(یادداشت مہندسی)

# مدلسازی جریان ابر کاواک اطراف روندههای زیرسطحی

**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)

## چکیدہ

ابرکاواک زمانی رخ میدهد که یک رونده زیرسطحی توسط یک حفره بزرگ و پیوسته احاطه شود. با توجه به کاهش پسای چشمگیر روندههای زیرسطحی که در طرز ابرکاواک حرکت مینمایند (نسبت به روندههایی که در طرز کاملاً مرطوب حرکت میکنند)، بررسی جریانهای ابرکاواک همواره از زمینههای مورد علاقه محققان بوده است. در این تحقیق، ابتدا شبیهسازی عددی جریان ابرکاواک طبیعی و مصنوعی به صورت متقارن محوری اطراف یک رونده زیرسطحی انجام شده است. ابعاد حفره ایجاد شده در هر دو حالت بهدست آمده و با یکدیگر مقایسه شدهاند. در مرحله بعدی، جریان ابرکاواک ناشی از تزریق گاز به صورت سهبعدی طراحی شده است. روابط میان شکل حفره، عدد کاویتاسیون و نرخ تزریق برای کاواک(های با اندازههای مختلف بهدست آمده است. در پایان، جریان ابرکاواک 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 نشتی از ابرکاواک طبیعی و ناشی از تزریق گاز است.

**واژههای کلیدی:** ابرکاواک، 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.

wiech. Eng.

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 artifitial 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

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 می-شود. عدد کاویتاسیون به صورت رابطه (۱) تعریف میشود.

$$\sigma = \frac{p - p_c}{\frac{1}{2}\rho U^2} \tag{1}$$

 $p_c$  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[۲-۱].

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 ابر كاواك زيادى مورد استفاده قرار گرفته است[۴-۳]. اين روش قادر به جدایش مرز میان بخار و گاز غیرقابل تقطیر در ابر کاواک مصنوعی نیست. ابر کاواک را می توان 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 و همکاران [۶–۵] ، مرکل و همکاران[۷]، سوآئر و اشنر [۸]، سنوکاک 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، شبیه سازی در دو مرحله انجام شده است. در ابتدا جریان ابر کاواک مصنوعی ناشی از تزریق گاز و همچنین جریان ابر کاواک طبیعی بررسی و شبیه سازی جریان به صورت متقارن محوری انجام شده است. پس از مقایسه نتایج در مرحله قبل، ابر کاواک ناشی از تزریق به صورت سه بعدی طراحی شده و عوامل مؤثر در این نوع جریان بررسی شده است. در مرحله بعد، جریان ابر کاواک طبیعی اطراف یک رونده زیر سطحی انجام شده است. طرح مخلوط چند فازی همگن همراه طرح کاویتاسیونی رایلی – پلست در مورد

5- Singhal

<sup>1-</sup> Kunz

<sup>2-</sup> Merkle

<sup>3-</sup> Sauer

<sup>4-</sup> Senocak

ابر کاواک طبیعی به کار گرفته شده، کاواکزا 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 وگاز بهصورت زیر نوشته می شوند[۱۱]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{U}_m) = 0, \qquad (\Upsilon)$$

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

$$\vec{\nabla}(m) + \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} =$$
(1)

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial c_l} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{U}_m) = \Gamma_l = \dot{m}_l^v + \dot{m}_l^c, \qquad (\texttt{f})$$

$$\frac{\partial (\alpha_{ng} \rho_{ng})}{\partial \alpha} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_{ng} \rho_{ng} \vec{U}_m) = 0, \qquad (\Delta)$$

که در آن،  $lpha_l$  و  $lpha_{ng}$  بهترتیب کسر حجمی مایع و گاز غیرقابل تقطیر هستند.

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

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

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

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 به کار گرفته شده در تحقیق حاضر از معادله  $\dot{m}_l^c \, o \, \dot{m}_l^\nu \, e$  یارتهای  $\dot{m}_l^\nu \, o \, \dot{m}_l^\nu \, e$  رایلی- پلست به دست آمده است [۱۰]. عبارتهای مرا و محملات چشمه را در طول فرآیند تبخیر و تقطیر (رشد و نابودی حباب) به صورت زیر توصیف نموده اند [۱۲]:

 $\dot{m}_{l}^{c} = F^{c} \alpha_{v} \rho_{v} \sqrt{\frac{2}{3} (\frac{|p_{v} - p|}{\rho_{l}})} \operatorname{sgn}(p_{v} - p), \qquad (\lambda)$ 

$$\dot{m}_{l}^{\nu} = -F^{\nu}(1-\alpha_{\nu})\rho_{\nu}\sqrt{\frac{2}{3}(\frac{|p_{\nu}-p|}{\rho_{l}})}\operatorname{sgn}(p_{\nu}-p), \qquad (9)$$

که در آنها،  $F^{\nu}$  و  $F^{c}$  ثابتهای تجربی هستند و در کار حاضر به ترتیب برابر با  $1 \cdot 1 \cdot 1$  و  $1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$  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]:

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

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

$$\frac{\partial(\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_k \vec{U}_k \varepsilon) =$$
(1.1)

$$\vec{\nabla} \cdot \left[ (\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_{\varepsilon}}) \vec{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon).$$
(11)

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 بهوجود آمده، نتایج حاصل در بعضی موارد غلط و غیرقابل توجیه هستند. مشکل سازگار نبودن در تابع دیوار در شبکههای با کیفیت در نزدیک دیوار، نبودن در تابع دیوار در شبکههای با کیفیت در نزدیک دیوار، با استفاده از فرمولاسیون تابع دیوار توسعه یافته در CFX ب طرف شده است. ایده اساسی در این تابع دیوار، محدود مقدار پایین (۲۱.06 پاستفاده شده در فرمولاسیون لگاریتمی با مقدار پایین (۱۱.06 پایین استفاده شده در فرمولاسیون لگاریتمی با مقدار پایین (۱۱.06 پایین و خطی نزدیک دیوار است. 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].

## ۳- حل عددی

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 حاصلضرب چندین متغیر یا گرادیان آن در محل شامل حاصلضرب چندین متغیر یا گرادیان آن در محل مکانهایی غیر از گرههای محاسباتی (نقاط انتگرال گیری یا مراکز حجم کنترل) نیاز است. این تقریبها در CFX با مراکز حجم کنترل) نیاز است. این تقریبها در CFX با

## 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]:

 $\phi = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \vec{r}, \qquad (17)$ 

که در آن،  $\phi_{up}$ ، مقدار کمیت  $\phi$  در گره بالایی، بردار  $\bar{r}$ ، بردار بین گره بالا و گره محاسبه شونده است.  $\Delta \overline{r} \cdot \Delta \overline{r}$  تصحیح جابهجایی عددی نامیده شده که خاصیت ضد نفوذی دارد. این عبارت به طرح رو به باد مرتبه اول افزوده شده است. انتخاب  $0=\beta$  به طرح رو به باد مرتبه اول منجر خواهد شد. در حالی که  $1=\beta$  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 باد مرتبه اول، از نوسانات غیرفیزیکی طرح رو به باد مرتبه است [۱۴].

# ۲-۳- شرایط مرزی و شرایط اولیه

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

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 تقسیم کننده 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، سوپرحفره 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 بهصورت 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 *۱CM* 



**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، شبیه سازی در دو حالت، با تزریق و بدون تزریق گاز انجام شده و ابعاد حفره در هر دو حالت به-دست آمده است.

در مرزی ورودی، سرعت ۱۰*m/s* انتخاب شده است. برای حالتی که سوپرحفره در اثر تزریق تولید شده، برای مرز خروجی فشار استاتیکی متناظر با عدد کاویتاسیون طبیعی ۵/۰ 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 می شود [۱۹]:

$$C_{Q} = \frac{Q}{Ud^{2}},\tag{17}$$

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 بهدست 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 سوپر کاویتاسیون مصنوعی، هیچ نوع انتقال جرمی در نظر گرفته نشده است. فرض شده فشار و سرعت مرجع ثابت بوده و سوپر حفره 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 ابر کاواک مصنوعی با آن مواجه میشود، با عدد کاویتاسیونی که برای ابر کاواک طبیعی بر اساس فشار بخار تعریف شده، متفاوت است. برای ابر کاواک مصنوعی عدد کاویتاسیون براساس فشار داخل حفره تعریف شده است(رابطه (۱)). در مرحله بعد، شبیه سازی با استفاده از یک شبکه سه بعدی و بی سازمان انجام شده است. شبکه شامل ۳٫۴۷۰٫۷۹۷ المان چهاروجهی است. توضیحات بیشتر در مورد انتخاب شبکه مناسب برای تحلیل در بخش

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.



 $\sigma \cong 0/7$  کانتورهای کسر حجمی مایع در  $\sigma$   $(\mathbf{Y})$ : کانتورهای کسر حجمی مایع در (الف) کاویتاسیون مصنوعی.





**شکل** (۴): کانتور کسر حجمی گاز غیرقابل تقطیر در . *Co*=۰/۲۹۹۶

۹١

نرخ تزريق.		
نتایج برای دیسک با قطر ۱/۰ cm		
$C_Q$	$p_c \ [pa]$	σ
•/•۵۴•	15391/80	•/४۶४٨
•/•۵٩٢	18820/48	٠/٣٣٧٩
•/•٨٢٩	19481/00	•/١٨١٢
•/1•47	2 • 224/92	•/169•
•/1494	21401/20	•/1414
•/٢••٣	T1989/8V	۰/۱۳۰۹
•/४९९۶	22212/82	•/1181
٠/٣٩٨٠	22124/24	•/\•VV
نتایج برای دیسک با قطر ۱/۵ cm		
CQ	$p_c [pa]$	σ
.1.094	14740/72	٠/٢٧۵٩
•/•Y&9	18834/29	•/٣٣٨•
•/•99۶	١٨٥٨٧/٧٥	•/١٩٨٨
•/1YDY	19971/97	•/١٧٢•
+/1411	2.244	•/1888
•/1777	८•८४४७/९८	•/1001
۰/۲۰۶۵	21122/10	٠/١۴٨٠
•/7447	21440/01	۰/۱۴۱۵

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

در جدول ۱ فشار داخل حفره و عدد کاویتاسیون متناظر، بر حسب نرخ تزریق برای دو کاواکزا با اندازههای ۱۳۵ 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 ۱*cm* است. در شکل ۶ الگوی سوپرحفره را در کسر حجمی مایع برابر با ۰/۸ و نرخ تزریق سوپرحفره را در کسر حجمی مایع برابر با ۰/۸

نرخ تزریق گاز بر حسب عدد کاویتاسیون در شکل ۷ با نتایج آزمایشگاهی [۱۹] مقایسه شده است. کمینه مقدار عدد کاویتاسیون برای کاواکزا بزرگتر (۱۸۵ ۲۰) بیشتر از کمینه مقدار آن برای کاواکزا کوچکتر (۱۰ ۲۰) است. با این حال، در هر دو حالت نتایج روند یکسانی دارد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش نرخ تزریق تا حد معینی، عدد

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.



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



شکل (۹): شبکهبندی سطحی نوک رونده زیرسطحی.

۵- نتایج ابر کاواک طبیعی

بررسی اثر زاویه نصب کاواکرا 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 کاواکرا دیسکی ۲*Cm*، طول رونده ۹۷*cm*، ارتفاع بالکها ۳/۱۹*cm* و بیشترین ضخامت مقطع بالکها مالکها ۳/۱۹*cm* و بیشترین ضخامت مقطع بالکها مالکها ۳/۱۹*cm* و بیشترین ضخامت مقطع بالکها مال ایجاد ابرکاواک یعنی کاواکرا 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. همان طور 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 بی سازمان شامل ۵٫۸۷۸٬۰۶۴ و در ایت. به دلیل محدودیتی که در محاسبات عددی برای

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 درشت تر 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. بدين ترتيب شبكه با المان كمتر 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 ۱۰۰*m/s* و عدد رینولدز شبیهسازی برابر ۲٬۲۴۰٬۷۰۱ بر اساس قطر کاواکزا است. عدد کاویتاسیون ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است. عدد كاويتاسيون طبق تعريف بر اساس فشار مرز خروجي 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 مشخص تر است. این تصاویر در شکل ۱۱ با وضوح بیشتری در نوک قابل مشاهده است. تغییر شکل سویرحفره با زاویه نصب، در این تصاویر به روشنی مشاهده می شود. الگوی سوپرحفره بهصورت سطح ثابت کسر حجمی مایع در مقدار ۷/۰ تعریف شده است.



در شکل **۱۲** نمای الگوی جریان در زاویه نصب  $\theta$  نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود 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 سوپر حفره در شکل **۱۴** از مقطع عمود بر جریان نشان داده شده است. برای هر حالت مقدار Du/Ddمحاسبه 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 <sup>۱۰–</sup> ۱۰ و برای معادله کسر حجمی برابر<sup>۴</sup>-۱۰ انتخاب شده است.



۶- نتیجه گیری
در این تحقیق ابر کاواک اطراف رونده های زیرسطحی بررسی در این تحقیق ابر کاواک اطراف رونده های زیرسطحی بررسی شد. مقایسه نتایج با داده های تجربی نشان از توانمندی روش های چندفازی مبتنی بر استفاده از معادله انتقال، در طراحی ابر کاواک است. دستاورده ای کلی این تحقیق به صورت زیر بیان می شود:
۱ - حفره به دست آمده ناشی از ابر کاواک طبیعی و ناشی از تزریق از نظر ابعاد برابر است.

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 است و برآ مورد نیاز رونده به دست آید.

# مراجع

- 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).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- Ishii, M. "Thermo-fluid Dynamic Theory of Twophase 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).
- 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.
- Cheraghi, A., Ebrahimi, R., Shams, M., and Bazargani, S.M. "Two-phase CFD Modeling of Threedimensional Supercavitating Flows", The 13th Annual & 2nd Int. Fluid Dynamic Conf., Shiraz Univ., Shiraz, Iran, 2010.
- 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.
- Ferziger, J.H. and Peri´c, M. "Computational Methods for Fluid Dynamics", 2nd Ed., Springer Verlag, Berlin, Germany, 1999.
- Brennen, C. "A Numerical Solution of Axisymmtric 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.