



## شبیه سازی عددی سوپر کاویتاسیون و محاسبه طول کاواک اطراف یک جسم غوطه‌ور

مهدی معرفت<sup>1\*</sup>، سهراب طهماسبی<sup>2</sup>، محمدرضا انصاری<sup>3</sup>

1- دانشیار، 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، 111-14115، maerefat@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 اسفند 1393

پذیرش: 11 خرداد 1394

ارائه در سایت: 07 تیر 1394

کلید واژگان:

شبیه سازی عددی

طول کاواک

کاواک زا گوه‌ای

کاربرد اجسام شناور تند رو باعث گردید که محققان زیادی بر روی پدیده سوپر کاویتاسیون مطالعه نمایند. کاواک ناشی از این پدیده باعث کاهش پسا اصطکاکی و افزایش سرعت شناور می‌گردد. هدف از تحقیق حاضر، استخراج ضرایب، جهت ارائه رابطه‌ای به منظور محاسبه طول کاواک اطراف یک جسم شناور همراه با کاواک زا گوه‌ای است، که در کاربردهای عملی حائز اهمیت است. بدین منظور شبیه سازی پدیده سوپر کاویتاسیون در اطراف سه جسم با هندسه متفاوت انجام گردیده است. در مرحله اول به منظور اینکه بتوان روش محاسبات، دامنه حل، تعداد سلولها، مدل انتقال جرم و مدل جریان معشوش را مورد ارزیابی قرار داد، جریان ابر کاواک اطراف یک بدنه استوانه ای با کلاهدک نیمکره‌ای شبیه سازی گردید و نتایج تحلیلی حاصل شده با نتایج تجربی اعتبار سنجی گردید. در مرحله دوم به منظور شکل‌گیری پدیده ابر کاواک اطراف گوه، تحلیل جریان در اطراف یک کاواک زا گوه‌ای شکل در سه زاویه 15 و 30 و 45 درجه صورت گرفت. در مرحله سوم تحلیل جریان در اطراف یک جسم شناور همراه با کاواک زا گوه‌ای انجام پذیرفت. در هر سه مرحله طول کاواک در اعداد کاویتاسیون مختلف استخراج شد و سپس ضرایب مربوط به رابطه طول کاواک تعیین گردید و سه رابطه یکسان با ضرایب متفاوت حاصل شد. به وسیله این روابط می‌توان طول کاواک را در اعداد کاویتاسیون مختلف محاسبه نمود. جهت شبیه‌سازی این پدیده از معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده در حالت گذرا استفاده گردید. از روش حجم محدود برای حل معادلات بهره‌گیری شده است.

## Numerical Simulation of Super-cavitating flow and calculation of cavity length around a submersible vehicle

Mehdi Maerefat\*, Sohrab Tahmasebi, Mohammad Reza Ansari

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 26 February 2015  
Accepted 01 June 2015  
Available Online 28 June 2015

**Keywords:**  
Numerical simulation  
cavity length  
wedge cavitator

### ABSTRACT

Development and application of high-speed underwater vehicle is the motivation for many researchers to consider super-captivating flows. Frictional drag decreases and vehicle's velocity increases due to cavity generation. The objective of the present research is to find the coefficients of a relation to estimate cavity length around a submersible vehicle equipped with a wedged-shaped cavitator-which has important practical applications. For this purpose, the super cavitation phenomena has been simulated numerically around three bodies with different geometry. In the first stage, to validate the results of numerical simulation of present work a well-established experimental result of a cylindrical body with hemispheric cap is used for comparison. This comparison is used for parameters effecting numerical method, turbulence flow model and mass transfer model. As this comparison is confirmed, the simulation is continued in the second stage for super cavitation phenomena initiation around a wedged-shaped cavitator with three angles of 15 and 30 and 45 degrees. Inthe third stage, the super cavitation flow is analyzed around a submersible body equipped with a wedged-shaped cavitator. The cavity length and related coefficients are obtained for three cases using different cavitation numbers. The developed equation is similar for all cases with different coefficients. The averaged Navier-Stokes equations are solved in transient case using finite volume method.

### 1- مقدمه

مکانیکی مانند پمپ‌ها، توربین‌ها، نازل‌ها و پروانه‌های دریایی اتفاق می‌افتد و اثر نامطلوبی بر روی کارایی تجهیزات فوق می‌گذارد. از طرف دیگر این پدیده باعث سایش، خوردگی روی سطح و ایجاد ارتعاش و سروصدا در سیستم

کاویتاسیون یک پدیده فیزیکی است که در آن فشار سیال تا حد فشار بخار اشباع کاهش یافته و بخار حاصل می‌گردد. این پدیده در بسیاری از تجهیزات

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

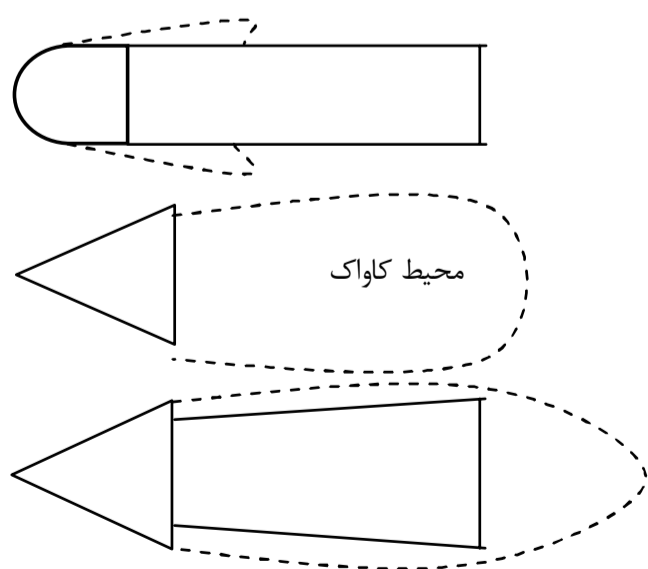
نمودند. میزان پسا و طول کاواک حاصل از دیسک را بر اساس قطر دیسک محاسبه نمودند. طول کاواک بدست آمده در کارهای قبلی برای تعداد محدودی عدد کاویتاسیون ارائه شده، در مطالعه حاضر با توجه به تحلیل‌های انجام شده و روابط ارائه شده، طول کاواک را برای طیف اعداد کاویتاسیون میتوان بدست آورد. لذا در مطالعه حاضر شبیه سازی پدیده سوپر کاویتاسیون برای سه جسم با هندسه متفاوت بررسی شد. در مرحله اول به منظور اینکه بتوان روش محاسبات، دامنه حل، تعداد سلولها، مدل انتقال جرم و مدل جریان مغشوش را مورد ارزیابی قرار داد، جریان ابر کاواک اطراف یک بدنه استوانه‌ای با کلاهک نیمکره‌ای شبیه سازی گردید و نتایج تحلیلی حاصل شده با نتایج تجربی اعتبار سنجی گردید. در مرحله دوم به منظور نحوه شکل‌گیری پدیده ابر کاواک اطراف گوه، تحلیل جریان ابر کاواک در اطراف یک کاواک زا گوه‌ای شکل در سه زاویه 15 و 30 و 45 درجه صورت گرفت. مهم‌ترین پارامترهای بدست آمده در تحلیل بدنه استوانه‌ای با کلاهک نیمکره‌ای، تثبیت مدل انتقال جرم و مدل آشفتگی است که در کاواک زا گوه‌ای با زاویه 15 درجه استفاده و با نتایج تحلیلی نیز صحت سنجی گردید لذا برای زوایای دیگر مثل 30 و 45 درجه نیز می‌تواند معتبر باشد. در مرحله سوم تحلیل جریان ابر کاواک در اطراف یک جسم شناور همراه با کاواک زا گوه‌ای انجام پذیرفت. در هر سه مرحله طول کاواک در اعداد کاویتاسیون مختلف استخراج شد و سپس ضرایب مربوط به رابطه طول کاواک استخراج گردید و سه رابطه یکسان با ضرایب متفاوت حاصل شد. به وسیله این روابط می‌توان طول کاواک را در اعداد کاویتاسیون مختلف محاسبه نمود.

## 2- شرح مسئله

هندسه دوبعدی ارائه شده شامل (1) استوانه با کلاهک نیمکره، (2) کاواک زا به فرم گوه‌ای در زوایای 15 و 30 و 45 درجه (3) کاواک زا به فرم گوه ای همراه با بدنه است که در شکل 1 نشان داده شده است. عدد رینولدز براساس سرعت جریان آزاد و طول مشخصه هریک از هندسه‌های فوق از  $5 \times 10^5$  تا  $9 \times 10^5$  تعریف گردیده است. عدد کاویتاسیون براساس رابطه (1) تعریف می‌گردد:

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

که  $P_0$  فشار بخار و  $\rho$  جرم حجمی سیال است. با توجه به سرعت‌های مختلف جریان آزاد، عدد کاویتاسیون در محدوده 0/06-2/2 متناسب با هندسه‌های تعیین شده حاصل می‌گردد.



شکل 1 هندسه‌های تحلیل شده

می‌گردد.

در کاربردهای دریایی این پدیده بسیار مفید است و با تشکیل سوپرکاویتاسیون می‌توان پسا اصطکاکی روی بدنه را شدیداً کاهش داد. همچنین سرعت یک جسم رونده در زیر آب را با استفاده از این پدیده می‌توان به بیش از 200 گره دریایی رساند. لذا برای استفاده از این پدیده، آگاهی از فیزیک و پیش‌بینی رفتار آن بسیار ضروری است. با توجه به اهمیت موضوع در سال‌های اخیر به واسطه توسعه روش‌های دینامیک محاسباتی، مطالعات عددی بر روی شبیه‌سازی فیزیکی پدیده به صورت پیشرفته‌ای امکان‌پذیر گشته است [1]. به طور کلی در شبیه سازی مدل‌های مختلف از دو دیدگاه زیر استفاده می‌شود:

### 1) مدل لاگرانژی (حباب‌های مجزا) (2) مدل اویلری (روش پیوسته)

در دیدگاه لاگرانژی رفتار حباب‌ها به طور مجزا مدنظر قرار می‌گیرند و از معادلات دینامیک حباب‌ها استفاده می‌شود. چاهین [2] با استفاده از این دیدگاه شروع کاویتاسیون و سروصدای پروانه دریایی را تخمین زد. در دیدگاه اویلری جریان به صورت یک مخلوط همگن تقریب زده می‌شود. لذا جریان مخلوط همگن با یک سرعت یکسان حرکت می‌کند و هویت هر فاز با یک معادله انتقال کسر حجمی مستقل تعیین می‌گردد. دیدگاه اویلری نیز به دو دسته تقسیم می‌گردد:

### 1) مدل باروتروپیک: در این مدل فشار و جرم حجمی در معادله پیوستگی تابع یکدیگر می‌باشند [3].

### 2) مدل مخلوط دوفازی: در این مدل معادلات پیوستگی هرفاز توسط معادله کسر حجمی تحلیل می‌گردند [4].

مدل‌های انتقال جرم توسط پارک و ری [5] به شکل خلاصه در جدول 1 ارائه گردیده است. مطالعات متعددی بر روی سوپرکاویتاسیون توسط روش‌های عددی و تجربی صورت گرفته است که معمولاً نتایج تجربی به واسطه اندازه‌گیری‌های فشار و تکنولوژی پردازش تصویر انجام شده است. چاهین و همکاران [6] سوپرکاویتاسیون را در پشت یک پرتابه مشاهده نمودند و خواص سیال داخل ابر کاواک<sup>1</sup> را اندازه‌گیری نمودند. لی و همکاران [7] جریان کاواک را با استفاده از دوربین سرعت بالا رؤیت نمودند و صحت تطبیق نتایج را با مدل‌های محاسباتی مشاهده نمودند. وارگس و همکاران [8] با استفاده از جریان پتانسیل و روش المان مرزی سوپرکاویتاسیون را مدل کردند و تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل حباب کاواک روی هندسه‌های کروی و مخروطی و زوایای مختلف مخروط در شعاع‌های مختلف نیمکره را نشان دادند.

شفقت و همکاران [9] با استفاده از روش المان مرزی بهینه‌سازی شکل کاواک زا<sup>2</sup> دوبعدی را نشان دادند. با استفاده از شکل کاواک زا ضریب پسا را کاهش دادند. آهن و همکاران [10] طول‌های کاواک تولید شده به وسیله کاواک زا را توسط روش المان مرزی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه کردند. کاهش ضریب پسا با استفاده از تغییر شکل کاواک زا فراهم گردید. لیندا و همکاران [11] جریان ابر کاواک اطراف یک دیسک تخت را شبیه‌سازی

### جدول 1 مدل‌های انتقال جرم [5]

روش اویلری	روش لاگرانژی
- مدل باروتروپیک	- مدل مخلوط دو فازی همگن
- رفتار حباب‌ها بصورت مجزا	- استفاده از معادله دینامیک حبابها

1- cavity  
2- cavitator

## 3- روش حل

## 3-1- معادلات حاکم

جهت دستیابی به مقادیر سرعت و فشار در میدان حل از معادلات پیوستگی جرم و مومنتوم بهره گیری می شود معادله پیوستگی جرم به فرم رابطه (2) است:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (2)$$

$\vec{v}$  بردار سرعت بوده و زیرنویس  $m$  معرف فاز مخلوط است.

معادله پیوستگی مومنتوم در رابطه (3) و (4) ارائه گردیده است.

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \quad (3)$$

$$\vec{\tau} = \mu_{eff} \left[ (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v}_m I \right] \quad (4)$$

$P$  فشار استاتیکی و  $\tau$  تانسور تنش آشفته است، لزجت موثر به شکل رابطه (5) است.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

که در آن

$\mu_t$  لزجت آشفته  $\mu$  لزجت مولکولی، و  $\mu_{eff}$  لزجت موثر جرم جمعی بوده و لزجت فاز مخلوط به شکل روابط (6) و (7) می باشد.

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_L \rho_L \quad (6)$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_L \mu_L \quad (7)$$

$\alpha$  کسر جمعی و  $v$  و  $L$  به فرم زیرنویس معرف بخار و سیال مایع می باشند.

ترم تنش رینولدز در مدل آشفته به شکل رابطه (8) است.

$$-\rho_m \overline{\vec{v}_m \vec{v}_m} = \mu_t \left[ \overline{(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)} - \frac{2}{3} (\rho K + \mu_t \overline{\nabla \cdot \vec{v}_m}) I \right] \quad (8)$$

در این مطالعه مدل های آشفته مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل آشفته  $k-\varepsilon$  استاندارد براساس فرضیه بوزینسک همراه با معادلات انتقال انرژی جنبشی  $k$  و نرخ اتلاف  $\varepsilon$  استفاده گردیده است [12].

لزجت آشفته  $\mu_t$  از ترکیب  $k$  و  $\varepsilon$  به شکل رابطه (9) است.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

معادلات انتقال  $k$  و  $\varepsilon$  به فرم رابطه (10) و (11) می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m k \vec{v}_m) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - y_M \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \varepsilon \vec{v}_m) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\delta_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{2\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

$C_\mu$  ثابت تجربی و معادل 0/09 است و ثوابت  $\delta_\varepsilon, \delta_k, C_{2\varepsilon}, C_{1\varepsilon}$  به ترتیب معادل 1/44 و 1/92 و 1 و 1/3 می باشند. از لزجت آشفته جهت محاسبه تنش های رینولدز استفاده می شود.

معادله انتقال جرم جهت محاسبه دینامیک کاواک بکار گرفته شده و فرآیند کاویتاسیون توسط ترمودینامیک و دینامیک تغییر فاز در سیستم شکل می گیرد. در این مطالعه مدل انتقال جرم سینگال جهت شبیه سازی کاواک اطراف نیمکره استوانه ای استفاده گردیده است.

مدلهای انتقال جرم توسط مرکل و همکاران [13]، کانز و همکاران [14]، اشتر و ساور [15]، سینگال و همکاران [16] و زوارت و همکاران [17] معرفی گردیده است.

رابطه انتقال جرم سینگال و همکاران به شکل رابطه (12) می باشد.

$$\frac{\partial (f_v \rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (f_v \rho_m \vec{v}_m) = -C_{con} \frac{v_{ch}}{\gamma} \rho_L \rho_L \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3} \frac{f_v}{\rho_L}} + C_{evp} \frac{v_{ch}}{\gamma} \rho_v \rho_L \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3} \frac{1 - f_v}{\rho_L}} + \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\delta_v} \nabla f_v \right) \quad (12)$$

$f_v$  کسر جرمی بخار و  $\alpha_v$  کسر جمعی بخار می باشد.  $\delta_v$  عدد پراتنل آشفته برای سرعت می باشد و  $\gamma$  کشش سطحی و  $v_{ch}$  سرعت مشخصه می باشد که انعکاس دهنده سرعت محلی لغزشی بوده و مقدار آن تقریباً  $\sqrt{k}$  می باشد که  $k$  انرژی جنبشی آشفته است. مقادیر ثابت  $C_{cond}$  و  $C_{evp}$  در مدل سینگال 0/01 و 0/02 می باشد.

## 3-2- روش عددی

حل معادلات به روش حجم محدود در نرم افزار فلوئنت<sup>1</sup> انجام گردیده است، تحلیل بصورت گذرا و متقارن محوری می باشد. از الگوریتم تصحیح فشار<sup>2</sup> برای حل معادلات کوپله سرعت و فشار بهره گیری شده، گسسته سازی ترمهای جابجایی بصورت پیشرو<sup>3</sup> مرتبه دو و ترمهای دیفیوژن بصورت تفاضل مرکزی مرتبه دو در نظر گرفته شده است. دامنه حل و شرایط مرزی در شکل 2 و الگوریتم حل در شکل 3 نشان داده شده است. با حل معادله انتقال جرم کسر جمعی بخار و توزیع آن در شبکه حل بدست می آید. براساس مقادیر کسر جمعی بخار در سلولها مقادیر جدید دانسیته و ویسکوزیته مخلوط حاصل می گردد. معادلات تصحیح فشار حل می شوند تا مقادیر سرعت و فشار بدست آید. معادلات ناویراستوکس و معادلات تصحیح فشار حل می شوند تا مقادیر جدید سرعت و فشار در هر سلول حاصل گردند.

## 3-3- تست اعتبارسنجی

جریان کاویتاسیون اطراف یک بدنه با کلاک نیم کروی به صورت تجربی توسط رز و مکنون [18] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. لذا جهت تأیید مدل انتقال جرم، مدل اغتشاش، مش بندی، روش عددی و شرایط مرزی، به نتایج فوق استناد گردیده است.

رز و مکنون یک سری نتایج تجربی از کاویتاسیون طبیعی اطراف یک بدنه متقارن استوانه ای به همراه دماغه کروی استخراج نموده اند که معیار مناسبی جهت صحت سنجی بشمار می آیند.

دامنه حل در محدوده  $30 < X/R < 50$  و  $0 < Y/R < 30$  در جهت جریان و عمود بر آن هست. دامنه به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده که تأثیرات

1- Ansys fluent 14

2- PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)

3- Upwind

نسبت رشد سلول ها در مش بندی با توجه به مدل های اغتشاش  $k-\epsilon$  استاندارد و  $k-\epsilon$  تحقیق پذیر<sup>1</sup> و اسپالارت آلماراس<sup>2</sup> [19]،  $1/05$  هست؛ و  $\gamma^+ = 50$  در نظر گرفته شده است. سرعت جریان آزاد  $0/7$  متر بر ثانیه و قطر کلاهک  $0/2$  متر است، عدد رینولدز معادل  $1/36 \times 10^5$  هست و اعداد کاویتاسیون بر اساس  $(P_0, U_\infty)$  معادل  $0/2$  و  $0/3$  و  $0/4$  و  $0/5$  لحاظ گردیده است.

3-4- استقلال شبکه

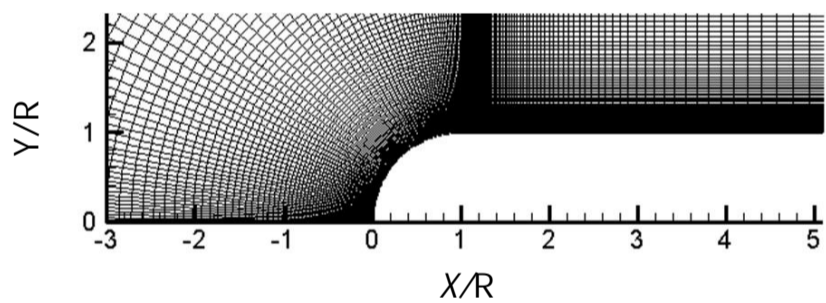
جهت بررسی استقلال میدان حل از تعداد سلول های استفاده شده، در شکل 5 سه حالت از مش بندی مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می گردد که برای عدد کاویتاسیون  $0/3$  چنانچه میدان حل از  $25500$  سلول تشکیل گردد همگرایی لازم محقق می شود. محور افقی معرف طول روی سطح نیمکره نسبت به قطر نیمکره و محور عمودی نیز نشان دهنده  $C_p$  هست که قسمت ثابت آن معادل عدد کاویتاسیون یا  $\sigma$  است.

3-5- مدل انتقال جرم

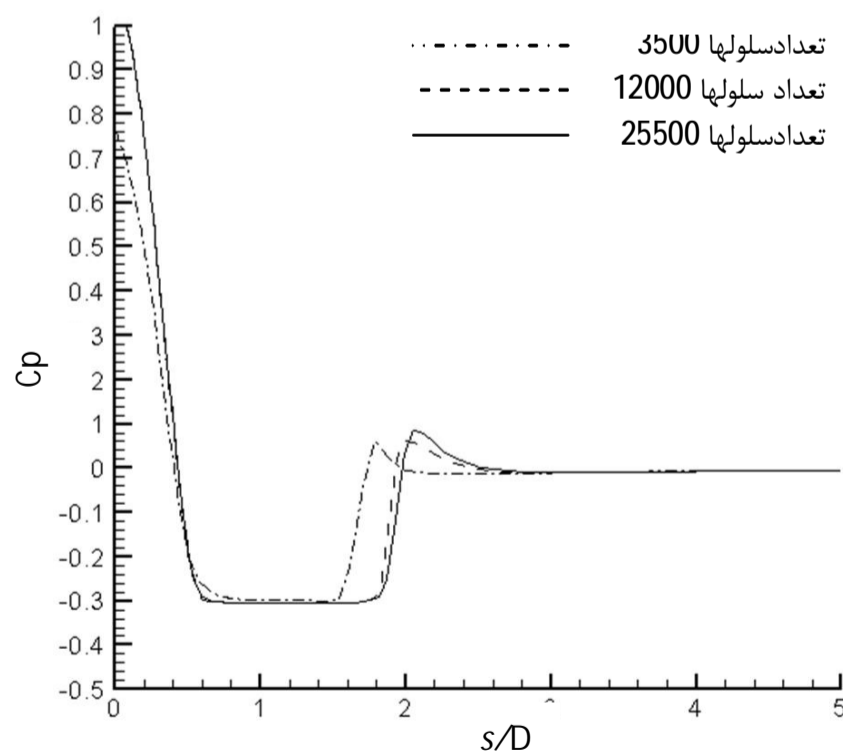
در جریان کاواک مدل انتقال جرم نقش مهمی را ایفا می کند؛ بنابراین انتخاب مدل انتقال جرم می تواند بر دقت پیش بینی بسیار تأثیرگذار باشد. مدل اغتشاش  $k-\epsilon$  استاندارد برای عدد کاویتاسیون  $0/3$  مبنای تحلیل هست.

در شکل 6 توزیع ضریب فشار  $C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$  روی کلاهک، همراه با بدنه

برای مدل انتقال جرم نشان داده شده است. محور افقی معرف طول روی



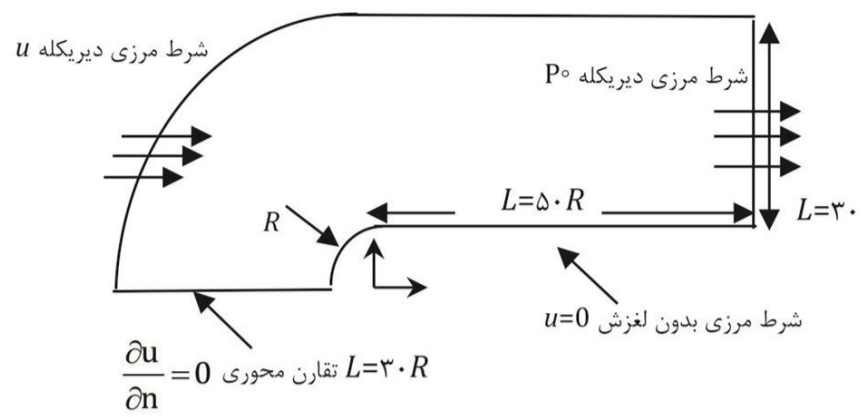
شکل 4 مش بندی



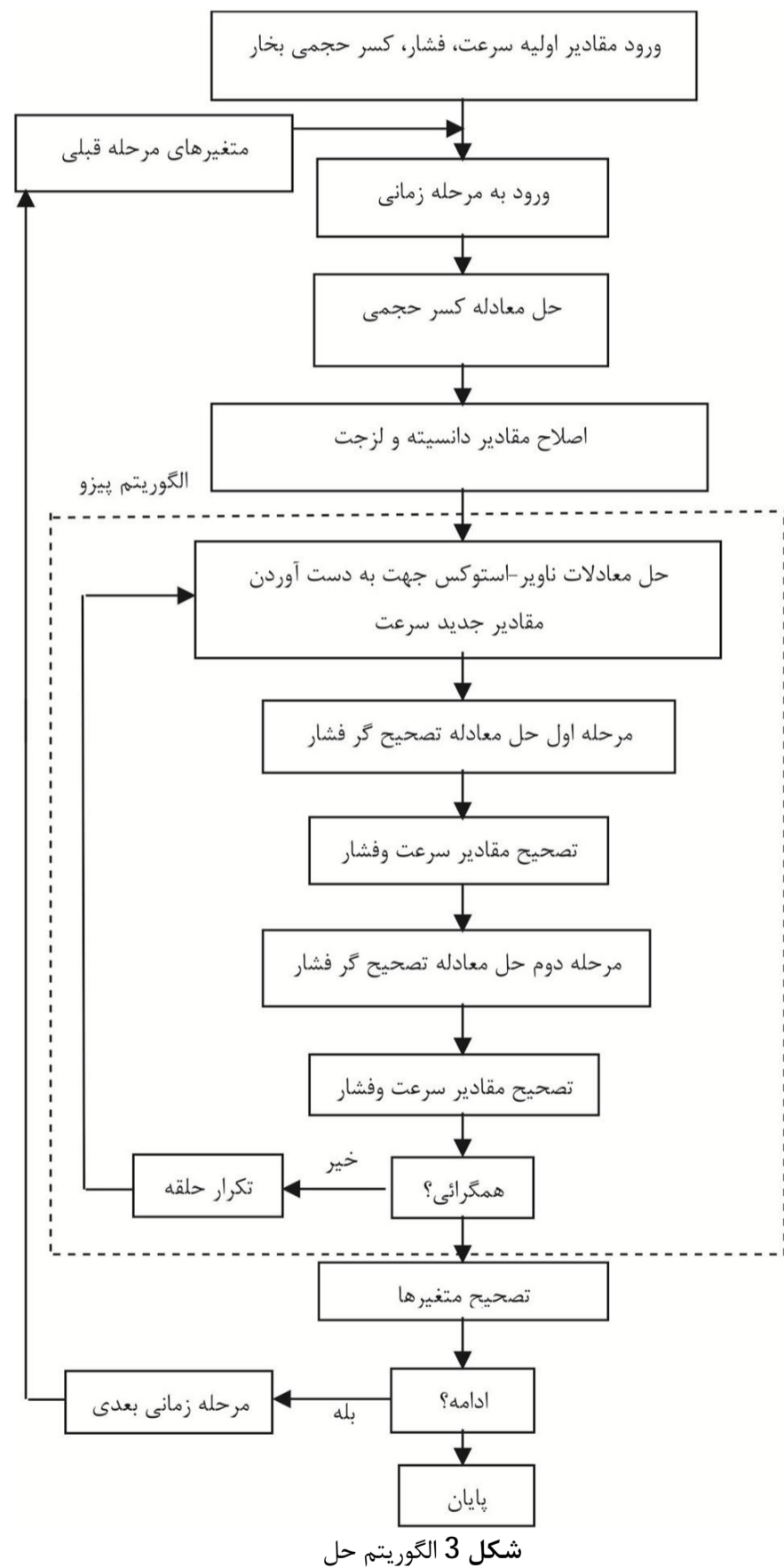
شکل 5 بررسی استقلال شبکه

1- Realizable  
2- Spallart-almaras

شرط مرزی بدون لغزش  $u=0$



شکل 2 دامنه حل و شرایط مرزی



شکل 3 الگوریتم حل

مرزها ناچیز باشد. مش بندی با سازمان C شکل شامل  $25500$  مش که  $170$  مش روی بدنه و  $70$  مش روی جهت عمودی مطابق شکل 4 لحاظ گردیده است.

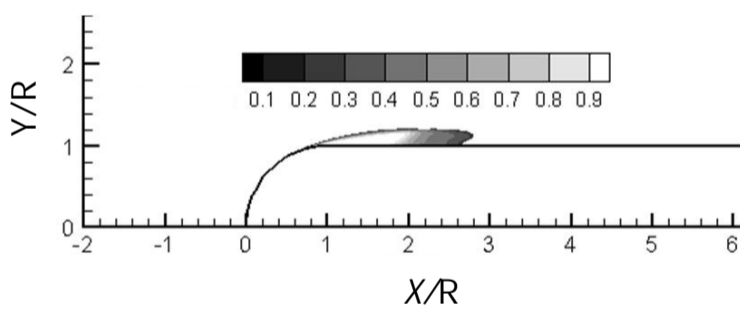
میزان تغییر فاز در قسمت سطح مشترک کاواک و در داخل کاواک توسط مدل اسپالارت آلماراس و مدل  $k-\epsilon$  تحقق پذیر کمتر از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد هست، همچنین طول کاواک و کسر حجمی بخار در مدل  $k-\epsilon$  استاندارد نسبت به مدل اسپالارت آلماراس و مدل  $k-\epsilon$  تحقق پذیر کامل تر هست؛ بنابراین در کلیه تحلیل ها از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده گردیده است [20].

### 3-7- تأثیر عدد کاویتاسیون

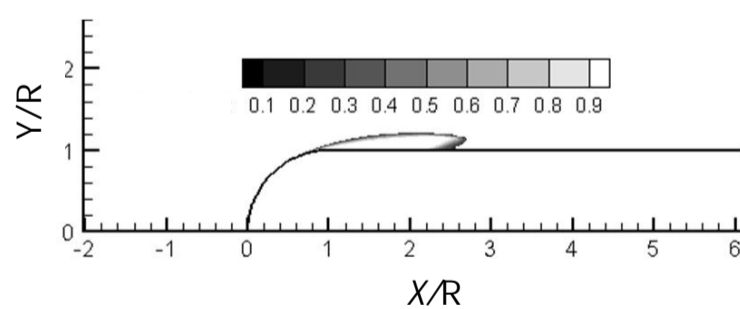
با توجه به تعیین مدل انتقال جرم و مدل آشفتگی لازم است که تأثیرات ناشی از تغییر عدد کاویتاسیون بر روی طول کاواک مشاهده گردد در شکل 11 نتایج حاصل از این تحلیل ارائه شده است. توزیع ضریب فشار روی کلاهک برای اعداد کاویتاسیون مختلف به دست آمد و با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. این تحلیل برای اعداد کاویتاسیون 0/2، 0/3، 0/4 و 0/5 انجام گرفته است. نتایج تجربی برای اعداد کاویتاسیون فوق توسط رز و مک نون موجود میباشد در شکل 11 نتایج تحلیل نتایج تجربی مقایسه شده است. وقتی عدد کاویتاسیون کاهش می یابد طول کاواک به واسطه کاهش فشار در حلقه بسته کاواک افزایش می یابد. سطح فشار داخل کاواک معادل فشار بخار هست و قسمت ثابت  $C_p$  ارائه شده تقریباً معادل عدد کاویتاسیون یا  $\sigma$  هست. توزیع فشار حاصل شده نشان می دهد که تطابق خوبی با نتایج تجربی وجود دارد.

کانتورهای کسر حجمی بخار در اعداد کاویتاسیون مورد نظر در شکل 12 نشان داده شده است. رشد حباب کاواک با کاهش عدد کاویتاسیون مشاهده می گردد.

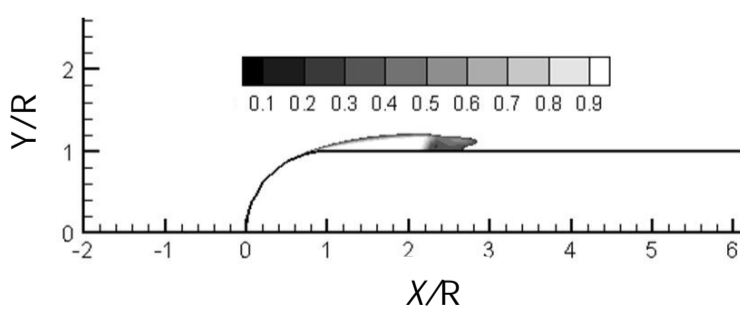
شکل 12 تغییر طول کاواک را نسبت به تغییر عدد کاویتاسیون نشان می دهد. مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج تجربی نشان می دهد که استفاده از مدل انتقال جرم سینگال و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  مورد تأیید هست.



شکل 8 کانتور کسر حجمی مدل اسپالارت الماراس در عدد کاویتاسیون 0/3



شکل 9 کانتور کسر حجمی مدل  $k-\epsilon$  استاندارد در عدد کاویتاسیون 0/3



شکل 10 کانتور کسر حجمی مدل  $k-\epsilon$  تحقق پذیر در عدد کاویتاسیون 0/3

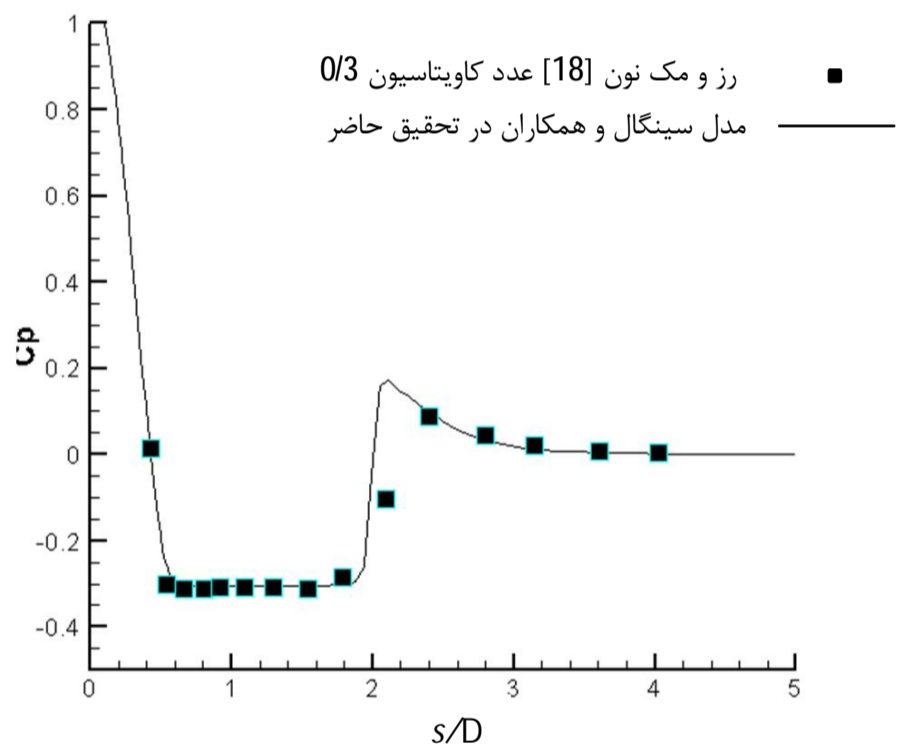
سطح نیمکره نسبت به قطر نیمکره و محور عمودی نیز نشان دهنده  $C_p$  هست که قسمت ثابت آن معادل عدد کاویتاسیون یا  $\sigma$  است.

مدل انتقال جرم بکار گرفته شده، نتایج بسیار نزدیکی با نتایج تجربی را نشان می دهد. لذا مدل سینگال و همکاران به عنوان مدل انتقال جرم در کلیه تحلیل ها استفاده گردیده است [20]. با توجه به محدودیت فضای مقاله ارائه معادلات، به کارگیری و مقایسه مدل های مختلف انتقال جرم امکان پذیر نیست.

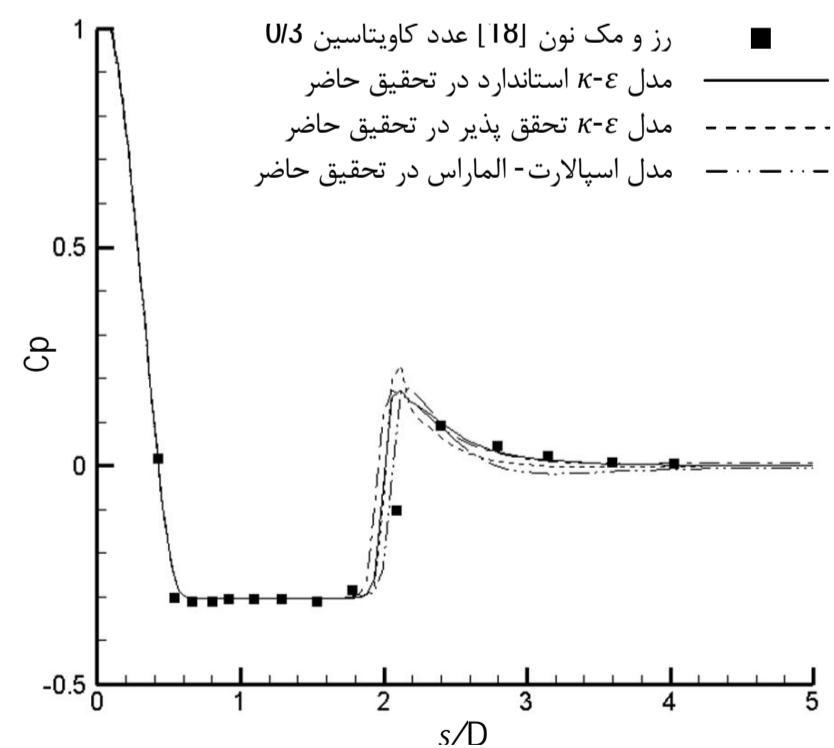
### 3-6- مقایسه مدل های آشفتگی

مدل اغتشاش در شکل گیری جریان کاویتاسیون مهم هست؛ بنابراین انتخاب مدل آشفتگی می تواند بر دقت تشکیل کاواک تأثیرگذار باشد. در این تحلیل سه مدل آشفتگی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. شکل 7 مقایسه مدل های اغتشاش را نشان می دهد.

کانتورهای کسر حجمی، مدل های آشفتگی اسپالارت آلماراس شکل 8،  $k-\epsilon$  استاندارد شکل 9،  $k-\epsilon$  تحقق پذیر شکل 10، همراه با مدل انتقال جرم سینگال در عدد کاویتاسیون 0/3 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج استفاده از مدل های اغتشاش در شکل 7 ارائه شده است.



شکل 6 مدل انتقال جرم



شکل 7 مقایسه مدل های اغتشاش

رابطه تجربی (13) طول کاواک را محاسبه نمود [21].  $A$  و  $n$  ضرایبی هستند که ثابت نبوده و متناسب با هندسه جسم تغییر می کنند.  $\sigma$  معرف عدد کاویتاسیون هست. این نکته حائز اهمیت است که ضرایب رابطه زیر از نتایج شکل 11 که در جدول 2 ارائه گردیده حاصل می گردد.

$$\frac{L_c}{L_{ch}} = A\sigma^{-n} \quad (13)$$

$L_c$  طول کاواک

$L_{ch}$  طول مشخصه (قطر نیمکره)

طول کاواک از دیتا مربوط به نمودار  $Cp$  به دست می آید که قسمت ثابت آن معادل عدد کاویتاسیون یا  $\sigma$  می باشد. در  $Cp$  ثابت طول کاواک محاسبه می شود.

بنابراین رابطه فوق به شکل رابطه (14) نوشته می شود.

$$\frac{L_c}{L_{ch}} = 0.15\sigma^{-1.9} \quad (14)$$

#### 4-2- کاواک زا گوهی

در این قسمت جهت بررسی کاویتاسیون از یک مدل گوهی استفاده گردیده است. گوه مورد نظر در سه زاویه 15 و 30 و 45 درجه مورد تحلیل قرار گرفته است. به خاطر تقارن هندسی تنها نیمی از شکل گوه مدل گردیده، دامنه حل معادل  $0 < Y/L_w < 40$  و  $-30 < X/L_w < 40$  هست که در شکل 13 نشان داده شده است.

به علت اینکه هدف شبیه سازی جریان اطراف کاواک زا و تشکیل کاواک و توسعه آن هست لذا میدان حل به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده، شرط مرزی بدون لغزش روی گوه اعمال شده و شرط تقارن روی مرز پایینی لحاظ گردیده است. مجموعه ای 26000 سلولی برای مش بندی بکار رفته، ابعاد گوه از ابعاد استوانه با کلاهک نیمکره کوچک تر هست لذا بررسی استقلال از شبکه لازم نیست. دیواره شیب دار گوه از 60 سلول و پشت آن از 30 سلول بهره گیری شده است. (شکل 14)

برای مش بندی با توجه به مدل  $K-\epsilon$  استاندارد نسبت رشد سلولها 1/05 لحاظ گردیده و  $Y^+ = 50$  هست. در شکل 15 نتایج تحلیل تغییرات طول کاواک نسبت به ضریب فشار (عدد کاویتاسیون) در گوه 45 درجه ارائه گردیده است. در شکل 16 کانتور کسر حجمی بخار در عدد کاویتاسیون 0/2 نشان داده شده است.

#### 4-3- محاسبه طول کاواک در گوه 30 درجه و 45 درجه

در جدول 3 تغییرات طول کاواک نسبت به عدد کاویتاسیون ارائه شده است. بنابراین رابطه مربوط به محاسبه طول کاواک در زاویه 30 درجه به شکل رابطه (15) و در زاویه 45 درجه به شکل رابطه (16) نوشته می شود [21].

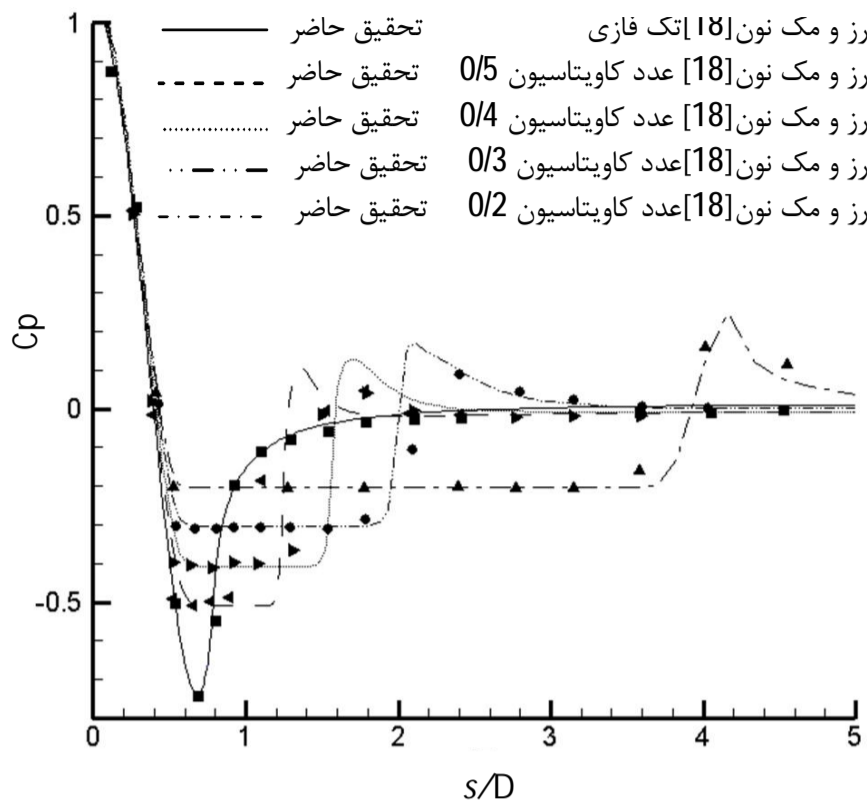
$$\frac{L_c}{L_w} = 0.235\sigma^{-1.7} \quad (15)$$

$$\frac{L_c}{L_w} = 0.23\sigma^{-1.74} \quad (16)$$

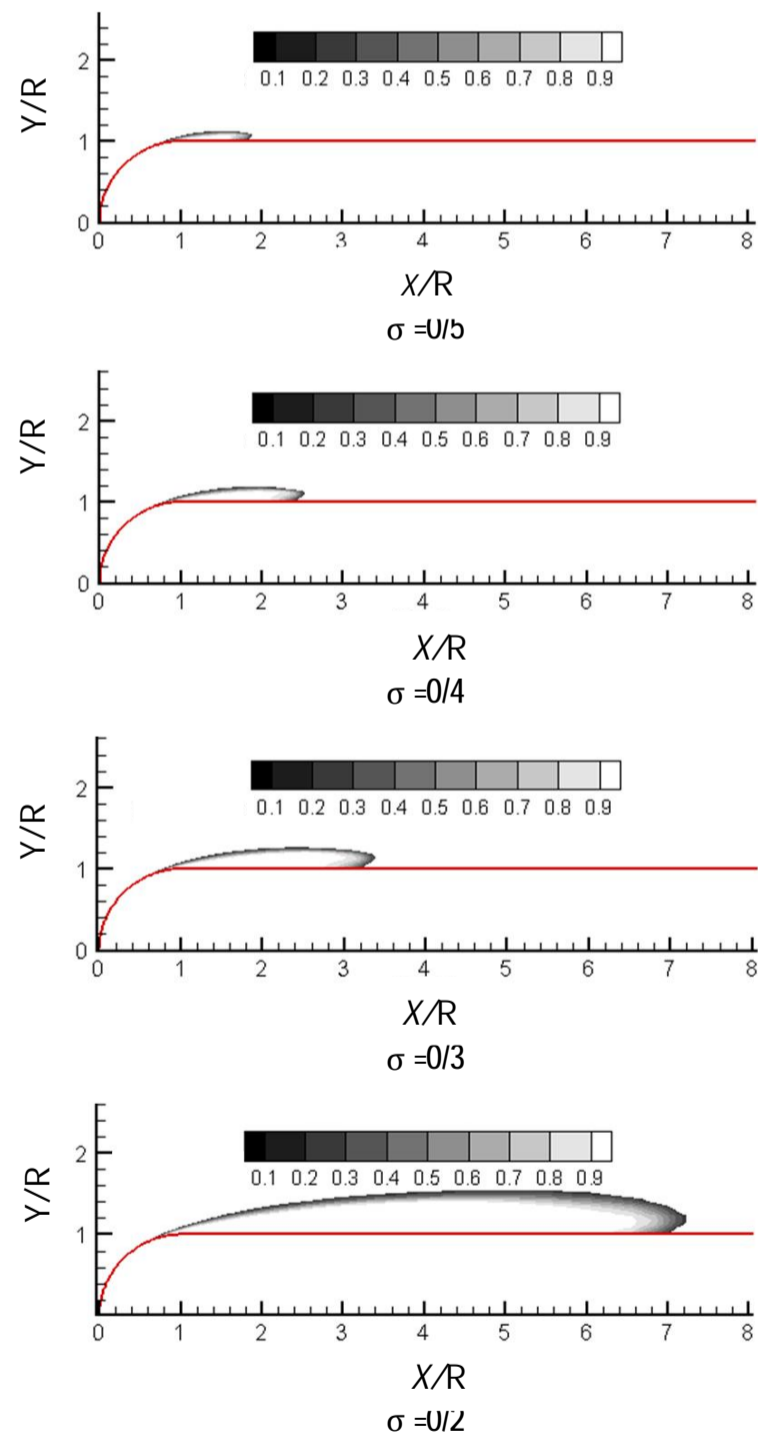
$L_c$  طول کاواک

$L_w$  طول گوه

در شکل 17 نتایج تحلیل تغییرات طول کاواک نسبت به ضریب فشار (عدد کاویتاسیون) در گوه 15 درجه ارائه گردیده است. در شکل 18



شکل 11 تأثیر عدد کاویتاسیون و افزایش طول کاواک



شکل 12 تغییر طول کاواک نسبت به عدد کاویتاسیون

#### 4- تحلیل نتایج

##### 4-1- محاسبه طول کاواک اطراف بدنه با کلاهک کروی

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل جریان کاواک، می توان بر اساس

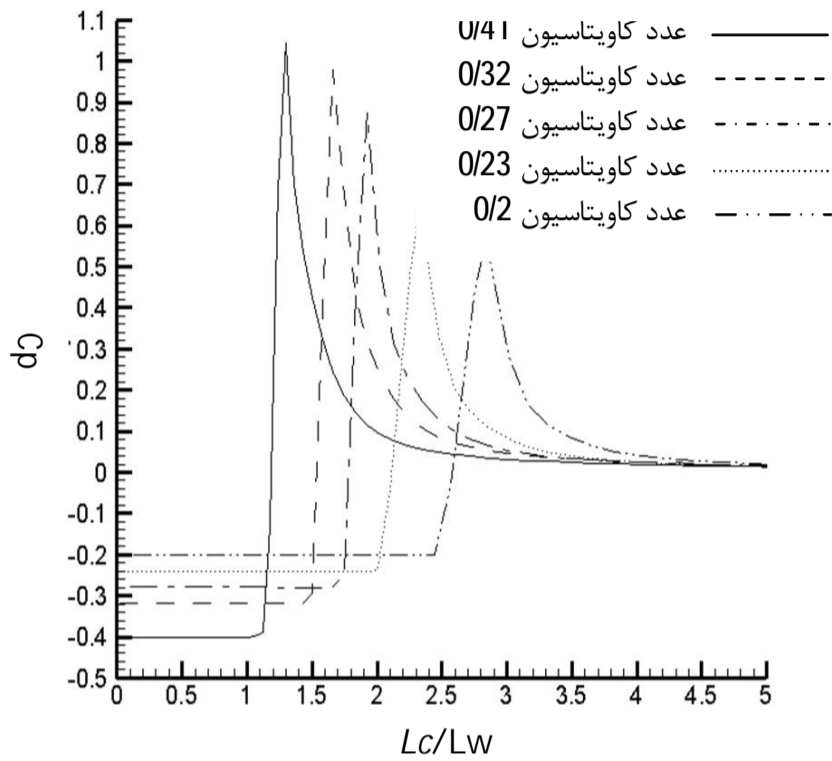
کانتور کسر حجمی بخار در عدد کاویتاسیون 0/1 نشان داده شده است.

جدول 2 تغییرات طول کاواک

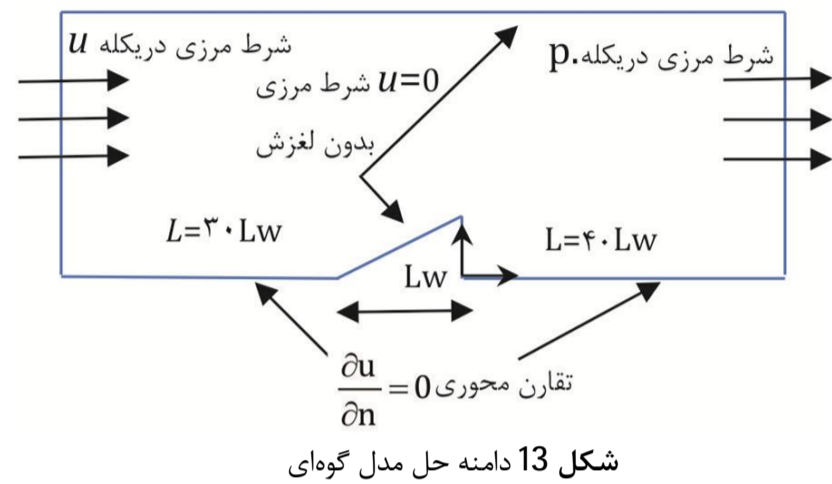
طول کاواک به قطر نیمکره	عدد کاویتاسیون
3/19	0/2
1/47	0/3
0/85	0/4
0/56	0/5

جدول 3 تغییرات طول کاواک روی گوه 30 درجه و 45 درجه

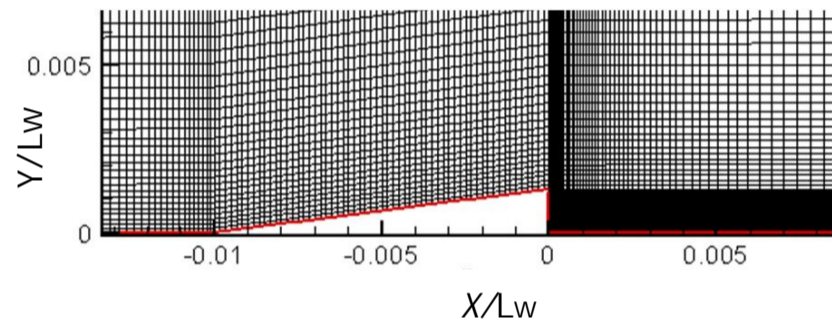
طول کاواک به طول گوه	طول کاواک به طول گوه	عدد کاویتاسیون
30 درجه	45 درجه	
3/62	3/78	0/2
1/82	1/86	0/3
1/12	1/13	0/4
0/76	0/76	0/5



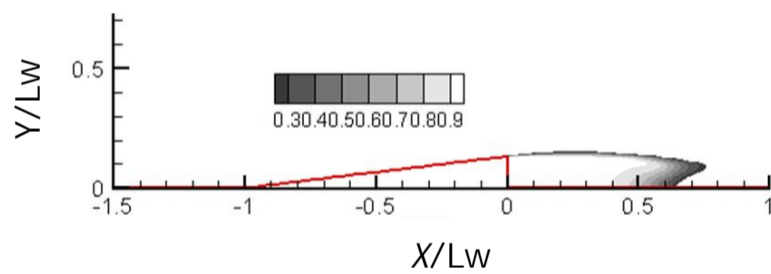
شکل 13 دامنه حل مدل گوه ای



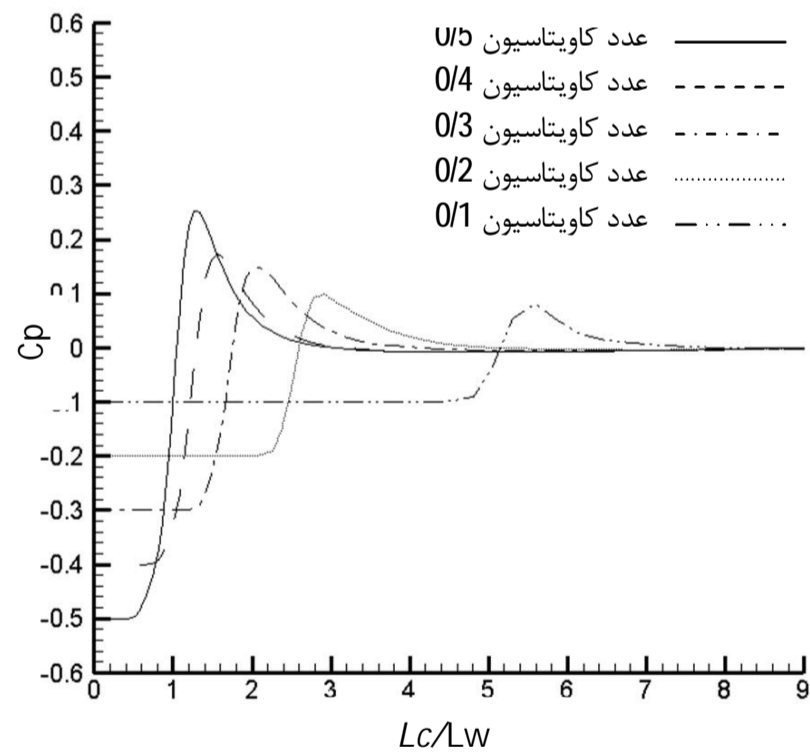
شکل 14 مش بندی گوه



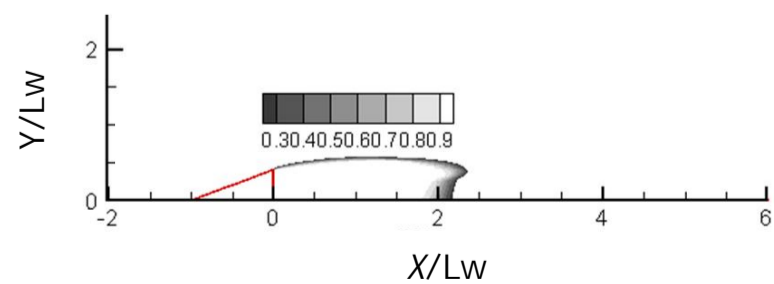
شکل 14 مش بندی گوه



شکل 15 تأثیر عدد کاویتاسیون روی گوه 15 درجه



شکل 15 تأثیر عدد کاویتاسیون روی طول کاواک در گوه 45 درجه



شکل 16 کسر حجمی بخار در sigma=0/2 در گوه 45 درجه

#### 4-4- محاسبه طول کاواک در گوه 15 درجه

آهن و همکاران [22] یک حل گر برحسب جریان پتانسیل ارائه کردند و طول کاواک را برای کاواک زا گوه ای شکل به دست آوردند. طول های کاواک برای اعداد کاویتاسیون مختلف محاسبه شده به وسیله حل فعلی و حل گر جریان پتانسیل در جدول 4 مقایسه شده است. در جدول 4 تغییرات طول کاواک نسبت به عدد کاویتاسیون ارائه شده است.

بنابراین رابطه مربوط به محاسبه طول کاواک در گوه 15 درجه به شکل رابطه (17) نوشته می شود.

$$\frac{L_c}{L_w} = 0.243\sigma^{-1.66} \quad (17)$$

$L_c$  طول کاواک

$L_w$  طول گوه

افزایش زاویه گوه باعث افزایش طول کاواک می گردد.

در حل جریان پتانسیل اثرات ویسکوزیته و آشفتگی لحاظ نمی گردد، لذا طول کاواک محاسبه شده معمولاً معادل طول کاواک حاصل از حل جریان پتانسیل نیست. با کاهش عدد کاویتاسیون (افزایش سرعت و کاهش فشار محیط) فشار به فشار بخار آب نزدیک تر شده و انتقال جرم از مایع به بخار

جدول 4 تغییرات طول کاواک روی گوه 15 درجه

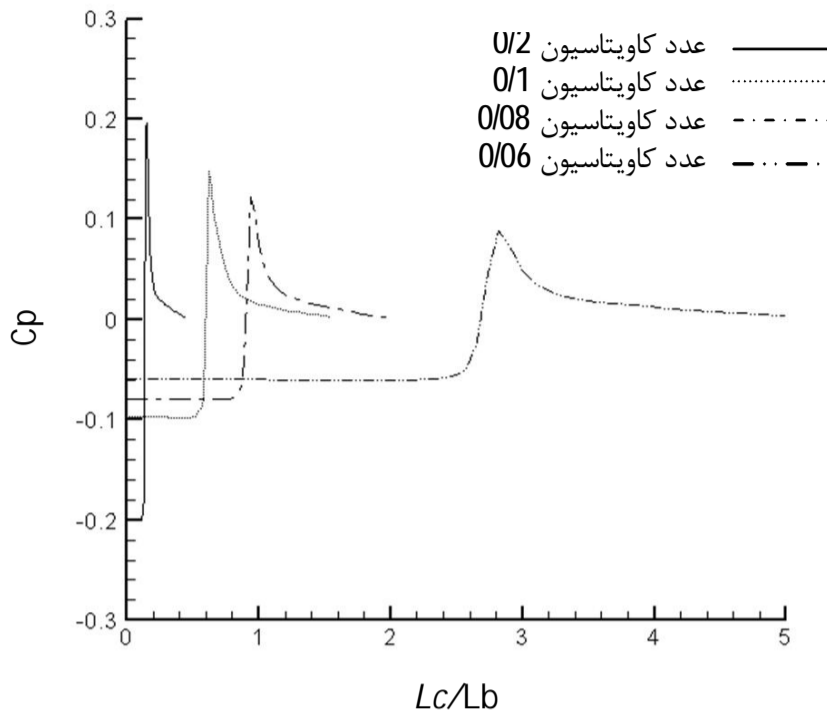
عدد کاویتاسیون	طول کاواک به طول گوه	آهن و همکاران [22]
0/2	3/51	3/50
0/23	2/78	2/98
0/27	2/13	1/98
0/32	1/61	1/48
0/41	1/06	0/97

سریع تر انجام می گیرد لذا کاویتاسیون بهتر و راحت تر پیش بینی می گردد.

#### 4-5- بدنه با کاواک زا

بدنه با کاواک زا، میدان حل و شبکه بندی در شکل 19 و 20 نشان داده شده است. یک بدنه با طول 80 میلی متر و نیمه ارتفاع 10 میلی متر طراحی شده است. ارتفاع دامنه محاسباتی معادل 60 میلی متر در نظر گرفته شده که مطابق با شرایط آزمایشگاهی است [22].

دامنه حل  $10 < X/LW < 20$  در جهت جریان و  $0 < Y/LW < 3$  عمود بر جریان هست و با توجه به محاسبات انجام گرفته روی شکل گوه ای کاواک زا مسلم است که فاصله بین ورودی و بدنه باید بیشتر در نظر گرفته شود؛ بنابراین فاصله بین بدنه و کاواک زا کوچک تر در نظر گرفته شده است. در شکل 20 مش بندی کاواک زا با بدنه نشان داده شده است. مرزهای ورودی و خروجی همانند آنچه برای کاواک زا بود لحاظ گردیده و شرایط بدون لغزش برای سطح کاواک زا و بدنه منظور شده است، مش بندی با 24000 سلول استفاده گردیده به طوری که روی سطح گوه 60 سلول و پشت آن 20 سلول لحاظ گردیده است. تحلیل جریان برای اعداد کاویتاسیون 0/06 و 0/08 و 0/1 و 0/2 در نظر گرفته شده و در شکل 21 نشان داده شده است. کانتورهای کسر حجمی بخار برای عدد کاویتاسیون 0/06 و قدم های زمانی مختلف در شکل 22 نشان داده شده است. کاواک روی بدنه شروع می شود و با افزایش زمان رشد می کند. وقتی زمان به 0/008 می رسد، کاواک به وجود آمده روی بدنه و کاواک در پشت بدنه به یکدیگر ملحق می شوند. قابل توجه است که به



شکل 21 تأثیر عدد کاویتاسیون روی طول کاواک در کاواک زا با بدنه

واسطه کاهش سرعت و افزایش فشار، ناحیه سیال فوراً در پشت بدنه در انتهای آن شکل می گیرد. مدل های انتقال جرم به واسطه اینکه از مدل اوپلری استفاده می کنند نمی توانند انتقال حباب های کوچک را در ناحیه جریان نشان دهند.

#### 4-6- محاسبه طول کاواک در کاواک زا با بدنه

بر مبنای تحلیل های نشان داده شده در شکل 21 طول کاواک ناشی از اعداد کاویتاسیون مختلف در جدول 5 ارائه گردیده است.

با توجه به داده های مندرج در جدول 5 طول کاواک بر اساس رابطه (18) استخراج می گردد.

$$\frac{L_c}{L_b} = 0.0024\sigma^{-2.45} \quad (18)$$

$L_c$  طول کاواک

$L_b$  طول بدنه

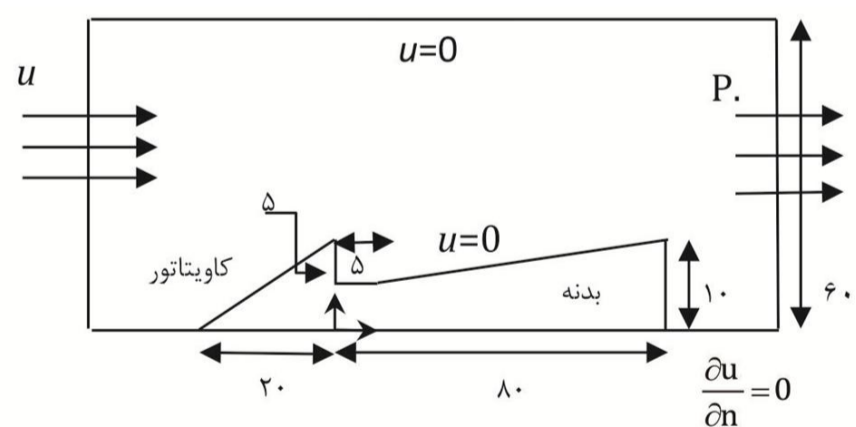
#### 5- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از روش حجم محدود و بهره گیری از نرم افزار فلوئنت شبیه سازی پدیده سوپر کاویتاسیون اطراف هندسه متقارن یک مدل جسم شناور انجام گرفت. تقارن هندسه جسم باعث گردید که تحلیل ها به صورت دوبعدی انجام گردد.

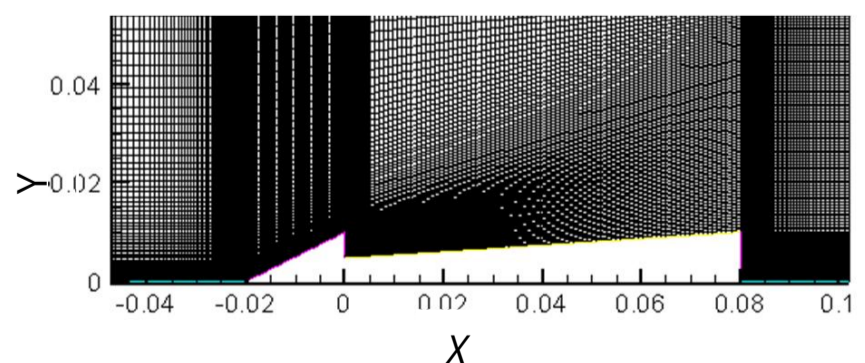
در مرحله اول اعتبار سنجی با توجه به نتایج تجربی جهت شرایط مختلف محاسباتی شامل دامنه حل، مدل انتقال جرم، مدل اغتشاش بر روی بدنه با کلاهیک نیم کروی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل با نتایج تجربی [18] در اعداد مختلف سوپر کاویتاسیون صحه سنجی شد. بر اساس تحلیل ها مدل انتقال جرم سینگال و همکاران و مدل اغتشاش  $k-\epsilon$

جدول 5 تغییرات طول کاواک روی کاواک زا با بدنه

عدد کاویتاسیون	طول کاواک به طول بدنه	آهن و همکاران [22]
0/06	2/4	2/5
0/08	1/1	0/87
0/1	0/67	0/5
0/2	0/12	0/11



شکل 19 هندسه کاواک زا با بدنه



شکل 20 مش بندی کاواک زا با بدنه



سازگاری دارد.

6- فهرست علائم

ضریب تقطیر	$C_{cond}$
ضریب تبخیر	$C_{evap}$
تانسور واحد	$C_p$
انرژی جنبشی آشفتگی ( $m^2/s^2$ )	$\kappa$
طول مشخصه (m)	$L_{ch}$
طول کاواک (m)	$L_c$
طول گوه (m)	$L_w$
فشار استاتیک (Pa)	$P$
فشار مرجع (Pa)	$P_o$
فشار بخار (Pa)	$P_v$
عدد رینولدز	$Re$
سرعت کل روی مرز کاواک (m/s)	$U_c$
سرعت جریان آزاد (m/s)	$U_\infty$
بردار سرعت (m/s)	$\vec{v}_m$
سرعت مشخصه (m/s)	$v_{ch}$
<b>علائم یونانی</b>	
کسر حجمی بخار	$\alpha_v$
نرخ اتلاف آشفتگی ( $m^2/s^3$ )	$\varepsilon$
لزجت (kg/ms)	$\mu$
لزجت مؤثر (kg/ms)	$\mu_{eff}$
لزجت آشفتگی (kg/ms)	$\mu_t$
لزجت گردابه آشفتگی ( $m^2/s$ )	$\nu_t$
جرم حجمی ( $kg/m^3$ )	$\rho$
عدد کاویتاسیون	$\sigma$
تانسور تنش آشفتگی (Pa)	$\tau$
عدد پرانتل	$\delta_v$
کشش سطحی (N/m)	$\gamma$

7- مراجع

[1] SH. Rhee, T. Kawamura, Li H. propeller cavitation study using An unstructured grid based Navier-Stokes solver, *J Fluids Eng*, Vol. 127, pp. 986-994, 2005.

[2] Gl. Chahine, Nuclei effects on cavitation inception and noise, *25th Symposium on naval hydrodynamic*, St. John's, New Urland and Labrador, Canada, 8-13 August, 2004.

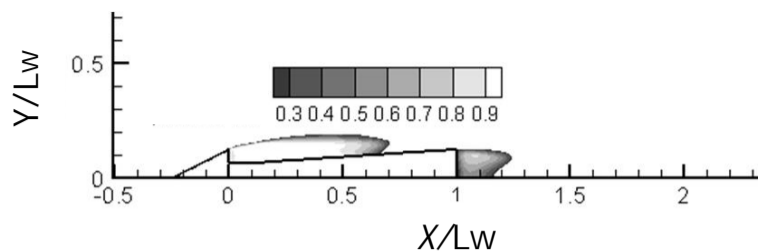
[3] A. Kubota, H. Kato, YamaguchiH, A new modeling of cavitating Flows a numerical study of unsteady cavitation on a hydro Foil section, *J Fluid Mech*, Vol. 240, pp. 59-96, 1994.

[4] V. Ahuja, A. Hosangadi, A runajatesan S, Simulations of cavitating flows using hybrid unstructured meshes, *J Fluids Eng*, Vol, 253, pp, 3685-92, 2001.

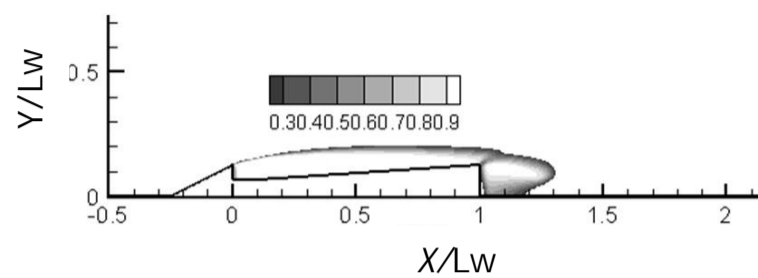
[5] S. Park, SH. Rhee, Investigation for the characteristics of cavitation modeling for computational fluid dynamics, *J Soc Naval Archi Korea*, Vol, 47, pp, 657-669, 2010.

[6] X. Wu, GL. Chahine, Charactrization of the content of the cavity behind a high-speed supercavitating body, *J Fluid Eng*, Vol, 129, pp, 36-45, 2007.

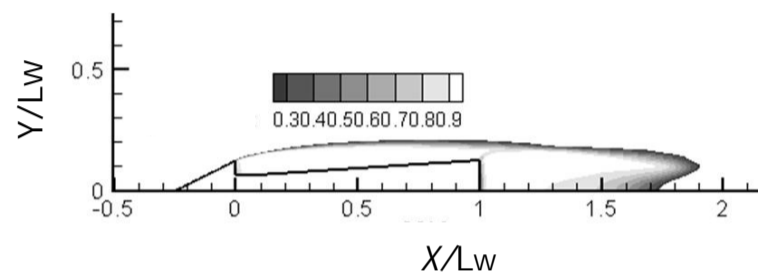
[7] X. Li, G. Wang, M. Zhang, W. Shyy, Structures of supercavitating multiphase flows, *J Therm Sci*, Vol, 47, pp, 1263-75, 2008.



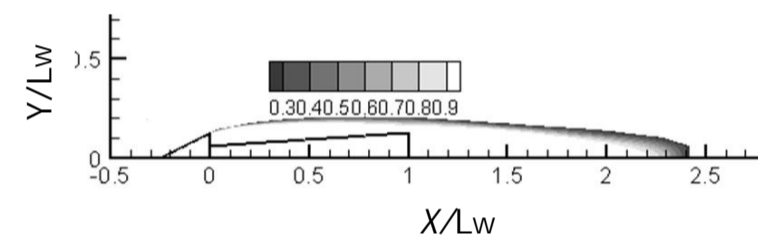
عدد کاویتاسیون 0/06 در زمان 0.004 ثانیه



عدد کاویتاسیون 0/06 در زمان 0.008 ثانیه



عدد کاویتاسیون 0/06 در زمان 0.012 ثانیه



عدد کاویتاسیون 0/06 در زمان 0.015 ثانیه

شکل 22 کانتور کسر حجمی بخار

استاندارد استفاده گردید.

در مرحله دوم به منظور شکل گیری پدیده ابر کاواک اطراف گوه، تحلیل جریان در اطراف یک کاواک زا گوه ای شکل در سه زاویه 15، 30 و 45 درجه صورت گرفت. انتقال جرم و افزایش طول کاواک همراه با کاهش عدد کاویتاسیون مشاهده شد. نتایج حاصل از کاواک زا 15 درجه با نتایج تحلیلی [22] صحنه سنجی گردید. سپس ضرایب مربوط به رابطه طول کاواک تعیین گردید و سه رابطه یکسان با ضرایب متفاوت حاصل شد. اختلاف بسیار کمی در ضریب رابطه 16 مشاهده می شود.

در مرحله سوم تحلیل جریان در اطراف یک جسم شناور همراه با کاواک زا گوه ای انجام پذیرفت. با کاهش عدد کاویتاسیون کاواک در پشت کاواک زا و در انتهای بدنه شکل می گیرد سپس کاواک روی بدنه رشد کرده و به کاواک پشت بدنه اتصال می یابد و در نهایت یک کاواک یکپارچه شکل می گیرد. در اعداد کاویتاسیون بالا فقط شاهد تولید کاواک در پشت کاواک زا هستیم. نتایج حاصل با نتایج تجربی [22] در اعداد مختلف سوپر کاویتاسیون صحنه سنجی شد سپس ضرایب مربوط به رابطه طول کاواک تعیین گردید و رابطه محاسبه طول کاواک حاصل شد.

جریان سوپر کاویتاسیون و روابط به دست آمده جهت محاسبه طول کاواک برای هر حالت متفاوت می باشند و متناسب با هندسه جسم و عدد کاویتاسیون متغیر می باشند. در همه حالت ها طول کاواک با کاهش عدد کاویتاسیون افزایش می یابد. تحلیل عددی برای طول کاواک با نتایج تجربی

- paper, FEDSM 99-7364, San Francisco, California, 18-23 July, 1999.
- [15] G. Schnerr, J. Sauer, Physical and numerical modeling of Unsteady cavitation dynamics, *In: 4<sup>th</sup> international conference on multiphase flows*, New Orleans, LA, 27 May-1 June, 2001.
- [16] A.K. Singhal, M.M. Athavale, H. Li, Y. Jiang, Mathematical basis and validation of the full cavitation model, *J Fluids Eng*, Vol, 124, pp, 617-24, 2002.
- [17] J.R. Edwards, R.K. Frankline, M.S. Liou, Low-diffusion flux-splitting methods for real fluid flows with phase transitions, *AIAA J*, Vol, 38, No, 9, pp, 1624-33, 2003.
- [18] H. Rouse, J.S. McNown, Cavitation and pressure distribution in engineering, *Bulletin 32*, State University of Iowa, 1948.
- [19] P.R. Spalart, S.R. Allmaras, A one equation turbulence model for aerodynamic flows, *In: 30<sup>th</sup> AIAA aerospace science meeting & exhibition*, AIAA Paper 92-439, Reno, NV, 6-9 January, 1992.
- [20] S. Park, S. Rhee, Computational analysis of turbulent Super-cavitating flow around a two-dimensional Wedge- Shape cavitator geometry, *J Computers & Fluids*, Vol, 70, pp, 73-85, 2012.
- [21] J.P. Franc, J.M. Michel, *Fundamental Of Cavitation Springer Science*, 2005.
- [22] B.K. Ahn, T.K. Lee, H.T. Kim, C.S. LEE, Experimental investigation of supercavitating flows, *Int J Naval Archit Ocean Eng*, Vol, 3, pp, 123-31, 2012.
- [8] A.N. Varghese, J.S. Uhlman, I.N. Kirschner, Numerical analysis of high-speed bodies in partially cavitating axisymmetric flow, *J Fluids Eng*, Vol, 127, pp, 41-54, 2005.
- [9] R. Shafaghat, S.M. Hosseinalipour, N.M. Nouri, I. Lashgari, Shape optimization of two-dimensional cavitators in supercavitating flows using NSGA II algorithm, *Appl Ocean Res*, Vol. 30, pp, 305-10, 2009.
- [10] B.K. Ahn, C.S. Lee, H.T. Kim, Experimental and numerical studies on supercavitating flow of axisymmetric cavitators, *Int J Naval Archit Ocean Eng*, Vol, 2, pp, 39-44, 2010.
- [11] J.W. Lindau, R.F. Kunz, J.M. Mulherin, H. Dreyer, D.R. Stinebring, Fully coupled, 6-DOF to Urans, modeling of cavitating flows around a supercavitating vehicles, *5<sup>th</sup> international symposium on cavitation, Osaka, Japan*, 1-4 November, 2003.
- [12] B.E. Launder, D.B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence, Acad Press*, 1972.
- [13] C.L. Merkle, J. Feng, P.E. Buelow, Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation, *In: 3<sup>rd</sup> international symposium on cavitation, Grenoble, France*, 7-10 April, 1998.
- [14] R.F. Kunz, D.R. Stinebring, T.S. Chyczewski, D.A. Boger, H.J. Gibeling, Multi-phase CFD analysis of natural and ventilated Cavitation about submerged bodies, *In: 3<sup>rd</sup> ASME joint fluid engineering conference, ASME*