



## تحلیل عددی دو بعدی و سه بعدی پدیده سوپرکاویتاسیون در حالت تزریق و بدون تزریق بخار و هوا بر روی سطح متحرک زیر سطحی

رحیم شمس‌الدینی<sup>۱\*</sup> و سید روح اله قدسی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

<sup>۲</sup> دکتری هوافضا، مرکز تحقیقات، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹

### چکیده

در این مقاله پدیده سوپرکاویتاسیون روی سطوح زیر سطحی در حالت تزریق گاز بررسی می‌شود. پدیده کاویتاسیون، یکی از پیچیده‌ترین مسائل در دینامیک سیالات است. به دلیل ماهیت پدیده کاویتاسیون، در بعضی از موارد وجود آن مشکل‌ساز است که باید از بوجود آمدن آن پیشگیری کرد؛ ولی در بعضی از موارد، وجود آن مفید است. در این مطالعه پدیده کاویتاسیون، یک عامل موثر و مثبت در نظر گرفته می‌شود که به دلیل کاربرد و حساسیت آن باید کنترل دقیقی روی آن داشت. برای افزایش دقت محاسبات، مدل جریان مغشوش RSM، به عنوان مدل جریان آشفته برای بررسی و تحلیل پدیده کاویتاسیون انتخاب گردید. بخش عمده این مقاله، به بررسی مسئله تزریق گاز در مدل‌های زیرسطحی برای تقویت ابرکاواک به منظور کاهش نیروی پسا در سیستم مربوط می‌شود. با توجه به هزینه بودن شبیه سازی در ابعاد دقیق، در این مقاله، مقایسه عدد بدون بعد نسبت طول ابر کاواک به طول جسم در دو مدل مشابه و متناسب، اما با اندازه‌های متفاوت انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که تزریق بخار آب، باعث کاهش نیروی مقاوم نخواهد شد؛ در حالی که تزریق هوا با ایجاد لایه نازکی از هوا باعث کاهش نیروی مقاوم سیال می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ابر کاواک؛ کاویتاسیون؛ تزریق گاز؛ زیر سطحی.

## 2D and 3D Numerical Investigation of the Super Cavitation Phenomena in the case of Injection and No Injection of the Air and Water vapour on the under water vehicle

R. Shamsoddini<sup>1,\*</sup>, S.R. Ghodsi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Sirjan Univ. Tech., Sirjan, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D, Aerospace. Eng., Research Center, Tehran, Iran.

### Abstract

In the present study, the super cavitation phenomenon with gas injection is investigated. The cavitation phenomena is one of the most complex problems of fluid dynamic. Cavitation usually creates problems in the some application and should be prevented. However, it is useful for some application. One of the advantages of the cavitation is drag reduction on the surface of underwater vehicles. However, it should be controlled. In the present study, the super cavitation phenomena is modeled and investigated using the RSM turbulence method. The main aim of the present study is to investigate the gas injection for stabilization this phenomena for drag reduction. Whereas the investigation on the exact dimension is a time consuming process, a scaled model was used for numerical modeling. The results shows that vapor injection don't reduce the drag forces. However, the air injection by creation a thin layer of flow around the under vehicle reduces considerably the drag force.

**Keywords:** Super Cavitation; RSM Model; Gas Injection; Under Water Vehicle.

## ۱- مقدمه

پدیده کاویتاسیون یکی از پدیده‌های مطرح و بسیار پر کاربرد در بحث مکانیک اجسام متحرک زیر سطحی است. هرگاه در فشار ثابت، دمای مایع افزایش و یا در دمای ثابت، فشار آن کاهش یابد، حالت مایع شروع به تغییر فاز کرده و حباب‌های پر شده از بخار آب و یا گاز ایجاد می‌گردند. در حالت کلی، کاویتاسیون باعث به وجود آمدن حباب در یک مایع در اثر کاهش فشار آن مایع می‌شود. بررسی پدیده کاویتاسیون، از اهمیت قابل توجهی در مکانیک سیالات و هیدرودینامیک برخوردار است و آثار آن باید در نظر گرفته شوند. در جایی که در مایعات سرعت افزایش یابد، فشار می‌تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد. به طور معمول در جریان مایعات، کاویتاسیون معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که فشار در سیستم به پایین‌تر از فشار بخار افت کند که نتیجه آن، ایجاد فاز بخار و گاز است که به صورت حباب‌هایی در سیال ایجاد می‌شود. کاویتاسیون یک پدیده معمول در پمپ‌ها، پره‌ها، توربین‌های هیدرولیکی، تزریق کننده‌های سوخت و به طور کلی هر وسیله‌ای است که سیال کاری آن مایع و در آن پدیده افت فشار محسوس باشد. این پدیده به طور گسترده باعث نتایج ناخوشایند مانند، خوردگی و ایجاد صدا و ارتعاش در بدنه و تجهیزات درگیر با آن است؛ اما این پدیده همیشه با اثرات تخریبی و منفی همراه نیست. به عنوان مثال در جریان اطراف متحرک‌های زیر سطحی سرعت بالا، این پدیده نقش تسهیل کننده حرکت را برعهده دارد. از اینرو به پدیده سوپرکاویتاسیون معروف است و زمانی اتفاق می‌افتد که کاویتاسیون متشکل از بخار و حباب‌های گاز از برخورد مستقیم مایع به بدنه متحرک زیرسطحی جلوگیری می‌کند که در نتیجه آن، مقاومت هیدرودینامیکی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش سیال می‌یابد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که سیال دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای در فشار و نهایتاً رسیدن فشار موضعی به فشار بخار و یا پایین‌تر از آن است. گسترش ناحیه کاویتاسیون و چسبیدن حباب‌های کوچکتر به یکدیگر، تشکیل یک هاله ابری شکل را در اطراف جسم می‌دهد که به ابرکاوک معروف است. پرتابه‌هایی که پدیده سوپرکاویتاسیون روی آنها رخ بدهد، می‌توانند در سرعت‌های بالا و با نیروی درگ بسیار کم حرکت کنند. در پدیده سوپرکاویتاسیون، تمام بدنه پرتابه‌ای که درون آب حرکت

می‌کند، با لایه‌ای از بخار پوشانده می‌شود. سوپرکاویتاسیون به دو شیوه قابل ایجاد است:

۱- افزایش سرعت پرتابه تا حدی که آب در قسمت‌های جلویی بدنه تبخیر بشود.

۲- تزریق گاز در فشار محیط به ناحیه کاویتایی.

روش اول به کاویتاسیون تبخیری و روش دوم، کاویتاسیون مصنوعی (هوا دهی) نامیده می‌شود. با توجه به کاهش نیروی درگ، پرتابه‌هایی که پدیده سوپرکاویتاسیون روی آنها رخ می‌دهد- یعنی حباب کل بدنه آنها را فرا می‌گیرد- می‌توانند به سرعت‌های بسیار بالایی دست یابند. با توجه به کمتر بودن چگالی و لزجت گاز در مقایسه با آب، درگ اصطکاکی شدیداً کاهش می‌یابد. در شرایطی که وقوع کاویتاسیون اجتناب ناپذیر است، به وجود آوردن ابر کاواک روی جسم به دلیل پایداری آن مورد توجه طراحان است. فرآیند سوپرکاویتاسیون طبیعی در اعداد کاویتاسیون پایین رخ می‌دهد. از سوی دیگر، تزریق گاز به ناحیه کاویتایی منجر به افزایش فشار این ناحیه شده و اثر مشابهی خواهد داشت. حتی برای پرتابه‌هایی طراحی می‌شوند که برای سرعت‌های بالا که در آنها سوپرکاویتاسیون طبیعی (تبخیری) رخ می‌دهد می‌توان نیروی درگ را با کمک سوپرکاویتاسیون مصنوعی کم کرد تا پرتابه بتواند در شرایط پایداری به سرعت طراحی شده دست یابد.

این پدیده معمولاً در سرعت‌های بالا اتفاق می‌افتد. در قرن گذشته تحقیقات روی این نوع جریان بخصوص در آمریکا، روسیه و اکراین چشم گیر بوده است. تحقیقات اولیه روی جریان‌های سوپرکاویتاسیون، به وسیله ریچاردت انجام گرفت که به طور تجربی و آزمایشگاهی جریان‌های سوپرکاویتاسیون را مورد مطالعه قرار داد [۱]. ایفرس به روش انطباق نقشه، جریان سوپرکاویتاسیون را بررسی کرد [۲]. تولید روش‌های پرتوربیشن را برای جریان‌های دو بعدی سوپرکاویتاسیون امتحان کرد [۳]. کاتبرت و استریت با استفاده از چشمه و چاه در طول یک استوانه متقارن محوری با استفاده از مدل محفظه ریابوچنسینگ، به مطالعه جریان سوپرکاویتاسیون پرداختند. آنها مسئله را برای شکل‌های ناشناخته کاویتا حل کردند؛ اما فقط برای موارد محدودی موفق بودند [۴]. برنان یک روش تخفیف در یک مدل انتقال یافته پتانسیل سرعت - خطوط جریان در پشت یک دیسک

پذیری سیال و کاویتاسیون در آن لحاظ شده بود را بررسی کردند [۲۰]؛ همچنین فروزانی و همکاران در کاری مجزا، حرکت یک جسم پرسرعت زیر سطحی را با روش‌های عددی و تجربی، مورد بررسی قرار دادند [۲۱].

با توجه به اینکه در اکثر مدل‌سازی‌های پدیده سوپرکاویتاسیون که به بخشی از آنها اشاره شد، از مدل‌های توربولانسی دومعادله‌ای استفاده شده است، ابتدا در این مقاله به بررسی دقت مدل‌های توربولانسی در شبیه‌سازی پدیده سوپرکاویتاسیون پرداخته می‌شود. سپس بر اساس دقیقترین مدل توربولانسی یعنی مدل RSM، پدیده سوپرکاویتاسیون در حالتی که تزریق گاز در محدوده کاویتاسیون صورت می‌گیرد، مدل‌سازی و بررسی می‌شود. گازهای هوا و بخار آب برای تزریق در نظر گرفته شده‌اند و این تزریق در مدل‌های دوبعدی و سه بعدی امتحان می‌شود. عامل دیگری که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، نسبت طول ابر کاواک به طول جسم است. اعمال همزمان موارد فوق را می‌توان مزیت پژوهش حاضر نسبت به کارهای صورت گرفته دانست. در ادامه ابتدا شرح مختصری از روند مدل‌سازی گفته می‌شود و سپس به بررسی نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود.

## ۲- مدل سازی

در این بخش از مقاله، به جزئیات مدل‌سازی صورت گرفته از جمله مدل جریان مغشوش، شبکه و نحوه مدل‌سازی پدیده کاویتاسیون پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- مدل جریان مغشوش

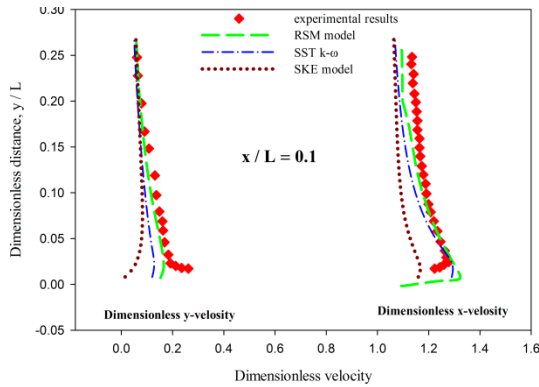
در حالی که بسیاری از تحلیل‌های صورت گرفته در رابطه با مدل‌سازی جریان مغشوش در پدیده کاویتاسیون مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشند، شمس‌الدینی و قدسی نشان دادند که نتایج تحلیل‌های مدل‌های دو معادله‌ای، می‌تواند تفاوت چشمگیری از لحاظ دقت با مدل RSM داشته باشند [۶]. نتایج مقایسه مدل‌های مختلف جریان مغشوش در شبیه‌سازی جریان سوپر کاویتاسیون روی هیدروفویل naca0009، در شکل ۱ آورده شده است. در این شکل پروفیل‌های سرعت قائم و افقی در راستای عمود بر سطح هیدروفویل رسم شده است.

و یک کره را امتحان کرد [۵]. چو کار کاتبرت و استریت را برای حل جریان‌های سوپرکاویتاسیون تقارن محوری گسترش داد [۶]. تا حدود دهه ۱۹۷۰، روش‌های تحلیل بیشترین سهم را در بررسی جریان سوپرکاویتاسیونی بر عهده داشتند. در شروع دهه ۱۹۸۰، از روش‌های عددی نیز برای تحلیل پدیده سوپرکاویتاسیون استفاده شد. ایتچیسون یک مدل اجزاء محدود متغییر را برای بررسی جریان در پشت یک دیسک در یک لوله با قطر و طول محدود به کار برد [۷]. اهلن روش تکینی صفحه را برای حل جریان پتانسیل غیر خطی کامل در پشت یک هیدروفیل صفحه صاف سوپرکاویتاسیونی، به روش عددی به کاربرد [۸]. هیس روش‌های چشمه داخلی را برای مدل‌سازی جریان صفحه‌ای و تقارن محوری استفاده کرد [۹]. ورگس و همکاران، روش المان مرزی برای تحلیل عددی برای جریان‌های سرعت بالای حالت تقارن محوری جزئی به کار بردند [۱۰]. شفقت و همکاران، روش المان مرزی را برای تحلیل عددی جریان دو بعدی سوپرکاویته ارائه نمودند [۱۱]. کیناس و همکاران [۱۲] و میشیما و کیناس [۱۳]، جریان حول هیدروفیل‌ها را در حالت سوپرکاویتاسیون و جریان‌های منجر به سوپر کاویته بررسی کردند و شکل بهینه هیدروفیل در جریان سوپرکاویتاسیونی را بدست آوردند.

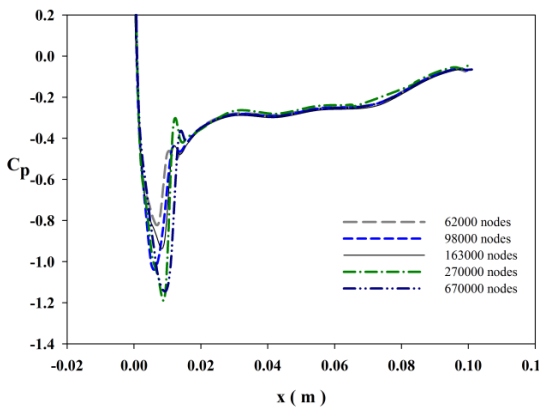
شمس‌الدینی و قدسی، به بررسی دقت مدل‌های جریان مغشوش در شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون پرداختند [۱۴]. بوزیاد در رساله دکترای خود، به بررسی عددی و تجربی جریان کاویتاسیون و ابر کاواک روی هیدروفویل در شرایط و موقعیت‌های مختلف پرداخت [۱۵]. لی پینگ و همکاران، به بررسی اثر هوادهی بر ابر کاواک روی یک مدل تقارن محوری پرداختند [۱۶] و جی بین و همکاران نیز، ابر کاواک را در اعداد کاویتاسیون مختلف روی یک جسم زیر سطحی با استفاده از مدل جریان مغشوش SST k- $\omega$  بررسی کردند [۱۷]. محمد نوری و همکاران، با استفاده از روش اغتشاشات به تحلیل نویز آکوستیکی ناشی از پدیده سوپرکاویتاسیون پرداختند [۱۸]. معرفت و همکاران، با شبیه‌سازی پدیده سوپرکاویتاسیون، طول کاواک اطراف یک جسم غوطه‌ور را تقریب زدند [۱۹]. فروزانی و همکاران، برخورد زمانمند الاستوپلاستیک پرتابه پرسرعت با سطح آب به صورت عددی با استفاده از روش اختیاری لاگرانژی اویلری که اثرات تراکم-

دارای چرخش و دوران، جریان‌های جابجایی آزاد و یا بویانت. در این روش، معادله انتقال صریح برای تانسور تنش رینولدز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = & \\ - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \rho \overline{u'_j u'_i u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right] & \\ + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) & \\ - \rho \beta (g_i \overline{u'_i \theta} + g_j \overline{u'_j \theta}) + p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) & \\ - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}) + S & \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱- مقایسه پروفیل‌های سرعت بی بعد در مقطع عمودی به فاصله مشخص از لبه هیدروفیل در مقایسه با نتایج تجربی [۱۵]



شکل ۲- بررسی استقلال مش. مقایسه ضرائب فشار بدست آمده در شبکه‌های مختلف با تراکم ۶۲۰۰۰، ۹۸۰۰۰، ۲۷۰۰۰۰، ۱۶۳۰۰۰ و ۶۷۰۰۰۰ گره

این نتایج که در اینجا با استفاده از مدل‌های جریان مغشوش موجود در بسته نرم افزاری فلوئنت بدست آمده‌اند، نشان می‌دهند که مدل RSM، مناسبترین مدل برای شبیه سازی جریان سوپرکاویتاسیونی است.

در تحلیل مسئله فوق برای انتخاب شبکه سعی شده تا حد امکان شبکه در نزدیک بدنه هیدروفیل متراکم شود و اثرات تراکم شبکه با شبکه‌هایی با تعداد ۶۲۰۰۰، ۹۸۰۰۰، ۱۶۳۰۰۰، ۲۷۰۰۰۰ و ۶۷۰۰۰۰ گره، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج این بررسی در شکل ۲، نشان داده شده است. در این شکل تغییرات ضریب فشار در طول مدل نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد گره‌های محاسباتی، اختلاف بین نمودارها کم می‌شود و این اختلاف بین شبکه با حدود ۲۷۰۰۰۰ گره و شبکه با ۶۷۰۰۰۰ گره به حداقل می‌رسد. از اینرو، شبکه با ۲۷۰۰۰۰ گره به عنوان شبکه مینا برای محاسبات انتخاب شده است. لازم به ذکر است که سعی شده تا حداقل این تراکم شبکه در سایر مدل‌های مورد بحث، در این مقاله نیز رعایت شود.

مدل‌های لزجت گردابه‌ای در جریان‌های لایه مرزی متصل به دیواره، تا جایی دقت قابل قبولی دارند دقت قابل قبولی دارند که تنها یک مولفه از تانسور تنش رینولدز از اهمیت برخوردار است. در چنین جریان‌هایی مدل لزجت گردابه‌ای معیار و بیانی، از مولفه غالب تنش رینولدز است؛ اما چنانچه جریان از این حالت بسیار ساده فرضی کمی انحراف پیدا نماید و یا به اصطلاح اندکی پیچیده‌تر شود، دیگر فرض استفاده شده در مدل لزجت گردابه‌ای صادق نمی‌باشد؛ لذا دیگر نمی‌توان به اعتبار مدل‌های لزجت گردابه‌ای دل بست. مدل RSM تحت عنوان بستر مرتبه دوم<sup>۱</sup>، بستر مومنتوم مرتبه دوم<sup>۲</sup> و مدل‌سازی مرتبه دوم<sup>۳</sup> شناخته می‌شوند. مدل RSM از لحاظ اجرا و عملکرد، از مدل‌های رایج لزجت گردابه‌ای پیچیده‌تر است، لیکن با وجود پیچیدگی، توصیف به مراتب دقیقتری از آشفتگی را ارائه می‌دهد و روی طیف بسیار وسیع و متنوعی از جریان‌های مهندسی معتبر است، مانند جریان‌های دارای خطوط جریان منحنی، جریان‌ها

<sup>1</sup> Second Order Closure

<sup>2</sup> Second Momentum Closure

<sup>3</sup> Second Order Modeling

### ۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش مدل‌هایی دو بعدی (تقارن محوری) و سه بعدی از متحرک‌های زیر سطحی در نظر گرفته می‌شود و پس از مدل‌سازی و مقایسه، اثر تزریق گاز بر پدیده سوپرکاویتاسیون در آنها به طور جداگانه، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱- حالت دو بعدی

در ادامه، سوپرکاویتاسیون روی یک مدل زیرسطحی مورد بحث قرار می‌گیرد که روی آن سه حالت پدیده سوپرکاویتاسیون طبیعی، مصنوعی با تزریق بخار (بخاردهی) و مصنوعی با تزریق هوا (هوادهی)، مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۳، هندسه و شرایط مرزی و مقطع تزریق گاز نشان داده شده است. به علت تقارن هندسه و شرایط مرزی، از یک مدل تقارن محوری برای تحلیل استفاده شده است. ارتفاع ناحیه مش‌بندی شده در مقابل ارتفاع متحرک زیرسطحی، حداقل ۲۰ برابر و طول ناحیه مش‌بندی، حداقل ۵۰ برابر در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۴ شبکه مورد استفاده برای این تحلیل نشان داده شده است که ابعاد و اندازه‌های آن، مطابق با مرجع [۱۶] در نظر گرفته شده است.

شبکه به نحوی تنظیم شده است که نقاط حساس و بیشترین گرادینان‌ها را به خوبی پوشش دهد. برای تحلیل، عدد کاویتاسیون  $\sigma_v = 0.25$  تنظیم می‌شود که به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\sigma_v = \frac{(P - P_c)}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (6)$$

در رابطه بالا  $P$  فشار در دور دست،  $P_c$  فشار کاویتی،  $\rho$  دانسیته سیال و  $U_\infty$  سرعت جریان آزاد است. سه حالت برای مقایسه انتخاب می‌شود:

۱- کاویتاسیون طبیعی

۲- کاویتاسیون مصنوعی در حالت تزریق بخار

۳- کاویتاسیون مصنوعی در حالت تزریق هوا

در شکل ۵ کانتور کیفی جزء حجمی بخار نشان داده شده است. این شکل به عنوان مبنای مقایسه بین حالات متفاوت است.

در این رابطه  $u$  معرف سرعت،  $P$  فشار است. جمله اول مشتق زمانی و جمله دوم، معرف جابجایی است و سمت راست معادله به ترتیب: جمله اول تا پنجم معادله به ترتیب، نشان دهنده پخش آشفتگی ( $D_{T,ij}$ )، پخش مولکولی ( $D_{l,ij}$ )، تولید تنش ( $P_{ij}$ )، تولید بویانسی ( $G_{ij}$ )، کرنش فشاری ( $\phi_{ij}$ ) و جمله آخر جمله چشمه است. با حل معادله فوق، تانسور تنش توربولانسی به طور مستقیم محاسبه می‌شود.

#### ۲-۲- مدل‌سازی جریان کاویتاسیون:

نرم افزار فلونت جرم‌های انتقالی را با  $R_e$  و  $R_c$  نشان می‌دهد که به ترتیب

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(P_{sat} - P)}{3\rho_l}} (1 - f) \quad (2)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(P_{sat} - P)}{3\rho_l}} f \quad (3)$$

که در رابطه بالا  $C_c$  و  $C_e$ ، ثوابت تجربی معادله،  $V_{ch}$  سرعت ویژه،  $\sigma$  کشش سطحی سیال،  $\rho_l$  و  $\rho_v$  به ترتیب، چگالی سیال و چگالی بخار،  $P_{sat}$  فشار بخار،  $P$  فشار سیال،  $f$  جزء جرمی بخار می‌باشند. معادله (۲) زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که فشار سیال از فشار بخار کمتر و معادله (۳)، زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که فشار سیال بر فشار بخار غالب باشد. سپس مقادیر فوق در رابطه (۴)، جهت محاسبه جزء حجمی اعمال می‌گردند.

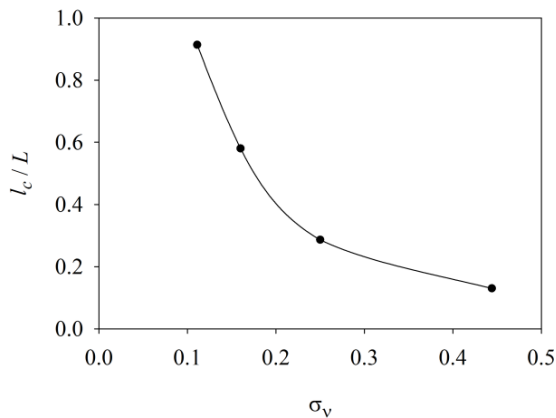
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f) + \nabla \cdot (\rho_m v_v f) = \nabla \cdot (\gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $\rho_m$  چگالی مخلوط،  $\rho_m v_v$  بردار سرعت فاز بخار،  $\gamma$  ضریب تبدیل موثر است. زمانی که مدل کاویتاسیون در مدل مخلوط (mixture) فعال می‌شود، سیال کاری به عنوان ترکیبی از سه سیال مایع، بخار و گاز غیر قابل چگالش در نظر گرفته می‌شود که رابطه (۴) بر این سیال حاکم است. نهایتاً رابطه‌ای که برای این سیال کاری به عنوان معادلات حرکت استفاده می‌شود برابر با رابطه (۵) است:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\rho g \nabla z - \nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $z$  ارتفاع،  $\mathbf{V}$  سرعت سیال و  $\rho$  چگالی متوسط سیال کاری،  $\boldsymbol{\tau}$  مجموع تنش‌های برشی در سیال است که در مدل‌سازی جریان، مجموع تنش‌های ویسکوز و تنش توربولانسی است.

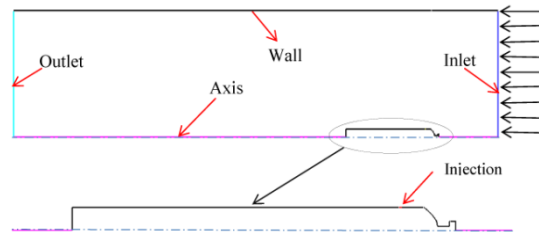
مستلزم آن است که سرعت متحرک زیر سطحی افزایش یابد؛ اما روش دیگر که می‌توان بدون افزایش سرعت طول ابر کاواک را افزایش داد، تزریق گاز در ناحیه کاویتاسیون است که به آن کاویتاسیون مصنوعی گفته می‌شود.



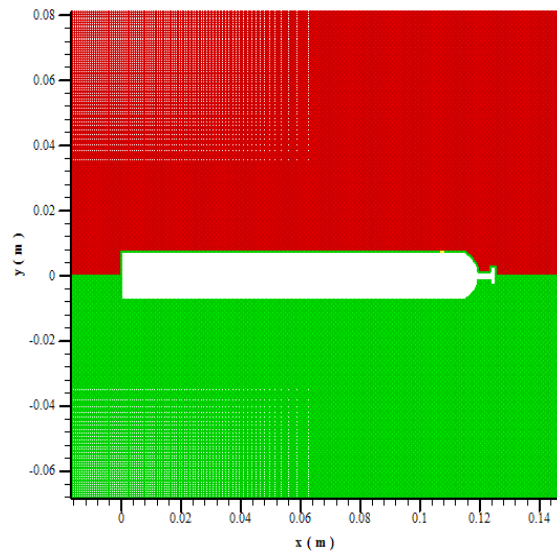
شکل ۶- تغییرات طول ابر کاواک نسبت به طول زیر سطحی بر حسب عدد کاویتاسیون

برای آنکه علت و نحوه تشکیل پدیده سوپر کاویتاسیون حول زیر سطحی بهتر مشخص شود، کانتور سرعت و فشار و خطوط جریان حول زیر سطحی در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از کانتور فشار مشخص است، روی بدنه زیر سطحی از لبه جلو یک ناحیه کم فشار به وجود می‌آید که باعث افت فشار به مقدار کمتر از فشار کاویتاسیون می‌شود. از اینرو تشکیل ابر کاواک در این ناحیه اجتناب ناپذیر است. همچنین در این ناحیه یک گردابه هم ظاهر می‌شود که نتیجه همان ناحیه کم فشار است. در ناحیه کاویتاسیون به علت جدایش مایع از سطح، اصطکاک سیال به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما این ناحیه تمام سطح زیر سطحی را نمی‌پوشاند، از اینرو از طریق تزریق گاز تلاش می‌شود که این جدایش مایع از سطح توسعه یابد.

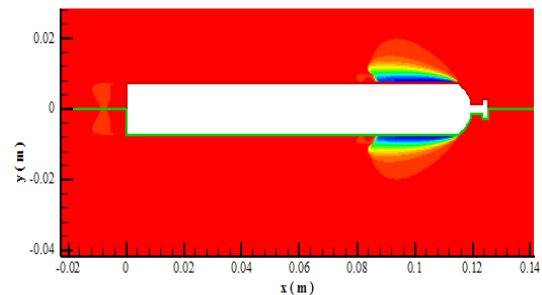
انتخاب بخار برای تزریق در سیستم، دارای خصوصیات ویژه‌ای است که این گاز را می‌تواند در رده گازهای تزریق شونده قرار دهد، از جمله آن چگالی و ویسکوزیته کمتر آن نسبت به هوا است؛ اما مشکل اصلی این سیال، قابلیت حل شدن در آب و یا به عبارت دیگر، قابلیت تغییر فاز آن به مایع است؛ لذا در این مقاله این خصوصیات را بررسی کرده تا پارامتر غالب به خوبی مشخص شود. سیال هوا دارای چگالی



شکل ۳- هندسه و شرایط مرزی و جهت جریان ورودی و خروجی و مقطع تزریق گاز

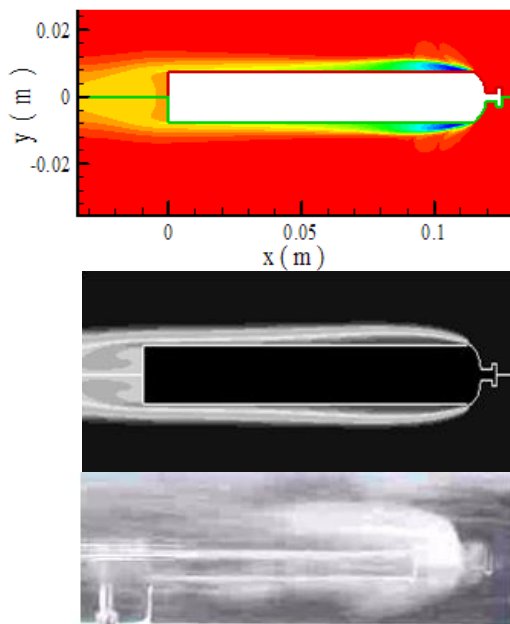


شکل ۴- شبکه تقارن محوری مورد استفاده برای تحلیل مدل زیر سطحی

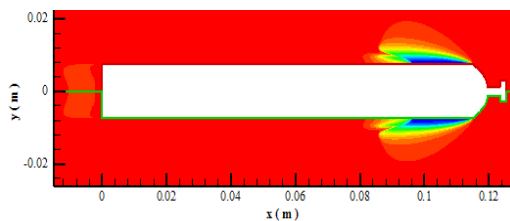


شکل ۵- کاویتاسیون طبیعی بر روی مدل تقارن محوری

در شکل ۶، تغییرات طول ابر کاواک ( $L_c$ ) نسبت به طول بدنه بر حسب عدد کاویتاسیون رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش عدد کاویتاسیون طول ابر کاواک افزایش می‌یابد. از اینرو، یک روش افزایش طول ابر کاواک کاهش عدد کاویتاسیون است که در شرایط فشار ثابت،



شکل ۸- مقایسه کیفی کانتور جزء حجمی آب برای کار حاضر (A) و نتایج عددی (B) و تجربی (C) مرجع [۱۶]



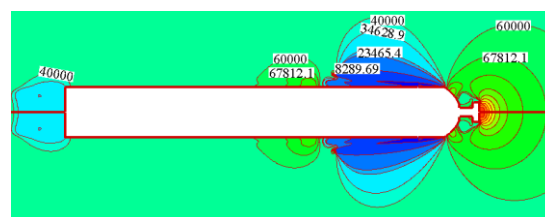
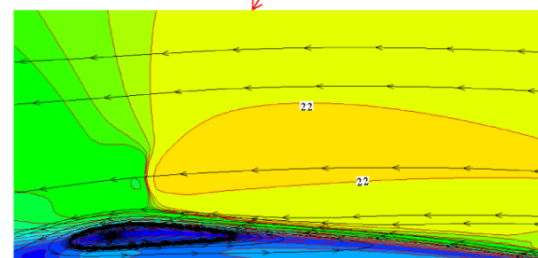
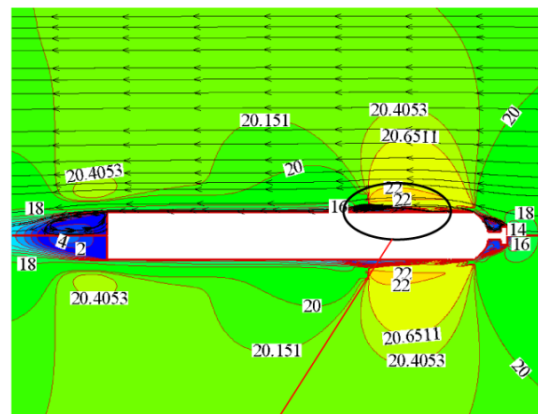
شکل ۹- نتایج حاصل از کاویتاسیون مصنوعی حاصل از تزریق بخار در سیستم

نتایج مقایسه حالات مختلف تزریق با حالت کاویتاسیون طبیعی در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند، تزریق هوا باعث کاهش نیروی کل می‌شود؛ در حالی که تزریق بخار، باعث افزایش نیروی درگ می‌شود.

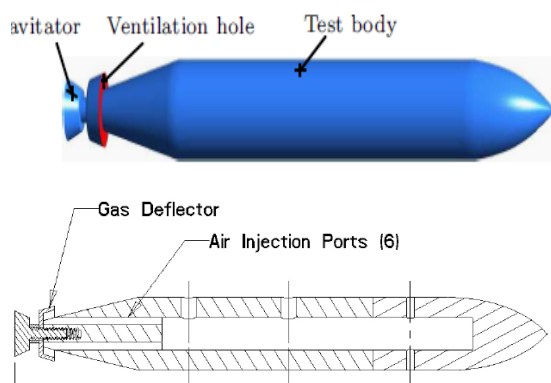
جدول ۱- مقایسه نیروهای وارده بر زیر سطحی در حالت

حالت	مختلف تزریق			کل نیرو (N)
	سیال تزریق	نیروی فشاری (N)	نیروی برشی (N)	
۱	بدون تزریق	۱۵/۱۸۶	۲/۲۴	۱۷/۴۲
۲	بخار	۱۵/۳۶	۲/۵۹	۱۷/۹۵
۳	هوا	۱۴/۷۸	۱/۸۵	۱۶/۶۳

A و ویسکوزیته پایین است و در آب حل نمی‌شود و می‌تواند به خوبی لایه ابرکاواک در اطراف جسم را تشکیل دهد که در شکل ۸، این نتایج برای حدود ۰/۲۵ ثانیه نشان داده شده است و به صورت کیفی با نتایج ابر کاواک تشکیل شده روی مدل ارائه شده در مرجع [۱۶]، مقایسه شده است. در شکل ۹، کانتور جزء حجمی آب در حالت تزریق بخار نشان داده شده است. در مقایسه این شکل با شکل ۵، حداقل نتیجه‌ای که در بدو امر برداشت می‌شود این است که تزریق بخار در سیستم هیچ نتیجه مثبتی را در بر نخواهد داشت و عملاً افزایش محدوده ابر کاواک اتفاق نمی‌افتد مطابق با آنچه که در شکل ۸ واقع می‌شود. علت این امر، همان قابلیت تغییر فاز بخار به آب است.

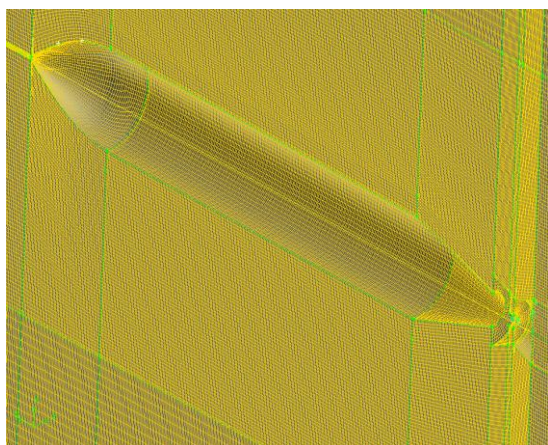


شکل ۷- کانتور سرعت (m/s) و خطوط جریان (شکل بالا) و کانتور فشار (Pa) شکل پایین حول زیر سطحی



شکل ۱۱- شماتیک زیر سطحی مدل برای تحلیل

برای تحلیل سه بعدی، شبکه ای مطابق شکل ۱۲ در نظر می‌گیریم که با فرض تقارن، نصف آن مدل و به طور منظم مش بندی شده است. این مدل، یک مدل سه بعدی است که با مقیاس یک پنجم نسبت به مدل مرجع برای تحلیل CFD، در نظر گرفته شده است که شبکه آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که حتی در حالت مقیاس یک پنجم و فرض تقارن (مدل‌سازی نصف محدوده تحلیلی)، باز هم حجم مش شبکه بیش از یک میلیون دویست هزار گره است و تحلیل با حجم کمتر از این مقدار غیر ممکن است.



شکل ۱۲- شبکه سه بعدی در نظر گرفته شده برای تحلیل مدل حاضر

اما مشکل اصلی تحلیل‌های CFD به خصوص در حالت سه بعدی، حجم محاسباتی بالا است. به عنوان مثال برای مقایسه کار حاضر با کار جی بین و همکاران [۱۷] که یک

### ۳-۲- حالت سه بعدی

هدف مهندسان در حال حاضر این است که با شیوه‌هایی نوین، آب دقیقاً در نوک دماغه شناور زیرسطحی، به بخار تبدیل گردد و همچنین با تزریق مصنوعی بخار، کاویتاسیون به مرحله سوپر کاویتاسیون برسد و حباب‌های کوچک منبسط شده و یک حباب بزرگ به صورت هاله‌ای، شناور را احاطه نماید. در واقع ابر کاواک زمانی شکل می‌گیرد که یک جسم متحرک زیرسطحی توسط یک حباب بزرگ و پیوسته احاطه شود. نمونه‌ای از این حباب که به ابر کاواک معروف است، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

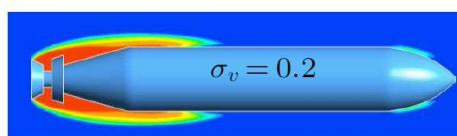
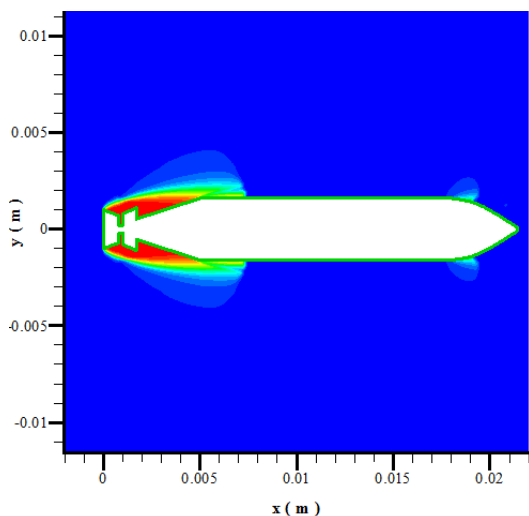
مشکل اساسی در تحلیل‌های عددی به خصوص تحلیل پدیده سوپرکاویتاسیون، حجم شبکه نسبتاً بالا است که حل این جریان‌ها را برای کامپیوترهای معمولی غیر ممکن می‌سازد. از اینرو در این بخش از مقاله، با بهره‌گیری از خصوصیت ویژه پدیده کاویتاسیون و همچنین تحلیل ابعادی، شرایطی در نظر گرفته شد تا تحلیل با مقیاس‌های کوچکتر برای شبیه‌سازی این جریان‌ها فراهم شود. از این رو مدلی با مقیاس یک پنجم، نسبت به مدل اصلی در نظر گرفته می‌شود و در ادامه این بحث، شکل ابر کاواک اطراف مدل اصلی و مدل با مقیاس یک پنجم در عدد کاویتاسیون و خصوصیات فیزیکی سیال کاری ثابت مقایسه می‌شود.

یک مدل با سه جزء (مایع، بخار و گاز) معرفی شده است. فرض شده است که جریان سیال همگن است؛ بنابراین اجزاء سیال چند فاز، قابلیت داشتن سرعت و فشار یکسانی را دارند. از اینرو یک مدل مطابق شکل ۱۱ در نظر گرفته شده است که هم از کاویتاتور و هم از محفظه تزریق بهره می‌جوید.



شکل ۱۰- نمایش پدیده سوپرکاویتاسیون و ایجاد ابر کاواک در اطراف اجسام



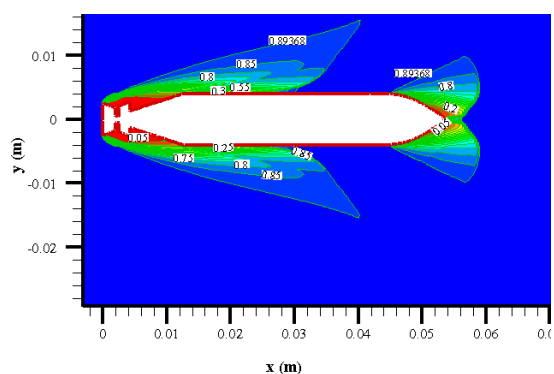


شکل ۱۲- مقایسه ابر کاواک بین نتایج کار حاضر (شکل بالا) و کار جی بین و همکاران [۱۷] (شکل پایین) در عدد کاویتاسیون ۰/۲

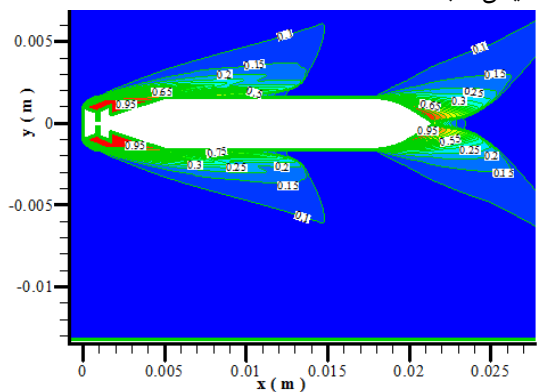
علاوه بر مقیاس ۱ به ۵، مقیاس ۱ به ۲/۵ هم نشان داده شده تا تأکیدی بر استقلال نسبت طول کاویتا به طول جسم از اندازه باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، ابر کاواک تشکیل شده در هر دو مقیاس تقریباً مشابه هستند. تفاوت‌های بین نتایج کار حاضر با کار نامبرده می‌تواند ناشی از تفاوت در مدل‌های توربولانسی نیز باشد؛ چرا که کار حاضر از مدل SST k- $\omega$  و نتایج کار فوق‌الذکر با استفاده از مدل RSM است و همانطور که از مقایسه‌ای که در شکل ۱ انجام پذیرفت، مدل RSM برای تحلیل پدیده سوپرکاویتاسیون مناسب‌تر است.

در اینجا نیز پدیده سوپر کاویتاسیون را می‌توان از روی کانتورهای فشار تشریح و توجیه کرد؛ همانگونه که در کانتورهای فشار شکل ۱۵ نشان داده شده است، ناحیه با فشار کمتر از فشار کاویتاسیون از لبه کاویتاتور شروع شده و برحسب عدد کاویتاسیون، روی بدنه زیرسطحی پیشروی می‌کند. هرچه قدر عدد کاویتاسیون کمتر باشد، ناحیه پیشروی ابر کاواک روی جسم گسترده‌تر می‌شود.

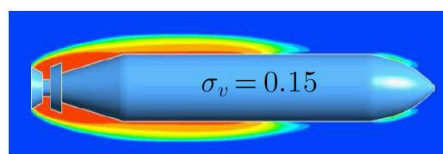
تحلیل CFD برای مدلی مشابه با شکل ۱۱ ارائه نمودند، شبکه‌ای با بیش از ۱۵ میلیون گره نیاز بود که با سیستم کامپیوترهای معمولی قابل انجام نبود؛ لذا با تکیه بر تحلیل ابعادی و استخراج عدد بدون بعدی به صورت نسبت طول کاویتا به طول جسم این مشکل قابل حل به نظر می‌رسد؛ یعنی فرض شده است، در مقیاس‌های محدود و در یک عدد کاویتاسیون ثابت، نسبت طول کاویتا به طول جسم تقریباً مستقل از اندازه جسم است و این عدد بدون بعد باید ثابت باشد که برای اثبات این ادعا، در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ در دو عدد کاویتاسیون متفاوت، نتایج مدل با مقیاس ۱ به ۵ بین کار حاضر و مرجع [۱۷] نشان داده شده است. در شکل ۱۳،



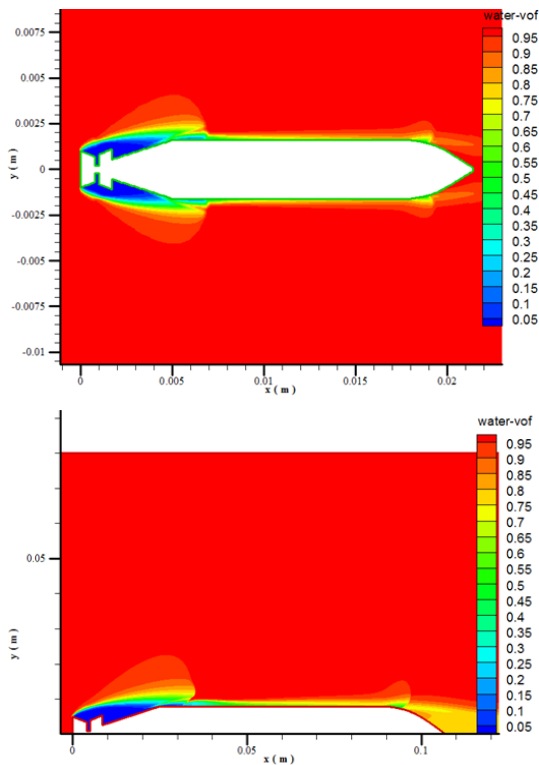
مقیاس ۱ به ۲/۵



مقیاس ۱ به ۵



شکل ۱۳- مقایسه ابر کاواک بین نتایج کار حاضر (شکل بالا) و کار جی بین و همکاران [۱۷] (شکل پایین) در عدد کاویتاسیون  $\sigma=0.15$

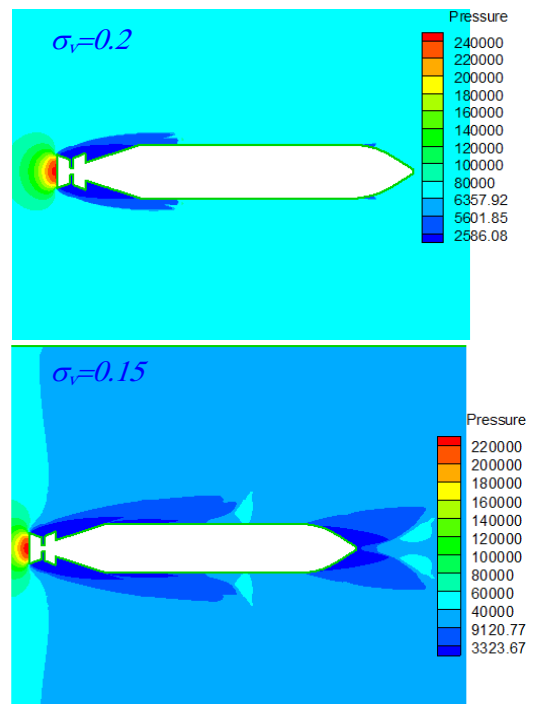


شکل ۱۶- مقایسه جزء حجمی آب مدل سه بعدی با مدل تقارن محوری در حالت تزریق هوا در عدد کاویتاسیون ۰/۲

حالتی که تزریق هوا در سیستم وجود دارد، پس از تشکیل ابر کاواک بخار، منطقه‌ای وجود دارد که محیطی دو فازی از هوا و آب است که خواص این محیط، باعث کاهش اصطکاک لزجی می‌شود که به طور کلی باعث کاهش نیروی پسا روی سطح جسم می‌شود. در واقع مدل سه بعدی نسبت به مدل دو بعدی به مراتب توزیع بهتری از جزء گازها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، به طور واضح از روی کانتورهای جز حجمی مشخص است که در تزریق هوا جزء جرمی هوا به سطح بدنه نزدیکتر است. پس عمل جدایش سیال کاری از سطح به خوبی انجام می‌پذیرد که باعث کاهش ضریب درگ می‌شود.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر تزریق بخار در سیستم در حالت تزریق دو سیال بخار و هوا و حالت بدون تزریق، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که تزریق بخار در سیستم نه تنها باعث کاهش ضریب پسا روی زیرسطحی نمی‌شود،



شکل ۱۵- کانتور فشار در دو عدد کاویتاسیون  $\sigma_v = 0.15$  و  $\sigma_v = 0.2$

در ادامه یک مدل تقارن محوری در ابعاد و اندازه‌های دقیق مرجع [۱۷] برای حالت هوادهی تنظیم شده است تا فرضیه مشابه بودن هندسه کاویتای در اطراف جسم برای حالت سه جزئی (مایع، بخار و هوا) نیز اثبات گردد. نتایج این مقایسه در شکل ۱۶ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انطباق نسبتاً مناسبی بین مدل دقیق تقارن محوری و مدل مقیاس شده سه بعدی وجود دارد و فرضیه ثابت بودن نسبت طول ابر کاواک به طول جسم را تایید می‌کند. در ادامه به بررسی نتایج با مدل سه بعدی با مقیاس یک پنجم پرداخته می‌شود.

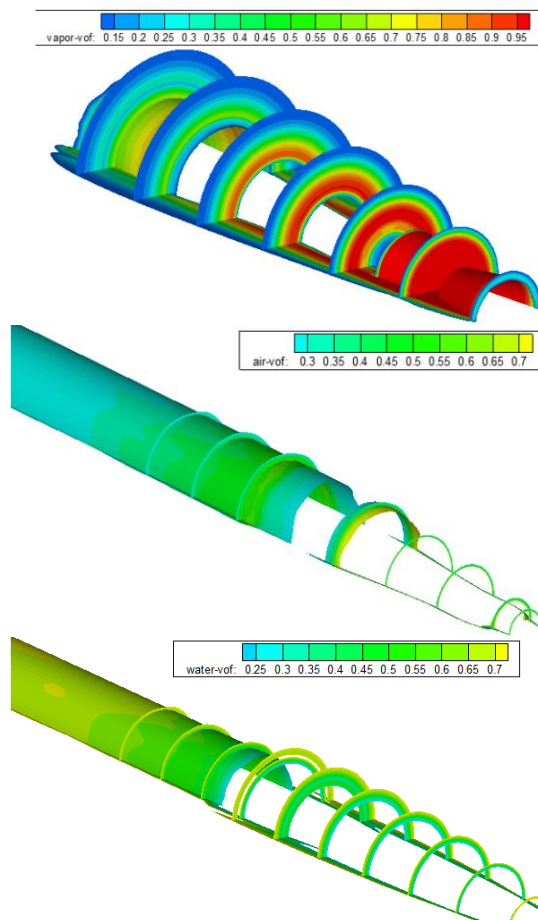
#### ۴- بررسی موقعیت قرار گیری جزءهای حجمی بخار، هوا و آب در اطراف زیر سطحی در حالت سه بعدی

در شکل ۱۷، موقعیت ابرکاواک ایجاد شده ناشی از کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی در عدد کاویتاسیون طبیعی ۰/۲، برای هر سه جزء بخار، هوا و آب نشان داده شده است. با کمی دقت در این شکل سه بعدی می‌توان دریافت که در

که این سیال در آب قابل حل نیست؛ لذا به خوبی باعث تقویت پوشش ابر کاواک در اطراف جسم زیرسطحی می‌شود. در آخرین بخش از کار حاضر، یک تحلیل سه بعدی در مقیاس یک پنجم در مقایسه با مدل‌های آزمایش شده و مدل دقیق تقارن محوری ارائه شد. نتایج تحلیل نشان داد که نسبت طول محدوده کاواک به طول جسم که مشخص کننده یک عدد بدون بعد (ضریب شکل) است، می‌تواند برای تحلیل‌های سه بعدی مفید باشد که اندازه نسبتاً بزرگی دارند؛ یعنی می‌توان به جای استفاده از یک مدل واقعی، یک مدل مقیاس شده با حفظ عدد کاویتاسیون را تست کرد. در این شرایط، نتایج مربوط به شکل و محدوده کاویتاسیون هم در حالت تزریق و هم در حالت بدون تزریق، تقریباً یکسان است. در حالت سه بعدی با بررسی کانتورهای سه بعدی، نیز مشاهده شد که فاز هوا به بدنه نسبت به فاز آب نزدیکتر است که باعث کاهش قابل توجه ضریب درگ می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] Reichardt H (1945) The physical laws governing the cavitation bubbles produced behind solids of revolution in a fluid flow. Rep.UM6628. Gottingen: The Kaiser Wilhelm Institute for Hydrodynamic Research.
- [2] Efros DA (1946) Hydrodynamic theory of two-dimensional flow with cavitation. DoklAkad Nauk SSSR 51: 267-270.
- [3] Tulin MP (1964) Supercavitating flows Small perturbation theory. J Ship Res 7(3): 16-37.
- [4] Cuthbert J, Street R (1964) An approximate theory for supercavitating flow about slender bodies of revolution, LMSC Report, Lockheed Missiles and Space Co.
- [5] Brennen CA (1969) Numerical solution of axisymmetric cavity flows. J Fluid Mech 3(7): 671-688.
- [6] Chou YS (1974) Axisymmetric cavity flows past slender bodies of revolution. J Hydrodyn 8(1): 13-18.
- [7] Aitchison JM (1984) The numerical solution of planar and axisymmetric cavitation flow problems. Comput Fluids 12(1): 55-65.
- [8] Uhlman JS (1989) The surface singularity or boundary integral method applied to supercavitating hydrofoils. J Ship Res 3:1.



شکل ۱۷- نمایش سه بعدی کانتورهای جزء حجمی بخار، هوا و آب در عدد کاویتاسیون طبیعی ۰/۲

بلکه باعث افزایش نیروی ویسکوز در حدود ۱۵/۶٪ و افزایش نیروی فشاری در حدود ۱/۱۳٪ می‌شود. نتایج کانتورهای فشار نشان می‌دهد که تزریق بخار، باعث افزایش موضعی فشار می‌شود که این مسئله باعث می‌شود، بخار به آب تغییر فاز داده و ناحیه کاویته را کاهش دهد. ضمناً به علت افزایش ضخامت عمود بر مقطع تزریق، دراگ فشاری را نیز افزایش می‌دهد؛ اما در مورد تزریق هوا در سیستم مقدار نیروی مقاوم ویسکوز به میزان ۱۷/۴٪ کاهش یافته که هدف اصلی نیز، کاهش این مولفه است؛ چرا که تاثیر پدیده کاویتاسیون مستقیماً بر این مولفه نیروی مقاوم است و در ضمن مقدار نیروی فشاری نیز به میزان ۲/۶۷٪ کاهش می‌یابد. این نتایج به علت خواص چگالی و ویسکوزیته پایین هوا نسبت به آب است و خصوصیت متمایز این سیال نسبت به بخار این است

- [16] Li-ping J, Cong W, Ying-jie W, Wang HB, Zhang JZ, Kai-ping Y (2006) Numerical simulation of artificial simulation of artificial ventilated cavity. *J Hydrodyn* 18(3): 273-279.
- [17] Bin J, Xian-wu L, Peng X, Zhang Y, Wu Y, Xu H (2010) Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around an underwater vehicle based on a three-component cavitation model. *J Hydrodyn* 22(6): 753-759.
- [۱۸] محمدنوری نوروز، ریاحی محمد، ولی پور علی (۱۳۹۱) ارائه مدل عددی بدون بعد در تحلیل نوپز آکوستیکی پدیده سوپرکاویتاسیون با استفاده از روش اغتشاشات، *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۵۳-۱۴۶: ۱۲(۵).
- [۱۹] معرفت م، طهماسبی س، انصاری م (۱۳۹۴) شبیه سازی عددی سوپرکاویتاسیون و محاسبه طول کاواک اطراف یک جسم غوطه ور، *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۹۶-۱۸۷: ۱۵(۸).
- [۲۰] فروزانی ح، سرانجام ب، کمالی ر، عبداللهی فر ع (۱۳۹۵) تحلیل برخورد زمانمند الاستوپلاستیک پرتابه پرسرعت با سطح آب. *مجله مکانیک سازه ها و شماره ها* ۲۹۸-۲۸۱: ۶(۳).
- [۲۱] فروزانی ح، سرانجام ب، کمالی ر، ربیعی ع (۱۳۹۶) شبیه سازی عددی و بررسی تجربی حرکت یک جسم پرسرعت زیرسطحی. *مجله مکانیک سازه ها و شماره ها* ۲۳۰-۲۱۷: ۷(۱).
- [9] Hase PM (2003) Interior source methods for planar and axisymmetric supercavitating flows. PHD Thesis, The university of Adelaide.
- [10] Verghese AN, Uhlman JS, Kirschner IN (2005) Numerical analysis of high Speed bodies in partially cavitation axisymmetric flow. *J Fluids Eng Trans ASME* 127:41-54.
- [11] Shafaghat R, Hosseinalipour SM, Shariatifard A (2007) Numerical analysis of a two dimensional bounded supercavitation flow. 15th Annual Conferences of the CFD Society of Canada.
- [12] Kinnas SA, Mishima S, Savineau C (1995) Application of optimization techniques to the design of cavitating hydrofoils and wings. *International Symposium on Cavitation Deauville, France*.
- [13] Mishima Sh, Kinnas SA (1995) A numerical optimization technique applied to the design of two-dimensional cavitating hydrofoil sections. *J Ship Res* 3(1).
- [۱۴] شمس الدینی ر، قدسی ر (۱۳۸۹) بررسی مدل های آشفتگی در پیش بینی جریان کاویتاسیون بر روی لبه حمله یک هیدروفویل NACA0009. اولین همایش ملی هیدرودینامیک کاربردی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.
- [15] Bouziad, YA (2006) physical modelling of leading edge cavitation: computational methodologies and application to hydraulic machinery. Lausanne, EPFL, 2006.