

بررسی اثر افزایش ضخامت و انحنای هندسه زیردریایی بدون سرنشین در جریان فوق بحرانی و کاویتاسیونی کانال باز به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

علی اسماعیلی

استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد
aliesmaeili@um.ac.ir

غزل تقی نیا

دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد
ghazal.taghinia@mail.um.ac.ir

چکیده

با حرکت یک زیردریایی بدون سرنشین نزدیک سطح آب، موجی در سطح دریا ایجاد خواهد شد. با حرکت این وسیله نقلیه بدون خدمه در سرعت‌های بالا، کاهش فشار جریان باعث شکست پیوند بین مولکولی آب و تبخیر آن و ایجاد حباب کاویتاسیون می‌شود. در این پژوهش شکل زیردریایی با هیدروفویل‌های مختلف ناکا مدل‌سازی شد تا با حل مسئله به روش عددی، شکل موج سطح آزاد و حباب بخار آب حول هیدروفویل در کانال‌های باز با اعداد فرود فوق بحرانی شبیه‌سازی شود. با تغییر هندسه هیدروفویل، تغییرات دامنه موج، شکل حباب و ضرایب آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. با تشکیل حباب کاویتاسیون روی سطح هیدروفویل، دامنه موج سطح آزاد بلندتر، ضریب پسا بیشتر و ضریب برآ کمتر شد. با افزایش انحنای هیدروفویل حجم حباب کاویتاسیون تشکیل شده در سطح بالای هیدروفویل بیشتر و ضریب پسا بیشتر شد.

کلمات کلیدی: هیدروفویل؛ کاویتاسیون؛ سطح آزاد آب؛ کانال باز؛ جریان فوق بحرانی؛ زیردریایی بدون سرنشین؛ دینامیک سیالات محاسباتی

فهرست علائم

C	طول وتر هیدروفویل (m)	علائم یونانی
Fr	عدد فروید	α
\dot{m}	نرخ انتقال جرم	ε
P	فشار محلی (pa)	k
P_0	فشار اتمسفر (pa)	μ
P_v	فشار بخار اشباع (pa)	ρ
Re	عدد رینولدز	σ_v
U	سرعت هیدروفویل (m/s)	زیر نویس
		P, Q
		l
		v

۱- مقدمه

طراحی زیردریایی بدون سرنشین^۱، از پیچیده‌ترین و چالش برانگیزترین سامانه‌های مهندسی است. این زیردریایی‌ها بدون احتیاج به خدمه روی سطح آب و یا نزدیکی سطح دریا از راه دور کنترل و هدایت می‌شوند. این وسایل نقلیه خودمختار برای اهداف وسیعی از جمله اقیانوس‌شناسی، نظارت بر محیط‌زیست، حمل‌ونقل کالا و صنایع نظامی کاربرد دارند. با حرکت زیردریایی 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 [۱] مسئله جسم دلخواه غرق‌شده در عمق محدود را با نگاهی 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 [۲] با بررسی تجربی و تحلیلی فشار سطح هیدروفویل و شکل موج سطح آزاد در تونل آب دریافتند عدد فروید جریان نقش کلیدی در تعیین شکل موج جریان دارد. در اعداد فروید 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. 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 فروید بالا مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفت.

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 حباب بخار آب روی سطح هیدروفویل شود و منجر به پدیده کاویتاسیون گردد. وقوع کاویتاسیون با آثار منفی زیادی از جمله خوردگی و فرسایش سطوح، ایجاد سروصدا، کاهش بازده عملکردی، کاهش برآ و افزایش پسا همراه است [۳].

بال و همکاران [۴] با حل مسئله غیر لزج صفحه تخت غرق‌شده در عمق محدود، 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 و همکاران [۵] ضریب فشار سطح هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ را در عدد کاویتاسیون ۱ و عمق بی‌بعد غرق‌شدگی ۰.۵ بررسی کردند.

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 اثر تشکیل حباب کاویتاسیون بر شکل موج و ضرایب آیرودینامیکی بررسی شده و اثر انحنا هیدروفویل‌های ناکا بر شکل موج، شکل حباب و ضرایب آیرودینامیکی آورده شده‌است. با شناخت درست از اثر تغییر هندسه زیردریایی، زاویه حمله و سرعت جریان بر عملکرد جسم غوطه‌ور می‌توان طراحی مناسبی از سامانه مغروق با بازده مناسب ارائه کرد.

¹ Autonomous Underwater Vehicles

² Semenov

³ Hydraulic-jump

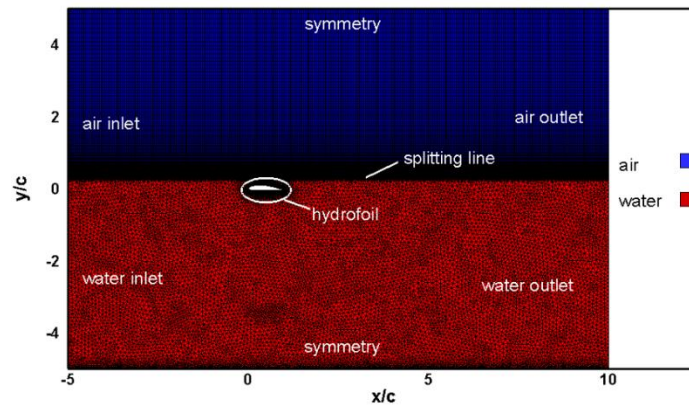
⁴ Breaking-wave

⁵ Blaine

۲- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

۲-۱- تعریف مسئله و شبکه‌بندی

برای بررسی اثر کاپیتاسیون و سطح آزاد بر ضرایب آیرودینامیکی وسیله نقلیه بدون سرنشین، محیط دریا و جریان هوای مجاور آن و هندسه زیردریایی به کمک نرم‌افزار دیزاین‌مدلر^۶ مدل‌سازی شد. در **Error! Reference source not found.** هندسه، ش رابط مرزی و شبکه‌بندی آورده شده‌است. دامنه حل به دو ناحیه تقسیم شد. نیمه بالا هوا و نیمه پایین آب است. با حل مسئله موجی در سطح دریا و حباب کاپیتاسیونی در ناحیه کم-فشار حول هیدروفویل تشکیل می‌شود.



شکل ۱: دامنه حل، شرایط مرزی و شبکه‌بندی

۲-۲- معادلات حاکم

در این مسئله سه فاز هوا، آب مایع و بخار آب 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 تشکیل حباب کاپیتاسیون فاز سوم این مسئله ایجاد می‌شود. این جریان چند فازی با مدل کسر حجمی سیال^۷ در نرم‌افزار فلوئنت حل شد. در مدل کسر حجمی مرز مشترک بین فازها با حل معادله پیوستگی کسر حجمی از رابطه (۱) مشخص می‌شود.

$$\frac{1}{\rho_q} [\nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q)] = \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (1)$$

میدان سرعت با حل معادله مومنتوم پایا از رابطه (۲) محاسبه شده و نتایج میدان سرعت میان فازها به اشتراک گذاشته می‌شود.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

مدل‌سازی کاپیتاسیون برای محاسبه نرخ انتقال جرم از فاز آب به فاز بخار آب با مدل اشتر-سوئر از رابطه (۳) انجام شده‌است.

$$\nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{u}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{D\alpha}{Dt} \quad (3)$$

در این رابطه ρ چگالی مخلوط سیال، تابعی از کسر حجمی و چگالی فازها در هر سلول، است.

⁶ Design modeler

⁷ Volume of fluids

برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ استفاده شده‌است. انرژی جنبشی k و انرژی تلفاتی بر واحد جرم ε در رابطه (۴) و (۵) آورده شده‌است.

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

در نهایت اعداد بی‌بعد رینولدز، فروید و کاویتاسیون که تعیین‌کننده رفتار و رژیم جریان آشفته و کاویتاسیونی در حضور سطح آزاد هستند؛ در روابط (۶)، (۷) و (۸) آورده شده‌است.

$$Re = \frac{\rho u c}{\mu} \quad (6)$$

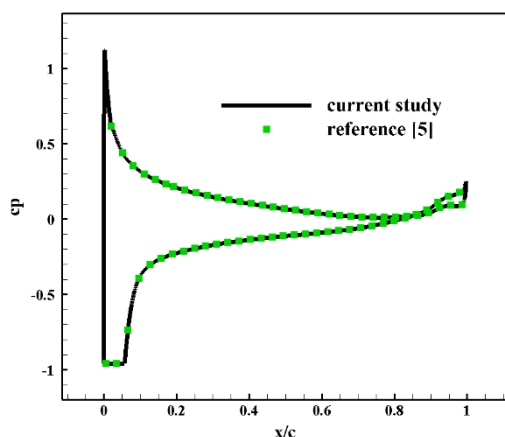
$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g c}} \quad (7)$$

$$\sigma_v = \frac{p_0 + \rho g h - p_v}{0.5 \rho u^2} \quad (8)$$

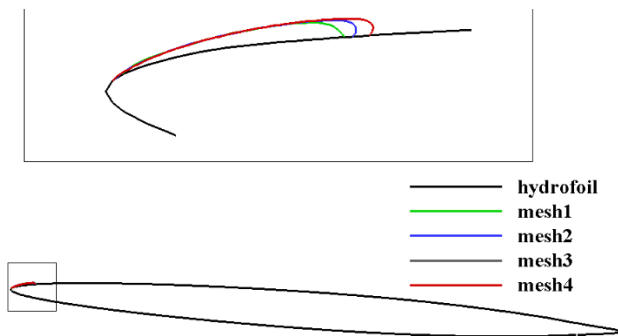
۳- نتایج و بحث روی نتایج

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 و عدد کاویتاسیون ۱، در جریانی با عدد فروید ۴.۵ و عدد رینولدز ۱۴ میلیون شبیه‌سازی شد. ۴ شبکه با تعداد سلول متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل ۲-الف) حباب کاویتاسیون سطح بالای هیدروفویل ۴ شبکه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شبکه ۳ و ۴ برهم منطبق‌اند. برای کاهش هزینه محاسباتی شبکه ۳ که تعداد سلول کمتری دارد؛ انتخاب شد. در شکل ۲-ب) مقایسه از ضریب فشار سطح هیدروفویل با مرجع [۵] آورده شده‌است.



(ب)

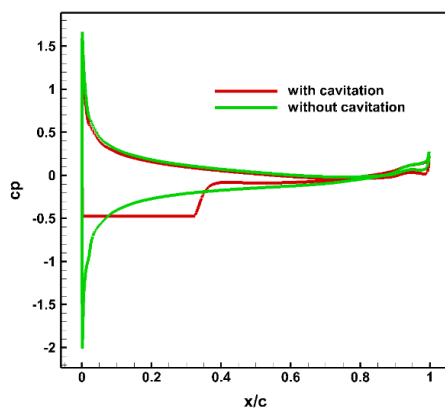


(الف)

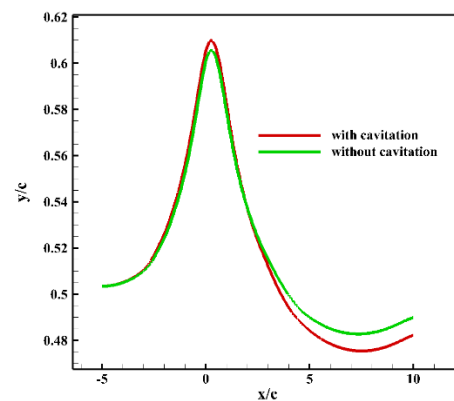
شکل ۲: الف) بررسی استقلال از شبکه و ب) اعتبار سنجی

۳-۲ اثر تشکیل حباب بر شکل موج

در حالت کلی کمتر شدن فشار سیال از فشار بخار آب تضمین‌کننده‌ی وقوع کاویتاسیون نیست و شروع این پدیده به شرایط اولیه سیال وابسته است [۳]. در این بخش نتایج شبیه‌سازی هیدروفویل ناکا ۱۶۰۰۶ در عمق غرق‌شدگی ۰/۵ متر و زاویه حمله ۴ درجه در دو حالت جریان کاویتاسیونی و در صورت صرف‌نظر کردن از اثر تشکیل کاویتاسیون در جریانی با عدد فروید ۶۰۴۸ مقایسه شده‌اند. در شکل ۳-الف) مقایسه‌ای از شکل موج تشکیل‌شده دو شبیه‌سازی است. بیشینه ضخامت حباب بخار در جریان کاویتاسیونی ۰/۲ طول وتر هیدروفویل است در حالی که افزایش ارتفاع موج در صورت تشکیل حباب به علت افزایش ناحیه کم‌فشار سطح و مکش زیاد، تنها ۰/۰۲ طول وتر هیدروفویل است. در شکل ۳-ب) ضریب فشار سطح دو شبیه‌سازی و در جدول ۱ ضرایب آیرودینامیکی دو شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند.



(ب)



(الف)

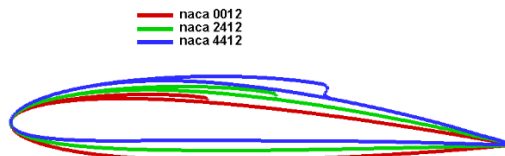
شکل ۳: مقایسه (الف) شکل موج (ب) ضریب فشار سطح هیدروفویل در جریان کاویتاسیونی و بدون کاویتاسیون

جدول ۱: مقایسه ضرایب آیرودینامیکی در صورت تشکیل کاویتاسیون و بدون آن در زاویه حمله ۴ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰.۵ متر در فروید ۶۰۴۸

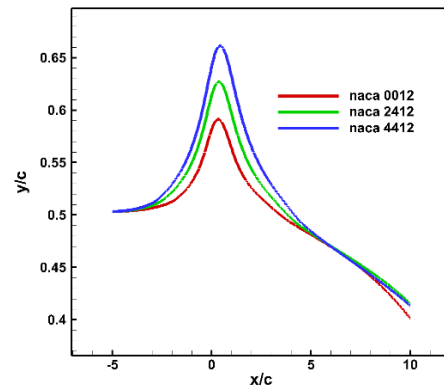
ضریب پسا	ضریب برآ	
۰.۲۱	۰.۲۹	جریان بدون کاویتاسیون
۰.۲۳	۰.۲۷	جریان کاویتاسیونی

۳-۳ اثر انحنا هندسه

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 در عدد فروید ۶۰۴۸ مقایسه شده‌اند. در شکل ۴-الف) شکل موج تشکیل‌شده در سطح آزاد آورده شده است. بیشینه ارتفاع موج تشکیل‌شده در سطح آزاد هیدروفویل‌های ناکا ۰۰۱۲، ناکا ۲۴۱۲ و ناکا ۴۴۱۲ به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۶ سانتی‌متر است. با افزایش انحنا، فشار سطح پایینی هیدروفویل بیشتر، فشار سطح بالایی هیدروفویل کمتر و حباب کاویتاسیون بزرگ‌تر می‌شود. شکل ۴-ب) شکل حباب سه شبیه‌سازی است. افزایش اندازه حباب سطح بالای هیدروفویل و افزایش فشار سطح زیرین منجر به افزایش دامنه موج شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴: مقایسه (الف) شکل موج (ب) شکل حباب با افزایش انحنا هیدروفویل‌های در عدد کایتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ متر

افزایش انحنا منجر به افزایش ناحیه کم‌فشار سطح بالایی، افزایش فشار سطح زیرین و بیشتر شدن ضریب برآ و پسا می‌شود. در جدول ۲ ضرایب آیرودینامیکی سه هیدروفویل آورده شده‌است.

جدول ۲: مقایسه ضرایب آیرودینامیکی با افزایش انحنا هیدروفویل در عدد کایتاسیون ۰/۵، زاویه حمله ۲/۵ درجه و عمق غرق‌شدگی ۰/۵ طول وتر در عدد فروید ۶/۴۸

ضریب پسا	ضریب برآ	هیدروفویل
۰/۰۲۶۴	۰/۱۶	ناکا ۰۰۱۲
۰/۰۲۶۹	۰/۲۸	ناکا ۲۴۱۲
۰/۰۳۶۶	۰/۳۹	ناکا ۴۴۱۲

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جریان سه-فازی به کمک مدل کسر حجمی سیال حل و اثر تشکیل حباب کایتاسیون، ضخامت و انحنای جسم مغروق بر شکل موج و ضرایب آیرودینامیکی بررسی شد. در جریان کایتاسیونی، برخاستگی موج سطح آزاد دریا بیشتر شده و نسبت به جریان بدون کایتاسیون، نیروی جلوبرندگی بیشتری برای ثابت نگه داشتن سرعت و عمق غوطه‌وری زیردریایی نیاز است. افزایش انحنا هندسه جسم مغروق منجر به بیشتر شدن دامنه موج تشکیل شده در سطح آزاد شد. در سامانه‌های نظامی برای کاهش احتمال شناسایی، هندسه‌ای با انحنای کمتر پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [۱] 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.
- [۲] B. R. Parkin, *Pressure Distribution on a Hydrofoil Running near the Water Surface*, Hydrodynamics Laboratory California Institute of Technology, 1955.
- [۳] J. P. Franc, *Fundamentals of Cavitation*, pp. 5, 2005.
- [۴] S. Bal and S. A. Kinnas, A Bem for the Prediction of Free Surface Effects on Cavitating Hydrofoils, 2002.
- [۵] P. C. Wu and J. H. Chen, Numerical Study on Cavitating Flow Due to a Hydrofoil near a Free Surface, *Ocean Engineering and Science*, 2016.