای ایجاد سوپرکاویتاسیون از کاویتاتور استفاده می‌کنند تا نیروی پسا را تا حد ممکن کاهش دهند؛ همچنین در تحقیق حاضر با ایجاد کاویتاسیون توسعه یافته بعد از فصل مشترک، نشر حباب‌های در حال تقطیر حلقوی مشاهده می‌شود. اثر کاویتاسیون بعد از فصل مشترک بر عدد شروع کاویتاسیون در دنباله مدل مورد بررسی با چندین بار تکرار

- [8] Ahn BK, Lee CS, Kim HT (2010) Experimental and numerical studies on super-cavitating flow of axisymmetric cavitators. *Int J Nav Arch Ocean* 2(1): 39-44
- [9] Arndt RE (1981) Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Annu Rev Fluid Mech* 13(1): 273-326.
- [10] Franc JP, Michel JM (2006) *Fundamentals of cavitation*. Springer Science & Business Media.
- [11] Ling SC, Gowing S, Shen YT (1982) The Role of microbubbles on cavitation inception on head forms. David Taylor Research Center Report.
- [12] Ceccio SL, Brennen CE (1991) Observations of the dynamics and acoustics of travelling bubble cavitation. *J Fluid Mech* 233: 633-660.
- [13] Arakeri V, Acosta A (1973) Viscous effects in the inception of cavitation on axisymmetric bodies. *J Fluid Eng-T ASME* 95: 519-527.
- [14] Hu CL, Wang GY, Huang B, Yu Z (2015) The inception cavitating flows over an axisymmetric body with a blunt head-form. *J Hydrodyn* 27(3): 359-366.

- [۱۵] شمس‌الدینی ر، قدسی ر (۱۳۹۷) تحلیل عددی دو بعدی و سه‌بعدی پدیده سوپرکاویتاسیون در حالت تزریق و بدون تزریق بخار و هوا بر روی سطح متحرک زیرسطحی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۲۴۰-۲۲۹: ۸(۱)
- [۱۶] جعفری گاوزن ا، جدیدی ام (۱۳۹۷) بررسی تجربی رفتار حدی پدیده کاویتاسیون حول استوانه با اندازه‌های مختلف در تونل کاویتاسیون سرعت بالا. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۱۵۶-۱۴۷: ۸(۱)
- [۱۷] فروزانی ح، سرانجام ب، کمالی ر، ربیعی ع (۱۳۹۶) شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی حرکت یک جسم پرسرعت زیر سطحی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۲۳۰-۲۱۷: ۷(۱)

- در قسمت انتهایی حباب تشکیل شده روی فصل مشترک، حباب حالت ابری شکل به وجود نمی‌آید، اما جت بازگشتی وجود دارد.
- در پشت پس جسم، کاویتاسیون در یک فاصله محدود از جسم ایجاد می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Reichardt H (1954) The physical laws governing the cavitation bubbles produced behind solids of revolution in a fluid flow. The Kaiser Wilhelm Institute for Hydrodynamic Research, Gottingen, Rep. UM, Vol. 6628.
- [2] Savchenko YN, Vlasenko YD, Semenenko V (1999) Experimental studies of high-speed cavitated flows. *Int J Fluid Mech Res* 26(3).
- [3] Vlasenko YD (2003) Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds. In *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan 1-8.
- [4] Hrubec J (2001) High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles. *Exp Fluids* 30(1): 57-64.
- [5] Wosnik M, Schauer TJ, Arndt RE (2003) Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle. in *Proceeding of 5Th International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan 1-4.
- [6] Chao H, Yang H, Zhao C, Huang WH (2006) Unsteady supercavitating flow past cones. Project Supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No: 10572045) and Distinguished Young Scholar Science Foundation of Heilongjiang Province of China (Grant No: JC-9), *J Hydrodyn* 18(3): 262-272.
- [7] Zhang XW, Wei YJ, Zhang JZ, Cong W, Yu KP (2007) Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation. *J Hydrodyn* 19(5): 564-571.