



Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir



Numerical Simulation of Cavitating Subsurface Hydrofoil at High Froude numbers

Ghazal Taghinia¹, Ali Esmaeili^{2*}

¹ MSc Student, Ferdowsi University of Mashhad; ghazal.taghinia@mail.um.ac.ir

² Assistant Professor, Ferdowsi University of Mashhad; liesmaeili@ferdowsi.um.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 13 Dec 2023

Last modification: 17 Feb 2025

Accepted: 27 May 2025

Available online: 29 May 2025

Article type:

Research paper

Keywords:

Hydrofoil

Cavitation

Free surface effect

Supercritical open channel flow

CFD

ABSTRACT

As an autonomous underwater vehicle (AUV) moves near the free surface, it gives rise to distinctive wave patterns on the sea's surface and fosters the formation of bubbles around its body. The influence of free surface and bubble formation at high system velocities significantly affects the performance of the vehicle and requires further investigation. To numerically simulate wave patterns and partial cavitation bubbles, the submerged body was modeled using the NACA hydrofoil series. By altering the geometry, angle of attack, immersion depth, and cavitation number, variations in the wave amplitude and bubble shape were examined. As the submerged body approaches the sea level, the presence of the free surface becomes more significant, resulting in an increased wave amplitude. Additionally with decreasing submersion depth lift and drag coefficients decrease and decreasing cavitation number results in an expansion of the cavitation volume, consequently reducing the amplitude of the free surface wave.

ISSN: 2645-8136



DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]

شبیه‌سازی عددی هیدروفویل نزدیک به سطح آزاد آب در جریان فوق بحرانی و کاویتاسیونی

غزل تقی نیاء^۱  ، علی اسماعیلی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا / دانشگاه فردوسی مشهد، ghazal.taghinia@mail.um.ac.ir

^۲ استادیار مهندسی هوافضا / دانشگاه فردوسی مشهد، aliesmaeili@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

با حرکت وسایل دریایی بدون سرنشین نزدیک سطح آب، موجی در سطح دریا و حباب کاویتاسیونی روی سطح جسم ایجاد می‌شود. اثر سطح آزاد و تشکیل حباب در سرعت‌های بالای سامانه به کلی بر عملکرد وسیله تاثیر گذار بوده و نیازمند بررسی بیشتر است. در این پژوهش هندسه جسم مغروف با هیدروفویل‌های مختلف ناکا مدل‌سازی شد تا با حل مسئله به روش عددی، شکل موج سطح آزاد و حباب بخار آب حول هیدروفویل شبیه‌سازی شود. با تغییر هندسه، زاویه حمله، عمق غرق‌شدنی و سرعت هیدروفویل تغییرات دامنه موج و شکل حباب مورد بررسی قرار گرفت. با نزدیک شدن جسم غوطه‌ور به سطح آب، حضور سطح آزاد اهمیت بیشتری پیداکرده و دامنه موج تشکیل شده بلندتر شده است. علاوه بر این، ضرایب برآ و پسا با کاهش عمق غوطه‌وری کمتر شده و با کاهش عدد کاویتاسیون، حجم حباب بخار تشکیل شده رشد کرده که منجر به کاهش دامنه موج سطح آزاد شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

هیدروفویل،

کاویتاسیون،

سطح آزاد آب،

کanal باز فوق بحرانی،

دینامیک سیالات محاسباتی

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسنده‌گان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱ - مقدمه

آبرودینامیکی و شکل حباب برای هیدروفویل غرق شده در عمق بی‌نهایت، بال^۷ و همکاران [۸] تابع پتانسیل اثر حضور سطح آزاد را به نتایج حل اضافه کرده و دریافتند حضور سطح آزاد در جریان کاویتاسیونی منجر به تغییر شکل حباب بخار می‌شود. در جریان هیدروفویل غرق شده در عمق محدود نیز صرف نظر کردن از اثر کاویتاسیون منجر به تغییر شکل موج سطح آزاد و ضرایب آبرودینامیکی می‌شود؛ بنابراین لازم است اثر این دو پدیده برای هندسه غرق شده در عمق محدود بررسی شود. وو^۸ و همکاران [۹] ضریب فشار سطح هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ را برای جریان کاویتاسیونی پایا در عدد فرود $6/48$ شبیه‌سازی کردند. برای بررسی ناپایابی در پدیده‌های شکست موج^۹، فروپاشی و تشکیل ابر کاویتاسیون، سان^{۱۰} و همکاران [۱۰] جریان کاویتاسیونی ناپایا حول هیدروفویل ناکا ۶۶ در نزدیکی سطح آزاد شدت کاویتاسیون را کم کرده و فرکанс نوسانات حباب کاویتاسیون بیشتر می‌شود. با افزایش عمق غرق شدگی شدت کاویتاسیون بیشتر شده و هیدروفویل ضرایب برآ و پسای بیشتری تجربه می‌کند. با کاهش عمق غرق شدگی نوسانات موج در ناحیه دنباله‌ی هیدروفویل شدیدتر است و در بعضی زمان‌ها شکست موج رخ می‌دهد. تاکنون پژوهشی که به مقایسه و بررسی عددی جریان کاویتاسیونی پایا و لزج هیدروفویل‌های ناکا در جریان فوق بحرانی در حضور سطح آزاد بپردازد، ارائه نشده است. در این پژوهش ابتدا اثر حضور سطح آزاد بر شکل حباب جریان کاویتاسیونی بررسی می‌شود. سپس اثر تشکیل حباب کاویتاسیون بر شکل موج و ضرایب آبرودینامیکی جریان فوق بحرانی کانال باز بررسی شده و در انتها با تحقیق بر اثر تغییر هندسه شناور، زاویه حمله و سرعت جریان بر عملکرد جسم غوطه‌ور پیشنهاداتی برای طراحی سامانه‌ای با بازده مناسب ارائه خواهد شد.

۲- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

۲-۱- تعریف مسئله و شبکه‌بندی

برای بررسی اثر کاویتاسیون و سطح آزاد بر ضرایب آبرودینامیکی شناور زیر سطحی در اعداد فرود بالا، محیط دریا و جریان هوای مجاور آن با مستطیلی به ابعاد $(10m \times 15m)$ و هندسه جسم معروف با هیدروفویل‌های ناکا به کمک نرمافزار دیزاین مدلر^{۱۱} به صورت دو بعدی مدل‌سازی شد. در شکل (۱) هندسه، شرایط مرزی

طراحی شناور زیرسطحی بدون سرنشین^۱، از پیچیده‌ترین و چالش برانگیزترین سامانه‌های مهندسی است. این سامانه‌ها بدون احتیاج به خدمه نزدیک سطح دریا و از راه دور کنترل و هدایت می‌شوند. این وسائل نقلیه خودمختار برای اهداف وسیعی از جمله اقیانوس‌شناسی، نظارت بر محیط‌زیست و حمل و نقل کالا کاربرد دارند [۱]. با حرکت شناور نزدیک سطح آب، تغییرات فشار ناشی از آن به شکل موجی در سطح آزاد دریا نمایان شده که باعث افزایش فشار هیدرو-استاتیکی بر بدنه زیردریایی و تغییر نیروهای آبرودینامیکی وارد بر هندسه می‌شود. تاکنون مقالات زیادی به بررسی حرکت جسم غوطه‌ور با سرعت پایین در آب پرداخته‌اند. سمینو^۲ و همکاران [۲] مسئله جسم دلخواه غرق شده در عمق محدود را با نگاشت در دستگاه مختلط حل کردند. با حل تقریبی مسئله شکل موج سطح آزاد محاسبه شد. این روش در شرایطی که پدیده‌های فیزیکی پرش هیدرولیکی^۳ و موج-شکنا^۴ رخ می‌دهد، پاسخی نداشت.

بلین^۵ و همکاران [۳] با بررسی تجربی و تحلیلی فشار سطح هیدروفویل و شکل موج سطح آزاد در تونل آب دریافتند عدد فرود جریان نقش کلیدی در تعیین شکل موج جریان دارد. در اعداد فرود کمتر از یک جریان زیر بحرانی است و اختلال ناشی از حرکت هیدروفویل بر بالادست و پایین دست جریان اثرگذار است. با افزایش سرعت هیدروفویل جریان فوق بحرانی شده و موج تنها می‌تواند به پایین دست جریان حرکت کند [۴]. در این رژیم از جریان سرعت انتشار موج سطح آزاد از سرعت حرکت هیدروفویل کمتر است. با افزایش نیاز صنعت به طراحی و ساخت وسائل نقلیه سرعت بالا رفتار جریان در اعداد فرود بالا مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفت [۵]. با پرخورد آب با سطح زیردریایی در جریان‌های با سرعت بالا، ناحیه‌ای پرفسنار در سطح زیرین و ناحیه‌ای کمتر از فشار بالایی ایجاد می‌شود. اگر فشار محلی سطح بالایی کمتر از فشار بخار باشد می‌تواند باعث گسیست مولکول‌های آب و تشکیل پدیده کاویتاسیون گردد. وقوع کاویتاسیون با آثار منفی زیادی از جمله خوردگی و فرسایش سطوح، ایجاد سروصدای، کاهش بازده عملکردی، کاهش برآ و افزایش پسا همراه است [۶]. کیناس^۶ [۷] مسئله کاویتاسیون حول هیدروفویل را به کمک اصل برهم نهی به صورت عددی از تئوری تابع پتانسیل جریان حل کرد. با محاسبه ضرایب

^۱ Autonomous Underwater Vehicles

^۲ Semenov

^۳ Hydraulic-jump

^۴ Breaking-wave

^۵ Blaine

^۶ Kinnas

بخشی از این سلول با فاز q و بخش دیگر آن با فازهای دیگر پرشده و $\alpha_q < 1$ است. این فازها مرز مشترکی در سلول دارند.

با هر بار حل مسئله، کسر حجمی هر فاز در تمامی سلول‌ها محاسبه می‌شود. با میانگین‌گیری حجمی خصوصیات و متغیرهای خواسته شده در هر سلول از شبکه قابل محاسبه است. در مدل کسر حجمی مرز مشترک بین فازها با حل معادله پیوستگی کسر حجمی از رابطه (۱) مشخص می‌شود.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

در این رابطه q فاز سیال، α_q کسر حجمی این فاز، ρ_q چگالی فاز، \vec{V}_q بردار سرعت، \dot{m}_{pq} نرخ جرم انتقال داده شده از فاز p به فاز q و \dot{m}_{qp} نرخ جرم انتقال داده شده از فاز q به p است. رابطه (۱) برای فاز اولیه حل نمی‌شود و کسر حجمی این فاز از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

در روش کسر حجمی سیال خواص سیال با میانگین‌گیری وزنی محاسبه می‌شود؛ مثلاً برای محاسبه چگالی و لزجت دینامیکی هر یک از سلول‌های شبکه به ترتیب از روابط (۳) و (۴) استفاده می‌شود.

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

$$\mu = \sum \alpha_q \mu_q \quad (4)$$

در این روابط q فاز سیال، α_q کسر حجمی این فاز، ρ_q چگالی فاز، μ میانگین چگالی سیال، μ_q لزجت دینامیکی فاز و μ میانگین لزجت سیال است.

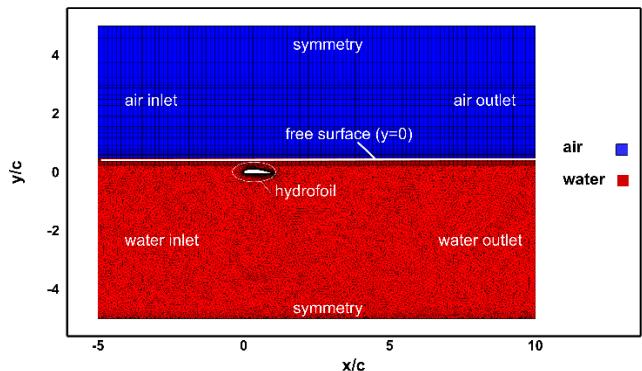
در روش کسر حجمی فازها میدان سرعت با حل معادله مومنتوم پایا از رابطه (۵) محاسبه شده و نتایج میدان سرعت میان فازها به اشتراک گذاشته می‌شود. با وجود لزجت دینامیکی، چگالی و وابستگی آنها به کسر حجمی فازها معادله مومنتوم به کسر حجمی فازها وابسته می‌شود.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}^T) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \vec{V} + \vec{V}^T) \right] + \rho \bar{g} + \vec{F} \quad (5)$$

در این رابطه ρ چگالی مخلوط فازها در هر سلول، \vec{V} بردار سرعت، ∇P گرادیان فشار، μ لزجت دینامیکی مخلوط فازها در هر سلول، \bar{g} نیروی جاذبه وارد به سیال و \vec{F} نیروی حجمی است.

و شبکه‌بندی آورده شده است. دامنه حل به دو ناحیه تقسیم شد. نیمه بالا هوا با چگالی $1/225 \text{ kg/m}^3$ و لزجت دینامیکی $10^{-5} \times 10/7894 \text{ kg/m.s}$ ، نیمه پایین آب با چگالی $998/2 \text{ kg/m}^3$ و لزجت دینامیکی 100000 kg/m.s است. با حل مسئله موجی در سطح دریا و حباب کاویتاسیونی در ناحیه کم‌فشار حول هیدروفویل تشکیل می‌شود. حباب کاویتاسیون با بخارآب به چگالی 5542 kg/m^3 و لزجت دینامیکی $10^{-5} \times 1/34 \text{ kg/m.s}$ اشباع خواهد شد.

شبکه‌بندی این هندسه با نرم‌افزار انسیس مشینگ^{۱۲} انجام شده است. نیمه بالایی دامنه حل شبکه‌بندی سازمان یافته مستطیلی^{۱۳} و نیمه پایینی دامنه شبکه‌بندی مثلثی بی‌سازمان دارد. در مرز سطح دریا که تغییرات چگالی زیاد است و حول هیدروفویل که تغییرات سرعت زیاد است، مش با دستور تورم^{۱۴} تا حد مناسبی ریز شده است.



شکل ۱ - دامنه حل، شرایط مرزی و شبکه‌بندی

۲-۲- معادلات حاکم

در این مسئله سه فاز هوا، آب مایع و بخارآب وجود دارد. دو فاز مجزا و غیرقابل اختلاط هوا و آب در سطح آزاد با خط موج از یکدیگر جدا می‌شوند. با تبدیل آب مایع به بخار و تشکل حباب کاویتاسیون فاز سوم این مسئله ایجاد می‌شود. این جریان چند فازی با مدل کسر حجمی سیال^{۱۵} در نرم‌افزار فلوئنت حل شد.

با مدل کسر حجمی می‌توان رفتار دو یا چند سیال مخلوط نشدنی را پیش‌بینی کرد. در این مدل هر سلول از شبکه باید کاملاً با فازها پوشید. اگر حجم یک سلول را واحد در نظر بگیریم و فاز سیال q باشد و کسر حجمی این فاز در یک سلول با α_q نشان داده شود؛

- کسر حجمی این فاز در یک سلول به یکی از سه شکل زیر است:
 - سلول خالی از فاز q و $\alpha_q = 0$ است.
 - سلول به طور کامل با فاز q پرشده و $\alpha_q = 1$ است.

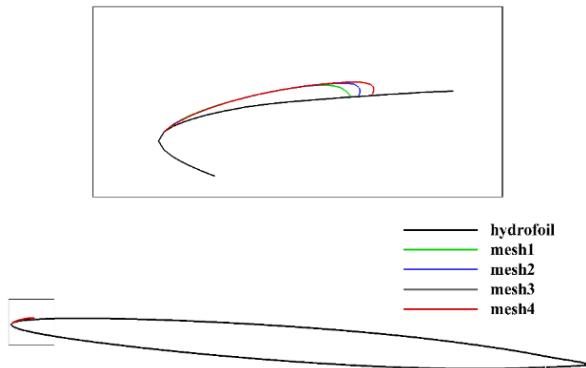
¹² Ansys meshing

¹³ quadrilateral

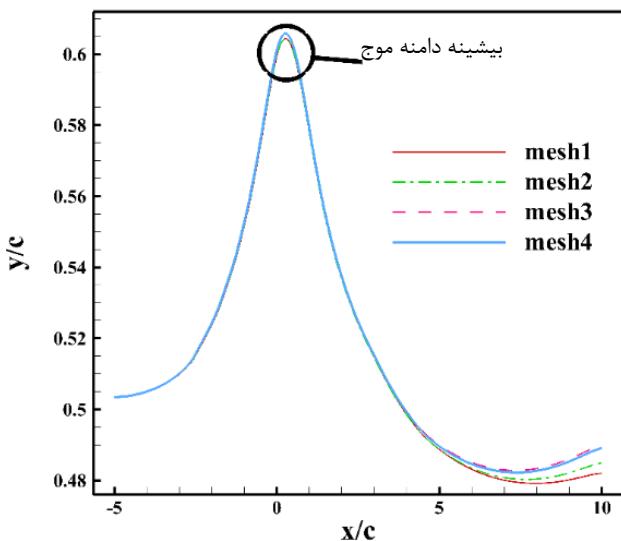
¹⁴ inflation

¹⁵ Volume of fluids

شکل موج شبکه‌بندی ۳ و ۴ بر هم منطبق بود. برای کاهش هزینه محاسباتی شبکه ۳ که تعداد سلول کمتری دارد انتخاب شد. تعداد گره‌ها روی هیدروفویل این شبکه ۲۲۰۰ و تعداد کل سلول‌ها ۱۳۲۶۲۲ است.



شکل ۲ - بررسی استقلال از شبکه (مقایسه‌ی شبکه کاویتاسیون) در عدد کاویتاسیون ۱، زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۵/۰ طول وتر



شکل ۳ - بررسی استقلال از شبکه (مقایسه‌ی شبکه موج) در عدد کاویتاسیون ۱، زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۵/۰ طول وتر

با شبیه‌سازی آشفتگی از مدل‌های متفاوت آشفتگی، تنها بازگشتی را به درستی پیش‌بینی کرد. نمودار y^+ این شبکه در شکل (۴) آورده شده است. مقادیر y^+ روی مرز دیواره هیدروفویل برای این شبکه در بازه ۴۰ تا ۱۴۰ است که برای این دسته از شبیه‌سازی‌ها، مقادیر به دست‌آمده محدوده قابل قبول است و دقت شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

مدل‌سازی کاویتاسیون برای محاسبه نرخ انتقال جرم از فاز آب به فاز بخار آب با مدل اشنر-سوئر^{۱۶} از رابطه (۶) انجام شده است.

$$\nabla \cdot (\alpha_v \rho_l \vec{V}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} (\vec{V} \cdot \nabla \alpha_v) \quad (6)$$

در این رابطه α_v کسر حجمی بخار آب، ρ_l چگالی فاز بخار، \vec{V} سرعت فاز بخار، ρ_l چگالی آب و ρ چگالی مخلوط سیال، تابعی از کسر حجمی و چگالی فازها است.

برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ استفاده شده است. انرژی جنبشی k و انرژی تلفاتی بر واحد جرم ε در رابطه (۷) و (۸) آورده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

درنهایت اعداد بی بعد رینولدز، فروید و کاویتاسیون که تعیین‌کننده رفتار و رژیم جریان آشفته و کاویتاسیونی در حضور سطح آزاد هستند؛ در روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) آورده شده است.

$$Re = \frac{\rho_l U c}{\mu_l} \quad (10)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g c}} \quad (11)$$

$$\sigma_v = \frac{p_0 + \rho_l g h - p_v}{\frac{1}{2} \rho_l U^2} \quad (12)$$

در این روابط ρ_l چگالی سیال آب، U سرعت جریان ورودی، c طول وتر هیدروفویل، μ_l لزجت سیال آب، p_0 فشار اتمسفر آزاد، p_v فشار بخار اشباع، g شتاب گرانش زمین و h عمق غرق‌شدگی هیدروفویل است.

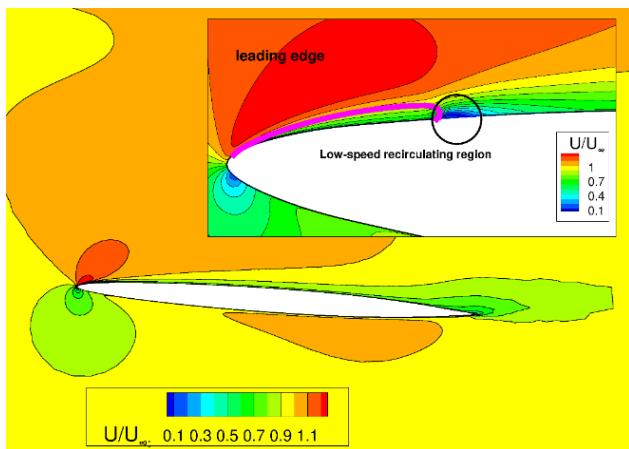
۳- نتایج و بررسی

۳-۱- استقلال از شبکه و اعتبار سنجی

برای بررسی استقلال از شبکه، هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در زاویه حمله ۴ درجه، عمق غرق‌شدگی ۵/۰ طول وتر هیدروفویل و عدد کاویتاسیون ۱، در جریانی با عدد فرود ۴/۵۶ شبیه‌سازی شد. ۴ شبکه با تعداد سلول متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل (۲) شکل حباب کاویتاسیون ۴ شبکه‌بندی و در شکل (۳) شکل موج سطح آزاد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل حباب کاویتاسیون و

^{۱۶} Schnerr-Sauer Cavitation Model

حباب کاویتاسیون کشیده می‌شوند. منحرف شدن خطوط جریان به سمت حباب کاویتاسیون این ناحیه کم سرعت را ایجاد کرده است.



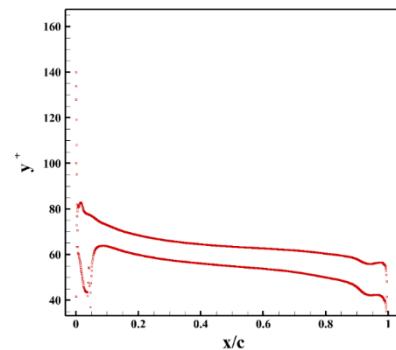
شکل ۶ - کانتور اندازه سرعت بی بعد شده در عدد کاویتاسیون ۱، زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق شدگی ۵/۰ طول وتر هیدروفویل

۳-۲- اثر سطح آزاد

در این بخش اثر سطح آزاد و موج تشکیل شده بر شکل و اندازه حباب کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در زاویه حمله ۴ درجه بررسی خواهد شد. اگر مختصات مشخصی روی سطح بالای هیدروفویل انتخاب شده و به سمت بالا حرکت کنیم، هیدروفویلی که در مجاورت سطح آزاد حرکت می‌کند به علت وجود فشار هیدرو-استاتیکی، فشار بیشتری در راستای عمودی تجربه خواهد کرد. حضور سطح آزاد و افزایش سطح دریا بالای لبهی حمله باعث بالا رفتن فشار هیدرو-استاتیکی این ناحیه و کاهش سرعت محلی خواهد شد. کاهش سرعت محلی، کوچک شدن حباب کاویتاسیون را به دنبال دارد [۱۰]. در شکل (۷) مقایسه‌ای از اندازه حباب کاویتاسیون در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن آورده شده است. در صورت صرف‌نظر کردن از اثر سطح آزاد طول حباب کاویتاسیون ۲/۳٪ طول وتر بیشتر خواهد شد. عدد کاویتاسیون در هر دو شبیه‌سازی ۱ است. با توجه به یکسان بودن عدد کاویتاسیون هر دو مسئله سرعت جریان ورودی در صورت وجود سطح آزاد و عمق غرق شدگی ۵/۰ طول وتر هیدروفویل از رابطه (۱۲) و در صورت عدم وجود سطح آزاد از رابطه (۱۳) محاسبه شده است.

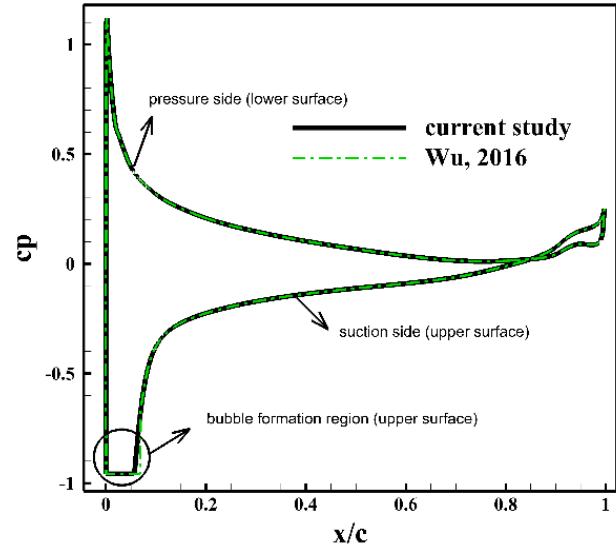
$$\sigma_v = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (13)$$

در این رابطه p_0 فشار اتمسفر، p_v فشار بخار آب و ρ چگالی آب و U سرعت سیال است. اگرچه سرعت سیال در صورت عدم وجود سطح آزاد کمتر است و انتظار می‌رود حباب کاویتاسیون کوچک‌تر باشد، اما کم شدن فشار هیدرو-استاتیکی سیال باعث بزرگ شدن حباب کاویتاسیون شده است.



شکل ۴ - نمودار y^+ شبکه سوم

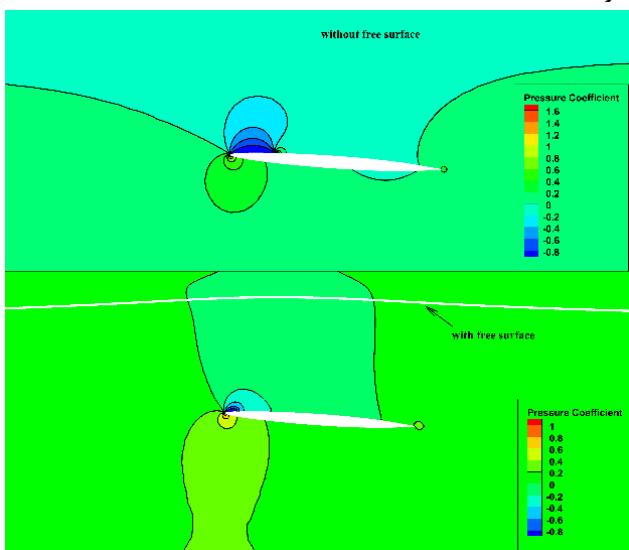
به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی، نتایج شبکه سوم با مرجع [۹] مقایسه شد. شایان ذکر است که در این مرجع، استقلال از دامنهٔ حل بررسی شده است و در این پژوهش، از نتایج آن برای اطمینان از مناسب بودن دامنهٔ محاسباتی استفاده شده است. در شکل (۵) ضریب فشار شبیه‌سازی حاضر با نتایج مرجع مقایسه شده است. طول حباب کاویتاسیون، ناحیهٔ فشار ثابت نمودار، در هر دو شبیه‌سازی ۵٪ طول وتر هیدروفویل است. با محاسبه سطح داخل نمودار ضریب فشار، به اندازهٔ ۳۰٪ نیروی برآ از ناحیهٔ حباب کاویتاسیون که تنها ۵٪ طول وتر را شامل می‌شود، تأمین شده و ۷۰٪ باقی‌مانده از ۹۵٪ بقیه طول وتر حاصل شده است. ضریب برآ ۰/۲۸ و ضریب پسا ۰/۲۴ است.



شکل ۵ - مقایسهٔ ضریب فشار شبیه‌سازی حاضر و مرجع [۹] در عدد کاویتاسیون ۱، زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق شدگی ۵/۰ طول وتر

در شکل (۶) کانتور اندازه سرعت بی بعد شده در نواحی اطراف هیدروفویل آورده شده است. از مختصاتی روی سطح بالای هیدروفویل که کسر حجمی بخار آب خالص از یک کمتر شده تا زمانی که کسر حجمی بخار آب به ۰/۰۲ می‌رسد، یک ناحیه جریان کم سرعت بازگشتی ایجاد شده است. در جریان کاویتاسیونی حول هیدروفویل کمینه فشار داخل حباب کاویتاسیون رخ می‌دهد؛ بنابراین خطوط جریان به سمت

نیاه می‌دهد حضور سطح آزاد منجر به کاهش نیروی پسا و برآ خواهد شد.



شکل ۹ - مقایسه کانتور ضربی فشار در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن در عدد کاویتاسیون ۱ و زاویه حمله ۴ درجه

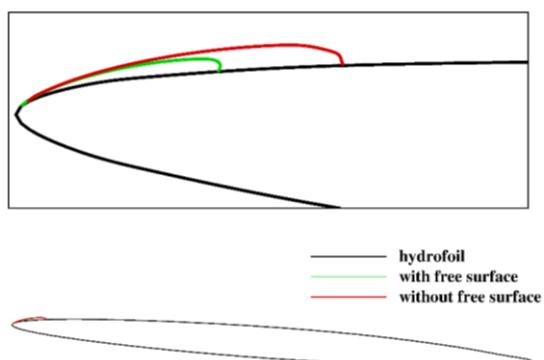
جدول ۱ - مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن در عدد کاویتاسیون ۱ و زاویه حمله ۴ درجه

ضریب برآ	ضریب پسا
۰/۲۸	۰/۰۲۴ همراه سطح آزاد
۰/۳۵	۰/۰۳۰ بدون سطح آزاد

۳-۳- اثر تشکیل حباب

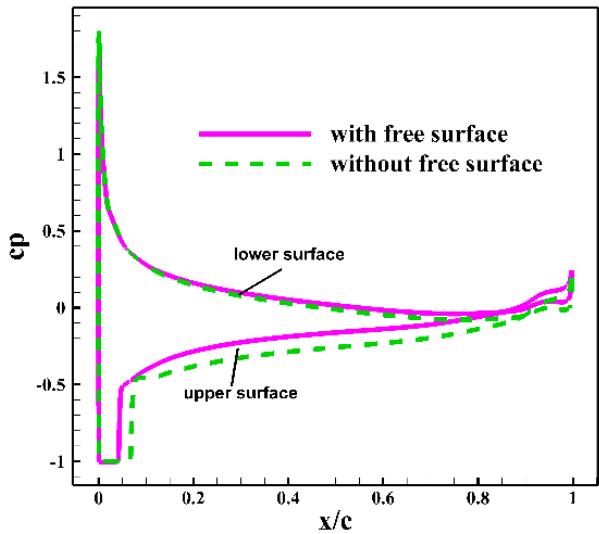
در حالت کلی کمتر شدن فشار سیال از فشار بخار آب تضمین کنندهٔ وقوع کاویتاسیون نیست و شروع این پدیده به شرایط اولیه سیال وابسته است. به اختلاف فشار شروع کاویتاسیون و فشار بخار آب تأخیر استاتیکی می‌گویند [۶]. در این بخش نتایج شبیه‌سازی هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در عمق غرق شدگی ۰/۵ طول وتر و زاویه حمله ۴ درجه در دو حالت جریان کاویتاسیونی و در صورت صرف‌نظر کردن از اثر تشکیل کاویتاسیون مقایسه شده‌اند. عدد فرود در این دو شبیه‌سازی ۶/۴۸ است.

در شکل (۱۰) شکل موج تشکیل شده در جریان کاویتاسیونی و جریان بدون کاویتاسیون مقایسه شده‌اند. وجود کاویتاسیون باعث بیشتر شدن ارتفاع موج می‌شود [۱۱]. بیشینه ارتفاع حباب کاویتاسیون در این شبیه‌سازی ۲٪ طول وتر هیدروفویل است در حالی که افزایش ارتفاع موج در صورت تشکیل حباب تنها ۰/۲٪ طول وتر هیدروفویل است.



شکل ۷ - مقایسه حباب کاویتاسیون در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن در عدد کاویتاسیون ۱ و زاویه حمله ۴ درجه

در شکل (۸) مقایسه‌ای از ضربی فشار سطح هیدروفویل در صورت وجود سطح آزاد و بدون در نظر گیری اثر آن آورده شده است. مقدار کمینه ضربی فشار در هر دو مسئله ۱ است. ضربی فشار سطح پایین هیدروفویل در هر دو شبیه‌سازی تقریباً برهم منطبق است، اما سطح بالای هیدروفویل در صورت وجود سطح آزاد، ضربی فشار بیشتر است. بعد از ناحیه تشکیل حباب نمودار ضربی فشار سطح بالای هر دو مسئله موازی یکدیگر و در فاصله تقریبی ۰/۱ از هم قرار دارند.



شکل ۸ - مقایسه ضربی فشار در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن در عدد کاویتاسیون ۱ و زاویه حمله ۴ درجه

در صورت وجود سطح آزاد ناحیه کم فشار سطح بالای هیدروفویل، به علت کوچک شدن حباب کاویتاسیون، کوچک‌تر است؛ بنابراین اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل کمتر و ضرایب برآ و پسا نسبت به حالتی که سطح آزاد وجود ندارد، کوچک‌تر خواهد شد. در شکل (۹) نمایی از کانتور ضربی فشار در دو حالت مختلف آورده شده است. برای درک بهتر اثر سطح آزاد بر هیدروفویل در جدول (۱) ضرایب برآ، پسا در صورت وجود سطح آزاد و در صورت صرف‌نظر کردن از اثر آن آورده شده است. همانطور که این جدول

حباب کاویتاسیون در لبهٔ حمله مکش زیاد جریان و کاهش شدید فشار استاتیکی باعث افزایش اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل نسبت به جریان کاویتاسیونی و افزایش ناچیز ضریب برآ خواهد شد. در جدول (۲) ضرایب آیرودینامیکی آورده شده‌است.

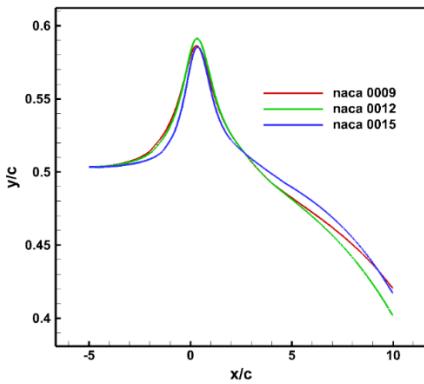
جدول ۲- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در صورت تشکیل کاویتاسیون و بدون آن در زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر در عدد فرود ۶/۴۸

ضریب برآ	ضریب پسای کل	ضریب پسای اصطکاکی	ضریب پسای شکلی	
۰/۲۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴	۰/۰۱۹	جریان کاویتاسیونی
۰/۲۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	جریان بدون کاویتاسیون

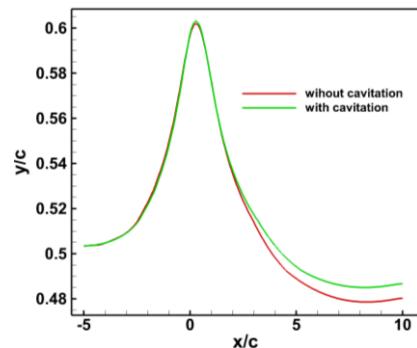
۴-۳-۴- اثر ضخامت

در این قسمت برای بررسی اثر افزایش ضخامت بر نتایج، سه هیدروفویل متقارن ناکا ۰۰۹، ناکا ۰۰۱۲ و ناکا ۰۰۱۵ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و عدد کاویتاسیون ۰/۵ در عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. عدد فرود جریان ۶/۴۸ است.

در شکل (۱۲) شکل موج تشکیل شده در سطح آزاد این سه هیدروفویل در جریان کاویتاسیونی با شرایط یکسان یا یکدیگر مقایسه شده‌است. ارتفاع موج تشکیل شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ و ناکا ۰۰۱۵ تقریباً ۰/۰۸ طول وتر هیدروفویل و ارتفاع موج تشکیل شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ تقریباً ۰/۰۹ طول وتر هیدروفویل است. علی‌رغم اینکه انتظار می‌رود بر خاستگی موج در جریان سطح آزاد حول هیدروفویل ناکا ۰۰۱۵ به علت بیشتر بودن ضخامت بیشتر باشد، ناحیه وسیع کم‌فشار سطح بالای هیدروفویل با مکندگی زیاد منجر به کم شدن دامنه موج شده است.

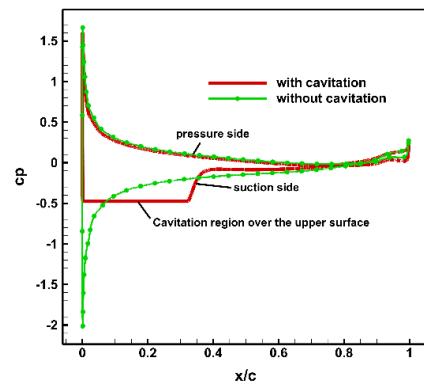


شکل ۱۲ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش ضخامت هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل



شکل ۱۰ - مقایسه شکل موج جریان در صورت تشکیل کاویتاسیون و بدون آن در زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در صورت ایجاد حباب کاویتاسیون ضریب فشار کمینه همان فشار بخار (P_{sat}) خواهد بود، اما در صورت جلوگیری از تشکیل حباب، فشار کمینه سطح بالا هیدروفویل به -200 کیلو پاسکال می‌رسد. این کاهش فشار و مکندگی زیاد، موج را به سمت خود می‌کشد. درنتیجه افزایش دامنه موج کمتر از حد انتظار خواهد شد. در شکل (۱۱) ضریب فشار هیدروفویل در حالت وقوع کاویتاسیون و صرفنظر کردن از اثر آن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سطح پایین دو هیدروفویل در دو شبیه‌سازی و سطح بالای هیدروفویل بعد از تمام ناحیهٔ حباب کاویتاسیون و جت بازگشتی تقریباً بر هم منطبق‌اند. لازم به ذکر است ضریب فشار جریان کاویتاسیونی با مرجع [۹] اعتبار سنجی شده است. در صورت عدم تشکیل کاویتاسیون صحت شبیه‌سازی از مقایسه نمودار ضریب فشار با کد MXPAN3D بررسی شد. اختلاف نتایج با مرجع٪ ۵ و به علت صرفنظر کردن از اثرات سه‌بعدی بودن جریان است.



شکل ۱۱ - مقایسه ضریب فشار سطح هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در صورت تشکیل کاویتاسیون و بدون آن در زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در این مسئله با تشکیل کاویتاسیون ضریب پسای اصطکاکی در ناحیهٔ تشکیل حباب کم و در ناحیهٔ جت بازگشتی زیاد می‌شود. ضریب پسای شکلی نیز با تشکیل حباب زیاد می‌شود. ضریب پسای کل که حاصل جمع این دو مقدار است با تشکیل کاویتاسیون به مقدار ناچیزی افزایش یافته‌است. با صرفنظر کردن از اثر تشکیل

هیدروفویل در راستای جریان ایجاد می‌شود. با افزایش ضخامت ناحیه کم فشار سطح بالای هیدروفویل بیشتر و فشار سطح پایین هیدروفویل کمتر می‌شود، بنابراین اختلاف این دو در راستای جریان کمتر و ضریب برآ کمتر شده است.

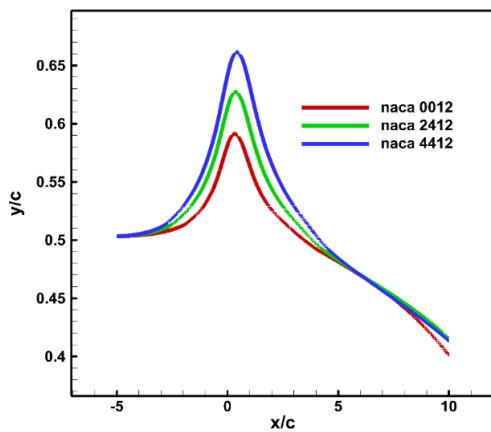
جدول ۳- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی با افزایش ضخامت هیدروفویل در عدد کاویتاسیون ۵/۰، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

نام	ضریب پسای کل	ضریب پسای اصطکاکی	ضریب پسای شکلی	هیدروفویل
ناکا ۰۱۹	۰/۰۲۰	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰۰۰۹
ناکا ۰۱۶	۰/۰۲۶	۰/۰۰۴	۰/۰۲۲	۰۰۱۲
ناکا ۰۰۷	۰/۰۳۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	۰۰۱۵

۳-۵- اثر انحنا

در این قسمت برای بررسی اثر افزایش انحنا هیدروفویل بر نتایج سه هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و عدد کاویتاسیون ۵/۰ در عمق غرق شدگی ۰/۵ طول وتر با یکدیگر مقایسه شده اند. عدد فرود جریان ۶/۴۸ است.

در شکل (۱۵) شکل موج تشكیل شده در سطح آزاد این سه هیدروفویل در جریان کاویتاسیونی با شرایط یکسان با یکدیگر مقایسه شده است. بیشینه ارتفاع موج تشكیل شده در سطح آزاد هیدروفویل های ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ به ترتیب ۹٪، ۹٪ و ۱۶٪ طول وتر هیدروفویل است. با افزایش انحنا هیدروفویل اندازه حباب کاویتاسیون بیشتر شده و ضخامت محلی هیدروفویل بیشتر خواهد شد. با افزایش انحنا، فشار سطح زیرین هیدروفویل نیز بیشتر می‌شود. افزایش اندازه حباب سطح بالای هیدروفویل و افزایش فشار سطح زیرین منجر به افزایش دامنه موج شده است.



شکل ۱۵- مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش انحنا هیدروفویل های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۵/۰، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

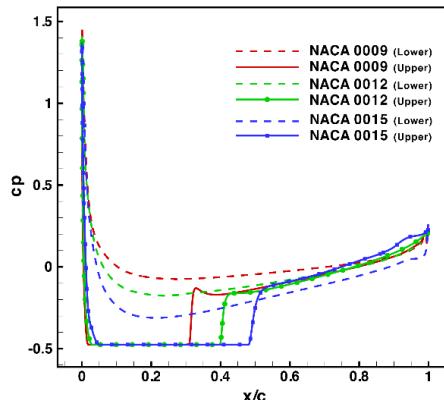
در شکل (۱۳) شکل حباب تشکیل شده در سطح بالای سه هیدروفویل آورده شده است. با افزایش ضخامت هیدروفویل، سطح بالای هیدروفویل کاهش فشار بیشتری تجربه می‌کند؛ بنابراین حجم بخار آب بیشتری روی سطح تشکیل خواهد شد.

naca 0009
naca 0012
naca 0015



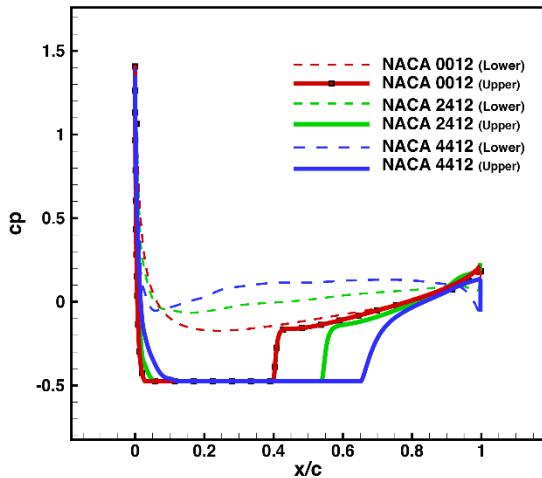
شکل ۱۳- مقایسه شکل، جرم بخار آب و طول حباب تشکیل شده با افزایش ضخامت هیدروفویل های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۵/۰، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در شکل (۱۴) ضریب فشار روی سطح سه هیدروفویل با یکدیگر مقایسه شده است. در قسمتی که حباب کاویتاسیون تشکیل شده فشار ثابت و برابر با فشار بخار آب اشباع است. اندازه ضریب فشار در این ناحیه برابر با عدد کاویتاسیون است. بعد از ناحیه تشکیل حباب، تقریباً هر سه هیدروفویل فشار یکسانی را تجربه می‌کنند. در سطح پایین هیدروفویل، افزایش ضخامت منجر به کاهش بیشتر فشار شده است.



شکل ۱۴- مقایسه ضریب فشار با افزایش ضخامت هیدروفویل های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۵/۰، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در جدول (۳) ضرایب برآ، پسا این سه هیدروفویل با یکدیگر مقایسه شده اند. با افزایش ضخامت هیدروفویل و بزرگ شدن حباب کاویتاسیون، ضریب پسای شکلی زیاد می‌شود. افزایش ضخامت هیدروفویل منجر به زیاد شدن پسای اصطکاکی و بزرگ شدن حباب کاویتاسیون باعث کم شدن پسای پوسته‌ای خواهد شد. نهایتاً جمع این دو مقدار پسای کل مسئله است که با افزایش ضخامت زیاد شده است. ضریب برآی هندسه از اختلاف ضریب فشار بالا و پایین



شکل ۱۸ - مقایسه ضریب فشار با افزایش انحنا هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون $5/0$ ، زاویه حمله $2/5$ درجه و عمق غرق شدگی $5/0$ طول وتر هیدروفویل

افزایش انحنا منجر به افزایش ناحیه کم‌فشار سطح بالایی، افزایش فشار سطح زیرین و بیشتر شدن ضریب برآ شده است. با افزایش انحنا ضریب پسای شکلی زیاد می‌شود. ضریب پسای پوسته‌ای با افزایش انحنا و بزرگ شدن حباب کاویتاسیون، به علت کم بودن لزجت دینامیکی آب و کم شدن تنفس برشی واردہ از سمت سیال به هیدروفویل، کمتر خواهد شد. پسای کل که حاصل جمع پسای پوسته‌ای و شکلی است، با افزایش انحنا زیاد شده است. در جدول (۴) ضرایب آیرودینامیکی و جرم بخارآب تشکیل شده سه هیدروفویل آورده شده است.

جدول ۴ - مقایسه ضرایب آیرودینامیکی با افزایش انحنا هیدروفویل در عدد کاویتاسیون $5/0$ ، زاویه حمله $2/5$ درجه و عمق غرق شدگی $5/0$ طول وتر هیدروفویل

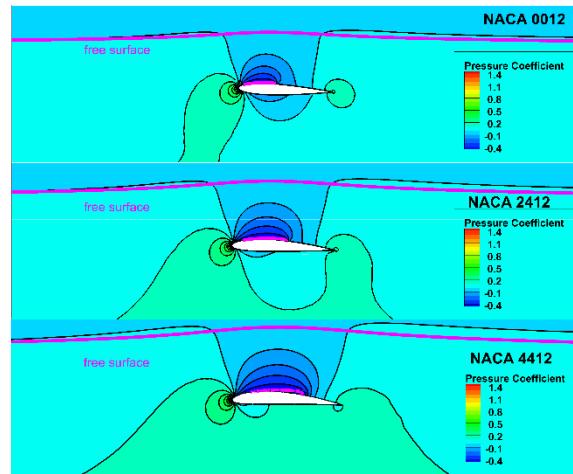
ناکا	هیدروفویل				ضد
	پسای کل	پسای شکلی	پسای پوسته‌ای	ضریب پسای کل	
۰/۱۶	۰/۰۲۶۴	۰/۰۲۱۴	۰/۰۰۴۹	۰۰۱۲	naca 0012
۰/۲۸	۰/۰۲۶۹	۰/۰۲۲۲	۰/۰۰۴۶	۲۴۱۲	naca 2412
۰/۳۹	۰/۰۳۶۶	۰/۰۳۲۳	۰/۰۰۴۲	۴۴۱۲	naca 4412

۶-۳-۶- اثر زاویه حمله

در این قسمت برای بررسی اثر افزایش زاویه حمله بر نتایج، هیدروفویل متقارن ناکا 0009 در زاویه حمله $0/009$ ، $2/5$ ، 3 و $3/5$ درجه و عدد کاویتاسیون $5/0$ در عمق غرق شدگی $5/0$ طول وتر شبیه‌سازی شد. عدد فرود جریان $6/48$ است.

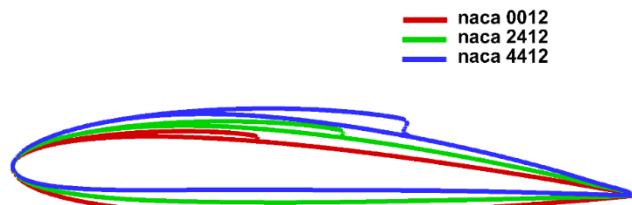
در شکل (۱۹) شکل موج تشکیل شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا 0009 در سه زاویه حمله $2/5$ ، 3 و $3/5$ درجه با یکدیگر مقایسه

در شکل (۱۶) کانتور ضریب فشار حول سه هیدروفویل آورده شده است. در ناحیه خارج از لایه مرزی هیدروفویل قانون برنولی برقرار است. با افزایش انحنا سرعت جریان بالای هیدروفویل بیشتر شده و فشار این ناحیه کمتر می‌شود. در سطح زیرین، افزایش انحنا منجر به کاهش سرعت جریان و افزایش فشار این ناحیه خواهد شد. وجود سطح آزاد فشار هیدرو-استاتیکی سطح بالا و پایین را افزایش داده است.



شکل ۱۶ - مقایسه کانتور ضریب فشار حول هیدروفویل با افزایش انحنا هندسه در عدد کاویتاسیون $5/0$ ، زاویه حمله $2/5$ درجه و عمق غرق شدگی $5/0$ طول وتر هیدروفویل

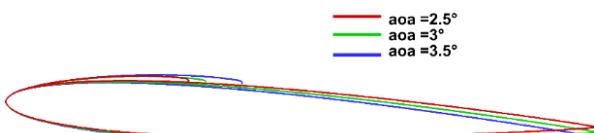
کاهش فشار زیاد سطح بالای هیدروفویل جریان را بیشتر مستعد تشکیل کاویتاسیون خواهد کرد. در شکل (۱۷) شکل حباب کاویتاسیون تشکیل شده برای سه هیدروفویل مقایسه شده است. با افزایش انحنا، جرم و طول حباب تشکیل شده روی سطح هیدروفویل بیشتر شده است.



شکل ۱۷ - مقایسه شکل حباب تشکیل شده با افزایش انحنا هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون $5/0$ ، زاویه حمله $2/5$ درجه و عمق غرق شدگی $5/0$ طول وتر هیدروفویل

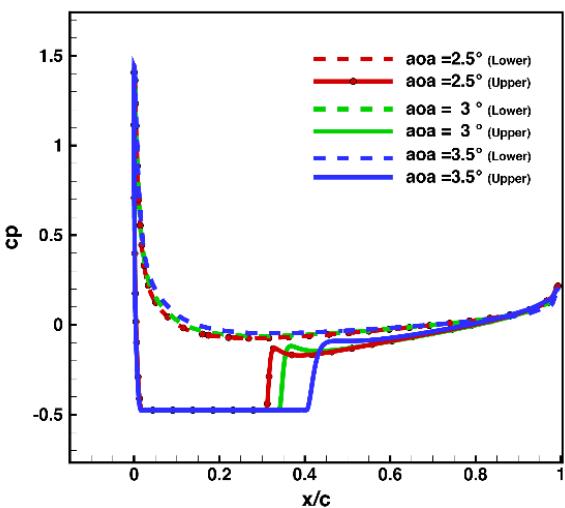
در شکل (۱۸) ضریب فشار منحنی سطح هر سه هیدروفویل آورده شده است. در ناحیه‌ای که حباب کاویتاسیون تشکیل شده اندازه فشار با فشار بخار اشباع برابر است. با افزایش انحنا و زیاد شدن طول حباب ناحیه فشار ثابت سطح بالای هیدروفویل، بیشتر شده است.

در شکل (۲۱) شکل حباب کاویتاسیون تشکیل شده در زوایای حمله $2/5$ ، 3 و $3/5$ درجه آورده شده است. با افزایش زاویه حمله و کم شدن فشار سطح بالایی هیدروفولیل، حجم و طول حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر می‌شود [۶].



شکل ۲۱ - مقایسه شکل حباب تشکیل شده با افزایش زاویه حمله هیدروفولیل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون $5/0$ و عمق غرق شدگی $5/0$ طول و تر هیدروفولیل

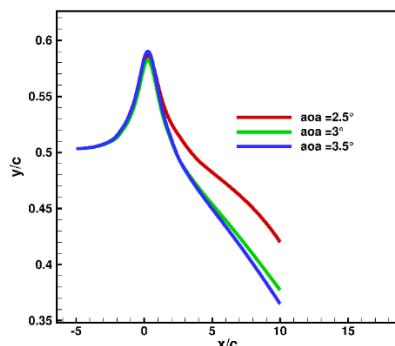
در شکل (۲۲) ضریب فشار سطح هیدروفولیل در زوایای حمله $2/5$ ، 3 و $3/5$ درجه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ناحیه تشکیل حباب، فشار سطح هیدروفولیل ثابت و برابر با فشار بخار اشباع است. بعد از ناحیه تشکیل حباب فشار هر سه هیدروفولیل تقریباً یکسان است. سطح زیرین هیدروفولیل با افزایش زاویه حمله افزایش فشار بسیار اندکی را تجربه می‌کند که قابل به چشم پوشی است.



شکل ۲۲ - مقایسه ضریب فشار با افزایش زاویه حمله هیدروفولیل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون $5/0$ و عمق غرق شدگی $5/0$ طول و تر هیدروفولیل

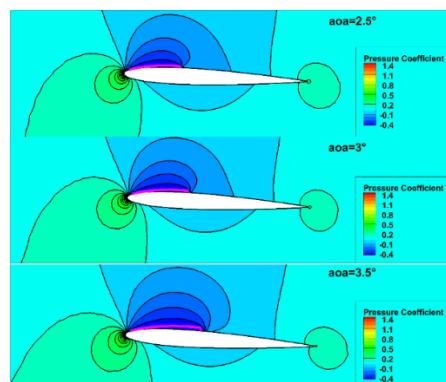
بزرگ شدن حباب کاویتاسیون با افزایش زاویه حمله منجر به کم شدن پسای پوسته‌ای و افزایش پسای شکلی خواهد شد. پسای کل با افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد. وسیع شدن ناحیه کم فشار بالای سطح هیدروفولیل با افزایش زاویه حمله باعث زیاد شدن اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفولیل و افزایش ضریب برآ شده است. ضرایب آئرودینامیکی هر سه شبیه‌سازی در جدول (۵) آورده شده است.

شده است. بیشینه دامنه موج، در هر سه شبیه‌سازی حدود 8% طول وتر هیدروفولیل است و اختلاف بسیار ناچیزی در دامنه موج سه شبیه‌سازی پیش‌بینی شده است. با اینکه انتظار می‌رود در صورت افزایش زاویه حمله هیدروفولیل، طول موج پیش‌بینی شده بلندتر شود، با بزرگ شدن حباب کاویتاسیون و مکش جریان، طول موج تغییراتی محسوسی نداشته است. با افزایش زاویه حمله هیدروفولیل، نرخ اضمحلال جریان بیشتر شده و از قانون پایستگی انرژی، اتفاقات بیشتر جریان منجر به افت h^{17} و کاهش دامنه موج با شب بیشتری شده است.



شکل ۱۹ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش زاویه حمله هیدروفولیل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون $5/0$ و عمق غرق شدگی $5/0$ طول و تر هیدروفولیل

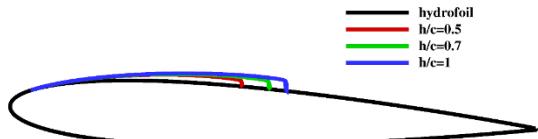
در شکل (۲۰) کانتور ضریب فشار حول هیدروفولیل ناکا ۰۰۰۹ در زوایای حمله $2/5$ ، 3 و $3/5$ درجه آورده شده است. با افزایش زاویه حمله در نواحی خارج از لایه مرزی، سرعت جریان سطح بالای هیدروفولیل بیشتر و فشار محلی کمتر خواهد شد. این کاهش فشار جریان را بیشتر مستعد تشکیل حباب کاویتاسیون خواهد کرد. با تشکیل حباب بزرگ‌تر ناحیه کم فشار سطح بالای هیدروفولیل وسیع‌تر می‌شود. با افزایش زاویه حمله سرعت جریان نزدیک سطح زیرین کمتر شده و فشار جریان بیشتر خواهد شد.



شکل ۲۰ - مقایسه کانتور ضریب فشار با افزایش زاویه حمله هیدروفولیل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون $5/0$ و عمق غرق شدگی $5/0$ طول و تر هیدروفولیل

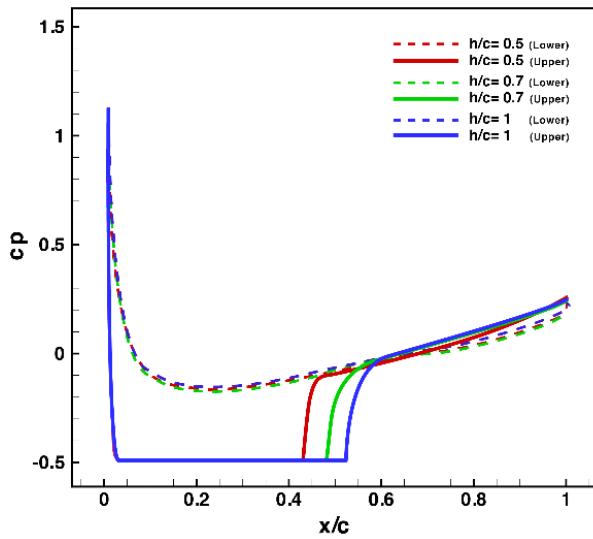
^{۱۷} Head loss

حباب تشکیل شده روی سطح بالای هیدروفویل به ازای عمق بی بعد غرق شدگی $0/0.5$ و 1 در شبیه سازی حاضر است.



شکل ۲۴ - مقایسه شکل حباب تشکیل شده با افزایش عمق غرق شدگی هیدروفویل ناکا 0012 در عدد کاویتاسیون $5/0$ و زاویه حمله $2/5$ درجه

در شکل (۲۵) ضریب فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل ناکا 0012 در سه عمق بی بعد غرق شدگی $0/0.5$ ، $0/0.7$ و 1 آورده شده است. با افزایش عمق غرق شدگی در سطح بالایی هیدروفویل، کاهش شبیب تغییرات فشار استاتیکی باعث بیشتر شدن طول حباب شده است. با افزایش طول حباب ناحیه فشار ثابت سطح بالای هیدروفویل بیشتر شده است. لازم به ذکر است که برای یکسان نگهداشتن عدد کاویتاسیون سرعت ورودی با افزایش عمق غرق شدگی بیشتر شد؛ که این افزایش سرعت خود دلیلی بر افزایش طول و حجم حباب کاویتاسیون است.



شکل ۲۵ - مقایسه ضریب فشار با افزایش عمق غرق شدگی هیدروفویل ناکا 0012 در عدد کاویتاسیون $5/0$ و زاویه حمله $2/5$ درجه

سان و همکاران [۱۰] در سال 2020 دریافتند با افزایش عمق غرق شدگی در جریان کاویتاسیونی، ضرایب برآ و پسا بیشتر می شود. در این پژوهش نیز با افزایش عمق غرق شدگی و بزرگ شدن حباب کاویتاسیون ناحیه کم فشار سطح بالایی هیدروفویل وسیع تر شده و اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل در راستای عمود بر جهت جریان بیشتر شده و ضریب برآ بیشتر می شود. با افزایش عمق غرق شدگی و بزرگ تر شدن حباب کاویتاسیون پسای پوسته ای کمتر و پسای شکلی بیشتر شده و ضریب پسای کل بزرگ تر شده است. لازم به ذکر است، بی بعد سازی ضرایب آیرودینامیکی با سرعت جریان ورودی انجام شده و سرعت جریان ورودی با افزایش ارتفاع غرق شدگی برای ثابت نگهداشتن عدد کاویتاسیون بیشتر شده است. در جدول (۶) نیروها و ضرایب آیرودینامیکی هیدروفویل ناکا 0012 با افزایش عمق غرق شدگی با یکدیگر مقایسه شده اند.

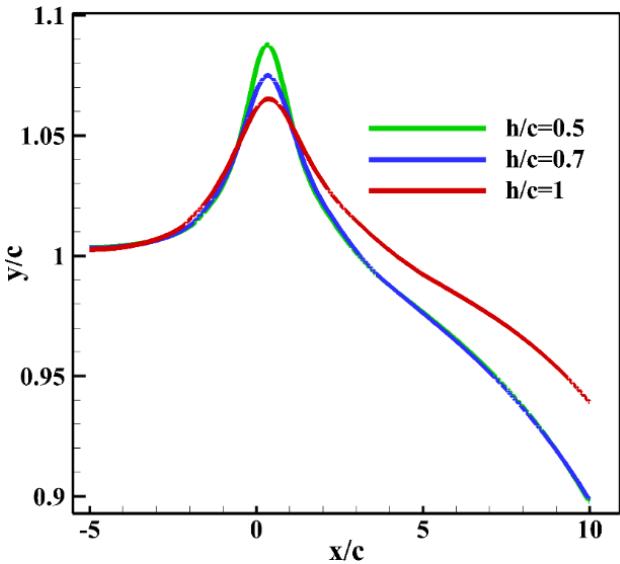
جدول ۵- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی هیدروفویل ناکا 0009 با افزایش زاویه حمله در عدد کاویتاسیون $5/0$ و عمق غرق شدگی $5/0$ طول و تر

زاویه حمله (deg)	پرسای پوسته ای	ضریب شکلی	ضریب پسای کل	ضریب برآ	نام
$2/5$	$0/0050$	$0/0158$	$0/0208$	$0/19$	
3	$0/0049$	$0/0191$	$0/0240$	$0/20$	
$3/5$	$0/0045$	$0/0231$	$0/0276$	$0/23$	

۳-۷- اثر عمق غرق شدگی

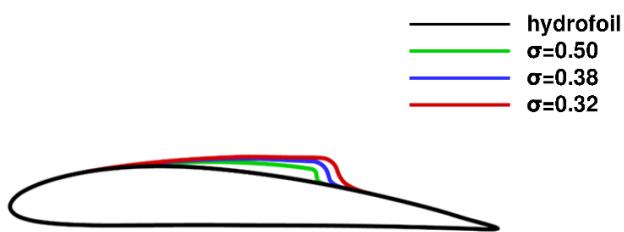
در این قسمت برای بررسی اثر افزایش عمق غرق شدگی بر شکل موج تشکیل شده در سطح آزاد، هیدروفویل ناکا 0012 در زاویه حمله $2/5$ درجه و عدد کاویتاسیون $5/0$ در عمق غرق شدگی بی بعد شده بر حسب طول و تر $0/0.5$ ، $0/0.7$ و 1 قرار گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه شد.

در شکل (۲۳) شکل موج تشکیل شده در سطح آزاد سه شبیه سازی با یکدیگر مقایسه شده اند. هر چه عمق غرق شدگی هیدروفویل بیشتر باشد، حضور هیدروفویل و تغییرات فشار ناشی از آن کمتر می تواند باعث افزایش طول موج شود. در عمق غرق شدگی بی بعد شده $0/0.5$ ، $0/0.7$ و 1 بیشینه دامنه موج به ترتیب $0/0.9$ ، $0/0.7$ و $0/0.6$ طول و تر هیدروفویل است.



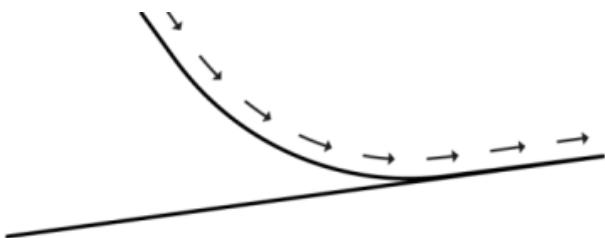
شکل ۲۳ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش عمق غرق شدگی هیدروفویل ناکا 0012 در عدد کاویتاسیون $5/0$ و زاویه حمله $2/5$ درجه

در سال 2020 سان و همکاران [۱۰] دریافتند، با افزایش عمق غرق شدگی هیدروفویل ناکا 66 طول و حجم بخار آب تشکیل شده در سطح بالای هیدروفویل بیشتر خواهد شد. شکل (۲۴) نمایی از



شکل ۲۷ - مقایسه شکل حباب تشکیل شده با افزایش عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق شدگی ۵/۵ طول وتر هیدروفویل

در هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ نحوه بسته شدن حباب کاویتاسیون به شکلی است که جریان عبوری از روی حباب با حرکت به موازات سطح هیدروفویل لایه مرزی در راستای عمود بر سطح ایجاد می‌کند. مرز انتهایی حباب این شبیه‌سازی در شکل (۲۸) آورده شده است.



شکل ۲۸ - نحوه بسته شدن حباب کاویتاسیون سطح بالای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲

در شکل (۲۹) نمایی از ضریب فشار روی سطح هیدروفویل در عدد کاویتاسیون ۰/۵، ۰/۳۸ و ۰/۳۲ آورده شده است. قسمت فشار ثابت هر سه نمودار یکسان و برابر با (P_{sat}) است. چون سرعت مرجع در بی بعد سازی متفاوت است، ضریب فشار ناحیه فشار ثابت سه شبیه‌سازی با یکدیگر تفاوت دارند. اگر از تغییرات ناچیز فشار هیدرو-استاتیکی در لایه مرزی هیدروفویل صرف نظر کرده و قانون برنولی در مختصات مشخصی خارج از حباب کاویتاسیون برای هر سه شبیه‌سازی نوشته شود، با افزایش سرعت شبیه‌سازی فشار استاتیکی کم خواهد شد. اگر گرادیان فشار لایه مرزی ثابت فرض شود، با افزایش سرعت فشار سطح هیدروفویل کم می‌شود. به همین علت بعد از ناحیه فشار ثابت، در صورت افزایش عدد کاویتاسیون فشار سطح بالای هیدروفویل افزایش بیشتری دارد. در سطح پایین هیدروفویل نیز با افزایش عدد کاویتاسیون، فشار بیشتر شده است.

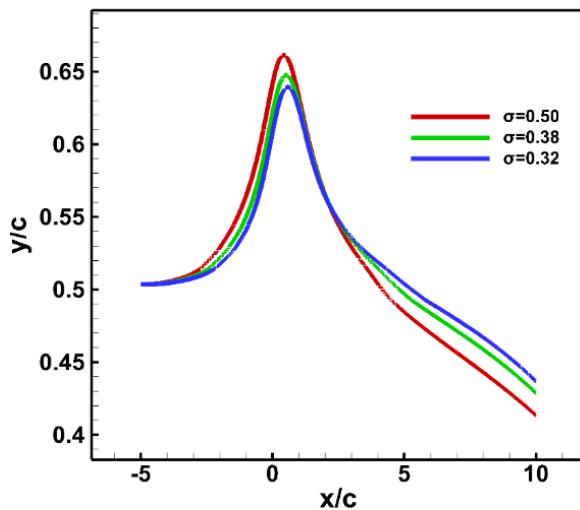
جدول ۶ - مقایسه نیروهای آبرو دینامیکی با افزایش عمق غرق شدگی هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در عدد کاویتاسیون ۵/۵ و زاویه حمله ۲/۵ درجه

ضریب برآ	ضریب پسای کل	پسای شکلی (N)	پسای اصطکاکی (N)	عمق غرق شدگی (h/c)	۰/۵
۰/۱۶	۰/۰۲۶	۲۳۶۶	۸۵۰		
۰/۱۷	۰/۰۲۸	۲۹۰۲	۸۲۸		۰/۷
۰/۱۸	۰/۰۲۹	۳۴۳۱	۸۱۶		۱

۳-۸- اثر عدد کاویتاسیون

در این قسمت برای بررسی اثر افزایش عدد کاویتاسیون، هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و در عمق ۰/۳۲ طول وتر در اعداد کاویتاسیون ۰/۵، ۰/۳۸ و ۰/۳۲ شبیه‌سازی و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شد.

در شکل (۲۶) شکل موج تشکیل شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در صورت افزایش عدد کاویتاسیون آورده شده است. در جریان بدون کاویتاسیون با افزایش سرعت جریان دامنه موج بیشتر می‌شود. در این مسئله با افزایش سرعت و بزرگ شدن ناحیه حباب کاویتاسیون، مکنگی سطح بالای هیدروفویل بیشتر شده و برخاستگی موج کمتر خواهد شد. در عدد کاویتاسیون ۰/۵، ۰/۳۸ و ۰/۳۲ بیشینه دامنه موج به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۱۴ و ۰/۱۳ طول وتر هیدروفویل است.



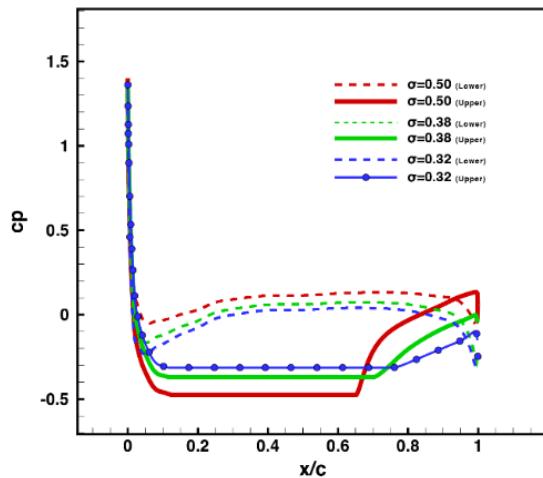
شکل ۲۶ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در عمق غرق شدگی ۵/۵ طول وتر و زاویه حمله ۲/۵ درجه

در شکل (۲۷) نمایی از شکل حباب تشکیل شده در سطح بالای هیدروفویل در صورت کاهش عدد کاویتاسیون آورده شده است. با افزایش سرعت جریان فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل کمتر شده و استعداد جریان برای تشکیل کاویتاسیون بیشتر خواهد شد [۱۲].

- با افزایش انحنا کاویتاسیون، دامنه موج تشکیل شده بلندتر، حجم حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر، ضرایب برآ و پسا بیشتر شد. با افزایش انحنا هندسه مغروق احتمال رديابی سامانه به علت افزایش دامنه موج بیشتر است.
- با افزایش عمق غرق‌شدنی هیدروفویل، دامنه موج تشکیل شده کوتاه‌تر، حجم حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر، ضرایب برآ و پسا بیشتر شد. پس برای سامانه‌ای با مأموریتی در عمق غوطه‌وری بالا اعمال تمهدات سازه‌ای برای جلوگیری از پوسیدگی و فرسایش سازه به علت وقوع کاویتاسیون ضروری است.
- با افزایش زاویه حمله هیدروفویل، حجم حباب کاویتاسیون بیشتر، ضرایب برآ و پسا بیشتر شد.
- با کاهش عدد کاویتاسیون، دامنه موج تشکیل شده کوتاه‌تر، حجم حباب کاویتاسیون بیشتر، ضریب برآ کمتر، ضریب پسا بیشتر شد.

۵- مراجع

1. G. Griffiths, *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicle*, 2002.
2. Y. A. Semenov and G. X. Wu, Free-Surface Gravity Flow Due to a Submerged Body in Uniform Current, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 883, pp. A60, 2020, doi: 10.1017/jfm.2019.930.
3. B. R. Parkin, B. Perry and T. Y. T. Wu, Pressure Distribution on a Hydrofoil Running near the Water Surface, *journal of Applied physics*, Vol. 27, pp. 232-240, 1956, doi: 10.1063/1.1722350.
4. J. S. Marshall and E. R. Johnson, The High-Speed Submerged Hydrofoil, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 954, 2023, doi: 10.1017/jfm.2022.1042.
5. O. M. Faltinsen, Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*, pp. 1-454, 2006, doi: 10.1017/CBO9780511546068.
6. J. P. Franc and J.-M. Michel, Fundamentals of Cavitation, *fluid Mechanics and Its Applications*, Vol. 76, 2005, doi: 10.1007/1-4020-2233-6.
7. S. A. Kinnas, *Non-Linear Corrections of the Linear Theory for the Prediction of the Cavitation Flow around Hydrofoils*, doctor of philosophy Thesis, Dept, MIT, 1985.



شکل ۲۹ - مقایسه ضریب فشار با افزایش عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله $2/5$ درجه و عمق غرق‌شدنی $0/5$ طول و تر هیدروفویل

در جدول (۷) ضرایب آیرودینامیکی با تغییر عدد کاویتاسیون آورده شده‌است. در صورت تشکیل کاویتاسیون فشار ناحیه‌ی تشکیل حباب ثابت و برابر با فشار بخار است در حالی که افزایش عدد کاویتاسیون باعث زیادشدن فشار سطح پایین هیدروفویل می‌شود. افزایش اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل منجر به افزایش نیروی برآ شده‌است. در نتایج فاین^{۱۸} [۱۲] نیز افزایش ضریب برآ با افزایش عدد کاویتاسیون در زوایای حمله متفاوت مشاهده شد. در این سه شبیه‌سازی، افزایش عدد کاویتاسیون، کوچک شدن حباب و کم شدن پسای شکلی باعث کاهش پسای کل شده‌است.

جدول ۷- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ با تغییر عدد کاویتاسیون در زاویه حمله $2/5$ درجه و عمق غرق‌شدنی $0/5$ طول و تر هیدروفویل

عدد کاویتاسیون	ضریب پسا شکلی (N)	ضریب پسا اصطکاکی (N)	ضریب برآ
۰/۵	۶۶۶۰	۸۸۲	۰/۳۹
۰/۳۸	۱۱۸۸۲	۱۰۳۸	۰/۲۹
۰/۳۲	۱۵۶۵۷	۱۲۰۸	۰/۲۴

۴- خلاصه نتایج

در این پژوهش جریان سه فازی کاویتاسیونی برای هیدروفویلهای ناکا با هندسه متفاوت، در زوایا حمله و سرعت متفاوت شبیه‌سازی و نتایج زیر حاصل شد.

- با افزایش ضخامت هیدروفویل، حجم حباب کاویتاسیون بیشتر، ضریب برآ کمتر و ضریب پسا بیشتر شد. پس کاهش ضخامت هیدروفویل منجر به افزایش نسبت ضریب برآ به پسا خواهد شد.

8. S. Bal and S. A. Kinnas, A Bem for the Prediction of Free Surface Effects on Cavitating Hydrofoils, *Computational Mechanics*, Vol. 28, pp. 260-274, 2002.
9. P. C. Wu and J. H. Chen, Numerical Study on Cavitating Flow Due to a Hydrofoil near a Free Surface, *Ocean Engineering and Science*, Vol. 1, No. 3, pp. 238-245, 2016.
10. T. Sun, Q. Xie, L. Zou, H. Wang and C. Xu, Numerical Investigation of Unsteady Cavitation Dynamics over a Naca66 Hydrofoil near a Free Surface, *Marine Science and Engineering*, Vol. 8, 2020, doi: 10.3390/jmse8050341.
11. Y. Wang, X. Wu, C. Huang and X. Wu, Unsteady Characteristics of Cloud Cavitating Flow near the Free Surface around an Axisymmetric Projectile, *Multiphase Flow*, Vol. 85, 2016, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.05.013.
12. N. E. Fine, *Computational and Experimental Investigations of the Flow around Cavitating Hydrofoils*, Master Thesis, Dept of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1988.