



## بررسی اثر فشار کاری محیط در شبیه سازی جریان سوپرکاویتاسیون همراه با دمش گاز

محمود پسندیده فرد<sup>1</sup>، امیر باقری<sup>2</sup>، محمود تباکی بجزستانی<sup>3</sup>  
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

## چکیده

شبیه سازی جریان در اطراف جسم مغروق در آب با سرعت زیاد به همراه دمش گاز دارای پیچیدگی بسیاری است، که اگر پدیده کاویتاسیون طبیعی نیز در نظر گرفته شود این پیچیدگی بسیار بیشتر شده به طوری که نرم افزار های موجود توانایی تحلیل آن را دارا نیستند. نکته ای که باید درباره این پدیده در نظر گرفت کم بودن اثر کاویتاسیون طبیعی نسبت به اثر کاویتاسیون مصنوعی در اعداد کاویتاسیون بسیار کم است. در این تحقیق سعی بر آن است تا در ابتدا با بررسی اثر فشار کاری محیط به شرایطی دست یافت که در آن با وجود سرعت زیاد پرتابه، کاویتاسیون طبیعی اتفاق نیفتد و سپس به شبیه سازی و بررسی جریان همراه با دمش گاز پرداخت. برای این منظور با استفاده از نرم افزار فلوئنت و مدل مخلوط چندفازی، هندسه ای متقارن محوری مورد شبیه سازی قرار گرفته است. هندسه مورد بررسی مخروطی 30 درجه به قطر 10 سانتی متر است. سیال تزریقی از سطحی به قطر 8 سانتی متر که در انتهای آن قرار دارد به داخل ناحیه دمش می شود. نتایج این شبیه سازی با نتایج تئوری کاویتاسیون طبیعی مقایسه شده و صحت شبیه سازی حاضر تایید گردید. نتایج نشان می دهد که در اعداد کاویتاسیون بالا مولفه های بی بعد حاکم بر این جریان مستقل از فشار کاری محیط هستند و در اعداد کاویتاسیون پایین تفاوت اندکی در نتایج حاصل می شود همچنین در فشارهای کاری کمتر برای رسیدن به عدد کاویتاسیون مشخص، ضریب دمش بیشتری لازم است اما با توجه به کمتر بودن چگالی در مجموع به دبی جرمی کمتری نیاز است.

**واژه های کلیدی:** سوپرکاویتاسیون - فشارکاری محیط - دمش گاز - مخروط

## مقدمه

طی دهه های اخیر، «کاویتاسیون» از جمله پدیده های فیزیکی بوده که توجه بسیاری از دانشمندان را به خود معطوف کرده است. برخلاف اثرات

دریا، 2- با کاهش فشار محیط، که فقط در تونل های آب با مسیر بسته امکان دارد، 3- با افزایش فشار درون حفره از طریق دمش گاز های غیرقابل چگالش درون حفره، که ابرحفره مصنوعی نامیده می شود [2].

برای یک جریان بدون کاویتاسیون رسیدن به سرعت های بسیار بالای شناور زیرسطحی برای دست یافتن به حالت ابرحفره طبیعی به شدت سخت و مشکل است. حتی در مورد اجسامی که برای شرایط سوپرکاویتاسیون طراحی شده اند رسیدن به این شرایط در لحظات اولیه پرتاب امری ناممکن است. راه دومی که برای رسیدن به ابرحفره اطراف بدنه شناور زیرسطحی وجود دارد. که عبارت است از دمیدن هوا به جریان در جلوی بدنه. در این شرایط ناحیه کاویتا ایجاد شده با تزریق گاز پر می شود و با گسترش آن اصطلاحاً سوپرکاویتاسیون مصنوعی یا گاز دهی شده به وقوع می پیوندد. که برای اولین بار توسط ریکارد و اپشتاین در 1944-1945 ارائه شده است [3]. با توجه به اهمیت پدیده کاویتاسیون، مطالعات بسیاری توسط محققان انجام گرفته است. پسندیده فرد و همکارانش از روش توزیع گردابه در مرزهای هیدروفویل و گردابه برای تحلیل کاویتاسیون جزئی و گسترده استفاده کردند [4]. سروشان و همکارانش جریان کاویتاسیونی غیر دائم را مدل سازی کردند [5]. بهبهانی نژاد و همکاران مدل رتبه کاسته را برای شبیه سازی جریان غیر دائم کاویتاسیون جزئی ارائه کردند. آن ها نشان دادند که این مدل از لحاظ زمان محاسباتی بهینه تر از روش های متداول در تحلیل جریان غیر دائم کاویتاسیون جزئی حول هیدروفویل عمل می کند [6]. روحی و همکارانش جریان کاویتاسیونی را با استفاده از مدل LES شبیه سازی کردند [7]. سمینکو معادله سوپرکاویتاسیون متقارن محوری را با استفاده از تئوری ممنتم و همچنین تئوری بدنه نازک تقریب زد [8]. همچنین ساوچنکو به بررسی، تغییر شکل کاویتا در اثر جاذبه پرداخته است [9].

در زمینه بررسی تفاوت های کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی فنگ و همکاران به بررسی تجربی کاویتاسیون همراه با دمش بر روی هندسه های متقارن محوری پرداختند [10]، ژانگ و همکاران به بررسی مشخصه های شکل ابرحفره در حالت طبیعی و مصنوعی پرداختند [11]، چراغی به بررسی عددی ابعاد حفره ایجاد شده در ابرحفره طبیعی و مصنوعی به صورت متقارن محوری و سه بعدی پرداخته است [12]، جیان هونگ و همکاران به بررسی مشخصه های میدان جریان اطراف پرتابه زیر سطحی همراه با کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی پرداختند [13]، معین فر و پسندیده فرد با استفاده از الگوریتم یانگ به بررسی ناپایایی کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی بر روی هندسه متقارن محوری پرداختند [14]، می شین و همکاران به بررسی کاویتاسیون مصنوعی در نزدیکی سطح آزاد پرداخته است [15]؛ و اکبر زاده و همکاران به بررسی دمش بر روی جریان عبوری از هیدروفویل با استفاده از روش پیش شرط توانی پرداخته اند [16]. و با مشاهده شکل و ابعاد سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی به بررسی تفاوت های آن ها پرداختند. انواع حالت های تخلیه هوا از ابرحفره توسط فرانک و مایکل بررسی شد [17].

در شبیه سازی های قبلی منتشر شده درباره سوپر کاویتاسیون تنها با سوپر کاویتاسیون طبیعی بررسی شده و یا در سوپر کاویتاسیون گاز دهی شده در اعداد کاویتاسیون بزرگ بررسی شده اند که در آنها پرتابه به محدوده کاویتاسیون طبیعی نمی رسد. در تحقیق حاضر هدف دست یابی به شرایطی است که در آن بتوان در سوپر کاویتاسیون گاز دهی شده، اعداد کاویتاسیون کوچک را مورد شبیه سازی قرار داد. برای این منظور با بررسی اثر فشار کاری محیط به شرایطی دست یافته شده است که در آن با وجود سرعت بالای پرتابه کاویتاسیون طبیعی رخ نمی دهد و سپس به

1- دانشیار، 09155179018, fard\_m@um.ac.ir (نویسنده مخاطب)

2- دانشجوی دکتری

3- دانشجوی کارشناسی ارشد

مخرب ایجاد کاویتاسیون در بسیاری از سیستم های سیالاتی، به وجود آمدن شرایط کاویتاسیون جزئی بر روی اجسام غوطه ور در آب مانند پرتابه ها و اژدرهای زیرآبی، مزایای قابل توجهی دارد؛ زیرا با به وجود آمدن کاویتاسیون در اطراف یک جسم غوطه ور، جسم به جای این که با فاز مایع در تماس باشد، با فاز بخار در تماس قرار می گیرد. با توجه به این که لزجت گازها به مراتب کمتر از لزجت مایعات است، این پدیده منجر به کاهش اساسی نیروی پسای وارد بر جسم می شود. از این مزیت پدیده کاویتاسیون، در پرتابه های زیرسطحی متقارن محوری، به عنوان عاملی جهت افزایش سرعت و کارایی بهتر استفاده می گردد [1].

در صورتی که طول کاویتا کمتر از طول جسم باشد و یا اصطلاحاً کاویتا بر روی جسم بسته شود، «کاویتاسیون جزئی» و در صورتی که طول کاویتا از طول جسم جلوتر برود و در منطقه ای خارج از جسم بسته شود، «کاویتاسیون گسترده» رخ داده است.

فرایند نزدیک شدن فشار محلی به فشار بخار مایع میتواند موجب کاویتاسیون طبیعی شود. در عدد کویتاسیون کمتر از 0.1 ابرحفره طبیعی بوجود می آید. راه های مختلفی برای رسیدن به ابرحفره وجود دارد: 1- با افزایش سرعت جریان، برای مثال رساندن آن به بالای 45 m/s در سطح

بررسی پرتابه با سرعت بالا در اعداد کاونتاسیون بسیار کم پرداخته شده است.

### معادلات حاکم و اعداد بی بعد

معادلات بقای جرم و ممنتوم برای جریان مخلوط چندفازی به صورت فرمول های (1) و (2) تعریف می شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} =$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]$$

که  $\mu_t$  سرعت در جهت  $i$  فشار مخلوط چند فازی،  $\mu$  و

$\mu_t$  ویسکوزیته جریان آرام و مغشوش می باشد. چگالی مخلوط چندفازی از فرمول (3) محاسبه می شود.

$$\rho = \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_v - \alpha_g) \rho_l \quad (3)$$

که  $\alpha$  کسر حجمی اجزا می باشد. زیر نویس های  $v, g$  و  $l$  مربوط می باشد به اجزای گاز غیر قابل چگالش، بخار و مایع.

در این جریان اعداد بی بعد دارای اهمیت هستند: عدد کاونتاسیون:

تمایل به کاونته شدن با عدد کاونتاسیون مشخص می شود. عدد کاونتاسیون به صورت رابطه (4) تعریف می شود

$$\sigma = \frac{p - p_c}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (4)$$

که در این رابطه  $P$  بیان کننده فشار مرجع (فشار استاتیکی عمق رونده)،  $P_c$  بیان کننده فشار تبخیر مایع در حالت طبیعی یا فشار داخل حفره در حالت مصنوعی بوده و مخرج کسر بیانگر فشار دینامیکی است که  $U_\infty$  بیان کننده سرعت پرتابه و  $\rho$  چگالی سیال است. ضریب دمشی:

$$C_Q = \frac{Q_{air}}{U_\infty D^2} = \frac{\dot{m}/\rho}{U_\infty D^2} \quad (5)$$

که در آن،  $Q_{air}$  نرخ جریان حجمی گاز،  $U_\infty$  سرعت جریان ورودی و  $D$  قطر بیسی کاواکزا است.

### شرایط شبیه سازی

هندسه مورد استفاده در این شبیه سازی مخروطی 30 درجه به قطر 10 سانتی متر است. سیال تزریقی از سطحی به قطر 8 سانتی متر که در انتهای آن قرار دارد به داخل ناحیه دمشی می شود. در شکل 1 و شکل 2 ناحیه محاسباتی و کیفیت شبکه نشان داده شده است. شبیه سازی به صورت متقارن محوری انجام شده و تمام ناحیه محاسباتی به صورت منظم شبکه بندی شده است. تعداد سلول های محاسباتی پس از مطالعه استقلال محاسبات از شبکه در حدود 200000 انتخاب شده است. شرط مرزی سرعت جریان آزاد برای ورودی و فشار خروجی برای انتهای ناحیه

محاسباتی در نظر گرفته شده است و شرط مرزی mass-flow-inlet (جریان با دبی جرمی ثابت) برای ورودی سیال ثانویه در نظر گرفته شده است. از هوا با خواص ثابت به عنوان گاز دمشی شونده استفاده شده است. در هر عدد کاونتاسیون مورد بررسی، فشار هوا محاسبه شده و براساس این فشار چگالی هوا بدست آمده است و با تغییر دبی جرمی هوای دمشی شده با سعی و خطا به مقدار عدد کاونتاسیون مورد نظر دست یافته شده است. در شکل 3 و شکل 4 کانتور فشار استاتیکی و کانتور فاز هوا نشان داده شده است.

در این شبیه سازی از مدل آشفتگی k-epsilon استفاده شده است. برای بدست آوردن عدد کاونتاسیون و طول و قطر ابر کاونتی، محل ماکزیمم ضخامت ابر کاونتی در محدوده 0/5 نسبت فاز بدست آمده و با ضرب طول آن در عدد 2، طول ابر کاونتی و فشار در همان ناحیه، فشار ابر کاونتی در نظر گرفته شده است.

### اعتبار سنجی

به منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از روابط تئوری زیر مربوط به طول به قطر دیسک و طول به قطر بیشینه ابر کاونتی استفاده شده است [18]. رابطه گارابدین (Garabedian) برای مخروط:

$$D_c = D_n \sqrt{\frac{C_x}{\sigma}}, L_c = D_n \frac{A \sqrt{C_x}}{\sigma}, \quad (6)$$

$$A = \sqrt{\ln \frac{1}{\sigma}}, C_x(\sigma) = C_x(0)(1 + \sigma) \quad (7)$$

که در این رابطه  $D_n$  قطر کاونتاتور،  $D_c$  قطر ابر کاونتی و  $L_c$  طول ابر کاونتی است. در حالتی که کاونتاتور دیسک است  $C_x(0)$  برابر 0.827 است. در حالتی که کاونتی متقارن محوری است و عدد کاونتاسیون کم و اثر جاذبه ناچیز است رابطه نیمه تجربی زیر بدست آمده است که شبیه رابطه بالا است [19,20].

$$D_c = D_n \sqrt{\frac{C_x}{k\sigma}}, L_c = D_n \frac{A \sqrt{C_x}}{\sigma} \quad (8)$$

که در آن  $k$  برابر 0.9 است.

ریچارد (Reichard) رابطه زیر را برای کاونتاتور های غیر دیسکی ارائه نمود:

$$C_x(\sigma) = C_{x0}(1 + \sigma), 0 < \sigma < 1.2 \quad (9)$$

که در آن  $C_{x0}$  ضریب پسا در حالتی که عدد کاونتاسیون به صفر میل کند است. ضریب پسای 0.2 برای مخروط با نیم زاویه 15 درجه در عدد کاونتاسیون صفر 0.02 است [21].

در شکل 5 تغییرات طول بی بعد ابر کاونتی و عدد کاونتاسیون با نتایج تئوری مقایسه شده است. در جدول 1 درصد خطا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشترین خطای شبیه سازی حاضر با نتایج تئوری در حدود 20 درصد است که با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در شبیه سازی حاضر و رابطه تئوری دقت قابل قبولی است.

جدول 1 - درصد تفاوت شبیه سازی حاضر با نتایج تئوری

$\sigma$	شبیه سازی	Reichard	%خطا
0.12	4.61	5.71	19.36
0.10	5.80	7.17	19.13
0.08	7.70	9.27	16.94
0.06	10.71	12.89	16.89

0.04	16.95	20.51	17.32
0.03	23.11	28.31	18.38
0.02	34.68	44.66	22.34

از مباحث مطرح شده در این قسمت می توان نتیجه گرفت که فرض متقارن محوری بودن سوپرکاویتی های مورد بررسی در این گزارش با حالت سه بعدی یکسان است. در ادامه بررسی ها تنها در حالت متقارن محوری انجام شده است.

#### اثر فشار کاری محیط (Operating Pressure)

این بررسی در دو سرعت 20 و 40 متر بر ثانیه انجام شده که هر کدام به صورت جداگانه گزارش می شود.

##### سرعت 20 m/s

شبیه سازی در این سرعت در سه فشار کاری محیط 50، 100 و 150 هزار پاسکال انجام شده است. در شکل 9 و شکل 10 به ترتیب تغییرات طول بی بعد ابر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون و ضریب دمشی بر حسب طول بی بعد ابر کاویتی نشان داده شده اند. همانطور که مشاهده می شود در فشارهای پایین تر طول بی بعد و ضریب دمشی بالاتری حاصل می شود اما با وجود افزایش سه برابری فشار کاری محیط اختلاف نتایج کمتر از 12 درصد است و در اختلاف فشار های کمتر این تفاوت به حدود 7 درصد می رسد. در اعداد کاویتاسیون پایین این اختلافات بسیار ناچیز است و می توان از اثر فشار کاری محیط در محدوده با اعداد کاویتاسیون بزرگتر از 0.05 صرف نظر نمود.

##### سرعت 40

شبیه سازی در این سرعت در سه فشار کاری محیط 160، 240 و 320 هزار پاسکال انجام شده است. در شکل 11 و شکل 12 به ترتیب تغییرات طول بی بعد ابر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون و ضریب دمشی بر حسب طول بی بعد ابر کاویتی نشان داده شده اند. همانند حالت قبل مشاهده می شود در فشارهای پایین تر طول بی بعد و ضریب دمشی بالاتری حاصل می شود اما با وجود افزایش سه برابری فشار کاری محیط اختلاف نتایج کمتر از 12 درصد است و در اختلاف فشار های کمتر این تفاوت به حدود 7 درصد می رسد. در اعداد کاویتاسیون پایین این اختلافات بسیار ناچیز است و می توان از اثر فشار کاری محیط در محدوده با اعداد کاویتاسیون بزرگتر از 0.05 صرف نظر نمود.

#### مقایسه سرعت های 20 و 40 متر بر ثانیه

در شکل 13 و شکل 14 به ترتیب تغییرات طول بی بعد ابر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون و ضریب دمشی بر حسب طول بی بعد ابر کاویتی در تمام حالت های مورد شبیه سازی نشان داده شده اند. در این نمودارها نتایج حاصل از دمشی با نتایج حاصل از کاویتاسیون طبیعی در فشار 100 کیلو پاسکال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج حاصل از کاویتاسیون همراه با دمشی با کاویتاسیون طبیعی تطابق خوبی دارد.

#### نتیجه گیری

- 1- در شرایط مورد بررسی در این گزارش می توان نتایج شبیه سازی سه بعدی و متقارن محوری را یکسان در نظر گرفت.
- 2- در جریان سوپر کاویتاسیون همراه با دمشی، تغییرات طول بی بعد ابر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون در اعداد کاویتاسیون بالا مستقل از فشار کاری محیط است اما در اعداد کاویتاسیون

یکی دیگر از مشخصه هایی که به منظور اعتبار سنجی بررسی شده است تغییرات طول ابر کاویتی به بیشینه قطر آن است. نتایج با روابط زیر مقایسه شده اند [21].  
رابطه ریچارد:

$$\frac{L}{d_m} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.70\sigma)} \quad (10)$$

رابطه می (May):

$$\frac{L}{d_m} = 1.067\sigma^{-0.658} - 0.52\sigma^{+0.465} \quad (11)$$

رابطه وید (Waid):

$$\frac{L}{d_m} = (1.08\sigma^{-1.118}) / (0.534\sigma^{-0.568} + 1) \quad (12)$$

گرابدین:

$$\frac{L}{d_m} = \left[ \frac{1}{\sigma} \log_e \frac{1}{\sigma} \right]^{1/2} \quad (13)$$

در شکل 6 مقایسه نتایج شبیه سازی حاضر با چند رابطه بالا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج شبیه سازی در این حالت به خوبی بر نتایج تئوری همخوانی دارد.

#### نتایج

##### مقایسه شبیه سازی متقارن محوری و سه بعدی

در شرایط شبیه سازی کاملا یکسان و در دبی برابر، عدد کاویتاسیون تقریباً یکسانی در حالت متقارن محوری و سه بعدی حاصل می شود. در جدول 2 تغییرات عدد کاویتاسیون بر حسب دبی گاز دمشی شده در سرعت 20 m/s نشان داده شده است.

در شکل 7 نمودار طول بی بعد ابر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون در سه فشار کاری متفاوت و در سه عدد کاویتاسیون رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود در حالت سه بعدی طول ابر کاویتی اندکی بیشتر است که یکی از علل آن کمتر بودن عدد کاویتاسیون در دبی یکسان است. در شکل 8 نمودار تغییرات ضریب دمشی بر حسب طول بی بعد ابر کاویتی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود به دلیل تغییر اندک عدد کاویتاسیون، در حالت سه بعدی نتایج اندکی متفاوت است.

##### جدول 2 - تغییرات عدد کاویتاسیون بر حسب دبی گاز دمشی شده در

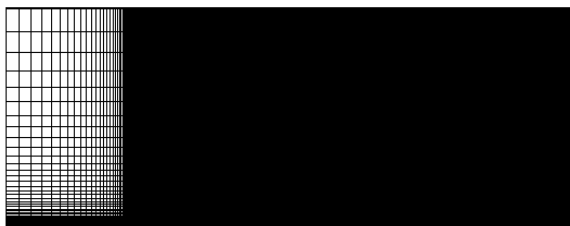
سرعت 20 m/s

O pressure	$m$	sigma 3D	Axisymmetric	تفاوت %
50000	0.032	0.11341	0.09941	-14.0868
	0.137	0.03993	0.03992	-0.0400
	0.294	0.01971	0.02	1.4867
100000	0.085	0.11366	0.09942	-14.3135
	0.288	0.04013	0.04009	-0.1036
	0.542	0.01887	0.02002	5.7573
150000	0.135	0.11616	0.10048	-15.6032
	0.43	0.0403	0.039999	-0.7481
	0.7515	0.01936	0.01998	3.1336

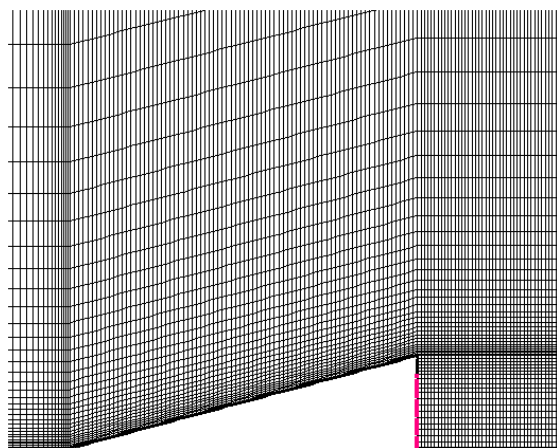
RESEARCH ON THE SHAPE CHARACTERS OF NATURAL AND VENTILATED SUPERCAVITATION", Journal of Hydrodynamics, Ser.B, 2007,19(5):571-564

- [12] چراغی، علی، ابراهیمی، رضا، محمدی بازرگانی، سجاد و شمس، مهرداد، "مدلسازی جریان ابرکاوک اطراف روندهای زیرسطحی"، فصلنامه مکانیک هوافضا، جلد 7، شماره 4، شماره 4، ص. 87-96، 1390
- [13] GUO Jian-hong, LU Chuan-jing, CHEN Ying, "Characteristics of Flow Field Around an Underwater Projectile with Natural and Ventilated Cavitation", J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.), 2011, 16(2): 241-236
- [14] Maryam Moein-far, Mahmood Pasandideh-fard, Rasool Elahi, Iman rashidi, " Numerical Simulation of Ventilated Cavitation behind an Axisymmetric Body", The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 21-19October, 2011, Krabi
- [15] Mei-Shan Jin, Cong-Tu Ha and Warn-Gyu Park, 2013, "Numerical study of ventilated cavitating flows with free surface effects", Journal of Mechanical Science and Technology 27(12), (2013), 3691-3683
- [16] P. Akbarzadeh, E. Akbarzadeh, "Numerical investigation of blowing effect on hydrodynamic behavior of cavitating flows over hydrofoils using power law preconditioning method", Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 67-59, 2014 (In Persian)
- [17] Franc, J.P., Michel, J.M. "Fundamentals of Cavitation", Springer, Netherlands, 2005
- [18] Garabedian, P.R., Calculation of axially symmetric cavities and jets. Pac. J. Math., 1956, 6, No. 4, pp. 684-611
- [19] Logvinovich, G.V., Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries, Halsted Press, 1973
- [20] Epshtein, L.A., Methods of Theory of Dimensionality and Similarity in Problems of Ship Hydromechanics, Sudostroenie Publishing House, Leningrad, 1970 [in Russian]
- [21] Plesset, Milton S., and Philip A. Shaffer Jr. "Drag in cavitating flow." Reviews of modern physics 20.1(1948): 228

#### شکل‌ها و نمودارها



شکل 1- ناحیه محاسباتی

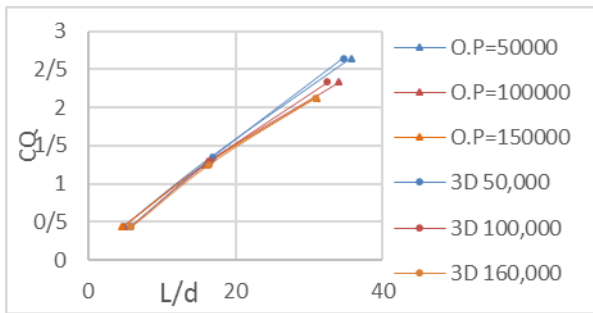


شکل 2- شبکه محاسباتی در اطراف مخروط (خط قرمز مرز ورود گاز است)

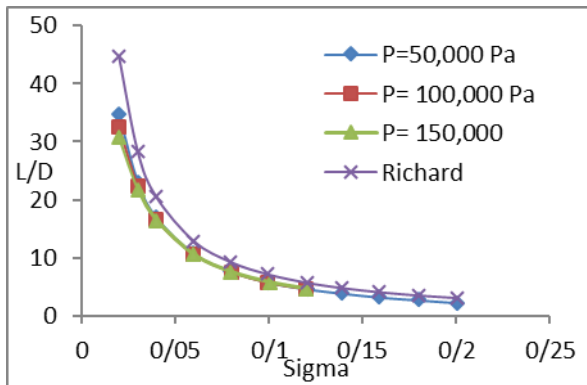
- پایین با افزایش سه برابری فشار محیط، طول بی بعد ابر کاویتی در حدود 10 درصد تغییر می کند.
- 3- تغییرات ضریب دمشی برحسب طول بی بعد ابر کاویتی در اعداد کاویتاسیون بالا مستقل از فشار کاری محیط است، اما در اعداد کاویتاسیون پایین با افزایش سه برابری فشار، ضریب دمشی در حدود 20 درصد کاهش می یابد.
- 4- در فشارهای کاری کمتر برای رسیدن به عدد کاویتاسیون مشخص، ضریب دمشی بیشتری لازم است اما با توجه به کمتر بودن چگالی در مجموع به دبی جرمی کمتری نیاز است.
- 5- با افزایش سرعت جسم، نتایج بالا همچنان صادق است و از شدت اختلافات ناشی از تغییر فشار نیز کاسته می شود.
- 6- در فشارهای کاری برابر، با افزایش سرعت طول ابر کاویتی و ضریب دمشی تغییری نمی کند.

#### مراجع

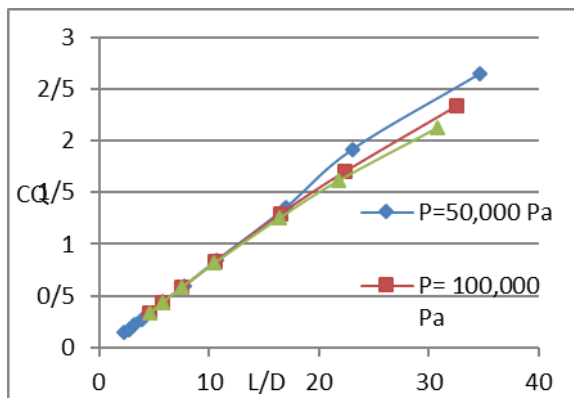
- [1] MS thesis, Hadi Afkar, "numerical simulation of flow with cavitation on ringed cavitator", 2013, MS Thesis, Ferdowsi University of Mashhad
- [2] Ji Bin, Luo Xian-wu, Peng Xiao-xing, Zhang Yao, Wu Yu-lin, Xu Hong-yuan, NUMERICAL INVESTIGATION OF THE VENTILATED CAVITATING FLOW AROUND AN UNDER-WATER VEHICLE BASED ON A THREE-COMPONENT CAVITATION MODEL, Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(6): 759-753
- [3] MS thesis, ELLISON GORDON KAWAKAMI, "INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF VENTILATED SUPERCAVITIES", MS Thesis, UNIVERSITY OF MINNESOTA 2011
- [4] M. Pasandideh Fard, I. Rashidi-Toroghi, M. Tolami, "Numerical Simulation of 2-D Supercavitation and partial cavitation, Using Boundary Element Method", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 4, No. 3, pp. 28-15, 2008. (In Persian)
- [5] M. Soroshan, S. A. Mohsenpour, H. Soleimani, "Modeling and Investigation of Unsteady and turbulent flow over hydrofoil", in 11th Marine Industries Conference, Kish Island, Iran, 2009. (In Persian)
- [6] M. Behbahani-Nejad, M. Changizian, "Reduced-Order modeling of unsteady partial cavity flows using the boundary element method", Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 152-140, 2013. (In Persian)
- [7] E. Roohi, A. P. Zahiri, M. Passandideh-Fard, "Numerical simulation of cavitation around a two-dimensional hydrofoil using VOF method and LES turbulence model", Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, No. 9, pp. 6488-6469, 2013
- [8] Vladimir N. Semenko, "Artificial Supercavitation. Physics and Calculation", Paper presented at the RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows", held at the von Kármán Institute (VKI) in Brussels, Belgium, 16-12 February 2001, and published in RTO EN-010, 237-205
- [9] Yu.N. Savchenko, "Experimental Investigation of Supercavitating Motion of Bodies", Paper presented at the RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows", held at the von Kármán Institute (VKI) in Brussels, Belgium, -12 16 February 2001, and published in RTO EN-010, 66-43
- [10] Feng Xue-mei, Lu Chuan-jing, Hu Tian-qun, "EXPERIMENTAL RESEARCH ON A SUPERCAVITATING SLENDER BODY OF REVOLUTION WITH VENTILATION", Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2(2002), 17-23
- [11] ZHANG Xue-wei, WEI Ying-jie, ZHANG Jia-zhong, WANG Cong, YU Kai-ping, "EXPERIMENTAL



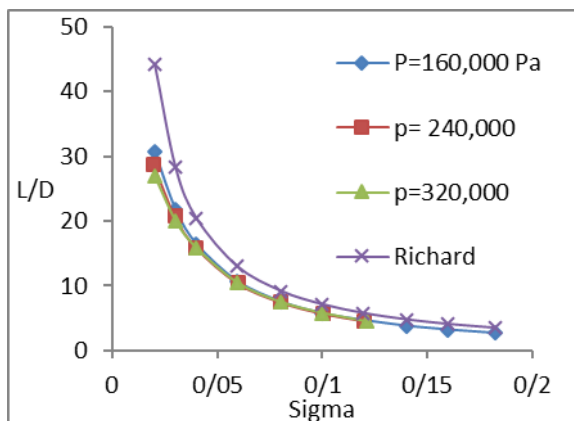
شکل 8- نمودار تغییرات ضریب دمزش بر حسب طول بی بعد ابر کاویتتی و سرعت 20 m/s



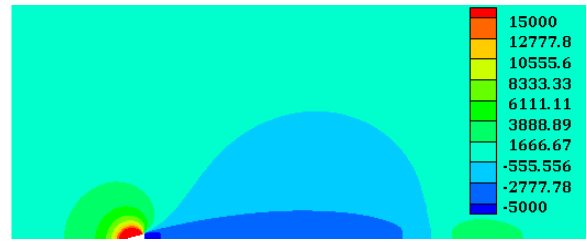
شکل 9- تغییرات طول بی بعد ابر کاویتتی بر حسب عدد کاویتاسیون در سرعت 20 m/s



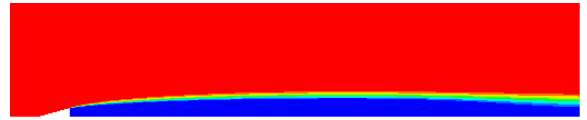
شکل 10- تغییرات ضریب دمزش بر حسب طول بی بعد ابر کاویتتی در سرعت 20 m/s



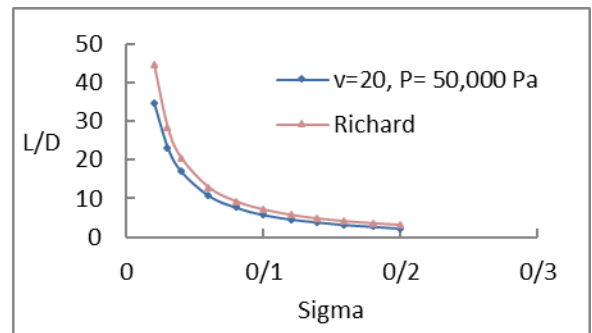
شکل 11- تغییرات طول بی بعد ابر کاویتتی بر حسب عدد کاویتاسیون در سرعت 40 m/s



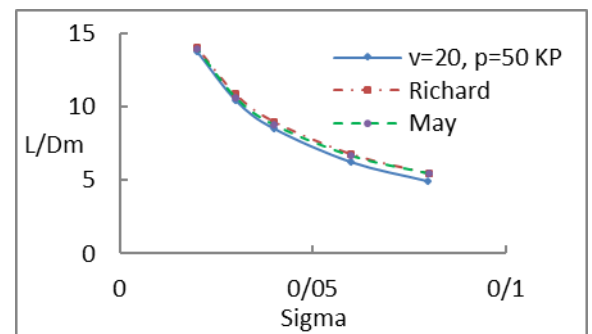
شکل 3- کانتور فشار استاتیکی



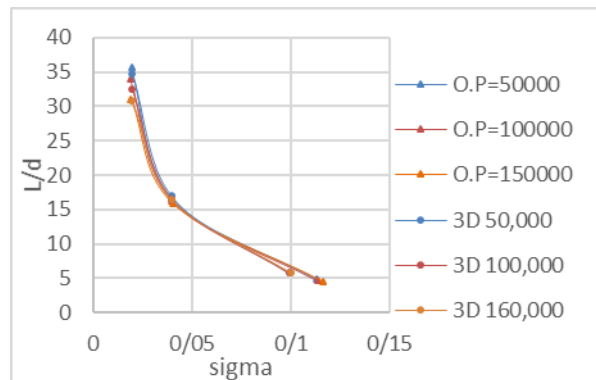
شکل 4- کانتور فاز هوا



شکل 5- تغییرات طول بی بعد ابر کاویتتی و عدد کاویتاسیون با نتایج تئوری

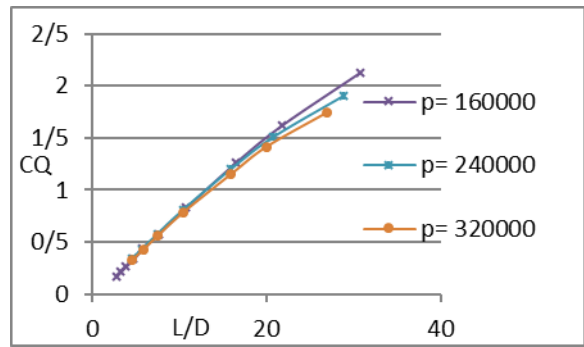


شکل 6- تغییرات طول ابر کاویتتی به بیشینه قطر آن و عدد کاویتاسیون با نتایج تئوری

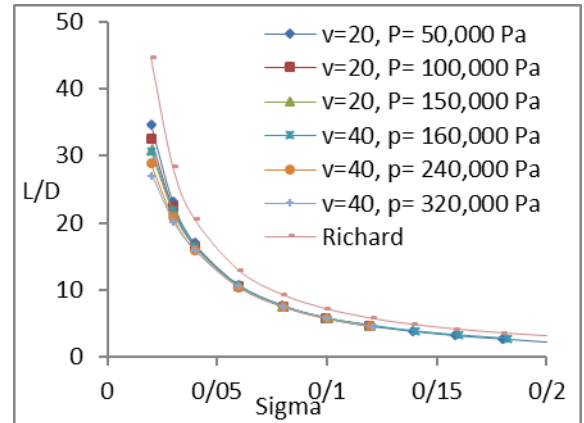


شکل 7- نمودار طول بی بعد ابر کاویتتی بر حسب عدد کاویتاسیون در سه فشار کاری متفاوت و سرعت 20 m/s

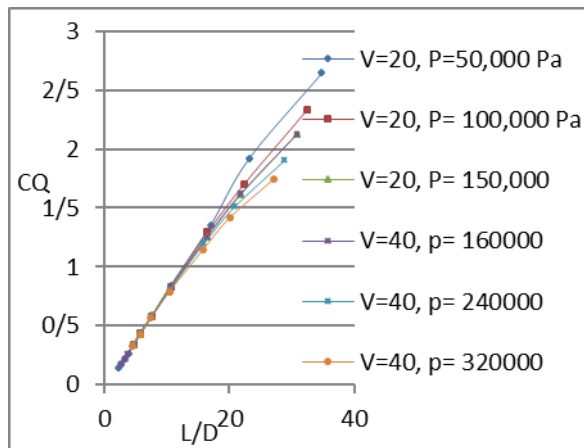




شکل 12- تغییرات ضریب دمش بر حسب طول بی بعد ابر کاویتی در سرعت 40 m/s



شکل 13- تغییرات طول بی بعد ابر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون در سرعت 20 m/s و 40 m/s و مقایسه آن با کاویتاسیون طبیعی و تئوری



شکل 14- تغییرات ضریب دمش بر حسب طول بی بعد ابر کاویتی در سرعت 20 m/s و 40 m/s و مقایسه آن با کاویتاسیون طبیعی و تئوری