



مطالعه تجربی و عددی پارامترهای سوپر کاویتاسیون مصنوعی حول کاواکزا ۳۰ درجه

سید مرتضی جوادپور^۱، سعید فراهت^{۲*}، حسین عجم^۳، محمود سالاری^۴، علیرضا حسین نژاد دوین^۵^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد^۴ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)^۵ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۸/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹

چکیده

ایجاد ابرکاواک روی رونده‌های زیرسطحی در کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت بسیار موثر است. در این تحقیق، ابتدا پدیده ابرکاواک مصنوعی روی کاواکزا مخروطی با زاویه نوک مخروط ۳۰ درجه در یک تونل آب شبه مدار باز، مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک تونل آب شبه مدار باز با قابلیت محدوده سرعت ۲۴ تا ۳۷ متر بر ثانیه انجام شده است. در مرحله بعد، جریان ابرکاواک حول کاواکزا و منطبق بر شرایط ورودی و تزریق، به صورت سه بعدی مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. مقایسه نتایج، نشان‌دهنده سازگاری خوب بین نتایج عددی و تجربی بوده است. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مهم جریان‌های کاویتاسیونی همچون عدد کاویتاسیون، سرعت جریان روی ابعاد ناحیه حباب، ضریب پسا و روابط بین آن‌ها، مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است. کاهش عدد کاویتاسیون، افزایش طول و قطر ناحیه کاویتی را به دنبال دارد. با کاهش سرعت جریان، شیب تغییرات مقدار طول ناحیه کاویتی کاهش می‌یابد و تقریباً صفر می‌شود. قطر ناحیه کاویتی، هم تغییراتی مشابه با طول ناحیه کاویتی دارد.

کلمات کلیدی: تونل آب؛ ابرکاواک مصنوعی؛ کاواکزا؛ جریان چندفازی؛ دینامیک سیالات عددی.

Experimental and Numerical Investigation of Parameters of Ventilated Super-Cavitation around 30-Degree Conical Cavitator

S. M. Javadpour¹, S. Farahat^{2,*}, H. Ajam³, M. Salari⁴, and A. Hossein Nezhad⁵¹ PhD Student, Mechanical Engineering Department, University of Sistan & Baluchestan, Zahedan, Iran.² Professor, Mechanical Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran³ Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran⁴ Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran⁵ Associate Professor, Mechanical Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abstract

In this work, the ventilated super-cavitating flow around a cavitator is studied experimentally. A 30-degree cone cavitator was tested in an open-water tunnel. The fluid flow velocity in the test section was between 24 and 37 m/s, and the injection rate was constant. Then the ventilated super-cavitating flow was simulated based on the inlet and injection conditions. Finally, the numerical results were compared with the existing experimental data. Also the 3D multi-phase fluid flow over the cavitators within the test section are modeled and analyzed numerically by solving the corresponding governing equations using the finite volume method and mixture model. Good agreement was observed in the two-way comparison. Finally, effects of the significant parameters, i.e. cavitation number and inlet velocity on the drag coefficient were studied. The results obtained indicate that the maximum cavity diameter and its length increase as the cavitation number decreases. Also with decrease in the velocity flow, the rate of cavity length changes is reduced. The cavity length variation is similar to the results for the cavity diameter.

Keywords: Water Tunnel; Ventilation Super-Cavitation; Cavitator; Multi-Phase Flow; Computational Fluid Dynamic.

۱- مقدمه

در برخی از جریان‌های هیدرودینامیکی، کلویتاسیون با تشکیل حباب‌های کوچک در جریان‌های داخلی و یا خارجی توسعه و رشد می‌کند. چنانچه سرعت جریان عبوری از روی بدنه‌های مغروق افزایش یابد، در هر موقعیتی از جریان که فشار سیال از فشار اشباع مایع در دمای مورد نظر کمتر شود، کلویتاسیون رخ می‌دهد. حباب (حفره) ایجاد شده را کلویتی می‌نامند. حالتی از پدیده کلویتاسیون که منجر به ایجاد یک حباب نسبتاً بزرگ با یک مرز پایدار و متمایز بین داخل حباب و جریان آب شود، به آن ابرکاوک گویند. ایجاد ابرکاوک در کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت ادوات زیرسطحی بسیار موثر است. جهت ایجاد حباب ابرکاوک از کاواک‌زا استفاده می‌شود. امروزه این موضوع، مبنای طراحی پیشرونده‌های زیر سطحی سرعت زیاد قرار گرفته است. اندازه قطر و طول حباب ایجاد شده به فرم و منحنی کاواک‌زا و سرعت حرکت بدنه بستگی دارد. یکی از عوامل ایجاد حباب ابرکاوک، کاواک‌زا است که به واسطه تغییر هندسه آن نرخ ایجاد کلویتاسیون و طول حباب ابرکاوک تغییر می‌کند. تمایل به کلویت شدن با عدد بی‌بعد کلویتاسیون مشخص می‌شود که به صورت رابطه (۱) معرفی می‌شود.

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

که در آن p و U به ترتیب فشار و سرعت مرجع، P_c فشار داخل حفره در حالت مصنوعی و ρ چگالی مایع هستند. با کاهش عدد کلویتاسیون، گرایش به کلویت شدن در مایع افزایش می‌یابد. عمومی‌ترین روش برای ایجاد پدیده ابرکاوک، افزایش سرعت جریان است، اما به دلیل عدم صرفه اقتصادی و یا محدودیت رونده‌های زیر سطحی این امر ممکن است، امکان پذیر نباشد. بدین سبب محققان روش افزایش فشار داخل حفره (با تزریق گاز یا همان ابرکاوک مصنوعی) را جهت ایجاد یک سوپرحفره، پیشنهاد نمودند.

اولین تحقیقات تجربی در زمینه ابرکاوک به وسیله ریچارد [۱] انجام گرفت. ایشان به صورت تجربی جریان ابرکاوک با تقارن محوری را مورد مطالعه قرار داد.

برخی محققان ابرکاوک مصنوعی را به صورت تجربی (تاو) [۲] و عددی (زو و همکاران) [۳]، مورد تحلیل قرار دادند. همچنین بین و همکاران [۴]، به بررسی پدیده

کلویتاسیون و ابرکاوک مصنوعی حول رونده‌های زیر سطحی پرداخت. تاو و همکاران [۲]، در یک تونل آب سرعت بالا، اثر حرکت عرضی نمونه را روی پدیده ابرکاوک مصنوعی، مورد مطالعه قرار دادند و پایداری ناحیه کلویتی و پارامترهای جریان از جمله ضریب فشار را در فرکانس‌های مختلف بررسی کرده‌اند. زو و همکاران [۳]، پدیده ابرکاوک مصنوعی را به صورت گذرا مورد بررسی عددی قرار دادند. آن‌ها تاثیر تغییرات نرخ تزریق را روی پارامترهای کلویتاسیون و جریان (عدد کلویتاسیون، ضریب پسا و ...)، مورد مطالعه قرار دادند. سالاری و دشتی [۵]، پدیده کلویتاسیون طبیعی و مصنوعی تحت یک جریان گذرا در یک تونل آب سرعت بالا را مورد مطالعه قرار دادند و سپس ضرایب پسا را مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تزریق هوا کاهش به‌سزایی در نیروی پسا دارد. ایکسیو و همکاران [۶]، تاثیر جاذبه را روی پارامترهای شکلی ابرکاوک طبیعی و مصنوعی را به صورت تجربی، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در اعداد کلویتاسیون کم، شکل و اندازه ناحیه کلویتی در جریان ابرکاوک طبیعی و مصنوعی یکسان است؛ همچنین در این بین زو و همکاران [۳]، پس از بررسی آزمایش کاواک‌زا در تونل آب با حداکثر سرعت ۲۵ متر، نتیجه مشابهی را دریافت کرده‌اند. بین و همکاران [۴]، جریان کلویتاسیون مصنوعی را به صورت عددی با کمک متوسط‌گیری معادلات ناویر استوکس مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها نرخ تزریق‌های مختلف را بررسی و تاثیر آن‌ها را روی شکل و اندازه کلویتی، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در نهایت، به دقت رضایت‌بخشی بین نتایج عددی خود و نتایج تئوری و تجربی دست یافتند. اخیراً محققانی به بررسی تجربی و عددی ابرکاوک پرداختند. سرانجام [۷]، به بررسی تجربی و عددی پدیده ابرکاوک طبیعی پرداخت. ایشان در تحقیق خود، نمونه کاواک‌زا را در یک محفظه (کانال) پراز آب شلیک می‌کند و پدیده ابرکاوک را حول بدنه متحرک، مورد مطالعه قرار می‌دهد. سالاری و همکاران [۸]، به بررسی و تحلیل عددی و تجربی جریان ابرکاوک طبیعی روی سه نوع کاواک‌زا در سرعت‌های مختلف پرداختند.

¹ RANS

نمودند. برخی محققان از روش $k-\varepsilon$ در استخراج نتایج خود کمک گرفته‌اند و برخی دیگر نمونه اغتشاش $k-\varepsilon$ را *realizable* و $k-\omega-SST$ و $k-\varepsilon-RNG$ [14] را مناسب دانسته‌اند. پارک و هانگ [۱۴]، جریان دوبعدی سوپرکاویتاسیون طبیعی را حول کاواک‌زا ۱۵ و ۴۵ درجه تحت سرعت یک متر بر ثانیه، مورد تحلیل عددی قرار دادند. آن‌ها در تحلیل خود از مدل اغتشاش و روش حجم محدود کمک گرفته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که هندسه کاواک‌زا روی طول کاویته بسیار تاثیرگذار است. برادران فرد و نیک‌سرشت [۱۶]، پدیده کاویتاسیون را به صورت گذرا حول کاواک‌زا ۴۵ درجه و تحت سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه، مورد تحلیل عددی قرار دادند. سالاری و همکاران [۸]، در تحلیل عددی خود از مدل تجاری سی اف ایکس^۱ و نمونه اغتشاش $k-\varepsilon$ استفاده نموده‌اند. روحی و همکاران [۱۷]، با استفاده از روش حجم جزء و نمونه اغتشاش ادی‌های بزرگ^۲، جریان روی هیدروفویل را به صورت دو بعدی، مورد تحلیل عددی قرار دادند. آن‌ها در نمونه‌سازی انتقال جرم در جریان ابرکاواک، نمونه کونز را پیشنهاد نمودند. چراغی و همکاران [۱۸] جریان ابرکاواک حول یک رونده زیرسطحی را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در بررسی عددی خود، از روش حجم محدود و نمونه مخلوط چند فازی برای تحلیل جریان استفاده نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند، در اعداد کاویتاسیون برابر، کاویته ابرکاواک طبیعی و مصنوعی از نظر ابعاد برابر است.

همچنین تحلیل پدیده کاویتاسیون از روش‌های عددی مختلفی نیز، مورد مطالعه قرار گرفته است. شفتت و همکاران [۱۹-۲۱]، رشیدی و همکاران [۲۲] و پسندیده و همکاران [۲۳]، در تحقیق خود از روش المان مرزی کمک گرفته‌اند و دریافته‌اند که این روش، سازگاری خوبی با نتایج تجربی در اعداد کاویتاسیون بزرگ (بیشتر از ۰/۲) دارد. پسندیده و همکاران [۲۳]، جریان ابرکاواک و کاویتاسیون جزئی را با استفاده از روش المان مرزی روی یک هیدروفویل، مورد بررسی قرار دادند.

برخی محققان به بررسی پارامترهای موثر روی ناحیه و پارامترهای هیدرودینامیکی در جریان‌های ابرکاواک مصنوعی پرداختند. در این قسمت، پارامترهای موثری از جمله تأثیر دیواره، نرخ تزریق و شکل کاواک‌زا اشاره‌ای شده است که توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. جینگ و همکاران [۹]، تأثیر دیواره تونل آب در جریان ابرکاواک مصنوعی به صورت عددی مطالعه و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. آن‌ها از کاواک‌زا با قطر ده میلی‌متر و در محدوده سرعت ۶-۹ متر بر ثانیه در نتایج تحقیق خود استفاده نموده‌اند. آن‌ها دریافته‌اند با کاهش قطر تونل آب، بیشینه قطر ناحیه کاویته هم در ابرکاواک طبیعی و مصنوعی افزایش می‌یابد. تأثیرات دیواره بر ناحیه کاویته ابرکاواک مصنوعی، به صورت عددی توسط ایکسین و همکاران [۱۰]، مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها دریافته‌اند که در نرخ تزریق ثابت، اندازه ناحیه کاویته با کاهش قطر تونل آب، روند کاهشی را به دنبال دارد. آن‌ها جریان کاویتاسیون مصنوعی را روی یک کاواک‌زا تخت و تحت جریان ده متر بر ثانیه مورد تحلیل عددی قرار دادند. بین و همکاران [۴]، به بررسی پدیده کاویتاسیون و ابرکاواک مصنوعی حول رونده‌های زیر سطحی پرداخت. آن‌ها تأثیر نرخ تزریق را روی اندازه و شکل ناحیه کاویته، مورد مطالعه قرار دادند. تأثیرات جاذبه و زاویه حمله کاواک‌زا روی ناحیه سوپر کاویتاسیون مصنوعی و پارامترهای هیدرودینامیکی توسط فنگ و همکارانش [۱۱]، مورد بررسی قرار گرفت. کونز و همکاران [۱۲]، پدیده ابرکاواک طبیعی و مصنوعی را روی کاواک‌زا تخت و نیم کروی در زوایای حمله مختلف به صورت سه بعدی، مورد تحلیل عددی قرار دادند.

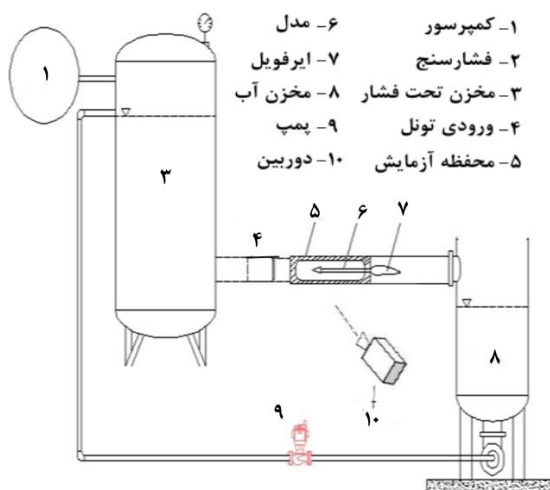
برخی اثر کاواک‌زا را روی شکل حباب و یا کاهش پسا، مورد مطالعه قرار دادند. اکثر کاواک‌زاهای مورد بررسی، مخروطی و یا هیدروفویل است. آهن و همکاران [۱۳] و پارک و هانگ [۱۴] کاواک‌زا مخروطی و برناد و همکاران [۱۵] و رولی و همکاران [۱۶]، پدیده کاویتاسیون توسط کاواک‌زا هیدروفویل را مورد تحلیل قرار دادند. آهن و همکاران [۱۳]، دو نوع کاواک‌زا مخروطی ۴۵ و ۹۰ درجه را به صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار دادند.

در زمینه تحقیق در مورد ابرکاواک، بررسی‌های عددی در جریان‌های ابرکاواک برای پیش بینی عددی این پدیده انجام گرفت و محققان از مدل‌های اغتشاش متفاوتی استفاده

¹ CFX² LES

نگهدارنده کاواک‌زا خارج می‌شود، به سنسور فشار مربوطه متصل گردیده است (شکل ۳).

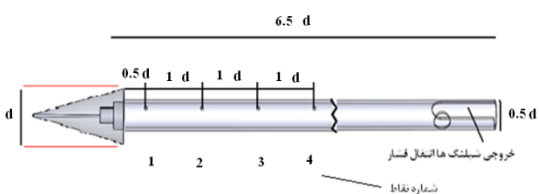
با توجه به تغییرات لحظه‌ای سرعت و فشار در تونل آب در حین آزمایش، می‌بایست علاوه بر ثبت فشار نوک دماغه، فشار ها روی منبع و در محفظه آزمون نیز ثبت می‌گردید.



شکل ۱- شماتیک تونل آب شبه مدار باز



شکل ۲- نحوه قرارگیری نمونه در محفظه آزمون



شکل ۳- شماتیکی از نمونه و موقعیت سوراخ‌های اندازه‌گیری فشار

در این تحقیق، ابتدا کاواک‌زا ۳۰ درجه در یک تونل آب شبه مدار باز، مورد آزمایش و جریان ابرکاواک مصنوعی، مورد مطالعه قرار داده شد. در مرحله بعد، جریان حول کاواک‌زا در شرایط مشابهی با شرایط آزمایش مورد تحلیل و شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. در این مرحله، پس از انتخاب شبکه بندی مناسب، نتایج عددی لازم استخراج گردیدند. در پایان، علاوه بر مقایسه نتایج تجربی و عددی، عوامل موثر در ابعاد کاویتی و ضریب پسا، مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- طرح مسئله و روش تجربی

در پیشرونده‌های زیر سطحی، کاواک‌زاها نقش عمده‌ای را در کاهش پسا به عهده دارند. مشاهدات تجربی نشان داده است که هندسه کاواک‌زا بر شکل کاویتی ایجاد شده، بسیار تاثیر گذار است. در این تحقیق کاواک‌زا ۳۰ درجه، مورد مطالعه قرار گرفت. برای نگهداری کاواک‌زاها از یک نوع بدنه استوانه‌ای استفاده شده است و جهت انجام آزمایشات از یک تونل آب شبه مدار باز، استفاده شده است. شماتیکی از اجزای تونل آب شبه مدار باز مورد نظر، در شکل ۱ نشان داده شده است. سرعت ماکزیمم آب عبوری از مقطع آزمون این تونل آب تا ۴۰ متر بر ثانیه نیز می‌رسد.

مقطع آزمون به صورت استوانه‌ای بوده که دارای قطر داخلی D (پنج سانتی‌متر) و طولی برابر با $8D$ می‌باشد. جنس بدنه آن از پلکسی گلاس با صافی سطح بسیار بالا انتخاب شده است (شکل ۲). نمونه نصب شده دارای یک کاواک‌زا با قطر ماکزیمم d است که به کمک یک بدنه استوانه‌ای که دارای سوراخ‌هایی برای اندازه‌گیری فشار است، به مجموعه نیرو سنج که در خارج از مقطع آزمون قرار می‌گیرد، متصل شده است. قطر کاواک‌زا این تحقیق، برابر با ۱۰ میلی‌متر بوده است. افزایش سرعت و برقراری جریان در محفظه آزمون تونل آب، به کمک افزایش فشار هوا در یک مخزن استوانه‌ای قائم که حدود ۷۰ درصد حجم آن آب است تامین می‌شود.

برای طراحی بدنه، طول بدنه به گونه‌ای انتخاب شده است که اندازه حجم حباب در سرعت بیشینه تونل، قابل اندازه‌گیری باشد و نیز در اثر ارتعاش بدنه، اندازه‌گیری‌ها دچار اشکال نگردند. فشار در نوک دماغه‌ها به وسیله لوله‌های استیل $0.7/10$ میلی‌متری که از قسمت انتهایی بدنه استوانه‌ای

یکی از پارامترهای موثر در مطالعات علوم هیدرودینامیک، عدد فرود است که طبق رابطه (۹) تعریف می‌شود. سومنکو [۲۴]، در مطالعات خود به این نتیجه رسید که تاثیر شتاب گرانش روی نتایج در صورتی که $\sigma Fr < 2$ محسوس نمی‌باشد.

$$Fr = \frac{U_{\infty}}{(gD)^{1/2}} \quad (9)$$

در این تحقیق، محدوده سرعت ۲۴ تا ۳۷ متر بر ثانیه و محدوده عدد کایتاسیون، $0/24 < \sigma < 0/15$ است که می‌توان بیان کرد که تاثیر گرانش روی نتایج محسوس نیست.

۳-۱- نمونه توربولانسی

جهت نمونه کردن اثرات توربولانسی در جریان و پدیده کایتاسیون، از نمونه توربولانسی $k - \omega - SST$ استفاده شده است. $k - \omega$ یک نمونه نسبتاً کامل و عمومی است که برای تشریح آشفتگی به کار می‌رود. در این نمونه دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی آشفته، k (m^2/s^2) و دیگری برای نرخ جدایش ω حل می‌شود.

نمونه SST در مقایسه با دیگر نمونه‌های اغتشاش با دقت و اطمینان بیشتر برای گستره زیادی از جریان‌ها به ویژه جریان‌های با گرادیان فشار مخالف، جریان روی ایرفویل و شوک‌های گذر صوت، می‌توان به کار برد.

در مدل SST، معادلات انتقال به صورت روابط (۱۰-۱۱) بیان می‌شود [۲۵].

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_k - Y_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} \quad (11)$$

که $S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$ و $\bar{G}_k = \mu_t 2 S_{ij} S_{ij}$ تولید انرژی جنبشی مغشوش، $\bar{G}_{\omega} = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$ نرخ اتلاف تولیدی، $Y_k = \rho \beta^* f_{\beta} k \omega$ و $Y_{\omega} = \rho \beta f_{\beta} \omega^2$ می‌باشند.

۳-۲- انتقال جرم

جهت نمونه کردن چند فازی مسئله، از نمونه مخلوط چند فازی استفاده شده است. شبیه‌سازی انتقال جرم مدل‌های متفاوتی وجود دارد از جمله: مدل سیگنهل [۲۶]، مدل مرکل [۲۷]، مدل اویس [۲۸] و مدلکونز [۲۹]. در تحقیق

برای ثبت داده‌ها از سنسورها، نیاز به یک برد A/D است که به تعداد سنسورها کانال ورودی داشته باشد؛ برای این منظور، از یک برد پی سی آی^۱ و یک ترمینال پی سی ال دی^۲ استفاده شده است. برای ثبت نتایج تجربی از نرم افزار لب ویو^۳ استفاده شده است. برنامه نویسی با توجه به سیستم اندازه‌گیری انجام پذیرفته است و ثبت داده‌ها با توجه به فرکانس درخواستی است که در این تحقیق، از فرکانس ۱۰۰۰ یعنی ضبط ۱۰۰۰ داده بر ثانیه استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری قطر و طول حباب ابرکاوک در پشت کاواک‌زا، از یک دوربین فیلم برداری با سرعت ۶۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. آزمایشات این تحقیق در محدوده سرعت ۲۴ تا ۳۷ متر بر ثانیه انجام گرفته است.

۳- معادلات حاکم در حل عددی

در حل عددی مسئله، معادلات حاکم بر مسئله معادله پیوستگی، مومنتم است و دو معادله انتقال جهت محاسبه کسر حجمی مایع و گاز استفاده شده است.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha_v) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_v \alpha_v u_i) = \dot{m}^- - \dot{m}^+ \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_g \alpha_g u_i) = 0 \quad (5)$$

در معادلات (۲-۵) روابط بین چگالی، ویسکوزیته دینامیکی، ویسکوزیته مغشوش مخلوط به صورت روابط (۶) تا (۸) بیان شده است.

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g \quad (6)$$

$$\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \alpha_g \mu_g \quad (7)$$

$$\mu_t = \frac{\rho_m c_{\mu} k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

زیر نویس L, V, g و m به ترتیب مربوط به فاز مایع و بخار و گاز و مخلوط می‌باشند. همچنین در روابط (۶-۹) پارامترهای $u, P, \dot{m}^-, \dot{m}^+, \alpha$ به ترتیب، نماینگر درصد حجمی فاز، نرخ تقطیر، نرخ تبخیر، فشار و سرعت است.

¹ PCI-1710HGU

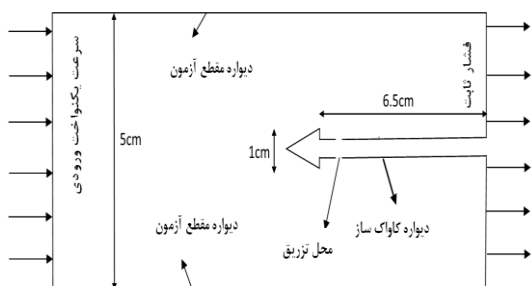
² PCLD-8710-AE

³ LABVIEW

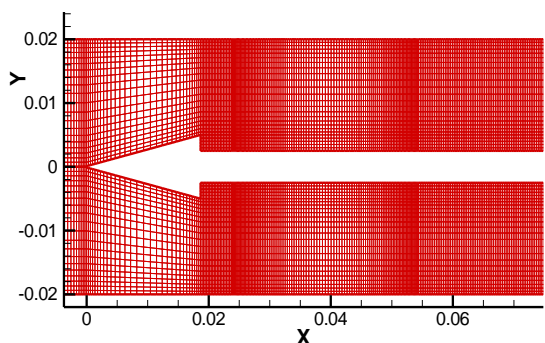
شکل ۵، شبکه نزدیک کاواک‌زا را نشان می‌دهد، شبکه حل مسئله، دارای ۹۲۰۰۰۰ المان است که در پشت دماغه و محل تزریق شبکه ریزتری، نسبت به دیگر فضاهای شبکه حل استفاده شده است.

۵- ارائه و تحلیل نتایج تجربی

آزمایش‌ها روی دماغه مخروطی ۳۰ درجه با مشخصات هندسی ذکر شده، انجام پذیرفته است. حجم حباب، اندازه توزیع لحظه‌ای فشار و نیروی پسا برای هر دماغه اندازه‌گیری و ارائه گردیده است.



شکل ۴ - هندسه و شرایط مرزی مسئله



شکل ۵- نمای دو بعدی از شبکه بندی حل مسئله کاواک‌زا

جدول ۱- مقادیر نتایج و درصد خطا برای شبکه‌های مختلف

درصد خطا	نیروی پسا (N)	تعداد سلول
٪۶/۱۵	۶/۵	۴۲۰۰۰۰
٪۳/۲۷	۶/۳	۹۲۰۰۰۰
٪۲/۶۲	۶/۲۶	۱۱۸۰۰۰۰
٪۱/۱۶	۶/۲	۱۶۵۲۰۰۰
٪۴/۹	۶/۴	۱۹۰۰۰۰۰

حاضر، از نمونه سیگنهایل استفاده شده است. ترم‌های چشمه در معادله (۳)، به ترتیب نشان‌دهنده فرآیند تبخیر (رشد حباب) و تقطیر (نابودی حباب) می‌باشند. ترم چشمه از معادله رایلی-پلاست، استخراج شده است [۲۶] و به صورت روابط (۱۲-۱۳) بیان می‌شود:

$$\dot{m}_i^- = C_{evap} \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left[\frac{2 p_v - p}{3 \rho_l} \right]^{1/2} \frac{\rho_l \alpha_l}{\rho_m} \quad (12)$$

$$\dot{m}_i^+ = C_{cond} \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left[\frac{2 p - p_v}{3 \rho_l} \right]^{1/2} \frac{\rho_v \alpha_v}{\rho_m} \quad (13)$$

در معادلات فوق $C_{evap} = 0/02$ و $C_{cond} = 0/01$ و $V_{ch} = \sqrt{k}$ که p_v ، σ و k به ترتیب نشان‌دهنده فشار مایع اشباع، تنش سطحی و انرژی مغشوش است.

۴- روش حل عددی

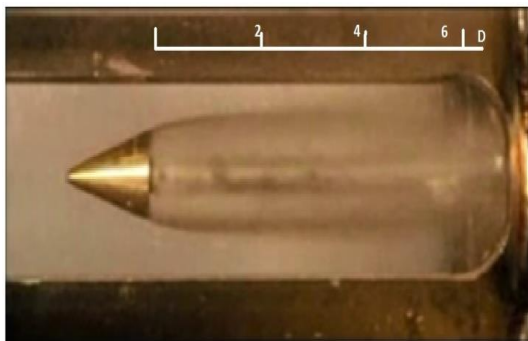
برخی از کدهای تجاری موجود، قابلیت تحلیل پدیده کاویتاسیون را دارند. در تحقیق حاضر، از کد تجاری CFX استفاده شده است. این کد معادلات، RANS را با استفاده از روش حجم محدود حل می‌کند. روش حجم محدود، از شکل انتگرالی معادلات بقاء استفاده می‌کند.

شکل ۴، شرایط مرزی مسئله را نشان می‌دهد. در مرز ورودی، مولفه‌های سرعت، کسر حجمی و پارامترهای توربولانسی تعیین شده‌اند و در مرز خروجی، فشار استاتیکی تنظیم شده است و شرط تزریق جریان به صورت دبی ثابت با مقدار ۰/۱ لیتر بر ثانیه و کسر حجمی گاز یک تعریف شده است. مرز دیواره تونل آب و کاواک‌ساز با شرط عدم لغزش لحاظ شده است. ابعاد دامنه شبکه حل با ابعاد تونل آب به‌طور یکسان نمونه شده است.

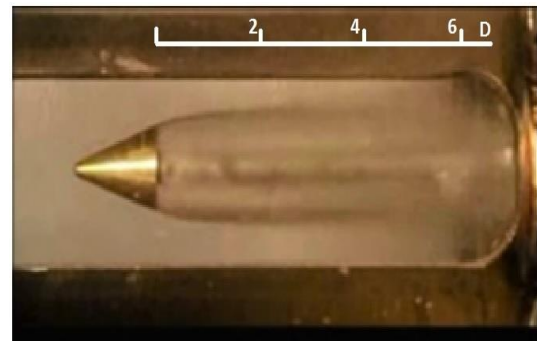
در این بخش، کاواک‌زا و تونل آب به صورت سه بعدی نمونه می‌شود و پنج شبکه حل با تعداد ۴۲۰۰۰۰ و ۹۲۰۰۰۰، ۱۱۸۰۰۰۰ و ۱۶۵۲۰۰۰ و ۱۹۰۰۰۰۰ المان چهار وجهی برای میدان حل تولید شده است. پس از بررسی انجام شده و مقایسه نتایج پنج شبکه تولید شده با نتایج تجربی مشخص گردید، نتایج دو شبکه اختلاف چندانی ندارند. بدین ترتیب شبکه با المان کمتر (۹۲۰۰۰۰ سلول) با توجه به اختلاف ناچیز نتایج، به عنوان شبکه مطلوب برای ادامه محاسبات انتخاب شده است. همچنین برای اطمینان از کیفیت مناسب شبکه، پارامتر Y^+ مورد بررسی قرار گرفت که کمترین و بیشترین این مقدار روی بدنه ۴۲ و ۱۲۰ است.

است. دبی هوای تزریق شده برابر با ۰/۱ لیتر بر ثانیه بوده است. برای محاسبه دبی هوای تزریق شده، از یک قطعه ونتوری شکل در مسیر جریان هوا استفاده و از اختلاف فشار ایجاد شده در مسیر ورود هوا، میزان دبی عبوری هوا اندازه‌گیری شده است. شکل ۶، کاویتی ایجاد شده در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

برای جریان روی کاواکزا مخروطی ۳۰ درجه، آزمایش‌هایی به منظور تأثیر هوادهی بر اندازه هندسی حباب ابرکاواک ایجاد شده در پشت کاواکزا انجام گردید. دامنه سرعت جریان در بازه ۳۷ تا ۲۴ متر بر ثانیه است. به منظور تأمین هوا به داخل کاویتی، چهار سوراخ در چهار طرف بدنه استوانه‌ای و به فاصله ۰/۵ D از قاعده کاواکزا تعبیه شده



(ب)



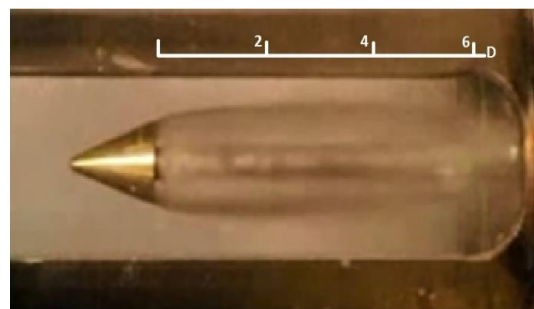
(الف)



(د)

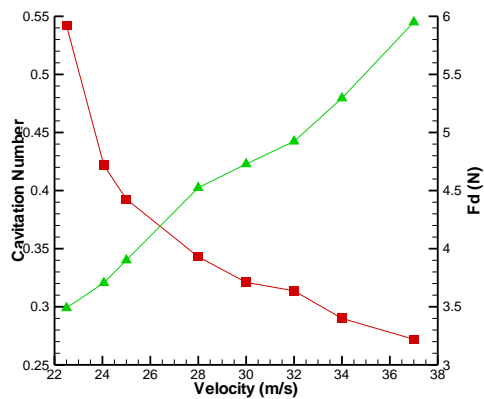


(ج)

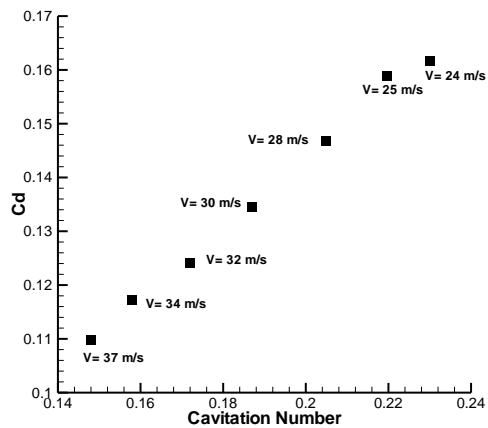


(ه)

شکل ۶- نتایج تجربی تشکیل، تبخیر و تقطیر ابرکاواک مصنوعی بر روی کاواکزا ۳۰ درجه در تونل آب تحت سرعت‌های مختلف در حالت هوادهی، (الف) سرعت ۳۷ متر بر ثانیه، (ب) سرعت ۳۴ متر بر ثانیه، (ج) سرعت ۳۲ متر بر ثانیه، (د) سرعت ۲۸ متر بر ثانیه و (ه) سرعت ۲۵ متر بر ثانیه



شکل ۸- تغییرات عدد کاویتاسیون و نیروی پسای تجربی بر حسب سرعت جریان (مربع: عدد کاویتاسیون و مثلث: نیروی پسای)



شکل ۹- تغییرات ضریب پسای تجربی بر حسب عدد کاویتاسیون در سرعت‌های مختلف جریان

۶- ارائه و تحلیل نتایج عددی

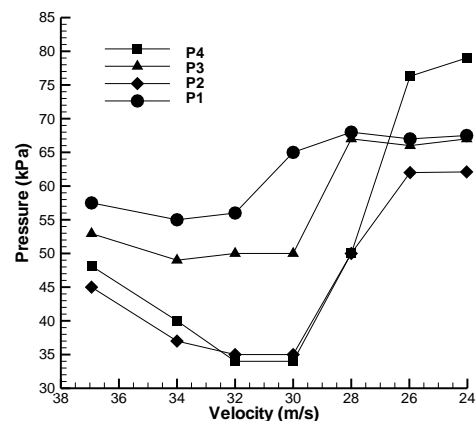
در این تحقیق، کاواک‌زا و محفظه آزمایش تونل آب به صورت سه بعدی شبکه‌بندی و نمونه شده، سپس جریان حول کاواک‌زا تحلیل شده است. نمونه تحت پنج سرعت مختلف (۳۷ و ۳۴ و ۳۲ و ۳۰ و ۲۸ و ۲۴ متر بر ثانیه) به صورت سه بعدی، مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. شکل ۱۰ و ۱۱، کانتور حجمی آب و هوا را در سرعت ۳۷ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

داخل ناحیه کاویتی (پشت کاواک‌زا)، مقدار فشار ثابت است و این مقدار فشار در راستای طول بدنه افزایش می‌یابد و در موقعیتی از بدنه که مقدار فشار به بیشینه خود برسد،

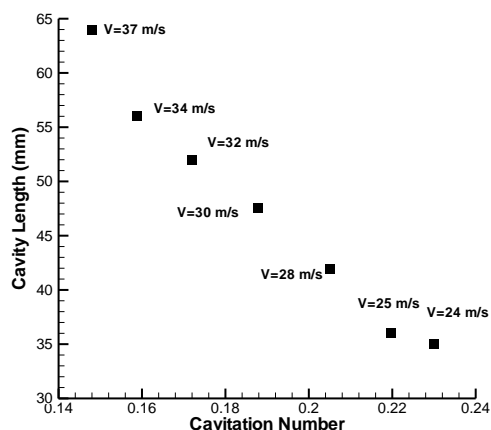
تغییرات فشار نشان می‌دهد، هنگامی که سرعت جریان بیشتر از ۲۸ متر بر ثانیه است، حباب ابرکاواک که در انتهای خود باز بوده و جریان هوای دمیده شده، به صورت مستقیم به بیرون تخلیه گردیده است (شکل ۷). در این حالت، فشار در موقعیت سنسورهای ۱ تا ۴ بسیار پایین بوده است. لیکن در بعد از این زمان با کاهش سرعت جریان طول حباب نیز کاهش یافته و انتهای حباب بسته شده است؛ به طوری که در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه، موقعیت انتهای حباب به نقطه ۴ روی بدنه رسیده است. در این حالت، یک جریان چرخشی در داخل حباب ایجاد و مقدار فشار داخل حباب نیز، به مراتب بیشتر از حالت حباب با انتهای باز گردیده است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنید، با کاهش سرعت مقدار عدد کاویتاسیون افزایش می‌یابد؛ به طوری که در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه، انتقال ناحیه ابرکاواک به ناحیه کاویتاسیون جزئی اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش سرعت، مقدار نیروی پسای تقریباً با شیب ثابتی افزایش می‌یابد.

افزایش سرعت، کاهش عدد کاویتاسیون را به همراه دارد در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در سرعت‌های زیاد و کم، مقدار تغییرات ضریب پسای نسبت به سرعت‌های متوسط (۲۸ تا ۳۲ متر بر ثانیه)، کاهش می‌یابد؛ بنابراین پدیده ابرکاواک در سرعت‌های بالا، تأثیری کمتری روی ضریب پسای دارد یا به عبارت دیگر، ایجاد پدیده ابرکاواک مصنوعی با نرخ تزریق ثابت تا سرعت خاصی کارایی دارد و پس از آن افزایش سرعت، تأثیر چشمگیری روی ضریب پسای ندارد و باید از دیگر روش‌هایی برای کاهش ضریب پسای استفاده کرد.



شکل ۷- تغییرات فشار در چهار نقطه روی بدنه بر حسب سرعت جریان



شکل ۱۳- طول ناحیه کاویتی با عدد کاویتاسیون

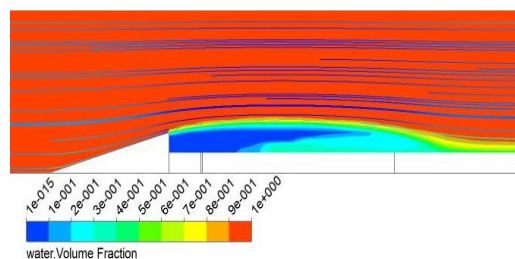
۷- مقایسه نتایج عددی و تجربی

جدول ۲، نتایج عددی و تجربی ضریب پسای کاواک‌زا ۳۰ درجه را تحت سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌کنید با افزایش سرعت، مقدار درصد خطای نتایج کاهش می‌یابد. علت کاهش ضریب پسا، به سبب گذر از ناحیه ابرکاواک به ناحیه کاویتاسیون جزئی است که با کاهش سرعت، ناحیه کاویتاسیون جزئی افزایش می‌یابد و جهت تحلیل دقیق‌تر این ناحیه، مناسب است شبکه تحلیل و نمونه دو فازی اصلاح شود. نیروی پسا که شامل پسای اصطکاکی و فشاری می‌شود، در نتایج روندی کاهشی دارد از طرفی، همواره فشار داخل کاویتی در تمامی سرعت‌ها تقریباً ثابت است؛ ولی فشار روی قسمت نوک کاواک‌زا با کاهش سرعت افزایش می‌یابد. به این ترتیب، مقدار نیروی پسا فشاری نیز افزایش یافته است. لذا با کاهش سرعت مقدار نیروی پسای اصطکاکی کاهش و مقدار نیروی پسای فشاری افزایش می‌یابد که در مجموع مقدار نیروی پسای کل کاهش یافته است. از طرفی، با کاهش سرعت مقدار نیروی پسا کاهش می‌یابد؛ لیکن تغییرات مجذور سرعت بسیار بیشتر است و در مجموع باعث افزایش ضریب پسا می‌شود.

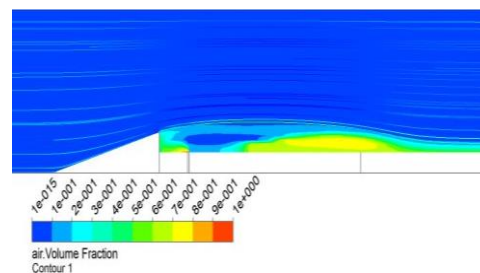
در این قسمت، مقایسه طول ناحیه کاویتی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با کاهش طول حباب و با عبور از چهار موقعیتی که فشارسنج‌ها در آنجا نصب شده‌اند، می‌توان موقعیت پایان حباب را در سرعت‌های مختلف به دست آورد؛ اما به دلیل اینکه در سرعت‌های بالا طول ناحیه کاویتی از موقعیت چهار فشارسنج تعبیه شده روی کاویتی گسترش

حباب کاویتی بسته می‌شود و بدین ترتیب، طول ناحیه کاویتی مشخص می‌شود (شکل ۱۲).

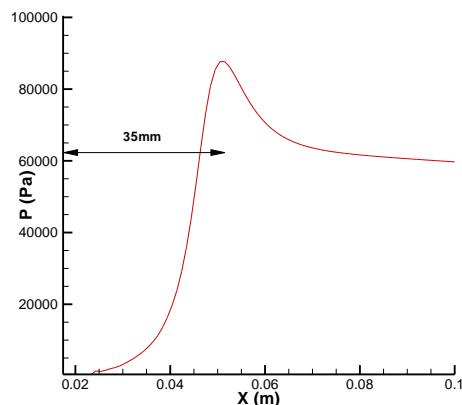
شکل ۱۳، طول ناحیه کاویتی را با عدد کاویتاسیون نشان می‌دهد. افزایش عدد کاویتاسیون، کاهش طول ناحیه کاویتی را به همراه دارد. با افزایش عدد کاویتاسیون، شیب تغییرات طول ناحیه کاویتی کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر، در سرعت‌های کم (۲۴ متر بر ثانیه)، طول ناحیه کاویتی تقریباً ثابت است.



شکل ۱۰- خطوط جریان و کانتور درصد حجمی آب در کاواک‌زا ۳۰ درجه تحت سرعت جریان ۳۷ متر بر ثانیه



شکل ۱۱- خطوط جریان و کانتور درصد حجمی هوا در کاواک‌زا ۳۰ درجه تحت سرعت جریان ۳۷ متر بر ثانیه



شکل ۱۲- تغییرات فشار بر روی بدنه نمونه کاواک‌زا ۳۰ درجه تحت جریان ابرکاواک مصنوعی ۲۴ متر بر ثانیه

همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌کنید، نسبت بیشترین قطر حباب به قطر کاواک‌زا با افزایش عدد کاویتاسیون کاهش می‌یابد و این مطلب بر اساس رابطه (۲) صدق می‌کند. به طوری که مقدار نسبت بیشترین قطر حباب به قطر کاواک‌زا با σ^{-1} تغییر می‌کند. مطابق شکل ۱۶، علت افزایش خطا در اعداد کاویتاسیون کوچک این است که در سرعت‌های زیاد، حباب ابرکاواک در انتهای خود باز بوده، جریان هوای دمیده شده به صورت مستقیم به بیرون تخلیه می‌شود؛ ولی در نمونه عددی، فاصله محفظه آزمایش و خروجی تونل به اندازه کافی طولانی انتخاب گردیده است.

نتایج عددی و تجربی، بیانگر این موضوع است که قطر حباب تشکیل شده با افزایش سرعت قطر حباب تشکیل شده افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج، دقت رضایت‌بخشی را به دنبال دارد. بررسی نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که روند تغییرات قطر ناحیه حباب با سرعت ارتباط مستقیم دارد و با افزایش سرعت جریان، قطر حباب افزایش می‌یابد (شکل ۱۷).

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ناحیه کاویتا تشکیل شده در جریان ابرکاواک مصنوعی، حول کاواک‌زا مخروطی ۳۰ درجه تحت سرعت‌های مختلف، مورد تحلیل تجربی و عددی قرار گرفته است. در بررسی عددی و تجربی ناحیه کاویتا و ضریب پسا حول کاواک‌زا ۳۰ درجه تحت شرایط جریان متفاوت دستاوردهای ذیل به دست آمده است.

۱- مقایسه نتایج عددی و تجربی و اختلاف کم نتایج ناشی از شبکه مناسب و الگوی دو فازی و نمونه توربولانسی مناسب است.

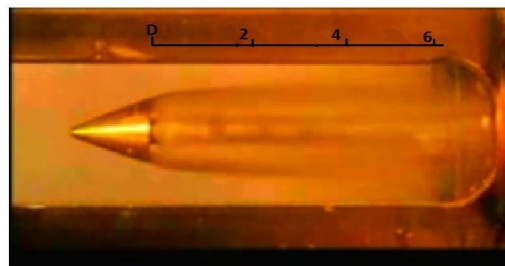
۲- کاهش عدد کاویتاسیون، کاهش ضریب پسا و افزایش نیروی پسا را به همراه دارد. با کاهش سرعت، شیب تغییرات ضریب پسا کاهش می‌یابد؛ به طوری که در سرعت‌های کم، مقدار ضریب پسا تقریباً ثابت می‌ماند.

۴- کاهش عدد کاویتاسیون، افزایش طول ناحیه کاویتا را به دنبال دارد. با افزایش عدد کاویتاسیون، شیب تغییرات مقدار طول ناحیه کاویتا تقریباً صفر است. قطر ناحیه کاویتا، هم تغییراتی مشابه با طول ناحیه کاویتا دارد.

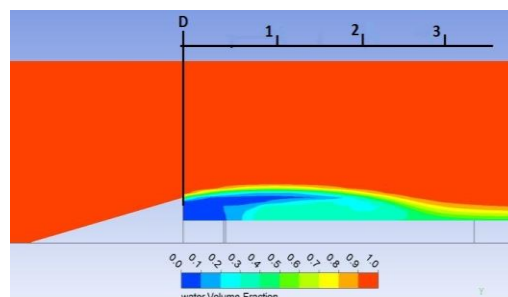
یافته است، امکان اندازه‌گیری طول ناحیه کاویتا امکان‌پذیر نیست. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید، در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه موقعیت انتهای حباب به نقطه ۴ روی بدنه رسیده است. در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه، شکل ۱۴ و ۱۵ ناحیه کاویتا در نتایج تجربی و عددی مشخص و مقایسه می‌کند. و نمودار شکل ۱۲، طول ناحیه کاویتا را مشخص می‌کند که این مقدار با نتایج تجربی ۲/۹ درصد خطا دارد.

جدول ۲- مقایسه ضریب پسا نتایج عددی و تجربی بر

حساب عدد کاویتاسیون و سرعت جریان				
عدد کاویتاسیون	سرعت	ضریب پسا عددی	ضریب پسا تجربی	درصد خطا
۰/۱۴۸	۳۷	۰/۱۱۱	۰/۱۰۹	۱/۹۳
۰/۱۵۸	۳۴	۰/۱۲۰	۰/۱۱۷	۱/۷۵
۰/۱۷۲	۳۲	۰/۱۲۸	۰/۱۲۴	۲/۷۵
۰/۱۸۵	۳۰	۰/۱۳۲	۰/۱۳۴	۱/۷۳
۰/۲۰۵	۲۸	۰/۱۴۵	۰/۱۴۶	۰/۷۱
۰/۲۲	۲۵	۰/۱۴۲	۰/۱۵۸	۹/۹۵
۰/۲۳	۲۴	۰/۱۴۳	۰/۱۶۱	۱۱/۱۳



شکل ۱۴- نتایج تجربی تشکیل ابرکاواک مصنوعی تحت سرعت ۲۴ متر بر ثانیه



شکل ۱۵- کانتور حجمی آب تحت سرعت ۲۴ متر بر ثانیه

revolution in a fluid flow. The Kaiser Wilhelm institute for hydrodynamic research, Gottingen, Rep. UM 6628.

- [2] Qi-tao L, Lei-ping X, You-sheng L (2008) Experimental study of ventilated supercavities with a dynamic pitching model. *J Hydrodyn* 20(4): 456-460.
- [3] Zou W, Yu K, Wan X (2010) Research on the gas-leakage rate of unsteady ventilated supercavity. *J Hydrodyn* 22(5).
- [4] Bin J, Xian-wu L, Xiao-xing P, Yao Z, Yu-lin W, Hong-yuan X (2010) Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around flow an under-water vehicle based on a three-component cavitation model. *J Hydrodyn* 22(6): 753-759.

۵. سالاری م، دشتی ح (۹۲) اندازه گیری تجربی مشخصه های جریان سوپرکاویتاسیونی در پایین دست یک کاویتاتور مخروطی ۳۰ درجه در دو حالت طبیعی و همراه با تزریق هوا. مجله مکانیک سیالات و آیرودینامیک ۲(۲): ۴۱-۵۲.

- [6] Xue Z, Ying-jie W, Jia-zhong Z, Cong W, Kai-ping Y, (2007) Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation. *J Hydrodyn* 19(5): 564-57.

- [7] Saranjam B, (2013) Experimental and numerical investigation of an unsteady supercavitating moving body. *Ocean Eng* 59: 9-14.

[۸] سالاری م، فراهت س، جوادپور س م (۹۲) مطالعه تجربی و عددی مشخصه های ابرکاواک ایجاد شده پشت کاواک سازهای مخروطی. ماهنامه مهندسی مکانیک مدرس ۱۳(۱۳): ۲۲۶-۲۳۶.

- [9] Jing-jun Z, Kai-ping Y, Jing-xin M, Ming Y (2010) The comparative study of ventilated supercavity shape in water tunnel and infinite flow field. *J Hydrodyn* 22(5): 689-696.

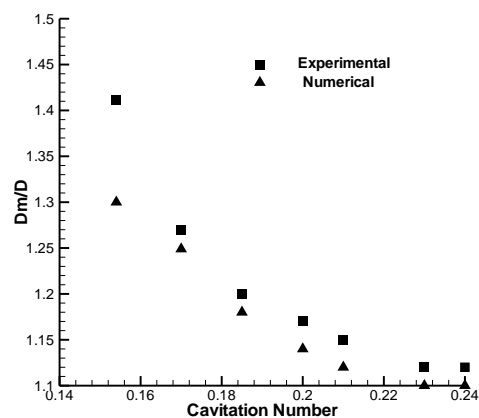
- [10] Xin C, Chuan-jing L, Jie L, Zhan-cheng P (2008) The wall effect on ventilated cavitating flows in closed cavitation tunnels. *J Hydrodyn* 20(5): 561-566.

- [11] Guang Feng G, Chen W, Chu X, Wang Z, M Zhang M, Chen W (2010) Simulation of unsteady artificial supercavities. *J Hydrodyn* 22(5): 905-911.

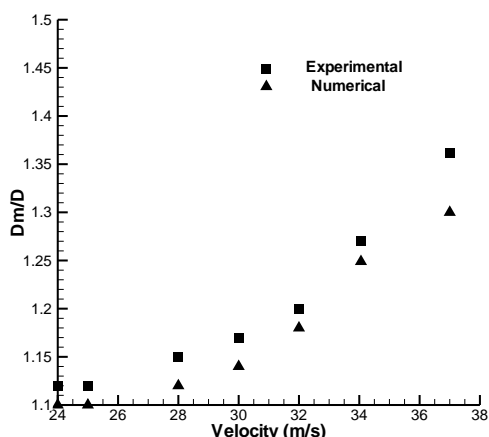
- [12] Kunz R, Boger D, Chyczewski T, Stinebring T, Gibeling H (1999) Multi-Phase CFD analysis of natural and ventilated cavitation about submerged bodies. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, California.

- [13] Ahn B, Ahn C, Lee C, Kim T (2010) Experimental and numerical studies on super-cavitating flow of axisymmetric cavitators. *Int J Nav Archit Ocean Eng* 2(1): 39-44.

۵- بررسی ها نشان می دهد، کاویتاسیون مصنوعی روشی مناسب و موثری برای کاهش نیروی پسا به ویژه در سرعت های متوسط (۲۸ تا ۳۲ متر بر ثانیه) است.



شکل ۱۶- تغییرات نسبت قطر بیشینه حباب به قطر کاواک‌زا بر حسب عدد کاویتاسیون



شکل ۱۷- تغییرات نسبت قطر بیشینه حباب به قطر کاواک‌زا بر حسب سرعت جریان

۹- تقدیر و تشکر

نویسندگان از زحمات و همکاری بی دریغ مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه جامع امام حسین (ع) کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۱۰- مراجع

- [1] Reuchardt H (1945) The physical law governing the cavitation bubbles produced behind solid of

- [21] Rashidi I, Moin H, Passandideh-Fard M, Passandideh-Fard M (1386) Numerical Simulation of Partial Cavitation over Axisymmetric Bodies: VOF Method vs. Potential Flow Theory. *JAST* 5(1): 23-33.
- [۲۳] پسندیده فرد محمود، رشیدی ایمان، تولمی محمد (۱۳۸۷) شبیه سازی عددی جریان کائیتاسیون گسترده و جزئی دو بعدی با استفاده از روش المان مرزی. فصلنامه مکانیک هوافضا ۲۸-۱۵: (۳)۴.
- [24] Semenenko, VN (2001) Dynamic processes of supercavitation and computer simulation. Paper presented at the RTO AVT lecture series on supercavitating flows at VKI.
- [25] Wilcox, DC (1998) Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc, La Canada, California.
- [26] Singhal, NH, Athavale AK, Li M, Jiang Y (2002) Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *J Fluid Eng-T Asme* 124: 1-8.
- [27] Merkle CL, Feng J, Buelow PE (1998) Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation. Proceeding of the 3rd International Symposium on Cavitation, (CAV98), Grenoble, France.
- [28] Owis FM, Nayfeh AH (2004) Numerical simulation of 3-D incompressible, multi-phase flows over cavitating projectiles. *Eur J Mech B-Fluid* 23(26): 339-351.
- [29] Kunz RF, Boger DA, Stinebring DR, Chyczewski TS, Lindau JW, Gibeling HJ (2000) A preconditioned navier-stokes method for two-phase flows with application to cavitation. *Comput Fluids* 29: 849-875.
- [14] Sunho P, Shin HR (2012) Computational analysis of turbulent super-cavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped cavitator geometry. *Comput Fluids* 70: 73-85.
- [15] Bernard S, Susan R, Sebastian Muntean S, Ioan Anton I (2006) Numerical analysis of the cavitating flows. Proceedings of the Romanian academy, Series A, Volume 7(1):1-13.
- [16] Baradaran Fard M, Nikseresht AH (2012) Numerical simulation of unsteady 3D cavitating flows over axisymmetric cavitators. *Sci Iran* 19(5): 1258-64.
- [17] Roohi E, PouyanZahiri A, Passandideh-Fard M (2013) Numerical simulation of cavitation around a two-dimensional hydrofoil using VOF method and LES turbulence model. *Appl Math Model* 37(9): 6469-6488.
- [۱۸] چراغی ع، ابراهیمی ر، محمدی س، شمس م (۱۳۹۰) نمونه سازی جریان ابرکاوک اطراف رونده های زیر سطحی. فصلنامه مکانیک هوافضا ۲۸-۱۵: (۴)۷.
- [19] Shafaghat R, Hosseinalipour SM, Lashgari I, Vahedgermi A (2011) Shape optimization of axisymmetric cavitators in supercavitating flows using the NSGAI algorithm. *Appl Ocean Res* 33:193-198.
- [20] Shafaghat R, Hosseinalipour SM, Nouri NM, Lashgari I (2008) Shape optimization of two-dimensional cavitators in supercavitating flows using NSGAI algorithm. *Appl Ocean Res* 30: 305-310.
- [21] Shafaghat R, Hosseinalipour SM, Derakhshani E (2010) Derivation of a correlation for drag coefficient in two-dimensional bounded supercavitating flows, using artificial neural networks. *Arch Appl Mech* 80: 771-784.