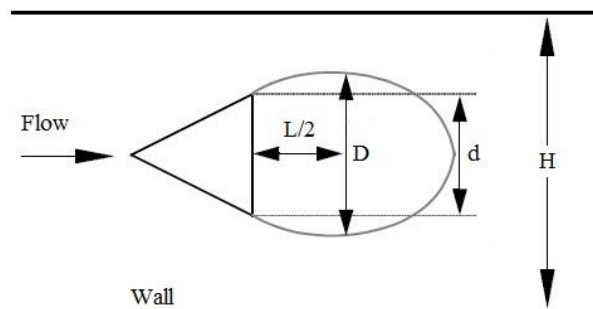


## ۴-۱ مقدمه

در این فصل نتایج شبیه سازی عددی جریان‌های سوپرکاویتاسیون ارائه می‌گردد، و با استفاده از نتایج تجربی و تحلیلی در دسترس اعتبار بخشی می‌شود. در تحقیق پیش رو پارامترهای سوپرکویتیتی، ضریب پسا و ضریب فشار در هندسه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در چهار زیر فصل نتایج دو بعدی، متقارن محوری، سه بعدی و سوپرکاویتاسیون مصنوعی ارائه شده است. پارامترهای سوپرکویتیتی در شکل (۴-۱) معرفی می‌شود. به علت ناپایداری‌های موجود در ناحیه بسته شدن سوپرکویتیتی، مشخص نمودن مرز دقیق آن مشکل می‌باشد، بنابراین برای محاسبه طول سوپرکویتیتی در اغلب کارهای ارائه شده و کار حاضر فاصله کویتیتور تا مرکز سوپرکویتیتی برابر  $L/2$  در نظر گرفته شده است. طول و قطر مرکز (بیشترین قطر) سوپرکویتیتی مانند کارهای ارائه شده توسط کانز و همکاران [۲۴]، از خطوط و سطوح همتراز کسر حجمی مایع در  $\alpha_l = 0.5$  محاسبه می‌گردد.



شکل (۴-۱): شماتیک سوپرکویتیتی پشت کویتیتور

که  $d$  قطر کویتیتور،  $L$  طول سوپرکویتیتی،  $D$  قطر مرکز سوپرکویتیتی (حداکثر قطر سوپرکویتیتی) و  $H$  ارتفاع میدان حل (ارتفاع تونل آب) است. لازم به ذکر است که ضریب پسایی که در ادامه تحقیق گزارش شده، فقط ناشی از

نیروهای فشاری وارد بر جسم است و از پسای حاصل از نیروهای لزج صرفنظر شده است. بنابراین ضریب پسای به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$C_D = \frac{\int p dA}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (1-4)$$

و همچنین ضریب فشار نیز به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2-4)$$

که  $p$  فشار روی سطح کویتیتور،  $p_\infty$  و  $U$  به ترتیب فشار و سرعت جریان آزاد می‌باشند.

## ۲-۴ نتایج جریان سوپرکویتاسیون دو بعدی

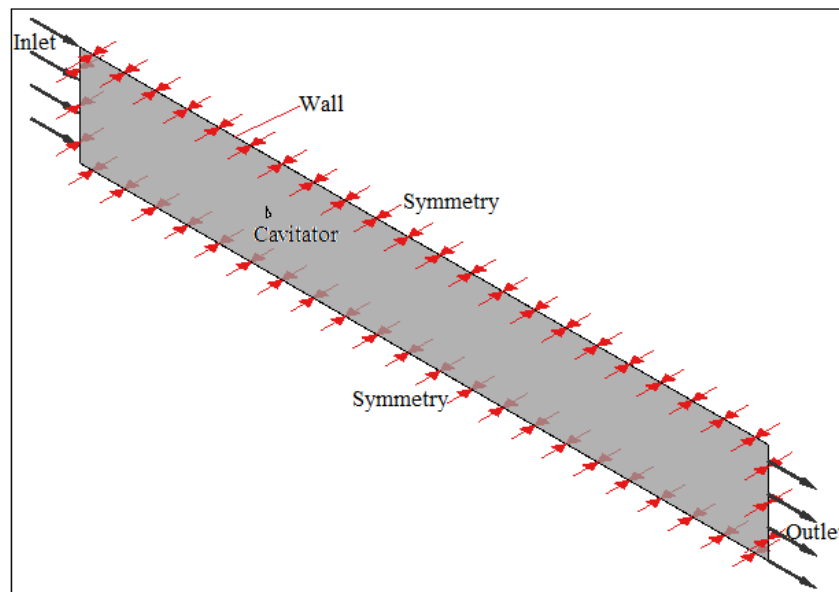
در مرحله اول نتایج شبیه سازی جریان سوپرکویتاسیون حول کویتیتورهای دو بعدی ارائه می‌گردد. سوپرکویتاسیون حول کویتیتورهای صفحه‌ای و گوه‌ای با زاویه رأس ۹۰ درجه مدل شده است. داده‌های تجربی استفاده شده برای اعتبار بخشی نتایج سوپرکویتاسیون دو بعدی، توسط واید<sup>۱</sup> [۳] در تونل آب CIT به دست آمده است. در کار وی نسبت ارتفاع تونل به حداکثر عرض کویتیتور ۳۷ در نظر گرفته شده است. محدوده عدد رینولدز بر اساس قطر کویتیتور  $6 \times 10^4$  تا  $10^5$  بوده، که در کار حاضر نیز عدد رینولدز در محدوده کار وی و برابر با ۸۵۳۷۱ اختیار شده است. در شکل (۲-۴) نمایی از میدان حل دوبعدی و شرایط مرزی استفاده شده در حل عددی مشاهده می‌شود. عمق میدان حل برابر ۰/۰۱ cm است. برای صفحات جلویی و پشتی شرط مرزی تقارن آینه‌ای<sup>۲</sup>، برای مرزهای بالا و پایین ناحیه حل و همچنین سطح کویتیتور شرط عدم لغزش<sup>۳</sup> انتخاب شده

<sup>1</sup> Waid

<sup>2</sup> Symmetry

<sup>3</sup> No Slip

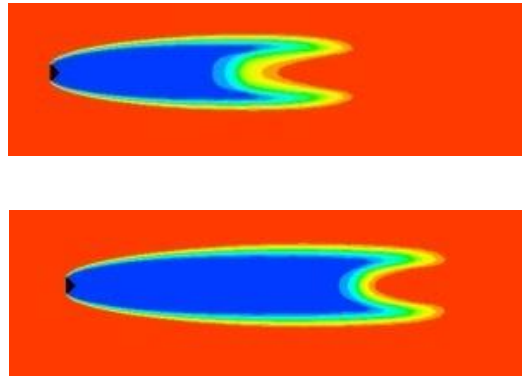
است. سرعت مرز ورودی  $12\text{m/s}$  با شدت اغتشاش ۱ درصد در نظر گرفته شده، و در مرز خروجی فشار استاتیکی متناظر با عدد کاویتاسیون مورد نظر تنظیم گردیده است.



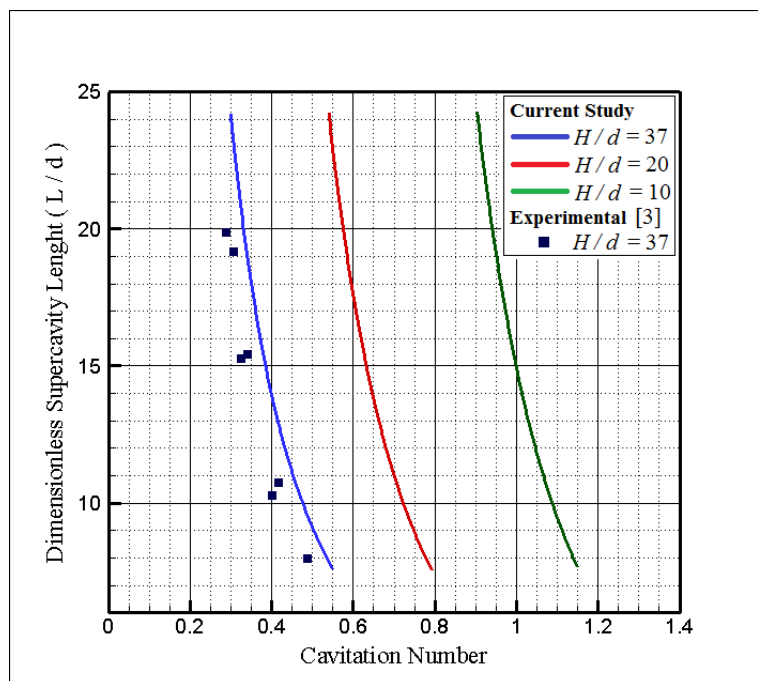
شکل (۴-۲): میدان حل برای کویتیتور دو بعدی در  $H/d = 10$

استقلال نتایج عددی از شبکه بررسی شده است. سه نوع شبکه بی سازمان با تعداد المان  $18252$ ،  $36751$  و  $48875$  برای کویتیتور صفحه‌ای، و همچنین سه شبکه بی سازمان با تعداد المان  $19056$ ،  $36139$  و  $51569$  برای کویتیتور گوه‌ای در  $H/d$  برابر  $37$  تولید شده است. همان طوری که قبلاً گفته شد،  $H/d$  نسبت عرض میدان حل (عرض تونل آب) به حداکثر عرض کویتیتور (قطر کویتیتور) است. نتایج گزارش شده با استفاده از شبکه با تعداد المان بالاتر به دست آمده است. در شکل (۴-۳) سوپرکوییتی تشکیل شده پشت کویتیتور صفحه‌ای برای  $H/d=37$  نشان داده شده است. این تصاویر کانتور کسر حجمی مایع را در اعداد کاویتاسیون  $0/32$  و  $0/36$  نشان می‌دهند. طول بی بعد سوپرکوییتی در نمودار (۴-۴) برای  $H/d$ های مختلف ارائه شده است. در واقع به منظور بررسی اثرات دیواره، طول بی بعد سوپرکوییتی بر حسب عدد کاویتاسیون در سه  $H/d$  (نسبت ضخامت میدان حل به بیشترین قطر کویتیتور) مختلف به دست آمده است. با توجه به نمودار ملاحظه می‌گردد

که با کاهش عرض تونل (عرض میدان حل)، سوپرکویتهای طویل تری در اعداد کاونتاسیون بالاتر به دست آمده است. در  $H/d=37$  نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی واید [۳]، مقایسه شده است. شرایط مدل شبیه سازی شده دقیقاً مشابه شرایط مدل آزمایشگاهی ( $Re$  و  $H/d$  برابر) انتخاب شده است. نتایج عددی به وضوح در راستای نتایج تجربی می باشد.

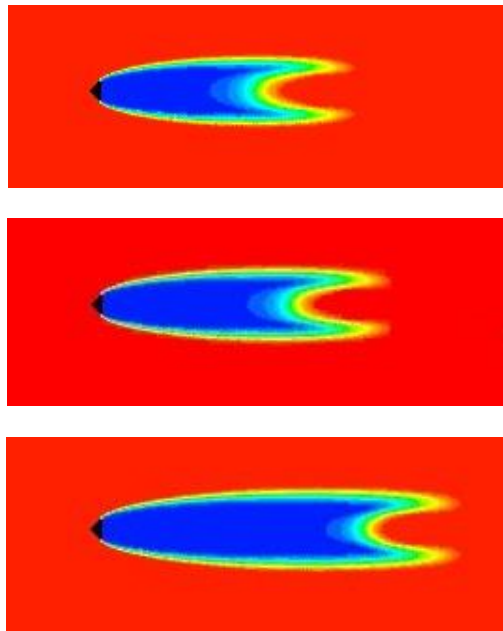


شکل (۴-۳): کانتور کسر حجمی مایع برای کویتیتور صفحه‌ای در عدد کاونتاسیون ۰/۳۶ (بالایی) و ۰/۳۲ (پایینی)

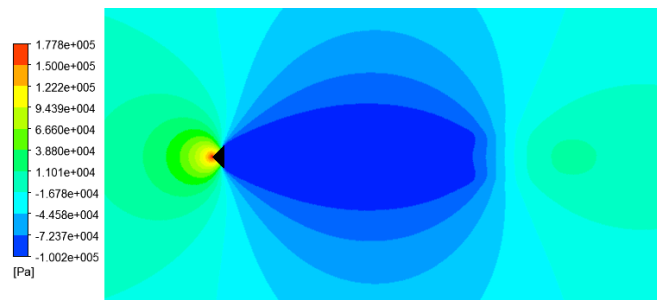


شکل (۴-۴): تغییرات طول بی بعد سوپرکویتهای با عدد کاونتاسیون در  $H/d$  های مختلف

در شکل (۴-۵) کانتورهای کسر حجمی برای گوه با زاویه راس ۹۰ درجه مشاهده می‌گردد. در این بخش طول و حداکثر ضخامت سوپرکوییتی در اعداد کاویتاسیون مختلف اندازه گیری شده و با داده‌های تجربی واید مقایسه شده است. همان طور که قبلاً گفته شد عدد رینولدز بر اساس قطر حداکثر کویتیتور، ۸۵۳۷۱ (در محدوده عدد رینولدز داده‌های تجربی) در نظر گرفته شده است. توجه داریم که در این قسمت نیز پارامتر  $H/d$  برابر ۳۷ است. همچنین در شکل (۴-۶) کانتور فشار در عدد کاویتاسیون ۰/۴۲ مشاهده می‌گردد.

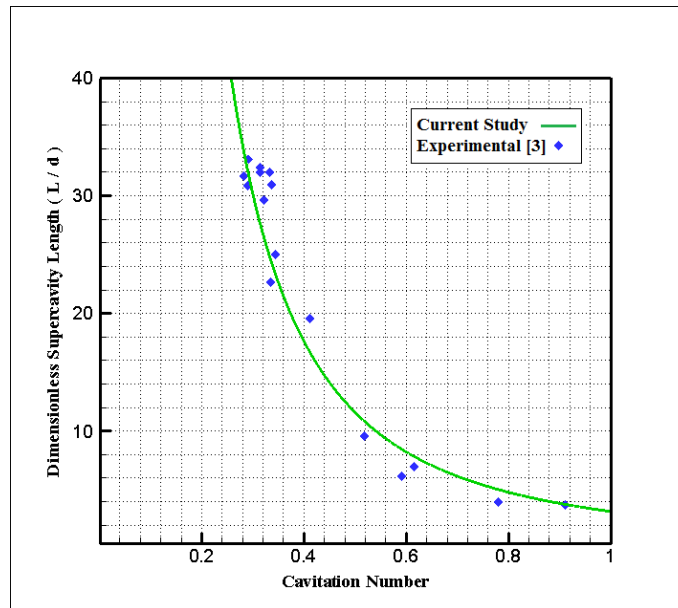


شکل (۴-۵): الگوی سوپرکوییتی حول کویتیتور گوه‌ای با زاویه راس ۹۰ درجه، در اعداد کاویتاسیون ۰/۴۲ ، ۰/۴۰ و ۰/۳۸

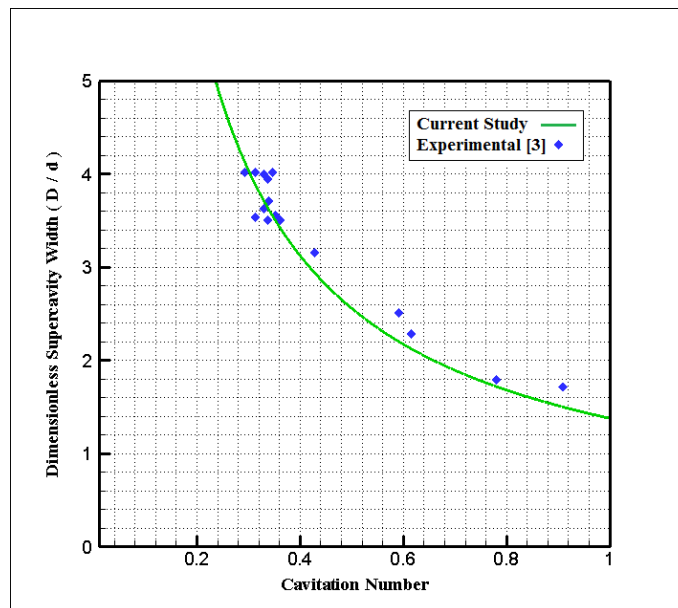


شکل (۴-۶): کانتور فشار حول کویتیتور گوه‌ای با زاویه راس ۹۰ درجه، در اعداد کاویتاسیون ۰/۴۲

شکل‌های (۷-۴) و (۸-۴) طول و ضخامت مرکز سوپرکویتیتی (مقادیر بی بعد) را بر حسب عدد کاویتاسیون نشان می‌دهد. پارامترهای سوپرکویتیتی از کانتور کسر حجمی مایع و در کسر حجمی ۰/۵ محاسبه شده است. مقایسه ساده بین نتایج عددی و تجربی، حاکی از قابل قبول بودن مقادیر بدست آمده است.



شکل (۷-۴): طول بی بعد سوپرکویتیتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای کویتیتور گوه‌ای با زاویه راس ۹۰ درجه



شکل (۸-۴): ضخامت بی بعد مرکز سوپرکویتیتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای کویتیتور گوه‌ای با زاویه راس ۹۰ درجه

### ۳-۴ نتایج جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری

یکی از اهداف تحقیق حاضر شبیه سازی جریان سوپرکاویتاسیون حول اجسام متقارن محوری بوده است. مدل سازی جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری در دو مرحله انجام گرفته و اعتبار بخشی نتایج توسط داده های تجربی و تحلیلی در دسترس صورت گرفته است.

در گام اول جریان سوپرکاویتاسیون حول دیسک و مخروط با زاویه راس ۴۵ درجه با استفاده از خاصیت تقارن محوری جریان شبیه سازی شده است. طول و قطر مرکز سوپرکویتیتی و همچنین ضریب پسا در اعداد کاویتاسیون مختلف محاسبه شده و با داده های ارائه شده توسط سلف و ریپکین<sup>۱</sup> [۵۷] و همچنین رابطه نیمه تجربی ریچارد<sup>۲</sup> [۳] مقایسه شده است. سلف و ریپکین طول و بیشترین قطر سوپرکویتیتی های بخار متقارن محوری را در تونل آب جت آزاد و در محدوده وسیعی از اعداد کاویتاسیون اندازه گیری کرده اند. همچنین ریچارد با آزمایشاتی که در تونل آب انجام داده، روابطی نیمه تجربی (تحلیلی) برای به دست آوردن طول و قطر مرکز سوپرکویتیتی به صورت زیر ارائه نموده است [۳].

$$\frac{L}{D} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(1.7\sigma + 0.066)} \quad (۳-۴)$$

$$\frac{D}{d} = \left[ \frac{C_D(\sigma)}{\sigma(1 - 0.132\sigma^{1/2})} \right]^{1/2} \quad (۴-۴)$$

که در روابط ذکر شده،  $L$  طول سوپرکویتیتی،  $D$  قطر مرکز سوپرکویتیتی و  $d$  قطر کویتیتور می باشد. همچنین ضریب پسا به صورت زیر محاسبه می گردد.

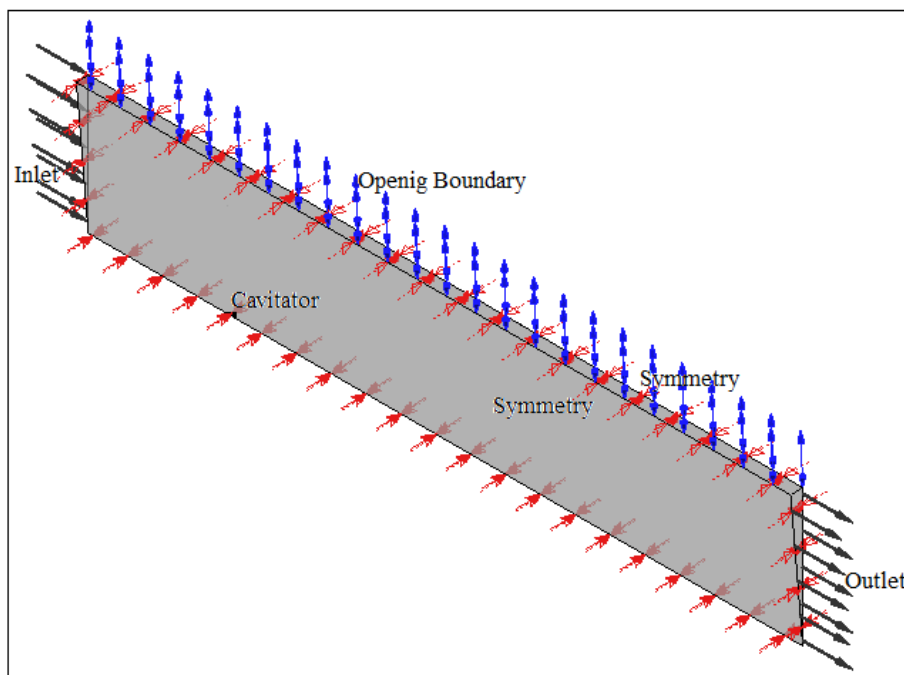
$$C_D(\sigma) = C_D(0)[1 + \sigma] \quad (۵-۴)$$

<sup>۱</sup> Self and Ripkein

<sup>۲</sup> Reichardt

ریچارد برای  $C_D(0)$  مقدار  $0/8$  پیشنهاد کرده است. نتایج تجربی وی به اعداد کاویتاسیون زیر  $0/12$  محدود بوده و برای اعداد کاویتاسیون بالاتر نتایج طبق روابط ذکر شده، برون یابی شده است.

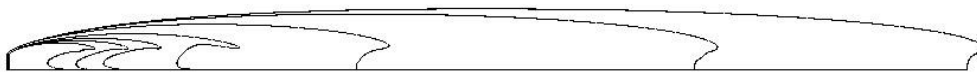
در شکل (۹-۴) نمایی از میدان حل و شرایط مرزی استفاده شده برای کویتیتور مخروطی نشان داده شده است. توجه داریم که میدان حل برای دیسک و مخروط مشابه هم اختیار شده است. برای شرط مرزی ورودی سرعت ثابت و برابر  $20\text{m/s}$  در نظر گرفته شده است. شدت آشفتگی در مرز ورودی  $1$  درصد و همچنین کسر حجمی مایع برابر  $1$  و کسر حجمی بخار صفر فرض شده است. در مرز خروجی فشار استاتیکی و بر اساس عدد کاویتاسیون تنظیم می‌گردد. مرز بالایی شرط محیط بی نهایت را فراهم می‌کند و برای صفحات جلویی و پشتی شرط مرزی تقارن آینه‌ای انتخاب می‌شود. شرط عدم لغزش برای مرز کویتیتور (دیسک یا مخروط) به عنوان یک دیواره نفوذ ناپذیر اعمال می‌شود.



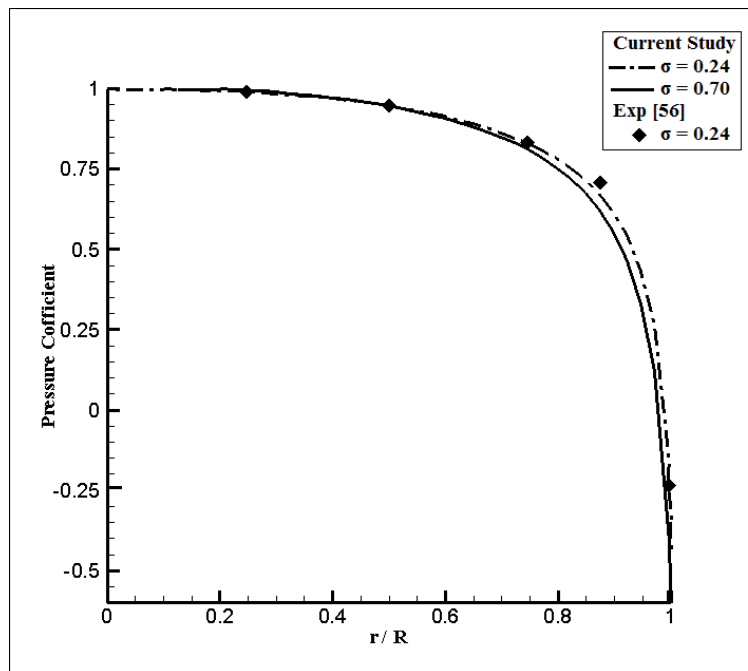
شکل (۹-۴): میدان حل جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری حول کویتیتور مخروطی به همراه شرایط مرزی



در شکل (۴-۱۰) الگوی سوپرکوییتی از کانتور کسر حجمی مایع و در  $\alpha = 0.5$  برای چند عدد کاونیتاسیون نشان داده شده است. در شکل (۴-۱۱) توزیع فشار روی سطح مرطوب دیسک در اعداد کاونیتاسیون  $0.24$  و  $0.70$  رسم شده است. نتایج تجربی گزارش شده در مرجع [۵۶] نیز در نمودار آورده شده است. مقایسه توزیع فشار بدست آمده با این داده‌ها حاکی از توزیع مناسب فشار بر روی سطح مرطوب دیسک می‌باشد. در ادامه پارامترهای سوپرکوییتی (طول و قطر مرکز سوپرکوییتی) بر حسب عدد کاونیتاسیون ارائه گشته است. همان طوری که قبلاً گفته شد، از نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۵۷] و نتایج نیمه تجربی حاصل از روابط ریچارد (روابط ۴-۳ و ۴-۴) برای اعتبار بخشی نتایج عددی در این قسمت از تحقیق استفاده شده است.

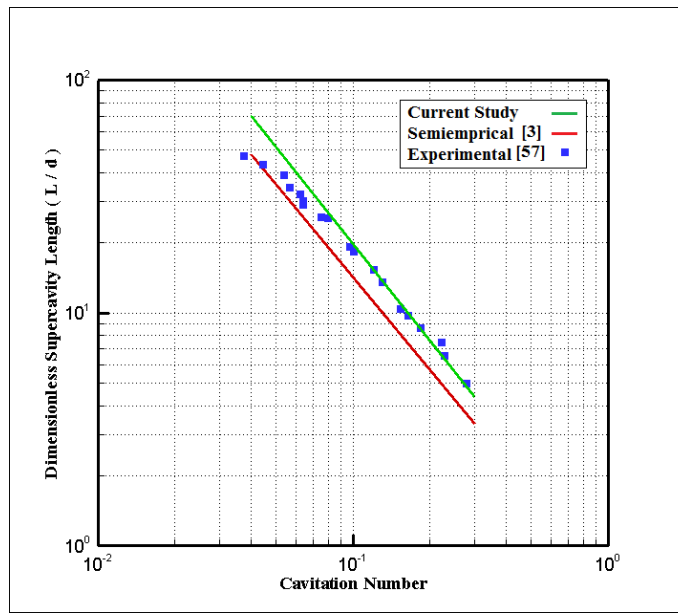


شکل (۴-۱۰): الگوی سوپرکوییتی پشت دیسک در اعداد کاونیتاسیون مختلف

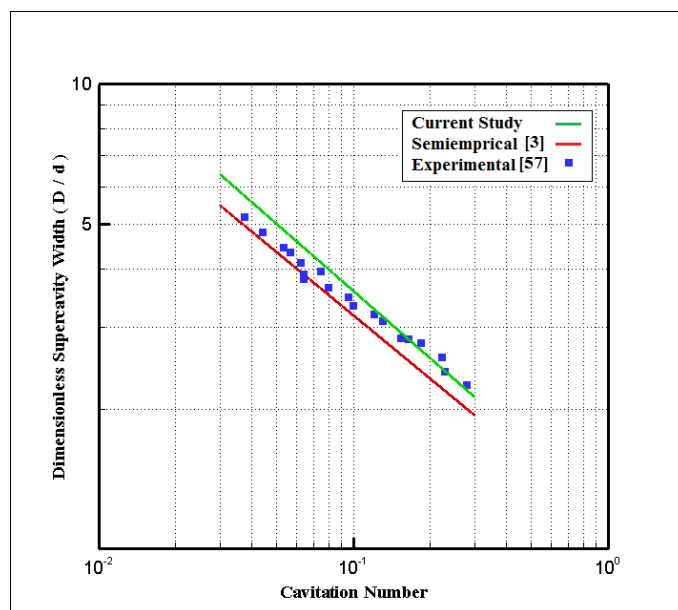


شکل (۴-۱۱): مقایسه ضریب فشار بر روی سطح مرطوب دیسک با نتایج تجربی

شکل‌های (۱۲-۴) و (۱۳-۴) به ترتیب تغییرات طول و بیشترین قطر بی بعد سوپرکوییتی تشکیل شده پشت دیسک را بر حسب عدد کاویتاسیون نشان می‌دهند. عدد رینولدز جریان بر اساس قطر کویتاتور  $(d=1/27\text{cm})$  برابر  $284569$  و در محدوده‌ی رینولدز داده‌های تجربی  $(4 \times 10^4 - 4 \times 10^5)$  است.

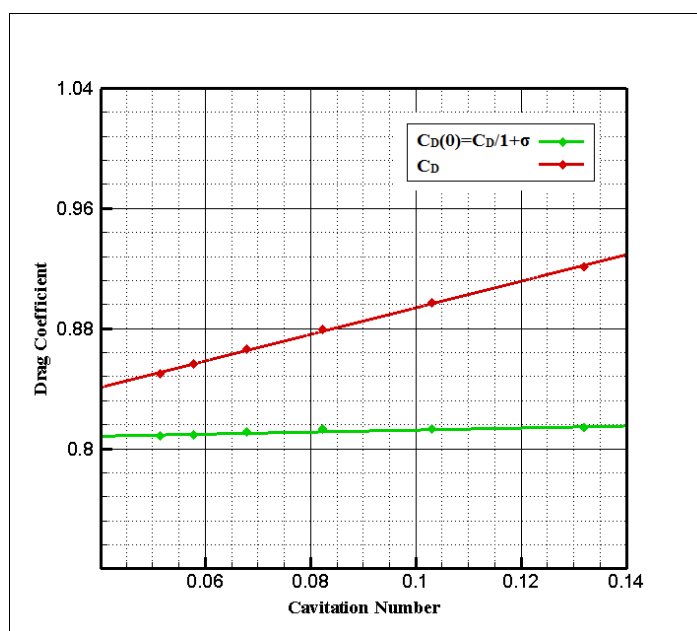


شکل (۱۲-۴): تغییرات طول بی بعد سوپرکوییتی پشت دیسک با عدد کاویتاسیون



شکل (۱۳-۴): تغییرات قطر بی بعد مرکز سوپرکوییتی پشت دیسک با عدد کاویتاسیون

در این قسمت ضریب پسا ( $C_D$ ) به همراه ضریب پسا در حالت عدد کاویتاسیون صفر (ضریب پسا برای طول بی نهایت سوپرکوییتی) ارائه می گردد. به نسبت  $C_D/1+\sigma$  ضریب پسا در حالت عدد کاویتاسیون صفر گفته می شود که از رابطه (۴-۵) بدست می آید. نمودار آن اساساً باید یک خط موازی محور افقی (محور عدد کاویتاسیون) باشد، که نمودار ارائه شده گویای این مطلب است. تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد کاویتاسیون برای دیسک در نمودار (۴-۱۴) مشاهده می شود.

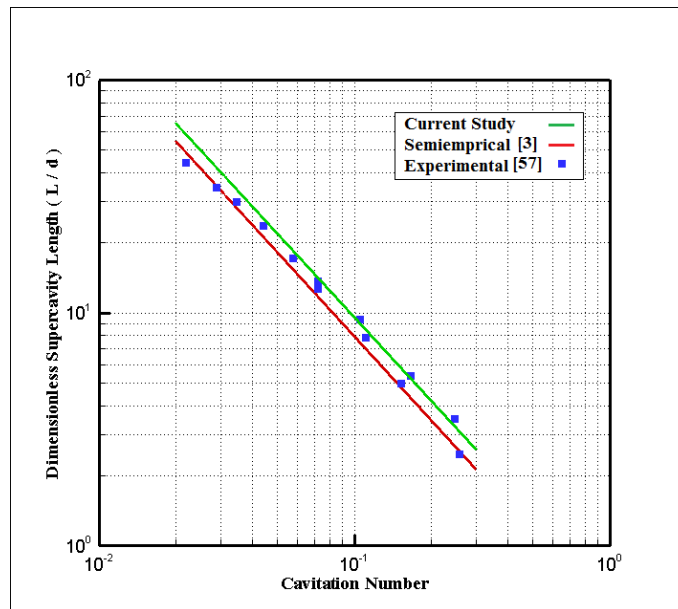


شکل (۴-۱۴): ضریب پسا و ضریب پسا برای طول بی نهایت سوپرکوییتی بر حسب عدد کاویتاسیون

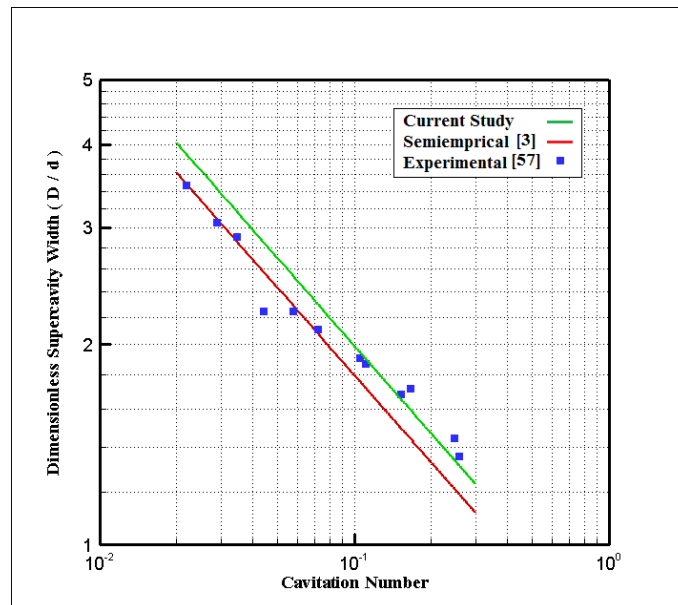
در شکل (۴-۱۵) الگوی سوپرکوییتی تشکیل شده پشت کویتیتور مخروطی (مخروط ۴۵ درجه)، در اعداد کاویتاسیون مختلف نشان داده شده است. شکل سوپرکوییتی مانند مورد دیسک از کانتور کسر حجمی مایع در  $\alpha = 0.5$  بدست آمده است. در شکل های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) پارامترهای سوپرکوییتی با نتایج تجربی و نیمه تجربی مقایسه شده است. شرایط شبیه سازی دقیقاً مشابه کویتیتور دیسکی می باشد.



شکل (۴-۱۵): الگوی سوپرکوییتی پشت مخروط ۴۵ درجه در اعداد کاویتاسیون مختلف



شکل (۴-۱۶): تغییرات طول بی بعد سوپرکوییتی پشت مخروط ۴۵ درجه با عدد کاویتاسیون

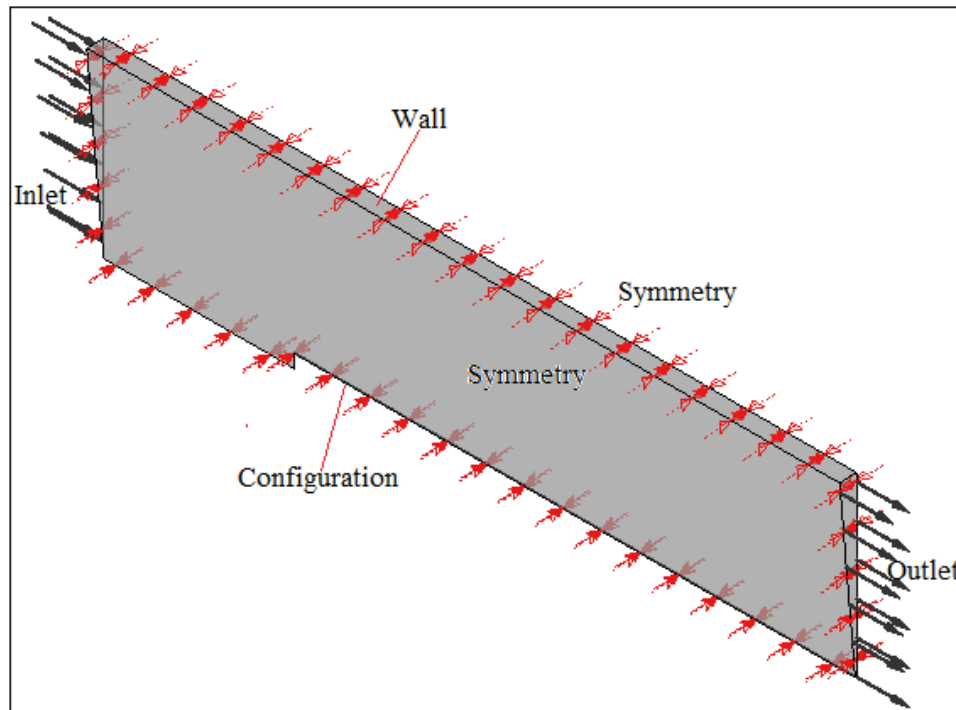


شکل (۴-۱۷): تغییرات قطر بی بعد مرکز سوپرکوییتی پشت مخروط ۴۵ درجه با عدد کاویتاسیون

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، در هر مورد سه نوع شبکه با تعداد سلول‌های متفاوت ایجاد شده است. شبکه‌های با ۱۷۲۰۰، ۳۲۰۰۰ و ۴۵۶۰۰ المان برای دیسک و شبکه‌های با ۱۸۰۰۰، ۳۱۳۰۰ و ۴۷۲۰۰ المان برای مخروط ۴۵ درجه تولید شده است. با مقایسه ضریب فشار در طول جریان برای هر شبکه و مشاهده اختلاف ناچیز بین نتایج شبکه متوسط و بالا، شبکه با المان بیشتر به عنوان شبکه مطلوب برای ادامه محاسبات انتخاب گشته است. همچنین مقدار حداکثر برای  $y^+$ ، به عنوان پارامتر بی بعد معرفی کننده فاصله اولین گره از دیوار برابر ۸۰ به دست آمده است. توضیحات مفصل‌تر در مورد نحوه انتخاب شبکه مطلوب در بخش بعدی ارائه خواهد شد.

در گام دوم، جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری حول کویتیتورهای به همراه بدنه مدل شده، و ضریب فشار روی کویتیتور و بدنه به دست آمده است. برای اعتبار بخشی نتایج این بخش، از داده‌های تجربی گزارش شده توسط رز و مکنون<sup>۱</sup> [۵۶]، استفاده شده است. ایشان فشار استاتیکی روی سطح کویتیتور و بدنه‌ی استوانه‌ای همراه آن را در تونل آب با اعمال شرایط کاویتاسیون و غیر کاویتاسیون اندازه‌گیری کرده‌اند. هندسه‌های متفاوتی توسط رز و مکنون بررسی شده که در این قسمت بدنه‌ی استوانه‌ای با کویتیتورهای مخروطی (زاویه راس ۴۵ درجه)، شبه کره‌ی و بدون کویتیتور شبیه سازی شده است. بیشترین قطر کویتیتور ۲/۵۴cm می‌باشد. در شکل (۴-۱۸) نمایی از میدان حل و شرایط مرزی برای بدنه استوانه‌ای ملاحظه می‌گردد. شرط مرزی جریان ورودی سرعت ثابت و برابر ۵m/s در نظر گرفته شده است. شدت آشفتگی در مرز ورودی ۱ درصد و همچنین کسر حجمی مایع برابر ۱ و کسر حجمی بخار صفر فرض شده است. در مرز خروجی فشار استاتیکی و بر اساس عدد کاویتاسیون تنظیم می‌گردد. برای مرز بالایی شرط عدم لغزش، برای صفحات جلویی و پشتی شرط مرزی تقارن آینه‌ای و برای مرز کویتیتور و بدنه شرط عدم لغزش اعمال می‌شود.

<sup>۱</sup> Rose and McNown

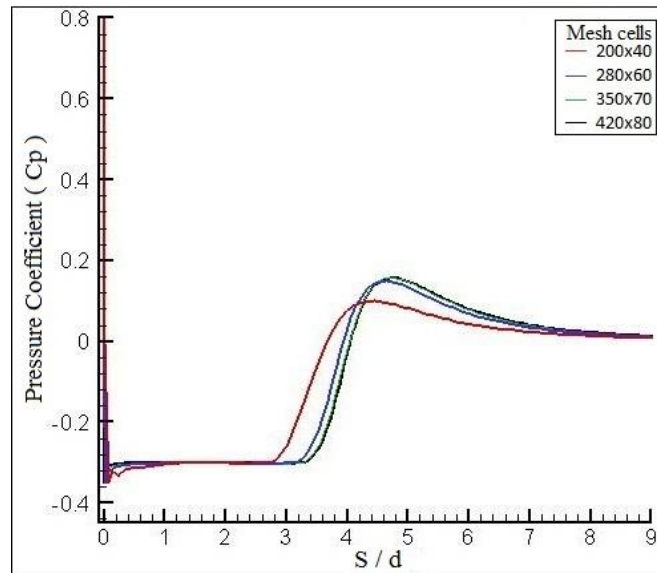


شکل (۴-۱۸): نمایی از میدان حل جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری برای استوانه به همراه شرایط مرزی

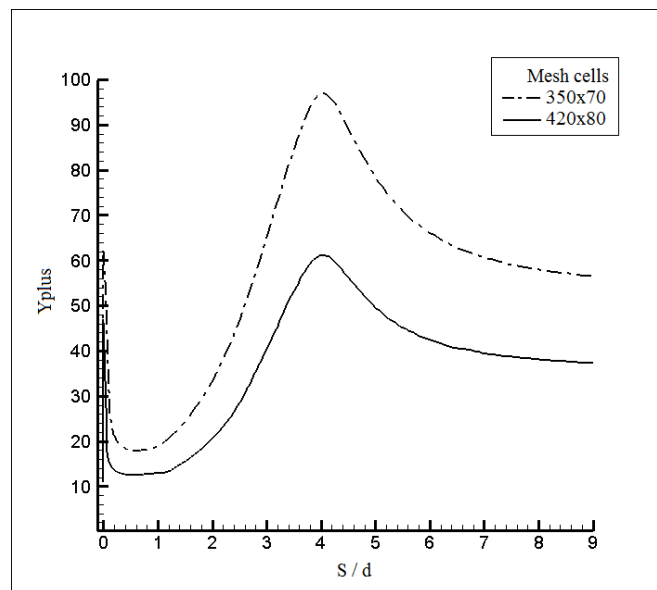
برای هر هندسه سه نوع شبکه مختلف تولید شده است. در کویتیتور شبه کروی سه شبکه  $40 \times 150$  ،  $60 \times 200$  و  $80 \times 300$  ، و برای کویتیتور مخروطی سه شبکه  $40 \times 180$  ،  $60 \times 300$  و  $80 \times 400$  تولید شده و با مقایسه ضریب فشار برای سه شبکه، و مشاهده نزدیکی جوابهای بدست آمده برای دو شبکه با سلول بالاتر، شبکه مطلوب انتخاب می گردد.

نمودار (۴-۱۹) نمونه‌ای از نحوه انتخاب شبکه مناسب و بررسی استقلال نتایج از شبکه را ارائه می کند. در این نمودار ضریب فشار برای استوانه‌ی بدون کویتیتور در چهار شبکه  $40 \times 200$  ،  $60 \times 280$  ،  $70 \times 350$  و  $80 \times 420$  رسم شده است. با توجه به نمودار عملاً اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین توزیع به دست آمده از سه شبکه با سلول بالاتر مشاهده نمی شود. بنابراین شبکه  $80 \times 420$  به عنوان شبکه مطلوب انتخاب شده است. همچنین برای بررسی مناسب بودن شبکه در نزدیک بدنه، در هندسه‌های مطالعه شده  $80 \times 420$  قرار دارد. به عنوان

مثال این تغییرات در نمودار (۴-۲۰) برای دو شبکه  $70 \times 350$  و  $20 \times 80$  مقایسه شده است. این کمیت در فصل سوم معرفی شده است.

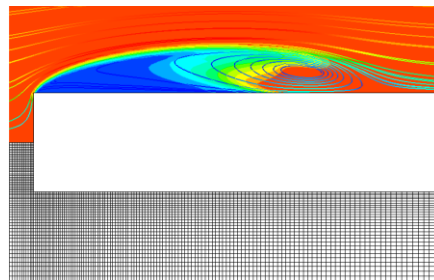


شکل (۴-۱۹): مقایسه ضریب فشار روی استوانه متقارن محوری برای شبکه‌های مختلف

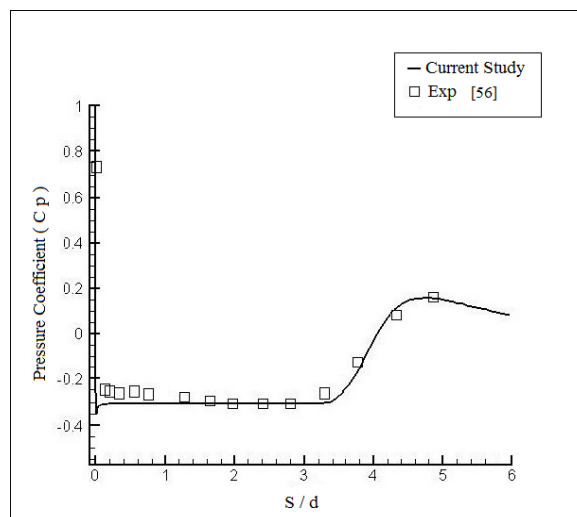


شکل (۴-۲۰): توزیع  $Y^+$  در طول استوانه بدون کویتور

بعد از تولید و انتخاب شبکه مناسب، جریان سوپرکاویتاسیونی در عدد کاویتاسیون انتخابی، برای سه مورد از هندسه‌های رز و مکنون مدل شده است. کانتور کسر حجمی مایع و توزیع ضریب فشار برای هر سه هندسه در ادامه ارائه می‌گردد. ضریب فشار برای بدنه‌های با کویتیتور شبه کروی و بدون کویتیتور تطابق مناسبی با نتایج تجربی دارد. برای کویتیتور مخروطی ضریب فشار با اینکه در ناحیه انتهایی کویتی، نتایج تفاوت آشکاری با نتایج تجربی دارد اما رفتار منحنی در روند نتایج تجربی است. در شکل (۴-۲۱) کانتور کسر حجمی به همراه خطوط جریان و نمونه شبکه استفاده شده برای استوانه بدون کویتیتور نشان داده شده است. نمودار توزیع ضریب فشار در شکل (۴-۲۲) برای هندسه استوانه‌ای با نتایج تجربی مقایسه شده است.



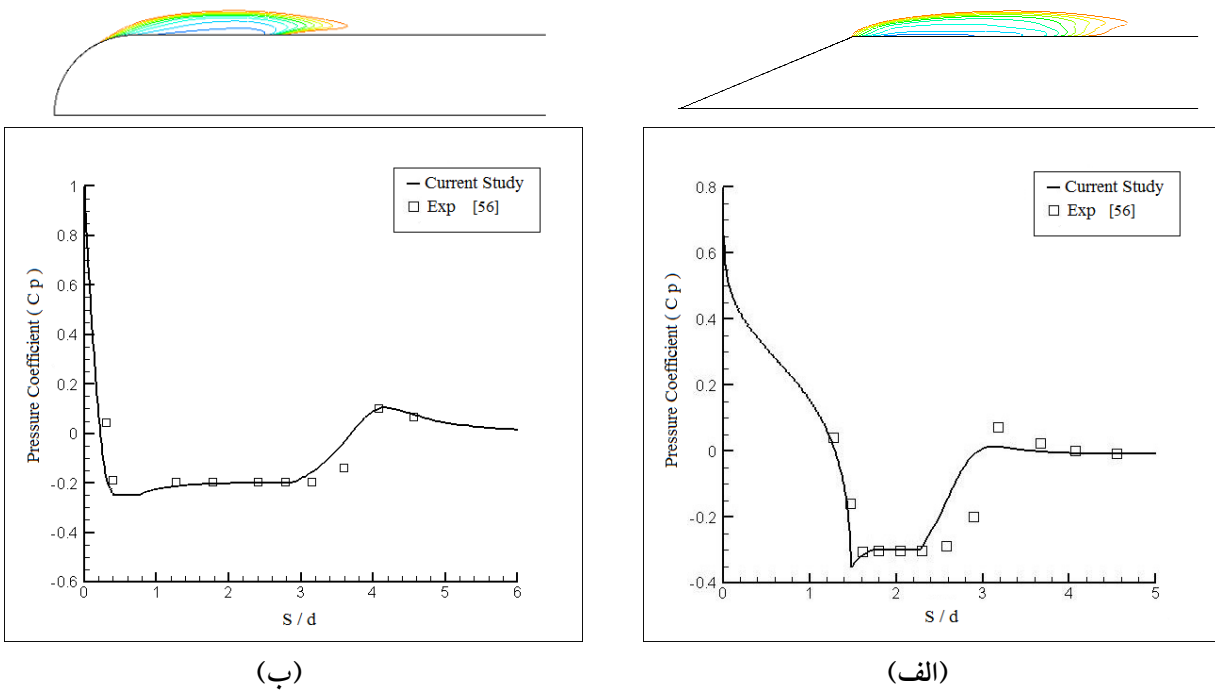
شکل (۴-۲۱): کانتور کسر حجمی مایع به همراه خطوط جریان و شبکه تولید برای استوانه بدون کویتیتور



شکل (۴-۲۲): توزیع ضریب فشار روی بدنه استوانه‌ای در عدد کاویتاسیون ۰/۳



در شکل (۴-۲۳) کانتور کسر حجمی برای کویتیتورهای مخروطی و شبه کروی به همراه توزیع ضریب فشار در اعداد کاویتاسیون انتخابی ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی با داده‌های گزارش شده توسط رز و مکنون [۵۶] مقایسه شده است.

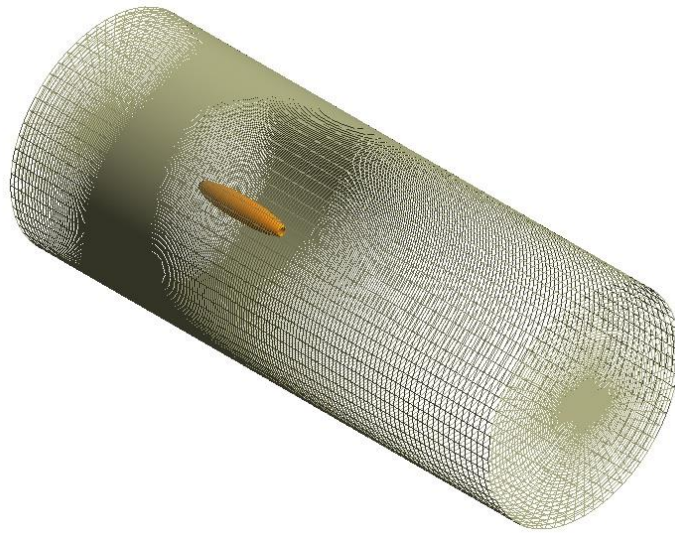


شکل (۴-۲۳): کانتورهای کسر حجمی مایع و توزیع ضریب فشار روی بدنه (الف) کویتیتور مخروطی با زاویه راس ۴۵ درجه، عدد کاویتاسیون ۰/۳ (ب) کویتیتور شبه کروی، عدد کاویتاسیون ۰/۲

#### ۴-۴ نتایج جریان سوپرکویتاسیون سه بعدی

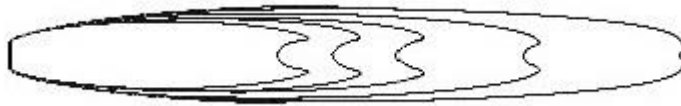
در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از مدل‌سازی سه بعدی جریان سوپرکویتاسیون ارائه می‌گردد. برای این منظور، جریان حول دیسک و استوانه بدون کویتیتور در چندین زاویه حمله مطالعه شده است. شبکه سه بعدی شامل ۱۳۹۸۶۰۰ المان، با توجه به مطالعات شبکه‌ای که در بخش متقارن محوری انجام شد، برای کویتیتور دیسکی تولید گشته است. ابعاد میدان حل برابر ابعاد میدان حل حالت متقارن محوری انتخاب شده است. نمایی

از میدان حل و شبکه به کار گرفته شده در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است. زاویه حمله جریان با استفاده از تنظیم مولفه‌های سرعت در ورودی و همچنین میدان اطراف تنظیم می‌شود. در مرز خروجی، فشار استاتیکی بر حسب عدد کاویتاسیون انتخاب می‌گردد. سایر فرضیات لازم و شرایط اولیه مانند حالت متقارن محوری اعمال می‌گردد. برای زاویه حمله صفر درجه، سرعت ورودی ۲۰ فرض می‌شود. مولفه‌های سرعت متناظر با زاویه حمله مورد نظر، از تصویر کردن سرعت در راستای افقی و عمودی میدان حل بدست می‌آید.

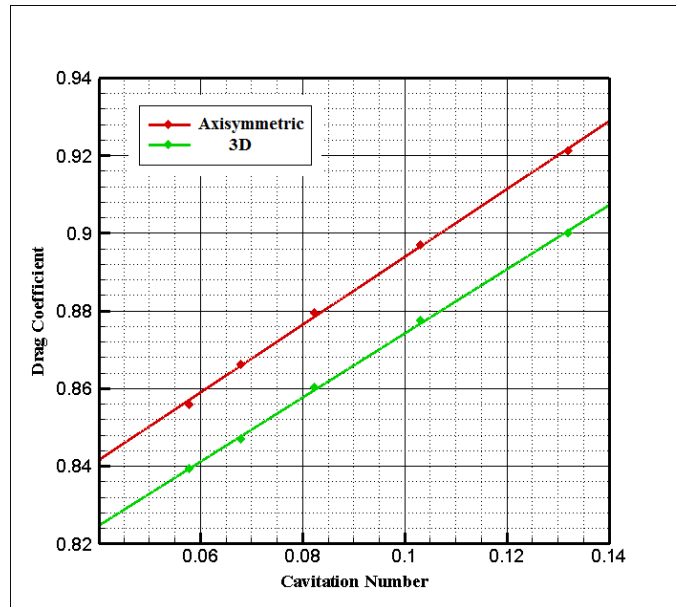


شکل (۴-۲۴): نمونه میدان حل و شبکه‌بندی سه‌بعدی به همراه سطح ثابت کسرحجمی مایع در  $\alpha = 0,9$

جریان برای زوایای حمله ۰/۰، ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ درجه، در اعداد کاویتاسیون مختلف حل شده است. شکل (۴-۲۵) رشد سوپرکوییتی را با کاهش عدد کاویتاسیون در زوایای حمله ۰,۰ درجه نشان می‌دهد. ابتدا ضریب پسا به دست آمده از شبیه‌سازی متقارن محوری با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه‌بعدی مقایسه شده است. در شکل (۴-۲۶) این مقایسه ملاحظه می‌گردد. اختلاف ضریب پسا محاسبه شده از شبیه‌سازی سه‌بعدی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی متقارن محوری زیر ۳ درصد به دست آمده، که حاکی از همخوانی مناسب نتایج سه‌بعدی و متقارن محوری است.



شکل (۴-۲۵): رشد سوپرکوییتی پشت دیسک با کاهش عدد کاویتاسیون

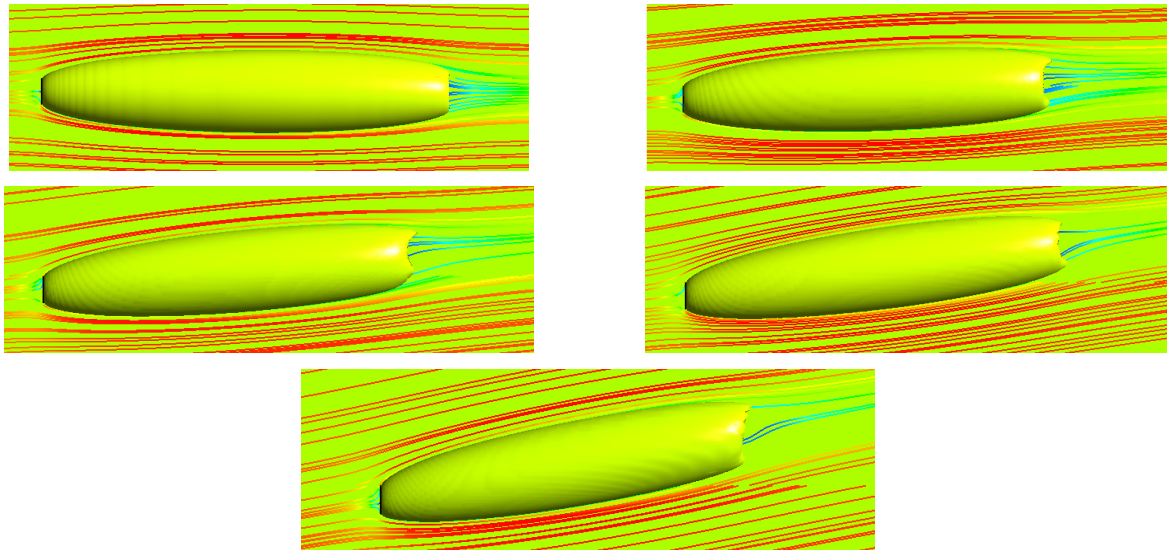


شکل (۴-۲۶) مقایسه ضریب پسا حاصل از شبیه سازی متقارن محوری و سه بعدی

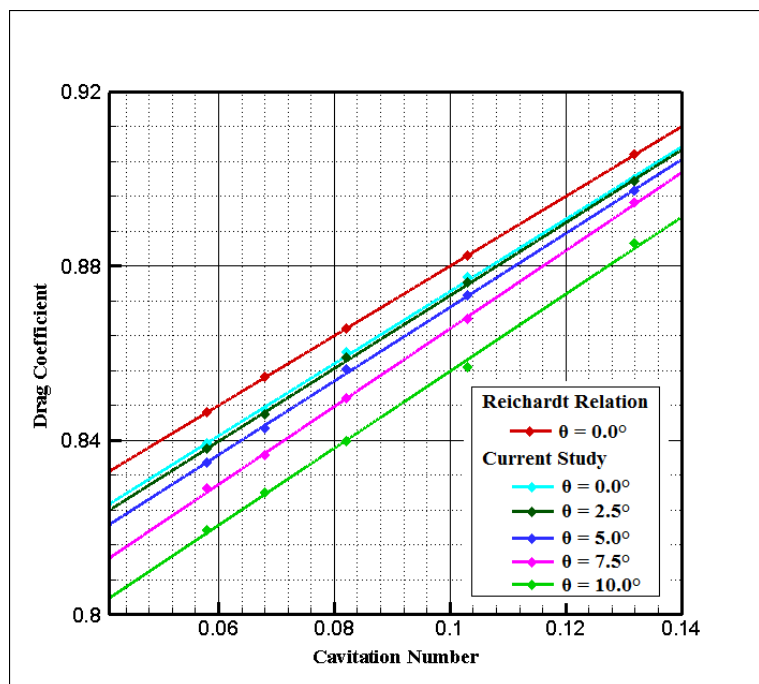
برای مشاهده تغییرات شکل سوپرکوییتی با زاویه حمله، سطح ثابت کسر حجمی مایع در  $\alpha = 0.7$ ، به همراه خطوط جریان روی آن در شکل (۴-۲۷) نشان داده شده است. همچنین تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله در اعداد کاویتاسیون مختلف در شکل (۴-۲۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منظور از نیروی پسا، نیروی فشاری وارد بر کویتیتور در جهت جریان می‌باشد.

در مرحله بعدی بررسی جریان سوپرکاویتاسیون سه بعدی، جریان حول استوانه بدون کویتیتور در زوایای حمله  $0/0$ ،  $2/5$ ،  $5/0$ ،  $7/5$  و  $10/0$  درجه مطالعه شده است. شبکه‌ای سه بعدی متناظر با شبکه متوسط مطالعه شده در بخش متقارن محوری برای استوانه بدون کویتیتور، با ابعاد  $60 \times 60 \times 280$  تولید شده و مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد میدان حل برابر ابعاد میدان حل حالت متقارن محوری انتخاب شده است. تغییرات الگوی

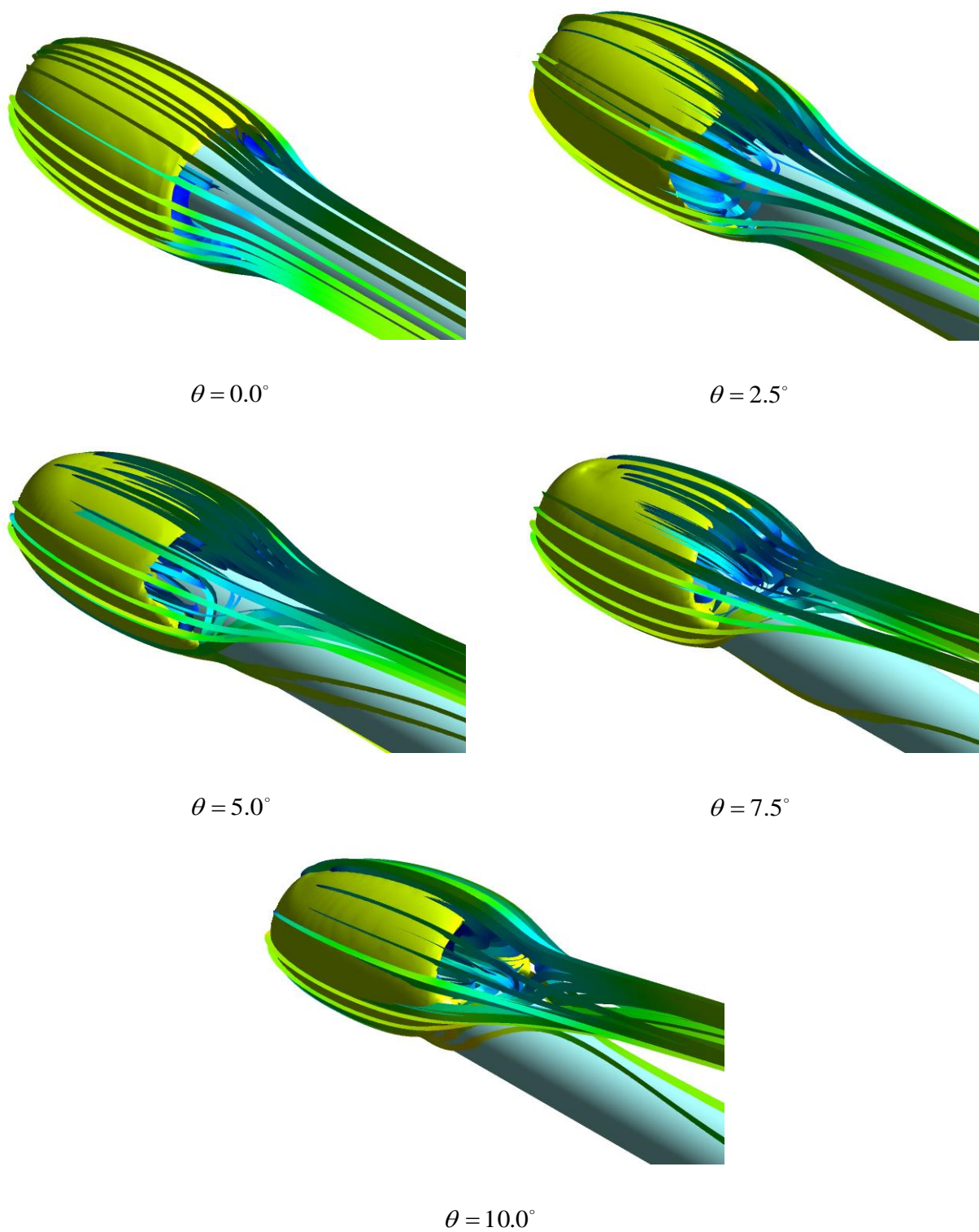
سوپرکوییتی در عدد کاویتاسیون  $0.3$  با تغییر زاویه حمله در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است. در این تصاویر خطوط جریان حول سطح همتراز کسر حجمی مایع در  $\alpha = 0.7$  ارائه شده، و ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه حمله جریان، تقارن خطوط از بین رفته و جریان به شدت سه بعدی است.



شکل (۴-۲۷): خطوط جریان روی سطح ثابت کسر حجمی مایع در زوایای حمله  $0^\circ$ ،  $2.5^\circ$ ،  $5.0^\circ$ ،  $7.5^\circ$  و  $10.0^\circ$  درجه  
 ( $\alpha = 0.7$ ،  $\sigma = 0.103$ )



شکل (۴-۲۸): تغییرات ضریب پسا با عدد کاویتاسیون در زوایای حمله مختلف برای دیسک

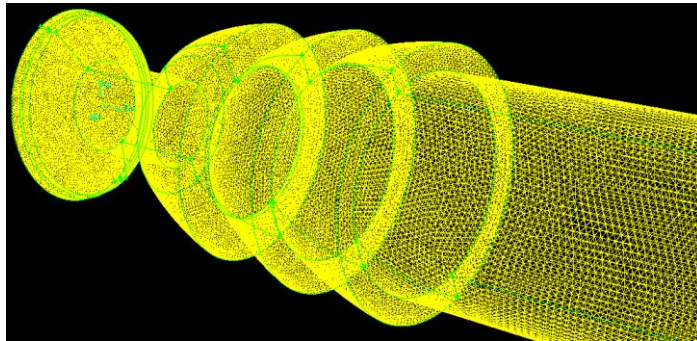


شکل (۴-۲۹): سطح ثابت کسر حجمی مایع در زوایای حمله مختلف به همراه خطوط جریان روی استوانه  
( $\sigma = 0.3, \alpha = 0.7$ )

نتایجی که در این بخش ارائه شد، حاکی از مدل‌سازی مناسب جریان سوپرکاویتاسیون سه بعدی حول کویتیتور دیسکی و همچنین بدنه استوانه‌ای است. با این مقدمه در ادامه تحقیق به بررسی کامل یک رونده زیر سطحی پرداخته می‌شود. با توجه به اطلاعاتی که از سایت‌ها و مراجع مختلف گردآوری شده، رونده‌ای که در شکل (۴-۳۰) ملاحظه می‌گردد، مدل شده است. قطر کویتیتور دیسکی  $2\text{cm}$ ، طول رونده  $97\text{cm}$ ، ارتفاع بالک‌ها  $3/19\text{cm}$  و بیشترین ضخامت مقطع بالک‌ها  $0/38\text{cm}$  می‌باشد. سیستم کاهش پسا این رونده‌ها یعنی کویتیتور و کاسه‌های پشت در شکل (۴-۳۱) دیده می‌شود. این سیستم عامل ایجاد سوپرکاویتاسیون است. دیسک جلوی رونده متحرک است و در زوایای متفاوتی می‌تواند تنظیم شود. این دیسک علاوه بر ایجاد سوپرکویتیتی وظایف متفاوتی دیگری نیز دارد. تولید لیفت برای حفظ مسیر مستقیم رونده، حفظ و کنترل زاویه پیچ و حفظ و پایداری رونده در کانال سمت از جمله این وظایف است. از کاسه‌های پشت برای تزریق گاز به داخل سوپرکویتیتی و افزایش فشار داخل آن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که سوپرکاویتاسیون بررسی شده در این بخش، سوپرکاویتاسیون طبیعی است و سوپرکویتیتی در اثر سرعت رونده و بدون تزریق گاز تولید می‌گردد. در صورتی که ابعاد سوپرکویتیتی حاصل از تزریق با ابعاد سوپرکویتیتی طبیعی مشابه باشد، این دو سوپرکویتیتی را می‌توان معادل یکدیگر دانست [۸].



شکل (۴-۳۰): هندسه‌ی رونده زیر سطحی



(ب)



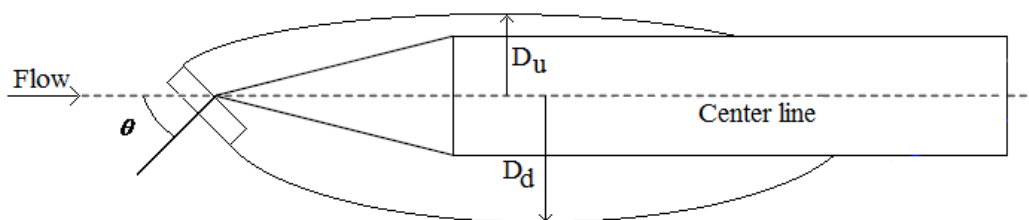
(الف)

شکل (۴-۳۱): (الف) هندسه نوک رونده زیر سطحی، (ب) شبکه روی هندسه نوک رونده زیر سطحی

در تحقیق حاضر اثرات زوایای نصب کویتیتور روی شکل سوپرکوییتی بررسی شده است. برای این منظور شبکه‌های بی سازمان شامل ۵۸۷۸۰۶۴ و ۳۸۳۵۴۲۸ المان چهار وجهی برای میدان حل تولید شده است. به دلیل محدودیتی که در محاسبات عددی برای شبکه‌های با تعداد المان بالاتر وجود داشت، میدان حل به دو ناحیه نزدیک و دور از بدنه تقسیم شده و برای ناحیه نزدیک بدنه از شبکه ریز استفاده شده، در حالی که برای ناحیه دورتر از شبکه بندی درشت‌تر استفاده گردیده است. محاسبات عددی به صورت موازی برای هر دو شبکه در زاویه نصب صفر درجه انجام شده، و نتایج کسر حجمی بدست آمده از هر دو شبکه با هم مقایسه شده است. با در نظر گرفتن اختلاف ناچیز بین نتایج، شبکه با المان بالاتر به عنوان شبکه مطلوب، برای ادامه محاسبات انتخاب شده است. همچنین در شبکه به کار گرفته شده برای اطمینان از کیفیت مناسب شبکه، پارامترهای نسبت منظری، حداکثر و حداقل زاویه وجه‌ها، نسبت طول لبه و نسبت حجم المان‌ها بررسی شده که همگی در محدوده قابل قبول CFX قرار داشتند [۴۷]. همچنین کمیت  $y^+$  نیز به عنوان یکی از کمیت‌های مناسب بودن شبکه بر روی بدنه بررسی شده، و بیشترین مقدار آن ۵۰۰ به دست آمده است. این مقدار  $y^+$  به دلیل رینولدز بالا قابل قبول می‌باشد. با توجه به تئوری CFX این مقدار می‌توانست تا مقدار ۱۰۰۰ نیز افزوده شود [۴۷].

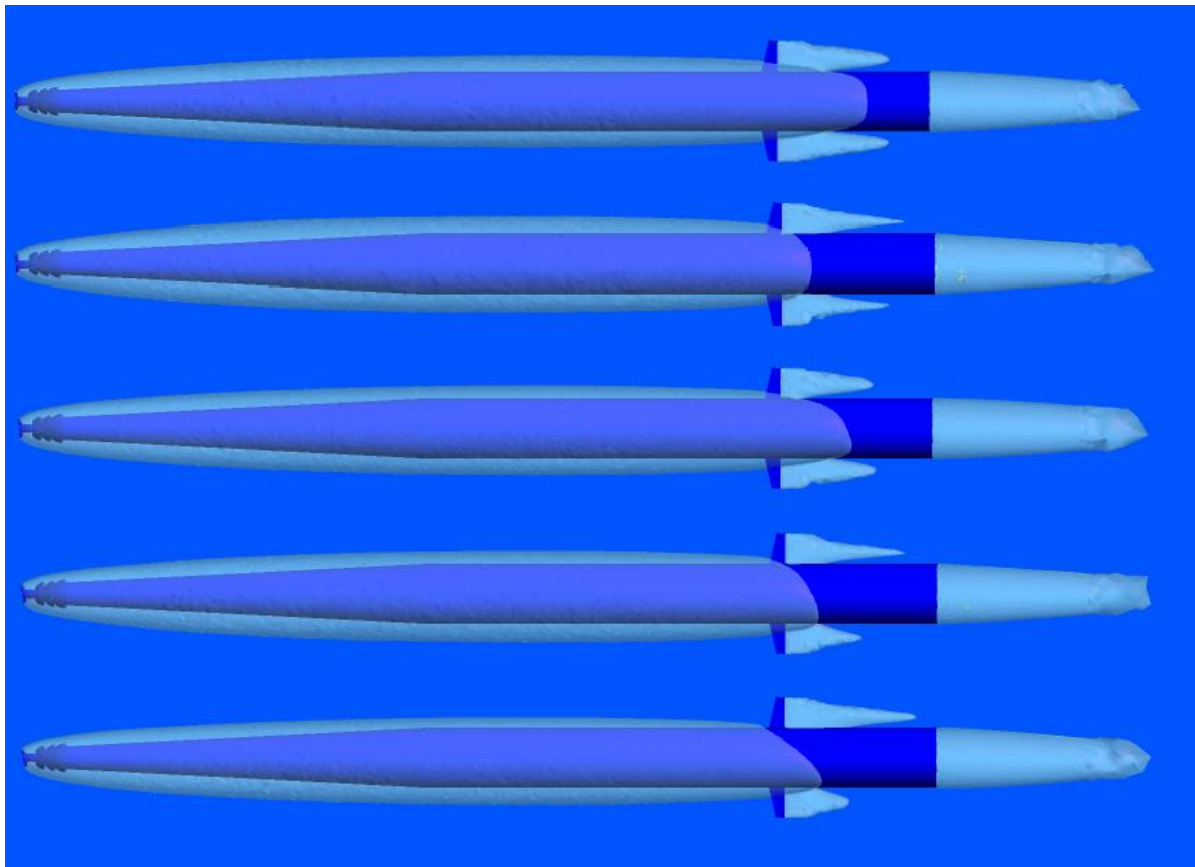
سرعت رونده  $100\text{m/s}$  و عدد رینولدز شبیه سازی  $2240701$  بر اساس قطر کویتیتور است. عدد کاویتاسیون شبیه سازی  $0/03$  در نظر گرفته شده است. عدد کاویتاسیون طبق تعریف بر اساس فشار مرز خروجی متناظر با عمق رونده مشخص می شود. مرزهای دور میدان نیز شرط محیط بی نهایت را فراهم می کند. برای بدنه رونده نیز شرط عدم لغزش انتخاب شده است.

میدان حل طبق توضیحات فصل سوم به ۴ ناحیه محاسباتی تقسیم شده و محاسبات روی یک پردازنده موازی انجام گرفته است. شبیه سازی عددی در زوایای نصب  $0$ ،  $3$ ،  $6$ ،  $9$ ،  $12$  و  $15$  درجه صورت گرفته و شکل سوپرکوییتی در هر حالت به دست آمده است. برای تحلیل نتایج پارامتر  $Du/Dd$  (نسبت کمترین قطر به بیشترین قطر سوپرکوییتی) طبق شکل (۴-۳۲) تعریف، و برای هر زاویه نصب مقدار این پارامتر محاسبه شده است. الگوی سوپرکوییتی در شکل (۴-۳۳) برای هر مورد ارائه شده، و در شکل (۴-۳۴) با وضوح بیشتری در نوک ملاحظه می شود. تغییرات شکل سوپرکوییتی با زاویه نصب، در این تصاویر به روشنی دیده می شود. عدم تقارن در ناحیه انتهایی سوپرکوییتی و پشت بالکها با افزایش زاویه نصب بیشتر شده است. این تغییرات در شکل (۴-۳۵) از مقطع عمود بر جریان نشان داده شده است. برای هر حالت مقدار  $Du/Dd$  محاسبه و همراه با تصاویر ارائه شده است.

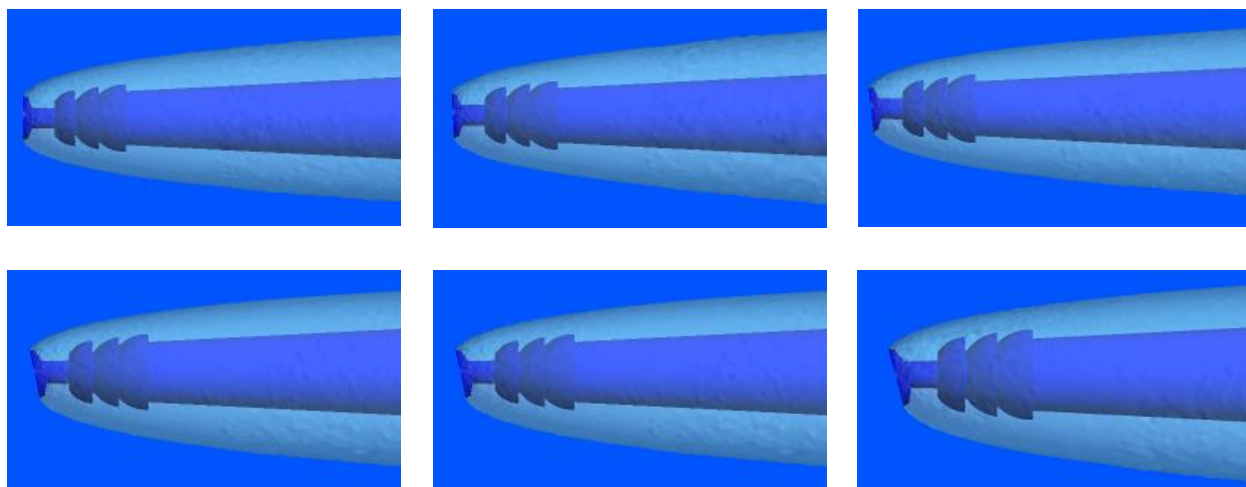


شکل (۴-۳۲): شماتیک هندسه رونده زیر سطحی به همراه الگوی سوپرکوییتی

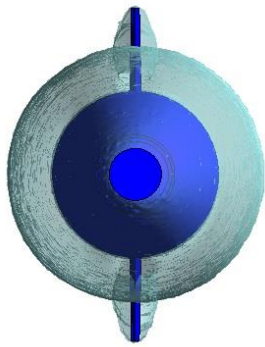




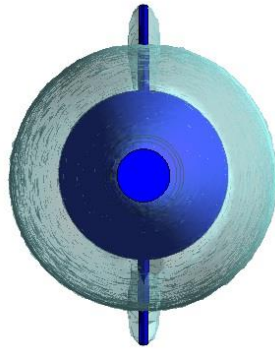
شکل (۴-۳۳): الگوی سوپرکویته حول رونده زیر سطحی در زوایای نصب متفاوت کویتاتور  
(عدد کاویتاسیون  $\sigma = 0.3$  در زوایای نصب کویتاتور ۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درجه)



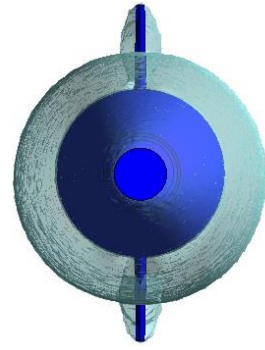
شکل (۴-۳۴): الگوی سوپرکویته حول در نوک رونده زیر سطحی در زوایای نصب متفاوت کویتاتور  
(عدد کاویتاسیون  $\sigma = 0.3$  در زوایای نصب کویتاتور ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درجه)



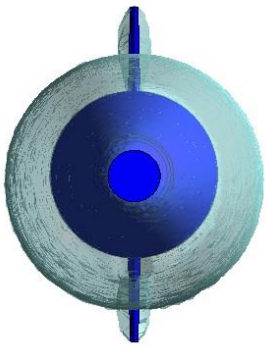
$$\theta = 0^\circ \text{ \& } D_u / D_d = 1$$



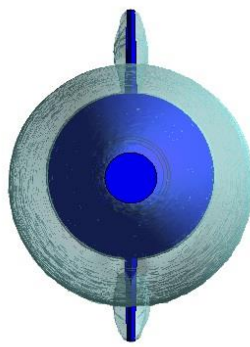
$$\theta = 3^\circ \text{ \& } D_u / D_d = 0.9638$$



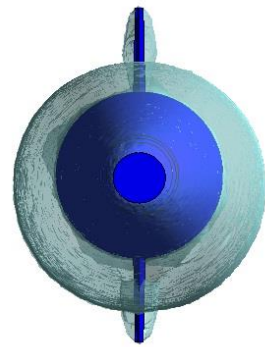
$$\theta = 6^\circ \text{ \& } D_u / D_d = 0.9210$$



$$\theta = 9^\circ \text{ \& } D_u / D_d = 0.8832$$



$$\theta = 12^\circ \text{ \& } D_u / D_d = 0.8478$$



$$\theta = 15^\circ \text{ \& } D_u / D_d = 0.8177$$

شکل (۴-۳۵): تغییرات پارامتر  $D_u/D_d$  با زوایای نصب کویتتور و الگوی سوپرکوییتی از مقطع عمود بر جهت جریان (عدد کاویتاسیون  $\sigma = 0.03$  در زوایای نصب کویتتور ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ درجه)

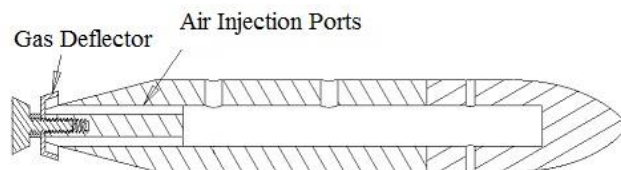
تا این بخش از پژوهش جریان سوپرکاویتاسیون طبیعی حول هندسه‌های متفاوتی شبیه سازی شده است. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و بعضاً تحلیلی در دسترس مقایسه شده، و این مقایسه‌ها حاکی از دقت مناسب و قابل قبول جواب‌های حاصل از این شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. مدل‌سازی جریان سوپرکاویتاسیون سه بعدی (جریان با زاویه حمله) و همچنین جریان سوپرکاویتاسیون حول یک پرتابه‌ی زیر سطحی کامل، از اهداف اصلی تحقیق حاضر است، که تا این مرحله به طور مناسبی محقق گشته است. در انتهای تحقیق جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی که با تزریق گاز غیر قابل تقطیر انجام می‌شود، در اطراف یک رونده زیر سطحی بررسی می‌گردد.

## ۴-۵ نتایج سوپرکاویتاسیون مصنوعی

گرایش جریان برای کاویته شدن با عدد کاویتاسیون طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma = \frac{p - p_c}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (۴-۶)$$

که  $p$  فشار محیط،  $p_c$  فشار داخل کویتی و مخرج کسر نیز فشار دینامیکی می‌باشند. با کاهش عدد کاویتاسیون گرایش جریان به کاویته شدن افزایش می‌یابد. برای رسیدن به حالت سوپرکاویتاسیون، اعداد کاویتاسیون پایین نیاز است. سه روش برای کاهش عدد کاویتاسیون موجود است: (۱) افزایش سرعت جریان (افزایش سرعت رونده به بالای ۴۵m/s در سطح دریا که با افزایش عمق رونده سرعت بالاتری نیاز است)، (۲) کاهش فشار محیط (فقط در تونل آب با اتاق آزمون بسته امکان‌پذیر است) و یا (۳) افزایش فشار داخل سوپرکویتی (با تزریق گاز یا همان سوپرکاویتاسیون مصنوعی). در یک رونده‌ی زیر سطحی که برای حرکت در رژیم سوپرکاویتاسیون طراحی می‌شود، سوپرکویتی با تزریق گاز تقویت می‌گردد. موضوع این بخش از تحقیق بررسی سوپرکاویتاسیون مصنوعی می‌باشد. وسنیک و همکاران وی<sup>۱</sup> [۷] یک رونده زیر سطحی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. برای مستند بودن نتایج شبیه سازی عددی، شرایط مساله مطابق شرایط آزمایشگاهی ایشان اعمال شده است. در شکل (۴-۳۶) شماتیک هندسه‌ی به کار برده شده توسط وسنیک و همکاران وی ملاحظه می‌گردد. قطر کویتیتور در این تصویر ۱cm است.



شکل (۴-۳۶): شماتیک هندسه بررسی شده در جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی [۷]

<sup>۱</sup> Wosnik and et al

شبیه سازی با استفاده از یک شبکه سه بعدی و بی سازمان انجام شده است. شبکه شامل  $3470797$  المان چهار وجهی می باشد. برای شبیه سازی عددی از پردازش موازی استفاده شده است. میدان حل مطابق توضیحات فصل سوم، به چهار ناحیه محاسباتی تقسیم گشته، و محاسبات هر ناحیه توسط یک پردازنده بر روی یک ماشین انجام شده است. قطر میدان حل برابر قطر هیدرولیکی تونل آب در نظر گرفته شده است. در مرزی ورودی سرعت  $10\text{ m/s}$ ، و در مرز خروجی فشار استاتیکی متناظر با عدد کاویتاسیون طبیعی  $0/5$  تنظیم شده است. برای بدنه هندسه شرط مرزی عدم لغزش را اعمال شده است. در مرز تزریق از شرط مرزی باز<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این مرز سرعت گاز تزریق شده به میدان جریان تنظیم می گردد. با افزایش سرعت گاز تزریق شده نرخ تزریق بیشتر شده و در نتیجه آن شاهد رشد سوپرکوییتی هستیم. نرخ تزریق از رابطه زیر محاسبه می شود.

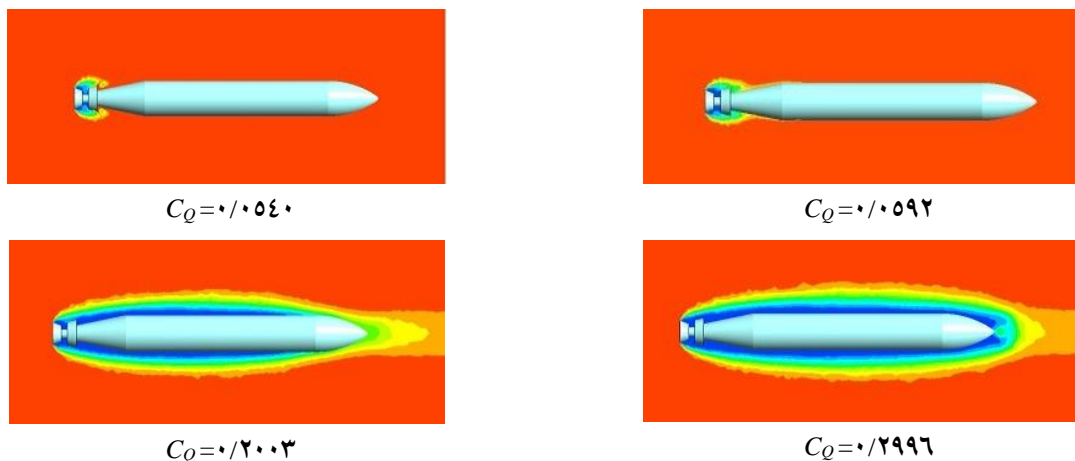
$$C_Q = \frac{Q}{Ud^2} \quad (7-4)$$

که  $Q$  نرخ جریان حجمی گاز،  $U$  سرعت جریان ورودی و  $d$  قطر کویتاتور هندسه می باشد. در مدل سازی سوپرکاویتاسیون مصنوعی، هیچ نوع انتقال جرمی در نظر گرفته نشده است. فشار و سرعت مرجع ثابت فرض شده است. سوپرکوییتی فقط به واسطه تزریق گاز تولید می شود. با افزایش نرخ تزریق به طول سوپرکوییتی افزوده می شود و یا به عبارت بهتر عدد کاویتاسیون کاهش یافته است. توجه به این نکته ضروری است که عدد کاویتاسیونی که در سوپرکاویتاسیون مصنوعی مواجه هستیم، با عدد کاویتاسیون سوپرکاویتاسیون طبیعی (که بر اساس فشار بخار تعریف شد) متفاوت است. برای سوپرکاویتاسیون مصنوعی عدد کاویتاسیون براساس فشار داخل سوپرکوییتی تعریف می شود (رابطه ۷-۴). عدد کاویتاسیون ارائه شده در این بخش، از رهیافت و سنیک و همکاران وی محاسبه شده است. ایشان به دلیل تحت تاثیر قرار گرفتن فشار اندازه گیری شده داخل سوپرکوییتی

---

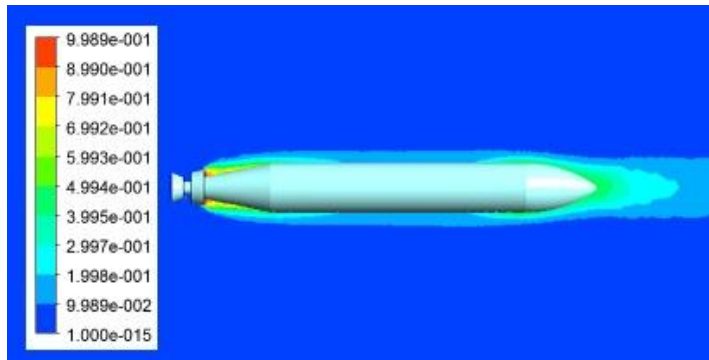
<sup>۱</sup> Opening

توسط جریان برگشتی در ناحیه بسته شدن سوپرکوییتی، از روش دیگری برای محاسبه عدد کاویتاسیون استفاده کردند. ایشان با افزایش نرخ تزریق طول‌های متفاوتی برای سوپرکوییتی به دست آوردند. با مقایسه این طول‌ها با نتایجی که برنن<sup>۱</sup> [۵۸] برای محدوده وسیعی از اعداد کاویتاسیون ارائه کرده است، عدد کاویتاسیون طول متناظر را به دست آوردند. در شکل (۴-۳۷) الگوی سوپرکوییتی تشکیل شده در نرخ تزریق‌های متفاوت ملاحظه می‌گردد. این تصاویر از شبیه‌سازی جریان برای نوک (کویتیتور) با قطر ۱ cm بدست آمده است. شکل (۴-۳۸) کانتور کسر حجمی گاز را نشان می‌دهد. تراکم گاز در ناحیه خروج از مرز تزریق و انتهای بدنه بالاتر می‌باشد. تغییرات نرخ تزریق گاز با عدد کاویتاسیون در شکل (۴-۳۹) با نتایج تجربی [۷] مقایسه شده است. مدل‌سازی برای دو دیسک با اندازه متفاوت (۱ و ۱/۵ cm) انجام شده است. تغییرات طول سوپرکوییتی و همچنین عدد کاویتاسیون با افزایش نرخ تزریق روند مشابهی دارد. با این وجود عدد کاویتاسیون به دست آمده برای دیسک بزرگتر، بالاتر می‌باشد. همچنین با افزایش نرخ تزریق بعد از حد معینی عدد کاویتاسیون و در نتیجه‌ی آن طول سوپرکوییتی اختلاف فاحشی وجود ندارد. شکل (۴-۴۰) الگوی سوپرکوییتی را در کسر حجمی مایع برابر ۰/۸ و نرخ تزریق ۰/۲۹۹۶ نشان می‌دهد.

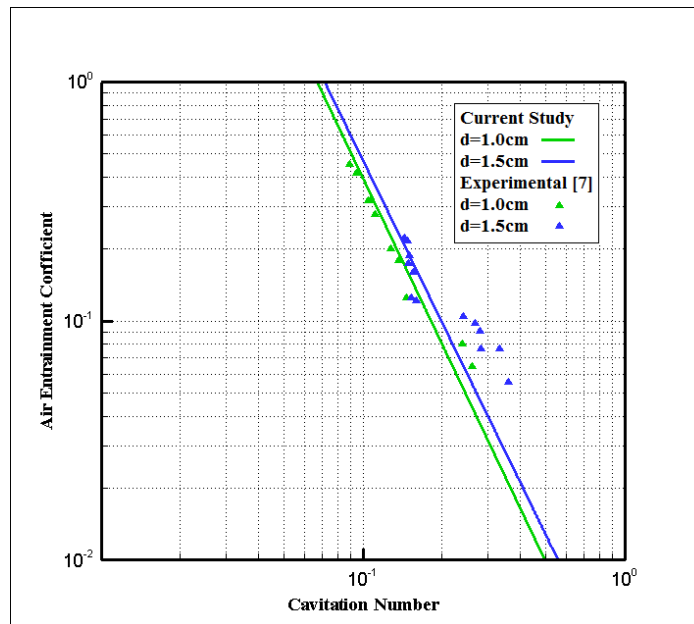


شکل (۴-۳۷): کانتور کسر حجمی مایع در نرخ تزریق‌های متفاوت

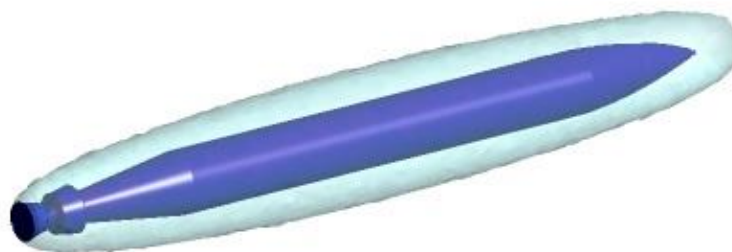
<sup>۱</sup> Brennen



شکل (۴-۳۸): کانتور کسر حجمی گاز غیر قابل تفطیر در  $C_Q = 0.2996$

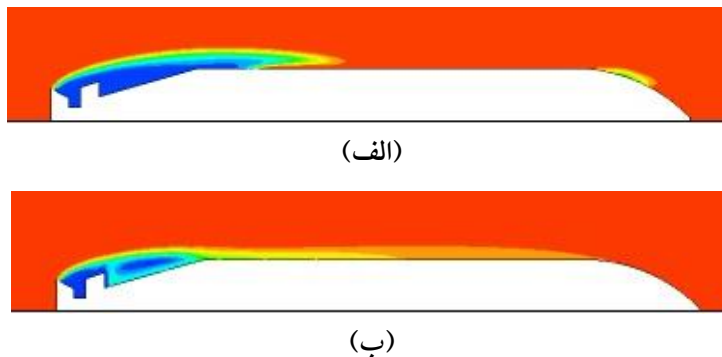


شکل (۴-۳۹): تغییرات نرخ تزریق با عدد کاویتاسیون

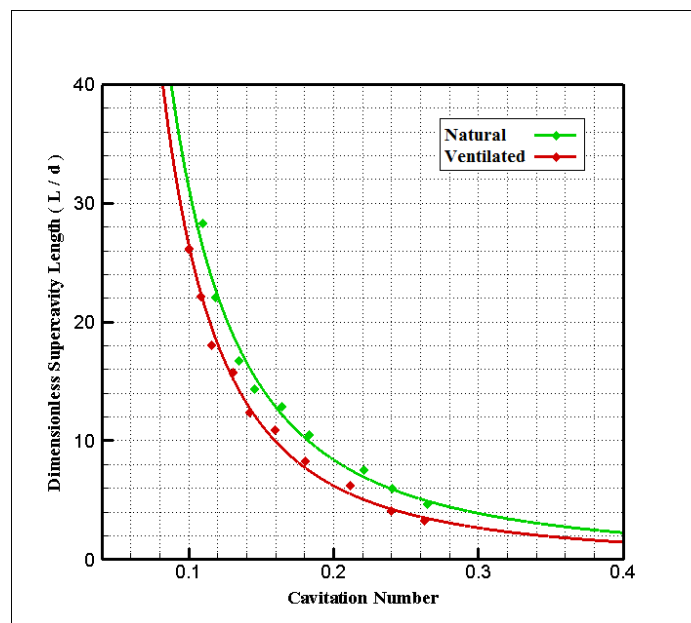


شکل (۴-۴۰): سطح همتراز کسر حجمی مایع  $\alpha = 0.08$  در  $C_Q = 0.2996$

در انتهای تحقیق مقایسه‌ای بین سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی انجام شده است. در شکل (۴-۴۱) کانطور کسر حجمی مایع در عدد کاویتاسیون انتخابی نشان داده شده است. شبیه‌سازی در چند عدد کاویتاسیون مختلف انجام شده و طول بی‌بعد سوپرکوییتی حاصل از سوپرکاویتاسیون طبیعی و سوپرکاویتاسیون ناشی از تزریق در شکل (۴-۴۲) مقایسه شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، تعریف عدد کاویتاسیون در هر مورد باهم متفاوت است.



شکل (۴-۴۱): کانطورهای کسر حجمی مایع در  $\sigma=0.26$  (الف) کاویتاسیون طبیعی، (ب) کاویتاسیون حاصل از تزریق



شکل (۴-۴۲): مقایسه طول بی‌بعد سوپرکوییتی برای سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی

## ۶-۴ بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر جریان سوپرکاویتاسیون در شرایط مختلف عملکردی بررسی شد. برای این منظور، در ابتدا جریان سوپرکاویتاسیون دو بعدی حول کویتیتورهای صفحه‌ای و گوه‌ای با زاویه رأس ۹۰ درجه شبیه سازی شده پارامترهای سوپرکویتیتی برای هر مورد به دست آمد. در مدل‌سازی دو بعدی اثرات دیواره نیز برای کویتیتور صفحه‌ای بررسی شد.

در گام دوم جریان سوپرکاویتاسیون حول هندسه‌های متقارن محوری بررسی شد. پارامترهای سوپرکویتیتی و ضریب پسا برای کویتیتور دیسکی و مخروطی با زاویه رأس ۴۵ درجه بدست آمد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی و تحلیلی در دسترس، حاکی از دقت مناسب شبیه سازی بود. در مرحله بعدی بررسی جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری، ضریب فشار بر روی بدنه استوانه‌ای، با سه نوع کویتیتور متفاوت (بدون کویتیتور، مخروطی و شبه کروی) انجام شد. نتایج به دست آمده برای کویتیتور شبه کروی و بدون کویتیتور تطابق خیلی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند، در حالی که توزیع ضریب فشار برای کویتیتور مخروطی نیز در روند نتایج تجربی قرار داشت.

بعد از مطالعه جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری به مدل‌سازی جریان سوپرکاویتاسیون سه بعدی پرداخته شد. جریان در زوایای حمله مختلف حول کویتیتور دیسکی و همچنین حول استوانه بدون کویتیتور شبیه سازی شد. برای کویتیتور دیسکی تغییرات ضریب پسا با زاویه حمله بررسی شد. الگوی سوپرکویتیتی نیز برای هر حالت به دست آمد. با توجه به مدل‌سازی مناسب سوپرکاویتاسیون سه بعدی حول هندسه‌های پیش گفته، در مرحله بعدی یک رونده زیر سطحی به صورت کامل مدل‌سازی شد، و تغییرات شکل سوپرکویتیتی در زوایای نصب مختلف کویتیتور به دست آمد.



در بخش آخر تحقیق، سوپرکاویتاسیون مصنوعی با تزریق گاز و بدون هیچ نوع انتقال جرمی، حول یک رونده زیر سطحی مدل شد. تغییرات طول سوپرکویته و عدد کاویتاسیون در نرخ تزریق‌های مختلف بررسی شد. با مقایسه‌ای که بین سوپرکویته حاصل از سوپرکاویتاسیون طبیعی و سوپرکویته ناشی از تزریق گاز انجام شد، این مطلب که سوپرکویته‌های با ابعاد مشابه را می‌توان معادل یکدیگر دانست، تایید شد.

با اتمام ارائه نتایج و با توجه به ایده‌هایی که برای ادامه و تکمیل تحقیقات بر روی پدیده سوپرکاویتاسیون وجود دارد، به ارائه پیشنهاداتی در این ارتباط پرداخته می‌شود.

#### ۸-۴ پیشنهادات برای ادامه تحقیقات

- ۱- مدل‌سازی پدیده سوپرکاویتاسیون با جملات چشمه مختلف با توجه به جملات چشمه معرفی شده در فصل دوم تحقیق (در کار حاضر از عبارت‌های چشمه رایلی - پلست در معادله انتقال استفاده شده است).
- ۲- در نظر گرفتن اثرات تراکم‌پذیری جریان برای مدل‌سازی سوپرکاویتاسیون در رونده‌های سرعت بالا.
- ۳- حل جریان سوپرکاویتاسیون به صورت غیر دائم.
- ۴- بررسی تجربی جریان سوپرکاویتاسیون سه بعدی.
- ۵- مدل‌سازی جریان سوپرکاویتاسیون حول یک رونده زیر سطحی کامل با در نظر گرفتن جریان خروجی حاصل از احتراق و استفاده از آن به عنوان گاز غیر قابل تقطیر برای ایجاد سوپرکاویتاسیون مصنوعی.