

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.1.8.2

بررسی عددی اثر قطر سوراخ کاویتاتور دیسکی بر نیروی پسا و شکل حباب ابرکاواک احسان یاری

ehsanyari11@gmail.com

استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۴

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۱۹

چکیده

ابرکاواک یک فرایند هیدرودینامیکی است که در آن جسم کاملاً در یک لایه گاز احاطه شده و تشکیل آن ناشی از کاویتاتور نصب شده در جلوی جسم است. شناورهای ابرکاواکی می‌توانند با سرعت‌های بالایی در آب حرکت کرده و مقاومت اصطکاکی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. در سال‌های اخیر محققان، هندسه‌های مختلفی از کاویتاتورها در تحقیقات تئوری، عددی و تجربی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. یکی از مهم‌ترین کاویتاتورهای مورد استفاده در کاربردهای عملی، کاویتاتورهای دیسکی سوراخ‌دار است که در این مقاله مورد تحلیل قرار گرفته است. حساسیت سنجی پارامترهای هندسی و جریانی و تأثیر آن‌ها بر هندسه کاویتی (حباب) و میزان انتقال جرم مهم‌ترین متغیرهایی هستند که در مطالعه حاضر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. تحلیل عددی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه حجم محدود به کمک نرم‌افزار انسیس-فلوئنت انجام شده است. برای مدل‌سازی جریان سیال اغتشاشی از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است. شبکه تولیدشده حول کاویتاتور و در همه دامنه حل شبکه‌سازمان یافته است. برای اعتبارسنجی نتایج عددی از دو نمونه هندسه شامل سطح مستطیلی با زاویه حمله ۱۰ درجه و کاویتاتور دیسکی استفاده شده است. مطابق نتایج به دست آمده انطباق خوبی بین داده‌های عددی و تجربی وجود دارد. بر اساس نتایج به دست آمده برای سرعت‌های بالاتر از ۶۰ متر بر ثانیه با استفاده از ضرایب ثابت اصلاحی می‌توان میزان مقاومت مربوط به حباب ابرکاواک را با دقت مناسبی تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: ابرکاواک، کاویتاتور دیسکی سوراخ‌دار، روش حجم محدود، انتقال جرم، ضریب پسا.

۱. مقدمه

کاویتاسیون به معنی تشکیل حباب‌های بخار در مناطق کم فشار میدان جریان مایع و ترکیدن این حباب‌ها در مناطق

پرفشار است. کاویتاسیون مشابه جوشیدن مایع است، با این تفاوت که جوشیدن در اثر دمای بالا روی می‌دهد و کاویتاسیون در اثر کاهش فشار. در واقع کاویتاسیون^۱

کاویتاسیون و ابرکاواک انجام گرفته است که از آن جمله می توان به تحقیقات اراکری و همکاران اشاره نمود که به بررسی تأثیر لزجت بر شروع کاویتاسیون در بدنه های متقارن محوری پرداخته اند [۲]. ژیان هانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱، با استفاده از فرض مدل مخلوط همگن و به کمک یک حل گر تجاری، مشخصات جریان کاویتاسیون طبیعی و گازدهی شده و برهمکنش میان آن ها را روی یک پرتابه مورد بررسی قرار دادند [۳]. جیانگ و همکاران به بررسی اثر تزریق آب در یک کاویتاتور سوراخ دار با استفاده از نرم افزار سی اف ایکس پرداختند [۴].

شانگ در سال ۲۰۱۳، جریان ابرکاواک طبیعی را در اطراف یک زیردریایی به صورت عددی شبیه سازی و وجود باله روی بدنه را مورد بررسی قرار داد [۵]. کنستانتین و همکاران معادله های مربوط به انتقال جرم سیال را توسعه داده و برای اجرا از نرم افزار سی اف ایکس استفاده نمودند طوری که شاهد افزایش دقت در مقایسه با داده های آزمایشگاهی بودند [۶]. غفاری و همکاران تحلیل پرتابه زیرسطحی متقارن محوری کاویتاتور دار با و بدون سوراخ با استفاده از دو روش المان مرزی و حجم محدود را مورد بررسی قرار داده اند [۷]. یانگ و همکاران به بررسی کاهش پسای یک وسیله سریع در جریان ابرکاواک با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به کمک روش اغتشاشی $k-\epsilon$ پرداختند. نتایج تحلیل های عددی بر چند کاویتاتور انطباق خوبی را با داده های تجربی نشان می دهد [۸]. کدیور و همکاران به بررسی کاویتاسیون طبیعی پشت کاویتاتورهای سه بعدی در حالت عددی و تجربی در تونل کاویتاسیون پرداختند. در این تحلیل عددی از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ برای جریان مغشوش و روش VOF برای مدل سازی جریان دوفازی کاویتاسیونی استفاده شده است [۹]. عرفانیان و مقیمان به مطالعه عددی تأثیر ضریب نرخ دمش گاز بر مشخصات کاویتی در جریان ابرکاواک گازدهی شده پرداختند. در این مطالعه جریان ابرکاواک گازدهی شده بر یک مدل پرتابه ای در شرایط پایدار با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار تجاری سی اف ایکس و به کارگیری مدل آشفتگی

پدیده ای ترمودینامیکی است که فرایند گذر از حالت مایع به حالت گازی بدون منبع خارجی را توصیف می کند، از سوی دیگر کاویتاسیون را به اصطلاح ناپیوستگی در پیوستگی سیال نیز می نامند که شکل حباب های بخاری را به خود گرفته اند [۱]. هنگامی که عدد کاویتاسیون کاهش می یابد، حفره کوچک تشکیل شده رشد کرده و بزرگ تر می شود تا جایی که تمام سطح جسم را در بر گرفته و در پایین دست کاویتاتور بسته می شود، این حالت را ابرکاواک می نامند. در شکل ۱ پدیده ابرکاواک بر روی هیدروفویل تحت زاویه حمله نشان داده شده است.



شکل ۱. سوپرکاویتاسیون دوبعدی پشت هیدروفویل ناسا ۱۶۰۱۲ [۱]

وقتی یک کویتی پر از گاز یا بخار رشد کرده، ابعاد آن در مقایسه با ابعاد جسم بسیار بیشتر شود، سوپر کویتی نامیده می شود. سوپر کاویتاسیون فرایندی هیدرودینامیکی است که در آن جسم کاملاً در یک لایه گاز احاطه شده است و مبدأ تشکیل آن کویتاتور نصب شده در جلوی جسم است. سوپر کویتی به دو صورت ایجاد می شود.

- ایجاد سرعت بالا به طوری که آب در دماغه جلوی جسم بخار شود؛
- فراهم کردن گاز در فشاری نزدیک به فشار محیط به شکلی که کویتی تشکیل شود.

از گذشته تا به امروز فعالیت های زیادی برای شناسایی رفتار پدیده ابرکاواک انجام شده است که امروزه به علت نیاز به سرعت های بالا در پرتابه ها، گلوله ها و شناورهای زیرسطحی کاربرد و شناسایی هرچه بیشتر پدیده ابرکاواک خود را بیشتر از قبل نشان می دهد. همان طور که گفته شد فعالیت های تجربی و عددی زیادی برای معرفی و توسعه دانش پدیده



شکل ۲. شماتیک جریان سوپر کاویتاسیون

تنش برشی مماسی روی سطح مشترک کابیتی به واسطه اصطکاک میان لایه‌های بخار - گاز کابیتی و جریان خارجی وجود داشته و مقدارش اغلب کم است، زیرا چگالی سیال داخل کابیتی بسیار کوچک‌تر از چگالی مایع است. از این رو، تنش‌های برشی روی کابیتی اغلب نادیده گرفته می‌شوند [۱۲].

◀ کاویتاسیون

ماهیت چندگانه کاویتاسیون باعث شده است که یک عدد بدون بعد برای آن تعریف شود. این عدد شامل پارامترهای جریانی و خواص فیزیکی سیال (جرم حجمی و لزجت) است.

◀ عدد کاویتاسیون

پارامترهای کاویتاسیون به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

P : فشار مطلق در نقطه مبنا در جریان

P_v : فشار بخار مایع در دمای آزمایش

ρ : چگالی مایع

V : سرعت در نقطه مبنا

برای تعریف σ لازم نیست حتماً کاویتاسیون رخ دهد زیرا اگر مقدار σ به حد کافی بزرگ باشد، پدیده کاویتاسیون اصلاً رخ نمی‌دهد. σ در واقع به یافتن فشار مطلق در یک نقطه و مقایسه آن با نقاط دیگر کمک می‌کند.

ضریب فشار نیز تعریفی مانند عدد کاویتاسیون داشته و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_p = \frac{P_s - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3)$$

که P_∞ و V فشار و سرعت نسبی جریان بالادست هستند.

کی‌اُمگا‌اس تی و تکنیک حجم سیال به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده تغییرات ضریب نرخ دمش گاز بر حسب طول کابیتی تابعی از عدد فرود جریان کابیتاسیونی بوده و مقدار بحرانی ضریب نرخ دمش گاز بر حسب عدد فرود جریان به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند [۱۰]. چان یونگ و همکاران به بررسی پدیده ابر کاواک در یک پرتابه زیرسطحی با عبور از ناحیه چگالی متغیر پرداختند. در این تحقیق هدف حرکت پرتابه از ناحیه کم چگالی به ناحیه چگال‌تر و برعکس و مطالعه پدیده ابر کاواک بوده است. در این تحلیل عددی از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ برای جریان مغشوش استفاده شده است [۱۱].

در این مقاله هدف تحلیل پدیده ابر کاواک حول کابیناتور دیسکی سوراخ‌دار در قطرهای متفاوت سوراخ داخل دیسک است. تحلیل‌های عددی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس حجم محدود و به کمک نرم‌افزار انسیس - فلوئنت انجام گرفته است.

۲. پارامترهای فیزیکی سوپر کابیتی‌ها

◀ فشار کابیتی

کابیتی مخلوطی از بخار و گاز چگال ناپذیر (غیر قابل تقطیر) است (شکل ۲) که فشار داخل آن عبارت است از:

$$p_c = p_v + p_g \quad (1)$$

در این معادله، p_v و p_g به ترتیب نشان‌دهنده فشار بخار و فشار جزئی گاز است. فشار کابیتی p_c اغلب، با زمان ثابت بوده و در سراسر کابیتی یکنواخت است. وجود گاز در کابیتی به واسطه دیفیوژن در سطح مشترک گازهای حل‌نشده در مایع است. اگر تجمع گاز اشباع درون مایع زیاد باشد، فشار جزئی گاز در کابیتی زیاد خواهد شد. نکته دیگری که مورد توجه است، فشار بالای گاز درون کابیتی‌های هوادهی شده^۳ است، که این فشار بالا به فشار محیط و نرخ تزریق جریان وابسته است.

در مدل کاویتاسیون معادله جابه‌جایی به همراه ترم‌های منبع وابسته به فشار حل می‌شود تا چگالی ناحیه به دست آید. به علت این کوپل بودن، معادله اصلاح فشار نیاز به فرمول‌بندی دوباره دارد (گرچه مدل به صورت صریح اثر تراکم‌پذیری را در نظر نمی‌گیرد) بدین وسیله به طرح کوپل فشار-سرعت-چگالی در معادله اصلاح می‌رسیم. این طرح، فرمولاسیون تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر را برای نگه‌داشتن تراکم‌ناپذیری فاز مایع و وابستگی فشار-چگالی در ناحیه کاویتاسیون ترکیب می‌کند.

◀ مدل چند فاز

طرح تک سیال (فاز مخلوط) مورد استفاده قرار گرفته است. این روش شامل معادله‌های جریان لزج استاندارد (ناویر-استوکز) است و مدل جابه‌جایی توربولانس $k-\varepsilon$ مورد استفاده قرار گرفته است. معادله‌های بقای جرم (۷) و مومتم (۸) به همراه معادله انتقال (۹) و معادله‌های مدل توربولانس تشکیل دستگاه معادله‌ها می‌دهند که چگالی سیال (که تابعی از کسر جرمی بخار f_v است) محاسبه می‌شود. رابطه $\rho_m - f_v$ (چگالی مخلوط و کسر جرمی بخار) به صورت زیر است:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{1-f_v}{\rho_l} \quad (5)$$

کسر حجمی فاز بخار α_v مرتبط است با کسر جرمی فاز بخار با:

$$\alpha_v = f_v \frac{\rho_m}{\rho_v} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot \left(\rho_m \vec{v}_m \right) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot \left(\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_m \left(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T \right) \right] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m f_v) + \nabla \cdot \left(\rho_m \vec{v}_m f_v \right) = R_e - R_c \quad (9)$$

σ برای هیدروفویل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma = \frac{P_{UP} - P_V}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (4)$$

بالتر بودن یا مساوی بودن یا کمتر بودن فشار نسبت به فشار بخار به مقدار $\sigma + C_p$ بستگی دارد. عبارت $\sigma + C_{P_{MIN}} = 0$ به حالت‌های بحرانی شروع کاویتاسیون مربوط است. وقتی که σ کم‌تر از $|C_{P_{MIN}}|$ باشد ناحیه‌ای روی سطح جسم وجود دارد که فشار کمتر از فشار بخار است و جریان بدون کاویتاسیون باقی می‌ماند.

◀ اثر لزجت در پدیده کاویتاسیون

لزجت اثر مستقیمی بر روی پدیده کاویتاسیون دارد. افزایش لزجت در سیالات باعث حالت خفقتان می‌شود و در نتیجه حباب‌های کاویتاسیون دیرتر به وجود آمده و دیرتر هم می‌ترکند. به عبارت دیگر یک افت انرژی مکانیکی ایجاد می‌شود که باعث جلوگیری از بزرگ شدن و ترکیدن حباب‌های کاویتاسیون می‌شود. از طرف دیگر افزایش لزجت اندازه پیشینه حباب‌ها را کم می‌کند. لزجت روی به تعویق انداختن و بزرگ شدن و ترکیدن حباب‌ها اثر محسوسی دارد.

۳. معادله‌های حاکم و الگوریتم حل

شش‌سازه سازی جریان ابرکاوآک حول کاویتاتور دیسکی سوراخ دار با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی بر اساس حجم محدود انجام گرفته است که در آن دستگاه معادله‌های ناویر استوکس وابسته به زمان-رینولدز میانگین (URANS) - به صورت فرم کانسرواتیو حل شده است. مدل عددی بر اساس طرح حجم محدود غیرصریح بر اساس الگوریتم سیمپل^۴ (پاتانکار [۱۳] و فرزیگر، پریک [۱۴]) به کمک مدل کاویتاسیون و چند فاز و به صورت متقارن محوری است. الگوریتم سیمپل نیاز به اصلاح برای جریان‌های تراکم‌پذیر بالا دارد (سنوکاک، شای [۱۵]) یکی از طرح‌های مهم روش فرمول‌بندی دوباره معادله اصلاح فشار برای نمایش رفتار پخش جابه‌جایی است.

◀ مدل کاپیتاسیون

ترم‌های منبع R_e و R_c که در معادله انتقال ظاهر شده است، به ترتیب تشریح‌کننده تولید بخار و میعان بخار هستند. ترم‌های منبع تابعی از شرایط محلی جریان (سرعت و فشار استاتیک) و خواص سیال (چگالی فازهای بخار، مایع و فشار اشباع و کشش سطحی بخار-مایع) هستند. ترم‌های منبع از معادله ریلی-پلست به دست آمده‌اند که ترم‌های درجه بالا و ترم لزجت حذف شده است. به دست آوردن ترم‌های منبع را می‌توانید در سینگهال [۱۶] مشاهده کنید. که به صورت زیر داده شده است:

$$p < p_v \quad R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (10)$$

$$p > p_v \quad R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} f_v \quad (11)$$

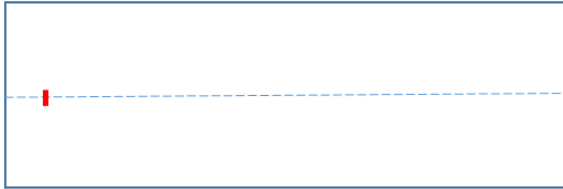
که C_e و C_c ثابت‌های تجربی است. k انرژی جنبشی موضعی و γ کشش سطحی و f_v کسر جرمی بخار و f_g کسر جرمی گازهای محلول هستند. C_e و C_c با مقایسه نتایج تجربی و عددی در شرایط اولیه و هندسه‌های مختلف به دست می‌آیند. که توسط سینگهال به صورت ۰/۰۲ و ۰/۰۱ بیان شده است.

۴. دامنه حل و شبکه عددی

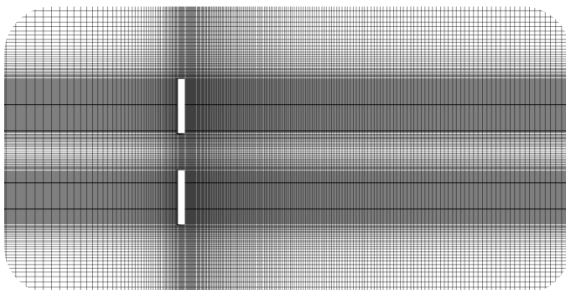
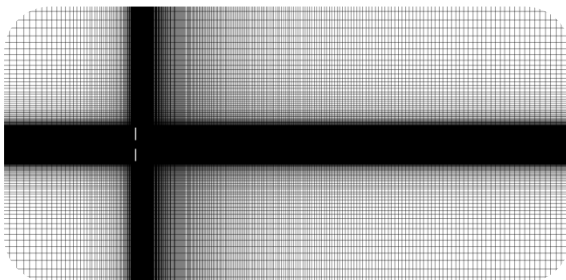
در این بخش دامنه حل عددی حول کاپیتاتور دیسکی سوراخ دار نشان داده شده است. محور وسط در شکل همان محور مورد استفاده برای حل متقارن محوری است. با توجه به فیزیک پدیده ابر کاواک و محدوده پشت کاپیتاتور بسیار بیشتر از ابعاد دیگر دامنه حل در نظر گرفته شده است. ابعاد دامنه حل طوری در نظر گرفته شده که اثرات دیواره بر روی حل حذف شود. دامنه حل مستطیلی به ابعاد ۶/۵ متر در ارتفاع ۲ متر است که به ترتیب ۱۳۰ و ۲۰ برابر قطر دیسک کاپیتاتور هستند. (شکل ۳)

در شکل ۴ شبکه لایه‌مرزی بر کاپیتاتور و نمونه شبکه سازمان یافته در دامنه حل نمایش داده شده است. با توجه به

حساسیت مدل‌سازی عددی پدیده ابر کاواک به شبکه تولید شده؛ در این تحلیل عددی سعی شده است از المان‌های با کیفیت بالا و ضریب منطری کم استفاده شود.



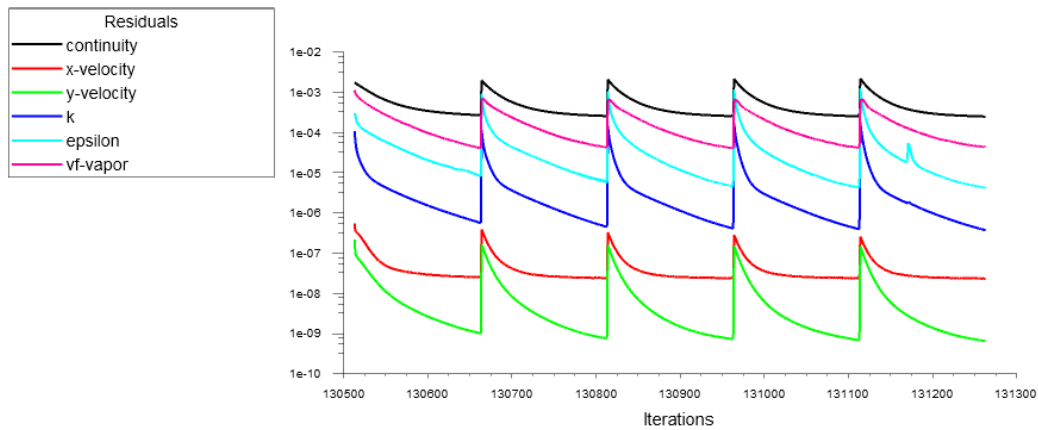
شکل ۳. محدوده دامنه حل و هندسه کاپیتاتور



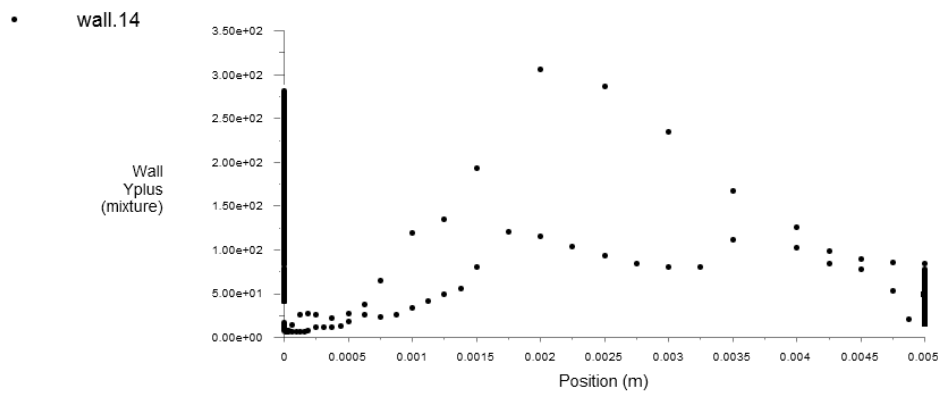
شکل ۴. شبکه سازمان یافته حول کاپیتاتور و دامنه حل

شکل ۵ نشان‌دهنده نمودار باقی مانده‌ها از حل عددی جریان سیال دوفازی در حالت ناپایاست. گام زمانی در نظر گرفته شده $\Delta t = 0.0001$ ثانیه است. مطابق شکل نتایج پس از حدود ۱۳۰ هزار تکرار استخراج شده است.

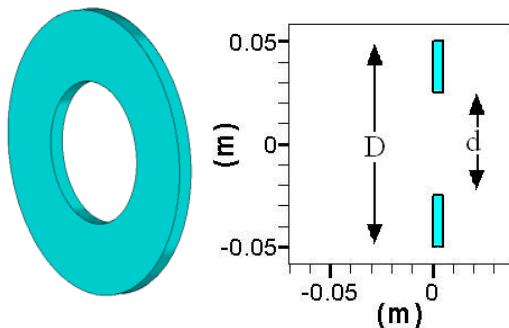
در شکل ۶ مقدار پارامتر $\gamma + \rho$ روی اولین گره محاسباتی حول کاپیتاتور نشان داده شده است، با توجه به مدل اغتشاشی مورد استفاده $(k - e)$ همه مقادیر بین ۳۰ تا ۳۰۰ هستند که این صحت داده‌های عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار باقی مانده‌ها بر حسب تکرار در سرعت ۹۰ متر بر ثانیه

شکل ۶. نمودار Y^+ بر حسب موقعیت در سرعت ۹۰ متر بر ثانیه

(۲۰۰، ۴۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰) متر بر ثانیه و در فشار عملکرد ۱/۸ اتمسفر شبیه‌سازی شده است.



شکل ۷. هندسه کاویتاتور و پارامترهای مربوطه

برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج به دست آمده از روش عددی با نتایج تجربی موجود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. شکل ۸ حجم بخار روی یک سطح مستطیلی را به ابعاد $۱۴۴ \times ۱۸ \times ۶۹/۵$ میلی‌متر در زاویه حمله ۱۰ درجه، سرعت ۹ متر بر ثانیه و عدد

۵. نتایج

هدف از انجام این تحقیق به دست آوردن نیروی پسا و حجم حباب و شار جرمی گذرنده از سوراخ داخلی کاویتاتور دیسکی سوراخ دار مطابق شکل است. علاوه بر این حساسیت سنجی پارامترهای هندسی و جریانی مختلف در ادامه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

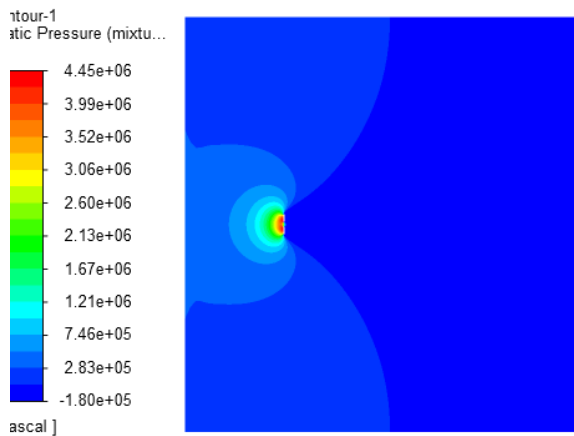
همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود هندسه تمامی کاویتاتورها دیسک همراه یک سوراخ در مرکز آن است. قطر خارجی همه کاویتاتورها ۱۰ سانتی‌متر است که در اینجا با D نشان داده شده است و قطر داخلی با d نشان داده می‌شود و طوری تغییر می‌کند که نسبت‌های D/d مشخصی را ایجاد کند. در این مقاله پنج نسبت قطر (۲ تا ۶) مورد بررسی قرار گرفته است، در ضمن ضخامت تمامی کاویتاتورها نیم سانتی‌متر است. هر کدام از حالت‌های بالا در هشت سرعت

ناچیز (کمتر از ۱ درصد) است. پس این مطلب تأییدکننده استقلال حل از شبکه به کار رفته است.

جدول ۲. مقایسه نیروی پسا در دو شبکه متفاوت

شبکه	سرعت (متر بر ثانیه)					
	۲۰۰	۱۶۰	۱۴۰	۱۲۰	۹۰	۶۰
۱۰۰۰۰۰	۱۱۱۴۲۶	۷۱۴۳۳	۵۴۸۰۷	۴۰۴۸۳	۲۳۱۰۰	۱۰۴۲۷
۴۰۰۰۰۰	۱۱۲۰۵۲	۷۱۸۷۲	۵۵۲۲۵	۴۰۷۰۴	۲۳۱۱۹	۱۰۴۲۹
درصد تفاوت	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۰۸	۰/۰۱۱

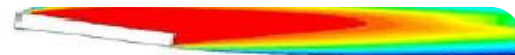
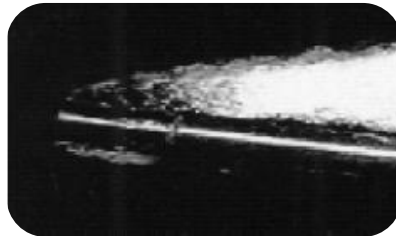
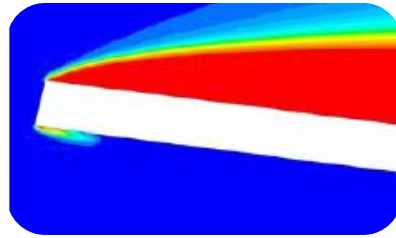
در شکل ۹ کانتور فشار استاتیکی در دامنه حل و در ناحیه نزدیک به کاویتاتور ارائه شده است. با توجه به سطح تخت دیسک کاویتاتور بیشترین میزان فشار در ناحیه نقاط سکون جریان یعنی جلوی دیسک مشاهده می‌شود.



شکل ۹. کانتور فشار استاتیکی حول کاویتاتور در سرعت ۹۰ متر بر ثانیه

شکل ۱۰ فرم حباب ابرکاواکی تولیدشده در ناحیه پشت کاویتاتور را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کاویتاتور سوراخ‌دار است؛ پس ناحیه جریان سیال آب ورودی از سوراخ دیسک نیز از نمای نزدیک‌تر نمایش داده شده است.

کاویتاسیون ۰/۵ برای دو حالت تجربی و عددی نشان می‌دهد [۱۷]. همان طور که مشاهده می‌شود توافق بسیار مناسبی در محدوده ناحیه تحت کاویتاسیون وجود دارد.



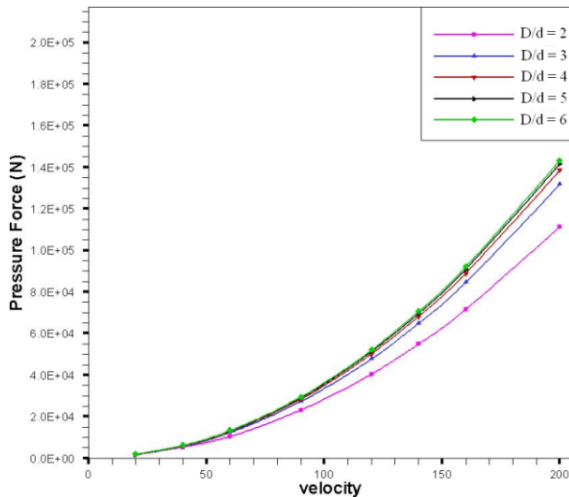
شکل ۸. حباب کاویتاسیون روی یک سطح مستطیلی با زاویه حمله ۱۰ درجه

همچنین در حالت کاویتاتور دیسکی که نتایج تجربی برای عدد کاویتاسیون ۰/۵ موجود است [۱۸] از جدول ۱ دقت مناسب شبیه‌سازی مشهود است.

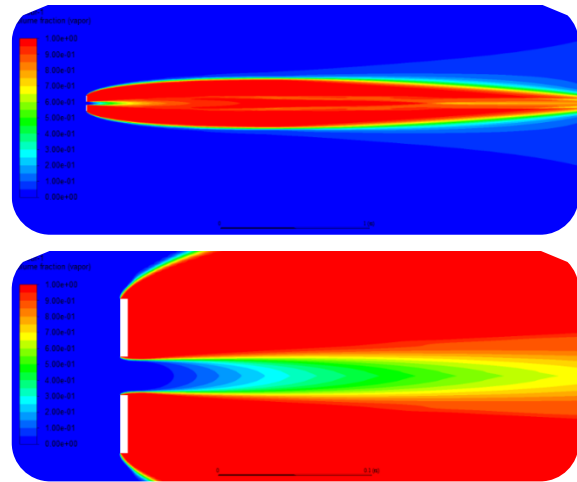
جدول ۱. مقایسه مقادیر تجربی و عددی برای کاویتاتور دیسکی

دیسک	$l_{\text{trix}} / D_{\text{cavitator}}$	$d_{\text{trix}} / D_{\text{cavitator}}$	C_D
تجربی	۱۸/۵	۳/۱۵	۰/۹۵
عددی	۱۵	۳	۰/۹۸

در این شبیه‌سازی‌ها از روش متقارن محوری استفاده شده است که در حدود ۱۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی برای هر مدل به کار رفته است. برای اطمینان از مستقل بودن شبکه، برای نسبت قطر ۲، یک شبکه دیگر با تعداد سلول‌های تقریباً ۴ برابر یعنی در حدود ۴۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی نیز شبیه‌سازی انجام شده است. مقادیر نیروی پسا و درصد تفاوت برای دو شبکه مختلف در جدول ۲ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اختلاف دو عدد محاسبه‌شده در هر دو بسیار



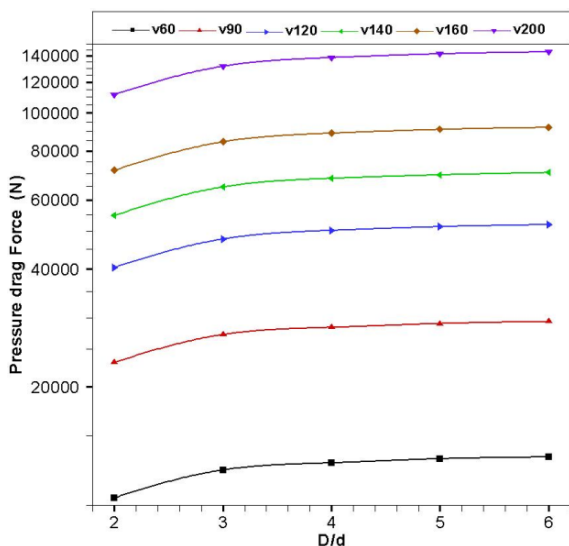
شکل ۱۰. نمودار نیروی پسا فشاری در برابر سرعت برای نسبت قطرهای متفاوت



شکل ۱۱. کانطور حجم بخار در سرعت ۹۰ متر بر ثانیه

حساسیت‌سنجی پدیده ابرکاوک (بر اساس پارامترهای هندسی و جریانی)

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت‌های بالا به صورت جدول و نمودار آورده شده است. همچنین برای استفاده از این نتایج برای دیگر حالت‌هایی که در این گستره مورد بررسی نیست؛ نمودارها و روش‌هایی به همراه خطای آن‌ها ارائه شده است که در صورت لزوم می‌توان به آن‌ها مراجعه نمود.



شکل ۱۲. نمودار نیروی پسا فشاری در برابر نسبت قطر برای سرعت‌های متفاوت

در شکل ۱۱ نمودار نیروی پسا فشاری در برابر سرعت جریان در نسبت قطرهای مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت نیروی پسا فشاری همواره افزایشی است. که این موضوع برای همه نسبت قطرها صدق می‌کند. در شکل ۱۲ نمودار نیروی پسا فشاری در برابر نسبت قطر برای سرعت‌های ۶۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه ترسیم شده است. در نمودارهای ۱۳ و ۱۴ نیروی درگ فشاری برحسب نسبت قطر برای سرعت‌های ۲۰ و ۴۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در شکل ۱۵ نیز نمودار ضریب اصلاحی برای محاسبه درگ فشاری ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود برای سرعت‌های ۶۰ به بعد روند نمودار نیروی پسا فشاری در برابر نسبت قطر کاملاً مشابه است؛ پس برای پیش‌بینی نیروی پسا در دیگر سرعت‌ها، ما نمودار شکل ۱۴ را به دست آورده‌ایم که با داشتن نسبت سرعت مربوط به سرعت ۶۰ متر بر ثانیه می‌توان ضریب اصلاح نیرو را از محور دیگر نمودار به دست آورد و با ضرب آن در نیروی فشاری مربوط به سرعت ۶۰ متر بر ثانیه، نیروی پسا فشاری مربوط به حالت مورد نظر را محاسبه نمود (شکل ۱۵). که مقدار درصد خطای این روش در نقاط معلوم مطابق جدول ۳ است.

جدول ۳. درصد خطای محاسبه پسا به کمک نمودار شکل ۸ با مقادیر

به دست آمده از شبیه سازی

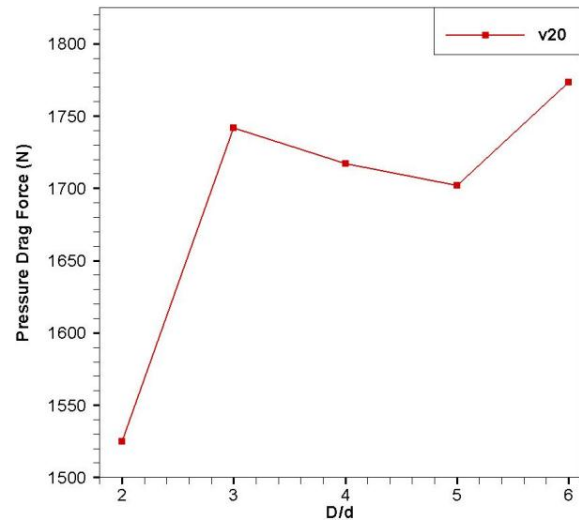
۲۰۰	۱۶۰	۱۴۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	D/d=2
۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۰۴۵	۰	D/d=3
۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۰/۰۷۵	۰	D/d=4
۱	۱	۰/۸۸	۰/۹۸	۰/۰۷۹	۰	D/d=5
۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۰/۰۹۳	۰	D/d=6

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود در تمامی حالت ها حداکثر درصد خطای نیروی پسا محاسبه شده ۱/۲ درصد است، پس برای دیگر سرعت ها نیز خطایی بیش از این انتظار نمی رود و به راحتی می توان به محاسبه نیروی پسا پرداخت.

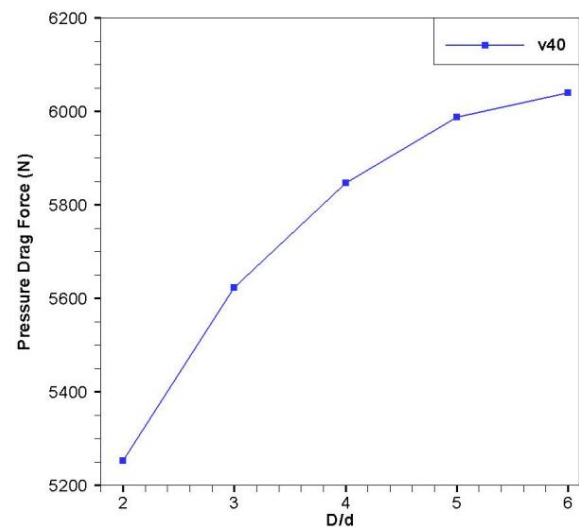
در شکل ۱۶ نمودار ضریب پسا فشاری در برابر سرعت و برای نسبت قطرهای ۲ تا ۶ رسم شده اند. در این نمودار در نسبت قطرهای مختلف روند مشابهی مشاهده می شود. که این موضوع در سرعت های بالاتر انطباق بیشتری را نشان می دهد.

شکل ۱۷ رفتار ضریب پسا بر حسب نسبت قطر را در سرعت های ۲۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه و شکل ۱۸ رفتار ضریب پسا بر حسب نسبت قطر را در سرعت های ۶۰ تا ۲۰۰ متر بر ثانیه نمایش می دهد. طبق شکل با افزایش سرعت روند مشابهی از ضریب درگ فشاری در سرعت های مختلف مشاهده می شود؛ اما در سرعت های پایین روند تغییرات ضریب درگ فشاری بر حسب نسبت قطر رفتار بسیار متفاوتی داشته و امکان استفاده از تقریب در سرعت های پایین امکان پذیر نیست.

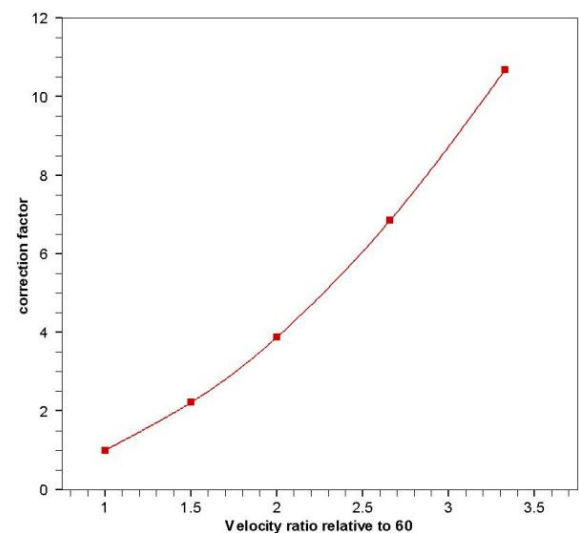
در شکل ۱۹ نمودار شار جرمی گذرنده از سوراخ داخلی کاویتاتور در برابر سرعت جریان و در شکل ۲۰ نمودار شار جرمی گذرنده از سوراخ داخلی کاویتاتور در برابر نسبت قطر رسم شده است.



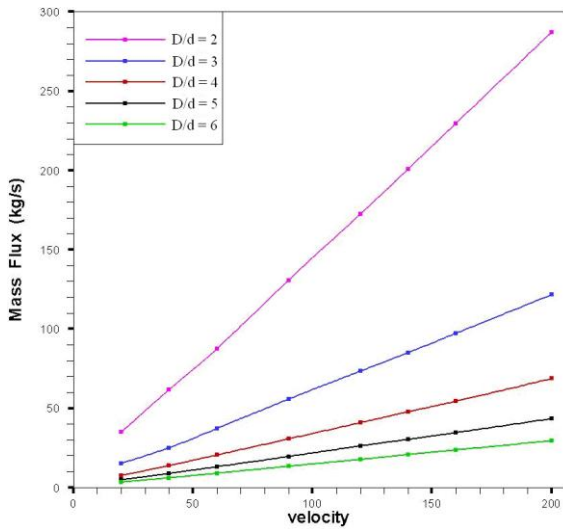
شکل ۱۳. نمودار نیروی پسا فشاری در برابر نسبت قطر برای سرعت ۲۰



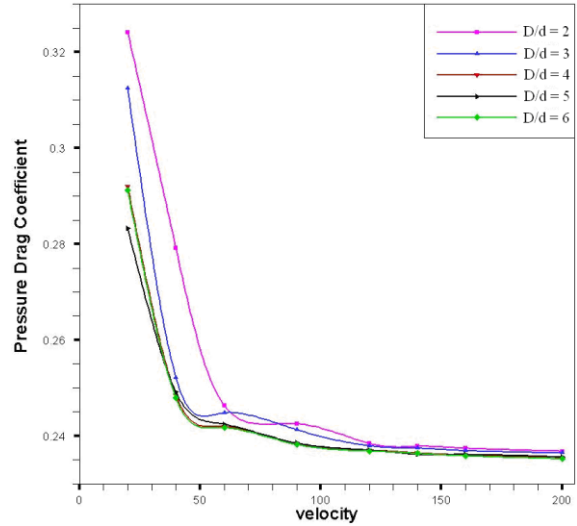
شکل ۱۴. نمودار نیروی پسا فشاری در برابر نسبت قطر برای سرعت ۴۰



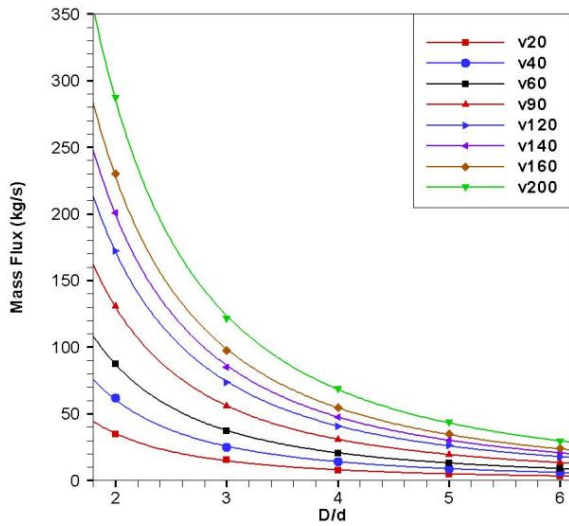
شکل ۱۵. نمودار ضریب اصلاح نیروی فشاری سرعت ۶۰ متر بر ثانیه در برابر نسبت سرعت



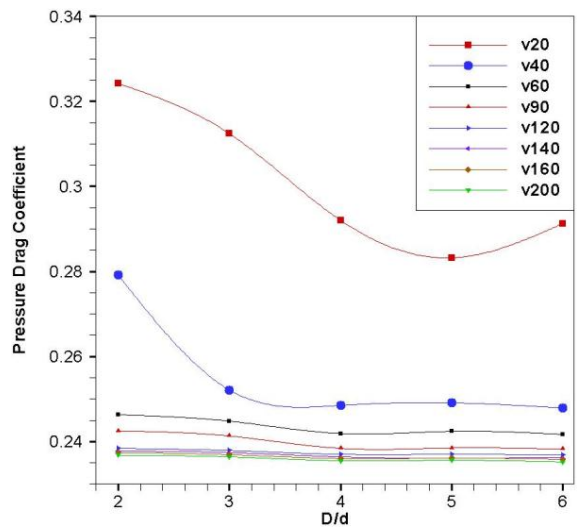
شکل ۱۹. نمودار شار جرمی در برابر سرعت



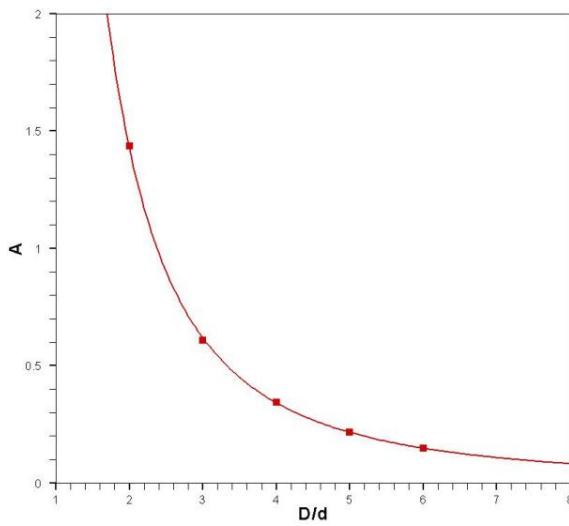
شکل ۱۶. نمودار ضریب پسا فشاری در برابر سرعت



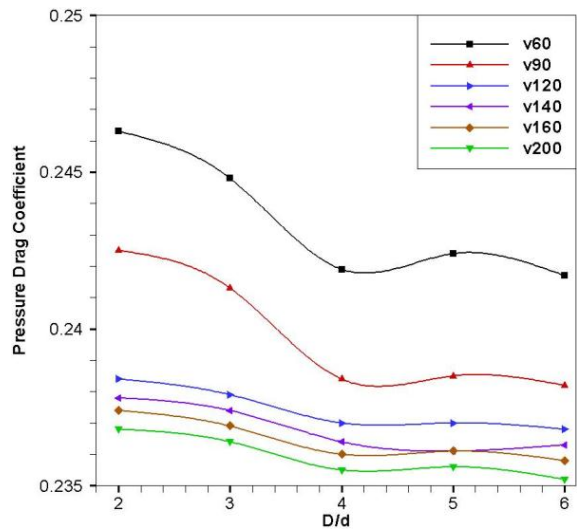
شکل ۲۰. نمودار شار جرمی در برابر نسبت قطر



شکل ۱۷. نمودار ضریب پسا فشاری در برابر نسبت قطر



شکل ۲۱. نمودار ضریب خط شار جرمی در برابر نسبت قطر



شکل ۱۸. نمودار ضریب پسا فشاری در برابر نسبت قطر

شکل ۲۲ حجم حباب بخار کاویتاسیون تشکیل شده توسط کاویتاتور را در هر حالت نسبت قطر برای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت قطر در هر سرعت حجم حباب افزایش می‌یابد هر چند این افزایش نسبت به طول کاویتاسیون کم است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله با استفاده از تحلیل عددی حجم محدود پدیده ابر کاواک حول کاویتاتور دیسکی سوراخ‌دار در سرعت‌ها و هندسه‌های مختلف کاویتاتور بر اساس نسبت قطر سوراخ به قطر دیسک انجام گرفته است. طبق نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را استخراج نمود:

- روش حجم محدود روش مناسبی برای تحلیل پدیده ابر کاواک است؛
- برای سرعت‌های ۶۰ به بعد روند نمودار نیروی پسا فشاری در برابر نسبت قطر کاملاً مشابه است؛
- برای پیش‌بینی نیروی پسا در هر سرعتی (بزرگ‌تر از ۶۰ متر بر ثانیه)، با داشتن نسبت سرعت مربوط به سرعت ۶۰ متر بر ثانیه می‌توان ضریب اصلاح نیرو را استخراج و با ضرب آن در نیروی فشاری مربوط به سرعت ۶۰ متر بر ثانیه، نیروی پسا فشاری مربوط به حالت مورد نظر را محاسبه نمود؛
- حداکثر میزان خطای مربوطه کمتر از ۲ درصد است.

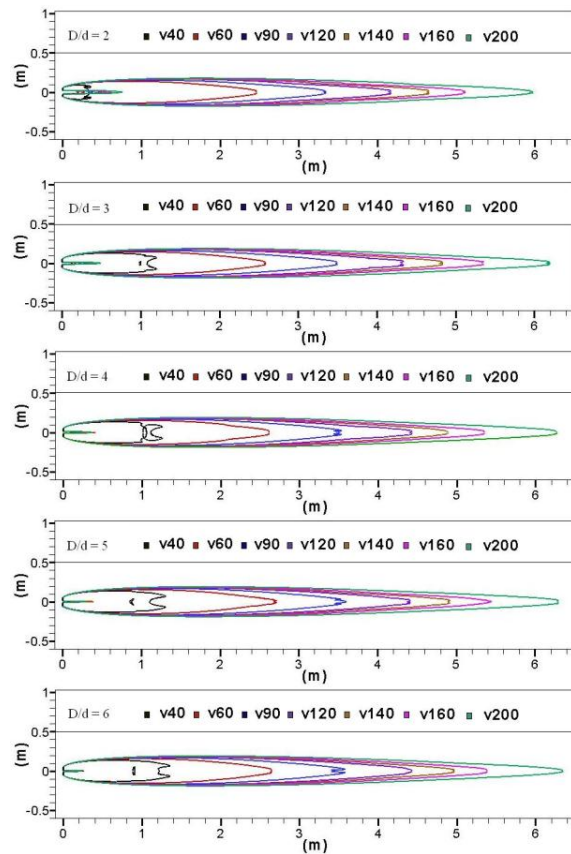
مراجع

- [1] Young F. Ronald. Cavitation. London: Imperial College Press; 1999.
- [2] Arakeri VH, Acosta AJ. Viscous effects in inception of cavitation on axisymmetric bodies. Journal of Fluids Engineering. 1973 Dec; 519-26.
- [3] Guo JH, Lu CJ, Chen Y. Characteristics of flow field around an underwater projectile with natural and ventilated cavitation. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2011; 16(2):236-41.
- [4] Jiang Z, Xiang M, Lin M, Zhang W, Zhang S. Research on hydrodynamic properties of annular cavitator with water injection. Polish Maritime Research. 2012; 19(4): 11-15.

برای پیش‌بینی شار گذرنده از سوراخ داخلی کاویتاتور در دیگر حالت‌ها می‌توان از شکل ۲۱ استفاده نمود، طوری که از این نمودار با داشتن نسبت قطر شیب خط $v = a \cdot m$ به دست می‌آید که در آن v سرعت جریان و m شار گذرنده است. خطای این روش در نقاط معلوم مطابق جدول زیر است.

جدول ۴. درصد خطای محاسبه شار گذرنده به کمک نمودار شکل ۱۴ با نقاط معلوم از شبیه‌سازی

سرعت (متر بر ثانیه)								
۲۰۰	۱۶۰	۱۴۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۴۰	۲۰	D/d
۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۱/۱	۱/۶	۶/۸	۱۷/۷	۲
۰	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۶۱	۱/۷	۲	۲/۸	۲۰/۳	۳
۰	۱	۰/۸	۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۸/۵	۴
۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۱	۰/۳	۱/۱	۸/۹	۵
۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۵	۱	۱/۹	۱۲	۶



شکل ۲۲. حجم حباب کاویتاسیون تشکیل شده به وسیله کاویتاتور

6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics; 2005 April 17-21; Matsushima, Miyagi, Japan.

[18] Franc JP, Michel JM. Fundamentals of Cavitation. Springer; 2004.

پی‌نوشت‌ها

1. Cavitation
2. Super-cavitation
3. Ventilated
4. Simple

[5] Shang Z. Numerical investigations of super cavitation around blunt bodies of submarine shape. Applied Mathematical Modelling. 2013;37(20): 8836-45.

[6] Konstantinov SY, Tselishev DV, Tselishev VA. Numerical cavitation model for simulation of mass flow stabilization effect in ANSYS سی . Modern Applied Science. 2014; 9(4):21-35.

[7] Ghaffari M, Pasandideh-Fard M, Tabaki M. Simulation of flow around axisymmetric projectiles with circular cavitator and ringed tip using control volume and boundary element methods. Modares Mechanical Engineering. 2016; 16(12): 67-78.

[8] Yang D, Xiong YL, Guo XF. Drag reduction of a rapid vehicle in super-cavitating flow. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017 Jan; 9(1): 35-44.

[9] Kadivar E, Javadi Kh, Javadpour SM. The investigation of natural super-cavitation flow behind three-dimensional cavitators: full cavitation model. Applied Mathematical Modelling. 2017;45:165-78.

[۱۰] عرفانیان محمدرضا، مقیمان محمد. مطالعه عددی تأثیر ضریب نرخ دمش گاز بر مشخصات کاویتی در جریان سوپر کاویتاسیون گازدهی شده. مجله مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳۹۷؛ ۱۸(۲): ۴۴۳-۴۵۰.

[11] Fan C, Li Z, Khoo BC, Du M. Supercavitation phenomenon research of projectiles passing through density change area. AIP Advances. 2019 Apr 2;9(4):045303.

[12] Acosta AJ, Furuya O. A Brief Note on Linearized, Unsteady, Supercavitating Flows. Journal of Ship Research. 1979;23(2):85-8.

[13] Patankar SV. Numerical heat and fluid flow. First ed. New York, CRC Press; 1980.

[14] Ferziger JH, Peric M. Computational methods for fluid dynamics. 2nd edition. Springer; 1999.

[15] Senocak I, Shyy W. A pressure-based method for turbulent cavitating flow computations. Journal of Computational Physics. 2002 Mar 1;176(2):363-83.

[16] Singhal AK, Athavale MM, Li H, Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. Journal of Fluids Engineering. 2002 Sep 1;124(3):617-24.

[17] Yoshikawa H, Tsubura I, Ota T. Unsteady cavitating flow around a slender rectangular.