J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 46, 2025. (15-29)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Numerical Simulation of Cavitating Subsurface Hydrofoil at High Froude numbers

Ghazal Taghinia[1], Ali Esmaeili[2*]

[1] *MSc Student, Ferdowsi University of Mashhad;* ghazal.taghinia@mail.um.ac.ir
[2] *Assistant Professor, Ferdowsi University of Mashhad;* aliesmaeili@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: http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.2

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/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۶، ۱۴۰۴، (۲۹-۱۵)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

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

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،

کانال باز فوق بحرانی،

دینامیک سیالات محاسباتی

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 مغروق با هیدروفویل‌های مختلف ناکا مدل‌سازی شد تا با حل مسئله به روش عددی، شکل موج سطح آزاد و حباب بخارآب حول هیدروفویل شبیه‌سازی شود. با تغییر هندسه، زاویه حمله، عمق غرق‌شدگی 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 تشکیل‌شده بلندتر شده است. علاوه بر این، ضرایب برآ و پسا با کاهش عمق غوطه‌وری کم‌تر شده و با کاهش عدد کاویتاسیون، حجم حباب بخار تشکیل‌شده رشد کرده که منجر به کاهش دامنه موج سطح آزاد شده است.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.2

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

۱ – مقدمه

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 وسایل نقلیه خودمختار برای اهداف وسیعی ازجمله اقیانوس‌شناسی، نظارت بر محیط‌زیست و حمل‌ونقل 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 آیرودینامیکی وارده 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 غرق‌شده 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 پایین‌دست جریان اثرگذار است. با افزایش سرعت هیدروفویل جریان فوق بحرانی شده و موج تنها می‌تواند به پایین‌دست 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 وسایل نقلیه سرعت‌بالا رفتار جریان در اعداد فرود بالا موردتوجه محققان و مهندسان قرار گرفت[۵]. با برخورد آب با سطح زیردریایی در جریان‌های با سرعت بالا، ناحیه‌ای پرفشار در سطح زیرین و ناحیه‌ای کم‌فشار روی سطح بالایی ایجاد می‌شود. اگر فشار محلی سطح بالایی کمتر از فشار بخار باشد می‌تواند باعث گسست مولکول‌های آب و تشکیل پدیده کاویتاسیون گردد. وقوع کاویتاسیون با آثار منفی زیادی ازجمله خوردگی و فرسایش سطوح، ایجاد سروصدا، 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 آیرودینامیکی و شکل حباب برای هیدروفویل غرق‌شده 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 غرق‌شده در عمق محدود نیز صرف‌نظر کردن از اثر کاویتاسیون منجر به تغییر شکل موج سطح آزاد و ضرایب آیرودینامیکی می‌شود؛ بنابراین لازم است اثر این دو پدیده برای هندسه غرق‌شده در عمق محدود بررسی شود. وو[۸] و همکاران [۹] ضریب فشار سطح هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ را برای جریان کاویتاسیونی پایا در عدد فرود ۶/۴۸ شبیه‌سازی کردند. برای بررسی ناپایایی 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 را بررسی کردند. نتایج این مقاله نشان داد وجود سطح آزاد شدت کاویتاسیون را کم کرده و فرکانس نوسانات حباب کاویتاسیون بیشتر می‌شود. با افزایش عمق غرق‌شدگی شدت کاویتاسیون بیشتر شده و هیدروفویل ضرایب برآ و پسای بیشتری تجربه می‌کند. با کاهش عمق غرق‌شدگی 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 نشده‌است. 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 آیرودینامیکی 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 آیرودینامیکی شناور زیر سطحی در اعداد فرود بالا، محیط دریا و جریان هوای مجاور آن با مستطیلی به ابعاد ($۱۰m \times ۱۵m$) و هندسه جسم مغروق با هیدروفویل‌های ناکا به کمک نرم‌افزار دیزاین‌مدلر[۱۱] به

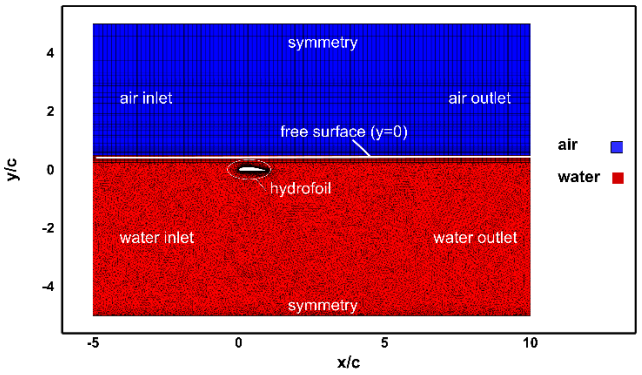
---

[۱] Autonomous Underwater Vehicles
[۲] Semenov
[۳] Hydraulic-jump
[۴] Breaking-wave
[۵] Blaine
[۶] Kinnas
[۷] Bal
[۸] Wu
[9] Wave breaking
[۱۰] Sun
[11] Design modeler

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

صورت دوبعدی مدل‌سازی شد. در شکل (۱) هندسه، شرایط مرزی و شبکه‌بندی آورده شده‌است. دامنه حل به دو ناحیه تقسیم شد. نیمه بالا هوا با چگالی ۱/۲۲۵ kg/m^3 و لزجت دینامیکی $۱/۷۸۹۴ \times ۱۰^{-۵}$ $kg/m.s$، نیمه پایین آب با چگالی ۹۹۸/۲ kg/m^3 و لزجت دینامیکی ۰/۰۰۱۰۰۳ $kg/m.s$ است. با حل مسئله موجی در سطح دریا و حباب کاویتاسیونی در ناحیه کم-فشار حول هیدروفویل تشکیل می‌شود. حباب کاویتاسیون با بخارآب به چگالی ۰/۵۵۴۲ kg/m^3و لزجت دینامیکی $۱/۳۴ \times ۱۰^{-۵}$ $kg/m.s$ اشباع خواهد شد.

شبکه‌بندی این هندسه با نرم‌افزار انسیس مشینگ[12] انجام شده‌است. نیمه بالایی دامنه حل شبکه‌بندی سازمان‌یافته مستطیلی[13] 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[14] 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[15] 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 پر شود. 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 به‌طور کامل با فاز q پرشده و $\alpha_q = 1$ است.
- بخشی از این سلول با فاز q و بخش دیگر آن با فازهای دیگر پرشده و $0 < \alpha_q < 1$ 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 خواسته‌شده 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.

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\nabla.(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{V_q}) = \sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})\right] \qquad (۱)$$

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

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q = 1 \qquad (۲)$$

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.

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \qquad (۳)$$

$$\mu = \sum \alpha_q \mu_q \qquad (۴)$$

در این روابط q فاز سیال، α_q کسر حجمی این فاز، ρ_q چگالی فاز، ρ 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) محاسبه‌شده 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.

$$\nabla.(\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla.\left[\mu(\nabla\vec{V} + \nabla\vec{V}^T)\right] + \rho\vec{g} + \vec{F} \qquad (۵)$$

در این رابطه ρ چگالی مخلوط فازها در هر سلول، $\vec{V}$ بردار سرعت، ∇P گرادیان فشار، μ لزجت دینامیکی مخلوط فازها در

[12] Ansys meshing
[13] quadrilateral
[14] inflation
[15] Volume of fluids

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

هر سلول، $\rho\vec{g}$ نیروی جاذبه وارده به سیال و $\vec{F}$ نیروی حجمی است.

مدل‌سازی کاویتاسیون برای محاسبه نرخ انتقال جرم از فاز آب به فاز بخارآب با مدل اشنر-سوئر[۱۶] از رابطه (۶) انجام شده‌است.

$$\nabla.(\alpha_v\rho_v\vec{V}) = \frac{\rho_v\rho_l}{\rho}(\vec{V}.\nabla\alpha_v) \quad (۶)$$

در این رابطه α_v کسر حجمی بخارآب، ρ_v 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 شده‌است. انرژی جنبشی k و انرژی تلفاتی بر واحد جرم ε در رابطه (۷) و (۸) آورده شده‌است.

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[\mu\frac{\partial k}{\partial X_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \quad (۷)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[\mu\frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۸)$$

درنهایت اعداد بی‌بعد 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 شده‌است.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_l U c}{\mu_l} \quad (۱۰)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gc}} \quad (۱۱)$$

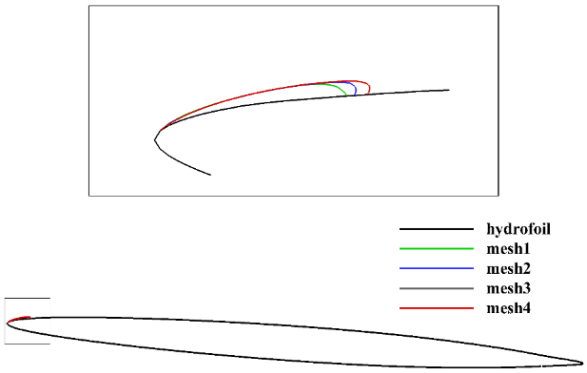
$$\sigma_v = \frac{p_0 + \rho_l g h - p_v}{\frac{1}{2}\rho_l U^2} \quad (۱۲)$$

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.

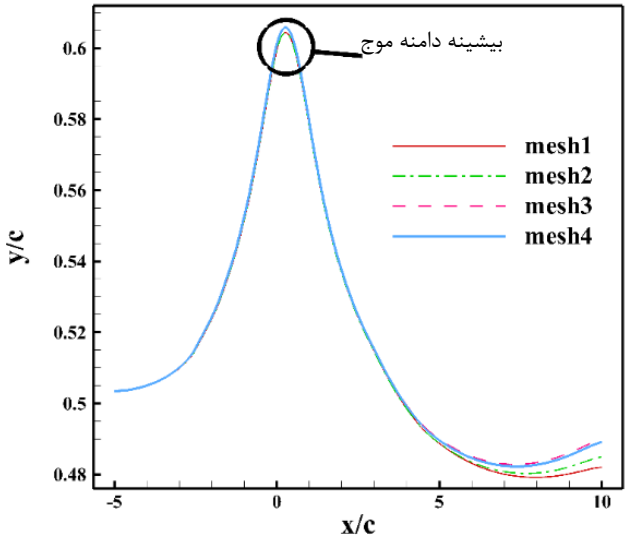
۳ – نتایج و بررسی

۳-۱- استقلال از شبکه و اعتبار سنجی

برای بررسی استقلال از شبکه، هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در زاویه حمله ۴ درجه، عمق غرق‌شدگی ۰/۵ 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 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 شکل کاویتاسیون) در عدد کاویتاسیون ۱، زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر



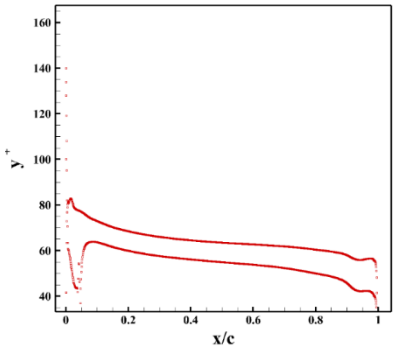
شکل ۳ - بررسی استقلال از شبکه (مقایسه‌ی شکل موج) در عدد کاویتاسیون ۱، زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر

با شبیه‌سازی آشفتگی از مدل‌های متفاوت آشفتگی، تنها $standard\ k-\varepsilon$ طول حباب کاویتاسیون و ناحیه جت بازگشتی را به‌درستی 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 به‌دست‌آمده محدوده‌ی قابل قبول است و دقت شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

[۱۶] Schnerr-Sauer Cavitation Model

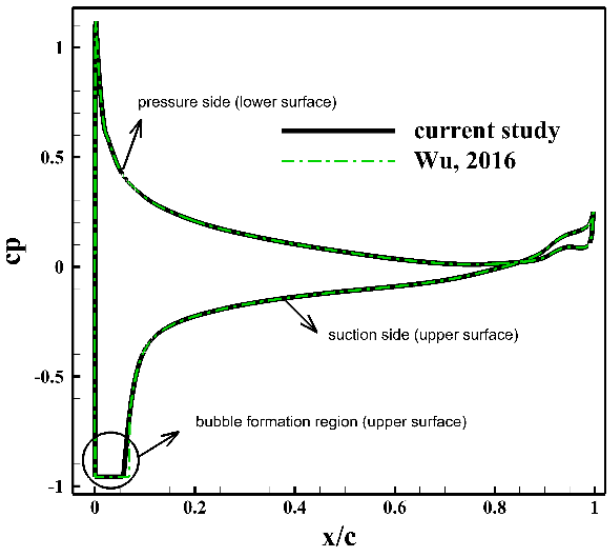
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]



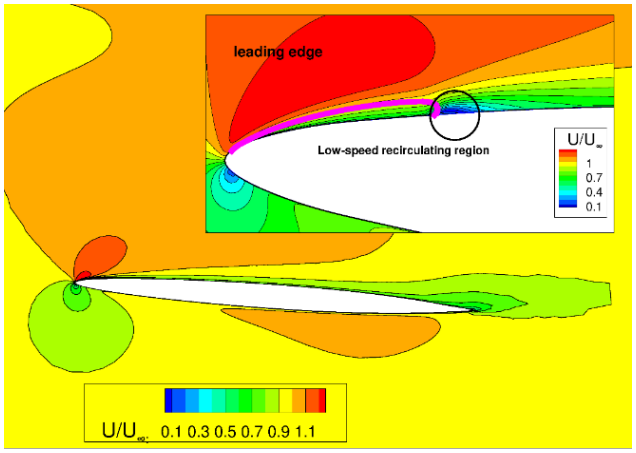
شکل ۴- نمودار y^+ شبکه‌ی سوم

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



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

در شکل (۶) کانتور اندازه‌ی سرعت بی بعد شده در نواحی اطراف هیدروفویل آورده شده‌است. از مختصاتی روی سطح بالای هیدروفویل که کسر حجمی بخارآب خالص از یک کمتر شده تا زمانی که کسر حجمی بخارآب به ۰/۰۲ می‌رسد، یک ناحیه جریان کم‌سرعت بازگشتی ایجاد شده‌است. در جریان کاویتاسیونی حول هیدروفویل کمینه فشار داخل حباب کاویتاسیون رخ می‌دهد؛ بنابراین خطوط جریان به سمت حباب کاویتاسیون کشیده می‌شوند. منحرف شدن خطوط جریان به سمت حباب کاویتاسیون این ناحیه کم‌سرعت را ایجاد کرده‌است.



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

۲-۳- اثر سطح آزاد

در این بخش اثر سطح آزاد و موج تشکیل‌شده 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 شده‌است. 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 غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل از رابطه (۱۲) و در صورت عدم وجود سطح آزاد از رابطه (۱۳) محاسبه شده‌است.

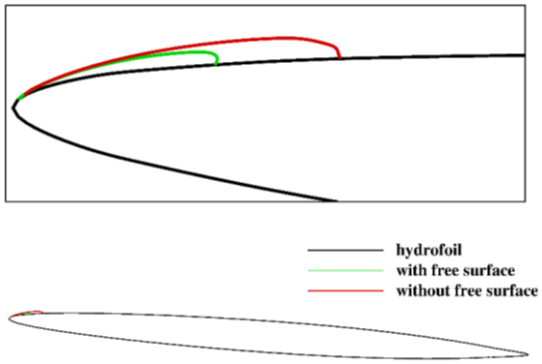
$$\sigma_v = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho U^2} \qquad (۱۳)$$

در این رابطه p_0 فشار اتمسفر، p_v فشار بخارآب 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

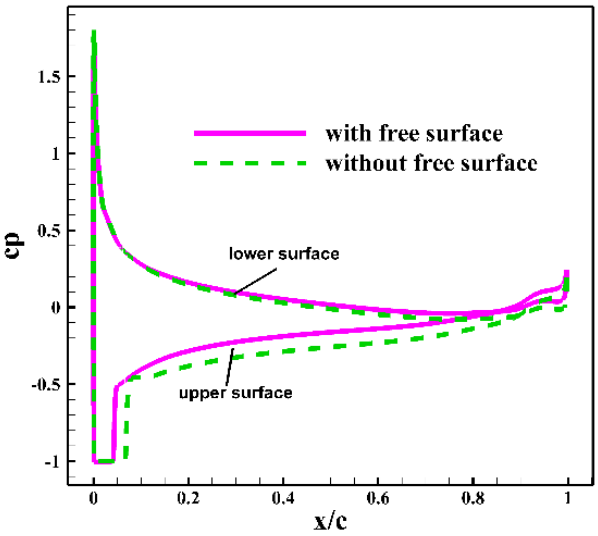
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

است.



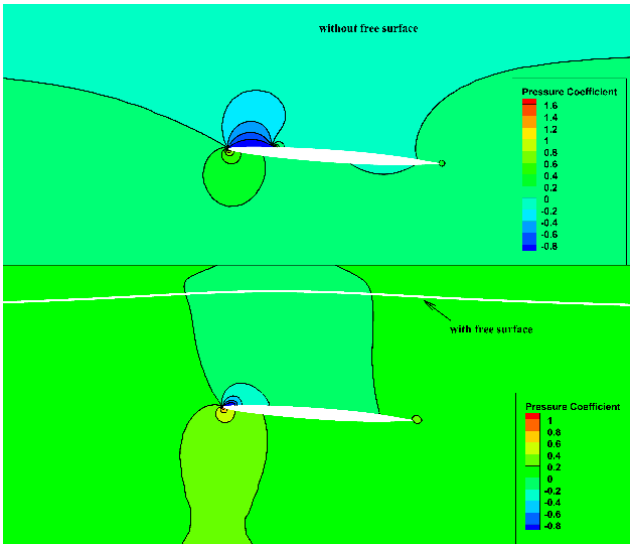
شکل ۷- مقایسه حباب کاویتاسیون در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن در عدد کاویتاسیون ۱ و زاویه حمله‌ی ۴ درجه

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



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

در صورت وجود سطح آزاد ناحیه کم‌فشار 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 ضریب 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 شده‌است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد حضور سطح آزاد منجر به کاهش نیروی پسا و برآ خواهد شد.



شکل ۹ – مقایسه کانتور ضریب فشار در صورت وجود سطح آزاد و بدون آن در عدد کاویتاسیون ۱ و زاویه حمله‌ی ۴ درجه

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

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

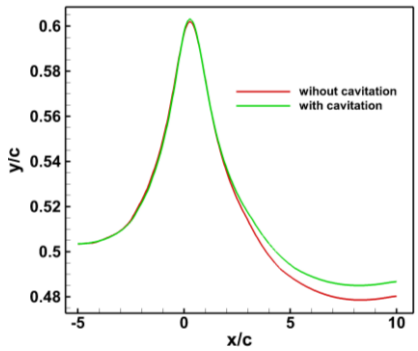
۳-۳- اثر تشکیل حباب

در حالت کلی کمتر شدن فشار سیال از فشار بخارآب تضمین‌کننده‌ی وقوع کاویتاسیون نیست و شروع این پدیده به شرایط اولیه سیال وابسته است. به اختلاف فشار شروع کاویتاسیون و فشار بخارآب تأخیر استاتیکی می‌گویند [۶]. در این بخش نتایج شبیه‌سازی هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در عمق غرق‌شدگی 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 تشکیل‌شده 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 حالی‌که افزایش ارتفاع موج در صورت تشکیل حباب تنها ٪۰/۲ طول وتر هیدروفویل است.

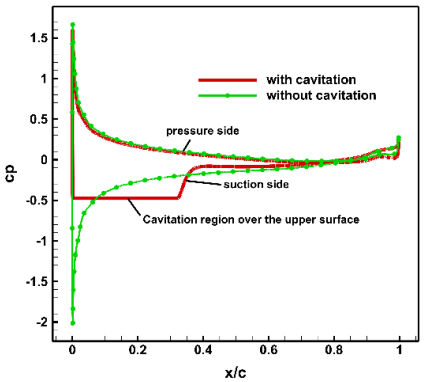
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]



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 بالای هیدروفویل به ۲۰۰- 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 ناحیه‌ی 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 ناحیه تشکیل حباب کم و در ناحیه 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 حباب کاویتاسیون در لبه‌ی 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.

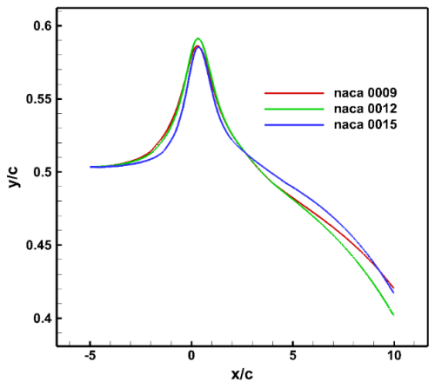
جدول ۲- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در صورت تشکیل کاویتاسیون و بدون آن در زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر در عدد فرود ۶/۴۸

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

۴-۳- اثر ضخامت

در این قسمت برای بررسی اثر افزایش ضخامت بر نتایج، سه هیدروفویل متقارن ناکا ۰۰۰۹، 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 تشکیل‌شده در سطح آزاد این سه هیدروفویل در جریان کاویتاسیونی با شرایط یکسان یا یکدیگر مقایسه شده‌است. ارتفاع موج تشکیل‌شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ و ناکا ۰۰۱۵ تقریباً ۰/۰۸ طول وتر هیدروفویل و ارتفاع موج تشکیل‌شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ تقریباً ۰/۰۹ طول وتر هیدروفویل است. علی رقم 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.

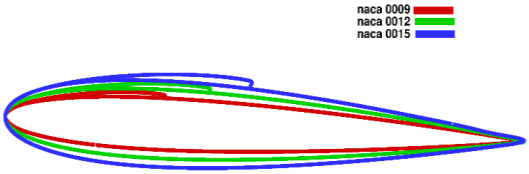


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

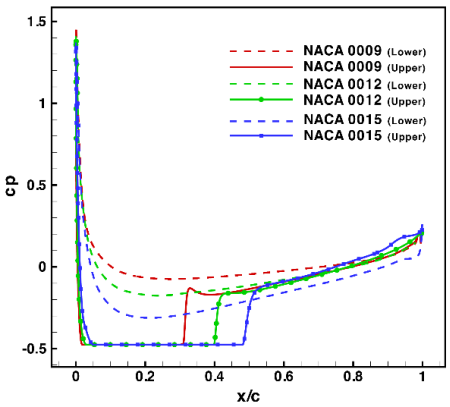
شکل ۱۲ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش ضخامت هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

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



شکل ۱۳ - مقایسه شکل، جرم بخار آب و طول حباب تشکیل‌شده 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

در شکل (۱۴) ضریب فشار روی سطح سه هیدروفویل با یکدیگر مقایسه شده‌است. در قسمتی که حباب کاویتاسیون تشکیل‌شده فشارثابت 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 شده‌است.



شکل ۱۴ - مقایسه ضریب فشار 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

در جدول (۳) ضرایب برآ، پسا این سه هیدروفویل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با افزایش ضخامت هیدروفویل و بزرگ شدن حباب کاویتاسیون، ضریب پسای شکلی زیاد می‌شود. افزایش ضخامت هیدروفویل منجر به زیادشدن 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 شده‌است. ضریب برآی هندسه از اختلاف ضریب فشار بالا و پایین هیدروفویل در راستای جریان ایجاد می‌شود. با افزایش ضخامت ناحیه کم‌فشار سطح بالای هیدروفویل بیشتر و فشار سطح پایین هیدروفویل کمتر می‌شود، بنابراین اختلاف این دو در راستای جریان کمتر و ضریب برآ کمتر شده‌است.

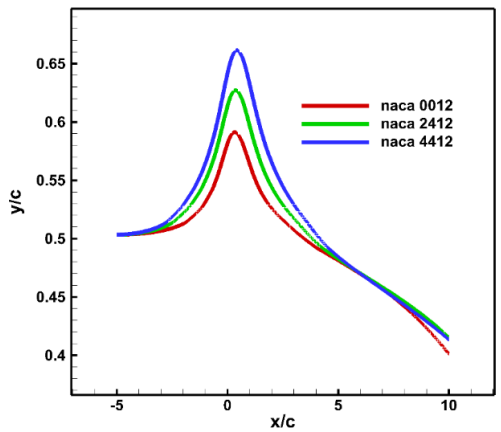
جدول ۳- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی با افزایش ضخامت هیدروفویل در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

هیدروفویل	ضریب پسای شکلی	ضریب پسای اصطکاکی	ضریب پسای کل	ضریب برآ
ناکا ۰۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۰	۰/۱۹
ناکا ۰۰۱۲	۰/۰۲۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶	۰/۱۶
ناکا ۰۰۱۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰۴	۰/۰۳۲	۰/۰۷

۵-۳- 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 ۰/۵ در عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. عدد فرود جریان ۶/۴۸ است.

در شکل (۱۵) شکل موج تشکیل‌شده در سطح آزاد این سه هیدروفویل در جریان کاویتاسیونی با شرایط یکسان با یکدیگر مقایسه شده‌است. . بیشینه ارتفاع موج تشکیل‌شده در سطح آزاد هیدروفویل‌های ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ به ترتیب ۹٪، ۱۲٪ 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 شده‌است.

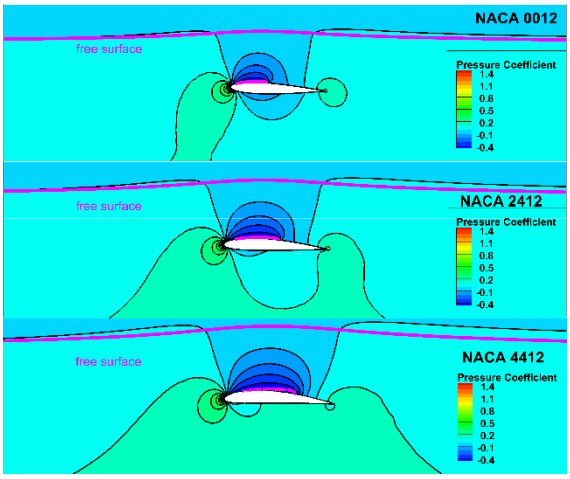


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

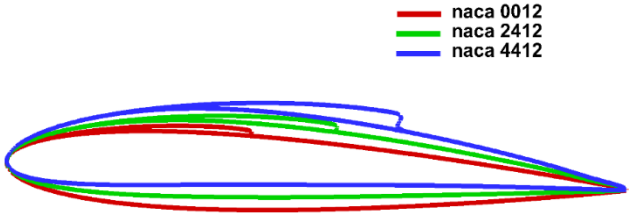
شکل ۱۵ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش انحنا هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در شکل (۱۶) کانتور ضریب فشار حول سه هیدروفویل آورده شده‌است. در ناحیه خارج از لایه‌مرزی 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.



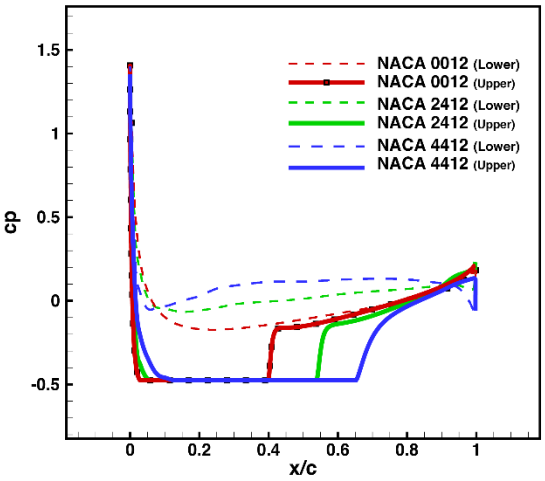
شکل ۱۶ - مقایسه کانتور ضریب فشار حول هیدروفویل با افزایش انحنا هندسه در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

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



شکل ۱۷ - مقایسه شکل حباب تشکیل‌شده با افزایش انحنا هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در شکل (۱۸) ضریب فشار منحنی سطح هر سه هیدروفویل آورده شده‌است. در ناحیه‌ای که حباب کاویتاسیون تشکیل‌شده اندازه فشار با فشار بخار اشباع برابر است. با افزایش انحنا و زیادشدن طول حباب ناحیه فشارثابت سطح بالای هیدروفویل، بیشتر شده‌است.



شکل ۱۸ - مقایسه ضریب فشار با افزایش انحنا هیدروفویل‌های ۴ رقمی ناکا در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

افزایش انحنا منجر به افزایش ناحیه کم‌فشار سطح بالایی، افزایش فشار سطح زیرین و بیشتر شدن ضریب برآ شده‌است. 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 تنش برشی وارده از سمت سیال به هیدروفویل، کمتر خواهد شد. پسای کل که حاصل جمع پسای پوسته‌ای و شکلی است، با افزایش انحنا زیاد شده‌است. در جدول (۴) ضرایب آیرودینامیکی و جرم بخارآب تشکیل‌شده سه هیدروفویل آورده شده‌است.

جدول ۴- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی با افزایش انحنا هیدروفویل در عدد کاویتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

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

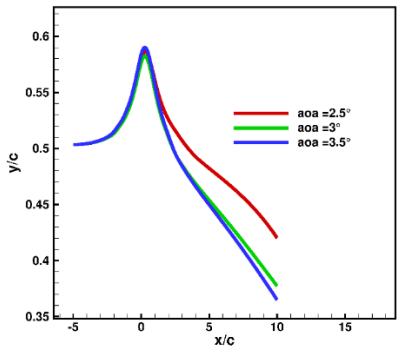
۶-۳- اثر زاویه حمله

در این قسمت برای بررسی اثر افزایش زاویه حمله بر نتایج، هیدروفویل متقارن ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درجه و عدد کاویتاسیون ۰/۵ در عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر شبیه‌سازی شد. عدد فرود جریان ۶/۴۸ است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

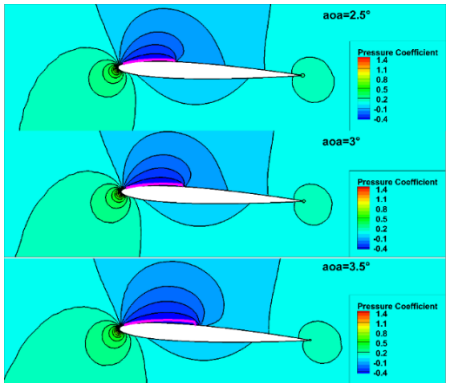
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

در شکل (۱۹) شکل موج تشکیل‌شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در سه زاویه حمله ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درجه با یکدیگر مقایسه شده‌است. بیشینه دامنه موج، در هر سه شبیه‌سازی حدود ۸٪ طول وتر هیدروفویل است و اختلاف بسیار ناچیزی در دامنه موج سه شبیه‌سازی پیش‌بینی شده‌است. با اینکه انتظار می‌رود در صورت افزایش زاویه حمله هیدروفویل، طول‌موج پیش‌بینی‌شده بلندتر شود، با بزرگ شدن حباب کاویتاسیون و مکش جریان، طول‌موج تغییراتی محسوسی نداشته است. با افزایش زاویه حمله هیدروفویل، نرخ اضمحلال جریان بیشتر شده و از قانون پایستگی انرژی، اتلافات بیشتر جریان منجر به افت هد[۱۷] و کاهش دامنه موج با شیب بیشتری شده‌است.



شکل ۱۹ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش زاویه حمله هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

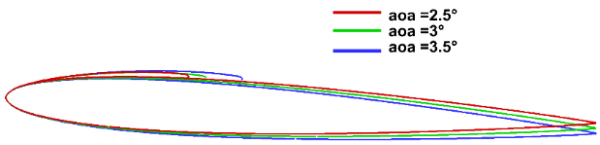
در شکل (۲۰) کانتور ضریب فشار حول هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زوایای حمله ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درجه آورده شده‌است. با افزایش زاویه حمله در نواحی خارج از لایه‌مرزی، سرعت جریان سطح بالای هیدروفویل بیشتر و فشار محلی کم‌تر خواهد شد. این کاهش فشار جریان را بیشتر مستعد تشکیل حباب کاویتاسیون خواهد کرد. با تشکیل حباب بزرگ‌تر ناحیه کم‌فشار سطح بالای هیدروفویل وسیع‌تر می‌شود. با افزایش زاویه حمله سرعت جریان نزدیک سطح زیرین کمتر شده و فشار جریان بیشتر خواهد شد.



[۱۷] Head loss

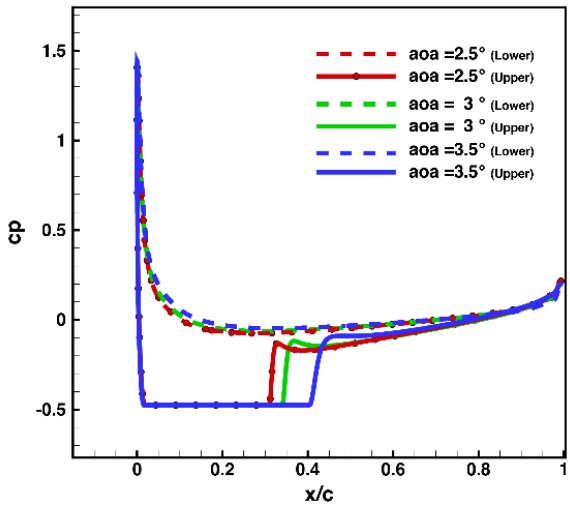
شکل ۲۰ - مقایسه کانتور ضریب فشار با افزایش زاویه حمله هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در شکل (۲۱) شکل حباب کاویتاسیون تشکیل‌شده در زوایای حمله ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درجه آورده شده است. با افزایش زاویه حمله و کم شدن فشار سطح بالایی هیدروفویل، حجم و طول حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر می‌شود [۶].



شکل ۲۱ - مقایسه شکل حباب تشکیل‌شده با افزایش زاویه حمله هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

در شکل (۲۲) ضریب فشار سطح هیدروفویل در زوایای حمله ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درجه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ناحیه تشکیل حباب، فشار سطح هیدروفویل ثابت و برابر با فشار بخار اشباع است. بعد از ناحیه تشکیل حباب فشار هر سه هیدروفویل تقریباً یکسان است. سطح زیرین هیدروفویل با افزایش زاویه حمله افزایش فشار بسیار اندکی را تجربه می‌کند که قابل به چشم‌پوشی است.



شکل ۲۲ - مقایسه ضریب فشار با افزایش زاویه حمله هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

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 کم‌فشار بالای سطح هیدروفویل با افزایش زاویه حمله باعث زیادشدن اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل و افزایش ضریب برآ

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

شده‌است. ضرایب آیرودینامیکی هر سه شبیه‌سازی در جدول (۵) آورده شده است.

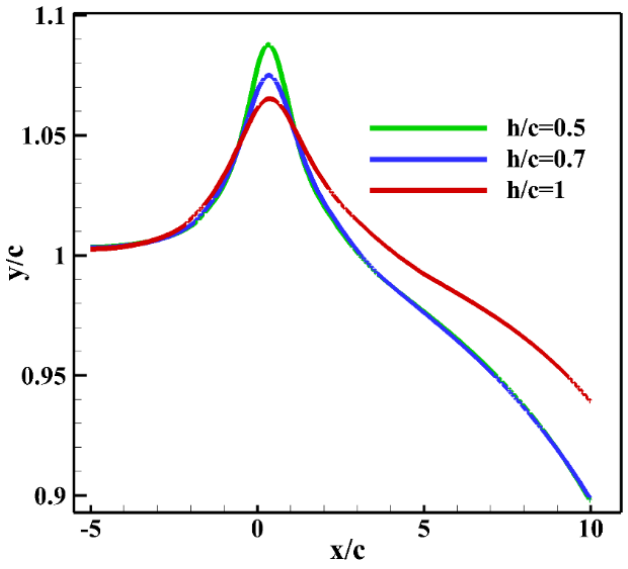
جدول ۵- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ با افزایش زاویه حمله در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر

زاویه حمله (deg)	ضریب پسای پوسته‌ای	ضریب پسای شکلی	ضریب پسای کل	ضریب برآ
۲/۵	۰/۰۰۵۰	۰/۰۱۵۸	۰/۰۲۰۸	۰/۱۹
۳	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۹۱	۰/۰۲۴۰	۰/۲۰
۳/۵	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۳۱	۰/۰۲۷۶	۰/۲۳

۷-۳- اثر عمق غرق‌شدگی

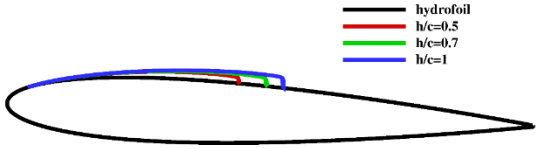
در این قسمت برای بررسی اثر افزایش عمق غرق‌شدگی بر شکل موج تشکیل‌شده در سطح آزاد، هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و عدد کاویتاسیون ۰/۵ در عمق غرق‌شدگی بی‌بعد شده بر حسب طول وتر ۰/۵، ۰/۷ و ۱ قرار گرفت و نتایج با یکدیگر مقایسه شد.

در شکل (۲۳) شکل موج تشکیل‌شده در سطح آزاد سه شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هر چه عمق غرق‌شدگی هیدروفویل بیشتر باشد، حضور هیدروفویل و تغییرات فشار ناشی از آن کمتر می‌تواند باعث افزایش طول‌موج شود. در عمق غرق‌شدگی بی‌بعد شده ۰/۵، ۰/۷ و ۱ بیشینه دامنه موج به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۰۷ و ۰/۰۶ طول وتر هیدروفویل است.



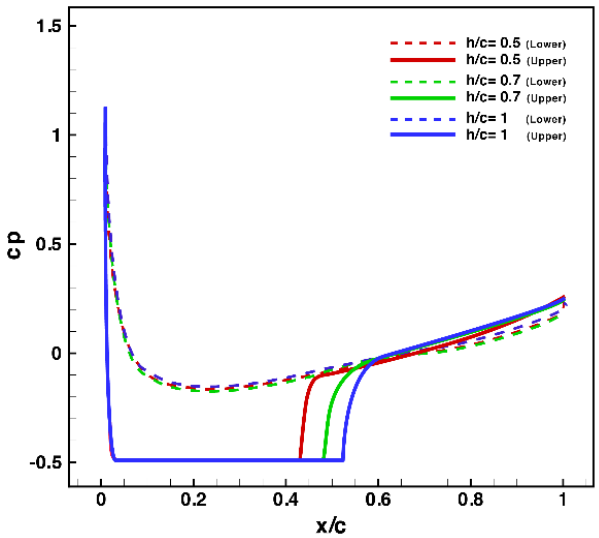
شکل ۲۳ - مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش عمق غرق‌شدگی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و زاویه حمله ۲/۵ درجه

در سال ۲۰۲۰ سان و همکاران [۱۰] دریافتند، با افزایش عمق غرق‌شدگی هیدروفویل ناکا ۶۶ طول و حجم بخارآب تشکیل‌شده در سطح بالای هیدروفویل بیشتر خواهد شد. شکل (۲۴) نمایی از حباب تشکیل‌شده روی سطح بالای هیدروفویل به ازای عمق بی‌بعد غرق‌شدگی ۰/۵، ۰/۷ و ۱ در شبیه‌سازی حاضر است.



شکل ۲۴ - مقایسه شکل حباب تشکیل‌شده با افزایش عمق غرق‌شدگی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و زاویه حمله ۲/۵درجه

در شکل (۲۵) ضریب فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در سه عمق بی‌بعد غرق‌شدگی ۰/۵، ۰/۷ و ۱ آورده شده است. با افزایش عمق غرق‌شدگی در سطح بالایی هیدروفویل، کاهش شیب تغییرات فشار استاتیکی باعث بیش‌تر شدن طول حباب شده است. با افزایش طول حباب ناحیه فشارثابت سطح بالای هیدروفویل بیشتر شده است. لازم به ذکر است که برای یکسان نگه‌داشتن عدد کاویتاسیون سرعت ورودی با افزایش عمق غرق‌شدگی بیشتر شد؛ که این افزایش سرعت خود دلیلی بر افزایش طول و حجم حباب کاویتاسیون است.



شکل ۲۵ - مقایسه ضریب فشار با افزایش عمق غرق‌شدگی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و زاویه حمله ۲/۵ درجه

سان و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۰ دریافتند با افزایش عمق غرق‌شدگی در جریان کاویتاسیونی، ضرایب برآ و پسا بیشتر می‌شود. در این پژوهش نیز با افزایش عمق غرق‌شدگی و بزرگ شدن حباب کاویتاسیون ناحیه کم‌فشار سطح بالایی هیدروفویل وسیع‌تر شده و اختلاف فشار سطح بالا و پایین هیدروفویل در راستای عمود بر جهت جریان بیشتر شده و ضریب برآ بیشتر می‌شود. با افزایش عمق غرق‌شدگی و بزرگ‌تر شدن حباب کاویتاسیون پسای پوسته‌ای کمتر و پسای شکلی بیشتر شده و ضریب پسای کل بزرگ‌تر شده‌است. لازم به ذکر است، بی‌بعد سازی ضرایب آیرودینامیکی با سرعت جریان ورودی انجام‌شده و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

سرعت جریان ورودی با افزایش ارتفاع غرق‌شدگی برای ثابت نگه‌داشتن عدد کاویتاسیون بیشتر شده است. در جدول (۶) نیروها و ضرایب آیرودینامیکی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ با افزایش عمق غرق‌شدگی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

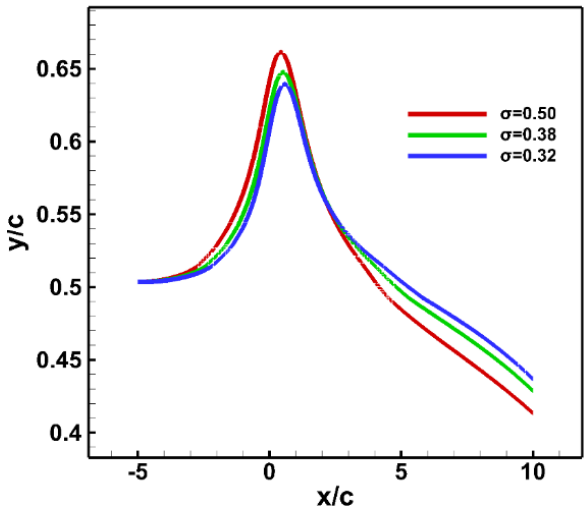
جدول ۶- مقایسه نیروهای آیرودینامیکی با افزایش عمق غرق‌شدگی هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ در عدد کاویتاسیون ۰/۵ و زاویه حمله ۲/۵ درجه

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

۸-۳- اثر عدد کاویتاسیون

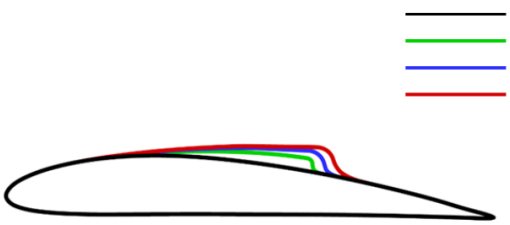
در این قسمت برای بررسی اثر افزایش عدد کاویتاسیون، هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و در عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر در اعداد کاویتاسیون ۰/۵، ۰/۳۸ و ۰/۳۲ شبیه‌سازی و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شد.

در شکل (۲۶) شکل موج تشکیل‌شده در سطح آزاد هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در صورت افزایش عدد کاویتاسیون آورده شده‌است. در جریان بدون کاویتاسیون با افزایش سرعت جریان دامنه موج بیشتر می‌شود. در این مسئله با افزایش سرعت و بزرگ شدن ناحیه‌ی حباب کاویتاسیون، مکندگی 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.



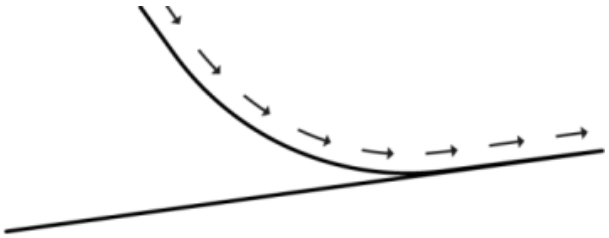
شکل ۲۶- مقایسه شکل موج سطح آزاد با افزایش عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر و زاویه حمله ۲/۵ درجه

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



شکل ۲۷ - مقایسه شکل حباب تشکیل‌شده با افزایش عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

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

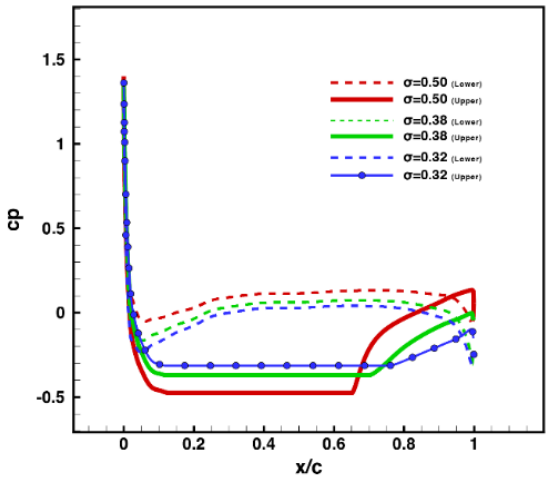


شکل ۲۸ - نحوه بسته شدن حباب کاویتاسیون سطح بالای هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲

در شکل (۲۹) نمایی از ضریب فشار روی سطح هیدروفویل در عدد کاویتاسیون ۰/۵، ۰/۳۸ و ۰/۳۲ آورده شده‌است. قسمت فشارثابت هر سه نمودار یکسان و برابر با (P_{sat}) است. چون سرعت مرجع در بی‌بعد سازی متفاوت است، ضریب فشار ناحیه فشارثابت 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 فشارثابت، در صورت افزایش عدد کاویتاسیون فشار سطح بالای هیدروفویل افزایش بیشتری دارد. در سطح پایین هیدروفویل نیز با افزایش عدد کاویتاسیون، فشار بیشتر شده‌است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]



شکل ۲۹ - مقایسه ضریب فشار با افزایش عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۴۴۱۲ در زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر 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 ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر هیدروفویل

عدد کاویتاسیون	پسای اصطکاکی (N)	پسای شکلی (N)	ضریب پسا	ضریب برآ
۰/۵	۸۸۲	۶۶۶۰	۰/۰۳۶	۰/۳۹
۰/۳۸	۱۰۳۸	۱۱۸۸۲	۰/۰۴۸	۰/۲۹
۰/۳۲	۱۲۰۸	۱۵۶۵۷	۰/۰۵۴	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.
- با افزایش انحنا هیدروفویل، دامنه موج تشکیل‌شده بلندتر، حجم حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر، ضرایب برآ و پسا بیشتر شد. با افزایش انحنا هندسه مغروق احتمال ردیابی سامانه به علت افزایش دامنه موج بیشتر است.
- با افزایش عمق غرق‌شدگی هیدروفویل، دامنه موج تشکیل‌شده کوتاه‌تر، حجم حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر، ضرایب برآ و پسا بیشتر شد. پس برای سامانه‌ای با مأموریتی در عمق غوطه‌وری بالا اعمال تمهیدات 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 تشکیل‌شده 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.

[۱۸] Fine

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]

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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.2]