مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1395، دوره 16، شماره 9، ص‌ص 87-96

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی رفتارِ متفاوت برون روی گاز دمشی در ساختار اَبَرکاواک دمشی

مهدی معرفت[1*]، سهراب طهماسبی [2]، محمدرضا انصاری[3]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی دکتری،مهندسی مکانیک،دانشگاه تربیت مدرس،تهران
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 14155-143، maerefat@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 06 تیر 1395
پذیرش: 22 مرداد 1395
ارائه در سایت: 21 شهریور 1395

کلید واژگان:
جریان کاواک دمشی
رفتار برون روی گاز
اَبَرکاواک

چکیده

دو پارامتر اساسی، عدد فرود و میزان ضریب گاز دمشی در تشکیل اَبَرکاواک دمشی بسیار مؤثر می‌باشند. هدف از ارائه این مقاله بررسی عددی رفتارِ متفاوت برون روی گاز دمشی در ساختار اَبَرکاواک دمشی می باشد، که با نتایج تجربی مقایسه می‌گردد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، مدل مخلوط همگن با احتساب سرعت لغزشی برای هر فاز، و مدل اغتشاش ترکیبی(DES) با در نظر گرفتن نیروی جاذبه انجام می گیرد. نتایج مقاله حاضر نشان می‌دهد، در اعداد فرود مختلف، وقتی‌که ضریب گاز دمشی Qv ثابت است، دو مکانیزم برون روی گاز دمشی به وجود می‌آید، الف) گردابه استوانه‌ای پیچشی، که مخلوطی از گاز دمشی و بخارآب بوده و در امتداد جسم تشکیل می‌گردد. ب) دو گردابه لوله‌ای توخالی که شامل گاز دمشی می‌باشد و در امتداد جسم،تحت تاثیر نیروی جاذبه قرار گرفته و به سمت بالا متمایل می‌گردد . با افزایش عدد فرود، کاواک از حالت دو گردابه لوله‌ای توخالی به حالت گردابه استوانه‌ای پیچشی تغییر حالت می‌دهد. وقتی‌که عدد فرود ثابت می باشد ، با افزایش میزان ضریب گاز دمشی کاواک بزرگ می‌شود و نیروی جاذبه بر شکل کاواک تأثیر می‌گذارد. افزایش طول کاواک، دارای حد معینی می باشد و پس‌ازآن حتی با افزایش نرخ دمش گاز طول حباب کاواک افزایش نمی یابد. در عدد فرود ثابت، مشاهده می شودکه با افزایش ضریب گاز دمشی، ضریب پسا روی بدنه جسم کاهش می یابد. فقط مدل اغتشاش (DES) که از ترکیب دو مدل اغتشاش ($SST\ k-\omega$) و مدل (LES) می‌باشد در شبیه‌سازی دو گردابه لوله‌ای توخالی بکار می رود.

Numerical investigation of different gas leakage behavior in ventilated cavitating flow structure

Mehdi Maerefat*, Sohrab Tahmasbi, Mohammad Reza Ansari

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
*P.O.Box 14155-143, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 June 2016
Accepted 12 August 2016
Available Online 11 September 2016

Keywords:
Ventilated cavitating flow
Gas leakage behavior
Super cavitation

ABSTRACT

In ventilated cavitating flow structure, two parameters are very important, Fr number and gas entrainment coefficient .The objective of this paper is to investigate the ventilated cavitating flow structure by numerical methods and verify with experimental results. The numerical simulation is performed by ANSYS-FLUENT and homogenous mixture model with a free slip velocity and DES turbulence model, and the gravity effect is considered. The results show when the gas entrainment coefficient Qv is constant, two typical mechanisms of the gas leakage exist at different Fr numbers, namely toroidal vortex mode and two hollow tube vortex mode .With the increasing of Fr, the cavity would transfer from the two hollow tube vortices to the toroidal vortices. Moreover, when the Fr number keeps constant, the enlargement of the cavity causes the gravitational effect to be more significant for the case of larger value of Qv. The result also showed that the cavity length increase has a defined value and it does not increase even with more gas flow injection. With the increasing of gas entrainment coefficient, the drag coefficient decrease. DES turbulence model is a combination of two models, SST $k-\omega$ and LES model and is suitable for simulating of two hollow tube vortices mode.

1- مقدمه

پدیده کاواک همواره در کاربردهای مهندسی، به‌عنوان یک پدیده نامطلوب ارزیابی گردیده است، چون در این پدیده نوسانات فشار حاکم است لذا ارتعاش ، نویز و خوردگی را به همراه داشته است. از آنجائیکه این موضوعات حاصل رفتار گذرای کاواک می‌باشد بنابراین ناگزیر هستیم که با این موارد مقابله کنیم. اگرچه در دینامیک سیالات پدیده کاواک اجتناب‌ناپذیر است، اما همیشه ناخوشایند نمی‌باشد. در دهه‌های جاری محققین تلاش نموده‌اند، که اثرات نا خواستنی این پدیده را کاهش دهند و مزایای آن را مخصوصاً در بحث کاهش پسای اصطکاکی افزایش دهند. افزایش سرعت جریان آزاد و یا دمش گاز به‌صورت اجباری، در محیط کاواک باعث ایجاد اَبَر

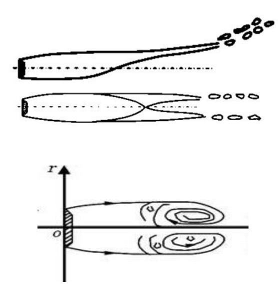
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Maerefat, S. Tahmasbi, M. R. Ansari, Numerical investigation of different gas leakage behavior in ventilated cavitating flow structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 87-96, 2016 (in Persian)

کاواک[1] می‌گردد. اَبَر کاواک دمشی[2] یکی از موفق‌ترین تکنولوژی‌ها در جهت کاهش نیروی پسای اصطکاکی بر روی رونده‌های زیرآبی می‌باشد[1]. محققان و مهندسین تحقیقات زیادی را جهت بررسی پدیده تشکیل حباب کاواک[3] به‌صورت طبیعی[4] یا دمشی در اطراف اجسام تندرو زیرآبی انجام داده‌اند. کاهش فشار محلی به فشار بخارآب باعث ایجاد حباب کاواک به‌صورت طبیعی می‌گردد. لذا در این شرایط نیروی پسا بر روی شناور به‌مراتب کوچک‌تر از زمانی خواهد بود که بدنه شناور با آب در تماس باشد. جهت تشکیل پدیده اَبَر کاواک سه روش موجود هست [2] . 1) با افزایش سرعت جریان آزاد U_∞ 2) کاهش فشار محیط P_∞، که در تونل‌های آب مداربسته امکان‌پذیر است 3) افزایش فشار داخل حباب کاواک P_c، که توسط دمش گاز غیرقابل تقطیر مثل هوا در داخل حباب کاواک میسر می‌گردد. اَبَر کاواک تولیدشده توسط روش‌های اول و دوم به‌عنوان کاواک طبیعی و روش سوم به‌عنوان کاواک دمشی یا مصنوعی محسوب می‌شود. بنابراین در حالت کاواک دمشی توسط دمش گاز می توان به طول حباب کاواک موردنظر رسید، ودر کاواک طبیعی با افزایش سرعت جریان آزاد به طول کاواک مورد نظر می رسیم. دو اختلاف اساسی بین کاواک طبیعی و دمشی وجود دارد 1) دمش، گاز دمشی در حباب کاواک باعث می‌گردد که در قسمت عقب کاواک رفتار متفاوتی ایجاد گردد. (نسبت به کاواک طبیعی) 2) گاز دمشی در حباب کاواک ، تحت تأثیر نیروی جاذبه قرارگرفته و در انتهای کاواک مطابق "شکل1" برخلاف نیروی جاذبه حرکت می‌کند.

ساوچنکو و همکاران[3] نتایج تجربی بر روی پرتابه‌های زیرآبی در تونل آب استخراج نمودند و بر اساس نتایج، روابط تجربی جهت محاسبه طول و قطر حباب کاواک در حالت تقارن محوری ارائه نمودند. لیندا و همکاران [4]حرکت سه‌بعدی حباب کاواک را بر روی یک شناور تندرو به‌صورت عددی شبیه‌سازی نمودند. در این مطالعه نشان دادند که توسط شبیه‌سازی عددی، می‌توان بر روی جسم بدون سطوح کنترل، شکل‌گیری و حرکت حباب کاواک را به‌طور قابل قبولی نشان داد. وانگ و همکاران [5] روابط بین شکل کاواک و پارامترهای هندسی مربوط به کاواک زا را به‌صورت عددی بررسی کردند و فرمول‌های تجربی جهت محاسبه طول و قطر حباب کاواک بر روی پرتابه‌های تحت تأثیر کاواک طبیعی ارائه نمودند. معرفت و همکاران [6] کاواک طبیعی را بر روی سه هندسه متفاوت شبیه‌سازی کردند و روابط مربوط به محاسبه

الف)



ب)

Fig 1. Gas leakage mechanisms a) Two hollow tube vortex b) Toroidal vortex

شکل 1 طرحواره مکانیزم برون روی گاز دمشی الف) دو گردابه لوله ای تو خالی ب) گردابه استوانه ای پیچشی

[1] Super-cavitation
[2] Ventilated super-cavitation
[3] Cavity
[4] Natural super-cavitation

طول کاواک سه هندسه را پس از شبیه‌سازی و صحه سنجی ارائه نمودند. پینگ و همکاران [7] شکل حباب کاواک دمشی نیروی پسا حاصل از آن را به‌صورت عددی شبیه‌سازی نمودند و رابطه بین شکل حباب کاواک دمشی و نرخ دمش گاز را به‌صورت تجربی ارائه کردند. ژانگ و همکاران[8] مجموعه‌ای از پرتابه‌های زیرآبی را در تونل آب مداربسته به‌صورت تجربی موردمطالعه قراردادند و مشخصات مربوط به شکل حباب کاواک را به‌صورت طبیعی و دمشی استخراج نمودند. وانگ و همکاران[9] نرخ گاز دمشی در حباب کاواک را موردبررسی قرار داده و نرخ تغییر حجم حباب کاواک را بر اساس روابط تجربی و نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی مقایسه نمودند. و تطابق بین نتایج تجربی و نتایج آزمایشگاهی را نشان دادند. بین و همکاران [10] حباب کاواک را به شکل طبیعی و دمشی با استفاده از یک مدل سه‌بعدی و بر اساس معادله انتقال جرم شبیه‌سازی نموده و تطابق بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی را نشان دادند.

چانسون و همکاران [11] مکانیزم پراکندگی گاز دمشی که به‌واسطه گرادیان فشار و تنش برشی ایجاد می‌شود را نشان دادند. کیم و همکاران[12] به‌صورت تجربی نشان دادند که با دمش حباب‌های گاز در گردابه پشت کاواک زا باعث ایجاد یک حباب کاواک پیوسته روی سطح جسم می‌گردد.

ساختار کاواک دمشی در شرایط مختلف هنوز به‌خوبی شناخته‌نشده است، لذا مطالعات بیشتری ازلحاظ تجربی و عددی در این زمینه لازم می‌باشد. هدف از ارائه این مقاله بررسی عددی رفتار متفاوت برون روی گاز دمشی در ساختار اَبَرکاواک دمشی، ومقایسه با نتایج تجربی می‌باشد.. وقتی‌که ضریب گاز دمشی Qv ثابت است، دو مکانیزم برون روی گاز دمشی در اعداد فرود مختلف به وجود می‌آید، الف) گردابه استوانه‌ای پیچشی[5]، که مخلوطی از گاز دمشی و آب می‌باشد و در امتداد جسم تشکیل می‌گردد. ب) دو گردابه لوله‌ای توخالی[6] که شامل گاز دمشی می‌باشد و در امتداد جسم، به سمت بالا متمایل می‌گردد .

2- معادلات حاکم

در معادلات حاکم، فرض بر اینستکه سیال مخلوطی از مایع، بخارآب و گاز غیرقابل تقطیر است. جریان به‌شکل مخلوط، همگن بوده بطوریکه فازهای جریان دارای سرعت و فشار مشابهی می‌باشند. در مرز مشترک فازها، هر فاز دارای سرعت لغزشی می‌باشد [13]. معادلات پیوستگی و مؤمنتم جریان مخلوط به فرم روابط (1) و (2) است.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

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

u_i و g_i بردار سرعت و نیروی وزنی در جهت i می‌باشند. p فشار جریان مخلوط است. μ و μ_t نیز لزجت جریان آرام و لزجت اغتشاشی می‌باشند. جرم حجمی جریان مخلوط به فرم رابطه (3) تعریف می‌گردد.

$$\rho=\alpha_v\rho_v+\alpha_g\rho_g+(1-\alpha_v-\alpha_g)\rho_l \tag{3}$$

α کسر حجمی هر فاز است. زیرنویس‌های l , g , v مربوط به فازهای

[5] Toroidal vortex
[6] Two hollow tube vortex

بخارآب، گاز و آب می‌باشند.پدیده ایجاد حباب کاواک توسط معادله انتقال جرم ارائه می‌گردد. رابطه (4) معادله بقای کسر حجمی بخار و رابطه (5) معادله بقای کسر حجمی گاز هست. ترم‌های $\dot{m}^{+}, \dot{m}^{-}$ در معادله میزان آب تبخیر شده و یا تقطیرشده در حین فرایند کاواک می‌باشند.

$$\frac{\partial(\rho_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \rho_v \alpha_v}{\rho}\right) + \dot{m}^{+} - \dot{m}^{-} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \alpha_g u_j)}{\partial x_j} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \rho_g \alpha_g}{\rho}\right) \quad (5)$$

طبق معادله رایلی-پلیسیت تغییر سایز حباب، ناشی از اختلاف فشار بین فشار استاتیک محلی و فشار بخار می‌باشد. با صرف‌نظر کردن از ترم مربوط به مشتق دوم شعاع حباب، معادله رایلی-پلیسیت به فرم رابطه (6) نوشته می‌شود.

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}\frac{|p_v - p|}{\rho_l}} \quad (6)$$

R شعاع حباب می‌باشد. تعداد حباب‌ها در واحد حجم N_b بستگی به جهت انتقال فاز دارد، که به فرم رابطه (7) می‌باشد.

$$N_b = (1 - \alpha_v - \alpha_g)\frac{3\alpha_g}{4\pi R^3} \quad (7)$$

چنانچه فرایند تقطیر انجام گردد به فرم رابطه (8) درمیاید.

$$N_b = \frac{3\alpha_v}{4\pi R^3} \quad (8)$$

نرخ انتقال جرم برای واحد حجم به فرم رابطه (9) می‌باشد.

$$\dot{m} = N_b \frac{d\left(\frac{\rho_v 4\pi R^3}{3}\right)}{dt} = 4\pi N_b \rho_v R^2 \frac{dR}{dt} \quad (9)$$

از ترکیب معادلات بالا و ترم‌های $\dot{m}^{+}, \dot{m}^{-}$ به روابط (10) و (11) می‌رسیم.

$$\dot{m}^{+} = C_e \frac{3\rho_v(1 - \alpha_v - \alpha_g)\max(\alpha_g, \alpha_{nuc})}{R} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}\frac{\max(p_v - p\ ,\ 0)}{\rho_l}} \quad (10)$$

$$\dot{m}^{-} = C_c \frac{3\rho_v \alpha_v}{R}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{\max(p - p_v, 0)}{\rho_l}} \quad (11)$$

در روابط فوق C_e و C_c ضرایب تجربی هستند که مقادیر آن‌ها به ترتیب معادل 50 و 0.01 می‌باشند. طبق مدل انتقال جرم زوارت-گیلبر مقدار α_{nuc} مربوط به میزان گاز محلول در آب می‌باشد که معادل $5\text{x}10^{-4}$ است. شعاع حباب در آب نیز معادل $1\text{x}10^{-6}$ متر در نظر گرفته می‌شود.

از روابط (4) و (5) کسر حجمی بخار و گاز حاصل می‌گردد و با روابط (10) و (11) ترکیب می‌گردند .

در کاواک طبیعی و کاواک دمشی مدلهای دو معادله ای اغتشاش مختلفی بکار می رود [14]. جهت بررسی جریان مغشوش در کاواک دمشی، کلیه مدلهای دومعادله ای بررسی گردید. و تنها مدل اغتشاش DES که بر پایه مدل k - ω SST می‌باشد، جوابگو می باشد.

رابطه (12) معادله انرژی جنبشی اغتشاش را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right\} + G_k - Y_k + S_k \quad (12)$$

رابطه (13) نرخ اتلاف اغتشاش را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\Gamma_\omega \frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right\} + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (13)$$

رابطه (14) و (15) منتشرکننده‌های مؤثر[1]، k و ω را نشان می‌دهد.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (14)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (15)$$

σ_k و σ_ω اعداد پرانتل اغتشاش برای k و ω می‌باشند. لزجت اغتشاش به فرم رابطه (16) می‌باشد.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}\frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1\omega}\right]} \quad (16)$$

ترم پراکندگی Y_k انرژی جنبشی اغتشاش از دیدگاه DES به فرم رابطه (17) می‌باشد.

$$Y_k = \rho\beta^* k\omega F_{DES} \quad (17)$$

$$F_{DES} = \max\left(\frac{L_t}{C_{des}\Delta_{max}}\ ,\ 1\right) \quad (18)$$

$C_{des} = 0.61$ و Δ_{max} بزرگ‌ترین طول سلول می‌باشد. مقیاس طول اغتشاش نیز از رابطه (19) می‌آید.

$$L_t = \frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^*\omega} \quad (19)$$

رابطه (20) عدد بدون بعد کاویتاسیون و رابطه (21) عدد بدون بعد ضریب پسا را نشان می‌دهد.

$$\sigma_c = \frac{p_r - p_c}{\frac{1}{2}\rho u_\infty^2} \quad (20)$$

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho u_\infty^2 A} \quad (21)$$

3- مدل عددی

در مطالعه حاضر جهت انجام تحلیل عددی از مدل مخلوط همگن[2] استفاده‌شده، فازها دارای سرعت لغزشی در بین مرزهای مشترک می‌باشند، هر فاز دارای کسر حجمی بوده و معادله مومنتوم به‌صورت مشترک برای کل جریان تحلیل می‌گردد. در این تحلیل از مدل‌های اغتشاشی دو معادله‌ای متفاوتی استفاده گردید و نهایتاً مدل DES بکار گرفته شد. این مدل اغتشاشی در نشان دادن گردابه در پشت مدل بسیار مناسب عمل نمود. مقدار y^+ روی بدنه جسم کمتر از 65 می‌باشد. جهت تحلیل عددی از نرم افزارفلوئنت[3] بهره‌گیری شد. ابعاد هندسی مدل عددی موردنظر، یک مدل تست تجربی می‌باشد که نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده در این مطالعه بر اساس نتایج تجربی آن می‌باشد [15] . با توجه به "شکل 2" قطر صفحه کاواک زا، D = 10 mm، طول مدل، L=100.7 mm و قطر مدل، 16 mm می‌باشد. صفحه کاواک زا به‌عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته‌شده است. زاویه انتهای مدل تست 45 درجه، عرض کاواکزا 5mm وزاویه کاواکزا 60 درجه می باشد. در "شکل 3" میدان جریان نشان داده‌شده است، ورودی جریان تا مدل، 200mm و انتهای مدل تا پایان میدان، 700 mm و ارتفاع میدان 200 mm می‌باشد. مدل عددی و تحلیل صورت گرفته به‌صورت سه‌بعدی می‌باشد. با توجه به اینکه مدل هندسی و میدان جریان متقارن است، نیمی از مدل به‌صورت متقارن لحاظ گردیده، بطوریکه صفحه تقارن صفحه xy می‌باشد و

[1] Effective diffusivities
[2] Hemogeneous Mixture
[3] Ansys-Fluent

شرط مرزی متقارن[1] بر روی صفحه xy بکار گرفته‌شده است. شرط مرزی روی مدل، شرط بدون لغزش[2] می‌باشد و مرز بین فازهای میدان جریان، شرط لغزش آزاد[3] می‌باشد. جریان ورودی آب با چگالی $999.19\ kg/m^3$ و لزجت $0.001139\ kg/ms$ و گاز دمشی با چگالی $1.185\ kg/m^3$ و لزجت $18.31x10^{-6}\ kg/ms$ می‌باشد. در "شکل 4" سلول بندی مدل و میدان جریان نشان داده‌شده است. در نزدیکی مرزهای بدنه و در پشت بدنه، از ضریب تراکم 1.05 بهره‌گیری گردیده. تحلیل به‌صورت گذرا انجام‌گرفته است و قدم‌های زمانی بکار رفته، $1x10^{-4}$ و $1x10^{-5}$ می‌باشد. تکرارها در هر مرحله تا رسیدن به حالت پایدار ادامه یافته است.

در تحلیل عددی صورت گرفته، عدد فرود و ضریب گاز دمشی دو پارامتر مهم جهت شکل‌گیری کاواک و مکانیزمهای برون روی گاز دمشی می‌باشند.

رابطه (22) عدد فرود را نشان می‌دهد که در آن U_∞ سرعت جریان آزاد، g شتاب جاذبه و D قطر کاواک از می‌باشد

$$\mathrm{Fr} = \frac{U_\infty}{\sqrt{gD}} \qquad (22)$$

رابطه (23) رابطه بدون بعد ضریب گاز دمشی می‌باشد که در آن Q، دبی حجمی گاز تزریق‌شده از پشت کاواک از در راستای جریان می‌باشد و U_∞ سرعت جریان آزاد و D قطر کاواک از است.

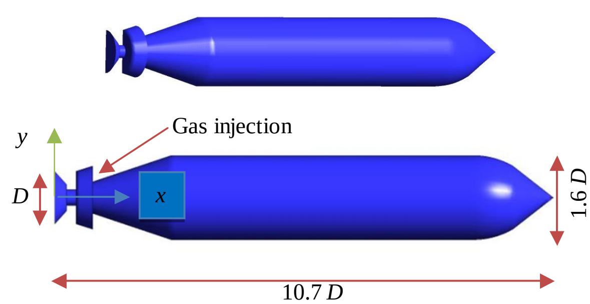


Fig. 2 Test model dimension

شکل 2 ابعاد هندسی مدل تست

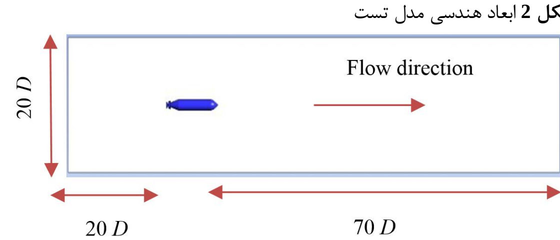


Fig. 3 Test body position

شکل 3 موقعیت مدل در میدان جریان

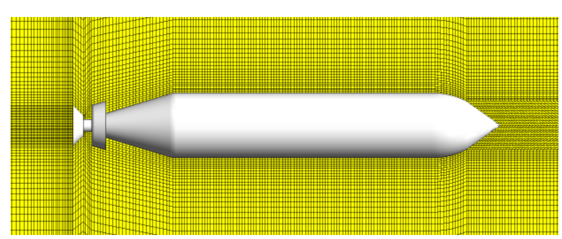


Fig. 4 Mesh structure

شکل 4 ساختار شبکه بندی

[1] Symmetry
[2] No slipping
[3] Slip velocity

$$Qv = \frac{Q}{U_\infty D^2} \qquad (23)$$

عدد رینولدز نیز در رابطه (24) نشان داده‌شده است.

$$\mathrm{R_e} = \frac{U_\infty D}{v} \qquad (24)$$

در "جدول 1" سرعت جریان آزاد، عدد فرود و میزان ضریب گاز دمشی که در تحلیل‌ها بکار رفته است، ارائه می‌گردد.

3-1- استقلال از شبکه

جهت بررسی استقلال از شبکه در میدان جریان، از سه شبکه سلول بندی استفاده گردید، در "جدول 2 " تعداد سلولها در هر حالت از شبکه بندی ارائه گردیده است

در "شکل 5" کانتور کسر حجمی گاز دمشی در مقطع عرضی X/D=18 مربوط به Fr=7.8 ، Qv=0.18 نشان داده شده است. در این شرائط در پشت جسم دو گردابه لوله ای تو خالی ایجاد می گردد که تحت تاثیر نیروی جاذبه بسمت بالا متمایل می گردد، توضیحات کامل موضوع فوق در بخش نتایج ارائه می گردد، لذا جهت بررسی استقلال از شبکه میدان جریان، بررسی این حالت از نتایج مطلوب بوده و مشاهده می گردد که حداکثر خطای بین شبکه بندی حالت 2 و حالت 3 کمتر از %5 می‌باشد، لذا میدان حل مستقل از شبکه بوده و براساس شبکه بندی حالت 3 کلیه تحلیلها انجام گردید.

جدول 1 داده‌های مربوط به تحلیل‌های عددی

Table 1 Input data

U_∞(m/s)	Fr	Re	Qv
2.44	7.8	21405	0.055
2.44	7.8	21405	0.069
2.44	7.8	21405	0.082
2.44	7.8	21405	0.18
2.44	7.8	21405	0.22
2.44	7.8	21405	0.4
3.75	12	32897	0.18
3.75	12	32897	0.31
3.75	12	32897	0.39
3.75	12	32897	0.54
3.75	12	32897	0.64
6.89	22	60443	0.18
7.39	23.6	64829	0.39

جدول 2 حالتهای شبکه بندی

Table 2 Mesh cases

Case	Fr	Qv	Cell number
Case 1	7.8	0.18	257967
Case 2	7.8	0.18	365234
Case 3	7.8	0.18	427145

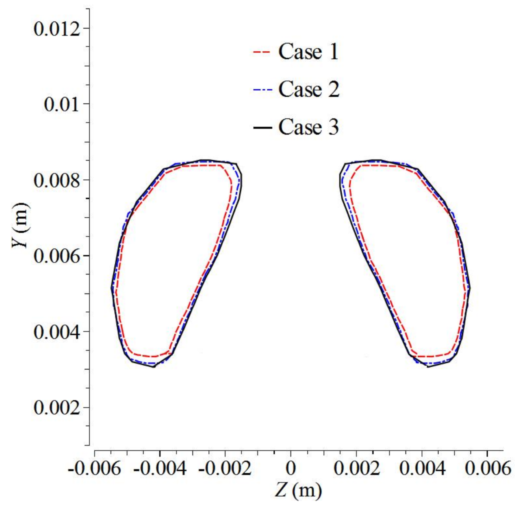


Fig 5.Comparison of gas volume fraction contour line cross section at X/D=18 Fr=7.8 , Qv=0.18 at different meshes

شکل5 مقایسه خطوط کانتور کسر حجمی گاز دمشی در شبکه بندی مختلف در مقطع عرضی X/D=18 و Qv=0.18 , Fr=7.8

در "شکل 6" نتایج تجربی [15] مربوط به الگوهای متفاوت برون روی گاز دمشی، برای ضریب گاز دمشی ثابت Qv=0.18، در اعداد فرود مختلف مقایسه شده است.

نتایج تجربی فوق نشان می‌دهد، وقتی‌که میزان گاز دمشی ثابت باشد، با افزایش عدد Fr الگوی برون روی گاز دمشی و ساختار جریان تغییر می‌یابد.

وقتی‌که میزان گاز دمشی ثابت باشد و عدد فرود تغییر کند، دو مکانیزم مختلف از برون روی گاز دمشی ایجاد می‌شود [16] .

4- نتایج

تاثیرمدلهای اغتشاش، تاثیر عدد فرود، تاثیر میزان ضریب گاز دمشی در روند تشکیل ساختار اَبَرکاواک بشرح زیر می باشد.

4-1- بررسی رفتار مدل‌های اغتشاش

انتخاب مدل اغتشاش، جهت نشان دادن رفتار ناپایدار ساختار کاواک بسیار اهمیت دارد. مدل دو معادله‌ای SST k - ω جهت ارائه رفتار و ساختار کاواک طبیعی بر روی جسم مناسب می‌باشد[17] و از طرفی دیگر مدل (LES)[1]، توانائی شبیه‌سازی کاواک در پشت جسم را دارد [18]. جهت بررسی جریان

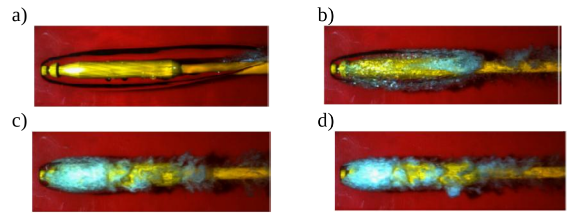


Fig 6. Comparison of the Experimentally cavitation pattern at different Fr numbers a) Fr=7.8, b) Fr=12, c) Fr=22, d) Fr=23.6 , Qv=0.18

شکل 6 مقایسه نتایج تجربی مربوط به الگوهای کاواک در اعداد فرود مختلف، الف) Fr=7.8 ، ب) Fr=12 ، ج) Fr=22، د) Fr=23.6 و Qv=0.18

[1] Large eddy simulation(LES)

مغشوش در کاواک دمشی، کلیه مدلهای دومعادله ای بررسی گردید. و تنها مدل اغتشاش [2] (DES) که ترکیبی از مدل SST k - ω و LESمی‌باشد، جوابگو می باشد.

در این مدل در ناحیه نزدیک جسم و در مجاورت لایه‌مرزی از مدل دو معادله‌ای (SST $k-\omega$) و در ناحیه پشت جسم از مدل اغتشاش (LES)، استفاده می‌گردد. در "شکل 7" مقایسه کسر حجمی برون روی گاز دمشی در Fr=7.8 و Qv=0.18 (دید از بالا) بین مدل‌های مختلف اغتشاش نشان داده‌شده است. مطابق با نتایج تجربی [15] برون روی گاز دمشی در Fr=7.8 و Qv=0.18 بصورت دو گردابه لوله ای شکل تو خالی می باشد. در "شکل 8" مقایسه خطوط کانتور کسر حجمی برون روی گاز دمشی، مدل‌های مختلف اغتشاش در Fr=7.8 و Qv=0.18 و t=0.15 s در مقطع عرضی X/D=23 نشان داده شده است، لذا مشاهده می گردد که فقط مدل اغتشاش (DES) ، دو گردابه لوله ای شکل تو خالی تشکیل می دهد و بقیه مدلهای اغتشاش توانایی نشان دادن این حلت گردابه را ندارند.

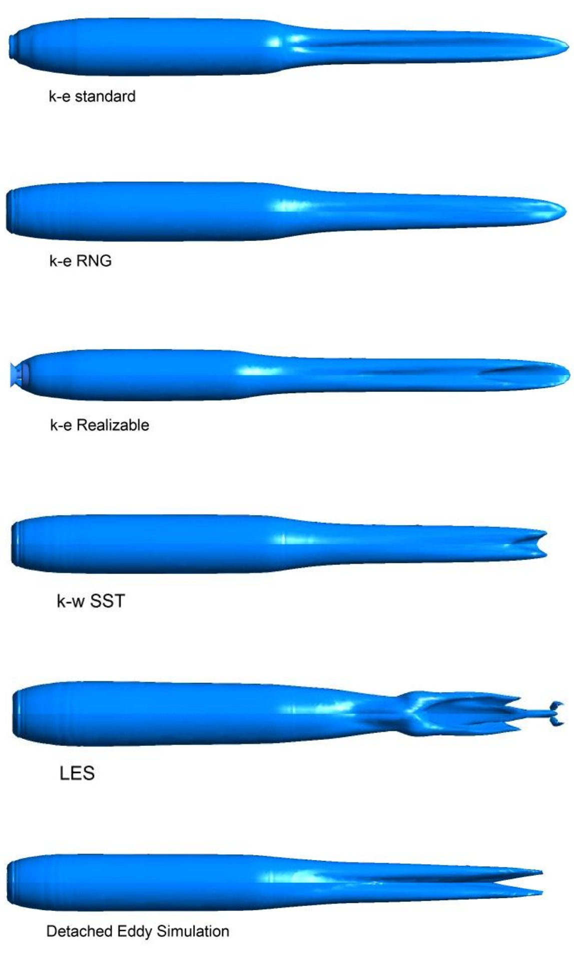


Fig 7. Comparison of turbulent models at Fr=7.8 , Qv=0.18 , t=0.15 s (vertical view)

شکل 7 مقایسه کسر حجمی برون روی گاز دمشی، مدل‌های مختلف اغتشاش در Fr=7.8 و Qv=0.18 و X/D=23 و t=0.15 s (دید از بالا) ،

[2] Detached Eddy Simulation(DES)

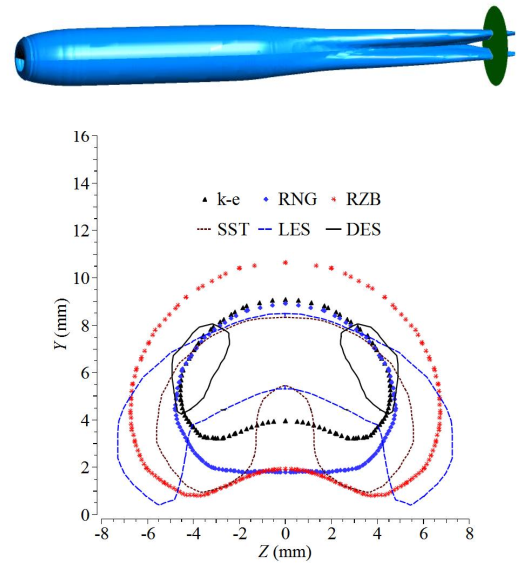


Fig 8. Comparison of gas volume fraction contour line at **t**urbulent models at Fr=7.8 , Qv=0.22 , X/D=23, t=0.15 s (vertical view)

شکل 8 مقایسه خطوط کانتورکسر حجمی برون روی گاز دمشی، مدل‌های مختلف اغتشاش در Fr=7.8 و Qv=0.18 و t=0.15 s در مقطع عرضی X/D=23 (دید از بالا) ،

4-2 تأثیر عدد فرود روی ساختار اَبَرکاواک

وقتی‌که میزان گاز دمشی ثابت باشد و عدد فرود تغییر کند، دو مکانیزم مختلف از برون روی گاز دمشی ایجاد می‌شود .

در "شکل9" مکانیزم اول برون روی گاز دمشی نشان داده‌شده است، در این شکل، مقایسه بین شکل کاواک، الف) نتیجه تجربی [15] و ب) تحلیل عددی در Fr=7.8 , Qv=0.18 ارائه‌شده است. این شکل الگوی مربوط به کاواک دمشی و کسر حجمی گاز، در صفحه عمودی و موقعیت طولی را از منظر روبرو و عمودی نشان می‌دهد. زمانی که عدد فرود نسبتاً کوچک است، Fr =7.8 ، کاواک به‌صورت پایدار تا 1.5 برابر طول جسم رشد می‌کند، تأثیر نیروی جاذبه در این حالت چشمگیر بوده و باعث می‌گردد که محور کاواک به سمت بالا متمایل گردد و سطح مقطع کاواک تغییر یابد.

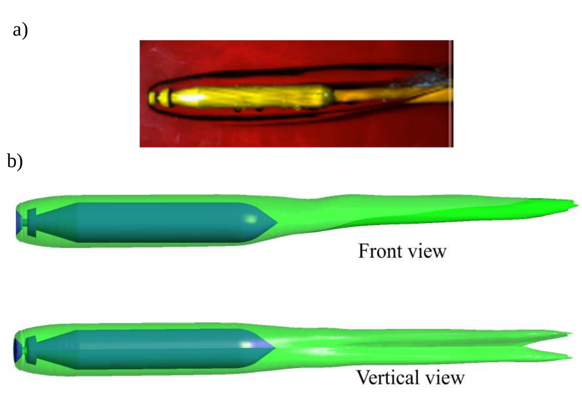


Fig 9. Ventilated cavity shape and gas volume fraction at different locations along the vertical planes at Fr=7.8 , Qv=0.18 a)Experimental b)Numerical

شکل 9 شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی در موقعیت‌های مختلف، درصفحه عمودی Fr=7.8 , Qv=0.18 الف) تجربی ب) عددی

"شکل 9 " نشان می‌دهد که برون روی گاز دمشی توسط دو گردابه لوله ای[1] شکل انجام می‌گردد و به‌واسطه نیروی جاذبه، گردابه های لوله‌ای شکل به سمت بالا تغییر مسیر می‌دهد. تا زمانی که کاواک روی جسم می‌باشد سطح مقطع کاواک به‌صورت متقارن می‌باشد و زمانی که کاواک به انتهای جسم می‌رسد سطح مقطع کاواک کاهش می‌یابد، به علت وجود نیروی جاذبه، سرعت روی کاواک کوچک‌تر از سرعت زیر کاواک شده و این اختلاف سرعت باعث می‌گردد که چرخش[2] ایجاد گردد و حاصل آن گردابه چرخشی باشد که به فرم مجرای لوله‌ای شکل خود را نشان می‌دهد [16]. به‌واسطه چرخش گردابه، مؤلفه سرعت به سمت بالا متمایل می‌گردد و باعث می‌شود که گردابه نسبت به محور افق زاویه‌دار شود.

در "شکل 10" براساس نتایج تحلیل عددی، خطوط کانتور کاواک برای Fr=7.8 , Qv=0.18 در سطوح مقاطع X/D=8,11,13,15,17,19,21,23 ارائه گردیده است. با توجه به سطوح مقاطع نشان داده‌شده، مشاهده می‌گردد که کاواک روی سطح جسم متقارن می‌باشد، در انتهای جسم، کاواک در اثر نیروی جاذبه به سمت بالا حرکت می‌کند و سطح مقطع آن کاهش می‌یابد، همچنان که سطح مقطع کاهش می‌یابد، کاواک کاملاً به فرم یک مسیر بسته و گردابه لوله‌ای شکل درمی‌آید.

در "شکل 11" مکانیزم دوم برون روی گاز دمشی، نشان داده‌شده است. در این شکل، مقایسه بین شکل کاواک، الف) نتیجه تجربی [15] و ب) تحلیل عددی در Fr=12, Qv=0.64, ارائه‌شده است. این شکل، الگوی مربوط به کاواک دمشی و کسر حجمی گاز، در صفحه عمودی و موقعیت طولی را از منظر روبرو و عمودی نشان می‌دهد. با افزایش عدد فرود، مکانیزم برون روی گاز دمشی کاملاً متفاوت می‌گردد.

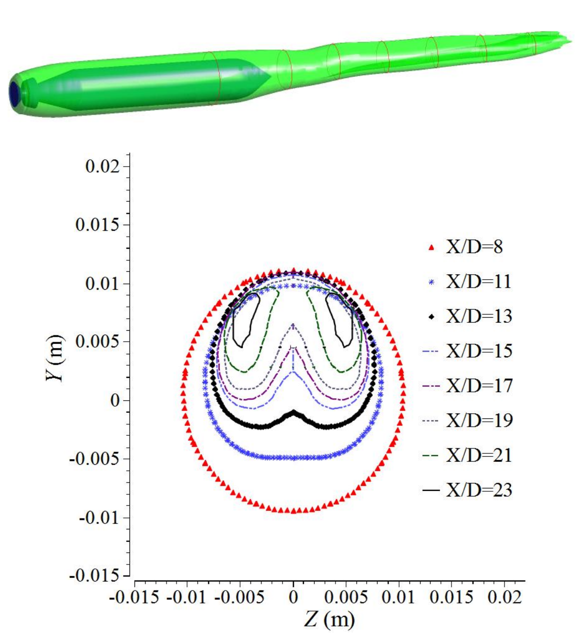


Fig 10. Numerical results of gas volume fraction contour line at different cross section Fr=7.8 , Qv=0.18

شکل10 نتایج تحلیل عددی از خطوط کانتور کسر حجمی گاز دمشی در سطوح مقاطع مختلف Fr=7.8 , Qv=0.18

[1] Trailing vortex
[2] Circulation

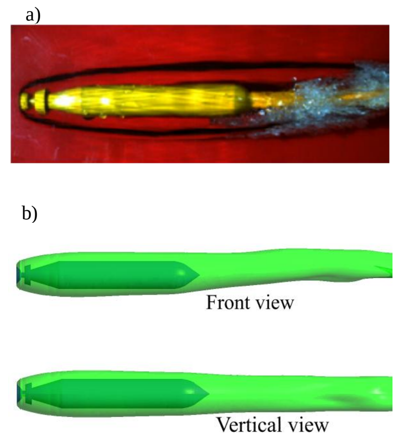


Fig 11. Ventilated cavity shape and gas volume fraction at different locations along the vertical planes Fr=12 , Qv=0.64 a)Experimental b)Numerical

شکل 11 شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی در موقعیت‌های مختلف، در صفحه عمودی $Fr=12, Qv=0.64$، الف) تجربی ب) عددی

وقتی ضریب گاز دمشی ثابت باشد، برای عدد فرود $Fr=23.6$، $Fr=22$، طول کاواک به‌مراتب کوچک‌تر از عدد فرود $Fr=7.8$ می‌باشد، زیرا افزایش سرعت جریان آزاد، مانع از بهم پیوستگی گاز دمشی می گردد. در این حالت تأثیر نیروی جاذبه روی شکل کاواک ناچیز می‌گردد و انتهای کاواک به‌صورت مخلوطی از گاز دمشی و بخارآب، خود را نشان می‌دهد، برون روی گاز دمشی را می‌توان به این شکل بیان نمود که خروج این گاز به‌صورت حلقه‌های بسته انجام می‌گردد [16].

براساس نتایج تحلیل عددی، ساختار کاواک، این موضوع را نشان می‌دهد، که کاواک به فرم متقارن در پشت جسم و در راستای جسم ادامه می‌یابد و تأثیر نیروی جاذبه روی آن ناچیز می‌باشد.

در "شکل 12" براساس نتایج تحلیل عددی، خطوط کانتور کاواک برای $Fr=12, Qv=0.64$ در سطوح مقاطع $X/D=8,11,13,15,17,19,21,23$ ارائه گردیده است. با توجه به سطوح مقاطع نشان داده‌شده، مشاهده می‌گردد که کاواک روی سطح جسم و در امتداد آن متقارن و به فرم گردابه استوانه‌ای[1] می‌باشد، در امتداد جسم، نیروی جاذبه تأثیر ناچیزی بر ساختار کاواک دارد، و همچنان در راستای جسم، برون روی گاز دمشی اتفاق می‌افتد.

4-3- تأثیر میزان گاز دمشی روی ساختار اَبَرکاواک

در "شکل 13" نتایج تجربی [15] مربوط به الگوهای متفاوت برون روی گاز دمشی برای عدد فرود $Fr=7.8$ و ضریب گاز دمشی الف) $Qv=0.055$ ب) $Qv=0.069$ ج) $Qv=0.082$ د) $Qv=0.18$ نشان داده شده است.

در "شکل 14" مقایسه بین شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی [15] و نتایج عددی در $Fr=7.8$ و الف) $Qv=0.069$ ب) $Qv=0.082$ ج) $Qv=0.18$ انجام گردیده است.

نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که، چنانچه عدد فرود ثابت باشد، با افزایش میزان ضریب گاز دمشی، سطح کاواک افزایش می‌یابد و بزرگ‌تر شدن سطح کاواک نشان می‌دهد، که تأثیر نیروی جاذبه روی شکل کاواک بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در عدد فرود $Fr=7.8$ با افزایش میزان ضریب گاز دمشی، سطح جسم و ادامه آن، به‌تدریج توسط کاواک پوشیده می‌گردد و ادامه کاواک به‌واسطه تأثیر نیروی جاذبه به سمت بالا متمایل می‌گردد.

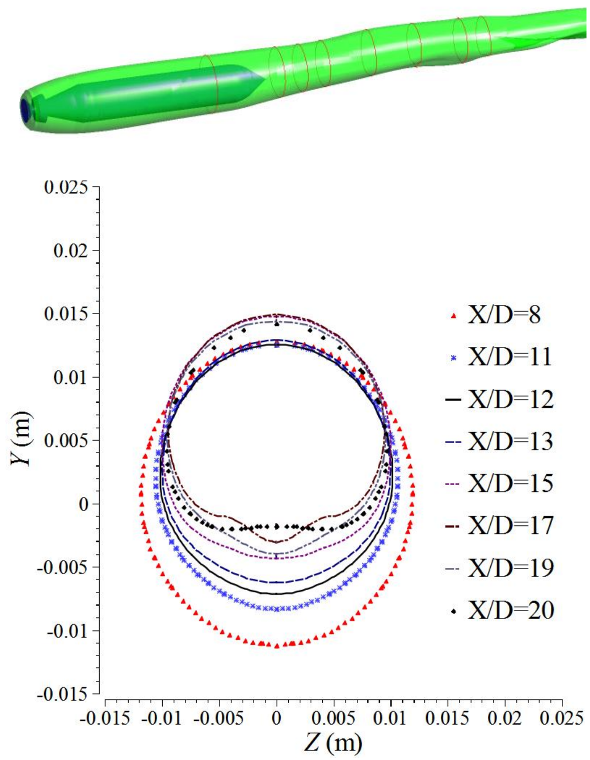


Fig 12. Numerical results of gas volume fraction contour line at different cross section Fr=12 , Qv=0.64

شکل 12 خطوط کانتور کسر حجمی گاز دمشی در سطوح مقاطع مختلف $Fr=12, Qv=0.64$

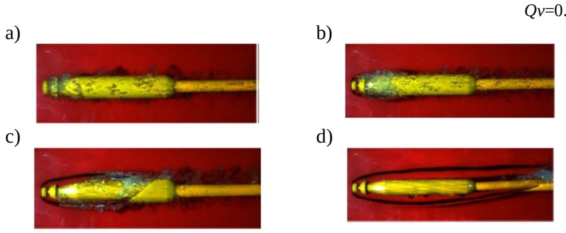


Fig 13. Comparison of cavitation pattern at a) $Qv=0.055$, b) $Qv=0.069$, c) $Qv=0.082$, d) $Qv=0.18$, Fr=7.8

شکل 13 مقایسه تجربی الگوهای کاواک در الف) $Qv=0.055$ ب) $Qv=0.069$ ج) $Qv=0.082$ د) $Qv=0.18$ و $Fr=7.8$

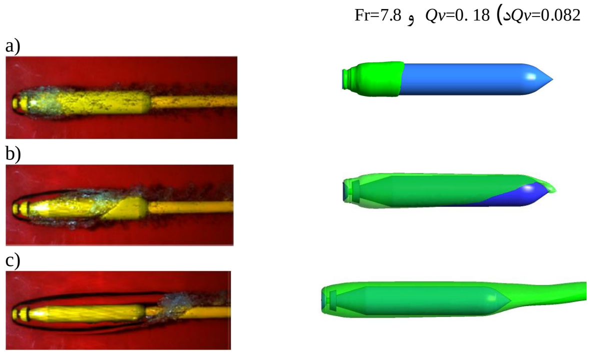


Fig 14. Comparison of ventilated cavity shape and gas leakage between experimental and numerical results a) $Qv=0.069$, b) $Qv=0.082$, c)$v=0.18$, Fr=7.8

شکل 14 مقایسه شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی و عددی الف) $Qv=0.069$ ب) $Qv=0.082$ ج) $Qv=0.18$, $Fr=7.8$

[1] Toroidal vortex

در "شکل 15" انطباق بین نتایج تجربی و نتایج عددی در Fr=7.8 و الف) Qv=0.069 ب) Qv=0.082 ج) Qv=0.18 انجام گردیده است.

مشاهده می‌گردد که نتایج عددی به حد قابل قبولی، شکل،اندازه و مرزهای نتایج تجربی را پوشش می‌دهد.

در "شکل 16 " نتایج تجربی [15] مربوط به الگوهای متفاوت برون روی گاز دمشی برای عدد فرود Fr=12 و ضریب گاز دمشی الف) Qv=0.12 ب) Qv=0.18 ج) Qv=0.39 د) Qv=0.64 نشان داده‌شده است .

در "شکل 17" مقایسه شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی [15] و نتایج عددی در Fr=12 و الف) Qv=0.18 ب) Qv=0.39 ج) Qv=0.64 انجام گردیده است.

ساختار جریان در عدد فرود Fr = 12 با افزایش میزان ضریب گاز دمشی، مشابه ساختار جریان در عدد فرود Fr = 7.8 می‌باشد. در یک‌میزان ضریب گاز دمشی Qv = 0.64 مشاهده می‌شود که کاواک از مکانیزم گردابه لوله‌ای در انتهای کاواک به مکانیزم گردابه استوانه‌ای تبدیل می‌گردد، این حالت یک حالت بحرانی است که وابسته به عدد فرود و میزان ضریب گاز دمشی می‌باشد. با توجه به "شکل 13 " و "شکل 17" مشاهده می‌گردد ، که در یک عدد فرود ثابت با افزایش نرخ دمش گاز، طول حباب افزایش می‌یابد. افزایش طول کاواک یک حد معینی دارد و پس‌ازآن حتی با افزایش نرخ دمش گاز نمی‌توان طول حباب کاواک را افزایش داد، با افزایش نرخ دمش گاز در حباب کاواک، به‌واسطه گرادیان فشار و تنش برشی، در انتهای کاواک مجرایی به وجود آمده و گاز دمشی از کاواک جدا می‌گردد.

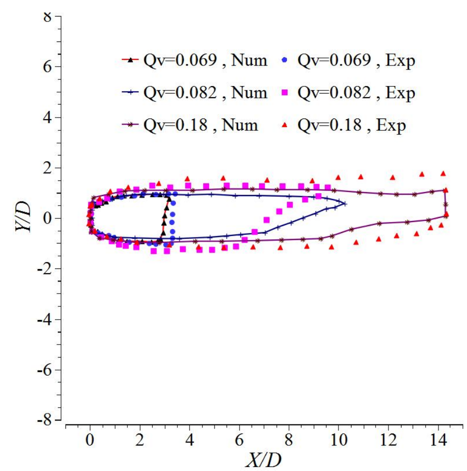


Fig 15 Comparison of ventilated cavity shape and gas leakage between experimental and numerical results a) Qv=0.069 , b) Qv=0.082 , c) Qv=0.18 , Fr=7.8

شکل 15 انطباق بین شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی و عددی الف) Qv=0.069 ب) Qv=0.082 ج) Qv=0.18 , Fr=7.8

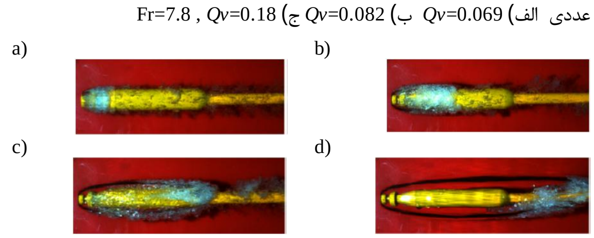


Fig 16. Comparison of cavitation pattern at a) Qv=0.12, b) Qv=0.18, c) Qv=0.39, d) Qv=0.64, Fr=12

شکل 16 مقایسه تجربی الگوهای کاواک در الف) Qv=0.12 ب) Qv=0.18 ج) Qv=0.39 د)Qv=0. 64 و Fr=12

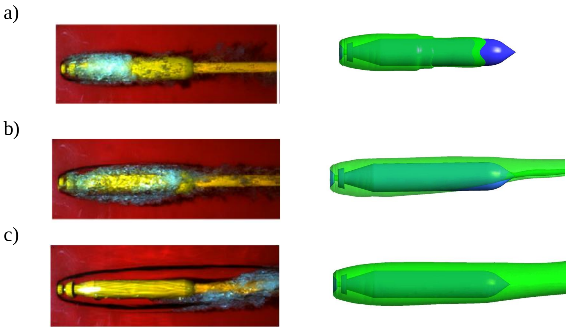


Fig 17. Comparison of ventilated cavity shape and gas leakage between experimental and numerical results a) Qv=0.18 , b) Qv=0.39 , c) Qv=0.64 , Fr=12 ,

شکل 17 مقایسه شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی و عددی الف) Qv=0.18 ب) Qv=0.39 ج) Qv=0.64 , Fr=12

در "شکل 18" انطباق شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی و عددی در Fr=12 و الف) Qv=0.18 ب) Qv=0.39 ج)Qv=0.64 انجام گردیده است.

در "شکل 19" خطوط میدان جریان وکانتور کسر حجمی گاز دمشی Fr=7.8 , Qv=0.18 نشان داده شده است، مشاهده می گردد که گاز دمشی از تماس خطوط جریان با بدنه جسم جلوگیری می کند.

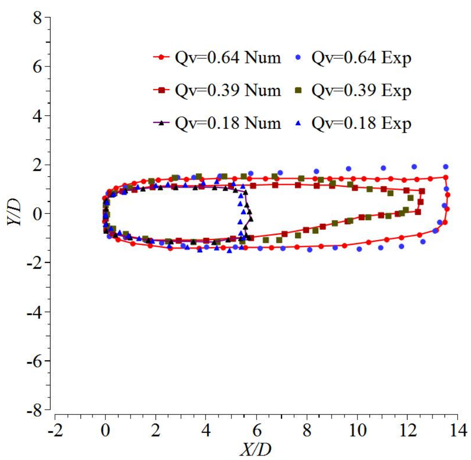


Fig 18. Comparison of ventilated cavity shape and gas leakage between experimental and numerical resultsa) Qv=0.18 , b) Qv=0.39 , c) Qv=0.64 , Fr=12 ,

شکل18 انطباق شکل کاواک دمشی و برون روی گاز دمشی بین نتایج تجربی و عددی الف) Qv=0.18 ب) Qv=0.39 ج) Qv=0.64 ,Fr=12

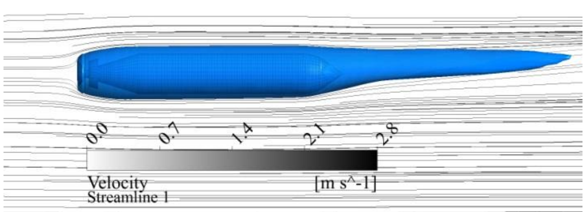


Fig 19. Velocity streamline and gas volume fraction contour Fr=7.8 , Qv=0.18

شکل 19 خطوط میدان جریان وکانتور کسر حجمی گاز دمشیQv=0.18 , Fr=7.8

4-4- تاثیر ضریب گاز دمشی روی ضریب پسا:

در " جدول 3" مقایسه ای **بین** ضریب پسا برای اعدد فرود Fr=7.8 و Fr=12 و ضرایب گاز دمشی متفاوت نشان داده‌شده است. در عدد فرود ثابت، مشاهده می شودکه با افزایش ضریب گاز دمشی، ضریب پسا روی بدنه جسم کاهش می یابد. افزایش ضریب گاز دمشی باعث می گردد که تماس سیال پیرامون جسم با بدنه جسم از بین برود و پسای اصطکاکی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. در حالت Fr=12 که گردابه پیچشی ایجاد می گردد بعلت اینکه ضریب پسای فشاری افزایش می یابد، مقدار ضریب پسا بزرگتر می باشد،

5- نتیجه‌گیری

توسط دمش گاز بر روی بدنه شناورهای رونده زیرآبی می‌توان اَبَرکاواک دمشی ایجاد کرد. نتایج تجربی و نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد،

1) فقط مدل اغتشاش (DES) که ترکیبی از مدل اغتشاش دو معادله‌ای (SST k - ω) و مدل (LES) می‌باشد ساختار اَبَرکاواک دمشی، را شبیه سازی می کند.

2) دو پارامتر اصلی و موثر در تشکیل اَبَر کاواک دمشی، عدد فرود و ضریب گاز دمشی، می‌باشند.

3) در اعداد فرود مختلف، وقتی میزان ضریب گاز دمشی ثابت باشد رفتار برون روی گاز دمشی، از داخل ساختار کاواک، توسط دو مکانیزم متفاوت قابل‌بیان است. الف) گردابه استوانه‌ای پیچشی، که شامل مخلوطی از گاز دمشی و بخارآب بوده و در امتداد جسم می باشد. ب) دو گردابه لوله‌ای توخالی که شامل گاز دمشی می‌باشد و تحت تأثیر نیروی جاذبه، با امتداد جسم، زاویه گرفته و به سمت بالا متمایل می‌گردد. تا زمانی که کاواک روی جسم است، سطح مقطع کاواک به‌صورت متقارن می‌باشد و زمانی که کاواک به انتهای جسم می‌رسد سطح مقطع کاواک کاهش می‌یابد. در اعداد فرود پایین گردابه لوله ای توخالی و با افزایش عدد فرود از حد معین، گردابه استوانه ای پیچشی تولید می شود.

4) در اعداد فرود ثابت، با افزایش میزان ضریب گاز دمشی، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای طول کاواک افزایش می‌یابد، و نیروی جاذبه بر شکل کاواک تأثیر می‌گذارد. طول کاواک معمولاً تا 1.5 برابر طول جسم افزایش می‌یابد. با افزایش عدد فرود، در یک مقدار خاصی از میزان گاز دمشی، کاواک از حالت گردابه لوله‌ای توخالی، به گردابه استوانه‌ای پیچشی تبدیل می‌گردد. این مقدار خاص با عدد فرود تغییر می‌یابد.

5) در یک عدد فرود ثابت، وقتی‌که کاواک بر روی جسم، شکل می گیرد، با افزایش میزان ضریب گاز دمشی، طول حباب افزایش می‌یابد. افزایش طول کاواک یک حد معینی دارد و پس‌ازآن حتی با افزایش نرخ دمش گاز نمی‌توان طول حباب کاواک را افزایش داد، زیرا با افزایش نرخ دمش گاز در حباب کاواک، به‌واسطه گرادیان فشار و تنش برشی در انتهای کاواک مجرایی به وجود آمده و گاز دمشی از کاواک خارج می‌گردد.

جدول 3 مقایسه ضریب پسا

Table 3 Comparison of drag coefficient

Fr	*Qv*	Cd
7.8	0.069	0.18
7.8	0.082	0.13
7.8	0.18	0.12
12	0.18	0.52
12	0.39	0.34
12	0.64	0.28

6) افزایش ضریب گاز دمشی باعث می گردد که پسای اصطکاکی روی بدنه جسم به مقدار قابل توجهی کاهش یابد و ضریب پسا بر روی جسم کم گردد.

6- فهرست علائم

A	سطح مقطع جسم (m^2)
C_d	ضریب پسا
C_c	ضریب تقطیر
C_e	ضریب تبخیر
C_p	ضریب فشار
D	قطر جسم (m)
D_ω	ترم دیفیوژن
F	نیروی پسا (N)
Fr	عدد فرود
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
G_k	ترم تولید k
G_ω	ترم تولید ω
K	انرژی جنبشی اغتشاش (m^2/s^2)
KL	طول جسم (m)
$\dot{m}^+$	نرخ انتقال جرم به فرم تبخیر (kg/s)
$\dot{m}^-$	نرخ انتقال جرم به فرم تقطیر (kg/s)
n	تعداد حباب در واحد حجم
P	فشار جریان مخلوط (pa)
P_r	فشار مرجع (pa)
P_B	فشار داخل حباب (pa)
P_c	فشار داخل کاواک (pa)
P_v	فشار بخار آب(pa)
P_∞	فشار محیط(pa)
Q_v	ضریب گاز دمشی
Q	دبی حجمی گاز دمشی
R	شعاع حباب (m)
R_e	عدد رینولدز
S_k	ترم چشمه
S_ω	ترم چشمه
t	زمان (s)
u	مؤلفه سرعت (m/s)
u_∞	سرعت جریان آزاد (m/s)
Y_k	ترم پراکندگی k به‌واسطه اغتشاش
Y_ω	ترم پراکندگی ω به‌واسطه اغتشاش

علائم یونانی

α_v	کسر حجمی بخار
α_g	کسر حجمی گاز
σ_c	عدد کاواک دمشی
μ	لزجت جریان آرام (kg/ms)
μ_t	لزجت جریان مغشوش (kg/ms)
ρ	جرم حجمی (kg/m^3)
ρ_v	جرم حجمی بخار (kg/m^3)

$\boldsymbol{\rho_g}$ جرم حجمی گاز $(\mathrm{kg/m^3})$

$\boldsymbol{\rho_l}$ جرم حجمی سیال $(\mathrm{kg/m^3})$

$\boldsymbol{\alpha_{nuc}}$ کسر حجمی گاز محلول در آب

$\boldsymbol{\sigma_k}$ عدد پرانتل مربوط به $\boldsymbol{k}$

$\boldsymbol{\sigma_\omega}$ عدد پرانتل مربوط به $\boldsymbol{\omega}$

$\boldsymbol{\alpha^*}$ ضریب دمپ لزجت اغتشاش

$\boldsymbol{\beta^*}$ ضریب دمپ

$\boldsymbol{\Gamma_k}$ ترم نفوذ مؤثر $\boldsymbol{k}$

$\boldsymbol{\Gamma_\omega}$ ترم نفوذ مؤثر $\boldsymbol{\omega}$

7-مراجع

[1] S. L. Ceccio, Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, *Fluid Mechanics*, Vol. 42, No. 4, pp. 183-203, 2010.

[2] M. Wosnik, R. E. A. Arndt, Measurements in high void-fraction bubbly wakes created by ventilated supercavitation, *Proceedings of The 6th International Symposium on Cavitation*, wageningen the netherlands, pp. 154-165, 2006.

[3] Y. N. Savchenko, Y. D. Vlanesko, V. N. Semenenko, Experimental study of high-speed cavitated flows, *Journal of Fluid Mechanics*,Vol. 26, No. 3, pp. 365-374, 1999.

[4] J. W. Lindau, R. F. Kunz, J. M. Mulherin, J. J. Dreyer, D. R. Stinebring, Fully coupled 6- DOF to URANS modeling of cavitating flow around a supercavitating vehicle, *Proceedings of The 5th International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, pp. 54-65, 2003.

[5] H. B. Wang, J. Z. Zhang, Y. J. Wei, Study on relations between cavity form and typical cavitator parameters, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 20, No. 2, pp. 251-257, 2005.

[6] M. Maerefat, S. Tahmasebi, M. R. Ansari, Numerical simulation of super-cavitating flow and calculation of cavity length around a submersible vehicle, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 187-196, 2015 (in Persian فارسی).

[7] J. L. ping, W. Cong, j. W. Ying, W. H. bin, Z. J. zhong, Y. K. ping, Numerical simulation of artificial ventilated cavity, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 18, No. 3, pp. 273-279, 2006.

[8] W. W. Zhang, Y. J. Wei, J. Z. Zhang, C. Wang, K. P. Yu, Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. B19, No. 5, pp. 564-571, 2007.

[9] Z. Wang, K. P. Yu, X. H. Wan, Research on the gas-leakage rate of unsteady ventilated supercavity, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, No. 5, pp. 778-783, 2010.

[10] B. Ji, 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*, Vol. 22, No. 6, pp. 753-759, 2010.

[11] H. Chanson, , *Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows*, pp. 127-135, London, Uk: Academic Press, 1997.

[12] K. S. Hong, K. Nakwan, Hydrodynamics and modeling of a ventilated supercavitating body in transition phase, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 27, No. 5, pp. 763-772, 2015.

[13] A. K. Singhal, H. Li, M. Athavale, Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp. 617-624, 2002.

[14] S. T. Johansen, J. Wu, W. Shyy, Filter-based un steady RANS computations, *Heat Fluid Flow*, Vol. 25, No. 1, pp. 10-21, 2004.

[15] T. J. Schauer, *An Experimental study of a ventilated supercavitating vehicle*, Thesis, MS thesis in aerospace engineering, university of minnesota, 2013.

[16] V. N. Semenenko, *Artificial supercavitation physics and calculation*, Institute of Hydromechanics of Ukrainian Academy of Science, Kiev, ADP012080, 2001.

[17] C. Delgosha, O. F. Patella, R. Reboud, Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation., *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, No. 1, pp. 38-45, 2003.

[18] B. Ji, X. Luo, W. Arndt, R. E. A. Peng, X. X. Wu, 68, Large eddy simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil., *Journal of Multiphase Flow*, Vol. 68, No 5, pp. 121-134, 2015.