



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Investigation of the shape of the torpedo nose in supercavitation and numerical analysis of the effect of gas injection

Abdolhossein Mohammadrahimi^{*}, Mohammadreza Negahdari, Seyed Amin Hosseini, Ehsan Parsaei

Faculty of Marine Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.

^{*} Corresponding Author Email: rahimi@cmu.ac.ir

Received: 12 July 2020

Revise Date: 3 May 2021

Accepted: 8 May 2021

DOI: 10.22113/JMST.2021.236372.2379

ABSTRACT

Extensive studies on cavitation have been conducted for years as an undesirable phenomenon in marine engineering. The cavitation phenomenon causes severe damage to the body of torpedoes, ship's propellers, pump impellers, and turbines. It also increases the frictional drag of submarine vessels and imposes many limitations on their design and construction. With increasing speed in submarines and increasing cavitation, supercavitation occurs which can be used to create a large bubble around the vessel. Because drag in the water is mostly due to the friction of the body, by the supercavitation, the contact of water with the torpedo is reduced. As a result, the friction drag is greatly reduced and the torpedo speed will increase significantly. In this regard, by artificially injecting air into the body in the state of cavitation, the process of creating supercavitation and reaching this stage can be accelerated. In this study, to investigate the effect of torpedo nose shape on supercavitation, different types of torpedo bodies have been modeled and studied different nose shapes. After modeling, meshing is performed with ANSYS Fluent software and the analysis of the model in cavitation numbers (0.2, 0.3, and 0.4) will be examined. Finally, the model will be analyzed in air injection mode (artificial supercavitation) with ANSYS CFX software and the results will be presented.

Keywords: supercavitation, torpedo nose, cavitation number, cavity.

1. INTRODUCTION

Countless numerical analyses have been performed in fluid flow analysis around various objects. In the analysis of a hydrofoil near the free surface (Shariati and Mousavizadegan, 2017) or the investigation of the interaction between the fluid and the structure on the semi-submerged platform body (Bakhtiari et al., 2019) and the investigation of the effect of the hydrodynamic parameters on the hydrodynamic coefficients of the semi-submerged propeller (Donyavizade et al., 2018) is among these activities. Among the subsurface weapons, the supercavitation torpedo has unique features such as high speed and destructive power, which has given great importance to this powerful weapon. The most prominent issue for underwater torpedoes, as a very powerful weapon, is to reach high speeds in the shortest possible time, and

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



this issue is very important and must be considered in the design and construction of such weapons. Be noted Today, the fastest torpedoes have limited speeds of less than 40 meters per second due to the tension and friction caused by the contact of seawater with its shell. As we know, when an object moves in water, a layer of water molecules adheres to the body of the object and is pulled along with it. It is called a shell.

2. MATERIALS AND METHODS

In this research, the simulation of the supercavitation flow on the model torpedo with different noses is first discussed. In this modeling, the homogeneous fluid approach based on the transmission equation model is used. Continuity and momentum equations for mixture and transfer equations for volume fraction are solved. The volume fraction equation has spring terms to determine the rate of mass transfer between the vapor and liquid phase, which can be determined with different mass transfer models. In this research, three model nozzles in the form of conical, conical, and disk cones with the same sequences are analyzed and investigated. For this, two different cavitation models implemented with Fluent software are used. The obtained results are compared and evaluated with the laboratory results and semi-experimental relations, which have an acceptable convergence.

3. RESULTS

In this part of the current research, the effect of five different nose modes of the model torpedo on the cavitation length, which is created in different cavitation numbers (0.2, 0.3, 0.4, and 0.5), is investigated.

The moving speed of the torpedo is 40 meters per second and the maximum floating depth is 30 meters below sea level (if the depth is defined higher than this value, due to the speed, it is not possible to create natural cavitation), which due to the change of the cavitation number, the effect of the shape of the nose It can be checked on cavitation.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

In this research, based on the finite volume numerical method, the Navier-Stokes equations and the steam transfer equation in terms of mass fraction were modeled and solved for model torpedoes with different noses in Ensys software, and the effects of changing the shape of the nose on the formation of cavitation around the object were investigated.

REFERENCES:

- Bakhtiari, M., Shemshaki, S. and Sadri Nasab, M. 2019. Investigating the interaction of fluid and structure on the body of a semi-submerged platform under the influence of regular sea waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), pp. 62-73. doi: 10.22113/jmst.2018.99592.2053.
- Donyavizadeh, N., Shafaghat, R., Dardel, M. and Mohammadzade Negharchi, S., 2018. Investigation of effect weight of parameters affecting the hydrodynamic coefficients in design of surface-piercing propellers.
- Khalil Shariati, S. and Hossein Mousavizadegan, S., 2017. Infinite length hydrofoil analysis near the free surface.
- Reichardt, H., 1945. The physical laws governing the cavitation bubbles produced behind solids of revolution in a fluid flow. *The Kaiser Wilhelm Institute for Hydrodynamic Research, Gottingen, Rep. UM, 6628.*



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



بررسی شکل دماغه اژدر در سوپر کاویتاسیون و تحلیل عددی اثر تزریق مصنوعی گاز

عبدالحسین محمدرحیمی*، محمدرضا نگهداری، سیدامین حسینی، احسان پارسایی

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: rahimi@cmu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2021.236372.2379

چکیده

سال ها مطالعات گسترده ای روی کاویتاسیون به عنوان یک پدیده نامطلوب در زمینه مهندسی دریا صورت گرفته است. پدیده کاویتاسیون آسیب های بسیار شدیدی به بدنه اژدرها، پروانه کشتی ها، پروانه پمپ ها و توربین ها وارد می کند، همچنین میزان درگ اصطکاکی شناورهای زیرسطحی را افزایش می دهد و محدودیت های زیادی را در طراحی و ساخت آن ها ایجاد می کند. با افزایش سرعت در شناورهای زیرسطحی و تشدید پدیده کاویتاسیون، سوپر کاویتاسیون رخ می دهد که می توان با بهره گیری مناسب از این پدیده، حباب بزرگ اطراف شناور ایجاد کرد. از آنجاکه نیروی کشش در آب بیشتر به واسطه اصطکاک پوسته جسم اتفاق می افتد، در اثر ایجاد پدیده سوپر کاویتاسیون، تماس آب با اژدر کم شده و در نتیجه درگ اصطکاکی به میزان بسیار زیادی کاهش یافته و سرعت اژدر افزایش چشمگیری خواهد داشت. در همین راستا می توان با تزریق مصنوعی هوا به جسم در حالت کاویتاسیون، فرآیند ایجاد سوپر کاویتاسیون و رسیدن به این مرحله را تسریع داد. در این تحقیق با هدف بررسی تأثیر شکل دماغه اژدر بر پدیده سوپر کاویتاسیون اقدام به مدل سازی و بررسی انواع بدنه اژدر با استفاده از اشکال دماغه های مختلف شده است. بعد از به دست آمدن هندسه مدل موردنظر، مش بندی با نرم افزار انسیس فلونت انجام شده و تحلیل مدل در اعداد کاویتاسیون (۰/۴ و ۰/۳) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت مدل را در حالت تزریق هوا (سوپر کاویتاسیون مصنوعی) با نرم افزار انسیس CFX تحلیل و نتایج حاصله ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی: سوپر کاویتاسیون، دماغه، اژدر، عدد کاویتاسیون، حباب (کوتی)

۱. مقدمه

هیدرودینامیکی موثر بر ضرایب هیدرودینامیکی پروانه نیمه مغروق (Donyavizade et al., 2018) از جمله این فعالیت هاست. در میان جنگ افزارهای زیرسطحی، اژدر سوپر کاویتاسیون از ویژگی های منحصر به فردی از جمله سرعت و قدرت تخریب بالا برخوردار بوده که اهمیت فراوانی به این سلاح پر قدرت بخشیده است.

تحلیل های عددی بیشماری در حوزه تحلیل جریان سیال اطراف اجسام مختلف انجام شده است. در تحلیل یک هیدروفویل در نزدیک سطح آزاد (Shariati and Mousavizadegan, 2017) یا بررسی اندرکنش سیال و سازه بر بدنه سکوی نیمه مغروق (Bakhtiari et al., 2019) و بررسی تاثیر پارامترهای

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



پارامترهای بی بعد و مدل سازی هندسی کاویتاتور پروسیجر بهینه سازی اشکال کاویتاتور (اشکال دماغه اژدر) را ارائه نمود. Kunz et al. (2000) با استفاده از کد UNCLE جریان با تقارن محوری همراه با کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی حول چندین جسم داخل آب را بررسی کرده اند. در حالت کاویتاسیون با تزریق گاز حباب کاویتاسیون در انتها بسته نشده است.

Lu و Chen (2005) با شبیه سازی عددی و استفاده از معادلات (RANS Reynolds Averaged Navier- Stokes equations) جریان سوپرکاویتاسیون مصنوعی حول یک ایرفویل دوبعدی را، در شرایطی که امکان کاویتاسیون طبیعی وجود نداشته بررسی کردند و نتیجه گرفتند که دبی حجمی گاز تزریقی تأثیر مهمی بر شکل کاویتاسیون دارد و با افزایش دبی شکل مرز سیال با گاز دچار نوسان می گردد.

Schnerr et al. (2006) و Schmidt et al. (2006) با استفاده از حل عددی معادلات بقاء جرم، مومنتم و انرژی برای جریان مخلوط همگن، مدل کاویتاسیون تعادلی را ارائه نمودند. همچنین Jia et al. (2006) یک حل عددی از سوپرکاویتاسیون گاز دهی شده ارائه و اثر نرخ دبی گاز بر ابعاد کویتی را مورد بررسی قرار دادند. Zhang et al. (2007) با استفاده از یک مطالعه آزمایشگاهی به مقایسه شکل و ابعاد کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی پرداختند و مشاهده کردند که اثرات جاذبه تأثیر بیشتری بر کاویتاسیون مصنوعی داشته است؛ به طوری که با کاهش عدد فرود جریان، عدم تقارن کویتی مصنوعی واضح تر می شود. Bin et al. (2010) با استفاده از فرض مدل مخلوط همگن و استفاده از مدل انتقال جرم سه جزئی، جریان سوپرکاویتاسیون طبیعی و مصنوعی را در اطراف یک مدل آزمایشگاهی به صورت عددی شبیه سازی نمودند. Morgut et al. (2011) با استفاده از مدل مخلوط همگن و حل یک معادله انتقال برای حجم سیال مایع، جریان سوپرکاویتاسیون طبیعی بر روی یک هیدرو فویل را شبیه سازی کردند. آن ها با در نظر گرفتن جملات چشمه مختلف در معادلات بقاء جرم و حجم سیال به مقایسه بین مدل های انتقال جرم در پیشگویی کویتی طبیعی تشکیل شده پرداختند نتایج آن ها شامل شکل و ابعاد کویتی تطابق مناسبی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی داشت. آن ها با نادیده گرفتن اثر فرود جریان نتیجه گرفتند که نرخ گاز دمیده شده در حالت سوپرکاویتاسیون گاز دهی شده، تأثیر زیادی بر ابعاد کاویتاسیون تشکیل شده دارد. Guo et al. (2011) با استفاده از فرض مدل مخلوط همگن و به کمک یک حلگر تجاری، مشخصات جریان کاویتاسیون طبیعی و گاز دهی شده و برهمکنش میان آن ها را بر روی یک پرتابه مورد بررسی قرار دادند. آن ها با مقایسه کویتی طبیعی و مصنوعی مشاهده کردند که اولاً در یک عدد کاویتاسیون مشخص، ساختار و ابعاد هر دو کویتی به جز در ناحیه انتهایی کویتی تقریباً یکسان است. ثانیاً با افزایش نرخ گاز

برجسته ترین مسئله برای اژدرهای زیرآبی به عنوان یک سلاح بسیار قدرتمند، رسیدن به سرعت های بالا در کوتاه ترین زمان ممکن بوده و این مسأله بسیار مهم و حائز اهمیت است و باید در طراحی و ساخت این گونه سلاح ها مورد توجه قرار گیرد. امروزه سریع ترین اژدرها به دلیل کشش و اصطکاک ناشی از تماس آب دریا با پوسته آن، دارای سرعت های محدود و کمتر از ۴۰ متر بر ثانیه هستند. همان طور که می دانیم وقتی که یک جسم درون آب حرکت می کند، لایه ای از مولکول های آب به بدنه جسم چسبیده و با آن کشیده می شود که این ویژگی سیالات سبب ایجاد نیروی کششی بالایی می شود که به این حالت کشش اصطکاکی پوسته ای گفته می شود.

با گذشت سال ها، تحقیقات گسترده ای روی پدیده های کاویتاسیون و سوپرکاویتاسیون انجام شد و نتایج حاصل از این تحقیقات کمک فراوانی به رفع مشکلات ناشی از کاویتاسیون در تجهیزات کرده است.

از جمله تحقیقات اولیه روی سوپرکاویتاسیون برای بررسی جریان سوپرکاویتاسیون دوبعدی از روش اختلال استفاده شده است (Reichardt, 1945; Garabedian, 1956; Tulin, 1964). با شروع سال ۱۹۷۰ برخی روش های عددی در این زمینه گسترش یافتند (Aitchison, 1984; Varghese et al., 2005) او با استفاده از روش المان محدود متغیر به بررسی جریان پشت یک دیسک درون لوله ای با قطر محدود و طول نامحدود پرداخت. اولمن به بررسی عددی جریان پتانسیل غیرخطی پشت یک صفحه ی صاف پرداخت. پرکاربردترین روش در تحلیل عددی جریان های سوپرکاویتاسیونی، روش المان مرزی می باشد. در سال ۲۰۰۵ با استفاده از این روش به آنالیز عددی جسم با سرعت بالا در جریان سوپرکاویتاسیونی نیمه کامل پرداختند (Varghese et al., 2005). همچنین Shafaghat et al. (2007) با استفاده از این روش جریان سوپرکاویتاسیون متقارن محوری را به صورت عددی بررسی و با مقایسه ی نتایج عددی حاصل با نتایج مشابه به دست آمده به وسیله ی روش های المان محدود و اختلاف محدود، نشان داد که روش المان مرزی دارای دقت بسیار خوبی در تحلیل جریان سوپرکاویتاسیونی می باشد. هم چنین حجم محاسبات به دلیل این که تنها مرز حوزه ی مسئله شبکه بندی شده به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. Kinna et al. (1995) جریان حول بال ها و هیدروفیل های سوپرکاویتاسیونی را تحلیل کرده، هیدروفیل های بهینه را با استفاده از روش ضرایب لاگرانژی به دست می آورند. Alyanak et al. (2004) به طراحی اشکال مختلف کاویتاتورها پرداخت. وی با تعیین پارامترهای طراحی شکل بهینه ی کاویتاتورها برای اژدر سوپرکاویتاسیونی را به دست آورد. وی هم چنین به معرفی چند پارامتر بی بعد در جریان سوپرکاویتاسیون پرداخت (Alyanak et al., 2006). Choi et al. (2005) با معرفی

کونیک، مخروطی و مخروطی دیسکی با دنباله های یکسان مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرند. برای این امر از دو مدل کاویتاسیونی متفاوت که با نرم افزار فلوئنت پیاده سازی شده اند، استفاده می گردد. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و روابط نیمه تجربی مقایسه و ارزیابی شده که از همگرایی قابل قبولی برخوردارند.

روش حل انتخاب شده برای حل معادلات بقای جرم و مومنتوم، روش حل تفکیکی می باشد که در آن هر یک از معادلات به طور جداگانه حل می شوند، بنابراین نیازمند حافظه و زمان کمتری می باشد. خطی سازی معادلات در روش حل تفکیکی با استفاده از روش ضمنی انجام گرفته است. جهت گسسته سازی معادله مومنتوم، در میدان حل، از روش آپویند مرتبه یک استفاده شده است. معادلات به صورت گسسته بر روی سلول های شبکه توسط روش حجم محدود حل می شود. برای حل همزمان میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل و برای تسریع در همگرایی از روش چند شبکه ای استفاده شده است. به منظور شبیه سازی جریان توربولانس، از مدل دو معادله ای K-ε RNG استفاده شده است. لازم به ذکر است که در توربومشین به دلیل تغییرات ناگهانی کرنش استفاده از مدل استاندارد K-ε جایز نیست و بایستی مدل K-ε RNG را بکاربرد.

کاویتاسیون پدیده دینامیکی است که هرگاه دمای مایع در فشار ثابت، افزایش و یا فشار آن در دمای ثابت کاهش یابد، در نهایت حالت مایع شروع به تغییر کرده و حباب های پر شده از بخار آب تولید می گردند. ضریب بدون بعد عدد کاویتاسیون (σ) را برای تحلیل رفتار سیال به هنگام تولید حباب (کاویتاسیون) مطابق با رابطه (۱) مورد استفاده قرار می گیرند.

به منظور تحلیل و بررسی مسئله، مدل سازی برای اژدر مورد نظر با دماغه های مختلف (دماغه نیم کره ای - دماغه بیضوی - دماغه مخروطی) انجام شده است، که تنها تفاوت این مدل ها در نوع دماغه ای آن ها می باشد و سایر پارامترهای طول و قطر در همه ای مدل ها یکسان است. این مدل سازی در نرم افزار کتیا مطابق با اشکال ۱ تا ۳ انجام گرفته است.

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_c}{(\rho_w V_{\infty}^2)}$$

رابطه (۱)

دمیده شده، کویتی طبیعی کوچک شده و در مقادیر نسبتاً زیاد نرخ گاز، عدد کاویتاسیون مصنوعی وابستگی بسیار کمی به عدد کاویتاسیون طبیعی داشته و تنها تابعی از مقدار گاز می باشد. Gao et al. (2012) با استفاده از روش حل عددی، اثر نرخ جریان گاز را بر ابعاد و مشخصات کویتی تشکیل شده را با چشم پوشی از اثرات جاذبه مورد بررسی قرار دادند. Shang (2013) جریان سوپر کاویتاسیون طبیعی را در اطراف یک زیر دریایی به صورت عددی شبیه سازی و وجود باله بر روی بدنه را مورد بررسی قرار داد. Wang et al. (2015) به کمک روش های آزمایشگاهی و عددی، اثر تغییرات ضریب نرخ دمش بر مشخصات کاویتاسیون گاز دهی شده را یک بازه محدود از عدد فرود مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش عدد فرود در یک ضریب نرخ دمش ثابت، اندازه کاویتاسیون کاهش و اثر جاذبه کمتر شده است.

امروزه با طرح ایجاد و استفاده از پدیده سوپر کاویتاسیون، نه تنها مشکلات ناشی از کاویتاسیون حل شده، بلکه با استفاده از ویژگی های منحصر به فرد سوپر کاویتاسیون امکان افزایش فوق العاده سرعت شناورها و تجهیزات زیر سطحی فراهم شده است. با توجه به مطالعات انجام گرفته، تاکنون بررسی همزمان تأثیر شکل دماغه اژدر بر کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی با استفاده از تزریق گاز در نوک آن به همراه مدل شبیه سازی شده مجزا، صورت نگرفته و این موضوع توسط نویسندگان و همکارانش در این تحقیق انجام گرفته است.

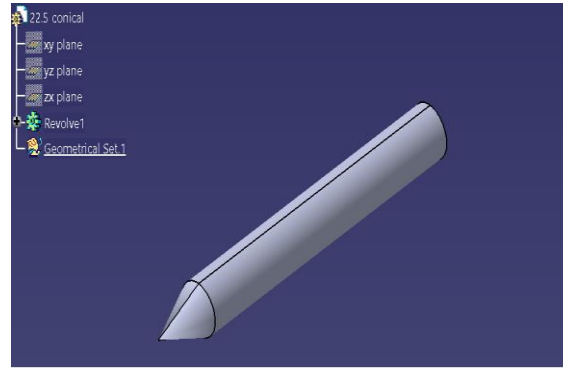
۲. مواد و روش ها

در این تحقیق ابتدا به شبیه سازی جریان سوپر کاویتاسیون بر روی اژدر مدل با دماغه های مختلف پرداخته می شود. در این مدل سازی از نگرش سیال همگن بر پایه مدل معادله انتقالی استفاده شده است. معادلات پیوستگی و مومنتوم برای مخلوط و معادله انتقالی برای کسر حجمی حل می شوند. معادله کسر حجمی دارای ترم های چشمه برای تعیین نرخ انتقال جرم بین فاز بخار و مایع می باشد که این ترم ها را می توان با مدل های مختلف انتقال جرم تعیین کرد. در این تحقیق، سه دماغه های مدل به صورت

$$\rho_w = \rho_{\text{چگالی سیال}}, V_w = \text{سرعت سیال نسبت به جسم}$$

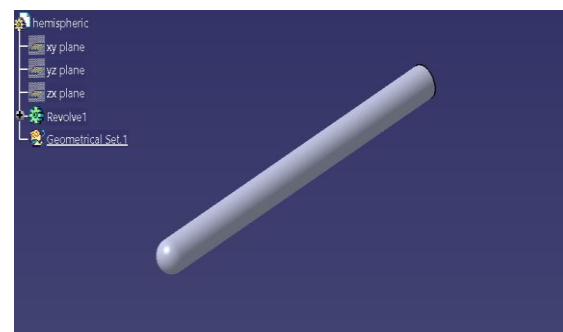
$$P_c = \text{فشار اطراف اژدر (فشار درون حباب)},$$

$$P_{\infty} = \text{فشار بخار (فشار مطلق مایع)}$$



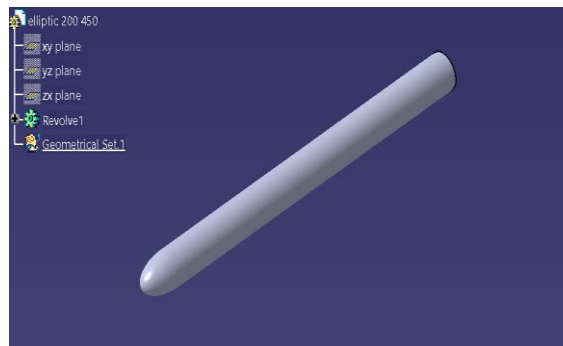
شکل ۱- اژدر مدل با دماغه مخروطی

Fig. 1- Model of torpedo with conical nose



شکل ۲- اژدر مدل با دماغه نیم کره‌ای

Fig. 2- Model of torpedo with hemispherical nose



شکل ۳- اژدر مدل با دماغه بیضوی

Fig. 3- Model of torpedo with elliptical nose

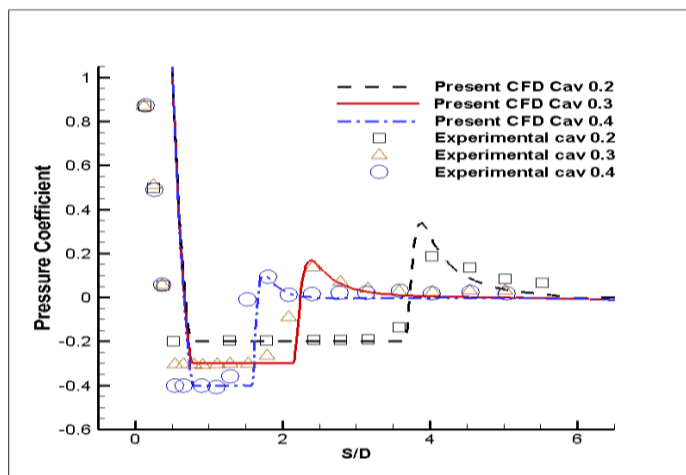
توسط مدل توربولانسی و شرایط حل مشروح در این تحقیق مورد مقایسه قرار گرفته است. مدل دماغه‌ای که به مقایسه نتایج آن پرداخته شده است، به صورت استوانه‌ای با سر نیم کره‌ای می‌باشد که استوانه، دماغه‌ای با قطری معادل ۲۰ میلی‌متر دارد. شرایط میدان جریان به صورت جریان آزاد با شرط ورودی سرعت با عدد رینولدز معادل $10^5 \times 1/36$ ، جریان دوفازی آب و بخار آب با مدل مخلوط (Mixture) می‌باشد. مدل استفاده شده برای کاویتاسیون نیز شیلر-نیومن اعمال شده است. همچنین در این حل عددی از حل ناپایا بر پایه فشار و مدل توربولانسی k-e-

در این تحقیق به دلیل ساده کردن محاسبات و تحلیل‌های نرم افزاری، از وجود زاویه حمله در طراحی صرف نظر می‌شود. به عبارتی دیگر در نمونه اژدرهای طراحی شده زاویه برخورد نوک دماغه اژدر با بردارهای حرکت نسبی سرعت آب صفر است. در واقع با صرف نظر کردن از زاویه حمله، می‌توان مدل‌ها را به صورت دوبعدی تحلیل کرد. برای اعتبار سنجی و اطمینان از حل عددی حاضر (جهت استفاده از آن در تحقیق)، نتایج بررسی یک از مدل‌های آزمایشگاهی (Rouse and McNow, 1948)، با تحلیل عددی

0/2، 0/3 و 0/4 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مطابقت قابل قبولی بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی برقرار است.

standard استفاده گردیده است. دامنه حل نیز به صورت دوبعدی متقارن محوری اعمال شده است.

در شکل 4 نمودار ضریب فشار برحسب فاصله از دماغه (به صورت نسبت بی بعد فاصله از دماغه بر قطر دماغه) در اعداد کاویتاسیون



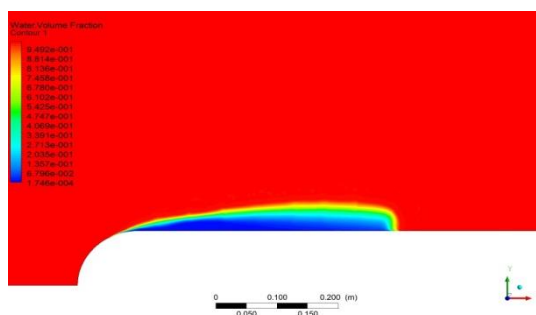
شکل 4- نمودار ضریب فشار برحسب نسبت فاصله از دماغه بر قطر دماغه برای دماغه مرجع
Fig. 4- Pressure coefficient curves for

همان گونه که می دانید فشار سطح دریا برابر با یک بار (یک اتمسفر) می باشد که به ازای هر ۱۰ متر زیر سطح یک بار فشار به اژدر وارد می شود. همچنین برای دستیابی به عدد کاویتاسیون کوچک (با توجه به تعریف عدد کاویتاسیون)، یا باید سرعت حرکت اژدر در سیال را افزایش داد یا اختلاف فشار جریان سیال با اژدر را کاهش داد. به عبارتی دیگر هرچه اژدر در عمق کمتری حرکت کند این اختلاف فشار کمتر بوده، پس کاویتاسیون راحت تر رخ می دهد. در اشکال ۵ تا ۸ تأثیر دماغه نیم کره ای شکل اژدر مدل بر کاویتاسیون ایجاد شده (کاویتاسیون طبیعی) در اعداد مختلف کویتی (0/2، 0/3، 0/4 و 0/5) را نشان می دهیم.

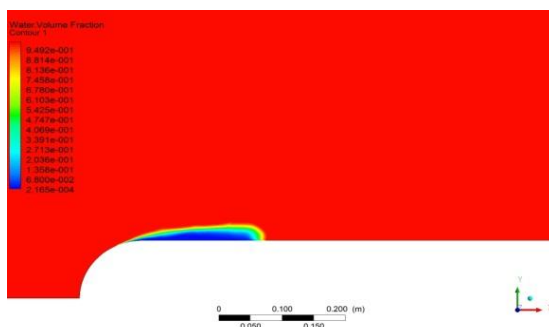
۳- نتایج

در این بخش از تحقیق حاضر تأثیر پنج حالت دماغه متفاوت اژدر مدل، بر روی طول کاویتاسیون که در اعداد کاویتاسیون مختلف (0/2، 0/3، 0/4 و 0/5) ایجاد می شود و مورد بررسی قرار می گیرد.

سرعت حرکت اژدر ۴۰ متر بر ثانیه و بیشترین عمق شناوری ۳۰ متر زیر سطح دریا می باشد (اگر عمق بیشتر از این مقدار تعریف شود؛ با توجه به سرعت، امکان ایجاد کاویتاسیون طبیعی وجود ندارد) که با توجه به تغییر عدد کاویتاسیون، تأثیر شکل دماغه بر روی کاویتاسیون قابل بررسی می باشد.

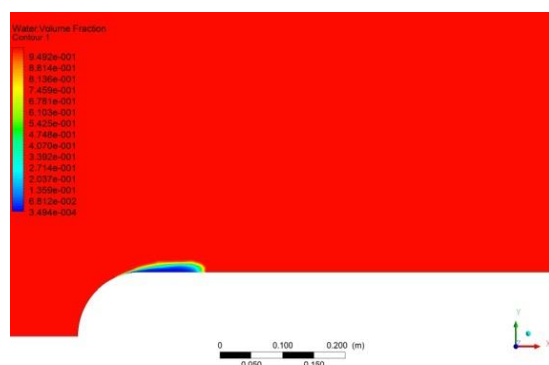


شکل 5- کانتور فاز آب برای دماغه نیم کره ای در عدد کاویتاسیون 0/2
Fig. 5- Water phase contour for hemispherical nose in cavitation number 0.2



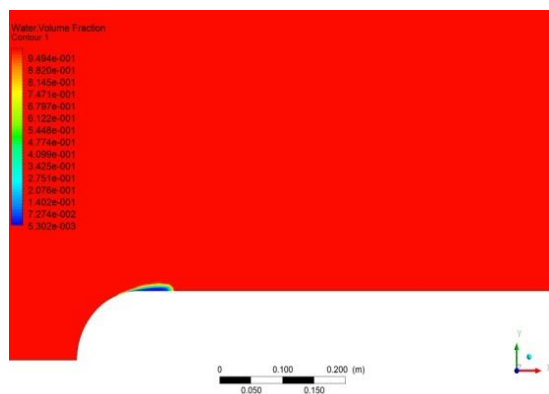
شکل ۶- کانتور فاز آب برای دماغه نیم کره‌ای در عدد کاویتاسیون ۰/۳

Fig. 6- Water phase contour for hemispherical nose in cavitation number 0.3



شکل ۷- کانتور فاز آب برای دماغه نیم کره‌ای در عدد کاویتاسیون ۰/۴

Fig 7. Water phase contour for hemispherical nose in cavitation number 0.4



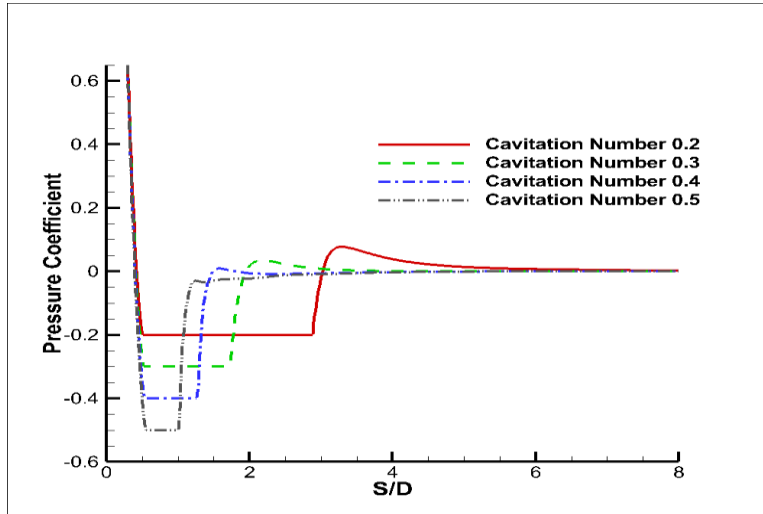
شکل ۸- کانتور فاز آب برای دماغه نیم کره‌ای در عدد کاویتاسیون ۰/۵

Fig. 8- Water phase contour for hemispherical nose in cavitation number 0.5

آزاد و فشار درون کویتی می‌گردد و این باعث می‌شود که گرادیان فشار کمتری در جریان ایجاد شده و خطوط جریان انحنای کمتری داشته باشند؛ لذا تمایل دارند موازی خطوط جریان بالادست رفتار کنند. بنابراین طول حباب افزایش می‌یابد.

در شکل ۹ نمودار ضریب فشار برحسب فاصله از دماغه در اعداد کاویتاسیون متفاوت برای دماغه نیم کره‌ای نشان داده شده است.

با توجه به تصاویر ۴ تا ۷ مشاهده می‌شود که با کاهش عدد کاویتاسیون، حجم کاویتاسیون ایجاد شده در اطراف اژدر بیشتر می‌شود. پس می‌توان گفت در اژدر مدل با دماغه نیم کره‌ای با عدد کاویتاسیون ۰.۲، بیشترین طول کاویتاسیون نسبت به سایر حالات ایجاد می‌شود. در نتیجه می‌توان روند افزایش طول حباب با کاهش عدد کاویتاسیون در این شکل‌ها را این‌گونه توجیه کرد، که کاهش عدد کاویتاسیون منجر به کاهش اختلاف فشار جریان

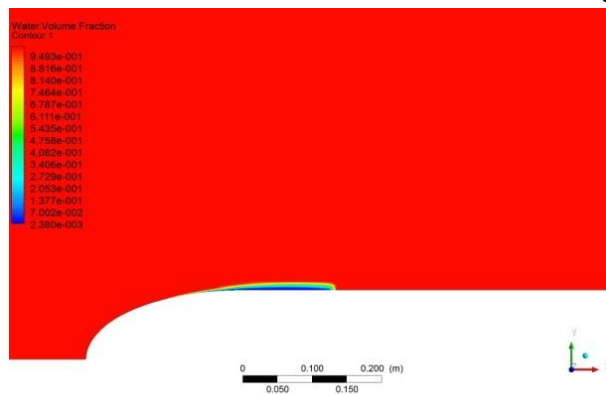


شکل ۹- نمودار ضریب فشار برحسب فاصله از دماغه در اعداد کاویتاسیون متفاوت برای دماغه نیم کره‌ای

Fig. 9- Compression coefficient curves for hemispherical nose

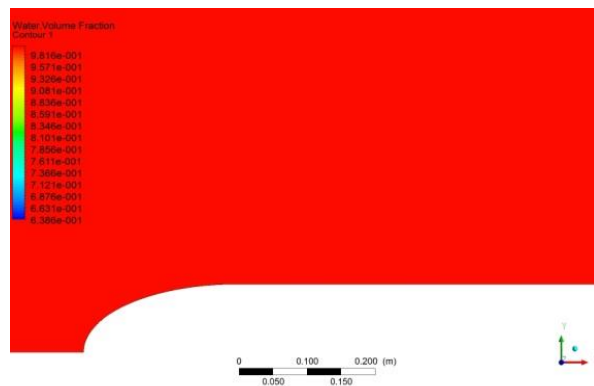
اشکال ۱۰ و ۱۱ تأثیر دماغه بیضوی شکل اژدر مدل، بر کاویتاسیون ایجاد شده (کاویتاسیون طبیعی) در اعداد مختلف کویتی (۰/۳، ۰/۲) نشان می‌دهد.

مقایسه نمودارهای شکل ۹ نشان دهنده حجم کاویتاسیون ایجاد شده توسط دماغه نیم کره‌ای در اعداد کاویتاسیون (۰/۳، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۵) است و مشخص می‌شود که دماغه در عدد کاویتاسیون ۰/۲ بیشترین حجم کویتی را تولید می‌نماید.



شکل ۱۰- کانتور فاز آب برای دماغه بیضی شکل در عدد کاویتاسیون ۰/۲

Fig. 10- Water phase contour for elliptical nose in cavitation number 0.2



شکل ۱۱- کانتور فاز آب برای دماغه بیضی شکل در عدد کاویتاسیون ۰/۳

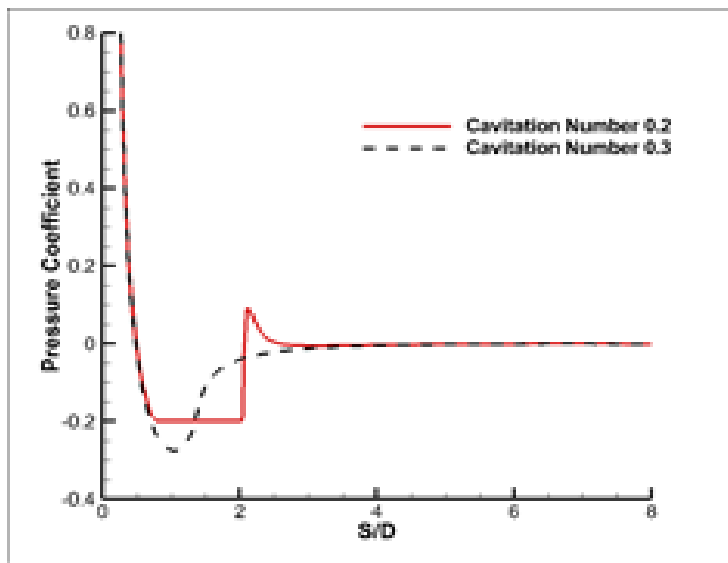
Fig. 11- Water phase contour for elliptical nose in cavitation number 0.3

است. مقایسه نمودارهای شکل مذکور نشان دهنده حجم کاویتاسیون ایجاد شده توسط دماغه بیضوی در اعداد کاویتاسیون (۰/۳ و ۰/۲) است و مشخص می شود که دماغه در عدد کاویتاسیون ۰/۲ بیشترین حجم کویتی را تولید می نماید. همچنین به دلیل خاصیت آئرو دینامیکی دماغه بیضوی از عدد کاویتاسیون ۰/۳ به بالا کاویتاسیونی ایجاد نمی شود و لذا از ترسیم نمودار خودداری می شود.

اشکال ۱۳ تا ۱۶ تأثیر دماغه مخروطی شکل اژدر مدل با زاویه ۲۲,۵ درجه بر کاویتاسیون ایجاد شده (کاویتاسیون طبیعی) در اعداد مختلف کویتی (۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵) را بررسی می کند.

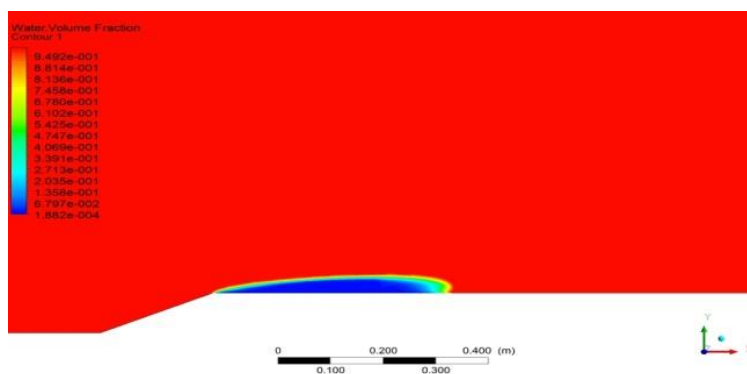
با توجه به نتایج و تحلیل تصاویر فوق مشاهده می شود که دماغه بیضوی شکل اژدر مدل از ویژگی آئرو دینامیکی بسیار خوبی در برابر سیال برخورداریافته به گونه ای که مقاومت دماغه اژدر با سیال بسیار کم می باشد لذا گرادیان فشار این مدل کم است. به همین دلیل مشاهده می شود در عدد کویتی ۰/۳ هیچ گونه کاهش فشاری بعد از دماغه ایجاد نشده و در واقع کاویتاسیونی تشکیل نمی شود. پس نیازی به بررسی این مدل در حالات دیگر (اعداد کویتی ۰/۴ و ۰/۵) نمی باشد.

در شکل ۱۲ نمودار ضریب فشار بر حسب فاصله از دماغه در اعداد کاویتاسیون متفاوت برای دماغه بیضی شکل نشان داده شده



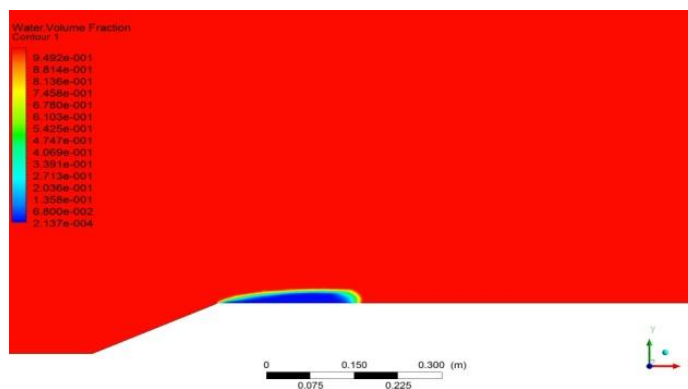
شکل ۱۲- نمودار ضریب فشار بر حسب فاصله از دماغه در اعداد کاویتاسیون متفاوت برای دماغه بیضی شکل

Fig. 12- Coefficient curves for elliptical nose



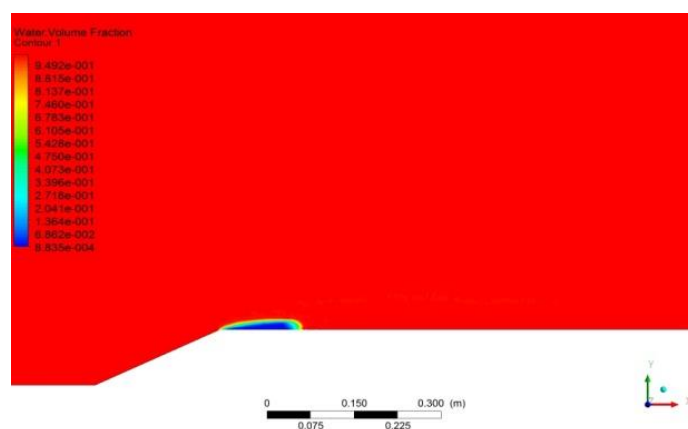
شکل ۱۳- کانتور فاز آب برای دماغه مخروطی ۲۲,۵ درجه در عدد کاویتاسیون ۰/۲

Fig. 13- Water phase contour for conical nose 22.5deg in cavitation number 0.2



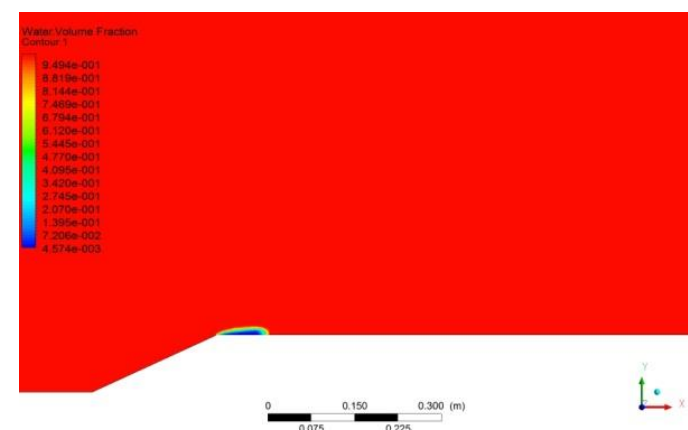
شکل ۱۴- کانتور فاز آب برای دماغه مخروطی ۲۲,۵ درجه در عدد کاویتاسیون ۰/۳

Fig. 14- Water phase contour for conical nose 22.5deg in cavitation number 0.3



شکل ۱۵- کانتور فاز آب برای دماغه مخروطی ۲۲,۵ درجه در عدد کاویتاسیون ۰/۴

Fig. 15- Water phase contour for conical nose 22.5deg in cavitation number 0.4



شکل ۱۶- کانتور فاز آب برای دماغه مخروطی ۲۲,۵ درجه در عدد کاویتاسیون ۰/۵

Fig. 16- Water phase contour for conical nose 22.5deg in cavitation number 0.5

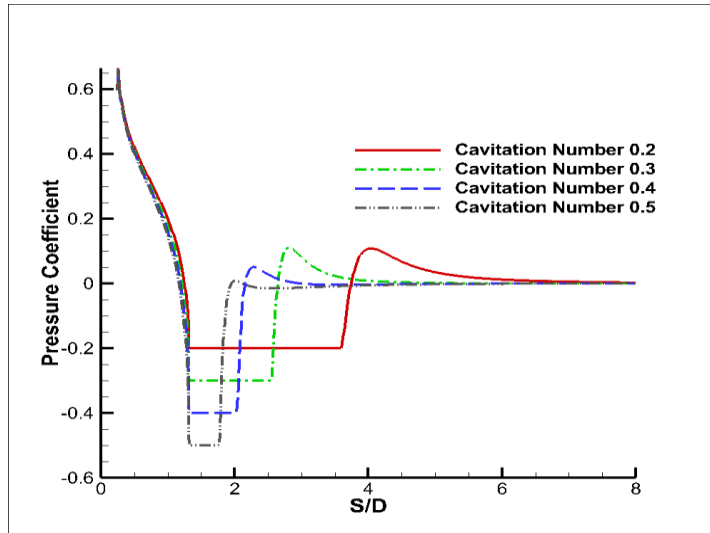
۰/۲ نسبت به سایر حالات (اعداد کویتی کاویتاسیون ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵) بیشتر است.

نتایج حاصل از تحلیل شکل ۱۷ نشان می‌دهد که توزیع ضریب فشار روی دماغه مخروطی با زاویه ۲۲,۵ درجه برای اعداد

تصاویر فوق نیز گویای این موضوع است که با کاهش عدد کاویتاسیون، حجم کاویتاسیون ایجادشده از قسمت شکستگی پیشانی در اطراف اژدر بیشتر شده و طول کاویتاسیون ایجاد در اژدر مدل با دماغه مخروطی با زاویه ۲۲,۵ درجه با عدد کویتی

حباب معادل فشار بخار است و قسمت ثابت PC (قسمت ثابت نمودار ضریب فشار) ارائه شده تقریباً معادل عدد کاویتاسیون است.

کاویتاسیون کاویتاسیون ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ وقتی عدد کاویتاسیون کاهش می‌یابد طول حباب به واسطه کاهش فشار در حلقه بسته حباب افزایش می‌یابد. به عبارتی سطح فشار داخل



شکل ۱۷- نمودار ضریب فشار برحسب فاصله از دماغه در اعداد کاویتاسیون متفاوت برای دماغه ۲۲/۵ مخروطی
Fig. 17- Coefficient curves for conical nose 22.5 deg

اینکه سرعت بالاتری نسبت به مدل Reynolds Stress دارد، اما جواب‌هایی مشابه با آن داده است.

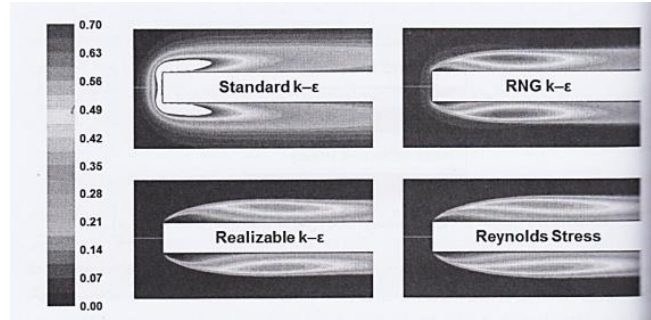
همچنین نمودار ضریب اصطکاک پوسته‌ای برای این نمونه در شکل ۱۹ رسم شده است. با مقایسه نتایج با داده‌های تجربی مشاهده می‌شود که مدل Realizable-k-ε به خوبی توانسته این شرایط را مدل کند.

در تاثیرگذارترین حالت محاسبه طول ایرکوییتی با استفاده از مکان ماکزیمم ضریب فشار در انتهای ایرکوییتی انجام می‌گیرد. با رسم نمودار ضریب فشار بر روی محور تقارن و یافتن نقطه ماکزیمم ضریب فشار در انتهای ایرکوییتی، مقدار طول ایرکوییتی به دست می‌آید. که مشابه شکل ۲۰ است؛ که با بزرگنمایی این قسمت دقیق‌تر می‌توان طول ایرکوییتی را به دست آورد. که در این مثال $\frac{L}{d} = 8.2$ به دست می‌آید.

یکی از مراحل بسیار مهم این تحلیل عددی ایجاد شبکه‌بندی مناسب با توجه به کیفیت مش و تعداد المان‌ها به دلیل تأثیر عمیقی که بر همگرایی حل می‌گذارد، می‌باشد. در مورد استقلال نتایج تحلیل از شبکه باید این جمع‌بندی حاصل شود که تغییر تعداد المان‌های شبکه تأثیری در نتایج حل عددی نخواهد گذاشت. برای این منظور برای یکی از تحلیل‌ها، چهار مدل شبکه‌بندی متفاوت به میزان درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

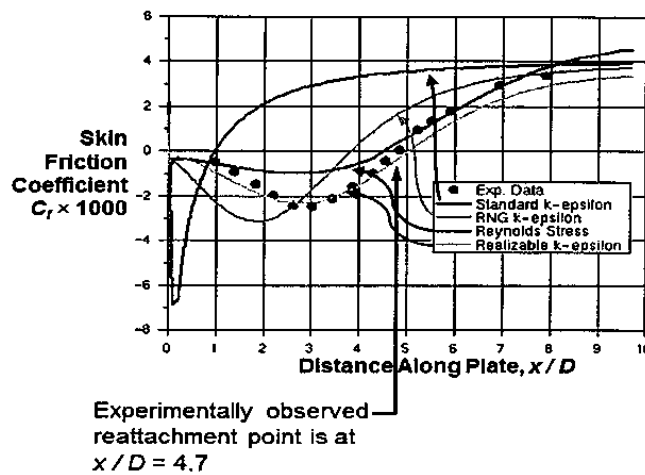
روش حل عددی در این تحلیل بر اساس الگوریتم فشار مینا است. و برای حل معادلات ناویر-استوکس از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی‌های جریان کاویتاسیون هوادهی شده و مشکلات همگرایی معادلات، از ترکیب چند الگوریتم در روند حل استفاده شده است به این صورت که در ابتدا با استفاده از الگوریتم سیمپل سی (SIMPLEC) و با کاهش ضرایب زیر تخفیف حل شروع شده و با همگرایی نسبی نتایج ضرایب به مقدار پیش‌فرض فلوئنت نزدیک شده است، در ابتدا تحلیل‌ها با دقت مرتبه اول انجام شده است و از نتایج آن برای شرایط اولیه حل با مرتبه دوم بالادست استفاده شده است. در انتها از الگوریتم Coupled با عدد کورانت یک، برای رسیدن به جواب نهایی استفاده شده است. و با توجه به هدف تحقیق که تحلیل سوپرکاویتاسیون هوادهی شده در حالت پایا است، انتظار می‌رود که مدل Realizable-k-ε بتواند به راحتی شرایط توربولانسی موردنظر را تحلیل کند.

با توجه به مطالب گفته شده در مورد مدل‌های توربولانس و شرایط جریان مورد مطالعه که یک جریان همراه باجت متقارن محوری و عدد رینولدز جریان بالا است، و در این شرایط مدل‌های Realizable-k-ε و K-ω-sst از توانمندی بالایی برخوردارند و نیز با توجه به پایداری و همگرایی بیشتر، مدل Realizable-k-ε، این مدل برای انجام تحلیل‌ها انتخاب شده است. با توجه به شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که مدل Realizable-k-ε با وجود



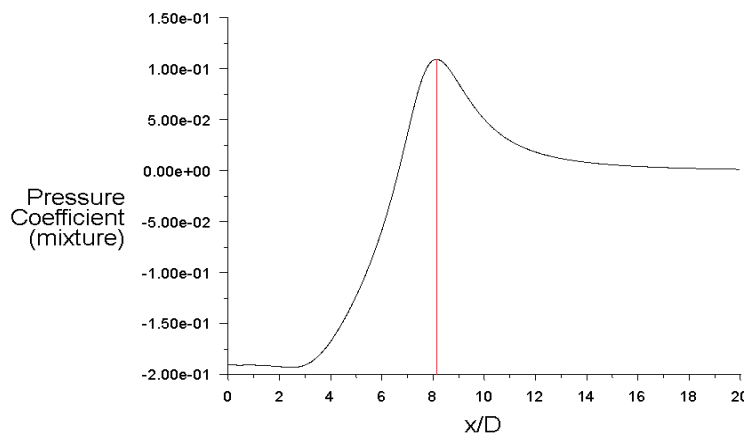
شکل ۱۸- مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی اغتشاشی در جریان با رینولدز ۵۰۰۰۰ در مدل‌های اغتشاشی مختلف (Saadati and Zayn al-Abedini, 2017)

Fig. 18- Comparison of contours with Reynolds 50,000 in different turbulence models (Saadati and Zayn al-Abedini, 2017)



شکل ۱۹- مقایسه ضریب اصطکاک پوسته‌ای در مدل‌های اغتشاشی مختلف برای استوانه سر تخت (Saadati and Zayn al-Abedini, 2017)

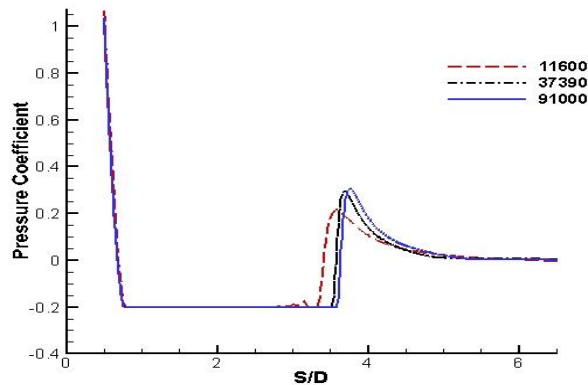
Fig. 19- Comparison of skin friction coefficient in different turbulence models for cylinders [28]
Fig. 20- Coefficient curves for the air cavity (Saadati and Zayn al-Abedini, 2017)



شکل ۲۰- تغییرات ضریب فشار درون ایرکویتی و مکان ماکزیمم ضریب فشار در انتهای ایرکویتی
Fig. 20- Variations of the pressure coefficient inside the air cavity and the location of the maximum pressure coefficient at the end of the air cavity

در ضریب فشار برای مدل دماغه نیم‌کره‌ای در عدد کاویتاسیون ۰/۲ ایجاد کرده است که نشان دهنده‌ی این واقعیت است که بیش از مقدار ۹۱۰۰۰ ریزتر کردن شبکه تأثیر بسیار ناچیزی بر روی نتایج تحلیل می‌گذارد. بنابراین از تعداد سلول ۳۷۳۹۰ جهت تحلیل هیدرودینامیکی این مدل استفاده شده است.

برای جمع‌بندی تأثیر تعداد المان‌ها به نتیجه حل مقدار نمودار ضریب فشار برای این مدل مورد مقایسه قرار گرفته است. طبق شکل ۲۱ افزایش تعداد المان‌ها از مقدار ۱۱۶۰۰ به ۳۷۳۹۰ تغییری قابل ملاحظه را به نتایج تحلیل اعمال کرده و افزایش بیش از این مقدار به ۹۱۰۰۰ تغییری به میزان کمتر از ۴ درصد را



شکل ۲۱- نتایج مطالعه استقلال حل از شبکه برای حالت دماغه نیم‌کره‌ای در عدد کاویتاسیون ۰/۲

Fig. 21. Mesh Independence study for hemispherical nose in cavitation number 0.2

دارای شبکه متراکم‌تری باشد و دیگر نواحی شبکه کمتر تا علاوه بر دقت نتایج هزینه محاسباتی کاهش یابد. با توجه به ناچیز بودن نیروهای ویسکوز در مقابل نیروهای فشاری در تحلیل همراه با سوپرکاویتاسیون، عدد Y-Plus تأثیر چندانی ندارد و اثر آن بررسی نشده است. نتایج شبکه‌بندی‌های مختلف به صورت جدول ۱ است.

در واقع با انجام استقلال حل از شبکه، از انتخاب شبکه ریزتر و غیر ضروری جلوگیری می‌شود و به نوعی بر زمان انجام تحلیل کاسته می‌شود. شبکه‌بندی هندسه کاملاً با سازمان انجام شده است. با توجه به اهمیت تأثیر شبکه‌بندی بر نتایج، تعدادی شبکه با تعداد سلول مختلف شبکه‌بندی شده است و نتایج حاصل از تحلیل آن‌ها با هم مقایسه شده است. در شبکه‌بندی سعی شده است ناحیه ایرکوییتی

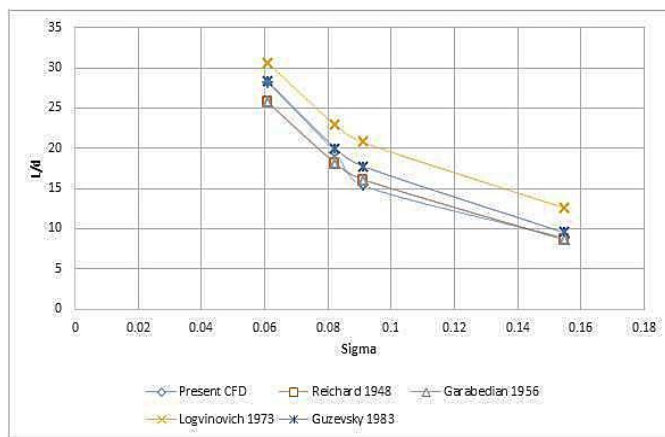
جدول ۱- فاصله نقطه‌های شبکه درون ایرکوییتی در شبکه‌بندی‌های مختلف

Table 1- The distance between the points of the network within the air cavity in different networks

تعداد سلول‌ها	فاصله نقطه‌های شبکه درون ایرکوییتی (میلی‌متر)	ردیف
21000	7.6	1
94000	2.5	2
184000	1.4	3
309000	1	4
525000	0.6	5

کاویتاسیون کوچک نتایج تحلیل عددی به روابط گازوسکی نزدیک‌تر است و در اعداد کاویتاسیون بزرگ‌تر به نتایج ریچارد نزدیک‌تر است. نمودار تغییرات ضریب فشار در ضرایب دممش مختلف به صورت نمودارهای شکل ۲۳ است.

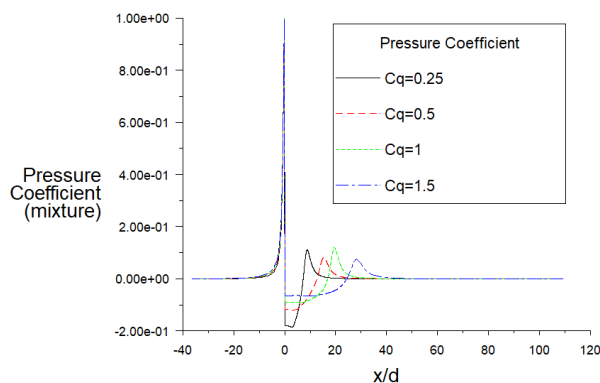
به منظور اعتبار سنجی نتایج تحلیل عددی از روابط نیمه تجربی اشاره شده در قسمت قبل استفاده شده است. نمودار مقایسه نتایج تحلیل عددی با روابط نیمه تجربی به صورت نمودارهای شکل ۲۲ است. با توجه به این نمودار نتایج تحلیل عددی ما از دقت مناسبی نسبت به روابط تجربی برخوردار است. البته در اعداد



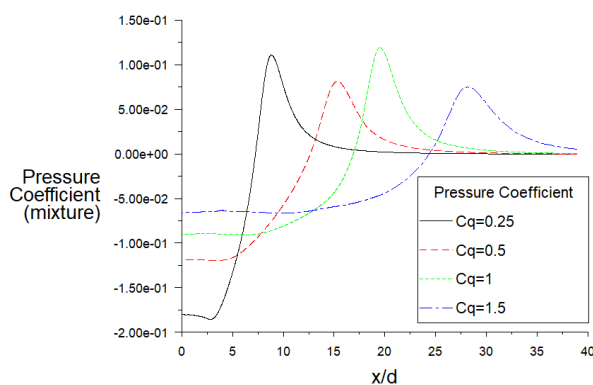
شکل ۲۲- نمودار مقایسه نتایج تحلیل عددی L/D حاصل از CFD با روابط نیمه تجربی

Fig. 22- Comparison diagram of L / D numerical analysis results from CFD with semi-experimental equations

(a)



(b)



شکل ۲۳- نمودار ضریب فشار در ضرایب دمشی مختلف

Fig. 23- Pressure coefficient diagram in different cq

۴- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق بر اساس روش عددی حجم محدود معادلات ناویر استوکس و معادله انتقال بخار برحسب کسر جرمی برای اژدر مدل با دماغه‌های مختلف در نرم‌افزار آنسیس مدل‌سازی و

حل گردید و اثرات تغییر شکل دماغه در شکل‌گیری کاویتاسیون در اطراف جسم مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اعتبار سنجی تحقیق مشخص می‌شود در فرآیند سوپرکاویتاسیون طبیعی نمودارها و تحلیل‌ها با نتایج حاصل از

تست آزمایشگاهی همخوانی دارد. در خصوص سوپر کاویتاسیون مصنوعی (همراه با تزریق گاز)، نمودارها و نتایج تحلیل عددی ما از همخوانی و دقیقی خوبی نسبت به روابط تجربی برخوردار است. البته در اعداد کاویتاسیون کوچک (برای مرحله سوپر کاویتاسیون مصنوعی) نتایج تحلیل عددی به روابط گازوسکی نزدیکتر است و در اعداد کاویتاسیون بزرگتر به نتایج تجربی نزدیکتر است.

تحلیل‌های ما نشان می‌دهد که شکل دماغه در شکل گیری و رشد کاویتاسیون به وجود آمده حول جسم تأثیرگذار بوده و نقش غیر قابل انکاری دارد. در بررسی صورت گرفته پرتابه با دماغه‌ی مخروطی شکل افت فشار بیشتری برای سیال نسبت به دماغه‌های دیگر ایجاد کرده و کاویتاسیون با ارتفاع و طول بیشتری نسبت به آن تولید می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که در پرتابه‌ی مخروطی با زاویه ۴۰ درجه طول کاویتا در عدد کاویتاسیون ۰/۲ از شکست پیشانی پرتابه شروع و حجم زیادی از طول بدنه توسط حباب پوشش داده می‌شود.

از تحلیل و بررسی تصاویر و نمودارهای حاصل از بررسی کاویتاسیون طبیعی می‌توان نتیجه گرفت:

۱- با کاهش عدد کاویتاسیون، طول سوپر کاویتاسیون افزایش پیدا می‌کند ولی قطر حباب کم می‌شود.

۲- یک نقطه سکون ناپایدار در انتهای کویتی، شکل می‌گیرد که به دلیل رشد ناحیه سوپر کاویتاسیون، موقعیت این نقطه سکون با زمان تغییر می‌کند و ناپایدار می‌باشد.

۳- همچنین از تحلیل کلیه تصاویر و نمودارهای به‌دست‌آمده از تحلیل اژدر مدل با دماغه‌های مختلف در نرم‌افزار انسیس مشخص می‌شود که در مدل‌هایی که دارای شکستگی هستند (مانند مدل‌های مخروطی)، کاویتاسیون از نقطه شکستگی (لبه پیشانی) هندسه مدل شروع می‌شود اما در مدل‌های هموار و آئرودینامیکی‌تر (مدل‌های بیضوی و نیم‌کره)، کاویتاسیون از نقطه جدایش جریان شروع می‌شود. البته تعیین نقطه جدایش جریان کار مشکلی است چون نقطه جدایش جریان، به شدت متأثر از سرعت جریان سیال و لزجت سیال می‌باشد.

۴- همچنین نتایج حاصل از تحلیل‌های دماغه‌های مختلف نشان می‌دهد که در یک عدد کاویتاسیون مشخص (مثلاً عدد کاویتاسیون ۰/۳)، طول حباب در مدل دماغه مخروطی بیشترین مقدار و در مدل با دماغه بیضوی کمترین مقدار را دارد. که این به علت ناهموازی روی سطح مدل است. به عبارتی هرچه مدل دارای شیب تندتری باشد، میزان پرش سیال از روی سطح مدل بیشتر خواهد بود و در نتیجه طول کاویتاسیون ایجادشده بیشتر است. همچنین هرچه مدل ما غیر آئرودینامیکی‌تر باشد (به عبارتی مقاومت بیشتری در مقابل عبور سیال داشته باشد) سبب افت فشار زیاد و جدایش جریان سیال عبوری بعد از دماغه می‌گردد.

۵- همچنین روند افزایش طول کویتی با کاهش عدد کاویتاسیون در این شکل‌ها را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که

کاهش عدد کاویتاسیون منجر به کاهش اختلاف فشار جریان آزاد و فشار درون کویتی می‌گردد و این باعث می‌شود که گرادیان فشار کمتری در جریان ایجادشده و خطوط جریان انحنای کمتری داشته باشند؛ لذا تمایل دارند موازی خطوط جریان بالادست رفتار کنند، بنابراین طول کویتی افزایش می‌یابد.

در قسمت بررسی و تحلیل اژدر مدل با تزریق گاز نتایج زیر حاصل می‌گردد. پدیده فیزیکی سوپر کاویتاسیون این امکان را فراهم می‌سازد تا یک شناور زیرسطحی در هاله‌ای از یک حباب بزرگ قرار گیرد به‌گونه‌ای که به‌جای تماس با آب، که نیروی پسا زیادی را تولید می‌کند، تنها با بخار آب در تماس باشد و بدین گونه اصطکاک به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد و در نتیجه می‌شود با نیروی محرکه‌ای برابر با یک شناور زیر آبی متعارف، به‌سرعت بسیار بالاتری دست یافت.

۱- فرآیند ایجاد کاویتاسیون مصنوعی با افزایش فشار کویتی (از طریق گاز دهی به کویتی) و کاهش عدد کاویتاسیون سرعت گرفته و ناحیه کویتی توسعه می‌یابد. گاز دهی به معنی تحت فشار قرار دادن حباب از درون می‌باشد. تزریق گاز در یک سرعت ثابت، عدد کاویتاسیون را کاهش و انداز حباب را افزایش می‌دهد. حتی برای پرتابه‌هایی که به‌منظور حرکت در شرایط سوپر کاویتاسیون طبیعی طراحی می‌شوند نیز در لحظات اولیه پرتاب با ایجاد سوپر کاویتاسیون مصنوعی نیروی پسا کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که این پرتابه‌ها خیلی سریع شتاب می‌گیرند. دماش گاز منجر به پیچیدگی‌های بیشتری در رفتار سوپر کاویتاسیون و ازجمله افزایش ناپایداری آن در اثر نوسانات شکل و ابعاد ناحیه کویتی می‌شود. با توجه به سرعت پرتابه، نرخ جریان گاز خروجی در حالت معمول بسیار زیاد است و موجودی مخزن برای تأمین گاز، کافی نمی‌باشد. همچنین احتمال مکش این گاز به داخل نازل‌ها وجود دارد. در نتیجه از یک سری دیواره‌های حلقوی برای کنترل نرخ خروج گاز استفاده می‌شود.

۲- هوادهی (تزریق گاز) موجب می‌شود تا کویتی (حباب) به‌سرعت رشد کند و مدت زمان فرآیند تبدیل کاویتاسیون به سوپر کاویتاسیون کاهش یافته، در نتیجه اندازه کویتی نیز نسبت به حالت بدون هوادهی، بزرگ‌تر شده که در نتیجه آن نیروی پسا کاهش می‌یابد. این امر سبب افزایش فوق‌العاده سرعت اژدر می‌شود.

۳- با توجه به این‌که برای اعداد فرود بالای ۲۵ از تأثیر جاذبه صرف نظر می‌شود لذا برای تحلیل‌های اژدر مدل با توجه به اینکه عدد فرود در تحلیل‌های این تحقیق ۳۸.۵ به‌دست‌آمده از تأثیر جاذبه برسوپر کاویتاسیون صرف نظر می‌کنیم. همچنین در عدد فرود ثابت، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب گاز دمشی، ضریب پسا روی بدنه جسم کاهش می‌یابد. افزایش ضریب گاز دمشی باعث می‌گردد که تماس سیال پیرامون جسم با بدنه جسم از بین برود و پسای اصطکاک‌کی به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد.

References:

- Aitchison, J.M., 1984. The numerical solution of planar and axisymmetric cavitation flow problems. *Computers & fluids*, 12(1), pp.55-65. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(84\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0045-7930(84)90027-6).
- Alyanak, E., Venkayya, V., Grandhi, R. and Penmetsa, R., 2004. Variable shape cavitator design for a supercavitating torpedo. In *10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference* (p. 4424). <https://doi.org/10.2514/6.2004-4424>
- Alyanak, E., Grandhi, R. and Penmetsa, R., 2006. Optimum design of a supercavitating torpedo considering overall size, shape, and structural configuration. *International Journal of Solids and Structures*, 43(3-4), pp.642-657. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.05.040>
- Bakhtiari, M., Shemshaki, S. and Sadri Nasab, M. 2019. Investigating the interaction of fluid and structure on the body of a semi-submerged platform under the influence of regular sea waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(1), pp. 62-73. doi: 10.22113/jmst.2018.99592.2053.
- Bin, J.I., Luo, X.W., Peng, X.X., Zhang, Y., Wu, Y.L. and Xu, H.Y., 2010. Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around an under-water vehicle based on a three-component cavitation model. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(6), pp.753-759. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60113-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60113-X)
- Chen, X. and Lu, C.J., 2005. Numerical simulation of ventilated cavitating flow around a 2 D foil. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 17(5), pp.607-614.
- Choi, J.H., Penmetsa, R.C. and Grandhi, R.V., 2005. Shape optimization of the cavitator for a supercavitating torpedo. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29, pp.159-167.
- Donyavizadeh, N., Shafaghat, R., Dardel, M. and Mohammadzade Negharchi, S., 2018. Investigation of effect weight of parameters affecting the hydrodynamic coefficients in design of surface-piercing propellers. *Journal of Marine Science and Technology*, 17(3), pp. 45-57. doi: 10.22113/jmst.2017.42946
- Gao, G.H., Zhao, J., Ma, F. and Luo, W.D., 2012. Numerical study on ventilated supercavitation reaction to gas supply rate. *Advanced Materials Research*, 418, pp.1781-1785. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.418-420.1781>
- Garabedian, P.R., 1956. Calculation of axially symmetric cavities and jets.
- Guo, J.H., Lu, C.J. and Chen, Y., 2011. Characteristics of flow field around an underwater projectile with natural and ventilated cavitation. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 16, pp.236-241.
- Jia, L.P., Cong, W.A.N.G., Wei, Y.J., Wang, H.B., Zhang, J.Z. and Yu, K.P., 2006. Numerical simulation of artificial ventilated cavity. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 18(3), pp.273-279. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60003-6)
- Khalil Shariati, S. and Hossein Mousavizadegan, S., 2017. Infinite length hydrofoil analysis near the free surface.
- Kinnas, S.A., Mishima, S. and Savineau, C., 1995. Application of optimization techniques to the design of cavitating hydrofoils and wings. In *Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, Present at the International Symposium on Cavitation Deauville, France* (pp. 2-5).
- Kunz, R.F., Boger, D.A., Stinebring, D.R., Chyczewski, T.S., Lindau, J.W., Gibeling, H.J., Venkateswaran, S. and Govindan, T., 2000. A preconditioned Navier–Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. *Computers & Fluids*, 29(8), pp.849-875. [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(99\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(99)00039-0).
- Morgut, M., Nobile, E. and Biluš, I., 2011. Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(6), pp.620-626. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.03.005>
- Reichardt, H., 1945. The physical laws governing the cavitation bubbles produced behind solids of revolution in a fluid flow. *The Kaiser Wilhelm Institute for Hydrodynamic Research, Gottingen, Rep. UM, 6628*.
- Rouse, H. and McNown, J.S., 1948. *Cavitation and pressure distribution: head forms at zero angle of yaw* (Vol. 32). Iowa City: State University of Iowa.
- Schmidt, S.J., Sezal, I.H. and Schnerr, G.H., 2006, September. Compressible simulation of high-speed hydrodynamics with phase change. In *ECCOMAS CFD 2006: Proceedings of the European Conference on Computational Fluid Dynamics, Egmond aan*

- Zee, *The Netherlands, September 5-8, 2006*. Delft University of Technology; European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS). URL: <http://www.lhm.mw.tu-muenchen.de/gd/>
- Schnerr, G.H., Schmidt, S.J., Sezal, I.H. and Thalhamer, M., 2006, September. Shock and wave dynamics of compressible liquid flows with special emphasis on unsteady load on hydrofoils and cavitation in injection nozzles. In *Proceedings of The 6th International Symposium on Cavitation*.
- Shafaghat, R., Hosseinalipour, S.M. and Shariatifard, A., 2007, May. Numerical analysis of a two dimensional bounded supercavitation flow. In *15th Annual Conferences of the CFD Society of Canada, Toronto, Canada* (pp. 27-31).
- Shang, Z., 2013. Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape. *Applied Mathematical Modelling*, 37(20-21), pp.8836-8845. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.04.009>
- Tulin, M.P., 1964. Supercavitating flows—small perturbation theory. *Journal of Ship Research*, 8(01), pp.16-37. <https://doi.org/10.5957/jsr.1964.8.1.16>.