

مطالعه عددی و تجربی اثرات تزریق بر جریان سوپر‌کاویتاسیون مصنوعی

سیدمرتضی جوادپور^۱، سعید فراغت^{۲*}، حسین عجم^۳، محمود سالاری^۴، علیرضا حسین نژاد دوین^۵

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۵	
واژگان کلیدی: تونل آب، سوپر‌کاویتاسیون مصنوعی، کاواک‌ساز، جریان چندفازی، نیروی پسا.	یکی از روش‌های کم‌هزینه در کاهش نیروی پسا روی رونده‌های زیرسطحی ایجاد ابرکاواک مصنوعی حول رونده است. همین امر باعث شده که همواره بررسی این موضوع مورد علاقه محققان قرار گیرد. در این تحقیق، جریان سوپر‌کاویتاسیون مصنوعی حول کاواک‌ساز ۳۰ درجه به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق، مطالعه و بررسی نرخ تزریق هوا و سرعت جریان آب روی ضریب پسا و شکل کاویتا می‌باشد. ابتدا پدیده سوپر‌کاویتاسیون مصنوعی در محدوده سرعت ۱۴ تا ۲۲ متر بر ثانیه، حول کاواک‌ساز ۳۰ درجه در یک تونل آب شبه‌مدار باز مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفته است. سپس، جریان سوپر‌کاویتاسیون مصنوعی حول کاواک‌ساز ۳۰ درجه و منطبق بر شرایط ورودی و تزریق، به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی و مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. در تحقیق عددی حاضر، از روش مخلوط چندفازی استفاده شده و معادله رایلی جهت انتقال جرم در یک ساختار چندفازی به کار گرفته شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده سازگاری خوب بین نتایج عددی و تجربی بوده است. پس از مقایسه نتایج عددی و تجربی، اثر تزریق در جریان سوپر‌کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، تأثیر تزریق و سرعت جریان بر ابعاد ناحیه حباب، ضریب پسا و روابط بین آن‌ها مطالعه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی تزریق، مقدار نیروی پسا و ضریب پسا تا ۳۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین، در دبی تزریق ثابت، با کاهش عدد کاویتاسیون، طول و قطر ناحیه کاویتا به ترتیب تا ۷۷٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

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

از این جهت، پدیده سوپر‌کاویتاسیون بسیار مورد توجه محققین قرار دارد. در برخی از جریان‌های هیدرودینامیک،

پدیده کاویتاسیون و یا حباب‌زایی، در بسیاری از موضوعات کاربردی از جمله جریان عبوری از داخل پمپ‌ها، نازل‌ها و 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 شود [۲].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Farahat@hamoon.usb.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

۵. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

مدل در یک تونل آب با سرعت زیاد مورد آزمایش قرار دادند و پایداری ناحیه کاویتا و پارامترهای جریان، از جمله ضریب فشار، را در فرکانس‌های مختلف مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که در حرکت عرضی، مقدار فشار داخل کاویتا تقریباً ثابت است و نشان دادند که در اعداد کاویتاسیون مصنوعی و طبیعی برابر، مقدار طول کاویتا یکسان است. در این بین، ژانگ و همکاران [۵] پس از بررسی آزمایش کاواک‌ساز در تونل آب با حداکثر سرعت ۲۵ متر بر ثانیه، دریافتند که شکل و ابعاد حباب سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی در صورت تساوی عدد کاویتاسیون شباهت بسیاری دارد. ژو و همکاران [۶] تأثیر دیواره‌ی تونل آب را در جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی به صورت عددی مطالعه و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. آن‌ها از کاواک‌ساز با قطر ۱۰ میلی‌متر و در محدوده سرعت ۶ - ۹ متر بر ثانیه در نتایج تحقیق خود استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که با افزایش قطر تونل باد، قطر کاویتا افزایش می‌یابد و تأثیر دیواره بر شکل کاویتا کمتر می‌شود. بارباکا و همکاران [۷] جریان کاویتاسیون مصنوعی حول یک حصار در یک تونل آب با حداکثر سرعت ۱۲ متر بر ثانیه را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها طول کاویتا و نیروی پسا تحت نرخ تزریق‌های مختلف استخراج کردند. آنها دریافتند که با کاهش عدد کاویتاسیون مصنوعی، ضریب پسا به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند. جیانگ و لی [۸] آزمایش‌هایی را حول یک پرتابه در یک تونل آب انجام داده و پدیده کاویتاسیون مصنوعی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که با تزریق هوا، نیروی پسا شدیداً کاهش می‌یابد؛ به‌جز در حالتی که گذر از حالت کاویتاسیون اتفاق می‌افتد (مثلاً از کاویتاسیون جزء به سوپرکاویتاسیون) و با تزریق هوا توانستند نیروی پسا را تا ۸۰٪ کاهش دهند.

همچنین، تحلیل پدیده کاویتاسیون از روش‌های عددی مختلفی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. برنارد و همکاران [۹] جریان کاویتاسیون را روی یک هیدروفویل به صورت عددی با کمک نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها جهت انتقال جرم از معادلات رایلی استفاده نموده‌اند. چراغی و همکاران [۱۰] جریان سوپرکاویتاسیون را حول یک رونده زیرسطحی به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در بررسی عددی خود از روش حجم محدود و

کاویتاسیون با تشکیل حباب‌های کوچک در جریان‌های داخلی و یا خارجی توسعه یافته 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 کاویتاسیون رخ می‌دهد. حباب (حفره) ایجاد شده را کاویتا می‌نامند. حالتی از پدیده کاویتاسیون منجر به ایجاد یک حباب نسبتاً بزرگ با یک مرز پایدار و متمایز بین داخل حباب و جریان آب می‌گردد که به آن سوپرکاویتاسیون گویند.

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: (۱) افزایش شتاب بدنه و رسیدن به سرعت‌های زیاد، به عنوان مثال بیشتر از حدود ۴۵ متر بر ثانیه، برای متحرک‌های زیرسطحی در دریا، (۲) کاهش فشار محیط. البته این روش تنها در تونل‌های آب آزمایشگاهی مدار بسته قابل اجرا می‌باشد و (۳) افزایش فشار داخل حباب از طریق تزریق به حباب با گازهای نامحلول.

سوپرکاویتاسیون ایجاد شده از روش‌های اول و دوم یاد شده را "سوپرکاویتاسیون طبیعی" و سوپرکاویتاسیون ناشی از روش سوم را "سوپرکاویتاسیون هوادهی شده" یا "سوپرکاویتاسیون مصنوعی" می‌نامند. اندازه قطر و طول حباب ایجاد شده به فرم و منحنی کاواک‌ساز و سرعت حرکت بدنه بستگی دارد. یکی از عوامل ایجاد حباب سوپرکاویتاسیون، کاواک‌ساز است که به واسطه تغییر هندسه آن نرخ ایجاد کاویتاسیون و طول حباب سوپرکاویتاسیون تغییر می‌کند. تمایل به کاویته شدن با عدد بی‌بعد کاویتاسیون مشخص می‌شود که به صوت زیر محاسبه می‌گردد:

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

که در آن P و U به ترتیب فشار و سرعت مرجع، P_c فشار داخل حفره در حالت مصنوعی و ρ چگالی مایع است.

برخی محققین پدیده کاویتاسیون مصنوعی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. تعدادی آزمایش تجربی نیز برای کاویتاسیون همراه با هوادهی، روی بدنه‌های متقارن محوری انجام شده است. لی و همکاران [۴] پدیده سوپرکاویتاسیون مصنوعی را با وجود اثر حرکت عرضی

کاویته تحت جریان سرعت ثابت با دو الگوریتم نسبت حجمی و یانگ به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحلیل خود دریافته‌اند که الگوریتم یانگ از دقت بیشتری نسبت به روش نسبت حجمی برخوردار است. اثر تغییرات عدد کاویتاسیون مصنوعی بر نیروی پسا و شکل کاویته به صورت عددی توسط جیا و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافته‌اند که در صورتی که نسبت ضخامت کاویته به قطر کاواک‌ساز برابر 0.2 باشد کمترین نیروی پسا را به همراه دارد. جی و همکاران [۱۸] نیز پدیده سوپرکاویتاسیون مصنوعی حول روندهای زیرسطحی را تحت نرخ‌های مختلف تزریق به صورت عددی و تجربی بررسی نموده‌اند. آن‌ها در نتایج خود دریافته‌اند که با افزایش نرخ تزریق، طول و قطر کاویته افزایش می‌یابد. زو و همکاران [۱۹] پدیده سوپرکاویتاسیون مصنوعی را به صورت گذرا مورد بررسی عددی قرار دادند. آن‌ها تأثیر تغییرات نرخ تزریق را بر پارامترهای کاویتاسیون و جریان (عدد کاویتاسیون، ضریب پسا و ...) مورد مطالعه قرار دادند. در میان تحقیقات انجام شده تاکنون، محققین آزمایش‌هایی جهت بررسی اثر نرخ تزریق بر شکل کاویته [۱۲] و یا بر نیروی پسا [۱۷] انجام داده‌اند. همچنین، برخی محققین به مطالعه عددی اثر نرخ تزریق بر شکل کاویته و نیروی پسا تحت سرعت ثابت جریان [۱۲، ۱۶ و ۱۸] پرداختند. اما در این تحقیق، اثر تزریق بر شکل کاویته و نیروی پسا تحت سرعت‌های مختلف جریان در محدوده ۱۴ تا ۲۲ متر بر ثانیه به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، ابتدا کاواک‌ساز 30 درجه در یک تونل آب شبه‌مدار باز آزمایش شد و جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی مطالعه گردید. در مرحله بعد، جریان حول کاواک‌ساز در شرایط مشابه با شرایط آزمایش مورد تحلیل و شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. در این مرحله، پس از انتخاب شبکه‌بندی مناسب، نتایج عددی لازم استخراج گردید. در پایان، علاوه بر مقایسه نتایج تجربی و عددی، اثر تزریق جریان هوا بر ابعاد کاویته و ضریب پسا مورد تحلیل قرار گرفت.

۲- ساخت افزار آزمایشگاهی

۲-۱- تونل آب

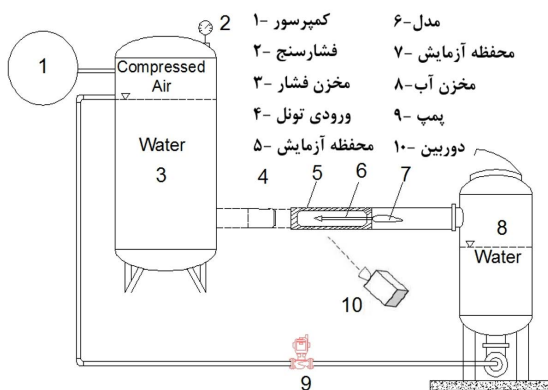
شماتیکی از اجزای تونل آب شبه‌مدار باز مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. سرعت ماکزیمم آب عبوری از

مدل مخلوط چندفازی برای تحلیل جریان استفاده نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند که در اعداد کاویتاسیون برابر، کاویته سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی از نظر ابعاد برابر است. سالاری و همکاران [۱۱] شکل کاویته حاصل از جریان سوپرکاویتاسیون طبیعی را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. آن‌ها در تحلیل عددی خود از نرم‌افزار CFX و در استخراج نتایج تجربی از تونل آب سرعت زیاد استفاده نموده‌اند. رشیدی و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و تجربی شکل کاویته جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی پرداختند. آن‌ها در تحلیل عددی از نرم‌افزار فلوئنت و در تحلیل تجربی از تونل آب با حداکثر سرعت 10 متر بر ثانیه استفاده نمودند و دریافته‌اند که با افزایش نرخ تزریق، طول کاویته افزایش می‌یابد.

در زمینه سوپرکاویتاسیون، بررسی‌های عددی در جریان‌های سوپرکاویتاسیون برای پیش‌بینی عددی این پدیده انجام گرفته و محققین از مدل‌های اغتشاش متفاوتی استفاده نموده‌اند. برخی محققین از روش $k - \varepsilon$ در استخراج نتایج خود کمک گرفته‌اند و برخی مدل اغتشاش $k - \varepsilon$ - realizable ، $k - \omega$ - SST ، $k - \varepsilon$ - و RNG [۱۱] را مناسب دانسته‌اند. پدیده کاویتاسیون روی یک هیدروفویل با استفاده از مدل اغتشاش $k - \omega$ - SST با کمک نرم‌افزار فلوئنت توسط لی و همکاران [۱۳] شبیه‌سازی شد. روحی و همکاران [۱۴] با استفاده از روش حجم سیال VOF و مدل اغتشاش LES جریان روی هیدروفویل را به صورت دو بعدی مورد تحلیل عددی قرار دادند. آن‌ها در مدل‌سازی انتقال جرم در جریان سوپرکاویتاسیون، مدل کونز را پیشنهاد نمودند. پارک و رهی [۱۵] پس از بررسی دوبعدی جریان سوپرکاویتاسیون حول دو کاواک‌ساز مخروطی 45 و 15 درجه دریافته‌اند که مدل اغتشاش $k - \varepsilon$ و مدل انتقال جرم سیگنهایل دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی و تئوری دارد.

برخی محققین به مطالعه نرخ تزریق روی پارامترهای سوپرکاویتاسیون مصنوعی پرداختند [۱۲، ۱۶ - ۱۹]. گو و همکاران [۱۶] به بررسی عددی اثر نرخ تزریق بر ضریب پسا در اعداد کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی مختلف پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش حجم محدود، کار عددی خود را دنبال کردند و دریافته‌اند که در اعداد کاویتاسیون طبیعی ثابت، با افزایش نرخ تزریق، ضریب پسا کاهش می‌یابد. رشیدی و همکاران [۱۲] اثر نرخ تزریق بر شکل

سه فشارسنج دیگر در نوک کاواک‌ساز، روی مقطع آزمون و مخزن استوانه‌ای ایجاد شده و به صورت همزمان فشار لحظه‌ای آنها نیز ثبت می‌گردد. سیم‌های فشارسنج‌های مذکور به وسیله لوله‌های استیل ۰/۷ میلی‌متری، از قسمت انتهایی بدنه استوانه‌ای خارج شده و به سنسور فشار مربوطه متصل می‌شود.



شکل ۱: شماتیک تونل آب مدار باز (شکل بدون مقیاس است)



شکل ۲: نمایی از مقطع آزمون و وضعیت قرارگیری مدل

در آزمایش‌های تجربی در تونل‌های آب، چنانچه فاصله دیواره‌های تونل از بدنه مدل از حد معینی کمتر باشد تأثیرات دیواره بر طول و شکل حباب کاویتا قابل ملاحظه خواهد بود. برای این منظور، چنانچه بخواهیم تأثیرات دیواره بر شکل و طول حباب ناچیز باشد می‌بایست عدد کاویتاسیون جریان مورد مطالعه از عدد کاویتاسیون انسداد جریان (ضریب انسداد) بیشتر باشد. مقدار ضریب انسداد جریان با استفاده از معادله بقای جرم و معادله برنولی با کمک رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\text{blockage}} = \frac{S_u^2}{S_d^2} - 1 \quad (2)$$

در این معادله، S_u و S_d به ترتیب نشان‌دهنده سطح مقطع جریان در بالادست و پایین‌دست مدل می‌باشند. نتایج تجربی مختلف نشان داده که با کاهش هر چه بیشتر عدد کاویتاسیون، طول حباب کاویتا نیز بزرگتر می‌شود. تا

مقطع آزمون این تونل آب تا ۴۰ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. این تونل از این منظر به صورت مدار باز طراحی شده است که بتواند به سرعت‌های زیاد 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 روی آن هوای تحت فشار با فشار معینی تزریق می‌گردد. 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 است. جنس بدنه آن از پلکسی-گلاس با صافی سطح بسیار بالا انتخاب شده است (شکل (۲)). پس از انجام هر آزمایش، مقداری آب در مخزن جمع-آوری می‌شود و سپس در آزمایش‌های بعدی مجدداً از طریق پمپ به مخزن تحت فشار پمپاژ می‌شود. چون آب خارج شده در مخزن به محیطی با شرایط استاندارد هوای آزاد تخلیه می‌گردد، به این تونل، تونل آب با مدار باز گفته می‌شود. در این مخزن، برای خروج آب از یک شیر کروی (تویی) بین مخزن و مقطع آزمون استفاده شده است. مکانیزم داخلی این نوع شیر به گونه‌ای است که پس از باز شدن آن، هیچ مانع و زائده‌ای در مسیر عبوری جریان داخل لوله وجود نداشته و آب به صورت یکنواخت وارد مقطع آزمون می‌شود. شیر به کار رفته طوری ساخته شده که با محفظه آزمایش به صورت یکپارچه و بدون رزوه به کار رفته است.

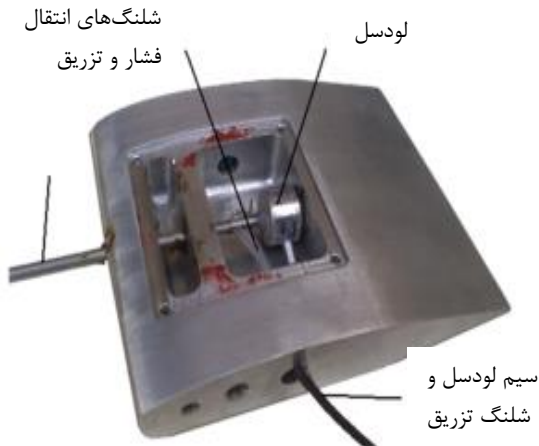
۲-۲- هندسه مقطع آزمون و کاواک‌ساز

مقطع آزمون به صورت استوانه‌ای بوده که دارای قطر داخلی D و طولی برابر با $8D$ می‌باشد. جنس بدنه آن از پلکسی-گلاس با صافی سطح بسیار بالا انتخاب شده است (شکل (۲)). مدل نصب شده دارای یک کاواک‌ساز با قطر ۱۰ میلی‌متر است که به یک بدنه استوانه‌ای متصل شده است. روی سطح بدنه استوانه‌ای سوراخ‌هایی برای اندازه‌گیری فشار تعبیه شده است و انتهای آن به مجموعه نیروسنج که در خارج از مقطع آزمون قرار می‌گیرد متصل شده است. قطر مقطع آزمون برابر ۵ سانتی‌متر است.

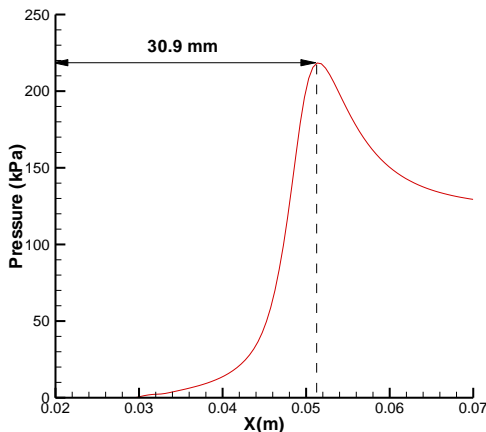
۳-۲- تجهیزات اندازه‌گیری

فشارسنج‌ها روی بدنه استوانه‌ای مدل در چهار موقعیت با فاصله ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر تعبیه شده است. همچنین،

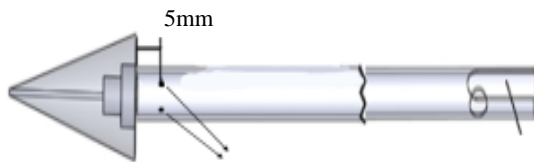
دبی هوای تزریق شده برابر با 0.0851 لیتر بر ثانیه می‌باشد. برای محاسبه دبی هوای تزریق شده، از یک قطعه ونتوری شکل در مسیر جریان هوا استفاده شده و از اختلاف فشار ایجاد شده در مسیر ورود هوا، میزان دبی عبوری هوا اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳: نمایی از ایرفویل نگهدارنده مدل، لودسل و شلنگ تزریق



شکل ۴: تغییرات فشار روی بدنه مدل کاواک‌ساز 30° درجه



چهار سوراخ جهت تزریق اطراف

شکل ۵: محل تزریق چهار سوراخ اطراف بدنه با تغییر زاویه 90° درجه نسبت به هم

۳-۲- واسنجی سنسورها و اعتبارسنجی

تمامی سنسورهای فشارسنج و نیروسنج به کار رفته در این آزمایش‌ها در یک آزمایشگاه مرجع واسنجی شده‌اند.

اینکه در عدد کاویتاسیونی برابر و یا کمتر از ضریب انسداد جریان و در شرایطی که مقدار فشار کاویتا کمتر از فشار محیط باشد طول حباب بسیار بزرگ و از نظر تئوری به سمت بینهایت میل خواهد نمود [۲۰]. اکثر پرتابه‌های زیرسطحی دارای کاواک‌ساز تخت می‌باشند و کاواک‌ساز مخروطی و نیمه‌کروی در تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه در این تحقیق، کاواک‌ساز تخت در جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به رابطه (۲) و سطح جریان پایین‌دست کاویتاسیون مصنوعی حول کاواک‌ساز تخت، مقدار عدد کاویتاسیون انسداد با مینیمم عدد کاویتاسیون جریان اختلاف کمی دارند و باعث افزایش درصد خطا می‌شود. بنابراین، جهت کاهش درصد خطا در نتایج آزمایش‌ها از کاواک‌ساز مخروطی استفاده شده است.

در این تحقیق، طبق رابطه (۲)، در بیشترین سرعت آزمایش، مقدار عدد کاویتاسیون انسداد 0.211 می‌باشد و مقدار کمترین عدد کاویتاسیون برابر 0.37 می‌باشد. چون مقدار عدد کاویتاسیون آزمایش از عدد کاویتاسیون انسداد بیشتر است، بنابراین تأثیرات دیواره تونل آب بر نتایج را می‌توان نادیده گرفت.

۳- آزمایش‌ها

۳-۱- روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها روی یک دماغه مخروطی 30° درجه انجام شده است. طول و قطر کاویتا، توزیع فشار لحظه‌ای و نیروی پسا اندازه‌گیری شده است. مقدار نیروی پسا توسط یک لودسل اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). همچنین، برای اندازه‌گیری قطر و طول حباب سوپرکاویتاسیون، از یک دوربین فیلم برداری با سرعت 600 فریم بر ثانیه و توزیع فشار روی بدنه کاواک‌ساز استفاده شده است. به طوری که مطابق شکل (۴)، هنگامی که حباب کاویتا بسته می‌شود فشار در آن نقطه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. روی کاواک‌ساز مخروطی 30° درجه، آزمایش‌هایی به منظور تأثیر هوادهی بر نیروی پسا و اندازه هندسی حباب سوپرکاویتاسیون انجام گردید. آزمایش‌ها در محدوده سرعت 14 تا 22 متر بر ثانیه انجام شده است. به منظور تزریق هوا به داخل کاویتا، چهار سوراخ مطابق شکل (۵) در چهار طرف بدنه استوانه‌ای و به فاصله 5 میلی‌متر از قاعده کاواک‌ساز تعبیه شده است.

جدول ۱- تکرار نتایج آزمایشگاهی

V (m/s)	Fd (N)	L/d
۲۱/۹۴	۴/۰۷	۶
۲۱/۹۷	۴/۰۹	۵/۹
۲۱/۹۹	۴/۱	۶
۲۲/۰۲	۴/۱۵	۶/۱
۲۱/۹۹	۴/۱۶	۶
۲۲/۱۳	۴/۱۷	۶/۲
۲۲/۱۷	۴/۲	۶/۱
۲۲/۱۹	۴/۲۲	۶
۲۲/۱۷	۴/۲۱	۶
۲۲/۱۶	۴/۲۲	۶/۱

کلیه آزمایش‌های مرتبط با این تحقیق در مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه جامع امام حسین (ع) انجام شده است.

۴- معادلات حاکم

در تحلیل عددی سه بعدی مسئله، معادلات حاکم بر مسئله، معادلات پیوستگی و مومنتم (۳ و ۴) می‌باشند. همچنین، جهت محاسبه کسر حجمی مایع و گاز، معادلات بقای جرم فاز بخار آب و هوا (روابط ۵ و ۶) استفاده شده‌اند.

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

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

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

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

در معادلات فوق، u_i تصویر بردار سرعت مخلوط در جهت i را نشان می‌دهد. همچنین، چگالی، ویسکوزیته دینامیک، ویسکوزیته مغشوش مخلوط به صورت روابط (۷) تا (۹) بیان شده‌اند:

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g$$

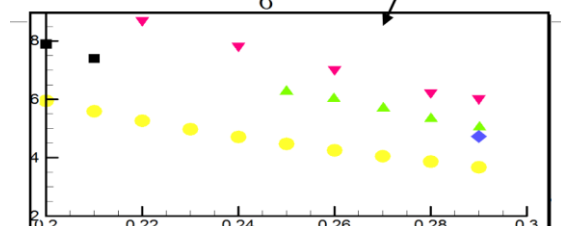
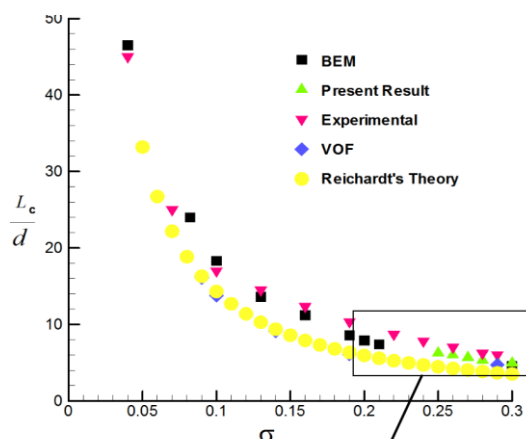
$$\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \alpha_g \mu_g$$

$$\mu_t = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\varepsilon}$$

زیرنویس‌های L ، V ، g و m به ترتیب مربوط به فاز مایع، بخار، گاز و مخلوط می‌باشند. در روابط فوق، پارامترهای

خروجی این سنسورها به صورت توابع خطی بوده که این خود پیچیدگی‌های واسنجی را کاهش داده است. این بدان معنی است که سیگنال خروجی هر سنسور بر حسب میلی ولت را می‌توان به صورت یک رابطه خطی به مقدار کمیت اندازه‌گیری مورد نظر ارتباط داد.

پس از انجام آزمایش‌ها روی کاواک‌سازهای 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 روی یک دیسک تخت، مطابق با شرایط آزمایش‌های فرانک و میشل [۱۵] و تحقیق ریچاردسون برقرار شد و سپس اندازه‌گیری‌های تجربی مرتبط انجام گردید. در شکل (۶)، نتایج حاصل از این تحقیق برای نسبت طول کاویتا به قطر دیسک تخت بر حسب تغییرات عدد کاویتاسیون جریان با داده‌های تجربی میشل و ریچاردسون و نتایج سایر روش‌های عددی مقایسه گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده تطابق خوبی با داده‌های تجربی میشل و دیگر نتایج دارد. جهت اطمینان از نتایج آزمایشگاهی، هر آزمایشی به طور متوسط ۱۰ بار انجام می‌گرفت و در پایان، میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی ثبت می‌شد. به عنوان مثال، در جدول ۱، نتایج تکرار آزمایش‌ها در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه آورده شده است.



شکل ۶: مقایسه نتایج تحقیق حاضر برای کاواک‌ساز دیسکی با دیگر نتایج [۲۰]

استفاده نموده‌اند. مدل نسبت حجمی برای جریان دو یا چند سیال بدون اختلاط با یکدیگر در شرایطی که تعیین سطح مشترک بین دو سیال آسان است، مناسب می‌باشد. مدل مخلوط سیال‌های مختلف امکان حرکت با سرعت‌های متفاوت و نفوذ در یکدیگر را دارند. همچنین، در این مدل، اندرکنش انتقال جرم درونی و اندازه حرکت لحاظ شده است. در تحقیق حاضر، با توجه به کارهای انجام شده قبلی، ابتدا هر دو مدل مخلوط و نسبت حجمی (VOF) استفاده و نتایج بررسی گردید. نتایج طبق جدول ۲ نشان می‌دهد که دقت دو مدل تفاوت چشمگیری ندارند. اما زمان محاسبات مدل مخلوط نسبت به مدل نسبت حجمی ۱۲۵٪ کمتر است. بنابراین، مدل مخلوط جهت ادامه کار انتخاب شد. محاسبات در سیستمی با پردازشگر سه هسته‌ای ۱/۸ گیگاهرتز و حافظه جانبی ۴ گیگابایت انجام شده است.

جدول ۲- نتایج و زمان محاسبات برای مدل‌های چندفازی مخلوط و نسبت حجمی

نوع مدل	مقدار نیروی پسا	زمان همگرایی(ساعت)
مخلوط	۴	۴
نسبت حجمی	۴/۲	۹

شبیه‌سازی انتقال جرم مدل‌های متفاوتی وجود دارد. در تحقیق حاضر از مدل سینگال [۲۳] استفاده شده است. عبارت‌های چشمه در معادله (۵) به ترتیب نشان‌دهنده فرایند تبخیر (رشد حباب) و تقطیر (نابودی حباب) می‌باشند. عبارت‌های چشمه از معادله رایلی-پلاست استخراج شده است [۲۳] و به صورت زیر بیان می‌شود:

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

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

۵- روش حل عددی

برخی از کدهای تجاری موجود، قابلیت تحلیل پدیده کاویتاسیون را دارند. در تحقیق حاضر، از کد تجاری سی اف ایکس استفاده شده است. این کد، معادلات متوسط-گیری ناویر-استوکس را با استفاده از روش حجم محدود حل می‌کند. روش حجم محدود، از شکل انتگرالی معادلات بقا استفاده می‌کند.

شکل (۷) شرایط مرزی مسئله را نشان می‌دهد. در مرز

α, m^+, m^-, P, u به ترتیب نمایانگر سرعت، فشار، نرخ تبخیر، نرخ تقطیر و درصد حجمی فاز می‌باشند.

۴-۱- مدل توربولانسی

برای مدل نمودن اثرات توربولانسی در جریان و پدیده کاویتاسیون، از مدل توربولانسی $k - \omega - SST$ استفاده شده است. مدل $k - \omega$ یک مدل نسبتاً کامل و عمومی می‌باشد که برای تشریح آشفتگی به کار می‌رود. در این مدل، دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی آشفته، $k (m^2/s^2)$ و دیگری برای نرخ جدایش ω حل می‌شود. برخی محققین، جهت شبیه‌سازی پدیده سوپرکاویتاسیون مدل اغتشاش $k - \varepsilon$ [۹] و برخی مدل اغتشاش SST [۶، ۱۳، ۲۱ و ۲۲] را مناسب دانسته‌اند. با توجه به نکات زیر، در روش عددی این تحقیق از مدل اغتشاش SST استفاده شده است.

(۱) اکثر محققین، از جمله، لی و همکاران [۱۳]، یو و همکاران [۲۱] و شانگ [۲۲]، از مدل اغتشاش SST جهت شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون استفاده نموده‌اند.

(۲) مدل SST در مقایسه با دیگر مدل‌های اغتشاش از دقت و اطمینان بیشتری برای گستره زیادی از جریان‌ها، به‌ویژه جریان‌های با گرادیان فشار مخالف، جدایش جریان، جریان روی ایرفویل و شوک‌های گذر صوت، برخوردار است.

در مدل SST ، معادلات انتقال به صورت زیر بیان می‌شوند:

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

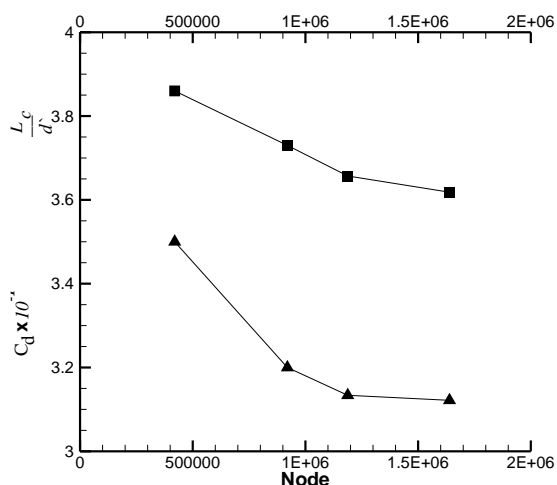
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (11)$$

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 $Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2$ عبارت‌های اتلاف دو معادله می‌باشند.

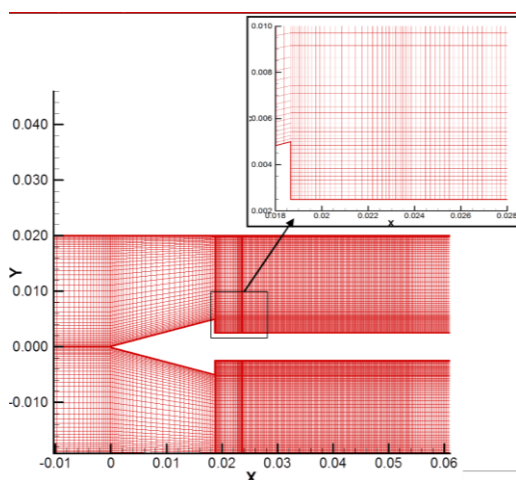
۴-۲- انتقال جرم

در جریان‌های کاویتاسیونی، گرادیان‌های شدید چگالی و لزجت در سطوح مشترک بین سیال‌ها به وجود می‌آید. برای شبیه‌سازی این گونه جریان‌ها، دو مدل مخلوط و نسبت حجمی کارایی دارند. برخی محققین از مدل نسبت حجمی [۱۲ و ۱۴] و برخی از مدل مخلوط [۱۰، ۱۱، ۱۸ و ۲۲]

مشاهده می‌شود، هوای تزریق شده از انتهای کاویتای خارج می‌شود که این عمل باعث نوسانات کوچکی روی سطح انتهایی کاویتای می‌شود و با افزایش سرعت، این نوسانات شدت می‌یابد، تا زمانی که باعث می‌شود انتهای کاویتای کاملاً باز شود.



شکل ۸: تغییرات ضریب پسا و نسبت طول کاویتای به قطر کاواک‌ساز در شبکه‌های مختلف جریان



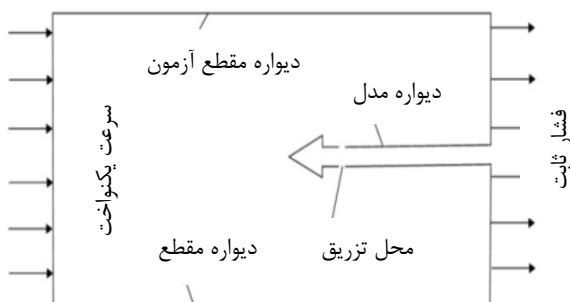
شکل ۹: نمای دوبعدی از شبکه‌بندی حل مسئله کاواک‌ساز

در داخل ناحیه کاویتای (پشت کاواک‌ساز) مقدار فشار ثابت است و این مقدار فشار در راستای طول بدنه افزایش می‌یابد و در موقعیتی از بدنه که مقدار فشار به ماکزیمم خود برسد، حباب کاویتای بسته می‌شود و بدین ترتیب طول ناحیه کاویتای به دست می‌آید.

شکل (۱۱) تغییرات طول ناحیه کاویتای را نسبت به عدد کاویتاسیون و عدد رینولدز نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، یا به عبارت دیگر افزایش سرعت جریان، مقدار طول ناحیه کاویتای افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان

ورودی مؤلفه‌های سرعت، کسر حجمی و پارامترهای توربولانسی تعیین شده‌اند و در مرز خروجی فشار استاتیک تنظیم شده است و شرط تزریق جریان به صورت دبی ثابت و کسر حجمی گاز برابر 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 به طور یکسان مدل شده است.

در این بخش، کاواک‌ساز و تونل آب به صورت سه‌بعدی مدل می‌شود و چهار شبکه حل با تعداد ۴۲۰۰۰۰، ۹۲۰۰۰۰، ۱۱۸۰۰۰۰ و ۱۶۵۲۰۰۰ المان چهار وجهی برای میدان حل تولید شده است. پس از بررسی انجام شده و مقایسه نتایج چهار شبکه با نتایج تجربی، مشخص گردید که نتایج دو شبکه ۹۲۰۰۰۰ و ۱۱۸۰۰۰۰ اختلاف چندانی ندارند (شکل (۸)). بدین ترتیب، با توجه به اختلاف ناچیز نتایج، شبکه با المان کمتر (۹۲۰۰۰۰ سلول) به عنوان شبکه مطلوب برای ادامه محاسبات انتخاب شده است. همچنین، برای اطمینان از کیفیت مناسب شبکه، پارامترهای وای پلاس مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۹)، شبکه نزدیک کاواک‌ساز را نشان می‌دهد که در پشت کاواک‌ساز و محل تزریق از شبکه ریزتری نسبت به دیگر فضاهای شبکه استفاده شده است.



شکل ۷: نمای دوبعدی از هندسه و شرایط مرزی مسئله

۶- ارائه و تحلیل نتایج

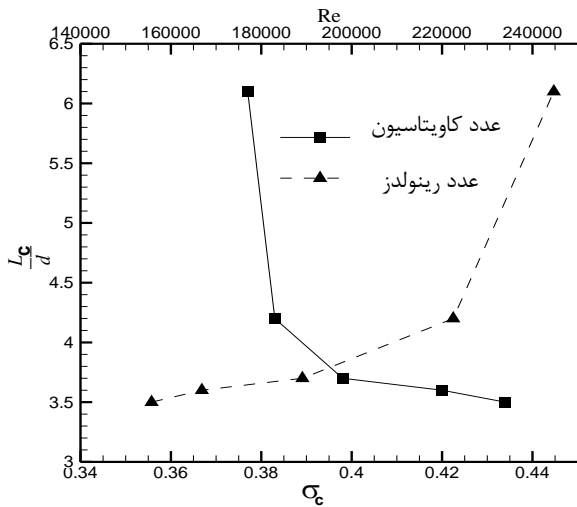
در این تحقیق، محفظه آزمایش و کاواک‌ساز بر اساس شرایط مرزی به صورت سه‌بعدی مدل، شبکه‌بندی و سپس مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، مشخصه‌های جریان سوپرکاویتاسیون در دو بخش شکل حباب کاویتای ضریب پسا ارائه شده است.

۶-۱- شکل حباب

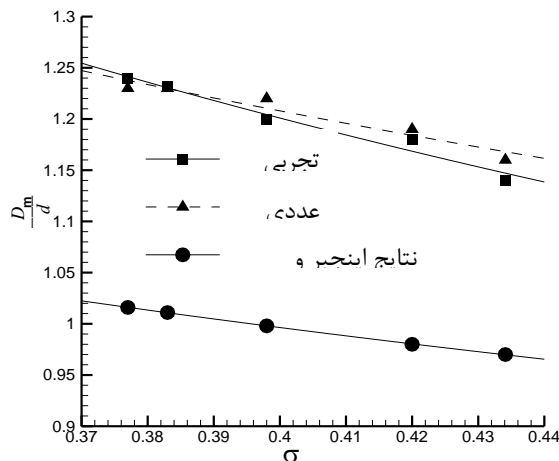
وضعیت هندسی حباب ایجاد شده در سرعت‌های مختلف در شکل (۱۰) ارائه شده است. همانطور که در این شکل

کاواک‌ساز را نشان می‌دهد. با کاهش عدد کایوتاسیون، مقدار قطر کایوتی افزایش می‌یابد. اما در کل، این افزایش قطر کایوتی در محدوده سرعت محسوس نیست. به طوری که در این محدوده سرعت تغییرات قطر کایوتی حدود یک میلی‌متر می‌باشد.

مقایسه نتایج عددی و تجربی حاضر با نتایج اینگبر و هیلی [۲۴] نشان می‌دهد که کیفیت تغییر رفتار منحنی تقریباً با نتایج حاضر یکسان است و علت تفاوت در نتایج به دلیل محدودیت رابطه (۱۴) می‌باشد که در محدوده $0.05 < \sigma < 0.25$ ارائه شده است.



شکل ۱۱: تغییرات نسبت طول کایوتی به قطر کاواک‌ساز به عدد کایوتاسیون و عدد رینولدز

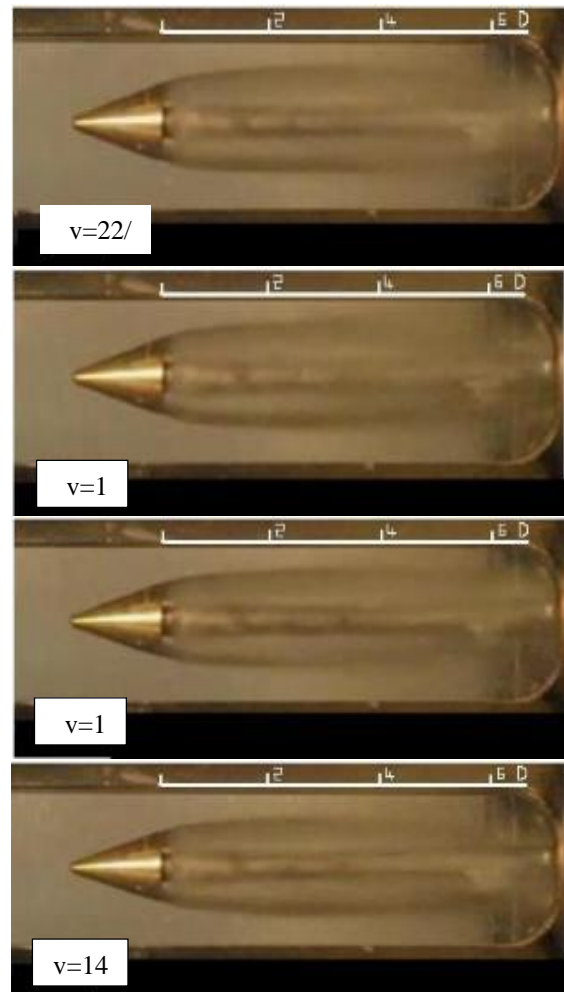


شکل ۱۲: تغییرات نسبت قطر کایوتی به قطر کاواک‌ساز به عدد کایوتاسیون

شکل (۱۳) تغییرات نیروی پسا را نسبت به عدد کایوتاسیون به صورت عددی و تجربی نشان می‌دهد. با افزایش عدد کایوتاسیون، مقدار نیروی پسا تقریباً با شیب

می‌دهد که تغییرات طول کایوتی با عدد کایوتاسیون به صورت خطی نیست و این مطلب در رابطه تئوری ریچارد [۲۰] نیز مشخص گردیده است.

با توجه به اینکه روش سوپر کایوتاسیون مصنوعی روشی مناسب و کم‌هزینه جهت افزایش طول کایوتی است، نتایج مشخص می‌کند که در اعداد کایوتاسیون بیشتر از 0.4 طول کایوتی افزایش چشمگیری ندارد و در محدوده $\sigma > 0.4$ مناسب است از روش‌های مؤثر دیگری جهت افزایش طول کایوتی استفاده شود.



شکل ۱۰: کایوتی حاصل از دماغه مخروطی ۳۰ درجه در سوپر کایوتاسیون مصنوعی

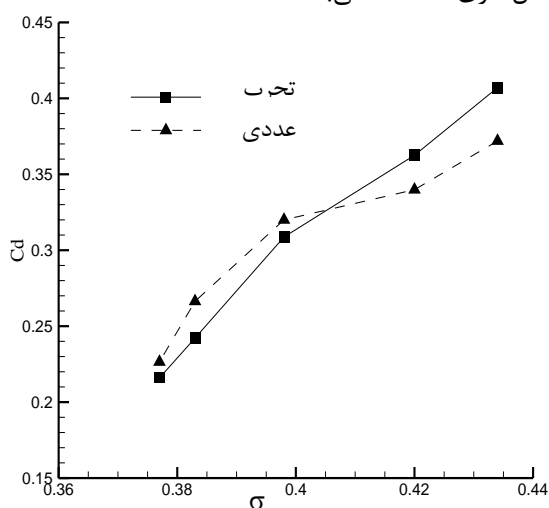
اینگبر و هیلی [۲۴] یک رابطه تجربی برای قطر کایوتی در اعداد کایوتاسیون کوچک ارائه نمودند (رابطه (۱۴)):

$$\frac{D_m}{d} = \sqrt{\frac{C_{D0}(1 + \sigma)}{\sigma}} \quad (14)$$

که C_{D0} ضریب پسا در عدد کایوتاسیون صفر است. شکل (۱۲) نتایج تجربی و عددی نسبت قطر کایوتی به قطر

نشان می‌دهد. بررسی نتایج بیانگر این موضوع است که با افزایش عدد کاویتاسیون، مقدار نیروی پسا کاهش و ضریب پسا افزایش می‌یابد.

اختلاف نتایج در سرعت‌های ۱۴ و ۱۵ متر بر ثانیه در شکل-های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) دو دلیل دارد. دلیل اول، کاهش سرعت و تأثیر عدد فرود بر جریان است که باعث می‌شود شکل کاویتا به صورت متقارن نباشد و این موضوع اندازه‌گیری طول و قطر حباب را با خطا مواجه می‌کند. دومین دلیل، وجود پدیده کاویتاسیون جزئی در این دو سرعت کم می‌باشد. به صورت کلی، مقایسه نتایج، دقت رضایت‌بخشی را به دنبال دارد و این اختلاف ناشی از تفاوت شرایط جریان و خواص سیال از جمله چگالی و فشار تبخیر آب در روش عددی و تجربی و همچنین توانمندی‌های مدل‌سازی معادلات می‌باشد.



شکل ۱۴: نتایج تجربی و عددی نیروی پسا نسبت به عدد کاویتاسیون در سرعت‌های مختلف

۲-۶- تزریق هوا

پس از بررسی و مقایسه نتایج تجربی و عددی سوپرکاویتاسیون مصنوعی با نرخ تزریق ۰/۰۸۵۱ لیتر بر ثانیه، در این قسمت تأثیر تزریق هوا بر ضریب پسا و ابعاد ناحیه کاویتا مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی و تحلیل عددی در چهار نرخ تزریق و پنج سرعت مختلف جریان انجام شده است.

جهت بررسی اثر تزریق بر پارامترهای کاویتاسیون مصنوعی، از پارامتر بی‌بعد ضریب نرخ تزریق طبق رابطه (۱۷) استفاده شده است.

$$Cq = \frac{Q}{U_{\infty} d^2} \quad (17)$$

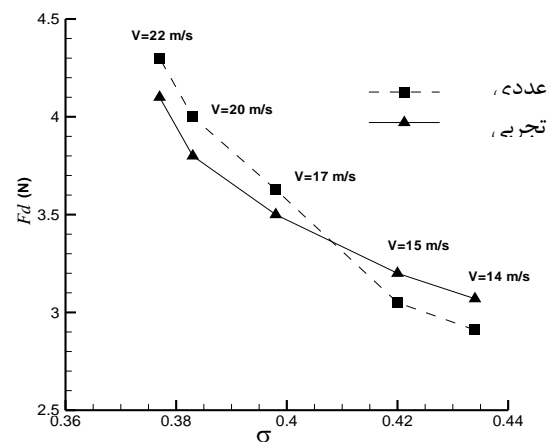
ثابتی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، نتایج نشان می‌دهد که نیروی پسا و ضریب پسا با عدد کاویتاسیون به صورت خطی تغییر می‌کنند. همچنین، فرانک و میشل [۲۰] برای کاواک‌سازهای مخروطی و در محدوده $0 < \sigma < 0.12$ رابطه (۱۵) را برای ضریب پسا ارائه نمودند. رابطه (۱۵) مشخص می‌کند که تغییرات ضریب پسا و عدد کاویتاسیون به صورت خطی است.

$$C_D = C_{D0}(1 + \sigma) \quad (15)$$

همچنین، مقایسه نتایج در شکل (۱۳)، دقت رضایت‌بخشی را به دنبال دارد و این اختلاف ناشی از این موضوع است که مدل کردن تزریق در نرم‌افزار به صورت یک حلقه در نظر گرفته شده است. ولی در آزمایش، عمل تزریق توسط چهار سوراخ تعبیه شده روی بدنه انجام می‌شود.

نیروی پسا که شامل پسای اصطکاکی و فشاری می‌شود در نتایج روندی کاهشی دارد. از طرفی، همواره فشار در داخل کاویتا در تمامی سرعت‌ها تقریباً ثابت است. ولی فشار روی قسمت نوک کاواک‌ساز با کاهش سرعت افزایش می‌یابد. به این ترتیب، مقدار نیروی پسا فشاری نیز افزایش یافته است. همچنین، با کاهش سرعت، مقدار نیروی پسای اصطکاکی کاهش یافته، که در مجموع مقدار نیروی پسای کل کاهش می‌یابد. بنابراین، با کاهش سرعت، مقدار نیروی پسای کل کاهش می‌یابد. اما تغییرات مجذور سرعت بسیار بیشتر است که طبق رابطه (۱۶) باعث افزایش ضریب پسا می‌شود.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (16)$$



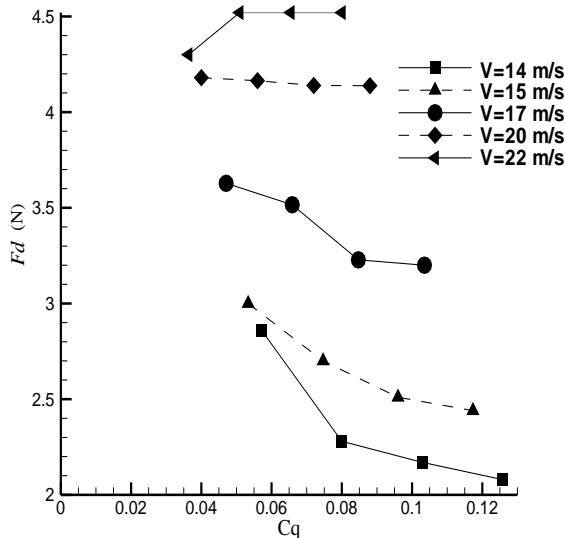
شکل ۱۳: نتایج تجربی و عددی نیروی پسا نسبت به عدد کاویتاسیون در سرعت‌های مختلف

شکل (۱۴) نتایج ضریب پسا نسبت به عدد کاویتاسیون را

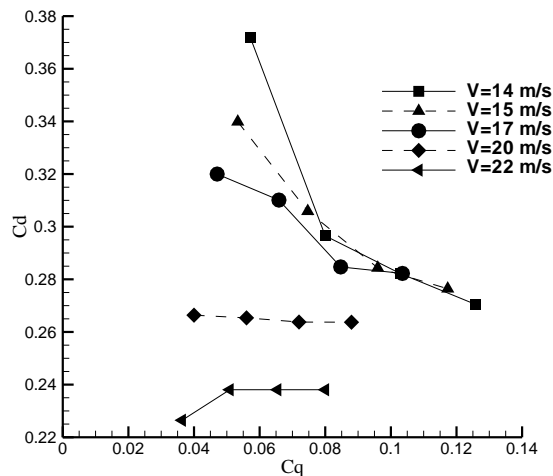
خطی نمی‌باشد.

همچنین، بررسی نتایج نشان می‌دهد که تغییرات طول کاویتی بر حسب نرخ تزریق جریان، در سرعت‌های مختلف جریان از شیب یکسانی برخوردار است (شکل (۱۷)). در سرعت‌های کم، تغییرات طول ناحیه کاویتی با افزایش سرعت محسوس نیست و در سرعت‌های ۲۰ و ۲۲ متر بر ثانیه، تغییرات طول ناحیه کاویتی نسبت به دیگر سرعت‌ها به شدت افزایش می‌یابد.

تغییرات قطر کاویتی نسبت به نرخ تزریق در سرعت‌های متفاوت در شکل (۱۸) نشان داده شده است. افزایش نرخ تزریق، به جز در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه، تأثیرات چشمگیری روی قطر کاویتی ندارد. در کمترین نرخ تزریق، افزایش سرعت جریان تأثیری بر قطر کاویتی ندارد.



شکل ۱۵: تغییرات نرخ تزریق بر نیروی پسا در سرعت‌های مختلف



شکل ۱۶: تغییرات نرخ تزریق بر ضریب پسا در سرعت‌های مختلف

مقدار نیروی پسا در نرخ‌های مختلف تزریق و سرعت‌های متفاوت در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۱۶) مشخص است، با افزایش نرخ تزریق، نیروی پسا و ضریب پسا کاهش می‌یابند. اما در نرخ تزریق یکسان، با افزایش سرعت جریان، مقدار نیروی پسا افزایش و ضریب پسا کاهش می‌یابد. همچنین، در سرعت‌های زیاد، با افزایش نرخ تزریق جریان، مقدار نیروی پسا و ضریب پسا تقریباً ثابت است. بنابراین، می‌توان گفت افزایش نرخ تزریق در سرعت‌های زیاد تأثیر چشمگیری روی کاهش نیروی پسا و ضریب پسا به همراه ندارد. به عبارت دیگر، طراح پرتابه زیرسطحی لزومی ندارد مخزن بزرگ هوا را جهت افزایش نرخ تزریق در داخل پرتابه تعبیه کند؛ چرا که در سرعت‌های زیاد، این مخزن باعث افزایش وزن خود پرتابه می‌شود و برد آن را کاهش می‌دهد و طراح می‌تواند با مخزن هوای کوچکتر همان درصد کاهش نیروی پسا و ضریب پسا را برای پرتابه زیرسطحی ایجاد کند.

شکل (۱۶) اثر تزریق را بر ضریب پسا در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ تزریق، مقدار ضریب پسا کاهش می‌یابد. البته در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه مقدار نیروی پسا و ضریب پسا ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شبیه این رفتار توسط جیا و همکاران [۱۷] ارائه شده است. آنها در مطالعه خود نشان دادند که در محدوده $0.1 < \sigma < 0.32$ مقدار ضریب پسا ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند. چرا که با کاهش عدد کاویتاسیون مقدار ضریب پسای فشاری کاهش و ضریب پسای اصطکاکی افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان، نرخ تغییرات ضریب پسا کاهش می‌یابد و این موضوع بیانگر این مطلب است که در سرعت‌های زیاد افزایش نرخ تزریق در سوپر کاویتاسیون مصنوعی تغییرات کمی بر ضریب پسا به همراه دارد. همچنین، با افزایش سرعت جریان، شیب تغییرات نیروی پسا و ضریب پسا بر حسب نرخ تزریق جریان کاهش می‌یابد. به طوری که در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه نرخ تغییرات ضریب پسا تقریباً صفر می‌شود.

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که در سرعت‌های متفاوت، با افزایش نرخ تزریق، طول ناحیه کاویتی به صورت خطی افزایش می‌یابد، که این موضوع هم توسط رشیدی و همکاران [۱۲] ارائه گردیده است؛ با آنکه تغییرات طول کاویتی با عدد کاویتاسیون در نرخ تزریق یکسان به صورت

سرعت‌ها و نرخ‌های مختلف تزریق به صورت تجربی و عددی مطالعه گردید. در بررسی عددی و تجربی شکل ناحیه کاویتی و ضریب پسا حول کاواک‌ساز ۳۰ درجه تحت شرایط مختلف جریان، دستاوردهای زیر به دست آمده است.

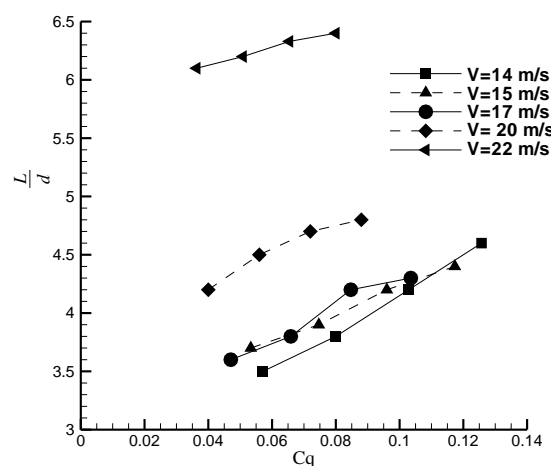
۱- اختلاف کم نتایج عددی و تجربی ناشی از شبکه مناسب و الگوی دوفازی و مدل توربولانسی مناسب می‌باشد.
۲- با ثابت ماندن مقدار دبی تزریق و کاهش عدد کاویتاسیون، ضریب پسا و نیروی پسا به ترتیب کاهش و افزایش پیدا می‌کند. به طوری که با ثابت ماندن مقدار دبی تزریق، افزایش سرعت جریان باعث کاهش ۳۶ درصدی ضریب پسا می‌شود.

۳- با افزایش دبی تزریق، مقدار نیروی پسا و ضریب پسا کاهش می‌یابد. به طوری که در سرعت‌های کم با افزایش دبی تزریق، مقدار ضریب پسا ۲۷٪ کاهش می‌یابد. ولی در سرعت‌های زیاد، تأثیر چشمگیری ندارد.

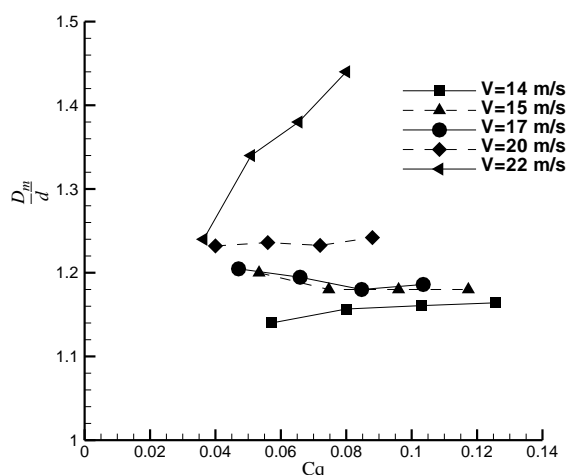
۴- افزایش دبی تزریق، افزایش طول کاویتی را با شیب ثابتی در سرعت‌های مختلف به همراه دارد. همچنین، در دبی تزریق ثابت، با افزایش سرعت جریان، طول و قطر ناحیه کاویتی تا ۷۷٪ و ۲۰٪ به ترتیب افزایش می‌یابد.

۵- نتایج نشان می‌دهد که کاویتاسیون مصنوعی روشی مناسب و مؤثر برای کاهش ضریب پسا می‌باشد. به طور کلی، در محدوده سرعت انجام شده در این تحقیق، مؤثرترین روش جهت کاهش ضریب پسا و نیروی پسا در سرعت‌های کم، افزایش نرخ تزریق و در سرعت‌های زیاد، افزایش سرعت جریان می‌باشد. به عبارت دیگر، در طراحی پرتابه‌های زیرسطحی جهت دستیابی به کمترین نیروی پسا و کمترین هزینه مناسب است در سرعت‌های کم، تا حد امکان دبی تزریق افزایش داده شود و در سرعت‌های زیاد، دبی تزریق تا حد بحرانی کم شود.

مختلف



شکل ۱۷: اثر تغییرات نرخ تزریق بر طول کاویتی در سرعت‌های مختلف



شکل ۱۸: اثر تغییرات نرخ تزریق بر قطر کاویتی در سرعت‌های مختلف

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مشخصه‌های جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی، حول کاواک‌ساز مخروطی ۳۰ درجه، تحت

۶- مراجع

- [1] Wang, G. and S. M. Ostojca-Starzewski, (2007) "Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil", Applied Mathematical Modelling, Vol. 31, No.3, 2007, pp. 417-447.
- [2] M. Wosnik, T. J. Schauer and R. E. Arndt, (2003) "Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle", Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Osaka, Japan, 1-4 November, 2003, Cav03-OS-7-008.
- [3] M. Wosnik and R. E. A. Arndt, "Measurements in high void-fraction bubbly wakes created by ventilated supercavitation", Journal of Fluids Engineering, Vol. 135, No. 1, 2013, 011304.
- [4] Q. T. Lee, L. P. Xue and Y. S. He, "Experimental study of ventilated supercavities with a dynamic pitching

- model”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 20, No. 4, 2008, pp. 456-460.
- [5] X. W. Zhang, Y. J. Wei, J. Z. Zhang, C. Wang and K. P. Yu, “Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation”, *Journal of Hydrodynamics Ser. B*, Vol. 19, No. 5, 2008, pp. 564-571.
- [6] J. J. Zhou, K. P. Yu, J. X. Min and M. Yang, “The comparative study of ventilated super cavity shape in water tunnel and infinite flow field”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, No. 5, 2010, pp. 689-696.
- [7] L. Barbaca, B. W. Pearce and P. A. Brandner, “Experimental investigation of ventilated cavity flow over a 3D wall mounted fence”, *International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu, Hawaii, April 10-15, 2016.
- [8] C. X. Jiang and F. C. Li, “Experimental study on the characteristics of ventilated cavitation around an underwater navigating body influenced by turbulent drag-reducing additives”, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, Vol. 58, No. 9, 2015, 594703.
- [9] S. Bernard, R. Susan-Resiga, S. Muntean and I. Anton, “Numerical analysis of the cavitating flows”, *Proceedings of the Romanian academy, Series A*, Vol. 7, No. 1, 2006, pp. 33-45.
- [10] علی چراغی، رضا ابراهیمی، سجاد محمدی بازرگانی و مهرزاد شمس، “مدل‌سازی جریان ابرکاواک اطراف رونده‌های زیرسطحی”، فصلنامه مکانیک هوافضا، جلد ۷، شماره ۴، ۱۳۹۰، صفحه ۸۷-۹۶.
- [11] م. سالاری، س. فراغت و س. م. جوادپور، “مطالعه تجربی و عددی مشخصه‌های سوپرکاویتی ایجاد شده پشت کابیناتورهای مخروطی” ماهنامه مکانیک مدرس هوافضا جلد ۱۳، شماره ۱۳، ۱۳۹۲، صفحه ۲۳۶-۲۲۶.
- [12] I. Rashidi, Ma. Passandideh-Fard, Mo. Passandideh-Fard and N. M. Nouri, “Numerical and experimental study of a ventilated supercavitating vehicle”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136, No. 10, 2014, 101301.
- [13] Z. R. Li, M. Pourquie and T. J. C. Van Terwisga, “A numerical study of steady and unsteady cavitation on a 2d hydrofoil”, 9th International Conference on Hydrodynamic, Shanghai, China, October 11-15, 2010, pp. 770-777.
- [14] E. Roohi, A. Pouyan Zahiri and M. Pasandideh-Fard, “Numerical simulation of cavitation around a two-dimensional hydrofoil using VOF method and LES turbulence model”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 9, 2013, pp. 6469-6488.
- [15] S. Park and S. H. Rhee, “Computational analysis of turbulent super-cavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped cavitator geometry”, *Computers & Fluids*, 70, 2012, pp. 73-85.
- [16] J. H. Guo, C. J. Lu and Y. Chen, “Characteristics of flow field around an underwater projectile with natural and ventilated cavitation”, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 16, No. 2, 2011, pp. 236-241.
- [17] L. P. Jia, C. Wang, Y. J. Wei, H. B. Wang, J. Z. Zhang, K. P. Yu, “Numerical simulation of artificial ventilated cavity”, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 18, No. 3, 2006, pp. 273-279.
- [18] B. Ji, X. W. Luo, X. X. Peng, Y. Zhang, Y. L. Wu and H. Y. Xu, “Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around an under-water vehicle based on a three-component cavitation model”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 753-759.
- [19] W. Zou, K. Yu and X. Wan, “Research on the gas-leakage rate of unsteady ventilated Supercavity”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, No. 5, 2010, pp. 635-643.
- [20] J. P. Franc and J. M. Michel, “Fundamentals of cavitation”, Section 6, Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, Vol. 75, 104 p, 2004.
- [21] K. P. Yu, G. Zhang, J. J. Zhou, W. Zou and Z. W. Li, “Numerical study of the pitching motions of supercavitating vehicles”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24, No. 6, 2012, pp. 951-958.
- [22] Z. Shang, “Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, 2013, pp. 8836-8845.
- [23] A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li and Y. Jiang, “Mathematical basis and validation of the full cavitation model”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, 2002, pp. 1-8.
- [24] M. S. Ingber and C. E. Hailey, “Numerical modeling of cavities on axisymmetric bodies at zero and non-zero angle of attack”, *Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vo. 15, 1992, pp. 251-271.