

## مطالعه تجربی جریان سوپر کاویتاسیونی طبیعی روی بدنه استوانه‌ای با کاویتی سازه‌های مختلف

در تحقیق حاضر، جریان سوپر کاویتاسیونی طبیعی با سرعت‌های مختلف داخل یک تونل آب مدار باز روی یک بدنه استوانه‌ای با کاویتی‌سازه‌های مختلف مخروطی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و نیز دیسک تخت با استفاده از یک دوربین فیلمبرداری سرعت بالا جهت مطالعه رفتار دینامیکی سوپر کاویتا و استخراج مشخصه‌های هندسی آن شامل طول و بیشینه قطرش در کنار بهره‌گیری از حسگرها، نیروسنج الکترونیکی و یک سیستم ثبت اطلاعات برای اندازه‌گیری نیروی پسای کلی وارد بر بدنه، توزیع فشار در راستای طولی آن و فشار نوک کاویتی‌ساز مطالعه تجربی شده است. به منظور اعتبارسنجی آزمایشات، نتایج مربوط به بدنه استوانه‌ای با کاویتی‌ساز دیسک تخت با اطلاعات موجود مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی شکل و عملکرد کاویتی‌سازه‌های ادوات نظامی زیر سطحی به کار رود.

علی غلامی<sup>۱</sup>

دانشجوی دکترا

وحید فرهنگ‌مهر<sup>۲</sup>

دکترا

حسن برسلانی<sup>۳</sup>

دانشجوی دکترا

واژه‌های راهنما: سوپر کاویتاسیون، تونل آب مدار باز، بدنه استوانه‌ای، کاویتی‌ساز

### ۱- مقدمه

افزایش سرعت و برد ادوات زیر سطحی مانند اژدرها و زیردریایی‌ها با کاهش قابل ملاحظه نیروی پسای اصطکاکی جریان روی سطح بدنه آنها در عین حفظ بازده آکوستیکی و هیدرودینامیکی مطلوب برایشان از چالش‌های اساسی در صنایع نظامی می‌باشد. وقتی جسمی با یک دماغه یا کاویتی‌ساز متصل به بدنه‌اش داخل آب با سرعت کافی حرکت می‌کند، پشت دماغه یک کاویتی شامل گاز، بخار یا مخلوطی از هر دو شکل می‌گیرد. کاویتی به وجود آمده با کاهش عدد کاویتاسیون توسعه می‌یابد، به طوری که می‌تواند به شکل یک سوپر کاویتی تمام یا بخش اعظمی از بدنه جسم را در بر گرفته و باعث شود که مایع با بدنه در تمام یا بخش اعظمی از طول آن تماس نداشته باشد. پس تشکیل سوپر کاویتی حول جسم موجب می‌گردد که نیروی پسای اصطکاکی جریان مایع تقریباً ناچیز و تنها به کاویتی‌ساز محدود شود. از این رو صنایع نظامی پدیده سوپر کاویتاسیون را در راستای اهداف مذکور به خدمت گرفته‌اند. برای کاهش عدد کاویتاسیون جهت حصول سوپر کاویتی با طول بیشتر و در نتیجه نیروی پسای اصطکاکی کمتر جریان روی سطح بدنه جسم باید فشار هیدرودینامیکی کاهش یابد که این امر مستلزم پرتاب جسم با سرعت اولیه بیشتر

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، پژوهشکده دریایی، دانشگاه جامع امام حسین

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز vfarhangmehr@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

است. گاهی می‌توان برای باقی ماندن جسم داخل سوپر کاویتا به جای افزایش سرعت اولیه پرتاب آن، از تزریق هوا به داخل سوپر کاویتا نیز استفاده کرد. بر این اساس بدیهی است که مشخصه‌های هندسی سوپر کاویتا مانند قطر و طول آن به شکل هندسی کاویتا ساز، سرعت حرکت جسم و میزان دبی هوای تزریقی به داخل آن در صورت وجود، بستگی داشته باشد.

در زمینه پدیده سوپر کاویتاسیون طبیعی مطالعات تحلیلی، تجربی و عددی گسترده‌ای صورت گرفته است. چووی و روزن [۱] به بررسی مزایای استفاده از کاویتا ساز تطبیقی با قابلیت تنظیم اندازه خود با سرعت وسیله متحرک پرداختند. هدف از تغییر اندازه کاویتا ساز، حفظ حداقل طول سوپر کاویتا و حداقل نیروی پسا در هر سرعت خاص است. پسای موضعی و نیروی محرکه مورد نیاز برای حفظ حرکت وسیله، می‌تواند باعث کم‌انرژی و ناپایداری هیدرودینامیکی آن شود. آنها از تحلیل المان محدود برای پیش‌بینی حد پایداری بهره جستند. هو و همکاران [۲] بر اساس روش معادله انتگرالی، جریان سوپر کاویتاسیونی ناپایای گذرا از روی مخروط‌ها با زوایای مختلف و در اعداد کاویتاسیون متفاوت را مطالعه عددی کردند. آنها برای محاسبه شکل و طول سوپر کاویتا روش گسسته‌سازی زمانی تفاضل محدود را به کار بستند. ما و همکاران [۳] سوپر کاویتا ایجاد شده در نوک کاویتا ساز با ابعاد مختلف و توسعه آن روی سطح جسم متحرک را با روش هس-اسمیت<sup>۱</sup> متقارن محوری دوبعدی که بر پایه تئوری پتانسیل و تکنیک پانل است، مدل‌سازی کرده و ضرایب فشار و پسا در جسم متقارن محوری را به دست آوردند. حرکت یک جسم سوپر کاویتاسیونی در آب‌های کم عمق متأثر از انسداد جریان است که باعث تغییر طول و قطر سوپر کاویتا می‌شود. هنگامی که عدد کاویتاسیون از عدد کاویتاسیون انسداد جریان کمتر باشد، طول سوپر کاویتا تولید شده توسط جسم صلب در حالی که فشار سوپر کاویتا کمتر از فشار محیط باشد، به سمت بی‌نهایت میل خواهد کرد. بر این اساس آمرومین [۴] با محاسبه بر پایه تئوری سیال ایده‌آل نشان داد که ترکیب اثرات مرز صلب (کف دریا) و مرز آزاد (سطح دریا) در آب‌های کم عمق به افزایش عدد کاویتاسیون برای یک سوپر کاویتا با طول ثابت، تغییر شکل‌های سه بعدی در مقاطع آن، تغییر در عملکرد هیدرودینامیکی، عمق حرکت و پایداری جسم می‌انجامد. شفقت و همکاران [۵،۶،۷] برای کاهش مصرف انرژی در اجسام شناور با سرعت بالا که چالشی مهم در تحقیقات هیدرودینامیک است، به بهینه‌سازی شکل کاویتا ساز دوبعدی متقارن و متقارن محوری در جریان پتانسیل سوپر کاویتاسیونی دوبعدی و متقارن محوری با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. در کار آنها کاویتا ساز عمود بر جریان در کانالی با طول زیاد قرار داشته و بلافاصله پشت آن به دلیل تغییر در امتداد جریان با سرعت بالا در برخورد با کاویتا ساز، سوپر کاویتا شکل گرفته که منجر به کاهش قابل ملاحظه نیروی پسای اصطکاکی می‌شود. آنها با مقایسه نتایج حاصل با سایر روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، کارشان را اعتبارسنجی کردند. نوری و اسلام دوست [۸] جریان پتانسیل سوپر کاویتاسیونی را با روش المان‌های مرزی از لحاظ عددی مورد بررسی قرار دادند و با بهره‌گیری مناسب از مزایای روش مزبور، الگوریتمی با فرآیند تکرار جهت تعیین مرز سوپر کاویتا با دقت بالا در جریان‌های دوبعدی متقارن معرفی کردند. در این الگوریتم، از یک طول سوپر کاویتا مشخص برای یافتن عدد کاویتاسیون مربوط به آن و پروفیل سوپر کاویتا استفاده می‌شود. آنها برای به دست آوردن سوپر کاویتا با طول محدود، مدلی خاص برای بستن سوپر کاویتا به کار گرفتند که با استفاده از این مدل، تغییر پروفیل بستن سوپر کاویتا و طول مشخص آن امکان‌پذیر بود. همچنین آنها با مقایسه نتایج حاصل با نتایج مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی قبلی، نتیجه گرفتند که الگوریتم عددی با فرآیند تکرار قابلیت

<sup>1</sup> Hess-Smith

اعتماد داشته و می‌تواند با روش‌المان‌های مرزی یا دیگر روش‌های عددی برای پیش‌بینی مشخصه‌های جریان سوپرکاویتاسیونی به کار رود. سادگی، استقلال نتایج از حدس اولیه برای مرز سوپرکاویتی و محاسبات مقرون به صرفه از ویژگی‌های الگوریتم آنها بود. هو و همکاران [۹] از یک طرح عددی ائتلافی<sup>۱</sup> با پراکندگی<sup>۲</sup> کنترل شده بر پایه روش لاکس - فردریک<sup>۳</sup> جهت شکافت شار عددی برای شبیه‌سازی جریان‌های سوپرکاویتاسیونی استفاده کرده و با مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی و تحلیلی، کارشان را اعتبارسنجی کردند. چن و همکاران [۱۰] مشخصه‌های جریان کاویتاسیونی طبیعی حول یک گوه متقارن دوبعدی در آب‌های کم عمق را مطالعه عددی کرده و اثرات دو نوع مرز آزاد و صلب روی الگوی جریان را تحلیل نمودند. آنها روش حجم سیال (VOF) در جریان چندفازی لزج که مناسب برای مسائل سطح آزاد است در حالت کوپل شده با یک مدل کاویتاسیون طبیعی جهت توجیه فرآیند انتقال جرم بین فازهای مایع و بخار به کار گرفتند. در گستره اعداد کاویتاسیون در کار آنها، شکل کاویتا به سه نوع پایدار، گذرا و گردابه-دنباله<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. آنها روی شکل سطح آزاد، سطح کاویتا و عملکرد هیدرودینامیکی گوه تحت شرایط اعداد کاویتاسیون نسبتاً کم بحث کرده و نتایجشان را با نتایج تجربی موجود مقایسه نمودند. ربیعی و همکاران [۱۱، ۱۲] جریان سوپرکاویتاسیونی ناپایا و فرآیند گذر آن به جریان کاویتاسیونی جزئی حول یک جسم پس از پرتاب به داخل مخزن آزمایش را با استفاده از دوربین سرعت بالا برای ثبت مشخصه‌های حرکت جسم و دینامیک ناحیه کاویتاسیونی و نیز با استفاده از معادلات ناویر-استوکس آشفته دوفازی به همراه مدل کاویتاسیون کامل و شبکه‌بندی عددی مورد مطالعه تجربی و عددی قرار داده و موقعیت جسم، سرعت و شتاب آن، نیروی پسای کلی وارد بر آن، طول و قطر کاویتا را تعیین کرده و نتایج آزمایشگاهی و عددی را با یکدیگر مقایسه نمودند. آنها نشان دادند که در فاز شتاب جسم با افزایش سرعت آن که معادل کاهش عدد کاویتاسیون است، طول کاویتا سازگار با فیزیک مساله افزایش یافته، ولی در فاز کاهش سرعت جسم، این پدیده برعکس است. پارک و ری [۱۳] با توجه به کاربردهای ادوات زیرسطحی نظامی سرعت بالا، جریان سوپرکاویتاسیونی سرعت بالا حول یک کاویتا ساز گوه‌ای شکل متقارن دو بعدی را با استفاده از یک حلگر معادلات ناویر-استوکس ناپایای متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS) بر اساس روش حجم محدود مرکز سلول مطالعه عددی کرده و برای اعتبارسنجی روش محاسباتی، جریان روی جسمی با سر نیم کره‌ای را شبیه‌سازی کرده و نتایجشان را با اطلاعات تجربی موجود مقایسه کردند. در فرآیند اعتبارسنجی، مجموعه مناسبی از اندازه میدان جریان، تعداد سلول‌ها، طرح‌های عددی، مدل‌های آشفته‌گی و مدل‌های کاویتاسیون با دقت مطالعه شدند. آنها تحت شرایط محاسباتی مختلف شامل چندین زوایای گوه‌ای و اعداد کاویتاسیون برای جریان سوپرکاویتاسیونی حول کاویتا ساز گوه‌ای شکل، طول سوپرکاویتی محاسبه شده را با نتایج حل تحلیلی و عددی با استفاده از حلگر جریان پتانسیل مقایسه کرده و توافق نسبتاً خوبی مشاهده نمودند. نهایتاً آنها جریان سوپرکاویتاسیونی حول یک جسم با کاویتا ساز گوه‌ای شکل را شبیه‌سازی و با مقایسه با اطلاعات تجربی موجود اعتبارسنجی کردند. روحی و همکاران [۱۴] با استفاده از حلگر حجم محدود جریان سوپرکاویتاسیونی پایا روی هیدروفویل را با به کارگیری مدل آشفته‌گی شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) ضمنی تراکم‌ناپذیر و تکنیک VOF جهت پایش مرز

<sup>1</sup> dissipative scheme

<sup>2</sup> dispersion

<sup>3</sup>Lax-Friedrichs

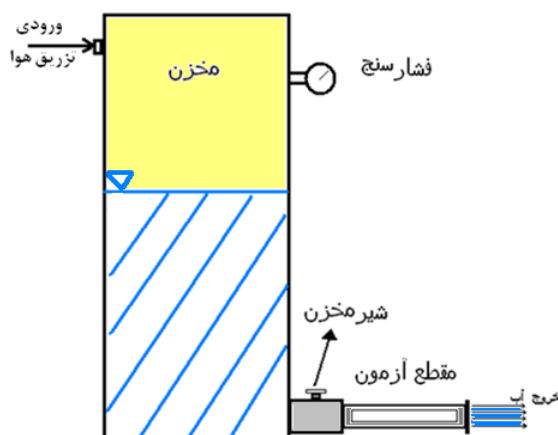
<sup>4</sup> vortex-wake

سوپرکاویتی تحلیل کردند. آنها اثرات مدل‌های انتقال جرم کنز<sup>۱</sup> و سائر<sup>۲</sup> را مطالعه کرده و دریافتند که ترکیب VOF، LES و مدل کنز قادر است که شکل سوپرکاویتی و دینامیک آن را با دقت شبیه‌سازی کرده و ضرایب برا و پسا، قطر سوپرکاویتی و نقطه آغاز آن را نزدیک به اطلاعات تجربی به دست آورد. آنها نشان دادند که جایگزینی مدل LES با مدل استاندارد  $k-\epsilon$  دقت کمتری را نتیجه می‌دهد. سرانجام [۱۵] مشخصه‌های مهم سوپرکاویتاسیون و کاویتاسیون جزئی روی یک جسم متحرک زیرآبی شلیک شده داخل مخزن آب شامل شکل‌گیری، تحول و فروپاشی را به صورت تجربی با استفاده از یک دوربین سرعت بالا جهت ثبت مسیر حرکت جسم و شکل پروفیل سوپرکاویتی و به صورت عددی با استفاده از معادلات RANS ناپایا کوپل شده با یک مدل حرکت جسم صلب شش درجه آزادی بررسی نمود و نتایج عددی و تجربی شامل مسیر پیش‌بینی شده و سرعت جسم را با هم مقایسه کرد و توافق خوبی مشاهده نمود که موید دقت قابل قبول روش عددی بود.

در تحقیق حاضر با استفاده از یک تونل آب مدار باز، یک دوربین سرعت بالا، تجهیزات اندازه‌گیری با دقت مناسب، کالیبره شده و متناسب با فیزیک مساله و یک سیستم ثبت اطلاعات برداشت شده، جریان سوپرکاویتاسیونی طبیعی با سرعت‌های مختلف روی بدنه استوانه‌ای با کاویتاسیون‌های مختلف مخروطی ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و دیسک تخت مطالعه تجربی شده است. نتایج شامل مشخصه‌های هندسی سوپرکاویتی مانند طول و بیشینه قطر آن و نیروی پسای وارد بر بدنه بوده و با مقایسه نتایج مربوط به بدنه استوانه‌ای با کاویتاسیون دیسک تخت در جریان سوپرکاویتاسیون طبیعی با اطلاعات موجود صحت آزمایشات انجام گرفته اعتبارسنجی شده است.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

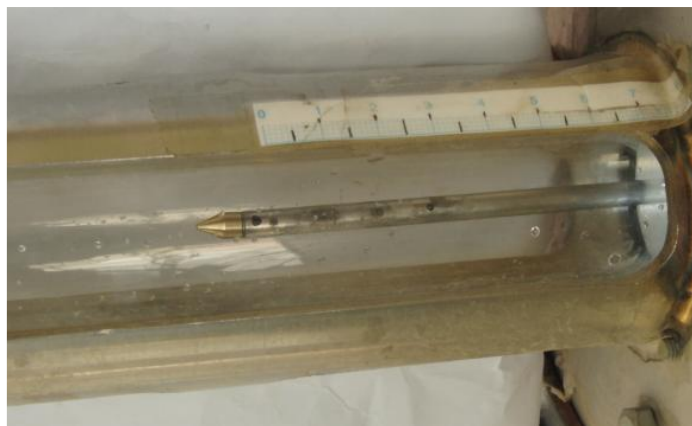
در کار حاضر، آزمایشات در یک تونل آب مدار باز انجام شده که طرحواره‌ای از آن در شکل (۱) نشان داده شده است. سهولت در طراحی، ساخت و کم بودن تجهیزات به کار رفته در آن از ویژگی‌های مهم این نوع تونل در مقایسه با تونل آب مدار بسته می‌باشند. در تونل آب مدار باز، مخزنی تا ارتفاع مشخص با آب پر شده و روی آن هوا با فشار متغیر بسته به سرعت جریان در محفظه آزمون و استحکام سازه‌ای مخزن تزریق می‌شود.



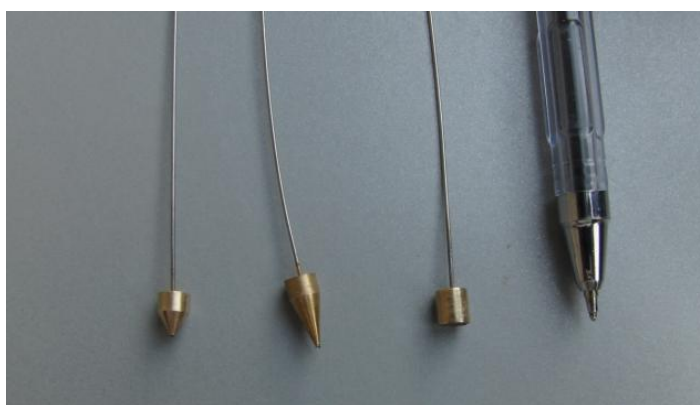
شکل ۱- طرحواره‌ای از تونل آب مدار باز

<sup>1</sup> Kunz

<sup>2</sup> Sauer



شکل ۲- نحوه قرارگیری مدل در محفظه آزمون

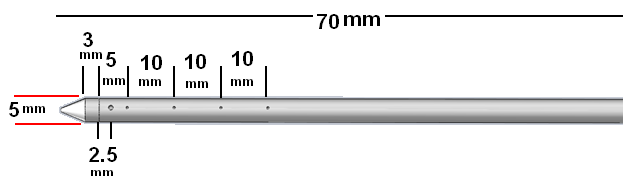


شکل ۳- کاویتی سازهای تخت و مخروطی

محفظه آزمون که استوانه‌ای با طول ۲۰ سانتی متر و قطر داخلی ۴۰ میلی متر از جنس پلکسی گلاس با صافی سطح و شفافیت بسیار بالا است به همراه مدل که شامل بدنه استوانه‌ای و کاویتی ساز مخروطی انتهایی آن تحت زاویه حمله صفر است، در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای ورود یکنواخت آب به محفظه آزمون از یک شیر توپی بین آن و مخزن استفاده می شود. بیشینه سرعت در محفظه آزمون ۴۵ متر بر ثانیه است. با توجه به پایین آمدن سطح آب مخزن در حین آزمون و تغییر فشار هیدرواستاتیک و فشار هوای داخل آن، سرعت جریان در محفظه آزمون متغیر بوده و کمترین سرعت در آن ۱۲ متر بر ثانیه است. در تمام آزمایشات، مدل در فاصله ۳ برابر قطر محفظه آزمون از ابتدای آن قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، از چهار نوع کاویتی ساز مخروطی ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و دیسک تخت، شکل (۳)، استفاده شده است. جهت پایداری و استحکام مکانیکی آنها روی بدنه استوانه‌ای با توجه به فشار آب در نوک، همگی در قسمت قاعده‌شان که رزوه شده است، به ابتدای بدنه که آن نیز رزوه شده است، متصل می شوند.

در شکل (۴)، مدل به همراه محل نصب حسگرهای فشار روی بدنه استوانه‌ای و نوک کاویتی ساز نمایش داده شده است. با توجه به قطر داخلی محفظه آزمون، قطر قاعده کاویتی ساز مخروطی ۵ میلی متر انتخاب شده است تا از دیواره محفظه آزمون به اندازه ۳/۵ برابر آن فاصله داشته باشد. حسگرهای فشار ضمن داشتن دقت خوب و کالیبره بودن به گونه‌ای نصب می شوند که اختلالی در جریان ایجاد نمی کنند.

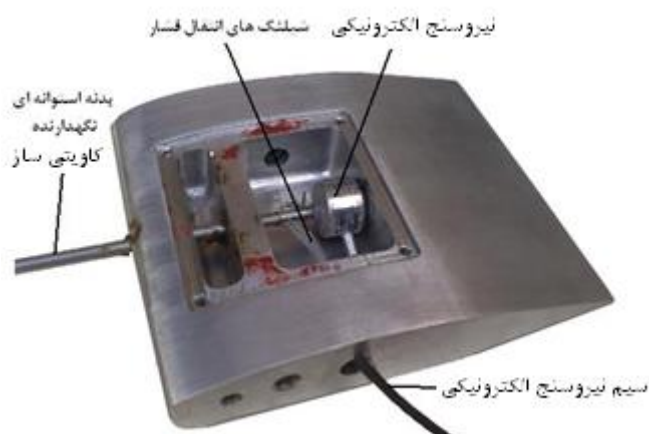


شکل ۴- طرحواره‌ای از هندسه بدنه استوانه‌ای، کاویتی‌ساز مخروطی و محل نصب حسگرهای فشار

برای پایدار نگه داشتن مدل و جلوگیری از ارتعاش آن از یک ایرفویل استاندارد ناکا<sup>۱</sup> که از انتها کوتاه شده، استفاده شده است، به گونه‌ای که تاثیر ناچیزی روی جریان خروجی از محفظه آزمون داشته و در عین حال کمترین تاثیر را از آن گرفته و نیز بتوان حسگر نیروی پسای وارد بر مدل را داخل آن قرار داد. با توجه به الزامات طراحی، حسگر ضد آب سکه‌ای ۵ کیلوگرم نیرو و با قطر ۲۰ میلی‌متر و دقت بالا برای اندازه‌گیری مجموع پسای فشاری و اصطکاکی انتخاب شده است. دو نما از خارج و داخل ایرفویل با دو محفظه مجزا در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. محفظه اول برای تجمع آب نفوذ کرده داخل ایرفویل و سپس تخلیه آن از طریق یک شیر تخلیه و محفظه دوم برای تعبیه حسگر نیروی پسا و نیز خارج کردن شلنگ حسگرهای فشار بدنه استوانه‌ای و نوک کاویتی‌ساز می‌باشد.

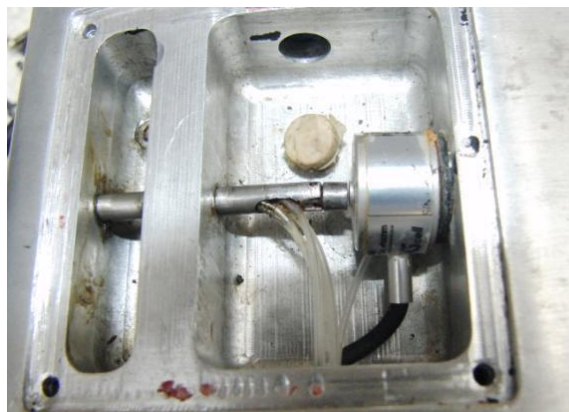
برای اتصال ایرفویل نگه‌دارنده مدل به محفظه آزمون با پیچ از دو دسته فولادی استفاده شده است که به ایرفویل امکان دو درجه آزادی می‌دهد. یکی برای تنظیم زاویه حمله مدل و دیگری برای جابجایی آن در امتداد قائم. این دسته‌ها نمایش داده نشده‌اند. پارامتر مهم در جریان‌های سوپر کاویتاسیونی عدد کاویتاسیون است که هیچ ارتباطی به مشخصه‌های هندسی جریان نداشته و بر اساس مشخصه‌های دینامیکی جریان به صورت  $\sigma = (P - P_c) / (P_c - P_\infty)$  تعریف می‌شود که در آن  $P$ ،  $P_c$  و  $P_\infty$  به ترتیب فشار در یک نقطه مشخص از میدان جریان، فشار یکنواخت داخل سوپر کاویتی که مجموع فشار بخار اشباع و فشار جزئی ناشی از گازهای چگالش‌ناپذیر داخل آن است و فشار دور دست می‌باشند [۱۶].

برای فیلم‌برداری از محفظه آزمون از دوربین Phantom V12.1 با سرعت ۲۰۰۰ فریم در ثانیه با نورپردازی مناسب بهره‌برده شده و دمای آب در تمام آزمایشات ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۵- نمای خارجی ایرفویل نگه‌دارنده مدل

<sup>1</sup> NACA



شکل ۶- نمای داخلی ایرفویل نگه دارنده مدل

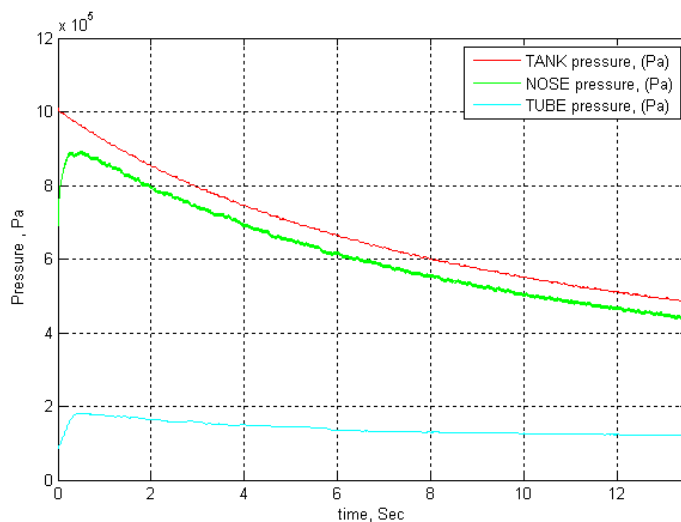
### ۳- تحلیل نتایج

پس از پر کردن مخزن آب تا یک ارتفاع مشخص جهت تامین فشار هیدرواستاتیکی و تزریق هوا به قسمت فوقانی آن تا یک فشار معین، شیر رابط مخزن و محفظه آزمون برای برقراری جریان سوپر کاویتاسیونی داخل آن و روی مدل باز شده و هم‌زمان با استفاده از دوربین برای استخراج مشخصه‌های هندسی سوپر کاویتا شامل طول و قطر آن از پدیده فیلم‌برداری و کمیت‌های مهندسی نیز شامل فشار در مخزن، قسمت‌های مشخص شده روی بدنه، نوک کاویتا ساز و همچنین نیروی پسای کلی وارد از طرف جریان بر مدل توسط حسگرهای کالیبره و با دقت مناسب اندازه‌گیری می‌شوند. جهت امکان مقایسه نتایج، آزمایشات تحت شرایط مشابه و کنترل شده با رعایت اصول مهندسی و ایمنی انجام می‌شوند. با تغییر ارتفاع آب در مخزن و نیز مقدار هوای تزریقی به قسمت فوقانی آن جریان‌های سوپر کاویتاسیونی با سرعت‌های مختلف داخل محفظه آزمون حول مدل مورد مطالعه تجربی قرار می‌گیرد. آب تخلیه شده از مخزن درون محفظه‌ای جمع‌آوری شده و توسط پمپی دوباره به مخزن برگردانده می‌شود. با استفاده از فشار نوک کاویتا ساز و فشار محفظه آزمون، سرعت در محفظه آزمون و عدد کاویتاسیون جریان تعیین می‌شوند.

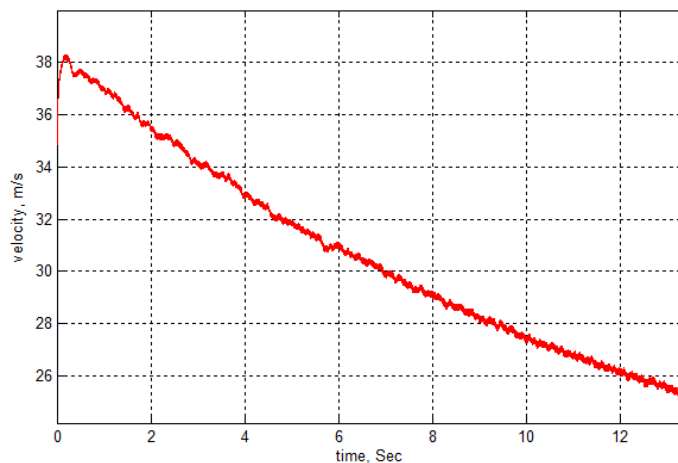
در اشکال (۷)، (۸) و (۹) به ترتیب کاهش زمانی فشار هوا در مخزن، محفظه آزمون و نوک کاویتا ساز، کاهش زمانی سرعت جریان در محفظه آزمون و نیز متعاقب آن، افزایش زمانی عدد کاویتاسیون جریان برای کاویتا ساز مخروطی ۳۰ درجه در محدوده سرعت ۲۵-۳۸ متر بر ثانیه به عنوان نمونه ارائه گردیده که با کاهش زمانی ارتفاع هیدرواستاتیکی در مخزن و افزایش حجم هوا در آن قابل انتظار بودند.

به منظور اعتبارسنجی صحت آزمایشات، نسبت طول سوپر کاویتا به قطر کاویتا ساز دیسک تخت بر حسب عدد کاویتاسیون جریان در گستره استفاده شده در مطالعه حاضر با اطلاعات تجربی موجود، در شکل (۱۰) مقایسه شده است که توافق خوبی مشاهده می‌شود.

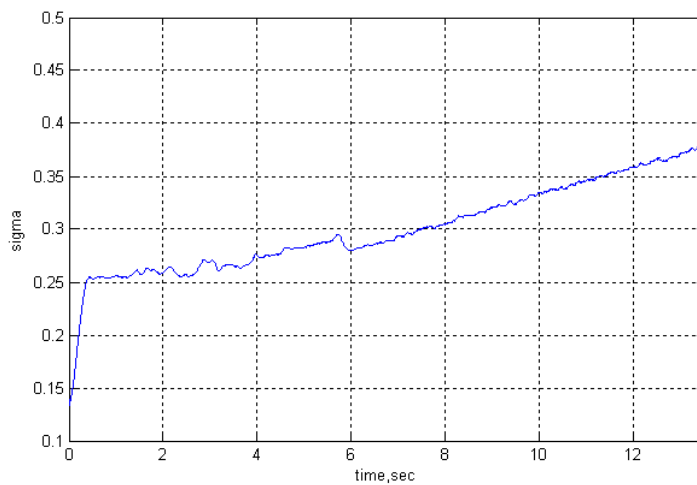
نسبت طول سوپر کاویتا به قطر کاویتا ساز و نیز نسبت قطر بیشینه سوپر کاویتا به قطر کاویتا ساز بر حسب عدد کاویتاسیون جریان به ترتیب در اشکال (۱۱الف) تا (۱۱د) و (۱۲الف) تا (۱۲د) برای کاویتا سازهای مختلف نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه راس کاویتا ساز، طول بی‌بعد سوپر کاویتا افزایش یافته و برای کاویتا ساز دیسک تخت می‌توان بیشترین طول سوپر کاویتا را حاصل کرد. قطر بی‌بعد سوپر کاویتا نیز برای کاویتا سازهای مخروطی با افزایش زاویه راس افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تغییرات زمانی فشار مخزن، محفظه آزمون و نوک کاویتای ساز مخروطی با زاویه ۳۰ درجه

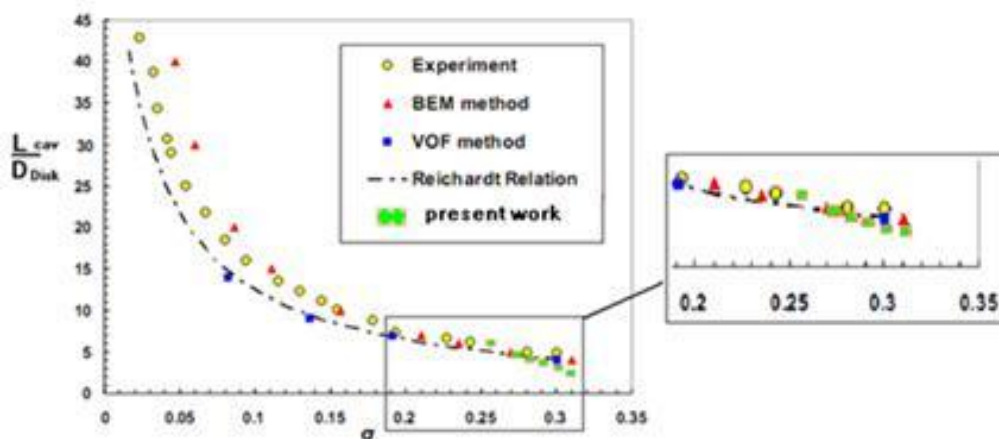


شکل ۸- تغییرات زمانی سرعت جریان در محفظه آزمون برای کاویتای ساز مخروطی ۳۰ درجه

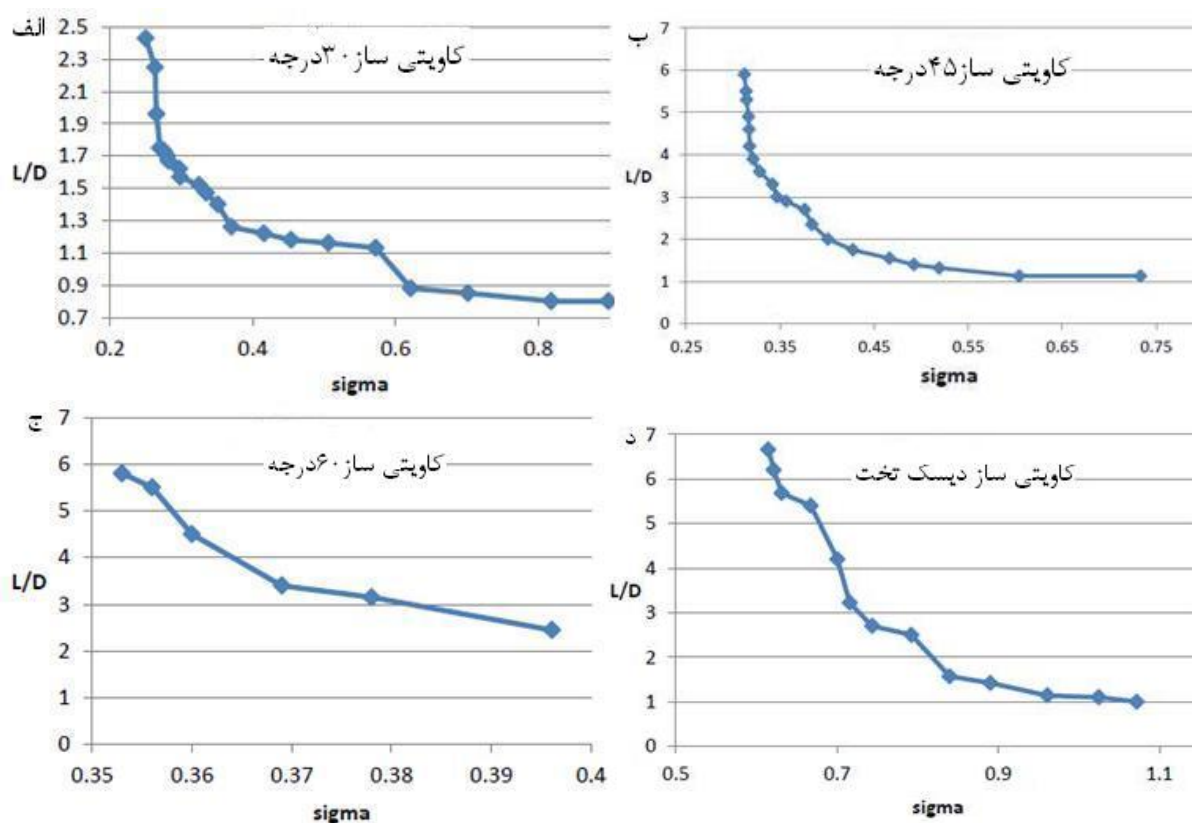


شکل ۹- تغییرات زمانی عدد کاویتاسیون جریان برای کاویتای ساز مخروطی ۳۰ درجه

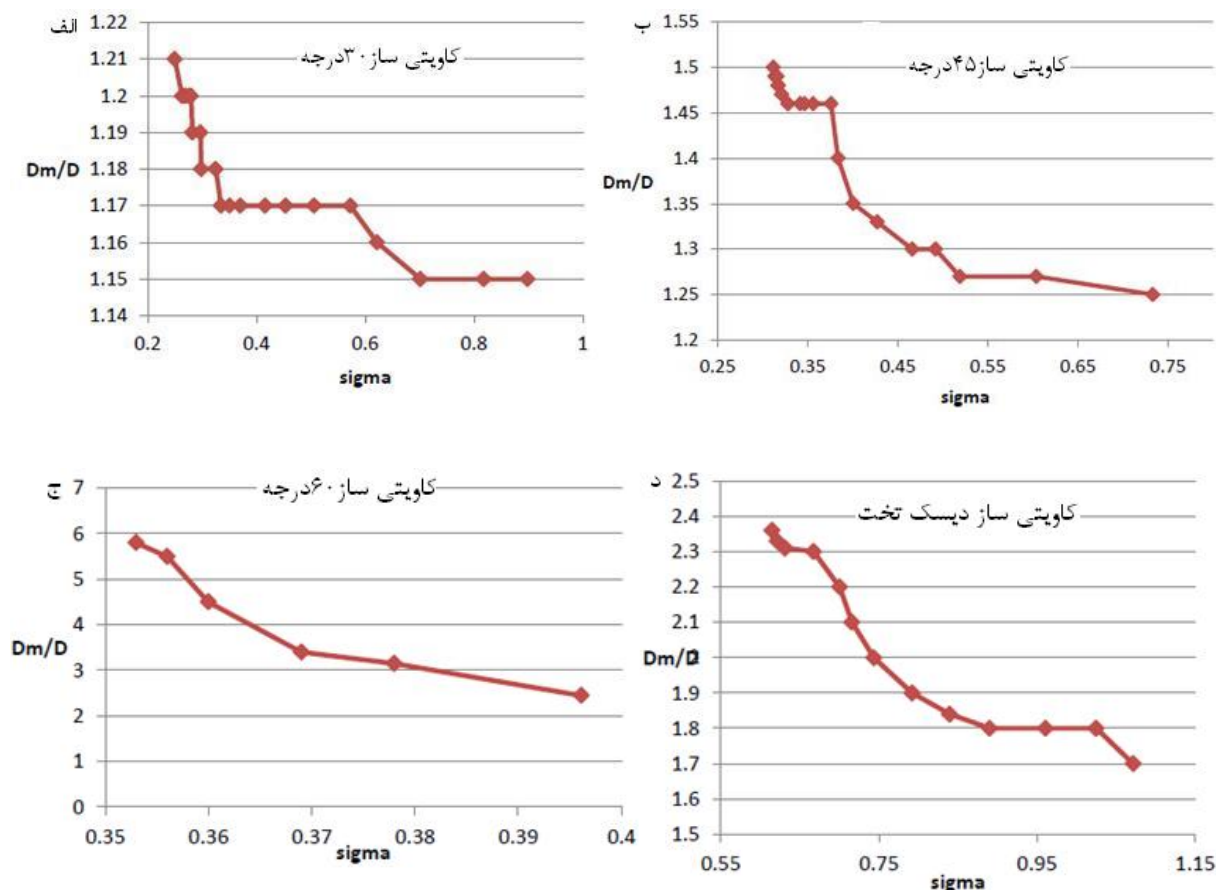




شکل ۱۰- اعتبارسنجی کار تجربی حاضر



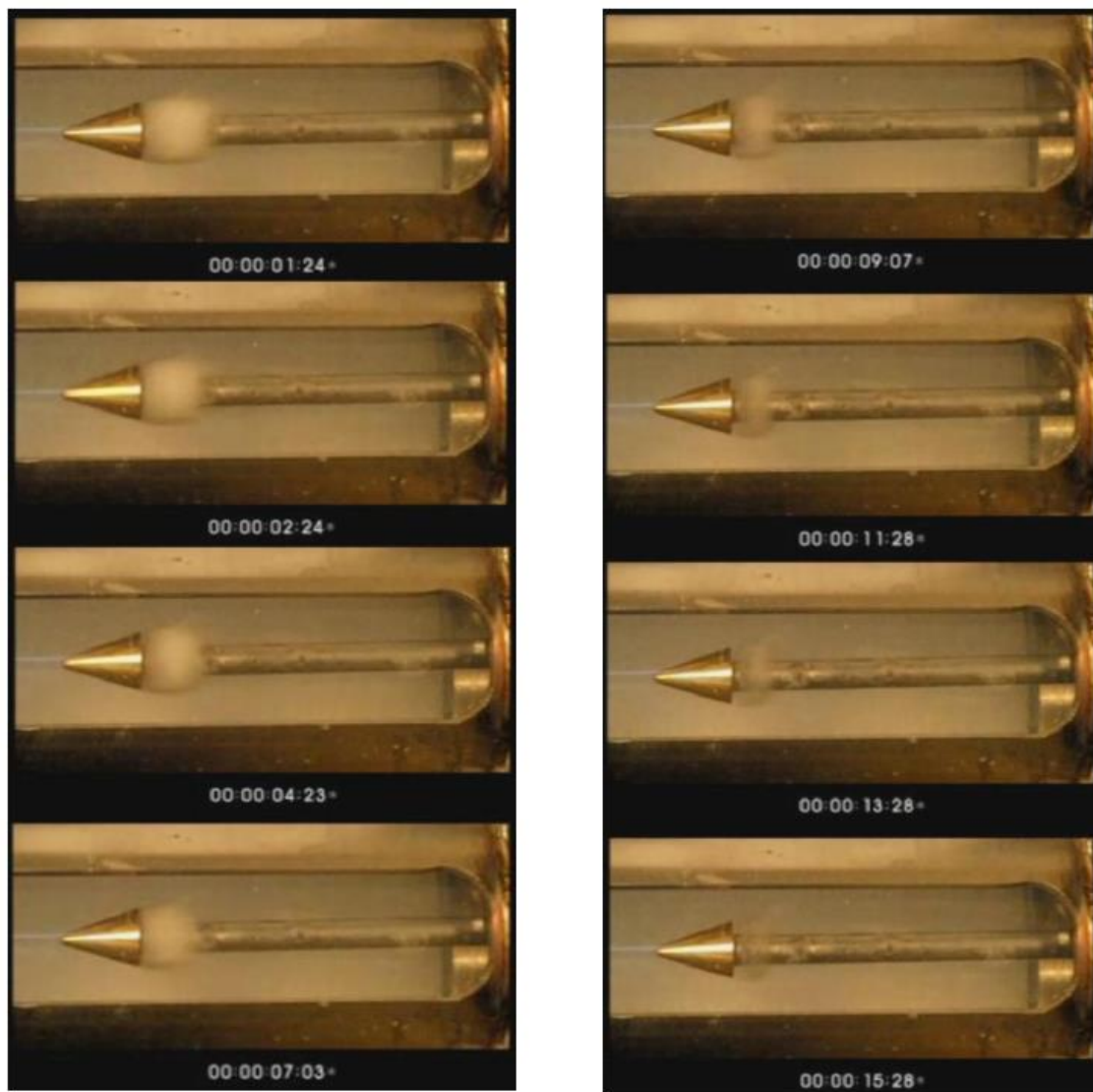
شکل ۱۱- تغییرات نسبت طول سوپر کاویته به قطر کاویته ساز نسبت به عدد کاویتاسیون برای کاویته سازهای مختلف



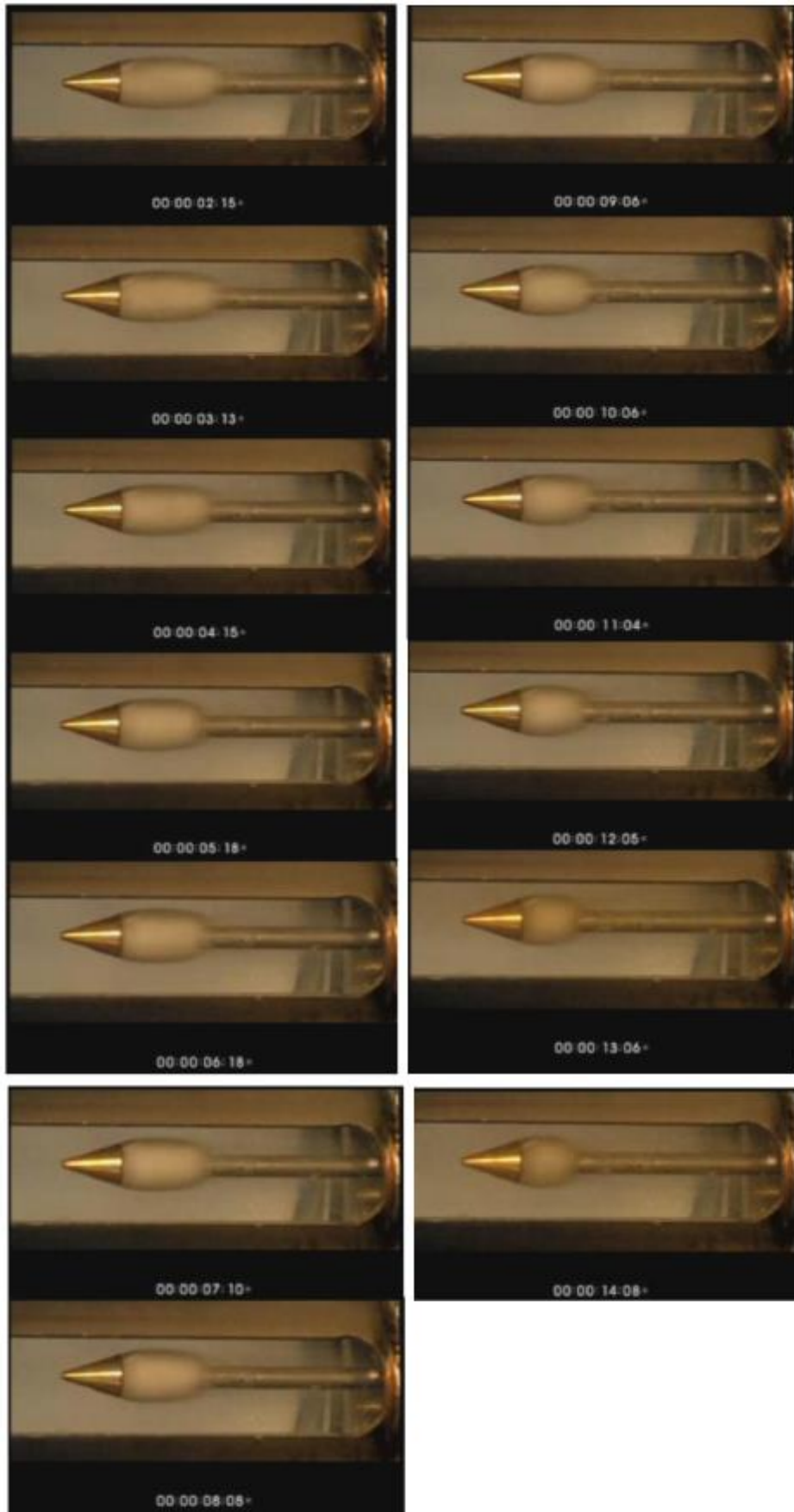
شکل ۱۲ - نسبت قطر ماکزیمم سوپر کاویتا به قطر کاویتا ساز نسبت به عدد کاویتاسیون برای کاویتا سازهای مختلف

شکل‌های (الف ۱۳)، (ب ۱۳)، (الف ۱۴)، (ب ۱۴)، (ب ۱۵) و (الف ۱۶) تصاویر گرفته شده منتخب توسط دوربین فیلم برداری برای کاویتا سازهای مختلف در محدوده سرعتشان و در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. از این تصاویر مشخصه‌های هندسی سوپر کاویتا مانند طول، قطر و نیز رفتار دینامیکی آن که به نوع کاویتا ساز بستگی دارند، قابل استخراج می‌باشند. با کاهش زمانی سرعت جریان و فشار در محفظه آزمون، طول سوپر کاویتا به تدریج با گذشت زمان کم شده که منجر به افزایش زمانی نیروی پسای اصطکاکی روی قسمتی از بدنه استوانه‌ای می‌شود که سوپر کاویتا تمام شده و آب با سرعت روی آن حرکت می‌کند. از طرفی به دلیل ثابت بودن فشار داخل سوپر کاویتا و نیز کاهش زمانی فشار در نوک کاویتا ساز، نیروی پسای فشاری با گذشت زمان کم می‌شود. لذا در مجموع به دلیل غالب بودن پسای فشاری بر پسای اصطکاکی، نیروی پسای کلی وارد بر مدل کاهش زمانی پیدا می‌کند. از طرفی به دلیل کاهش زمانی بیشتر فشار دینامیکی در محفظه آزمون در مقایسه با کاهش زمانی نیروی پسای ضریب پسای روی مدل با گذشت زمان افزایش می‌یابد. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که ضریب پسای با عدد کاویتاسیون جریان افزایش یافته و کاویتا ساز دیسک تخت عملکرد هیدرودینامیکی نامطلوب‌تری در مقایسه با کاویتا سازهای مخروطی دارد.

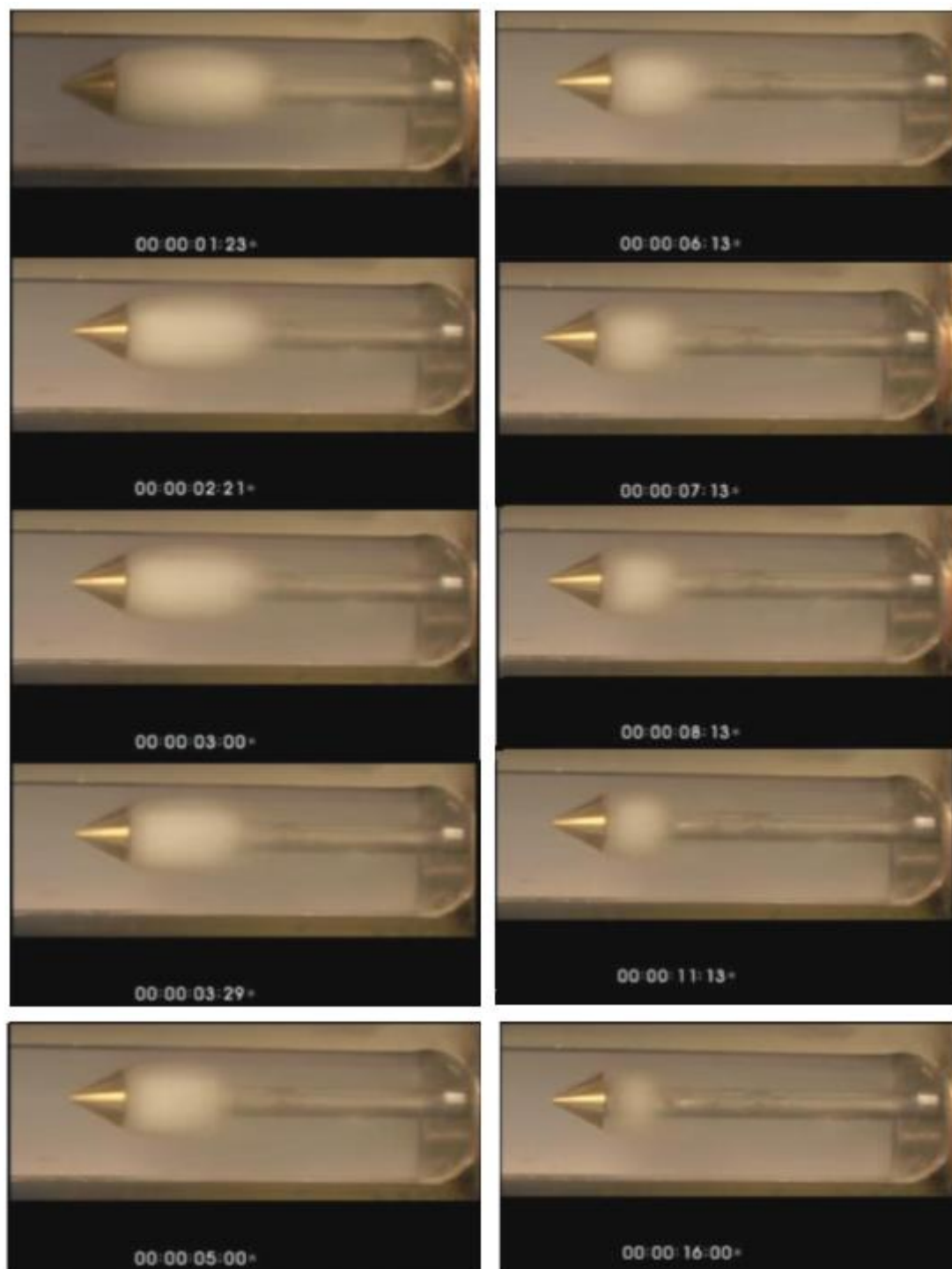
چنانچه در مقدمه نیز اشاره گردید، با میل کردن عدد کاویتاسیون جریان به عدد کاویتاسیون مشخصی، طول سوپر کاویتا افزایش چشم‌گیری می‌یابد که به این پدیده انسداد جریان گفته می‌شود. در اشکال (الف ۱۸) تا (د ۱۸) تغییرات طول سوپر کاویتا به قطر بیشینه آن بر حسب عدد کاویتاسیون جریان در مختصات لگاریتمی برای کاویتا سازهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۳ الف - تصاویر منتخب از فیلم برداری سرعت بالا برای  
 کاویتی ساز ۳۰ درجه در محدوده سرعت ۱۵-۲۴ متر بر ثانیه

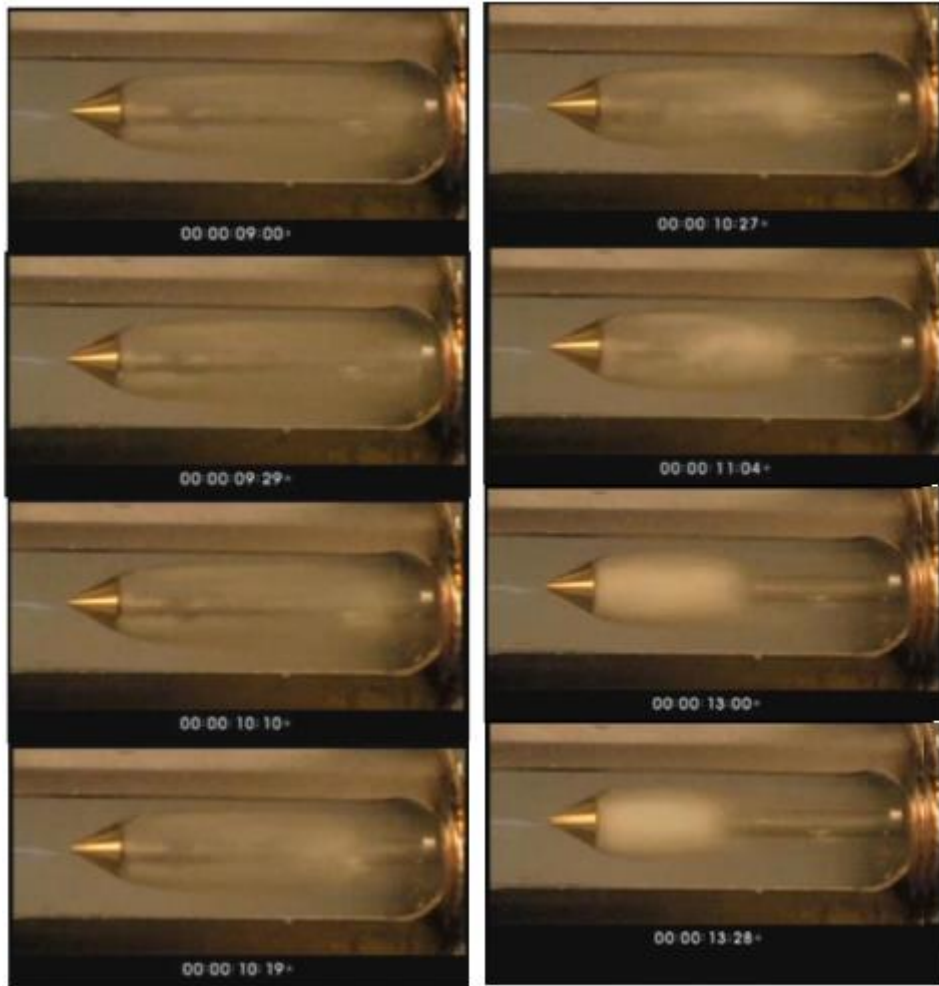


شکل ۱۳ ب - تصاویر منتخب از فیلم برداری سرعت بالا برای کاویتاسیون ۳۰ درجه در محدوده سرعت ۲۵-۳۸ متر بر ثانیه

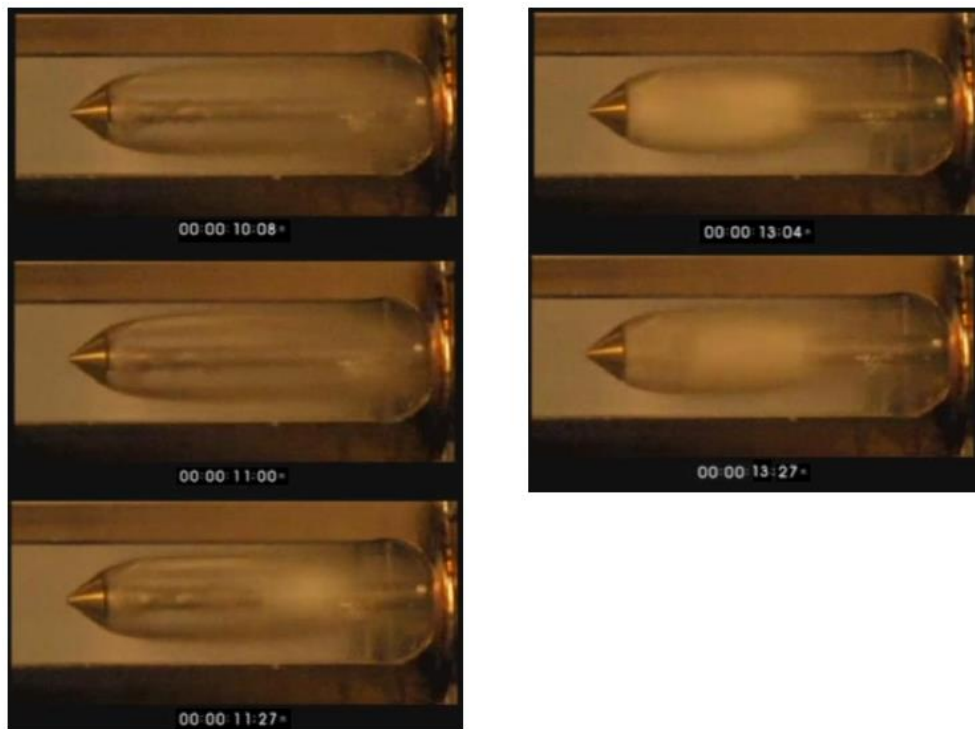


شکل ۱۱۴ الف - تصاویر منتخب از فیلم برداری سرعت بالا برای

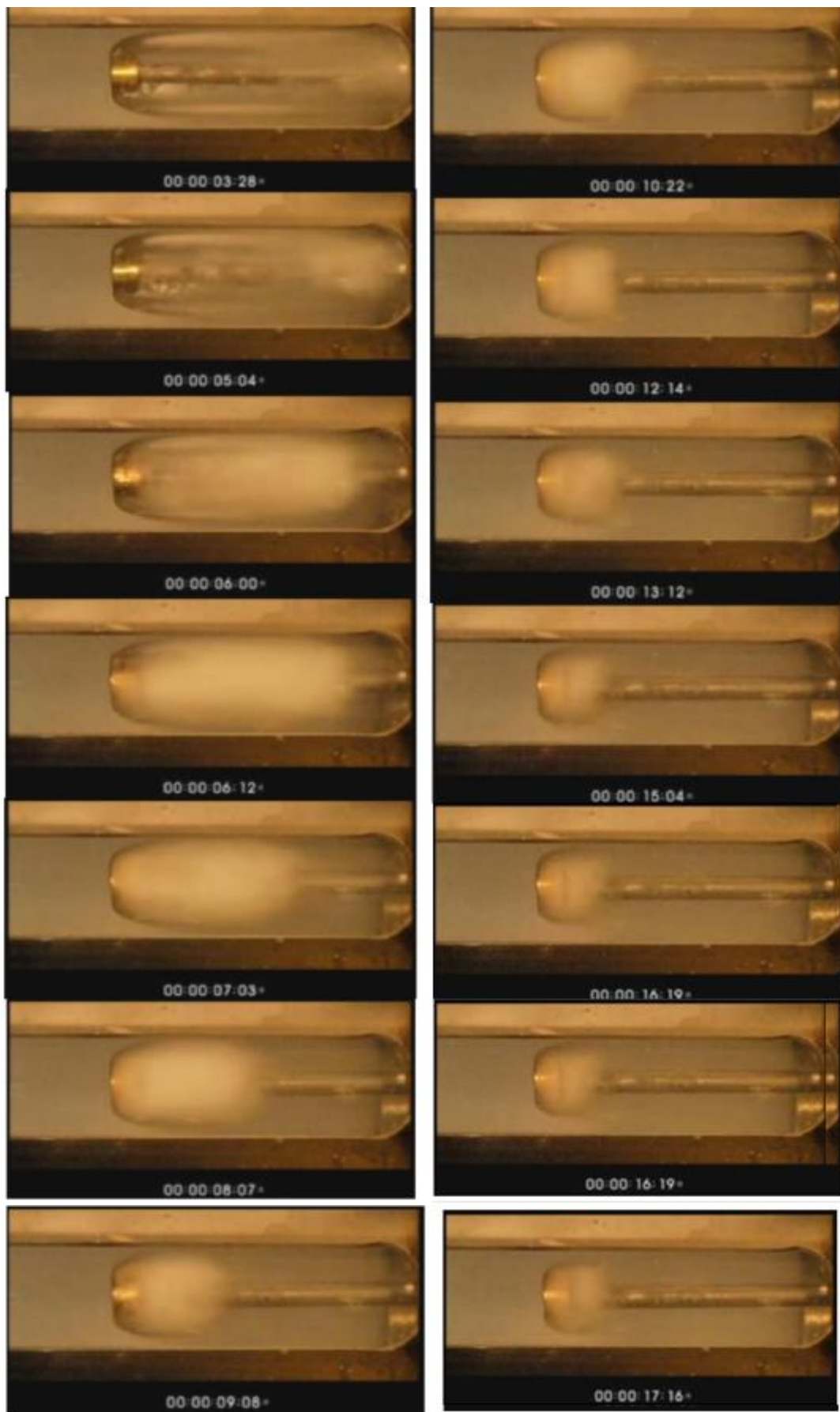
کاویتی ساز ۴۵ درجه در محدوده سرعت ۱۶-۲۶ متر بر ثانیه



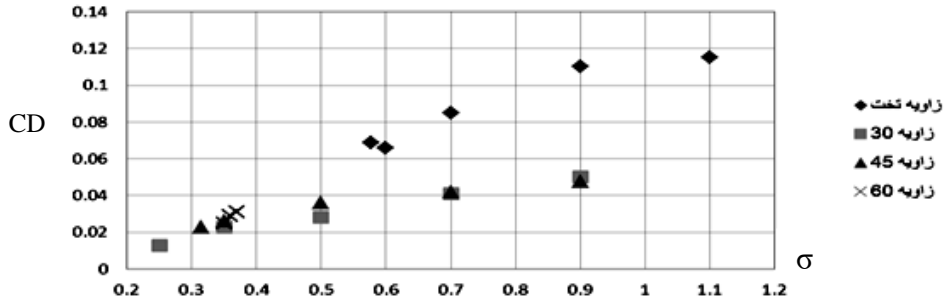
شکل ۱۴ - تصاویر منتخب از فیلم برداری سرعت بالا برای کاویتی ساز ۴۵ درجه در محدوده سرعت ۲۷-۳۷ متر بر ثانیه



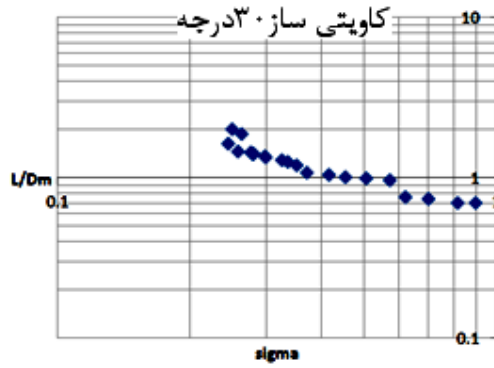
شکل ۱۵ - تصاویر منتخب از فیلم برداری سرعت بالا برای کاویتی ساز ۶۰ درجه در محدوده سرعت ۲۶-۳۶ متر بر ثانیه



شکل ۱۶- تصاویر منتخب از فیلم برداری سرعت بالا برای کاویتی ساز دیسک تخت در محدوده سرعت ۱۳-۲۰ متر بر ثانیه

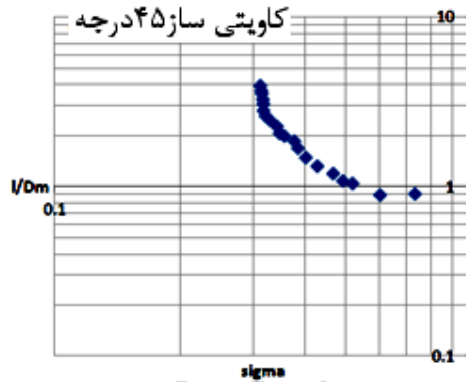


شکل ۱۷- تغییرات ضریب پسا با عدد کاویتاسیون جریان



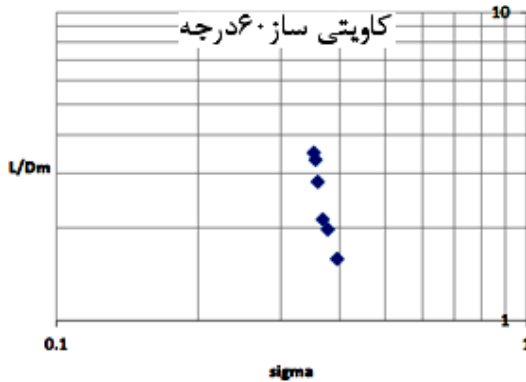
شکل ۱۸ الف- تغییرات نسبت طول سوپرکاویتی به بیشینه قطر آن نسبت

به عدد کاویتاسیون جریان برای کاویتا ساز ۳۰ درجه



شکل ۱۸ ب- تغییرات نسبت طول سوپرکاویتی به بیشینه قطر آن نسبت

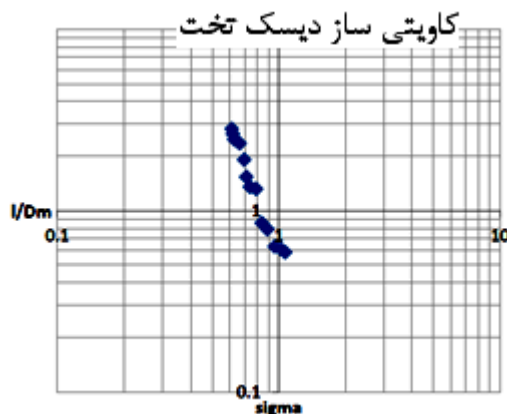
به عدد کاویتاسیون جریان برای کاویتا ساز ۴۵ درجه



شکل ۱۸ ج- تغییرات نسبت طول سوپرکاویتی به بیشینه قطر آن نسبت

به عدد کاویتاسیون جریان برای کاویتا ساز ۶۰ درجه





**شکل ۱۸ -** تغییرات نسبت طول سوپر کاویتی به بیشینه قطر آن نسبت به عدد کاویتاسیون جریان برای کاویتی ساز دیسک تخت

مشاهده می‌شود که هرچه عدد کاویتاسیون جریان به عدد کاویتاسیون انسداد جریان نزدیک‌تر باشد، نقاط به دست آمده در حالت عمودی تر در نمودار قرار می‌گیرند و نیز به نظر می‌رسد که با افزایش زاویه راس کاویتی ساز مخروطی عدد کاویتاسیون انسداد جریان افزایش یافته و برای کاویتی ساز دیسک تخت ( $\sigma_{blockage}=3.98$ ) بیشترین است. نتیجه جالب دیگر این است که عدد کاویتاسیون انسداد جریان برای کاویتی سازهای مخروطی ۳۰ درجه ( $\sigma_{blockage}=1.78$ )، ۴۵ درجه ( $\sigma_{blockage}=2.0$ ) و ۶۰ درجه ( $\sigma_{blockage}=2.24$ ) به ترتیب بزرگتر از عدد کاویتاسیون انسداد جریان ناشی از قرار گرفتن گوه‌ای متقارن با وتر  $C=5\text{mm}$  (برابر با قطر کاویتی سازهای مخروطی) و زوایای راس ۴۵، ۳۰ و ۶۰ درجه داخل کانالی با ارتفاع  $H=40\text{mm}$  (برابر با قطر محفظه آزمون) می‌باشد که به ترتیب از رابطه زیر [۱۶]  $0.374$ ،  $0.619$  و  $0.92$  به دست می‌آیند. در رابطه زیر  $2\gamma$  زاویه راس گوه می‌باشد.

$$\frac{\sigma_{blockage}}{1 + \frac{\sigma_{blockage}}{2}} = \frac{4\gamma}{\pi} \cosh^{-1} \left( e^{\frac{\pi C}{H}} \right) \quad (1)$$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، جریان سوپر کاویتاسیونی طبیعی حول بدنه استوانه‌ای با کاویتی سازهای مخروطی ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه و دیسک تخت در یک تونل آب مدار باز تحت زاویه حمله صفر با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری مناسب و کالیبره و نیز یک دوربین فیلم برداری سرعت بالا برای استخراج مشخصه‌های هندسی سوپر کاویتی مطالعه تجربی شده است. در آزمایشات اثر نوع کاویتی ساز، سرعت جریان در محفظه آزمون بر اندازه سوپر کاویتی، ضریب پسای روی مدل بررسی گردید. مشاهده شد که تشکیل سوپر کاویتی می‌تواند باعث کاهش نیروی پسای وارد بر مدل از طرف جریان شود. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که پدیده سوپر کاویتاسیون و استفاده از کاویتی سازها می‌تواند برای کاهش قابل ملاحظه نیروی پسای وارد بر ادوات نظامی زیر سطحی مانند اژدها و زیر دریایی‌ها و در نتیجه افزایش سرعت، برد و کارایی آنها در شرایط عملیاتی و نیز کاهش مصرف انرژی آنها گردد. در بین کاویتی سازهای مطالعه شده در تحقیق حاضر به نظر می‌رسد که کاویتی سازهای ۳۰ و ۴۵ درجه به دلیل امکان ایجاد انسداد جریان کمتر و عملکرد هیدرودینامیکی مناسب‌تر در کاهش نیروی پسای وارد از طرف جریان بر بدنه برای استفاده در کاربردهای نظامی مناسب‌تر می‌باشند.

## مراجع

- [1] Choi, J.Y., and Ruzzene, M., "Stability Analysis of Supercavitating Underwater Vehicles with Adaptive Cavitator", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, pp. 1360-1370, (2006).
- [2] Hu, Ch., Yang, H.L., Zhao, C.B., and Huang, W.H., "Unsteady Supercavitating Flow Past Cones", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 18, No. 3, pp. 262-272, (2006).
- [3] Ma, Ch., Jia, D., Qian, Zh.F., and Feng, D.H., "Study on Cavitation Flows of Underwater Vehicle", *Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics*, Vol. 18, No. 3, pp. 373-377, Shanghai, China, July, (2006).
- [4] Amromin, E., "Analysis of Body Supercavitation in Shallow Water", *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp.1602-1606, (2007).
- [5] Shafaghat, R., Hosseinalipour, S.M., Nouri, N.M., and Lashgari, I., "Shape Optimization of Two-dimensional Cavitators in Supercavitating Flows, using NSGA II Algorithm", *Applied Ocean Research*, Vol. 30, pp. 305-310, (2008).
- [6] Shafagat, R., Hosseinalipour, S.M., Nouri, N.M., and Vahedgermi, A., "Mathematical Approach to Investigate the Behavior of the Principal Parameters Axisymmetric Supercavitating Flows, using Boundary Element Method", *J. Mech.*, Vol. 25, No. 4, pp. 65-73, (2009).
- [7] Shafaghat, R., Hosseinalipour, S.M., Lashgari, I., and Vahedgermi, A., "Shape Optimization of Axisymmetric Cavitators in Supercavitating Flows, using the NSGA II Algorithm", *Applied Ocean Research*, Vol. 33, pp. 193-198, (2011).
- [8] Nouri, N.M., and Eslamdoost, A., "An Iterative Scheme for Two-dimensional Supercavitating Flow", *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp.708-715, (2009).
- [9] Hu, Z.M., Dou, H.S., and Khoo, B.C., "On the Modified Dispersion-controlled Dissipative (DCD) Scheme for Computation of Flow Supercavitation", *Computers and Fluids*, Vol. 40, pp. 315-323, (2011).
- [10] Chen, X., Lu, C.J., Li, J., and Chen, Y., "Properties of Natural Cavitation Flows Around a 2-D Wedge in Shallow Water", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 23, No. 6, pp.730-736, (2011).
- [11] Rabiee, A., Alishahi, M.M., Emdad, H., and Saranjam, B., "Part A: Experimental Investigation of Unsteady Supercavitating Flows", *IJST, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 35, pp.15-29, (2011).
- [12] Rabiee, A., Alishahi, M.M., Emdad, H., and Saranjam, B., "Part B: Numerical Investigation of Unsteady Supercavitating Flows", *IJST, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 35, pp. 31-46, (2011).

- [13] Park, S., and Rhee, S. H., "Computational Analysis of Turbulent Supercavitating Flow Around a Two-dimensional Wedge-shaped Cavitator Geometry", *Computers and Fluids*, Vol. 70, pp. 73-85, (2012).
- [14] Roohi, E., Zahiri, A.P., and Passandideh-Fard, M., "Numerical Simulation of Cavitation Around a Two-dimensional Hydrofoil using VOF Method and LES Turbulence Model", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, pp. 6469-6488, (2013).
- [15] Saranjam, B., "Experimental and Numerical Investigation of an Unsteady Supercavitating Moving Body", *Ocean Engineering*, Vol. 59, pp. 9-14, (2013).
- [16] Franc, J.P., and Michel, J.M., "Fundamentals of Cavitation", Section: 6. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, Vol. 75, pp. 97-130, (2004).

**Abstract**

In this investigation, the natural supercavitating flow with various velocities in an open-circuit water tunnel over a cylindrical body equipped with a cavitator is studied experimentally. The cavitators are cones with angles of  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and a flat disk. In order to analyze the dynamic behaviour of supercavity and derive its geometrical characteristics such as its length and diameter, a high-speed photography system is used. Also several convenient sensors are utilized to measure the drag force and the pressure distribution along the body. To validate the experiments, the results obtained for the case of disk cavitator are compared with the available information in the literature. The results of this study can be employed in the design and optimization of shape and operation of cavitators in the military applications.