



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

مهدی معرفت^{1*}، سهراب طهماسبی²، محمدرضا انصاری³

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

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

چکیده

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 کلاهک 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:

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)

می گردد.

در کاربردهای دریایی این پدیده بسیار مفید است و با تشکیل سوپرکاویتاسیون می توان پسا اصطکاکی روی بدنه را شدیداً کاهش داد. همچنین سرعت یک جسم رونده در زیر آب را با استفاده از این پدیده می توان به بیش از 200 گره دریایی رساند. لذا برای استفاده از این پدیده، آگاهی از فیزیک و پیش بینی رفتار آن بسیار ضروری است. با توجه به اهمیت موضوع در سال های اخیر به واسطه توسعه روش های دینامیک محاسباتی، مطالعات عددی بر روی شبیه سازی فیزیکی پدیده به صورت پیشرفته ای امکان پذیر گشته است [1]. به طور کلی در شبیه سازی مدل های مختلف از دو دیدگاه زیر استفاده می شود:

1) مدل لاگرانژی (حباب های مجزا) 2) مدل اویلری (روش پیوسته)

در دیدگاه لاگرانژی رفتار حباب ها به طور مجزا مدنظر قرار می گیرند و از معادلات دینامیک حباب ها استفاده می شود. 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 می شود. لذا جریان مخلوط همگن با یک سرعت یکسان حرکت می کند و هویت هر فاز با یک معادله انتقال کسر حجمی مستقل تعیین می گردد. دیدگاه اویلری نیز به دو دسته تقسیم می گردد:

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

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

مدل های انتقال جرم توسط پارک و ری [5] به شکل خلاصه در جدول 1 ارائه گردیده است. مطالعات متعددی بر روی سوپرکاویتاسیون توسط روش های عددی و تجربی صورت گرفته است که معمولاً نتایج تجربی به واسطه اندازه گیری های 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 کاواک¹ را اندازه گیری نمودند. لی و همکاران [7] جریان کاواک را با استفاده از دوربین سرعت بالا رؤیت نمودند و صحت تطبیق نتایج را با مدل های 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 هندسه های کروی و مخروطی و زوایای مختلف مخروط در شعاع های مختلف نیمکره را نشان دادند.

شفقت و همکاران [9] با استفاده از روش المان مرزی بهینه سازی شکل کاواک² دوبعدی را نشان دادند. با استفاده از شکل کاواک² ضریب پسا را کاهش دادند. آهن و همکاران [10] طول های کاواک تولید شده به وسیله کاواک را توسط روش المان مرزی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه کردند. کاهش ضریب پسا با استفاده از تغییر شکل کاواک² را فراهم گردید. لیندا و همکاران [11] جریان ابر کاواک اطراف یک دیسک تخت را شبیه سازی

جدول 1 مدل های انتقال جرم [5]

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

1- cavity
2- cavitator

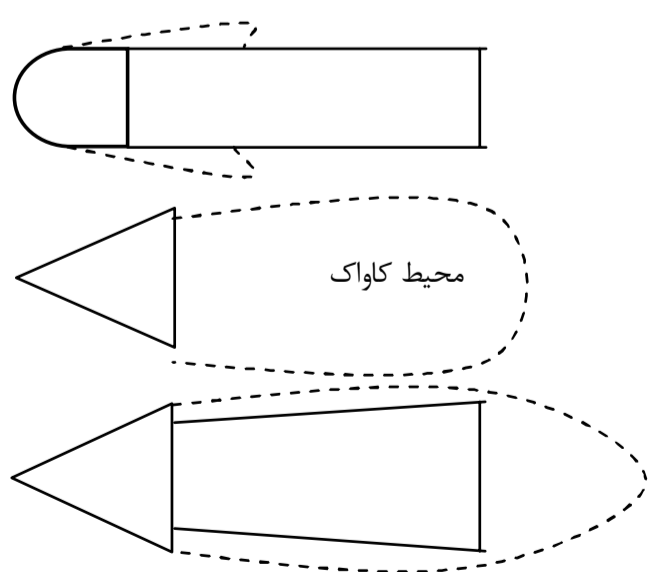
نمودند. میزان پسا و طول کاواک حاصل از دیسک را بر اساس قطر دیسک محاسبه نمودند. طول کاواک بدست آمده در کارهای قبلی برای تعداد محدودی عدد کاویتاسیون ارائه شده، در مطالعه حاضر با توجه به تحلیل های انجام شده و روابط ارائه شده، طول کاواک را برای طیف اعداد کاویتاسیون میتوان بدست آورد. لذا در مطالعه حاضر شبیه 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 استوانه ای با کلاهک نیمکره ای شبیه سازی گردید و نتایج تحلیلی حاصل شده با نتایج تجربی اعتبار سنجی گردید. در مرحله دوم به منظور نحوه شکل گیری پدیده ابر کاواک اطراف گوه، تحلیل جریان ابر کاواک در اطراف یک کاواک زا گوه ای شکل در سه زاویه 15 و 30 و 45 درجه صورت گرفت. مهم ترین پارامترهای بدست آمده در تحلیل بدنه استوانه ای با کلاهک نیمکره ای، تثبیت مدل انتقال جرم و مدل آشفتگی است که در کاواک زا گوه ای با زاویه 15 درجه استفاده و با نتایج تحلیلی نیز صحت سنجی گردید لذا برای زوایای دیگر مثل 30 و 45 درجه نیز می تواند معتبر باشد. در مرحله سوم تحلیل جریان ابر کاواک در اطراف یک جسم شناور همراه با کاواک زا گوه ای 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 می توان 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 گوه ای 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 هندسه های فوق از 5×10^5 تا 9×10^5 تعریف گردیده است. عدد کاویتاسیون براساس رابطه (1) تعریف می گردد:

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

که P_0 فشار بخار و ρ جرم حجمی سیال است. با توجه به سرعت های مختلف جریان آزاد، عدد کاویتاسیون در محدوده 0/06-2/2 متناسب با هندسه های تعیین شده حاصل می گردد.



شکل 1 هندسه های تحلیل شده

3- روش حل

1-3- 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 τ تانسور تنش آشفتگی است، لزجت موثر به شکل رابطه (5) است.

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

که در آن

μ_t لزجت آشفتگی μ لزجت مولکولی، و μ_{eff} لزجت موثر جرم جمعی بوده و لزجت فاز مخلوط به شکل روابط (6) و (7) می باشد.

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

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

α کسر حجمی و v و L به فرم زیرنویس معرف بخار و سیال مایع می باشند.

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

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

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

لزجت آشفتگی μ_t از ترکیب k و ε به شکل رابطه (9) است.

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

معادلات انتقال k و ε 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_μ 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 آشفتگی 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 α_v کسر حجمی بخار می باشد. δ_v عدد پراتنل آشفتگی برای سرعت می باشد و γ 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 آشفتگی 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 فلوئنت¹ انجام گردیده است، تحلیل بصورت گذرا و متقارن محوری می باشد. از الگوریتم تصحیح فشار² برای حل معادلات کوپله سرعت و فشار بهره گیری شده، گسسته سازی ترمهای جابجایی بصورت پیشرو³ 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 حجمی بخار و توزیع آن در شبکه حل بدست می آید. براساس مقادیر کسر حجمی 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 کلاهدک 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 پذیر¹ و اسپالارت آلماراس² [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_∞) معادل $0/2$ و $0/3$ و $0/4$ و $0/5$ لحاظ گردیده است.

3-4- استقلال شبکه

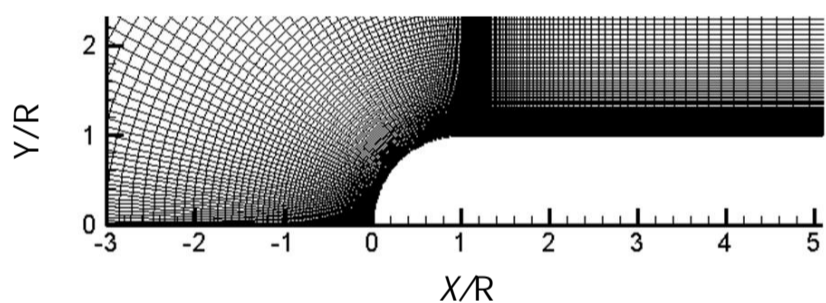
جهت بررسی استقلال میدان حل از تعداد سلول های استفاده شده، در شکل 5 سه حالت از مش بندی مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می گردد که برای عدد کاویتاسیون $0/3$ چنانچه میدان حل از 25500 سلول تشکیل گردد همگرایی لازم محقق می شود. محور افقی معرف طول روی سطح نیمکره نسبت به قطر نیمکره و محور عمودی نیز نشان دهنده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

3-5- مدل انتقال جرم

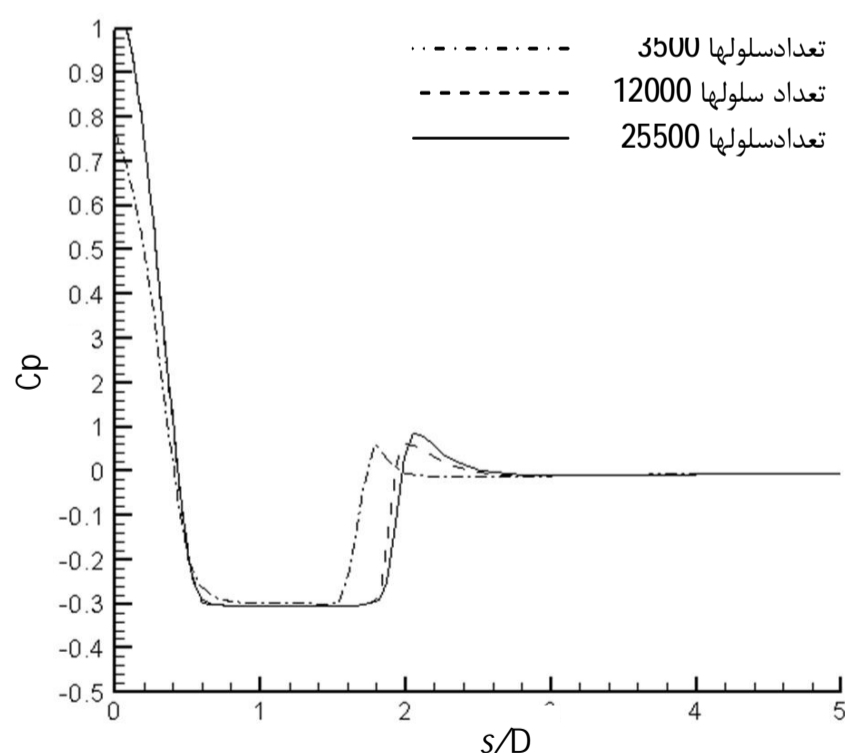
در جریان کاواک مدل انتقال جرم نقش مهمی را ایفا می کند؛ بنابراین انتخاب مدل انتقال جرم می تواند بر دقت پیش بینی بسیار تأثیرگذار باشد. مدل اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد برای عدد کاویتاسیون $0/3$ مبنای تحلیل هست.

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

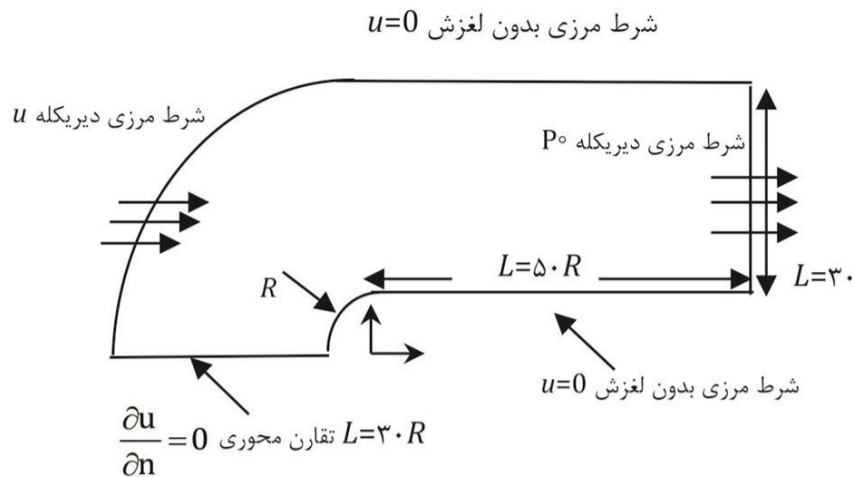


شکل 4 مش بندی

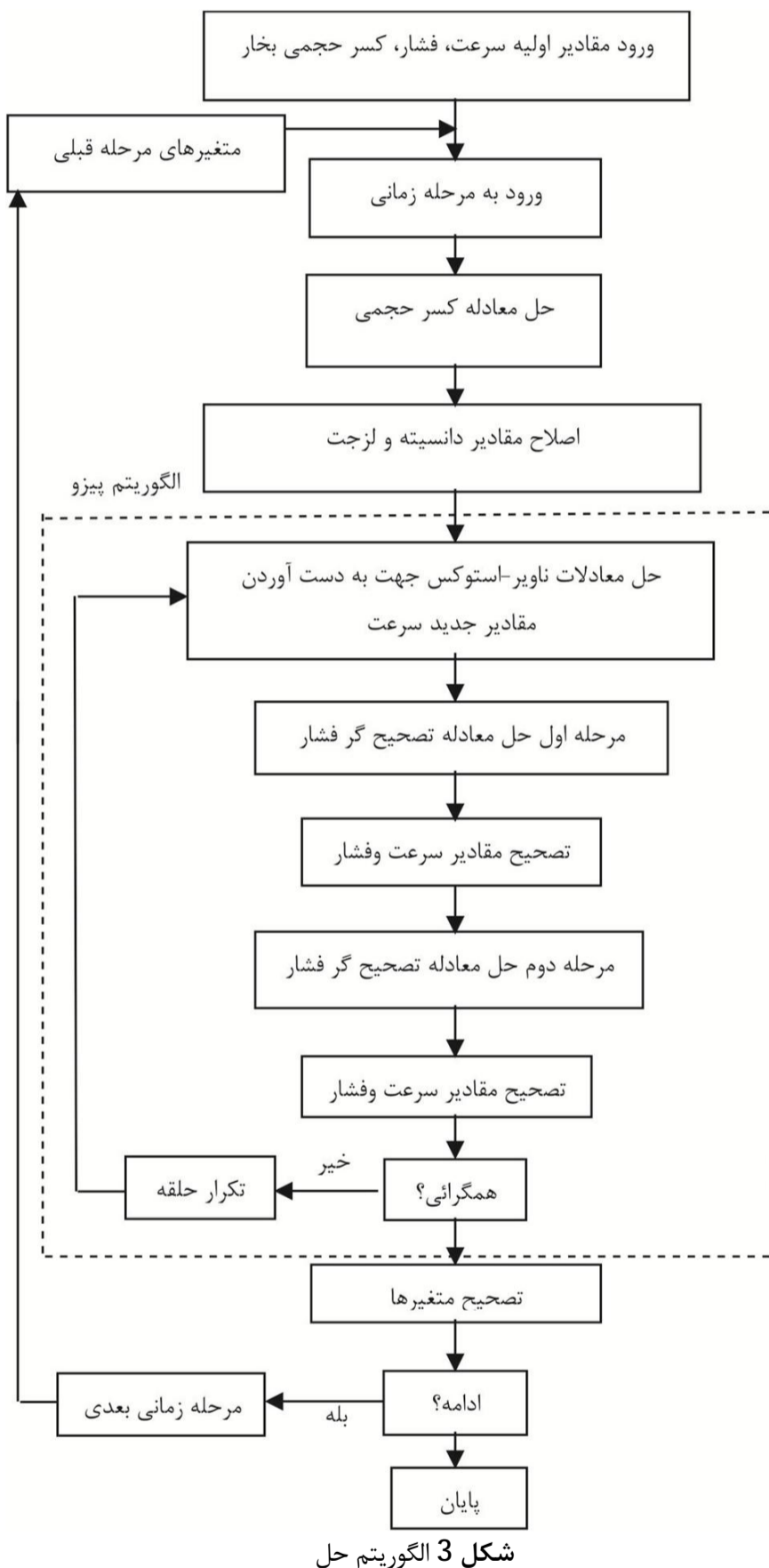


شکل 5 بررسی استقلال شبکه

1- Realizable
2- Spallart-almaras



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.

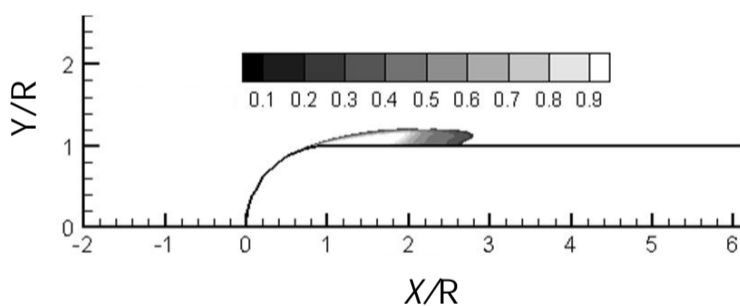
میزان تغییر فاز در قسمت سطح مشترک کاواک و در داخل کاواک توسط مدل اسپالارت آلماراس و مدل $k-\epsilon$ تحقق‌پذیر کمتر از مدل $k-\epsilon$ استاندارد هست، همچنین طول کاواک و کسر حجمی بخار در مدل $k-\epsilon$ استاندارد نسبت به مدل اسپالارت آلماراس و مدل $k-\epsilon$ تحقق‌پذیر کامل‌تر هست؛ بنابراین در کلیه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

3-7- تأثیر عدد کاویتاسیون

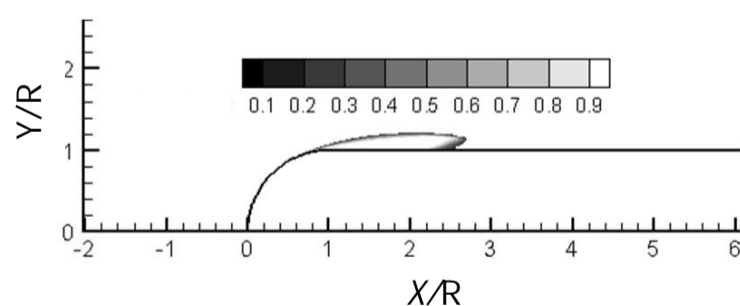
با توجه به تعیین مدل انتقال جرم و مدل آشفتگی لازم است که تأثیرات ناشی از تغییر عدد کاویتاسیون بر روی طول کاواک مشاهده گردد در شکل 11 نتایج حاصل از این تحلیل ارائه شده است. توزیع ضریب فشار روی کلاهک برای اعداد کاویتاسیون مختلف به دست آمد و با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. این تحلیل برای اعداد کاویتاسیون 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 می‌یابد طول کاواک به واسطه کاهش فشار در حلقه بسته کاواک افزایش می‌یابد. سطح فشار داخل کاواک معادل فشار بخار هست و قسمت ثابت C_p ارائه شده تقریباً معادل عدد کاویتاسیون یا σ هست. توزیع فشار حاصل شده نشان می‌دهد 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 می‌گردد.

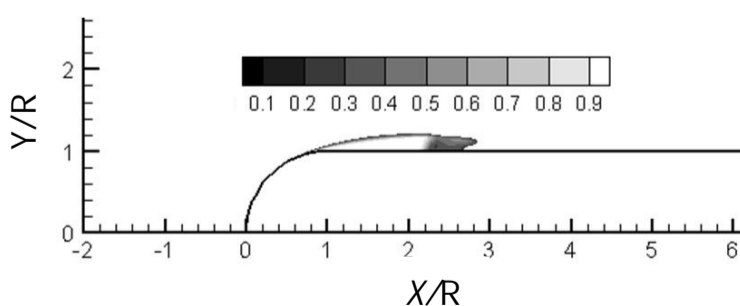
شکل 12 تغییر طول کاواک را نسبت به تغییر عدد کاویتاسیون نشان می‌دهد. مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج تجربی نشان می‌دهد که استفاده از مدل انتقال جرم سینگال و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ مورد تأیید هست.



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 $k-\epsilon$ تحقق‌پذیر در عدد کاویتاسیون 0/3

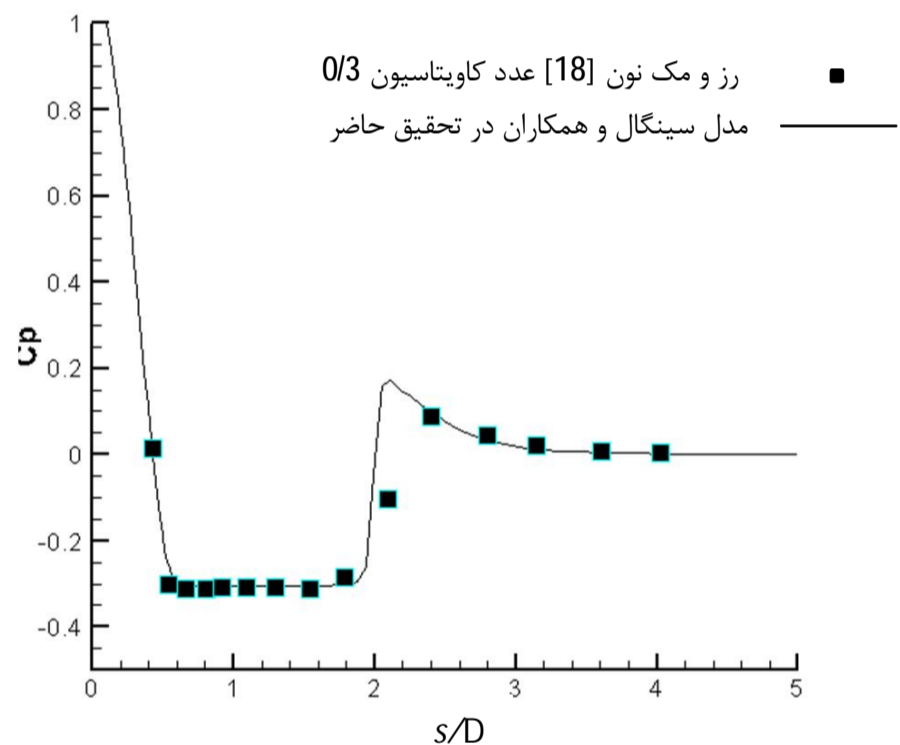
سطح نیمکره نسبت به قطر نیمکره و محور عمودی نیز نشان‌دهنده C_p هست که قسمت ثابت آن معادل عدد کاویتاسیون یا σ است.

مدل انتقال جرم بکار گرفته شده، نتایج بسیار نزدیکی با نتایج تجربی را نشان می‌دهد. لذا مدل سینگال و همکاران به‌عنوان مدل انتقال جرم در کلیه تحلیل‌ها استفاده گردیده است [20]. با توجه به محدودیت فضای مقاله ارائه معادلات، به‌کارگیری و مقایسه مدل‌های مختلف انتقال جرم امکان‌پذیر نیست.

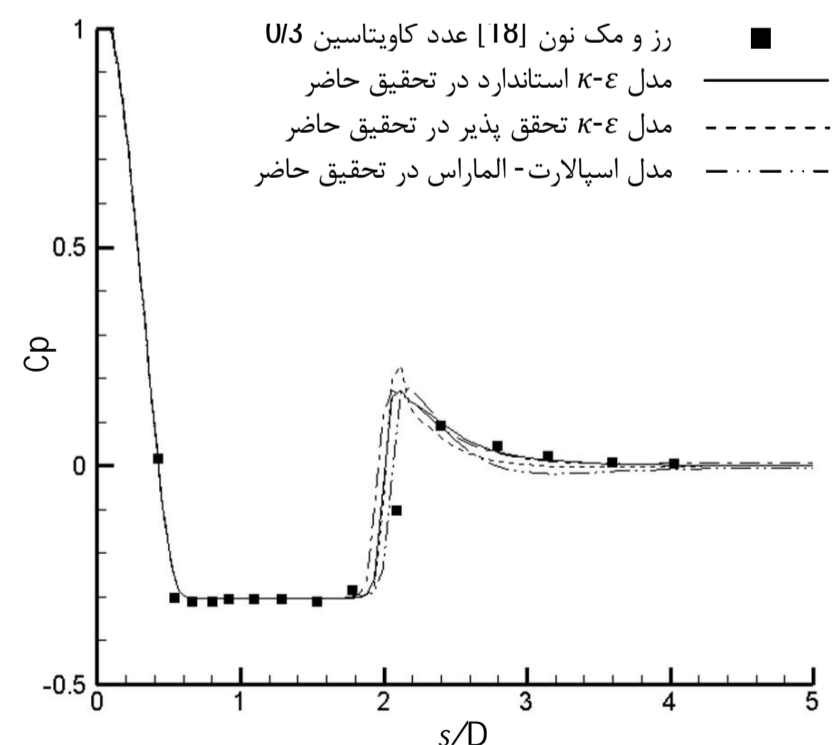
3-6- مقایسه مدل‌های آشفتگی

مدل اغتشاش در شکل‌گیری جریان کاویتاسیون مهم هست؛ بنابراین انتخاب مدل آشفتگی می‌تواند بر دقت تشکیل کاواک تأثیرگذار باشد. در این تحلیل سه مدل آشفتگی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. شکل 7 مقایسه مدل‌های اغتشاش را نشان می‌دهد.

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



شکل 6 مدل انتقال جرم



شکل 7 مقایسه مدل‌های 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. σ 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 C_p به دست می آید که قسمت ثابت آن معادل عدد کاویتاسیون یا σ می باشد. در C_p 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 گوه ای

در این قسمت جهت بررسی کاویتاسیون از یک مدل گوه ای 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 کلاهدک 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 سلول ها 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].

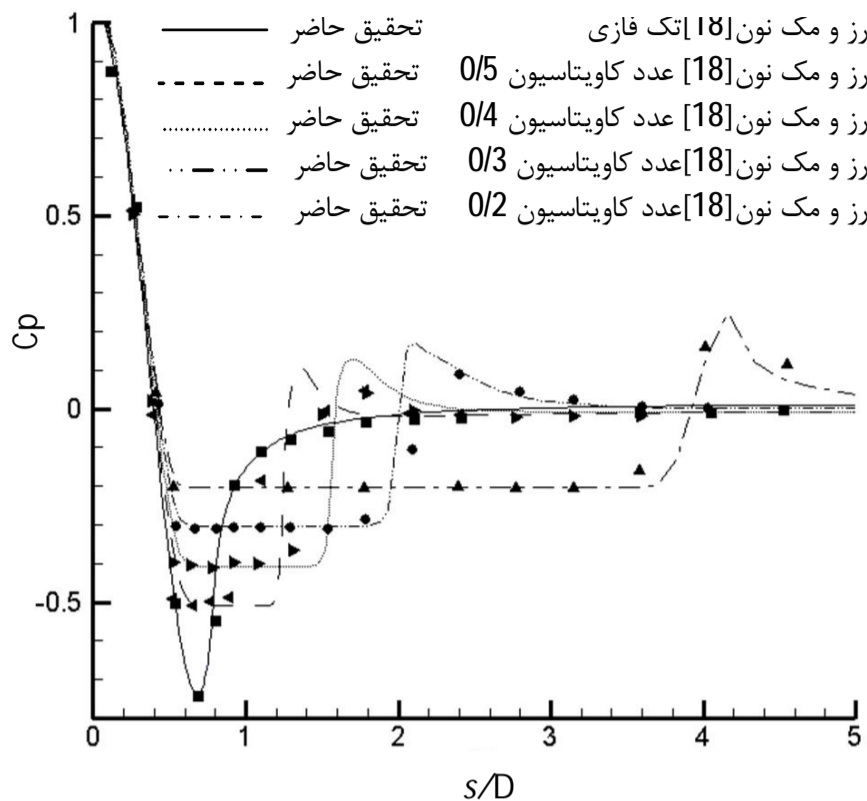
$$\frac{L_c}{L_w} = 0.235\sigma^{-1.7} \quad (15)$$

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

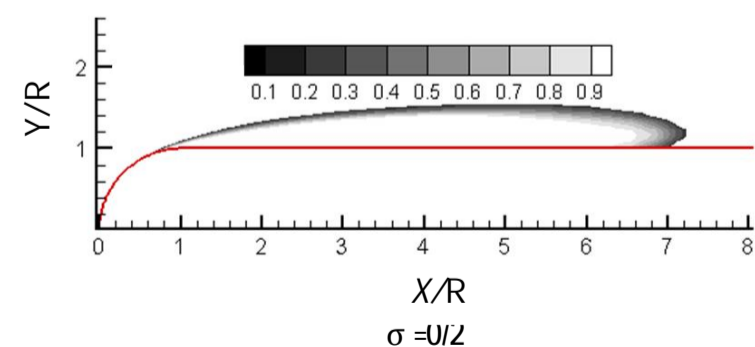
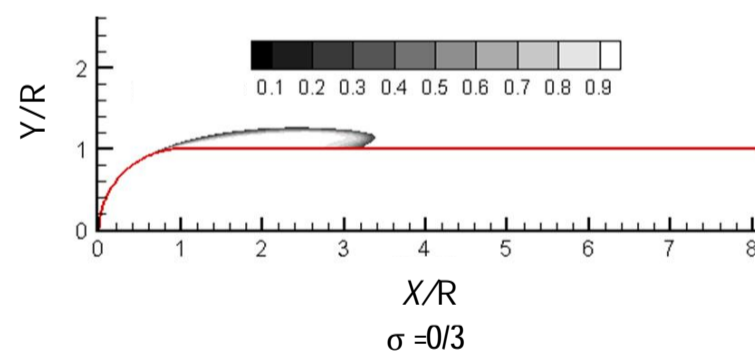
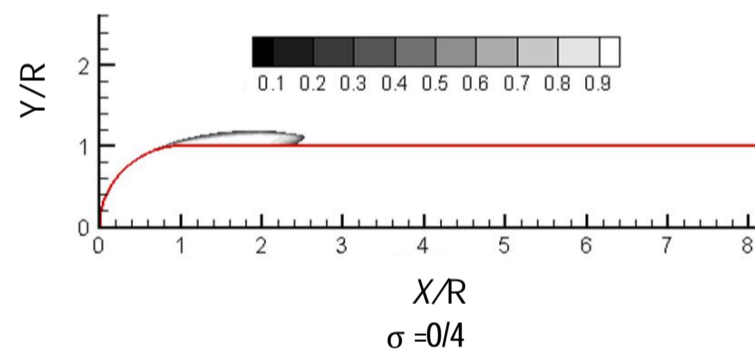
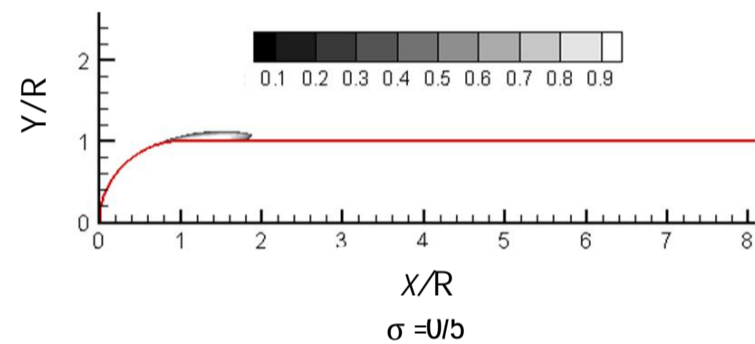
L_c طول کاواک

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 کلاهدک کروی

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

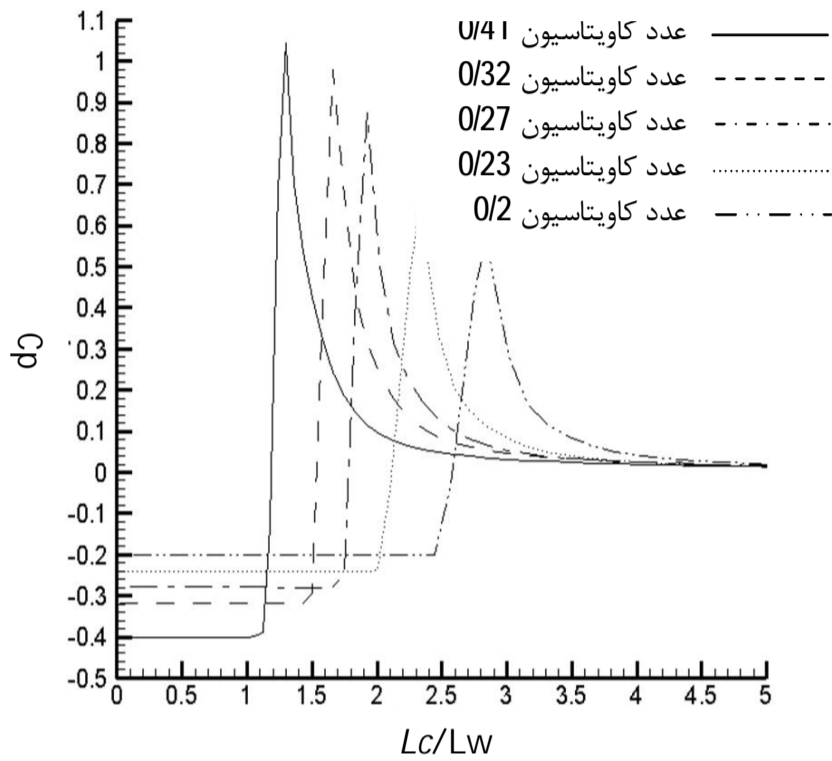
کانتور کسر حجمی بخار در عدد کاویتاسیون 0/1 نشان داده شده است.

جدول 2 تغییرات طول کاواک

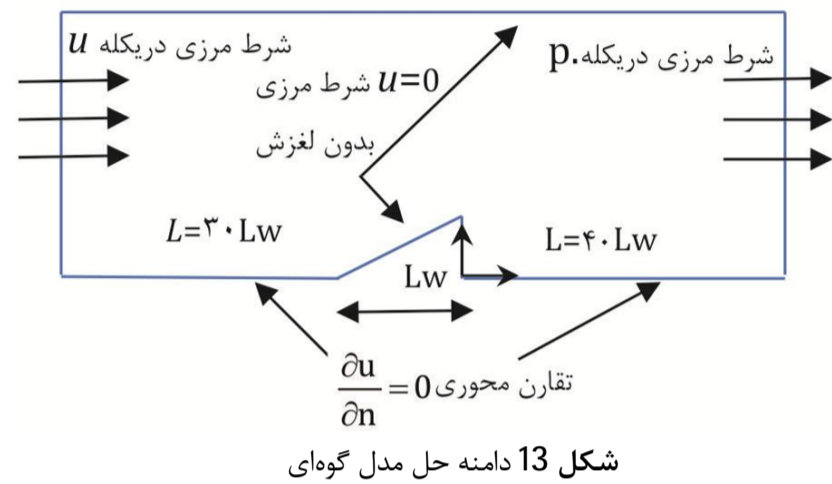
طول کاواک به قطر نیمکره	عدد کاویتاسیون
3/19	0/2
1/47	0/3
0/85	0/4
0/56	0/5

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

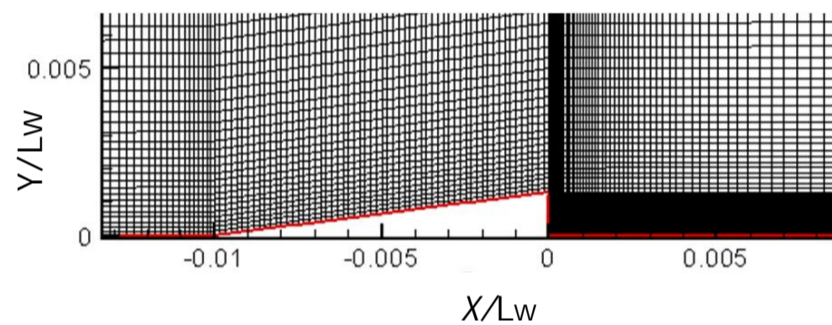
طول کاواک به طول گوه	طول کاواک به طول گوه	عدد کاویتاسیون
30 درجه	45 درجه	
3/62	3/78	0/2
1/82	1/86	0/3
1/12	1/13	0/4
0/76	0/76	0/5



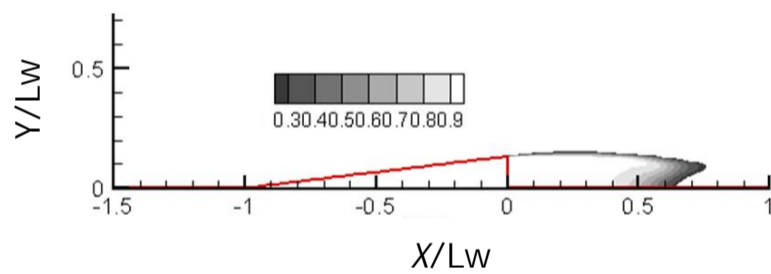
شکل 13 دامنه حل مدل گوه ای



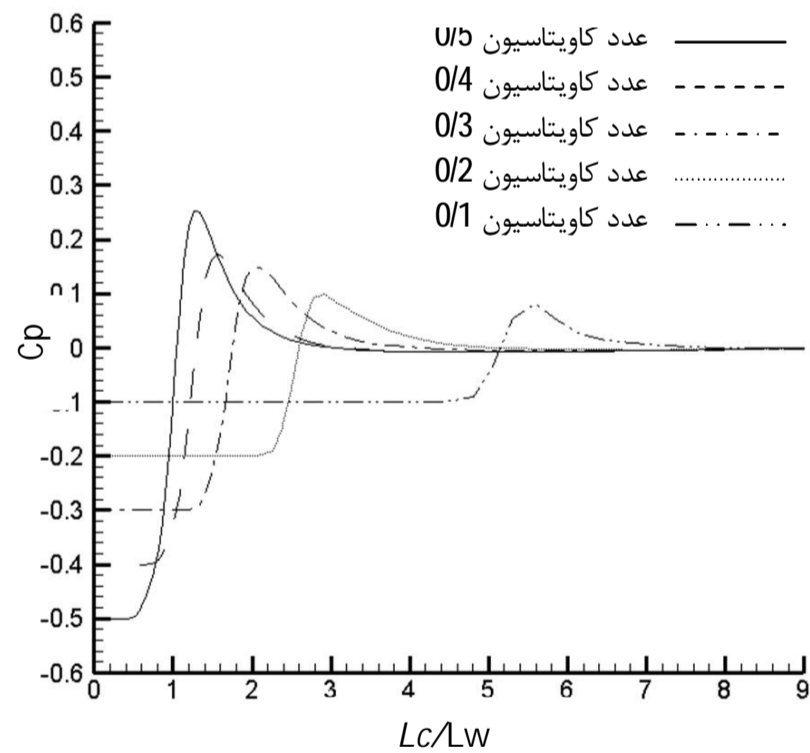
شکل 14 مش بندی گوه



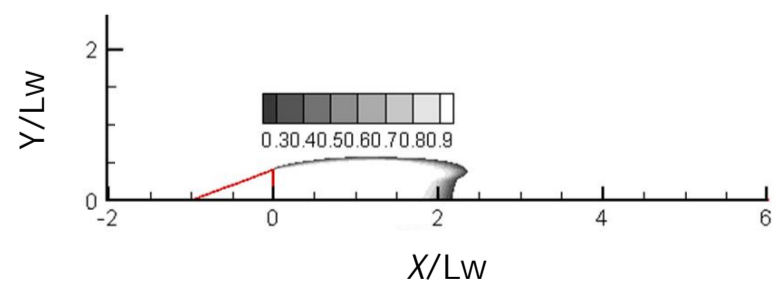
شکل 15 تأثیر عدد کاویتاسیون روی طول کاواک در گوه 45 درجه



شکل 16 کسر حجمی بخار در sigma = 0/1



شکل 17 تأثیر عدد کاویتاسیون روی طول کاواک در گوه 30 درجه



شکل 18 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.

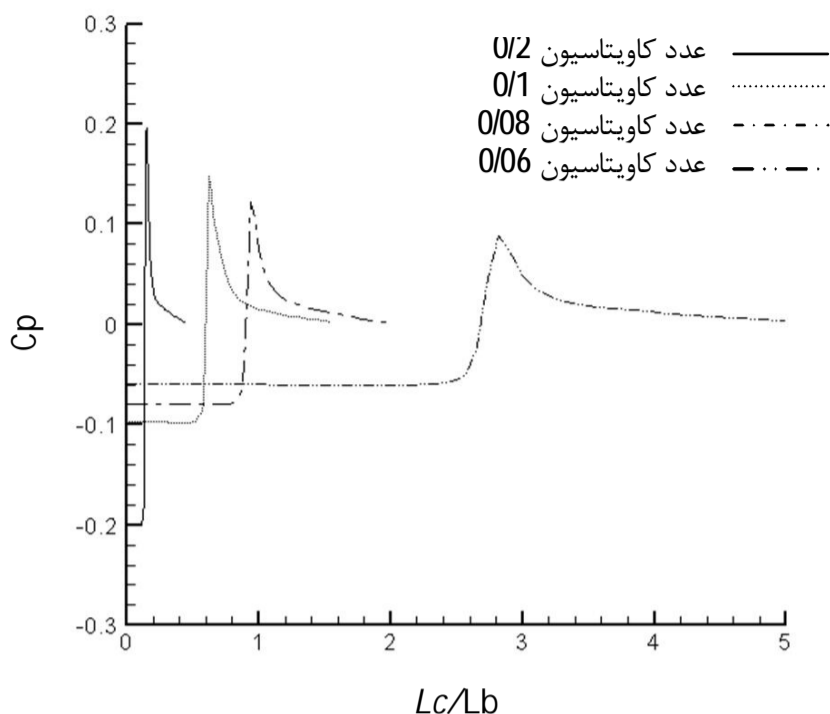
$$\frac{L_c}{L_w} = 0.243\sigma^{-1.66} \quad (17)$$

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



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 می‌گیرد. مدل‌های انتقال جرم به واسطه اینکه از مدل اوپلری استفاده می‌کنند نمی‌توانند انتقال حباب‌های کوچک را در ناحیه جریان نشان دهند.

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

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

با توجه به داده‌های مندرج در جدول 5 طول کاواک بر اساس رابطه (18) استخراج می‌گردد.

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

L_c طول کاواک

L_b طول بدنه

5- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از روش حجم محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی پدیده سوپر کاویتاسیون اطراف هندسه متقارن یک مدل جسم شناور انجام گرفت. تقارن هندسه جسم باعث گردید که تحلیل‌ها 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 تحلیل‌ها 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	اهن 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

جدول 4 تغییرات طول کاواک روی گوه 15 درجه

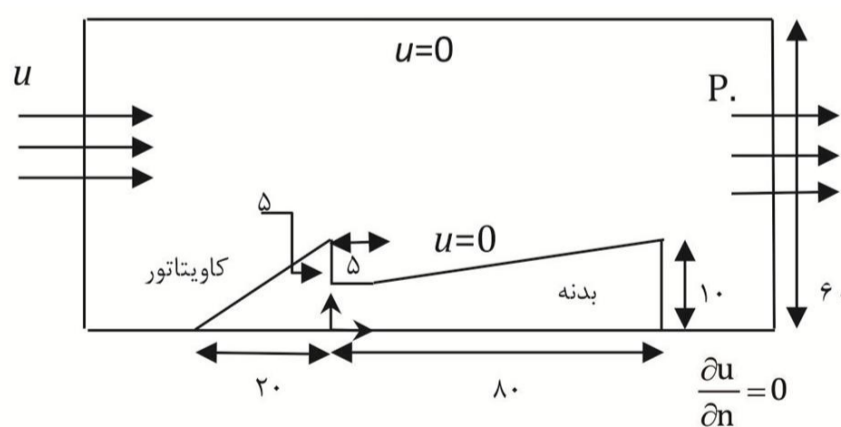
عدد کاویتاسیون	طول کاواک به طول گوه	آهن و همکاران [22]
0/2	3/51	3/50
0/23	2/78	2/98
0/27	2/13	1/98
0/32	1/61	1/48
0/41	1/06	0/97

سریع‌تر انجام می‌گیرد لذا کاویتاسیون بهتر و راحت‌تر پیش‌بینی می‌گردد.

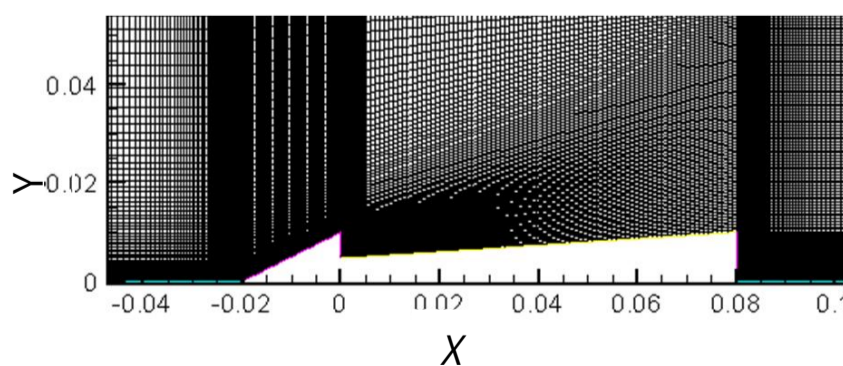
4-5- بدنه با کاواک زا

بدنه با کاواک زا، میدان حل و شبکه‌بندی در شکل 19 و 20 نشان داده شده است. یک بدنه با طول 80 میلی‌متر و نیمه ارتفاع 10 میلی‌متر طراحی شده است. ارتفاع دامنه محاسباتی معادل 60 میلی‌متر 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 گوه‌ای کاواک زا مسلم است که فاصله بین ورودی و بدنه باید بیشتر در نظر گرفته شود؛ بنابراین فاصله بین بدنه و کاواک زا کوچک‌تر 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 قدم‌های زمانی مختلف در شکل 22 نشان داده شده است. کاواک روی بدنه شروع می‌شود و با افزایش زمان رشد می‌کند. وقتی زمان به 0/008 می‌رسد، کاواک به وجود آمده روی بدنه و کاواک در پشت بدنه به یکدیگر ملحق می‌شوند. قابل توجه است که به



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)	κ
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_∞
بردار سرعت (m/s)	\vec{v}_m
سرعت مشخصه (m/s)	v_{ch}
علائم یونانی	
کسر حجمی بخار	α_v
نرخ اتلاف آشفتگی (m^2/s^3)	ε
لزجت (kg/ms)	μ
لزجت مؤثر (kg/ms)	μ_{eff}
لزجت آشفتگی (kg/ms)	μ_t
لزجت گردابه آشفتگی (m^2/s)	ν_t
جرم حجمی (kg/m^3)	ρ
عدد کاویتاسیون	σ
تانسور تنش آشفتگی (Pa)	τ
عدد پرانتل	δ_v
کشش سطحی (N/m)	γ

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.

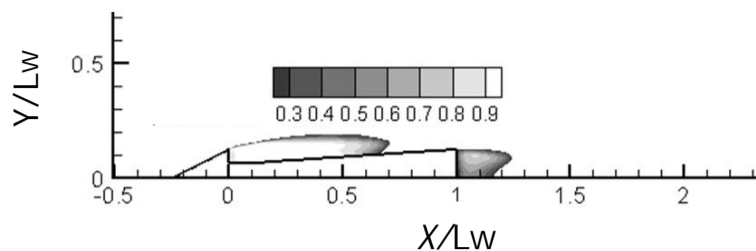
[3] A. Kubota, H. Kato, YamaguchiH, A new modeling of cavitating Flows a numerical study of unsteady cavitation on a hydro Foil section, *J Fluid Mech*, Vol. 240, pp. 59-96, 1994.

[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.

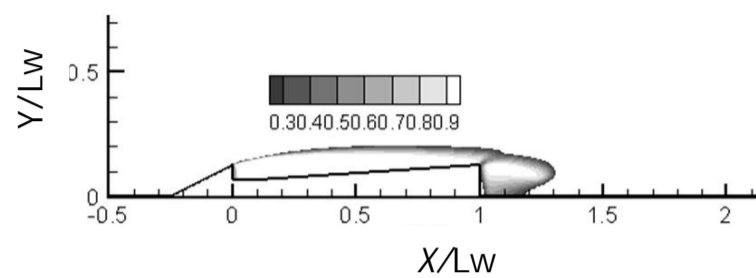
[5] S. Park, SH. Rhee, Investigation for the characteristics of cavitation modeling for computational fluid dynamics, *J Soc Naval Archi Korea*, Vol, 47, pp, 657-669, 2010.

[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.

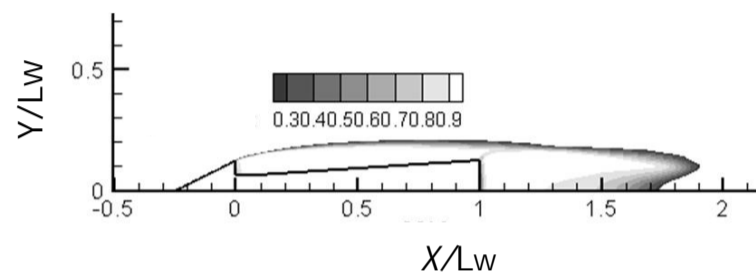
[7] X. Li, G. Wang, M. Zhang, W. Shyy, Structures of supercavitating multiphase flows, *J Therm Sci*, Vol, 47, pp, 1263-75, 2008.



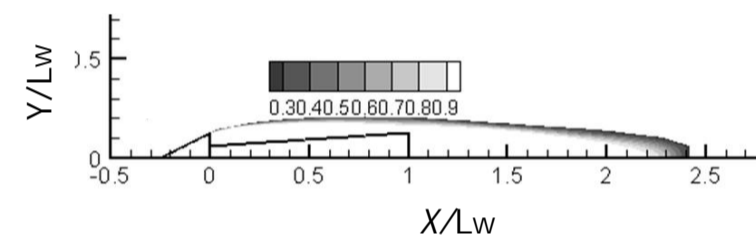
عدد کاویتاسیون 0/06 در زمان 0.004 ثانیه



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: 4th 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: 30th 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, *5th 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.O. Buelow, Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation, *In: 3rd 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: 3rd ASME joint fluid engineering conference, ASME*