



مطالعه عددی تأثیر ضریب نرخ دمش گاز بر مشخصات کاویتی در جریان سوپر کاویتاسیون گازدهی شده

محمد رضا عرفانیان¹، محمد مقیمان^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* صندوق پستی 91775-1111، moghiman@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 آذر 1396

پذیرش: 01 بهمن 1396

ارائه در سایت: 26 بهمن 1396

کلید واژگان:

جریان دوفازی

سوپر کاویتاسیون گازدهی شده

الگوی خروج گاز

ضریب نرخ دمش گاز

طول کاویتی

چکیده

در این مقاله جریان سوپر کاویتاسیون گازدهی شده بر روی یک مدل پرتابه‌ای در شرایط پایدار با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار تجاری سی اف ایکس و بکارگیری مدل آشفتگی کی-امگا اس-اس-تی و تکنیک حجم سیال به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، ابعاد کاویتی گازدهی شده حاصل از نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی موجود، مقایسه و دقت حل عددی مشخص شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که در یک عدد فرود ثابت و با افزایش ضریب نرخ دمش گاز، ابعاد کاویتی گازدهی شده در ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بحرانی تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین مشاهده شده است که در کاویتهای بزرگتر، اثر نیروی جاذبه موجب انحراف قسمت انتهایی کاویتی به سمت بالا می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب نرخ دمش گاز، الگوی خروج گاز از انتهای کاویتی از حالت جت بازگشتی به حالت گردابه دوقلو تبدیل می‌شود. تغییرات ضریب نرخ دمش گاز بر حسب طول کاویتی تابعی از عدد فرود جریان کاویتاسیونی بوده و مقدار بحرانی ضریب نرخ دمش گاز بر حسب عدد فرود جریان به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

Numerical study of gas rate coefficient effect on ventilated supercavitating flow specifications

Mohammad-Reza Erfanian, Mohammad Moghiman*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91755-1111 Mashhad, Iran, moghiman@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 02 December 2017

Accepted 21 January 2018

Available Online 15 February 2018

Keywords:

Two phase flow

Ventilated supercavitation

Gas leakage mechanism

Ventilated gas rate coefficient

Cavity length

ABSTRACT

In this paper, the three dimensional ventilated cavitating flow in the steady condition around a projectile model is simulated using CFD method combined with a sst k- ω turbulence model and volume-of-fluid technique. With the aid of CFD software ANSYS CFX. The numerical model is validated using comparisons between numerical predictions and existing experimental data and fairly good agreement is revealed. The numerical results show that with increasing the ventilation gas rate at constant Froude number, the cavity length gradually increases to a critical value and then remains fixed upon further increase in gas ventilation rate. Also, it has been observed that rear portion of larger cavity moves upwards due to gravitational effect. With increasing the ventilation gas rate, the gas leakage mechanism at rear portion of ventilated supercavity changes from the re-entrant jet closure mode to twin vortex closure mode. The variation of ventilation gas rate versus cavity length is a function of Froude number and the critical ventilation gas rate increases linearly with Froude number.

1- مقدمه

راندمان سیستم هیدرودینامیکی اشاره کرد [2]. هر چند که در مکانیک سیالات، کاویتاسیون به عنوان یک عامل مزاحم و مخرب شناخته می‌شود که باید از آن دوری نمود و محدودیت‌های زیادی را در طراحی و ساخت وسایل هیدرودینامیکی و هیدرولیکی بوجود می‌آورد اما به وسیله تشکیل سوپرکاویتاسیون بر روی یک جسم زیرآبی متحرک می‌توان نیروی پسی اصطکاکی وارد بر آن را به‌طور قابل توجهی کاهش داد [3]. همان‌گونه که از نام آن برمی‌آید، سوپرکاویتاسیون همان کاویتاسیون است که حباب حاصل از آن که کاویتی نامیده می‌شود، تمام یا قسمت عمده‌ای از جسم متحرک در زیر آب را در بر گرفته است [4,5]. پدیده کاویتاسیون عموماً توسط

پدیده کاویتاسیون از موضوعات مهمی است که از دیرباز تاکنون مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این پدیده فیزیکی که شامل رشد و فعالیت حباب‌های گازی شکل در داخل مایع است، به دلیل کاهش فشار موضعی به کمتر از فشار اشباع بخار اتفاق می‌افتد [1]. به دلیل وابستگی کاویتاسیون به مسأله افت فشار در مایع، امکان رخداد آن در وسایل کاربردی هیدرودینامیکی و هیدرولیکی از قبیل پمپ‌ها، پره‌های توربین، پروانه‌ها، سازه‌های دریایی بسیار محتمل است. از آثار مخرب کاویتاسیون می‌توان به خوردگی و فرسایش سطوح مرزی مجاور مایع، ارتعاش و سر و صدا و کاهش

Please cite this article using:

M. R. Erfanian, M. Moghiman, Numerical study of gas rate coefficient effect on ventilated supercavitating flow specifications, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 443-450, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پارامترهای بدون بعد عدد کاویتاسیون (σ)، ضریب نرخ دمش (C_q) و عدد فرود (Fr) توصیف شده و به صورت روابط (3-1) تعریف می‌گردد [6]:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_c}{0.5\rho U_\infty^2} \quad (1)$$

$$C_q = \frac{\dot{Q}}{D_n^2 U_\infty} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{D_n g}} \quad (3)$$

در روابط فوق، P_0 فشار محلی، P_c فشار داخل حباب کاویتاسیون، ρ چگالی سیال، U_∞ سرعت سیال، $\dot{Q}$ نرخ گاز دمیده شده، D_n قطر کاویتاتور و g شتاب جاذبه زمین می‌باشد. سوپر کاویتاسیون بر دو نوع است: طبیعی و مصنوعی (گازدهی شده). در سوپر کاویتاسیون طبیعی نیاز است تا مومنتم جریان آنقدر افزایش یابد تا ناحیه‌ای که در آن فشار کمتر از فشار اشباع است، قسمت عمده‌ای از جسم را بپوشاند. این روش به دلیل دشواری‌های زیاد در تولید سرعت بالا در زیر آب، معمولاً ناممکن است. در سوپر کاویتاسیون گازدهی شده با دمیدن گاز از مجرای نزدیک به ابتدای جسم، ناحیه کم‌فشار اطراف جسم توسط لایه‌ای از گاز پوشانده شده و جسم به جای آب با یک گاز که لزجت کمتری دارد در تماس است. سوپر کاویتاسیون گازدهی شده یک راهکار مؤثر و فن‌آوری موفق در کاهش نیروی پسای اصطکاکی اجسام در حال حرکت و مغروق در آب است [7]. با وجود شباهت‌های زیاد بین حباب سوپر کاویتاسیون گازدهی شده و طبیعی، دو اختلاف عمده میان این دو وجود دارد: اولاً ویژگی غیرقابل چگالش گاز دمیده شده، رفتار متفاوتی را در قسمت انتهایی کاویتی موجب می‌شود. ثانیاً، اثرات نیروی گرانش می‌تواند برای حباب‌های بزرگ حتی در سرعت‌های کم نیز پدیدار شود [8].

در دهه اخیر، پیشرفت روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی از یکسو و افزایش چشمگیر قدرت پردازش سیستم‌های رایانه‌ای از سوی دیگر سبب شده است که توجه اکثر محققان در حوزه حل مسائل چندفازی و جریان‌های کاویتاسیونی و سوپر کاویتاسیونی به روش‌های عددی جلب شود [9]. از طریق مشاهدات آزمایشگاهی، تا حدودی ویژگی‌های جریان کاویتاسیونی کشف شده است اما علی‌رغم پیشرفت‌ها در حوزه جریان کاویتاسیونی، حل عددی جریان سوپر کاویتاسیون به دلیل آشکار نمودن خصوصیتی که توسط حل تحلیلی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی قابل مشاهده نیست، یکی از موضوعات مورد علاقه پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است [10].

در این سال‌ها برای شناخت هرچه بیشتر جریان‌های کاویتاسیونی، مطالعات عددی زیادی توسط محققان انجام شده است. اغلب پژوهش‌های انجام شده مبتنی بر رویکرد سیال همگن می‌باشند [11] که در آن جریان چند فازی به عنوان یک مخلوط همگن و با چگالی متغیر از مایع و گاز در نظر گرفته می‌شود. استفاده از حلگرهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی مانند سی-اف-ایکس نیز در شبیه‌سازی جریان‌های کاویتاسیونی بسیار رایج شده است. در این نرم‌افزارها معمولاً روش مخلوط همگن بر پایه مدل معادله انتقال، به کار گرفته شده و معادلات بقاء جرم و مومنتم برای مخلوط و معادله انتقال برای مایع (یا بخار) حل می‌شود. در معادلات بقاء جرم و حجم سیال، جملات چشمه مناسب به منظور محاسبه انتقال جرم میان فازها در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر بیشتر پژوهش‌های عددی به بررسی ویژگی‌هایی از جریان سوپر کاویتاسیونی که از طریق مشاهدات تجربی و حل تئوری قابل مشاهده نیست، مانند ساختار جت بازگشتی در محل انسداد کاویتی، نحوه بسته شدن کاویتی، شکل‌گیری حباب کاویتی و نابودی آن در

شرایط ناپایا پرداخته‌اند. اشمیدت و همکاران [12] و اشتر و همکاران [13] در سال 2006 با استفاده از حل عددی معادلات بقاء جرم، مومنتم و انرژی برای جریان مخلوط همگن، مدل کاویتاسیون تعادلی را ارائه نمودند. در این روش آب خالص و فاز بخار به وسیله معادلات حالت مناسب که در زمان و مکان هذلولوی می‌باشند، توصیف می‌شوند. این روش قابلیت محاسبه ویژگی‌های جریان دوفاز مانند تبدیل میان فازها و امواج چگالشی را دارد اما قادر به پیش‌بینی اثرات غیرتعادلی نمی‌باشد. جیا و همکاران در سال 2006 یک حل عددی از سوپر کاویتاسیون گازدهی شده ارائه و اثر نرخ دبی گاز بر ابعاد کاویتی را مورد بررسی قرار دادند [14]. ژانگ و همکاران در سال 2007 با استفاده از یک مطالعه آزمایشگاهی به مقایسه شکل و ابعاد کاویتی طبیعی و مصنوعی پرداختند و مشاهد کردند که اثرات جاذبه تأثیر بیشتری بر کاویتی مصنوعی داشته است؛ به‌طوریکه با کاهش عدد فرود جریان، عدم تقارن کاویتی مصنوعی واضح‌تر می‌شود [15]. بین و همکاران در سال 2010 با استفاده از فرض مدل مخلوط همگن و استفاده از مدل انتقال جرم سه جزئی، جریان سوپر کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی را در اطراف یک مدل آزمایشگاهی به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند [8]. مورگات و همکاران در سال 2011 با استفاده از مدل مخلوط همگن و حل یک معادله انتقال برای حجم سیال مایع، جریان سوپر کاویتاسیون طبیعی بر روی یک هیدروفویل را شبیه‌سازی کردند. آنها با در نظر گرفتن جملات چشمه مختلف در معادلات بقاء جرم و حجم سیال به مقایسه بین مدل‌های انتقال جرم در پیشگویی کاویتی طبیعی تشکیل شده پرداختند [11]. نتایج آنها شامل شکل و ابعاد کاویتی تطابق مناسبی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی داشت. آنها با نادیده گرفتن اثر فرود جریان نتیجه گرفتند که نرخ گاز دمیده شده در حالت سوپر کاویتاسیون گازدهی شده، تأثیر زیادی بر ابعاد کاویتی تشکیل شده دارد. ژیان-هانگ و همکاران در سال 2011، با استفاده از فرض مدل مخلوط همگن و به کمک یک حلگر تجاری، مشخصات جریان کاویتاسیون طبیعی و گازدهی شده و برهم‌کنش میان آنها را بر روی یک پرتابه مورد بررسی قرار دادند [16]. آنها با مقایسه کاویتی طبیعی و مصنوعی مشاهده کردند که اولاً در یک عدد کاویتاسیون مشخص، ساختار و ابعاد هر دو کاویتی به جز در ناحیه انتهایی کاویتی تقریباً یکسان است. ثانیاً با افزایش نرخ گاز دمیده شده، کاویتی طبیعی کوچک شده و در مقادیر نسبتاً زیاد نرخ گاز، عدد کاویتاسیون مصنوعی وابستگی بسیار کمی به عدد کاویتاسیون طبیعی داشته و تنها تابعی از مقدار گاز می‌باشد. جاثو و همکاران در سال 2012 با استفاده از روش حل عددی، اثر نرخ جریان گاز را بر ابعاد و مشخصات کاویتی تشکیل شده را با چشم‌پوشی از اثرات جاذبه مورد بررسی قرار دادند [17]. شانگ در سال 2013 جریان سوپر کاویتاسیون طبیعی را در اطراف یک زیردریایی به صورت عددی شبیه‌سازی و وجود باله بر روی بدنه را مورد بررسی قرار داد [10]. وانگ و همکاران در سال 2015 به کمک روش‌های آزمایشگاهی و عددی، اثر تغییرات ضریب نرخ دمش بر مشخصات کاویتی گازدهی شده را یک بازه محدود از عدد فرود مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش عدد فرود در یک ضریب نرخ دمش ثابت، اندازه کاویتی کاهش و اثر جاذبه کمتر شده است [18].

اگرچه تاکنون مطالعات زیادی بر روی وابستگی ابعاد کاویتی گازدهی شده به ضریب نرخ دمش انجام شده است، اما تأثیر عدد فرود جریان در این خصوص کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر ضریب نرخ دمش بر نحوه تغییرات ابعاد کاویتی گازدهی شده و الگوی

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (11)$$

ثابت‌های موجود در روابط فوق از قبیل σ_ω و σ_k یک ترکیب خطی از مقادیر متناظر آن‌ها در مدل‌های آشفتگی کی- ϵ پسیلون ($\sigma_{\omega l}$ و σ_{kl}) و کی- ω امگا ($\sigma_{\omega 2}$) و σ_{k2}) بوده و به شکل روابط (13,12) تعریف می‌شود:

$$\sigma_\omega = F_1 \sigma_{\omega 1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \quad (12)$$

$$\sigma_k = F_1 \sigma_{k1} + (1 - F_1) \sigma_{k2} \quad (13)$$

در روابط بالا، F_1 و F_2 توابع آشفتگی بوده و به صورت روابط (14-17) بیان می‌شوند:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (14)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500v}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad (15)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (16)$$

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500v}{d^2 \omega} \right) \quad (17)$$

که در آن d فاصله تا سطح بعدی و $CD_{k\omega}$ جزء مثبت عبارت دیفرانسیل در رابطه (9) بوده و به صورت رابطه (18) تعریف می‌شود:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (18)$$

و در نهایت لزجت آشفتگی به صورت رابطه (19) محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (19)$$

که در آن Ω قدر مطلق ورتیسیته جریان است.

3-2- مدل حجم سیال

در این پژوهش از مدل حجم سیال برای محاسبه مرز بین فاز مایع و گاز استفاده شده است. حجم سیال مایع (α_l) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\left. \begin{array}{ll} 1 & \text{برای مایع} \\ 0 & \text{برای گاز} \end{array} \right\} = \alpha_l$$

در $0 < \alpha_l < 1$ در سطح مشترک مایع و گاز معادله انتقال به منظور محاسبه حجم سیال مایع در شرایط غیرقابل تراکم به صورت رابطه (20) ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_l \rho_l u_j)}{\partial x_j} = \dot{m} \quad (20)$$

باید توجه داشت با توجه به آنکه جریان دوفاز فقط شامل آب و گاز می‌باشد، لزومی به حل معادله انتقال برای جزء گاز نبوده و کسر حجمی گاز از رابطه (21) محاسبه می‌شود:

$$\alpha_g = 1 - \alpha_l \quad (21)$$

در رابطه (20)، جمله چشمه است که بیانگر نرخ انتقال جرم بین فازهای مایع و بخار در شرایط وقوع کاویتاسیون طبیعی است. با توجه به اینکه عدد کاویتاسیون طبیعی در این پژوهش مقدار زیادی داشته و امکان رخداد کاویتاسیون وجود ندارد، لذا از عبارت چشمه در معادله انتقال حجم سیال چشم‌پوشی می‌گردد [23].

3- روش عددی

در این پژوهش از حل گر نرم افزار تجاری سی-اف-ایکس برای انجام حل عددی جریان سوپر کاویتاسیون گازدهی شده در شرایط سه بعدی در اطراف

خروج گاز از انتهای کاویتی می‌باشد. محاسبه ضریب نرخ دمش بحرانی که از مهمترین مسائل در طراحی سیستم دمش گاز در پرتابه‌های زیرآبی است، از دیگر اهداف کار حاضر است. همچنین در این پژوهش تغییرات ضریب نرخ دمش بحرانی به عدد فروود جریان نیز مورد بررسی قرار گرفته و یک رابطه برای محاسبه آن بر حسب عدد فروود جریان ارائه می‌گردد.

2- مدل سازی ریاضی

2-1- معادلات حاکم

در این پژوهش از مدل معادلات ناویر استوکس سه بعدی در شرایط پایدار همراه با روش حجم سیال برای شبیه سازی جریان سوپر کاویتاسیون گازدهی اطراف یک جسم مغروق در آب استفاده شده است. برای این منظور حلگر کد تجاری نرم افزار سی-اف-ایکس که توانایی و کاربرد زیادی در تحلیل گستره زیادی از مسائل مهندسی در حوزه جریان‌های چندفازی را دارد [19]، به کار گرفته شده است. معادلات بقا جرم و مومنتم در مختصات کارتزین به ترتیب به صورت روابط (4,5) ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (5)$$

که در آن ρ و p به ترتیب سرعت، فشار مخلوط و نیروی حجمی هستند. ρ چگالی مخلوط و μ لزجت مخلوط هستند و به صورت روابط (6,7) تعریف می‌شوند:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + (1 - \alpha_l) \rho_g \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + (1 - \alpha_l) \mu_g \quad (7)$$

که در آن α حجم سیال هر گونه و پایین نویس‌های l و g به ترتیب نمایانگر مایع و گاز هستند، μ_t لزجت آشفتگی، δ_{ij} نماد کرونیکر و پایین نویس‌های i و j نمایانگر جهات در سیستم مختصات کارتزین می‌باشد. به منظور بسته شدن دستگاه معادلات ذکر شده در بالا، لازم است تا عبارت لزجت آشفتگی مدل شود.

2-2- مدل سازی آشفتگی

مدل آشفتگی کی- ω امگا اس-اس-تی که توسط منتر [20] و بر پایه فرضیه بوزینسک ارائه شده است، از پرکاربردترین مدل‌ها برای شبیه سازی آشفتگی در دینامیک سیالات محاسباتی و بستن دستگاه معادلات حاکم است [21]. این مدل که ترکیبی از دو مدل آشفتگی است، برای نواحی داخل لایه مرزی از مدل کی- ω امگا و برای نواحی خارج لایه مرزی از مدل کی- ϵ پسیلون استفاده می‌کند [22]. در مدل آشفتگی کی- ω امگا اس-اس-تی، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف انرژی‌ها (ϵ) به ترتیب از طریق معادلات انتقال (8,9) محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (9)$$

که در آن P و τ_{ij} که تانسور تنش برشی می‌باشد، به صورت روابط (10,11) تعریف می‌شود:

شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش استفاده شده است. با توجه به وجود تقارن در مسئله و حل نیمی از آن، از شرط مرزی تقارن برای صفحه در راستای عمود بر محور y استفاده شده است (شکل 2).

3-3- شبکه بندی دامنه محاسباتی

برای شبکه بندی دامنه محاسباتی از نرم افزار آنسیس-مشینگ استفاده شده است. الگوی کلی شبکه بندی دامنه محاسباتی بر روی صفحه تقارن آن در شکل 3 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، در اطراف جسم که محل تشکیل کاویتی گازدهی شده می باشد، از شبکه بسیار ریز و از نوع سازمان یافته استفاده شده است و به تدریج و با دور شدن از کاویتی، به سبب کاهش حجم محاسبات اضافی شبکه درشت تر شده است. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج عددی به تعداد المان محاسباتی، سه شبکه با اندازه مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. شبکه ((الف)) با تعداد المان محاسباتی در حدود 500 هزار، شبکه ((ب)) با تعداد المان محاسباتی در حدود 800 هزار و شبکه ((ج)) با تعداد المان محاسباتی در حدود 1 میلیون و 200 هزار در نظر گرفته شده اند. نتایج توزیع ضریب فشار روی بدنه برای سه شبکه مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، نتایج مربوط به شبکه های ((ب)) و ((ج)) بر روی یکدیگر منطبق شده اند. همچنین در جدول 1 طول بی بعد کاویتی تشکیل شده در یک دبی جرمی یکسان برای سه شبکه مختلف ارائه گردیده است. همان طور که دیده می شود، اختلاف بسیار ناچیزی میان شبکه ((ب)) و ((ج)) وجود دارد و بنابراین جهت انجام تمامی محاسبات عددی انجام شده در این تحقیق از شبکه با کیفیت متوسط، ((ب))، استفاده می شود. در این حالت معیار وای-پلاس بر روی دیواره بالایی و پایینی مدل مقداری کمتر از 1 ($y^+ < 1$) دارد. زمان محاسبات برای هر اجرا در حالت اجرای موازی توسط یک سیستم با پردازشگر 8 هسته ای و 16 گیگا بایت حافظه داخلی در حدود 15 ساعت می باشد.

4- نتایج

4-1- صحنه گذاری حل عددی

به منظور صحنه گذاری نتایج حل عددی و مدل های به کار گرفته شده (شامل انتخاب مدل آشفتگی، مدل حجم سیال و شرایط مرزی) از نتایج آزمایشگاهی که توسط وانگ و همکاران [18] ارائه شده است، استفاده می شود. در شکل 5 کاویتی گازدهی پیشگویی شده توسط حل عددی در شرایط $C_q=0.041$ ، $Fr=7.8$ و $C_q=0.11$ با $Fr=12$ با حالت متناظر آن در مشاهدات آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، اندازه و محل انسداد کاویتی گازدهی حاصل از حل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

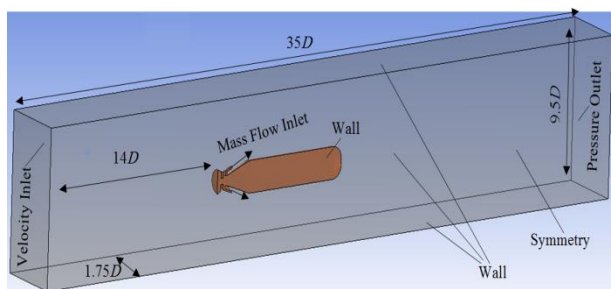


Fig. 2 The computational domain extent and boundary conditions

شکل 2 ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

یک جسم مستقر در تونل آب استفاده شده است. در این نرم افزار روش حجم محدود در شرایط فشار مبنا برای تبدیل معادلات غیر خطی ذکر شده در بالا به معادلات جبری قابل حل توسط روش های عددی، به کار گرفته شده است. همچنین الگوریتم سیمپل برای ارتباط بین فشار و سرعت انتخاب شده است. معادلات بقاء جرم، مومنتم و حجم سیال با استفاده از طرح تفاضل سازی درجه دو و در شرایط پایدار حل شده اند.

در این تحقیق دو جزء سیال آب و هوا در محاسبات وجود دارند. لزجت و چگالی آب به ترتیب برابر 1.139×10^{-3} Pas و 998 kg/m^3 در نظر گرفته شده که متناظر با خواص آب خالص در دمای 25°C می باشد. از هوا در دمای 25°C نیز به عنوان فاز گاز استفاده شده که لزجت و چگالی آن به ترتیب برابر 1.831×10^{-5} Pas و 1.185 kg/m^3 می باشد.

3-1- مدل هندسی

در این پژوهش از مدل ارائه شده در [18] به منظور اعتبار سازی حل عددی و نیز مطالعه جریان کاویتاسیون گازدهی شده استفاده شده است. جسم مورد نظر شامل یک کاویتاتور دیسکی با لبه های تیز به قطر $d=1.5 \text{ cm}$ در قسمت جلویی آن می باشد که در پشت کاویتاتور مجرای خروج گاز جهت دمش گاز در نظر گرفته شده است. بدنه جسم به شکل مخروطی - استوانه ای و به طول $L=11 \text{ cm}$ و قطر بدنه $D=2 \text{ cm}$ می باشد. در شکل 1 نمایشی از جسم مورد نظر به همراه ابعاد آن ارائه شده است.

3-2- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

مشخصات دامنه محاسباتی و محل قرارگیری مدل بر اساس بستر آزمایشگاهی ارائه شده در [18] منظور شده است. همان طور که در شکل 2 مشاهده می شود، دامنه محاسباتی به صورت مقطع آزمایش در تونل آب و به شکل مکعب-مستطیلی به ابعاد 35D در طول، 9.5D در ارتفاع و 3.5D در پهنا می باشد. همچنین مدل آزمایشگاهی در وسط مقطع آزمایش و به فاصله 14D از ورودی در نظر گرفته شده است. از شرط مرزی دریکله با یک مقدار معین برای سرعت (U_∞) و حجم سیال (1 برای فاز آب و 0 برای فاز گاز) به عنوان شرط مرزی ورودی استفاده شده است. برای شرط مرزی خروجی، از یک مقدار معین برای فشار و بر اساس عدد کاویتاسیون دلخواه استفاده شده است. به منظور دمش گاز از شرط مرزی جرم ورودی با مقدار معین (0 برای فاز آب و 1 برای فاز گاز) برای سطح مجرای دمش گاز استفاده شده است. برای سطوح مرزی جانبی، پایینی، بالایی دامنه محاسباتی و همچنین سطح مدل از

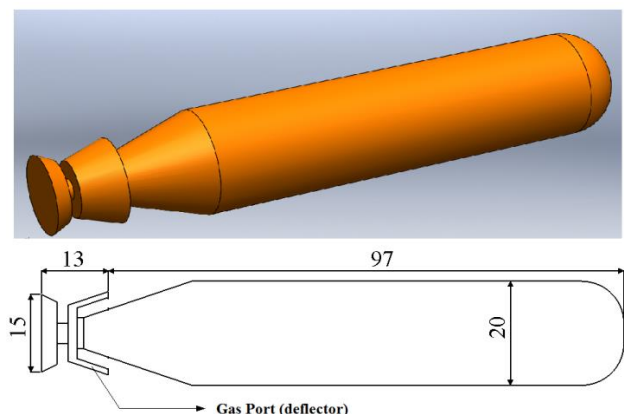


Fig. 1 The geometry of the model (dimension to mm)

شکل 1 هندسه مدل (ابعاد به میلی متر)

با استفاده از رابطه فوق برابر مقدار 8.25 محاسبه می‌شود. همانطور که در جدول 1 مشاهده گردید طول بی‌بعد کاویتی با استفاده از نتایج حل عددی در حدود 8.67 پیش‌بینی شده است. تطابق میان نتایج شبیه‌سازی و مقدار تحلیلی در محاسبه طول کاویتی، دقت روش حل عددی به‌کار گرفته شده را آشکار می‌کند.

2-2- تأثیر ضریب نرخ دمش بر مشخصات کاویتی

در این قسمت تأثیر نرخ دمش گاز با افزایش تدریجی دبی جرمی گاز در یک عدد فرود ثابت و محاسبه طول کاویتی تشکیل شده مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 6 شکل کاویتی محاسبه شده حاصل از نتایج عددی در ضرایب مختلف جریان گاز و در عدد فرود 7.8 ارائه و با نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکاران [18] مقایسه شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود، در مقادیر کم ضریب نرخ دمش هوا، کاویتی به‌صورت حباب‌های مجزایی از هوا شکل می‌گیرد که در ناحیه کم فشار پشت به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کنند. با افزایش تدریجی ضریب نرخ دمش، کاویتی بزرگتر شده تا آنکه با افزایش بسیار کمی در $C_q=0.049$ طول کاویتی با یک افزایش ناگهانی، کل جسم را پوشانده است. این رخداد به دلیل تغییر الگوی تخلیه هوا از انتهای کاویتی از حالت گردابه چرخشی به حالت گردابه دولوله‌ای می‌باشد. با افزایش بیشتر ضریب نرخ دمش هوا تا مقدار 0.081، ابعاد کاویتی رشد چندانی نداشته و تقریباً ثابت مانده است. زیرا پس از آن که یک کاویتی پایدار و شفاف تولید شد، الگوی نشت گاز از انتهای کاویتی تغییر نکرده و به‌صورت حباب‌های بزرگ از انتهای کاویتی تخلیه می‌شود. همچنین با افزایش ضریب نرخ دمش در یک عدد فرود ثابت، بزرگی اندازه کاویتی سبب شده است تا اثرات نیروی جاذبه بر کاویتی نیز بیشتر شده و انتهای کاویتی به سمت بالا متمایل گردد. تطابق نتایج پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی موجود در ارائه تغییرات رشد کاویتی با افزایش ضریب نرخ دمش، بار دیگر دقت حل عددی به‌کار گرفته شده را نشان می‌دهد. در شکل 7 خطوط جریان بر روی توزیع پیوسته میدان فشار در اطراف ناحیه انسداد کاویتی و در شکل 8 الگوی نشت گاز از انتهای کاویتی در دو حالت جت بازگشتی و گردابه‌های دوقلو نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در الگوی نشت گاز جت بازگشتی، خروج گاز از کاویتی دشوارتر از الگوی گردابه‌های دوقلو صورت می‌گیرد. با افزایش دبی گاز و کاهش اختلاف فشار بین خارج و داخل کاویتی در نهایت قدرت جت بازگشتی کاهش یافته و نشت

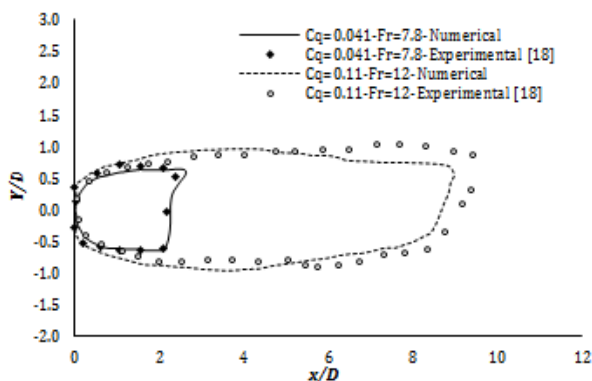


Fig. 5 The comparison of ventilated cavity shape between numerical predictions and experimental results [18]

شکل 5 مقایسه شکل کاویتی گازدهی شده بین نتایج عددی و آزمایشگاهی [18]

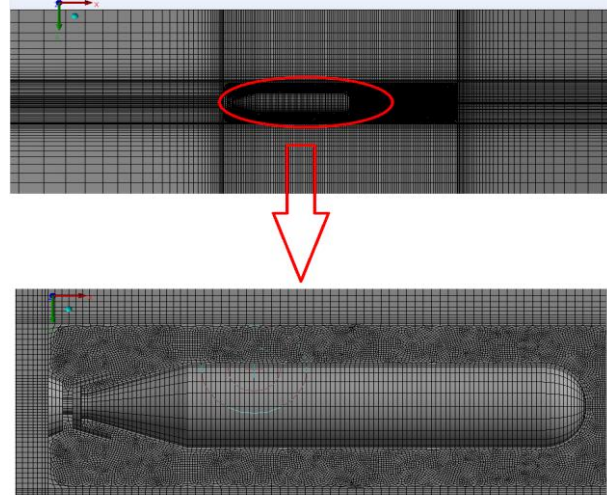


Fig. 3 Diagram of computational grid with medium-resolution

شکل 3 شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با کیفیت متوسط

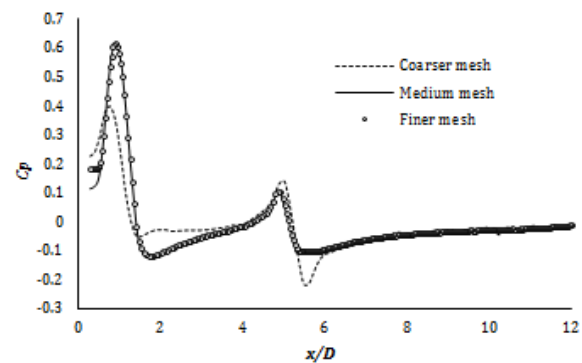


Fig. 4 Variation of pressure coefficient along the model for the different grid resolution levels at non-cavitating flow conditions

شکل 4 تغییرات ضریب فشار روی بدنه مدل برای سه شبکه‌بندی مختلف در شرایط بدون کاویتاسیون

جدول 1 مقایسه طول بی‌بعد شده کاویتی برای شبکه‌های با کیفیت مختلف در جریان سوپر کاویتاسیون گازدهی شده

Table 1 Comparison of non-dimensionalized cavity length for different grid resolution levels at ventilated supercavitating flow condition

طول بی‌بعد کاویتی	نوع شبکه
7.15	شبکه درشت
8.67	شبکه متوسط
8.62	شبکه ریز

وانگ و همکاران [18] به خوبی پیش‌بینی شده است. همچنین به عنوان مقایسه‌ای دیگر، طول کاویتی پیش‌گویی شده با نتایج تحلیلی گارابدین بر حسب عدد کاویتاسیون مقایسه شده است. رابطه تحلیلی گارابدین برای محاسبه طول کاویتی به‌صورت رابطه (22) ارائه می‌شود [24]:

$$\frac{L}{D} = \frac{\sqrt{C_{d0}(1 + \sigma) \ln \frac{1}{\sigma}}}{\sigma} \quad (22)$$

که در آن L طول کاویتی و C_{d0} ضریب پسا برای کاویتاتور دیسکی شکل در عدد کاویتاسیون صفر بوده و برابر 0.82 می‌باشد [25]. با توجه به اینکه در اینجا عدد کاویتاسیون در ضریب نرخ دمش 0.049، (با توجه به مقدار فشار میانگین در داخل کاویتی) در حدود 0.16 بوده، لذا طول بی‌بعد شده کاویتی

دوتایی صورت می‌گیرد. از آنجا که خروج گاز در این حالت به آسانی و توسط حباب‌های بزرگ انجام می‌گیرد، فشار داخل کاویتی از مقدار بیشینه آن در حالت قبل توانایی افزایش نخواهد داشت و در نتیجه عدد کاویتاسیون و طول کاویتی ثابت می‌ماند.

دستیابی به مقدار ضریب نرخ دمش بحرانی در طراحی اجسام پرسرعت زیرآبی بسیار حائز اهمیت است [27]. ضریب نرخ دمش بحرانی یک مقدار حداقلی برای حجم گاز مورد نیاز برای شکل‌گیری یک کاویتی پایدار که کل جسم را بپوشاند، مشخص می‌کند. همان‌گونه که در شکل 8 مشاهده گردید، مقدار ضریب نرخ دمش بحرانی وابسته به عدد فرود می‌باشد. در شکل 10 تغییرات ضریب نرخ دمش بحرانی بر حسب عدد فرود ارائه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش عدد فرود ضریب نرخ دمش به صورت خطی افزایش یافته است.

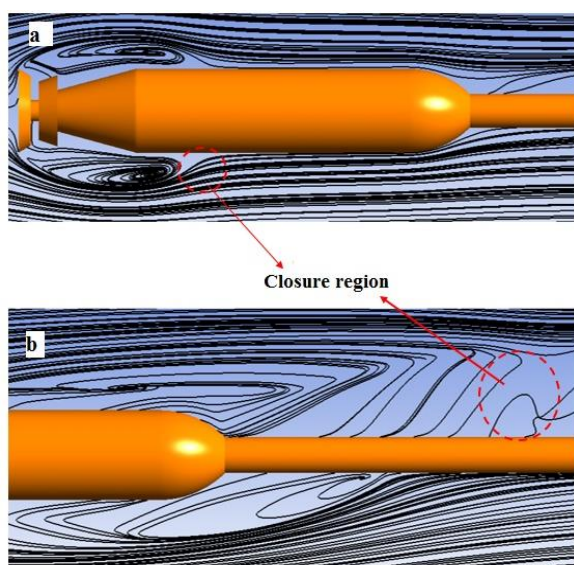


Fig. 7 The streamlines around the closure region in two modes: a) re-entrant jet and b) twin vortex

شکل 7 خطوط جریان در اطراف ناحیه بسته شدن کاویتی در دو حالت: (a) جت بازگشتی و (b) گردابه‌های دوقلو

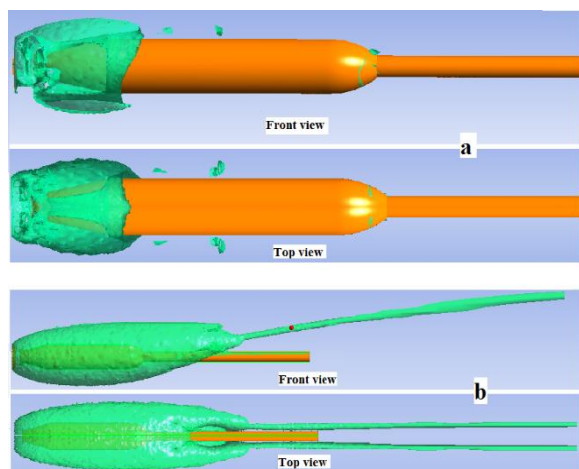


Fig. 8 The gas leakage from ventilated cavity in two modes: a) re-entrant jet and b) twin vortex

شکل 8 نشت گاز از انتهای کاویتی گازدهی شده در دو حالت: (a) جت بازگشتی و (b) گردابه‌های دوقلو

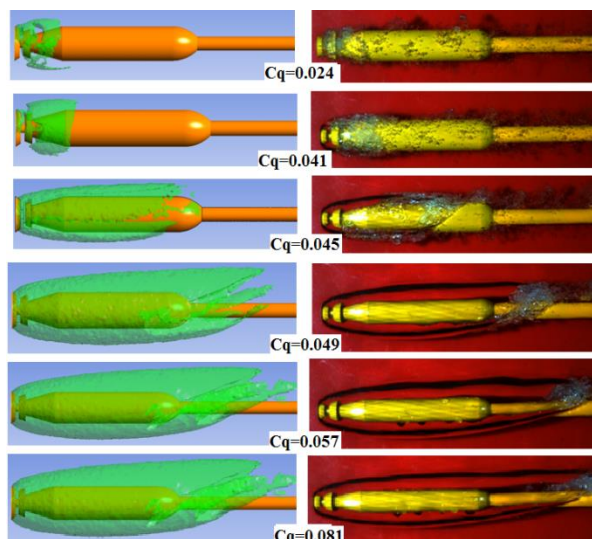


Fig. 6 Comparison of predicted and experimental cavity pattern at various gas entrainment coefficient

شکل 6 مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی شکل کاویتی برای ضرایب مختلف نرخ دمش گاز در $Fr=7.8$

گاز از انتهای کاویتی آسان‌تر می‌شود. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، در این حالت نشت گاز از انتهای کاویتی از طریق دو گردابه لوله‌ای شکل صورت می‌پذیرد.

به منظور بررسی وابستگی ضریب نرخ دمش به عدد فرود، اجراهای متعددی با اعداد فرود مختلف در هر ضریب نرخ دمش انجام شده و طول کاویتی در هر حالت محاسبه گردیده است. در شکل 9 منحنی تغییرات ضریب نرخ دمش هوا بر حسب طول بی‌بعد شده کاویتی برای اعداد فرود مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر عدد فرود با افزایش ضریب نرخ دمش هوا، طول کاویتی در ابتدا با نرخ کمی افزایش یافته است و پس از آن با تغییر اندکی در ضریب نرخ دمش هوا، طول کاویتی به‌طور ناگهانی افزایش یافته است. با بیشتر شدن ضریب نرخ دمش، طول کاویتی افزایش قابل توجهی نداشته است. این رفتار در تمامی اعداد فرود مشاهده شده است. بنابراین در هر عدد فرود یک مقدار ضریب نرخ دمش بحرانی، C_{qc} ، وجود دارد که پس از رسیدن به آن طول کاویتی تقریباً ثابت مانده و افزایش قابل توجهی نخواهد داشت. باید توجه داشت که نقطه بسته شدن کاویتی و به بیان دیگر طول کاویتی گازدهی شده به اختلاف فشار داخل و خارج کاویتی مرتبط است. مکانیزم خروج گاز از انتهای کاویتی تا قبل از رسیدن به ضریب نرخ دمش بحرانی به‌صورت جت بازگشتی¹ است و در انتهای کاویتی یک ناحیه چرخشی وجود دارد که آب را به داخل حباب کاویتی می‌کشد [26]. در این شرایط نشت گاز از انتهای کاویتی به سختی صورت می‌گیرد؛ بنابراین فشار داخل کاویتی افزایش می‌یابد. افزایش فشار داخل کاویتی منجر به کاهش عدد کاویتاسیون گازدهی شده می‌شود و طبق روابط تحلیلی [24] طول کاویتی افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب نرخ دمش، اندازه ناحیه چرخش در انتهای کاویتی کاهش یافته و طول کاویتی به سرعت افزایش می‌یابد. در این شرایط رژیم خروج گاز از انتهای کاویتی از حالت جت بازگشتی به حالت گردابه دوتایی² تغییر می‌کند. پس از رسیدن به ضریب نرخ دمش بحرانی، الگوی خروج گاز در انتهای کاویتی تماماً توسط گردابه‌های

¹ Re-entrant jet

² Twin vortex

- ضریب نرخ دمش بحرانی تابع عدد فرود جریان بوده و با افزایش عدد فرود به صورت خطی افزایش می‌یابد.
- با افزایش ضریب نرخ دمش، اندازه ناحیه چرخش در انتهای کاویتی کاهش یافته و طول کاویتی به سرعت افزایش می‌یابد. در این شرایط رژیم خروج گاز از انتهای کاویتی از حالت جت بازگشتی به حالت گردابه دوتایی تغییر می‌کند.

6- فهرست علائم

C_q	ضریب نرخ دمش
C_{qc}	ضریب نرخ دمش بحرانی
D_n	قطر کاویتاتور
Fr	عدد فرود
L	طول کاویتی
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
$\dot{Q}$	دبی حجمی گاز (m^3/s)
U	سرعت جریان (ms^{-1})

علائم یونانی

α	حجم سیال
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	عدد کاویتاسیون

زیر نویس‌ها

g	فاز گاز
l	فاز مایع
∞	جریان آزاد

7- مراجع

- [1] F. R. Young, *Cavitation*, 1th Edition, pp. 10-21, Watford College, Imperial College Press, 1999.
- [2] R. F. Kunz, D. A. Boger, T. S. Chyczewski, D. Stinebring, H. Gibeling, T. Govindan, Multi-phase CFD analysis of natural and ventilated cavitation about submerged bodies, *Proceedings of the 3rd ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco, California, July 1999.
- [3] M. Maerefat, S. Tahmasebi, M. R. Ansari, Numerical Simulation of Supercavitating flow and calculation of cavity length around submersible vehicle, *Modares Mechanical Engineering* Vol.15, No. 8, pp. 187-196, 2015. (In Persian)
- [4] E. Amromin, G. Karafiati, B. Metcalf, Ship drag reduction by air bottom ventilated cavitation in calm water and in waves, *Journal of Ship Research*, Vol. 55, No. 3, pp. 196-207, 2011.
- [5] E. Amromin, J. Kopriva, R. E. Arndt, M. Wosnik, Hydrofoil drag reduction by partial cavitation, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 931-936, 2006.
- [6] L. Epshtein, Characteristics of ventilated cavities and some scale effects, unsteady water flow with high velocities, *Proceedings of International Symposium IUTAM*, Moscow, Russia, 1973.
- [7] S. L. Ceccio, Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42, pp. 183-203, 2010.
- [8] J. Bin, X. W. Luo, X. X. Peng, Y. Zhang, Y. L. Wu, 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*, Ser. B, Vol. 22, No. 6, pp. 753-759, 2010.
- [9] S. Park, S. H. Rhee, Computational analysis of turbulent super-cavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped cavitator geometry, *Computers & Fluids*, Vol. 70, pp. 73-85, 2012.
- [10] Z. Shang, Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 20-21, pp. 8836-8845, 2013.
- [11] M. Morgut, E. Nobile, I. Biluš, Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 37, No. 6, pp. 620-626, 2011.
- [12] S. J. Schmidt, I. H. Sezal, G. H. Schnerr, Compressible simulation of high-speed hydrodynamics with phase change, *Proceedings of the European Conference on Computational Fluid Dynamics*, Egmond aan Zee, The

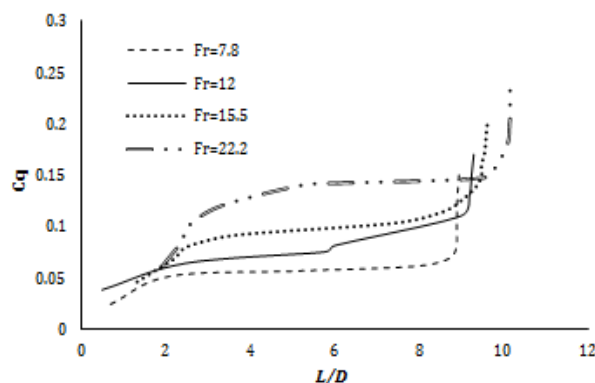


Fig. 9 Variation of ventilated gas rate with the dimensionless cavity length for different Froude numbers.

شکل 9 تغییرات ضریب نرخ دمش بر حسب طول کاویتی بی‌بعد شده برای اعداد فرود مختلف

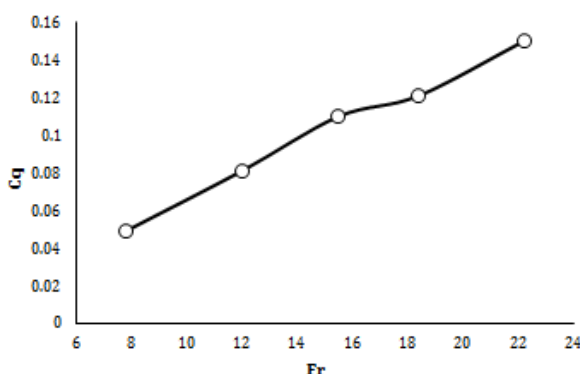


Fig. 10 Variation of critical ventilated gas rate with Froude number

شکل 10 تغییرات ضریب نرخ دمش بحرانی بر حسب عدد فرود جریان

بر اساس نتایج شکل 10، رابطه (23) برای محاسبه ضریب نرخ دمش بحرانی بر حسب عدد فرود پیشنهاد می‌گردد:

$$C_{qc} = 0.007 \times Fr - 0.003 \quad (23)$$

با استفاده از رابطه بالا می‌توان ضریب نرخ دمش بحرانی را برای اعداد فرود بالاتر محاسبه و در طراحی سیستم تولید گاز مورد استفاده قرار داد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان کاویتاسیونی اطراف یک مدل پرتابه‌ای با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و به‌کارگیری مدل دوفازی حجم سیال و مدل آشفستگی کی-امگا اس اس تی شبیه‌سازی شده است. برای حل معادلات حاکم از نرم‌افزار تجاری انسیس سی-اف-ایکس استفاده شد و دقت حل عددی، شبکه‌بندی محیط حل، شرایط مرزی انتخاب شده و الگوریتم مورد استفاده از طریق مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد بررسی قرار گرفت و تطابق خوبی مشاهده گردید. بر اساس داده‌های شبیه‌سازی عددی، نتایج زیر به‌دست آمد:

- با افزایش ضریب نرخ دمش گاز، در ابتدا طول کاویتی گازدهی شده کمی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار مشخص با افزایش کمی در C_q ، طول کاویتی رشد ناگهانی خواهد داشت. پس از آن با افزایش بیشتر ضریب نرخ دمش گاز، طول کاویتی تغییر زیادی نخواهد داشت.
- در کاویتی‌های گازدهی شده با طول بیشتر، اثر نیروی جاذبه بیشتر شده و انتهای کاویتی به سمت بالا منحرف می‌شود.

- twisted hydrofoil, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 51, pp. 33-43, 2013.
- [20] F. R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [21] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*: Second Edition, pp. 271-315, Pearson Education Limited, 2007.
- [22] P. Huang, *Physics and Computations of Flows with Adverse Pressure Gradients, Modeling Complex Turbulent Flows*, Vol. 7, pp. 245-258, 1999.
- [23] M. Ghaffari, M. Pasandideh Fard, M. Tabaki, Simulation of flow around axisymmetric projectiles with circular cavitator and ringed tip using control volume and boundary element methods, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 16, No. 12, pp. 67-78, 2016 (in Persian).
- [24] P. Garabedian, Calculation of axially symmetric cavities and jets, *Pacific Journal of Mathematics*, Vol. 6, No. 4, pp. 611-684, 1956.
- [25] J. P. Franc, J. M. Michel, *Fundamentals of cavitation*, 1th Edition, pp. 311-315, Springer science & Business media, 2005.
- [26] E. Kawakami, R. E. Arndt, Investigation of the behavior of ventilated supercavities, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 133, No. 9, pp. 091305, 2011.
- [27] A. Karn, R. E. A. Arndt, J. Hong, Gas entrainment behaviors in the formation and collapse of a ventilated supercavity, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 79, pp. 294-300, 2016.
- Netherlands, 2006.
- [13] G. H. Schnerr, S. J. Schmidt, I. H. Sezal, M. Thalhamer, Shock and wave dynamics of compressible liquid flows with special emphasis on unsteady load on hydrofoils and cavitation in injection nozzles, *Proceedings of The 6th International Symposium on Cavitation*, Wageningen, Netherlands, september 2006.
- [14] L. P. JIA, W. Cong, 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, pp. 273-279, 2006.
- [15] X. W. Zhang, Y. J. Wei, J. Z. Zhang, W. Cong, K. P. Yu, Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 19, No. 5, pp. 564-571, 2007.
- [16] J. H. Guo, C.J. Lu, 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, pp. 236-241, 2011.
- [17] G. H. Gao, J. Zhao, F. Ma, W. D. Luo, Numerical study on ventilated supercavitation reaction to gas supply rate, *Advanced Materials Research*, Vols 418-420, pp. 1781-1785, 2012.
- [18] Z. Wang, B. Huang, G. Wang, M. Zhang, F. Wang, Experimental and numerical investigation of ventilated cavitating flow with special emphasis on gas leakage behavior and re-entrant jet dynamics, *Ocean Engineering*, Vol. 108, pp. 191-201, 2015.
- [19] B. Ji, X. Luo, Y. Wu, X. Peng, Y. Duan, Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a