

(یادداشت مهندسی)

## مدل سازی جریان ابر کاواک اطراف روندهای زیر سطحی

مهرزاد شمس<sup>۴</sup>  
دانشکده مهندسی مکانیک

علی چراغی<sup>۱</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۲</sup> و سجاد محمدی بازرگانی<sup>۳</sup>  
دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۲)

### چکیده

ابراکاوک زمانی رخ می‌دهد که یک رونده زیرسطحی توسط یک حفره بزرگ و پیوسته احاطه شود. با توجه به کاهش پسای چشمگیر روندهای زیرسطحی که در طرز ابرکاوک حرکت می‌نمایند (نسبت به روندهایی که در طرز کاملاً مرطوب حرکت می‌کنند)، بررسی جریان‌های ابرکاوک همواره از زمینه‌های مورد علاقه محققان بوده است. در این تحقیق، ابتدا شبیه‌سازی عددی جریان ابرکاوک طبیعی و مصنوعی به صورت متقارن محوری اطراف یک رونده زیرسطحی انجام شده است. ابعاد حفره ایجاد شده در هر دو حالت به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در مرحله بعدی، جریان ابرکاوک ناشی از تزریق گاز به صورت سه‌بعدی طراحی شده است. روابط میان شکل حفره، عدد کاویتاسیون و نرخ تزریق برای کاواک‌زاهای با اندازه‌های مختلف به دست آمده است. در پایان، جریان ابرکاوک فقط در حالت طبیعی و بدون تزریق گاز برای بررسی اثر زاویه نصب روی شکل سوپرحفره شبیه‌سازی شده است. در تحقیق حاضر، از روش مخلوط چندفازی استفاده شده و معادله رایلی-پلست جهت انتقال جرم در یک ساختار چندفازی به کار گرفته شده است. نتایج نشان‌دهنده ابعاد معادل برای حفره‌های ناشی از ابرکاوک طبیعی و ناشی از تزریق گاز است.

**واژه‌های کلیدی:** ابرکاوک، جریان چندفازی، عبارت چشمه، رونده زیرسطحی، زاویه نصب

(Engineering Note)

## Modeling of Supercavitating Flow over Submerged Vehicles

A. Cheraqi, R. Ebrahimi, and S.M. Bazargani

M. Shams

Aerospace Eng. Dep't.

Mech. Eng. Dep't.

K.N. Toosi Univ. of Tech.

(Received: 8 Nov., 2010; Accepted: 3 Dec., 2011)

### Abstract

Supercavitation occurs when a submerged and moving body is enveloped by a large and continuous cavity. Research on the characteristics of supercavitation have received great attention due to its substantial effect on drag reduction, as compared to the same fully wetted underwater body. In this study, numerical simulation of ventilated and natural supercavitation in an axisymmetric vehicle with cavitator is performed. In addition, simulation was performed for three-dimensional cases with various cavitator sizes. Also, the relations among cavity shape, ventilated cavitation number, and ventilation rate, for different cavitator sizes, were analyzed. Furthermore, the numerical simulation was performed on an underwater vehicle with disk cavitator at nose at various installation angles. The effect of installation angle on the supercavity formation was also studied. The multiphase mixture method was used and the Rayleigh-Plesset equation was implemented for inter-phase mass transfer. The numerical results were compared with experimental data and show equivalent natural and artificial cavity sizes.

**Keywords:** Supercavitation, Multiphase Flow, Source Term, Underwater Vehicle, Installation Angle

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: Cheraqi.a@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): Rebrahimi@kntu.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: S.M.Bazargani@gmail.com

۴- دانشیار: Shams@kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

در مطالعات اخیر، گرایش به استفاده از معادلات ناویر-استوکس در حل معادلات جریان بیشتر است. سری اول این روش‌ها از یک معادله حالت برای در نظر گرفتن تغییر فاز (زمانی که فشار مایع به زیر فشار بخار برسد)، استفاده شده است. این رهیافت در شبیه‌سازی کاویتاسیون ورقه‌ای و ابرکاواک زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۳-۴]. این روش قادر به جدایش مرز میان بخار و گاز غیرقابل تقطیر در ابرکاواک مصنوعی نیست. ابرکاواک را می‌توان با حل معادله جداگانه‌ای برای فاز مایع، به همراه عبارات چشمه برای برآورد نرخ تغییر فاز طرح نمود. این طرح‌ها، به طرح‌های مخلوط چندفازی معروف هستند. این روش‌ها سازگاری بیشتری با فیزیک جریان‌های کاویتاسیونی دارند. کانز<sup>۱</sup> و همکاران [۵-۶]، مرکل<sup>۲</sup> و همکاران [۷]، سوآئر<sup>۳</sup> و اشنر [۸]، سنوکاک<sup>۴</sup> و همکاران [۹] و سینگهال<sup>۵</sup> و همکاران [۱۰] تحقیقات گسترده‌ای با استفاده از این طرح انجام داده‌اند. تفاوت عمده این کارها در عبارات چشمه استفاده شده و حل عددی آنها است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این روش خاصیت جابه‌جایی آن است که توانسته اثراتی مانند نیروی اینرسی را روی حفره به خوبی طرح نماید.

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی در دو مرحله انجام شده است. در ابتدا جریان ابرکاواک مصنوعی ناشی از تزریق گاز و همچنین جریان ابرکاواک طبیعی بررسی و شبیه‌سازی جریان به صورت متقارن محوری انجام شده است. پس از مقایسه نتایج در مرحله قبل، ابرکاواک ناشی از تزریق به صورت سه‌بعدی طراحی شده و عوامل مؤثر در این نوع جریان بررسی شده است. در مرحله بعد، جریان ابرکاواک طبیعی اطراف یک رونده زیرسطحی انجام شده است. طرح مخلوط چند فازی همگن همراه طرح کاویتاسیونی رایلی-پلست در مورد

ابرکاواک پدیده تشکیل سوپرحفره اطراف رونده‌های زیرسطحی سرعت بالا است. برای کاهش نیروی پسای رونده‌های زیرسطحی، یک کاواک‌زا در قسمت نوک آن نصب شده است. در این حالت به دلیل افزایش سرعت آب در لبه کاواک‌زا، فشار تا فشار تبخیر متناظر با دمای آب کاهش یافته و یک حفره در اطراف دماغه سامانه شکل گرفته است. چنانچه سرعت پرتابه به اندازه کافی زیاد باشد، کل سامانه درون حفره قرار خواهد گرفت. به این ترتیب پسای ناشی از اصطکاک پوسته‌ای به طور تقریبی از بین رفته و پسای فشاری نقش اصلی را خواهد داشت.

تمایل به کاویته شدن با عدد کاویتاسیون مشخص می‌شود. عدد کاویتاسیون به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

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

در این رابطه،  $p$  فشار مرجع (فشار استاتیکی عمق رونده)،  $p_c$  فشار تبخیر مایع در حالت طبیعی یا فشار داخل حفره در حالت مصنوعی بوده و مخرج کسر بیانگر فشار دینامیکی است.

با کاهش عدد کاویتاسیون گرایش به کاویته شدن در مایع افزوده شده و روندهای متفاوتی مانند کاویتاسیون آغازی، ورقه‌ای، جزئی و ابرکاواک قابل رؤیت است.

برای به‌دست آوردن یک سوپرحفره، اعداد کاویتاسیون بسیار پایین نیاز است. سه روش برای کاهش عدد کاویتاسیون وجود دارد: (۱) افزایش سرعت جریان (افزایش سرعت رونده به بالای ۴۵ m/s در سطح دریا که با افزایش عمق رونده سرعت بالاتری نیاز است)، (۲) کاهش فشار محیط (فقط در تونل آب با اتاق آزمون بسته امکان‌پذیر است) و (۳) افزایش فشار داخل حفره (با تزریق گاز یا همان ابرکاواک مصنوعی).

طرح‌های کاویتاسیون متفاوتی در سال‌های گذشته برای شبیه‌سازی جریان‌های کاویتاسیونی ارائه شده است. مطالعات اولیه با استفاده از تئوری جریان پتانسیل و روش المان مرزی انجام شده است. این روش‌ها همچنان به‌طور گسترده در کارهای مهندسی مورد استفاده هستند [۱-۲].

1- Kunz  
2- Merkle  
3- Sauer  
4- Senocak  
5- Singhal

$$\dot{m}_l^c = F^c \alpha_v \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{p_v - p_l}{\rho_l} \right)} \operatorname{sgn}(p_v - p), \quad (8)$$

$$\dot{m}_l^v = -F^v (1 - \alpha_v) \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{p_v - p_l}{\rho_l} \right)} \operatorname{sgn}(p_v - p), \quad (9)$$

که در آنها،  $F^c$  و  $F^v$  ثابت‌های تجربی هستند و در کار حاضر به ترتیب برابر با  $1/0 \times 10^5$  و  $0/5 \times 10^5$  در نظر گرفته شده‌اند [۱۳].

## ۲-۲- طرح اغتشاش

مدل  $k-\varepsilon$  با تابع دیوار مخصوصی برای محاسبه عبارت‌های نوسانی استفاده شده است. معادلات برای جریان چندفازی همگن عبارتند از [۱۴]:

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_m \bar{U}_m k) = \quad (10)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \bar{\nabla} k \right] + P_k - \rho \varepsilon,$$

$$\frac{\partial(\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_m \bar{U}_m \varepsilon) = \quad (11)$$

$$\bar{\nabla} \cdot \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_\varepsilon} \right) \bar{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon).$$

ثابت‌های ارائه شده توسط مرجع [۱۴] در محدوده وسیعی از جریان‌های آشفته در معادلات قابل استفاده است.

در توابع دیوار استاندارد باید از شبکه‌بندی میدان جریان در نواحی نزدیک دیوار اجتناب نمود. به واسطه تداخل مفهومی که از محاسبه میدان سرعت با استفاده از توابع دیوار و گسسته‌سازی میدان جریان به وجود آمده، نتایج حاصل در بعضی موارد غلط و غیرقابل توجیه هستند. مشکل سازگار نبودن در تابع دیوار در شبکه‌های با کیفیت در نزدیک دیوار، با استفاده از فرمولاسیون تابع دیوار توسعه یافته در CFX بر طرف شده است. ایده اساسی در این تابع دیوار، محدود نمودن مقدار  $y^*$  استفاده شده در فرمولاسیون لگاریتمی با مقدار پایین  $y^* = \max(y^*, 11.06)$ ، که  $11/60$  فصل مشترک بین ناحیه لگاریتمی و خطی نزدیک دیوار است. بنابراین تمام نقاط شبکه بیرون زیر لایه لزج قرار گرفته و مشکل ناسازگاری شبکه‌های با کیفیت (شبکه ریز) بر طرف شده است [۱۲].

ابرهاکاوک طبیعی به‌کار گرفته شده، کاواک‌ها در زوایای مختلف نصب شده و اثرات زوایای نصب روی شکل سوپر حفره به‌دست آمده است.

## ۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان شامل صورت بقایی معادلات RANS، همراه دو معادله انتقال اضافی برای محاسبه کسر حجمی مایع و گاز به‌صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۱]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_m \bar{U}_m) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \bar{U}_m) + \rho_m (\bar{U}_m \cdot \bar{\nabla}) \bar{U}_m = \quad (3)$$

$$-\bar{\nabla} (p_m) + \bar{\nabla} \cdot (\bar{\tau} + \bar{\tau}_t) + \bar{f}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{U}_m) = \Gamma_l = \dot{m}_l^v + \dot{m}_l^c,$$

$$\frac{\partial(\alpha_{ng} \rho_{ng})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\alpha_{ng} \rho_{ng} \bar{U}_m) = 0, \quad (5)$$

که در آن،  $\alpha_l$  و  $\alpha_{ng}$  به ترتیب کسر حجمی مایع و گاز غیرقابل تقطیر هستند.

در تحقیق حاضر، از هوا به‌عنوان گاز غیرقابل تقطیر در شبیه‌سازی جریان ابرکاواک مصنوعی استفاده شده است. چگالی مخلوط و لزجت آشفته از روابط زیر محاسبه شده است [۱۱]:

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_{ng} \rho_{ng}, \quad (6)$$

$$\mu_{m,t} = \frac{\rho_m c_\mu k^2}{\varepsilon}. \quad (7)$$

چگالی هر جزء ثابت فرض شده است. با استفاده از طرح مخلوط (همگن) برای تحلیل جریان کاویتاسیونی آشفته، سامانه معادلات به دو فرض دیگر برای بسته شدن نیاز دارد، که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

## ۲-۱- انتقال جرم

عبارات چشمه به‌کار گرفته شده در تحقیق حاضر از معادله رایلی-پلست به‌دست آمده است [۱۰]. عبارت‌های  $\dot{m}_l^c$  و  $\dot{m}_l^v$  جملات چشمه را در طول فرآیند تبخیر و تقطیر (رشد و نابودی حباب) به‌صورت زیر توصیف نموده‌اند [۱۲]:

### ۳- حل عددی

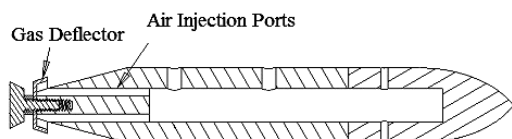
استاتیکی متناظر با عدد کاویتاسیون تنظیم شده است. در مورد مربوط به ابرکاواک مصنوعی، نرخ حجمی گاز ورودی به میدان با استفاده از مولفه‌های سرعت تعیین شده است. برای بدنه رونده شرط عدم لغزش اعمال شده است. در ابتدا کسر حجمی مایع برابر یک و کسر حجمی بخار و گاز نیز برابر با صفر فرض شده است.

#### ۳-۳- پردازش موازی

در تحقیق حاضر به دلیل حجم بالای محاسبات از پردازش موازی استفاده شده است. بدین ترتیب که ناحیه حل، بعد از شبکه‌بندی نرم‌افزار گمبیت با استفاده از تقسیم‌کننده MeTiS در CFX به طور خودکار به چهار ناحیه محاسباتی تقسیم شده است. هر ناحیه توسط یک پردازنده بر روی یک رایانه چهار هسته‌ای حل شده است.

#### ۴- نتایج ابرکاواک مصنوعی

در یک رونده زیرسطحی که برای حرکت در روند ابرکاواک طراحی شده، سوپر حفره طبیعی با تزریق گاز تقویت شده است. بخش اول تحقیق بررسی ابرکاواک مصنوعی است. وسنیک و همکاران وی [۱۹] ابرکاواک در اطراف یک رونده زیرسطحی را به صورت آزمایشگاهی بررسی نموده‌اند که برای مستندسازی نتایج تحقیق از داده‌های گزارش شده توسط ایشان استفاده شده است. در شکل ۱ نمای هندسه‌ای که توسط وسنیک و همکاران وی بررسی شده، نشان داده شده است. قطر کاواک‌زا در این تصویر  $1\text{ cm}$  است.



شکل (۱): نمای هندسه بررسی شده در جریان ابرکاواک مصنوعی [۱۹].

در ابتدا جریان ابرکاواکی به صورت متقارن محوری طراحی شده است. برای این مورد، شبیه‌سازی در دو حالت، با تزریق و بدون تزریق گاز انجام شده و ابعاد حفره در هر دو حالت به دست آمده است.

کدهای تجاری، طرح‌های کاویتاسیونی را در اختیار محققان قرار داده‌اند. این کدها به طور عموم بر اساس معادله حالت یا معادله انتقال رایلی- پلست بنا شده‌اند. در پژوهش حاضر، از کد CFX استفاده شده است. این برنامه، معادلات RANS را با استفاده از روش حجم محدود حل می‌نماید. معادلات هیدرودینامیکی به طور ضمنی در هر گام زمانی گسسته شده و در یک سامانه ترکیب، حل شده است. روش حجم محدود از شکل انتگرالی معادلات بقاء بهره گرفته است. تابع زیر انتگرال شامل حاصل ضرب چندین متغیر یا گرادیان آن در محل گره‌ها است. برای تقریب انتگرال‌ها، به مقادیر متغیرها در مکان‌هایی غیر از گره‌های محاسباتی (نقاط انتگرال‌گیری یا مراکز حجم کنترل) نیاز است. این تقریب‌ها در CFX با استفاده از توابع شکل المان محدود محاسبه شده‌اند [۱۲].

#### ۳-۱- تقریب جمله جابه‌جایی

طرح‌های مختلفی برای گسسته ساختن معادلات جابه‌جایی در CFX در دسترس است. در حالت کلی این فرآیند به صورت زیر انجام خواهد شد [۱۲]:

$$\phi = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \vec{r}, \quad (12)$$

که در آن،  $\phi_{up}$  مقدار کمیت  $\phi$  در گره بالایی، بردار  $\vec{r}$  بردار بین گره بالا و گره محاسبه شونده است.  $\beta \nabla \phi \cdot \Delta \vec{r}$  تصحیح جابه‌جایی عددی نامیده شده که خاصیت ضد نفوذی دارد. این عبارت به طرح رو به باد مرتبه اول افزوده شده است. انتخاب  $\beta=0$  به طرح رو به باد مرتبه اول منجر خواهد شد. در حالی که  $\beta=1$  دارای دقت مرتبه دوم است. در این تحقیق از طرح با کیفیت استفاده شده است. این طرح از یک دستورالعمل غیرخطی برای محاسبه  $\beta$  در هر گره استفاده نموده و علاوه بر افزایش دقت محاسبات نسبت به طرح رو به باد مرتبه اول، از نوسانات غیرفیزیکی طرح رو به باد مرتبه دوم جلوگیری نموده و موجب بهبود نرخ همگرایی حل شده است [۱۴].

#### ۳-۲- شرایط مرزی و شرایط اولیه

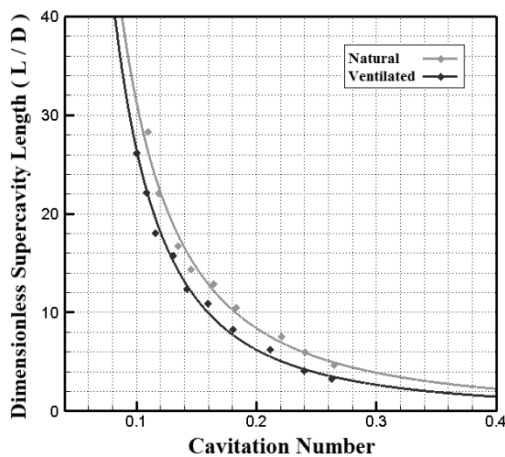
در مرز ورودی، مؤلفه‌های سرعت همراه مقادیر کسر حجمی و کمیت‌های اغتشاش تنظیم شده‌اند. در مرز خروجی فشار

طور خودکار به چهار ناحیه محاسباتی تقسیم شده و محاسبات هر ناحیه توسط یک پردازنده بر روی یک ماشین انجام شده است. ارتباط بین نواحی با استفاده از توابع کتابخانه MPI انجام شده است.

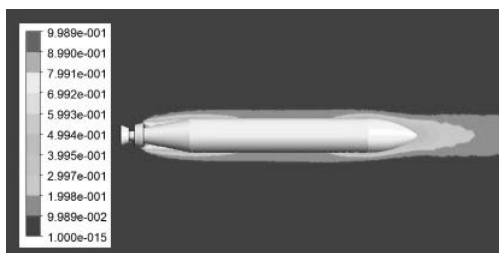
در شکل ۴ کانتور کسر حجمی گاز نشان داده شده است. تراکم گاز در ناحیه خروج از مرز تزریق و انتهای بدنه بیشتر است.



شکل (۲): کانتورهای کسر حجمی مایع در  $\sigma \cong 0.26$  (الف) کاویتاسیون طبیعی (ب) کاویتاسیون مصنوعی.



شکل (۳): طول بی‌بعد حفره کاویتاسیونی ناشی از ابرکاواک طبیعی و مصنوعی.



شکل (۴): کانتور کسر حجمی گاز غیرقابل تقطیر در  $C_Q = 0.2996$ .

در مرزی ورودی، سرعت  $10 \text{ m/s}$  انتخاب شده است. برای حالتی که سوپرحفره در اثر تزریق تولید شده، برای مرز خروجی فشار استاتیکی متناظر با عدد کاویتاسیون طبیعی  $0.5$  تنظیم شود، در حالی که در سوپرحفره طبیعی فشار خروجی متناظر با عدد کاویتاسیون کاهش داده خواهد شد. برای بدنه هندسه، شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده است. در مرز تزریق شرط مرزی، سرعت برابر با سرعت تزریق گاز به میدان تنظیم شده است. سرعت تزریق از رابطه (۱۳) محاسبه شده است. در این تحقیق از هوا به عنوان گاز غیرقابل تقطیر استفاده شده است. با افزایش سرعت گاز تزریق شده، نرخ تزریق بیشتر شده و در نتیجه حفره رشد خواهد نمود. نرخ تزریق از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$C_Q = \frac{Q}{Ud^2}, \quad (13)$$

که در آن،  $Q$  نرخ جریان حجمی گاز،  $U$  سرعت جریان ورودی و  $d$  قطر کاواکزا هندسه است.

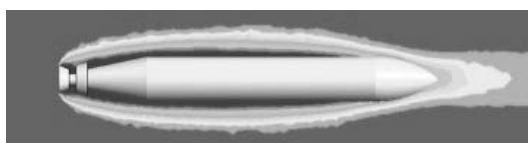
در شکل ۲ کانتور کسر حجمی مایع برای کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی نشان داده شده است. تغییرات ابعاد حفره با عدد کاویتاسیون برای هر دو حالت به دست آمده و در شکل ۳ مقایسه شده است. همان‌طور که از این نمودار واضح است ابعاد حفره در هر دو حالت به طور تقریبی برابر بوده و دو حفره را از نظر ابعادی می‌توان معادل دانست.

در طراحی سوپرکاویتاسیون مصنوعی، هیچ نوع انتقال جرمی در نظر گرفته نشده است. فرض شده فشار و سرعت مرجع ثابت بوده و سوپرحفره فقط به واسطه تزریق گاز تولید شود. با افزایش نرخ تزریق، طول حفره افزایش و عدد کاویتاسیون کاهش یافته است. توجه به این نکته ضروری است که عدد کاویتاسیونی که ابرکاواک مصنوعی با آن مواجه می‌شود، با عدد کاویتاسیونی که برای ابرکاواک طبیعی بر اساس فشار بخار تعریف شده، متفاوت است. برای ابرکاواک مصنوعی عدد کاویتاسیون براساس فشار داخل حفره تعریف شده است (رابطه (۱)). در مرحله بعد، شبیه‌سازی با استفاده از یک شبکه سه‌بعدی و بی‌سازمان انجام شده است. شبکه شامل  $3,470,797$  المان چهاروجهی است. توضیحات بیشتر در مورد انتخاب شبکه مناسب برای تحلیل در بخش طرح‌سازی ابرکاواک طبیعی ارائه شده است. میدان حل به

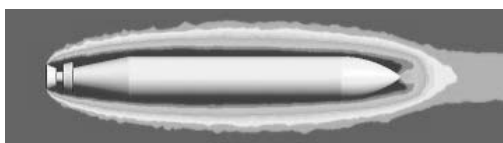
کاویتاسیون و در نتیجه آن طول حفره، افزایش زیادی ندارد. برای رسیدن به سوپرحفره با ابعاد یکسان برای دو کاواکزا، در کاواکزای با قطر کوچکتر به نرخ تزریق بیشتری نسبت به کاواکزای با قطر بزرگتر نیاز است. به عبارت دیگر در عدد کاویتاسیون برابر، ابعاد سوپرحفره تولید شده برای کاواکزای با قطر بیشتر، بزرگتر می‌باشد.



$C_Q = 0.0592$



$C_Q = 0.2003$

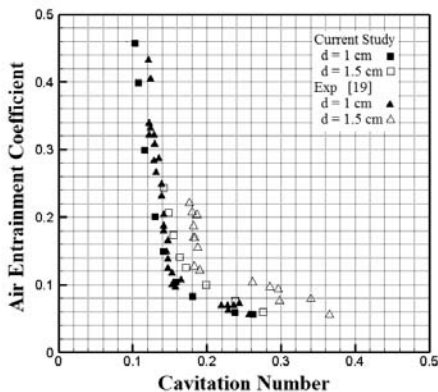


$C_Q = 0.2996$

شکل (۵): کانتور کسر حجمی مایع در نرخ تزریق‌های متفاوت.



شکل (۶): الگوی سوپرحفره از کسر حجمی مایع  $C_Q = 0.2996$  و  $\alpha = 0.8$



شکل (۷): تغییرات نرخ تزریق با عدد کاویتاسیون.

جدول (۱): تغییرات فشار داخل حفره و عدد کاویتاسیون با نرخ تزریق.

نتایج برای دیسک با قطر ۱/۰ cm		
$C_Q$	$p_c [pa]$	$\sigma$
۰/۰۵۴۰	۱۵۳۹۷/۶۰	۰/۲۶۲۸
۰/۰۵۹۲	۱۶۶۳۵/۴۸	۰/۲۳۷۹
۰/۰۸۲۹	۱۹۴۶۸/۵۵	۰/۱۸۱۲
۰/۱۰۴۲	۲۰۵۷۴/۹۳	۰/۱۵۹۰
۰/۱۴۹۴	۲۱۴۵۱/۷۰	۰/۱۴۱۴
۰/۲۰۰۳	۲۱۹۶۹/۶۷	۰/۱۳۰۹
۰/۲۹۹۶	۲۲۷۱۲/۶۲	۰/۱۱۶۱
۰/۳۹۸۰	۲۳۱۲۹/۷۴	۰/۱۰۷۷
نتایج برای دیسک با قطر ۱/۵ cm		
$C_Q$	$p_c [pa]$	$\sigma$
۰/۰۵۹۴	۱۴۷۴۵/۷۳	۰/۲۷۵۹
۰/۰۷۵۹	۱۶۶۳۴/۳۹	۰/۲۳۸۰
۰/۰۹۹۶	۱۸۵۸۷/۷۵	۰/۱۹۸۸
۰/۱۲۵۷	۱۹۹۲۱/۹۲	۰/۱۷۲۰
۰/۱۴۱۱	۲۰۳۴۴/۴۶	۰/۱۶۳۶
۰/۱۷۳۲	۲۰۷۶۵/۹۳	۰/۱۵۵۱
۰/۲۰۶۵	۲۱۱۲۲/۱۵	۰/۱۴۸۰
۰/۲۴۴۳	۲۱۴۴۵/۵۷	۰/۱۴۱۵

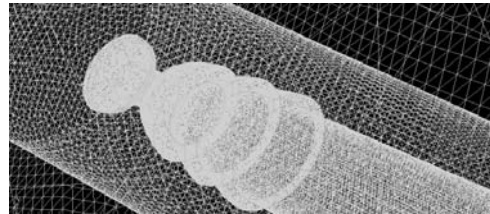
در جدول ۱ فشار داخل حفره و عدد کاویتاسیون متناظر، بر حسب نرخ تزریق برای دو کاواکزا با اندازه‌های ۱cm و ۱/۵cm ارائه شده است. با مقایسه این داده‌ها مشخص می‌شود که با افزایش نرخ تزریق، فشار داخل حفره افزایش و در نتیجه عدد کاویتاسیون کاهش خواهد یافت. در شکل ۵ الگوی حفره در نرخ تزریق‌های متفاوت ارائه شده است. این نتایج برای کاواکزا با قطر ۱cm است. در شکل ۶ الگوی سوپرحفره را در کسر حجمی مایع برابر با ۰/۸ و نرخ تزریق ۰/۲۹۹۶ نشان داده شده است.

نرخ تزریق گاز بر حسب عدد کاویتاسیون در شکل ۷ با نتایج آزمایشگاهی [۱۹] مقایسه شده است. کمینه مقدار عدد کاویتاسیون برای کاواکزا بزرگتر (۱/۵ cm) بیش‌تر از کمینه مقدار آن برای کاواکزا کوچکتر (۱ cm) است. با این حال، در هر دو حالت نتایج روند یکسانی دارد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش نرخ تزریق تا حد معینی، عدد

شبکه‌های با المان بالا وجود دارد، میدان حل به دو ناحیه نزدیک و دور از بدنه تقسیم شده و برای ناحیه نزدیک بدنه از شبکه ریز و برای ناحیه دورتر، از شبکه‌بندی درشت‌تر استفاده شده است (شکل ۹). محاسبات عددی به صورت موازی برای هر دو شبکه در زاویه نصب صفر درجه انجام شده و نتایج کسر حجمی بدست آمده از هر دو شبکه با هم مقایسه شده است. بدین ترتیب شبکه با المان کمتر با توجه به اختلاف ناچیز نتایج، به عنوان شبکه مطلوب برای ادامه محاسبات انتخاب شده است. هم‌چنین برای اطمینان از کیفیت مناسب شبکه، عوامل نسبت منظری، بیشینه و کمینه زاویه صفحه، نسبت طول لبه‌ها و نسبت حجم المان‌ها بررسی شده و همگی در محدوده قابل قبول CFX قرار دارد. در پایان کمیت *Yplus* به‌عنوان یکی از کمیت‌های مناسب بودن شبکه بر روی بدنه بررسی شده و بیش‌ترین مقدار آن ۵۰۰ بدست آمده است. این مقدار *Yplus* به دلیل رینولدز بالای جریان قابل قبول بوده و این مقدار توانسته تا ۱,۰۰۰ نیز افزوده شود [۱۲]. در شکل ۹ شبکه‌بندی سطحی در نوک رونده نشان داده شده است. سرعت جریان برابر با  $100\text{ m/s}$  و عدد رینولدز شبیه‌سازی برابر  $2,240,701$  بر اساس قطر کاواک‌زا است. عدد کاویتاسیون  $0/03$  در نظر گرفته شده است. عدد کاویتاسیون طبق تعریف بر اساس فشار مرز خروجی متناظر با عمق رونده مشخص شده است. مرزهای دور میدان نیز شرط محیط بی‌نهایت را فراهم نموده است. برای بدنه رونده نیز شرط عدم لغزش انتخاب شده است. شبیه‌سازی عددی در زوایای نصب ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درجه انجام شده و الگوی سوپرحفره در هر حالت به دست آمده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از تصاویر مشخص است که تقارن سوپرحفره در قسمت انتهایی آن از بین رفته و نزدیک باله‌ها این مطلب مشخص‌تر است. این تصاویر در شکل ۱۱ با وضوح بیش‌تری در نوک قابل مشاهده است. تغییر شکل سوپرحفره با زاویه نصب، در این تصاویر به روشنی مشاهده می‌شود. الگوی سوپرحفره به‌صورت سطح ثابت کسر حجمی مایع در مقدار  $0/7$  تعریف شده است.



شکل (۸): هندسه رونده زیرسطحی.

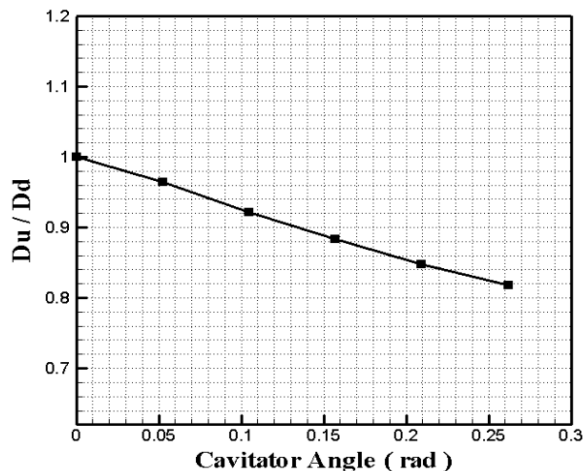


شکل (۹): شبکه‌بندی سطحی نوک رونده زیرسطحی.

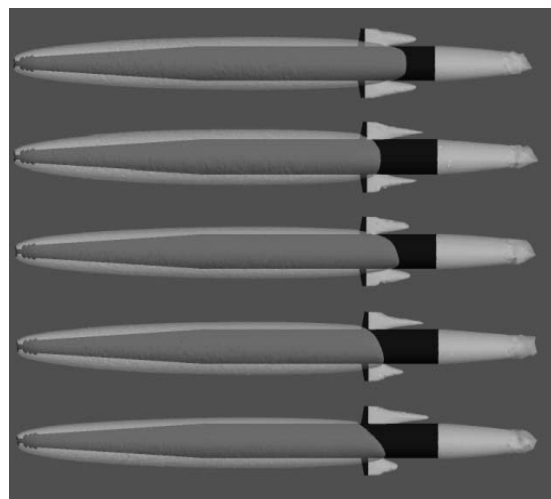
### ۵- نتایج ابرکاواک طبیعی

بررسی اثر زاویه نصب کاواک‌زا روی شکل سوپرحفره از دیگر اهداف این تحقیق بوده است. در ادامه تحقیق جریان ابرکاواکی در اطراف یک رونده زیرسطحی خاص بررسی شده است. قطر کاواک‌زا دیسکی  $2\text{ cm}$ ، طول رونده  $97\text{ cm}$ ، ارتفاع بالک‌ها  $3/19\text{ cm}$  و بیش‌ترین ضخامت مقطع بالک‌ها  $0/38\text{ cm}$  است. سامانه کاهش پسای این رونده‌ها که همان عامل ایجاد ابرکاواک یعنی کاواک‌زا و کاسه‌های پشت است در شکل ۸ نشان داده شده است. دیسک جلو این رونده‌ها به طور معمول متحرک ساخته شده و در زوایای متفاوتی قادر به تنظیم است. این دیسک وظایف متفاوتی علاوه بر ایجاد کاویتاسیون دارد. تولید برآ برای حفظ مسیر مستقیم رونده، حفظ و کنترل زاویه پیچ از جمله این وظایف است. از کاسه‌های پشت برای تزریق گاز به داخل سوپرحفره و هم‌چنین داخل میدان استفاده شده است.

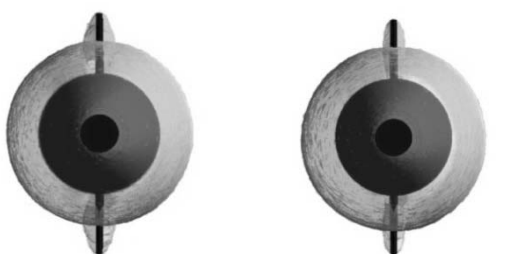
ابرکاواکی که در این بخش بررسی شده، ابرکاواک طبیعی بوده و فقط هدف شبیه‌سازی در این مورد به‌دست آوردن اثر زاویه نصب کاواک‌زا روی شکل سوپرحفره است. همان‌طور که گفته شد و نتایج بخش قبل نیز مؤید این مطلب است، در صورتی که ابعاد سوپرحفره حاصل از تزریق، با ابعاد سوپرحفره طبیعی مشابه باشد، این دو سوپرحفره را می‌توان معادل یکدیگر دانست. بنابراین اثر زاویه نصب، روی شکل سوپرحفره در ابرکاواک طبیعی و مصنوعی را می‌توان یکسان فرض نمود. در این بخش، شبکه‌های بی‌سازمان شامل  $5,878,064$  و  $3,835,428$  المان چهاروجهی برای میدان حل تولید شده است. به دلیل محدودیتی که در محاسبات عددی برای



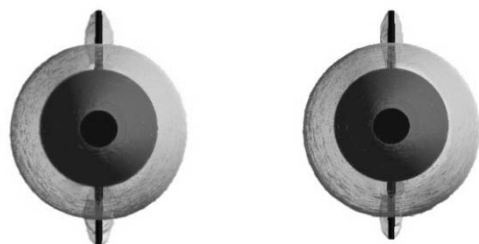
شکل (۱۳): تغییرات نسبت  $D_u/D_d$  با زاویه نصب کاواک‌زا.



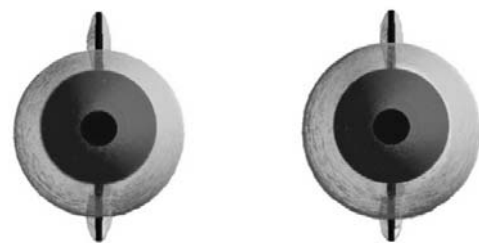
شکل (۱۰): سوپرحفره در زوایای نصب ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درجه.



$\theta = 0^\circ$  &  $D_u/D_d = 1$        $\theta = 3^\circ$  &  $D_u/D_d = 0.9638$

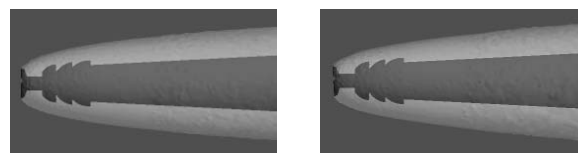


$\theta = 6^\circ$  &  $D_u/D_d = 0.9210$        $\theta = 9^\circ$  &  $D_u/D_d = 0.8832$

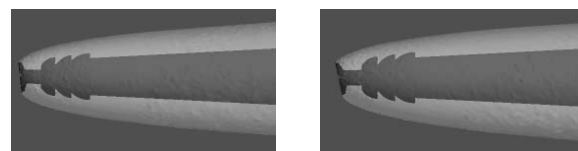


$\theta = 12^\circ$  &  $D_u/D_d = 0.8478$        $\theta = 15^\circ$  &  $D_u/D_d = 0.8177$

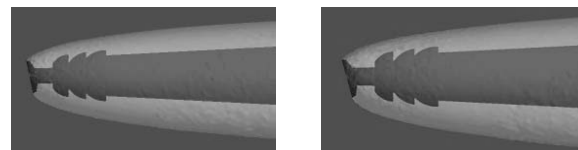
شکل (۱۴): تغییرات سوپرحفره و عامل  $D_u/D_d$  با زاویه نصب کاواک‌زا.



$\theta = 0^\circ$        $\theta = 3^\circ$

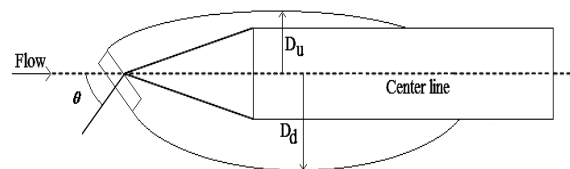


$\theta = 6^\circ$        $\theta = 9^\circ$



$\theta = 12^\circ$        $\theta = 15^\circ$

شکل (۱۱): سوپرحفره اطراف نوک رنده عدد کاویتاسیون  $\sigma = 0.3$



شکل (۱۲): نمای هندسه رنده زیرسطحی به همراه الگوی سوپرحفره.



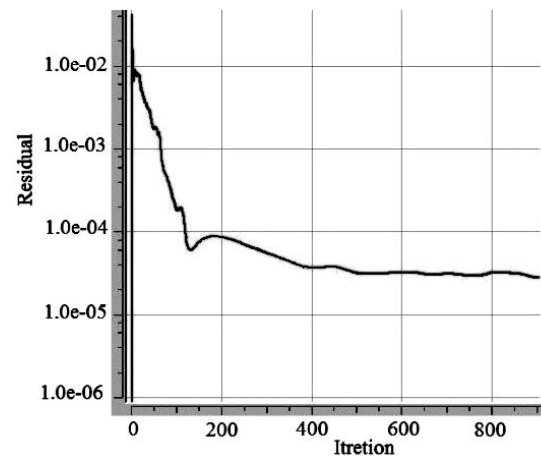
۲- در مورد ابرکاواک مصنوعی، تزریق بیش از یک مقدار معین، اثری در افزایش طول سوپرحفره ندارد،  
 ۳- نتایج تونل آب به شدت متأثر از نسبت قطر تونل به قطر کاواک‌زا است. در کاواک‌زای کوچک‌تر، برای رسیدن به یک حفره با ابعاد مشخص، به نرخ تزریق بیش‌تری نیاز است. این مطلب در نتایج عددی نیز به وضوح مشخص است و  
 ۴- شکل حفره به شدت متأثر از زاویه نصب کاواک‌زا است و برای حفظ تعادل رونده باید زوایای مناسب نصب برای تامین برآ مورد نیاز رونده به‌دست آید.

### مراجع

1. Pasandideh-Fard, M., Rashidi-Torghi, I., and Tolami, M. "Numerical Simulation of 2-D Supercavitating and Partial Cavitation, Using Boundary Element Method", *Aerospace Mech. J.*, Vol. 4, No. 2, pp. 15-28, 2008 (In Persian).
2. Shafaghat, R., Hosseinalipour, S.M., Nouri, N.M., and Lashgari, I. "Shape Optimization of Two-dimensional Cavitators in Supercavitating Flows, Using NSGA II Algorithm", *J. Applied Ocean Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 305-310, 2008.
3. Delannoy, Y. and Kueny, J.L. "Two-phase Flow Approach in Unsteady Cavitation Modelling", In *ASME Cavitation and Multiphase Flow Forum*, Vol. 98, No. 2, pp. 153-159, 1990.
4. Kubota, A., Kato, H., and Yamaguchi, H. "A New Modelling of Cavitating Flows: A Numerical Study of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil Section", *J. Fluid Mech.*, Vol. 240, No.4, pp. 59-96, 1992.
5. Kunz, R.F., Boger, D.A., Stinebring, D.A., Chyczewski, T.S., Gibeling, H.J., Venkateswaran, S., and Govindan, T.R.A. "Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-phase Flows with Application to Cavitation Prediction", *Computers & Fluids*, Vol. 29, No. 8, pp. 849-875, 2000.
6. Kunz, R.F., Lindau, J.W., Kaday, T.A., and Peltier, L.J. "Unsteady RANS and Detached Eddy Simulations of Cavitating Flow over a Hydrofoil", *The 5th Int. Symp. on Cavitation, Workshop on Physical Models and CFD Tools for Computation of Cavitating Flows*, No. Cav03 OS-1-12, Osaka, Japan, 2003.
7. Merkle, C.L., Feng, J.Z., and Buelow, P.E. "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation", *The 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Cavitation*, pp. 307-311, France, 1998.
8. Sauer, J. and Schnerr, G.H. "Unsteady Cavitating Flow-A New cavitation Model, Based on Modified Front Capturing Method and Bubble Dynamics", *The 4th Fluids Eng. Summer Conf., FEDSM2000-11095*, 2000.

در شکل ۱۲ نمای الگوی جریان در زاویه نصب  $\theta$  نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدم تقارن در ناحیه انتهایی حفره و پشت بالک‌ها با افزایش زاویه نصب بیشتر شده است. برای تحلیل کمی نتایج، عامل  $Du/Dd$  (نسبت قطر کمینه (بالایی) به قطر بیشینه (پایینی)) تعریف شده است. تغییرات  $Du/Dd$  بر حسب زاویه نصب در شکل ۱۳ رسم شده و عدم تقارن سوپرحفره در شکل ۱۴ از مقطع عمود بر جریان نشان داده شده است. برای هر حالت مقدار  $Du/Dd$  محاسبه و همراه با تصاویر ارائه شده است.

در شکل ۱۵ نمونه‌ای از روند همگرا شدن نتایج در طی فرآیند تکرار، ارائه شده است. معیار همگرایی برای معادلات اندازه حرکت و اغتشاش برابر  $10^{-5}$  و برای معادله کسر حجمی برابر  $10^{-4}$  انتخاب شده است.



شکل (۱۵): نمونه‌ای از روند همگرایی معادله کسر حجمی.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابرکاواک اطراف رونده‌های زیرسطحی بررسی شد. مقایسه نتایج با داده‌های تجربی نشان از توانمندی روش‌های چندفازی مبتنی بر استفاده از معادله انتقال، در طراحی ابرکاواک است. دستاوردهای کلی این تحقیق به‌صورت زیر بیان می‌شود:

۱- حفره به دست آمده ناشی از ابرکاواک طبیعی و ناشی از تزریق از نظر ابعاد برابر است،

9. Senocak, I. and Shyy, W. "A Pressure Based Method for Turbulent Cavitating Flow Computations", *J. Comput. Phys.*, Vol. 176, No. 2, pp. 363–383, 2002.
10. Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H., and Jiang, Y. "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", *Trans. of ASME, J. Fluids Eng.*, Vol. 124, No. 2, pp. 617–624, 2002.
11. Ishii, M. "Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-phase Flow", 3rd Ed., Springer, New York, USA, 2006.
12. CFX-ANSYS Canada Ltd. CFX-5.7: Solver Theory, Canada, 2004.
13. Cheraghi, A., Ebrahimi, R., Shams, M., and Bazargani, S.M. "The Investigation of Supercavitating Flow at the Cavitators with Different Angles of Attack and Its Effects on Drag Coefficient", *The 10th Iranian Aerospace Soc. Conf., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran, 2010 (In Persian)*.
14. Launder, B.E. and Spalding, D.B. "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, 1974.
15. Cheraghi, A., Ebrahimi, R., Shams, M., and Bazargani, S.M. "Two-phase CFD Modeling of Three-dimensional Supercavitating Flows", *The 13th Annual & 2nd Int. Fluid Dynamic Conf., Shiraz Univ., Shiraz, Iran, 2010*.
16. Cheraghi, A., Ebrahimi, R., Shams, M., and Bazargani, S.M. "Numerical Simulation of A Ventilated Supercavitating Vehicle", *The 13th Annual & 2nd Int. Fluid Dynamic Conf., Shiraz Univ., Shiraz, Iran, 2010*.
17. Ferziger, J.H. and Perić, M. "Computational Methods for Fluid Dynamics", 2nd Ed., Springer Verlag, Berlin, Germany, 1999.
18. Brennen, C. "A Numerical Solution of Axisymmetric Cavity Flows", *J. Fluid Mech.*, Vol. 37, No. 4, pp. 671-688, 1968.
19. Wosnik, M., Schauer, T.J., and Arndt, R.E.A. "Experimental Study of a Ventilated Supercavitating Vehicle", *The 5th Int. Symp. on Cavitation, CAV2003, Osaka, Japan, 2003*.