



# مطالعه تجربی و عددی مشخصه‌های ابرکاواک ایجاد شده پشت کاواک‌سازهای مخروطی

محمود سالاری<sup>۱\*</sup>، سعید فراحت<sup>۲</sup>، سید مرتضی جوادپور<sup>۳</sup>

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

\* تهران، صندوق پستی ۱۸۷-۱۶۵۳۵، msalari@ihu.ac.ir

**چکیده-** در این تحقیق ابتدا به صورت تجربی جریان ابرکاواک روی سه کاواک‌ساز مخروطی با زوایای نوک مخروط ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در یک تونل آب مدار باز مورد آزمایش و اندازه‌گیری قرار گرفته است. آزمایشات در یک تونل آب مدار باز در محدوده سرعت ۲۷ تا ۳۸ متر بر ثانیه انجام شده است. در مرحله بعد، جریان ابرکاواک حول کاواک‌سازهای مورد مطالعه، منطبق بر شرایط آزمایش‌های تجربی مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. مقایسه نتایج نشان دهنده سازگاری خوب بین نتایج عددی و تجربی بوده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مهم جریان‌های کاویتاسیونی همچون عدد کاویتاسیون، سرعت جریان و زاویه نوک کاواک‌ساز مخروطی بر روی ابعاد و شکل ناحیه حباب و روابط بین آنها مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است.

**کلیدواژگان:** تونل آب، ابرکاواک، کاواک‌ساز مخروطی، جریان دوفازی، دینامیک سیالات عددی.

## Experimental and numerical study of the characteristics of supercavities developed behind conical cavitators

M. Salari<sup>1\*</sup>, S. Farhat<sup>2</sup>, S. M. Javadpou<sup>3</sup>

1- Assoc. Prof., Dept. Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Dept. Mech. Eng., Sistan & Baluchestan Univ

3- Ph.D Candidate, Dept. Mech. Eng., Sistan & Baluchestan Univ.

\* P.O.B. 16535-187, Tehran, Iran. msalari@ihu.ac.ir

### Abstract

In this research, the dimensional characteristics of supercavities developed behind three different conical cavitators with conic angles of 30, 45 and 60 degrees are studied numerically and experimentally. The experiments were done in an open-loop water tunnel. The fluid flow velocity in the test section was between 27 to 38 m/s. Also the 3D multiphase fluid flows over the cavitators within the test section are investigated numerically. Good agreement was observed in comparison between the numerical and experimental results. Finally, effects of some important parameters .i.e. the cavitation index, inlet velocity and conic angle of the cavitators on the characteristics of the supercavities are discussed.

**Keywords:** Water Tunnel, Supercavitation, Cavitator, Two-Phase Flow, Computational Fluid Dynamic.

### ۱- مقدمه

حباب‌های کوچک در جریان‌های داخلی و یا خارجی توسعه و رشد می‌کند. چنانچه سرعت جریان عبوری از روی بدنه‌های

در برخی از جریان‌های هیدرودینامیکی، کاویتاسیون با تشکیل

سینگهال دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی و تئوری دارد. از طرف دیگر، بعضی از محققان مدل اغتشاش  $k - \varepsilon - \text{RNG}$  و همکاران [۴] در تحلیل پدیده ابرکاواک از روش حجم محدود و مدل اغتشاش  $k - \varepsilon - \text{RNG}$  و کینگ لی و همکاران [۵] مدل اغتشاش  $k - \omega - \text{SST}$  را برای تحلیل کاویتاسیون ورقه‌ای مناسب دانسته‌اند.

پدیده کاویتاسیون بر اساس شکل مسأله و تغییرات فشار انواع مختلفی دارد. در این بین محققان از جمله چنگ و همکاران [۶]، کینگ لی و همکاران [۵] و نوری و همکاران [۲] به بررسی دیگر حالت‌های کاویتاسیون پرداختند. چنگ و همکاران [۶] به بررسی عددی تقارن محوری حباب تشکیل شده در پشت دماغه رونده‌های زیر سطحی پرداختند. آنها بر مبنای تئوری جریان پتانسیل انواع کاویتاسیون را مورد مطالعه قرار داده و دریافتند که تغییرات فشار در کاویتاسیون جزئی فشار بسیار شدید است در حالی که در کاویتاسیون ورقه‌ای تقریباً ثابت است. کینگ لی و همکاران [۵] کاویتاسیون ورقه‌ای را بر روی یک هیدروفویل به صورت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از مدل اغتشاش  $k - \omega - \text{SST}$  مورد مطالعه قرار دادند. آنها جهت افزایش دقت نتایج از مدل اغتشاش  $k - \omega - \text{SST}$  اصلاح شده استفاده نموده‌اند. کاویتاسیون توده‌ای با کاواک‌سازهای مختلف به صورت عددی توسط نوری و همکاران [۲] مورد بررسی قرار گرفت. تاو [۷] ابرکاواک مصنوعی را به صورت تجربی و وانگ [۸] آنرا به صورت عددی مورد تحلیل قرار داده‌اند. همچنین بین و همکاران [۹] نیز به بررسی پدیده کاویتاسیون و ابرکاواک مصنوعی حول رونده‌های زیر سطحی پرداخته‌اند.

پژوهشگران با بررسی شکل حباب و تأثیر مؤثر بر آن سعی در بهینه‌سازی و کنترل حباب (کاواک) داشته‌اند. به عنوان مثال رابطه بین طول ابرکاواک و عدد کاویتاسیون توسط چاو و همکاران [۱۰] ارائه گردید. در این بین یو و همکاران [۱۱] پس از بررسی آزمایش کاواک‌ساز در تونل آب با حداکثر سرعت ۲۵ متر بر ثانیه دریافتند شکل و ابعاد حباب ابرکاواک طبیعی و مصنوعی در صورت تساوی عدد کاویتاسیون شباهت بسیاری دارد. در همین راستا برخی اثر کاواک‌ساز را بر روی شکل حباب و اثر آن را بر روی کاهش پسا مورد مطالعه قرار دادند.

مغروق افزایش یابد، در هر موقعیتی از جریان که فشار سیال از فشار اشباع مایع در دمای مورد نظر کمتر شود کاویتاسیون رخ می‌دهد. حباب (حفره) ایجاد شده را کاواک می‌نامند. پدیده ابرکاواک، پدیده تشکیل حباب بزرگ در اطراف پیش‌رونده‌های زیر سطحی سرعت بالا است که قسمت اعظمی از بدنه را در بر می‌گیرد. در برخی از ادوات زیر سطحی که برای طراحی در سرعت‌های بالا بکار می‌روند، لازم است تا به منظور کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت بدنه، با بکارگیری کاواک‌ساز در ناحیه دماغه، حباب جدایش کاویتاسیونی ایجاد شود تا نیروی مقاوم اصطکاکی آن به شدت کاهش یابد. امروزه این موضوع مبنای طراحی پیش‌رونده‌های زیر سطحی سرعت بالا قرار گرفته است. اندازه قطر و طول حباب ایجاد شده به فرم و منحنی کاواک‌ساز و سرعت حرکت بدنه بستگی دارد. به واسطه تغییر هندسه کاواک‌ساز می‌توان نرخ ایجاد کاویتاسیون و طول حباب ابرکاواک را تغییر و کنترل کرد. تمایل به ایجاد حباب با عدد بی بعد کاویتاسیون مشخص می‌شود که در رابطه (۱) معرفی شده است.

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

که در آن  $p$  و  $U$  به ترتیب فشار و سرعت مرجع،  $P_c$  فشار تبخیر مایع و  $\rho$  چگالی مایع هستند.

اولین تحقیقات تجربی در زمینه پدیده ابرکاواک به وسیله ریچارد [۱] انجام گرفت. ایشان به صورت تجربی جریان ابرکاواک با تقارن محوری را مورد مطالعه قرار داد.

در زمینه تحقیق در مورد ابرکاواک، بررسی‌های گسترده‌ای نیز برای پیش‌بینی این پدیده با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته است. در این میان برخی محققان تأثیر مدل اغتشاشی را در نتایج خود بررسی نموده‌اند و اکثر محققان مدل اغتشاشی  $k - \varepsilon$  را جهت مدل‌سازی پدیده ابرکاواک مناسب دانسته‌اند. نوری و همکاران [۲] با روش حجم محدود و با کمک از الگوریتم سیمپل جهت وابسته نمودن میدان سرعت و فشار، یک بدنه استوانه‌ای با دماغه نیم کروی، مخروطی و تخت را مورد تحلیل سه بعدی قرار دادند و پدیده ابرکاواک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در نتایج تحقیق خود دریافتند که مدل اغتشاش  $k - \varepsilon$  با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد. همچنین در بررسی دو بعدی جریان ابرکاواک، پارک و آرهی [۳] دریافتند مدل اغتشاش  $k - \varepsilon$  و مدل انتقال جرم

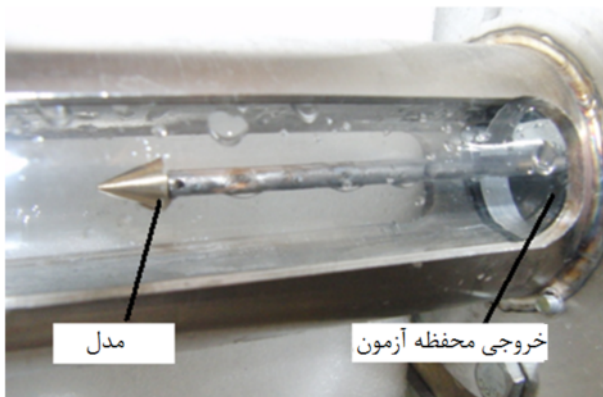
شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان روی هیدروفویل را به صورت دو بعدی مورد تحلیل عددی قرار دادند. آنها در مدل‌سازی انتقال جرم در جریان ابرکاواک، مدل کونز را پیشنهاد نمودند. همچنین تحلیل پدیده کاویتاسیون با روش المان مرزی توسط شفقت و همکاران [۲۴، ۱۸، ۱۷] و رشیدی و همکاران [۲۵] و پسندیده و همکاران [۲۶] پرداختند و دریافتند که این روش سازگاری خوبی با نتایج تجربی در اعداد کاویتاسیون بزرگ (بیشتر از ۰/۲) دارد. پسندیده و همکاران [۲۶] جریان ابرکاواک و کاویتاسیون جزئی را با استفاده از روش المان مرزی بر روی یک هیدروفویل مورد بررسی قرار دادند. این روش عددی، پدیده ابرکاواک را حول کاواک‌سازهایی با زاویه کم به خوبی پیش‌بینی می‌کند و با افزایش زاویه راس مخروط درصد خطا افزایش می‌یابد. چراغی و همکاران [۲۷] جریان ابرکاواک حول یک رونده زیرسطحی به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها در بررسی عددی خود از روش حجم محدود و مدل مخلوط چند فازی برای تحلیل جریان استفاده نموده‌اند. آنها نشان دادند در اعداد کاویتاسیون برابر، حباب ابرکاواک طبیعی و مصنوعی از نظر ابعاد برابر است. در این تحقیق، ابتدا سه نوع کاواک‌ساز در یک تونل آب مدار باز مورد آزمایش و اندازه‌گیری تجربی قرار گرفت. سپس جریان حول همان سه نوع کاواک‌ساز در شرایط مشابه با آزمایش تجربی، شبهه‌سازی عددی شده و نتایج عددی لازم استخراج گردیدند. در پایان، علاوه بر مقایسه نتایج تجربی و عددی، عوامل مؤثر در ابعاد حباب مورد تحلیل قرار گرفت.

## ۲- طرح مسأله و روش تجربی

در رونده‌های زیر سطحی، بکارگیری کاواک‌سازها نقش عمده‌ای در کاهش پسا دارند. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که هندسه کاواک‌ساز بر شکل حباب ایجاد شده بسیار تأثیرگذار است. در این تحقیق مدل‌های بررسی شده به سه نوع کاواک‌ساز مخروطی با زاویه نوک ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه محدود شده‌اند. برای تثبیت کاواک‌ساز مخروطی از یک بدنه استوانه‌ای در انتهای آن استفاده شده است. شکل ۱ کاواک‌سازهای مخروطی مورد نظر و شکل ۲ نمای جانبی و ابعاد آنها را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش‌های این تحقیق از یک تونل آب مدار باز با سرعت حداکثر ۴۰ متر بر ثانیه استفاده شده است.

اکثر کاواک‌سازهای مورد بررسی مخروطی و یا هیدروفویل است. آهن و همکاران [۱۲] و پارک وهانگ [۱۳] کاواک‌ساز مخروطی و برناد و همکاران [۱۴] و رولی و همکاران [۱۵] پدیده کاویتاسیون توسط کاواک‌ساز هیدروفویلی را مورد تحلیل قرار دادند. آهن و همکاران [۱۲] دو نوع کاواک‌ساز مخروطی ۴۵ و ۹۰ درجه را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در آنالیز عددی بر مبنای فرض غیر لزج بودن و تراکم ناپذیری جریان با روش مقدار مرزی نتایج خود را ارائه نمودند. برناد و همکاران [۱۴] جریان کاویتاسیون را بر روی یک هیدروفویل به صورت عددی با کمک نرم‌افزار فلونتت مورد بررسی قرار دادند. آنها جهت انتقال جرم از معادلات رایلی استفاده نموده‌اند. پارک وهانگ [۱۳] پس از بررسی دو بعدی جریان ابرکاواک حول دو کاواک‌ساز مخروطی ۴۵ و ۱۵ درجه دریافتند مدل اغتشاش  $k - \varepsilon$  و مدل انتقال جرم سینگهال دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی و تئوری دارد. پدیده کاویتاسیون بر روی یک هیدروفویل با استفاده از مدل اغتشاش  $k - \omega - SST$  با کمک نرم‌افزار فلونتت توسط رولی و همکاران [۱۵] شبهه‌سازی شد. چوی و همکاران [۱۶] و شفقت و همکاران [۱۸، ۱۷] به بهینه‌سازی حباب ایجاد شده پرداختند.

از جمله پارامترهای تأثیرگذار در نتایج تحلیل پدیده کاویتاسیون، می‌توان شکل کاواک‌ساز، سرعت جریان و غیره را نام برد. اما یک سری پارامترهای غیرمستقیمی وجود دارد که مورد علاقه برخی محققان می‌باشد. چن و همکاران [۱۹] و زو و همکاران [۲۰] تأثیر دیواره تونل آب و تاو و همکاران [۲۱] حرکت عرضی کاواک‌ساز را بر روی شکل کاواک مورد بررسی قرار دادند. همچنین اثر جاذبه بر روی ابرکاواک طبیعی و مصنوعی توسط یو و همکاران [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت و امرومین [۷] اثر سطح آزاد و کف دریا را بر روی کاواک تشکیل شده در جریان‌های ابرکاواک، مورد بررسی قرار داد. او در نتایج خود نشان داد که کف اثر بیشتری بر تغییر شکل کاواک دارد. در بین تحلیل‌های انجام شده محققان از روش‌های عددی متفاوتی جهت مطالعه پدیده کاویتاسیون و ابرکاواک استفاده نموده‌اند. چنگ و همکاران [۲۲] با استفاده از تئوری پتانسیل انواع کاویتاسیون‌ها از جمله ابرکاواک را مورد مطالعه قرار داد. روحی و همکاران [۲۳] با استفاده از روش حجم سیال VOF و



شکل ۳ نحوه قرارگیری مدل در محفظه آزمون

تمام تست‌های مرتبط با این تحقیق در آزمایشگاه دریایی سازمان تحقیقات و خودکفایی ندسا و مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه جامع امام حسین (ع) انجام شده است.

### ۳- معادلات حاکم در حل عددی

در حل عددی مسأله، معادلات حاکم بر مسأله معادله پیوستگی، مومنتم، انتقال کسر حجمی فاز مایع می‌باشند [۲۸].

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha_v) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_v \alpha_v u_i) = \dot{m}^- - \dot{m}^+ \quad (4)$$

در این معادلات روابط بین چگالی  $(\rho_m)$ ، ویسکوزیته دینامیکی  $(\mu_m)$  و ویسکوزیته مغشوش  $(\mu_t)$  مخلوط به صورت روابط (۵) تا (۷) بیان می‌شوند.

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v \quad (5)$$

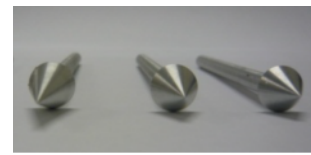
$$\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v \quad (6)$$

$$\mu_t = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

در این معادلات زیر نویس‌های  $v$ ،  $l$  و  $m$  به ترتیب مربوط به فاز مایع، بخار و مخلوط می‌باشند. همچنین پارامترهای  $\alpha$ ،  $\dot{m}^-$ ،  $\dot{m}^+$ ،  $P$ ،  $u$ ، به ترتیب نمایانگر درصد حجمی فاز بخار، نرخ جرمی تقطیر، نرخ جرمی تبخیر، فشار و سرعت می‌باشند.

### ۳-۱- مدل اغتشاشی

جهت مدل نمودن اثرات اغتشاش در جریان و پدیده



شکل ۱ کاواک‌سازهای مخروطی تحقیق



شکل ۲ شکل کلی و ابعاد مدل

محفظه آزمایش این تونل آب به صورت استوانه‌ای و با قطر ۴۵ و طول ۴۰۰ میلی‌متر بوده است (شکل ۳). برای طراحی بدنه، طول آن به نحوی انتخاب شده است که اندازه حجم حباب در سرعت بیشینه تونل قابل اندازه‌گیری باشد. فشار در نوک دماغه‌ها به وسیله لوله‌های استیل ۰/۷ میلی‌متری که از قسمت انتهایی بدنه استوانه‌ای نگه‌دارنده کاواک‌ساز خارج می‌شود به سنسور فشار مربوطه متصل شده است.

لازم به ذکر است که عملکرد تونل آب مورد استفاده در این تحقیق بدین گونه بوده است که این تونل دارای هیچ پمپی نیست و به کمک افزایش فشار هوا در یک مخزن استوانه‌ای قائم که حدود ۷۰ درصد حجم آن پر از آب شده است، انرژی لازم برای تخلیه آب از این مخزن و در نتیجه افزایش سرعت جریان در محفظه آزمون تامین می‌شود. با توجه به تغییرات لحظه‌ای سرعت و فشار در تونل آب مدار باز در حین تست، می‌بایست علاوه بر ثبت فشار نوک دماغه، فشارها روی منبع و در محفظه آزمون نیز ثبت می‌گردید.

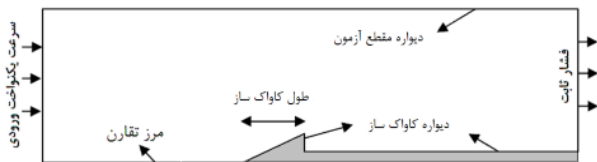
برای ثبت داده‌ها از سنسورها، نیاز به یک برد آنالوگ به دیجیتال می‌باشد که به تعداد سنسورها کانال ورودی داشته باشد برای این منظو از یک برد PCI-1710HGU و یک ترمینال PCLD-8710-AE استفاده شده است. برای ثبت نتایج تجربی از نرم‌افزار لب ویو استفاده شده است. در این تحقیق از فرکانس ۱۰۰۰ یعنی ضبط ۱۰۰۰ داده بر ثانیه برای اندازه‌گیری لحظه‌ای فشارها استفاده شده است. به صورت همزمان از یک دوربین سرعت بالای ۶۰۰ فریم در ثانیه برای تصویربرداری از حباب پشت کاواک‌ساز استفاده شده است. آزمایش‌های این تحقیق در محدوده سرعت ۲۷ تا ۳۷ متر بر ثانیه برای هر یک از سه کاواک‌ساز مخروطی انجام گرفته است.

انسیس CFX استفاده شده که معادلات RANS را با استفاده از روش حجم محدود حل می‌کند. روش حجم محدود، از شکل انتگرالی معادلات بقاء استفاده می‌کند.

شکل ۴ شرایط مرزی مسأله را نشان می‌دهد. در مرز ورودی مؤلفه‌های سرعت، کسر حجمی و پارامترهای توربولانسی تعیین شده‌اند و در مرز خروجی فشار استاتیکی تنظیم شده است و مرز دیواره محفظه آزمون و کاواک‌ساز با شرط عدم لغزش لحاظ شده است. ابعاد دامنه شبکه حل با ابعاد تونل آب بطور یکسان مدل شده است.

در این بخش، سه شبکه حل با تعداد ۳۴۰۰۰۰ و ۵۲۰۰۰۰ و ۷۲۰۰۰۰ المان چهار وجهی برای میدان حل تولید شده است. پس از بررسی انجام شده و مقایسه نتایج سه شبکه تولید شده با نتایج تجربی مشخص شد نتایج دو شبکه اختلاف چندانی ندارند. بدین ترتیب شبکه با المان کمتر با توجه به اختلاف ناچیز نتایج، به عنوان شبکه مطلوب برای ادامه محاسبات انتخاب شده است (جدول ۱). همچنین برای اطمینان از کیفیت مناسب شبکه، پارامتر  $Y^+$  مورد بررسی قرار گرفت که کمترین و بیشترین این مقدار بر روی بدنه ۳۷ و ۶۰ می‌باشد. شکل ۵ شبکه نزدیک کاواک‌ساز را نشان می‌دهد، شبکه حل مسأله دارای ۵۲۰۰۰۰ المان می‌باشد که در نزدیکی دیواره‌ها ریز شده است.

در شکل ۶ نمونه‌ای از روند همگرایی نتایج در طی فرایند تکرار، ارائه شده است. معیار همگرایی برای معادلات اندازه حرکت و اغتشاش و معادله کسر حجمی رسیدن به مقدار باقی‌مانده‌ها تا مرتبه ۰/۰۰۰۰۱ بوده است.



شکل ۴ هندسه و شرایط مرزی مسأله

جدول ۱ مقادیر نتایج و درصد خطا برای شبکه‌های مختلف

تعداد سلول	$Dm/D$	$L/D$
۳۴۰۰۰۰	۱/۱۳	۱/۹۹
۵۲۰۰۰۰	۱/۱۶	۱/۹۴
۷۲۰۰۰۰	۱/۱۷	۱/۹۲

کاویتاسیون از مدل اغتشاشی  $k-\varepsilon$  با تابع مخصوصی استفاده شده است [۲۹]. معادلات این مدل اغتشاشی برای جریان دوفازی همگن به صورت روابط (۸) و (۹) می‌باشند.

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (9)$$

که در آن ضرایب ثابت به صورت رابطه ۱۰ می‌باشند.

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad (10)$$

مشکل ناسازگار بودن تابع دیواره در شبکه‌های ریز نزدیک دیواره با استفاده از فرمولاسیون جدید تابع دیواره مخصوص در نرم‌افزار انسیس CFX برطرف شده است. لذا سعی شده است که مقدار  $Y$  در زیرلایه لزوج قرار نگیرد و تمام نقاط شبکه بیرون زیر لایه لزوج قرار گیرند. بنابراین مشکل ناسازگاری شبکه‌های بسیار ریز برطرف شده است [۳۰].

### ۳-۲- انتقال جرم

جهت مدل نمودن چند فاز از مدل مخلوط چند فاز استفاده شده است. شبیه‌سازی انتقال جرم مدل‌های متفاوتی وجود دارد از جمله: مدل سیگنهال [۳۱] مدل مرکب [۳۲] مدل اویس [۳۳] و مدل کونز [۳۴]. در تحقیق حاضر از مدل سیگنهال استفاده شده است. ترم‌های چشمه در معادله (۴) به ترتیب نشان دهنده فرایند تبخیر (رشد حباب) و تقطیر (نابودی حباب) می‌باشند. ترم چشمه از معادله رایلی-پلاست استخراج شده که به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) بیان می‌شوند [۳۱]:

$$\dot{m}^- = C_{\text{evap}} \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left[ \frac{2p_v - p}{3 \rho_l} \right]^{1/2} \frac{\rho_l \alpha_l}{\rho_m} \quad (11)$$

$$\dot{m}^+ = C_{\text{cond}} \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \left[ \frac{2p - p_v}{3 \rho_l} \right]^{1/2} \frac{\rho_v \alpha_v}{\rho_m} \quad (12)$$

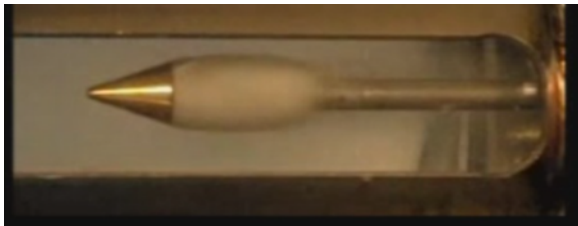
در این معادلات  $C_{\text{evap}} = 0.02$  و  $C_{\text{cond}} = 0.01$  و  $V_{ch} = \sqrt{k}$  می‌باشند و  $p_v$  و  $k$  به ترتیب نشان‌دهنده فشار مایع اشباع و انرژی مغشوش جریان می‌باشند.

### ۴- روش حل عددی

برخی از کدهای تجاری موجود قابلیت تحلیل پدیده کاویتاسیون را دارند. در تحقیق حاضر، از نرم‌افزار تجاری

روی تشکیل ناحیه حباب و نوع آن (کاویتاسیون جزئی و ابرکاواک) دارد.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، عدد کاویتاسیون کاهش می‌یابد اما با افزایش زاویه کاواک‌ساز این روند کاهشی از شیب کمتری برخوردار است.



الف- سرعت ۳۷ متر بر ثانیه



ب- سرعت ۳۴ متر بر ثانیه



ج- سرعت ۳۲ متر بر ثانیه

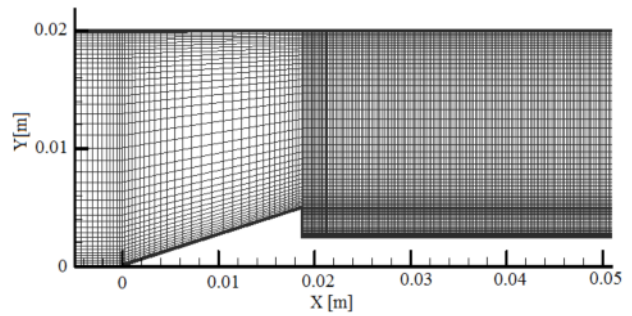


د- سرعت ۳۰ متر بر ثانیه

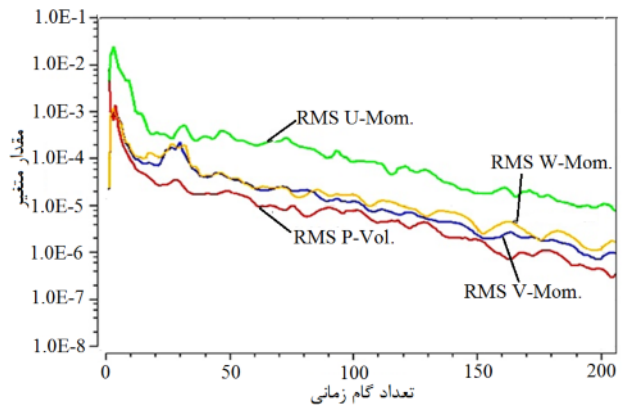


ی- سرعت ۲۸ متر بر ثانیه

شکل ۷ نتایج تجربی تشکیل، تبخیر و تقطیر ابرکاواک بر روی کاواک‌ساز ۳۰ درجه در تونل آب تحت سرعت‌های مختلف



شکل ۵ بخشی از نمای دو بعدی شبکه محاسباتی در نزدیکی دماغه



شکل ۶ نمونه‌ای از روند همگرایی معادله مومنتم

## ۵- ارائه و تحلیل نتایج تجربی

آزمایش‌ها بر روی سه دماغه مخروطی با مشخصات هندسی ذکر شده، انجام پذیرفته است. حجم حباب، اندازه فشار لحظه‌ای در نوک دماغه، فشار در دیواره مقطع آزمون و فشار در مخزن اصلی تونل اندازه‌گیری شده است. برای اعتبارسنجی نتایج تجربی ابتدا آزمایش روی یک کاواک‌ساز دیسک تخت انجام گردیده و با نتایج موجود در مرجع [۳۵] مقایسه گردید که تطابق نتایج بسیار رضایت بخش بود.

شکل ۷ اثر تغییر سرعت بر روی ناحیه حباب تشکیل شده در کاواک‌ساز ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. تصاویر ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهند که تأثیر تغییرات سرعت بر روی طول ناحیه حباب چشمگیر نیست.

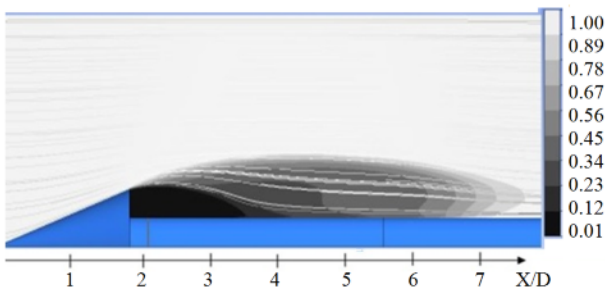
در شکل ۸ ناحیه حباب تشکیل شده در سرعت ۳۷ متر بر ثانیه بر روی کاواک‌سازهای مخروطی با زوایای نوک مختلف نشان داده شده است. در این شکل اثر زاویه نوک کاواک‌ساز بر روی ابعاد ناحیه حباب قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص می‌باشد پروفیل کاواک‌ساز تأثیر بسزایی بر

با افزایش سرعت جریان تغییرات فشار ( $P - P_c$ ) افزایش می‌یابد و مطابق رابطه (۲) تغییرات عدد کاویتاسیون کاهش می‌یابد. تغییرات عدد کاویتاسیون به معنی تغییرات اندازه حباب ابر کاواک پشت کاواک‌ساز می‌باشد. به طور مثال در کاواک‌ساز با زاویه مخروطی ۶۰ درجه تغییرات عدد کاویتاسیون که بر حسب سرعت بسیار کم می‌باشد بدین معنی است که طول حباب ابر کاواک نیز بر حسب سرعت در این محدود بسیار کم می‌باشد.

### ۶- ارائه و تحلیل نتایج عددی

در این تحقیق، کاواک‌ساز و محفظه آزمایش تونل آب به صورت سه بعدی شبکه‌بندی و مدل شده و سپس جریان حول کاواک‌ساز تحلیل شده است. مدل تحت پنج سرعت مختلف (۳۷ و ۳۴ و ۳۲ و ۳۰ و ۲۸ متر بر ثانیه) به صورت سه بعدی مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. شکل ۱۰ کانتور نسبت حجمی آب و خطوط جریان را بر روی کاواک‌ساز ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کانتور ضریب فشار و ادی ویسکوزیته را حول کاواک‌ساز ۴۵ درجه و عدد کاویتاسیون ۰/۳۳ نشان می‌دهند. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در موقعیتی که حباب بسته می‌شود مقدار ویسکوزیته گردابی بیشتری است و این به علت جت بازگشتی است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود فشار داخل حباب ثابت بوده و در قسمتی که حباب بسته شود مقدار فشار ماکزیمم می‌شود و سپس روند کاهشی را دارد. بر این اساس، طول ناحیه حباب تعیین می‌شود. به طور مثال در شکل ۱۳ می‌توان دید که طول حباب با سرعت ورودی ۳۲ متر بر ثانیه برای کاواک‌ساز مخروطی ۳۰ درجه در حدود ۳/۱۴ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۰ خطوط جریان و کانتور درصد حجمی آب روی کاواک‌ساز ۳۰ درجه تحت سرعت جریان ۳۷ متر بر ثانیه



الف- کاواک‌ساز ۳۰ درجه

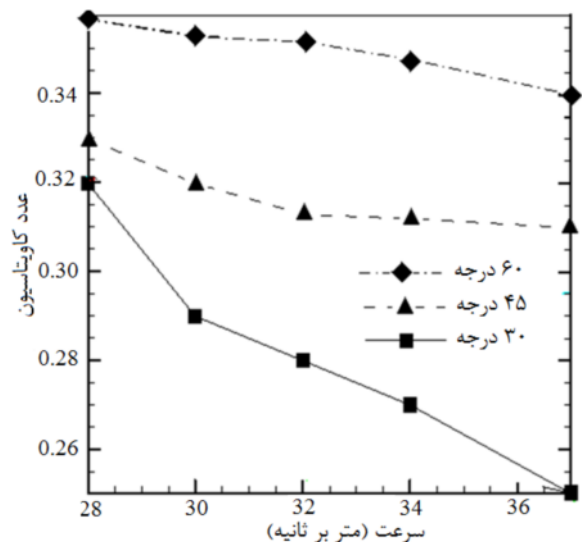


ب- کاواک‌ساز ۴۵ درجه



ج- کاواک‌ساز ۶۰ درجه

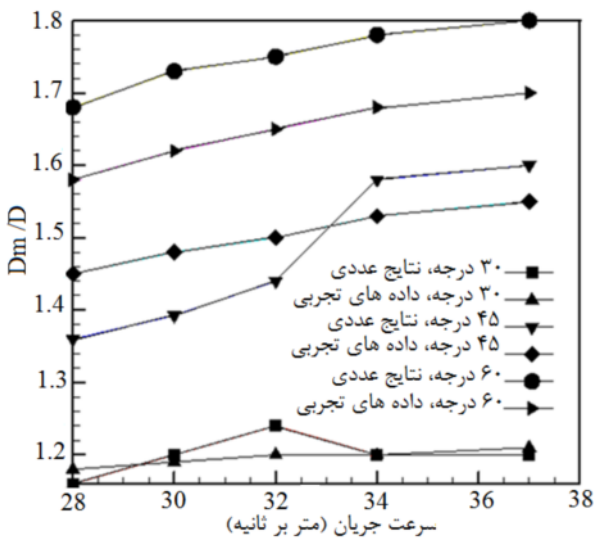
شکل ۸ نتایج تجربی تشکیل، تبخیر و تقطیر ابر کاواک بر روی کاواک‌سازهای مختلف در تونل آب تحت سرعت ۳۷ متر بر ثانیه



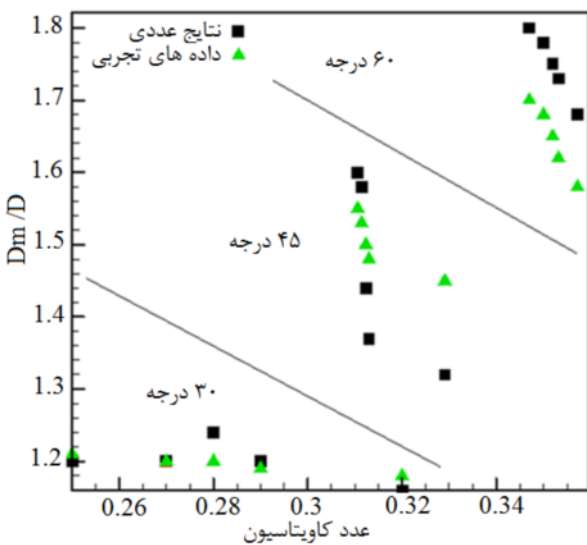
شکل ۹ تغییرات عدد کاویتاسیون بر حسب سرعت جریان

این پدیده بدان علت است که در زاویای کاواک‌ساز بیشتر

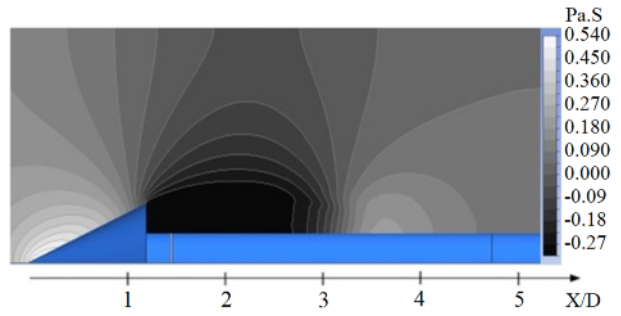
شکل ۱۴ نتایج عددی و تجربی بیانگر این موضوع است که قطر حباب تشکیل شده با افزایش سرعت روند تقریباً ثابتی را به دنبال دارد. همچنین مقایسه نتایج، دقت رضایت بخشی را به دنبال دارد و این اختلاف ناشی از تفاوت شرایط جریان و خواص سیال از جمله چگالی و فشار تبخیر آب در روش عددی و تجربی و همچنین توانمندی‌های مدل سازی معادلات حل می‌باشد. همچنین بررسی نتایج تجربی و عددی در شکل ۱۵ نشان می‌دهد که روند تغییرات قطر ناحیه حباب با عدد کاویتاسیون رابطه مستقیمی دارد.



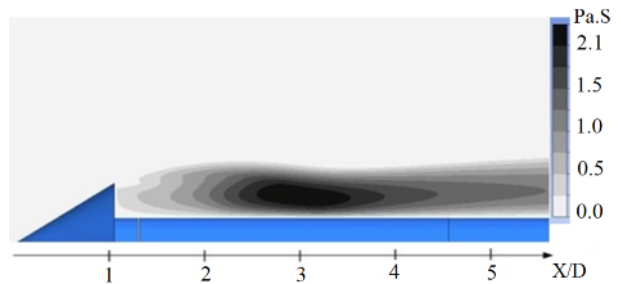
شکل ۱۴ تغییرات نسبت قطر ماکزیمم حباب ( $D_m$ ) به قطر کاواک‌ساز ( $D$ ) برحسب سرعت جریان برای کاواک‌سازهای مختلف



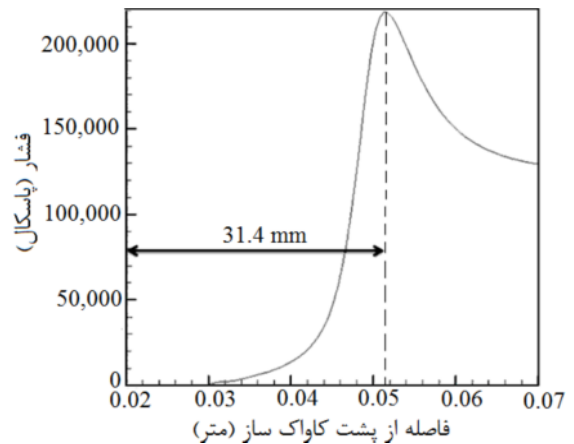
شکل ۱۵ تغییرات نسبت قطر ماکزیمم حباب ( $D_m$ ) به قطر کاواک‌ساز ( $D$ ) برحسب عدد کاویتاسیون برای کاواک‌سازهای مختلف



شکل ۱۱ کانتور ضریب فشار حول کاواک‌ساز ۴۵ درجه



شکل ۱۲ کانتور ویسکوزیته گردابی در جریان حول کاواک‌ساز ۴۵ درجه



شکل ۱۳ تغییرات فشار بر روی بدنه مدل کاواک‌ساز ۳۰ درجه تحت جریان ۳۲ متر بر ثانیه

## ۷- مقایسه نتایج عددی و تجربی

در این قسمت طول ناحیه حباب مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. در آزمایش‌های انجام شده به دلیل سرعت متغیر و روند کاهشی آن، طول حباب نیز متغیر بوده و به صورت لحظه‌ای دنباله حباب به سمت جلو حرکت می‌کند. با کاهش طول حباب می‌توان موقعیت پایان حباب را در سرعت‌های مختلف به دست آورد.



مقایسه نتایج بیانگر این است که با افزایش زاویه کاواک‌ساز، اثر تغییرات عدد کاویتاسیون بر روی طول حباب افزایش می‌یابد. به طور مثال برای کاواک‌ساز ۳۰ درجه با افزایش عدد کاویتاسیون (بازه تغییرات ۰/۰۷) تغییرات طول ناحیه حباب نامحسوس است. از طرف دیگر برای کاواک‌ساز ۶۰ درجه با افزایش عدد کاویتاسیون (بازه تغییرات ۰/۱۵) تغییرات طول ناحیه حباب بسیار شدید است.

### ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ناحیه حباب تشکیل شده حول سه نوع کاواک‌ساز مخروطی با زوایای مخروط ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه تحت سرعت‌های مختلف مورد تحلیل تجربی و عددی قرار گرفته است. در این بررسی دستاوردهای ذیل به دست آمده است.

- مقایسه نتایج عددی و تجربی و اختلاف کم نتایج ناشی از شبکه مناسب و الگوی دو فازی و مدل توربولانسی مناسب می‌باشد.

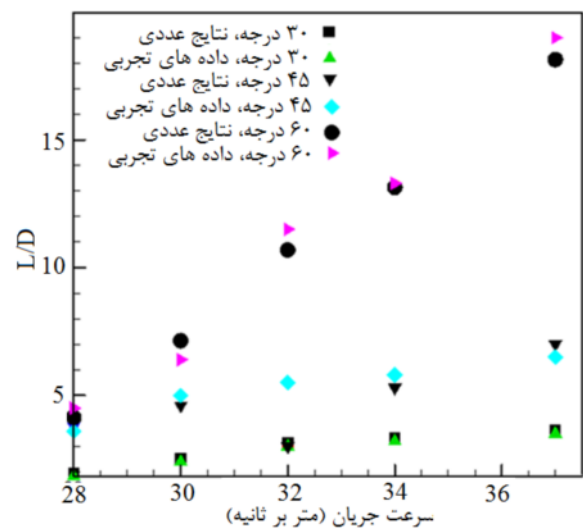
- تغییرات قطر حباب نسبت به عدد کاویتاسیون و زاویه کاواک‌ساز کم می‌باشد و افزایش یا کاهش عدد کاویتاسیون و زاویه کاواک‌ساز تأثیر آنچنانی بر روی قطر ناحیه حباب ندارد. اثر زاویه کاواک‌ساز بر روی طول حباب نسبت به عدد کاویتاسیون بیشتر است. طول ناحیه حباب به شدت متأثر از زاویه کاواک‌ساز است. جهت افزایش طول حباب بهترین راهکار افزایش زاویه کاواک‌ساز است.

- با افزایش عدد کاویتاسیون طول و قطر ناحیه حباب کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت جریان طول و قطر ناحیه حباب افزایش می‌یابد.

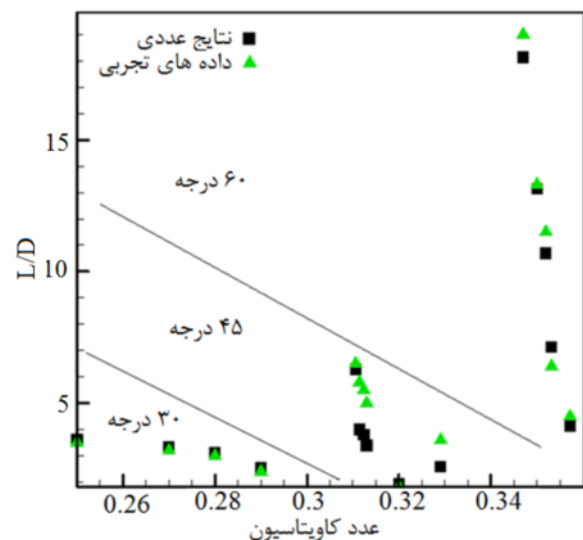
### ۹- مراجع

- [1] Reuchardt H., "The Physical Law Governing the Cavitation Bubbles Produced Behind Solid of Revolution in a Fluid Flow", *The Kaiser Wilhelm institute for hydrodynamic research*, Gottingen, Rep. UM 6628, 1945.
- [2] Nouri N.M., Shienjad A., Eslamdoost A., "Multi-phase Computational Fluid Dynamics Modeling of Cavitating Flows Over Axisymmetric Head-Forms", *IUST International Journal of Engineering Science*, Vol. 19, No. 5, 2008, pp. 71-81.
- [3] Park S., Rhee S.H., "Computational Analysis of Turbulent Super-cavitating Flow around a Two-

به طوری که با افزایش عدد کاویتاسیون برای کاواک‌ساز ۳۰ درجه مقدار قطر حباب روند افزایشی را دارد ولی برای کاواک‌سازهای ۴۵ و ۶۰ به علت تغییرات کم عدد کاویتاسیون مقدار تغییرات قطر حباب هم بسیار ناچیز می‌باشد و این مطلب در هر دو نتایج تجربی و عددی قابل مشاهده است. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که طول ناحیه حباب در نتایج عددی و تجربی با افزایش سرعت افزایش می‌یابد و این افزایش تقریباً با شیب ثابتی صورت می‌گیرد. همچنین از شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد کاویتاسیون نیز طول ناحیه حباب کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶ تغییرات نسبت طول حباب ( $L$ ) به قطر کاواک‌ساز ( $D$ ) بر حسب سرعت جریان برای کاواک‌سازهای مختلف



شکل ۱۷ تغییرات نسبت طول حباب ( $L$ ) به قطر کاواک‌ساز ( $D$ ) بر حسب عدد کاویتاسیون برای کاواک‌سازهای مختلف

- Conference on Hydrodynamic*, October 11-15, 2010, Shanghai, China, pp. 770-777.
- [16] Choi J.H., Penmetsa R.C., Grandhi R.V., "Shape Optimization of the Cavitator for a Supercavitating Torpedo", *Structure Multidisc Optimization*, 2005, Vol. 29, No. 2, pp. 159-167.
- [17] Shafaghat R., Hosseinalipour S.M., Lashgari I., Vahedgermi A., "Shape Optimization of Axisymmetric Cavitators in Supercavitating Flows Using the NSGAI Algorithm", *Applied Ocean Research*, 2011, Vol. 3, No. 3, pp. 193-198.
- [18] Shafaghat R., Hosseinalipour S. M., Nouri N. M., Lashgari I., "Shape Optimization of Two-Dimensional Cavitators in Supercavitating Flows Using NSGAI Algorithm", *Applied Ocean Research*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 305-310.
- [19] Xin C., Chuan-jing L., Jie L., Zhan-cheng P., "The Wall Effect on Ventilated Cavitating Flows in Closed Cavitation Tunnels", *Journal of Hydrodynamic*, 2008, Vol. 20, No. 5, pp. 561-566.
- [20] Jing-jun Z., Kai-ping Y., Jing-xin M., Ming Y., "The Comparative Study of Ventilated Supercavity Shape in Water Tunnel and Infinite Flow Field", *Journal of Hydrodynamics*, 2010, Vol. 22, No. 5, pp. 689-696.
- [21] Amromin E., "Analysis of body supercavitation in shallow water", *Ocean Engineering*, 2007, Vol. 11, No. 3, pp. 1602 - 1606.
- [22] Cheng M., Di J., Zheng-fang Q., Ding-hua F., "Study on Cavitation Flows of Underwater Vehicle", *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2006, Vol. 18, No. 3, pp. 373-377.
- [23] Roohi E., PouyanZahiri A., Passandideh-Fard M., "Numerical Simulation of Cavitation around a Two-Dimensional Hydrofoil Using VOF Method and LES Turbulence Model", *Appl. Math. Modeling*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 12-20.
- [24] Shafaghat R., Hosseinalipour S.M., Derakhshani E., "Derivation of a Correlation for Drag Coefficient in Two-Dimensional Bounded Supercavitating Flows, Using Artificial Neural Networks", *Arch Appl Mech*, 2010, pp. 771-784.
- [25] Rashidi I., Moin H., Pasandideh-Fard M., Pasandideh-Fard M., "Numerical Simulation of Partial Cavitation over Axisymmetric Bodies: VOF Method vs. Potential Flow Theory", *JAST*, Vol. 5, No. 1, pp. 23-33.
- [26] Pasandideh-Fard M., Rashidi I., Tolemi M., "Numerical Simulation of Two-Dimensional Partial and Super Cavitation Using Boundary Element Method", *Mechanics and Aerospace Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 15-28, 2008. (In Persian)
- [27] Cheraghi A., Ebrahimi R., Mohammadi S., Shams M., "Modeling of Supercavitation over Underwater Vehicles", *Mechanics and Aerospace Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 96-87, 2010. (In Persian)
- [28] Ishii, M. *Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-Dimensional Wedge-Shaped Cavitator Geometry*", *Computers & Fluids*, Vol. 9, No. 12, 2012, pp. 73-85.
- [4] Xin C., Yan Y., Chuan-jing L., Ying C., Jia-yi C., "Interference of Side Strut with The Natural Cavitating Flows Around a Submerged Vehicle in Water Tunnel Experiments", *Journal of Hydrodynamics*, 2011, Vol. 5, No. 23, pp. 554-561.
- [5] Li D., Grekula M., Lindell P., "A modified SST k-w Turbulence Model to Predict the Steady and Unsteady Sheet Cavitation on 2D and 3D Hydrofoils", *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation*, CAV2009- Paper No. 107, August 17-22, 2009, Ann Arbor, Michigan, USA
- [6] Cheng M., Di J., Zheng-fang Q., FENG Ding-hua, "Study on Cavitation Flows of Underwater Vehicle", *Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics*, 2008.
- [7] Qi-tao L., Lei-ping X., You-sheng L., "Experimental Study of Ventilated Supercavities with A Dynamic Pitching Model", *Journal of Hydrodynamics*, 2008, Vol. 4, No. 20, pp. 456-460.
- [8] Zou W., Yu K., Wan X., "Research on the Gas-Leakage Rate of Unsteady Ventilated Supercavity", *Journal of Hydrodynamics*, 2010, Vol. 22, No. 5, pp. 635-643.
- [9] Bin J., Xian-wu L., Xiao-xing P., Yao Z., Yu-lin W., Hong-yuan X., "Numerical Investigation of the Ventilated Cavitating flow around Flow an Under-Water Vehicle Based on a Three-Component Cavitation Model", *Journal of Hydrodynamics*, 2010, Vol. 22, No. 6, pp. 753-759.
- [10] Chao H., Hong-lan Y., Cun-bao Z., Wen-hu H., "Unsteady Supercavitating Flow Past Cones", *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2006, Vol. 18, No. 3, pp. 262-272.
- [11] Xue-wei Z., Ying-jie W., Jia-zhong Z., Cong W., Kai-ping Y., "Experimental Research on the Shape Characters of Natural and Ventilated Supercavitation", *Ser. B*, 2007, Vol. 19, No. 5, pp. 564-571.
- [12] Ahn B., Ahn C., Lee C., Kim T., "Experimental and Numerical Studies on Super-Cavitating Flow of Axisymmetric Cavitators", *Inter. Journal Nav. Archit. Oc. Eng*, 2010, Vol. 2, No. 1, pp. 39-44.
- [13] Sunho P., Shin H. R., "Computational Analysis of Turbulent Super-Cavitating Flow around a Two-Dimensional Wedge-shaped Cavitator Geometry", *Computers & Fluids*, 2012, Vol. 70, pp. 73-85.
- [14] Bernard S., Susan R., Sebastian Muntean S., Ioan Anton I., "Numerical Analysis of the Cavitating Flows", *Proceeding of the Romanian Academy, Series A*, 2006, Vol. 7, No. 1, pp. 48-56.
- [15] Zi-ru Li Z., Pourquoi P., Tom J.C., Terwisga V., "A Numerical Study of Steady and Unsteady Cavitation on a 2d Hydrofoil", *9<sup>th</sup> International*

- [33] Owis F.M., Nayfeh A.H., "Numerical Simulation of 3-D Incompressible, Multi-Phase Flows Over Cavitating Projectiles", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2004, Vol. 23, No. 2, pp. 339-351.
- [34] Kunz R.F., Boger D.A., Stinebring D.R., Chyczewski T.S., Lindau J.W., Gibeling H.J. "A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation", *Computers & Fluids*, 2000, Vol. 29, No.8, pp. 849-875.
- [35] Franc, J.P. and Michel, J.M., *Fundamentals of Cavitation*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 2004, pp. 185-250.
- phase Flow*, 3rd Ed., Springer, New York, USA, 2006.
- [29] Launder, B.E. and Spalding, D.B. "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 1974, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289.
- [30] CFX-ANSYS Canada Ltd. CFX-5.7: Solver Theory, Canada, 2004.
- [31] Singhal, N.H., Athavale, A.K., Li, M., Jiang, Y., "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", *J. Fluids Eng.*, 2002, Vol. 124, No. 3, pp. 1-8.
- [32] Merkle C.L., Feng J., Buelow P.E.O., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation", *Proceeding of the 3rd International Symposium on Cavitation, (CAV98)*, Grenoble, France, 1998.